# SÜRDÜRÜLEBİLİR GELECEĞİN KİMYASI:

## GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE YENİ PERSPEKTİFLER

Editör:
**Prof. Dr. Hülya ÇELİK**



BİDGE Yayınları

**BİDGE Yayınları**

**Sürdürülebilir Geleceğin Kimyası: Güncel Yaklaşımlar ve Yeni Perspektifler**

**Editör:** Prof. Dr. Hülya ÇELİK

**ISBN:** 978-625-5474-87-2

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

# EDİTÖRÜN ÖN SÖZÜ

Bilimsel gelişmeler, insanlığın karşı karşıya bulunduğu çevresel, teknolojik ve ekonomik sorunlara çözüm arayışında önemli bir rol üstlenmektedir. Bu süreçte kimya bilimi, maddenin yapısını ve dönüşümünü anlamanın ötesine geçerek sürdürülebilir enerji, çevre dostu malzemeler, kaynakların verimli kullanımı ve yenilikçi analiz yöntemleriyle geleceğin şekillenmesine katkı sağlamaktadır. Sürdürülebilir Geleceğin Kimyası: Güncel Yaklaşımlar ve Yeni Perspektifler başlıklı bu eser, kimya biliminin farklı disiplinlerle kurduğu güçlü etkileşimi ve sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik bilimsel yaklaşımları bir araya getirmek amacıyla hazırlanmıştır. Kitapta, kritik metallerin kaynakları ve stratejik önemi, nanomalzemelerin sürdürülebilir enerji teknolojilerindeki uygulamaları, yeşil adsorbentlerin geliştirilmesi ve kullanım alanları ile yakın kızılötesi spektroskopik verilerin modern modelleme yöntemleriyle değerlendirilmesi ele alınmaktadır. Birbirinden farklı ancak bilimsel açıdan ilişkili bu konular, kimyanın hem temel araştırmalardaki hem de güncel teknolojik uygulamalardaki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Bu eserin temel amacı, güncel bilimsel bilgileri bir araya getirmenin yanı sıra araştırmacılara yeni bakış açıları kazandırmak ve disiplinler arası çalışmaların gelişimine katkı sunmaktır. Kitabın, özellikle kimya, malzeme bilimi, enerji, çevre ve analitik bilimler alanlarında çalışan akademisyenler, araştırmacılar ve lisansüstü öğrenciler için yararlı bir kaynak olmasını diliyorum. Eserin hazırlanmasına bilimsel birikimleri ve değerli çalışmalarıyla katkı sağlayan tüm bölüm yazarlarına teşekkür

ederim. Bu kitabın, sürdürülebilir bir geleceğe yönelik bilimsel düşüncenin gelişmesine ve yeni araştırmalara ilham vermesini temenni ederim.

Prof. Dr. Hülya Çelik

# İÇİNDEKİLER

KRİTİK METALLER VE POTANSİYEL KAYNAKLARI: BİRİNCİL CEVHERLERDEN DÖNGÜSEL KAYNAKLARA GÜNCEL BİR DEĞERLENDİRME ..... 1
*MEHMET HAKAN MORCALI*

SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİNDE NANOMALZEMELERİN ROLÜ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ ..... 17
*M.SALİH KESKİN KESKİN*

AÇIK NIR VERİ SETLERİNDE 1B-CNN, PLS VE SVR KALİBRASYONLARININ KARŞILAŞTIRILMASI ..... 49
*FATİH MEHMET AVCU*

YEŞİL ADSORBENTLERİN MODİFİKASYONU VE KULLANIMLARI ..... 75
*SUAT KAHYA*

YÜKSEK PERFORMANSLI SIVI KROMATOGRAFİSİ İLE PETROL BİLEŞENLERİNİN AYRILMASI VE KARAKTERİZASYONU ..... 100
*BESRA İNAN*

ELEKTRONİK ATIKLARDAN ELDE EDİLEN ÇOK METALLİ ÇÖZELTİLERDE SEÇİCİ AYIRMA, YÜKSEK SAFLIKTA METAL GERİ KAZANIMI VE KAPALI DÖNGÜ PROSESLER ..... 123
*ÖMER ÖDEMİŞ*

BİNA VE YAPILARDA RADON GAZI KONSANTRASYONUNUN ÖNEMİ ..... 146
*AHMET ÇARHAN, MERVE ŞAHİN*

POLİMERLERİN ÇÖZÜNME DAVRANIŞLARI: MOLEKÜLER MEKANİZMALAR VE

# İÇİNDEKİLER

POLİMER–ÇÖZÜCÜ ETKİLEŞİMLERİ ..... 194
*PELİN SEVİNÇ, ALİ KARA*

# BÖLÜM 1

# Kritik Metaller ve Potansiyel Kaynakları: Birincil Cevherlerden Döngüsel Kaynaklara Güncel Bir Değerlendirme

**MEHMET HAKAN MORCALI**[1]

## Giriş

Elektrifikasyon, yenilenebilir enerji, süper alaşımlar, veri merkezleri, süper bilgisayarlar ve savunma sanayi sistemleri gibi ileri teknoloji gerektiren süreçler metal talebinin miktarını ve bileşimini sürekli değiştirmektedir. Kritik mineral talebinin mevcut politikalar altında 2040'a kadar yaklaşık iki katına çıkması; lityum, nikel, grafit, bakır ve mıknatıs tipi nadir toprak elementlerinde (NTE) belirgin artışlar beklenmektedir. Bununla birlikte sorunun yalnızca jeolojik varlıklar olmadığı, aksine üretim ve rafinasyonun birkaç gelişmiş ülkede yoğunlaşması, bazı metallerin ana metal üretimine bağlı yan ürün olması ve geri dönüşüm altyapısının sınırlılığı arz riskini sürekli olarak büyütmektedir (Nassar & ark., 2015; IEA, 2026).

Bu kitap bölümünün amacı, güncel yayınlar ve politika belgeleri temelinde kritik metal kavramını açıklamak; birincil

[1]Prof. Dr. Gaziantep Üniversitesi, Naci Topçuoğlu Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-5021-4459

cevherleri, yan ürün süreçleri, endüstriyel atıklar ve kullanım ömrünü tamamlamış (bitmiş ürünler) ürünleri karşılaştırmak; teknik kazanım yolları ile yatırım kararı için gereken ölçütleri ortaya koymaktır. Temel yaklaşım, sorumlu birincil üretim ile döngüsel kaynakları birbirinin alternatifi değil, aynı arz güvenliği portföyünün tamamlayıcıları olarak ele almaktır.

**Kritik metal kavramı ve kaynak sınıflaması**

"Kritik metal" element veya metal ürününe, "kritik mineral" doğal mineral kaynağına, "kritik hammadde" ise cevherden rafine bileşiğe uzanan daha geniş bir tedarik kategorisine işaret etmektedir. Kritiklik ifadesi sabit bir elemente ait özellik değildir; ekonomik ve stratejik önem, üretim-rafinasyon süreci, ithalat bağımlılığı, yönetişim riski, yan ürün bağımlılığı, ikame, geri dönüşüm ve zaman yoğunluğuna göre değişmektedir. Bu nedenle kritik kavramına ait listeler yerkabuğunda en az bulunan elementlerin sıralaması olarak okunmamalıdır (Schicho & Tercero Espinoza, 2024).

Avrupa Birliği ekonomik önem ile arz riskini iki ana eksen olarak kullanmakta; 2024 düzenlemesi 34 kritik ve bunların içinde 17 stratejik hammadde tanımlamaktadır. ABD'nin 2025 listesinde 60 kritik mineral, Türkiye'nin 2025 raporunda ise 37 kritik maden bulunmaktadır (European Commission, 2023; European Union, 2024; USGS, 2025; ETKB, 2025; IICEC, 2025). Ülkelerin yayınladığı listeler politika önceliği yaratmaktadır fakat kritik metallere yapılacak yatırım kararı için metalin hangi fazda, hangi saflıktaki ürüne, hangi maliyet ve etkiyle dönüştürülebileceği ayrıca çalışılması gerekmektedir. Literatürdeki güncel çalışmalarda ve derlemelerde ülkeler tarafından oluşturulan listelerin değer zincirinin ara aşamalarını, yan ürünleri ve geri dönüşümü her zaman yeterince temsil etmediğini vurgulamaktadır (Deberdt & ark., 2025).

Ülkelerin oluşturduğu listeler incelendiğinde kaynaklar dört işlevsel grupta ele alınmıştır:

- Birincil kaynaklar: hedef metal için işletilen cevherler ve doğal tuzlu sular.
- Eş/yan ürün kaynakları: ana metal üretimine bağlı Ga, Ge, In, Re, Te, Se, Co ve bazı PGM/NTE akımları.
- İkincil kaynaklar: piller, mıknatıslar, katalizörler, elektronik atıklar ve üretim hurdaları.
- Alışılmadık/artık kaynaklar: maden atıkları, kömür külü, boksit artığı, cüruflar, fosfojips, asit maden drenajı ve endüstriyel tuzlu sular.

**Başlıca kritik metal grupları**

Lityum, nikel, kobalt, manganez ve doğal grafit bataryalarda; bakır ise şebeke, motor, kablo ve güç elektroniğinde temel girdi olarak bilinmektedir. Lityum ana kayaçlarda (örneğin; tinkal-$Na_2B_4O_7.10H_2O$, kolemanit-$2CaO.3B_2O_3.5H_2O$) yan ürün olmakla birlikte jeotermal veya petrol sahası tuzlu sularından da bulunmaktadır. Nikel-kobalt sülfürlü cevherlerde ve lateritlerde bulunmaktadır. Kobaltın önemli bölümü bakır ya da nikel üretiminin yan ürünü olarak elde edilmektedir. Batarya kimyasındaki değişim metallere olan talebi değiştirse de lityum, grafit, fosfor ve bakır gereksinimini ortadan kaldırmamaktadır (IEA, 2026; Ma & ark., 2025).

NTE'lerin başlıca jeolojik kaynakları karbonatitler, alkali magmatik kayaçlar, iyon adsorpsiyon killeri ve monazit-ksenotim plaserleridir. Nd-Pr mıknatıs miktarı, Dy-Tb ise yüksek sıcaklık performansı açısından öne çıkmaktadır. Benzer kimyasal davranış, komşu NTE'lerin yüksek saflıkta ayrılmasını güçleştirmektedir. Skandiyumun bağımsız yüksek tenörlü cevherleri sınırlı olduğundan üretimi çoğunlukla uranyum, nikel, titanyum veya boksit işleme akımlarına bağlıdır (Morcali, 2025; Zhao & ark., 2025).

Galyum, Germanyum ve İndiyum optoelektronik, güç elektroniği, güneş hücreleri ve ekranlarda; Re, Sb, W, Ta, Nb ve Ti yüksek performanslı alaşımlarda; platin grubu metaller (PGM) ise kataliz, elektroliz ve yakıt hücrelerinde önem taşır. Bu metallerin bir bölümü boksit/alümina, çinko, bakır ve molibden tesislerinin düşük derişimli ara akımlarından elde edilmektedir. Dolayısıyla uygun toplama ve saflaştırma devresi, jeolojik varlık kadar belirleyici olmaktadır (Huang & ark., 2024; Nassar & ark., 2015).

## Potansiyel kaynaklar: olanaklar ve sınırlamalar

### Birincil cevherler ve yan ürünler

Arzın ana gövdesi yakın gelecekte de birincil madencilikten sağlanacağı ön görülmektedir. Bununla birlikte cevher zenginleştirme, kimyasal dönüşüm, ayırma, metal/alaşım ve bileşen üretimi birincil madencilik süreçleri ile birlikte gelişmeye devam etmezse orta akımda darboğaz oluşabileceği öngörülmektedir. Mevcut alümina, çinko, bakır, molibden ve nikel-bakır tesislerinde Ga, In-Ge, Se-Te-PGM, Re ve Co kazanımı üretim sürecini çeşitlendirmektedir. Bunun için element dağılımının kütle dengesiyle izlenmesi, uygun ara akımın seçilmesi ve satılabilir saflıkta ürün devresinin kurulmasına ihtiyaç vardır (IEA, 2026; Nassar & ark., 2015).

### Maden ve endüstri artıkları

Eski maden atıkları, geçmişten kalan yüksek tenörlü veya yetersiz ayırma sistemleri nedeniyle bugün değerli bileşenler içerebilmektedir. Malzemenin çıkarılmış ve kısmen öğütülmüş olması avantaj; heterojenlik, düşük tenör ve eski saha alanı olması ise temel risk olarak görülmektedir. Bu tür sahalarda temsilî örnekleme, üç boyutlu stok modellemesi, tane-faz karakterizasyonu ve çevresel tehlike haritalaması yapılmadan ekonomik potansiyel ileri sürülmesi ciddi risk olarak karşımıza çıkmaktadır. Fiziksel ön

zenginleştirme, seçici liç, biyoliç ve hedef iyonu tanıyan ayırıcılar reaktif kullanarak eski maden atıklarının tekrardan değerlendirilmesine önemli olup bu yöntemler atık su yükünü de azaltabilecektir (Kursunoglu, 2025; Hajdu-Rahkama & Kinnunen, 2025).

Kömür ve kömür yanma ürünleri NTE, Ga ve Ge için geniş hacimli ancak genellikle düşük tenörlü kaynaklar olarak bilinmektedir. Yanma elementleri külde zenginleştirse de kazanılabilirlik cam, alüminosilikat, fosfat ve oksit fazlarına bağlıdır (Seredin & Dai, 2012; Thomas & ark., 2024). Literatürdeki bir çok çalışmada, kül mineralojisi ve ana element bileşiminin hem liç verimini hem de ikincil faz oluşumunu belirlediğini; kalsiyumca zengin küllerin çözünmeye elverişli olmakla birlikte çökelme ve jelleşme riski taşıdığını göstermektedir (Liu & ark., 2023; Gerardo & Song, 2025). Bu nedenle toplam NTE derişimin de rezerv beyanı değil, temsilî örnekleme, faz analizi ve kazanım testleri ciddi bir tarama göstergesidir. Matris farkı, reaktif tüketimi ve Th-U davranışı her kaynak için ayrı akım şeması gerektirmektedir (Arroyo & ark., 2014).

Boksit artığı; Sc, NTE, Ga, V ve Ti için büyük ve merkezî stoklar sunmaktadır. Buna karşılık yüksek Fe matrisi, alkalilik, silis jelleşmesi, düşük hedef metal derişimi ve eşlik eden tehlikeli elementler seçiciliği sınırlamaktadır. Sc kazanımında indirgeyici kavurma, asit pişirme-su liçi ve solvent ekstraksiyonu/iyon değişimi üzerine çeşitli araştırmalar devam etse de geniş ölçekli yerleşik bir ticari proses henüz oluşmamıştır. En güçlü model, Fe-Al-Ti ve Sc/NTE ürünlerini artık nötralizasyonuyla birlikte değerlendirmektir (Jammulamadaka & ark., 2025). Fırın cürufları, baca tozları, anot çamuru, fosfojips ve asit maden drenajı da akıma özgü kütle dengesi ve güvenli ön işlem koşuluyla potansiyel kaynaklar arasındadır.

**Tuzlu sular**

Kıtasal sular, jeotermal akışkanlar, petrol-gaz üretim suları ve tuzdan arındırma konsantreleri Li yanında Rb, Cs, Mg ve Mn içerebilmektedir. Adsorpsiyon, iyon değişimi, membran, çözücü ekstraksiyonu ve elektrokimyasal ayırma temelli doğrudan lityum çıkarımı daha kısa çevrim ve daha küçük alan vaat etmektedir. Ancak Mg/Li oranı, silis, hidrokarbon, ölçeklenme, adsorban ömrü, su dengesi ve yeniden enjeksiyon kalitesi gerçek süreç bakımından doğrulanmalıdır (Abedi & ark., 2026).

**Kentsel kaynaklar**

Elektronik atıklar Cu, Au, Ag, Pd ve Ta yanında mıknatıs, ekran ve bileşenlerde NTE barındırmaktadır. Küresel elektronik atık miktarı her geçen gün büyürken; belgelenmiş toplama ve geri dönüşüm oranı oluşan atık miktarına göre çok geride kalmaktadır (UNITAR & ITU, 2024). NTE geri dönüşümünde asıl engel toplam tenöründen ziyade ürün çeşitliliği, dağınık toplama ve seçici parçalama/söküm sürecidir (Binnemans & ark., 2013; Patil & ark., 2022; Vuppaladadiyam & ark., 2024). NdFeB mıknatıslarda hidrojenle gevrekleştirme ve kısa döngüde yeniden alaşımlama, temiz ve izlenebilir beslemede kimyasal ayırma gereksinimini azaltabilmektedir (Cherkezova-Zheleva & ark., 2024).

Atık lityum-iyon piller Li, Ni, Co, Mn, grafit, Cu ve Al için giderek büyüyen bir kaynaktır. Güvenli deşarj-söküm, mekanik ön işlem, pirometalurji, hidrometalurji ve doğrudan katot yenileme alternatifleri besleme kimyası ile hedef ürüne göre seçilmelidir. Kimyasal süreç değişimi, siyah kütle (black mass) standardı, atık su ve ürün kalitesi kritik basamaklar olarak karşımıza çıkmaktadır (Deng & ark., 2025; Ma & ark., 2025). Kullanılmış otomotiv katalizörleri ve süperalaşımlar PGM ve Re açısından yüksek değerli kaynaklardır fakat rafinasyon süreçleri karmaşık ve zordur (Xia & Ghahreman, 2023; Xv & ark., 2025).

*Tablo 1. Kritik metaller için başlıca kaynak gruplarının karşılaştırılması*

| **Kaynak grubu** | **Başlıca hedefler** | **Güçlü yön** | **Kritik sınırlama** | **Göreli olgunluk** |
|---|---|---|---|---|
| Birincil cevherler | Li, Ni, Co, Cu, NTE, grafit, Sb, W, PGM | Büyük ve uzun ömürlü arz tabanı | Uzun izin/yatırım süresi; çevresel-sosyal etkiler | Ticari |
| Ana metal proses yan ürünleri | Ga, Ge, In, Re, Se, Te, Co, PGM | Mevcut tesis ve merkezî ara akım | Ana metal üretimine bağımlılık; düşük derişim | Ticari-gelişen |
| Maden/zenginleştirme atıkları | NTE, Co, Ni, Cu, Sb, W, Sn, PGM | İşlenmiş malzeme; iyileştirme olanağı | Heterojenlik, düşük tenör, eski saha sorumluluğu | Pilot-seçili ticari |
| Kömür ve uçucu kül | NTE, Y, Sc, Ga, Ge | Büyük stok; ince tane | Matris bağı, asit tüketimi, Th/U ve değişkenlik | Ar-Ge/pilot |
| Boksit artığı | Sc, NTE, Ga, V, Ti | Büyük merkezî stok | Yüksek Fe/alkalilik; seçicilik ve artık yönetimi | Ar-Ge/pilot |
| Cüruf, toz, anot çamuru, fosfojips | V, Cr, Co, Zn, In, Ge, Re, Te, PGM, NTE | Proseste yoğunlaşmış veya çözünmüş akım | Tehlikeli eş bileşenler; akım özgüllüğü | Ticari-pilot |
| Tuzlu sular | Li, Rb, Cs, Mg, Mn | Madencilik/enerji/su üretimiyle bütünleşme | Mg/Li seçiciliği, adsorban ömrü, su ve reinjeksiyon | Ticari-pilot |
| E-atık ve NdFeB mıknatıs | Cu, Au, Ag, Pd, Ta, Nd, Pr, Dy, Tb | Bazı bileşenlerde yüksek tenör | Toplama, söküm, ürün çeşitliliği | Ticari-pilot |
| Atık Li-iyon pil | Li, Ni, Co, Mn, grafit, Cu, Al | Büyüyen ve izlenebilir kaynak | Güvenlik, kimya değişimi, atık su ve ürün kalitesi | Gelişen |

| Kaynak grubu | Başlıca hedefler | Güçlü yön | Kritik sınırlama | Göreli olgunluk |
|---|---|---|---|---|
| Kullanılmış katalizör/süperalaşım | Pt, Pd, Rh, Re, Co, Ni, Ta, Hf, W | Çok yüksek değer ve güçlü geri dönüşüm teşviki | Numune temsilciliği; karmaşık rafinaj | Ticari |

*Kaynak: Tablodaki veriler yayınlamış derlemelerden sentezlenmiştir (Kursunoglu, 2025; Vo & ark., 2026; Zhao & ark., 2025).*

## Kazanım teknolojileri ve proses seçimi

Kaynak türünden bağımsız olarak çalışılacak malzeme içerisindeki toplam metal içeriğinden ziyade metalin mineralojik/kimyasal türü, serbestleşmesi ve hedef ürün saflığına bağlı olacağıdır. Güncel literatür çalışmaları her bir atığın kendi özelinde yöntem ile kazanılması gerektiğini tek bir evrensel yöntem yerine beslemeye özgü hibrit akım şemalarını önermektedir (Vo & ark., 2026):

- Fiziksel ön işlemler kırma-öğütme, boyut, yoğunluk, manyetik, elektrostatik ve flotasyon ayırmasıyla kütle reddi sağlamaktadır.
- Pirometalurji kavurma, ergitme ve klorlamayla heterojen beslemeyi; enerji, gaz arıtımı ve cürufa metal kaybı yönetilmelidir.
- Hidrometalurji liç, solvent ekstraksiyonu, iyon değişimi, adsorpsiyon ve çöktürmeyle yüksek saflık sağlar; reaktif-su tüketimi ve birlikte çözünme sınırlayıcıdır.
- Biyo/solvometalurji, iyonik sıvılar, derin ötektik çözücüler ve seçici adsorbanlar düşük tenör ve seçicilik için umut vericidir; hız, toksisite, kayıp ve geri kullanım gerçek beslemede gösterilmelidir.

- Doğrudan veya kısa döngü geri dönüşüm katot ya da mıknatısın işlevsel yapısını koruyabilir; ancak temiz, ayrı toplanmış ve kimyası bilinen besleme gereklidir.

"Yeşil çözücü" etiketi tek başına yeterli değildir. Çözücünün üretimi, geri kazanımı, ömrü, su ve enerji tüketimi yaşam döngüsü sınırında incelenmelidir. Amaç en yüksek tek-aşama liç yüzdesi değil; ön zenginleştirme, seçici kazanım, reaktif geri devri, satılabilir ürün ve kararlı artığı birlikte sağlayan akım şemasıdır.

**Potansiyel kaynağı değerlendirme çerçevesi**

Bir laboratuvar çalışması sonrası üretilen ürünün yatırım yapılabilir kaynağa dönüşmesi için dört karar kapısı birlikte geçilmelidir:

1. Kaynak ve değişkenlik: stok hacmi veya debi, tenör, tane boyu, nem, faz türleşmesi, zamansal-mekânsal değişkenlik ve örnekleme güveni belirlemektedir.
2. Teknik seçicilik: toplam kazanım yanında kütle reddi, reaktif tüketimi, birlikte çözünen elementler, ayırma faktörü, ürün saflığı ve artık (geri kalan) kararlılığı gerçek beslemede ölçülmelidir.
3. Entegre proses: geri devirler, su-ısı entegrasyonu, çözücü/adsorban ömrü, korozyon, katı-sıvı ayırma, emisyon ve iş güvenliği pilot ölçekte doğrulanmalıdır.
4. Değer ve sürdürülebilirlik: sermaye-işletme maliyeti, yan ürün kredisi, lojistik, bertaraf yükünden kaçınma, karbon-su ayak izi, toksisite/radyoloji, sosyal lisans ve mevzuat birlikte değerlendirilmelidir.

Karşılaştırmada yalnız "% geri kazanım" verilmemelidir. Besleme başına ürün kütlesi, saflık, kg ürün başına enerji-su-reaktif, çözücü geri kazanımı, tehlikeli artık, emisyon, maliyet, teknoloji

hazırlık düzeyi ve kritik ekipman/reaktif riski birlikte raporlanmalıdır.

**Türkiye için öncelikler**

Türkiye'nin 2025 yaklaşımı enerji dönüşümü girdileri ile ülkenin kaynak ve sanayi yetkinliklerini birlikte ele almaktadır (ETKB, 2025; IICEC, 2025). Öncelik yalnız maden üretimi değil, cevher veya atıktan saf bileşik, metal, alaşım ve bileşene uzanan orta-akım kapasitesi olmalıdır:

- Ulusal artık envanteri: maden ve endüstri artıklarının hacim, kimya, faz, risk ve mülkiyet bilgisiyle sayısal atlas içinde sınıflandırılmalıdır.
- Kömür külü demonstrasyonu: Türkiye'deki farklı kül sahaları katmanlı örneklenmeli; NTE-Ga-Ge, Th-U, ön zenginleştirme ve seçici liç birlikte değerlendirilmelidir.
- Yan ürün metalurjisi: mevcut metal tesislerinde Ga-Ge-In-Re-Te-Se-Bi-Sb-Co-PGM kütle dengeleri çıkarılmalıdır.
- Kentsel madencilik: batarya, NdFeB mıknatıs, elektronik atık ve katalizörlerde toplama ve güvenli söküm rafinajla eşleştirilmelidir.
- Ortak pilot merkez: gerçek beslemelerde deney, ürün standardı, tekno-ekonomik analiz (TEA), yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve artık güvenliği birlikte yürütülmelidir.

Türkiye'nin coğrafi konumu, metal-makine sanayisi, bor ve endüstriyel mineraller deneyimi, gelişen batarya/otomotiv ekosistemi ve büyük artık akımları bölgesel işleme ve geri dönüşüm merkezi olma olanağı sunmaktadır. Katma değer için odak, hammadde ihracından yüksek saflıklı ara ürün, alaşım, mıknatıs,

katot-aktif malzeme ve geri dönüştürülmüş içeriğe doğru evrilmelidir.

## Sonuç

Literatürdeki yüksek kazanım değerlerine karşın çalışmaların çoğu küçük ölçekli veya sentetik beslemelidir. Çalışmalar toplam analizden faz/tane türleşmesine; tek metal oranından ürün saflığına ve çözücü ömrüne geçmeli, TEA ile LCA'yı deney tasarımına katmalıdır. Kritik metal sorunu kaynak, proses, rafinaj, ürün tasarımı, toplama ve politika arasında bir sistem sorunudur. Türkiye için dayanıklı portföy; temsili kaynak verisini seçici proses, satılabilir ürün, güvenli artık, pilot doğrulama ve orta-akım saflaştırma kapasitesiyle birleştirmesi gerektiği düşünülmektedir.

**Kaynakça/References**


Abedi, M., Chang, A., Hassan, H. I., Yang, A., Hickethier, M. L., Bushagour, A. H., Aghajari, M., Stoerzinger, K. A., Layton, A., Abbasi, B., Chang, C.-H. & Feng, Z. (2026). Recovering critical metals from brines: Technology landscape, circular economy, and future trends. *ACS Applied Energy Materials, 9*(4), 2005-2034. https://doi.org/10.1021/acsaem.5c03407

Arroyo, F., Font, O., Chimenos, J. M., Fernández-Pereira, C., Querol, X. & Coca, P. (2014). IGCC fly ash valorisation: Optimisation of Ge and Ga recovery for an industrial application. *Fuel Processing Technology, 124*, 222-227. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.004

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A. & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production, 51*, 1-22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037

Cherkezova-Zheleva, Z., Burada, M., Sobetkii (Slobozeanu), A. E., Paneva, D., Fironda, S. A. & Piticescu, R.-R. (2024). Green and sustainable rare earth element recycling and reuse from end-of-life permanent magnets. *Metals, 14*(6), 658. https://doi.org/10.3390/met14060658

Deberdt, R., Smith, N. M., Calderon, J. L. & McCall, S. K. (2025). Critical minerals lists for low-carbon transitions: Reviewing their structure, objectives, and limitations. *Energy Research & Social Science, 127*, 104252. https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104252

Deng, H., Wang, B., Xu, J., Yang, G., Shi, Z., Zhu, H., He, W. & Li, G. (2025). A comprehensive review of whole process typical hydrometallurgical technologies for recycling waste lithium-ion batteries. *Separation and Purification Technology, 363*, 132234. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132234

ETKB. (2025). *Türkiye Kritik ve Stratejik Madenler Raporu*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/TKDB/tr/Belgeler/T%C3%BCrkiye_Kritik_ve_Stratejik_Madenler_Raporu.pdf

European Commission. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023: Final report*. Publications Office of the European Union. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1

European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

Gerardo, S., & Song, W. (2025). Rare earths recovery from calcium-rich coal fly ash: Secondary phase formation and mitigation approaches. *Environmental Science & Technology, 59*(43), 23592-23601. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c08817

Hajdu-Rahkama, R. & Kinnunen, P. (2025). Tailings valorisation: Opportunities to secure rare earth supply and make mining environmentally more sustainable. *Journal of Cleaner Production, 520*, 146147. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146147

Huang, Y., Wang, M., Liu, B., Su, S., Sun, H., Yang, S. & Han, G. (2024). The extraction and separation of scarce critical metals: A review of gallium, indium and germanium extraction and separation from solid wastes. *Separations, 11*(4), 91. https://doi.org/10.3390/separations11040091

IEA. (2026). *Global Critical Minerals Outlook 2026*. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2026

IICEC. (2025). *Türkiye Kritik Enerji Mineralleri Görünümü 2025*. Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi. https://iicec.sabanciuniv.edu/sites/iicec.sabanciuniv.edu/files/inline-files/IICEC-TCEMO-2025_0.pdf

Jammulamadaka, H. S., Rezaee, M. & Pisupati, S. V. (2025). Unlocking scandium from red mud: A critical review of challenges, opportunities, and recovery methods. *Hydrometallurgy, 236*, 106522. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2025.106522

Kursunoglu, S. (2025). A review on the recovery of critical metals from mine and mineral processing tailings: Recent advances. *Journal of Sustainable Metallurgy, 11*(3), 2023-2050. https://doi.org/10.1007/s40831-025-01126-y

Liu, P., Zhao, S., Xie, N., Yang, L., Wang, Q., Wen, Y., Chen, H., & Tang, Y. (2023). Green approach for rare earth element (REE) recovery from coal fly ash. *Environmental Science & Technology, 57*(13), 5414-5423. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09273

Ma, X., Meng, Z., Bellonia, M. V., Spangenberger, J., Harper, G., Gratz, E., Olivetti, E., Arsenault, R. & Wang, Y. (2025). The evolution of lithium-ion battery recycling. *Nature Reviews Clean Technology, 1*, 75-94. https://doi.org/10.1038/s44359-024-00010-4

Morcali, M. H. (2025). Nadir toprak elementlerinin elde ediliş yöntemleri ve sürdürülebilir enerji teknolojilerindeki kullanımları. In M. H. Morcali (Ed.), *Fen bilimlerinde disiplinlerarası yaklaşımlar ve sürdürülebilir enerji teknolojilerindeki güncel eğilimler*. Vizetek Yayıncılık. https://doi.org/10.54637/vizetek.9786253821739

Nassar, N. T., Graedel, T. E. & Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances, 1*(3), e1400180. https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180

Patil, A. B., Paetzel, V., Struis, R. P. W. J. & Ludwig, C. (2022). Separation and recycling potential of rare earth elements from energy systems: Feed and economic viability review. *Separations, 9*(3), 56. https://doi.org/10.3390/separations9030056

Schicho, M. & Tercero Espinoza, L. (2024). Criticality assessment for raw materials: Perspectives and focuses. *Mineral Economics, 39*(1), 93-110. https://doi.org/10.1007/s13563-024-00474-7

Seredin, V. V. & Dai, S. (2012). Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology, 94*, 67-93. https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.001

Thomas, B. S., Dimitriadis, P., Kundu, C., Vuppaladadiyam, S. S. V., Raman, R. K. S. & Bhattacharya, S. (2024). Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 12*(3), 112769. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112769

UNITAR & ITU. (2024). *The Global E-waste Monitor 2024*. United Nations Institute for Training and Research & International Telecommunication Union. https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/

USGS. (2025). *2025 List of Critical Minerals*. U.S. Geological Survey. https://www.usgs.gov/programs/mineral-resources-program/science/about-2025-list-critical-minerals

Vo, P. H. N., Vo, T. P., Nguyen Huy, L., Chaiwong, C., Ajorloo, M., Evans, T. J., Clark, S. M. & Strezov, V. (2026). Secondary resources and advanced separation technologies for critical metal recovery: Progress and challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 14*(2), 121445. https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121445

Vuppaladadiyam, S. S. V., Thomas, B. S., Kundu, C., Vuppaladadiyam, A. K., Duan, H. & Bhattacharya, S. (2024). Can e-waste recycling provide a solution to the scarcity of rare earth metals? An overview of e-waste recycling methods. *Science of the Total Environment, 924*, 171453. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171453

Xia, J., & Ghahreman, A. (2023). Platinum group metals recycling from spent automotive catalysts: Metallurgical extraction and recovery technologies. *Separation and Purification Technology, 311*, 123357. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123357

Xv, B., Li, Z., Zha, G., Liu, D., Yang, B. & Jiang, W. (2025). Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: Review of conventional techniques and vacuum metallurgy. *Resources, Conservation and Recycling, 215*, 108103. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108103

Zhao, T.-Y., Li, W.-L., Kelebek, S., Choi, Y., Wu, C.-Q., Zhang, W.-J., Wang, C.-Y., Zhao, Z.-W. & Sadri, F. (2025). A comprehensive review on rare earth elements: Resources, technologies, applications, and prospects. *Rare Metals, 44*(10), 7011-7040. https://doi.org/10.1007/s12598-025-03459-9

# BÖLÜM 2

# SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİNDE NANOMALZEMELERİN ROLÜ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

**MEHMET SALİH KESKİN**[11]

## GİRİŞ

İnsanoğlunun yaşaması için her zaman suya, gıdaya ve enerjiye ihtiyacı vardır. Artan hızlı nüfus ve ekonomik büyüme, küresel enerji arzı her geçen gün ek talepler getirecektir. Uluslararası Enerji Ajansına göre, dünyanın enerji talebinin 2009'daki yaklaşık 12 milyar ton petrol eşdeğerinden (toe) iken, mevcut politika senaryolarına göre 2035 yılına kadar yaklaşık 17-18milyar toe yükseleceğini beklenmektedir. International Energy Agency (IEA, 2011). Karbondioksit emisyonlarının ise mevcut ve yeni politikalara göre yılda 29 gigatondan 36-43 gigatona çıkması öngörülmektedir. Yukarıdaki veriler, yetersiz fosil yakıt kaynakları ve artan tüketimden kaynaklanan enerji arzı ve çevresel bozulmanın insanlık ve bütün canlılar için iki büyük küresel sorun haline geldiğini iyi bilinmektedir (Chu & Majumdar, 2012),

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Siirt Üniversitesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, ORCID: 0000-0001-9862-1590

Kısacası, güneş enerjisi, mekanik enerji ve termal enerji gibi bol miktarda bulunan "yeşil" enerji kaynaklarından tam olarak yararlanmak için yeni teknolojiler geliştirmek, uzun vadeli enerji ihtiyaçlarımızı karşılamanın ve sürdürülebilir çevresel kalkınmayı sağlamanın etkili bir yoludur (Ahmadizadeh, et al., 2024). İnsan yaşamının, gelecekte bol ve sürdürülebilir enerji üretme, küresel zorluğunun üstesinden gelmek için gerekli olan çeşitli enerji uygulamalarıyla yakından ilişkili olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Çeşitli enerji uygulamaları arasında enerji üretimi, dönüşümü, depolanması, tasarrufu ve iletimi uygulamaları yer almaktadır. Son zamanlarda rüzgar, güneş, gelgit, biyokütle, ve jeotermal enerjiler gibi çeşitli yenilenebilir enerji türleri olmasına rağmen, bunlar doğaları gereği doğal şartlara bağlı olarak üretimi sürekli değil ve elektrik şebekesine entegre edildiklerinde büyük dalgalanmalar oluşturabilirler. Bu nedenle, çeşitli enerji kaynaklarından tam olarak yararlanmak için gelişmiş enerji depolama cihazlarına ihtiyacımız var. Fosil yakıt ekonomisinden yenilenebilir teknolojilere dayalı bir ekonomiye geçmeden önce, enerji depolama yeteneğimizi önemli ölçüde iyileştirmemiz gereklidir (Jansirani et al., 2026). Bu bağlamda küresel enerji talebinin sürdürülebilir bir şekilde karşılanabilmesi için yakıt hücreleri, elektrolizörler, foto elektrolizörler, metal-hava pilleri, metal-iyon pilleri ve süper kapasitörler gibi elektrokimyasal enerji dönüşüm ve depolama teknolojileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Genellikle "temiz enerji teknolojileri" olarak adlandırılan bu sistemler, fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji altyapılarına rekabetçi bir alternatif oluşturabilmek için daha yüksek verimlilik, daha uzun kullanım ömrü ve daha düşük maliyet gibi performans kriterlerinde önemli gelişmelere ihtiyaç duymaktadır. Elektrokimyasal enerji dönüşümü ve depolama süreçleri, elektrot ve elektrolit ara yüzeylerinde gerçekleşen çok sayıda kimyasal reaksiyon ile fiziksel etkileşimi içermektedir. Bu süreçlerin etkinliği; elektronlar, delikler, iyonlar ve moleküller gibi yük taşıyıcılarının

taşınım özelliklerine bağlı olup, kullanılan elektrot malzemelerinin bileşimi, yüzey özellikleri ve yapısal tasarımı tarafından doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle, elektrokimyasal sistemlerin performansını artırmaya yönelik araştırmalar büyük ölçüde elektrot malzemelerinin geliştirilmesi ve elektrot mimarisinin optimize edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Söz konusu araştırma alanları, enerji teknolojilerinin geleceğini şekillendirme potansiyelleri nedeniyle hem akademik çevrelerde hem de endüstriyel uygulamalarda yoğun ilgi görmektedir (Lei, et al., 2021).

**Nanomalzemeler**

Nanomalzemeler, küçük boyutları nedeniyle yığın malzemelerden önemli ölçüde farklı yapı ve özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemeler nano ölçek aralığında, genellikle 1 ila 100 nanometre arasında boyutlara sahiptir ve benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler sergiler.

Yüksek yüzey alanları, dikkate değer biyo uyumlulukları, optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle çeşitli alanlarda; çevre, tarım, gıda, biyoteknoloji, biyomedikal, tıp, enerji, ilaç vb. gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Nanomalzemeler, enerji üretimi, depolanması ve iletimi süreçlerinde performansın artırılmasına yönelik sundukları üstün özellikler nedeniyle son yıllarda yoğun araştırma konusu hâline gelmiştir. Nanoteknoloji alanındaki ilerlemeler, özellikle güneş enerjisi uygulamaları ve enerji depolama sistemlerinde kullanılan batarya teknolojileriyle bütünleşerek enerji sektöründe önemli dönüşümlerin gerçekleşmesine katkı sağlamaktadır. Yüksek özgül yüzey alanı, ayarlanabilir elektronik özellikler ve gelişmiş reaksiyon kinetikleri gibi avantajlar sunan nano malzemeler, daha verimli ve ekonomik enerji teknolojilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin

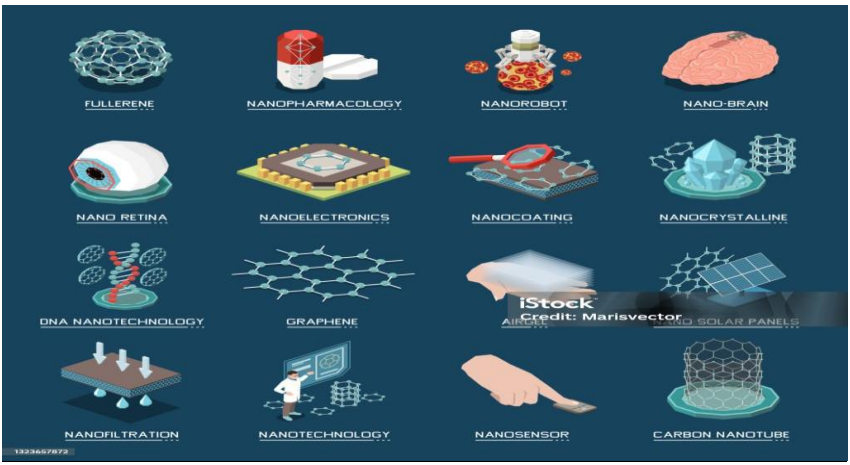
azaltılması açısından nano malzemeler sürdürülebilir enerji sistemlerinin temel bileşenleri arasında değerlendirilmektedir (Altammar, 2023).

**Ana Nanomalzeme Türü:**

- **Nanopartiküller:** Bunlar, en az bir boyutu 100 nanometreden daha küçük olan son yüzyılda bilimin bir başarısı olarak ortaya çıkmış parçacıklardır.
- **Nanoteknoloji:** Nanobilim, kimya, fizik, biyoloji, biyokimya, malzeme bilimi ve mühendislik gibi birçok bilim dalını bir araya getiren disiplinler arası bir araştırma alanıdır. Nanobilimde elde edilen temel bilgi ve ilkelerin pratik uygulamalara dönüştürülmesi ise nanoteknoloji olarak tanımlanmaktadır**.** Bu nedenle nanoteknoloji, farklı disiplinlerin bilgi ve yöntemlerini bir araya getiren yakınsak (konverjan) bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir.

Nanoteknolojinin en önemli özelliklerinden biri, farklı bilim alanlarını ortak bir platformda buluşturmasıdır. Örneğin, DNA tabanlı biyosensörler ve DNA silikon çipleri; yarı iletken teknolojisi, malzeme bilimi, moleküler biyoloji ve tıp alanlarının birleşimiyle geliştirilen önemli nanoteknolojik uygulamalar arasında yer almaktadır. Bu tür sistemler, özellikle hastalıkların erken tanısı, genetik analizler ve kişiselleştirilmiş tıp uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Kulkarni, 2015).

***Şekil 1****. Farklı disiplinlerdeki nano malzemelerin örnekleri*




*Kaynak: iStock by Getty Images (t.y.).*

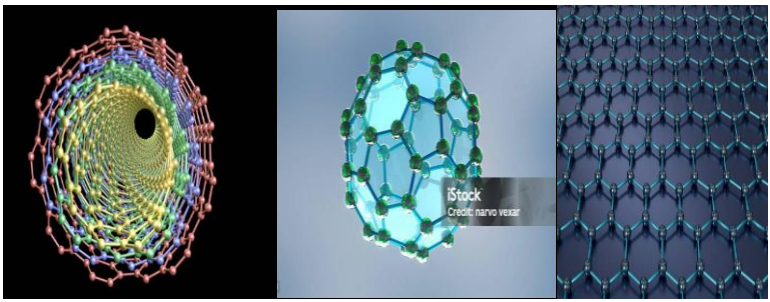
**Nanolifler:** Bunlar, nano ölçek aralığında çaplara sahip uzun, ince liflerdir.

Nanolif veya nanofiber, ortalama lif çapları nanometreler (nanometre $=10^{-9}$ metre) mertebesinde olan yaklaşık olarak bir insan saçı telinin binde biri kadar ince liflerdir.

- **Nanotüpler:** Nanotüpler, nano ölçekli çapları, yüksek özgül yüzey alanları, gelişmiş mikro gözenekli yapıları, üstün adsorpsiyon kapasiteleri ve çevre dostu özellikleri sayesinde nano malzemeler arasında önemli bir yere sahiptir. Karbon esaslı nanotüpler; tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler), çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler), fullerenler ($C_{60}$ ve $C_{540}$), grafen, grafen oksit ve aktif karbon nanopartikülleri gibi farklı nano yapıları kapsamaktadır. Özellikle tek veya çok katmanlı grafen tabakalarının silindirik bir yapı oluşturmasıyla meydana gelen karbon

nanotüpler, sahip oldukları yüksek mekanik dayanım, kimyasal kararlılık ve elektriksel iletkenlik sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bunun yanı sıra, karbon nanotüpler, grafen ve grafen oksit ile aktif karbon gibi nanoporlu karbon bazlı malzemeler; ağır metaller, florür iyonları, tekstil boyaları ve farmasötik kalıntılar gibi kirleticilerin giderilmesinde yüksek adsorpsiyon performansı sergileyerek su arıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rao et al.,2021).

***Şekil 2.*** *Farklı nano tüpler ve nano karbonlara ait görseller*




*Kaynak: iStock by Getty Images (t.y.).*

- **Nanolaminatlar:**

Bunlar, kompozit bir malzeme oluşturmak için birbiri üzerine istiflenmiş farklı malzemelerden oluşan ince katmanlardır

## Güneş enerjisi Sistemlerinde Nano Malzemelerin Rolü

Güneş enerjisi, sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak küresel enerji dönüşümünde önemli bir konuma

sahiptir. Bununla birlikte, geleneksel fotovoltaik sistemlerin enerji dönüşüm verimlilikleri belirli sınırlar içerisinde kalmaktadır. Nanoteknoloji alanındaki gelişmeler, güneş hücrelerinin optik ve elektronik özelliklerinin iyileştirilmesine olanak sağlayarak enerji dönüşüm performansının artırılmasında önemli fırsatlar sunmaktadır. Nano boyutlu malzemeler, ışık hasadını artırma, yük taşıyıcılarının taşınımını iyileştirme ve enerji kayıplarını azaltma gibi avantajları sayesinde güneş enerjisi teknolojilerinin gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır.

- **Nanokristaller ve Nano Yapılar:**

Nanokristal tabanlı malzemeler, boyuta bağlı optik özellikleri sayesinde güneş spektrumunun daha geniş bir bölümünden yararlanabilme potansiyeline sahiptir. Bu durum, foton soğurma kapasitesinin artmasına ve dolayısıyla enerji dönüşüm verimliliğinin yükselmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, nano yapılı yüzeylerin kullanılmasıyla güneş hücrelerinin etkin yüzey alanı artırılabilmekte ve ışığın hücre içerisinde daha uzun süre tutulması sağlanabilmektedir. Böylece ışık emiliminde iyileşme elde edilerek fotovoltaik performans artırılmaktadır.

- **İnce Film ve Nano katman Teknolojileri**:

Nano ölçekli malzemeler, güneş hücrelerinde kullanılan aktif katmanların kalınlığının azaltılmasına olanak tanımaktadır. İnce film teknolojileri sayesinde daha az hammadde kullanılarak yüksek ışık soğurma kapasitesi elde edilebilmekte, üretim maliyetleri düşürülebilmekte ve kaynak kullanımının azaltılmasıyla çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanabilmektedir. Ayrıca, ince nano katmanlar yük taşıyıcılarının daha etkin bir şekilde ayrılmasına ve taşınmasına yardımcı olarak cihaz performansını iyileştirmektedir.

- **Esnek ve Hafif Foto voltaik Sistemler:**

Nano teknolojik yöntemlerle geliştirilen yeni nesil fotovoltaik malzemeler, hafif, ince ve mekanik olarak esnek güneş panellerinin üretimini mümkün kılmaktadır. Bu özellikler, güneş enerjisi sistemlerinin yalnızca geleneksel uygulamalarla sınırlı kalmayıp bina cepheleri, taşıt yüzeyleri ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi farklı alanlara entegre edilmesini sağlamaktadır. Böylece güneş enerjisinin kullanım alanları genişlemekte ve enerji üretiminin daha yaygın hâle gelmesine katkıda bulunulmaktadır.

Kısacası, nanomalzemeler güneş enerjisi teknolojilerinde ışık emiliminin artırılması, enerji dönüşüm verimliliğinin yükseltilmesi, maliyetlerin azaltılması ve yeni uygulama alanlarının geliştirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle nanoteknoloji, geleceğin yüksek performanslı ve sürdürülebilir fotovoltaik sistemlerinin geliştirilmesinde temel araştırma alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir (Conibeer*,* et al*.,* , 2010). Enerji dönüşüm teknolojilerinin etkinliği açısından enerji depolama sistemleri kritik bir öneme sahiptir. Özellikle güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili ve değişken üretim karakteristiği, yüksek enerji yoğunluğuna sahip, hızlı şarj edilebilen ve güvenli depolama teknolojilerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu nedenle enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir enerji altyapılarının oluşturulmasında temel araştırma alanlarından biri olarak kabul edilmektedir.

