

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOTEKNOLOJİ ANA BİLİM DALI

YEŞİL SENTEZ YÖNTEMİYLE *Robinia pseudoacacia* L. MEYVE
EKSTRAKTLARINDAN ELDE EDİLEN DEMİR OKSİT
NANOPARTİKÜLLERİN KARAKTERİZASYONU VE SUDAN BOYA
GİDERİM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS

Semra DEMİR

MAYIS-2025
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

BİYOTEKNOLOJİ ANA BİLİM DALI

**YEŞİL SENTEZ YÖNTEMİYLE *Robinia pseudoacacia* L. MEYVE
EKSTRAKTLARINDAN ELDE EDİLEN DEMİR OKSİT
NANOPARTİKÜLLERİN KARAKTERİZASYONU VE SUDAN BOYA
GİDERİM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI**

**CHARACTERIZATION OF IRON OXIDE NANOPARTICLES OBTAINED
FROM *Robinia pseudoacacia* L. FRUIT EXTRACTS BY GREEN SYNTHESIS
METHOD AND INVESTIGATION OF DYE REMOVAL PERFORMANCES
FROM WATER**

YÜKSEK LİSANS

Semra DEMİR

**MAYIS-2025
GÜMÜŞHANE**



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

BİYOTEKNOLOJİ ANA BİLİM DALI

**YEŞİL SENTEZ YÖNTEMİYLE *Robinia pseudoacacia* L. MEYVE
EKSTRAKTLARINDAN ELDE EDİLEN DEMİR OKSİT
NANOPARTİKÜLLERİN KARAKTERİZASYONU VE SUDAN BOYA
GİDERİM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI**

**CHARACTERIZATION OF IRON OXIDE NANOPARTICLES OBTAINED
FROM *Robinia pseudoacacia* L. FRUIT EXTRACTS BY GREEN SYNTHESIS
METHOD AND INVESTIGATION OF DYE REMOVAL PERFORMANCES
FROM WATER**

YÜKSEK LİSANS

Semra DEMİR

Danışman: Dr. Öğr.Üyesi Bülent AKAR

**MAYIS-2025
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Yeşil Sentez Yöntemiyle Robinia pseudoacacia L. Meyve Ekstraktlarından Elde Edilen Demir Oksit Nanopartiküllerin Karakterizasyonu ve Sudan Boya Giderim Performanslarının Araştırılması**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

30/05/2025

.....
Semra DEMİR

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Biyoteknoloji Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteğini ve değerli vaktini esirgemeyen, tez çalışmamın seçimi, planlanması ve uygulanması sürecinde beni yönlendiren, yol gösteren, bilgi, birikim ve deneyimlerini benimle paylaşan, çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren saygı değer hocam, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bülent AKAR' a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca deneysel çalışmalarımda değerli yardımlarını esirgemeyen ve katkı sağlayan sayın Prof. Dr. Cemalettin BALTACI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi her zaman yanımda olan desteğini her zaman bana hissettiren motive kaynağım sevgili eşim Sinan DEMİR'e, tüm aşamalarda varlıklarını hissettiğim ve hayatları boyunca benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan annem Firdevs ALP ve babam Ahmet ALP'e ve varlığı ile bana güç veren canım kızım Beren DEMİR'e sonsuz teşekkür ederim.

Semra DEMİR
GÜMÜŞHANE – 2025

ÖZET

Biyoremediasyon, çeşitli organizmalar kullanılarak çevresel kirleticilerin zararsız bileşenlere dönüştürülmesini amaçlayan sürdürülebilir bir yöntemdir. Son yıllarda, yeşil sentezle üretilmiş nanopartiküller biyoremediasyon uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Fiziksel ve kimyasal sentez yöntemlerine çevre dostu bir alternatif olan yeşil sentez, biyolojik materyaller kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle sentezlenen nanopartiküller, toksik kimyasallar yerine tamamen biyolojik kökenli doğal bileşenlerden oluşur. Bu çalışmada, Türkiye’de ağaçlandırma ve peyzaj uygulamalarında yaygın olarak kullanılan *Robinia pseudoacacia* L. bitkisinin ekonomik değeri olmayan meyveleri kullanılarak demir oksit (Fe_3O_4) nanopartikülleri yeşil sentez yöntemiyle üretilmiş ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Nanopartiküllerin yapısal, fonksiyonel ve optik özellikleri; UV-Vis spektrofotometresi, geçirimli elektron mikroskobu/enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (TEM/EDX), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve X-ışını kırınımı (XRD) teknikleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, sentezlenen Fe_3O_4 nanopartiküllerinin 10 nm’den küçük, amorf yapıda olduğunu göstermektedir. Ayrıca, meyve ekstraktı ve bu ekstraktan elde edilen demir oksit nanopartiküllerinin, sulu çözeltilerden organik boyar maddeler olan metilen mavisi (MM), fenol kırmızısı (FR) ve malaşit yeşili (MY) giderimindeki etkinlikleri araştırılmıştır. En yüksek boya adsorpsiyon kapasitesi MM çözeltisinde elde edilmiş; düşük ve orta başlangıç konsantrasyonlarında %97’nin üzerinde giderim oranları ve düşük dozlarda yüksek adsorplanmış madde miktarı (Q_e) değerleri gözlemlenmiştir. FR, üç boya arasında en düşük adsorpsiyon kapasitesine sahipken, MY için %99’a kadar ulaşan yüksek giderim oranları kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular, *Robinia pseudoacacia* meyvelerinden yeşil sentezle elde edilen Fe_3O_4 nanopartiküllerinin çevresel kirleticilerin uzaklaştırılmasında potansiyel bir adsorban olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Robinia pseudoacacia, Meyve, Demir oksit nanopartikül, Yeşil sentez, Boya adsorpsiyonu

SUMMARY

Bioremediation is a sustainable method that aims to convert environmental pollutants into harmless components using various organisms. In recent years, nanoparticles synthesized through green methods have been widely employed in bioremediation applications. As an environmentally friendly alternative to physical and chemical synthesis methods, green synthesis is carried out using biological materials. Nanoparticles synthesized through this method consist entirely of biologically derived natural components, instead of toxic chemicals. In this study, iron oxide (Fe_3O_4) nanoparticles were green-synthesized from the non-economic fruits of *Robinia pseudoacacia* L., widely used in afforestation and landscaping in Türkiye, and subsequently characterized. The structural, functional, and optical properties of the nanoparticles were analyzed using UV-Vis spectrophotometry, transmission electron microscopy/energy-dispersive X-ray spectroscopy (TEM/EDX), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD) techniques. The obtained data indicate that the synthesized Fe_3O_4 nanoparticles are less than 10 nm in size and have an amorphous structure. The effectiveness of the fruit extract and its derived Fe_3O_4 nanoparticles in removing methylene blue (MM), phenol red (FR), and malachite green (MY) from aqueous solutions was also evaluated. The highest dye adsorption capacity was obtained in the MM solution; over 97% removal efficiency and high adsorbed amount (Q_e) values at low and moderate initial concentrations were observed. Among the three dyes, FR exhibited the lowest adsorption capacity, while high removal rates up to 99% were recorded for MY. The findings indicate that green-synthesized Fe_3O_4 nanoparticles from *Robinia pseudoacacia* fruits are promising adsorbents for environmental pollutant removal.

Keywords: Robinia pseudoacacia, Fruit, Iron oxide nanoparticles, Green synthesis, Dye adsorption

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. <i>Robinia pseudoacacia</i> Türünün Sistematığı ve Taksonomik Özellikleri	3
1.3. <i>Robinia pseudoacacia</i> 'nın Doğal Yayılış ve Ekolojisi	4
1.4. Nanoteknoloji.....	5
1.4.1. Nanopartiküller.....	6
1.4.1.1. Nanopartikül Tipleri.....	7
1.4.1.1.1 Karbon Bazlı Nanopartiküller.....	7
1.4.1.1.2 Seramik Nanopartiküller	8
1.4.1.1.3 Yarı İletken Nanopartiküller	8
1.4.1.1.4 Polimer Nanopartiküller	9
1.4.1.1.5 Lipid Nanopartiküller	9
1.4.1.1.6 Metal Nanopartiküller	10
1.4.1.2. Nanopartikül Sentez Yöntemleri	10
1.4.1.2.1 Fiziksel Yöntem	11
1.4.1.2.2 Kimyasal Yöntem	11
1.4.1.2.3 Biyolojik Yöntem	12
1.4.1.3. Nanopartiküllerin Kirleticilerin Gideriminde Kullanımları.....	13
1.5. Çalışmanın Amacı.....	13
2. MATERYAL VE YÖNTEM	14
2.1. Meyvelerin Temini	14
2.2. Meyve Ekstraktlarının Hazırlanması.....	14
2.3. Demir Nano Partiküllerin (FeONP) Sentezlenmesi	15

