İLERİ MALZEMELER VE NANOTEKNOLOJİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE UYGULAMALAR

EDİTÖR
MUSTAFA FATİH ERGİN





BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

İleri Malzemeler ve Nanoteknoloji: Güncel Yaklaşımlar Ve Uygulamalar

Editör: MUSTAFA FATİH ERGİN

ISBN: 978-625-5057-72-3

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

ÖNSÖZ

Malzeme bilimi ve nanoteknoloji, bilimsel gelişmelerin teknolojik uygulamalara dönüşmesinde önemli bir yere sahiptir. Malzemelerin bileşimlerinin, yapılarının ve yüzey özelliklerinin anlaşılması ve düzenlenmesi; çevresel sorunların çözümünden enerji verimliliğine, kaynakların etkin kullanımından endüstriyel sistemlerin dayanıklılığına kadar pek çok alanda yeni olanaklar sunmaktadır. Bu olanakların değerlendirilmesi, temel bilimlerle mühendislik uygulamalarını bir araya getiren disiplinler arası bir bakış açısını gerektirmektedir.

Bu kitap, ileri malzemeler ve nanoteknoloji alanındaki bilgi birikimini, güncel araştırma yaklaşımlarını ve uygulama olanaklarını ortak bir çerçevede sunmak amacıyla hazırlanmıştır. Farklı uzmanlık alanlarından araştırmacıların katkılarıyla oluşturulan eser, malzemelerin sentezinden işlevsel özelliklerinin geliştirilmesine ve kullanım koşullarındaki davranışlarına uzanan süreçleri ele almaktadır. Bu çerçevede, üretim yöntemleri ile yapı, özellik ve performans arasındaki ilişkilerin birlikte değerlendirilmesi kitabın temel yaklaşımını oluşturmaktadır.

İleri malzemelerin geliştirilmesinde yüksek performansın yanı sıra üretilebilirlik, uzun süreli kararlılık, maliyet ve çevresel etkiler de belirleyici olmaktadır. Laboratuvar ortamında elde edilen bulguların uygulanabilir çözümlere dönüştürülmesi, bu unsurların araştırma sürecinin bütününde gözetilmesini gerektirmektedir. Kaynakların verimli kullanılması, daha az atık oluşturan üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve malzemelerin kullanım ömrünün uzatılması, bu doğrultuda önem taşıyan araştırma hedefleridir.

Eserde bir araya getirilen çalışmaların, farklı uygulama alanları arasındaki bilimsel bağlantıların anlaşılmasına katkı sağlaması amaçlanmaktadır. Malzeme tasarımı, sentez ve yüzey düzenleme süreçlerine ilişkin bilgi ve deneyimlerin farklı alanlar arasında paylaşılması, yeni araştırma sorularının geliştirilmesine ve ortak çalışmaların oluşmasına zemin hazırlayabilir. Kitabın, okuyuculara kendi uzmanlık alanlarını daha geniş bir bilimsel çerçevede değerlendirme olanağı sunması beklenmektedir.

Bu eserin; malzeme bilimi, kimya ve mühendisliğin ilgili alanlarında çalışan araştırmacılara, lisansüstü öğrencilere ve uygulayıcılara yararlı bir kaynak olmasını diliyorum. Sunulan bilgi ve değerlendirmelerin, yeni çalışmaların tasarlanmasına ve bilimsel bilginin uygulamaya aktarılmasına katkı sağlamasını umuyorum.

Bilgi, deneyim ve emekleriyle kitaba katkıda bulunan tüm yazarlara, değerlendirme ve yayıma hazırlık süreçlerinde görev alan herkese teşekkür ederim. Kitabın, ileri malzemeler ve nanoteknoloji alanındaki bilimsel iletişimi güçlendirmesini ve yeni araştırmalara ilham vermesini temenni ederim.

Editör

Doç.Dr. Mustafa Fatih ERGİN

İÇİNDEKİLER

BOYARMADDELERİN FOTOKATALİTİK BOZUNMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN MALZEMELER: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR, UYGULAMA POTANSİYELİ VE GELECEK PERSPEKTİFİ 1

ELİF YAMAN ÇAMLI, GAMZE GÜNDÜZ MERİÇ, ADİFE ŞEYDA YARGIÇ

SULU VE ASİDİK BİTKİ ÖZÜTÜ KULLANIMI İLE METALİK NANOPARTİKÜL SENTEZİ VE KULLANIM ALANLARI 28

AYLA ÖZER, DENİZ UZUNOĞLU DOĞRUYOL, MEMDUHA ERGÜT, HALİS ENES ÜNAL

İKİ BOYUTLU (2D) MALZEMELERİN YAPISI VE ÇOKLU ALANLARDA UYGULAMALARI 54

GAMZE GÜNDÜZ MERİÇ, ADİFE ŞEYDA YARGIÇ, ELİF YAMAN ÇAMLI

BÖLÜM 1

BOYAR MADDELERİN FOTOKATALİTİK BOZUNMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN MALZEMELER: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR, UYGULAMA POTANSİYELİ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

ELİF YAMAN ÇAMLI[1],
GAMZE GÜNDÜZ MERİÇ[2],
ADİFE ŞEYDA YARGIÇ[3]

Giriş

İnsanlar, hayvanlar ve bitkilerin hayatta kalması ve ekosistemin devamlılığı için en temel madde sudur (Nazim vd., 2023). Sağlıklı bir yaşamın korunabilmesi için saf ve kirlenmemiş suya erişim gereklidir ve dünya üzerindeki suyun yalnızca %2,5'i tatlı su olduğu için mevcut su kaynaklarının dikkatli kullanılması önemlidir (Mishra ve Tiwari, 2025; Rajput vd., 2021). Bunun yanı sıra, hızlı endüstrileşme ve nüfus artışı organik ve inorganik su kirleticilerine neden olarak tatlı su teminini önemli bir küresel endişe kaynağı haline getirmektedir (Pan vd., 2023a). Suda bulunan tipik kirleticiler organik boyalar, ağır metaller, biyolojik kirleticiler olarak sıralanabilir (Zahoor vd., 2026; Azzam vd., 2022; Cheng vd., 2022). Özellikle sentetik boyalar aromatik yapılarının karmaşık olması,

kimyasal olarak kararlı olmaları ve biyobozunur olmamaları sebebiyle üstesinden gelinmesi gereken bir sorun olarak öne çıkmaktadır (Vudamala vd., 2025; Abdulhameed vd., 2025). Önceki yıllarda boyar maddeler bitki, mineral ve hayvan özlerinden doğal yollarla elde edilirken, günümüzde hammadde olarak petrokimya türevleri kullanılarak sentezlenmektedirler. Bu sentetik boyalar sanayinin gelişmesine katkı sağlamış olsa da günümüzde varlığını sürdüren çeşitli çevresel ve insan sağlığını etkileyen endişeleri de beraberinde getirmiştir (Stuvart vd., 2026). Tekstil endüstrisi başta olmak üzere kağıt, ilaç, deri, kozmetik ve gıda işleme sektörlerinin atık sularında sıklıkla bulunan boyar madde kirliliği genellikle toksik ağır metal ve organik çözücülerle birlikte bulunmaktadır. Bu tür atık sular uygun şekilde bertaraf edilmediği takdirde ciddi ekolojik risklere neden olmaktadır (Yun vd., 2024; Zahid vd., 2026). Boyar madde içeren atık su arıtımında sıklıkla kullanılan yöntemler (i) fiziksel yöntemler: adsorpsiyon (Kaewkhiad vd., 2026), biyosorpsiyon (Gupta vd., 2025), membran filtrasyon (Muizzah vd., 2026), iyon değiştirme (Zeng vd., 2024) gibi, (ii) kimyasal yöntemler: oksidasyon (Ahmed ve Kayani, 2024), ozonlama (Shang vd., 2024), elektrokimyasal yöntemler (Hou vd., 2026), fenton ve fenton-benzeri sistemler (Fang vd., 2026) gibi, (iii) biyolojik yöntemler: aerobik-anaerobik bozunma (Yadav vd., 2026), mikrobiyal bozunma (Pan vd., 2026), aktif çamur sistemleri (Pan vd., 2023b) gibi sınıflandırılabilir. Bu yöntemler birlikte kullanılabilir ya da bir yöntem diğer bir yöntemin ön işlemi olabilir. Bu sebeple literatürde farklı sınıflandırmalara da rastlamak mümkündür. Konvansiyonel yöntemlerin her biri farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Kimyasal işlemler maliyetli ve çevreye zararlı reaktifler gerektirebilirken, fiziksel ve biyolojik yöntemler çevre açısından daha elverişli olmakla birlikte genellikle daha az verimlidir (Stuvart vd., 2026). Ayrıca, endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan, özellikle boyar madde içeren atık suların kompleks yapıda olması ve biyolojik olarak zor parçalanabilen organik bileşikler

içermesi bahsedilen bu yöntemlerin tek başına yeterli olmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle, boyar maddeler gibi kalıcı ve toksik organik kirleticilerin daha verimli bir şekilde giderilebilmesi için ileri oksidasyon prosesleri (İOP) alternatif veya tamamlayıcı ileri arıtma teknolojileri olarak önem kazanmıştır (Dhamorikar vd., 2024). Fotokataliz, sonokimyasal yöntem, foto-fenton, UV/H_2O_2 prosesleri gibi yöntemler İOP yöntemleri arasında yer almaktadır. Bu yöntemlerde, hidroksil radikali (·OH) benzeri, oksidasyon kapasitesi yüksek olan bir reaktif türü oluşturulur, boyar maddeler gibi dirençli organik kirleticilerin büyük molekül yapıları parçalanarak, daha düşük molekül ağırlıklı bileşiklere dönüştürülür (Ramutshatsha-Makhwedzha ve Munyengabe, 2026).

Yakın yıllarda yürütülen çalışmaların başlıca odak noktalarından biri, inatçı ve zararlı organik kirleticilerin çeşitli su kaynaklarından uzaklaştırılması süreci olmuştur. Bu nedenle, İOP gibi yenilikçi su arıtma yöntemlerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Süreç maliyetinin ekonomik olması, düşük enerji ve kimyasal tüketimi avantajları da olması İOP yöntemlerine olan ilgiyi daha da artırmaktadır (Zahoor vd., 2026).

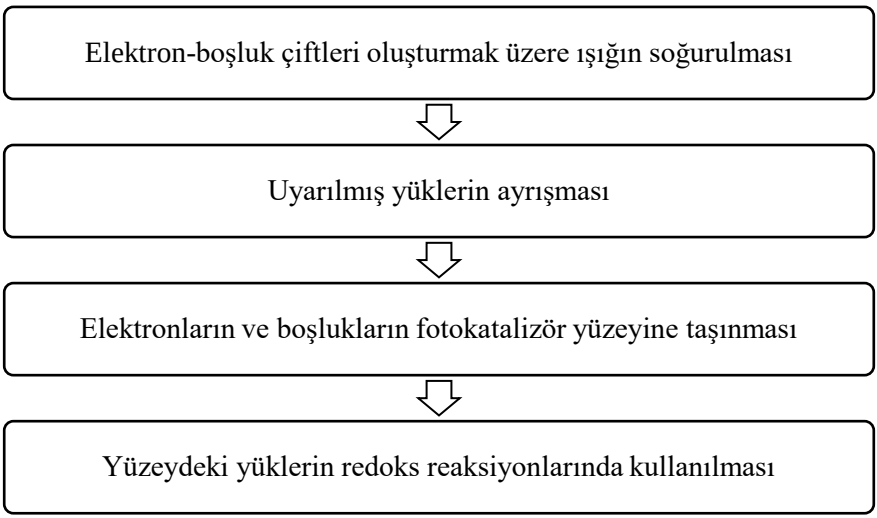
Fotokataliz: Temel İlkeler ve Mekanizma

İOP yöntemlerinin en önemlilerinden biri olan fotokataliz, ışık enerjisi kullanılarak yarı iletken bir fotokatalizörün yüzeyinde gerçekleşen oksidasyon-indirgenme (redoks) reaksiyonları aracılığıyla kirleticilerin parçalanmasıdır. Fotokataliz reaksiyonu dört önemli basamak ile tanımlanabilir: (i) elektron-boşluk çiftleri oluşturmak üzere ışığın soğurulması, (ii) uyarılmış yüklerin ayrışması, (iii) elektronların ve boşlukların fotokatalizör yüzeyine taşınması ve (iv) yüzeydeki yüklerin redoks reaksiyonlarında kullanılması (Şekil 1) (Zhu ve Wang, 2017). Üçüncü basamakta elektron-boşluk çiftleri fotokatalizör yüzeyine taşınırken, yüzeye ulaştığında yeniden birleşebilir (rekombinasyon) (Li ve Wu, 2015;

Simon vd., 2016). Rekombinasyon sırasında elde edilen enerjinin, ısı veya ışık yayımı şeklinde dağılması sağlanır. Yüzeyde bulunan ve uzun ömürlü olan yükler, farklı redoks reaksiyonlarını başlatma potansiyeline sahiptir (Gershon vd., 2015). Yüksek oksidasyon kapasitesine sahip bu reaktif türler, organik kirleticilerin özellikle boyar madde moleküllerinin yapılarının parçalanmasını sağlar. Sürecin devamında, uygun reaksiyon koşullarında bu ara ürünlerin CO_2, H_2O ve inorganik iyonlara kadar oksitlenmesiyle mineralizasyon gerçekleşebilir (Ramutshatsha-Makhwedzha ve Munyengabe, 2026).

Şekil 1. Fotokatalitik reaksiyon sürecindeki basamaklar

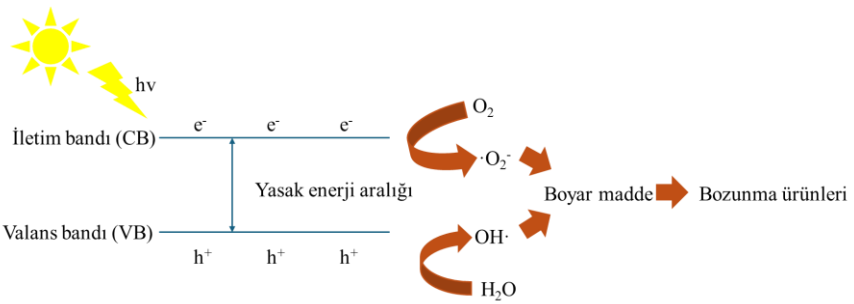
(Yazar çizimidir)



Boyar maddelerin fotokatalitik reaksiyonlar sonucu bozunmasına ait mekanizma Şekil 2'de verilmiştir. Bozunma, yarı iletken fotokatalizörün ışıkla uyarılması ile başlar. Foton enerjisinin fotokatalizörün yasak enerji aralığından daha yüksek olması durumunda, valans bandındaki elektronlar iletim bandına uyarılarak elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasını sağlar. Yük taşıyıcılarının fotokatalizör yüzeyine ulaşması sırasında gerçekleşen elektron-

boşluk rekombinasyonu sırasında fotokatalitik etkinlik artar, yüzeye ulaşan elektron-boşluk çiftleri oksijen, su ve hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek hidroksil radikalleri gibi reaktif oksijen türlerinin oluşmasını sağlar. Oluşan bu türler, büyük ve kompleks yapıdaki boyar madde molekülleri ile etkileşerek oksidatif bozunmayı başlatır. Süreç sonunda boyar madde molekülleri daha küçük ve zararsız bozunma ürünlerine dönüşür (Wu vd., 2023).

Şekil 2. Boyar maddelerin fotokatalitik bozunma mekanizması (Yazar çizimidir)



Boyar Madde Bozunmasında Kullanılan Fotokatalizörlerin Sınıflandırılması

Boyar maddenin ışığı doğrudan soğurarak parçalanması olarak tanımlanan fotoliz olayından farklı olarak, fotokatalitik bozunmada ışıkla etkinleşen katalizör, bozunmayı hızlandıran reaktif türlerin oluşumunu hızlandırır (Anisuzzaman vd., 2022). Fotokatalizörlerin bu etkisi, boyar maddelerin fotokatalitik bozunmasında bozunma verimini etkileyen temel unsurlardan biridir. Kullanılan katalizörün fizikokimyasal, morfolojik özellikleri ve bileşimi doğrultusunda fotokatalizörler farklı sınıflar altında incelenmektedir.

Metal Oksit Bazlı Fotokatalizörler

Metal oksitler, uygun bant aralıkları, kimyasal kararlılıkları ve yüzey özellikleri sayesinde boyar maddelerin fotokatalitik olarak bozunmasında yaygın olarak kullanılan yarı iletken malzemelerdir (Al Miad vd., 2024). Tablo 1'de bazı metal oksitlerin fotokatalitik uygulamaları özetlenmiştir.

Tablo 1. Bazı metal oksitlerin fotokatalitik performansları

Metal oksit	Katkı	Bozunan boyar madde	Bozunma verimi	Kaynak
ZnO	Ce	MB	%92,62	Karidas vd., 2020
ZnO	La	Metil Oranj	%85,86	Nguyen vd., 2019
CuO	Ce	RhB MB	%95,39 %87,72	Singh vd., 2021
CuO	Gd	RhB	%87,00	Natarajan vd., 2023
CuO	Nd	MB	%99,00	El-Sayed vd., 2022
SnO_2	Ce	Malahit yeşili	%99,99	Bhawna vd., 2020
TiO_2	Y	Malahit yeşili	%95,34	Yulizar vd., 2023
TiO_2	Sm	RhB	%89,00	Mahmoud vd., 2021
CeO_2	Sm	Bengal gülü	%94,06	Chahal vd., 2020
CeO_2	Gd/Sm	MB	%90,00	El Rouby vd., 2016
WO_3	La	RhB	%94,00	Nehra vd., 2022
ZrO_2	Nd	MB	%91,00	Dhandapani vd., 2016
ZrO_2	Ce/Er	RhB	%99,00	Gionco vd., 2019
ZrO_2	Cu	Alizarin sarısı	%88,00	Arjun vd., 2020

Kaynak: Yazar belirttiği farklı kaynaklardan derlemiştir.

Karbon Bazlı Fotokatalizörler

Karbon bazlı fotokatalizörlerden grafen ve grafen oksit (GO), indirgenmiş grafen oksit (rGO) gibi türevleri, yarı iletken tabanlı fotokatalizörlerin performansını artırmak için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektriksel iletkenliğinin yüksek ve yüzey alanının geniş olması nedeniyle özellikle grafen fotokatalitik reaksiyonlar sırasında elektron taşınmasını kolaylaştırarak elektron-boşluk rekombinasyonunu en aza indirir (Nuryasari vd., 2026). Yarıiletken ile kompozit malzeme olarak sentezlenen grafen ve türevleri daha yüksek fotokatalitik aktivite göstermektedir. Bhattacharyya vd. (2025) yaptıkları çalışmada TiO_2@GOn nanokompozitinin, boyar madde bozunumu sürecinde saf TiO_2 ve grafen oksitten ayrı ayrı daha üstün bir performans sergileyerek sinerjistik bir katalitik etki ortaya koyduğunu belirtmektedir. Kurniawan vd. (2020), sentezledikleri 104,51 m^2/g özgül yüzey alanına sahip GO/TiO_2 kompoziti ile 4 saat içerisinde metilen mavisinin (MB) neredeyse tamamını giderebilmiştir.

Karbon noktalar (CD'ler) ayarlanabilir optik özellikleri ve yüksek elektron aktarım yetenekleri sayesinde fotokataliz alanında çok yönlü nanomalzemeler olarak öne çıkmaktadır (Han vd., 2018). Sendão vd. (2025), tarla atığı olan mısır sapı kalıntılarından CD üretmiş ve buna TiO_2 katkılayarak fotokatalitik nanokompozit malzeme elde etmişlerdir. Fotokatalizörün bozunma yüzdesi değeri ve reaksiyon hız sabiti üzerindeki etkisini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla, CD ilavesiyle sağlanan katalitik verimlilik artışı %ln(C) olarak hesaplanmıştır. MB bozunmasının incelendiği bu çalışmada, saf TiO_2'ye kıyasla CD ilavesiyle katalitik performansta %374'lük bir artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Mikrodalga destekli yeşil yaklaşım kullanılarak *Araucaria araucana* reçinesinden sentezlenen gümüş katkılı karbon noktalarının kullanıldığı bir diğer çalışmada ise 120 dakika içinde %96,8

katyonik (Metilen Mavisi) ve %97,3 anyonik (Alizarin Kırmızı S) boyar maddeler etkili bir şekilde bozunmuştur (Jini vd., 2025).