Bataryalar, üretilen enerjinin depolanması ve ihtiyaç duyulduğunda verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak enerji sistemlerinin genel performansını doğrudan etkilemektedir. Son yıllarda nanoteknoloji, batarya teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmıştır. Nano ölçekli malzemelerin kullanımı sayesinde elektrotların özgül yüzey alanı artırılabilmekte,

iyon ve elektron taşını mı hızlandırılabilmekte ve elektrokimyasal reaksiyonların etkinliği iyileştirilebilmektedir. Bu gelişmeler, bataryaların enerji depolama kapasitesinin artırılmasına, şarj ve deşarj sürelerinin kısaltılmasına ve çevrim ömürlerinin uzatılmasına katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla nanomalzemeler, yüksek performanslı ve uzun ömürlü yeni nesil enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir (Yılmaz, 2025).

***Şekil 3.*** *Esnek ve hafif fotovoltaik sistemlere ait örnekler*



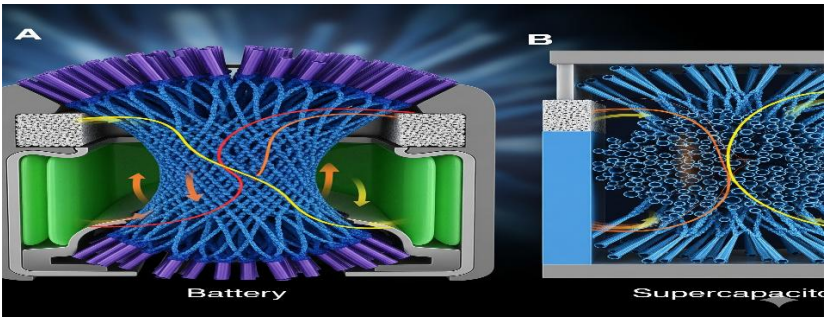
*VistaCreate. (t.y.).* Solar panel system.

## Yeni Nesil Enerji Depolama Bataryaları

Elektrik enerjisi sektörü, enerji üretiminden nihai tüketime kadar uzanan süreçlerin tamamında önemli bir yapısal değişim geçirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sistemlerindeki payının giderek artması, elektrik şebekelerinin işletilmesini ve yönetimini daha karmaşık bir hâle getirirken, özellikle sanayi kuruluşlarında enerji arzının sürekliliği, güç kalitesi ve enerji maliyetlerinin etkin biçimde yönetilmesi önem kazanmaktadır. Bu kapsamda, enerji sistemlerinin esnekliğini ve güvenilirliğini artıran enerji depolama çözümleri öne çıkmakta;

özellikle gelişmiş batarya teknolojileri, geleceğin enerji altyapısının temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

*Şekil 4. Gelecek için Nanotüplerin enerji depolanma bataryaları*




*Kaynak: Sektörüm Dergisi (2026).*

Sürdürülebilir bir gelecek için yenilenebilir enerjinin etkin kullanımının yanı sıra güvenli ve verimli enerji depolama teknolojilerine de ihtiyaç vardır. Bu bağlamda bataryalar; elektrikli ulaşım, taşınabilir elektronik cihazlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu gibi birçok alanda kritik rol oynamaktadır. Özellikle nanomalzemelerin batarya bileşenlerinde kullanılması, enerji ve güç yoğunluğu, hızlı şarj/deşarj ve çevrim ömrü gibi performans özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Geleceğin batarya teknolojilerinin ise yüksek performansın yanı sıra düşük çevresel etki, güvenlik, maliyet ve geri dönüşüm olanaklarını birlikte sağlayacak şekilde geliştirilmesi beklenmektedir.

***Tablo1.*** *Nano Enerji Depolamada bazı Batarya Çeşitleri*

| **Depolama Türü** | **NanoMalzeme Katkısı** | **Avantajı** |
|---|---|---|
| Lityum-İyon Bataryalar | Silikon Nano Teller, Grafen Katkılı Elektrotlar | Daha Hızlı Şarj (10 kat) ve Daha Yüksek Enerji Yoğunluğu |

| | | |
|---|---|---|
| Süperkapasitörler | Karbon Nanotüpler (CNT), Yüksek Yüzey Alanlı Grafen | Anlık Güç Çıkışı (Yüksek Güç Yoğunluğu) ve Uzun Ömür |
| Katı Hal Bataryaları | Nano-seramik veya Nano-polimer Elektrolitler | Artan Güvenlik (yanmazlık) ve Yüksek Termal Kararlılık |

*Kaynak: Liu et al. (2018)'den yararlanılarak hazırlanmıştır.*

Örnek: Grafen bazlı süper kapasitörler, yüksek elektriksel iletkenlikleri ve geniş özgül yüzey alanları sayesinde geleneksel elektrokimyasal bataryalara kıyasla çok daha hızlı şarj ve deşarj özellikleri sergilemektedir. Bu sistemler, enerjiyi saniyeler mertebesinde depolayıp serbest bırakabilmeleri nedeniyle özellikle elektrikli araç uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. Hızlı enerji transferi kapasitesi, ani güç gereksinimlerinin karşılanmasında ve rejeneratif frenleme sırasında açığa çıkan enerjinin etkin bir şekilde geri kazanılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu sayede araçların enerji kullanım verimliliği artırılmakta, güç performansı iyileştirilmekte ve elektrikli ulaşım sistemlerinin genel etkinliği desteklenmektedir (Liu, et al, 2018). Sonuç olarak, nano malzeme destekli enerji dönüşüm sistemleri, enerji teknolojilerinde yalnızca performans artışı sağlayan yenilikler olmanın ötesinde, enerji üretimi, depolanması ve kullanımına yönelik yaklaşımların yeniden şekillenmesine katkı sunan stratejik gelişmeler olarak değerlendirilmektedir. Nano ölçekte tasarlanmış malzemeler; yüksek enerji dönüşüm verimliliği, düşük enerji kayıpları ve gelişmiş sistem performansı gibi avantajları sayesinde daha temiz, güvenilir ve sürdürülebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu kapsamda nano teknoloji, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını destekleyerek küresel

enerji ve çevre sorunlarına yönelik çözüm arayışlarında önemli bir araştırma ve uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde bilim insanları ve mühendisler, nano malzemelerin sunduğu özgün fiziksel ve kimyasal özelliklerden yararlanarak enerji verimliliğini artırmaya, kaynak kullanımını optimize etmeye ve uzun vadede sürdürülebilir enerji sistemlerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalarını yoğun bir şekilde sürdürmektedir (Yılmaz, 2025).

## Elektrokimyasal Enerji Dönüşüm Mekanizması

Elektrokimyasal enerji dönüşümü, temel olarak su ve karbon döngülerine dayanan süreçleri kapsamakta olup, sürdürülebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Bu sistemler içerisinde su-enerji döngüsü özel bir öneme sahiptir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması ile dönüştürülmesine yönelik birçok teknolojinin temelini oluşturmaktadır. Suyun elektrokimyasal olarak ayrıştırılması ve yakıt hücreleri aracılığıyla yeniden enerjiye dönüştürülmesi, bu döngünün en önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu süreçlerde elektrik enerjisi kimyasal enerjiye, kimyasal enerji ise tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek kapalı çevrimli bir enerji sistemi oluşturulmaktadır.

Elektrokimyasal su ayrıştırma süreci, katot ve anot elektrotlarında gerçekleşen iki temel yarı reaksiyondan oluşmaktadır. Katotta gerçekleşen hidrojen gelişim reaksiyonu (Hydrogen Evolution Reaction, HER) sonucunda hidrojen gazı üretilirken, anotta gerçekleşen oksijen gelişim reaksiyonu (Oxygen Evolution Reaction, OER) ile oksijen gazı açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonlar sayesinde elde edilen hidrojen, yüksek enerji yoğunluğuna sahip temiz bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir. Üretilen hidrojen daha sonra yakıt hücrelerinde kullanılabilmekte ve burada enerji dönüşümünün ters yönlü aşaması gerçekleşmektedir. Yakıt hücrelerinde anotta hidrojen

oksidasyon reaksiyonu (Hydrogen Oxidation Reaction, HOR), katotta ise oksijen indirgeme reaksiyonu (Oxygen Reduction Reaction, ORR) meydana gelmektedir. Bu elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda hidrojenin kimyasal enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve yüksek verimli, düşük emisyonlu enerji üretimi sağlanmaktadır. Bu nedenle HER, OER, HOR ve ORR reaksiyonlarının kinetiklerinin iyileştirilmesi ve bu süreçlerde görev alan elektro katalizörlerin geliştirilmesi, elektrokimyasal enerji dönüşüm teknolojilerinin ilerlemesinde temel araştırma alanları arasında yer almaktadır (Jin et al.,2018),( Lu, et al ., 2021).

## Yüzey Aktif Bölgeleri

Yüzey aktif bölgeleri, katalizör yüzeyinde yer alan ve çevredeki reaktan moleküllerini adsorplayarak onların kimyasal dönüşümünü kolaylaştıran katalitik merkezler olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgeler genellikle koordinasyon sayısı düşük, yani tam doymamış yüzey atomlarından oluşmakta ve yüksek yüzey enerjileri nedeniyle reaktanlarla etkileşime girme eğilimi göstermektedir. Katalitik reaksiyonların büyük bir kısmı bu aktif merkezlerde gerçekleştiğinden, bir katalizörün performansı doğrudan yüzey aktif bölgelerinin sayısı, dağılımı ve kimyasal özellikleri ile ilişkilidir. Katı katalizörler, farklı kristal yapılar, yüzey düzlemleri ve atomik düzenlemeler sergileyebilmektedir. Özellikle kenarlar, köşeler, boşluklar ve kristal kusurları gibi yapısal özellikler, farklı türlerde aktif bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle aynı kimyasal bileşime sahip katalizörler bile yüzey morfolojilerindeki farklılıklar nedeniyle önemli ölçüde farklı katalitik davranışlar gösterebilmektedir (Huang, et al., 2019). Yüzey aktif bölgelerinin katalitik etkinliğini artırmak için genel olarak iki temel yaklaşım uygulanmaktadır. Bunlardan ilki, aktif bölge sayısının artırılmasıdır. Nano boyutlu yapıların oluşturulması

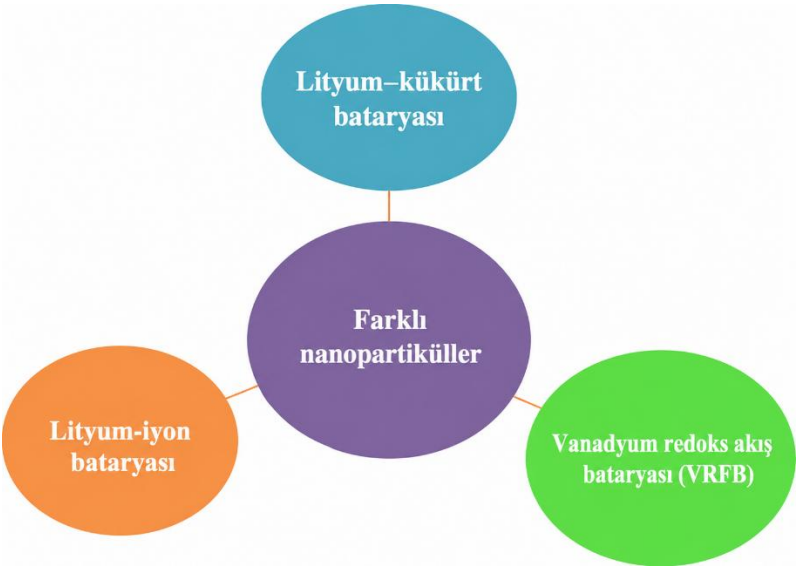
ve parçacık boyutunun küçültülmesi, özgül yüzey alanını artırarak daha fazla aktif merkezin açığa çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca genişleyen yüzey alanı, reaktanların adsorpsiyonunu kolaylaştırmakta ve yük taşıyıcılarının katı–katı ile katı–sıvı ara yüzeyleri boyunca daha etkin taşınmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak parçacık boyutunun aşırı küçültülmesi, yüzey ve ara yüzey etkilerinin baskın hâle gelmesine yol açarak yük transfer süreçlerini ve dolayısıyla katalitik performansı olumsuz yönde etkileyebilmektedir.İkinci yaklaşım ise mevcut aktif bölgelerin intrinsik aktivitelerinin geliştirilmesidir. Bu amaçla yüzey elektronik yapısının düzenlenmesi, kusur mühendisliği, heteroatom katkılama, alaşımlama ve yüzey modifikasyonu gibi çeşitli stratejiler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, aktif merkezlerin reaktanlara olan bağlanma enerjilerini optimize ederek reaksiyon ara ürünlerinin adsorpsiyon ve desorpsiyon davranışlarını iyileştirmekte, böylece reaksiyon kinetiğini hızlandırmaktadır. Sonuç olarak, aktif bölge yoğunluğunun artırılması ve aktif bölgelerin kimyasal özelliklerinin optimize edilmesi, yüksek performanslı katalizörlerin tasarımında temel araştırma yaklaşımları olarak öne çıkmaktadır (Xu,et al., 2019).

### Pil Teknolojilerinde Nanoparçacıklar

Nano parçacıklar, enerji depolama sistemlerinde sundukları üstün fiziksel ve elektrokimyasal özellikler sayesinde modern pil teknolojilerinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Nano ölçekli malzemelerin yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, iyon ve elektron taşımını hızlandırarak elektrokimyasal reaksiyonların daha etkin gerçekleşmesine olanak tanımaktadır. Bu özellikler, pillerin şarj ve deşarj hızlarının artırılmasına, enerji depolama kapasitelerinin yükseltilmesine ve genel performanslarının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca nanoparçacıkların elektrot yapısına entegre edilmesi, enerji yoğunluğunu artırırken pil

ömrünün uzatılmasına ve daha kompakt enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine olanak vermektedir (Mueller,et al., 2015), (Mahmud, 2023).

*Şekil 5. Farklı nanoparçacıklar*




Kaynak: (Mahmud, 2023).

Lityum-iyon pil teknolojilerinde nanoparçacıkların kullanımı, elektrot malzemelerinin elektrokimyasal özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir. Özellikle nano boyutlu lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) katot malzemeleri, yüksek termal kararlılıkları, düşük toksisiteleri ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Benzer şekilde, anot malzemesi olarak kullanılan silikon nanoparçacıkları, teorik olarak yüksek lityum depolama kapasitesine sahip olmaları sayesinde enerji yoğunluğunun artırılmasına ve kapasite kaybının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Nanoteknolojinin sağladığı avantajlar yalnızca lityum-iyon pillerle sınırlı değildir. Lityum-kükürt pillerde nano boyutlu kükürt yapıları, elektrot stabilitesini artırarak çevrim ömrünü uzatmakta ve enerji yoğunluğunu iyileştirmektedir.

Vanadyum redoks akış pillerinde kullanılan vanadyum oksit nano parçacıkları ise elektrokimyasal reaksiyon kinetiğini hızlandırarak enerji verimliliğinin ve çevrim kararlılığının artırılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca nanoyapılı nikel-kobalt-manganez oksit (NMC) elektrot malzemeleri, iyon difüzyon yollarını kısaltarak daha hızlı şarj ve deşarj süreçlerinin gerçekleştirilmesine olanak vermektedir(Su, et al., 2012), (Özcan &ark.,2021)

arkNano parçacıkların boyut, morfoloji ve yüzey özelliklerinin kontrollü olarak tasarlanabilmesi, yeni nesil enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu nano ölçekli malzemeler sayesinde daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip, daha güvenli, daha uzun ömürlü ve daha verimli pillerin geliştirilmesi mümkün hale gelmektedir. Dolayısıyla nano parçacık tabanlı elektrot malzemeleri, elektrikli araçlardan taşınabilir elektronik cihazlara ve şebeke ölçekli enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanında geleceğin enerji teknolojilerinin temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Di Lupo, et al., 2014).

## Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$) Nanoparçacıkları

Lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) nanoparçacıkları, sahip oldukları üstün elektrokimyasal ve termal özellikler nedeniyle lityum-iyon pillerde yaygın olarak kullanılan katot malzemeleri arasında yer almaktadır. Geleneksel lityum kobalt oksit tabanlı katotlarla karşılaştırıldığında, $LiFePO_4$ daha yüksek termal kararlılık, daha düşük çevresel etki ve daha uzun çevrim ömrü sunmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılığını koruyabilmesi, pil sistemlerinde güvenlik açısından kritik öneme sahip olan termal kaçak (thermal runaway) riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (Di Lupo, et al.,2014). Nano boyutlu $LiFePO_4$ parçacıkları, iyon difüzyon yollarını kısaltarak ve elektrot-elektrolit temas alanını artırarak elektrokimyasal performansın

iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu özellikler sayesinde $LiFePO_4$ nano parçacıkları, elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve şebeke ölçekli enerji depolama sistemleri gibi yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

- **Silikon Nanoparçacık Tabanlı Piller**

Silikon, yüksek teorik lityum depolama kapasitesi nedeniyle lityum-iyon pil anotları için en umut verici malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, şarj ve deşarj süreçleri sırasında meydana gelen büyük hacim değişimleri, elektrot yapısında çatlak oluşumuna ve kapasite kayıplarına neden olabilmektedir. Bu sorunun giderilmesi amacıyla son yıllarda nano boyutlu silikon parçacıklarının kullanımı üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Silikonun nano ölçeğe indirgenmesi, hacim değişimlerinden kaynaklanan mekanik gerilmelerin azaltılmasına yardımcı olmakta ve elektrot bütünlüğünün korunmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, çevrim kararlılığı ve kapasite tutma performansı önemli ölçüde iyileşmektedir. Silikon nano parçacıklarının kullanımı, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip ve uzun ömürlü lityum-iyon pillerin geliştirilmesine olanak sağlayarak yeni nesil enerji depolama teknolojilerine önemli katkılar sunmaktadır (Chen, et al., 2014).

- **Kükürt Nanoparçacık Tabanlı Piller**

Lityum-kükürt pilleri, yüksek teorik enerji yoğunluğu ve kükürdün yüksek özgül kapasitesi nedeniyle enerji depolama alanında büyük ilgi görmektedir. Bununla birlikte, şarj-deşarj döngüleri sırasında kükürtün önemli hacim değişimlerine uğraması ve çözünür polisülfit türlerinin oluşması, pil performansının zamanla azalmasına neden olan temel sorunlar arasında yer almaktadır. Bu problemlerin giderilmesi amacıyla nano boyutlu kükürt yapılarının kullanımı etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Kükürt nano

parçacıkları, elektrot yapısının daha kararlı hale gelmesini sağlayarak hacim değişimlerinin olumsuz etkilerini azaltmakta ve aktif malzemenin daha etkin kullanılmasına olanak vermektedir. Bunun sonucunda çevrim ömrü uzamakta, kapasite korunumu iyileşmekte ve genel pil performansı artmaktadır. Bu avantajlar, lityum-kükürt pillerinin yüksek enerji yoğunluğuna sahip sürdürülebilir enerji depolama sistemleri olarak gelecekte daha geniş kullanım alanı bulmasına katkı sağlamaktadır (Mallick & Gayen 2023)

- **Vanadyum Oksit Nanoparçacık Tabanlı Akış Pilleri**

Vanadyum redoks akış pilleri (Vanadium Redox Flow Batteries, VRFBs), farklı yükseltgenme basamaklarındaki vanadyum iyonlarının redoks reaksiyonlarından yararlanarak enerji depolayan ve gerektiğinde enerji sağlayan gelişmiş elektrokimyasal enerji depolama sistemleridir (Wen, et al., 2013). Ölçeklenebilir yapıları, yüksek güvenilirlikleri ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle özellikle şebeke ölçekli enerji depolama uygulamalarında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, vanadyum oksit nano parçacıklarının VRFB sistemlerine entegre edilmesinin pil performansını önemli ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir. Nano boyutlu vanadyum oksit yapıları, elektrot yüzey alanını artırarak redoks reaksiyonlarının gerçekleşebileceği aktif bölgelerin sayısını çoğaltmakta ve elektrokimyasal kinetiği hızlandırmaktadır. (Casimir , et al., 2016), (Zhou, et al., 2022). Bunun sonucunda enerji verimliliği, depolama kapasitesi ve çevrim kararlılığı artmaktadır. Bu gelişmeler, vanadyum redoks akış pillerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre enerji depolama sistemlerinde daha etkin kullanılmasına olanak sağlayarak sürdürülebilir enerji altyapılarının geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

- **Nano Yapılı Nikel–Kobalt–Manganez Oksit (NMC) Piller**

Nikel-kobalt-manganez oksit (NMC) katot malzemeleri, yüksek enerji yoğunluğu ile uzun çevrim ömrü arasında dengeli bir performans sunmaları nedeniyle günümüz lityum-iyon pil teknolojilerinin en önemli bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Nano yapılandırılmış NMC malzemelerinin geliştirilmesi, katot performansının iyileştirilmesinde önemli ilerlemeler sağlamıştır (Yang, et al., 2023). Parçacık boyutu, morfolojisi ve yüzey özelliklerinin kontrollü şekilde tasarlanması, iyon difüzyon mesafelerini kısaltmakta ve elektrot içindeki yük transfer süreçlerini hızlandırmaktadır. Bu sayede daha yüksek şarj ve deşarj hızlarına ulaşılabilmekte, aynı zamanda uzun süreli kullanımda kapasite kayıpları azaltılmaktadır. Nano yapılı NMC katotlar, elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik sistemler ve büyük ölçekli enerji depolama uygulamalarında ihtiyaç duyulan yüksek performanslı pil teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Jiang , et al., 2019).

## Nadir Toprak Oksit Katkılı Nano Malzemeler ve Enerji Depolama Uygulamaları

Nadir toprak elementleri (Rare Earth Elements, REEs), benzersiz elektronik, manyetik ve optik özellikleri nedeniyle ileri teknoloji uygulamalarında stratejik öneme sahip malzemeler arasında yer almaktadır. Bu elementlerden elde edilen nadir toprak oksitleri, özellikle elektronik, enerji, kataliz ve savunma sanayii gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Akıllı telefonlardan yarı iletken teknolojilerine, katalitik sistemlerden enerji dönüşüm cihazlarına kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan bu malzemeler, yüksek teknolojili ürünlerin geliştirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir (Hossain, et al., 2022). Son yıllardaki araştırmalar, nadir toprak oksit katkılı nano malzemelerin

performans özelliklerinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu malzemeler; korozyon koruması, termal bariyer kaplamalar, hidrofobik yüzeyler, katalitik uygulamalar ve çevresel iyileştirme teknolojileri gibi birçok alanda başarılı sonuçlar göstermektedir. Ayrıca enerji depolama sistemlerinde elektrot malzemelerinin elektronik iletkenliğini, yapısal kararlılığını ve elektrokimyasal aktivitesini artırma potansiyeline sahip olmaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, yüksek üretim maliyetleri, saflaştırma süreçlerinin karmaşıklığı ve kaynakların sınırlı olması gibi faktörler, bu malzemelerin yaygın kullanımının önündeki temel engeller arasında yer almaktadır (Hossain,et al., 2022). malzemelerin gelecekte yüksek performanslı enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

**Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilirlik**

Nanoteknoloji, enerji sistemlerinin performansını iyileştirmenin yanı sıra çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi ve kaynak kullanımının daha verimli hâle getirilmesi açısından da önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Nano ölçekli malzemelerin yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir elektronik yapıları ve üstün fonksiyonel özellikleri, enerji dönüşüm ve depolama teknolojilerinde verimliliğin artırılmasına olanak sağlarken aynı zamanda daha düşük malzeme tüketimi ve daha etkin kaynak kullanımı gibi çevresel avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, nanomalzemelerin sürdürülebilir enerji teknolojilerindeki kullanımının çevresel etkilerinin yaşam döngüsü perspektifinde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Enerji depolama sistemlerinde kullanılan nanoparçacıklar, özellikle lityum, kobalt ve çeşitli nadir elementlere dayalı malzemelerden üretilebilmektedir. Bu malzemelerin sentez süreçleri yüksek enerji tüketimi gerektirebilmekte ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarının artmasına neden olabilmektedir. Ayrıca söz konusu hammaddelerin

çıkarılması, işlenmesi ve rafine edilmesi süreçleri; doğal habitatların bozulması, ekosistemlerin zarar görmesi ve çevresel kirlilik gibi olumsuz etkileri beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle enerji depolama teknolojilerinin sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesinde yalnızca kullanım performansı değil, hammadde temininden üretim aşamasına kadar tüm süreçlerin çevresel etkileri dikkate alınmalıdır.

Nanoparçacık içeren enerji depolama sistemlerinin kullanım aşamasında da çevresel güvenlik önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Özellikle üretim, kullanım veya kullanım ömrü sonrasında çevreye salınabilecek nano boyutlu parçacıkların toprak, su ve canlı organizmalar üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bunun yanında, enerji depolama cihazlarının yüksek enerji verimliliği sağlaması ve karbon emisyonlarını azaltması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak bu faydaların uzun vadede korunabilmesi için potansiyel çevresel risklerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Enerji depolama sistemlerinin kullanım ömrü sonunda uygulanacak geri dönüşüm ve atık yönetimi stratejileri de sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Lityum, kobalt ve diğer değerli metallerin geri kazanılması, hem doğal kaynak tüketimini azaltmakta hem de atık miktarının kontrol altında tutulmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle sorumlu geri dönüşüm uygulamalarının geliştirilmesi ve çevre dostu bertaraf yöntemlerinin yaygınlaştırılması, nanoteknoloji tabanlı enerji depolama sistemlerinin sürdürülebilirliğini artıran temel unsurlar arasında yer almaktadır. Sonuç olarak, nanomalzemelerin enerji depolama teknolojilerine sağladığı teknik avantajların çevresel etkilerle birlikte bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi, daha sürdürülebilir ve çevre dostu enerji sistemlerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. (Pokrajac, et al., 2021).

- Kaynak Verimliliği ve Malzeme Tasarrufu:

  Nanomalzemeler, yüksek özgül yüzey alanları ve gelişmiş fonksiyonel özellikleri sayesinde daha az miktarda hammadde kullanılarak daha yüksek performans elde edilmesine imkân tanımaktadır. Bu durum, enerji üretim ve depolama sistemlerinde malzeme tüketiminin azaltılmasına katkı sağlarken doğal kaynakların daha etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını desteklemektedir. Böylece hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha verimli teknolojilerin geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

- Geri Dönüşüm ve Atık Yönetimi:

Nanoteknolojik yaklaşımlar, enerji sistemlerinde kullanılan bileşenlerin geri kazanım ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle güneş panelleri, bataryalar ve diğer enerji depolama sistemlerinde kullanılan malzemelerin ayrıştırılması ve yeniden değerlendirilmesi süreçlerinde nanomalzemeler den yararlanılabilmektedir. Bu sayede atık miktarı azaltılmakta, değerli hammaddelerin yeniden kullanımı teşvik edilmekte ve enerji teknolojilerinin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri sınırlandırılmaktadır.

- Temiz ve Düşük Karbonlu Enerji Üretimi:

Nanoteknoloji, yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini artırarak fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına katkı sunmaktadır. Özellikle güneş enerjisi dönüşüm sistemleri, hidrojen üretim teknolojileri ve enerji depolama uygulamalarında nanomalzemelerin kullanımı enerji dönüşüm verimliliğini yükseltmekte ve enerji kayıplarını azaltmaktadır. Bunun sonucunda sera gazı emisyonlarının düşürülmesi desteklenmekte, karbon ayak izi azaltılmakta ve daha çevre dostu enerji sistemlerinin geliştirilmesi mümkün hâle gelmektedir. Nanoteknoloji, çevresel

izleme ve kirlilik kontrolü alanlarında yüksek performanslı çözümler sunan önemli bir araştırma ve uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır. Nanomalzeme temelli sensörler, kirletici bileşenlerin, toksik gazların ve ağır metal iyonlarının çok düşük konsantrasyonlarda dahi yüksek hassasiyet ve seçicilikle tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sensörlerin üstün algılama performansı, nano malzemelerin geniş özgül yüzey alanına ve güçlü adsorpsiyon özelliklerine dayanmaktadır. Ayrıca, çevresel değişimlerin elektriksel, optik veya elektrokimyasal sinyallere etkin bir şekilde dönüştürülebilmesi, ölçüm doğruluğunu ve algılama hızını artırmaktadır. Bu özellikler sayesinde nano sensörler, hava, su ve toprak kalitesinin gerçek zamanlı olarak izlenmesinde önemli avantajlar sunmakta ve çevresel risklerin erken tespit edilmesine katkı sağlamaktadır. Böylece nanoteknoloji, çevre yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin desteklenmesinde stratejik bir rol üstlenmektedir (Shapira & Youtie, 2015).

Sonuç olarak, nanoteknoloji yalnızca enerji teknik performansını artıran bir araç değil, aynı zamanda kaynak verimliliğini geliştiren, atık oluşumunu azaltan ve düşük karbonlu enerji teknolojilerinin yaygınlaşmasını destekleyen önemli bir sürdürülebilirlik unsuru olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle nanomalzemeler, geleceğin çevresel açıdan daha sorumlu ve sürdürülebilir enerji altyapılarının oluşturulmasında stratejik bir rol üstlenmektedir.

## Zorluklar ve Gelecek Araştırma Alanları

Nanomalzemelerin enerji teknolojilerinde sunduğu önemli avantajlara rağmen, bu teknolojilerin yaygın ve sürdürülebilir bir şekilde uygulanabilmesi için çeşitli teknik, ekonomik ve düzenleyici zorlukların aşılması gerekmektedir. Bu nedenle, nanoteknoloji tabanlı enerji sistemlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar

yalnızca performans iyileştirmelerine değil, aynı zamanda üretim süreçleri, güvenlik değerlendirmeleri ve mevzuat çalışmalarına da odaklanmaktadır.

- **Üretim Maliyetleri ve Ölçeklenebilirlik:**

Nanomalzemelerin sentezi ve işlenmesi, çoğu durumda geleneksel malzemelere kıyasla daha karmaşık süreçler gerektirmektedir. Bu durum üretim maliyetlerini artırabilmekte ve teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanmasını sınırlayabilmektedir. Bununla birlikte, son yıllarda geliştirilen yeni sentez yöntemleri, yeşil üretim yaklaşımları ve ölçeklenebilir üretim teknikleri sayesinde maliyetlerin azaltılmasına yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Gelecekte ekonomik açıdan rekabetçi üretim süreçlerinin geliştirilmesi, nanomalzemelerin ticari kullanımının yaygınlaşmasında belirleyici olacaktır.

- **Sağlık, Güvenlik ve Çevresel Riskler:**

Nano boyuttaki malzemeler, makro ölçekteki benzerlerinden farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler sergileyebilmektedir. Bu nedenle, nanomalzemelerin insan sağlığı ve çevre üzerindeki uzun dönem etkileri henüz tam olarak ortaya konulamamıştır. Özellikle üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinde oluşabilecek olası risklerin belirlenebilmesi için kapsamlı toksikolojik, ekotoksikolojik ve çevresel etki çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda, güvenli kullanım protokollerinin oluşturulması, etkin atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi ve yaşam döngüsü değerlendirmelerinin yaygınlaştırılması gelecekteki araştırmaların öncelikli konuları arasında yer almaktadır. Özellikle metal nanopartiküllerin çevresel davranışı, üzerinde önemle durulması gereken araştırma alanlarından biridir. Örneğin, gümüş nanopartiküllerin yüksek konsantrasyonlarda sucul organizmalar üzerinde toksik etkilere neden olabileceği ve ekosistem dengesini olumsuz yönde etkileyebileceği bildirilmiştir. Bu nedenle, metal

nanopartiküllerin çevresel kaderinin ve ekolojik etkilerinin ayrıntılı olarak araştırılmasının yanı sıra, daha sürdürülebilir ve çevre dostu (yeşil) sentez, kullanım ve geri kazanım yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Malik, et al., 2023).

- **Yasal ve Düzenleyici Çerçeveler:**

Nanoteknolojinin enerji sektöründeki uygulamaları hızla gelişmesine rağmen, bu alana yönelik standartlar ve düzenleyici mekanizmalar birçok ülkede henüz tam olarak oluşturulmuş değildir. Nanomalzemelerin üretimi, kullanımı, taşınması ve geri dönüşümüne ilişkin ulusal ve uluslararası standartların geliştirilmesi, teknolojinin güvenli ve sürdürülebilir biçimde yaygınlaşması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle gelecekte bilimsel araştırmaların yanı sıra politika geliştirme ve düzenleyici çalışmaların da hız kazanması beklenmektedir.

- **Genel Değerlendirme ve Gelecek Perspektifi**

Nanomalzemeler, enerji üretimi, dönüşümü ve depolanması süreçlerinde sundukları üstün fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde enerji teknolojilerinde önemli ilerlemelerin önünü açmaktadır. Özellikle güneş enerjisi sistemleri, bataryalar, süperkapasitörler ve hidrojen enerjisi uygulamalarında elde edilen gelişmeler, nanomalzemelerin enerji verimliliğinin artırılmasında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bunun yanında, kaynak kullanımının azaltılması, enerji kayıplarının en aza indirilmesi ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin performansının iyileştirilmesi gibi avantajlar, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Gelecekte nanoteknoloji alanındaki bilimsel ve teknolojik gelişmelerin, daha yüksek performanslı, ekonomik ve çevre dostu enerji sistemlerinin geliştirilmesini desteklemesi beklenmektedir. Bu kapsamda, özellikle metal nanopartiküllerin enerji depolama ve enerji dönüşüm sistemlerinde kullanımı önemli

araştırma alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Metal nanopartiküller; yüksek yüzey alanları, ayarlanabilir elektronik yapıları ve üstün katalitik özellikleri sayesinde yüksek performanslı bataryaların, daha verimli güneş pillerinin ve hidrojen üretim teknolojilerinde kullanılan katalizörlerin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır. Bunun yanı sıra, çevresel iyileştirme uygulamalarında kirleticilerin giderilmesi ve kimyasal reaksiyonların verimliliğinin artırılması amacıyla da etkin bir şekilde değerlendirilmektedir. Enerji alanı dışında ise ilaç taşıma sistemleri, biyogörüntüleme ve kanser tedavisi gibi biyomedikal uygulamalarda da metal nanopartiküllerin potansiyeli yoğun biçimde araştırılmaktadır. Bununla birlikte, nanomalzemelerin geniş ölçekli uygulamalara aktarılabilmesi için üretim maliyetlerinin düşürülmesi, uzun dönemli kararlılıklarının artırılması, güvenlik ve çevresel etkilerinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi ve uygun düzenleyici altyapının oluşturulması gerekmektedir. Bu zorlukların aşılmasıyla birlikte nanoteknolojinin, enerji sektörünün dönüşümünde stratejik bir rol üstlenmeye devam edeceği ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesinde temel araştırma alanlarından biri olmayı sürdüreceği öngörülmektedir (Niculescu, et al., 2021).

## Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Nanomalzemeler, sahip oldukları yüksek özgül yüzey alanı, ayarlanabilir fiziksel ve kimyasal özellikleri ile üstün elektriksel, optik ve katalitik davranışları sayesinde sürdürülebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Güneş hücreleri, hidrojen üretimi, yakıt hücreleri, bataryalar ve süperkapasitörler gibi farklı uygulamalarda nanomalzemelerin kullanılması; enerji dönüşüm veriminin artırılmasına, şarj ve deşarj süreçlerinin hızlandırılmasına ve cihazların kullanım ömrünün uzatılması gibi özellikler, onları daha da önemli bir araç hâline getirmektedir.

Bununla birlikte, nanomalzemelerin laboratuvar ölçeğindeki başarılı performanslarının endüstriyel uygulamalara aktarılması önünde bazı güçlükler bulunmaktadır. Yüksek üretim maliyetleri, karmaşık sentez yöntemleri, ölçek büyütme problemleri, uzun dönem kararlılık ve geri dönüşüm olanaklarının sınırlı olması bu güçlüklerin başında gelmektedir. Ayrıca nanomalzemelerin üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarında insan sağlığı ve çevre üzerinde oluşturabileceği etkilerin yaşam döngüsü yaklaşımıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle yalnızca yüksek performansa odaklanılması yeterli olmayıp güvenlik, ekonomik uygulanabilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik ile birlikte ele alınmalıdır.

Gelecekteki çalışmaların düşük maliyetli, toksik olmayan, bol bulunan ve geri dönüştürülebilir ham maddelerden nanomalzeme üretimine yönelmesi beklenmektedir. Yeşil sentez yöntemleri, biyokütle kökenli nanoyapılar, metal-organik kafesler, MXeneler, iki boyutlu malzemeler ve hibrit nanokompozitler bu alanda önemli araştırma konuları olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak nanomalzemeler, mevcut teknik, ekonomik ve çevresel sorunların giderilmesi koşuluyla temiz enerji üretimi, dönüşümü ve depolanmasında önemli katkılar sağlayabilecek ve sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi hızlandırabilecek güçlü bir potansiyele sahiptir.

## Kaynakça/References


Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: Characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in Microbiology, 14*, 1155622. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622

Casimir, A., Zhang, H., Ogoke, O., Amine, J. C., Lu, J., & Wu, G. (2016). Silicon-based anodes for lithium-ion batteries: Effectiveness of materials synthesis and electrode preparation. *Nano Energy, 27*, 359–376. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.07.023

Chen, Z., Xu, M., Du, B., Zhu, H., Xie, T., & Wang, W. (2014). Morphology control of lithium iron phosphate nanoparticles by soluble starch-assisted hydrothermal synthesis. *Journal of Power Sources, 272*, 837–844. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.019

Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature, 488*(7411), 294–303. https://doi.org/10.1038/nature11475

Conibeer, G., Green, M. A., Koenig, D., Perez-Wurfl, I., Huang, S., Hao, X., Di, D., Shi, L., Shrestha, S., Puthen-Veetil, B., So, Y., Zhang, B., & Wan, Z. (2011). Silicon quantum dot based solar cells: Addressing the issues of doping, voltage and current transport. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19*(7), 813–824. https://doi.org/10.1002/pip.1045

Jansirani, D., Mohamed Rizwana, A., Noorjahan Rehana, A., & Mathina, P. A. (2026). Nanomaterials for energy harvesting and storage in nano-ecosystems. In D. K. Gupta, S. Murugan, & A. Iyer (Eds.), *Nano-ecosystems* (pp. 67–88). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-5033-3_4

Di Lupo, F., Tuel, A., Mendez, V., Francia, C., Meligrana, G., Bodoardo, S., & Gerbaldi, C. (2014). Mesoporous $TiO_2$ nanocrystals produced by a fast hydrolytic process as high-rate long-lasting Li-ion battery anodes. *Acta Materialia, 69*, 60–67. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.057

Hossain, M. K., Raihan, G. A., Akbar, M. A., Rubel, M. H. K., Ahmed, M. H., Khan, M. I., Hossain, S., Sen, S. K., Jalal, M. I. E., & El-Denglawey, A. (2022a). Current applications and future potential of

rare earth oxides in sustainable nuclear, radiation, and energy devices: A review. *ACS Applied Electronic Materials, 4*(7), 3327–3353. https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c00069

Hossain, M. K., Rubel, M. H. K., Akbar, M. A., Ahmed, M. H., Haque, N., Rahman, M. F., Hossain, J., & Hossain, K. M. (2022b). A review on recent applications and future prospects of rare earth oxides in corrosion and thermal barrier coatings, catalysts, tribological, and environmental sectors. *Ceramics International, 48*(22), 32588–32612. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.220

Huang, W., & Li, W. (2019). Surface and interface design for heterogeneous catalysis. *Physical Chemistry Chemical Physics, 21*(2), 523–536. https://doi.org/10.1039/C8CP05717F

International Energy Agency. (2011). *World energy outlook 2011*. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2011

iStock. (n.d.). *Carbon nanotube images and stock photos* [Photograph collection]. Retrieved July 1, 2026, from https://www.istockphoto.com/photos/carbon-nanotube

Jiang, H. R., Zeng, Y. K., Wu, M. C., Shyy, W., & Zhao, T. S. (2019). A uniformly distributed bismuth nanoparticle-modified carbon cloth electrode for vanadium redox flow batteries. *Applied Energy, 240*, 226–235. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.051

Jin, H., Guo, C., Liu, X., Liu, J., Vasileff, A., Jiao, Y., Zheng, Y., & Qiao, S. Z. (2018). Emerging two-dimensional nanomaterials for electrocatalysis. *Chemical Reviews, 118*(13), 6337–6408. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00689

Kulkarni, S. K. (2015). *Nanotechnology: Principles and practices* (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09171-6

Lu, H., Tournet, J., Dastafkan, K., Liu, Y., Ng, Y. H., Karuturi, S. K., Zhao, C., & Yin, Z. (2021). Noble-metal-free multicomponent nanointegration for sustainable energy conversion. *Chemical Reviews, 121*(17), 10271–10366. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01328

Mahmud, M. Z. A. (2023). A concise review of nanoparticles utilized energy storage and conservation. *Journal of Nanomaterials, 2023*, 5432099. https://doi.org/10.1155/2023/5432099

Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A revolution in modern industry. *Molecules, 28*(2), 661. https://doi.org/10.3390/molecules28020661

Mallick, S., & Gayen, D. (2023). Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems—A critical review. *Journal of Energy Storage, 62*, 106894. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894

Mueller, S. C., Sandner, P. G., & Welpe, I. M. (2015). Monitoring innovation in electrochemical energy storage technologies: A patent-based approach. *Applied Energy, 137*, 537–544. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.082

Niculescu, A. G., Chircov, C., Bîrcă, A. C., & Grumezescu, A. M. (2021). Nanomaterials synthesis through microfluidic methods: An updated overview. *Nanomaterials, 11*(4), 864. https://doi.org/10.3390/nano11040864

Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. F. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan pil kimyasallarının özellikleri ve üstün yönlerinin kıyaslanması üzerine bir derleme çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 8*(2), 276–298. https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsa/issue/62545/913918

Pokrajac, L., Abbas, A., Chrzanowski, W., Dias, G. M., Eggleton, B. J., Maguire, S., Maine, E., Malloy, T., Nathwani, J., Nazar, L., Sips, A., Sone, J., van den Berg, A., Weiss, P. S., & Mitra, S. (2021). Nanotechnology for a sustainable future: Addressing global challenges with the International Network4Sustainable Nanotechnology. *ACS Nano, 15*(12), 18608–18623. https://doi.org/10.1021/acsnano.1c10919

Rao, N., Singh, R., & Bashambu, L. (2021). Carbon-based nanomaterials: Synthesis and prospective applications. *Materials Today: Proceedings, 44*, 608–614. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.593

Sektörüm Dergisi. (2026, Eylül). *Sektörüm Dergisi, Sayı 188: İnteraktif e-dergi*. https://www.sektorumdergisi.com/sektorum-dergisi-sayi-188-eylul-2026-interaktif-e-dergi/

Shapira, P., & Youtie, J. (2015). The economic contributions of nanotechnology to green and sustainable growth. In V. A. Basiuk & E. V. Basiuk (Eds.), *Green processes for nanotechnology: From inorganic to bioinspired nanomaterials* (pp. 409–434). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15461-9_15

Su, X., Wu, Q., Zhan, X., Wu, J., Wei, S., & Guo, Z. (2012). Advanced titania nanostructures and composites for lithium ion battery. *Journal of Materials Science, 47*(6), 2519–2534. https://doi.org/10.1007/s10853-011-5974-x

Vista Create. (n.d.). *Solar panel system* [Photograph]. Retrieved July 1, 2026, from https://create.vista.com/tr/photos/solar-panel-system

Wen, Y., Zhu, Y., Langrock, A., Manivannan, A., Ehrman, S. H., & Wang, C. (2013). Graphene-bonded and -encapsulated Si nanoparticles for lithium-ion battery anodes. *Small, 9*(16), 2810–2816. https://doi.org/10.1002/smll.201202512

Xu, C., Ravi Anusuyadevi, P., Aymonier, C., Luque, R., & Marre, S. (2019). Nanostructured materials for photocatalysis. *Chemical Society Reviews, 48*(14), 3868–3902. https://doi.org/10.1039/C9CS00102F

Yang, Q., Deng, N., Zhao, Y., Gao, L., Cheng, B., & Kang, W. (2023). A review on 1D materials for all-solid-state lithium-ion batteries and all-solid-state lithium-sulfur batteries. *Chemical Engineering Journal, 451*, 138532. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138532

Yılmaz, H. (2025, February 27). *Nano materyallerin enerji verimliliği üzerindeki etkileri*. KÜRE Ansiklopedi. https://kureansiklopedi.com/tr/detay/nano-materyallerin-enerji-verimliliği-uzerindeki-e

Zhou, G., Chen, H., & Cui, Y. (2022). Formulating energy density for designing practical lithium–sulfur batteries. *Nature Energy, 7*(4), 312–319. https://doi.org/10.1038/s41560-022-01001-0

# BÖLÜM 3

# AÇIK NIR VERİ SETLERİNDE 1B-CNN, PLS VE SVR KALİBRASYONLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

**FATİH MEHMET AVCU**[1]

## Giriş

Yakın kızılötesi (NIR) spektroskopi hızlı ve numune hazırlığı gerektirmeyen bir yöntemdir.Bu yüzden gıda, tarım, petrokimya gibi alanlarda rutin olarak kullanılır (Pasquini, 2018). NIR bantları geniş ve iç içe geçtiği için yöntemin nicel kullanımı çok değişkenli kalibrasyona dayanır. Uzun süredir bu işin için kısmi en küçük kareler (PLS) yöntemi kullanılır (Wold et al., 2001). PLS genellikle standart normal değişken dönüşümü (SNV) (Barnes et al., 1989) ya da Savitzky–Golay (SG) türevi (Engel et al., 2013; Rinnan et al., 2009; Savitzky & Golay, 1964) gibi saçılma düzeltme ve türev alma adımlarıyla birlikte kullanılır. Doğrusal olmayan modeller arasında çekirdek yöntemleri, özellikle destek vektör regresyonu (SVR), uzun zamandır kullanılır (Balabin & Lomakina, 2011; Thissen et al., 2004).

2017'den beri tek boyutlu derin sinir ağları (1B-CNN) infrared ve diğer titreşim spektroskopik ölçümlerde (Acquarelli et al., 2017; Bitra et al., 2024; Cui & Fearn, 2018; Khan et al., 2025; Mishra &

[1] Doç. Dr., İnönü Üniversitesi, Enformatik Bölümü, Orcid: 0000-0002-1973-7745

Passos, 2021; Yang et al., 2019; Zhang et al., 2019; Zhou et al., 2022) kullanılmaya başlandı. Literatüre bakıldığında bu yöntemin PLS'den daha doğru sonuç verdiğini görülmektedir. Özellikle veri sayısı yüksek olduğunda çalışmalarda ya da spektrumlarda doğrusal olmayan etkiler bulunduğunda ne kadar etkili bir yöntem olduğu görülmektedir (Cui & Fearn, 2018; Passos & Mishra, 2023). Bunun yanında yine analitik laboratuvarlarda tipik olan küçük veri setlerinde PLS'in en az onun kadar doğru olduğunu gösteriyor (Einarson et al., 2022; Mishra et al., 2022). Yapılan yakın zaman çalışmalarına göre bu çelişkinin büyük kısmı deneylerin eksik tanımlanmasından kaynaklandığı, özelikle ön işleme, ağ mimarisi, hiper parametre ayarı ve doğrulama tasarımı yanlış kurgulanmasından olduğun raporlanmıyor (Mishra et al., 2022; Passos, 2026; Walsh et al., 2023). Spektrumların veri çoğaltımı, CNN'leri küçük kalibrasyon setleriyle kullanıma uygun hâle getirmek için önerilmektedir (Bjerrum et al., 2017).

Literatürdeki model karşılaştırmalarının değerlendirilmesinde birkaç temel sorun vardır. İlki, model doğrulama süreçlerindeki eksikliklerdir. Paremetreler(hipermarametre), ön işleme basamakları veya latent değişken sayıları, test verisi üzerinden belirlendiğinde hata tahminleri aşırı iyimserdir (Cawley & Talbot, 2010; Varma & Simon, 2006). Bu tür bilgi sızıntılarına data leakage denir. Makine öğrenimi tabanlı çalışmalarda tekrarlanamayan sonuçların başlıca nedenlerinden biridir (Kapoor & Narayanan, 2023). Gıda analizinde kullanılan NIR regresyon modellerini hakkında tartışmalar doğrulama adımlarının çoğunlukla yetersiz uygulandığını ve eksik raporlandığını doğrulamaktadır (Ezenarro & Schorn-García, 2025; Westad & Marini, 2015).