2.4. Demir Nanopartikülleri Karakterizasyonu.....	16
2.4.1. UV-Vis Görüntüleme	16
2.4.2. Fourier-Transform İnfrared (FT-IR) Spektrofotometre Analizi	16
2.4.3. Geçirimli Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Analizi	17
2.4.4. X-Işınları Kırınım Kristalografisi (XRD) Analizleri	17
2.5. Boyaların Adsorpsiyonu	17
2.2. Adsorpsiyon Hesaplamaları	19
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	21
3.1. Demir Oksit Nanopartiküllerin Karakterizasyonu.....	21
3.1.1. UV-Vis Spektroskopisi ile FeONP Sentezinin Değerlendirilmesi.....	21
3.1.2. Fourier-Transform İnfrared (FT-IR) Spektrofotometre Analizi	22
3.1.3. FeONP'lerin TEM ve EDX Analizleri.....	24
3.1.3. FeONP'lerin XRD Analizleri.....	28
3.2. Boya Adsorpsiyon Çalışmaları	30
3.2.1. FeONP ve FeONP Sentezinde Kullanılan Toz Meyve Materyalinin Metilen Mavisi (MM) Adsorpsiyon Kapasitesinin Değerlendirilmesi	30
3.2.2. FeONP ve FeONP Sentezinde Kullanılan Toz Meyve Materyalinin Malaşit Yeşili (MY) Adsorpsiyon Kapasitesinin Değerlendirilmesi	36
3.2.3. FeONP ve FeONP Sentezinde Kullanılan Toz Meyve Materyalinin Fenol Kırmızısı (FR) Adsorpsiyon Kapasitesinin Değerlendirilmesi	41
4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME	49
KAYNAKÇA	51
ÖZGEÇMİŞ	64

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. FeNP'lerin EDX analiz sonuçları	26
Tablo 2. Farklı konsantrasyonlardaki FeONP' lerin MM adsorplama oranı	31
Tablo 3. Farklı konsantrasyonlardaki <i>Robinia pseudoacacia</i> meyvesinin toz materyalinin MM adsorplama oranı	34
Tablo 4. Farklı konsantrasyonlardaki FeONP' lerin MY adsorplama oranı.....	37
Tablo 5. Farklı konsantrasyonlardaki <i>Robinia pseudoacacia</i> meyvesinin toz materyalinin MY adsorplama oranı	40
Tablo 6. Farklı konsantrasyonlardaki FeONP'lerin FR adsorplama oranı.....	42
Tablo 7. Farklı konsantrasyonlardaki <i>Robinia pseudocacia</i> meyvesinin toz materyalinin FR adsorplama oranı.	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. <i>Robinia pseudoacacia</i> bitkisinin genel görünümü	4
Şekil 2. <i>Robinia pseudoacacia</i> türünün Türkiye’ deki doğallaşmış dağılımı (Tübives, 2024).....	5
Şekil 3. <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Meyve örnekleri.....	14
Şekil 4. Blenderden geçirilerek toz haline getirilmiş <i>Robinia pseudoacacia</i> L. meyve örnekleri	15
Şekil 5. a. FeONP çözeltisi, b. sentezlenen FeONP’ler	16
Şekil 6. Metilen mavisi kalibrasyon grafiği (a) ve verdiği maksimum absorbanı (b)	18
Şekil 7. Malaşit yeşili kalibrasyon grafiği (a) ve verdiği maksimum absorbanı (b).....	19
Şekil 8. Fenol kırmızısı kalibrasyon grafiği (a) ve verdiği maksimum absorbanı (b)	19
Şekil 9. FeONP biyosentezi sırasında UV-Vis adsorban değerlerinin zamanla değişimi: Reaksiyon başlangıcı ve sonu karşılaştırması.....	21
Şekil 10. Ekstraktın (a) ve demir nanopartikülün (b) FT-IR spektrumları.....	23
Şekil 11. FeONP’lerin Geçirimli Elektron Mikroskop (TEM) görüntüleri	25
Şekil 12. FeONP’lerin EDX analizleri.....	26
Şekil 13. Fe_3O_4 JCPDS Kart No: 19-0629'a ait XRD pik konumları ve yoğunlukları	28
Şekil 14. FeNP'lere ait XRD deseni	29
Şekil 15. 1000 mg/L sulu çözeltide MM’ nin FEONP ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi	33
Şekil 16. 1000 mg/L sulu çözeltide MM’sinin <i>Robinia pseudocacia</i> meyvesinin toz materyali ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi	35
Şekil 17. 250 mg/L sulu çözeltide MY’ sinin FeONP ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi	38
Şekil 18. 250 mg/L sulu çözeltide MY’sinin <i>Robina pseudoacacia</i> meyvesinin toz materyali ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi	41
Şekil 19. 250 mg/L sulu çözeltide FR’sinin FeONP ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi	43
Şekil 20. 250 mg/L sulu çözeltide FR ‘ sinin <i>Robinia pseudoacacia</i> meyvesinin toz materyali ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi	46
Şekil 21. Çalışmada kullanılan maddelerin molekül şekilleri.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μL	: Mikrolitre
Ads	: Adsorpsiyon
dk	: Dakika
EDX	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy- Dispersive X-Ray Spectroscopy)
Fe_3O_4	: Demiroksit
Fe-NP	:Demir Nanopartikül
FeONP	: Demiroksit Nanopartikül
FR	: Fenol Kırmızısı
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared)
g	: Gram
L	: Litre
mg/L	: miligram/Litre
mL	: Mililitre
MM .	: Metilen Mavisi
MY	: Malaşit Yeşili
NaOH	: Sodyum Hidroksit
nm	: Nanometre
NP	: Nanopartikül
$^{\circ}\text{C}$	: Celcius Derece
RNA	: Ribo Nükleik Asit
rpm	: Dakika Devir Sayısı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	: Geçirimli Elektron mikroskobu
UV	: Ultraviyole
UV-Vis	: Görünür Spektrofotometresi
XRD	: X-Işınları Kırınım Kristalografisi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Çevre kirliliğinin önlenmesi açısından çevre ve doğal kaynakların atıklara karşı korunması ve gerekli önlemlerin alınmış olunması oldukça önemlidir. Bununla birlikte, kirlenmeye maruz kalmış ortamlardan kirleticiler giderimi de çevre kirliliğinin çözüme kavuşturulmasında büyük önem taşımaktadır. Çoğunlukla insansal aktiviteler neticesinde oluşan kirleticiler, hava, toprak ve suya karışarak buralarda birikme yaparlar. Bunun neticesinde bu kirleticiler organizmalar üzerinde stres oluşturarak ortamın biyoçeşitliliğinde azalmalara, toprak verimliliğinde düşüslere ve buna bağlı olarak ürün kayıplarına, hatta besin zinciri yoluyla kirlilikle direkt ilişkisi olmayan diğer organizmalarda ve insanlarda sağlık problemlerine yol açmaktadırlar (Alengebawy vd., 2021).

Çevre kirliliğinin artması, çevresel kirlilik kaynaklarının bulundukları ortamdan giderimlerini sağlamak için uygun yöntemlerin geliştirilmesi yönündeki çalışmaların yapılmasını zorunlu kılmıştır. Çevresel kirlilik kaynaklarının ortamdan organizmalar vasıtasıyla uzaklaştırılması biyoremediasyon olarak adlandırılmıştır. Temel olarak bu teknolojiye kirliliğin giderimi hedeflenmiştir (Kumar vd., 2011). Çevre kirliliğini azaltmada gelecek vadede biyoremediasyon, kirleticilerin dönüştürülmesinde ve ortamdan uzaklaştırılmasında organizmalardan yararlanılan bir uygulamadır (Vural vd., 2018). Temelde iki biyoremediasyon metodu vardır. Bu metotlar atıkların taşınma yolu ile uzaklaştırılması ya da ortamdan kaldırılması temeline dayanır. Bunlar; yerinde (in-situ) ve yerinde olmayan (ex-situ) biyoremediasyonlardır. Kirlenmiş toprağı eski haline getirmek için kullanılan iki yöntemdir. İşlem için gereken süre, kazılan toprağın özel araçlarla taşınmasına veya yerinde işlenmesine bağlıdır. Tipik olarak, doğal toprak ortamında gerçekleşmeyen yerinde olmayan iyileştirme teknikleri, yerinde yaklaşımlarından daha hızlı ve daha etkilidir (Dindar vd., 2010). İnsan aktiviteleri sonucunda kirlenmiş toprak, hava ve sudan kirleticilerin bitkiler kullanılarak uzaklaştırılması olarak tanımlanan fitoremediasyon, biyoremediasyonun bir türüdür. Fitoremediasyon, toprakta, tortuda, yeraltı suyunda, yüzey suyunda ve hatta atmosferdeki kimyasal kirleticileri uzaklaştırmak, parçalamak veya biriktirmek için bitkileri ve bunlarla ilişkili rizosferik mikroorganizmaları kullanma yöntemidir (Acar ve Yüksel,