Biyokütle kaynaklarının piroliziyle elde edilen, gözenekli yapısı, karbonca zengin bileşimi ve ayarlanabilen yüzey fonksiyonelliği ile biyokömür, yüksek yüzey alanı ve kirleticileri adsorplama kapasitesinin yanı sıra elektron transferini kolaylaştırarak fotokatalitik reaksiyonlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Subramaniam vd., 2023). Gümüş gibi değerli metal yüklü biyokömür kompozitleriyle metilen mavisi gibi boyar maddelerin fotokatalitik bozunmasında, biyokömür boyar madde moleküllerinin adsorpsiyonu için adsorpsiyon yüzeyi sağlayarak kirletici ile gümüş nanoparçacıkları arasındaki teması artırır. Aynı zamanda bir destek yapısı olarak kompozit kararlılığını ve yüzey alanı genişletir (Gungure vd., 2024). Gümüş nanoparçacıkları ise fotonları verimli şekilde soğurarak elektron-boşluk çiftleri oluşturur; bu çiftler reaktif oksijen türlerinin üretilmesi için aktif merkez işlevi görerek fotokatalitik aktiviteyi etkin bir şekilde artırır (Stuvart vd., 2026).

Biyokömürün aktivasyon ile geliştirilmiş bir türevi olan aktif karbonun (AC), boyar maddelerin fotokatalitik bozunma reaksiyonlarında test edildiği çalışmalarda ise CeO_2 gibi yarı iletken özellik gösteren bir metal oksit varlığında, Rodamin B (RhB) gibi kanserojen bir boyar maddenin fotokatalitik bozunma süreçlerinde özgün performanslar ortaya koyduğu belirlenmiştir. Özellikle AC oranının kütlece %40 olduğu örnekte, fotokatalitik aktivitenin verimini düşüren e^-/h^+ çiftlerinin rekombinasyonu azalarak üstün bir fotokatalitik aktivite elde edilmiştir (Sumi vd., 2025). Kenevir biyokömürünün KOH ile aktive edilmesiyle türetilen AC'nin kullanıldığı bir diğer çalışmada ise, kristal viyole (CV) boyar maddesinin fotokatalitik olarak bozunması deneyleri gerçekleştirilmiştir. %3 oranında Se içeren AC 75 dakika içerisinde %98,2'lik bozunma verimi ile en yüksek performansı göstermiştir (Kanwal vd., 2025).

Karbon bazlı fotokatalizörler arasında yaygın kullanılan bir diğer örnek ise karbon nanotüplerdir (CNT). Özellikle TiO_2, ZnO ve diğer yarı iletken fotokatalizörler ile birlikte kullanılırlar. Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) üzerine yerleştirilmiş TiO_2 kullanımını araştıran bir çalışmada, tek kap (one-pot) yöntemi ile TiO_2/MWCNT nanoyapısı oluşturulmuştur. MB ve RhB boyar maddelerinin bozunmasında kullanılan kompozit fotokatalizör saf TiO_2'ye göre daha iyi fotokatalitik performans göstermiştir (Trinh vd., 2024). Jia vd. (2026) ZnO/CNT kompozitleri sentezleyerek RhB bozunmasında test etmiş, 7,5 dakika içerisinde RhB'nin %98,4 oranında bozunduğunu belirlemişlerdir.

Silika Bazlı Fotokatalizörler

SiO_2 (Silika), mezogözenekli SiO_2, SiO_2 destekli TiO_2, SiO_2-metal oksit kompozitleri, metal yüklü SBA-15 ve SiO_2-karbon kompozitleri gibi farklı silika ve silika bazlı fotokatalizörler kimyasal kararlılıklarının yüksek olması, ayarlanabilir gözenek yapıları ve yüzey fonksiyonel grupları sayesinde fotokatalitik sistemlerde boya bozunması için sıklıkla kullanılmaktadır. Saf SiO_2 daha çok adsorban ya da destek malzemesi olarak kullanılırken, metal oksit ve karbon esaslı malzemelerle oluşturulan kompozitler, adsorpsiyon ve fotokatalitik bozunmayı bir araya getirerek giderim performansını artırmaktadır (Huang vd., 2011; Wang vd., 2018; Zaccariello vd., 2014). Tablo 2'de bazı silika ve silika bazlı fotokatalizörlerin fotokatalitik aktiviteleri özetlenmiştir.

Tablo 2. Bazı silika bazlı fotokatalizörlerin fotokatalitik performansları

Silika bazlı fotokatalizör	Bozunan boya	Bozunma verimi	Kaynak
Ni-SiO_2	MB	%92,00	Pandey vd., 2022
ZnO-SiO_2	MB	%97,42	Ulfa vd., 2025
Co-SiO_2	Nötral Kırmızı	%81,00	Mahfoozi vd., 2021
Au-TiO_2/SiO_2	MB, RhB, Kongo Kırmızısı, Bengal gülü	~%95,00	Malik vd., 2016
TiO_2-SiO_2	MB	%95,81	Ulfa vd., 2023
AuCu-SBA-15-Ti/SiO_2	MB	%100	Barroso-Martín vd., 2018
Pt-SiO_2-Co	MB	%98,82	Ghazvini ve Shahrnoy, 2020
MnO_2-SiO_2	MB	%97,80	Wei vd., 2020

Kaynak: Yazar belirttiği farklı kaynaklardan derlemiştir.

Polimer Bazlı Fotokatalizörler

İletken polimerler, ayarlanabilir elektronik yapıları ve görünür bölgedeki ışıkla etkileşimleri sayesinde boyar maddelerin fotokatalitik bozunmasında kullanılan alternatif fotokatalizörlerdendir (Cui vd., 2024). Polianilin (PANI), polipirol (PPy), politiyofen türevleri ve polimer–metal oksit kompozitleri gibi polimerler özellikle yarı iletken metal oksitlerle oluşturdukları kompozitlerde fotokatalitik performansın gelişimine katkıda bulunmaktadır. Bu tür kompozit malzemelerin boyar madde bozunmasındaki fotokatalitik etkinliği kompozit bileşimi, yüzey özellikleri ve reaksiyon koşullarına bağlıdır (Sun vd., 2025). PANI, iki ya da üç bileşenli kompozit olarak CdS (Qutub vd., 2022), TiO_2 (Aminuddin vd., 2021), Ni (Bhaumik vd., 2021), indirgenmiş GO (Fenniche vd., 2022), ZnO (Hamdy vd., 2021), TiO_2/CdS (Qutub vd., 2022), Zn/Fe_3O_4 (Zare vd., 2021), TiO_2/kitosan (Palliyalil vd., 2022), ZnO/grafen oksit (Liu vd., 2022) TiO_2/Fe_3O_4 (Jumat vd., 2021) gibi bileşenlerle birlikte fotokatalizör olarak kullanılmaktadır.

Bu kompozitlerde PANI kaplama tipik olarak 100-200 nm kalınlığındadır ve yeşil renklidir; bununla birlikte, UV-görünür ışığın tüm dalga boylarına karşı yeterince şeffaftır ve böylece ışığın fotokatalizöre ulaşmasını sağlar. Bu durum, hibrit kompozitlerin sağladığı fotokatalizin başarısı açısından önemlidir. Ayrıca üçlü kompozit bileşenlerin fotokatalitik aktivitesinin yorumlanması daha güçtür; çünkü her bir bileşen, boyar madde adsorpsiyonuna katılabilir (Stejskal, 2022).

Polipirolün tek başına kullanıldığı çalışmalarda ışık altında oluşan temel reaktif türlerin, süperoksit anyon radikali ($O_2^{\cdot -}$) olduğu belirlenmiştir (Taymaz vd., 2021). Bununla birlikte, çalışmaların çoğu çok bileşenli kompozit malzemeleri hedef almıştır. İki bileşenli kompozit olarak TiO_2 ve ZnO gibi fotokatalitik açıdan aktif inorganik bileşikler içeren çalışmalara literatürde rastlanmaktadır (Stejskal, 2022). Buna ek olarak, malzemelere kontrollü bir yüzey özelliği ya da mekanik özellik kazandırmak amacıyla üçüncü bir bileşen de dahil edilmiştir. Metilen mavisi, kongo kırmızısı, malahit yeşili, rodamin B gibi boyar maddelerin bozunmasında kullanılan ve yüksek fotokatalitik aktiviteye sahip olan $FeWO_4$ (Hussain vd., 2022), Fe (Taymaz vd., 2021), $MoSe_2$ (Mittal ve Khanuja, 2021), Ag/Sn_3O_4 (Bahadoran vd., 2022), TiO_2/grafen oksit (Yu vd., 2022) ve TiO_2/Cu-MOF (Liu vd., 2021) gibi iki bileşenli ve üç bileşenli polipirol kompozitlerine ait çalışmalar literatürde yer almaktadır.

Sonuç

Tekstil, kağıt, gıda ve deri endüstrisi gibi alanlarda sıklıkla kullanılan boyar maddelerin atık sularda bulunması su kalitesi, ekosistem, çevresel sorunlar ve insan sağlığı açısından istenmeyen bir durumdur. Boyar maddelerin kimyasal olarak kararlı olması geleneksel yöntemler ile tamamen giderilmesini zorlaştırmaktadır. İleri oksidasyon süreçlerinden biri olan fotokatalitik yöntem, organik bir kirletici olan boyar maddenin daha az zararlı ara ürünlere

dönüşmesini sağlayabilen önemli bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Fotokatalizör olarak metal oksitler, karbon esaslı malzemeler, silika bazlı yapılar ve polimer esaslı kompozit malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Metal oksitler yarı iletken özellikleri ve uygun yüzey kimyaları ile öne çıkarken, karbon esaslı malzemeler adsorpsiyon kapasitesi ve elektriksel iletkenliği açısından avantajlıdır. Silika bazlı malzemeler geniş yüzey alanı, gözenek yapısı ve yüzey modifikasyonuna uygunluğu sayesinde katalizör destek malzemesi olarak kullanılırlar. Polimer bazlı fotokatalizörler ise özellikle yarı iletken metal oksitler ile oluşturdukları kompozitlerde üstün fotokatalitik performansları ile dikkat çekmektedir.

Gelecek Perspektifi

Boyar maddelerin fotokatalitik olarak bozunması araştırmaları gelecekte yalnızca yüksek verim hedefinde sabit kalmamalı, aynı zamanda enerji verimli, toksisite kontrollü, sürdürülebilir ve gerçek atık sulara uygulanabilir sistemleri hedefleyen şekilde planlanmalıdır. Gerçek endüstriyel atık sular üzerinde yürütülecek deneysel çalışmalar, uzun dönem kararlılık, yeniden kullanılabilirlik, katalizör bileşenlerinin suya karışması testleri, enerji tüketiminin belirlenmesi ve katalizör üretim maliyetlerinin düşürülmesi gibi önemli parametreleri de içermelidir.

Sonuç olarak, fotokatalitik sistemlerin sürdürülebilirliği için yalnızca daha aktif malzemelerin geliştirilmesi değil, bu malzemelerin güvenli, ekonomik ve ölçeklenebilir arıtma sistemlerine dönüştürülebilmesi de önem arz etmektedir.

Kaynakça

Abdulhameed, A. S., Al Omari, R. H., Althahban, S., Jazaa, Y., Abualhaija, M., & Algburi, S. (2025). Green vegetable waste composited with chitosan as a bioadsorbent for effective removal of methylene blue dye from water: Insight into physicochemical and

adsorption characteristics. *Biomass and Bioenergy*, *193*, 107528. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107528

Ahmed, H. R., & Kayani, K. F. (2024). A comparative review of Fenton-like processes and advanced oxidation processes for Methylene Blue degradation. *Inorganic Chemistry Communications*, *170*, 113467. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113467

Al Miad, A., Saikat, S. P., Alam, M. K., Sahadat Hossain, M., Bahadur, N. M., & Ahmed, S. (2024). Metal oxide-based photocatalysts for the efficient degradation of organic pollutants for a sustainable environment: a review. *Nanoscale Advances*, *6*(19), 4781-4803. https://doi.org/10.1039/d4na00517a

Aminuddin, N. F., Nawi, M. A., Bahrudin, N. N., & Jawad, A. H. (2021). Iron ion assisted photocatalytic-adsorptive removal of acid orange 52 by immobilized TiO_2/polyaniline bilayer photocatalyst. *Applied Surface Science Advances*, *6*, 100180. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100180

Anisuzzaman, S. M., Joseph, C. G., Pang, C. K., Affandi, N. A., Maruja, S. N., & Vijayan, V. (2022). Current trends in the utilization of photolysis and photocatalysis treatment processes for the remediation of dye wastewater: a short review. *ChemEngineering*, *6*(4), 58. https://doi.org/10.3390/chemengineering6040058

Arjun, A., Dharr, A., Raguram, T., & Rajni, K. S. (2020). Study of copper doped zirconium dioxide nanoparticles synthesized via sol–gel technique for photocatalytic applications. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *30*(12), 4989-4998. https://doi.org/10.1007/s10904-020-01616-4

Azzam, A. M., Shenashen, M. A., Tawfik, A., Safwat, N. A., Mostafa, B. B., & El-Safty, S. A. (2022). Antimicrobial activity of mesoporous organic functionalized hexagon Fe_3O_4 nanosheets for

wastewater treatment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *18*, 100739. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100739

Bahadoran, A., Baghbadorani, N. B., De Lile, J. R., Masudy-Panah, S., Sadeghi, B., Li, J., ... & Fakhri, A. (2022). Ag doped Sn_3O_4 nanostructure and immobilized on hyperbranched polypyrrole for visible light sensitized photocatalytic, antibacterial agent and microbial detection process. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *228*, 112393. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112393

Barroso-Martín, I., Moretti, E., Talon, A., Storaro, L., Rodríguez-Castellón, E., & Infantes-Molina, A. (2018). Au and AuCu nanoparticles supported on SBA-15 ordered mesoporous titania-silica as catalysts for methylene blue photodegradation. *Materials*, *11*(6), 890. https://doi.org/10.3390/ma11060890

Bhattacharyya, B., Geetha, M., Anwar, H., Zaidi, S. A., Sadasivuni, K. K., Mohamed, M., ... & Jarrar, R. A. (2025). Synergistic effect of TiO_2 nanorods incorporated with graphene oxide for photocatalytic degradation of multiple dyes. *International Journal of Environmental Research*, *19*(1), 34. https://doi.org/10.1007/s41742-024-00694-3

Bhaumik, M., Maity, A., & Brink, H. G. (2022). Metallic nickel nanoparticles supported polyaniline nanotubes as heterogeneous Fenton-like catalyst for the degradation of brilliant green dye in aqueous solution. *Journal of colloid and interface science*, *611*, 408-420. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.181

Bhawna, Choudhary, A. K., Gupta, A., Kumar, S., Kumar, P., Singh, R. P., ... & Kumar, V. (2020). Synthesis, antimicrobial activity, and photocatalytic performance of Ce doped SnO_2 nanoparticles. *Frontiers in Nanotechnology*, *2*, 595352. https://doi.org/10.3389/fnano.2020.595352

Chahal, S., Rani, N., Kumar, A., & Kumar, P. (2020). Electronic structure and photocatalytic activity of samarium doped cerium oxide nanoparticles for hazardous rose bengal dye degradation. *Vacuum*, *172*, 109075. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109075

Cheng, T., Gao, H., Liu, G., Pu, Z., Wang, S., Yi, Z., ... & Yang, H. (2022). Preparation of core-shell heterojunction photocatalysts by coating CdS nanoparticles onto $Bi_4Ti_3O_{12}$ hierarchical microspheres and their photocatalytic removal of organic pollutants and Cr (VI) ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *633*, 127918. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127918

Cui, Z., Yuan, R., Chen, H., Zhou, B., Zhu, B., & Zhang, C. (2024). Application of polyaniline-based photocatalyst in photocatalytic degradation of micropollutants in water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, *59*, 104900. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104900

Dhamorikar, R. S., Lade, V. G., Kewalramani, P. V., & Bindwal, A. B. (2024). Review on integrated advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *138*, 104-122. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.04.037

Dhandapani, C., Narayanasamy, R., Karthick, S. N., Hemalatha, K. V., Selvam, S., Hemalatha, P., ... & Kim, H. J. (2016). Drastic photocatalytic degradation of methylene blue dye by neodymium doped zirconium oxide as photocatalyst under visible light irradiation. *Optik*, *127*(22), 10288-10296. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.08.048

El Rouby, W. M. A., Farghali, A. A., & Hamdedein, A. (2016). Microwave synthesis of pure and doped cerium (IV) oxide (CeO_2) nanoparticles for methylene blue degradation. *Water Science*

and Technology, *74*(10), 2325-2336. https://doi.org/10.2166/wst.2016.420

El-Sayed, F., Hussien, M. S., Mohammed, M. I., Ganesh, V., AlAbdulaal, T. H., Zahran, H. Y., ... & Ibrahim, M. A. (2022). The photocatalytic performance of Nd_2O_3 doped CuO nanoparticles with enhanced methylene blue degradation: synthesis, characterization and comparative study. *Nanomaterials*, *12*(7), 1060. https://doi.org/10.3390/nano12071060

Fang, R., Zhai, C., Kou, J., Lai, H., Carraro, M., Wu, D., ... & Huang, Y. (2026). ZIF-67@ g-C_3N_4 Z-scheme photocatalyst for efficient removal of dye and norfloxacin via photo-fenton-like degradation under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 117543. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2026.117543

Fenniche, F., Henni, A., Khane, Y., Aouf, D., Harfouche, N., Bensalem, S., ... & Belkhalfa, H. (2022). Electrochemical synthesis of reduced graphene oxide–wrapped polyaniline nanorods for improved photocatalytic and antibacterial activities. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *32*(3), 1011-1025. https://doi.org/10.1007/s10904-021-02204-w

Ghazvini, M., & Shahrnoy, A. A. (2020). Efficient degradation of methylene blue by Co (II) complexes constrained to the hall of mesoporous silica decorated by Pt nanoparticles. *Materials Letters*, *259*, 126776. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126776

Gershon, T., Shin, B., Bojarczuk, N., Hopstaken, M., Mitzi, D. B., & Guha, S. (2015). The role of sodium as a surfactant and suppressor of non-radiative recombination at internal surfaces in Cu_2ZnSnS_4. *Advanced Energy Materials*, *5*(2), 1400849. https://doi.org/10.1002/aenm.201400849

Gionco, C., Hernández, S., Castellino, M., Gadhi, T. A., Muñoz-Tabares, J. A., Cerrato, E., ... & Paganini, M. C. (2019). Synthesis and characterization of Ce and Er doped ZrO_2 nanoparticles as solar light driven photocatalysts. *Journal of Alloys and Compounds*, *775*, 896-904. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.046

Gungure, A. S., Jule, L. T., Nagaprasad, N., & Ramaswamy, K. (2024). Studying the properties of green synthesized silver oxide nanoparticles in the application of organic dye degradation under visible light. *Scientific Reports*, *14*(1), 26967. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75614-8

Gupta, S., Prajapati, A., & Kumar, A. (2025). Removal of anionic dyes by magnetic modified A. barbadensis Miller residue leaves as a bio-adsorbent using biosorption process. *Green Technologies and Sustainability*, *3*(3), 100196. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100196

Hamdy, M. S., Abd-Rabboh, H. S., Benaissa, M., Al-Metwaly, M. G., Galal, A. H., & Ahmed, M. A. (2021). Fabrication of novel polyaniline/ZnO heterojunction for exceptional photocatalytic hydrogen production and degradation of fluorescein dye through direct Z-scheme mechanism. *Optical Materials*, *117*, 111198. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111198

Han, M., Zhu, S., Lu, S., Song, Y., Feng, T., Tao, S., ... & Yang, B. (2018). Recent progress on the photocatalysis of carbon dots: Classification, mechanism and applications. *Nano Today*, *19*, 201-218. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2018.02.008

Hou, T., Lu, H. L., Al-Dhabi, N. A., Chen, A. H., Tang, W. W., Li, M. Y., & Cui, D. (2026). Enhanced bio-electrochemical decolorization of azo dye by an rGO/polyaniline-modified biocathode: Performance improvement and cathodic microbiome

reshaping. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 124766. https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.124766

Huang, C. H., Chang, K. P., Ou, H. D., Chiang, Y. C., Chang, E. E., & Wang, C. F. (2011). Characterization and application of Ti-containing mesoporous silica for dye removal with synergistic effect of coupled adsorption and photocatalytic oxidation. *Journal of hazardous materials*, *186*(2-3), 1174-1182. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.125

Hussain, D., Siddiqui, M. F., Shirazi, Z., & Khan, T. A. (2022). Evaluation of adsorptive and photocatalytic degradation properties of $FeWO_4$/polypyrrole nanocomposite for rose bengal and alizarin red S from liquid phase: Modeling of adsorption isotherms and kinetics data. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *41*(4), e13822. https://doi.org/10.1002/ep.13822

Jia, J., Duan, S., Liu, P., Feng, S., & Xu, Q. (2026). Synthesis of ZnO/Carbon Nanotube Composites for Enhanced Photocatalytic Performance and Its Mechanism Study. *ChemistrySelect*, *11*(19), e73451. https://doi.org/10.1002/slct.73451

Jini, A. R., Simiyon, G. G., Vergheese, T. M., Magdalane, C. M., & Gopal, R. (2025). A novel sunlight harvesting silver-doped carbon dot nanoprobe for the efficient photodegradation of cationic (Methylene Blue) and anionic (Alizarin Red S) dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, *180*, 114761. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114761

Jumat, N. A., Khor, S. H., Basirun, W. J., Juan, J. C., & Phang, S. W. (2021). Highly visible light active ternary polyaniline-TiO_2-Fe_3O_4 nanotube/nanorod for photodegradation of reactive black 5 dyes. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *31*(5), 2168-2181. https://doi.org/10.1007/s10904-021-01912-7

Kaewkhiad, O., Chantarak, S., & Khaokong, C. (2026). Synthesis of an interpenetrating network skim natural rubber latex/poly (acrylic acid) hydrogel for selective dye removal and heavy metal ion adsorption. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102953. https://doi.org/10.1016/j.jics.2026.102953

Kanwal, H., Khoja, A. H., Hajji, Y., Shakir, S., Anwar, M., Liaquat, R., ... & Hleili, M. (2025). Photocatalytic performance of dual-function selenium-enriched biomass-derived activated carbon as a catalyst for dye degradation and hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *101*, 1288-1303. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.509

Karidas, S., Veena, B. K., Pujari, N., Krishna, P., & Chunduru, V. (2020). Photodegradation of methylene blue (MB) using cerium-doped zinc oxide nanoparticles. *Sādhanā*, *45*(1), 128. https://doi.org/10.1007/s12046-020-01329-x.