Diğer sorun ise istatistiksel değerlendirme eksikliğidir. Mevcut karşılaştırmaların büyük bir kısmı, tek bir veri kümesini kullanmaktadır. Birden çok modelin farklı veri kümeleri üzerinde karşılaştırılmasına olanak tanıyan parametrik olmayan testler

metodolojik olarak iyi tanımlanmış olsa da (Demšar, 2006; Friedman, 1937; Holm, 1979), kemometri alanındaki çalışmalarda nadiren tercih edilmektedir.

Buna bağlı üçüncü bir sorun ise tek veriye güvenmektir. Tecator ya da 'Chimiométrie 2006' toprak kütüphanesi gibi açık NIR veri setleri sabit bir kalibrasyon/test bölmesiyle dağıtılır (Borggaard & Thodberg, 1992; Fernández Pierna & Dardenne, 2008). Yeni yöntemler genellikle o tek test kümesindeki hatalarına göre sıralanır. Test kümesi birkaç düzine numuneden oluştuğunda hata tahmininin kendisi de belirsizdir.

Bu çalışma ise, yalnızca açık veri ve tamamen paylaşılan kod kullanarak bu boşlukları ele alıyor.

## Materyal ve yöntem

### Veri setleri

Dokuz kalibrasyon görevi veren dört açık NIR veri seti kullanıldı (Tablo 1). Setler numune sayısı (60-732), spektral aralık, değişken sayısı (100-700), ölçüm modu ve matris açısından birbirinden ayrılıyor. Serbestçe dağıtılabildikleri ve yaygın olarak kullanıldıkları için seçildiler; böylece sonuçlar önceki çalışmalarla ilişkilendirilebiliyor.

Tecator et verisi: İnce kıyılmış 215 et numunesinin Tecator Infratec Food and Feed Analyzer cihazında ölçülen NIR geçirgenlik spektrumları (850-1050 nm, 100 kanal) ve referans nem, yağ ve protein içerikleri (%) (Borggaard & Thodberg, 1992). Veri R dilindeki caret paketinden alındı. Orijinal 172 kalibrasyon (eğitim ve izleme) ve 43 test numunesi ayrımı literatür bölmesi olarak kullanıldı.

Benzin verisi: 60 benzin numunesinin 900-1700 nm arasında 2 nm adımla ölçülen yansıma spektrumları, log(1/R) (401 değişken), ve oktan sayıları (Kalivas, 1997); R pls paketinden alındı.

NIRsoil verisi: Belçika'nın Valon bölgesinden toplanan, kurutulup elenmiş toprak numunelerinin absorbans spektrumları (1100-2498 nm, 2 nm, 700 değişken) ve toplam azot (Nt, g $kg^{-1}$), karbon (Ciso, g/100 g) ve katyon değişim kapasitesi (KDK, meq/100 g) değerleri. Veri 'Chimiométrie 2006' yarışması için yayımlandı (Fernández Pierna & Dardenne, 2008) ve R prospectr paketinden alındı. Her özellik için referans değeri eksik olan numuneler ayrı ayrı çıkarıldı; geriye sırasıyla 645, 732 ve 447 numune kaldı. Yarışmanın kalibrasyon/test ayrımı literatür bölmesi olarak kullanıldı.

Fermantasyon verisi. Çavdar, buğday ve mısırdan hazırlanan 166 alkol fermantasyonu şırasının birinci türev NIR spektrumları (1115-2285 nm, 235 değişken) ile glikoz ve etanol derişimleri (g $L^{-1}$) (Liebmann et al., 2009); R chemometrics paketinden alındı. Spektrumlar türevi alınmış olarak dağıtıldığı için 'ham' girdi sayıldı.

Tüm veriler doğrudan paketlerin veri dosyalarından okundu; referans değeri eksik olanlar dışında hiçbir numune çıkarılmadı.

*Tablo 1. Veri setleri ve kalibrasyon görevleri. Literatür bölmesi, orijinal ayrımdaki kalibrasyon / test numune sayısını gösterir.*

| Görev (birim) | n | Spektrum | Değişken | Aralık | Ort. ± SS | Literatür bölmesi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tecator – nem (%) | 215 | NIT, 850–1050 nm | 100 | 39,3–76,6 | 63,20 ± 9,90 | 172 / 43 |
| Tecator – yağ (%) | 215 | NIT, 850–1050 nm | 100 | 0,9–49,1 | 18,14 ± 12,74 | 172 / 43 |
| Tecator – protein (%) | 215 | NIT, 850–1050 nm | 100 | 11,0–21,8 | 17,68 ± 3,02 | 172 / 43 |
| Benzin – oktan sayısı | 60 | log(1/R), 900–1700 nm | 401 | 83,4–89,6 | 87,18 ± 1,53 | – |
| NIRsoil – Nt (g $kg^{-1}$) | 645 | Absorbans, 1100–2498 nm | 700 | 0,2–8,8 | 1,77 ± 1,19 | 485 / 160 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | 732 | Absorbans, 1100–2498 nm | 700 | 0,1–17,2 | 1,67 ± 1,77 | 548 / 184 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | 447 | Absorbans, 1100–2498 nm | 700 | 1,0–46,3 | 13,15 ± 6,28 | 334 / 113 |
| Fermantasyon – glikoz (g $L^{-1}$) | 166 | 1. türev, 1115–2285 nm | 235 | 0,3–54,4 | 17,48 ± 14,19 | – |

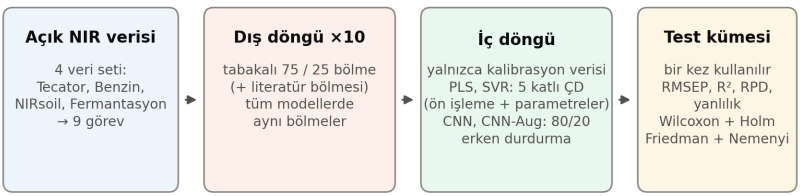
| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fermantasyon – etanol ($g\ L^{-1}$) | 166 | 1. türev, 1115–2285 nm | 235 | 21,7–88,1 | 58,02 ± 22,38 | – | | |

## Doğrulama tasarımı

Başarım, tekrarlı dış ayırma şemasıyla tahmin edildi (Şekil 1). Her görev için numuneler 10 kez rastgele olarak %75 kalibrasyon ve %25 test kümesine ayrıldı. Kalibrasyon ve test kümelerinin aynı aralığı kapsaması için bölmeler referans değerin kantil dilimlerine göre tabakalandırıldı. Her model için aynı işlemler kullanıldı. Bu da eşleştirilmiş karşılaştırmaya olanak verdi. Literatür bölmesi bulunan setlerde (Tecator ve NIRsoil) bu bölme ek bölme olarak ayrıca analiz edildi ve ayrı raporlandı.

Veriye bağlı her karar (hyperparametreler) yalnızca o bölmenin kalibrasyon numuneleriyle verildi. Test numuneleri algoritmaya gösterilmedir ve raporlanan hatayı hesaplamak için yalnızca bir kez kullanıldı. Yöntemi rahat açıklamak için SNV ve SG her spektruma tek başına uygulandı. Merkezleme ve ölçekleme ise her eğitim katının içinde yeniden hesaplandı.

*Şekil 1. Doğrulama iş akışı. Veriye bağlı tüm kararlar her dış bölmenin kalibrasyon kümesi içinde verilir;*




## Modeller

Ön işleme Adımı: PLS ve SVR için üç seçeneğe bakıldı: ham veri, SNV (Barnes et al., 1989), 15 noktalı pencere ve ikinci derece polinomla SG birinci türevi (Savitzky & Golay, 1964).

PLS Adımı: Spektrumlar ortalamaya göre merkezlendi. 1-20 gizli değişkenle PLS regresyonu (Wold et al., 2001) kuruldu. Ön işleme ve gizli değişken sayısı, kalibrasyon kümesinde 5 katlı çapraz doğrulamayla RMSE en küçük olacak şekilde birlikte seçildi. Seçilen model kalibrasyon kümesinin tamamıyla yeniden kuruldu.

SVR Adımı: Spektrumlar ön tabi tutuldu. Otomatik ölçeklendi yapıldı ve radyal tabanlı çekirdekli ε-SVR'ye işlemi uygulandı (Thissen et al., 2004).

1B-CNN Adımı: Ağ, spektral regresyonda yaygın uygulamayı izliyor (Cui & Fearn, 2018; Yang et al., 2019). Girdi, SNV ile düzeltilmiş ve her değişken kalibrasyon ortalaması ve standart sapmasıyla otomatik ölçeklenmiş spektrumdur. Mimaride iki evrişim bloğu (7 genişlikte 16 süzgeç ve 5 genişlikte 32 süzgeç; her birinde ReLU etkinleştirmesi ve 2 kat ortalama havuzlama) ve ardından düzleştirme, seyreltme (0,2), $10^{-3}$ L2 cezalı 64 ReLU birimli yoğun katman ve doğrusal bir çıktı birimi bulunuyor. Eğitilebilir parametre sayısı 54.049 (Tecator, 100 değişken) ile 361.249 (NIRsoil, 700 değişken) arasında değişiyor. Eğitimde standartlaştırılmış yanıtın ortalama kare hatası Adam eniyileyicisiyle (başlangıç öğrenme oranı $10^{-3}$, yığın boyutu 32) en küçüklendi; doğrulama kaybı 20 dönem boyunca iyileşmediğinde öğrenme oranı yarıya indirildi (en düşük $10^{-5}$). Dönem sayısını test kümesine dokunmadan seçmek için kalibrasyon numunelerinin %20'si (yanıta göre tabakalı) iç doğrulama kümesi olarak ayrıldı. Doğrulama kaybı 50 dönem boyunca iyileşmediğinde eğitim durduruldu (en fazla 500 dönem) ve en iyi dönemin ağırlıkları saklandı. Dolayısıyla CNN kalibrasyon numunelerinin %80'iyle eğitilirken PLS ve SVR %100'üyle yeniden kuruldu. Bu fark erken durdurmanın olağan bedelidir ve CNN'in aleyhine işler.

Veri çoğaltmalı 1B-CNN (CNN-Aug) Adımı: Aynı ağ, kalibrasyon spektrumları ve her spektrumun dört çoğaltılmış

kopyasıyla eğitildi. Bjerrum ve arkadaşlarını (2017) izleyerek her kopyaya rastgele bir toplamsal kayma, spektrum boyunca rastgele doğrusal bir eğim ve rastgele bir çarpan uygulandı. Bu değerler otomatik ölçeklenmiş girdi uzayında sırasıyla ±0,1, ±0,1 ve 0,9-1,1 aralıklarından düzgün dağılımla çekildi. Çoğaltma yalnızca eğitim kısmına uygulandı; iç doğrulama spektrumları çoğaltılmadı.

Tüm rastgele sayı tohumları sabitlendi ve yalnızca bölme sırasına bağlı; bu nedenle her çalıştırma birebir yeniden üretilebilir.

**Başarım ölçütleri ve istatistiksel analiz**

Her model ve bölme için test kümesinde tahmin hatasının karekök ortalaması (RMSEP), belirleme katsayısı ($R^2$), başarımın sapmaya oranı (RPD = test referans değerlerinin standart sapması / RMSEP) ve yanlılık hesaplandı. Sonuçlar 10 bölme üzerinden ortalama ± standart sapma olarak verildi.

Her görev içinde dört model, eşleştirilmiş 10 RMSEP değeri üzerinden iki yönlü Wilcoxon işaretli sıralar testiyle ikişerli karşılaştırıldı ve görev başına altı p değeri Holm yöntemiyle düzeltildi (Holm, 1979). Görevler arası karşılaştırmada modeller her görevde ortalama RMSEP'e göre sıralandı ve Demšar'ın (2006) önerdiği gibi sıralara Friedman testi (Friedman, 1937) uygulandı. Ortalama sıraları farklı olan model çiftlerini belirlemek için $\alpha = 0,05$ düzeyinde Nemenyi kritik farkı (KF) kullanıldı. Dokuz görev dört veri setinden geldiği ve üç görev aynı spektrumları paylaştığı için görevler tamamen bağımsız değildir; bu yüzden görevler arası testler betimleyici olarak okunmalıdır. Ayrıca her görev × bölme kombinasyonunu bir blok sayan ikinci bir Friedman testi hesaplandı. Bölmeler arası kararlılık, 10 bölmedeki RMSEP'in değişim katsayısıyla (DK) özetlendi. Tecator ve NIRsoil için literatür bölmesindeki RMSEP'in 10 tekrarlı bölmenin dağılımı içindeki yeri belirlendi. Her modelin eğitim süresi (hiper

parametre araması dahil duvar saati süresi, iki çekirdekli sanal makinede) kaydedildi.

### Yazılım ve tekrarlanabilirlik

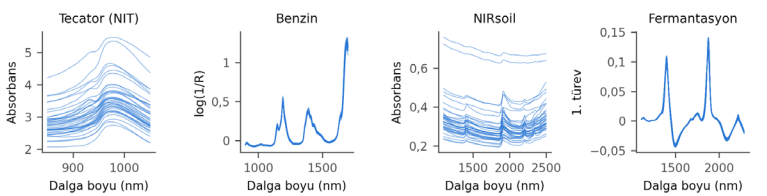
Tüm hesaplamalar Python 3.11 ile NumPy 1.26, SciPy 1.17, scikit-learn 1.8.0 (Pedregosa et al., 2011), TensorFlow/Keras 2.15.1 (Abadi et al., 2016) ve pandas 3.0 kullanılarak yapıldı. Verileri okumak, karşılaştırmayı çalıştırmak ve tüm tablo ve şekilleri üretmek için gereken kod Ek Materyal olarak sunuldu ve kabulün ardından açık bir depoya konacak.

## Bulgular

### Veriler ve seçilen modeller

Her veri setinden örnek spektrumlar Şekil 2'de görülüyor. Dört set dört ayrı durumu temsil ediyor: numuneye göre değişen güçlü bir taban çizgisi olan geçirgenlik spektrumları (Tecator), saçılması az ve hidrokarbon üst tonlarının keskin bantlarını içeren spektrumlar (benzin), büyük kaymalar ve heterojen bir mineral matris içeren yansıma spektrumları (NIRsoil) ve saçılmanın çoğunun zaten giderildiği türev spektrumlar (fermantasyon).

*Şekil 2. Her veri setinden rastgele seçilmiş kırk spektrum, girdi olarak kullanıldığı haliyle (fermantasyon spektrumları birinci türev olarak dağıtılıyor).*




İç çapraz doğrulamada seçilen ön işleme bu tabloyla uyumluydu. Tecator nem ve yağ görevlerinde PLS için 10 bölmenin

hepsinde, SVR için sırasıyla 9 ve 10 bölmede SNV seçildi. NIRsoil özelliklerinde SVR her bölmede SG birinci türevini seçerken PLS, SG türevi ile ham spektrum arasında gidip geldi. Benzin ve Tecator protein için tek bir seçenek öne çıkmadı (Ek Tablo S1). PLS modellerindeki gizli değişken sayısının ortancası benzinde 7, fermantasyon glikozda 20 oldu.

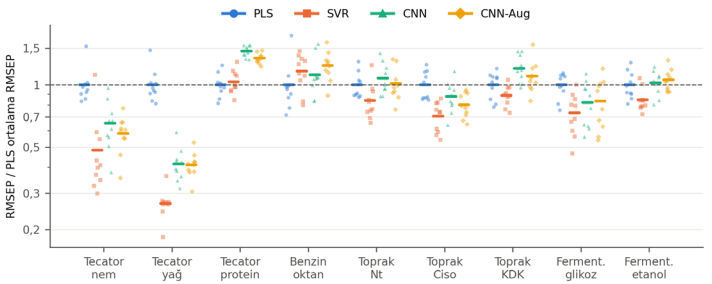
## Tekrarlı bölmelerde doğruluk

Tablo 2, 10 bölme üzerinden ortalama RMSEP ve $R^2$ değerlerini veriyor. Şekil 3 ise her bölmedeki RMSEP'i aynı görevin ortalama PLS hatasına oranlanmış olarak gösteriyor.

*Tablo 2. Test kümesi RMSEP değerleri (10 tekrarlı bölme üzerinden ortalama ± SS, referans değerin biriminde) ve ortalama $R^2$.*

| Görev | RMSEP PLS | RMSEP SVR | RMSEP CNN | RMSEP CNN-Aug | $R^2$ PLS | $R^2$ SVR | $R^2$ CNN | $R^2$ CNN-Aug |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tecator – nem (%) | 2,01 ± 0,40 | 0,969 ± 0,483 | 1,31 ± 0,34 | 1,17 ± 0,23 | 0,958 | 0,988 | 0,982 | 0,986 |
| Tecator – yağ (%) | 2,35 ± 0,44 | 0,629 ± 0,101 | 0,977 ± 0,184 | 0,966 ± 0,134 | 0,965 | 0,997 | 0,994 | 0,994 |
| Tecator – protein (%) | 0,721 ± 0,091 | 0,745 ± 0,096 | 1,05 ± 0,06 | 0,967 ± 0,055 | 0,942 | 0,938 | 0,879 | 0,897 |
| Benzin – oktan sayısı | 0,267 ± 0,075 | 0,311 ± 0,060 | 0,298 ± 0,066 | 0,331 ± 0,053 | 0,962 | 0,953 | 0,954 | 0,946 |
| NIRsoil – Nt (g $kg^{-1}$) | 0,575 ± 0,082 | 0,482 ± 0,098 | 0,618 ± 0,106 | 0,582 ± 0,103 | 0,759 | 0,828 | 0,717 | 0,749 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | 0,987 ± 0,155 | 0,695 ± 0,113 | 0,866 ± 0,147 | 0,789 ± 0,108 | 0,676 | 0,835 | 0,753 | 0,791 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | 3,50 ± 0,50 | 3,10 ± 0,35 | 4,18 ± 0,64 | 3,85 ± 0,69 | 0,659 | 0,734 | 0,515 | 0,590 |
| Fermantasyon – glikoz (g $L^{-1}$) | 5,91 ± 0,79 | 4,32 ± 0,97 | 4,84 ± 1,19 | 4,92 ± 1,35 | 0,817 | 0,898 | 0,872 | 0,866 |
| Fermantasyon – etanol (g $L^{-1}$) | 1,49 ± 0,23 | 1,26 ± 0,16 | 1,53 ± 0,20 | 1,57 ± 0,19 | 0,995 | 0,997 | 0,995 | 0,995 |

*Şekil 3. Her tekrarlı bölmedeki test RMSEP değerinin aynı görevin ortalama PLS RMSEP değerine oranı (logaritmik ölçek).*




SVR dokuz görevin yedisinde, PLS ise kalan ikisinde (Tecator protein ve benzin oktan) en düşük ortalama RMSEP'i verdi. CNN türlerinden hiçbiri ortalamada herhangi bir görevde birinci olmadı. SVR, PLS'e göre ortalama RMSEP'i Tecator nem ve yağda %52 ve %73, üç toprak özelliğinde %11-30 ve fermantasyon görevlerinde %15-27 düşürdü. Tecator proteinde %3, benzinde %16 daha kötüydü; iki fark da anlamlı değildi.

İkili testler (Ek Tablo S2) bu tabloyu doğruluyor. Holm düzeltmesinden sonra SVR, 6 görevde (Tecator nem ve yağ, toprak Nt ve Ciso, glikoz ve etanol) PLS'ten, yine 6 görevde (Tecator yağ ve protein, üç toprak özelliği ve etanol) düz CNN'den anlamlı olarak daha doğruydu. CNN türlerinden hiçbiri hiçbir görevde SVR'den anlamlı olarak daha doğru olmadı. PLS'e göre CNN'lerin tablosu karışıktı: düz CNN Tecator nem, Tecator yağ ve toprak Ciso'da anlamlı olarak daha iyi, Tecator protein ve toprak KDK'da anlamlı olarak daha kötüydü; kalan dört görevde anlamlı fark yoktu.

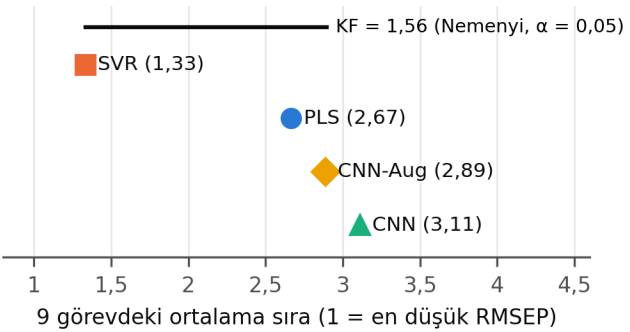
En büyük etkiler Tecator nem ve yağ görevlerinde görüldü. Bu görevlerde doğrusal olmayan üç model de PLS'ten çok daha iyiydi (CNN: %−35 ve %−58; CNN-Aug: %−42 ve %−59; SVR: %−52 ve %−73). Bu sonuç, bu geçirgenlik spektrumlarında yağ ve nem kalibrasyonunun bilinen doğrusal olmayan yapısıyla örtüşüyor

(Borggaard & Thodberg, 1992). İlişkinin doğrusala daha yakın olduğu Tecator proteinde PLS ile SVR eşdeğerdi, iki CNN ise %34-45 daha kötüydü.

### Görevler arası karşılaştırma

Görev başına sıralara uygulanan Friedman testi anlamlıydı ($\chi^2$ = 10,33, serbestlik derecesi 3, N = 9, p = 0,016). Ortalama sıralar SVR için 1,33, PLS için 2,67, CNN-Aug için 2,89 ve CNN için 3,11 oldu (Şekil 4). Nemenyi kritik farkı 1,56 olduğundan yalnızca SVR ile düz CNN arasındaki fark (1,78) anlamlıydı; SVR ile CNN-Aug arasındaki fark (1,56) eşik değerdeydi. 90 görev × bölme kombinasyonunun tamamı blok olarak kullanıldığında sıralama aynı kaldı, yalnızca CNN-Aug ile PLS yer değiştirdi (ortalama sıralar SVR 1,49, CNN-Aug 2,62, PLS 2,89, CNN 3,00; $\chi^2$ = 77,7, p < $10^{-15}$).

*Şekil 4. Dört modelin dokuz görevdeki ortalama sıraları (Friedman testi, p = 0,016).*




### Spektral veri çoğaltmanın etkisi

Veri çoğaltma, CNN'in RMSEP'ini 90 bölmenin 61'inde düşürdü. Görev başına ortalama RMSEP'teki değişimin ortancası %−5,8 oldu; değişim %−10,6 (Tecator nem) ile %+11,1 (60 numuneli benzin) arasında kaldı. İyileşme Holm düzeltmesinden sonra Tecator

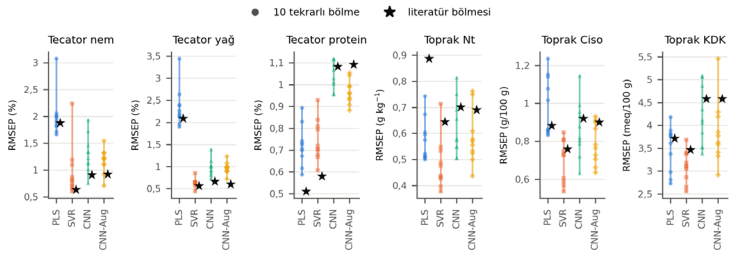
nem ve proteinde anlamlıydı; üç toprak özelliğinde tutarlı (10 bölmenin 8-9'unda iyileşme) ama anlamlı değildi. Veri çoğaltma yedi görevde CNN sonuçlarının yayılımını da azalttı (Tablo 2) ve RMSEP değişim katsayısının ortancasını 0,172'den 0,160'a indirerek PLS (0,152) ve SVR (0,163) değerlerine yaklaştırdı. Buna rağmen CNN-Aug 5 görevde SVR'den anlamlı olarak daha az doğru kaldı.

**Bölmeler arası değişkenlik ve literatür bölmeleri**

Bölmeler arasındaki farklar, modeller arasındaki farkların çoğuna göre büyüktü. 36 görev × model kombinasyonunda, 10 bölmedeki en büyük RMSEP'in en küçüğe oranının ortancası 1,74 oldu ve oran 1,17 ile 3,74 arasında değişti. En düşük RMSEP'i veren model dokuz görevin sekizinde bölmeden bölmeye değişti; yalnızca Tecator yağda SVR 10 bölmenin hepsinde birinciydi (Ek Tablo S3). Örneğin fermantasyon glikozda SVR 5 bölmede, CNN-Aug 3 bölmede, düz CNN 2 bölmede en iyiydi.

Şekil 5, alışılmış literatür bölmesinin sonucunu 10 tekrarlı bölmenin arasına yerleştiriyor. Birkaç durumda bu sonuç tekrarlı bölmelerin aralığının dışında kaldı. Tecator proteinde literatür bölmesindeki RMSEP PLS için %0,51, SVR için %0,58 idi ve tekrarlı bölmelerin hepsinden düşüktü (en düşük değerler %0,59 ve %0,61); CNN-Aug'un RMSEP'i (%1,09) ise hepsinden yüksekti. Tecator yağda iki CNN de literatür bölmesinde tekrarlı bölmelerin hepsinden daha iyi sonuç verdi. Toprak Nt'de PLS'in literatür bölmesindeki RMSEP'i 0,89 g $kg^{-1}$ ile 10 tekrarlı bölmenin hepsinden (0,50-0,74 g $kg^{-1}$) yüksekti. Yalnızca bu bölmeye bakılsaydı PLS CNN'lerden açıkça kötü görünecekti; oysa tekrarlı bölmelerde iki CNN türünden de anlamlı olarak farklı değildi (Tablo 3).

*Şekil 5. Tecator ve NIRsoil görevlerinde 10 tekrarlı bölmenin (noktalar ve aralık) ve literatür bölmesinin (yıldız) RMSEP değerleri.*




*Tablo 3. Literatür (orijinal) kalibrasyon/test bölmesinde RMSEP.*

| Görev | PLS | SVR | CNN | CNN-Aug |
|---|---|---|---|---|
| Tecator – nem (%) | 1,879 (40) | 0,632 (10) | 0,911 (10) | 0,922 (10) |
| Tecator – yağ (%) | 2,093 (20) | 0,563 (10) | 0,659 (0) | 0,603 (0) |
| Tecator – protein (%) | 0,510 (0) | 0,581 (0) | 1,084 (60) | 1,093 (100) |
| NIRsoil – Nt (g kg⁻¹) | 0,887 (100) | 0,644 (90) | 0,701 (80) | 0,690 (80) |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | 0,881 (50) | 0,759 (70) | 0,920 (60) | 0,901 (80) |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | 3,716 (50) | 3,466 (90) | 4,577 (70) | 4,583 (90) |

## PLS gizli değişken sınırına duyarlılık

İç çapraz doğrulama bazı bölmelerde (özellikle glikozda) izin verilen en yüksek değer olan 20 gizli değişkeni seçtiği için PLS analizi en fazla 30 gizli değişkenle tekrarlandı. Bu durumda 90 bölmenin 19'unda, beş göreve dağılmış olarak, 20'den fazla gizli değişken seçildi. Ortalama RMSEP %−4,0 (toprak Ciso) ile %+10,0 (Tecator nem) arasında değişti. Dört görevde değişmedi, dört görevde ise arttı (en fazla %10); çünkü genişleyen arama uzayı zaman zaman aşırı uyumlu modellere yol açtı. SVR ile yapılan karşılaştırmaların hiçbiri değişmedi: SVR aynı yedi görevde PLS'ten daha doğru kaldı (Ek Tablo S4). Dolayısıyla 20 gizli değişken sınırı PLS'i dezavantajlı duruma düşürmedi.

## Tartışma

### Küçük NIR veri setlerinde derin öğrenme

Temel bulgu şu: her kararın yalnızca kalibrasyon verisiyle verildiği bir doğrulama protokolünde, geleneksel bir çekirdek yöntemi görevlerin çoğunda en doğru model oldu ve CNN türlerinden hiçbiri ortalamada hiçbir görevde birinci olmadı. Bu sonuç, CNN'lerin PLS'ten daha iyi olduğu çalışmalarla (Cui & Fearn, 2018; Passos & Mishra, 2023) çelişmiyor. Bizim CNN'lerimiz de spektrum ile özellik arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı görevlerde (Tecator nem ve yağ) PLS'i büyük farkla geçti ve fermantasyon glikozda rekabetçiydi. Ancak sonuçlar, CNN'lere atfedilen üstünlüğün bir kısmının aslında doğrusal olmayan modellemenin kendisinden geldiğini düşündürüyor; SVR aynı kazancı çok daha küçük bir arama uzayı ve eğitim maliyetiyle, aynı ya da daha yüksek düzeyde elde etti. CNN'i yalnızca PLS ile karşılaştıran çalışmalar bu yüzden derin öğrenmenin kendine özgü katkısını olduğundan büyük gösteriyor. Karşılaştırmalara varsayılan olarak SVR ya da iyi ayarlanmış başka bir doğrusal olmayan referans model (Balabin & Lomakina, 2011; Thissen et al., 2004) eklenmeli.

Burada kullanılan veri setleri derin öğrenme ölçülerine göre küçük (60-732 numune). Bu bilinçli bir tercih: laboratuvar kalibrasyon kümelerinin tipik boyutu budur ve yöntem seçiminin pratikte en çok önem taşıdığı yer de burasıdır. Önceki çalışmalar CNN'lerin yararının numune sayısıyla arttığını gösterdi (Cui & Fearn, 2018; Mishra et al., 2022; Passos & Mishra, 2023); bizim sonuçlarımız da bununla tutarlı. CNN'lerin görece en iyi başarımı daha büyük toprak ve Tecator setlerinde, en kötüsü ise veri çoğaltmanın hatayı artırdığı 60 numuneli benzin setinde görüldü. Birkaç bin numunelik bir karşılaştırmada SVR ile olan fark muhtemelen daralır ya da tersine döner; sonuçlarımız o ölçeğe genellenmemeli.

**Veri çoğaltma**

Bjerrum ve arkadaşlarının (2017) yaklaşımıyla yapılan veri çoğaltma bölmelerin çoğunda yararlı oldu ve CNN'i daha kararlı hale getirdi. Bu, birkaç yüz spektrumla eğitilen CNN'lerde veri çoğaltmanın rutin olarak kullanılmasını destekliyor. Ancak kazanç (ortalama %6 civarı) çoğu görevde SVR ile aradaki farktan çok küçüktü. Veri çoğaltma spektrumları kayma, eğim ve çarpımsal etkilerle bozar; bunlar SNV ve türevin zaten büyük ölçüde giderdiği değişimlerdir. Bununla uyumlu olarak etki, taban çizgisi ve saçılma değişiminin en güçlü olduğu Tecator nem ve toprak özelliklerinde en büyük (Şekil 2), türevi zaten alınmış fermantasyon spektrumlarında ise yoktu. Spektrumların karıştırılması ya da cihaza özgü bozulmaların benzetimi gibi kimyasal açıdan daha anlamlı çoğaltma yöntemleri daha yararlı olabilir; bunun aynı protokolle sınanması gerekiyor.

**Tek bölme ve Yöntem Sıralaması**

Burada gözlenen bölmeler arası değişkenliğin yeni kalibrasyon yöntemlerinin nasıl değerlendirildiğine doğrudan bir etkisi var. 15-183 numunelik test kümelerinde RMSEP, aynı verinin rastgele bölmeleri arasında ortanca 1,7 kat değişti ve en iyi modelin kim olduğu dokuz görevin sekizinde değişti. Tecator ve NIRsoil'in yaygın kullanılan literatür bölmeleri temsil edici değildi. Bazı model-görev kombinasyonlarında bu bölmeler 10 rastgele bölmenin tüm aralığının altında ya da üstünde hata verdi; toprak Nt'de ise farklı bir sıralamaya yol açacaktı. Yalnızca literatür bölmesinde değerlendirilen yeni bir yöntem, o test numuneleriyle nasıl etkileştiğine bağlı olarak olduğundan iyi ya da kötü görünebilir.

Açık NIR verileri üzerindeki yöntem karşılaştırmaları için şunları öneriyoruz: (i) sonuçlar tekrarlı bölmeler üzerinden ve yayılımıyla birlikte raporlanmalı, (ii) ön işleme dahil tüm seçim adımları kalibrasyon verisinin içinde tutulmalı (Cawley & Talbot, 2010;

Varma & Simon, 2006; Westad & Marini, 2015), (iii) PLS'in yanında en az bir iyi ayarlanmış doğrusal olmayan referans model bulunmalı ve (iv) çoklu karşılaştırma düzeltmeli, eşleştirilmiş, parametrik olmayan testler kullanılmalı (Demšar, 2006). Literatür bölmesi önceki çalışmalarla süreklilik için raporlanabilir, ama tek kanıt olmamalı. Bu öneriler, CNN deneylerinin daha eksiksiz raporlanması (Passos, 2026) ve NIR regresyonunda daha iyi doğrulama uygulamaları (Ezenarro & Schorn-García, 2025) yönündeki son çağrılarla örtüşüyor.

**Sınırlılıklar**

Bazı sınırlılıklar göz önünde tutulmalı. Birincisi, yalnızca bir CNN mimarisi, SNV girdisiyle ve mimari ya da hiper parametre araması yapılmadan denendi; PLS ve SVR'de ise ön işleme ve parametreler eniyilendi. Bu, CNN'lerin pratikte sıklıkla kullanıldığı biçimi yansıtıyor, ancak Passos ve Mishra'nın (2022) önerdiği otomatik ayarlama gibi daha kapsamlı bir arama CNN sonuçlarını iyileştirebilir. Böyle bir aramanın da, bu çalışmanın kaçınmaya çalıştığı iyimser sapmayı önlemek için kalibrasyon verisinin içine yerleştirilmesi gerekir ve maliyeti buna göre artar. İkincisi, erken durdurma için ayrılan kısım nedeniyle CNN kalibrasyon numunelerinin %80'iyle eğitildi, PLS ve SVR ise tamamını kullandı. Üçüncüsü, dokuz görev dört veri setinden geliyor ve üç görev aynı spektrumları paylaşıyor; görevler arası testler bağımsız gözlemlere dayanmadığı için betimleyici olarak okunmalı. Dördüncüsü, tüm veri setleri görece küçük ve masaüstü cihazlarda ölçülmüş; büyük, çok cihazlı kütüphanelerde ya da el tipi spektrometrelerde sonuçlar farklı olabilir. Son olarak yalnızca nokta tahminleri karşılaştırıldı; rutin kullanımda önemli olan tahmin belirsizliği ve cihaz ya da numune kaymasına karşı dayanıklılık değerlendirilmedi.

## Sonuçlar

Tekrarlı, iç içe ve sızıntısız doğrulamayla değerlendirilen dokuz açık NIR kalibrasyon görevinde RBF çekirdekli SVR 7 görevde, PLS 2 görevde en doğru model oldu; veri çoğaltmalı ya da çoğaltmasız 1B-CNN ortalamada hiçbir görevde birinci olmadı. CNN'ler spektrum-özellik ilişkisinin doğrusal olmadığı görevlerde PLS'i belirgin biçimde geçti, ama SVR çok daha düşük bir eğitim maliyetiyle daha büyük kazanç sağladı. Spektral veri çoğaltma CNN'i bölmelerin üçte ikisinde iyileştirdi, fakat SVR ile aradaki farkı kapatmadı. Aynı verinin rastgele bölmeleri arasındaki farklar çoğu zaman modeller arasındaki farklardan büyüktü ve Tecator ile NIRsoil'in alışılmış literatür bölmeleri tekrarlı bölme sonuçlarını temsil etmedi. Birkaç yüz numunelik kalibrasyon kümelerinde yeni derin öğrenme yöntemleri yalnızca PLS ile değil, iyi ayarlanmış doğrusal olmayan bir referans modelle, tekrarlı bölmeler üzerinde ve uygun istatistiksel testlerle karşılaştırılmalı. Bu makaleyle paylaşılan kod, böyle karşılaştırmalar için hazır bir protokol sunuyor.

## Kaynakça


Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., & others. (2016). TensorFlow: A system for large-scale machine learning. *Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16)*, 265-283.

Acquarelli, J., van Laarhoven, T., Gerretzen, J., Tran, T., Buydens, L. M., & Marchiori, E. (2017). Convolutional neural networks for vibrational spectroscopic data analysis. *Analytica Chimica Acta*, *954*, 22-31. https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.12.010

Balabin, R. M., & Lomakina, E. I. (2011). Support vector machine regression (SVR/LS-SVM)—An alternative to neural networks

(ANN) for analytical chemistry? Comparison of nonlinear methods on near infrared (NIR) spectroscopy data. *Analyst*, *136*(8), 1703-1712. https://doi.org/10.1039/c0an00387e

Barnes, R., Dhanoa, M., & Lister, S. (1989). Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy*, *43*(5), 772-777. https://doi.org/10.1366/0003702894202201

Bitra, V. S., Verma, S., & Rao, B. (2024). TinyML-Raman: A novel IoT based field-deployable spectra analysis for accurate identification of pharmaceuticals and trace dye-pesticide mixtures from facile SERS method. *Analytica Chimica Acta*, *1322*, 343063. https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343063

Bjerrum, E. J., Glahder, M., & Skov, T. (2017). Data augmentation of spectral data for convolutional neural network (CNN) based deep chemometrics. *arXiv preprint arXiv:1710.01927*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.01927

Borggaard, C., & Thodberg, H. H. (1992). Optimal minimal neural interpretation of spectra. *Analytical Chemistry*, *64*(5), 545-551. https://doi.org/10.1021/ac00029a018

Cawley, G. C., & Talbot, N. L. (2010). On over-fitting in model selection and subsequent selection bias in performance evaluation. *Journal of Machine Learning Research*, *11*, 2079-2107.

Cui, C., & Fearn, T. (2018). Modern practical convolutional neural

networks for multivariate regression: Applications to NIR calibration. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *182*, 9-20. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2018.07.008

Demšar, J. (2006). Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of Machine Learning Research*, *7*, 1-30.

Einarson, K., Baum, A., Olsen, T., Larsen, J., Armagan, I., Santacoloma, P., & Clemmensen, L. (2022). Predicting pectin performance strength using near-infrared spectroscopic data: A comparative evaluation of 1-D convolutional neural network, partial least squares, and ridge regression modeling. *Journal of Chemometrics*, *36*(2), e3348. https://doi.org/10.1002/cem.3348

Engel, J., Gerretzen, J., Szymańska, E., Jansen, J. J., Downey, G., Blanchet, L., & Buydens, L. M. (2013). Breaking with trends in pre-processing? *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *50*, 96-106. https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.04.015

Ezenarro, J., & Schorn-García, D. (2025). How are chemometric models validated? A systematic review of linear regression models for NIRS data in food analysis. *Journal of Chemometrics*, *39*(6), e70036. https://doi.org/10.1002/cem.70036

Fernández Pierna, J., & Dardenne, P. (2008). Soil parameter quantification by NIRS as a chemometric challenge at "Chimiométrie 2006". *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *91*(1), 94-98.

https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2007.06.007

Friedman, M. (1937). The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the American Statistical Association*, *32*(200), 675-701. https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522

Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, *6*(2), 65-70.

Kalivas, J. H. (1997). Two data sets of near infrared spectra. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *37*(2), 255-259. https://doi.org/10.1016/S0169-7439(97)00038-5

Kapoor, S., & Narayanan, A. (2023). Leakage and the reproducibility crisis in machine-learning-based science. *Patterns*, *4*(9), 100804. https://doi.org/10.1016/j.patter.2023.100804

Khan, Z., Yoon, S.-C., & Bhandarkar, S. (2025). Deep learning model compression and hardware acceleration for high-performance foreign material detection on poultry meat using NIR hyperspectral imaging. *Sensors*, *25*(3), 970. https://doi.org/10.3390/s25030970

Liebmann, B., Friedl, A., & Varmuza, K. (2009). Determination of glucose and ethanol in bioethanol production by near infrared spectroscopy and chemometrics. *Analytica Chimica Acta*, *642*(1–2), 171-178. https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.10.069

Mishra, P., & Passos, D. (2021). Deep chemometrics: Validation and transfer of a global deep near-infrared fruit model to use it on a

new portable instrument. *Journal of Chemometrics*, *35*(10), e3367. https://doi.org/10.1002/cem.3367

Mishra, P., Passos, D., Marini, F., Xu, J., Amigo, J., Gowen, A., Jansen, J., Biancolillo, A., Roger, J., Rutledge, D., & Nordon, A. (2022). Deep learning for near-infrared spectral data modelling: Hypes and benefits. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *157*, 116804. https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116804

Pasquini, C. (2018). Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives–A review. *Analytica Chimica Acta*, *1026*, 8-36. https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.04.004

Passos, D. (2026). Convolutional neural networks in Vis–NIR chemometrics: From contradiction to conditional design. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *203*, 119015. https://doi.org/10.1016/j.trac.2026.119015

Passos, D., & Mishra, P. (2022). A tutorial on automatic hyperparameter tuning of deep spectral modelling for regression and classification tasks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *223*, 104520. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104520

Passos, D., & Mishra, P. (2023). Deep Tutti Frutti: Exploring CNN architectures for dry matter prediction in fruit from multi-fruit near-infrared spectra. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *243*, 105023. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.105023

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., & others. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825-2830.

Rinnan, Å., van den Berg, F., & Engelsen, S. B. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *28*(10), 1201-1222. https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.07.007

Savitzky, A., & Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, *36*(8), 1627-1639. https://doi.org/10.1021/ac60214a047

Thissen, U., Pepers, M., Üstün, B., Melssen, W., & Buydens, L. M. (2004). Comparing support vector machines to PLS for spectral regression applications. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *73*(2), 169-179. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.01.002

Varma, S., & Simon, R. (2006). Bias in error estimation when using cross-validation for model selection. *BMC Bioinformatics*, *7*, 91. https://doi.org/10.1186/1471-2105-7-91

Walsh, J., Neupane, A., Koirala, A., Li, M., & Anderson, N. (2023). Review: The evolution of chemometrics coupled with near infrared spectroscopy for fruit quality evaluation. II. The rise of convolutional neural networks. *Journal of Near Infrared*

*Spectroscopy*, *31*(3), 109-125. https://doi.org/10.1177/09670335231173140

Westad, F., & Marini, F. (2015). Validation of chemometric models–A tutorial. *Analytica Chimica Acta*, *893*, 14-24. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.06.056

Wold, S., Sjöström, M., & Eriksson, L. (2001). PLS-regression: A basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *58*(2), 109-130. https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1

Yang, J., Xu, J., Zhang, X., Wu, C., Lin, T., & Ying, Y. (2019). Deep learning for vibrational spectral analysis: Recent progress and a practical guide. *Analytica Chimica Acta*, *1081*, 6-17. https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.06.012

Zhang, X., Lin, T., Xu, J., Luo, X., & Ying, Y. (2019). DeepSpectra: An end-to-end deep learning approach for quantitative spectral analysis. *Analytica Chimica Acta*, *1058*, 48-57. https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.01.002

Zhou, L., Tan, L., Zhang, C., Zhao, N., He, Y., & Qiu, Z. (2022). A portable NIR-system for mixture powdery food analysis using deep learning. *LWT*, *153*, 112456. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112456

## Ek Materyal

*Ek Tablo S1. İç çapraz doğrulamada seçilen ön işleme (10 bölmeden kaçında seçildiği: ham / SNV / SG birinci türev) ve PLS gizli değişken sayısı (ortanca, aralık).*

| Görev | PLS ham/SNV/SG1 | SVR ham/SNV/SG1 | PLS GD |
|---|---|---|---|
| Tecator – nem (%) | 0 / 10 / 0 | 0 / 9 / 1 | 10 (9–16) |
| Tecator – yağ (%) | 0 / 10 / 0 | 0 / 10 / 0 | 10 (8–14) |
| Tecator – protein (%) | 4 / 5 / 1 | 0 / 7 / 3 | 14 (12–19) |
| Benzin – oktan sayısı | 3 / 3 / 4 | 3 / 7 / 0 | 7 (5–9) |
| NIRsoil – Nt (g $kg^{-1}$) | 3 / 0 / 7 | 0 / 0 / 10 | 11 (8–14) |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | 5 / 0 / 5 | 0 / 0 / 10 | 16 (8–20) |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | 3 / 0 / 7 | 0 / 0 / 10 | 13 (9–20) |
| Fermantasyon – glikoz (g $L^{-1}$) | 1 / 7 / 2 | 2 / 0 / 8 | 20 (11–20) |
| Fermantasyon – etanol (g $L^{-1}$) | 0 / 3 / 7 | 0 / 3 / 7 | 14 (12–20) |

*Ek Tablo S2. 10 eşleştirilmiş bölmedeki RMSEP değerleri üzerinde iki yönlü Wilcoxon işaretli sıralar testleri.*

| Görev | Karşılaştırma | Ortanca fark | p | p (Holm) |
|---|---|---|---|---|
| Tecator – nem (%) | PLS – SVR | +1,114 | 0,0039 | 0,0117 |
| Tecator – nem (%) | PLS – CNN | +0,688 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – nem (%) | PLS – CNN-Aug | +0,750 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – nem (%) | SVR – CNN | -0,369 | 0,0840 | 0,1680 |
| Tecator – nem (%) | SVR – CNN-Aug | -0,315 | 0,1055 | 0,1680 |
| Tecator – nem (%) | CNN – CNN-Aug | +0,069 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – yağ (%) | PLS – SVR | +1,683 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – yağ (%) | PLS – CNN | +1,326 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – yağ (%) | PLS – CNN-Aug | +1,374 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – yağ (%) | SVR – CNN | -0,358 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – yağ (%) | SVR – CNN-Aug | -0,349 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – yağ (%) | CNN – CNN-Aug | +0,027 | 0,5566 | 0,5566 |
| Tecator – protein (%) | PLS – SVR | -0,007 | 0,5566 | 0,5566 |
| Tecator – protein (%) | PLS – CNN | -0,360 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – protein (%) | PLS – CNN-Aug | -0,260 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – protein (%) | SVR – CNN | -0,309 | 0,0020 | 0,0117 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Tecator – protein (%) | SVR – CNN-Aug | -0,226 | 0,0020 | 0,0117 |
| Tecator – protein (%) | CNN – CNN-Aug | +0,086 | 0,0059 | 0,0117 |
| Benzin – oktan sayısı | PLS – SVR | -0,062 | 0,0840 | 0,2578 |
| Benzin – oktan sayısı | PLS – CNN | -0,023 | 0,0645 | 0,2578 |
| Benzin – oktan sayısı | PLS – CNN-Aug | -0,075 | 0,0098 | 0,0586 |
| Benzin – oktan sayısı | SVR – CNN | +0,037 | 0,6250 | 0,6250 |
| Benzin – oktan sayısı | SVR – CNN-Aug | -0,018 | 0,2754 | 0,5508 |
| Benzin – oktan sayısı | CNN – CNN-Aug | -0,033 | 0,0137 | 0,0684 |
| NIRsoil – Nt (g kg⁻¹) | PLS – SVR | +0,086 | 0,0020 | 0,0117 |
| NIRsoil – Nt (g kg⁻¹) | PLS – CNN | -0,036 | 0,0840 | 0,2520 |
| NIRsoil – Nt (g kg⁻¹) | PLS – CNN-Aug | -0,018 | 0,6250 | 0,6250 |
| NIRsoil – Nt (g kg⁻¹) | SVR – CNN | -0,124 | 0,0020 | 0,0117 |
| NIRsoil – Nt (g kg⁻¹) | SVR – CNN-Aug | -0,090 | 0,0098 | 0,0391 |
| NIRsoil – Nt (g kg⁻¹) | CNN – CNN-Aug | +0,032 | 0,1055 | 0,2520 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | PLS – SVR | +0,307 | 0,0020 | 0,0117 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | PLS – CNN | +0,088 | 0,0039 | 0,0156 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | PLS – CNN-Aug | +0,194 | 0,0020 | 0,0117 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | SVR – CNN | -0,170 | 0,0098 | 0,0293 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | SVR – CNN-Aug | -0,093 | 0,0488 | 0,0742 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | CNN – CNN-Aug | +0,070 | 0,0371 | 0,0742 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | PLS – SVR | +0,293 | 0,0273 | 0,0820 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | PLS – CNN | -0,675 | 0,0039 | 0,0195 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | PLS – CNN-Aug | -0,070 | 0,0840 | 0,0977 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | SVR – CNN | -0,970 | 0,0020 | 0,0117 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | SVR – CNN-Aug | -0,672 | 0,0098 | 0,0391 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | CNN – CNN-Aug | +0,239 | 0,0488 | 0,0977 |
| Fermantasyon – glikoz (g L⁻¹) | PLS – SVR | +1,546 | 0,0020 | 0,0117 |
| Fermantasyon – glikoz (g L⁻¹) | PLS – CNN | +1,008 | 0,0273 | 0,1367 |
| Fermantasyon – glikoz (g L⁻¹) | PLS – CNN-Aug | +0,662 | 0,0371 | 0,1484 |
| Fermantasyon – glikoz (g L⁻¹) | SVR – CNN | -0,280 | 0,1602 | 0,3203 |
| Fermantasyon – glikoz (g L⁻¹) | SVR – CNN-Aug | -0,543 | 0,0840 | 0,2520 |
| Fermantasyon – glikoz (g L⁻¹) | CNN – CNN-Aug | -0,088 | 0,5566 | 0,5566 |
| Fermantasyon – etanol (g L⁻¹) | PLS – SVR | +0,196 | 0,0039 | 0,0156 |
| Fermantasyon – etanol (g L⁻¹) | PLS – CNN | +0,028 | 0,8457 | 0,8457 |
| Fermantasyon – etanol (g L⁻¹) | PLS – CNN-Aug | -0,040 | 0,3223 | 0,8262 |
| Fermantasyon – etanol (g L⁻¹) | SVR – CNN | -0,281 | 0,0020 | 0,0117 |
| Fermantasyon – etanol (g L⁻¹) | SVR – CNN-Aug | -0,284 | 0,0020 | 0,0117 |
| Fermantasyon – etanol (g L⁻¹) | CNN – CNN-Aug | -0,142 | 0,2754 | 0,8262 |

*Ek Tablo S3. Her modelin en düşük test RMSEP'ini verdiği tekrarlı bölme sayısı (10 üzerinden).*

| Görev | PLS | SVR | CNN | CNN-Aug |
|---|---|---|---|---|
| Tecator – nem (%) | 0 | 8 | 0 | 2 |
| Tecator – yağ (%) | 0 | 10 | 0 | 0 |
| Tecator – protein (%) | 6 | 4 | 0 | 0 |
| Benzin – oktan sayısı | 7 | 2 | 1 | 0 |
| NIRsoil – Nt (g $kg^{-1}$) | 0 | 9 | 0 | 1 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | 0 | 8 | 2 | 0 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | 1 | 9 | 0 | 0 |
| Fermantasyon – glikoz (g $L^{-1}$) | 0 | 5 | 2 | 3 |
| Fermantasyon – etanol (g $L^{-1}$) | 1 | 9 | 0 | 0 |

*Ek Tablo S4. PLS'in en yüksek gizli değişken sayısına duyarlılığı*

| Görev | PLS ≤20 GD | PLS ≤30 GD | GD (≤30) | >20 bölme | GD | SVR |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tecator – nem (%) | 2,007 | 2,208 | 10 (9–28) | 1 | | 0,969 |
| Tecator – yağ (%) | 2,350 | 2,350 | 10 (8–14) | 0 | | 0,629 |
| Tecator – protein (%) | 0,721 | 0,721 | 14 (12–19) | 0 | | 0,745 |
| Benzin – oktan sayısı | 0,267 | 0,267 | 7 (5–9) | 0 | | 0,311 |
| NIRsoil – Nt (g $kg^{-1}$) | 0,575 | 0,575 | 11 (8–14) | 0 | | 0,482 |
| NIRsoil – Ciso (g/100 g) | 0,987 | 0,947 | 20 (10–25) | 5 | | 0,695 |
| NIRsoil – KDK (meq/100 g) | 3,496 | 3,692 | 16 (9–27) | 3 | | 3,099 |
| Fermantasyon – glikoz (g $L^{-1}$) | 5,911 | 5,937 | 22 (11–26) | 8 | | 4,319 |
| Fermantasyon – etanol (g $L^{-1}$) | 1,494 | 1,513 | 14 (12–22) | 2 | | 1,264 |

# BÖLÜM 4

# YEŞİL ADSORBENTLERİN MODİFİKASYONU VE KULLANIMLARI

**SUAT KAHYA**[1]

## Giriş

Doğal polimerler olarak adlandırdığımız polisakkaritler, polipeptitler ve nükleik asitler biyolojik sistemlerin bileşenlerindendir ve doğada önemli görevleri yerine getirirler (Troy et al., 2021). Selüloz ve proteinler gibi doğal polimerler, bitki ve hayvan hücrelerinin yapısal bütünlüğünün korunmasında etkilidir (Joanna et al., 2019). Hemoglobin gibi bazı doğal polimerler vücudumuzda oksijen taşınmasını sağlar (Marc et al., 2019). Nişasta, selüloz, lignin, kitin, kitosan ve polipeptit; yenilenebilir, biyobozunur (doğada çözünebilir) toksik olmayan, ucuz ve bol miktarda bulunan doğal polimerlerdir. Doğal polimerlerde bulunan aktif fonksiyonel gruplar, modifiye eden unsurlar ile bağ kurma kabiliyetine sahiptir. Bununla beraber, bu aktif fonksiyonel gruplar, diğer grupların yada moleküllerin doğal polimer yapısına aşılanması

[1] Dr. Öğretim Üyesi, Aksaray Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü, Orcid: 0000-0002 -1660-5771.