2023). Bitkiler çoğu kirleticilerin çevreden uzaklaştırılmasında kullanılabilir. Bunlar, petrol hidrokarbonları, pestisitler, metaller, radyonüklidler ve patlayıcılar olabilir (Kösesakal, 2011). Günümüzde çevre kirliliğini önlenmesi ya da azaltılması için çok sayıda araştırılmasına yönelik çalışmalar yapılmakta ve bu çalışmalar yeni yöntemler ile desteklenmektedir. Son zamanlarda bu uygulamalar içerisinde çevre kirliliğinin gideriminde nanoteknoloji yaygın olarak kullanılmaktadır (Beni ve Jabbari, 2022). Esasında uzun yıllardır bilinen ve uygulanan metotlar olan nanopartiküllerin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle sentezlenmesi geleneksel yöntemler olarak adlandırılmaktadır (Mutaf vd., 2023). Araştırmacılar, son yıllarda daha basit ve kolay bir yöntem olan biyolojik sentezi (yeşil sentez) kullanmaya başlamışlardır. Bu uygulamanın tercih edilmesinde, kimyasal kullanımının olmaması, ucuz, çevre dostu ve sentez sürecinin kolay olması gibi faktörler etkilidir (Baran ve Saydut, 2019). Nanopartiküllerin yeşil sentezi, çevre dostu ve biyouyumlu malzemelerin kullanılmasını içermektedir. Örneğin çözücü olarak suyun kullanılması ve biyolojik yöntemlerle işlemlerin oda sıcaklığında uygulanması yeşil sentezi bu açıdan ön plana çıkartmaktadır (Jain vd., 2024). Yeşil sentez, metal ve metal oksit nanopartikülleri üretmek için geleneksel yöntemler olarak nitelendirilen fiziksel ve kimyasal yöntemlere içerdiği bazı avantajlar ile önemli bir alternatiftir. Bu yöntem yalnızca güvenli olması ile değil, aynı zamanda uygun maliyetli, ölçeklenebilir ve basittir ve doğal ortam koşullarında problemsiz bir şekilde gerçekleşir (Abuzeid vd., 2023). Son 10 yılda fiziksel ve kimyasal olarak sentezlenmiş çalışmalara oranla bitki, bakteri, maya ve alg kullanılarak biyolojik yollarla sentezlenmiş nanopartikül çalışmalarında önemli bir artış olmuştur (Hussain vd., 2023). Biyosentezde yaygın olarak metal ve metal oksitler kullanılmaktadır. Metalik nanopartiküller ilginç biyolojik, fiziksel, kimyasal, manyetik ve optik özelliklerinden dolayı dikkate değer bir noktaya ulaşmıştır (Yakut ve Karataş, 2021). Bitkilerin metal iyonlarını indirgediği bilinmektedir. Doğal indirgeyicilerden biri olan bitki özlerinin maliyetleri düşüktür, kolay bulunabilirler ve biyouyumlulukları yüksektir. Bitkilerde bulunan polifenoller, karetenoidler, glukosinatlar, terpenoidler ve glutatyonlar çevre dostudur (Bukhari vd., 2021). Yeşil sentez yönteminde biyolojik numunelerin içerdiği polifenol, protein, şeker ve terpenoid gibi fitokimyasallar indirgeyici özelliklerinden dolayı kimyasal ajan kullanma gerekliliğini ortadan kaldırmakta ve böylelikle bu kimyasalların çevrede oluşturacağı olumsuzlukları da engellemektedir (Güven ve Sızmaz, 2020). Özellikle biyoremediasyon uygulamalarında yeşil sentez yolu ile elde edilen metal nanopartiküllerin kullanımına yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur ve her geçen gün bunlara yeni çalışmalar eklenmektedir (Singh vd., 2018).

Dünya çapında büyük endişe kaynağı olan konulardan biri de su kirliliğidir. Yeraltı su kaynakları da giderek kirlenme sebebiyle azalmaktadır. Örneğin, İtalya'daki Po Nehri vadisinin yeraltı su kaynakları endüstriyel kirlilik nedeniyle kalıcı olarak terk edilmiştir (Juwarakar vd., 2010). Su kütlelerindeki kirleticilerin giderimi ve en aza indirilmesinde son yıllarda yapılan araştırma çalışmalarının sayısı artmaktadır. Bu konuda biyoremediasyon işlemlerinin, toksik metallerin sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için kullanılması büyük ilgi görmektedir (Coelho vd., 2015). Özellikle boya içeren atık sularındaki boyaların biyoremediasyonu, geleneksel arıtma tekniklerine göre daha avantajlı olduğu için tekstil atıklarının arıtılmasında etkili bir yöntemdir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US EPA) dahil olmak üzere çeşitli büyük çevre kurumları tarafından boyalar, tehlikeli kirleticiler olarak kabul edilmiştir. Boyaların, kanserojen yapıları nedeniyle suda küçük konsantrasyonlarda bile bulunması olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır (İhsanullah vd., 2020). Boya giderim çalışmalarında bitkiler adsorban olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada Fabaceae familyasına ait *Robinia pseudoacacia* L. (Beyaz çiçekli yalancı akasya) türüne ait meyvelerin ve bu meyve ekstraktlarından elde edilen demir oksit nanopartiküllerin karakterizasyonu yapılarak sudan kirletici özellikteki boyaları giderme kapasiteleri belirlenmiştir. *Robinia pseudoacacia* çevre stresine uyum gösteren, ekolojik değeri yüksek ve ekonomik bir ağaç türü olduğu için dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemizde de süs bitkisi, orman ağacı ve peyzaj amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Arslan, 2019). *Robinia pseudoacacia* türünün kimyasal kompozisyonu ve biyolojik aktiviteleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiş (Marinas vd., 2014; Hosseinihashemi vd., 2016; Kara, 2022). Bu çalışmalarda türün biyolojik aktivite açısından kayda değer olduğuna dair bulgular elde edilmiştir.

1.2. *Robinia pseudoacacia* Türünün Sistematığı ve Taksonomik Özellikleri

Alem: Plantae / Bitkiler

Bölüm: Magnoliophyta / Tohumlu Bitkiler

Alt sınıf: Rosidae

Familiya: Fabaceae

Cins: *Robinia* L. / Yalancı Akasya

Tür: *Robinia pseudoacacia* L. / Yalancı Akasya

Robinia pseudoacacia (Şekil 1), 20-25 m boylarına sahip bir ağaç bir türüdür. Yaşlı gövdeleri derin çatlaklı, gri esmer bir kabuğa sahipken genç sürgünleri ise yeşil kırmızı kahverengi çıplak ya da hafif tüylü bir yapıdadır. Üzerinde kulakçıklardan değişmiş batıcı

dikenleri bulunur. Yapıları yumurta veya elips şeklinde olup üst yüzü canlı yeşil alt yüzü ise soluk gri yeşilidir. Beyaz renkli çiçek halindeyken çok güzel kokuları bulunmaktadır. Çiçeklerinin birçoğu bir araya gelerek 10-20 cm uzunluğunda salkım şeklinde aşağıya doğru sarkarlar (Göker, 1982). Bitkinin çiçeklenme zamanı Nisan-Haziran ayları arasındadır (Tübives, 2024). 5-10 cm uzunluğunda bulunan baklalarının içinde 3-10 adet sert kabuklu mercimek şeklinde açık kahverengi renğinde tohumları bulunmaktadır. Çok dayanıklı oduna sahip olup inşaat alanında başarı ile kullanılmaktadırlar. Hızlı büyüme yeteneğine sahip olan ıssık ağaçlarındandır. Nehir yatakları ve dolma alanlarda en iyi gelişim gösterdiği alanlardır. Kök sistemleri önce derine inip daha sonra etrafa yayılmaktadır. Köklerinin ucunda serbest azotu tespit eden bakterilerden oluşan mycorrhiza'lar bulunur (Anşin ve Özkan, 1993).

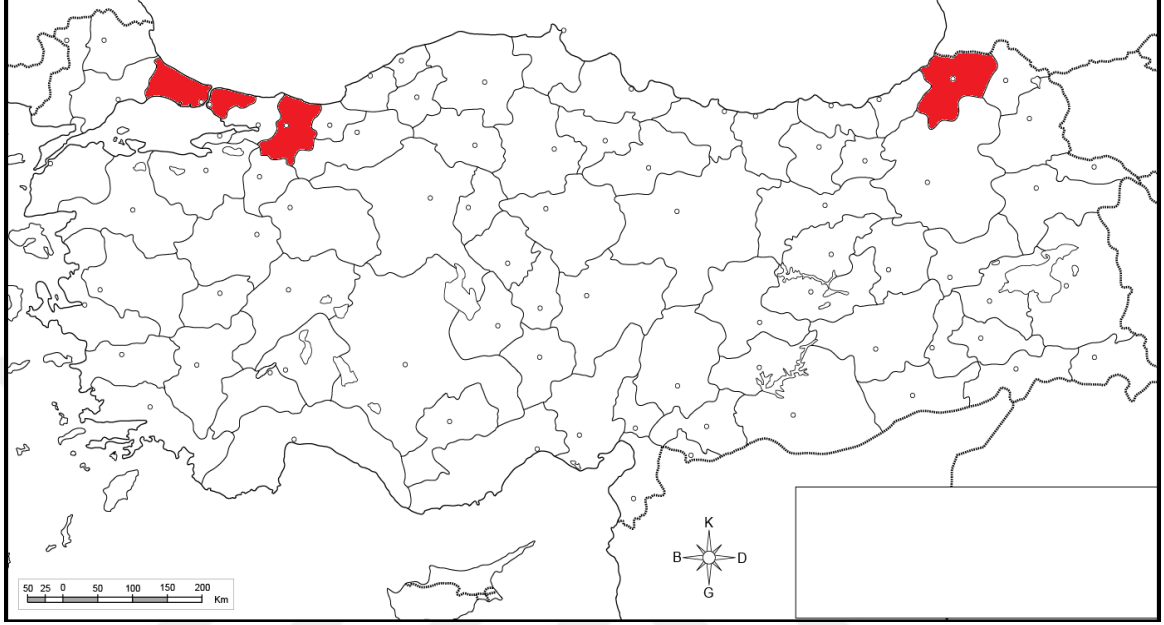


Şekil 1. Robinia pseudoacacia bitkisinin genel görünümü

1.3. Robinia pseudoacacia'nın Doğal Yayılış ve Ekolojisi

Çok yıllık bir ağaç türü olan bitki genel olarak Kuzey Amerika'da yetişmektedir. (Seçmen vd., 2000). J.Robin tarafından Avrupa'ya ilk kez 1601 yılında getirilmiştir. Orman ağacı olarak en fazla Macaristan, Romanya Tuna Nehri boyunca geniş alanda yetiştirilmektedir. Çiçeklerinin arıcılık yönünden değerli olduğu bilinmektedir (Anşin ve Özkan, 2006). Ülkemizde ise genel olarak doğallaşmış bir tür olarak Kuzey Anadolu da

dağılım göstermekte olup İstanbul, Artvin, Sakarya illerinde yayılış göstermektedir (Şekil 2) (Tübives, 2024; Bizim Bitkiler, 2013). Türkiye’ ye süs bitkisi olarak getirilmiş ancak kısa sürede yaygınlaşmıştır. Yol kenarları, okul bahçeleri, tren istasyonları gibi alanlarda sıkça rastlanmaktadır (Anşin ve Özkan, 2006).