Kurniawan, T. A., Mengting, Z., Fu, D., Yeap, S. K., Othman, M. H. D., Avtar, R., & Ouyang, T. (2020). Functionalizing TiO_2 with graphene oxide for enhancing photocatalytic degradation of methylene blue (MB) in contaminated wastewater. *Journal of environmental management*, *270*, 110871. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110871

Li, J., & Wu, N. (2015). Semiconductor-based photocatalysts and photoelectrochemical cells for solar fuel generation: a review. *Catalysis Science & Technology*, *5*(3), 1360-1384. https://doi.org/10.1039/c4cy00974f

Li, Y., Yan, S., Jia, X., Wu, J., Yang, J., Zhao, C., ... & Yang, X. (2021). Uncovering the origin of full-spectrum visible-light-responsive polypyrrole supramolecular photocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, *287*, 119926. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.119926

Liu, S., Hu, J., Wu, D., Zeng, H., Zhou, T., Yang, M., & Feng, Q. (2022). Preparation of spunlaced viscose/PANI-ZnO/GO fiber membrane and its performance of photocatalytic decolorization. *Journal of Industrial Textiles*, *51*(5), 7359S-7373S. https://doi.org/10.1177/15280837211070615

Mahfoozi, F., Mahmoudi, A., Sazegar, M. R., & Nazari, K. (2021). High-performance photocatalytic degradation of neutral red over cobalt grafted-mesoporous silica under UV irradiation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *100*(1), 170-182. https://doi.org/10.1007/s10971-021-05627-6

Mahmoud, Z. H., AL-Bayati, R. A., & Khadom, A. A. (2021). Electrochemical photocatalytic degradation of Rhodamine B dye by Sm^{3+} doped Titanium dioxide (Sm-TiO_2) in natural sunlight exposure. *International Journal of Electrochemical Science*, *16*(12), 211241. https://doi.org/10.20964/2021.12.43

Malik, R., Chaudhary, V., Tomer, V. K., Rana, P. S., Nehra, S. P., & Duhan, S. (2016). Visible light-driven mesoporous Au–TiO_2/SiO_2 photocatalysts for advanced oxidation process. *Ceramics international*, *42*(9), 10892-10901. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.222

Mittal, H., & Khanuja, M. (2021). Hydrothermal in-situ synthesis of $MoSe_2$-polypyrrole nanocomposite for efficient photocatalytic degradation of dyes under dark and visible light irradiation. *Separation and Purification Technology*, *254*, 117508. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117508

Mishra, B., & Tiwari, A. (2025). Sustainable water management and treatment: systems, processes and technologies. In *Evaluating environmental processes and technologies* (pp. 197-229). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85327-2_7

Mu'izzah, N. R., Pramono, E., Saputra, E.Y., Wartono, M. W., & Salleh, W.N.W. (2026). Structure-property relationships of PVDF membranes incorporating GPTMS-modified lignosulfonate for reactive dye separation. *Next Materials*, *13*, 103102. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.103102

Natarajan, V., Sathiyamoorthy, K., Thilak Kumar, R., Navaneethan, M., & Harish, S. (2024). Sunlight-driven photocatalytic degradation of organic pollutant in an aqueous medium by Gd-doped CuO nanocatalyst. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *35*(1), 25. https://doi.org/10.1007/s10854-023-11715-w.

Nazim, V. S., El-Sayed, G. M., Amer, S. M., & Nadim, A. H. (2023). Functionalized SnO_2 nanoparticles with gallic acid via green chemical approach for enhanced photocatalytic degradation of citalopram: synthesis, characterization and application to pharmaceutical wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(2), 4346-4358. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22447-5

Nehra, P., Khatri, A., Kumar, A., Singh, S., & Rana, P. S. (2023). Synthesis and characterization of rare earth metal doped tungsten trioxide photocatalyst for degradation of Rhodamine B dye. *Journal of Rare Earths*, *41*(9), 1302-1310. https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.07.007

Nguyen, L. T., Nguyen, L. T., Duong, A. T., Nguyen, B. D., Quang Hai, N., Chu, V. H., ... & Bach, L. G. (2019). Preparation, characterization and photocatalytic activity of La-doped zinc oxide nanoparticles. *Materials*, *12*(8), 1195. https://doi.org/10.3390/ma12081195

Nuryasari, F., Purba, I. T., Furqon, M. I. Z., Febrianti, V., Saputera, W. H., & Waluyo, J. (2026). Carbon-based photocatalysts: A review of applications in biofuel production, chemical synthesis,

and dye degradation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *205*, 110380. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.110380

Palliyalil, S., Chola, R. K. V., Vigneshwaran, S., Poovathumkuzhi, N. C., Chelaveettil, B. M., & Meenakshi, S. (2022). Ternary system of TiO_2 confined chitosan–polyaniline heterostructure photocatalyst for the degradation of anionic and cationic dyes. *Environmental Technology & Innovation*, *28*, 102586. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102586

Pan, K., Tang, X., Qu, G., Tang, H., Wei, K., & Lv, J. (2023a). Mesoporous silica/iron phthalocyanine light-driven nanomaterials for efficient removal of Pb^{2+} ions from wastewater. *ACS Applied Nano Materials*, *6*(14), 12816-12827. https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01499

Pan, K., Guo, T., Liao, H., Huang, Z., Qian, Z., Li, F., & Li, J. (2023b). Adding iron shavings in activated sludge system to enhance removal of refractory organics and nitrogen for textile-dyeing wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(5), 110999. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110999

Pan, K., Yang, B., Sun, A., Xia, W., Yang, J., Xiang, J., ... & Li, C. (2026). Enhanced azo dye degradation in microbial fuel cells with a hydrophilic flavin derivative modified anode. *International Journal of Hydrogen Energy*, *235*, 155151. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.155151

Pandey, M., Prajapti, R., Shukla, P., Paredi, P., Tsunoji, N., Kumar, R., ... & Bandyopadhyay, M. (2022). Synthesis of novel tetranuclear Ni complex incorporated mesoporous silica for improved photocatalytic degradation of methylene blue in presence of visible light. *Polyhedron*, *228*, 116161. https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.116161

Qutub, N., Singh, P., Sabir, S., Umar, K., Sagadevan, S., & Oh, W. C. (2022). Synthesis of polyaniline supported CdS/CdS-ZnS/CdS-TiO_2 nanocomposite for efficient photocatalytic applications. *Nanomaterials*, *12*(8), 1355. https://doi.org/10.3390/nano12081355

Rajput, R. B., Jamble, S. N., & Kale, R. B. (2021). Solvothermal synthesis of anatase TiO_2 for the detoxification of methyl orange dye with improved photodegradation efficiency. *Engineered Science*, *17*(7), 176-184. https://doi.org/10.30919/es8d534

Ramutshatsha-Makhwedzha, D., & Munyengabe, A. (2026). Catalytic materials applied for dye removal in advanced oxidation processes: A mini review of studies from 2015 to 2025. *Discover Water*, *6*(1), 27. https://doi.org/10.1007/s43832-026-00342-1

Sendão, R. M., Algarra, M., Lázaro-Martínez, J., Brandao, A. T., Gil, A., Pereira, C., ... & da Silva, L. P. (2025). Visible-light-driven photocatalytic degradation of organic dyes using a TiO_2 and waste-based carbon dots nanocomposite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *713*, 136475. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136475

Shang, J., Deng, C., Xue, Z., Dong, Z., Fu, L., & Fan, H. J. S. (2024). Kinetics of catalytic ozonation of methylene blue in wastewater with Fe/Ce co-doped in attapulgite. *Desalination and Water Treatment*, *317*, 100023. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100023

Simon, T., Carlson, M. T., Stolarczyk, J. K., & Feldmann, J. (2016). Electron transfer rate vs recombination losses in photocatalytic H_2 generation on Pt-decorated CdS nanorods. *ACS energy letters*, *1*(6), 1137-1142. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00468

Singh, S. J., & Chinnamuthu, P. (2021). Highly efficient natural-sunlight-driven photodegradation of organic dyes with combustion derived Ce-doped CuO nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *625*, 126864. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126864

Stejskal, J. (2022). Recent advances in the removal of organic dyes from aqueous media with conducting polymers, polyaniline and polypyrrole, and their composites. *Polymers*, *14*(19), 4243. https://doi.org/10.3390/polym14194243

Stuvart, A., Arun, T. R., Rekha, D., Sudhani, H. P., & Rajendran, A. (2026). Biochar-Based Silver Composites for Methylene Blue Dye Remediation: A Review. *Next Research*, 101950. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101950

Subramaniam, M. N., Wu, Z., Goh, P. S., & Zhou, S. (2023). The state-of-the-art development of biochar based photocatalyst for removal of various organic pollutants in wastewater. *Journal of Cleaner Production*, *429*, 139487. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139487

Sumi, K., Supraja, K. S., Aashika, R. C., & Arivanandhan, M. (2025). Biomass-derived activated carbon/cerium oxide nanocomposite as adsorptive photocatalyst for effective removal of carcinogenic dye. *Materials Research Bulletin*, *183*, 113212. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2024.113212

Sun, K., Zhang, C., Yang, C., Wang, X., Wan, Z., Zhao, E., ... & Sun, H. (2025). A review on conductive polymers-modified TiO2 photocatalyst for environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(3), 116518. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116518

Taymaz, H. B., Taş, R., Kamış, H., & Can, M. (2021). Photocatalytic activity of polyaniline and neutral polyaniline for

degradation of methylene blue and malachite green dyes under UV Light. *Polymer Bulletin*, *78*(5), 2849-2865. https://doi.org/10.1007/s00289-021-03674-1

Trinh, N. B., Nguyen, T. A., Vu, S. V., Vo, H. G. T., Lo, T. N. H., Park, I., & Vo, K. Q. (2024). Modified hydrothermal method for synthesizing titanium dioxide-decorated multiwalled carbon nanotube nanocomposites for the solar-driven photocatalytic degradation of dyes. *Rsc Advances*, *14*(46), 34037-34050. https://doi.org/10.1039/d4ra05899b

Ulfa, M., Aziza, H., & Sholeha, N. A. (2025). In-situ sulfonated mesoporous silica as ZnO nanomaterial support for enhanced dyes photodegradation. *Results in Engineering*, *26*, 104381. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104381

Ulfa, M., Anggreani, C. N., & Sholeha, N. A. (2023). Fine-tuning mesoporous silica properties by a dual-template ratio as TiO_2 support for dye photodegradation booster. *Heliyon*, *9*(6). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16275

Vudamala, K., Shekhar Rao, D., Sharma, A., Ray, D., Chanu, A. K., & Prakash, P. (2025). Comparative assessment of heavy metal contamination and pollution trends in Indian estuarine sediments: Insights from East and West Coasts of India. *ACS ES&T Water*, *5*(6), 2760-2777. https://doi.org/10.1021/acsestwater.5c00165

Wang, B., Zhou, Y., Li, L., Xu, H., Sun, Y., Du, Y., & Wang, Y. (2018). In situ synthesis of TiO_2-doped mesoporous silica from coal fly ash for the photocatalytic degradation of dyes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *57*(46), 15632-15637. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03190

Wei, J., Li, K., Yu, H., Yin, H., Cohen Stuart, M. A., Wang, J., & Zhou, S. (2020). Controlled synthesis of manganese oxide nanoparticles encaged in hollow mesoporous silica nanoreactors and

their enhanced dye degradation activity. *ACS omega*, *5*(12), 6852-6861. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00171

Wu, H., Li, L., Wang, S., Zhu, N., Li, Z., Zhao, L., & Wang, Y. (2023). Recent advances of semiconductor photocatalysis for water pollutant treatment: mechanisms, materials and applications. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *25*(38), 25899-25924. https://doi.org/10.1039/d3cp03391k

Yadav, A., Tiwari, A., Mishra, V., Rao, A., Poria, P., Kumar, P., ... & Sharma, R. S. (2026). Sequential anaerobic–aerobic dye degradation and amine detoxification in textile effluent using integrated microbial–algal fuel cell. *Journal of Water Process Engineering*, *86*, 109747. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.109747

Yu, H., He, Y., Li, H., Li, Z., Ren, B., Chen, G., ... & Ou, J. Z. (2022). Core-shell PPy@ TiO_2 enable GO membranes with controllable and stable dye desalination properties. *Desalination*, *526*, 115523. https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115523

Yulizar, Y., Abdullah, I., Surya, R. M., & Alifa, N. L. (2023). Green synthesis of novel $YMnO_3$-doped TiO_2 for enhanced visible-light-driven photocatalytic degradation of malachite green. *Journal of Environmental Management*, *342*, 118139. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118139

Yun, H., Hwang, S. W., Jung, M., Choi, I. G., Yeo, H., & Kwak, H. W. (2024). Microwave-assisted utilization of kraft lignin-derived activated carbon for efficient dye removal. *Biomass and Bioenergy*, *186*, 107279. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107279

Zaccariello, G., Moretti, E., Storaro, L., Riello, P., Canton, P., Gombac, V., ... & Benedetti, A. (2014). TiO_2–mesoporous silica nanocomposites: cooperative effect in the photocatalytic degradation

of dyes and drugs. *RSC advances*, *4*(71), 37826-37837. https://doi.org/10.1039/c4ra06767c

Zahid, A., Mazhar, H., Mujtaba, G., Al-Mahmodi, A. F., Qudoos, A., Bangash, I. A., ... & Ali, S. A. (2026). Biomass-modified nanoparticles for photocatalytic dye degradation: A sustainable roadmap toward a cleaner Future–Review. *Biomass and Bioenergy*, *205*, 108492. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108492

Zahoor, S., Muhammad, S., Kashif, M., Shahzad, N., Liu, Y. C., Celik, C., ... & Wen, C. (2026). Advances in mesoporous nanomaterials for photocatalytic degradation of pollutants: fundamentals, material classifications, challenges and future prospects. *Coordination Chemistry Reviews*, *549*, 217239. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217239

Zare, N., Kojoori, R. K., Abdolmohammadi, S., & Sadegh-Samiei, S. (2022). Ultrasonic-assisted synthesis of highly effective visible light Fe_3O_4/ZnO/PANI nanocomposite: Thoroughly kinetics and thermodynamic investigations on the Congo red dye decomposition. *Journal of Molecular Structure*, *1250*, 131903. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131903

Zeng, G., Liu, X., Wu, L., Meng, Z., Zeng, D., & Yu, C. (2024). Novel visible-light-driven I^- doped $Bi_2O_2CO_3$ nano-sheets fabricated via an ion exchange route for dye and phenol removal. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, *43*(12), 100462. https://doi.org/10.1016/j.cjsc.2024.100462

Zhu, S., & Wang, D. (2017). Photocatalysis: basic principles, diverse forms of implementations and emerging scientific opportunities. *Advanced Energy Materials*, *7*(23), 1700841. https://doi.org/10.1002/aenm.201700841

BÖLÜM 2

SULU VE ASİDİK BİTKİ ÖZÜTÜ KULLANIMI İLE METALİK NANOPARTİKÜL SENTEZİ VE KULLANIM ALANLARI

AYLA ÖZER[1]
DENİZ UZUNOĞLU DOĞRUYOL[2]
MEMDUHA ERGÜT[3]
HALİS ENES ÜNAL[4]

Giriş

Kendi doğal ortamında yetişen bitkilerin yaprak ve dallarının sulu özütü içeriğinde bulunan indirgeyici ajanların metal iyonlarının indirgenmesinde kullanımı ile metalik nanopartikül sentezi mümkündür. Biyosentez yöntemi ile nanopartikül sentezinde, ortama konulan metal tuzu ile bitki özütünün birleşmesi sonucu, bitkilerdeki fenolik bileşenlerin metal tuzlarını indirgemesi

[1] Prof. Dr., Mersin Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-7824-238X
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Mersin Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-9706-303X
[3] Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-7297-1533
[4] Dr., Mersin Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-2937-8659

sonucunda partiküller oluşur. Bitki özütlerinde bulunan flavonoidler, fenolik bileşikler, terpenoidler, proteinler ve diğer fitokimyasal bileşenler yalnızca metal iyonlarının indirgenmesinde değil, aynı zamanda oluşan nanopartiküllerin stabilize edilmesinde de etkin rol oynamaktadır. Bu özellikleri sayesinde bitki aracılı biyosentez; çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir bir nanopartikül sentez yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Metal akümülatör olarak tanımlanan bazı bitki türlerinin (biyokütlelerin), bünyelerinde doğal olarak biriktirdikleri metalik bileşenlerden yararlanılarak metalik nanopartikül ve kompozit malzeme sentezi gerçekleştirilmektedir. Özellikle fitoremediasyon uygulamaları sonucunda ağır metallerce zenginleşen bitkisel biyokütleden elde edilen metal içerikli asidik liç çözeltilerinin, sentetik metal tuzlarına alternatif metal kaynağı olarak kullanılması; çevresel iyileştirme, kaynak geri kazanımı ve nanopartikül sentezini bütünleştiren yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntem, kirlenmiş alanlardan uzaklaştırılan metallerin yüksek katma değerli fonksiyonel nanomalzemelere dönüştürülmesine olanak sağlayarak döngüsel ekonomi ilkelerini desteklemektedir. Bu çalışma, bitkilerin dal ve yapraklarından elde edilen sulu özütlerinin ve asidik liç yöntemi ile elde edilen asidik liç çözeltilerinin kullanımı ile metalik nanopartikül malzeme sentezine yönelik bilgileri içermektedir. Ayrıca araştırma grubumuz tarafından geliştirilen özgün çalışmalar doğrultusunda, hiperakümülatör bitkilerden elde edilen metal içerikli liç çözeltilerinin nanopartikül sentezindeki kullanım potansiyeli değerlendirilerek bu yaklaşımın çevresel, katalitik, biyosensör ve antibakteriyel uygulamalardaki önemi ortaya konulmaktadır.

Nanopartikül Sentez Yöntemleri

Nanoteknoloji, benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklere sahip nanometre boyutundaki malzemelerin tasarımı ve manipülasyonu ile modern bilimin en dinamik araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Katalizör sistemlerinden

hedeflenmiş ilaç taşıyıcılarına kadar geniş bir yelpazede kullanılan metal ve metal oksit nanopartiküllerin üretimi, geleneksel olarak fiziksel ve kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Ancak bu geleneksel yaklaşımlar; yüksek enerji tüketimi, toksik kimyasal indirgeyicilerin kullanımı ve çevreye zararlı yan ürünlerin oluşması gibi ciddi dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, Yeşil Kimya ilkeleri doğrultusunda geliştirilen sürdürülebilir, toksik olmayan ve çevre dostu "yeşil sentez" yaklaşımları son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Bakteri veya fungus tabanlı biyolojik yöntemlerle kıyaslandığında; steril kültür ortamı gerektirmemesi, kolay ölçeklenebilirliği, düşük maliyeti ve yüksek reaksiyon hızı nedeniyle bitki özütleri aracılı sentez en avantajlı biyosentez rotası olarak öne çıkmaktadır. Bitki yaprak, meyve, kök, dallarından elde edilen sulu özütler; içerdikleri flavonoidler, polifenoller, terpenoidler ve proteinler gibi zengin fitokimyasal bileşenler sayesinde reaksiyonda herhangi bir harici kimyasala ihtiyaç duyulmaksızın hem etkin bir indirgeyici hem de partiküllerin topaklanmasını önleyen birer doğal kaplama ajanı olarak işlev görür.