(grafting) için elverişlidir; böylece polimer malzemelerin özellikleri geliştirilmiş olur (George et al., 2019).

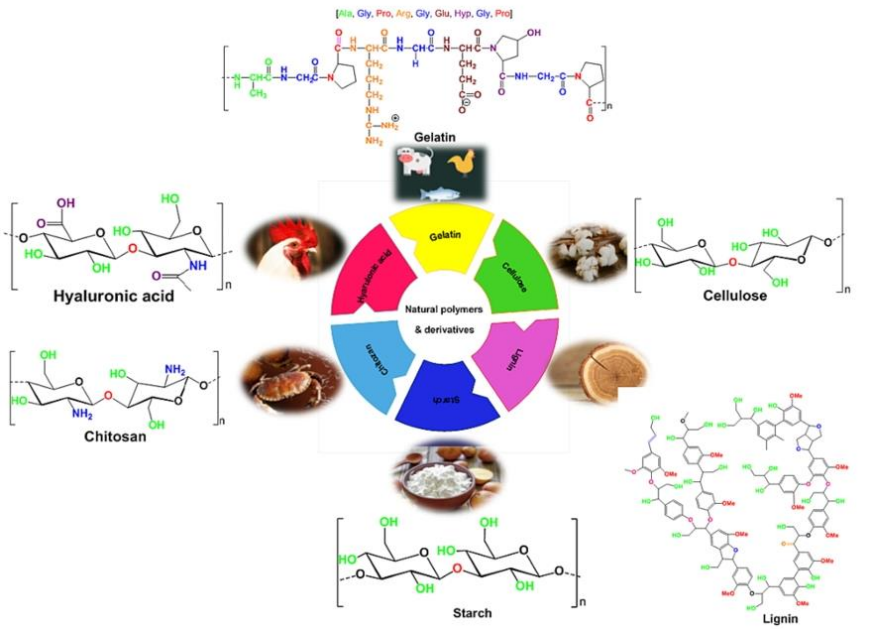
Doğal polimerler; bitki, hayvan ve mikroorganizmaların büyümesinde, gelişmesinde, üremesinde ve metabolizma sürecinde oluşan biyopolimerlerdir (Eloisa, 2007). Bu bakımdan, doğal polimerleri kaynağına göre şu şekilde ayırmamız mümkündür: Bitkilerin gelişimi sırasında oluşanlar (selüloz, nişasta, lignin, pektin vb.); hayvansal biyopolimerler (proteinler, nükleik asitler, kitin, hiyalüronik asit, kolajen vb.) ve mikroorganizma kökenliler (aljinat, dekstran vb.). İlaveten, kimyasal bileşimlerine ve yapılarına göre doğal polimerleri genel gruplara ayırabiliriz: Polisakkaritler, proteinler, nükleik asitler, poliesterler, poliamidler. Bu doğal polimerler, aktivitelerini tamamlarlar ve yeryüzündeki canlıların katılımı ile biyobozunmaya uğrar (biyolojik olarak parçalanma). Neticede, canlı organizmalara zarar vermeyen, potansiyel olarak faydalı olabilecek besin bileşenlerine dönüşürler. Başka bir ifadeyle, doğal polimerlerin oluşumu, çoğalması ve biyolojik olarak parçalanması doğa için çok yararlıdır (Emma et al., 2021). Bileşimine göre, doğal polimerlerin biyobozunma süresi 100 ile 300 gün arasında değişir; bu durum bize, sentetik polimerlerden 100 kat daha az zamanda olduğunu gösterir. Dahası, doğal polimerler biyolojik olarak parçalandığında doğaya zararlı maddeler meydana gelmez (Emma et al., 2021).

Günümüze geldiğimizde, çevreye daha az zarar veren biyokütle temelli adsorbentlerin (biyosorbanların) sentezlenmesi, günlük yaşantımızın daha sürdürülebilir olmasına katkı sağlayacaktır. Doğal polimerler, belirli seviyede sorpsiyon (tutma) özelliklerine sahip uygun adsorbentlerdir. Farklı iyonları, organik bileşikleri ve biyolojik olarak aktif olan bileşikleri kimyasal ve fiziksel etkileşimler yardımıyla adsorbe ederler. Modifiye edilmemiş biyosorbanların sorpsiyon kapasitesinin görece düşük olması nedeniyle, doğal polimerlerin farklı yöntemlerle modifikasyonuyla

yüksek sorpsiyon kapasitesine sahip "fonksiyonel yeşil adsorbentler" olarak kullanılması daha etkili olmaktadır. Doğal polimerlerin adsorpsiyon özelliklerini artırmak ve seçici sorpsiyon özellikleri geliştirmek için bazı fiziksel ve kimyasal modifikasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında, fonksiyonel biyopolimerlerin eldesi ve yeşil biyoadsorbentlerin işlevini artırmak için oksidasyon, aşılama (grafting), asetilasyon, çapraz bağlama, ikili modifikasyon, asit ve alkali ile işlem, sililleme, esterleşme gibi çeşitli kimyasal yöntemler vardır (Hokkanen et al., 2016). Bu yöntemlerin uygulanmasıyla, doğal polimerlerin morfolojik ve yapısal değişiklikler kazanması mümkündür (Hemavathy et al., 2019). Doğal polimer malzemeler, morfolojik modifikasyonlar sonucu kristal yapıdan amorf yapıya geçme, makromoleküllerin supramoleküler yapılarının oluşması ve yüksek mezo- ve mikro gözenekli yapıların oluşuması gibi değişimlere uğrarlar. Doğal polimerlerin bahsettiğimiz bu yöntemlerle işlenmesinden sonra, yeni fonksiyonel gruplar meydana gelir ve çapraz bağlanma ile ağ yapısı gelişimi gözlenir. Bu şekilde, yeşil adsorbentlerin seçiciliği, sorpsiyon kapasitesi, termal, kimyasal ve mekanik kararlılığını arttırmış oluruz. Meyve atıkları (Thirumavalavan et al., 2010), şeker kamışı atıkları (Osvaldo et al., 2007), çay yaprakları (Mahvi et al., 2005), bitkiler (Basso et al., 2002) ve tarımsal atıklar (Moussavi & Khosravi, 2010) gibi çeşitli biyoatıklar doğal polimer olmalarından dolayı, yeşil sorbentlerin geliştirilmesi amacıyla kullanılabilir. Doğada bol bulunur olma, çevre dostu olma, fazla işlem gerektirmeme veya hiç işlem gerektirmeme ve diğer endüstrilerden geriye kalan bir atık malzeme veya yan ürün olma durumunda, doğal polimer bazlı yeşil sorbentler düşük maliyetli olarak değerlendirebilir (Gadd, 2009). Farklı yöntemlerle modifikasyonla oluşturulan yeşil adsorbentler, sentetik adsorbentlere kıyasla daha çevreci olarak kabul edilmektedir. Bunun çeşitli nedenleri vardır; i) Adsorbentin ana matrisi, doğal polimer olduğundan çevre üzerinde hemen hemen olumsuz etkisi yoktur. ii) Modifikasyon sonucunda

düzenleyici ajan (modifiyer), doğal polimerin makromolekülüne kovalent bağ ile bağlanır; bu yüzden dış etkiler sonucu salınma tehlikesi yoktur. iii) Doğal polimerlerin modifikasyonunda kullanılan düzenleyici ajanlar temelde doğal kökenli bileşiklerdir (örneğin sitrik asit, üre, laktik asit, maleik asit, vb.) ve daha da önemlisi, diğer düzenleyici ajanların doğal polimer makromolekülüne katılmasıyla toksisitede (zehirlilik) azalma görülür. Genelde, doğal polimerlerin temel alınarak sentezlenmesiyle elde edilen biyosorbanları, yeşil kimyanın 12 temel ilkesine uygun olması nedeniyle, "yeşil adsorbentler" olarak adlandırmamız mümkündür (Anastas & Warner, 2000). Bazı doğal polimerler, kaynakları ve yapıları Şekil 1 ile verilmiştir (Bekchanov et al., 2024).

*Şekil 1. Bazı doğal polimerler, kaynakları ve yapıları*




*Kaynak: (Bekchanov et al., 2024)*

## Yeşil Adsorbanların Özellikleri, Sentezi ve Uygulamaları

Tarımsal atıklar, meyve-sebze kabukları, orman atıkları, alg biyokütlesi, fungal biyokütle ve su ürünleri gibi çok sayıda doğal menşeili atıklar son zamanlarda pek çok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Deng & Ting, 2005; Yun et al., 2001). Sıkça kullanılan doğal yeşil adsorbanlar yenilenebilir, düşük maliyetli ve çevre dostu (ecofriendly) olmaları yanında kullanım, taşınma ve işlenme ile ilgili problemlere neden olmaz (Ahmed, 2011; Chen et al., 2010). Doğal polimerleri doğrudan adsorban olarak kullanılabiliriz, ancak bunların adsorpsiyon kapasitesinin düşüklüğü, kimyasal ve mekanik kararlılıklarının zayıflığı nedeniyle, farklı aktif iyonojenik gruplar içeren düşük ve yüksek moleküler ağırlıklı modifiye ediciler kullanılarak modifikasyonu yapılabilmektedir.

Organik ortamda, sulu çözelti ve süspansiyonlarda, şişmiş halde, eriyik içerisinde, çözücü-çözücü olmayan (solvent-nonsolvent) sistemlerde ve katıların mekanik etkisi altında, homojen ve heterojen işlemlerde doğal polimerlerin kimyasal modifikasyon reaksiyonları ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Çözelti ortamında, sürecin ilerleyişini etkileyen faktörler; nükleofilin tabiatı, çözücü doğası, süre ve reaksiyon sıcaklığıdır (Gericke, Fardim, Heinze, 2012; Ian, 2013).

## Selüloz Esaslı Yeşil Adsorbanlar

Selüloz, bitki hücre duvarının temel bileşeni olup fotosentetik canlıların biyokütlesini oluşturur ve bu bakımdan dünyada en bol bulunan polimerdir. Pamuk, ahşap, tekstil, jüt, kenevir, şeker pancarı posası, tahıl sapları, keten ve mikrobiyolojik yöntemlerle kolayca ve bolca temin edilmektedir. Selüloz; tekstil, kağıt ve gıda endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptir. Bitkilerin yanında mikroskobik organizmalar, algler (yeşil algler) ve deniz canlıları da selülozun farklı kaynakları arasındadır. Selüloz, suda çözünmez ve düşük şişme davranışı gösterir. Homojen ve heterojen

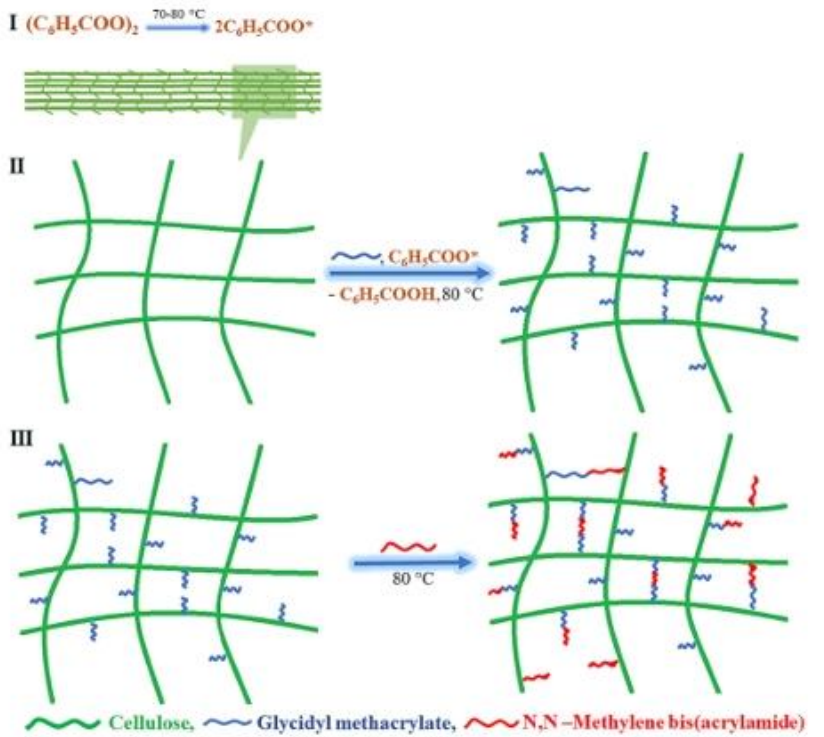
koşullarda selüloz, kimyasal olarak modifiye edilebilir. Selüloz, suda ve diğer birçok organik çözücüde çözünmez, bu nedenle çözücü karışımlarının kullanılması gerekir. Selüloz makromolekülleri, yüksek yoğunlukta hidroksil gruplarına sahiptir ve bu gruplar homojen ve heterojen koşullar altında oksidasyon, eterleşme, esterleşme, aşı (grafting) kopolimerizasyonu ve diğer kimyasal modifikasyon reaksiyonlarıyla yeni fonksiyonel polimerlerin sentezlenmesinde kullanılabilir (Hokkanen et al., 2016).

Adina ve arkadaşları 2018 yılında, çevre dostu bir biyosorban elde etmek için selülozu tiyoüre ile kimyasal olarak modifiye etmişlerdir. Sentezlenen biyosorbanın yüksek bir sübstitüsyon (yer değiştirme) derecesine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) teknikleri yardımıyla sentezlenen biyosorbanın bileşimini ve yapısını incelemişler ve modifiye edilmiş biyosorbanın oluşumu kanıtlamışlardır (Adina et al., 2018). Bunun yanında, kullanılan biyosorbanın, nadir toprak elementlerinin metal iyonlarına (örneğin Ne (III) ve Eu (III)) karşı seçicilik özelliğinin olduğunu saptamışlardır. Diğer bir çalışmada (Gurgel et al., 2009), anyon değiştirici malzeme elde etmek amacıyla merserize selüloz ile süksinik anhidriti, trietilentetraminin olduğu ortamda kimyasal olarak modifiye etmiştir. Bunun için selüloz, sentezlenen anyon değiştirici malzemedeki amino gruplarının bazikliğini artırmak için, $CH_3I$ varlığında metil iyodürleme reaksiyonu yapılarak kuaterner (dördüncül) amino gruplarının sentezi sağlanmıştır.

Modifiye edilmiş selüloz, toksik metal iyonlarının uzaklaştırılmasında biyoadsorban olarak kullanılmaktadır. Selüloz, maleik anhidrit ile modifiye edilerek atık sulardan $Hg^{2+}$ iyonlarının uzaklaştırılmasında kullanılmıştır (Zhou et al., 2012; Zhou et al., 2014). Sentezlenen biyoadsorban, $Hg^{2+}$ iyonlarını 172.5 mg/g gibi büyük bir adsorpsiyon kapasitesi ile adsorplamıştır.

Selüloz esaslı yeşil iyon değiştirici malzemeler, polimerizasyon reaksiyonları ile de gerçekleştirilebilir. Bazı bilimsel çalışmalarda (Anirudhan & Jalajamony, 2010; Anirudhan, Nima, Divya, 2013a, 2013b), iyonojenik fonksiyonel gruplara sahip monomerler selüloza aşı (gtafting) polimerizasyon uygulanarak yeşil adsorbanlar sentezlenmiştir. Yeşil adsorban sentezi için başlatıcı olarak benzoil peroksit, monomer olarak ise N,N'-metilen-bis(akrilamid) ve glisidil metakrilat (GMA) kullanmışlardır (Şekil 2). Aşılanmış selülozun yapısına ek bir amino grubu katmak için, asidik koşullarda dimetilamin ile modifikasyon gerçekleştirilmiştir.

*Şekil 2. Selülozun, glisidil metakrilat ve N,N'-Metilenbis(akrilamid) ile aşı kopolimerizasyonu*




*Kaynak: (Bekchanov et al., 2024)*

Adsorbanlar için rejenere edilebilirlik (yeniden aktif hale getirilebilme) ve tekrar kullanılabilirlik önemlidir. Doğal polimerler kullanılarak elde edilen yeşil adsorbanların, sentetik polimer esaslı iyon değiştirici reçineler gibi çoklu kullanım özelliklerine sahip olmaları gerekir. Yapılan çalışmalarda, yeşil adsorbanların yeniden kullanılabilirliğinin genelde 3 ila 30 döngü arasında tekrarlanarak başarıyla gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Yeşil adsorbanlar üzerinde adsorbe edilen madde türüne göre, rejenerasyon işlemi alkali çözeltiler (başlıca KOH, NaOH, $NH_3$ vb.) veya asit çözeltileri (başlıca HCl, $H_2SO_4$, $HNO_3$, $CH_3COOH$ vb.) ile gerçekleştirilir.

Rejenerasyon ile adsorbanın yeniden kullanım döngüsünün yüksek olması, bu adsorbanın tüm önemli gereksinimleri karşılayan termal, kimyasal ve mekanik kararlılığının da yüksek olmasına katkı sağlar. Rejenerasyon için en yaygın kullanılan yeşil adsorban, selülozun polietilenimin ve epiklorohidrin ile modifiye edilmesiyle elde edilen CNF/PEI adsorbanıdır (Zhang et al., 2022). Bu adsorban, 30 kez yeniden kullanılsa dahi, adsorpsiyon özelliği hemen hemen değişmeden kalmıştır.

**Nişasta Esaslı Yeşil Adsorbanlar ve Özellikleri**

Nişasta, doğal koşullarda α-glukozun polikondenzasyonu ile oluşan, akışkan toz formunda doğal bir polisakkarittir. Bu polisakkarit, yapısal olarak birbirinden farklı olan amiloz ve amilopektin gibi iki bileşene sahiptir. Nişastada bulunan amiloz ve amilopektin miktarı, elde edilen bitkinin türüne bağlıdır. Nişasta suda ve diğer sıvılarda çözünmez, ancak su içinde ısıtıldığında geri dönüşümsüz olarak parçalanabilir ki, bu olaya jelatinleşme (çirişlenme) denir. Nişastadaki amiloz doğrusal (lineer), amilopektin ise dallanmış bir yapıya sahiptir. Nişastadaki amiloz miktarı ne kadar fazlaysa, nişastanın jelatinleşme eğilimi de o kadar fazla olur. Son yıllarda, çeşitli yeni yöntemler kullanılarak nişasta modifiye edilerek, yeni fonksiyonel özelliklerde polimer malzemeler

sentezlenmiştir. Modifiye polimer malzemeler, ilaçtan tekstil endüstrisine kadar farklı sektörlerde sıkça kullanılmaktadır Yeni fonksiyonel polimer malzemeler, nişastanın dört farklı şekilde modifiye edilmesiyle sentezlenir: fiziksel, kimyasal, enzimatik ve genetik mühendisliği (Benavent & Rosell, 2017; Lyytikainen et al., 2018).

Nişasta esaslı fonksiyonel polimerler, nişasta makromolekülündeki hidroksil gruplarının modifiye edilmesiyle sentezlenir. Hidroksil grupları, nişasta makromoleküllerindeki her bir monomer halkasının 2., 3. ve 6. karbon atomlarına bağlıdır ve nişasta için sık kullanılan modifikasyon yöntemleri esterleşme ve eterleşme, katyonizasyon, oksidasyon ve çapraz bağlamadır.

Doğal polimerleri modifiye etmede yaygın bir yöntem; iyonojenik fonksiyonel gruplar içeren monomerlerin, radikal polimerizasyon ile doğal polimerlere aşılanmasıdır. Başlatıcıların katılımıyla doğal polimere bir monomer aşılanır; sonrasında kalan monomerler, aşılanan monomer ile istenen oranda polimerleştirilerek farklı özelliklere sahip yeni fonksiyonel polimer sentezlenir. Ce (IV) iyonları varlığında hidrolize nişastaya önce akrilik asit monomeri aşılanmış, ardından aşı polimere akrilik asit ile radikal polimerizasyon yapılarak nişasta-g-poliakrilik asit kopolimeri sentezlenmiştir (Ekebafe et al., 2018). Sentezlenen adsorbanlar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendiğinde, orijinal nişastaya göre gözenekli ve pürüzlü bir dokuya sahip oldukları belirlenmiştir. Ayrıca, FTIR kullanılarak sentezlenen adsorbanda oluşan yeni kimyasal bağlar tanımlanmış ve termogravimetrik analiz (TGA) ile sentezlenen adsorbanın termal kararlılığının orijinal nişastaya kıyasla daha yüksek (250–300 °C) olduğu bulunmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde, nişasta-g-polyakrilonitril sentezlenmiştir. Aşı polimerizasyon ile sentezlenen polimer malzemelerde karboksil ve nitril gruplarının varolması, elde edilen malzemelere belirli fonksiyonel özellikler kazandırmıştır.

Elde edilen bu malzeme atık suların Pb (II) iyonlarından arındırılmasında kullanılmış ve adsorbanların adsorpsiyon kapasitesi, nişasta-g-poli(akrilik) asit için 118.61 mg/g, nişasta-g-poli(akrilonitril) için ise 115.83 mg/g olarak bulunmuştur.

Diğer çalışmada ise (Ghamry & Abdelmonem, 2022), akrilik asit ve vinilsülfonik asit radyasyon polimerizasyonu ile nişastaya aşılanmış ve nişasta-g-poli(akrilik asit)-poli(vinilsülfonik asit) (St-g-PAA-PVSA) kopolimeri sentezlenmiştir. Hidroksil ve hidrojen radikalleri ile elektronize su radikalleri üretmek için önce suya gama ışınları uygulanmış (radyasyon verilmiş) sonra reaktifler reaksiyon sistemine eklenmiştir. Bu işlem sonucu oluşan makroradikal çözeltide kalan monomerlere saldırarak aşılama reaksiyonunu gerçekleştirmiş ve St-g-PAA-PVSA kopolimeri meydana gelmiştir. Sentezlenen adsorbanların radyoaktif Co (kobalt) ve Eu (evropiyum) izotoplarını sorpsiyonu incelenmiş ve adsorbanın sırasıyla 104.8 mg/g Co ve 209.9 mg/g Eu metal iyonunu absorbe ettiği saptanmıştır.

"Yeşil" hidrojel adsorbentlerin hazırlanmasında kullanılan nişasta, ucuz, çevre dostu ve yenilenebilir ham maddedir. 2020 yılında Hend ve Enas, akrilik asit ve akrilamid ile nişastayı radikal polimerizasyonu yöntemiyle aşılamıştır. Bunun için, patatesten elde edilen nişastayı potasyum persülfat ($K_2S_2O_8$) başlatıcısı ile karıştırmış ve aşı kopolimerinin makromoleküllerini bağlamak (çapraz bağ oluşturmak) için metilenbisakrilamid kullanmıştır. Elde edilen fonksiyonelleştirilmiş kopolimer; şelat oluşturabilen amino ve karboksil grupları içermekte olup hem anyonlara hem de katyonlara karşı yüksek seçici sorpsiyon özelliklerine sahiptir. Sentezlenen adsorbentin adsorpsiyon özelliklerini incelemek amacıyla, malahit yeşili (MG) boyasının sorpsiyonu çalışılmış ve hidrojel süperadsorbentin 59.5 mg/g adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu, adsorbent üzerinde 5 döngü boyunca MG boyasının

sorpsiyon ve desorpsiyon işlemleri yapılabildiğini rapor etmişlerdir (Hend & Enas, 2020).

Taweekarn ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bir diğer çalışmada karboksillenmiş nişastadan bir hidrojel sentezlenmiştir. Saflaştırılmış nişasta, glutaraldehit varlığında asidik bir ortamda hidroliz edilerek rafine bir hidrojel elde edilmiştir. Sentezlenen hidrojel, metilen mavisi (MB) boyasının gideriminde kullanılmış ve 34.84 mg/g oranında MB boyasının adsorbe edildiği gözlemlenmiştir (Taweekarn et al., 2022).

Atık su arıtımı ve nadir metal iyonlarını ayrıştırmak için, nişasta bazlı hidrojeller birincil ve ikincil amin, karboksilik, fosfat veya sülfonik asit gibi fonksiyonel grupların eklenmesiyle modifiye edilebilir ve çeşitli iyonlara karşı adsorpsiyon kapasiteleri artırılabilir (Luo et al., 2021). Farag ve arkadaşları 2018 yılında, radyasyonla başlatılan aşı polimerizasyonuyla nişasta bazlı bifonksiyonel bir hidrojel sentezlemiştir. 2-akrilamido propan sülfonik asit ve dimetilaminoetil metakrilat kopolimer, benzoil klorür başlatıcısı kullanılarak nişasta üzerine aşılanmıştır. Fonksiyonelleştirilmiş adsorbent; astrazon kırmızısı organik boyasını, kobalt iyonlarını ve fosfatları sırasıyla maksimum 600 mg/g, 426–350 mg/g ve 650 mg/g adsorpsiyon kapasiteleriyle etkin bir şekilde uzaklaştırmıştır (Farag et al., 2018).

Nişasta bazlı modifiye nanokompozit malzemeler, basit polimer malzemelere kıyasla çok fonksiyonlu özelliklere sahiptir. Bu tür malzemeler, nişastanın organik ve inorganik maddelerle modifiye edilmesiyle sentezlenir. (Mohamed & Mahmoud, 2020a, 2020b), araştırmacılar nişasta bazlı manyetik tepkili bir nanokompozit adsorbent sentezlemişler ve nanokompozit malzemenin, **2.9 nm** gözenek boyutuna ve **528.4 m²/g** gibi yüksek bir yüzey alanına sahip mezogözenekli bir yapıya sahip olduğu belirlemişlerdir. Sentezlenen nanoadsorbent, fluvastatin içeren ilaç sanayisi atık sularını **782.05**

**mg/g** gibi daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi ile arıtmıştır. Aynı araştırmacılar, sentezlenen yeşil nanoadsorbenti kullanarak atık suların toksik ilaçlardan ve Cr (VI) iyonlarından arındırılması üzerine bir çalışma yürütmüştür. Bu yeşil adsorbent, toksik naproksen ilacı ve Cr (VI) iyonları içeren atık suları sırasıyla **420.13 mg/g** ve **309.82 mg/g** adsorbe etmiştir.

## Kitin ve Kitosan Bazlı Yeşil Adsorbentler ve Özellikleri

Kitin, doğal koşullar altında canlı organizmaların büyümesi sırasında oluşur ve çoğunlukla doğal yenilenebilir ham maddelerden olmak üzere yılda $1 \times 10^{10}$ ila $1 \times 10^{12}$ ton arasında üretilir (Varun et al., 2017). Dünyada çevre dostu kitin üretimi için yeterli ham madde mevcuttur. Diğer polisakkaritlerden farklı olarak kitin, asetamid fonksiyonel grubu içeren bir polimerdir ve böcekler, kın kanatlılar, planktonlar, yengeçler gibi omurgasız canlıların kitinli dış iskeletinde ve miselyum yapısına sahip çeşitli canlılarda bulunur. Biyobozunur, çevre dostu ve yenilenebilir bir malzemedir (Chokradjaroen et al., 2018). Fonksiyonel grup ve fizikokimyasal özellik bakımından kitin ve kitosan birbirinden ayrılır. Kitin hidrofobik, kitosan ise nispeten hidrofiliktir ve suda iyi şişer. Kitin ve kitosan doğal hallerinde kimyasal olarak aktif fonksiyonel grupları korurlar ve bu fonksiyonel gruplar sayesinde kitin ve kitosan, modifiye edilmeden de atık suların toksik metal iyonlarından, organik boyalardan, antibiyotiklerden, polifenollerden, diğer toksik maddelerden ve hatta mikroorganizmalardan temizlenmesinde "yeşil adsorbentler" olarak kullanılabilir. Ayrıca, kitosanın modifiye edilmesiyle adsorpsiyon, fizikokimyasal ve mekanik özellikleri ile kimyasal ve termal kararlılığı daha da artırılabilmektedir. Kitosan hem amino hem de karboksil grupları içerdiğinden, koşullara bağlı olarak hem asidik hem de bazik özelliklere sahiptir. Bu bakımdan, kitosan pH'a duyarlı akıllı bir malzemedir (Huang et al., 2019).

He ve arkadaşları 2015 yılında yapılan bir çalışmada, izopropil alkol karışımına monokloroasetik asit ekleyerek kitosanı modifiye etmişlerdir. Sentezlenen O-CMCS'ye linkomisin adsorbe edilerek, antibakteriyel özelliklere sahip bir hidrojel sentezlenmiştir (He et al., 2015). Popa ve arkadaşları (2021), kitosan makromolekülünü fosforik asit ile işleme tabi tutarak amino ve fosforik gruplar içeren bir polimer sentezlemiştir. Asidik bir çözelti içinde ıslatılmış kitosan, propan aldehit varlığında fosforik asit ile işleme tabi tutulmuş ve azot ile fosfor içeren fonksiyonel bir polimer elde edilmiş ve bu malzeme kullanılarak, atık sular Pb (II) iyonlarından etkili bir şekilde temizlenmiştir (Popa et al., 2021).

Kitosan bazlı, çapraz bağlı polimer malzemeleri elde etmenin birkaç yolu mevcuttur. Chen ve çalışma arkadaşları (Chen et al., 2009), glutaraldehit varlığında kitosanı çapraz bağlayarak bir polimer malzeme elde etmişler ve çeşitli metal iyonlarının sentezlenen bu adsorbent üzerindeki adsorpsiyonu incelemişlerdir. Metal iyonlarının adsorbente sorpsiyon mekanizması; yalancı birinci derece (pseudo-first order) ve yalancı ikinci derece (pseudo-second order) kinetik modellerinin yanında Langmuir, Freundlich ve Dubinin-Radushkevich izoterm modelleri incelenerek belirlenmiştir. Metal iyonlarının adsorbente sorpsiyonunun, yalancı ikinci derece kinetik modele ve Langmuir izoterm modeline uyduğunu belirlemişlerdir. Bir başka araştırmada (Haojin et al., 2022), polietilen glikol ve formaldehit varlığında kitosanı çapraz bağlayarak yüksek adsorpsiyon özelliklerine sahip çapraz bağlı kitosan sentezlemişler ve elde edilen adsorbentin, Reaktif Kırmızı 2 (RR2) boyasına karşı yüksek sorpsiyon özellikleri gösterdiğini bildirmişlerdir. 1 g adsorbentin atık sudan 2334.8 mg RR2 boyasını adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırarak atık suyu etkili bir şekilde temizlediğini gözlemlemişlerdir.

Yapılmış olan araştırmalar, aşı kopolimerizasyonu ile modifiye edilen kitosanın, geliştirilmiş adsorpsiyon özelliklerine

sahip biyopolimerler ürettiğini göstermiştir. Böyle bir modifikasyon reaksiyonu, polimer malzemenin polimerizasyon derecesinde bir artışla beraber gerçekleşir. Yapılan bir araştırmada, %40 deasetillenmiş kitosan, akrilonitril varlığında radyasyon polimerizasyonu ile aşılanmıştır. Aşılanmış kitosan-poliakrilonitril (CS-g-PAN), çözeltideki As (III) (Arsenik) iyonlarını adsorplamak için adsorbent olarak kullanılmıştır. Bu adsorbent, As (III) iyonlarını 19.724 mg/g değeri ile adsorbe etmiştir (Hanh et al., 2015). Başka bir çalışmada, başlatıcı olarak potasyum persülfat kullanılarak, akrilamid varlığında kitosan, aşı kopolimerizasyonu ile amino ve amit grupları içeren bir aşı kopolimer (CS-g-Poliakrilamid) elde edilmiştir. Adsorpsiyon çalışmalarıyla, CS-g-Poliakrilamid adsorbentinin 62.12 mg/g Cu (II) iyonu adsorbladığı gözlemlenmiştir (Al-Karawi et al., 2011).

Kitosan, selülozdan sonra en yaygın olarak üretilen polimerdir ve çok fonksiyonlu özelliklere sahiptir. Bu nedenle, kitosan bazlı nanokompozit malzemelerin sentezi ve pratik uygulamalarıyla ilgili bilimsel çalışmalar geniş çapta yapılmaktadır. Glutaraldehit varlığında kitosan, $Fe_3O_4$ ile çapraz bağlanarak manyetik özelliklere sahip granüler bir malzeme sentezlenmişir. Bu adsorbent, fonksiyonel polimerin tetraetilenpentamin ile modifiye edilmesiyle elde edilmiştir. Sentezlenen bu nanokompozit adsorbent kullanarak çözeltideki $UO_2^{2+}$ (Uranil) iyonlarının adsorpsiyonu incelenmiş ve çözelti pH'ı 4 ve sıcaklık 25 °C olduğunda, maksimum 1.8 mmol/g miktarında $UO_2^{2+}$ iyonu adsorbe edildiği belirlenmiştir (Elwakeel ve ark., 2014).

Aktif karbonlar ve sentetik adsorbanlar atık suların arıtılmasında etkili olmakla birlikte, sentetik polimerlerin içerdiği düşük molekül ağırlıklı kimyasal bileşikler su sistemlerini yeniden kirletebilmektedir. Ayrıca, kullanılmış adsorbanların dış ortamda birikmesi doğaya önemli ölçüde zarar vermektedir. Bu tür

adsorbanların maliyetleri yüksek ve üretimleri yenilenemeyen ham maddelere dayanmaktadır. Doğal polimerlerin modifikasyonuyla çevre dostu adsorbanların sentezlenmesi ve bu malzemelerin geniş ölçekte kullanılması, doğal polimerlerin zaman içinde tükenmelerine yol açabilir. Bunun için, doğal polimerlerin kullanımıyla ortaya çıkan biyopolimer atıklarının işlenerek yararlı fonksiyonel malzemelere dönüştürülmesi, çevrenin iyileştirilmesine ve ekonominin geliştirilmesine katkı sunacaktır. Aktif karbonlar ve sentetik adsorbanlarla kıyaslandığında, doğal polimer esaslı yeşil adsorbanlar görece olarak düşük maliyetli, çevre dostu, yenilenebilir ham madde kaynaklarına dayalı ve biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerdir. Doğal polimerler esaslı çok fonksiyonel özelliklere sahip yeşil adsorbanların sentezlenmesi kolaydır. Çünkü, doğal polimerlerin makromolekülleri hidroksil, amin ve diğer aktif fonksiyonel grupları içermektedir. İklim değişikliği, çeşitli çevresel sorunlar ve nüfus artışı nedeniyle çevre dostu, toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilen ve yenilenebilir ham maddelerden elde edilen yeşil malzemelere olan talep her geçen gün artmaktadır. Doğal polimer esaslı fonksiyonel yeşil malzemeler, gelecekte böyle sorunların çözülmesinde önemli görevler üstlenebilecektir.

## Sonuç

Çalışmada, adsorpsiyon teknolojisinde etkin adsorban olarak kullanılan farklı doğal polimerler; modifikasyon yöntemleri, özellikleri ve uygulamaları incelenmiştir. Arzu edilen özelliklere ve ayırma karakteristiklerine sahip yeşil adsorbanların eldesi için iyileştirme ve modifikasyon yapılması elzemdir. Doğal polimerlerin modifikasyonunda sıkça kullanılan yöntemler konu edinilmiştir. Veriler bize, doğal polimerlerin heterojen ve homojen fazlarda modifiye edilmesiyle yeşil adsorbanların elde edildiğini göstermiştir. Heterojen fazda gerçekleştirilen modifikasyon, polimerlerin yüzeyinde meydana gelirken, homojen fazdaki modifikasyon ise

makromolekül boyunca gerçekleşmiştir. Doğal polimer esaslı hidrojel yeşil adsorbanlar, ilaç, petrol, gaz, tekstil, kimya ve tarım endüstrilerinden kaynaklanan atık suların toksik organik bileşiklerden yüksek verimle arıtılmasında kullanılabilmektedir.

Doğal polimerlerin kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi sonucu bu malzemelerin inşaat, gıda ve tekstil endüstrileri yanında tarım, petrol, gaz, kimya, gıda ve ilaç endüstrilerinde de yeşil adsorban olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, doğal polimer esaslı malzemelere yönelik talep ve arzın farklı endüstrilerde giderek arttığını göstermektedir. Ayrıca, doğal polimerlerin, gelecek dönemde dünyada en fazla üretilen ve kullanılan polimerler olacağı gerçeğinin dikkate alınması ve buna göre üretim modelleri geliştirilmesi gerekmektedir.

**Kaynakça**

Adina, N., Andreea, G., Corneliu, M. D., Mihaela, C., Petru, N., Narcis, D., & Alina, B. (2018). Rare earth elements removal from water using natural polymers. *Scientific Reports*, *8(31),* 1–11. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18623-0

Ahmed, S. A. (2011). Batch and fixed-bed column techniques for removal of Cu(II) and Fe (III) using carbohydrate natural polymer modified complexing agents. *Carbohydrate Polymers*, *83(4),* 1470–1478. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.09.051

Al-Karawi, A. J. M., Al-Qaisi, Z. H. J., Abdullah, H. I., Al-Mokaram, A. M. A., & Al- Heetimi, D. T. A. (2011). Synthesis, characterization of acrylamide grafted chitosan and its use in removal of copper (II) ions from water. *Carbohydrate Polymers, 83(2),* 495–500. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.017

Anastas, P. T., & Warner, J. C. (2000). Green Chemistry: Theory and Practice, *Oxford University Press: New York*, p.30. https://doi. org/10.1021/op000054t

Anirudhan, T. S., & Jalajamony, S. (2010). Cellulose-based anion exchanger with tertiary amine functionality for the extraction of arsenic (V) from aqueous media. *Journal of Environmental Management, 91,* 2201–2207. https://doi.org/10.1016/j

Anirudhan, T. S., Nima, J., & Divya, P. L. (2013a). Adsorption of chromium (VI) from aqueous solutions by glycidylmethacrylate-grafted-densified cellulose with quaternary ammonium groups. *Applied Surface Science, 279,* 441–449. https://doi. org/10.1016/j.apsusc.2013.04.134

Anirudhan, T. S., Nima, J., & Divya, P. L. (2013b). Adsorption of chromium (VI) from aqueous solutions by glycidylmethacrylate-grafted-densified cellulose with quaternary ammonium groups. *Applied Surface Science, 279(4),* 41–49. https://doi. org/10.1016/j.apsusc.2013.04.13

Basso, M. C., Cerrella, E. G., & Cukierman, A. L. (2002). Lignocellulosic materials as potential biosorbents of trace toxic metals from wastewater. *Industrial and Engineering Chemistry Research, 41(15),* 3580–3585. https://doi.org/10.1021/ ie020023h

Benavent, G. Y., & Rosell, C. M. (2017). Comparison of porous starches obtained from different enzyme types and levels. *Carbohydrate Polymers, 157,* 533–540. https://doi. org/10.1016/j.carbpol.2016.10.047

Chen, A. H., Yang, C. Y., Chen, C. Y., Chen, C. Y., & Chen, C. W. (2009). The chemically crosslinked metal-complexed chitosans for comparative adsorptions of Cu (II), Zn (II), Ni (II) and Pb (II) ions in aqueous medium. *Journal of Hazardous Materials, 163,* 1068–1075. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.073

Chen, S., Yue, Q., Gao, B., & Xu, X. (2010). Equilibrium and kinetic adsorption study of the adsorptive removal of Cr (VI) using modified wheat residue. *Journal of Colloid and Interface Science, 349,* 256–264. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.057

Chokradjaroen, C., Theeramunkong, S., Yui, H., Saito, N., & Rujiravanit, R. (2018). Cytotoxicity against cancer cells of chitosan oligosaccharides prepared from chitosan powder degraded by electrical discharge plasma. *Carbohydrate Polymers, 201,* 20–30. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.037

Deng, S., & Ting, Y. P. (2005). Fungal biomass with grated poly (acrylic acid) for enhancement of Cu (II) and Cd (II)

biosorption. *Langmuir, 21(13)*, 5940–5948. https://doi.org/10.1021/la047349a

Ekebafe, L. O., Ogbeifun, D. E., & Okieimen, F. E. (2018). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of Lead (II) sorption on hydrolyzed starch graft copolymers. *Journal of Polymers and the Environment, 26,* 807–818. https://doi.org/10.1007/ s10924-017-0949-x

Eloisa, B. M. (2007). Natural polymer characterization. *Macromolecula Symposia, 258,* 1–4. https://doi.org/10.1002/masy.200751201

Elwakeel, K. Z., Atia, A. A., & Guibal, E. (2014). Fast removal of uranium from aqueous solutions using tetraethylene pentamine modified magnetic chitosan resin. *Bioresource Technology, 160,* 107–114. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.037

Emma, M. N. P., Gruter, G.-J. M., Parsons, J. R., & Tietema, A. (2021). Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review. *Science of the Total Environment, 753,* 141953. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141953

Farag, A. M., Sokker, H. H., Zayed, E. M., Eldien, F. A. N., & Abd, A. N. M. (2018). Removal of hazardous pollutants using bifunctional hydrogel obtained from modified starch by grafting copolymerization. *International Journal of Biological Macromolecules, 120,* 2188–2199. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.171

Gadd, G. M. (2009). Biosorption: Critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 84(1),* 13–28. https://doi.org/10.1002/jctb.1999

George, V. A., Annie, P. S., & Latha, M. S. (2019). Remediation of heavy metals and dyesfrom wastewater using cellulose-based adsorbents. *Environmental Chemistry Letters, 17(2),* 867–877. https://doi.org/10.1007/s10311-018-00843-z

Gericke, M., Fardim, P., & Heinze, T. (2012). Ionic liquids-promising but challenging solvents for homogeneous derivatization of cellulose. *Molecules, 17(6),* 7458–7502. https://doi.org/10.3390/molecules17067458

Ghamry, M. A., & Abdelmonem, I. M. (2022). Adsorption of 60 Co and 154+152 Eu using graft copolymer of starch-polyacrylic acid-Polyvinylsulfonic acid. *Journal of Polymers and the Environment, 30,* 3622–3632. https://doi.org/10.1007/s10924-022-02446-w

Gurgel, L. V. A., de Melo, J. C., P., de Lena, J. C., & Gil, L. F. (2009). Adsorption of chromium (VI) ion from aqueous solution by succinylated mercerized cellulose functionalized with quaternary ammonium groups. *Bioresource Technology, 100,* 3214–3220. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.068

Hanh, T. T., Huy, H. T., & Hien, N. Q. (2015). Pre-irradiation grafting of acrylonitrile onto chitin for adsorption of arsenic in water. *Radiation Physics and Chemistry, 106,* 235–241. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.08.004

Haojin, L., Lei, M., Guoqing, Z., Wenzhi, J., & Zhirong, Z. (2022). Preparation of high- performance chitosan adsorbent by cross-linking for adsorption of Reactive Red 2 (RR2) dye wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(6),* 108872. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108872

He, G., Chen, X., Yin, Y., Cai, W., Ke, W., Kong, Y., & Zheng, H. (2015). Preparation and antibacterial properties of O-carboxymethyl chitosan/lincomycin hydrogels. *Journal of*

*Biomaterials Science. Polymer Edition, 27,* 370–384. https://doi.org/10.1080/ 09205063.2015.1132616

Hemavathy, R. R. V., Kumar, P. S., Suganya, S., Swetha, V., & Varjani, S. J. (2019). Modelling on the removal of toxic metal ions from aquatic system by different surface modified Cassia fistula seeds. *Bioresource Technology, 281,* 1–9. https://doi. org/10.1016/j.biortech.2019.02.070

Hend, A., & Enas, A. (2020). Green adsorbents based on polyacrylic acid-acrylamide grafted starch hydrogels: The new approach for enhanced adsorption of malachite green dye from aqueous solution. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 15,* 2796–2816. https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1711896

Hokkanen, S., Bhatnagar, A., & Sillanpaa, M. (2016). A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity. *Water Research, 91,* 156–173. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.008

Huang, G. Q., Zhang, Z. K., Cheng, L. Y., & Xiao, J. X. (2019). Intestine-targeted delivery potency of O-carboxymethyl chitosan-coated layer-by-layer microcapsules: An in vitro and in vivo evaluation. *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications, 105,* 110129. https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110129

Ian, C. (2013). Chemical modification of polysaccharides. *International Scholarly Research Notices,* 1–27. https://doi.org/10.1155/2013/417672

Joanna, K., Polko, J., & Kieber, J. (2019). The regulation of cellulose biosynthesis in plants. *The Plant Cell, 31(2),* 282–296. https://doi.org/10.1105/tpc.18.00760

Luo, H., Dong, F., Wang, Q., Li, Y., & Xiong, Y. J. M. (2021). Construction of porous starch-based hydrogel via regulating the ratio of amylopectin/amylose for enhanced water-retention. *Molecules, 26(13),* 3999. https://doi.org/10.3390/ molecules26133999

Lyytikainen, J., Ovaska, S. S., Soboleva, E., Rinkunas, R., Lozovski, T., Maldzius, R., & Backfolk, K. (2018). Optimizing electric corona treatment for hydroxypropylated starch-based coatings. *Carbohydrate Polymers, 197,* 359–365. https://doi.org/ 10.1016/j.carbpol.2018.06.030

Mahvi, A. H., Naghipour, D., Vaezi, F., & Nazmara, S. (2005). Tea waste as an adsorbent for heavy metal removal from industrial wastewaters. *American Journal of Applied Sciences, 2(1),* 372. https://doi.org/10.3844/ajassp.2005.372.375

Marc, W. T., Werten, G. E., Martien, A., Cohen, S., Frits, & de Wolf, A. (2019). Production of protein-based polymers in Pichia pastoris. *Biotechnology Advances, 37(5),* 642–666. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.03.012

Moussavi, G., & Khosravi, R. (2010). Removal of cyanide from wastewater by adsorption onto pistachio hull wastes: Parametric experiments, kinetics and equilibrium analysis. *Journal of Hazardous Materials, 183,* 724–730. https://doi.org/10.1016/j. jhazmat.2010.07.086

Mohamed, A. K., & Mahmoud, M. (2020a). Encapsulation of starch hydrogel and doping nanomagnetite onto metal-organic frameworks for efficient removal of fluvastatin antibiotic from water. *Carbohydrate Polymers, 245,* 116438. https://doi.org/ 10.1016/j.carbpol.2020.116438

Mohamed, A. K., & Mahmoud, M. E. (2020b). Nanoscale Pisum sativum pods biochar encapsulated starch hydrogel: A novel nanosorbent for efficient chromium (VI) ions and naproxen drug

removal. *Bioresource Technology, 308,* 123263. https://doi.org/ 10.1016/j.biortech.2020.123263

Osvaldo, K. J., Leandro, V. A. G., Júlio, C. P. M., Vagner, R. B., Tˆania, M. S. M., Rossimiriam, P. F. G., & Laurent, F. G. (2007). Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modiied sugarcane bagasse. *Bioresource Technology, 98(6),* 1291–1297. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.013

Popa, A., Visa, A., Maranescu, B., Hulka, I., & Lupa, L. (2021). Chemical modification of chitosan for removal of Pb (II) ions from aqueous solutions. *Materials, 14,* 7894. https://doi.org/10.3390/ma14247894

Taweekarn, T., Wongniramaikul, W., Boonkanon, C., Phanrit, C., Sriprom, W., Limsakul, W., Towanlong, W., Phawachalotorn, C., & Choodum, A. (2022). Starch biocryogel for removal of methylene blue by batch adsorption. *Polymers, 14,* 5543. https://doi.org/10.3390/polym14245543

Thirumavalavan, M., Lai, Y. L., Lin, L. C., & Lee, J. F. (2010). Cellulose based native and surface modified fruit peels for the adsorption of heavy metal ions from aqueous solution: Langmuir adsorption isotherms. *Journal of Chemical and Engineering Data, 55(3),* 1186–1192. https://doi.org/10.1021/je900585t

Troy, E., Tilbury, M. A., Power, A. M., & Wall, J. G. (2021). Nature-based biomaterials and their application in biomedicine. *Polymers, 13(19),* 3321. https://doi.org/ 10.3390/polym13193321

Varun, T.K., Senani, S., Jayapal, N., Chikkerur, J., Roy, S., & Tekulapally, V.B. Extraction of chitosan and its oligomers from shrimp shell waste, their characterization and antimicrobial effect. *Veterinary World, 10,* 170–175. doi:10.14202/vetworld.2017.1 70-175.