Şekil 2. *Robinia pseudoacacia* türünün Türkiye’ deki doğallaşmış dağılımı (Tübives, 2024)

Ekonomik değere sahip olan *Robinia pseudoacacia* L. farmasötik ve biyoenerji alanlarında kullanım alanlarına sahiptir ve geleneksel olarak kabuk, yaprak ve çiçekleri bazı rahatsızlıkları tedavi etmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca çiçekleri, arıcılıkta nektar kaynağı olarak ve parfümeride hoş kokuları nedeniyle kullanılmaktadır (Saraç vd., 2022).

1.4. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji, 1-100 nanometre ölçeğindeki malzemelerin özelliklerinin anlaşılması, kontrolü ve bu boyutta gerçekleştirilen tüm görüntüleme, ölçüm ve modelleme süreçlerini kapsayan bir teknolojik alandır (Eren, 2022). Bununla birlikte bu saha, maddelerin nanometre düzeyindeki boyutlara indirgenmesiyle birlikte yapı ve bileşen düzeyinde ortaya çıkan farklılıkların, bu malzemelere özgün fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler kazandırması nedeniyle; bu özelliklerin anlaşılması, kontrol edilmesi ve çeşitli alanlarda uygulanmasını konu edinen disiplinler arası bir bilim alanı olarak tanımlanmaktadır (Bhushan, 2017; Szczyglewska vd., 2023). Disiplinler arası yapısıyla nanoteknoloji, fizik, kimya, farmakoloji, bilgisayar bilimi, tarım, gıda ve mühendislik

gibi birçok alanda uygulama potansiyeli sunan yenilikçi bir araştırma sahasıdır (Bayda vd., 2019; Mohammad vd., 2022). Dünya genelinde nanoteknolojiye yönelik yatırımlar, özellikle Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa ülkeleri gibi gelişmiş ülkelerde milyarlarca dolar ve avro düzeyine ulaşırken, gelişmekte olan ülkeler finansal kısıtlamalar nedeniyle bu alanda benzer düzeyde harcama yapamamaktadır. Ancak, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerin bilim çevreleri, nanoteknolojinin gelecekteki teknolojik gelişmelerde belirleyici bir rol oynayacağı konusunda fikir birliği içindedir (Malik vd., 2023; Khatoon and Velidandi, 2025). Bu durum, önümüzdeki yıllarda nanoteknolojiye dayalı endüstriyel yatırımların ve teknolojik gelişmelerin kaçınılmaz hale geleceğini göstermektedir. Ayrıca, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve mevcut teknolojilerin ekonomik sürdürülebilirliğine ilişkin artan endişeler, nanoteknolojinin daha temiz, uygun maliyetli ve çok yönlü uygulama potansiyelini ön plana çıkarmaktadır. Bu gelişmeler, nanoteknolojinin en önemli uygulama alanlarından biri olan nanopartiküllerin üretimi ve kullanımı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu alandaki çalışmalar çok sayıda olup her geçen gün gittikçe artmaktadır (Khan vd., 2019).

1.4.1. Nanopartiküller

Tipik olarak 1 ila 100 nm arasında değişen nanopartiküller, büyük ölçekli malzemelere kıyasla farklı özellikler sergileyen benzersiz atom topluluklarıdır. Küçük boyutları nedeniyle atomlarının büyük bir kısmı yüzeyde bulunur ve bu da atomik, elektronik ve manyetik yapılarını değiştirir. Nihai olarak daha düşük erime noktaları, daha yüksek yüzey alanları ve spesifik optik ve manyetik davranışlar gibi değiştirilmiş fiziksel ve kimyasal özelliklere yol açar. Bu özellikler, nanopartikülleri çeşitli endüstriyel uygulamalar için onları oldukça değerli kılmaktadır. Çünkü bunlar makroskobik düzeydeki malzemelere kıyasla farklı reaktivite ve faz kararlılığı göstermektedir (Banfield ve Zhang, 2001; Horikoshi ve Serpone, 2013). Nanopartiküller, küresel, üçgen, dörtgen, altıgen, kübik, elipsoidal gibi farklı morfolojilere sahip olabilirler (Sau ve Rogach, 2010; Polarz, 2011). Bununla birlikte, nanopartiküller genel şekillerine göre sıfır boyutlu, bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu olarak sınıflandırılabilirler. Sıfır boyutlu nanopartiküller genellikle ayrı, bağımsız parçacıklardır. Bir boyutlu nanomalzemeler, örneğin film veya yüzey kaplamaları gibi, tek bir boyutta uzunlukları olan yapıları içerir. İki boyutlu nanomalzemeler, kalın membranlara sahip, sabit ve uzun nanoyapılara örnek olarak nanopor filtreler verilebilir. Üç boyutlu nanomalzemeler ise sabit ve küçük yapıları içeren parçacıklardır (Nair vd., 2022). Küçük boyutları ve kendine özgü fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle nanopartiküller, çevresel uygulamalar da dahil olmak

üzere çeşitli alanlar için ilgi çekici hale gelmiştir (Altammar, 2023). Nanopartiküllerin bu özellikleri ve sağladıkları avantajlar; tıp, malzeme kimyası, bilgi teknolojisi, tarım, biyomedikal uygulamalar, optik, kataliz, elektronik, çevre, enerji ve sensör teknolojileri gibi pek çok alanda geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Özellikle biyomedikal araştırmalarda ilaç taşıma sistemleri, kanser tedavisi, theranostik uygulamalar, antibakteriyel ajanlar, implantlar ve yara iyileştirme gibi alanlarda dikkat çekici olmuşlardır (Pandit vd., 2022). Nanopartiküller, tarihsel olarak biyotik ve abiyotik süreçlerle doğada zaten var olagelmiş, bu da onların biyomedikal ve diğer uygulamalarda kullanılabilirliğini daha da anlamlı kılmaktadır. Nanopartiküller, doğal oluşumlarında biyotik mekanizmalarla mikroorganizmalar veya bitkiler gibi organizmalar tarafından üretilirken, abiyotik mekanizmalarla ise volkanik faaliyetler veya suyun minerallerle etkileşimi gibi doğa olayları sonucu oluşabilir. Örneğin, bakteriler metal iyonlarını indirgemesi ile nanopartiküller oluşturabilirken, volkanik patlamalar sırasında gazlar ve magmalarla etkileşim sonucu da nano mineraller oluşabilir (Xu ve Hochella, 2024). Belirtildiği üzere, doğada biyotik ve abiyotik süreçlerle var olabilen nanopartiküllerin sentetik üretim yöntemleri teknolojinin ilerlemesiyle birlikte daha kontrollü ve spesifik özelliklere sahip nanopartiküllerin üretilmesini mümkün kılmıştır (Abbas vd., 2020).

1.4.1.1. Nanopartikül Tipleri

Nanopartiküller, fizikokimyasal özellikleri ve yapısal bileşenleri dikkate alınarak farklı sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma genel olarak karbon bazlı, seramik, yarı iletken, polimer bazlı, lipid bazlı ve metal bazlı nanopartiküller olmak üzere altı ana grupta ele alınabilir (Mahbub ve Hoque, 2020; Joudeh ve Linke, 2022; Al-Harbi ve Abd-Elrahman, 2024).