Yeşil sentez teknolojisindeki en yenilikçi ve sürdürülebilir değişimlerinden biri, çevre kirliliğiyle mücadelede kullanılan metal hiperakümülatör bitkilerin sürece dahil edilmesidir. Ağır metallerle kirlenmiş toprakları temizleme (fitoremediasyon) yeteneğine sahip bu özel bitkiler, bünyelerinde yüksek derişimlerde metali depolama özelliğine sahiptirler. Metallerce kirlenen biyokütlenin çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi kritik bir sorun teşkil ederken, metallerin asidik liç yöntemleriyle çözeltiye alınması bu atığı kıymetli bir hammaddeye dönüştürür. Bu bağlamda, bitkiden kontrollü asit ekstraksiyonu ile elde edilen metal zengin liç çözeltileri, aynı veya farklı bir bitkinin sulu özütüyle (fitokimyasallarla) reaksiyona sokulduğunda harici ticari metal tuzlarına gerek kalmadan doğrudan nanopartikül sentezini mümkün kılmaktadır. Bu bütünleşik

yaklaşım, hem tehlikeli atık yönetimini çözmekte hem de nanoteknolojiye tam bir döngüsel ekonomi modeli kazandırmaktadır. Bu bölümde, bitki özütleri kullanılarak gerçekleştirilen metalik nanopartikül sentezinin temel prensipleri, hiperakümülatör bitkilerin fitoremediasyon süreçlerindeki rolleri ve bu bitkilerden elde edilen metal içerikli asidik liç çözeltilerinin nanopartikül sentezindeki kullanımına ilişkin güncel yaklaşımlar ele alınmaktadır. Ayrıca araştırma grubumuz tarafından geliştirilen özgün çalışmalar değerlendirilerek bu yaklaşımın çevresel, katalitik, biyosensör ve antibakteriyel uygulamalardaki potansiyeli ortaya konulmaktadır.

Metal Hiperakümülatör Bitkiler

Ağır metaller, doğal jeolojik süreçler ve insan faaliyetleri sonucunda toprak, su ve hava ortamlarında birikebilen önemli çevresel kirleticiler arasında yer almaktadır. Madencilik faaliyetleri, endüstriyel üretim, fosil yakıt kullanımı, tarımsal uygulamalar ve atık depolama alanları ağır metal kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır. Toprakta biriken ağır metaller bitkiler tarafından alınarak besin zincirine girebilmekte ve ekosistem ile insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Ağır metal kirliliğine maruz kalan bitkilerde fizyolojik ve biyokimyasal süreçler etkilenmekte, büyüme ve gelişme yavaşlamakta, biyokütle üretimi azalmakta ve bitki dokularında metal birikimi meydana gelmektedir (Edelstein ve Ben-Hur, 2018).

Bitkiler tarafından alınan metaller genel olarak iki grupta değerlendirilmektedir. Birinci grupta Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni ve Zn gibi bitki gelişimi için gerekli olan, ancak belirli eşik değerlerinin üzerinde toksik etki gösteren elementler yer almaktadır. İkinci grupta ise As, Cd, Hg, Pb, Sb ve Tl gibi bitkiler için zorunlu olmayan ancak düşük konsantrasyonlarda dahi toksisite oluşturabilen elementler bulunmaktadır (Edelstein ve Ben-Hur, 2018; Nedaee Ziabari vd.,

2024; Rascio ve Navari-Izzo, 2011). Akümülatör olmayan bitkilerde bu metallerin birikimi bitkilerin metabolik gereksinimlerini aşmaz (<10 ppm). Ağır metallerin bitki dokularında aşırı birikimi fitotoksisiteye yol açmakta, tarımsal verimi düşürmekte ve ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Yetiştiği topraklarda çeşitli ağır metalleri toprak üstü organlarında aşırı miktarda biriktirebilen ancak bundan olumsuz etkilenmeyen bazı bitki türleri vardır ki bu bitkiler hiperakümülatör bitkiler olarak adlandırılırlar. Hiperakümülatör bitkiler, toprakta veya komşu bitkilerde bulunan miktarların çok üzerinde miktarlarda potansiyel toksik elementleri toprak üstü dokularında biriktirebilen bitkilerdir. Başlangıçta "hiperakümülatör" terimi, 1 g kuru bitki temelinde 1 mg Ni'den daha/fazla nikel biriktirebilen bitkileri için kullanılmış; daha sonra bitkiler için ağır metal hiperakümülatörü kriterleri belirlenmiştir. Bu kriterlere göre hiperakümülatörler, doğal topraklarında yetişirken, bitkilerin toprak üstü organlarında >10 mg /g kuru bitki (%1) Mn veya Zn, >1 mg/ g kuru bitki (%0,1) As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Se veya Tl ve >0,1 mg g kuru bitki (%0,01) Cd biriktiren ve fitotoksik hasara uğramayan bitkilerdir (Rascio ve Navari-Izzo, 2011). Ağır metal biriktirebilen bitki türlerinin sayısı yeryüzünde yaklaşık 450 olarak bilinmektedir (Güneş ve Bozkurt, 2021).

Hiperakümülatör bitkiler, genellikle benzer koşullar altında yetişen, hiperakümülatör olmayan bitkilere kıyasla metal seviyelerini en az 100 kat daha fazla yoğunlaştırma yetenekleriyle tanımlanırlar (Keeran vd., 2019). Hiperakümülatör bitkiler, yalnızca ekolojik ve fizyolojik özellikleriyle değil, aynı zamanda ağır metallerle kirlenmiş toprakların fitoremediasyonunda ve mineralize alanlardan değerli metallerin geri kazanılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesindeki potansiyel uygulamaları ile önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Hiperakümülatör bitkiler, hem fitoremediasyon hem de fitomani uygulamaları kapsamında çevresel

ve ekonomik açıdan büyük potansiyele sahiptir. Hiperakümülatör bitkiler, *Thlaspi L.* genusuna ait bitki türlerinde olduğu gibi birden fazla ağır metali aşırı miktarda bünyesinde biriktirebilen fakat az miktarda biyokütle oluşturan hiperakümülatör bitkiler ile *Helianthus annuus L., Nicotiana tabacum L. Brassica juncea L. ve Zea mays L.* gibi orta seviyede ağır metal biriktirebilen fakat yüksek miktarda biyokütle oluşturan bitki türleri olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır (Esetlili ve Anaç, 2015). Özellikle yüksek biyokütle üretimi ile karakterize edilen türler, hem metal uzaklaştırma kapasitesi hem de geri kazanılabilirlik açısından ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, hiperakümülatörlerin seçilim, melezleme ve genetik mühendislik teknikleri ile geliştirilmesi, metal kirliliğinin giderilmesinde sürdürülebilir çözümler sunabilir. Hiperakümülatör bitkilerin başlıca kullanım alanları şunlardır:

- **Toprak ve Su Kirliliği Temizliği (Fitoremediasyon):** Ağır metallerle kirletilmiş alanların temizlenmesinde (fitoekstraksiyon) en önemli araçlardır. Kirli sahalara ekilerek metalleri kökleri vasıtasıyla bünyelerine alırlar ve toprak üstü kısımlarında depolarlar.
- **Maden Arama (Biyojeokimyasal Prospeksiyon):** Topraktaki metalleri bünyelerinde biriktirdikleri için, bu bitkilerin analizi, yer altındaki metal yataklarının (nikel, çinko, altın vb.) tespit edilmesinde kullanılır.
- **Peyzaj Onarımı ve Restorasyon:** Özellikle maden atık sahalarının, eski sanayi bölgelerinin ve çevre kirliliğine maruz kalmış alanların rehabilitasyonunda, toprağın iyileştirilmesi amacıyla kullanılır.
- **Fitomadencilik (Phytomining):** Hiperakümülatör bitkilerin, yüksek nikel veya diğer metalleri içeren alanlarda yetiştirilip, hasat edildikten sonra yakılarak metallerin elde edilmesi işlemidir.

Chaney vd. (1983), ağır metal ile kirlenmiş toprakların temizlenmesi amacıyla hiperakümülatör bitkilerin kullanımını öneren ilk araştırmacılar arasında yer almaktadır. Bu yöntemde, hiperakümülatör bitkilerin topraktan absorbe ettikleri metaller, bitkinin yer üstü kısımlarının hasat edilmesiyle ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Böylece topraktaki toksik ağır metallerin uzaklaştırılması veya ekonomik değeri olan metallerin geri kazanılması sağlanmaktadır.

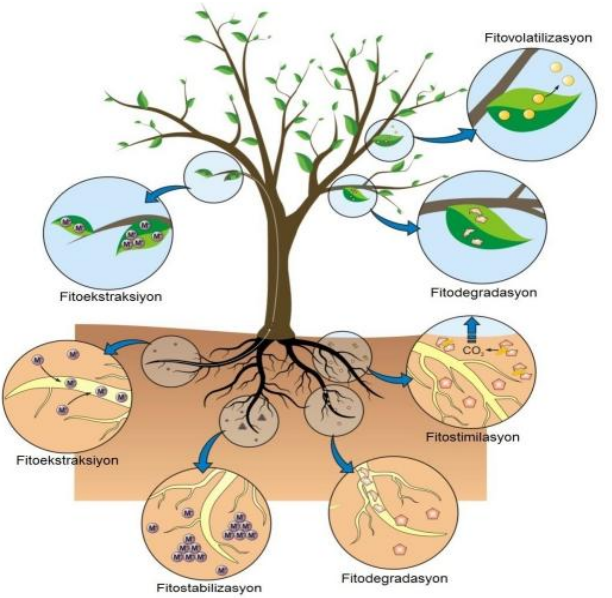
Fitoremediasyon

Modern bilimin gelişmesiyle birlikte, bitki temelli çevre iyileştirme yöntemlerinden olan fitoremediasyon, toprak iyileştirme alanında yeşil, çevre dostu ve uygun maliyetli bir yöntemdir. Fitoremediasyon, bitki yetiştirilerek kirlenmiş alanların kirleticilerden temizlenmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bitkiler organik ve inorganik kirleticileri bünyelerine alarak, biriktirerek, depolayarak veya parçalayarak kirli alanların temizlenmesini sağlarlar. Bu sayede kirlenmiş arazilerin düzenlenmesi veya stabilize edilmesi amaçlanmaktadır. Fitoremediasyon, diğer ıslah yöntemlerine göre sürdürülebilir, uygun maliyetli ve çevre dostu bir teknik olması nedeniyle önem taşımaktadır. Ancak fitoremediasyonda başarılı olabilmek için toprağın kolloidal yapısının cins ve miktarı çok önemlidir. İnorganik toprak kolloidleri içerisinde kil mineralleri önemli bir role sahiptir. Kil minerallerinin miktarı diğer elementlerin tutulmasının yanı sıra, ağır metallerin topraktaki tutulumunda da önemli bir yere sahiptir. Fitoremediasyonda başarılı olabilmenin diğer bir şartı ise uygun bitkilerin geliştirilmesi ve bitkilerin ağır metale olan toleranс mekanizmalarının belirlenmesidir. Fitoremediasyon, son yıllarda dünya çapında bilim insanları ve mühendislerin büyük ilgisini çekmiştir. Bitkiyle arıtma yönteminin geleneksel fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemlerine kıyasla avantajları düşük maliyet, basitlik ve çevre dostu olmasıdır (Liu ve Tran, 2021). Bu çevre dostu

ve düşük maliyetli yöntem ile bitkiler, kirleticileri Şekil 1'de verilen mekanizmalarla bünyesinde biriktirir veya zararsız hale getirebilirler:

Şekil 1. Fitoremediasyon şematik gösterimi

Kaynak: (Aybar vd., 2015)



Bir bitkinin organlarına bağlı olarak farklı mekanizmalar ile kirleticileri bünyesinde biriktirme mekanizmaları (Şekil 1); fitoekstraksiyon (fitoakümülasyon), fitostabilizasyon, fitovolatilizasyon, rizofiltrasyon, fitodegradasyon (fitotransformasyon) ve rizodegradasyon olarak sınıflandırılmıştır. Bunlar;

- **Fitoekstraksiyon:** Ağır metallerce kirlenmiş topraklardaki ağır metallerin bitkiler aracılığıyla alınıp; gövde ve yapraklarda biriktirilerek ortamdan uzaklaştırılması yöntemidir. Bu işlemde, toprak üstü

organlarında normal bir bitkiye göre (100) ila (1000) kat daha fazla ağır metal biriktirebilen ve zarar görmeyen hiperakümülatör bitkiler kullanılır. Hasat edilen bitkiler yakılarak küllerinden metaller geri kazanılabilir. Bu teknik Cu ve Zn gibi aktif olarak alınan mikrobesin elementleri ve Cd, Ni ve Pb gibi besin elementi olmayan ağır metallerin uzaklaştırılmasında kullanılabilmektedir. Fitoekstraksiyon teknolojisi sadece metal kirliliğinin düşük veya orta seviyede olduğu alanlar için uygulanabilmektedir.

- **Fitostabilizasyon:** Bitki kökleri sayesinde topraktaki kirleticilerin hareketliliğini azaltarak, yayılmalarını veya yeraltı sularına karışmalarını önleme tekniğidir. Bu teknikte, erozyonun önlenmesi, yeraltı sularına kirleticilerin sızmasının azaltılması ve toprakla doğrudan temasın önlenmesi için toprak yüzeyi bitkiler ile örtülmektedir. Bu teknikte bitki kökleri fiziksel ve kimyasal olarak kirleticileri immobilize etmektedir (Berti ve Cunningham, 2000). Bu teknik, kirlenmiş topraklarda büyüyebilen ve toksik metalleri daha az toksik formlara fizyolojik, dönüştürmek için toprağın kimyasal ve biyolojik özelliklerini değiştirebilen bitkilere gereksinim duymaktadır.

- **Fitovolatilizasyon:** Bitkilerin kirleticileri (özellikle cıva, arsenik gibi ağır metaller) absorbe edip, kök ve yaprakları aracılığıyla daha az zararlı gaz formunda atmosfere salmasıdır. Bu teknolojide, bitkiler tarafından absorbe edilen ağır metaller daha az toksik uçucu formlara dönüştürülerek transpirasyon ile atmosfere verilmektedir. As, Hg ve Se gibi metaller doğada gaz formunda bulunabilmektedir.

- **Rizofiltrasyon:** Özellikle sucul ortamlardaki veya atık sulardaki radyonüklitlerin ve ağır metallerin bitki kökleri tarafından tutulması, emilmesi ve adsorbe edilmesi yöntemidir. Rizofiltrasyon için ideal bitki önemli miktarda kök biyokütlesi veya yüzey alanı üretmeli, yüksek miktarda hedef metali biriktirebilmeli ve tolere edebilmeli, düşük maliyetli olmalı ve minimum düzeyde sekonder atık üretmelidir (Dushenkov ve Kapulnik, 2000).

- **Fitodegradasyon (Fitotransformasyon):** Bitkilerin bünyelerindeki veya kök bölgelerindeki enzimler aracılığıyla organik kirleticileri daha basit ve zararsız formlara parçalamasıdır. Bu metotta, bitkilerdeki metabolik işlevler ve toprak mikroorganizmaları arasındaki rizosferik birliktelikle organik kirleticiler parçalanmaktadır. Organik kirleticilerin fitodegradasyonu bitki içerisinde veya rizosferde gerçekleşebilmektedir.

- **Rizodegradasyon:** Kök bölgesindeki (rizosfer) mikroorganizmaların aktivitesi ile kirleticilerin parçalanmasıdır; bitki bu mikroorganizmalar için gerekli ortamı sağlar.

- Bitkiler tarafından metal iyonlarının alımı; metal iyonlarının kök yüzeyine tutunması, kök içine alımı, kütle akışı ve difüzyon aracılığıyla gövdeye translokasyonunu kapsamaktadır. Toprak partiküllerine bağlı halde bulunan metallerin alımı köklerden rizosfere salgılanan metal şelatlayıcı moleküller, plazma membranına bağlı metal redüktaz ve proton salımı ile sağlanmaktadır (Salt vd., 1995).

Bitkiler tarafından gerçekleştirilen fitoekstraksiyon süreci yalnızca ağır metallerin kirlenmiş ortamlardan uzaklaştırılmasını sağlamamakta, aynı zamanda metalce zengin bitkisel biyokütlenin ikincil bir hammadde olarak değerlendirilmesine de olanak tanımaktadır. Geleneksel uygulamalarda hasat edilen biyokütle çoğunlukla bertaraf edilmekte veya metal geri kazanımı amacıyla yakma gibi işlemlere tabi tutulmaktadır. Ancak son yıllarda geliştirilen sürdürülebilir yaklaşımlar, hiperakümülatör bitkilerde biriken metallerin asidik liç yöntemleriyle çözeltiye alınarak doğrudan metalik nanopartikül sentezinde metal kaynağı olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Bu yaklaşım, fitoremediasyon ile nanoteknolojiyi bir araya getirerek kirlenmiş biyokütlenin yüksek katma değerli nanomalzemelere dönüştürülmesini mümkün kılmakta ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda yenilikçi bir kaynak geri kazanım stratejisi sunmaktadır. Bu kapsamda, bir sonraki bölümde sulu bitki özütleri ve hiperakümülatör bitkilerden elde edilen metal içerikli asidik liç çözeltilerinin kullanımıyla gerçekleştirilen metalik nanopartikül sentez mekanizmaları ve bu alandaki güncel uygulamalar ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Bitki Kullanımı ile Metalik Nanopartikül Sentezi

Metalik nanopartiküller; kataliz, çevresel iyileştirme, biyomedikal uygulamalar, sensör teknolojileri ve enerji sistemleri gibi çok geniş bir kullanım alanına sahip olmaları nedeniyle günümüzde en yoğun araştırılan nanomalzemeler arasında yer almaktadır. Bu malzemelerin sentezinde elektrokimyasal yöntemler, hidrotermal sentez, mikroemülsiyon teknikleri, sonokimyasal yöntemler ve kimyasal indirgeme gibi çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Metalik nanopartiküller bu klasik sentez yöntemleri ile istenilen büyüklük ve morfolojide sentezlenebilmelerine rağmen bu yöntemlerin sahip oldukları tehlikeli kimyasal ve toksik madde kullanımı, zor ve masraflı saflaştırma gereksinimi, düşük dönüşüm, yüksek enerji gereksinimi gibi dezavantajları en aza indirebilmek

amacıyla biyosentez gibi basit, uygun fiyatlı ve zararlı madde içermeyen yöntemler araştırılmaya başlanmıştır.

Birçok alanda uygulama alanı bulan ve insan hayatını kolaylaştıran malzemeler içinde yer alan nanopartiküllerin, toksik etkisi olmayan biyosentez yöntemi ile sentezlenmesi önemlidir. Biyosentez yöntemi, atık ürünlerin problem haline gelmesini önlemekle birlikte insan sağlığına zararı olmayan, mayaların, alglerin, virüslerin, yeşil bitki özütlerinin ve birçok canlı organizmanın kullanımı ile gerçekleştirilen özellikle nanopartiküllerin sentezinde kullanılan bir yöntemdir. Nanopartiküllerin biyosentezi yöntemi, diğer sentez yöntemlerine göre kolay, ucuz ve hızlıdır. Doğada kolaylıkla ve bol miktarda bulunan bitkilerin nanopartikül sentezinde kullanılması nanoteknolojik malzemeler için ekonomik değer kazandırması nedeniyle bitkiler ve mikroorganizmalar biyosentez yönteminin kaynağı durumundadır.

Bitki özütlerinin metal iyonlarını indirgeme özellikleri 1900'lü yıllardan beri bilinmektedir. Son 30 yıldır kabul gören uygulama ise bitki dokusunun metal tuzlarını indirgeme özelliğine dayandırılmaktadır. Biyosentez yöntemi ile nanopartikül sentezinde, ortama konulan metal tuzu ile bitki özütünün birleşmesi sonucu, bitkilerdeki fenolik bileşenlerin metal tuzlarını indirgemesi sonucunda partiküller oluşur. Metal tuzlarının herhangi bir türü ile, genel organizmaların veya yeşil bitkilerin, az sayıda metallere karşı direnç geliştirdiği ve aynı organizmayı kullanarak birden fazla metalik nanopartikül sentezlenebilmesi, nanopartiküllerin sentezi için önemli bir etkendir.