Yun, Y. S., Park, D., Park, J. M., & Volesky, B. (2001). Biosorption of trivalent chromium on the brown seaweed biomass. *Environmental Science and Technology, 35,* 4353–4358. https://doi.org/10.1021/es010866k

Zhang, W., Wang, L., M¨akil¨a, E., Willf¨or, S., & Xu, C. (2022). Ultralight and porous cellulose nanofibers/polyethyleneimine composite aerogels with exceptional performance for selective anionic dye adsorption. *Industrial Crops and Products, 177,* 114513. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114513

Zhou, Y. M., Jin, Q., Hu, X. Y., Zhang, Q. Y., & Ma, T. S. (2012). Heavy metal ions and organic dyes removal from water by cellulose modified with maleic anhydride. *Journal of Materials Science, 47,* 5019–5029. https://doi.org/10.1007/s10853-012- 6378-2

Zhou, Y. M., Wang, X. H., Zhang, M., Jin, Q., Gao, B., & Ma, T. S. (2014). Removal of Pb (II) and malachite green from aqueous solution by modified cellulose. *Cellulose, 21,* 2797–2809. https://doi.org/10.1007/s10570-014-0282

# BÖLÜM 5

# YÜKSEK PERFORMANSLI SIVI KROMATOGRAFİSİ İLE PETROL BİLEŞENLERİNİN AYRILMASI VE KARAKTERİZASYONU

**BESRA İNAN**[1]

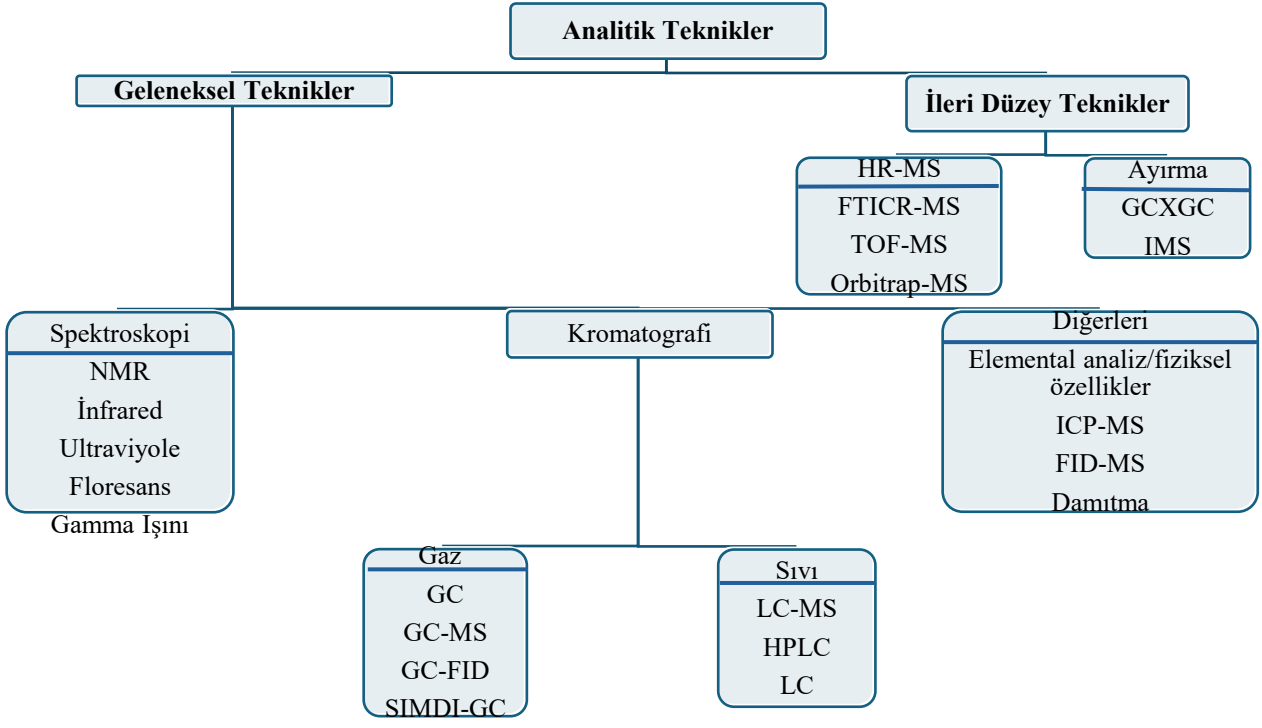
## Giriş

Ham petrol, önemli bir enerji kaynağı olup, küresel ekonominin birçok sektöründe merkezi ve vazgeçilmez bir role sahiptir. Petrol, farklı bileşiklerden oluşan kompleks bir karışım olması nedeniyle, içerdiği bileşenlerin ayrılması ve karakterizasyonu açısından önemli bir analitik zorluk oluşturmaktadır(Mao et al., 1995; Oro & Lucy, 2010; Purcell et al., 2006). Bununla birlikte, analitik alandaki ilerlemeler doğrultusunda laboratuvar koşullarında geliştirilen yeni analiz yöntemlerinin ortaya konulması ve güvenilirliklerinin doğrulanmasına yönelik çalışmalar sürdürülmektedir(Chaudhuri, 2011; Speight, 2014;

[1] Dr., Şırnak Üniversitesi,Kimya, ORCID: 0000-0002-1161-7204

Vempatapu et al., 2024; Vempatapu & Kanaujia, 2017 a, 2017 b). Petrol distilatlarını oluşturan bileşenlerin farklı uçuculuk, polarite ve fizikokimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle, bu ürünlerin rafine edilmesi, dönüştürülmesi ve iyileştirilmesine yönelik proseslerin izlenmesi ve optimizasyonunda çeşitli analitik yöntemlerden yararlanılmaktadır (Şema 1.)(Roman-Hubers et al., 2023). Bu yöntemler, hammadde, ara ürün ve nihai ürünlerin kimyasal bileşiminin ve fizikokimyasal özelliklerinin karakterize edilmesine olanak sağlamaktadır (Speight, 2014).

*Şema 1. Petrol maddelerinin analizinde kullanılan başlıca analitik yöntemler*



*(Roman-Hubers et al., 2023)*

Petrol ürünlerinin karakterizasyonunda farklı kromatografik ve spektroskopik analiz tekniklerinden yararlanılmaktadır. Kromatografik analizlerde gaz kromatografisi (GC) ve sıvı kromato grafisi (LC) yaygın olarak kullanılan tekniklerdir. Spektroskopik analizlerde ise kızılötesi (IR), ultraviyole (UV), floresans, X-ışını floresansı ve indüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektrometrisi (ICP-AES) gibi teknikler tercih edilmektedir. Söz konusu analitik yöntemler sayesinde yakıt ve petrol türevi ürünlerin toplam kükürt ve merkaptan kükürdü içeriği, hidrokarbon bileşimi, polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) düzeyleri ve elementel bileşimi gibi çeşitli parametreleri belirlenebilmektedir(Adams et al., 2013; Rodgers & McKenna, 2011; Swartz, 2010).

Yüksek basınçlı sıvı kromatografisi (HPLC), birçok bileşenden oluşan numunelerde olduğu gibi petrol içerisinde bulunan farklı bileşenlerin birbirinden ayrıştırılmasını sağlayarak, rafinasyon sürecinin çeşitli aşamalarında mevcut olan bileşiklerin ve bileşik gruplarının kısmen karakterize edilmesine imkân sunmaktadır(Badoga et al., 2022; Barman et al., 2000; Pasadakis et al., 2001; Pasadakis & Varotsis, 2000).

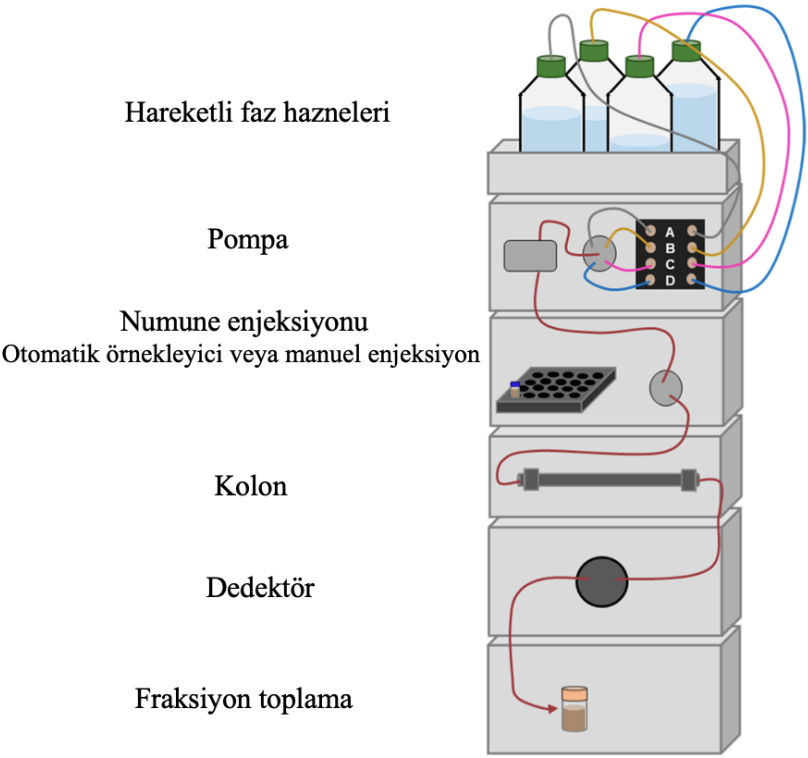
**Petrol Ürünlerinin Karakterizasyonunda HPLC Sisteminin Bileşenleri**

HPLC sisteminde numunenin bileşenlerinin ayrılabilmesi için hareketli faz, yüksek basınç sağlayan bir pompa aracılığıyla kolondan geçirilir. Hareketli faz tek bir çözücüden oluşabileceği gibi, farklı çözücülerin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle de hazırlanabilir. Ayırma işleminin sıcaklıktan etkilenmesini azaltmak ve daha kararlı çalışma koşulları sağlamak amacıyla kolon genellikle sıcaklık kontrollü bir fırın içerisinde bulunur. Numunenin sisteme aktarılması manuel olarak şırınga ile gerçekleştirilebilmekle birlikte,

günümüzde daha çok otomatik örnekleyiciler(autosampler) kullanılmaktadır.

Kolondan ayrılarak çıkan bileşenlerin belirlenmesinde ise farklı dedektör sistemlerinden yararlanılır. HPLC uygulamalarında yaygın olarak kullanılan dedektörler arasında UV absorbans ve kırılma indisi (RI) dedektörleri yer almaktadır. Bu sistemlerde analitlerin sahip olduğu optik özelliklerin hareketli fazdan farklı olması, bileşenlerin kolondan çıkışlarının tespit edilmesini mümkün kılar(Kamiński et al., 2004; Miller, 2009). Söz konusu dedeksiyon tekniklerinin numuneyi tüketmeden ölçüm yapabilmesi önemli bir avantaj olmakla birlikte, tüm analit türlerini aynı etkinlikle tespit edebilen evrensel bir dedektörün bulunmaması HPLC yöntemlerinin sınırlamalarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bir HPLC sisteminin şematik gösterimi Şekil 1.'de verilmiştir(Barman et al., 2000; Robson et al., 2017).

*Şekil 1. HPLC sisteminin şematik gösterimi*




*(Heshka, 2021)*

Yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC), analiz edilecek numunenin ve bileşenlerin özelliklerine bağlı olarak, kullanılan kolonun sabit faz özellikleri doğrultusunda normal faz veya ters faz modunda uygulanabilmektedir. Ayrıca hareketli fazın izokratik veya gradyan elüsyon şeklinde kullanılması ve farklı dedektör sistemlerinden yararlanılması, yöntemin analiz amacına uygun şekilde optimize edilmesine olanak sağlamaktadır (Badoga et al., 2022; Heshka, 2021; Jokuty & Gray, 1991; Matsunaga, 1983; Pasadakis et al., 2001; Pasadakis & Varotsis, 2000; Rudzinski, 2003; Speight, 2014).

Ham petrol, hidrokarbonlar, heteroatom içeren birçok bileşikten oluşan ve bu bileşiklerin yapısal olarak birbirinden farklı izomerlerini de bulunduran bileşimi en karmaşık karışımlarından biridir. Ağır petrol türlerinin bileşimi, yüksek molekül ağırlığına sahip ve daha karmaşık yapıda hidrokarbon moleküllerinin varlığıyla karakterize edilmektedir(Barman et al., 2000; U.S. Energy Information Administration, 2026; Zhang et al., 2008).

Petrol temelli ayırma üzerine yayımlanan çalışmaların birçoğu, petrol türevlerinin HPLC ile analizinde, normal faz kromatografisi sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedeni, bu tür numunelerin su bazlı hareketli fazlara göre organik çözücüler içerisinde daha yüksek çözünürlük göstermesi ve dolayısıyla organik hareketli fazlarla daha uyumlu olmasıdır(Heshka, 2021; Jokuty & Gray, 1991; Oro & Lucy, 2010; Sarowha et al., 1997; Speight, 2014).

**Petrol Ürünlerinin HPLC ile Bileşen Türlerine Göre Ayrılması**

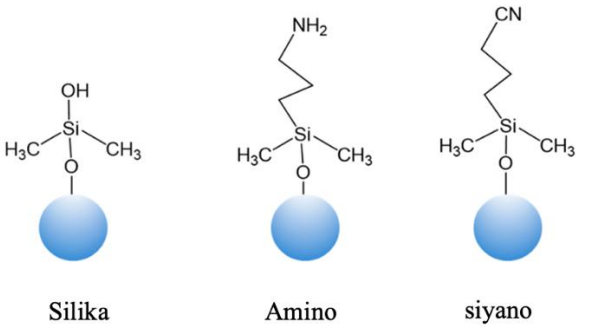
Hidrokarbon tipi analizinde, hidrokarbonların nicel olarak belirlenmesi ve gruplandırılması sonucunda, bileşenler doymuş hidrokarbonlar(saturatlar), aromatik hidrokarbonlar ve polar bileşikler olmak üzere üç ana sınıfta incelenmektedir(Oro & Lucy, 2010; Vempatapu et al., 2024; Vempatapu & Kanaujia, 2017).

**Aromatik Hidrokarbon Türü ayırma**

Ham petrolde bulunan farklı aromatik bileşik gruplarının nitel ve nicel olarak belirlenmesi, bu fraksiyonların karakterizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. Aromatik bileşiklerin halka sayısına göre gruplandırılarak ayrılması, grup tipi ayırma olarak adlandırılmakta ve literatürde aromatik bileşiklerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, aromatik bileşenlerin belirlenmesinde genel olarak normal faz elüsyonuna dayalı ayırma yöntemleri tercih edilmekte ve buna ek olarak Şekil 2. de gösterilen silika, amino, siyano veya diol ve alümina yapılı polar partiküllü

sabit fazlar da yüksek ayırma seçiciliği sebebiyle kullanılan kolon tiplerindendir(Fetzer & Biggs, 1985; Panda et al., 2021; Pasadakis & Varotsis, 2000; Sutton & Nesterenko, 2007). Ayrıca, apolar çözücüler petrol numunelerini iyi çözebildiğinden, normal faz kromatografisinde hareketli faz olarak sıklıkla kullanılmaktadır(Sutton & Nesterenko, 2007).

*Şekil 2. Aromatik Hidrokarbon türü ayırmada kullanılan sabit faz yapıları*




*(Heshka, 2021)*

Petrokimyasal numunelerin kalitatif ve kantitatif analizinde, aromatik hidrokarbon bileşenlerinin tespitinde; UV-görünür bölge, floresans, diyot dizisi (DAD) ve kızılötesi (IR) gibi spektroskopik dedektörlerin yanı sıra kırılma indisi (RI), evaporatif ışık saçılımı (ELSD), dielektrik sabiti (DCD) ve alev iyonlaşma (FID) dedektörleri de yaygın olarak kullanılmaktadır(Ali & Hassan, 2002; Fetzer & Biggs, 1985; Fish et al., 1984; Panda et al., 2006, 2021; Pasadakis et al., 2001; Pasadakis & Varotsis, 2000; Sutton & Nesterenko, 2007; Vempatapu et al., 2024; Zhang et al., 2008).

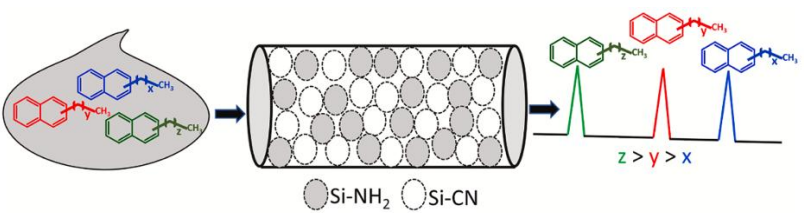
UV-görünür bölge dedektörü, petrol analizlerinde aromatik ve polar bileşiklerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Floresans dedektörü ise özellikle orta ve ağır petrol distilatları ile

kalıntılarındaki PAH'ların, çoğunlukla ters faz HPLC yöntemiyle belirlenmesinde kullanılmaktadır. IR dedektörü, normal faz HPLC uygulamalarında hidrokarbonların tespitinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir(Gaspar et al., 2012; Kamiński et al., 2004; Pasadakis et al., 2001; Pasadakis & Varotsis, 2000; Sarowha et al., 1997; Swartz, 2010).

**Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)**

Ham petrol veya petrol distilatı gibi herhangi bir karmaşık numunenin analizinde, rutin olarak karakterize edilen aromatik bileşik sınıflarından biri olan polisiklik aromatik hidrokarbonların (PAH'lar) ayrılmasında, yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) kapsamında hem normal faz hem de ters faz yöntemleri kullanılmaktadır(Heshka, 2021; Jiang & Lucy, 2016). PAH'ların moleküler özellikleri, C18 sabit faz ile gerçekleştirdikleri etkileşimler aracılığıyla alıkonma davranışlarını etkilemektedir. Bu nedenle, PAH'ların moleküler şekli, düzlemselliği ve alkil sübstitüentleri ayırma sürecinde önemli rol oynamaktadır. Örneğin, daha büyük halkalı yapılar daha yüksek alıkonma gösterirken, PAH yapısına belirli bir sayının üzerinde alkil zinciri eklenmesiyle alıkonma azalmaktadır. Bu durum, Panda ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmanın grafiksel özetinde de gösterilmiştir (Şekil 3)(Jiang & Lucy, 2016; Panda et al., 2021; Pasadakis & Varotsis, 2000; Robson et al., 2017).

*Şekil 3. Alkil karbon sayısının aromatik bileşiklerin alıkonma süreleri üzerindeki etkisi*



*(Panda et al., 2021)*

Bununla beraber 3-(2,4-Dinitroanilino)propil (DNAP), PAH'ların analizinde en yaygın kullanılan yük-transfer bağlı fazlardan biridir. DNAP kolonları aromatik karbon sayısından ziyade, aromatik halka sayılarına göre ayırma işlemi gerçekleştirmekte olup ayrıca petrol içerisindeki doymuş ve polar bileşikleri PAH'lardan ayırabilmektedir(Grizzle & Thomson, 1982; Jiang & Lucy, 2016; Nondek & Málek, 1978; Popl et al., 1974, 1976).

Orta ve ağır distilat kalıntılarındaki PAH'lar, çoğunlukla tam spektrumlu diyot dizisi dedektörü (DAD) ve floresans dedektörü yardımıyla belirlenmektedir(Barman et al., 2000; Fetzer & Biggs, 1985).

**Heteroatom içeren Polar Bileşiklerin Ayrılması**

Heteroatom içeren bileşikler, hidrokarbonlardan farklı olarak azot, oksijen, kükürt ve metaller gibi atomları içermektedir. Bu heteroatomlardan azot ve kükürt petrolün iyileştirilmesi sırasında, katalizörlerin deaktivasyonu, ürünlerin kararlılığını azaltma ve çeşitli çevre sorunları oluşturdukları için problemli bileşen olarak bilinmektedir(Han et al., 2018; Robson et al., 2017; Von Mühlen et al., 2010; Zhu et al., 2011). Azot içeren bileşikler, karbazol, indol ve pirol gibi nötr azotlu türler ile piridin ve kinolin gibi bazik azotlu türlerden oluşmaktadır. Kükürt içeren bileşikler başlıca sülfitik ve tiyofenik bileşikler olarak bulunurken, oksijen içeren bileşikler ise ağırlıklı olarak naftenik asitler ve fenoller şeklinde bulunmaktadır(Gal'pern, 1976; Robson et al., 2017).

Petrol numunelerinin analizinde polisiklik aromatik azotlu heterosiklik bileşiklerin (PANH'lar) ayrıştırılması amacıyla, açık kolon ayırmaları yaygın olarak kullanılmış olsa da,(Barman et al., 2001; Gopinath et al., 2006) birçok dezavantajla(Carlsson & Östman, 1997) karşılaşılmıştır. Akridin ve karbazol tipi azotlu

bileşikleri elde edebilmek için normal fazda Dimetilaminopropil silika kolon tipi kullanılarak ve kolonun ters yönde yıkanması (backflush) tekniği kullanılarak elde edilmiştir(Gopinath et al., 2006).

Petrolden elde edilen ppm düzeyindeki azaarenlerin karakterizasyonunda normal faz yük-transfer HPLC yöntemi kullanılmakta; DNAP-silika veya 3-(2,4-dinitrobenzensülfonamido)propil (DNSP)-silika kolonlar UV dedeksiyonu yardımıyla 285nm dalga boyunda tespit edilir ve çözücü olarak diklorometan tercih edilmektedir(Barman et al., 2000; Frolov, 1997; Li et al., 1992; Rodrigues Covas et al., 2020).

Ham petrol numunelerinde kükürt içeren bileşiklerin karakterizasyonu, azot içeren bileşiklerin karakterizasyonuna kıyasla daha zorlayıcı olabilmektedir. Normal faz HPLC'deki ayırma mekanizmaları açısından değerlendirildiğinde, kükürt içeren heterosiklik bileşiklerin PAH'lara benzer bir davranış sergilediği görülmektedir. Nitekim PAH yapısına bir kükürt atomunun eklenmesi, molekülün polaritesinde ve fizikokimyasal özelliklerinde alıkonma davranışını önemli ölçüde değiştirecek düzeyde bir farklılığa yol açmamaktadır. Bu benzerlik, kükürt içeren heterosiklik bileşiklerin PAH'lardan ayrılmasını güçleştirmektedir(Andersson et al., 2006; Nocun & Andersson, 2012; Wilson et al., 2017). Bu ayırma güçlüğünün aşılmasına ve kükürt içeren bileşiklerin alıkonma davranışlarının daha iyi anlaşılmasına yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Wilson ve arkadaşları, kükürt içeren heterosiklik bileşiklerin normal fazdaki alıkonma davranışlarını incelemek amacıyla, amin sabit fazı üzerinde 254 nm dalga boyunda UV dedeksiyonu kullanarak model bileşiklerin alıkonma özelliklerini araştırmıştır(Wilson et al., 2017).

Diğer bir çalışmada Rudzinski ve Rai, ham petrolde bulunan termal olarak kararsız ve uçucu olmayan PASH bileşiklerinin belirlenmesi amacıyla, APCI-tandem MS ile birleştirilmiş normal

faz HPLC yöntemini (NPHPLC-APCI-MS) kullanmıştır(Han et al., 2018; Rudzinski & Rai, 2005). Ayrıca, petrol asfalt çimentolarında bulunan kükürt bileşiklerinin analizinde LC-MS yöntemi uygulanmış ve ters faz modunda 14 farklı kükürt bileşiği ayrılmıştır(Bojkovic et al., 2022).

**Doymuş Hidrokarbon Türü ayırma**

Doymuş hidrokarbon fraksiyonu (*n*-parafinler, izoparafinler ve naftenler), oda sıcaklığında sıvı özellik gösteren ve yapısında ağırlıklı olarak doğrusal veya dallanmış alifatik zincirler ile halkalı parafinler bulunan apolar hidrokarbonlardan oluşmaktadır(Karevan et al., 2022; Van Beek et al., 2018).

Literatürde, hidrokarbonların ayrılması ve analizinde HPLC ile birlikte kırılma indisi, dielektrik sabiti veya kızılötesi dedektörlerin kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır(Barman et al., 2000; Dhole & Ghosal, 1995; Kamiński et al., 2004; Pasadakis & Varotsis, 2000). Bu tür analizlerde kırılma indisi (RI) dedektörü sıklıkla kullanılmasına rağmen, Miller ve arkadaşlarının çalışmalarında da gösterildiği üzere, *n*-alkan, izoalkan, sikloalkan ve alkenlerin kırılma indisi değerlerinin moleküler yapılarına ve karbon atomu sayılarına bağlı olarak değişmesi, bu hidrokarbon türlerinin RI dedektörü ile belirlenmesinde belirsizliklere neden olabilmektedir(Matisova, Eva, 1998).

Chaffin'in çalışmasında, ağır petrol ürünlerinden elde edilen doymuş hidrokarbon fraksiyonlarının RI dedektöründeki yanıtları incelenmiş ve bu fraksiyonlara ait yanıt faktörleri *p*-Bondapak aminopropilmetilsilil bağlı amorf silika HPLC kolonu kullanılarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, HPLC ile petrol numunelerinin analizine yönelik literatürdeki çalışmaların önemli bir bölümü, doymuş hidrokarbonların doğrudan miktar tayininden ziyade aromatik fraksiyonun belirlenmesine ve doymuş hidrokarbon

miktarının kalan kısım üzerinden hesaplanmasına dayanmaktadır(Chaffin et al., 1996).

## Sonuç

Bu çalışma, petrol ürünlerinin nitel ve nicel analizinde kullanılan Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC) tekniğine genel bir bakış sunmaktadır. HPLC, petrol numunelerinin bileşen analizinde önemli bir analitik araç olduğunu kanıtlamıştır. Analit türüne göre gerçekleştirilen ayırma işlemleri kapsamında PAH'ların aromatik halka sayılarına göre ayrılması ve heteroatom içeren hidrokarbonların karakterizasyonu öne çıkmaktadır. Azotlu bileşiklerin apolar hidrokarbonlardan daha kolay ayrılabilmesi, bu bileşiklerin analizini kolaylaştırırken kükürtlü bileşiklerin benzer PAH bileşiklerinden ayırt edilmesinde MS dedektöründen yararlanılması önem taşımaktadır. Ayrıca, özel analitlere yönelik geliştirilen yöntemler HPLC'nin çok yönlülüğünü ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, HPLC alanındaki yöntemsel gelişmeler ve farklı ayırma yaklaşımları, petrolün karmaşık moleküler yapısının daha ayrıntılı incelenmesine olanak sağlamaktadır. Yenilikçi durağan fazların yüksek çözünürlüklü analiz teknikleriyle birlikte kullanılması, petrol bileşenlerinin karakterizasyonunu geliştirme ve ham petrolün moleküler bileşiminin daha kapsamlı anlaşılmasına katkıda bulunma potansiyeli taşımaktadır.

# Kaynakça


Adams, R. K., Zabarnick, S., West, Z. J., Striebich, R. C., & Johnson, D. W. (2013). Chemical Analysis of Jet Fuel Polar, Heteroatomic Species via High-Performance Liquid Chromatography with Electrospray Ionization–Mass Spectrometric Detection. *Energy & Fuels*, *27*(5), 2390–2398. https://doi.org/10.1021/ef3015298

Ali, M. A., & Hassan, A. (2002). Hydrocarbon Group Types Analysıs Of Petroleum Products: A Comparatıve Evaluatıon Of Hplc And Tlc Analytıcal Performance. *Petroleum Science and Technology*, *20*(7–8), 751–762. https://doi.org/10.1081/LFT-120003709

Andersson, J. T., Hegazi, A. H., & Roberz, B. (2006). Polycyclic aromatic sulfur heterocycles as information carriers in environmental studies. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *386*(4), 891–905. https://doi.org/10.1007/s00216-006-0704-y

Badoga, S., Gieleciak, R., Alvarez-Majmutov, A., Xing, T., & Chen, J. (2022). An overview on the analytical methods for characterization of biocrudes and their blends with petroleum. *Fuel*, *324*, 124608. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124608

Barman, B. N., Cebolla, V. L., Mehrotra, A. K., & Mansfield, C. T. (2001). Petroleum and Coal. *Analytical Chemistry*, *73*(12), 2791–2804. https://doi.org/10.1021/ac010415i

Barman, B. N., Cebolla, V. L., & Membrado, L. (2000). Chromatographic Techniques for Petroleum and Related Products. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, *30*(2–3), 75–120. https://doi.org/10.1080/10408340091164199

Bojkovic, A., Vermeire, F. H., Kuzmanović, M., Dao Thi, H., & Van Geem, K. M. (2022). Analytics Driving Kinetics: Advanced Mass Spectrometric Characterization of Petroleum Products. *Energy & Fuels*, *36*(1), 6–59. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02355

Carlsson, H., & Östman, C. (1997). Clean-up and analysis of carbazole and acridine type polycyclic aromatic nitrogen heterocyclics in complex sample matrices. *Journal of Chromatography A*, *790*(1–2), 73–82. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(97)00759-0

Chaffin, J. M., Lin, M.-S., Liu, M., Davison, R. R., Glover, C. J., & Bullin, J. A. (1996). The Use of HPLC to Determine The Saturate Content of Heavy Petroleum Products. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, *19*(10), 1669–1682. https://doi.org/10.1080/10826079608005500

Chaudhuri, U. R. (2011). *Fundamentals of petroleum and petrochemical engineering*. CRC Press.

Dhole, V. R., & Ghosal, G. K. (1995). Quality Assurance of Petrol by HPLC. *Journal of Liquid Chromatography*, *18*(12), 2475–2488. https://doi.org/10.1080/10826079508013976

Fetzer, J. C., & Biggs, W. R. (1985). Liquid chromatographic retention behavior of large, fused polycyclic aromatics. *Journal of Chromatography A*, *346*, 81–92. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)90496-5

Fish, R. H., Komlenic, J. J., & Wines, B. K. (1984). Characterization and comparison of vanadyl and nickel compounds in heavy crude petroleums and asphaltenes by reverse-phase and size-exclusion liquid chromatography/graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Analytical Chemistry*, *56*(13), 2452–2460. https://doi.org/10.1021/ac00277a043

Frolov, E. B. (1997). Liquid chromatography of petroleum carbazoles. *Organic Geochemistry*, *26*(1–2), 43–47. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(96)00151-9

Gal'pern, G. D. (1976). Heteroatomic Components of Petroleum. *Russian Chemical Reviews*, *45*(8), 701–720. https://doi.org/10.1070/RC1976v045n08ABEH002707

Gaspar, A., Zellermann, E., Lababidi, S., Reece, J., & Schrader, W. (2012). Characterization of Saturates, Aromatics, Resins, and Asphaltenes Heavy Crude Oil Fractions by Atmospheric Pressure Laser Ionization Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. *Energy & Fuels*, *26*(6), 3481–3487. https://doi.org/10.1021/ef3001407

Gopinath, R., Dalai, A. K., & Adjaye, J. (2006). Effects of Ultrasound Treatment on the Upgradation of Heavy Gas Oil. *Energy & Fuels*, *20*(1), 271–277. https://doi.org/10.1021/ef050231x

Grizzle, P. L., & Thomson, J. S. (1982). Liquid chromatographic separation of aromatic hydrocarbons with chemically bonded (2,4-dinitroanilinopropyl)silica. *Analytical Chemistry*, *54*(7), 1071–1078. https://doi.org/10.1021/ac00244a013

Han, Y., Zhang, Y., Xu, C., & Hsu, C. S. (2018). Molecular characterization of sulfur-containing compounds in petroleum. *Fuel*, *221*, 144–158. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.110

Heshka, N. E. (2021). Applications of High Performance Liquid Chromatography in the Petroleomic Analysis of Crude Oil: A Mini-Review. *Energy & Fuels*, *35*(22), 18104–18115. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02091

Jiang, P., & Lucy, C. A. (2016). Retentivity, selectivity and thermodynamic behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons on charge-transfer and hypercrosslinked stationary phases under conditions of normal phase high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, *1437*, 176–182. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2016.02.014

Jokuty, P. L., & Gray, M. R. (1991). Resistant nitrogen compounds in hydrotreated gas oil from Athabasca bitumen. *Energy & Fuels*, *5*(6), 791–795. https://doi.org/10.1021/ef00030a004

Kamiński, M., Kartanowicz, R., & Przyjazny, A. (2004). Application of high-performance liquid chromatography with ultraviolet diode array detection and refractive index detection to the determination of class composition and to the analysis of gasoline. *Journal of Chromatography A*, *1029*(1–2), 77–85. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2003.12.053

Karevan, A., Zirrahi, M., & Hassanzadeh, H. (2022). Standardized High-Performance Liquid Chromatographyto Replace Conventional Methods for Determination of Saturate, Aromatic,Resin, and Asphaltene (SARA) Fractions. *ACS Omega*, *7*(22), 18897–18903. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01880

Li, Maowen., Larter, S. R., Stoddart, Daniel., & Bjoroey, Malvin. (1992). Liquid chromatographic separation schemes for pyrrole and pyridine nitrogen aromatic heterocycle fractions from crude oils suitable for rapid characterization of geochemical samples. *Analytical Chemistry*, *64*(13), 1337–1344. https://doi.org/10.1021/ac00037a007

Mao, J., Pacheco, C. R., Traficante, D. D., & Rosen, W. (1995). Analysis of Benzoquinolines and Acridines in a Brazilian

Diesel Oil by Particle Beam LC/MS and HPLC/UV. *Journal of Liquid Chromatography*, *18*(5), 903–916. https://doi.org/10.1080/10826079508010401

Matisova, Eva. (1998). *Quantitative Analysis of Aromatic Hydrocarbons in Complex Hydrocarbon Mixtures by High Resolution Capillary Gas Chromatography*. *92*(11), 870–874.

Matsunaga, Atsushi. (1983). Separation of aromatic and polar compounds in fossil fuel liquids by liquid chromatography. *Analytical Chemistry*, *55*(8), 1375–1379. https://doi.org/10.1021/ac00259a042

Miller, J. M. (2009). *Chromatography: Concepts and Contrasts* (1st edn). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780471980582

Nocun, M., & Andersson, J. T. (2012). Argentation chromatography for the separation of polycyclic aromatic compounds according to ring number. *Journal of Chromatography A*, *1219*, 47–53. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.11.006

Nondek, L., & Málek, J. (1978). Liquid chromatography of aromatic hydrocarbons on a chemically bonded stationary phase of the charge-transfer type. *Journal of Chromatography A*, *155*(1), 187–190. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)83949-7

Oro, N. E., & Lucy, C. A. (2010). Comparison of hypercrosslinked polystyrene columns for the separation of nitrogen group-types in petroleum using High Performance Liquid Chromatography. *Journal of Chromatography A*, *1217*(40), 6178–6185. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.07.078

Panda, S. K., Alawani, N. A., Al-Qunaysi, T. A., Elanany, M., & Muller, H. (2021). Alkyl carbon number limits the ring-number separation of polycyclic aromatic compounds in

petroleum analysis. *Fuel*, *284*, 118937. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118937

Panda, S. K., Schrader, W., & Andersson, J. T. (2006). β-Cyclodextrin as a stationary phase for the group separation of polycyclic aromatic compounds in normal-phase liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, *1122*(1–2), 88–96. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.04.026

Pasadakis, N., Gaganis, V., & Varotsis, N. (2001). Accurate determination of aromatic groups in heavy petroleum fractions using HPLC-UV-DAD. *Fuel*, *80*(2), 147–153. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00082-X

Pasadakis, N., & Varotsis, N. (2000). A Novel Approach for the Quantitation of the Hydrocarbon Groups in Heavy Petroleum Fractions by HPLC−RI Analysis. *Energy & Fuels*, *14*(6), 1184–1187. https://doi.org/10.1021/ef000072b

Popl, M., Dolanský, V., & Mostecký, J. (1974). Influence of the molecular structure of aromatic hydrocarbons on their adsorptivity on alumina. *Journal of Chromatography A*, *91*, 649–658. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)97945-2

Popl, M., Dolanský, V., & Mostecký, J. (1976). Influence of the molecular structure of aromatic hydrocarbons on their adsorptivity on silica gel. *Journal of Chromatography A*, *117*(1), 117–127. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)81072-9

Purcell, J. M., Hendrickson, C. L., Rodgers, R. P., & Marshall, A. G. (2006). Atmospheric Pressure Photoionization Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry for Complex Mixture Analysis. *Analytical Chemistry*, *78*(16), 5906–5912. https://doi.org/10.1021/ac060754h

Robson, W. J., Sutton, P. A., McCormack, P., Chilcott, N. P., & Rowland, S. J. (2017). Class Type Separation of the Polar and Apolar Components of Petroleum. *Analytical Chemistry*, *89*(5), 2919–2927. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04202

Rodgers, R. P., & McKenna, A. M. (2011). Petroleum Analysis. *Analytical Chemistry*, *83*(12), 4665–4687. https://doi.org/10.1021/ac201080e

Rodrigues Covas, T., Santos De Freitas, C., Valadares Tose, L., Valencia-Dávila, J. A., Dos Santos Rocha, Y., Duncan Rangel, M., Cabral Da Silva, R., & Gontijo Vaz, B. (2020). Fractionation of polar compounds from crude oils by hetero-medium pressure liquid chromatography (H-MPLC) and molecular characterization by ultrahigh-resolution mass spectrometry. *Fuel*, *267*, 117289. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117289

Roman-Hubers, A. T., Cordova, A. C., Barrow, M. P., & Rusyn, I. (2023). Analytical chemistry solutions to hazard evaluation of petroleum refining products. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *137*, 105310. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2022.105310

Rudzinski, W. E. (2003). Chromatographic Separation and Atmospheric Pressure Ionization/Mass Spectrometric Analysis of Nitrogen, Sulfur and Oxygen Containing Compounds in Crude Oils. In C. S. Hsu (Ed.), *Analytical Advances for Hydrocarbon Research* (pp. 313–336). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9212-3_13

Rudzinski, W. E., & Rai, V. (2005). Detection of Polyaromatic Sulfur Heterocycles in Crude Oil Using Postcolumn Addition of

Tropylium and Tandem Mass Spectrometry. *Energy & Fuels*, *19*(4), 1611–1618. https://doi.org/10.1021/ef0400666

Sarowha, S. L. S., Sharma, B. K., Sharma, C. D., & Bhagat, S. D. (1997). Characterization of Petroleum Heavy Distillates Using HPLC and Spectroscopic Methods. *Energy & Fuels*, *11*(3), 566–569. https://doi.org/10.1021/ef960058s

Speight, J. G. (2014). *Handbook of Petroleum Product Analysis* (1st edn). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118986370

Sutton, P. A., & Nesterenko, P. N. (2007). Retention characteristics of aromatic hydrocarbons on silica and aminopropyl-modified monolithic columns in normal-phase HPLC. *Journal of Separation Science*, *30*(17), 2900–2909. https://doi.org/10.1002/jssc.200700352

Swartz, M. (2010). HPLC DETECTORS: A BRIEF REVIEW. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, *33*(9–12), 1130–1150. https://doi.org/10.1080/10826076.2010.484356

U.S. Energy Information Administration. (2026). *Monthly Energy Review*. U.S. Energy Information Administration. https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/previous.php

Van Beek, F. T., Edam, R., Pirok, B. W. J., Genuit, W. J. L., & Schoenmakers, P. J. (2018). Comprehensive two-dimensional liquid chromatography of heavy oil. *Journal of Chromatography A*, *1564*, 110–119. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.06.001

Vempatapu, B. P., & Kanaujia, P. K. (2017). Monitoring petroleum fuel adulteration: A review of analytical methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *92*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.04.011

Vempatapu, B. P., Kumar, J., Upreti, B., & Kanaujia, P. K. (2024). Application of high-performance liquid chromatography in petroleum analysis: Challenges and opportunities. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *177*, 117810. https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117810

Von Mühlen, C., De Oliveira, E. C., Zini, C. A., Caramão, E. B., & Marriott, P. J. (2010). Characterization of Nitrogen-Containing Compounds in Heavy Gas Oil Petroleum Fractions Using Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography Coupled to Time-of-Flight Mass Spectrometry. *Energy & Fuels*, *24*(6), 3572–3580. https://doi.org/10.1021/ef1002364

Wilson, W. B., Hayes, H. V., Sander, L. C., Campiglia, A. D., & Wise, S. A. (2017). Normal-phase liquid chromatography retention behavior of polycyclic aromatic hydrocarbon and their methyl-substituted derivatives on an aminopropyl stationary phase. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *409*(22), 5291–5305. https://doi.org/10.1007/s00216-017-0474-8

Zhang, B., Li, X., & Yan, B. (2008). Advances in HPLC detection—Towards universal detection. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *390*(1), 299–301. https://doi.org/10.1007/s00216-007-1633-0

Zhu, X., Shi, Q., Zhang, Y., Pan, N., Xu, C., Chung, K. H., & Zhao, S. (2011). Characterization of Nitrogen Compounds in Coker Heavy Gas Oil and Its Subfractions by Liquid Chromatographic Separation Followed by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. *Energy & Fuels*, *25*(1), 281–287. https://doi.org/10.1021/ef101328n

# BÖLÜM 6

# ELEKTRONİK ATIKLARDAN ELDE EDİLEN ÇOK METALLİ ÇÖZELTİLERDE SEÇİCİ AYIRMA, YÜKSEK SAFLIKTA METAL GERİ KAZANIMI VE KAPALI DÖNGÜ PROSESLER

**Ömer ÖDEMİŞ**[1]

## Giriş

Elektronik atıklar, bakır, nikel, kalay, çinko, gümüş, altın ve paladyum gibi metaller içermeleri nedeniyle ikincil hammadde kaynağıdır. Ancak baskılı devre kartlarının (PCB) bileşimi cihaz türüne, üretim dönemine ve ön işlem yöntemine göre önemli ölçüde değişir. Bu heterojenlik, metal geri kazanımında seçici ve birbirini tamamlayan işlem basamaklarının tasarlanmasını gerektirir.

Bu kitap bölümünde PCB kaynaklı çok metalli çözeltilerin hazırlanması, çözeltideki metal türlerinin seçici biçimde ayrılması, yüksek saflıkta ürün elde edilmesi ve reaktiflerin yeniden kullanılması bir bütün olarak ele alınmaktadır. Bir basamakta yüksek

[1]Dr., Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi; ORCID: 0000-0001-6892-622X

çözündürme verimi sağlanması, diğer basamaklarda metal kaybının ve safsızlık taşınmasının olmadığı anlamına gelmez (Liang et al., 2023; Q. Xia et al., 2023).

Dolayısıyla araştırmalar, yalnızca tek tek metallerin çözeltiye geçiş yüzdeleriyle değil; beslemenin niteliği, ayırma seçiciliği, nihai ürün saflığı ve toplam kütle dengesiyle birlikte değerlendirilmelidir. İzleyen bölümlerde önce PCB beslemesinin değişkenliği, ardından liç kimyası ve metal ayırma yöntemleri, son olarak da kapalı döngü tasarımı ve çevresel etkiler tartışılmaktadır.

Bu çerçevede hedef metalin katı beslemeden çözeltideki ayırma akımına, oradan da nihai metal veya metal bileşiği ürününe aktarılması izlenir. Her adımda oluşan kayıplar ve geri dönüş akımları hesaba katılmadıkça yüksek saflıkta ve sürdürülebilir bir geri kazanım iddiası doğrulanmış sayılmaz.