1.4.1.1.1. Karbon Bazlı Nanopartiküller

Çok sayıda makromolekülün bileşiminde yer alan ve dünyada en fazla miktarda bulunan elementlerden birisi olan karbon farklı formları veya çok sayıda allotropları olması ile eşsiz nitelikte bir elementtir. Allotroplarının kafes yapısının manipüle edilebilmesi, karbonun gelişmiş ve çok yönlü uygulamalarda kullanılmasına olanak tanımaktadır (Okwundu vd., 2018; Holmannova vd., 2022). Karbon elementi bu özelliklerinden dolayı karbon bazlı nanomalzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Karbon nanopartiküller saf karbondan oluşmakta olup, buna bağlı olarak ta yüksek stabiliteye, olağanüstü elektrik ve ısı iletkenliğine, sağlam mekanik özelliklere sahiptirler. Düşük toksisite ile son derece biyouyumludurlar ve hidrofobiktirler (Holmannova vd.,

2022; Ayanda vd., 2024). Yapılarının boyutluluğuna bağlı olarak, karbon nanomalzemeler “sıfır boyutlu” (fullerenler, karbon dotlar, nano diamondlar), “tek boyutlu” (karbon nanotüpler, karbon nanohornlar) veya “iki boyutlu” (grafen) malzemeler olarak sınıflandırılırlar (Jović vd., 2020). Su arıtımı ve çeşitli ayırma işlemleri ve çevre kirliliğinin giderilmesinde, moleküler boyuttaki çapları ve mikroskobik yapıları sayesinde yeni nesil elektronik cihazların geliştirilmesinde, yüksek mekanik dayanıklılıkları ve iletkenlik özellikleri nedeniyle, takviye edici elemanlar, koruyucu malzemeler ve iletken polimerlerin üretimi gibi uygulamalarda önemli bir kullanım potansiyeline sahiptirler (Speranza, 2021). Karbon nanomalzemeler, tıbbi uygulamalarda optik sistemlerden tıbbi implantlara, biyomedikal sensörlerden tıbbi elektronik cihazlara ve doku iskelelerine kadar geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmuştur. Ayrıca, ilaç, gen ve aşılarda kontrollü taşınması ve hedefe yönelik salımında umut vadeden bir dağıtım sistemi olarak da öne çıkmaktadır (Jović vd., 2020).

1.4.1.1.2. Seramik Nanopartiküller

Seramik nanopartiküller yüksek sıcaklıklarda ısıtma ve bunu takiben hızlı soğutma metodlarıyla sentezlenerek elde edilen, karbonatlar, fosfatlar, oksitler ve karbürler gibi inorganik bileşiklerden meydana gelirler. Özellikle sol-jel, alev sentezi ve ters mikro emülsiyon gibi yöntemlerle üretilen bu nanopartiküller; amorf, kristalin, yoğun, gözenekli veya içi boş yapılar gösterebilir. Yüksek kimyasal kararlılıkları ve ısıya dayanıklılıkları sayesinde seramik nanopartiküller; kimyasal süreçler, boya fotodegradasyonu, fotokataliz, görüntüleme teknikleri, ilaç, gen ve aşı taşıyıcı sistemler, biyoyumlu implantlar, doku mühendisliği ve sensör teknolojileri gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Bhardwaj vd., 2021; Thakur vd., 2022).

1.4.1.1.3. Yarı İletken Nanopartiküller

Yarı iletken nanopartiküller, metaller ve ametaller arasında geçiş özelliği gösteren parçacıklardır. Periyodik tablonun II–VI, III–V ve IV gruplarındaki elementlerin oluşturduğu bileşiklerinden meydana gelirler. GaN, GaP, InP ve InAs (III–V grubu); ZnO, ZnS, CdS, CdSe ve CdTe (II–VI grubu); silikon ve germanyum (IV grubu) yarı iletken nanoparçacıklara örnek olarak verilebilir (Shah vd., 2021; Ahmed vd., 2022). Bu nanopartiküller geniş bant aralıklarına sahiptir ve bant aralıkları ayarlanarak onlara farklı özellikler kazandırılabilir. Nano ölçekteki bu yarı iletkenler, küçük boyutları (1–20 nm), geniş yüzey alanları ve kuantum etkileri nedeniyle optoelektronik ve manyetik açıdan özel davranışlar gösterirler. Bu nedenden dolayı “quantum dots” olarak da

tanınmaktadır. Güneş pili, LED, lazer, tıbbi görüntüleme ve kuantum bilgisayar gibi birçok teknolojik kullanımları vardır (Ishtiaq vd., 2020). Boyutları ve şekilleri, onların sahip oldukları elektronik özellikleri doğrudan etkiler. Bu nedenle, atomlara benzer şekilde “yapay atomlar” olarak tanımlanırlar. Ayrıca, uygun bant aralıkları sayesinde bu nanoparçacıklar suyun ayrıştırılması gibi enerji uygulamalarında da kullanılır. Buna ek olarak elektronik, fotonik ve yenilenebilir enerji konularında önemli uygulama sahaları mevcuttur (Shah et al., 2021; Ishtiaq et al., 2020).

1.4.1.1.4. Polimer Nanopartiküller

Polimerik özellikteki nanopartiküller 10 ila 1000 nm arasında değişen ölçekte olup, katı partiküller şeklinde tanımlanmaktadır. Bu sistemler aktif bileşenlerin çekirdek içerisinde enkapsüle edildiği ya da yüzeyde adsorbe edildiği sistemlerdir (Zielińska vd., 2020). Bu yapı morfolojik olarak, “nanokapsül” ve “nanosfer” olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılabilir. Polimerik nanopartiküller çoğunlukla üç temel polimer sınıfından üretilir: polyesterler, poli-alkil-siyanoakrilatlar ve amfipatik blok kopolimerlerdir. Bu nanopartiküller, taşıdıkları aktif bileşenleri enzimatik yıkıma karşı muhafaza edebilmekte iken ilaçların doku dağılımını ve biyoyararlanımını da değiştirebilmektedir (Jana vd., 2017). Hem yüzey adsorpsiyonu hem de çekirdek enkapsülasyonu uygulamaları ile değişik ilaç tiplerine uyum sağlayabilme kabiliyetine sahiptirler. Bu nanopartiküllerin ilaç taşıyıcısı olarak ön plana çıkmalarında birkaç ana özellik belirleyicidir. Bu özellikler düşük toksisite, biyolojik olarak yüksek uyumluluk ve hedeflenen bölgelerde biyobozunabilirlik göstermeleri olarak sıralanabilir. Bunlara bağlı olarak ta kanser hastalıklarının tedavisi edilmesi gibi hedefe odaklı ilaç taşıma sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılmaları mümkün hale gelmektedir (Zielińska et al., 2020; Liu ve Feng, 2015).

1.4.1.1.5 Lipid Nanopartiküller

Lipid nanopartiküller küçük lipid parçacıklardan teşekkül eden yağ molekülleridir ve karakteristik olarak dört ana lipid bileşeninden oluşmaktadırlar. Bunlar şu şekilde sıralanır: partikül oluşumu ve stabilizasyonu için gerekli olan kolesterol ve fosfolipitler negatif yüklü nükleik asitlere bağlanmayı sağlayan ve böylelikle ilaç yüklemesini artıran katyonik veya iyonize edilebilir lipidler ve biyolojik sistem içinde partikül stabilitesini ve dolaşım süresini artırmaya katkıda bulunan polietilen glikol (PEG) eklenmiş lipidlerdir (Mehta vd., 2023). Lipid nanopartikülleri çeşitli biyomedikal uygulamalarda RNA tabanlı aşılarda da dahil olmak üzere umut vadeden taşıyıcılardır. Bu tip nanopartiküller ilaçların

etkili bir şekilde iletilmesini sağlayarak belirli dokulara veya hücrelere daha iyi odaklanmış iletimi sağlar. Nanopartiküllerin sentezlenmesinde kullanılan lipitler biyolojik kaynaklardan da elde edilmektedir (Alfutaïmani vd., 2024).

1.4.1.1.6. Metal Nanopartiküller

Metaller çeşitli özelliklere sahip bol miktarda bulunan elementlerdir ve bunlar kullanılarak sentezlenen metal nanopartiküller, 100 nm'nin altında bir boyut aralığına sahiptir. Metal nanopartiküller, yalnızca tek bir elementten oluşan nanomalzemelerdir ve yapılarında tekil atomlardan ya da çok sayıda atomun bir araya gelmesiyle oluşan kümeler bulunabilir. Altın (Au), gümüş (Ag), platin (Pt), bakır (Cu), paladyum (Pd), renyum (Re), çinko (Zn), rutenyum (Ru), kobalt (Co), kadmiyum (Cd), alüminyum (Al), nikel (Ni) ve demir (Fe) gibi metaller, en yaygın sentezlenen metal nanopartiküller arasında yer almaktadır (Saleh, 2022). Çok yönlü nanomalzemeler olarak kullanılma imkanına sahip olan metal nanopartiküllerin özellikleri boyut ve şekil, elektriksel, elektronik, optik ve katalitik yapılarına göre değişir (Kumar vd., 2022; Deepa, vd., 2023). Sentezleme aşamasında başta boyut ve şekli olmak üzere bu özelliklerin ortaya çıkmasında metal tuzları ve indirgeyici madde arasındaki redoks potansiyeli, metal-metal bağlarının gücü, çözücünün doğası, kullanılan stabilize edici maddenin türü, sentez koşulları, sıcaklık ve benzeri gibi çeşitli faktörler belirleyicidir (Krishnaswamy ve Orsat, 2017). Onlara özgü bu karakteristik özelliklerin sağladığı avantajlar pek çok alanda kullanımları yönünde tercih edilmesini sağlamaktadır. İlaç taşıma ve kontrollü salınım (Chandrakala vd., 2022), tanı ve görüntüleme (Muneer vd., 2020), antimikrobiyal ve antioksidan uygulamalar (Karkullukçu vd., 2023), su arıtımı ve temizliği gibi çevre teknolojileri (Pinto vd., 2020; Demirel vd., 2024), yenilenebilir enerji sistemleri (Raina vd., 2020), nano elektronik ve sensör teknolojileri (Rafatmah ve Hemmateenejad, 2023), nano-gübreler ve pestisitler (Hudzovskyi, 2024), gıda ambalajları (Dobrucka ve Ankiel, 2019) ve kozmetik (Niska vd., 2018) gibi alanlar onların kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir.