Metalik nanopartiküllerin sentezinde bitki özütlerinin kullanımı ile ilgili iki farklı yaklaşım vardır:

Sulu bitki özütünün kullanımı: Metalik nanopartiküllerin klasik indirgeme yoluyla sentez yöntemlerinde, farklı indirgeyici

kimyasalların (sodyum borohidrit, sodyum sitrat, R-COH: glikoz, laktoz, maltoz ve etilen glikol) kullanımı ile metal tuzlarından indirgenme yoluyla partikül sentezlenirken; bu yaklaşımda, farklı indirgeyici kimyasallar yerine aynı görevi gören çoğunlukla polifenoller gibi biyoaktif bileşenleri içeren sulu bitki özütlerinin kullanımı ile metal tuzlarından indirgenme yoluyla partikül sentezlenmektedir. Biyosentez yöntemi ile nanopartikül sentezinde bitki özütleri, mantar, maya, alg, virüs v.b. canlı organizmaları kullanılmaktadır. Biyosentezde kullanılan diğer ajanlara göre, sulu bitki özütleri ile sentez yönteminin bitkilerin kolay elde edilebilmesi, kolay ve güvenli işlenebilmesi, sterilizasyona gerek duyulmaması gibi avantajları vardır. Bu nedenlerle bitki özütlerinin kullanıldığı biyosentez yöntemi; basit ve ekonomik olması, toksik madde kullanımı gerektirmemesi, farmakolojik ve biyomedikal uygulamalara uygun olması, geniş yelpazede ticari üretime elverişli olması gibi avantajlarından dolayı günümüzde sıkça kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Ülkemizin bitki çeşitliliği göz önüne alındığında başka amaçla kullanılmayan bitki yapraklarının/dallarının biyosentez yöntemi ile metalik nanopartikül sentezinde kullanılması ile çevre dostu olarak kullanılmayan bir kaynağın ekonomik değere dönüştürülmesi mümkündür.

Bitki özütleri kullanımı ile metalik nanopartikül sentezi süreci üç temel aşamadan oluşur (Deka vd., 2025):

Aktivasyon aşamasında, metal iyonları indirgenerek indirgenmiş metal atomları oluşur.

Gelişim aşamasında, küçük nanopartiküllerin yakın çevrede oluşumu gerçekleşir ve bu da daha büyük parçacıkların oluşmasına yol açar. Ostwald olgunlaşması, metal iyonlarının heterojen çekirdeklenme, genişleme ve ardından indirgenmeye uğradığı bir olgudur. Bu aşama aynı zamanda nanopartiküllerin termodinamik kararlılığının artmasına da neden olur.

Sürecin sonlanma aşaması, nanopartiküllerin nihai yapısını belirler.

Literatürde, metal nanopartiküllerinin yanı sıra metal oksit nanopartiküllerinin sentezinde de bitki özütlerinin etkin şekilde kullanılabildiği gösterilmiştir. Flavonoidler, terpenoidler, şekerler, ketonlar, aldehitler, karboksilik asitler ve amidler gibi fitokimyasal bileşikler, metal iyonlarının indirgenmesinde ve oluşan nanopartiküllerin stabilize edilmesinde temel rol oynamaktadır (Singh vd., 2018). Metal oksit nanopartiküllerinin oluşumunda ise çevreden veya fitokimyasal bileşiklerin oksidasyonu sonucunda sağlanan oksijen, indirgenmiş metal atomları ile reaksiyona girerek metal oksit çekirdeklerinin oluşmasını sağlar. Takiben fitokimyasal bileşenler nanopartikül yüzeyini kaplayarak topaklanmayı önlemekte ve parçacıkların kararlılığını artırmaktadır.

Sulu bitki özütlerinin metalik nanopartikül sentezinde indirgeyici ve stabilize edici ajan olarak kullanıldığı çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır. Araştırma grubumuz tarafından farklı bitki türleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar da bu alana önemli katkılar sağlamıştır. Bu kapsamda yürütülen çalışmalardan seçilmiş örnekler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Farklı bitki türlerinin sulu özütlerinin indirgeyici ajan olarak kullanıldığı metalik nanopartikül sentezi, karakterizasyonu ve kullanım alanları ile ilgili çalışmalarımızdan özet

Bitki sulu özütü	**Sentezlenen malzeme**	**Kullanım amacı**	**Kaynak**
Bauhinia variegata (orkide) yaprağı	Gümüş nanopartikül (AgNP)	Fe^{3+}'ün kolorimetrik tayini	(Uzunoğlu vd., 2024)
Citrus limon (Limon) yaprağı	Fe-Zn bimetalik nanopartikül (Fe-ZnNP)	Heterojen Fenton benzeri katalizör/ Reactive Red 2 giderimi	(Oruç vd., 2019)

Eriobotrya japonica yaprağı	Demir nanopartikül (FeNP)	Cr(VI) adsorpsiyon	(Önal vd., 2019)
Eriobotrya japonica yaprağı	Demir nanopartikül (FeNP)	Heterojen Fenton benzeri katalizör/ Basic Red 46 giderimi	(Önal vd., 2017)
Ulva spp.(alg)	Demir oksit nanopartikül (IO-NPs)	Heterojen Fenton benzeri katalizör/ Malachite green giderimi	(Ergüt vd., 2019)
Enteromorpha spp (alg)	Demir oksit nanopartikül (IO-NPs)	Cu (II) adsorpsiyon	(Ercan vd., 2019)
Persea americana (avokado) yaprağı	Gümüş nanopartikül (AgNP)	Antibakteriyel özelliklerinin belirlenmesi	(Arslantürk vd., 2019)
Kıbrıs akasyası *(Acacia cyanophylla)* yaprağı	Gümüş nanopartikül (AgNP)	Basic Red 46 adsorpsiyonu	(Taşkıran vd., 2017)
Kıbrıs akasyası *(Acacia cyanophylla)* yaprağı	Bakır oksit (CuO) nanopartikülleri	Telon Blue AGLF (TB AGLF) ve Metilen Mavisi (MB) adsorpsiyonu	(Çimen vd., 2019)
Myrtus communis (mersin/murt) yaprağı	$CaCO_3$ nanopartikül	Methylene Blue (MB)	(Uzunoğlu ve Özer, 2018)
Citrus limon (Limon) yaprağı	Pd-Fe_3O_4 bimetalik nanopartiküller (Pd-Fe_3O_4NP)	Yerinde H_2O_2 Üretimi ile Heterojen Fenton-benzeri Reaksiyonla Boyarmadde Degradasyonu	(Ergüt vd., 2022)
Persea americana (avokado) kabuğu/çekirdeği	Gümüş nanopartikül (AgNP)	Gümüş Nanopartiküllerle Yüklenmiş Aljinat Yara Örtüsü/Biyofilmi Hazırlanması	(Abdulbari vd., 2025)

Hiperakümülatör bitkilerin asidik liç çözeltilerinin kullanımı: Kendi doğal ortamında yetişen metal hiperakümülatör bitkilerin ve fitoremediasyonda kullanılan bitkilerin bünyelerinde biriktirdikleri ağır metallerin fitoekstraksiyon yöntemi ile geri kazanımı sonrası asidik liç çözeltisi içeriğinde bulunan metallerin, kimyasal çöktürme yönteminde kullanılan metal tuzları yerine kullanımı ile metalik nanopartikül sentezi mümkündür (Ünal, 2025; Uzunoğlu Doğruyol, 2022). Hiperakümülatör bitkiler, yalnızca ekolojik ve fizyolojik özellikleriyle değil, aynı zamanda ağır metallerle kirlenmiş toprakların fitoremediasyonunda ve mineralize alanlardan değerli metallerin geri kazanılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesindeki potansiyel uygulamaları ile de önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bitkisel biyokütle kullanımı ile gerçekleştirilen nanopartikül sentezi, bitkilerin bünyelerinde biriktirdikleri atık ağır metallerin geri dönüşümü ile nanopartiküllere dönüştürülmesi, sürdürülebilir bir süreç sağlar. Bünyesinde metal biriktirebilen hiperakümülatör bitkilerin dal/kök/yapraklarından liç yöntemi ile hazırlanan metal içerikli asidik çözeltinin, metalik nanopartikül sentezinde sentetik metal tuzu çözeltisi yerine kullanımı ile ilgili ilk çalışmalar araştırma grubumuz tarafından gerçekleştirilmiş olup; demir hiperakümülatör iki farklı tür bitkiden, *Pinus brutia* ve *C. sempervirens* bitkilerinin fitoekstraksiyonu sonrası metal içerikli liç çözeltisinin kullanımı ile demir içerikli nanopartiküllerin sentezi, karakterizasyonu ve kullanım alanlarının değerlendirilmesi ile ilgilidir (Ünal, 2025; Uzunoğlu Doğruyol, 2022).

İlk çalışmada, Mersin ili Musalı bölgesindeki kromit ($FeCr_2O_4$) damarı yakınlarından temin *Pinus brutia*'nın dal ve yapraklarından hazırlanan liç çözeltisi nanopartikül sentezinde demir iyonu kaynağı olarak, sodyum borohidrür ($NaBH_4$) ise indirgeyici ajan olarak kullanılmıştır. Bu koşullar altında kimyasal indirgeme yöntemiyle demir nanopartiküllerin biyosentezi ile eş

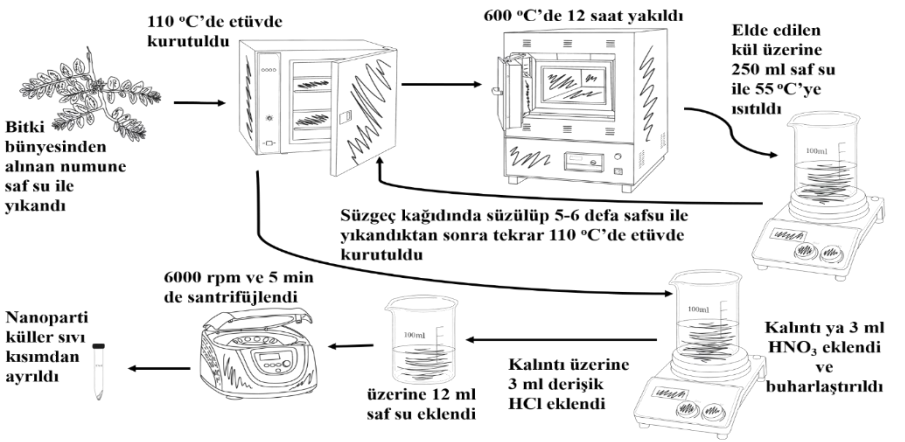
zamanlı hidrojen gazı üretimi gerçekleştirilmiştir (Uzunoğlu ve Özer, 2020). Diğer bir çalışma, H_2O_2'nin kolorimetrik tayini için peroksidaz benzeri bir katalizör işlevi gören demir bazlı nanopartiküllerin (FeNP) sentezinde, *P. brutia*'nın asidik liç çözeltisi kullanımı ile ilgilidir. Deneysel sonuçlar, FeNP'lerin güçlü bir doğal peroksidaz benzeri aktivite sergilediğini ve H_2O_2 varlığında kromojenik substrat 3,3′,5,5′-tetrametilbenzidin'in (TMB) oksidasyonunu verimli bir şekilde katalize edebildiğini göstermiştir (Uzunoğlu ve Özer, 2023). Ayrıca, demir hiperakümülatörü bitki kullanımı ile sentezlenen nanopartiküllerin (FeNP) antibakteriyel aktivite uygulamalarındaki ve kolorimetrik askorbik asit (AA) tespitindeki kullanımları da araştırılmıştır. Sentezlenen FeNP'lerin; *Listeria monocytogenes* ve *Staphylococcus aureus* gibi gram-pozitif bakterilere ve ayrıca *Escherichia coli*, *Salmonella enteritidis* ve *Salmonella typhimurium* gibi gram-negatif bakterilere karşı yüksek antibakteriyel etkinlik sergilediği gözlemlenmiştir (Uzunoğlu ve Özer, 2022).

C. sempervirens (Akdeniz servisi) bitkisi yalnızca morfolojik ve estetik özellikleri açısından değil, aynı zamanda ekolojik işlevselliği bakımından da büyük önem taşımaktadır. Başta ağır metaller olmak üzere özellikle çevresel kirleticilere karşı etkili bir biyofiltre işlevi görmektedir. Yapılan araştırmalar, bu türün çinko, mangan, bakır, kadmiyum ve demir gibi ağır metalleri absorbe ederek yaprak dokularında biriktirme yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu birikim genellikle yaşlı yapraklarda yoğunlaşmakta; böylece genç, aktif fotosentetik dokular ağır metallerin zararlı etkilerinden korunmaktadır. Bu fitostabilizasyon mekanizması, Akdeniz servisinin ağır metal kirliliğine maruz kalmış bölgelerde biyoremediasyon (biyolojik arıtım) amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir (Farahat ve Linderholm, 2015). Bu hipotezlerin doğruluğunu araştırmak, kullanılmayan bir kaynağın çevre dostu bir malzemeye dönüştürülmesini sağlamak amacı ile

demir-çelik endüstrisinin bulunduğu bir bölgede (Hatay-Payas), doğal olarak yetişen demir hiperakümülatörü olan Akdeniz servisi (*C.sempervirens*), H_2O_2 tespiti için demir esaslı nanozim benzeri nanopartiküllerin (FeNP) biyosentezinde kullanılmıştır (Ünal vd., 2026). Ağacın yaprak, dal ve köklerinde bulunan metalin bitkiden alınması ve nanopartikül sentezlenmesi için ekibimizce geliştirilen özgün yöntemi içeren deneysel sistem Şekil 2'de sunulmuştur.

Şekil 2. *Cupressus sempervirens (Akdeniz servisi) kullanımı ile nanopartikül biyosentezi (Bio-FeNPs) deneysel gösterimi*

Kaynak: (Ünal vd., 2026)



Araştırma grubumuz tarafından geliştirilen bu yöntemde, bitki bünyesinde biriken metalin geri kazanılması ile aynı biyokütleden yüksek katma değerli fonksiyonel nanopartiküller üretilmekte ve böylece sentetik metal tuzlarının kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır.

Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Sonuç olarak; bitki özütleri kullanılarak gerçekleştirilen metalik nanopartikül biyosentezi, çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir bir sentez yöntemi olarak son yıllarda önemli bir gelişim göstermiştir. Bitkilerde bulunan flavonoidler, fenolik

bileşikler, terpenoidler, şekerler ve diğer fitokimyasallar, metal iyonlarının indirgenmesi ve oluşan nanopartiküllerin stabilize edilmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu özellikleri sayesinde biyosentez yöntemi, toksik kimyasalların kullanımını azaltarak yeşil kimya ilkelerine uygun alternatif bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca bitki özütlerinin kolay temin edilebilmesi, düşük enerji gereksinimi, biyouyumlu ürünlerin elde edilmesine olanak sağlaması ve farklı metal sistemlerine uygulanabilirliği, bu yöntemin akademik çalışmaların yanı sıra endüstriyel uygulamalar açısından da önemini artırmaktadır.

Bunun yanında, fitoremediasyon amacıyla kullanılan hiperakümülatör bitkilerden fitoekstraksiyon sonrasında elde edilen metal içerikli asidik liç çözeltilerinin, sentetik metal tuzları yerine nanopartikül sentezinde kullanılması sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu yöntem, kirlenmiş alanlardan uzaklaştırılan metallerin yüksek katma değerli nanomalzemelere dönüştürülmesine olanak sağlayarak çevresel iyileştirme ile kaynak geri kazanımını aynı süreçte birleştirmektedir. Böylece fitoremediasyon süreci yalnızca kirlenmiş alanların temizlenmesine hizmet etmekle kalmamakta, aynı zamanda atık biyokütlenin katma değeri yüksek fonksiyonel nanomalzemelere dönüştürülmesine imkân sağlayan döngüsel ekonomi temelli bütünleşik bir yaklaşıma dönüşmektedir.

Çalışma grubumuz tarafından gerçekleştirilen araştırmalar, bu yaklaşımın demir esaslı nanopartiküllerin sentezi ve bunların çevresel, katalitik, antibakteriyel ve biyosensör uygulamalarında başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, hiperakümülatör bitkilerin yalnızca ağır metallerin uzaklaştırılmasında değil, aynı zamanda nanoteknoloji alanında kullanılabilecek fonksiyonel malzemelerin üretiminde de önemli bir biyolojik kaynak olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşımın farklı hiperakümülatör bitki türlerine,

farklı metal sistemlerine ve bimetalik veya çok bileşenli nanopartiküllerin sentezine uyarlanması ile uygulama alanlarının daha da genişleyeceği öngörülmektedir.

Bu nedenle hiperakümülatör bitkilerin nanopartikül biyosentezinde değerlendirilmesi, fitoremediasyon ve nanoteknolojiyi bütünleştiren gelecek vaat eden araştırma alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Gelecekte bu alanda yürütülecek çalışmaların; sentez mekanizmalarının daha ayrıntılı olarak aydınlatılmasına, üretim süreçlerinin ölçek büyütmeye uygun şekilde geliştirilmesine ve elde edilen nanomalzemelerin çevre, enerji, kataliz, biyomedikal ve sensör teknolojileri gibi farklı disiplinlerde kullanımının yaygınlaştırılmasına önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, hiperakümülatör bitkilerin çevresel iyileştirme süreçlerinden elde edilen biyokütlenin yüksek katma değerli nanomalzemelere dönüştürülmesi, sürdürülebilir nanoteknoloji ve kaynak geri kazanımı açısından geleceğin en umut verici araştırma alanlarından biri olmaya devam edecektir.

Kaynakça

Abdulbari, R., Doğruyol Uzunoğlu D., Özer, A. (2025). Preparation and Identification of Alginate Wound Dressing/Biofilm Loaded with Silver Nanoparticles Biosynthesized from Avocado (Persea americana) Waste. *9. International Ankara Multidisciplinary Studies Congress, Ankara*, *November 13-14*, 338–375. https://2dc40e33-085f-40e0-8172-9a1f898c1942.filesusr.com/ugd/614b1f_887f2748e2f64044b40d719bf350d386.pdf

Arslantürk, S., Uzunoğlu, D., Eser, E., Ekiz, H. İ., ve Özer, A. (2019). Green Synthesis of Silver Nanoparticles As an Antibacterial Agent: Optimization of Synthesis Conditions With Response Surface Methodology. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, *20*(4), 481–494. https://doi.org/10.18038/estubtda.529702

Aybar, M., Bilgin, A., ve Sağlam, B. (2015). Removing heavy metals from the soil with phytoremediation. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *1*(1-2), 59–65.

Berti, W. R., ve Cunningham, S. D. (2000). Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment. In *Phytostabilization of metals* (pp. 71–88).

Chaney, R. L., Marsh, P. B., Parr, J. F., ve Kla, J. M. (1983). Plant uptake of inorganic waste constituents. *Land Treatment of Hazardous Wastes*, 5076.

Çimen, B., Şengül, S., Ergüt, M., ve Özer, A. (2019). CuO Nanopartiküllerinin Yeşil Sentezi ve Karakterizasyonu: Telon Blue AGLF ve Metilen Mavisi Adsorpsiyonu. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *4*(1), 1–20. https://doi.org/10.33484/sinopfbd.315643

Deka, K., Nongbet, R. D., Das, K., Saikia, P., Kaur, S., Talukder, A., ve Thakuria, B. (2025). Understanding the mechanism underlying the green synthesis of metallic nanoparticles using plant extract(s) with special reference to Silver, Gold, Copper and Zinc oxide nanoparticles. *Hybrid Advances*, *9*(January), 100399. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100399

Dushenkov, S., ve Kapulnik, Y. (2000). Phytofiltration of metals. In I. Raskin ve B. D. Ensley (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals using plants to clean up the environment* (pp. 89–106). Wiley.

Edelstein, M., ve Ben-Hur, M. (2018). Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, *234*(February), 431–444. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.039

Ercan, G., Uzunoğlu, D., Ergüt, M., ve Özer, A. (2019). Biosynthesis and characterization of iron oxide nanoparticles from Enteromorpha spp. extract: determination of adsorbent properties for copper (II) ions. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, *03*(01), 65–74. www.dergipark.gov.tr

Ergüt, M. (2022). *Development Of Heterogenous Catalysis For Fenton-Like Reactions With In Situ H2O2 Synthesis*. Mersin University, Chemical Engineering Department, PhD Thesis.

Ergüt, M., Uzunoğlu, D., ve Özer, A. (2019). Efficient decolourization of malachite green with biosynthesized iron oxide nanoparticles loaded carbonated hydroxyapatite as a reusable heterogeneous Fenton-like catalyst. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, *54*(8). https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1596698

Esetlili, B. Ç., ve Anaç, D. (2015). *Ağır Metal Kirliliği ve Fitoremediasyon*. Apelasyon. http://apelasyon.com/Yazi/263-agir-metal-kirliligi-ve-fitoremediasyon

Farahat, E., ve Linderholm, H. W. (2015). The effect of long-term wastewater irrigation on accumulation and transfer of heavy metals in Cupressus sempervirens leaves and adjacent soils. Science of the Total Environment, 512, 1-7. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.032

Güneş, F., ve Bozkurt, S. (2021). Bazı Hiperakümülatör Bitkiler ve Özellikleri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, *14*(1), 67–90.