## Elektronik Atıkların Metal İçeriği

PCB içeriğindeki metallerin dağılımı, ayırma dizisinin belirlenmesinde ilk adımdır. Kullanılmış akıllı telefon kartları üzerinde yürütülen araştırmada, farklı metal gruplarının farklı liç ve geri kazanım basamakları gerektirdiği gösterilmiştir (Diallo et al., 2025). Bu nedenle ön işlem sonrasında temsil edici numuneler üzerinden elementel analiz yapılmalı ve metalce zengin ince fraksiyonlardaki kayıplar izlenmelidir.

Mekanik hazırlama, liç ve seçici ayırma arasındaki bağlantı Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekil, tek bir işletme reçetesi değil; farklı PCB beslemeleri için uyarlanabilecek genel malzeme akışını temsil etmektedir.

*Şekil 1. Elektronik atıktan çok metalli liç çözeltisine ve seçici ayırmaya uzanan genel proses akışı.*




Kaynak: Yazar tarafından yapay zekâ destekli görsel oluşturma araçları kullanılarak hazırlanmış kavramsal şema.

Şekil 1'deki akışta en kritik geçiş, heterojen katı malzemenin çok metalli çözeltiye dönüşmesidir. Serbest iyonlar, klorür ve sülfat kompleksleri ile farklı yükseltgenme basamakları nedeniyle aynı toplam derişimdeki çözeltiler farklı ayırma davranışı gösterebilir. Bu nedenle toplam metal derişimiyle birlikte pH, redoks potansiyeli ve ana anyonların belirlenmesi gerekir (D. Xia et al., 2024).

Ön karakterizasyonda XRF gibi hızlı tarama yöntemlerinden yararlanılabilir; ancak özellikle düşük derişimli değerli metaller için uygun numune hazırlama sonrası çok elementli ICP-OES/ICP-MS analizleri gerekebilir. Liç artığı ve çözeltinin aynı kütle bilançosunda değerlendirilmesi, görünürde yüksek çözündürme veriminin gerçek metal kaybını gizlemesini önler (Jadhao et al., 2023; D. Xia et al., 2024).

Metal içeriği ve faz dağılımının belirlenmesi, bir sonraki aşamada hangi metalin hangi kimyasal ortamda çözündürüleceğini öngörmek açısından gereklidir. Bu nedenle ön işlemi izleyen temel aşama, hedef metallerin seçilmiş reaktiflerle çözeltiye alınmasıdır.

**Metal Çözündürme Süreçleri**

PCB'lerde metal çözündürmek için asidik ve oksitleyici sistemler, amonyak/amonyum çözeltileri, derin ötektik çözücüler (DES), iyonik sıvılar ve biyolojik yöntemler incelenmektedir. Bu

seçeneklerin karşılaştırılması yalnızca liç yüzdesine dayandırılamaz; besleme türü, sıcaklık, tane boyutu, süre, reaktif tüketimi ve sonraki ayırma basamağının gereksinimleri de değerlendirilmelidir (Jadhao et al., 2023; Oke & Potgieter, 2025).

Örneğin oksitleyici sülfat ortamında bakırın çözündürülmesi, çözeltiye geçişi kolaylaştırırken $H_2O_2$ tüketimi ve yan tepkimeleri de beraberinde getirir. Kullanılmamış PCB malzemesindeki bakır çözündürme davranışı, $H_2SO_4/H_2O_2$ ve $HNO_3$ sistemlerinde incelenmiştir (Kelly et al., 2026). Bu sonuçların, kullanım ömrünü tamamlamış heterojen PCB akımları için doğrudan aynı düzeyde gerçekleşeceği varsayılmamalıdır.

Bakırın oksitleyici sülfat ortamında çözünmesi aşağıdaki net reaksiyonla ifade edilebilir:

$$Cu + H_2O_2 + H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + 2H_2O$$

Bununla birlikte $H_2O_2$ ayrışması, yüzey pasivasyonu ve yan faz oluşumu nedeniyle gerçek asit ve oksitleyici tüketimi deneysel olarak belirlenmelidir.

Liç çözeltisinde metal türleşmesinin değerlendirilebilmesi için pH, redoks potansiyeli ve çok elementli analizler birlikte kullanılmalıdır. Gerekli durumlarda iyon kromatografisi ve katı artıkların XRD/SEM-EDS incelemeleriyle malzeme bilançosu tamamlanabilir. Bu analitik çerçeve, aşağıda tartışılan alternatif çözücü sonuçlarının neden tek bir performans sıralamasına dönüştürülemeyeceğini de açıklar.

Kolin klorür temelli DES sistemlerinde hidrojen bağı vericisinin niteliği, su miktarı, viskozite ve oksitleyici derişimi metal çözünmesini değiştirir. Bu değişkenler, atık PCB malzemesi üzerinde deneysel olarak değerlendirilmiştir (Oke & Potgieter, 2025). Dolayısıyla "yeşil çözücü" tanımlaması, çözücünün yeniden kazanımı ve metalin nihai ürüne dönüştürülmesi hakkında tek başına kanıt sağlamaz.

Alternatif bir yaklaşımda, alkali ferrisiyanür çözeltisiyle PCB kökenli değerli metallerin çözündürülmesi ve reaktifin yeniden oluşturulması incelenmiştir (Li et al., 2025). Bildirilen Au, Ag ve Pd çözündürme verimleri sırasıyla %68,3, %93,0 ve %74,0; ferrisiyanür rejenerasyonu ise yaklaşık %91,7'dir. Bunlar farklı ölçütlerdir: reaktifin yeniden oluşturulması, çözeltiden nihai değerli metal ürünü elde edildiği anlamına gelmez.

Biyolojik yöntemler de daha düşük sıcaklıklarda işlem olanağı sağlayabilir; buna karşılık işlem süresi, metal toksisitesi, besiyeri tüketimi ve ürün elde etme basamakları sınırlayıcıdır. Biyoliç metalin katı fazdan çözündürülmesi, biyosorpsiyon ise çözeltideki metalin biyolojik yüzeye tutulmasıdır. Bu iki mekanizmanın ayrı raporlanması gerekir (Hu et al., 2024; Kim et al., 2025).

İyonik sıvı kullanan çalışmalar, çok metalli liçte kompleksleşmenin belirleyici olabileceğini göstermektedir. Gerçek cep telefonu PCB atığından metal çözünmesi, tetrabütilfosfonyum klorür–tetrabütilfosfonyum format karışımında araştırılmıştır (Domańska et al., 2026). Bu deneyler, çözünme sırasında Fe gibi safsızlıkların da yüksek oranda çözeltiye geçebildiğini göstermesi açısından önemlidir.

318 K'de üç saat süreyle gerçekleştirilen deneyin metal bazlı liç sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur (Domańska et al., 2026). Cu, Ag, Au, Ni, Pb ve Fe için farklı çözündürme oranları, aynı çözeltide tek bir "toplam geri kazanım" değeriyle özetlenemez. Özellikle Fe'nin de çözeltiye geçmesi, sonraki seçici saflaştırmayı gerekli kılar.

*Tablo 1. Gerçek cep telefonu PCB malzemesinde iyonik sıvı karışımıyla raporlanan liç verimleri.*

| Metal | Liç verimi (%) | Koşul |
|---|---|---|
| Cu | 60,9 | 318 K; 3 saat |
| Ag | 62,3 | 318 K; 3 saat |
| Au | 83,0 | 318 K; 3 saat |
| Ni | 80,0 | 318 K; 3 saat |
| Pb | 78,2 | 318 K; 3 saat |
| Fe | 90,5 | 318 K; 3 saat |

Kaynak: Raporlanan deney sonuçları esas alınmıştır (Domańska et al., 2026).

Elektrokimyasal liçte oksitleyici ortam elektrot reaksiyonlarıyla desteklenebilir. Gerçek atık PCB'lerde klorür, $Fe^{2+}$ ve ön işlem etkileri faktöriyel deney tasarımıyla araştırılmıştır (Grima-Carmena et al., 2025). Çalışmanın kullanılmış dekapaj asitlerini değerlendirmesi reaktif döngüselliği açısından önemlidir; ancak safsızlık taşıması ve metal ürününe dönüşüm ayrıca izlenmelidir.

Liç aşamasından seçici ayırmaya geçmeden önce beslemenin pH, redoks potansiyeli, metal ve anyon derişimleri ile askıda katı miktarı belirlenmelidir. Metal türleşmesindeki değişim, seçici çöktürme, organik faza ekstraksiyon veya elektrokimyasal birikme performansını doğrudan etkileyebilir.

Biyolojik proseslerde raporlanan yüksek çözündürme veya tutunma yüzdeleri de aynı nedenle dikkatle yorumlanmalıdır. Güncel bir derlemede özetlenen Au, Ag ve Pt biyoliç sonuçları, farklı besleme ve deney koşullarına aittir; aynı prosesin eşzamanlı çıktıları olarak yorumlanamaz (Ming et al., 2025).

Liç raporlarında besleme kütlesi, nem oranı, başlangıç elementel analiz yöntemi, parçacık boyutu dağılımı, reaksiyon süresi, sıcaklık, karıştırma hızı, serbest asit derişimi ve oksitleyici tüketimi birlikte verilmelidir. Aynı metal farklı mineralojik veya

alaşım fazlarında bulunduğunda nominal olarak eşdeğer iki PCB örneğinin çözünme davranışı değişebilmektedir (D. Xia et al., 2024).

Gerçek PCB atığının biyolojik işlenmesine yönelik bir araştırmada, biyoliçin bazı baz metaller için bir seçenek olabileceği gösterilmiştir (Becci et al., 2020). Bununla birlikte işletme süresi, katı yüklemesi ve çevresel analizlerin sistem sınırları açıkça belirtilmeden biyoliç ile kimyasal liç arasında kesin üstünlük sıralaması yapılamaz.

Biyolojik metal geri kazanımının karbon ayak izi, incelenen PCB sistemi için yaklaşık 0,4 kg $CO_2$-eşdeğeri/kg işlenen PCB olarak raporlanmıştır (Becci et al., 2020). Bu değer PCB işleme birimi başınadır; başka bir çalışmadaki kg $CO_2$-eşdeğeri/kg geri kazanılan Cu sonucu ile doğrudan karşılaştırılması doğru değildir. Ürün saflığı ve reaktif rejenerasyonu verileri ayrıca değerlendirilmedikçe düşük karbon ayak izi bütünleşik kapalı döngü başarısı anlamına gelmez.

Bu liç çalışmalarının ortak bulgusu, yüksek çözündürme oranının tek başına seçici ayırmayı garanti etmediğidir. Çözeltiye birlikte geçen metaller, izleyen saflaştırma yöntemlerinin seçiminde belirleyici olduğundan, çözündürme ve ayırma aşamalarının ayrı fakat birbirine bağlı tasarlanması gerekir.

**Seçici Metal Ayırma Yöntemleri**

Seçici çöktürme, solvent ekstraksiyonu, iyon değişimi ve elektrokazanım farklı mekanizmalara dayanmaktadır. Tablo 2, bu yöntemlerin seçici ayırmadaki işlevlerini ve temel sınırlılıklarını bir arada gösterir. Tablo, yöntemlerin birbirini dışlayan seçenekler değil, uygun koşullarda ardışık kullanılabilecek basamaklar olarak okunmalıdır.

*Tablo 2. Seçici metal ayırma yöntemlerinin temel mekanizmaları ve sınırlılıkları.*

| Yöntem | Temel mekanizma | Sınırlılık |
|---|---|---|
| Çöktürme | Çözünürlük farkı | Birlikte çökelme |
| Solvent ekstraksiyonu | Fazlar arası dağılım | Organik faz kaybı |
| İyon değişimi | Seçici bağlanma | Rejenerasyon gereksinimi |
| Elektrokazanım | Elektrot indirgenmesi | Yan reaksiyonlar ve enerji |

Kaynak: Bölümde incelenen çalışmalar temel alınarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

Solvent ekstraksiyonu metalin organik faza aktarılmasını; çöktürme ise düşük çözünürlüklü bir ürün oluşturulmasını hedefler. Bakır ekstraksiyonu ve elektrokazanımını ele alan bir çalışma ile yeniden kullanılabilir çöktürücü ligandları inceleyen başka bir çalışma, her iki yaklaşımda da sonraki ayırma ve ürün hazırlama basamaklarının önemini göstermektedir (Kelly et al., 2026; Vance et al., 2025).

Gerçek PCB kökenli liç çözeltisinde fenolik pirazol ligandı kullanılarak bakırın %96'sının geri kazanıldığı bildirilmiştir (Vance et al., 2025). Bununla birlikte ligandın yenilenmesi ve çok çevrimli kararlılığı, tek çevrimdeki metal ayırma yüzdesinden ayrı bir işletme ölçütüdür.

Sementasyonda bakır iyonları metalik demir tarafından indirgenir. Bu işlem aşağıdaki reaksiyonla gösterilebilir:

$$Cu^{2+}_{(aq)} + Fe_{(s)} \rightarrow Cu_{(s)} + Fe^{2+}_{(aq)}$$

Bu reaksiyon sırasında bakır katı faza alınırken çözeltide $Fe^{2+}$ birikir. Cu–Ni ayrımına yönelik araştırma, kullanılan reaktifin sonraki basamağın safsızlık yükünü değiştirebildiğini göstermektedir (Singh et al., 2026).

Seçici çöktürme, adsorpsiyonla tamamlandığında kalan iyonlar daha düşük derişime indirilebilir. Gerçek atık PCB liç çözeltisinde önce Cu'nun çöktürülmesi, ardından Pb ve Zn'nin adsorpsiyonla ayrılması araştırılmıştır (Rahimi et al., 2026). Böyle bir hibrit akımda adsorpsiyon, tek başına yüksek saflıkta ürün üretimi yerine sonraki saflaştırmaya hazırlık işlevi görür.

Elektrokimyasal ayırmada hedef metalin birikmesi, elektrot potansiyelinin yanı sıra kompleksleşme, kütle aktarımı ve elektrot yüzeyiyle belirlenir. Farklı elektrolit ortamlarının metal davranışına etkisi ve PCB kökenli çok bileşenli anotların elektro-rafinasyonu ayrı deneysel çalışmalarda incelenmiştir (Niculescu et al., 2026; Song et al., 2023).

Platin grubu metaller açısından Pt/Pd/Rh model çözeltisinde membran destekli sıyırma işlemi, metal komplekslerinin farklı seçicilik gösterebileceğini ortaya koymaktadır (Qu et al., 2026). Ancak model çözelti sonuçları, Cu ve Fe açısından zengin gerçek PCB liç çözeltilerine doğrudan aktarılmamalıdır.

Ölçek büyütme sırasında organik faz kaybı, emülsiyon oluşumu ve ekstraktant bozunması; iyon değişiminde ise reçine kapasitesinin rekabetçi iyonlar nedeniyle azalması dikkate alınmalıdır. Bu nedenle laboratuvarda tek temasla elde edilen verimler, sürekli endüstriyel prosesin başarısı olarak sunulmamalıdır.

Reçine veya adsorban içeren sistemlerde kırılma eğrileri, rejenerasyon sonrası kapasite ve elüsyon çözeltisinden ürün geri kazanımı belirlenmelidir. Çok metalli gerçek PCB liçinde tek iyonlu sentetik çözelti verileri yeterli değildir.

Sıralanan yöntemler belirli bir çözelti için tek başına yeterli olmayabilir. Metal türleşmesi, reaktif seçimi ve her ayırma aşamasından sonra çözeltide kalan metaller birlikte değerlendirildiğinde, bu yöntemlerin hangi sırayla uygulanacağı belirlenebilir.

**Çok Metalli Çözeltilerde Ayırma Stratejileri**

Çok metalli liç çözeltilerinde sonraki ayırma işlemini belirleyen temel değişken, yalnızca toplam metal derişimi değil kimyasal türleşmedir. Klorür veya sülfat komplekslerinin oranı, serbest asitlik, pH ve redoks potansiyeli hem çöktürmeyi hem de ekstraksiyon ve elektrokimyasal ayırmayı etkiler (Domańska et al., 2026; Li et al., 2025; Oke & Potgieter, 2025).

Bu nedenle liç sonrasında filtrasyon ve gerektiğinde pH ayarı yapılırken birlikte çökelme riskine dikkat edilmelidir. Metalin çökelti, süzüntü ve yıkama fazları arasındaki dağılımı belirlenmeden "giderim oranı" doğrudan metal geri kazanımı olarak kullanılmamalıdır.

Solvent ekstraksiyonunda hedef metalin organik ve sulu fazlar arasındaki dağılımını ifade eden dağılım katsayısı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$D_i = C_{i,org} / C_{i,aq}$$

İki metal arasındaki ayırma faktörü ise dağılım katsayılarının oranıdır:

$$\beta_{ij} = D_i / D_j$$

Burada $C_{i,org}$ ve $C_{i,aq}$ sırasıyla hedef metalin organik ve sulu fazdaki denge derişimlerini; $D_i$ ve $D_j$ ise i ve j metallerinin dağılım katsayılarını ifade eder. Bu değerler pH, faz oranı, iyonik güç ve ekstraktant bileşimi belirtilmeden karşılaştırılamaz. Ekstraksiyonun ardından sıyırma ve ürün elde etme aşamalarındaki kayıplar toplam geri kazanımı düşürebilir.

Çok aşamalı PCB geri kazanımı üzerine yapılan çalışma, farklı metallerin ardışık çöktürme, ekstraksiyon ve sementasyon yöntemleriyle ayrılabileceğini göstermektedir (Diallo et al., 2025). Uygun dizilim, işlem sonrası çözeltinin özellikleri ve hedef ürün gereksinimi dikkate alınarak belirlenmelidir.

Dolayısıyla kademeli ayırma stratejisinde önce baskın safsızlıkların uzaklaştırılması, ardından hedef metalin yoğunlaştırılması ve son olarak ürün saflaştırma basamağına geçilmesi uygun olabilir. Bu sıralama her PCB beslemesi için sabit değildir; gerçek çözelti analizine ve metal bazında kütle dengesine dayanmalıdır.

**Yüksek Saflıkta Metal ve Ürün Elde Edilmesi**

Çözeltiye geçen metalin geri kazanılması, yüksek saflıkta bir ürün elde edilmesiyle aynı anlama gelmez. Bu bölümde metalik ürünün elde edilmesi ve saflaştırılması, elektrokazanım ve elektro-rafinasyon örnekleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Elektrokimyasal saflaştırma bu farkı somutlaştırmaktadır. PCB kökenli çok bileşenli anotlarla yaklaşık %99 Cu içeren katot ürünü elde edilmiş; ancak toplam geri kazanım oranının aynı düzeyde olmadığı bildirilmiştir (Niculescu et al., 2026). Dolayısıyla katot bileşimi ve metal kütle bilançosu birlikte raporlanmalıdır.

Bu örnekte raporlanan yaklaşık %99 katot Cu bileşimi ile yaklaşık %89 bakır geri kazanımı, birbirinden bağımsız performans göstergeleridir. Sonuçlar, yüksek geri kazanımın tek başına yüksek saflığı garanti etmediğini ve çok bileşenli anotlar için uygun elektrokimyasal işletme penceresinin deneysel belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Elektrokimyasal ürün üretimine ek olarak uygun bileşiklerin çöktürülmesi veya kristalizasyonu da hedef ürün tanımına göre değerlendirilebilir. Ancak metal tuzu veya oksit ürününün saflığı, doğrudan metalik elementin saflığı olarak raporlanmamalı; ürün fazı ve bileşimi ayrıca doğrulanmalıdır.

**Süreç Performansının Değerlendirilmesi**

Yüksek saflıkta metal üretimini değerlendirmek için en az üç gösterge ayrı tanımlanmalıdır: liç verimi, başlangıç metalinin çözeltiye geçen kısmını; toplam geri kazanım, başlangıç metalinin nihai ürüne ulaşan kısmını; ürün saflığı ise nihai ürünün hedef metal

kütle payını ifade eder. Bu göstergelerin paydaları farklı olduğu için aynı yüzde ölçeğinde doğrudan karşılaştırılmaları doğru değildir.

Çok aşamalı PCB geri kazanım çalışmasında Cu, Ag ve Au için bildirilen geri kazanım değerleri ile NiO ve nadir toprak oksidi ürünlerinin saflıkları farklı nicelikleri temsil eder (Diallo et al., 2025). Bu ayrım, farklı yayınlardan seçilen en yüksek yüzdelerin tek bir başarı sıralamasına dönüştürülmesini önler.

Atık PCB'lerden ardışık metal geri kazanımına yönelik sıfır deşarj hidrometalurji yaklaşımı, geri kazanım akımlarının bütünleşik ele alınmasına örnektir (Gande et al., 2021). Burada sıfır deşarj yaklaşımı, tüm yan ürünlerin çevresel etkisinin kendiliğinden ortadan kalktığı anlamına gelmez.

Tek bir basamaktaki yüksek verimin bütünleşik proses başarısı anlamına gelmemesi, metal kütle dengesinin yanı sıra reaktif dolaşımının ve safsızlık yönetiminin incelenmesini gerektirir. Bu nedenle kapalı döngü işletme, proses performansının ayrı bir bileşeni olarak ele alınmalıdır.

Kapalı döngü işletmede yalnızca metal ürünleri değil, asit, baz, proses suyu, çözücü ve elektrolit gibi girdilerin yeniden kullanılması hedeflenir. Bununla birlikte çözeltide biriken metalik ve organik safsızlıklar, kontrollü purj veya arıtma gerektirebilir. Bu nedenle kapalı döngü kavramı, sıfır atıkla eş anlamlı değildir.

Elektrolit ve reaktiflerin yeniden dolaşıma alınması, metal geri kazanımının yanında enerji ve kimyasal tüketiminin azaltılması amacı taşır. Ancak çok çevrimli çalışmada ürün saflığı, çözeltinin kimyasal bileşimi ve biriken safsızlıklar izlenmelidir. Şekil 2, reaktif rejenerasyonunun geri kazanım hattına nasıl bağlanabileceğini şematik olarak göstermektedir.

Bakır geri kazanım zincirinde sıyırma ile elektrokazanımın birleştirilmesi, çözelti akımlarını aynı proses içinde değerlendirmenin bir örneğidir (Kelly et al., 2026). Buna karşılık bu çalışma, tüm reaktiflerin sınırsız sayıda yeniden kullanılabildiğini göstermemektedir.

Bakır yüklü çöktürücü ligandların asitle işlenerek yeniden kullanımı araştırılmıştır (Vance et al., 2025). Ligandın çok çevrimli dayanımı ile çözeltiye geçen bakırın nihai üründe kazanılması ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Şekil 2'deki geri dönüş hattının uygulanabilmesi için taze reaktif beslemesi, geri dönüş debisi ve kontrollü purj miktarı birlikte hesaplanmalıdır. Şekildeki HCl/NaOH rejenerasyonu, her PCB liç prosesinde kullanılan standart bir işlem değil, uygun tuzlu atık akımlarına uygulanabilecek bir teknoloji seçeneğidir.

*Şekil 2. Metal geri kazanımında reaktif rejenerasyonu, geri dönüş ve kontrollü purj akımları.*




Kaynak: Yazar tarafından yapay zekâ destekli görsel oluşturma araçları kullanılarak hazırlanmış kavramsal şema.

Atık cep telefonu PCB sisteminde elektrolitin 19 çevrim boyunca yeniden kullanımı incelenmiştir (Liang et al., 2023). Böyle bir sonuç, reaktif döngüselliğinin gösterilmesine katkı sağlasa da her çevrimde ürün saflığı ve safsızlık birikimi izlenmeden sınırsız döngü işletimi sonucuna varılamaz.

PCB liç çözeltisi yerine bakır elektro-rafinasyonundan gelen endüstriyel akımda Sb/Bi ayrımı ve bipolar membranlı elektrodiyalizle reaktif rejenerasyonu araştırılmıştır (Luo et al., 2026). Bu nedenle çalışma, elektronik atık geri kazanımı için doğrudan kanıt değil, aktarılabilir bir proses yaklaşımı sunmaktadır.

Kapalı döngünün gerçek performansı, reaktif yeniden kullanım sayısı yanında net reaktif tüketimi ve üründe kalan safsızlık

miktarıyla ölçülmelidir. Döngü boyunca oluşan atık tuz, organik bozunma ürünleri veya ağır metal birikimi ayrıca kontrol edilmelidir.

Reaktif tüketimini değerlendirmek için kg reaktif/ton PCB ve kg reaktif/kg geri kazanılan metal gibi iki farklı gösterge birlikte kullanılabilir. Birincisi besleme işleme yükünü, ikincisi hedef metal ürünüyle ilişkili maliyeti gösterir. Önemli ölçüde metal içeriği değişen PCB beslemelerinde bu iki normalizasyon birbirinden farklı sonuçlar verebilir.

Kapalı döngü işletim, yalnızca elektrolitin bir defa tekrar kullanılmasıyla kanıtlanamaz. Reaktif derişiminin ve iyonik bileşimin çoklu devirlerde ölçülmesi, ürün saflığının korunup korunmadığının gösterilmesi, taze reaktif ilavesinin ve purj akışının kütle bilançosuna dahil edilmesi gerekir. Liang ve arkadaşlarının PCB işleme sistemi, art arda elektrolit dolaşımının uygulanabilirliğine ilişkin örnek oluşturur (Liang et al., 2023). Ancak bu tür sonuçların diğer PCB beslemelerine aktarılabilmesi için safsızlık profilinin de karşılaştırılması zorunludur.

Bakır rafinerisi akımında yürütülen araştırmada HCl ve NaOH yeniden üretilmiştir (Luo et al., 2026). Bu örnek, iyon değiştirici reçine rejenerasyonu ile bipolar membranlı elektrodiyalizin birbirini tamamlayabileceğini göstermektedir; ancak PCB sistemine aktarım için ayrı deneysel doğrulama gerekir.

Çalışmada yaklaşık 1,84 M HCl ve 2,26 M NaOH elde edilirken NaOH üretimine göre özgül enerji tüketimi 8,74 kWh $kg^{-1}$ NaOH olarak bildirilmiştir (Luo et al., 2026). Bu gösterge, elektrokazanımda metal başına enerji tüketimiyle doğrudan karşılaştırılamaz.

Rejenerasyon ürünlerinin doğrudan proseste kullanılıp kullanılamayacağı, asit-baz miktarının tüketim ihtiyacını karşılamasına ve çözeltide safsızlık bulunmasına bağlıdır. Bu nedenle kapalı döngü başarısı, aynı sistemin işletme koşullarında çok çevrimli olarak doğrulanmalıdır.

Kapalı döngü uygulamaları ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirilirken karşılaştırılabilir fonksiyonel birimlerin seçilmesi gerekir. Böylece reaktif kullanımındaki kazanımların enerji, atık arıtımı ve ürün kalitesi üzerindeki karşılıkları birlikte izlenebilir.

Teknoekonomik değerlendirmede metal satış geliri ile ilk yatırım, enerji, reaktif, bakım ve atık arıtma giderleri aynı sistem sınırında ele alınmalıdır. Laboratuvar verimlerinin ekonomik uygulanabilirliğe dönüşmesi, özellikle sürekli işletmede reaktif kaybı ve gerçek metal ürün kalitesine bağlıdır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde de işlevsel birim belirleyicidir. Örneğin kg $CO_2$-eşdeğeri/kg işlenen PCB ile kg $CO_2$-eşdeğeri/kg geri kazanılan Cu farklı sorulara yanıt verir. Bu nedenle farklı çalışmaların çevresel etkileri, aynı işlevsel birime ve sistem sınırına uyarlanmadan doğrudan sıralanmamalıdır.

PCB pirometalurjisine yönelik çalışmada, atık ısıdan enerji geri kazanımı ve yakıt değişimi seçeneklerinin çevresel ve ekonomik etkileri birlikte değerlendirilmiştir (Wang et al., 2025). Bu sonuçların, proses ve işlevsel birimi farklı olan biyoliç çalışmalarına doğrudan aktarılması uygun değildir.

Yöntemler arasında karşılaştırma yapmak için besleme türü ve raporlanan performans göstergesinin tanımı korunmalıdır. Tablo 3'te seçilmiş araştırmalar bu sınırlar dikkate alınarak sunulmaktadır.

Atık PCB beslemesinde kolin klorür ile ChCl:CAA (kloroasetik), ChCl:DCA (dikloroasetik) veya ChCl:TCA (trikloroasetik) asit kullanılarak hazırlanan derin ötektik çözücüler incelenmiştir (Oke & Potgieter, 2025). Çözücü etkinliği ChCl:TCA > ChCl:DCA > ChCl:CAA sırasını izlemiştir. Bununla birlikte liç sıcaklığıyla beraber parçacık boyutunun da değiştiği karşılaştırmalarda verim artışını yalnız sıcaklığın etkisine bağlamak metodolojik olarak doğru değildir. Bu çalışma, alternatif çözücülerin kimyasal seçiciliği kadar deney parametrelerinin birlikte kontrol edilmesi gereğini göstermektedir.

Pt(IV), Pd(II) ve Rh(III) içeren model çözeltide taşıyıcı membranlı elektrodiyalizle seçici sıyırma incelenmiş; optimize $SCN^-$ koşullarında Pd(II) için %82,3, Pt(IV) için %3,9 sıyırma verimi ve 34,5 ayırma faktörü bildirilmiştir (Qu et al., 2026). Rh(III) besleme bölmesinde kalmıştır. Buradaki deneysel ortam model platin grubu metal çözeltileridir; bu sonuç gerçek PCB liç çözeltisinde doğrulanmış geri kazanım oranı olarak sunulmamalıdır.

Kullanılmış cep telefonu PCB'lerinde amonyak–amonyum klorür ortamında alkalin bulamaç elektrolizi sonrasında elektrolitin yeniden kullanımı araştırılmıştır (Liang et al., 2023). İlk işlem ve 19 yeniden kullanım döngüsü boyunca bakır geri kazanımı %99'un, bakır ürün saflığı %99,9'un üzerinde gerçekleşmiş ve akım verimi çoğunlukla %90'ın üzerinde kalmıştır. Buna karşılık diğer metallerin elektrolitte birikmesi gözlenmiştir. Dolayısıyla deneysel olarak başarılı elektrolit dolaşımı, sonsuza dek sıfır purj ve sıfır safsızlık birikimi anlamına gelmez.

*Tablo 3. Seçilmiş araştırmaların besleme türleri, deneysel çıktıları ve yorum sınırları.*

| Kaynak / malzeme | Raporlanan temel bulgu | Kitaptaki yorum sınırı |
|---|---|---|
| (Rahimi et al., 2026) Gerçek PCB liç çözeltisi | Cu %97,71 ± 0,40; Pb/Cu/Zn adsorpsiyon verileri | CuS çöktürme verimi ve adsorpsiyon kapasitesi farklı ölçütlerdir |
| (Grima-Carmena et al., 2025) Gerçek atık PCB | Cu %99; Au %75; Ag %99'a kadar liç | Üst verimler; farklı işletme koşulları olabilir |
| (Oke & Potgieter, 2025) Atık PCB / DES | ChCl: TCA en etkin çözücü | Sıcaklık ve parçacık boyutu etkileri ayrıştırılmalı |
| (Qu et al., 2026) Pt/Pd/Rh model çözeltisi | Pd %82,3; Pt %3,9 sıyırma; β = 34,5 | Gerçek PCB doğrulaması değildir |
| (Liang et al., 2023) Cep telefonu PCB | 19 tekrar kullanım; Cu >%99; saflık >%99,9 | Safsızlıkların elektrolitte birikimi ayrıca izlenmeli |

Kaynak: Tabloda belirtilen araştırmaların deneysel bulguları esas alınarak düzenlenmiştir.

**Teknolojik Sınırlamalar ve Gelecek Perspektifi**

Ölçek büyütmede reaktif geri dönüşü, safsızlık birikimi, ekipman korozyonu, ayırma kapasitesi ve atık yönetimi temel belirsizlik alanlarıdır. Bu nedenle duyarlılık analizlerinde metal fiyatı, enerji maliyeti, reaktif tüketimi ve ürün saflığının yanı sıra proses akımlarının uzun süreli kararlılığı da değerlendirilmelidir.

Sürdürülebilir bir proses seçimi, yüksek tekil verim iddialarından çok karşılaştırılabilir kütle dengesi ve yaşam döngüsü verilerine dayanmalıdır. Laboratuvar sonuçlarının pilot ölçekte doğrulanması, çalışmanın endüstriyel uygulanabilirliği hakkında daha güvenilir karar verir.

Gelecek çalışmalarda aynı gerçek PCB liç çözeltisinin farklı seçici ayırma dizilerine dağıtılması, her koldaki toplam metal bilançosu ve reaktif tüketiminin eşit koşullarda karşılaştırılmasını sağlayabilir. Metal kazanımına ilişkin çalışmaların, yalnızca yüksek yüzde sonuçlarına değil aynı zamanda ürün kalitesine, atık akımlarına ve çevrim sayısına odaklanması gerekir.

İncelenen literatür, gerçek PCB kaynaklı çok metalli çözeltilerde tek bir seçici ayırma yönteminin her metal için yeterli olmadığını göstermektedir. En tutarlı yaklaşım, beslemeyi önce karakterize etmek, ardından uygun liç kimyasını belirlemek, hedef metalleri ardışık biçimde ayırmak ve nihai ürün saflığını metal kütle dengesiyle doğrulamaktır.

Sonuç olarak elektronik atıklardan yüksek saflıkta metal elde edilmesi, ön işlemden çözelti hazırlamaya, seçici ayırmadan ürün elde edilmesine ve reaktiflerin yeniden kullanımına kadar uzanan bir zincirin bütünleşik tasarımını gerektirir. Çalışmalarda liç verimi, ayırma verimi, toplam metal geri kazanımı ve ürün saflığı ayrı raporlanmalı; gerçek PCB atıklarında ölçülmeyen kapalı döngü başarısı varsayılmamalıdır. Bu yaklaşım, laboratuvar bulgularının endüstriyel uygulamalara aktarılmasında daha güvenilir bir temel sağlayacaktır.

**Şekillere İlişkin Açıklama:** Bu kitap bölümünde yer alan şematik görsellerin hazırlanmasında yapay zekâ destekli görsel oluşturma araçlarından yararlanılmıştır. Şekiller, ilgili bilimsel literatür esas alınarak yazarın yönlendirmeleri doğrultusunda oluşturulmuş ve bilimsel içeriğe uygunluk bakımından değerlendirilmiştir. Görseller, deneysel bulguları değil, ele alınan süreçlerin kavramsal gösterimlerini ifade etmektedir.

**Kaynakça**

Becci, A., Amato, A., Fonti, V., Karaj, D., & Beolchini, F. (2020). An innovative biotechnology for metal recovery from printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling, 153*, 104549. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104549

Diallo, S., Tran, L.-H., Larivière, D., & Blais, J.-F. (2025). Leaching and recovery of rare earth elements, copper, nickel, silver and gold from used smartphone circuit boards. *Minerals Engineering, 222*, 109157. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109157

Domańska, U., Wiśniewska, A., Dąbrowski, Z., Wróbel, K., Kolasa, D., & Skrzypczyńska, K. (2026). Investigation on metal leaching efficiency from the electronic waste of mobile phones - printed circuit boards - using ionic liquids. *Journal of Molecular Liquids, 456*, 129611. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2026.129611

Gande, V. V., Vats, S., Bhatt, N., & Pushpavanam, S. (2021). Sequential recovery of metals from waste printed circuit boards using a zero-discharge hydrometallurgical process. *Cleaner Engineering and Technology, 4*, 100143. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100143

Grima-Carmena, L., Giner-Sanz, J. J., Pocoví-Martínez, S., Bosch-Mossi, F., & Pérez-Herranz, V. (2025). Study of the effect of the pretreatment and the concentrations of iron (II) and chloride, on the electrochemical leaching of waste printed circuit boards using ANOVA analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 152*, 234–244. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.04.054

Hu, S., Wang, H., Li, X., He, W., Ma, J., Xu, Y., Xu, Y., & Ming, W. (2024). Recent advances in bioleaching and biosorption of metals from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Environmental Management, 371*, 123008. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123008

Jadhao, P. R., Mishra, S., Singh, A., Pant, K. K., & Nigam, K. D. P. (2023). A sustainable route for the recovery of metals from waste printed circuit boards using methanesulfonic acid. *Journal of Environmental Management, 335*, 117581. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117581

Kelly, N., Boelens, P., Parvez, A. M., Kutschke, S., Ebert, D., Guy, B. M., Möckel, R., Aamir, M. H., Sanchez-Garrido, C., Fischer, U., Sajjad, M., Renno, A. D., Ott, L., Ellinger, F., Patil, A. B., & Gutzmer, J. (2026). Hydrometallurgical recovery of high-purity copper from waste printed circuit boards: An experimental study and life cycle assessment. *Environmental Science: Advances, 5*, 772–790. https://doi.org/10.1039/D5VA00348B

Kim, J. Y., Hwang, J.-H., Lee, T., Kim, Y., Bae, S., Kim, D., Lee, J., Lee, J., Tsang, Y. F., & Kwon, E. E. (2025). A review of sustainable metal recovery from e-waste via bioleaching: Current status and strategies for improvement. *Chemical Engineering Journal, 516*, 164149. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164149

Li, H., Oraby, E., Eksteen, J., Xie, W., Gu, J., & Yuan, H. (2025). Extraction of precious metals from waste printed circuit boards using alkaline ferricyanide solutions: An exploratory study. *Minerals Engineering, 222*, 109144. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109144

Liang, Q., Wang, J., Chen, S., Chen, S., Hu, L., Qin, J., Han, Y., Zeng, X., Li, X., Guo, Q., Chen, M., & Shu, J. (2023). Electrolyte circulation: Metal recovery from waste printed circuit boards of mobile phones by alkaline slurry electrolysis. *Journal of Cleaner Production, 409*, 137223. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137223

Luo, D., Lopez, J., & Cortina, J. L. (2026). Integrated circular process for selective antimony and bismuth recovery and in-situ acid/base regeneration by using electrodialysis bipolar membranes from copper electrorefining effluents. *Separation and Purification Technology, 411*, 139472. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.139472

Ming, W., Hu, S., Zhang, X., Ma, J., He, W., Xu, Y., Wang, H., Xu, Y., Xing, W., Chen, Z., & Li, X. (2025). Review: Biorecovery of precious metals from waste printed circuit boards. *Minerals Engineering, 228*, 109306. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109306

Niculescu, F., Pencea, I., Stănescu, M., Iacob, G., Buțu, M., & Stăncel, C.-D. (2026). Electrorefining behavior of a multicomponent copper alloy derived from waste printed circuit boards. *Chemical Engineering Journal Advances, 27*, 101418. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2026.101418

Oke, E. A., & Potgieter, J. H. (2025). Sustainable leaching of metals from waste printed circuit boards using efficient carboxylic acid-based deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology, 374*, 133712. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133712

Qu, C., Wang, B., Hou, C., Li, H., Wang, X., Zhang, R., Jiang, J., Wang, L., Liu, Y., & Zhang, Y. (2026). Stepwise separation of platinum group metals via anion-controlled stripping in carrier conducted membrane electrodialysis. *Journal of Membrane Science, 751*, 125521. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2026.125521

Rahimi, V., Samet, A., Pimentel, C. H., Gómez-Díaz, D., Freire, M. S., Lazzari, M., & González-Álvarez, J. (2026). Dual-stage treatment of waste printed circuit boards for $Cu^{2+}$, $Pb^{2+}$, and $Zn^{2+}$ recovery: A precipitation-adsorption hybrid process. *Separation and Purification Technology, 414*, 139797. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.139797

Singh, N., Ambili, S., Pasupuleti, K. S., Kang, H.-N., & Lee, J.-Y. (2026). Sustainable separation of copper and nickel from spent printed circuit boards. *Minerals Engineering, 236*, 109888. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109888

Song, Q., Xia, Q., Yuan, X., & Xu, Z. (2023). Multi-metal electrochemical response mechanism for direct copper recovery from waste printed circuit boards via sulfate- and chloride-system electrolysis. *Resources, Conservation and Recycling, 190*, 106804. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106804

Vance, S. S. M., Chatzisymeon, E., Morrison, C. A., & Love, J. B. (2025). Recovering copper from e-waste: Recyclable precipitation versus solvent extraction with carbon emission assessment. *Green Chemistry, 27*, 3789–3804. https://doi.org/10.1039/D4GC06466F

Wang, X., Huang, W., Yan, B., Zhou, S., Zhu, X., Wang, Z., Cheng, Z., & Chen, G. (2025). E-waste recycling: Integrated life cycle assessment and techno-economic analysis unravels pyrometallurgy's edge and delivers an optimization framework for recovering waste printed circuit boards. *Waste Management, 207*, 115135. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115135

Xia, D., Lee, C., Charpentier, N. M., Deng, Y., Yan, Q., & Gabriel, J.-C. P. (2024). Drivers and pathways for the recovery of critical metals from waste-printed circuit boards. *Advanced Science, 11*(30), e2309635. https://doi.org/10.1002/advs.202309635

Xia, Q., Song, Q., & Xu, Z. (2023). Electrorefining and electrodeposition for metal separation and purification from polymetallic concentrates after waste printed circuit board smelting. *Waste Management, 158*, 146–152. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.014

# BÖLÜM 7

# BİNA VE YAPILARDA RADON GAZI KONSANTRASYONUNUN ÖNEMİ

**MERVE ŞAHİN[1],**

**AHMET ÇARHAN[2,3]**

## Giriş

Radon, doğal uranyum-238 bozunum serisinin bir ürünü olan radyum-226'nın bozunmasıyla oluşan, renksiz, kokusuz ve tatsız bir radyoaktif soy gazdır. Doğal kökenli olmasına karşın kapalı hacimlerde birikmesi, bina kullanıcılarının uzun süreli iyonlaştırıcı radyasyon maruziyetini artırabilmektedir. Radon gazının solunmasından sonra özellikle kısa ömürlü bozunum ürünlerinin solunum yollarında tutunması ve alfa parçacıkları yayması, akciğer dokusunda biyolojik hasara neden olabilmektedir (ICRP, 2010; IARC, 1988). Bu nedenle radon, yalnızca radyasyon güvenliği alanının değil; halk sağlığı, iş sağlığı ve güvenliği, yapı fiziği,

[1]Ankara Yildirim Beyazit University, Institute of Science, CBRN (Chemical, Biological, Radiological and Nuclear) Threats and Management, ANKARA
[2]Ankara Yıldırım Beyazıt University, Medical Faculty, Department of Medical Biology, Ankara, Türkiye, ORCID: 0000-0003-1584-0072
[3]Ankara Yildirim Beyazit University, Yenimahalle Training and Research Hospital, Ankara, Türkiye, RCID: 0000-0003-1584-0072

jeoloji, çevre sağlığı ve kentleşme politikalarının da ortak inceleme konusudur.

Radon tehlikesine ilişkin bilimsel farkındalık, önce Schneeberg ve Joachimsthal madenlerinde çalışan işçilerde gözlenen yüksek akciğer hastalığı ve ölüm oranlarıyla gelişmiş; II. Dünya Savaşı sonrasında uranyum madencisi kohortlarından elde edilen epidemiyolojik verilerle nicel bir risk çerçevesine kavuşmuştur. 1984 yılında Stanley Watras'ın evinde çok yüksek radon düzeylerinin belirlenmesi ise sorunun madenlerle sınırlı olmadığını, sıradan konutlarda da ciddi maruziyetlerin ortaya çıkabileceğini göstermiştir (U.S. EPA, 1986). İzleyen dönemde radon ve bozunum ürünleri Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı tarafından insan için kanserojen olarak sınıflandırılmış; Dünya Sağlık Örgütü, Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı ve Avrupa Birliği tarafından konutlar, işyerleri ve kamuya açık binalar için ölçüm, referans seviyesi, azaltım ve ulusal eylem planı esasları geliştirilmiştir (IARC, 1988; World Health Organization [WHO], 2009); ICRP, 2014).

Binalardaki radon konsantrasyonu; zeminin uranyum ve radyum içeriği, toprak geçirgenliği, fay ve çatlak sistemleri, temel tipi, yapı kabuğundaki açıklıklar, iç-dış basınç farkları, baca etkisi, havalandırma rejimi, yapı malzemeleri ve kullanım alışkanlıkları gibi çok sayıda değişkenin ortak etkisiyle oluşur. Bu değişkenlik nedeniyle bölgesel radon haritaları önceliklendirme açısından değerli olsa da tek bir yapının güvenli olduğuna ilişkin kesin hüküm vermez. Bina bazındaki riskin belirlenmesi, uygun süre ve koşullarda gerçekleştirilen kalite güvenceli ölçümlere; yüksek sonuçların yönetimi ise kaynağın ve giriş yollarının doğru tanımlanmasına dayanır.

Enerji verimliliği amacıyla bina kabuğunun daha sızdırmaz hâle getirilmesi, yeterli ve dengeli havalandırma sağlanmadığında iç ortam radon birikimini artırabilmektedir. Buna karşılık yeni yapılarda radona dayanıklı temel ayrıntılarının tasarım aşamasında uygulanması, mevcut yapılarda ise aktif temel altı basınç düşürme başta olmak üzere kaynağa yönelik mühendislik önlemlerinin kullanılması maruziyeti önemli ölçüde azaltabilmektedir (U.S. EPA, 2025; BRE, 2023). Dolayısıyla radonun etkin biçimde yönetilmesi; jeolojik verinin, yapı tasarımının, ölçüm sisteminin, sağlık risk iletişiminin ve düzenleyici denetimin bütünleşik bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirir.

Türkiye'de ulusal ve yerel ölçüm çalışmaları, genel ortalamaların yanında belirli konut, okul, işyeri, yeraltı ulaşım alanı ve diğer yapılarda yüksek konsantrasyonların görülebildiğini ortaya koymaktadır (TAEK, 2014; Sağlık Bakanlığı, 2017). Bununla birlikte ölçüm süreleri, örnekleme yöntemleri, mevsimsel koşullar ve bina özellikleri arasındaki farklılıklar, bulguların birlikte yorumlanmasını güçleştirmektedir. Ayrıca radyasyondan korunma mevzuatı ile imar, yapı ruhsatı, yapı denetimi ve mesleki yeterlilik düzenlemeleri arasındaki bağın güçlendirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışma, radonun bina ve yapılardaki önemini tarihsel kanıtlar, sağlık etkileri, fiziksel mekanizmalar, uluslararası uygulamalar, Türkiye'deki mevcut durum ve uygulanabilir mühendislik çözümleri temelinde bütüncül olarak değerlendirmektedir.

## Amaç, Kapsam Ve Yöntem

Bu çalışmanın amacı, bina ve yapılarda radon gazı konsantrasyonunun önemini bilimsel, düzenleyici ve teknik boyutlarıyla incelemek; radonun oluşum ve taşınım

mekanizmalarını, insan sağlığı üzerindeki etkilerini, ölçüm ve azaltım yaklaşımlarını ortaya koymak ve Türkiye için uygulanabilir politika ve mühendislik önerileri geliştirmektir. Bu doğrultuda tarihsel gelişim ile güncel risk değerlendirme yaklaşımı arasında bağ kurulmuş; uluslararası referans seviyeleri ve ülke uygulamaları karşılaştırılmış; Türkiye'deki mevzuat, ulusal projeler, jeolojik riskler ve yayımlanmış ölçüm bulguları birlikte değerlendirilmiştir.

Çalışmanın kapsamını konutlar, eğitim ve sağlık yapıları, işyerleri, kamu binaları, yeraltı yapıları ve radon birikimi bakımından önem taşıyan diğer kapalı hacimler oluşturmaktadır. İnceleme; radon-222'nin uranyum-238 bozunum serisindeki oluşumu, toprak ve yapı malzemelerinden emanasyonu, difüzyon ve basınç kaynaklı adveksiyonla taşınımı, bina içine giriş yolları, havalandırma ve enerji verimliliğiyle ilişkisi, ölçüm stratejileri, sağlık riskleri, yeni ve mevcut yapılarda koruyucu önlemler ile ulusal eylem planı bileşenlerini içermektedir. Çalışma bir saha ölçümü veya deneysel araştırma niteliğinde değildir; mevcut kanıtların sistematik biçimde sınıflandırıldığı, karşılaştırıldığı ve tez konusu doğrultusunda sentezlendiği doküman incelemesine dayalı bir araştırmadır (WHO, 2009; IAEA, 2014).