1.4.1.2. Nanopartikül Sentez Yöntemleri

Nanopartiküllerin üretiminde boyutlarını, şekillerini ve yüzey işlevselliklerini etkileyen çeşitli sentez yöntemleri kullanılmaktadır (Harish vd., 2022). Bu yöntemlerin gerçekleştirilmesinde, “yukarıdan aşağıya” ve “aşağıdan yukarıya” olmak üzere iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. “Yukarıdan aşağıya” yaklaşım, mevcut bir yapının boyutunun nano ölçekteki bir boyuta doğru küçültülmesini ifade ederken; “aşağıdan yukarıya”

yaklaşım ise daha küçük atom veya moleküllerin bir araya getirilerek daha büyük bir nano yapı oluşturulması esasına dayanmaktadır (Abid vd., 2022).

Nanopartikül üretimi için geleneksel olarak fiziksel, kimyasal yöntemler kullanılmakta iken, son zamanlarda biyolojik teknikler de yaygın olarak kullanılmaktadır (Selmani vd., 2022). Geleneksel yöntemler, kapsamlı ölçeklenebilirlik, yenilikçi pil iletimi, elektrik uygulamaları, hedefli hastalık tedavisi ve enerji depolama/korunumu alanları ve nanopartikül morfolojisi üzerinde yüksek kontrol alanlarında uygulamalara sahiptir. Bu geleneksel yöntemlerin aynı zamanda olumsuz etkileri olduğu da bilinmektedir. Sentez sırasında organik çözücülerin aşırı derecede kullanılması nörodavranışsal ve üreme riski oluşturmaktadır. Yüksek basınç, yüksek ısı koşulları, uçucu buhar ve aşırı karbondioksit üretimi konusundaki endişe bu sentezin olumsuz etkileri arasında ek olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerin hepsi sentezi yürüten tüm çevreler için geri dönülemez risklere sebep olmaktadır. Bu faktörler nedeniyle geleneksel sentez yöntemlerinin zararları faydalarından daha ağır bastığı için yeşil sentezin önü açılmıştır (Huston vd., 2021).

1.4.1.2.1 Fiziksel Yöntem

Nanoparçacıkların (NP'lerin) sentezinde kullanılan fiziksel yaklaşım, esas olarak ultrasonikasyon, mikrodalga (MW) ışınlı, elektrokimyasal yöntemler gibi çeşitli fiziksel yöntemlerle malzemenin boyutunun küçültüldüğü “yukarıdan aşağıya” bir yöntemdir (Gour ve Jain, 2019). Lazer ablasyonu, ultrasonik işlem ve bilyalı öğütme gibi teknikler, büyük miktarlarda nanopartikül üretme avantajı sunsa da, bu yöntemler yüksek enerji gereksinimi ve maliyetli ekipman yatırımları gibi dezavantajlara sahiptir (Jiang vd., 2022).

1.4.1.2.2 Kimyasal Yöntem

Kimyasal yöntemler; fiziksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyet, basit uygulama süreçleri ve yüksek ölçeklenebilirlik özellikleriyle öne çıkmaktadır (Jiang vd., 2022). Kimyasal yöntemde nanopartiküllerin sentezi için inorganik ve organik indirgeyici ajanlar kullanılır ve aşağıdan yukarıya nanopartikül sentezidir. İndirgeyici ajanlar iyonları indirgeyerek metal oluşumuna ve oligomerik kümeler halinde aglomerasyona neden olur. Bu kümelerin bir sonucu olarak metalik koloidal parçacıklar oluşur (Kumari vd., 2023). Kimyasal sentez yolu ile nanopartiküllerin sentezinde birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler mikrodalga destekli sentez, hidrotermal sentez, poliol sentezi, mikro

emülsiyon tekniği, salvo termal sentez, sol-jel yöntemi, plazma ve kimyasal buhar sentezi olarak sıralanabilir (Kumari vd., 2023).

1.4.1.2.3 Biyolojik Yöntem

Biyolojik sentez, diğer adıyla yeşil sentez aşağıdan yukarıya sentez yaklaşımını içeren bir nanopartikül sentez yöntemidir (Hussain vd., 2016). Yeşil sentez teknolojisi, çevre dostu, toksik olmayan, metal nanopartiküllerin sentezi için potansiyel olarak kolay, etkili, temiz bir teknolojidir. Nanopartiküllerin yeşil sentezi sırasında neredeyse hiç toksik kimyasal üretilmez ve bunların çevre uyumluluğu çok yüksek olduğu için diğer teknolojilere göre enerji girdisi çok daha düşüktür. Bu nedenle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak yeşil sentezle üretilen nanopartiküller kullanılır ve son yıllarda düşük maliyetleri ve çevre dostu olması nedeniyle birçok uygulama alanında oldukça ilgi görmüştür (Bahrulolom vd., 2021).

Yeşil sentezde, nanopartiküllerin sentezi için virüsler, bakteriler, mantarlar, alglar ve bitkiler gibi biyolojik ajanları kullanır (Pandit vd., 2022). Doğanın kimyasal fabrikaları olan bitkiler ve bitki özleri, uygun maliyetli olmaları ve düşük bakım gerektirmeleri nedeniyle biyolojik alternatifler arasında en iyi seçenek gibi görünmektedir (Parveen vd., 2016). Araştırmalar, bitki ve bitki özleri kullanılarak yapılan yeşil sentezin, bakteri ve mantar gibi diğer mikroorganizmalara göre daha hızlı olduğunu ortaya koymuştur. Yeşil sentezde bitki ve bitki özlerinin kullanımı; hızlı büyümeleri, tek adımlı teknik sağlamaları, ekonomik olmaları, patojenik olmamaları ve çevre dostu nanopartikül sentezi sunmaları nedeniyle ilgi çekmiştir (Rafique vd., 2017).

Bitkiler, çeşitli kısımlarında belirli oranlarda ağır metal biriktirme kapasitesine sahip olup; içerdiği karbohidratlar, proteinler ve koenzimler gibi biyomoleküller aracılığıyla metal tuzlarını nanoparçacıklara indirgeme potansiyeli göstermektedir (Singh vd., 2018). Bitki özleri, içerdiği saponinler, alkaloidler, flavonoidler ve terpenoidler gibi bileşikler sayesinde mükemmel indirgeyiciler olarak işlev görürken; amidler, karboksilik asitler, aldehytler, ketonlar, şekerler, terpenoidler ve flavonlar da nanoparçacıkların biyolojik olarak indirgenmesinden sorumlu temel fitokimyasallar arasında yer almaktadır (Bordiwala, 2023; Soltys vd., 2021). Nanopartiküllerin verimliliğini artırmak için son zamanlarda, değişken boyut, şekil ve kararlılığa sahip çok sayıda yöntem kullanılmaktadır. Biyosentezlenen NP'lerin tespiti ve karakterizasyonu, UV-vis spektroskopisi, FT-IR, TEM, SEM, AFM, DLS, XRD, zeta potansiyel analizleri vb. gibi farklı teknikler kullanılarak yapılmaktadır (Salem ve Fouda, 2021).

1.4.1.3. Nanopartiküllerin Kirleticilerin Gideriminde Kullanımı

Günümüzde yaygın sanayileşme ve yoğun tarımsal faaliyetler nedeniyle; gelişmekte ve gelişmiş ülkeler için toprak, su ve havanın kirlenmesi büyük bir endişe kaynağıdır (Roy vd., 2021). Son yıllarda, insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak; fabrikalar, hastaneler ve tarımsal işletmeler gibi çeşitli kaynaklardan çevreye önemli miktarda antibiyotik, ağır metal ve diğer yeni nesil kirleticiler yayılmaktadır (Nguyen vd., 2022). Günümüzde su kirliliği, küresel ölçekte karşılaşılan en önemli çevresel sorunlar arasında yer almaktadır (Ghosh vd., 2022). İnsanlar, metalle kirlenmiş suyu tüketerek ağır metallerle maruz kalabilirler. Ağır metallerin toksik etkileri, geçmişte ABD'deki Love Kanalı trajedisi ve Japonya'daki Minamata hastalığı gibi ciddi çevresel ve sağlık krizlerine yol açmıştır (Barasarathi vd., 2022).

Nanomalzemeler, kirli sudan ağır metaller, organik ve inorganik boyalar, pestisitler ve küçük moleküller gibi kirleticileri uzaklaştırma konusunda etkilidir (Ghosh vd., 2022). Bu atıkları arıtmak için birçok farklı teknik uygulanmıştır, ancak en basit, düşük maliyetli, etkili ve başarılı yöntemlerden biri adsorpsiyondur. Bu amaçla kullanılan ve büyük potansiyele sahip malzeme grubu ise nanopartiküllerdir (Anastopoulos vd., 2018). Nanomalzemeler, küçük boyutları ve geniş yüzey alanları sayesinde etkili katalizörler ve adsorbanlar olarak kullanılır (Thangavelu, vd., 2022). Her ülke, suyu arıtmak için etkili bir yönteme ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde, yüksek verimliliğe sahip ve düşük maliyetli atık su arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi büyük bir gereklilik haline gelmiştir (Mondal vd., 2023).