Keeran, N. S., Balasundaram, U., Govindan, G., ve Parida, A. K. (2019). Prosopis juliflora : A Potential Plant for Mining of Genes for Genetic Engineering to Enhance Phytoremediation of Metals. In *Transgenic Plant Technology for Remediation of Toxic Metals and Metalloids* (pp. 381–393).

Liu, Z., ve Tran, K. Q. (2021). A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *226*, 112821. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112821

Nedaee Ziabari, S. Z., Sedaghathoor, S., Kaviani, B., ve Baniasad, M. (2024). Phytoremediation ability of three succulent ornamental plants; cactus (Opuntia humifusa), kalanchoe (Kalanchoe blossfeldiana) and bryophyllum (Bryophyllum delagoensis) under heavy metals pollution. *Science of the Total Environment*, *947*(July), 174579. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174579

Önal, E. S., Yatkin, T., Ergüt, M., ve Özer, A. (2017). Green Synthesis of Iron Nanoparticles by Aqueous Extract of Eriobotrya japonica Leaves as a Heterogeneous Fenton-like Catalyst: Degradation of Basic Red 46. *International Journal of Chemical*

Engineering and Applications, *8*(5), 327–333. https://doi.org/10.18178/ijcea.2017.8.5.678

Önal, E. S., Yatkın, T., Aslanov, T., Ergüt, M., ve Özer, A. (2019). Biosynthesis and Characterization of Iron Nanoparticles for Effective Adsorption of Cr(VI). *International Journal of Chemical Engineering*.

Oruç, Z., Ergüt, M., Uzunoğlu, D., ve Özer, A. (2019). Green synthesis of biomass-derived activated carbon/Fe-Zn bimetallic nanoparticles from lemon (Citrus limon (L.) Burm. f.) wastes for heterogeneous Fenton-like decolorization of Reactive Red 2. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *7*(4). https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103231

Rascio, N., ve Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, *180*(2), 169–181. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016

Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Ensley, B. D., Chet, I., ve Raskin, I. (1995). Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, *13*, 468–475.

Singh, J., Dutta, T., Kim, K. H., Rawat, M., Samddar, P., ve Kumar, P. (2018). "Green" synthesis of metals and their oxide nanoparticles: Applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, *16*(1), 1–24. https://doi.org/10.1186/s12951-018-0408-4

Taşkıran, F., Uzunoğlu, D., ve Özer, A. (2017). Biosynthesis, Characterisation and Determination of Adsorbent Properties of Silver Nanoparticles With Cyprus Acacia (Acacia Cyanophylla) Leaf Extract. *Anadolu Unıversity Journal Of Scıence And*

Technology A - Applied Sciences and Engineering, 18(3), 733-745. https://doi.org/10.18038/aubtda.299006

Ünal, H. E. (2025). *Synthesis, Characterization And Research Of Application Fields Of Metallic Nanoparticles By Using Heavy Metal Accumulating Plants*. Mersin University, Chemical Engineering Department, PhD Thesis.

Ünal, H. E., Uzunoğlu Doğruyol, D., ve Özer, A. (2026). Turning biomass into nanozymes: iron-based nanoparticles from Cupressus sempervirens for enzyme-mimetic detection of H2O2. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 16, 216. https://doi.org/10.1007/s13399-026-07127-5

Uzunoğlu, D., Ergüt, M., Kodaman, C. G., ve Özer, A. (2024). Biosynthesized Silver Nanoparticles for Colorimetric Detection of Fe3+ Ions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(6), 7783-7794. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04760-8

Uzunoğlu, D., ve Özer, A. (2023). Colorimetric detection of H2O2by peroxidase-like catalyst iron-based nanoparticles synthesized by using hyperaccumulator plant-derived metal solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(1). https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109159

Uzunoğlu, D., ve Özer, A. (2018). Biosynthesis and characterization of CaCO3 nanoparticles from the leach solution and the aqueous extract of Myrtus communis plant. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, *2*(3), 245–253.

Uzunoğlu, D., ve Özer, A. (2020). Hydrogen gas production during the synthesis of the iron nanoparticles by using Pinus brutia, an accumulator plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(50), 26472–26489. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.217

Uzunoğlu, D., ve Özer, A. (2022). Facile Synthesis of Magnetic Iron-Based Nanoparticles from the Leach Solution of Hyperaccumulator Plant Pinus brutia for the Antibacterial Activity and Colorimetric Detection of Ascorbic Acid. *ACS Applied Bio Materials*, *5*(11), 5465–5476. https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00782

Uzunoğlu Doğruyol, D. (2022). *Synthesis, Characterization And Investigation Of Utilization Areas Of Metallic Nanoparticles With Heavy Metal Accumulator Plants*. Mersin University, Chemical Engineering Department, PhD Thesis.

BÖLÜM 3

İKİ BOYUTLU (2D) MALZEMELERİN YAPISI VE ÇOKLU ALANLARDA UYGULAMALARI

GAMZE GÜNDÜZ MERİÇ[1]
ADİFE ŞEYDA YARGIÇ[2]
ELİF YAMAN ÇAMLI[3]

Giriş

2D malzemeler; yüksek elektriksel iletkenliği, bol miktardaki yüzey fonksiyonel grupları, ayarlanabilir katmanlar arası mesafesi ve mükemmel elektrokimyasal aktivitesi sayesinde enerji depolama, algılama, kataliz, çevresel iyileştirme, biyotıp, elektromanyetik dalgalar ve esnek elektronik alanlarında muazzam bir potansiyel

[1] Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9487-4267. [2] Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8671-5896. [3] Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Alternatif Enerji Kaynakları Programı, Orcid: 0000-0002-1052-8779.

sergilemektedir. 2D malzeme araştırmalarındaki hızlı ilerlemeye rağmen; özellikle belirli uygulama gereksinimleri doğrultusundaki ters tasarım ilkeleri bağlamında, hazırlama yöntemleri, yapısal özellikler, nitelikler ve hedeflenen uygulamalar arasındaki temel ilişkilere dair sistematik bir analiz eksik kalmıştır. Bu çalışma, yapı, performans ve işlevin eşgüdüm içinde düzenlenmesine odaklanmaktadır. Çalışma öncelikle hazırlama yöntemlerinden yapısal özelliklere doğru bir ileri yönlü eşleme oluşturarak elektrokimyasal aktivite, iyon taşınımı ve mekanik esnekliği belirleyen yapı-aktivite ilişkilerini açıklamakta ve bunları uygulama gereksinimleriyle ilişkilendirmektedir. Ardından; uygulama gereksinimleri, performans hedefleri, yapısal özellikler ve hazırlama yöntemleri arasında bağlantı kuran bir ters tasarım çerçevesi önerilmektedir. Son olarak, 2D malzemelerin laboratuvar aşamasından endüstriyel kullanıma geçişini hızlandırmayı amaçlayan yapay zekâ destekli tasarım, büyük ölçekli yeşil sentez ve hetero yapı mühendisliği gibi gelecekteki yönelimler ana hatlarıyla ele alınmaktadır.

Artan enerji talepleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek daha fazla kullanılması (Solangi vd., 2023) nedeniyle, verimli ve sürdürülebilir enerji depolama teknolojileri büyük ilgi görmektedir. Kapasitörler (Duan vd., 2022), süperkapasitörler (Guo vd., 2025a; Zou vd., 2022) ve piller (Guo vd., 2026; Su vd., 2026) dahil olmak üzere enerji depolama cihazları, büyük ölçüde elektrot malzemelerinin performansına dayanmaktadır. Ancak, Pt, Ru ve Ir gibi geleneksel değerli metal elektrotlar; yüksek maliyet ve sınırlı ölçeklenebilirlik sorunlarıyla karşı karşıyadır (Luo vd., 2025); bu durum, yeni elektrot malzemelerine ve yenilikçi yöntemlere duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır (Danilovic vd., 2014; Garg vd., 2020; Guo vd., 2025b). Bu bağlamda, yüksek elektriksel iletkenlik ve mekanik kararlılık sergileyen grafen (Ares 2022; Jangra vd., 2024) ile birlikte, iki boyutlu (2D) malzemeler giderek artan bir ilgi

görmektedir. Geçiş metali dikalkojenürleri (TMD'ler) ve hekzagonal bor nitrür gibi diğer 2D malzemeler de kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu malzemelerle kıyaslandığında 2D malzemeler; hidrofiliklik, yapısal çeşitlilik ve enerji depolama mekanizmaları açısından belirgin avantajlar sunmaktadır (Nan vd., 2019).

İlk kez 2011 yılında Drexel Üniversitesi'nde Gogotsi ve arkadaşları (Naguib vd., 2011) tarafından tanımlanan iki boyutlu (2D) bir nanomalzeme olan 2D malzemeler, malzeme biliminde çığır açan bir gelişmeyi temsil etmektedir. 2D malzemeler; geçiş metali karbürleri, nitrürleri veya karbonitrürlerinden türetilen katmanlı bir malzeme ailesini ifade eder. Bileşimi genellikle $M_{n+1}X_nT_x$ şeklinde ifade edilir; burada M; Cr, Mo, Ta, Hf, Zr, Sc, Ti, Nb ve V gibi erken geçiş metallerini, X; karbon ve azotu, T_x ise -F, -O ve -OH gibi yüzey uç gruplarını temsil eder (Yuan vd., 2024). 2D malzemeler; olağanüstü mekanik dayanıklılık, mükemmel elektriksel iletkenlik, hidrofiliklik, bol miktarda yüzey grubu, yüksek özgül yüzey alanı ve araya madde yerleştirme (interkalasyon) kapasitesi sergilemesi sayesinde enerji depolama uygulamaları için son derece elverişlidir (Zhou vd., 2023; Xiao vd., 2024). Ayrıca 2D malzemeler; elektrokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlayacak şekilde grafen, metal-organik kafes yapıları (MOF'lar) (Ramachandran vd., 2026), karbon nanotüpler (Dong vd., 2026), geçiş metali oksitleri, geçiş metali disülfürleri, iletken polimerler vb. ile birleştirilebilir. Günümüzde araştırmacılar; hidroflorik asit ile aşındırma, ergimiş tuz ile aşındırma, kimyasal buhar biriktirme (CVD), elektrokimyasal aşındırma, kalıplama yöntemleri ve benzerleri dahil olmak üzere 2D malzeme sentezlemeye yönelik pek çok yöntemi araştırmışlardır.

Bu çalışma, öncelikle geleneksel florür içerikli aşındırma tekniklerinden yeni ortaya çıkan çevre dostu yaklaşımlara kadar çeşitli 2D malzeme sentez yöntemlerini ele almakta ve her birinin avantajlarını ve dezavantajlarını ayrıntılı olarak incelemektedir.

Ardından, 2D malzemelerin yapısal özellikleri ile çeşitli uygulama alanları arasındaki uyumluluk ilişkisi ortaya konularak; süperkapasitörler, bataryalar, sensörler, kataliz, çevresel iyileştirme, biyotıp, elektromanyetik dalgalar ve esnek elektronik alanlarında bu malzemeler ile ilgili en son gelişmeler değerlendirilmektedir.

2D Malzemelerin Sentez Yöntemleri

Umut vaat eden iki boyutlu (2D) geçiş metali azot/karbon bileşikleri sınıfı olan malzemeler için sentez yöntemlerinin geliştirilmesi, her zaman bu malzemelerin uygulama alanlarının ilerlemesinde temel bir itici güç olmuştur. Geleneksel olarak 2D malzeme sentezinde flor içeren aşındırıcı maddeler kullanılmıştır; bu yöntemler bu malzemeler üzerine yapılan temel araştırmalara zemin hazırlamış olsa da ciddi çevresel kirliliğe yol açmakta ve insan sağlığı açısından riskler oluşturmaktadır. Araştırmalar ilerledikçe yeni sentez yöntemleri ortaya çıkmaya devam etmekte; böylece flor içermeyen, yüksek verimli ve özellikleri hassas bir şekilde kontrol edilebilen 2D malzemelerin elde edilmesi giderek mümkün hale gelmektedir. Şekil 1, farklı hazırlama yöntemlerinin belirli yapısal özellikleri nasıl belirlediğini vurgulamaktadır.

Şekil 1. *2D malzeme sentez yöntemleri ve yapısal özelliklerin kontrolü*



Geleneksel sentez yöntemleri

2D malzemeler için geleneksel sentez yöntemlerinin temel mantığı, florür içeren reaktifler kullanılarak öncü MAX fazlarından (Ti_2AlN) "A" katmanının (çoğunlukla III A veya IV A grubu bileşenleri) seçici olarak uzaklaştırılmasıdır. Bu yöntemlerin uygulanması nispeten kolay ve kullanım alanları geniş olsa da florun yüksek aşındırıcılığı ve toksisitesi araştırmacılar için ciddi riskler oluşturmaktadır. HF ile dağlama, 2D malzeme sentezinde öncü bir yöntemdir. 2011 yılında Naguib ve arkadaşları, Ti_3AlC_2 MAX fazındaki Al katmanını oda sıcaklığında 2 saat boyunca seçici olarak dağlamak amacıyla aşındırıcı olarak %50'lik derişik HF kullanmış ve $Ti_3C_2T_x$'i başarıyla sentezlemişlerdir (Naguib vd., 2011). İlk aşamada Ti_3AlC_2, HF ile reaksiyona girerek Ti_3C_2, AlF_3 ve H_2 oluşturmaktadır. Ardından, yeni oluşan Ti_3C_2; H_2O ve HF ile etkileşime girerek $Ti_3C_2T_x$'i meydana getirmektedir. İlk raporlanmasından bu yana bu yöntem, Ti_2AlC, Ti_3AlCN ve Ta_4AlC_3 gibi birçok MAX fazının dağlanmasında yaygın olarak kullanılmış ve 2D malzeme sentezinde geniş çapta kendine yer bulmuştur (Naguib vd., 2012). Ancak HF'in toksisitesi ve aşındırıcılığı yüksektir; ayrıca şiddetli reaksiyon verme eğilimi, 2D malzemenin aşırı dağlanmasına yol açabilir. Araştırmacılar, HF'in doğrudan kullanımından kaynaklanan riskleri azaltmak amacıyla, florür tuzları ve diğer asitler aracılığıyla yerinde (in-situ) HF üretimine dayalı bir dağlama yöntemi geliştirmişlerdir.

Yeşil sentez yöntemleri

Geleneksel sentez yöntemleri yüksek enerji tükettiği, zehirli HF açığa çıkardığı ve zararlı atık oluşturduğu için, çevresel uyumluluk ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle, 2D malzemeler için çevreci, basit, verimli ve kontrol edilebilir sentez yöntemleri arayışı büyük önem taşımaktadır.

Alkali aşındırma yöntemi

Asit aşındırma yönteminin başarısı, doğal olarak MAX fazının dağlanmasında alkali kullanımının mümkün olup olmadığı sorusunu akla getirmiştir. Yapılan araştırmalar, Ti_3AlC_2'nin dağlanmasında güçlü alkalilerin veya organik alkalilerin kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Alkali dağlama işlemi, Al'nin amfoterik doğasından yararlanır; bu süreçte OH^- iyonları MAX fazındaki Al ile reaksiyona girerek çözünür $Al(OH)_4^-$ iyonlarını oluşturur ve böylece "A" katmanının uzaklaştırılması sağlanır. Alüminyum üretiminde kullanılan Bayer yöntemi, Li ve çalışma arkadaşlarına ilham kaynağı olmuş ve araştırmacılar Ti_3AlC_2'yi 270 °C sıcaklıkta ve 27,5 M NaOH çözeltisi kullanarak dağlamışlardır (Li vd., 2018). Ti_3C_2 iskeletinin korozyona uğramasını önlemek amacıyla hidrotermal sıcaklığı ve NaOH konsantrasyonunu kontrol altında tutarak, %92 saflıkta ve herhangi bir -F uç grubu içermeyen $Ti_3C_2T_x$ (T = -OH, -O) elde etmişlerdir. Elde edilen $Ti_3C_2T_x$ film elektrot (52 μm kalınlık, 1,63 g cm^{-3}), 1 M H_2SO_4 elektroliti içinde ve 2 mV s^{-1} tarama hızında, birim kütle başına 314 F g^{-1} değerinde özgül kapasitans sergilemiştir; bu performans, HF işlemiyle elde edilen çok katmanlı $Ti_3C_2T_x$'in kapasitesini (yaklaşık %214 oranında) aşmıştır. Bununla birlikte, yüksek alkali konsantrasyonu ve yüksek reaksiyon sıcaklığı nedeniyle deney belirli riskler taşımaktadır. Xuan ve çalışma arkadaşları, 2D malzeme sentezlemek için daha güvenli bir organik bazla dağlama yöntemi önermişlerdir (Xuan vd., 2016). Araştırmacılar, yüzey oksitlerini uzaklaştırmak amacıyla Ti_3AlC_2'ye düşük konsantrasyonlu HF ile ön işlem uygulamış, ardından dağlayıcı olarak tetrametilamonyum hidroksit (TMAOH) kullanarak $Al(OH)_4^-$ uç gruplarına sahip $Ti_3C_2T_x$ elde etmişlerdir. Komşu katmanlar arasındaki boşluğa yerleşen TMA^+ iyonu, katmanlar arası mesafenin genişlemesini sağlamaktadır. Yakın zamanda Kulkarni ve arkadaşları, 2D malzemelerini sentezlemek amacıyla MAX fazının düşük sıcaklık ve düşük

konsantrasyon koşullarında KOH kullanılarak hidrotermal yöntemle dağlandığı özgün bir "tek kap" (one-pot) yöntemi bildirmişlerdir (Kulkarni vd., 2024). Günümüzde, KOH kullanılarak 2D malzeme sentezleme süreci henüz başlangıç aşamasındadır ve elde edilen verim, florür bazlı kimyasal aşındırma yöntemlerindekine kıyasla hâlâ daha düşüktür. Ancak bu çalışma, hidrotermal sıcaklığın artırılmasıyla verimin önemli ölçüde artırılabileceğini ortaya koymuştur.

Elektrokimyasal aşındırma yöntemi

Elektrokimyasal aşındırma, bir elektrik alanı aracılığıyla "A" katmanının seçici olarak uzaklaştırılmasını hızlandırarak flor içermeyen senteze olanak tanır. 2017 yılında Sun ve diğerleri, 2D malzemelerin flor içermeyen bir çözelti içinde elektrokimyasal aşındırma yoluyla Ti_2AlC'den elde edilebileceğini ilk kez göstermiştir (Sun vd. 2017). 2018'de Yang ve çalışma arkadaşları, Ti_3AlC_2'nin hem katot hem de anot görevi gördüğü iki elektrotlu bir sistemde Ti_3AlC_2'yi aşındırmak için elektrolit olarak 0,2 M TMAOH ve 1,0 M NH_4Cl kullanmışlardır (Yang vd., 2018). Cl^- iyonlarının dahil olduğu yükseltgenme reaksiyonları sonucunda, geniş yanal boyutlara ve az sayıda katmandan oluşan yapılara sahip $Ti_3C_2(OH)_2$ elde edilmiştir. Daha sonra Shen ve diğerleri, metal safsızlıkları içermeyen florsuz $Ti_3C_2Cl_2$ hazırlamak için erimiş tuz destekli yeni bir elektrokimyasal aşındırma yöntemi geliştirmişlerdir (Shen vd., 2021). Yüzey sonlandırma grupları, çeşitli inorganik tuzlar kullanılarak -Cl'den -S ve/veya -O'ya dönüştürülebilir; bu da modifikasyon sürecini önemli ölçüde basitleştirir ve yüzey sonlandırma seçenekleri yelpazesini genişletir. Elektrokimyasal aşındırma yaklaşımı, elektrik alanının etkisi sayesinde 2D malzeme sentez sürecini hızlandırır ve flor içermeyen malzeme hazırlamak için ılımlı, çevre dostu ve etkili bir yöntemdir. Ayrıca, aşındırma ortamı oldukça güvenlidir ve elde edilen 2D malzeme filmi daha büyük yanal boyutlara sahiptir. Bununla birlikte, elektrolit bileşimi,

reaksiyon süresi ve aşındırma voltajı seçimi 2D malzemenin başarılı bir şekilde sentezlenmesinde kritik bir rol oynar; bu durum, yöntemin daha geniş çapta benimsenmesi önünde önemli zorluklar oluşturur ve 2D malzemelerin büyük ölçekli sentezine elverişli değildir. 2025 yılında Seena ve diğerleri, elektrolit tasarımı ve elektrokimyasal aşındırma sürecinin optimizasyonu konusunda önemli ilerlemeler kaydederek bu yöntemin büyük ölçekli uygulaması için yeni çözümler sunmuşlardır (Seena vd., 2025). Elektrolit olarak 1M KCl ve 0,3M KOH içeren karışık bir çözelti kullanmışlardır. Geleneksel elektrolitlerle karşılaştırıldığında, bu sistem daha düşük aşındırıcılığa ve daha düşük maliyete sahiptir. Aynı zamanda, çift elektrotlu bir sistemde elektrot (anot ve katot) olarak madeni para benzeri MAX fazı peletlerini yenilikçi bir şekilde kullanıp oda sıcaklığında 5V gerilim altında 4 saat boyunca işlemden geçirerek, %80'lik bir malzeme verimiyle homojen ve verimli bir aşındırma süreci elde etmişlerdir. Bu yenilikçi yöntem, büyük ölçekli ve çevre dostu 2D malzeme üretimi için yeni bir yol açmış ve ileri malzeme biliminde daha geniş kapsamlı uygulamalara zemin hazırlamıştır.