Kaynaklar; konuya doğrudan katkı, kurumsal veya akademik güvenilirlik, yayımlanma güncelliği, yöntemsel açıklık ve doğrulanabilirlik ölçütleri esas alınarak değerlendirilmiştir. Radonun kanserojenliği, doz-yanıt ilişkisi ve radyolojik korunma ilkelerinde uluslararası otoritelerin temel yayınlarına; Türkiye'ye ilişkin konsantrasyon ve uygulama değerlendirmelerinde ise resmî raporlar, mevzuat metinleri ve kullanıcı tarafından sağlanan akademik çalışmaların bulgularına öncelik verilmiştir. Farklı araştırmalardaki ölçüm süresi, cihaz türü, örneklem yapısı, mevsim

ve bina özellikleri aynı olmadığı için yerel sonuçlar doğrudan ulusal düzeye genellenmemiştir.

**Kaynak incelemesi aşağıdaki adımlarla yürütülmüştür:**

- Türkiye'nin Resmî Kaynakları: NDK mevzuatı, TAEK/TENMAK teknik raporları, Sağlık Bakanlığı faaliyet raporları ve ilgili resmî proje belgeleri.
- Hakemli ve kurumsal araştırmalar: Konut radonu epidemiyolojisi, ulusal veri tabanları, azaltım performansı ve yapı bilimi çalışmaları.
- Ulusal araştırma çalışmaları: Türkiye'de farklı iller ve bina türlerindeki lisansüstü tezler ile iki uluslararası çalışma. Bu çalışmalar yerel örnek kanıtı olarak kullanılmış, tek tek çalışmaların kısa ölçüm süresi, örneklem büyüklüğü, cihaz türü ve mevsimsellik sınırlamaları gözetilmiştir.

Mevzuat için "yürürlükte", "taslak", "rehber" ve "sertifika kredisi" ayrımı korunmuştur. İl veya bina bazındaki ölçümler ulusal prevalans göstergesi gibi genellenmemiş; aritmetik ortalama, geometrik ortalama, maksimum değer ve yıllık etkin doz gibi farklı metrikler birbirinin yerine kullanılmamıştır.

## Tarihsel Arka Plan Ve Radonun Kamu Sağlığı Gündemine Girişi

### Schneeberg ve Joachimsthal: Madenci Hastalığından Akciğer Kanserine

Radon riskinin tarihi nükleer enerji çağından çok daha eskidir. Saksonya'daki Schneeberg ve Bohemya'daki Joachimsthal madenlerinde gümüş, kobalt ve daha sonra uranyum cevheri çıkaran işçilerde olağan dışı yüksek ölüm oranları yüzyıllar boyunca

bildirilmiştir. Georgius Agricola, on altıncı yüzyılda maden havası ve tozla ilişkili ağır akciğer hastalıklarını betimlemiştir. Harting ve Hesse, 1879'da Schneeberg madencilerindeki ölümlerin önemli bölümünü otopsi ve klinik bulgularla akciğer kanseri olarak tanımlamış; 1869–1877 arasında yaklaşık 650 kişilik işgücünde 150 ölüm kaydetmiştir. Daha sonraki tarihsel değerlendirmelerde bazı dönemlerde madencilerin yaklaşık yarısının akciğer kanserinden öldüğü bildirilmiştir (National Research Council, 1988).

1924'te maden havasındaki radyoaktivite ile "Schneeberger hastalığı" arasında ilişki önerilmiş, fakat etkenin radon gazı mı, kısa ömürlü bozunum ürünleri mi, arsenik ve toz gibi eş maruziyetler mi olduğu uzun süre tartışılmıştır. 1950'ler ve 1960'larda aerosol fiziği, dozimetri ve madenci epidemiyolojisinin gelişmesiyle, bronş epiteline dozu esas olarak radona değil, solunan radon bozunum ürünlerinin alfa ışınımına bağlayan çağdaş model yerleşmiştir (ICRP, 2010; National Research Council, 1988).

**Dünya Savaşı Sonrası Uranyum Madencileri ve Nicel Risk**

Nükleer silah ve enerji programlarının hızlanmasıyla Kuzey Amerika, Çekoslovakya, Fransa, Almanya ve Kanada'daki uranyum madenlerinde geniş işçi grupları izlenmeye başlanmıştır. ABD Halk Sağlığı Servisi Colorado Plateau araştırmasını 1949'da başlatmış; binlerce beyaz ve Amerikan Yerlisi madenciden oluşan kohortlarda akciğer kanseri ölümlerinin beklenenin birkaç katına çıktığını göstermiştir (National Research Council, 1988; ICRP, 2010). Çalışmalar, kümülatif "working level month" maruziyeti arttıkça riskin yükseldiğini; maruziyet yaşı, maruziyetten geçen süre ve doz hızının riski değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Bu kohortlar iki politika sonucunu doğurmuştur. Birincisi, maden havalandırması ve mesleki maruziyet sınırları yalnız dış

gama dozu üzerinden değil radon bozunum ürünleri üzerinden düzenlenmeye başlanmıştır. İkincisi, radonun insan için kanserojen olduğuna ilişkin nedensellik kanıtı, konut düzeylerindeki daha düşük fakat çok daha uzun süreli maruziyetlerin incelenmesi için başlangıç noktası olmuştur.

## Stanley Watras Olayı: Maden Sorunundan Konut Sorununa

Aralık 1984'te Pennsylvania'daki Limerick Nükleer Güç Santrali'nde inşaat mühendisi olarak çalışan Stanley Watras, tesise girerken radyasyon portal alarmını tetiklemiştir. Tesis henüz nükleer yakıt yüklememiş olduğundan kaynağın işyeri olması mümkün değildi. İz sürme ölçümleri, Watras'ın Reading Prong jeolojik kuşağındaki evinde yaklaşık 2.700 pCi/L, yani yaklaşık 100.000 Bq/m³ radon bulunduğunu göstermiştir. Bu konsantrasyon, U.S. EPA'nın güncel 4 pCi/L eylem düzeyinin yaklaşık 675 katıdır. Ev temel altı basınç düşürme ve diğer düzeltmelerle 4 pCi/L'nin altına indirilmiştir (U.S. EPA, 1986). Watras olayı, aşağıki sonuçlarla tarihsel kırılmadır.

- Yüksek radonun yalnız maden ve uranyum işletmesi sorunu olmadığını, sıradan bir konutta ortaya çıkabileceğini göstermiştir.
- Bina kabuğu, temel altı zemin ve basınç farklarının belirleyici rolünü kamuoyuna somut bir vakayla anlatmıştır.
- ABD'de eyalet taramaları, test kiti piyasası, radon bölge haritaları ve azaltım mesleğinin hızla gelişmesine yol açmıştır. U.S. EPA, Eylül 1985'te Radon Action Program'ı başlatmıştır (U.S.EPA, 1986; U.S. EPA, 2025).

## Başlıca Tarihsel ve Düzenleyici Dönüm Noktaları

***Tablo 1.*** *Başlıca Tarihsel ve Düzenleyici Dönüm Noktaları*

| Yıl/ Dönem | Olay | Bilimsel veya Politik Sonuç |
|---|---|---|
| 1556 | Agricola'nın maden hastalıklarını betimlemesi | Maden havası, toz ve ölüm arasındaki ilişkinin erken kaydı |
| 1879 | Harting ve Hesse'nin Schneeberg madencilerinde akciğer kanseri tanımlaması | Mesleki akciğer kanserinin tarihsel klinik temeli |
| 1924 | Maden havası radyoaktivitesinin etken olarak önerilmesi | Radon/bozunum ürünü hipotezinin başlangıcı |
| 1949 sonrası | Colorado Plateau ve diğer uranyum madencisi kohortları | Maruziyet–yanıt ilişkisinin nicelleştirilmesi; havalandırma ve meslek politikaları |
| 1950'ler–1960'lar | Kısa ömürlü bozunum ürünlerinin bronş dozundaki rolünün anlaşılması | Ölçüm ve dozimetri odağının "radon kızı ürünlerine" kayması |
| 1984 | Stanley Watras'ın evindeki aşırı radon | Konut radonunun kitlesel kamu sağlığı sorunu olarak tanınması |
| 1985 | U.S. EPA Radon Action Program | Ulusal ölçüm, risk iletişimi, azaltım ve yeni yapı önleme programı |
| 1988 | IARC Monograph 43 | Radon ve bozunum ürünlerinin insan için kanserojen, Grup 1 sınıflaması |
| 1993 | ICRP Publication 65 | Ev ve işyerinde radona karşı koruma yaklaşımının sistemleştirilmesi |
| 2009 | WHO Handbook on Indoor Radon | 100 Bq/m³ hedefi; ölçüm, azaltım ve ulusal program çerçevesi |
| 2010 | ICRP Publication 115 | Birleşik madenci ve konut kanıtlarıyla risk katsayısının yükseltilmesi |
| 2013 | 2013/59/Euratom Direktifi | AB'de konut ve işyerleri için 300 Bq/m³'ü aşmayan referans; ulusal eylem planı zorunluluğu |
| 2014 | ICRP Publication 126 ve IAEA GSR Part 3 | Bütünleşik bina/yer yaklaşımı; yeni yapıda önleme ve mevcut yapıda azaltım |
| 2021–2025 | ABD Ulusal Radon Eylem Planı | Sağlık eşitliği, milyonlarca binaya erişim ve önlenebilir ölüm hedefleri |

## ICRP, IAEA, WHO ve IARC Politikalarındaki Değişim

**IARC:** 1988 tarihli Monograph 43, madenci epidemiyolojisi ve deneysel kanıtlara dayanarak radonu ve bozunum ürünlerini "insan için kanserojen" Grup 1'de sınıflandırmıştır (IARC, 1988). Bu, tehlike tanımlamasıdır; belirli bir bina için risk düzeyi uzun süreli ölçümle belirlenir.

**ICRP:** Publication 65'teki mesleki odak, Publication 115 ve 126 ile bütünleşik halk sağlığı yaklaşımına dönüşmüştür. ICRP 115, madenci ve konut birleştirilmiş analizlerine dayanarak nominal risk katsayısını yaklaşık iki katına çıkarmış; konut çalışmalarında ölçüm hatası düzeltildiğinde 100 Bq/m³ başına bağıl risk artışının Avrupa analizinde yaklaşık %16'ya ulaşabildiğini vurgulamıştır. ICRP 126, radonu "mevcut maruziyet durumu" olarak ele almış; ülke veya bölge için 100–300 Bq/m³ aralığında, 300 Bq/m³'ü aşmayan referans seviye; yeni binalarda önleme, mevcut binalarda azaltım ve yer/bina temelli yönetim önermiştir (ICRP, 2010; ICRP, 2014).

**IAEA:** GSR Part 3, hükümetin ulusal eylem planı oluşturmasını; yüksek doluluklu konut ve binalarda yıllık ortalama için 300 Bq/m³'ü aşmayan referans seviye belirlemesini; yapı yönetmeliklerinde önleyici ve düzeltici önlemler bulunmasını ister (IAEA, 2014). İşyerleri için yaklaşım bağlama göre farklılaşır ve 1.000 Bq/m³'e kadar bir referans seviyesine izin verir. Bu nedenle IAEA'nın işyeri değeri, AB'nin 300 Bq/m³ üst sınırıyla aynı değildir.

**WHO:** WHO politikası radyolojik optimizasyonu halk sağlığı ve tütün kontrolüyle birleştirmiştir. Mümkün olan ülkelerde 100 Bq/m³; bunun uygulanamadığı yerde 300 Bq/m³'ü aşmayan ulusal referans; en az üç aylık ölçüm; yapı yönetmeliği, azaltım hizmeti ve

kamusal iletişim önerir. Referans seviyenin altında da risk sıfır kabul edilmez (WHO, 2009).

## Dünya Çapındaki Uygulamalar, Politikalar Ve Bina Sistemleri

### Uluslararası ve Ulusal Referans Seviyelerinin Karşılaştırılması

Referans seviyeleri karşılaştırılırken üç hata önlenmelidir. Birincisi, "referans seviye" kanser riskinin başladığı eşik değildir. İkincisi, eylem düzeyi ile mevzuattaki azami değer aynı hukuki anlama gelmeyebilir. Üçüncüsü, konut, yüksek doluluklu kamu binası ve işyeri için farklı değerler uygulanabilir (WHO, 2009; European Union, 2013).

***Tablo 2.*** *Uluslararası ve Ulusal Referans Seviyelerinin Karşılaştırılması*

| Kurum/ Ülke | Konut/Yüksek Doluluklu Bina | İşyeri | Politika Anlamı |
|---|---|---|---|
| WHO | Hedef 100 Bq/m³; olanaksızsa en çok 300 Bq/m³ | Ulusal sisteme bağlı | Halk sağlığı temelli referans; altında da optimizasyon |
| ICRP 126 | 100–300 Bq/m³; üst sınır 300 | Üst sınır 300 Bq/m³ önerisi | Bütünleşik yer ve bina yaklaşımı |
| IAEA GSR Part 3 | En çok 300 Bq/m³ | En çok 1.000 Bq/m³ | Ulusal eylem planı ve yapı kodu gereği |
| Avrupa Birliği | En çok 300 Bq/m³ | En çok 300 Bq/m³ | Üye devletler için bağlayıcı direktif çerçevesi |
| ABD EPA | Eylem 4 pCi/L ≈ 148 Bq/m³; 2–4 pCi/L arası azaltım düşünülür | İş sağlığı sistemi ayrıca uygulanır | Federal rehber; eyalet/yerel kodlarla uygulama |
| Kanada | 200 Bq/m³ | Günde 4 saatten fazla kullanılan işyerlerinde 200 Bq/m³ rehberi | Bir yıl içinde düzeltme; ALARA |

| Kurum/ Ülke | Konut/Yüksek Doluluklu Bina | İşyeri | Politika Anlamı |
|---|---|---|---|
| Norveç | 100 Bq/m³'te eylem; 200 Bq/m³ azami | Bağlama göre 200 Bq/m³ | Okul, anaokulu ve kiralık konutlarda güçlü uygulama |
| İsveç | 200 Bq/m³ | 200 Bq/m³ | İşyerinde düzeltme sonrası aşım için bildirim |
| Finlandiya | Mevcut konut 300; yeni konut 200 Bq/m³ | Faaliyete göre düzenleme | Yeni bina için daha sıkı önleyici hedef |
| Almanya | 300 Bq/m³ | 300 Bq/m³ | Radon önlem alanları ve ulusal eylem planı |
| Birleşik Krallık | 200 Bq/m³ eylem; 100 Bq/m³ hedef | İşyerinde ayrı risk değerlendirmesi | "Radon Affected Area" haritası ve BR 211 koruma düzeyleri |
| Türkiye, yürürlükte | 400 Bq/m³ | 1.000 Bq/m³ | Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, md. 37–38 |
| Türkiye, 2023 taslağı | 300 Bq/m³ | Belirli işyerlerinde 1.000 Bq/m³ | Yürürlüğe girdiği doğrulanmamış taslak |

Bu tablo, Türkiye'nin yürürlükteki konut değerinin WHO hedefinin dört, AB/ICRP üst düzeyinin 1,33 katı olduğunu gösterir. Referans seviyelerinin doğrudan "güvenli/güvensiz" sınırı gibi yorumlanmaması gerekir; örneğin 290 Bq/m³, 301 Bq/m³'ten biyolojik olarak farklı bir kategori değildir.

## Amerika Birleşik Devletleri

ABD sistemi federal rehber, eyalet programı, yerel yapı kodu, gayrimenkul işlemi ve meslek standardının birleşimidir. U.S. EPA, bütün konutların test edilmesini önerir; 4 pCi/L (yaklaşık 148 Bq/m³, uygulamada 150 Bq/m³ olarak yuvarlanır) ve üzerinde azaltım, 2–4 pCi/L arasında da azaltımın değerlendirilmesini ister. EPA Radon Zone Map, ilçeleri öngörülen iç ortam potansiyeline

göre Zone 1 (>4 pCi/L), Zone 2 (2–4 pCi/L) ve Zone 3 (<2 pCi/L) olarak sınıflar. Harita kaynak ve kod önceliği içindir; tek bir evin testinin yerine geçmez.

ABD Ulusal Radon Eylem Planı 2021–2025, radon hizmetlerine erişimde eşitliği, sekiz milyon binada risk azaltımını ve yılda yaklaşık 3.500 gelecekteki akciğer kanseri ölümünün önlenmesini hedeflemiştir. EPA resmi web sayfası yeni dönem planının geliştirilmekte olduğunu belirtmektedir (U.S. EPA, 2015). Radon Resistant New Construction yaklaşımı; gaz geçirgen agrega, plastik membran, temel geçişlerinin kapatılması, çatı üstüne çıkan boru ve fan için elektrik kutusu bileşenlerini yaygınlaştırmıştır. ANSI/AARST ölçüm ve azaltım standartları ile International Residential Code'un radon eki, uygulamayı teknik ayrıntıya dönüştürür (U.S. EPA, 2001). Politikanın güçlü yanı test–düzelt–doğrula döngüsüdür. Zayıf yanı, federal eylem düzeyinin çoğunlukla bağlayıcı bina kabul şartı olmaması ve eyaletler arasında lisans, bildirim, kira ve satış kurallarının değişmesidir.

**Avrupa Birliği ve Seçilmiş Üye Ülkeler**

2013/59/Euratom Direktifi, radon politikasını nükleer tesis mevzuatının dar alanından çıkarıp bina stokuna yerleştirmiştir. Direktifin 54. maddesi işyerleri, 74. maddesi iç ortamlar için yıllık ortalama 300 Bq/m³'ü aşmayan ulusal referans seviyeleri öngörür (European Union, 2013). 103. madde ve Ek XVIII; ulusal radon eylem planında sorumluluklar, ölçüm stratejisi, radon alanlarının belirlenmesi, mevcut binaların düzeltilmesi, yeni binalara girişin önlenmesi, kamu bilgilendirmesi, işyeri yönetimi ve yapı malzemeleriyle koordinasyonu ister.

**Almanya**, Radon Protection Act hükümleriyle 300 Bq/m³ referans değerini ve "radon precautionary area" ilanını kullanır

(Federal Office for Radiation Protection). Önlem alanlarında yeni binaların zeminle temas eden bölümlerinde radon girişine karşı teknik önlemler ve işyerlerinde ölçüm yükümlülükleri güçlenir. Federal radon eylem planı; haritalama, ölçüm kalitesi, yapı tekniği, işyeri, sağlık iletişimi ve araştırmayı birlikte ele alır.

**Birleşik Krallık**, British Geological Survey ve UK HSA'nın jeoloji ile konut ölçümlerini birleştirdiği radon potansiyel haritalarını kullanır. Konutların en az %1'inin 200 Bq/m³ eylem düzeyini aşmasının beklendiği alanlar "Radon Affected Area" sayılır. BRE BR 211 rehberinde yeni yapı koruması temel ve tam düzey olarak kademelendirilir: temel koruma radon membranı; tam koruma membrana ek olarak sump veya havalandırmalı temel altı düzenini içerir. Harita tasarım düzeyini seçtirir, fakat tamamlanmış binadaki ölçüm gereğini ortadan kaldırmaz (British Geological Survey, 2022).

**İrlanda, Çekya, Avusturya ve İspanya** gibi ülkeler de direktif uyarınca ulusal eylem planı, radon öncelikli alan, kamu binası ölçümü ve yeni bina önlemlerini farklı yoğunluklarda kullanmaktadır. Uygulama farklılıklarının ortak nedeni, bina stokunun yaşı, jeolojik risk, iklim, yerel yönetim kapasitesi ve zorunlu test kapsamıdır.

**İskandinav Ülkeleri**

İskandinav yaklaşımı, soğuk iklimde güçlü baca etkisi, hava sızdırmaz konut stoğu ve granitik/uranyumlu jeoloji nedeniyle özellikle gelişmiştir.

**Norveç:** DSA, 100 Bq/m³ üzerinde azaltım ve 200 Bq/m³'ün aşılmamasını ister. Kiralık konutlar, okullar ve anaokullarında

ölçüm ve belgelemeye özel önem verilir. Yeni binalarda radon bariyeri ve sonradan etkinleştirilebilecek temel altı önlem yaygındır
**İsveç:** Konut ve işyerleri için 200 Bq/m³ referans seviyesi kullanılır. İşveren, ölçüm ve düzeltme sonrasında değer hâlâ yüksekse radyasyon güvenliği otoritesine bildirim sürecine girmektedir.
**Finlandiya:** Mevcut konutlar için 300, yeni konutlar için 200 Bq/m³ referans seviyesi vardır. STUK, ısıtma döneminde eylül–mayıs arasında en az iki, tercihen üç aylık ölçümü vurgulamaktadır (Norwegian Radiation and Nuclear Safety Author; Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland; Swedish Radiation Safety Authority).
**Danimarka ve İzlanda:** Yeni yapılarda zemin gazına karşı sızdırmazlık, havalandırma ve ulusal yapı kodu hükümleri kullanılır. Nordik ülkelerin ortak değerlendirmesi, yalnız membran şartının değil, doğrulanabilir performansın önemli olduğunu göstermektedir.

## Kanada

Health Canada, konutlar ile günde dört saatten fazla kullanılan kamu ve işyeri ortamları için 200 Bq/m³ yıllık ortalama rehberini uygular. Değer aşıldığında düzeltmenin bir yıl içinde tamamlanması; her durumda maruziyetin makul ölçüde düşük tutulması önerilir. Güncel ulusal iletişim materyallerinde yaklaşık her beş konuttan birinin rehberin üzerinde olduğu, radonun Kanada'da yılda yaklaşık 3.200 akciğer kanseri ölümüne ve akciğer kanserlerinin yaklaşık %16'sına katkıda bulunduğu belirtilir (Health Canada, 2025a; Health Canada, 2010).

Ulusal Bina Kodu 2010'dan itibaren zemin gazı bariyeri ve temel altından ileride fan bağlanmasına imkân veren boru çıkışı gibi hükümler getirmiştir; ancak eyalet ve belediye uyarlamaları değişmektedir. Health Canada'nın 52 konutluk aktif zemin emişi saha çalışmasında ortalama azalma %90,7, medyan %93,5; en

yüksek %99,6 ve en düşük %47,2 bulunmuş, bütün evler 200 Bq/m³ altına düşürülmüştür. Bu sonuç, sistemin yüksek etkinliğini ve bina özelinde devreye alma/doğrulama gereğini birlikte gösterir.

## Ulusal Stratejilerin Ortak Bileşenleri

Olgun radon programları aşağıdaki bileşenlerin çoğunu aynı anda içerir:

- Ulusal referans seviyesi ve bunun "optimizasyon" anlamının açık tanımı.
- Jeojenik radon potansiyeli ile bina ölçüm sonuçlarını birleştiren öncelik haritası.
- Temsilî ulusal tarama ve yüksek riskli alanlarda yoğunlaştırılmış ölçüm.
- Okul, çocuk bakım tesisi, hastane, kamu binası, yeraltı işyeri ve kiralık konut için ayrı program.
- Yeni binalarda risk kademeli veya ülke çapında radona dayanıklı yapı hükümleri.
- Mevcut binalarda teşvik, düşük gelir desteği, kiracı ve alıcı koruması.
- Ölçüm laboratuvarı ve azaltım yüklenicisi için yeterlilik, kalite güvence ve denetim.
- Ölçüm öncesi kapalı-bina koşulları, asgari süre, cihaz yerleşimi, mevsim düzeltmesi ve belirsizlik kuralları.
- Düzeltme sonrası doğrulama ve uzun dönem yeniden ölçüm.
- Program performansının ölçülen bina, düzeltilen bina, önlenen maruziyet ve eşitlik göstergeleriyle izlenmesi.

## Akıllı Binalar, Enerji Verimliliği ve Sürekli İzleme

Akıllı binalarda radon kontrolü üç katmanda kurulabilir:

**Algılama katmanı:** Bina otomasyonuna bağlı iyonizasyon odası veya yarı iletken tabanlı radon sensörleri, iç–dış basınç, hava debisi, karbondioksit, sıcaklık ve bağıl nem sensörleriyle birlikte izlenir. Saatlik/günlük veriler mevsim, kullanım ve HVAC değişikliklerini anlamak için yararlıdır. Tüketici tipi cihazların kalibrasyon, duyarlılık, cevap süresi ve algoritmaları farklı olduğundan resmî uygunluk kararında kalite güvenceli uzun süreli ölçümün yerini almamalıdır.

**Kontrol katmanı:** Fan-hazır radon borusundaki fan, temel altı basıncı bina içinden düşük tutacak şekilde çalıştırılır. Mekanik havalandırma, iç mekânı aşırı negatif basınca düşürmeden dengelenir. Değişken hızlı fan ve basınç geri beslemesi enerji tüketimini düşürebilir; ancak güvenlik fonksiyonunun yalnız konsantrasyon alarmına bağlı aralıklı çalışması, sensör gecikmesi ve ölçüm belirsizliği nedeniyle dikkatle tasarlanmalıdır.

**Doğrulama katmanı:** Sistem arızası, boru tıkanması, fan durması veya bina kabuğu değişikliği için alarm; yıllık fonksiyon kontrolü; belirli aralıklarla bağımsız uzun süreli ölçüm ve bakım kaydı gerekir. Enerji yönetim sistemi radon verisini trend olarak tutmalı, kişisel mahremiyet ve bina sağlık verisi yönetişimi açık olmalıdır.

Yüksek hava sızdırmazlığı, ısıtma/soğutma enerjisini azaltırken doğal infiltrasyonu düşürür. Egzoz fanları veya dengesiz mekanik sistemler iç mekânı negatif basınca getirirse zemin gazı emişi artabilir. Bu nedenle “yeşil bina” ile “düşük radon” kendiliğinden eş anlamlı değildir; enerji modeline basınç dengesi, taze hava ve radon devreye alma kriteri eklenmelidir.

## LEED ve BREEAM Bağlamında Radon

**LEED:** USGBC'nin LEED BD+C Homes/Midrise sistemindeki radona dayanıklı yapım kredisi, EPA Zone 1'de ve ABD dışındaki yüksek riskli alanlarda gaz geçirgen 10–15 cm tabaka, temel altı boru, polietilen örtü, geçişlerin sızdırmazlığı, çatı üstüne çıkan dikey boru ve fan için elektrik hazırlığını tarif eder (U.S. Green Building Council). Büyük yenilemede ön test ve 4 pCi/L üzerindeyse aktif azaltım yaklaşımı vardır. Ancak bu hüküm bütün LEED sürümlerinde ve bütün proje tiplerinde otomatik zorunlu bir önkoşul değildir. Tezde "LEED sertifikalı her bina radon açısından test edilmiştir" sonucu çıkarılamaz; sürüm, rating system, ülke uyarlaması ve seçilen kredi kontrol edilmelidir.

**BREEAM:** BREEAM In-Use International Residential V6 bilgi tabanında "Hea 13 Radon risk management" başlığı bulunur (BREEAM Knowledge Base). BREEAM New Construction değerlendirmelerinde radon, saha ve sağlık değerlendirmesi kapsamında proje/ülke kılavuzuna göre ele alınabilir. Bununla birlikte doğal radon, BREEAM'in "contaminated land" kredisinde otomatik olarak kirlenmiş arazi sayılmaz. LEED'de olduğu gibi kanıt, kullanılan teknik kılavuz ve sürüme özgü olmalıdır.

**En iyi entegrasyon modeli:** Sertifika puanından bağımsız olarak (i) saha radon potansiyeli taraması, (ii) radona dayanıklı temel detayı, (iii) tamamlanmış bina uzun süreli testi, (iv) işletme sensörü ve bakım planı, (v) azaltım sonrası doğrulama birlikte şartnamelendirilmelidir.

## Ulusal Uygulamalar, Projeler, Mevzuat Ve Jeolojik Risk

### TAEK'in 7.293 Konutluk Ulusal Veri Sentezi

TAEK'in 2014 tarihli "Türkiye'de Konutlarda Radon Ölçümleri" teknik raporu, 1984–2012 arasında 81 il, 153 yerleşim

ve 7.293 konutta yapılan ölçümleri birleştirmiştir. Çalışmalar farklı yıllar, mevsimler, ölçüm süreleri ve seçilmiş yerleşimleri içerdiğinden modern anlamda tek aşamalı olasılıklı ulusal prevalans araştırması değildir; yine de Türkiye'nin en kapsamlı yayımlanmış kamu kaynaklarından biridir (TAEK, 2014).

***Tablo 3.*** *TAEK'in 7.293 Konutluk Ulusal Veri Sentezi*

| **Gösterge** | **TAEK 2014 Sonucu** |
|---|---|
| İl sayısı | 81 |
| Yerleşim sayısı | 153 |
| Konut sayısı | 7.293 |
| Aritmetik ortalama | 81 Bq/m³ |
| Geometrik ortalama | 57 Bq/m³ |
| Geometrik standart sapma | 2,3 |
| Yaz ortalaması | 65 Bq/m³ |
| Kış ortalaması | 93 Bq/m³ |
| <100 Bq/m³ | 5.784 konut; %79,3 |
| <200 Bq/m³ | 6.768 konut; %92,8 |
| <400 Bq/m³ | 7.218 konut; %99,0 |
| ≥400 Bq/m³ | Yaklaşık %1,0 |

Rapor, Giresun–Şebinkarahisar'da 312 Bq/m³; Ardahan'da 282 Bq/m³; Mardin'de 208 Bq/m³; Nevşehir'de yaklaşık 174 Bq/m³; Çanakkale'nin Kestanbol ve Ayvacık yerleşimlerinde sırasıyla 167

ve 190 Bq/m³ gibi yüksek il/yerleşim ortalamaları bildirmiştir (TAEK, 2014). Bu değerler bina bazındaki maksimum değil, çalışmanın gruplandırılmış sonuçlarıdır. Granitik, volkanik/tüflü birimler, uranyum oluşumları, fay/çatlak sistemleri ve düşük havalandırma açıklayıcı etmenler olarak tartışılmıştır.

TAEK raporunun önemli uyarısı, radon haritası ile deprem/fay haritasının bütünüyle çakışmamasıdır. Birinci derece deprem kuşağındaki birçok il ulusal ortalamanın altında kalmıştır. Faylar zemin gazına geçirgen kanal sağlayabilse de radon riskini tek başına belirlemez; radyum içeriği, geçirgenlik, nem, temel türü ve bina basıncı birlikte değerlendirilmelidir.

**Sağlık Bakanlığı–TAEK/NDK "Türkiye Radon Haritası" Projesi**

Sağlık Bakanlığı ile dönemin TAEK'i arasında 2013'te yapılan protokol doğrultusunda, Türkiye İstatistik Kurumu tarafından seçilen yaklaşık 62.300 adreste, bodrum/zemin ve birinci katlarda, soğuk dönemde yaklaşık iki aylık pasif dedektör ölçümü planlanmıştır (Sağlık Bakanlığı, 2017; Demiröz, 2019). IAEA'ya sunulan 2019 ülke belgesine göre dağıtım Eylül 2014'te başlamış, saha çalışması 2018'de tamamlanmış; adres hataları ve hane reddi için bir asıl ve iki yedek adres yöntemi, çağrı merkezi ve farkındalık çalışmaları kullanılmıştır. Sağlık Bakanlığı 2017 Faaliyet Raporu, ölçümlerin 2016–2017 döneminde 22, 2017–2018 döneminde 17 ilde sürdüğünü ve bunu Ulusal Radon Kontrol Programı'nın izleyeceğini belirtmiştir.

Bu büyük proje ile TAEK'in 2014'te yayımladığı 7.293 konutluk tarihsel veri sentezi aynı çalışma değildir. 2019 sunumunda nihai teknik rapor ve haritanın hazırlanacağı ifade edilmesine rağmen, 29 Temmuz 2026'ya kadar yapılan resmî kaynak

taramasında yaklaşık 62.300 adreslik projenin doğrulanabilir nihai sayısal veri seti veya kamuya açık teknik sonuç raporu bulunamamıştır. Bu nedenle tezde projeye ilişkin il bazlı sayılar, yayımlanmış birincil rapor olmaksızın aktarılmamalı; "saha çalışmasının tamamlandığı, sonuç raporunun kamuya açık olarak doğrulanamadığı" yazılmalıdır.

## Ulusal Bazı Çalışmaların Toplu Bulguları

Ekli çalışmalar ulusal temsil iddiası taşımaz; buna karşın bina türü, mevsim, kat ve havalandırmanın önemini somutlaştırır.

***Tablo 4.*** *Ulusal Çalışmaların Toplu Bulguları*

| Yer / Yapı | Tasarım ve Yöntem | Başlıca Sonuç | Yorum |
|---|---|---|---|
| Akhisar–Gölmarmara–Gördes–Sındırgı–Köprübaşı konutları | 137 konut, yaklaşık bir aylık CR-39 | Bölge ortalamaları 156,45–174,9; aralıklar 63–442 Bq/m³ | Kısa süre ve seçilmiş jeoloji; yerel yüksek değerler (Çam Kaynar, 2011) |
| Erzincan konutları | 84 konut, dört mevsim CR-39 | 4,87–767,37; yıllık ortalama 91 Bq/m³; doz 2,29 mSv/y | Kış yüksek; mevsimsel ölçüm güçlü yön (Öztürk, 2012) |
| Denizli jeotermal otelleri | Aylık LR-115 | 57,71–275,7 Bq/m³ | Termal/jeolojik bağlam; konaklama süresi ayrıca değerlendirilir (Baran, 2013) |
| Afyonkarahisar konutları | 50 konut, dört jeolojik bölge ve dört dönem | 5–2.494; yıllık ortalama 168,6 Bq/m³ | Çok yüksek uç değer; bölge ortalamaları 125–224,2 (Açıl, 2014) |
| Afyonkarahisar işyerleri | 29 işyeri, dört dönem | 13–1.932; yıllık ortalama 159 Bq/m³ | İşyerinde kullanım süresi/doz ayrımı gerekli (Özçelik, 2014) |

| Yer / Yapı | Tasarım ve Yöntem | Başlıca Sonuç | Yorum |
|---|---|---|---|
| Samsun çeşitli binalar | Kısa dönem AlphaGUARD | Genel 1–131, ortalama 26; bir camide ortalama 1,9 | Açık pencere 9,5; uzun kapalı ofis 49,66; havalandırma ve temel |
| İstanbul–Fatih okulları | 25 okul, 509 LR-115 | 40–395 Bq/m³ | Derslikler için uzun doluluk ve çocuk koruması |
| Kocaeli–Yahya Kaptan konutları | 24 CR-39 | Ortalama 41 Bq/m³; doz 1,03 mSv/y | Düşük grup ortalaması riskin sıfır olduğu anlamına gelmez (Karatay, 2016) |
| Muğla eski/yeni konutlar | 25 konut, 100 LR-115 | Eski ort. 230,01; yeni ort. 144,84 Bq/m³ | Yaş, temel ve havalandırma olası açıklayıcı; küçük örneklem (Erdoğan, 2017) |
| Isparta okulları | 12 okul, 576 E-PERM ölçümü | Mevsim ortalamaları 189–528; genel 358±44 Bq/m³ | Yüksek yerel okul bulgusu; ulusal genelleme yapılmamalı (Çine, 2017) |
| Nevşehir okul/kamu binaları | 24 bina, iki altı aylık AlphaGUARD dönemi | Yaz aritmetik 75; kış 67 Bq/m³ | Beklenen mevsim deseninden farklılık, yerel işletme etkisini gösterir (Akyürek, 2017) |
| İzmir kapalı metro istasyonları | 11 istasyon, aylık/yıllık LR-115 | Yıllık istasyon ort. 249,03–723,69; genel 392,86 Bq/m³ | Personel ve yolcu bulunma süreleri çok farklıdır (Karataş, 2017) |
| Batman ilkokulları | 41 okul, üç aylık CR-39 | Ortalama 41; en yüksek 109 Bq/m³ | Kat yükseldikçe azalma (Aldemir, 2018) |
| Sakarya Üniversitesi binaları | 32 bina, mevsimsel LR-115 | 0,2–149,53; yıllık ort. 38,7 Bq/m³ | Kış 63,1; yaz 21,1; kat ve havalandırma ilişkisi (Işık, 2018) |

Çalışmalar arası farkların gerçek coğrafi değişim kadar yöntemden de kaynaklandığı unutulmamalıdır. Bir aylık pasif ölçüm, sürekli cihazla birkaç günlük tarama, dört mevsim ölçümü ve yıllık ortalama aynı belirsizliğe sahip değildir. Doz sonuçları ise farklı doluluk, denge faktörü ve dönüşüm katsayıları nedeniyle doğrudan sıralanmamalıdır.

**Yürürlükteki Radyasyon Mevzuatı**

NDK'nin güncel mevzuat sayfasında yürürlükte gösterilen 24 Mart 2000 tarihli Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği'nin 37. maddesi, konutlarda yıllık ortalama 400 Bq/m³, işyerlerinde 1.000 Bq/m³ radon konsantrasyonunu müdahale düzeyi olarak verir; yapı malzemelerinin radyoaktivite kontrolü ilkesini de içerir (Nükleer Düzenleme Kurumu-Mevzuat, 2023; Resmî Gazete/23999). 38. madde yeraltı madenleri, tüneller ve benzeri işyerlerinde ölçüm yapılmasını; 1.000 Bq/m³ aşıldığında havalandırma ve kontrol tedbirlerini düzenler. 2023'te dış görüşe açılan Radyasyondan Korunma Yönetmeliği Taslağı:

- Bina içi yıllık ortalama için 300 Bq/m³ referans seviyesi,
- Bu değerin üzerindeki binalar için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca, NDK görüşüyle önlem,
- Yapı malzemelerinden kaynaklanan dış gama maruziyeti için yılda 1 mSv,
- Belirli işyerleri için 1.000 Bq/m³ ve daha yüksek maruziyetlerde planlı maruziyet hükümleri öngörmüştür (Nükleer Düzenleme Kurumu-Mevzuat, 2023).

Taslak hükümleri, nihai düzenleme Resmî Gazete'de yayımlanıp yürürlüğe girmedikçe bağlayıcı değildir. Bu raporun kesim tarihinde

söz konusu taslak, NDK'nin yürürlükteki mevzuat listesinde nihai yönetmelik olarak saptanmamıştır.

## Yapı Denetimi, İmar Mevzuatı ve Standardizasyon Boşluğu

Türkiye'de yapı denetim mekanizmaları ve imar mevzuatı incelendiğinde, "Yapı Denetimi Uygulama Usul ve Esasları Yönetmeliği" ile "İmar Kanunu" gibi temel düzenlemelerin statik ve deprem güvenliğini önceliklendirirken radyoaktif bir risk etmeni olan radon gazı yalıtımını ve standardizasyonunu çoğunlukla göz ardı ettiği görülmektedir (4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun; Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği; Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği). TENMAK (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu) tarafından yayımlanan "Kapalı Ortamlarda Radon ve Yapı Malzemelerindeki Radyoaktiviteye İlişkin Kılavuz (RSGD-KLV-013)" raporlarında zemin gazı tahliyesi ve sızdırmazlık bariyerlerinin önemi vurgulansa da, bu kriterler yasal mevzuatta bağlayıcı ve net teknik zorunluluklar olarak yer bulmamaktadır; bu durum yapı denetim süreçlerinde denetlenebilir bir yasal boşluk yaratmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki ulusal radon eylem planları ve yapı kodlarının (örneğin Kanada'daki Quebec Yapı Kodu) aksine, Türkiye'deki yapı üretim zincirinde radon konsantrasyonunu düşürecek yalıtım tedbirlerinin "Binalarda Radon Gazı Etkisinin Azaltılmasına Yönelik Alınabilecek Önlemler Üzerine Bir Değerlendirme" gibi akademik çalışmalarda ve uluslararası standartlarda (Eurocode/IAEA) belirtilmesine rağmen standartlara bağlanmaması, kapalı ortamlarda uzun vadeli akciğer kanseri riskini artıran önemli bir halk sağlığı ve teknik mevzuat eksikliği olarak ortada durmaktadır.

## Yapı Malzemeleri ve Türkiye Verisi

TENMAK arşivindeki 1.033 örnek ve 33 malzeme türünü kapsayan Türkiye çalışmasında yapısal malzemeler için Ra-226, Th-232 ve K-40 etkinlikleri sırasıyla yaklaşık 4,3–258; 1,3–124,9 ve 24,4–1.092 Bq/kg aralıklarında bildirilmiştir (Turhan et al., 2008; Başdemir, 2023). Uçucu kül ve fosfojips gibi katkılarda daha yüksek değerler görülebilmiştir. Yapısal ve kaplama malzemelerinin grup ortalama radyum eşdeğerleri çoğunlukla 370 Bq/kg tarama değerinin altında kalmış; tuğla grubu için hesaplanan iç doz ortalaması yaklaşık 1,06±0,13 mSv/y ile dikkat çekmiştir. Bu veriler iki ayrı maruziyet yolunu ayırmayı gerektirir:

- Ra-226, Th-232 ve K-40'dan kaynaklanan dış gama dozu;
- Ra-226'dan üretilen radonun gözeneklerden emanasyon ve ekshalasyonu.

Yüksek toplam radyum, yüksek iç ortam radonunu garanti etmez; radonun gözenek hacmine kaçış oranı, difüzyon uzunluğu, yüzey kaplaması, malzeme miktarı ve hava değişimi belirleyicidir. Ekli 2023 modelleme tezinde, yüksek difüzyon/emanasyon ve düşük havalandırma birleştiğinde tünel kalıp beton yapı malzemesi katkısının ihmal edilemeyeceği; sıradan koşullarda zeminin çoğu yapı için baskın kaynak olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

AB Direktifi yapı malzemelerinden kaynaklanan dış gama için 1 mSv/y referansını ve tarama amaçlı etkinlik konsantrasyon indeksini kullanır (European Union, 2013):

$$I = C(Ra\text{-}226)/300 + C(Th\text{-}232)/200 + C(K\text{-}40)/3000$$

İndeks doğrudan doz veya radon emisyonu değildir; hangi malzemenin ayrıntılı değerlendirmeye alınacağını belirleyen tarama aracıdır.

## Türkiye'nin Jeolojik Yapısına Göre Risk Analizi

Türkiye'nin karmaşık tektonik ve magmatik yapısı, radon potansiyelinin kısa mesafelerde değişmesine elverişlidir. Risk değerlendirmesi aşağıdaki katmanları birlikte kullanmalıdır:

- **Kaynak terimi:** Granit, granodiyorit, riyolit, tüf, bazı volkanik kül birimleri, fosfatlı oluşumlar ve uranyum cevherleşmeleri daha yüksek U/Ra içerebilir. Şebinkarahisar çevresindeki uranyum oluşumları ve granitik–volkanik birimler buna örnektir.
- **Taşınım yolu:** Kuzey Anadolu Fayı, Doğu Anadolu Fayı ve Batı Anadolu graben sistemi gibi çatlaklı/faylı zonlar, radon taşıyan zemin gazına yol sağlayabilir. Ancak radonun 3,82 günlük yarı ömrü nedeniyle etkili taşınım, uygun geçirgenlik ve basınç akışı gerektirir.
- **Zemin özelliği:** Çakıl ve kırıklı kaya yüksek geçirgenlikle daha fazla advektif akış sağlayabilir. Çok kuru veya orta nemli gözenekler emanasyonu kolaylaştırırken, suya doygunluk gaz fazı taşınımını yavaşlatabilir; sonuç doğrusal değildir.
- **Bina bağlantısı:** Bodrum, döşeme çatlağı, tesisat geçişi, drenaj/sump, havalandırılmayan döşeme altı ve negatif iç basınç jeolojik potansiyeli iç ortam maruziyetine dönüştürür.
- **İşletme:** Kışın kapalı pencere ve güçlü baca etkisi çoğu yerde konsantrasyonu yükseltir; iklimlendirme ve kullanıcı davranışı mevsim desenini tersine de çevirebilir.

Öncelikli tarama alanları; granitik/volkanik ve uranyumlu birimler, aktif/kırıklı tektonik zonlar, jeotermal sahalar, yeraltı yapıları, karsik/mağara ortamları, zeminle temaslı ve düşük havalandırmalı okul/konutlar olarak belirlenebilir. Ancak "fay üzerinde = yüksek radon" veya "düşük risk haritası = ölçüm

gereksiz" biçimindeki deterministik çıkarımlar bilimsel değildir. MTA jeoloji ve diri fay katmanları, NDK/TENMAK çevresel radyoaktivite verileri ve kalite güvenceli bina ölçümleri coğrafi bilgi sisteminde birleştirilmelidir (Nükleer Düzenleme Kurumu, Çevresel Radyoaktivite Atlası; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü-Yerbilimleri Harita Görüntüleyici).

## Radonun Yapılardaki Kaynakları Ve Fiziksel Mekanizmaları

U-238'in yarı ömrü yaklaşık 4,47 milyar yıl, Ra-226'nın 1.600 yıl ve Rn-222'nin 3,8235 gündür (National Research Council, 1988; WHO, 2009). Uzun ömürlü ana çekirdeklerin toprak ve kayada bulunması sürekli radon üretir. Rn-222'nin birkaç günlük yarı ömrü, hem gözeneklerden binaya taşınmasına yetecek kadar uzun hem de uzak mesafeli atmosferik taşınımını sınırlandıracak kadar kısadır.

Th-232 serisindeki Rn-220 ("toron") 55,6 saniyelik kısa yarı ömrü nedeniyle kaynağa çok yakın ortamlar dışında daha sınırlı taşınır. Bununla birlikte toronca zengin sıva/toprak yapı malzemelerinde duvara yakın ölçümlerde önemli olabilir. Rn-219 ise U-235 serisinde çok kısa yarı ömürlüdür ve bina radon programlarının ana hedefi değildir.

## Emanasyon, Difüzyon ve Adveksiyon

Ra-226 alfa bozunumunda oluşan Rn-222 atomu geri tepme enerjisi kazanır. Atom mineral tanesinin yüzeyine yeterince yakınsa taneden çıkarak hava veya su dolu gözenek hacmine geçer; buna emanasyon denir. Emanasyon katsayısı, üretilen radonun gözenek hacmine kaçan payıdır ve tane boyutu, mineral yerleşimi, porozite ve nemden etkilenir (ICRP, 2010; IAEA, 2014). Gözenekteki radon iki ana süreçle taşınır:

- **Moleküler difüzyon:** Yüksek konsantrasyondan düşüğe doğru taşınımdır. Yoğun ve düşük geçirgen malzemede baskın olabilir; radon yarı ömrü erişilebilir difüzyon mesafesini sınırlar.
- **Basınca bağlı adveksiyon:** Toprak gazının basınç gradyanı boyunca toplu hareketidir. Geçirgen dolgu, çakıl, kırıklı kaya ve açık çatlaklarda binaya giren radon akısının çoğunu oluşturabilir.

Kayadaki uranyum miktarı yalnız "kaynak kapasitesini" gösterir. İç ortam konsantrasyonu, kaynak × emanasyon × taşınım × bina giriş alanı ÷ havalandırma ve bozunma dengesinin sonucudur (ICRP, 2010; IAEA, 2014).

**Bina–Zemin Basınç Farkı ve Baca Etkisi**

Isıtılan binada iç hava yükselir ve üst kısımlardan kaçar. Alt katlarda oluşan küçük negatif basınç, temel altı toprak gazını çatlak ve açıklıklardan içeri çeker. Birkaç pascal büyüklüğündeki fark bile zemin geçirgense önemli akış üretebilir. Bu "baca etkisi" soğuk havada artar (BRE, 2023; IAEA, 2014). Aşağıdaki etmenler negatif basıncı güçlendirebilir:

- Banyo/mutfak egzoz fanları ve kurutucu egzozu,
- Dengesiz mekanik havalandırma ve dönüş havası kanalı kaçakları,
- Şömine ve yanma havası alan cihazlar,
- Rüzgârın bina yüzeylerinde oluşturduğu basınç dağılımı,
- Asansör ve merdiven şaftları,
- Üst katlardaki hava kaçakları,
- Yağış, don veya zemin nemi nedeniyle yüzeyden gaz çıkışının azalması ve akışın temel altına yönelmesi.