1.5. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, Fabaceae familyasına ait *Robinia pseudoacacia* L. (beyaz çiçekli yalancı akasya) türünün ekonomik değeri bulunmayan ve doğada bol miktarda bulunan meyvelerinden bitkisel ekstraksiyon yöntemleriyle elde edilen özütlere kullanılmasıyla demir oksit nanopartiküllerinin sentezlenmesi ve bu nanopartiküllerin yapısal ve kimyasal özelliklerinin karakterize edilmesidir. Ayrıca, hem bitkisel meyve ekstraktlarının hem de sentezlenen demir oksit nanopartiküllerinin, sulu ortamdaki boyar madde kirliliğinin giderilmesindeki etkinliğinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda, çevre dostu, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir nanoteknolojik arıtım yöntemi geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Meyvelerin Temini

Gümüşhane Eskibağlar Mahallesi'nde peyzaj amaçlı yetiştirilmiş *Robinia pseudoacacia* ağaçlarından Eylül 2023'de meyveler toplanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. *Robinia pseudoacacia* L. Meyve örnekleri

2.2. Meyve Ekstraktlarının Hazırlanması

Robinia pseudoacacia meyveleri blenderden geçirilerek toz haline getirildi (Şekil 4). Toz haline getirilen numuneden 1110 g alınarak hazırlamak için 20 L hacme sahip bir kaba 10 L saf su ilave edilerek kapağı kapalı bir şekilde 2.5 saat süre ile kaynatıldı. Daha sonra bu örnekler soğumaya bırakıldı. Ekstrakt oluşumu gerçekleştikten sonra 1.00 mm, 0.50 mm ve 0.25 mm gözenek çapına sahip eleklerden geçirilerek süzme işlemi gerçekleştirildi. Ardından elekten geçirilen ekstraktın kuru madde içeriği dijital refraktometre (Hanna HI96801) ile tespit edildi. Yapılan analiz neticesinde meyve ekstraktının kuru madde miktarı içeriği $\%4.00 \pm 0.25$ olarak belirlendi. Meyve ekstraktının kuru maddesi daha sonra vakum evaporatör kullanılarak 60 °C' de 150 mbar basınç altında $\%10$ 'a çıkartıldı (Gedikli, 2022; Karakullukçu vd., 2023).

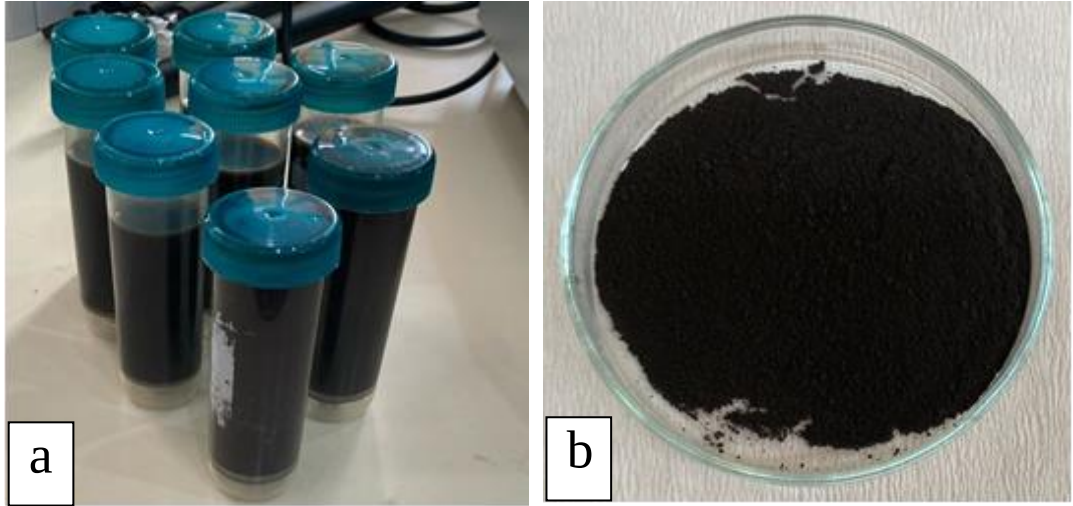


Şekil 4. Blenderden geçirilerek toz haline getirilmiş *Robinia pseudoacacia L.* meyve örnekleri

2.3. Demir Nano Partiküllerin (FeONP) Sentezlenmesi

R. pseudoacacia meyve örneklerinden demir oksit nanopartiküllerinin yeşil sentezi için demir(III) ve demir(II) iyonları içeren çözeltiler hazırlanmıştır. Bu amaçla, 0.2 M konsantrasyonunda 125 mL Fe^{3+} çözeltisi hazırlamak için $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tuzu kullanılmıştır. Ayrıca, 0.1 M konsantrasyonda 125 mL Fe^{2+} çözeltisi elde etmek üzere 3.8 g FeSO_4 tartılarak ayrı ayrı beherlerde her iki madde çözüldü ve balon jojede birleştirilerek 250 mL'ye tamamlandı. Ardından 600 mL hacimli bir behere 250 mL %10 kuru madde içeriğine sahip *R. pseudoacacia* meyve ekstraktı eklendi. Bir pH metre cihazı (OHAUS Starter 3000 marka) kullanılarak pH değeri 1.0 M NaOH eklenmesiyle 10.00 olarak ayarlandı. Bunu takiben çözelti bir magnetik karıştırıcıda karıştırılarak (750 rpm) 1 saniyeye 1 damla karşılık gelecek şekilde $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ çözeltisinden ayırma hunisi kullanılarak damlatma işlemi gerçekleştirildi. Bu damlatma işlem 250 mL için 60 dk tamamlandı. Ardından 2.5 saat boyunca beherin ağzına bir cam ile kapatılarak 750 rpm'de karıştırıldı (Yusefi vd., 2020; Gedikli, 2022).

Fe_3O_4 oluştuğundan dolayı çözeltide renk değişimi (tamamen siyaha dönüştür) gözlemlendi (Şekil 5). Oluşan demir oksit nanopartikülü (FeONP) çözeltisi 8 adet 50 ml falkon santrifüj tüpüne aktararak bir santrifüj cihazında (NÜVE NF 800R) 4000 rpm'de santrifüj edildi. Santrifüj etme işlemi her işlem bitiminde oluşan çöküntünün saf su ile yıkanmasının gerçekleştirilmesi ile 3 tekrarlı yapıldı. Çökelekler darası 120x20 mm kapaklı cam petrilere konuldu. Son olarak etüv içerisinde 60 °C'de vakumlu bir fırında 3 saat boyunca kurumaya bırakıldı. *R. pseudoacacia* bitki meyvelerinden demir oksit nanopartikülleri (FeONP) sentezlenmiştir (Yusefi vd., 2020; Gedikli, 2022).



Şekil 5. a. FeONP çözeltisi, b. sentezlenen FeONP'ler

2.4. Demir Nanopartikülleri Karakterizasyonu

Demir nanopartiküllerinin karakterizasyonunda UV-Vis, FTIR, TEM, EDX ve XRD analizleri kullanılmıştır. Bunlar arasında TEM, EDX ve XRD analizleri Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda (BUMER) yaptırılmıştır.

2.4.1. UV-Vis Görüntüleme

Demir oksit nanopartiküllerinin oluştuğuna dair UV-Vis görüntüleme işlemleri Gümüşhane Üniversitesi Gıda Mühendisliği Laboratuvarı'nda mevcut spektrofotometre cihazında (Shimadzu UV-1800, Kyoto, Japan) 200-800 nm dalga boylarında taranmıştır.

2.4.2. Fourier-Transform İnfrared (FT-IR) Spektrofotometre Analizi

R. pseudoacacia meyve ekstraktından elde edilen nanopartiküllerin kimyasal yapısını değerlendirmek, indirgeme ve stabilizasyon süreçlerinde rol oynayan fonksiyonel grupları belirlemek ve bu grupların kaynaklandığı biyomolekülleri tanımlamak amacıyla FT-IR spektrofotometre analizi hem nanopartiküllere hem de sentezde kullanılan bitki ekstraktına uygulanmıştır. Analizler, Gümüşhane Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde mevcut Perkin Elmer marka (model: UART Two) FT-IR spektrofotometresi kullanılarak $4000\text{--}450\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir.

2.4.3. Geçirimli Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Analizi

Sentezlenen FeONP'lerin morfolojik ve elementel karakterizasyonu, Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) ile gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, FEI TALOS F200S TEM cihazı (200 kV) kullanılmıştır. Analiz öncesinde numuneler uygun şekilde hazırlanmış, nanopartiküller etanol içerisinde disperse edilerek bir damla Cu grid üzerine damlatılmış ve vakumda kurutulmuştur. Aynı sistemde entegre olarak bulunan Enerji Saçılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) kullanılarak elementel analiz yapılmıştır.

2.4.4. X-Işınları Kırınım Kristalografisi (XRD) Analizleri

FeONP'lerin kristal yapısı ve faz bileşimini belirlemek amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizi gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan BRUKER D8 DISCOVER cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, Cu-K α ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) radyasyonu ile gerçekleştirilmiştir. X-ışını kaynağı olarak bakır (Cu) anodu kullanılmış ve 40 kV gerilim ile 40 mA akım uygulanmıştır. Tarama işlemi, 2θ aralığında 10° ile 80° arasında gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, X-ışını kırınım deseninin analizinde kullanılmıştır.