CVD yöntemi

CVD, gaz halindeki reaktanlar aracılığıyla alt tabakalar üzerinde doğrudan 2D malzemeyi büyüten ve MAX fazı öncüllerine dayanmayan, aşağıdan yukarıya bir sentez stratejisini temsil eder. Xu ve diğerleri, 2015 yılında ultra ince Mo_2C büyütmek için CVD sürecini ilk kez tanıtmışlardır (Xu vd., 2015). 1085 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, yanal boyutu 100 μm'yi aşan α-Mo_2C kristallerini doğrudan sentezlemek amacıyla, alt tabaka olarak Mo folyo üzerinde duran bir Cu folyo ve karbon kaynağı olarak CH_4 kullanmışlardır. İki yıl sonra Geng ve diğer araştırmacılar, CVD yöntemiyle üretilen Mo_2C'nin yanal boyutunu santimetre seviyesine kadar genişletmişlerdir (Geng vd., 2017). Bu süreçte karbon kaynağı olarak CH_4, indirgeyici ve taşıyıcı gaz olarak H_2 ve destekleyici Mo

folyo üzerindeki sıvı Cu ise katalizör olarak kullanılmıştır. Yüksek reaksiyon sıcaklığı, yüzeyde Mo ayrışmasının (segregasyonunun) gerçekleştiği bir Cu-Mo alaşımının oluşumunu tetiklemiştir. Açığa çıkan Mo, karbon öncülüyle daha fazla reaksiyona girerek Mo_2C kristallerini oluşturmuştur. Ayrıca, CH_4 akış hızı ayarlanarak kristal kalınlığı da kontrol edilebilmektedir. Elde edilen 2D malzeme, düşük kusur yoğunluğu ve büyük yanal boyutlar sergilemekte; bu da onu malzemenin kendine özgü özelliklerini incelemek açısından son derece elverişli kılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek üretim maliyetleri ve zorlu süreç gereklilikleri, yaygın pratik kullanımın önünde engeller oluşturmaktadır. Wang'in ekibi, 2D malzemelerin ölçeklenebilir ve atom ekonomisine dayalı sentezi için yenilikçi ve doğrudan bir sentez yöntemi ortaya koymuştur (Wang vd., 2023). 950 °C sıcaklıkta Ti yüzeyine $TiCl_4$ ve CH_4 gaz karışımı vererek, halı benzeri bir yapıya sahip Ti_2CCl_2 hazırlamışlardır. 2D malzeme halısının bükülmesi ve serbest kalmasıyla oluşan küre benzeri morfolojiler, daha fazla katalitik aktif bölgeyi açığa çıkararak mükemmel bir lityum iyon depolama kapasitesi sergilemektedir.

Diğer yeni sentez yöntemleri

Yukarıda ele alınan yöntemlerin yanı sıra, 2D malzemelerin aşındırılmasında kullanılan ve henüz tam olarak incelenmemiş bazı yeni aşındırma yöntemleri de mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları kısaca tanıtılmaktadır. Liang ve arkadaşları, Fe(III) iyonları ve sodyum oksalat içeren bir çözelti içinde foto-fenton reaksiyonunu kullanarak %95'e varan saflıkta flor içermeyen Ti_3C_2 elde etmiş ve bu malzemenin ileri teknoloji esnek Li-S piller için üstün nitelikler sergilediğini göstermişlerdir (Liang vd., 2022). An ve çalışma arkadaşları, MAX fazlarından düşük kaynama noktasına sahip Zn tabakasını uzaklaştırmak amacıyla fiziksel vakum damıtma yöntemini kullanarak -Cl ve -O grupları içeren 2D malzemeler hazırlamışlardır (An vd., 2023a). Bu, reaksiyonların tamamının vakumlu tüp fırın içerisinde gerçekleştiği, florür ve asit içermeyen

bir yöntemdir; dolayısıyla çevrenin kirlenmesini önler. Lazer darbe ablasyonu yöntemi, MAX fazının sıvı fazda lazer ablasyonu yoluyla 2D malzeme kuantum noktaları üretilmesini sağlar ve bu yöntem Nb_2AlC, Ti_2AlC, V_2AlC ve Ti_3AlC_2 MAX fazlarına uygulanabilir niteliktedir (Ramirez vd., 2023). Chen ve arkadaşları, çeşitli 2D malzemelerin hazırlanması amacıyla süperkritik CO_2 kullanan süperkritik bir aşındırma yöntemi önermişlerdir (Chen vd., 2023). Bu teknik kullanılarak üretilen $Ti_3C_2T_x$ tabanlı sodyum iyon hücresi, olağanüstü kulombik verimlilik ve kapasite sergilemiş; bu da ticari üretim açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. 2D malzeme üretiminde kullanılan her yöntemin kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Genel olarak 2D malzeme sentezi, geleneksel flor içeren aşındırma teknolojisinden; florür içermeyen, çevre dostu ve kontrol edilebilir yeni yöntemlere doğru bir evrim geçirmiştir. Gelecekteki çalışmalar, bu yeni yöntemlerin enerji tüketimi ve veriminin optimize edilmesine ve 2D malzemelerin laboratuvar ortamındaki araştırmalardan gerçek dünya uygulamalarına taşınarak sanayileşmesinin teşvik edilmesine odaklanmalıdır.

2D malzemelerin enerji depolama uygulamaları

Enerji depolama teknolojisi, yenilenebilir enerjinin geniş ölçekte kullanımına olanak tanıyarak enerji yapısı dönüşümünü ve sürdürülebilir kalkınmayı yönlendiren temel bir itici güç işlevi görmektedir. Son yıllarda, yeni nesil bir iki boyutlu (2D) malzemenin hazırlanma süreçlerinde sürekli yenilikler kaydedilmiş ve bu durum, malzemenin zengin yapısal özelliklerinin temelini oluşturmuştur. Bu özgün katmanlı yapı, 2D malzemeye nispeten yüksek bir özgül yüzey alanı, üstün mekanik dayanıklılık ve yüksek elektriksel iletkenlik kazandırmaktadır. 2D malzemenin iyon iletimini ve yük depolama davranışını etkin bir şekilde düzenlemesini sağlayan unsur, tam da hazırlama yöntemiyle belirlenen bu yapı-aktivite ilişkisidir. Sonuç olarak malzeme;

süperkapasitörler, lityum/sodyum/potasyum iyon piller, çinko iyon piller ve lityum-kükürt/sodyum-kükürt/çinko-iyot piller gibi çeşitli enerji depolama cihazlarında olağanüstü elektrokimyasal performans sergilemektedir. 2D malzemenin yapı-aktivite ilişkisine dair araştırmalar derinleştikçe ve hazırlama teknikleri olgunlaştıkça, malzemenin verimli ve sürdürülebilir enerji depolama alanındaki uygulama potansiyeli giderek daha umut verici bir hal almaktadır.

Süperkapasitörler

Ekonomik büyüme ve sanayileşme enerjiye olan talebi artırmış, bu da enerji depolama cihazlarına yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Süperkapasitörler; yüksek kapasiteleri, yüksek güç yoğunlukları ve üstün döngü kararlılıkları sayesinde dünyanın enerji ikilemine bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. 2D malzemeler; mükemmel iletkenlik, psödokapasitans ve hidrofiliklik özellikleri sayesinde, süperkapasitör uygulamalarında verimli elektrotlar için potansiyel bir malzeme niteliği taşımaktadır. Bununla birlikte; 2D malzemenin yüzey kimyası, kusurları, katman kalınlığı, makroskobik morfolojisi, özgül yüzey alanı ve diğer özellikleri daha iyi kontrol edilerek potansiyeli tam anlamıyla ortaya çıkarılabilir; böylece temiz enerji gelişimini ilerletmek ve enerji depolama maliyetlerini düşürmek adına yeni teknik yollar sunulabilir (Saju vd., 2025).

Lityum iyon piller (LIB)/Sodyum iyon piller (SIB)/Potasyum iyon piller (PIB)

2D malzemeler, kendine özgü yapısal özellikleri sayesinde LIB'lerin, SIB'lerin ve PIB'lerin enerji depolama performansını artırmada olağanüstü derecede etkili olan, oldukça umut verici bir 2D (iki boyutlu) nanomalzemedir (Yu vd., 2024). Ancak LIB'lerde, nano-yapraklarının üst üste istiflenmesi lityum iyonlarının aktif bölgelere erişimini kısıtlayabilir (Javed vd., 2024); SIB'lerde ise yüzey oksidasyonuna ve katmanlar arası yeniden istiflenmeye

yatkınlığı ile yavaş Na^+ difüzyonu, malzemenin enerji depolama alanındaki pratik uygulamasını sınırlar; benzer şekilde PIB'lerde de sıkı istiflenmesi aktif bölgeleri kapatır; buna ek olarak malzemenin doğası gereği düşük teorik potasyum depolama kapasitesi, ilave potasyum depolama bölgelerinin eksikliği ve K^+ girişi/çıkışı sırasında döngüsel süreçte yapısal çöküşe yatkınlığı sorun teşkil eder. Bu nedenle araştırmacılar, söz konusu zorlukların üstesinden gelmek için hem 2D malzemenin özgün yapısından hem de tasarlanmış modifikasyonlardan yararlanmaktadır.

Çinko iyon piller (ZIB) için 2D malzemeler

ZIB'ler; gelişmiş güvenlik, uygun maliyet ve çevre dostu olma gibi avantajlar sunan, gelişmekte olan bir güç kaynağı türünü temsil etmektedir. Pratik uygulamalarda ZIB'ler; aktif elektrot malzemelerinin yapısal olarak ayrışması, dar bir elektrokimyasal kararlılık aralığı, çinko dendrit oluşumu ve yetersiz çevrim ömrü gibi zorluklarla karşı karşıyadır (Han vd., 2026; Wang vd., 2026; Zhao vd., 2025). Bununla birlikte 2D malzeme; yüksek iletkenlik, ayarlanabilir katmanlar arası mesafe, düşük enerji bariyerleri, bol miktarda yüzey fonksiyonel grubu ve zengin bir kimyasal bileşim dahil olmak üzere benzersiz yapısal özelliklere ve fizikokimyasal niteliklere sahiptir. Araştırmacılar, 2D malzemenin yapısını hassas bir şekilde düzenleyerek ZIB'lerdeki söz konusu sorunları giderebilmektedirler (Wang vd., 2025; An vd., 2023b).

Lityum kükürt piller (LSB)/Na-S piller/Zn-I_2 piller

LSB'ler, sahip oldukları çok daha yüksek teorik enerji yoğunluğu nedeniyle büyük ilgi görmüştür; ancak polisülfitlerin mekik etkisi (shuttling effect) ve kükürdün düşük elektriksel iletkenliği, pratik uygulamalarını ciddi şekilde kısıtlamaktadır. LSB'lere benzer şekilde, oda sıcaklığında çalışan Na-S piller de kükürdün zayıf iletkenliği ve sodyum ile polisülfitlerin mekik hareketinden kaynaklanan yavaş reaksiyon kinetiği gibi sorunlarla

karşı karşıyadır; bu durum, söz konusu pillerin daha fazla geliştirilmesini sınırlandırmaktadır (Chen vd., 2013). Öte yandan Zn-I_2 piller, doğuştan gelen güvenlik özellikleri ve bol bulunan hammadde kaynakları nedeniyle önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Bununla birlikte, sulu ortamlarda çözünür poliiyot bileşiklerinin difüzyonu nedeniyle, çinko anot özellikle yüksek yükleme seviyelerinde zayıf arayüzey kararlılığı ve mekik etkileri sorunlarıyla karşılaşmakta; bu da cihazın kararlılığını ciddi şekilde etkilemektedir (Fu vd., 2026).

2D malzemelerin gelişmekte olan uygulama alanları

Günümüzde 2D malzemeler; kendine özgü katmanlı yapısı, bol miktardaki yüzey fonksiyonel grupları ve üstün özellikleri sayesinde sensörler, esnek elektronikler, kataliz, çevresel iyileştirme, biyotıp ve elektromanyetik dalgalar gibi gelişmekte olan araştırma alanlarında yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Süregelen derinlemesine çalışmalarla 2D malzemenin performansı sürekli iyileştirilmekte olup, gelişmekte olan uygulama alanlarındaki kullanımının daha da genişlemesi beklenmektedir.

Sensörler

Sensörler; tüketici elektroniği, insan-bilgisayar etkileşimi, artırılmış gerçeklik cihazları ve elektronik cilt (e-cilt) gibi alanlardaki geniş uygulama yelpazesiyle günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Elverişli fiziksel, elektriksel ve kimyasal özellikleri sayesinde 2D malzemeler, sensör hassasiyetini ve seçiciliğini artırmak amacıyla sensör teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2025). Son dönemde, basınç ve gaz sensörlerinde kullanımı büyük ilgi görmüş; araştırmacılar da 2D malzeme sensörlerinin algılama performansını çeşitli yollarla iyileştirmeye odaklanmışlardır.

Fotokataliz ve elektrokataliz

Enerji ve çevre, insanlığın varlığını sürdürmesi ve gelişimi açısından büyük önem taşımaktadır. Fosil yakıt kaynaklarının giderek azalması ve kirlilik sorununun kötüleşmesi nedeniyle, sürdürülebilir, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının araştırılması aciliyet arz etmektedir (Ighalo vd., 2024). Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve diğer çevre dostu yenilenebilir enerji kaynakları, enerji krizi ve çevresel zorlukların çözümünde kilit rol oynayan unsurlar olarak öne çıkmıştır. Bu bağlamda hem güneş enerjisine dayalı fotokataliz hem de elektrot sistemlerinden yararlanan elektrokataliz, küresel enerji taleplerini karşılama ve kirliliği azaltma konusunda etkili stratejiler sunmaktadır (Sreedhar vd., 2021). Enerji tüketiminin azaltılması ve çevre kirliliği sorunlarının çözüme kavuşturulmasında; yenilikçi, yüksek verimli ve çevreye zarar vermeyen katalizörlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Liao vd., 2025). Benzersiz optoelektronik özelliklere sahip bir iki boyutlu (2D) malzeme sınıfı, fotokatalitik ve elektrokatalitik reaksiyonlarda en iyi katalizör yardımcıları olarak kabul edilmektedir (Murali vd., 2022). Bunlar, fotokatalitik ve elektrokatalitik reaksiyonlarda kataliz süreci açısından çeşitli avantajlı özelliklere sahiptir.

Çevresel iyileştirme

Çağdaş küresel sanayileşme ve kentleşmenin yaygın süreciyle birlikte, giderek artan sayıda toksik ve tehlikeli madde sürekli olarak çevreye salınmakta ve birikmekte, ekolojik dengeyi ciddi şekilde bozmaktadır. Bunlar arasında, suda çözünebilen toksik kirleticilerden ve zararlı gazlardan kaynaklanan kirlilik, dünya çapında geniş ilgi çekmiştir. Bu nedenle, çevresel dekontaminasyon için kullanılan yüksek verimli malzemelerin geliştirilmesi önemlidir ve bu da önemli bir teknik zorluk teşkil etmektedir (Zhang vd., 2024). Yeni ortaya çıkan 2D malzemeler, atmosfer ve su iyileştirme

için mükemmel bir potansiyele sahiptir (Khosla vd., 2022). Bu, doğal katmanlı yapısına, kontrol edilebilir katmanlar arası mesafeye ve bol miktarda yüzey fonksiyonel grubuna atfedilir. Bu yapısal ve kimyasal özellikler, kirleticilerin taşınmasına ve yayılmasına elverişli kanallar sağlayabilir ve daha fazla adsorpsiyon ve reaktif bölgeyi ortaya çıkararak kirleticilerin yakalanmasını, ayrılmasını ve dönüştürülmesini kolaylaştırabilir.

Biyotıpta 2D malzemeler

2D malzemeleri; mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleri, kontrol edilebilir yüzey kimyası ve iyi biyouyumlulukları sayesinde biyotıp alanında benzersiz avantajlar sergilemiş; antibakteriyel tedavi, doku mühendisliği ve ilaç iletimi gibi alanlarda büyük ilgi görmüştür.

İlk olarak, antibakteriyel uygulamalar için yapısal gereklilikleri; bakteri ile malzeme arasında geniş bir temas alanı, bol miktarda yüzey aktif bölge ve bakteri zarı hasarına yol açabilecek 2D katmanlı bir yapıya sahip olmayı içerir. Bu bağlamda, mükemmel 2D morfolojisi ve ayarlanabilir yüzey kimyasal özellikleri, onun antibakteriyel alanda benzersiz avantajlar sergilemesini sağlar. Rasool ve arkadaşları, $Ti_3C_2T_x$ 2D malzemenin antibakteriyel özelliklerini sistematik olarak inceleyen ilk araştırmacılar olmuş ve eksfoliasyon (katman ayırma) sonrası elde edilen az katmanlı $Ti_3C_2T_x$ nano-yapraklarının, *Escherichia coli* ve *Bacillus subtilis* bakterilerinin büyümesini etkili bir şekilde baskılayabildiğini tespit etmişlerdir. Antibakteriyel etki, temel olarak 2D katmanlar ile bakteriler arasındaki doğrudan temastan kaynaklanmaktadır. İndirgenmiş $Ti_3C_2T_x$'in nano-ölçekli kalınlığı ve keskin kenarları sayesinde, katmanları bakteri yüzeyini adsorbe edip kaplayabilir; kenarların oluşturduğu "nano-bıçak" etkisi ise hücre zarı yapısını tahrip ederek hücre lizisine ve hücre içi maddelerin dışarı sızmasına yol açar. Aynı zamanda, $Ti_3C_2T_x$ yüzeyindeki

oksijen içeren fonksiyonel gruplar malzemeye iyi bir hidrofiliklik kazandırarak bakteri zarı ile etkileşimi teşvik eder ve böylece doğrudan temasla sağlanan sterilizasyon etkisini güçlendirir (Rasool vd., 2016). Daha sonra moleküler dinamik çalışmaları, katmanlarının lipid zarı üzerine adsorbe olduklarında fosfolipidlerde yerel faz geçişlerini tetikleyebildiğini; bunun sonucunda temas bölgesindeki fosfolipid moleküllerinin diziliminin daha sıkı hale geldiğini ve hareketlerinin yavaşladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, arayüzde zar kusurları oluşarak hücre içeriğinin sızma sürecini hızlandırmaktadır (Lee vd., 2021).

Ayrıca 2D malzemelerin yapısının ilaç iletimi uygulamalarındaki temel gereksinimler; ilaç yükleme kapasitesini artırmak için geniş bir özgül yüzey alanına sahip olma ihtiyacı ile aynı zamanda uyarıya duyarlı salım sağlamak amacıyla malzemenin mükemmel fototermal dönüşüm performansından ve kontrol edilebilir yüzey kimyasından yararlanma gerekliliğinde kendini göstermektedir. Bu nedenle, iki boyutlu (2D) katmanlı bir yapıya, zengin yüzey aktif bölgelere ve kontrol edilebilir yüzey kimyasal özelliklerine sahip olan 2D malzemeler, akıllı bir ilaç iletim platformu olarak daha uygundur. Deng ve arkadaşları, 2D malzemenin yüksek özgül yüzey alanı, iyi biyouyumluluğu ve kontrol edilebilir yüzey kimyasının; malzemenin uyarıya duyarlı bir antitümör ilaç taşıyıcısı olarak kullanılmasına, böylece ilaç yükleme ve uyarıya duyarlı salım işlemlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanıdığını belirtmişlerdir (Deng vd., 2025).