Radon girişinin azaltılması için yalnız içeriye daha fazla hava vermek değil, temel altı basınç alanını kontrol etmek gerekir. Aktif temel altı sistemin amacı, döşeme altında sürekli olarak bina içinden daha düşük bir basınç oluşturarak akış yönünü binadan emiş noktasına çevirmektir.

***Tablo 5.*** *Başlıca Giriş Yolları*

| Giriş Yolu | Mekanizma | İnceleme Noktası |
|---|---|---|
| Beton döşeme çatlakları | Advektif zemin gazı akışı; çatlak genişliği çok küçük olsa da basınç etkili | Yapısal ve rötre çatlakları, onarım izleri |
| Döşeme–duvar birleşimi | Sürekli çevresel açıklık veya zayıf derz | Temel çevresi, perde duvar tabanı |
| Kontrol ve inşaat derzleri | Kesintisiz sızma hattı | Derz dolgu bütünlüğü |
| Boru/kablo geçişleri | Manşon çevresi veya açık servis boşluğu | Su, elektrik, gaz, telekom geçişleri |
| Sump, drenaj ve zemin süzgeci | Doğrudan toprak gazı bağlantısı | Kapak sızdırmazlığı, sifon suyu |
| Asansör çukuru ve servis şaftı | Derin zemin bağlantısı ve bina içinde baca etkisi | Çukur su yalıtımı, şaft basıncı |
| Toprak zeminli bodrum/crawlspace | Geniş çıplak zemin yüzeyi | Membran, havalandırma, bina ile hava geçişi |
| Boşluklu beton blok duvar | Duvar boşluklarında gaz iletimi | Üst kapama, çatlak ve geçişler |
| Kuyu suyu | Sudaki radonun duş/yıkama sırasında havaya geçmesi | Özel kuyu, yüksek yeraltı suyu radonu |
| Yapı malzemesi | Radyum içeren malzemeden ekshalasyon | Malzeme etkinliği, yüzey kaplaması, hava değişimi |

Belediye şebeke suyunda arıtma, depolama ve havalandırma radonu çoğunlukla azaltır; özel kuyular daha anlamlı olabilir. Genel bir yaklaşık kural olarak sudaki 10.000 Bq/L radon, iç havaya yaklaşık 1 Bq/L (1.000 Bq/m³) katkı sağlayabilir; ancak kullanım,

hacim ve havalandırma nedeniyle bina özelinde model veya ölçüm gerekir (WHO, 2009; U.S. EPA, 2026). Yapı malzemesi ve su, bazı bağlamlarda önemli olsa da çoğu zeminle temaslı binada ana kaynak toprak gazıdır.

## Yapılarda Mühendislik Önlemleri Ve Teknik Çözümler

### Önce Teşhis: Ölçüm ve Bina İnceleme Akışı

Mühendislik müdahalesi yalnız bir konsantrasyon sayısına değil, kaynak ve taşınım tanısına dayanmalıdır:

- *İlk ölçüm:* En düşük düzenli kullanılan katta, yatak/oturma veya çalışma bölgesinde, dış duvar/pencere/ısı kaynağından uzakta kalite güvenceli cihazla yapılır. Uyum ve yıllık ortalama için tercihen 12 ay, en az 3 ay ölçüm kullanılır (WHO, 2009; U.S EPA, 2001).
- *Doğrulama:* Referans seviyeye yakın veya üstündeki sonuç, yöntem protokolüne göre ikinci ölçüm veya sürekli cihazla doğrulanır. Çok yüksek sonuçta önlem geciktirilmez.
- *Bina araştırması:* Temel tipi, çatlaklar, sump/drenaj, servis geçişleri, HVAC, egzoz, yanma cihazları, katlar arası hava yolu ve geçmiş tadilat kaydedilir.
- *Tanısal test:* Temel altı basınç alanı genişletme testi, geçici emiş, duman kalemi, basınç ölçümü ve kat/oda radon taraması yapılır.
- *Tasarım:* Kaynak kontrolü önceliklendirilir; fan debisi ve basıncı, deşarj yeri, yoğuşma, gürültü ve enerji dikkate alınır.
- *Devreye alma:* Fan çalışma göstergesi/manometre, elektrik güvenliği, boru etiketi, kaçak ve deşarj kontrolü yapılır.
- *Doğrulama ve bakım:* Sistem stabil olduktan sonra kısa kontrol ve ardından uzun süreli ölçüm; fan/alarmlar için yıllık kontrol; büyük tadilat veya HVAC değişikliği sonrası yeniden ölçüm yapılır.

## Mevcut Yapılarda Azaltım Seçenekleri

***Tablo 6.*** *Mevcut Yapılarda Azaltım Seçenekleri*

| Teknik | Uygun Durum | Beklenen Rol | Sınırlama / Kalite Noktası |
|---|---|---|---|
| Aktif temel altı basınç düşürme (ASD/SSD) | Beton döşemeli zemin/bodrum | En güvenilir ana yöntem; çoğu binada >%80–90 azalma mümkün | Basınç alanı testi, sürekli fan, güvenli deşarj ve bakım gerekir |
| Pasif temel altı havalandırma | Var olan uygun boru/sump veya düşük-orta düzey | Baca etkisiyle emiş; fana çevrilebilir | Tek başına performans binaya ve iklime bağlı |
| Sump emişi | Açık drenaj/sump sistemi | Mevcut gaz toplama ağını kullanabilir | Kapak ve pompa geçişleri gaz sızdırmaz olmalı |
| Drenaj karosu emişi | Temel çevresi drenajlı bina | Geniş basınç alanı sağlayabilir | Drenajın dış atmosfere kaçakları kontrol edilmeli |
| Alt membran emişi | Toprak zeminli crawlspace | Membran altındaki gazı toplar | Membran dikiş/kenar ve kolon geçişleri tamamen kapatılmalı |
| Duvar boşluğu emişi | Boşluklu blok temel duvarı | Duvardaki gaz yollarını kontrol eder | Yapısal/nem etkileri ve kat bağlantısı incelenmeli |
| Isı geri kazanımlı havalandırma | Kaynak kontrolünün tamamlayıcısı; bodrum/tek hacim | Seyreltme ve basınç dengesi | Debi, iklim, enerji, nem; güçlü kaynakta tek başına yetersiz |
| Pozitif basınçlandırma | Uygun sızdırmaz kabuklu belirli binalar | Zemin gazı girişini azaltabilir | Nem yoğuşması ve kabuk hasarı riski; sürekli denge gerekir |
| Çatlak/derz sızdırmazlığı | Bütün sistemlerin tamamlayıcısı | Kısa devreyi azaltır; fan verimini yükseltir | "Tek başına çözüm" değildir; yeni çatlaklar oluşabilir |

| Teknik | Uygun Durum | Beklenen Rol | Sınırlama / Kalite Noktası |
|---|---|---|---|
| Doğal havalandırma | Geçici maruziyet azaltımı | Pencere açıkken hızlı düşüş | Pencereler kapandıktan sonra saatler içinde geri dönebilir; enerji/güvenlik sorunu |
| Kuyu suyu havalandırma/GAC | Suyun önemli kaynak olduğu doğrulanırsa | Kullanımdan önce sudaki radonu azaltır | GAC radyoaktivite biriktirebilir; atık ve servis güvenliği gerekir |

(U.S EPA, 2001; Health Canada, 2025b; BRE, 2023)

U.S EPA (2025) tüketici rehberi bazı doğru tasarlanmış sistemlerde %99'a varan azaltım bildirir. Buna karşın saha performansı binadan binaya değişir. Çatlakları yalnız mastikle kapatmak, görünmeyen veya sonradan oluşan yollar nedeniyle yeterli değildir. Doğal havalandırma kalıcı mühendislik kontrolü sayılmaz; EPA kaynaklarında pencereler kapandıktan yaklaşık 12 saat sonra önceki düzeyin geri gelebileceği belirtilir (U.S EPA, 2025).

## Aktif Temel Altı Basınç Düşürme Tasarım İlkeleri

ASD sisteminde döşeme altında bir veya daha fazla emiş çukuru açılır; PVC/uygun gaz borusu bina dışına veya koşullu olarak hizmet dışı bir boşluktan çatı üstüne taşınır; sürekli çalışan fan zemin gazını binaya girmeden dışarı atar. İyi tasarımın ölçütleri şunlardır:

- Emiş noktası sayısı döşeme altı dolgu geçirgenliği ve bölmelerle belirlenir.
- Fan seçimi yalnız debiye değil, gerekli statik basınca dayanır.
- Deşarj, pencere, kapı, hava emişi ve kullanıcı alanından güvenli uzaklıkta, tercihen çatı üstündedir.

- Fan, kaçak halinde iç ortama pozitif basınçlı radon vermeyecek yerde bulunur; yaşam alanında veya altında basınçlı boru hattı bırakılmaz.
- Boru eğimi ve yoğuşma suyu dönüşü tasarlanır; don, yağmur ve canlı girişi düşünülür.
- Yangın durdurucu, ses ve titreşim kontrolü, elektrik kesintisi/arıza göstergesi sağlanır.
- U-tüp manometre veya diferansiyel basınç göstergesi kullanıcı tarafından görülebilir olur; gösterge radon ölçer değil, sistem çalışması göstergesidir.
- Devreye alma "fan dönüyor" kontrolüyle bitmez; döşemenin uzak noktalarında negatif basınç alanı doğrulanır.

**Yeni Yapılarda Radona Dayanıklı Temel Paketi**

Yeni yapıda koruma, sonradan düzeltmeye göre daha düşük marjinal maliyetle uygulanır. En dayanıklı yaklaşım, "pasif fakat aktifleşmeye hazır" çoklu bariyer sistemidir:

- *Gaz geçirgen tabaka:* Temel döşemesi altında en az yaklaşık 10 cm temiz, iri agrega veya eşdeğer gaz toplama geokompoziti. İnce malzeme ile tıkanma önlenir.
- *Toplama ve tahliye: A*grega içine T bağlantısı/perfore kolektör; bina içinde ısıtılmış hacimden mümkün olduğunca dik geçen, çatı üstünde biten gaz sızdırmaz boru. Büyük veya bölünmüş temelde zonlar arası bağlantı.
- *Radon bariyeri:* Temel altı polietilen veya sertifikalı membran; ekler üretici bindirme/bant sistemiyle; duvar, kolon, boru ve kazık başlarında detaylı. Membran ayrıca nem kontrolü sağlar ancak tek başına performans garantisi değildir.

- *Döşeme ve geçiş sızdırmazlığı:* Döşeme–duvar derzi, kontrol derzi, servis manşonu, sump kapağı ve drenaj bağlantısı elastik ve dayanıklı sistemle kapatılır.
- *Fan-hazır elektrik:* Tavan/çatı veya dış hat üzerinde fan bağlantısı için etiketli devre ve güvenli montaj yeri; boru güzergâhı erişilebilir.
- *Basınç dengeli HVAC:* Dönüş havası ve egzoz sistemi alt katı sürekli negatif basınca düşürmeyecek şekilde test edilir; yanma güvenliği doğrulanır.
- *Tamamlanma sonrası test:* Binanın normal kullanımı ve HVAC koşullarında uzun süreli ölçüm. Referans/şartname değerinin üzerindeyse fan etkinleştirilir ve tekrar test edilir.

Membranın beton dökümü sırasında delinmesi, radon borusunun çatı arasında bitirilmesi, deşarjın pencere yakınına verilmesi ve fan elektriğinin unutulması yaygın uygulama hatalarıdır. Yapı denetim kontrol listesi, beton öncesi fotoğraf ve konum kaydı, membran bütünlük kontrolü, boru duman/sızdırmazlık testi ve teslim sonrası ölçüm belgesi içermelidir.

- Jeolojik ve Geoteknik Etüdün Entegrasyonu
- Klasik geoteknik etüt taşıma gücü, oturma, yeraltı suyu ve deprem parametrelerine odaklanır. Radon için ek modül şu bilgileri içerebilir:
- Jeolojik birim ve bilinen U/Ra içeriği,
- MTA radyoelement/jeoloji/uranyum oluşumu verileri,
- Fay, kırık, karst ve geçirgen dolgu,
- Toprak gazı radonu ve geçirgenlik ölçümü; mevsim ve örnekleme derinliği,
- Yeraltı suyu ve özel kuyu kullanımı,
- Planlanan bodrum, temel ve havalandırma biçimi,
- Risk sınıfı ve uygulanacak koruma paketi.

Toprak gazı ölçümü tek başına gelecekteki iç ortam konsantrasyonunu kesin öngörmez. Bina basıncı ve detayları henüz oluşmadığından sonuç, "tasarım önceliği" olarak kullanılmalıdır. Yüksek riskte tam koruma; düşük riskte en az fan-hazır pasif sistem ve bütün binalarda tamamlanma sonrası ölçüm, belirsizliği yönetir.

## Okul, Hastane, İşyeri ve Yeraltı Yapılara Özgü Konular

**Okullar:** Ölçüm, düzenli kullanılan zemin/bodrum dersliklerinde okul dönemi boyunca yapılmalı; hafta sonu ve tatil HVAC kapanması kaydedilmelidir. Merkezi havalandırmanın yalnız ders saatinde çalışması yıllık ortalama ve gerçek öğrenci maruziyeti için ayrı senaryolar gerektirir.

**Hastaneler ve bakım tesisleri:** Yirmi dört saat kullanım, basınç zonları ve enfeksiyon kontrolü nedeniyle basit pencere havalandırması uygun değildir. ASD ile dengeli HVAC birlikte tasarlanmalı; negatif basınçlı izolasyon odalarının zemin gazı yolu olmaması sağlanmalıdır.

**İşyeri ve yeraltı ulaşımı:** Konsantrasyon kadar çalışan bulunma süresi ve vardiya paterni belirleyicidir. İzmir metrosu tezi, yolcuların kısa süresine karşı personelin saatler süren maruziyetini somutlaştırır. Tünel, istasyon, maden, depo ve bodrum işyerinde proses/yangın havalandırması radon kontrolüyle koordineli olmalıdır.

**Termal ve balneolojik tesisler:** Jeotermal su ve gazdan radon açığa çıkışı, kapalı havuz ve tedavi odalarında ek kaynak oluşturabilir. Su besleme noktası havalandırması, lokal emiş ve çalışan doz değerlendirmesi gerekir.

## Ölçüm ve Azaltım İçin Örnek Performans Şartnamesi

***Tablo 7.*** *Ölçüm ve Azaltım Için Örnek Performans Şartnamesi*

| Aşama | Asgari Kabul Ölçütü |
|---|---|
| Ön tasarım | Jeoloji/radon potansiyeli taraması ve koruma sınıfı |
| Uygulama projesi | Membran, toplama tabakası, boru, deşarj, fan elektriği ve sızdırmazlık detayları |
| Şantiye | Beton öncesi membran/boru kontrolü; delik ve ek onarım kaydı |
| Mekanik devreye alma | Bina basınç dengesi; egzoz ve yanma cihazı güvenliği |
| İlk radon testi | Normal işletmede en düşük kullanılan kat; en az 3 ay, tercihen 12 ay |
| Aktivasyon | Proje hedefi veya ulusal referans üzerindeyse fan kurulması/çalıştırılması |
| Azaltım doğrulaması | Sistem kararlı olduktan sonra kısa kontrol; ardından uzun süreli doğrulama |
| İşletme | Görsel sistem göstergesi; yıllık fan/alarm/baca kontrolü; 2–5 yılda veya tadilat sonrası yeniden test |

## Türkiye İçin Politika Ve Uygulama Önerileri

### Ulusal Referans Seviyesi ve Görev Dağılımı

Yürürlükteki 400 Bq/m³ konut değerinin, WHO'nun 100 Bq/m³ halk sağlığı hedefi ve ICRP/AB'nin 300 Bq/m³ üst yaklaşımıyla uyumlu biçimde güncellenmesi gerekir. Kısa vadede 300 Bq/m³'ü aşmayan bağlayıcı referans; uzun vadede yeni yapı ve kamu binaları için 100 Bq/m³'e yaklaşan tasarım hedefi benimsenebilir. Değer, "altı güvenlidir" biçiminde değil, optimizasyon ve öncelik seviyesi olarak tanımlanmalıdır.

Mevzuat NDK, Sağlık Bakanlığı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Millî Eğitim Bakanlığı, yerel yönetimler ve TSE arasındaki görevleri açıkça bölüştürmelidir. Ölçümden sonra düzeltme kararı, teknik tasarım, mali destek, işyeri bildirimi ve veri sorumlusu belirsiz bırakılmamalıdır.

## 62.300 Adreslik Projenin Veri Yönetişimi

Tamamlandığı bildirilen büyük taramanın yöntem, kalite güvence, il/ilçe dağılımı, mevsim düzeltmesi, ölçüm geçerlilik oranı ve belirsizliğiyle birlikte anonimleştirilmiş olarak yayımlanması, Türkiye radon politikasının en yüksek önceliklerindendir. Yayın paketi şunları içermelidir:

- Örnekleme çerçevesi ve ağırlıklar;
- Adres yedekleme ve yanıtsızlık analizi;
- Cihaz, laboratuvar, blank/duplikat ve kalibrasyon;
- Ham sonuçların gizliliği korunmuş coğrafi çözünürlüğü;
- Aritmetik ve geometrik ortalama, yüzdelikler ve aşım oranları;
- Mevsim, kat, bina yaşı/türü ve havalandırma değişkenleri;
- Radon potansiyel haritası modeli ve harita doğrulaması;
- Yeniden ölçüm ve eylem sonrası izleme planı.

İl ortalamasını tek renkli idari harita olarak sunmak yeterli değildir. Jeoloji ve bina stokunu yansıtan sürekli radon potansiyel yüzeyi ile ölçülen bina dağılımı ayrı gösterilmelidir.

### İmar, yapı ruhsatı ve yapı denetimine entegrasyon

Risk kademeli teknik düzenleme aşağıdaki yapıda kurulabilir:

- *Tüm yeni binalar:* En az gaz toplama yolu, sızdırmaz membran, dikey boru ve fan elektriği; teslim sonrası test. (U.S. EPA, 2001; BRE, 2023)
- *Orta/yüksek radon potansiyelli alan:* Tam membran detayları, çoklu temel zonu, performans hesabı ve saha denetimi.
- *Okul, çocuk bakım, hastane, huzurevi ve uzun süreli kamu binası:* Haritadan bağımsız radon tasarımı ve zorunlu kabul testi.
- *Bodrum/yeraltı işyeri, metro, tünel, mağara, maden ve termal tesis:* İş hijyeni kapsamında sürekli veya periyodik izleme, çalışma süresi ve doz değerlendirmesi.
- *Büyük renovasyon ve enerji dönüşümü:* Hava sızdırmazlık/HVAC değişikliğinden önce ve sonra radon testi.

Yapı denetim sistemi; proje kontrolü, beton öncesi fotoğraflı saha kontrolü, malzeme sertifikası, boru güzergâhı ve deşarj kontrolü, fan-hazır elektrik ve tamamlanmış bina ölçüm raporunu kayıt altına almalıdır. Sırf radon membranı çizilmiş olması kabul için yeterli sayılmamalıdır.

**Ölçüm ve Azaltım Meslek Sistemi**

Ulusal yetkinlik programı; ölçüm kuruluşu, laboratuvar ve azaltım yüklenicisini kapsamalıdır. ISO/IEC 17025 laboratuvar yeterliliği, ISO 11665 ölçüm ilkeleri, ulusal saha protokolü, cihaz performans testi, çıkar çatışması ve rapor formatı düzenlenmelidir (ISO 11665, 2019). Ölçüm yapan kuruluşun aynı binada azaltım satması durumunda bağımsız doğrulama mekanizması bulunmalıdır.

Azaltım profesyoneli için yapı fiziği, radyasyondan korunma, HVAC, elektrik/yangın, nem ve iş güvenliği eğitimi; sınav, saha deneyimi, sürekli eğitim ve kamu sicili gerekir. Sistemin

tasarım debisi/basıncı, fan modeli, enerji tüketimi, deşarj yeri ve doğrulama sonucu bina dosyasına eklenmelidir.

## Sağlık Eşitliği ve Risk İletişimi

Radon cihazı ve düzeltme maliyeti düşük gelirli haneler, kiracılar ve kırsal özel kuyu kullanıcıları için engel olabilir. Ölçüm kiti sübvansiyonu, okul/kamu binası merkezi ihalesi, düşük faizli azaltım desteği ve kiracının sonuçlara erişim hakkı sağlanmalıdır. Gayrimenkul satış/kira işlemlerinde test sonucu veya test önerisi açıklanabilir; kısa süreli satış testlerinin yıllık ortalama belirsizliği açıkça yazılmalıdır.

Kamu iletişimi korkutucu "radyoaktif ev" dilinden kaçınmalı; radonun doğal, ölçülebilir ve çoğu durumda düzeltilebilir olduğunu anlatmalıdır (WHO, 2009; U.S. EPA, 2025). Ana mesajlar: kokuya güvenilemez; harita ev testinin yerine geçmez; sigarayı bırakma ile bina düzeltmesi birlikte yapılır; fan sistemi bakım ister.

## Ulusal Performans Göstergeleri

Beş yıllık eylem planı aşağıdaki göstergelerle izlenebilir:

- Uzun süreli test edilen konut ve kamu binası sayısı/oranı;
- 100, 200, 300 ve 400 Bq/m³ üzerindeki bina oranı;
- Yüksek sonucu olan binalarda düzeltme tamamlama oranı ve süre;
- Azaltım sonrası medyan yüzde düşüş ve yeniden aşım;
- Radona dayanıklı yeni yapı oranı ve kabul testi uyumu;
- Düşük gelirli bölgelerde test/azaltım erişimi;
- Okul, hastane ve yeraltı işyerlerinde kapsama;

- Yetkin kuruluşların kalite denetimi ve başarısızlık oranı;
- Enerji renovasyonu sonrası radon değişimi;
- Sigara prevalansına göre önlenebilir akciğer kanseri yükü modellemesi.

## Bulgular

- **Güvenli bina, haritadan değil ölçümden anlaşılır.** Jeoloji, kat seviyesi, temel türü, sızdırmazlık, havalandırma ve işletme rejimi aynı mahalledeki iki binayı çok farklı kılabilir.
- **Türkiye verisi ortalama ile uç değerleri birlikte göstermektedir.** TAEK ulusal ortalaması 81 Bq/m³ iken, yerel akademik çalışmalar yüzlerce ve kimi tekil örneklerde binlerce Bq/m³ ölçmüştür (TAEK, 2014).
- **Ulusal mevzuat güncel uluslararası koruma düzeyinin gerisindedir.** Türkiye'de bağlayıcı konut değeri 400 Bq/m³; WHO'nun hedefi 100 Bq/m³, ICRP ve AB'nin üst referans seviyesi 300 Bq/m³'tür (WHO, 2009; ICRP, 2010).
- **2023 taslağı ile yürürlükteki düzenleme karıştırılmamalıdır.** Taslak 300 Bq/m³ öngörür; ancak bu rapor tarihinde yürürlüğe girdiği doğrulanmamıştır.
- **En etkili mevcut bina çözümü kaynağı kontrol etmektir.** Aktif temel altı basınç düşürme, Kanada saha çalışmasında ortalama %90,7 ve medyan %93,5 azalma sağlamıştır; yalnız çatlak kapatma çoğu zaman yeterli değildir (Health Canada, 2025b; U.S. EPA, 2025).
- **Yeni binada fan-hazır pasif sistem düşük maliyetli bir sigortadır.** Sistem tamamlanmış binada test edilmeli; sonuç yüksekse fana dönüştürülmelidir.
- **Akıllı bina sensörü, resmî uzun süreli ölçümün yerini tutmaz.** Sürekli sensörler havalandırma ve basınç yönetimini destekler;

uyum kararı kalite güvenceli, temsilî uzun süreli ölçüme dayanmalıdır.

- **Türkiye için öncelik mevzuat–veri–inşaat üçlüsünü bağlamaktır.** Ulusal eylem planı, erişilebilir ölçüm veri tabanı, risk kademeli imar/yapı denetimi hükümleri, yetkin ölçüm ve azaltım meslek sistemi birlikte kurulmalıdır.

## Tartışma

Radon yönetiminin temel güçlüğü, tehlikenin görünmez olması ile binadan binaya değişimin çok yüksek olmasıdır. Ulusal ortalama veya jeoloji haritası kamu kaynağını yönlendirebilir, fakat bireysel maruziyeti belirleyemez. TAEK'in 81 Bq/m³ ortalaması ile ekli yerel çalışmalardaki kBq/m³ düzeyindeki uç değerlerin birlikte bulunması çelişki değil, log-normal dağılıma ve bina özelliklerine bağlı beklenen sonuçtur.(ICRP, 2010; IAEA, 2014)

Türkiye literatürünün güçlü yönü çok sayıda il ve bina türünde saha ölçümü yapılmış olmasıdır. Zayıf yönleri ise çalışmalar arası protokol farklılığı, küçük/kolayda örneklem, kısa ölçüm, mevsim düzeltmesinin her zaman yapılmaması, aynı sonuçtan farklı doz katsayılarıyla hesap yapılması ve yüksek sonuçların azaltım sonrası izlenmemesidir. Gelecek araştırmaların yalnız "il ortalaması ölçmekten" ziyade müdahale etkinliği, bina determinanları, maliyet-etkililik ve tekrar ölçüm üzerinde yoğunlaşması gerekir.

Yapı malzemeleri araştırması da iki uç yorumdan kaçınmalıdır. "Bütün radon zeminden gelir" ifadesi bazı yüksek radyumlu/emanasyonlu malzemeler ve üst katlar için doğru değildir; "yüksek radyumlu her malzeme yüksek oda radonu üretir" ifadesi de emanasyon, yüzey ve havalandırmayı ihmal eder. Temel altı ve oda havası radonu, malzeme ekshalasyonu, su ve HVAC dengesini birlikte ölçmelidir.

Yeşil bina politikası için en önemli çelişki, hava sızdırmazlık ile iç hava kalitesidir. Isı kaybını azaltan bina kabuğu, dengeli taze hava sağlanmazsa radonu da içeride tutabilir; egzoz ağırlıklı sistem zemin gazı emişini artırabilir. Bu risk, enerji verimliliğine karşı bir argüman değil, radonun bütünleşik bina performansına eklenmesi gerektiğinin göstergesidir (BRE, 2023; WHO, 2009).

Uluslararası referans seviyelerinin farklı olması da bilimsel çelişki sayılmamalıdır. WHO 100 Bq/m³'ü sağlık hedefi olarak önerirken 300 Bq/m³'ü uygulanabilir üst sınır kabul eder; EPA yaklaşık 150 Bq/m³ eylem düzeyi kullanır; Kanada 200 Bq/m³ seçmiştir. Seçim, doğrusal risk modeli altında sağlık yararı, mevcut bina dağılımı, azaltım kapasitesi, maliyet ve uygulanabilirliğin optimizasyonudur. Türkiye'nin 400 Bq/m³ değeri ise güncel uluslararası yönelime göre yüksek kalmaktadır.( WHO, 2009; U.S. EPA, 2025; Health Canada, 2010).

## Sonuç

Radon, binalarda doğal kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyon maruziyetinin başlıca bileşenlerinden ve önlenebilir akciğer kanseri nedenlerinden biridir. Tehlike, çoğunlukla zemindeki U-238 serisinden üretilen Rn-222'nin basınç farkıyla binaya girmesi ve kısa ömürlü bozunum ürünlerinin solunum epiteline alfa dozu vermesinden doğar. Akut uyarı belirtisi yoktur; risk uzun süreli ortalama ve kümülatif maruziyetle artar. Sigara, mutlak riski çok güçlü biçimde yükseltir.

Tarihsel madenci kohortları nedenselliği, Watras vakası konut ölçeğini, konut birleştirilmiş analizleri düşük konsantrasyonda da riski göstermiştir. Bunun sonucunda modern radon politikası ölçüm, ulusal eylem planı, yeni yapı önleme, mevcut bina azaltımı ve halk iletişimini bir arada yürütmektedir.

Türkiye'nin yayımlanmış 7.293 konutluk çalışması genel ortalamanın 81 Bq/m³ olduğunu, fakat binaların yaklaşık %1'inin eski 400 Bq/m³ değerini aştığını göstermiştir. Yerel çalışmalar yüksek bina ve işyeri uçlarını doğrular. Yaklaşık 62.300 adreslik sonraki projenin nihai kamuya açık sonuçlarının doğrulanamaması, kanıta dayalı politika için önemli veri boşluğudur. Yürürlükteki 400/1.000 Bq/m³ rejimi, 2023 taslağındaki 300 Bq/m³ yönelimiyle karıştırılmamalı; yapı denetimi ve imar mevzuatına performans temelli teknik hükümler eklenmelidir.

Mühendislikte en etkili yaklaşım kaynağı kontrol etmektir. Mevcut beton döşemeli binalarda aktif temel altı basınç düşürme; yeni binalarda gaz geçirgen tabaka, membran, sızdırmazlık, dikey tahliye ve fan hazırlığı temel pakettir. Her sistem ölçümle seçilmeli, devreye alınmalı ve azaltım sonrası doğrulanmalıdır. Böylece radon, belirsiz ve görünmez bir tehlike olmaktan çıkarak ölçülebilir, yönetilebilir ve sağlık yükü azaltılabilir bir bina performans parametresine dönüşür.

## Kaynakça


Açıl, D. (2014). Afyonkarahisar konutlarında radon konsantrasyonu ve jeolojik ilişkiye ilişkin [Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi].

Akyürek, S. (2017). Nevşehir'de okul ve kamu binalarında radon ölçümlerine ilişkin [Yüksek lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi].

Aldemir, K. (2018). Batman ilkokullarında radon konsantrasyonuna ilişkin [Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi].

Baran, A. (2013). Denizli'de jeotermal otellerde radon ölçümlerine ilişkin [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi].

Başdemir, S. (2023). Binalarda yapı malzemelerinden kaynaklı radon gazı tahmini [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi].

British Geological Survey. (2022). *Radon Potential for Great Britain* version 3.

https://www2.bgs.ac.uk/nationalgeosciencedatacentre/citedData/catalogue/0a2a29b5-ac3f-4909-9d48-d08c12572c35.html

BREEAM Knowledge Base. *Hea 13—Radon Risk Management*. https://kb.breeam.com/section/in-use/international-residential-v6/part-1/01-health-and-wellbeing-part-1/hea-13-radon-risk-management/

Building Research Establishment (BRE). (2023). *BR 211: Radon—Guidance on Protective Measures for New Buildings*.

Çam Kaynar, S. (2011). Akhisar–Gölmarmara–Gördes–Sındırgı bölgesi doğal radyoaktivitesinin jeolojik yapı ile ilişkisinin incelenmesi [Doktora tezi, Celal Bayar Üniversitesi].

Çakmak, M. A. (2014). Samsun ilinde bina içi radon ölçümlerine ilişkin [Yüksek lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi].

Çıtlak, K. (2018). Sakarya Üniversitesi kampüs binalarında radon konsantrasyonlarına ilişkin [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi].

Çine, A. (2017). Isparta ilindeki okullarda radon ve doğal radyasyona ilişkin [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi].

Demiröz, B. (2019). *National Radon Action Plan—Turkey*, IAEA Regional Workshop country presentation.

Erdoğan, M. G. (2017). Muğla'da eski ve yeni konutlarda radon konsantrasyonlarının karşılaştırılmasına ilişkin [Yüksek lisans tezi; tam başlık ve üniversite doğrulanmalı].

European Union. (2013). Council Directive 2013/59/Euratom. *Official Journal of the European Union*, L13.

Federal Office for Radiation Protection, Germany (BfS). *Regulations on Protection against Radon*. https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/radon/regulations/regulations_node.html

Health Canada. (2010). *Reducing Radon Levels in Existing Homes: A Canadian Guide for Professional Contractors ve ASD saha çalışması.*

Health Canada. (2025a). *Radon action guides.* https://www.canada.ca/en/health-canada/services/health-risks-safety/radiation/radon/action-guides.html

Health Canada. (2025b). *Radon: What You Need to Know*. https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/health/publications/radon/radon-what-you-need-to-know-factsheet.pdf

International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2010). *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*, ICRP Publication 115.

International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2014). *Radiological Protection against Radon Exposure*, ICRP Publication 126.

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, GSR Part 3.

International Agency for Research on Cancer (IARC). (1988). *Man-made Mineral Fibres and Radon*, IARC Monographs, Vol. 43.

ISO 11665. (2019). *Measurement of Radioactivity in the Environment—Air: Radon-222*.

Işık, U. (2018). Kütahya ilinde yapı malzemelerindeki U, Th, K oranları [Yüksek lisans tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi].

Karataş, T. (2017). İzmir kapalı metro istasyonlarında radon ölçümlerine ilişkin [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi].

Karatay, K. (2016). Kocaeli Yahya Kaptan bölgesinde ev içi radon konsantrasyonuna ilişkin [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi].

Kurt, A. (2015). İstanbul ili Fatih ilçesi okullarında radon ölçümlerine ilişkin [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi].

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. *Yerbilimleri Harita Görüntüleyici*. https://yerbilimleri.mta.gov.tr/Default.aspx

Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK)-Mevzuat. *2*4.03.2000 tarih ve 23999 Nolu Resmî Gazete Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği.

Nükleer Düzenleme Kurumu. *Çevresel Radyoaktivite Atlası*. https://www.ndk.gov.tr/cevresel-radyoaktivite-atlasi

Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority (DSA). *Radon*. https://dsa.no/en/radon

Öztürk, E. (2012). Erzincan ili ev içi radon konsantrasyonunun mevsimsel değişimi ve topraktaki radyoaktivitenin tayini [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi].

National Research Council. (1988). *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: BEIR IV*. Washington, DC: National Academies Press.

Özçelik, M. (2014). Afyonkarahisar işyerlerinde radon konsantrasyonuna ilişkin [Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi].

Piec, R., et al. (2019). Polonya konutlarında kısa süreli radon ölçüm çalışması [Tam yazar listesi ve özgün yayın künyesi doğrulanmalı].

Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği. Resmî Gazete 03.07.2017 tarih ve 30113 nolu Yönetmelik

Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland (STUK). *Reference Levels and Regulations Concerning Radon in Dwellings*.

https://stuk.fi/en/reference-levels-and-regulations-concerning-radon-in-dwellings

Resmî Gazete/23999. 24.03.2000 tarih ve 23999 nolu Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği

Rey, J., et al. (2025). Swiss national radon database: Building, geological and measurement determinants. Frontiers in Public Health, 13, 1625922. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1625922https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1625922

Sağlık Bakanlığı. (2017). *2017 Yılı Faaliyet Raporu*—Türkiye Radon Haritası çalışmaları.

Swedish Radiation Safety Authority. *Radon at Work*. https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/areas/radon/radon-at-work--your-responsibilities-as-an-employer/

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2014). Türkiye'de konutlarda radon ölçümleri [Teknik rapor].

Turhan, Ş., Baykan, U. N., & Şen, K. (2008). Türkiye'de kullanılan yapı malzemelerinin radyoaktivite içerikleri (TAEK TR 2008-7) [Teknik rapor]. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1986). Radon: Pinpointing a Mystery. *EPA Journal*, 12(6).

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2001). *Building Radon Out: A Step-by-Step Guide on How to Build Radon-Resistant Homes*. *EPA*, 402/K01/002.

https://wwfw.epa.gov/radon/builder-and-contractor-resources-radon-resistant-new-construction-rrnc

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2015) The National Radon Action Plan: A Strategy for Saving Lives. *EPA*, 402/R-15/001.

https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-05/documents/nrap-a_strategy_for_saving_lives_-_final.pdf

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2025). *Consumer's Guide to Radon Reduction*. https://www.epa.gov/radon/consumers-guide-radon-reduction

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2026). *What are the Health Effects from Exposure to Radon?* https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon

U.S. Green Building Council. *LEED BD+C Homes—Radon-Resistant Construction*. https://www.usgbc.org/node/2775883

World Health Organization. (2009). WHO handbook on indoor radon: A public health perspective. World Health Organization.

Yapı Denetimi Hakkında Kanunu. 4708 sayılı Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği. 05.02.2008 tarih ve 26778 nolu Resmî Gazete

# BÖLÜM 8

# POLİMERLERİN ÇÖZÜNME DAVRANIŞLARI: MOLEKÜLER MEKANİZMALAR VE POLİMER–ÇÖZÜCÜ ETKİLEŞİMLERİ

**Pelin SEVİNÇ[1],**
**Ali KARA[2]**

## Giriş

Formülasyon süreçlerinin hâkim olduğu ilaç, kimya, tekstil ve malzeme bilimi gibi pek çok alanda çözünürlük, önemini koruyan kritik bir parametredir. Yeni yasal düzenlemeler ve sürdürülebilirlik amaçları doğrultusunda, onlarca yıldır birçok geleneksel ve yüksek performanslı çözücüler (örneğin halojenli çözücüler, aromatik bileşikler içerenler ve DMF (Dimetilformamid) gibi) giderek kısıtlanmaya başlamıştır. Bununla birlikte, yeni geliştirilen biyobazlı çözücüler de olası alternatiflerin yerini yavaş yavaş almaya başlamıştır (Jean-Marie Aubry et al., 2026). Bu yeşil dönüşümün en kritik uygulama alanlarından biri olan polimer çözünmesi ise,

[1] Doktora Öğrencisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Polimer Malzemeler, ORCID: 0009-0002-1561-5473
[2] Profesör Doktor, Bursa Uludağ Üniversitesi, Kimya, ORCID: 0000-0003-2457-6314

polimer zincirlerinin çözücü içinde moleküler düzeyde dağılması sürecidir. Kaplama, yapıştırıcı, membran üretimi, lif çekimi ve biyomedikal sistemler gibi birçok endüstriyel sektörde hayati öneme sahip olan bu süreçlerde, polimerin yalnızca çözünüp çözünmediğini bilmek yeterli değildir; çözünme hızı, çözeltinin homojenliği ve zincirlerin kimyasal bütünlüğü de nihai malzemenin performansını doğrudan etkiler (Beth A. Miller-Chou & Jack L. Koenig, 2003) Düşük molekül ağırlıklı maddelere kıyasla polimerlerin çözünmesi; uzun, dolanmış zincirler ve düzenli kristalin bölgeler içermeleri nedeniyle çok daha karmaşık bir moleküler yeniden düzenlenme gerektirir. Süreç, çözücü moleküllerinin matrise nüfuz ederek zincir segmentlerini hareketlendirmesi ve ardından bu zincirlerin birbirinden ayrılarak dağılmasıyla gerçekleşir. Ancak her polimer, çözücü ortamında aynı davranışı göstermez; bazı makromoleküller hızla çözünürken, bazıları önce belirgin şekilde şişip ardından yavaşça dağılır. Çapraz bağlı polimerler çözücüleri emerek hacmini artırırken, kimyasal bağları sebebiyle birbirinden bağımsız zincirlere ayrılmadıklarından dolayı reel bir çözelti formu oluşturamazlar. Bu nedenle, polimer-çözücü sistemlerinde şişme, çözünme ve bozunma kavramlarının birbirinden doğru şekilde ayırt edilmesi gerekir.

Sonuç olarak; polimerlerin çözücü ortamındaki makroskobik davranışlarını kimyasal yapılarının yanı sıra zincir uzunluğu, dolanma derecesi ve morfoloji gibi mikroskobik ve fiziksel özellikleri de belirler. Literatürde çözünürlüğün hesaplanmasında kullanılan çeşitli fiziksel ve kimyasal temelli yöntemler ile teorik modeller bulunmakla birlikte (Fowles et al., 2025), bu modellerin detaylı matematiksel türetimlerine ve sayısal hesaplamalarına bu bölümde değinilmeyecektir. Bu çalışma, söz konusu teorik hesaplamaların ötesine geçerek; yeni nesil çözücülerin polimer sistemlerindeki davranışını temelinden kavramak adına polimerlerin çözünme dinamiklerini moleküler mekanizmalar, polimer-çözücü

etkileşimleri, yapı-morfoloji ilişkisini bütüncül bir yaklaşımla incelemeyi amaçlamaktadır.

**Polimer çözünmesinin temel mekanizmaları**

Polimer çözünmesi, yüzeyin ıslanmasından başlayarak zincirlerin çözeltide dağılmasına kadar uzanan, birbiriyle bağlantılı birkaç ardışık aşamadan oluşur. Bu kinetik süreç; polimerin amorf, yarı kristalin veya çapraz bağlı olmasına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Narasimhan, 2001).

Sürecin ilk adımı, çözücünün polimer yüzeyiyle temas etmesiyle gerçekleşen yüzey ıslanmasıdır. Polimerlerin yüzeylerindeki pürüzlülük veya gözenekli yapısı, gözeneklerin birbiri ile olan etkileşimlerinin olup olmadığı, yüzeyindeki enerji, içerisinde bulunan katkı maddeleri gibi etkenler ıslanmanın kolayca gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini dolayısıyla çözünmenin hızını direkt olarak etkiler. Eğer ıslanma başarılı bir şekilde gerçekleşirse çözücü molekülleri de serbest olarak ortamda bulunan boşluklardan yararlanır ve polimerin iç kısımlarına doğru ilerleyecektir. Bu esnada çözücünün molekül boyutu, ortamın sıcaklığı ve amorf bölgelerin varlığı sızmaları kolaylaştırır, ancak kristalin bölgelerin varlığı ise çözücünün ilerlemesini zorlaştırır.

Diğer taraftan, polimerin çözücü ortamında kütle kaybetmesi ya da parçalanması her zaman bir fiziksel çözünme mekanizmasıyla gerçekleşmez. Biyobozunur polimerler veya hidrolize duyarlı polyesterler gibi spesifik sistemlerde zincir bütünlüğü; hidroliz, fotoliz veya oksidasyon gibi kimyasal reaksiyonlarla bozunabilir. Bu nedenle, malzeme performansının ve kararlılığının doğru değerlendirilebilmesi için, sistemdeki kütle kaybının fiziksel bir çözünme sürecinden mi yoksa kimyasal bir bozunmadan mı kaynaklandığı net bir şekilde ayırt edilmelidir (Visan et al., 2021). Molekül ağırlığı yüksek, uzun ve dallanmış zincirlerde moleküler kenetlenme yoğunluğu çok daha fazla olduğundan, ayrılma ve

dağılma adımı kısa zincirli yapılara kıyasla çok daha uzun bir zaman dilimi gerektirir (Miller-Chou & Koenig, 2003).

**Polimer çözücü etkileşimleri**

Polimerlerdeki çözünme davranışlarını belirlerken zincirlerde bulunan uç gruplar ile çözücü arasında bulunan etkileşimlerdir. Bu gruplar bazen hidroksil iyonları, bazen karboksil grupları bazen de amin grupları gibi fonksiyonel yapılar olabilir. Bu kimyasal yapıların polaritesi, apolar veya polar olması da çözücü ile etkileşimlerini önemli derecede etkiler. Örneğin Polietilen (PE), polistiren (PS), polipropilen (PP) apolar yapıdadır; Polietilentereftalat (PET), polivinilklorür (PVC), polikaprolakton (PCL) ise polar yapıdadır. Kimyadaki benzer benzeri çözer ilkesi ile yaklaşıldığında polar yapıdaki polimerler polar çözücülerde, apolar yapıdaki polimerler ise apolar çözücülerde çözünür. En çok kullanılan çözücü su polar yapıdadır ancak polimer zincirlerinin yapısı çok uzun olduğundan PET veya PVC polimerleri su içerisinde çözünmez. Ancak daha güçlü polar kimyasal yapılara sahip olan asetonda veya tetrahidrofuranda (THF) çözünür. En yaygın kullanılan apolar çözücülere örnek olarak toluen, ksilen, kloroform ve diklorometan örnek olarak verilebilir. PS polimeri oda sıcaklığında bile kolaylıkla bu çözücülerden birinde rahatlıkla çözünür.

Sıcaklık, polimerlerin çözünürlüğünü etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Genellikle sıcaklık ile çözünme hızı artar. Burada polimerin kristal yapısı en kritik etkiyi barındırır. Kristal yapının varlığı ve sıcaklığın etkisi ile polimerin kimyasal bağları gevşer, erime noktasına geldiğinde aralarında bulunan bağlar kopar ve amorf hale gelir, böylelikle çözünme gerçekleşir. Örneğin; PP polimerinin, kristal ve amorf formları, n-dekan ve dekalin çözücüleri içerisinde çözünme kinetiğinin araştırıldığı bir çalışmada sıcaklığın artması çözünmeyi hızlandırdığını göstermiştir (Paschalis Alexandridis et al., 2025).

Polimerin parçacık boyutu da çözünme hızını belirleyen önemli bir etkendir. Boyut olarak daha küçük yapılara sahip moleküller daha hızlı çözünürken, boyutları daha büyük olanlar daha uzun sürede çözünür. Örneğin selüloz molekülleri buna bir örnektir (Haq Nawaz et al., 2024).

Polimerlerin molekül ağırlığı tam ve kesin bir sayıdan ziyade ortalama bir değer olarak verilir (M. Saçak, 1998). Bir polimerin ortalama molekül ağırlığı, zincirler arasında çeşitli konfigürasyonlara yol açan moleküler ağırlık dağılımı sergiler. Bu da farklı kristal yapıları öne çıkarırken, polimer zincirleri arasında sinerjik etki yaratır. Yüksek molekül ağırlıklı ve düşük molekül ağırlıklı polimerler farklı kristalleşme davranışı gösterir ve çözünme mekanizmalarının da farklılaşmasına yol açar. Aynı zamanda zincir mimarisindeki dallanmalar, polimerlerin paketlenme yoğunluğunu ve temas biçimini değiştirir; yıldız, hiperdallanmış veya tarak tipi özel zincir topolojileri, polimer-çözelti hidrodinamik hacmini, içsel viskozitesini ve segmental hareketliliğini doğrudan modüle eder (Songyan Lu Min Chen & Hanying Li, 2025).

**Sonuç**

Polimerlerin çözünme mekanizmalarını kapsamlı bir şekilde anlamak için çözünürlük parametrelerini, kimyasal yapılarını, maddeler arasındaki etkileşimlerini incelemek gerekir. Polimer moleküllerinin kristalin veya amorf yapısı çözünme davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Çözücü seçimlerini doğru yönlendirmek için polimerin ve çözücünün polaritelerini analiz etmek gerekir. Gelecekte polimerlerin çözünmesinde çevre dostu çözücüler geliştirilmesi, geri kazanımı mümkün olan formülasyonların araştırılması ve biyobazlı içerikler üretilmesi önemli araştırma alanlarına girmektedir. Kapsamlı çalışmalar daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

## Kaynakça

Beth A. Miller-Chou, Jack L. Koenig, 2003,1223-1270, 28, 8, Progress in Polymer Science https://doi.org/10.1016/S0079-6700(03)00045-5

Daniel J. Fowles; Benedict J. Connaughton; James W. Carter; John B. O. Mitchell; David S. Palmer, 2025, Chem. Rev. (2025) 125 (15): 7057–7098, https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00855

Haq Nawaz, Aiyong He, Zhen Wu, Xiaoyu Wang, Yetao Jiang, Aman Ullah, Feng Xu, Fengwei Xie, 2024, International Journal of Biological Macromolecules, 133012, Volume: 273, Part 1, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133012

Jean-Marie Aubry, Evamaria Hofmann, Florian Laubé, Théophile Gaudin and Véronique Nardello-Rataj, 2026, Current Opinion in Colloid & Interface Science, Volume 85, October 2026, 102044 https://doi.org/10.1016/j.cocis.2026.102044

Mehmet Saçak, Polimer Kimyasına Giriş, Ankara 1998, A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları No:50

Miller-Chou, B. A., & Koenig, J. L. (2003). A review of polymer dissolution. Progress in Polymer Science, 28(8), 1223–1270. https://doi.org/10.1016/S0079-6700(03)00045-5

Paschalis Alexandridis, Ali Ghasemi, Marina Tsianou, 2025, Polymers 17(23):3213 https://doi.org/10.3390/polym17233213

Songyan Lu Min Chen and Hanying Li, 2025, The Impact of Molecular Weight Distribution on the Crystalline Texture of Polymers—Illustrated by Lamellar Crystal, Shish–Kebab

and Nested Spherulites. Materials 2025, 18, 4196. https://doi.org/10.3390/ma18174196

Visan, A.I.; Popescu-Pelin, G.; Socol, G. Degradation Behavior of Polymers Used as Coating Materials for Drug Delivery—A Basic Review. Polymers 2021, 13, 1272. https://doi.org/10.3390/polym13081272


BİDGE