Sonuç

2D malzemenin çok sayıdaki uygulama alanı arasında süperkapasitörler; nispeten olgunlaşmış elektrot hazırlama süreçleri ve yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj-deşarj kapasitesi ile uzun çevrim ömrü gibi özellikleri sayesinde şu anda ticari açıdan en uygulanabilir seçenektir. Bu alandaki temel kısıtlamalar, geniş yüzey alanlı 2D

malzemenin membran elektrotlarının homojen bir şekilde üretilmesi süreci ve katmanlar arası istiflenmeden kaynaklanan sınırlı iyon taşınımı ile ilgilidir. Bunu elektromanyetik ekranlama uygulamaları takip etmektedir. Farklı uygulamaların olgunluk düzeyleri değişkenlik gösterse de 2D malzemeler laboratuvar ortamından endüstriyel üretime geçişte hâlâ benzer darboğazlarla karşılaşmaktadır. İlk olarak, büyük ölçekli üretimde engeller mevcuttur: Geleneksel HF (hidroflorik asit) ile aşındırma yöntemi tehlikeli ve çevreyi kirletici niteliktedir (Irawan vd., 2026); buna karşılık çevre dostu sentez yöntemleri ise düşük verim sorununa sahiptir (Raj vd., 2026). Yüksek saflıkta ve az kusurlu 2D malzemenin büyük ölçekte üretilmesi, aşırı yüksek maliyetler nedeniyle zorluğunu korumaktadır (Baek vd., 2026). İkinci olarak, kararlılık kritik bir öneme sahiptir; 2D malzeme hava, su veya yüksek sıcaklık ortamlarında kolayca oksitlenerek performans kaybına uğrar (Irawan vd., 2026). Ayrıca, nemli koşullarda nemi emip şişerek yapısal bütünlüğünü yitirebilir (Adhami vd., 2026). Üçüncü olarak, morfoloji bir zorluk teşkil eder; nano-yapraklar kolayca üst üste istiflenerek özgül yüzey alanını azaltırken, lifler ve filmler genellikle mekanik ve elektriksel özellikleri olumsuz etkileyen gözenek kusurları sergiler (Liang vd., 2026). Dördüncü husus ise arayüz mühendisliğidir. Polimerler veya diğer malzemelerle kompozit yapılar oluşturulduğunda, zayıf arayüz bağı tekrarlanan deformasyonlar altında ayrılmaya yol açar (Hussain vd., 2026). Elektrokimyasal cihazlarda ise zayıf katı-katı arayüz teması iyon taşınımını kısıtlayarak, etkili çok bileşenli sinerjiyi ve kararlılığı engeller (Tran vd., 2026). Gelecekte, 2D malzemenin büyük ölçekli üretiminde verim, tutarlılık ve maliyet sorunlarının çözümüne odaklanılmalıdır. Buna ek olarak, yapısal koruma ve arayüz mühendisliği yöntemleriyle 2D malzemenin uzun vadeli kararlılığı artırılmalı ve böylece laboratuvar ortamındaki bir malzemeden pratik bir ürüne dönüşümü kolaylaştırılmalıdır. Bu sayede 2D malzemeler; algılama teknolojileri, esnek elektronikler,

iletişim teknolojileri, kuantum teknolojileri, biyotıp, çevresel iyileştirme ve elektrikli araçlar gibi alanlarda geniş uygulama potansiyeli sergileyebilecektir.

Kaynakça

Adhami, A., Mozafari, M., & Soroush, M. (2026). MXene-based stimuli-responsive and autonomous intelligent materials. Commun. Mater., 7, 36. 10.1038/s43246-026-01074-4

An, Y., Tian, Y., Man, Q., Shen, H., Liu, C., Xiong, S., & Feng, J. (2023a). Fluorine- and acid-free strategy toward scalable fabrication of two-dimensional MXenes for sodium-ion batteries. Nano Lett., 23, 5217–5226. 10.1021/acs.nanolett.3c01201

An, Y., Xu, B., Tian, Y., Shen, H., Man, Q., Liu, X., Yang, Y., & Li, M. (2023b). Reversible Zn electrodeposition enabled by interfacial chemistry manipulation for high-energy anode-free Zn batteries. Mater. Today, 70, 93–103. 10.1016/j.mattod.2023.09.008

Ares, P. & Novoselov, K. S. (2022). Recent advances in graphene and other 2D materials. Nano Mater. Sci., 4, 3–9. 10.1016/j.nanoms.2021.05.002

Baek, S., Jung, B., Kim, S., Park, C. M., Jang, M., Jun, B.-M., & Yoon, Y. (2026). Removal of selected inorganic contaminants by MXene-based pressure-driven membranes in water: a review. Process Saf. Environ., 207, 108405. 10.1016/j.psep.2026.108405

Chen, N., Duan, Z., Cai, W., Wang, Y., Pu, B., Huang, H., Xie, Y., Tang, Q., Zhang, H., & Yang, W. (2023). Supercritical etching method for the large-scale manufacturing of MXenes. Nano Energy, 107, 108147. 10.1016/j.nanoen.2022.108147

Chen, S., Bao, P., & Wang, G. (2013). Synthesis of Fe2O3–CNT–graphene hybrid materials with an open three-dimensional nanostructure for high capacity lithium storage. Nano Energy, 2, 425–434. 10.1016/j.nanoen.2012.11.012

Danilovic, N., Subbaraman, R., Chang, K. C., Chang, S. H., Kang, Y., Snyder, J., Paulikas, A. P., Strmcnik, D., Kim, Y. T., Myers, D.,

Stamenkovic, V. R., & Markovic, N. M. (2014). Using surface segregation to design stable Ru-Ir oxides for the oxygen evolution reaction in acidic environments. Angew. Chem. Int. Ed., 53, 14016–14021. 10.1002/anie.201406455

Deng, P., Ling, Z., Fang, F., Ruan, J., Yang, C., Hu, R., Zhou, J., & Xiong, P. (2025). Stimuli-responsive MXene nanomaterials for advanced antitumor drug delivery systems. Int. J. Nanomed., 20, 13317–13332. 10.2147/IJN.S552112

Dong, M., Ke, H., Wang, F., Wang, K., Sun, G., Zheng, T., & Wang, X. (2026). High-strength, electrochemically efficient RuO2-MXene/CNTs hybrid fibres via nanostructure design for flexible electronics and energy storage. Mater. Des., 267, 116378. 10.1016/j.matdes.2026.116378

Duan, L., Han, K., & Xie, L. (2022). Capacitors with sand-particle interlayer. J. Energy Storage, 52, 105050. 10.1016/j.est.2022.105050

Fu, X., Pan, Y., Chen, Z., Li, F., Yang, Y., Chen, M., Tu, H., Qiu, T., Xing, Z., Rao, P., Kang, Z., Zhang, W., Shi, X., Shan, L., & Tian, X. (2026). An amino acid-based functional additive enables fast polyiodide conversion kinetics for durable Zn–I2 batteries. Energy Environ. Sci., 19, 1170–1179. 10.1039/d5ee06668a

Garg, R., Agarwal, A., & Agarwal, M. (2020). A review on MXene for energy storage application: effect of interlayer distance. Mater. Res. Express, 7, 022001. 10.1088/2053-1591/ab750d

Geng, D., Zhao, X., Chen, Z., Sun, W., Fu, W., Chen, J., Liu, W., Zhou, W., & Loh, K. P. (2017). Direct synthesis of large-area 2D Mo2C on in situ grown graphene. Adv. Mater., 29, 1700072. 10.1002/adma.201700072

Guo, H., Luo, H., Zhu, F., Li, S., Su, X., Chen, Z., Liu, A., Li, J., Zhou, W., Lu, M., Liu, T., Yang, Y., & Chao, D. (2026). Mechanical-

thermal decoupling engineering unlocks ultrastable dry thick iodine cathodes for ah-level zinc-based pouch batteries. Adv. Mater., 38, e73037. 10.1002/adma.73037

Guo, Q., Sun, C., Li, Y., Li, K., & Tai, X. (2025a). Novel poly(9-hydroxyfluorene)/NiO flowerlike microspheres with good energy storage performance for supercapacitor application. Polymer, 335, 128833. 10.1016/j.polymer.2025.128833

Guo, Q., Sun, C., Li, Y., Li, K., & Tai, X. (2025b). Recent advances of electrode materials applied in an electrochromic supercapacitor device. Molecules, 30, 182. 10.3390/molecules30010182

Han, M., Ding, Y., Lou, J., Wang, J., Yang, M., Shan, L., Qiu, C., Xing, Z., Zhao, Z., & Shi, X. (2026). Tailoring zinc-ion deep eutectic electrolytes through dual regulation of solvation shell volume and solvent polarity. Energy Environ. Sci., 19, 2045–2055. 10.1039/D6EE00073H

Hussain, I., Tamang, T. L., Islam, M. N., Wang, K., Singh, K., Baek, K. H., Xu, B., & Zhang, K. (2026). Stretchable MXenes for supercapacitors: a review. Chem. Rec., 26, e202500199. 10.1002/tcr.202500199

Ighalo, J. O., Smith, M. L., Mayyahi, A. A., & Amama, P. B. (2024). MXenes in photocatalytic NOx abatement: current innovations, opportunities, and challenges. Appl. Catal. B Environ. Energy, 358, 124352. 10.1016/j.apcatb.2024.124352

Irawan, F. H., Fahma, F., Suryanegara, L., & Syamsu, K. (2026). Green and antioxidant-functionalized MXenes: Progress, challenges, and applications. E3S Web Conf., 691, 02007. 10.1051/e3sconf/202669102007

Jangra, S., Kumar, B., Sharma, J., Sengupta, S., Das, S., Brajpuriya, R. K., Ohlan, A., Mishra, Y. K., & Goyat, M. S. (2024). A review on

overcoming challenges and pioneering advances: MXene-based materials for energy storage applications. J. Energy Storage, 101, 113810. 10.1016/j.est.2024.113810

Javed, M. S., Zhang, X., Ahmad, T., Usman, M., Shah, S. S. A., Ahmad, A., Hussain, I., Majeed, S., Khawar, M. R., Choi, D., Xia, C., Zoubi, W. Al, Assiri, M. A., Hassan, A. M., Ali, S., & Han, W. (2024). MXenes to MBenes: latest development and opportunities for energy storage devices. Mater. Today Off., 74, 121–148. 10.1016/j.mattod.2024.01.001

Khosla, A., Sonu, Awan, H. T. A., Singh, K., Gaurav, Walvekar, R., Zhao, Z., Kaushik, A., Khalid, M., & Chaudhary, V. (2022). Emergence of MXene and MXene–polymer hybrid membranes as future-environmental remediation strategies. Adv. Sci., 9, 2203527. 10.1002/advs.202203527

Kulkarni, M., Lalic, A., Balu, R., Zhang, H., Dutta, N. K., & Choudhury, N. Roy (2024). Hydrothermal synthesis of MXenes in alkali environment and development of MXene/PEDOT:PSS composite electrodes for supercapacitor applications. MRS Adv., 9, 1310–1317. 10.1557/s43580-024-00951-9

Lee, O.-S., Madjet, M. E., & Mahmoud, K. A. (2021). Antibacterial mechanism of multifunctional MXene nanosheets: domain formation and phase transition in lipid bilayer. Nano Lett., 21, 8510–8517. 10.1021/acs.nanolett.1c01986

Li, T., Yao, L., Liu, Q., Gu, J., Luo, R., Li, J., Yan, X., Wang, W., Liu, P., Chen, B., Zhang, W., Abbas, W., Naz, R., & Zhang, D. (2018). Fluorine-free synthesis of high-purity Ti3C2Tx (T=OH, O) via alkali treatment. Angew. Chem. Int. Ed., 57, 6115–6119. 10.1002/anie.201800887

Liang, C., Tai, F., Wang, Z., Zhou, T., & Cheng, Q. (2026). Defect-elimination strategies for fabricating high-strength and highly

conductive MXene fibers. Adv. Mater., 38, e14754. 10.1002/adma.202514754

Liang, L., Niu, L., Wu, T., Zhou, D., & Xiao, Z. (2022). Fluorine-free fabrication of MXene via photo-Fenton approach for advanced lithium–sulfur batteries. ACS Nano, 16, 7971–7981. 10.1021/acsnano.2c00779

Liao, D., Tian, G., Xiaoyu, F., Li, Z., Sun, Y., Chang, W., Li, Z., Li, L., Zeng, C., Wei, F., & Zhang, C. (2025). Toward an active site–performance relationship for oxide-supported single and few atoms. ACS Catal., 15, 8219–8229. 10.1021/acscatal.5c00981

Luo, H., Su, D., Yang, S., Li, Y., Shan, Z., Zheng, M., Hong, M., Liu, T., & Lu, M. (2025). Diversified battery recycling: advances in recovery techniques and value-added functional applications. Nano Energy, 139, 110973. 10.1016/j.nanoen.2025.110973

Murali, G., Modigunta, J. K. Reddy, Park, Y. H., Lee, J.-H., Rawal, J., Lee, S.-Y., In, I., & Park, S.-J. (2022). A review on MXene synthesis, stability, and photocatalytic applications. ACS Nano, 16, 13370–13429. 10.1021/acsnano.2c04750

Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., Hultman, L., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2011). Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti3AlC2. Adv. Mater., 23, 4248–4253. 10.1002/adma.201102306

Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., Presser, V., Lu, J., Hultman, L., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2012). Two-dimensional transition metal carbides. ACS Nano, 6, 1322–1331. 10.1021/nn204153h

Nan, J., Guo, X., Xiao, J., Li, X., Chen, W., Wu, W., Liu, H., Wang, Y., Wu, M., & Wang, G. (2019). Nanoengineering of 2D MXene-based materials for energy storage applications. Small, 17, 1902085. 10.1002/smll.201902085

Raj, K., Jhala, R., Sujai, S., Pattanayak, B., Singh, J., Kumar, P., Kaladhar, M., Singh, R., Bisht, Y., & Gautam, A. (2026). A comprehensive review on the MXene-based catalysts for hydrogen generation via water splitting processes. J. Mol. Struct., 1349, 143534. 10.1016/j.molstruc.2025.143534

Ramachandran, T., Raji, R. K., Subramanian, G., Kandhan, K., & Hamed, F. (2026). Synergistic MXene–MOF/COF hybrid electrodes for next-generation supercapacitors: global research trends, Interface engineering, and future perspectives. Microchem. J., 227, 118647. 10.1016/j.microc.2026.118647

Ramírez, R., Melillo, A., Osella, S., Asiri, A. M., Garcia, H., & Primo, A. (2023). Green, HF-free synthesis of MXene quantum dots and their photocatalytic activity for hydrogen evolution. Small Methods, 7, 2300063. 10.1002/smtd.202300063

Rasool, K., Helal, M., Ali, A., Ren, C. E., Gogotsi, Y., & Mahmoud, K. A. (2016). Antibacterial activity of Ti3C2Tx MXene. ACS Nano, 10, 3674–3684. 10.1021/acsnano.6b00181

Saju, D. M., Sapna, R., Deka, U., & Hareesh, K. (2025). MXene material for supercapacitor applications: a comprehensive review on properties, synthesis and machine learning for supercapacitance performance prediction. J. Power Sources, 647, 237302. 10.1016/j.jpowsour.2025.237302

Seena, S., Backiyaleela, S. Susanna Victoria, Sinthika, S., Anand, R., & Vasantha, V. S. (2025). An eco-friendly and cost-effective strategy for the synthesis of high-purity MXene. J. Phys. Chem. C, 129, 8228–8238. 10.1021/acs.jpcc.5c00235

Shen, M., Jiang, W., Liang, K., Zhao, S., Tang, R., Zhang, L., & Wang, J. Q. (2021). One-pot green process to synthesize MXene with controllable surface terminations using molten salts. Angew. Chem. Int. Ed., 60, 27013–27018. 10.1002/anie.202110640

Solangi, N. H., Karri, R. R., Mubarak, N. M., Mazari, S. A., & Azad, A. K. (2023). Emerging 2D MXenes as next-generation materials for energy storage applications. J. Energy Storage, 70, 108004. 10.1016/j.est.2023.108004

Sreedhar, A., Reddy, I. N., & Noh, J.-S. (2021). Photocatalytic and electrocatalytic reduction of CO2 and N2 by Ti3C2 MXene supported composites for a cleaner environment: a review. J. Clean. Prod., 328, 129647. 10.1016/j.jclepro.2021.129647

Su, X., Li, S., Chen, Z., Guo, H., Liu, Z., Wang, Y., Chen, D., Cheng, Z., Liu, T., & Luo, H. (2026). Steering Zn(ClO4)2 electrolyte: trifunctional polycationic artificial interphase for wide-temperature ah-level Zn-I2 pouch cells. Energy Storage Mater., 85, 104900. 10.1016/j.ensm.2026.104900

Sun, W., Shah, S. A., Chen, Y., Tan, Z., Gao, H., Habib, T., Radovic, M., & Green, M. J. (2017). Electrochemical etching of Ti2AlC to Ti2CTx (MXene) in low-concentration hydrochloric acid solution. J. Mater. Chem. A, 5, 21663–21668. 10.1039/C7TA05574A

Tran, M.-H., Linh, V. T. Thuy, Nhiem, L. T., Nguyen, P. K. Thinh, & Ta, Q. T. Hoai (2026). Recent advances in Ti3C2Tx MXene-based composites for electrocatalytic applications. Nanoscale Adv., 8, 1817–1835. 10.1039/d5na01003a

Wang, Y., Zhong, C., Li, C., Dong, Z., Wang, J., Guo, X., Su, Y., Jiang, J., Wu, C., Liu, H., Dou, S., & Yang, X. (2026). Alloying strategies for stable Zn anodes: mechanistic insights and design principles. ACS Nano, 20, 119–136. 10.1021/acsnano.5c18604

Wang, D., Zhou, C., Filatov, A. S., Cho, W., Lagunas, F., Wang, M., Vaikuntanathan, S., Liu, C., Klie, R. F., & Talapin, D. V. (2023). Direct synthesis and chemical vapor deposition of 2D carbide and nitride MXenes. Science, 379, 1242–1247. 10.1126/science.add9204

Wang, Y., Shi, Y., Yang, Y., Cheng, Z., Jia, H., Zhou, Y., & Li, L. (2025). Recent advances in MXene-based materials for zinc-ion batteries. FlatChem, 54, 100940. 10.1016/j.flatc.2025.100940

Xiao, Z., Xiao, X., Kong, L. B., Dong, H., Li, X., He, B., Ruan, S., Zhai, J., Zhou, K., Huang, Q., & Chu, L. (2024). Preparation of MXene-based hybrids and their application in neuromorphic devices. Int. J. Extrem. Manuf., 6, 022006. 10.1088/2631-7990/ad1573

Xu, C., Wang, L., Liu, Z., Chen, L., Guo, J., Kang, N., Ma, X.-L., Cheng, H.-M., & Ren, W. (2015). Large-area high-quality 2D ultrathin Mo2C superconducting crystals. Nat. Mater., 14, 1135–1141. 10.1038/nmat4374

Xuan, J., Wang, Z., Chen, Y., Liang, D., Cheng, L., Yang, X., Liu, Z., Ma, R., Sasaki, T., & Geng, F. (2016). Organic-base-driven intercalation and delamination for the production of functionalized titanium carbide nanosheets with superior photothermal therapeutic performance. Angew. Chem. Int. Ed., 55, 14569–14574. 10.1002/anie.201606643

Yang, S., Zhang, P., Wang, F., Ricciardulli, A. G., Lohe, M. R., Blom, P. W. M., & Feng, X. (2018). Fluoride-free synthesis of two-dimensional titanium carbide (MXene) using a binary aqueous system. Angew. Chem. Int. Ed., 57, 15491–15495. 10.1002/anie.201809662

Yu, J., Qu, D., Wang, X., Ma, J., Zheng, Y., Zhang, P., Zhao, X., Wang, Y., Li, P., & Zhang, J. (2024). A supercapacitor driven by MXene nanofluid gel electrolyte induced the synergistic high ionic migration rate and excellent mechanical properties. Adv. Funct. Mater., 35, 1–8. 10.1002/adfm.202414934

Yuan, H., Hua, J., Wei, W., Zhang, M., Hao, Y., & Chang, J. (2024). Progress and prospect of flexible MXene-based energy storage. Carbon Energy, 7, e639. 10.1002/cey2.639

Zhang, Y. & Wang, R. (2024). Heterointerface engineering of MXene: advanced applications in environmental remediation. Chemosphere, 364, 143054. 10.1016/j.chemosphere.2024.143054

Zhang, R., Jiao, S., Zheng, X., Liu, J., & Tang, K. (2025). MXene in sensor applications: types, progress and prospects. Mater. Today Commun., 46, 112608. 10.1016/j.mtcomm.2025.112608

Zhao, Z., Zhang, R., Li, Z., Sun, J., Zhou, X., Yan, Z., Li, L., & Chen, X. (2025). Emerging biomass functional materials for stable zinc anode. Energy Storage Mater., 81, 104521. 10.1016/j.ensm.2025.104521

Zhou, Y., Yin, L., Xiang, S., Yu, S., Johnson, H. M., Wang, S., Yin, J., Zhao, J., Luo, Y., & Chu, P. K. (2023). Unleashing the potential of MXene-based flexible materials for highperformance energy storage devices. Adv. Sci., 11, 2304874. 10.1002/advs.202304874

Zou, H., Deng, X., Zheng, L., Guo, Q., & Nie, G. (2022). Facile synthesis of novel poly(1Hbenzoindole)/ WO3 nanocomposites with enhanced energy storage capability and its application in high-performance supercapacitor. Electroanal. Chem., 923, 116812. 10.1016/j.jelechem.2022.116812


BİDGE