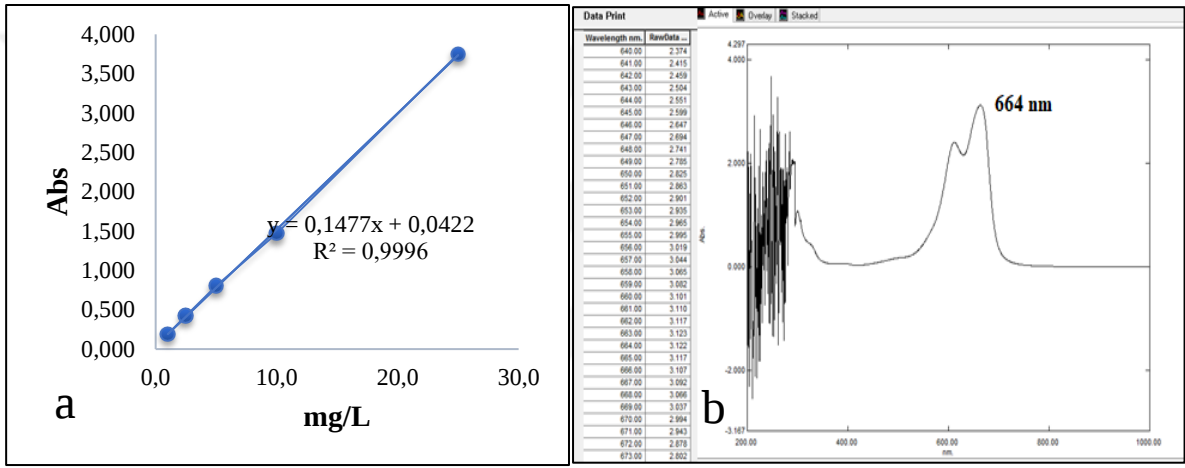
2.5. Boyaların Adsorpsiyonu

R. pseudoacacia meyve ekstraktından yeşil sentez yöntemiyle elde edilen FeONP'ler ile toz haline getirilmiş *Robinia pseudoacacia* meyvesinin sudan adsorpsiyon yoluyla boya giderimini sağlamak ve neticesinde adsorpsiyon davranışlarını incelemek amacıyla, her bir boyar madde için (metilen mavisi (MM), malaşit yeşili (MY) ve fenol kırmızısı (FR)) 2500.0 mg/L derişiminde stok çözeltiler hazırlanmıştır. Bu stok çözeltilerden uygun hacimlerde alınıp saf su ile seyreltilerek, 2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 40.0, 100.0, 250.0 olmak üzere 7 farklı boya çözeltisi MY ve PR için, MM için ise bunlara ilave olarak 500.0 ve 1000.0 mg/L konsantrasyonlarında dokuz farklı boya çözeltisi elde edilmiştir. Hazırlanan her boya çözeltisinin özgün pH değerleri ölçülmüştür.

Adsorpsiyon deneyleri için polipropilen (PP) tüplere sırasıyla 0.0125, 0.025 ve 0.050 g FeONP tartılmış ve her tüpe ayrı ayrı 10 mL'lik boya çözeltileri eklenmiştir. Bu şekilde, adsorban süspansiyon konsantrasyonları 1.25, 2.50 ve 5.00 g/L olacak şekilde ayarlanmıştır. Kontrol amaçlı olarak, 0.050 g ve 0.100 g FeONP üzerine 10 mL saf su eklenerek kör numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, sallamalı çalkalayıcıda 50 rpm hızında 12 saat boyunca karıştırılmış, ardından 5000 rpm'de 15 dakika santrifüjlenerek

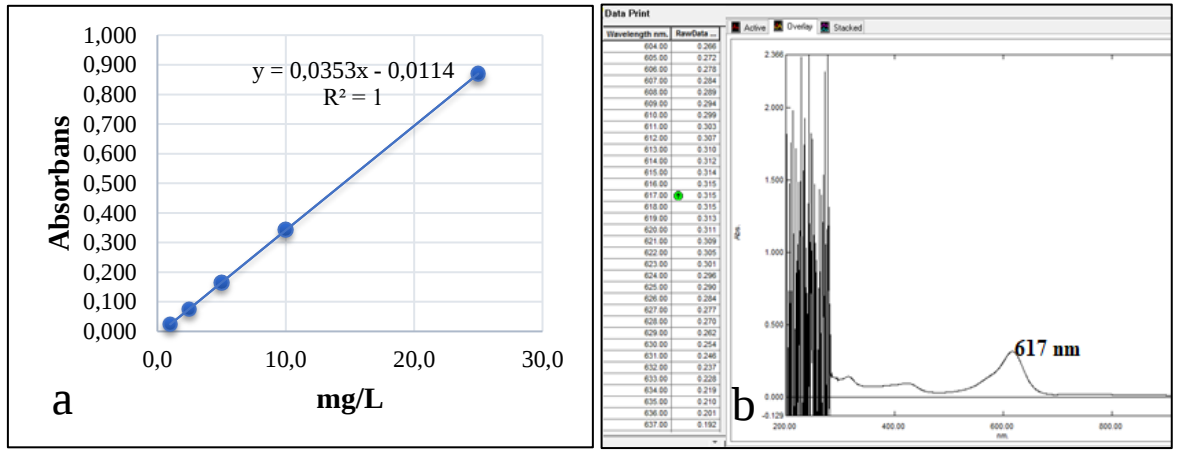
katı-sıvı ayrımı sağlanmıştır. Santrifüj sonrası üst fazdan alınan çözeltilerde kalan boya konsantrasyonları UV-Vis spektrofotometre ile analiz edilmiştir (Bozbeyoğlu vd., 2022; Demirel vd., 2024).

Metilen mavisinin maksimum absorpsiyon dalga boyunun belirlenmesi amacıyla, Shimadzu UV-1800 UV-Vis spektrofotometresi kullanılarak 5.0 mg/L konsantrasyonundaki çözelti üzerinden 200–1000 nm aralığında spektral tarama yapılmıştır. En yüksek absorbansın 664 nm’de gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 6). Ayrıca, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 ve 25.0 mg/L konsantrasyonlarında hazırlanan standart çözeltiler ile kalibrasyon eğrisi ($y=0.1477x + 0.0422$, $R^2=0.999$) oluşturulmuştur (Şekil 6).



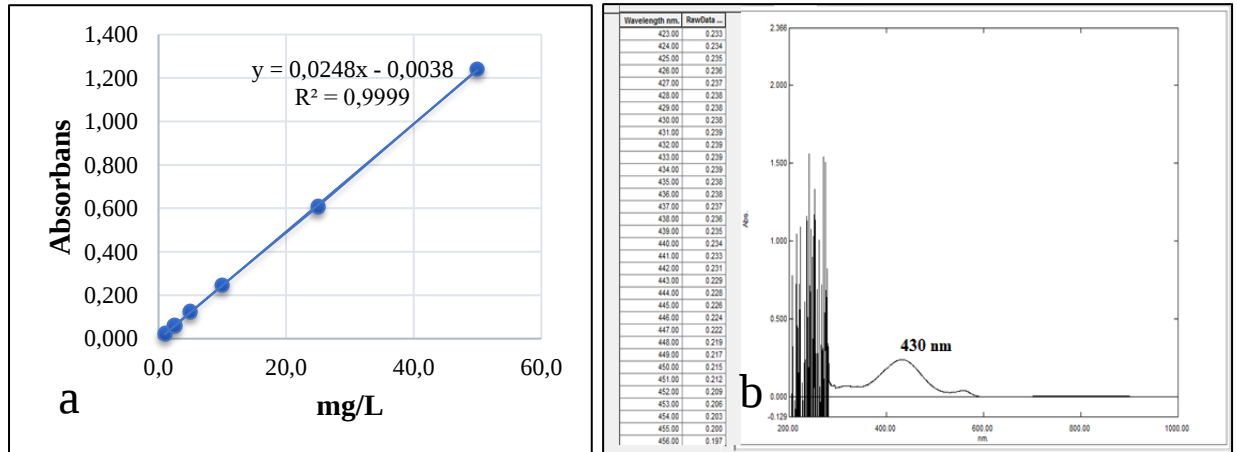
Şekil 6. Metilen mavis kalibrasyon grafiği (a) ve verdiği maksimum absorbansı (b)

Malaşit yeşili boyasının maksimum absorpsiyon dalga boyunun belirlenmesi için, 5.0 mg/L konsantrasyonundaki çözeltiden yararlanılarak 200–1000 nm aralığında spektral tarama gerçekleştirilmiştir. Yapılan tarama sonucunda, malaşit yeşili boyasının maksimum absorbans değerinin 617 nm dalga boyunda olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 ve 25.0 mg/L konsantrasyonlarındaki çözeltiler kullanılarak bir kalibrasyon eğrisi ($y= 0.353x - 0.0114$, $R^2=0.998$) oluşturulmuştur (Şekil 7).



Şekil 7. Malaşit yeşili kalibrasyon grafiği (a) ve verdiği maksimum absorbanşı (b)

Fenol kırmızısı boyasının maksimum absorpsiyon dalga boyunun belirlenmesi amacıyla, 5.0 mg/L konsantrasyonundaki çözeltiden faydalanılarak 200–1000 nm aralığında spektral tarama yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, fenol kırmızısı boyasının maksimum absorbanş değerinin 430 nm dalga boyunda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 ve 25.0 mg/L konsantrasyonlarındaki standart çözeltiler kullanılarak bir kalibrasyon eğrisi oluşturulmuş ve bu eğri $y=0.0248x-0.0038$ formülü ile ifade edilmiştir ($R^2 = 0.9997$) (Şekil 8).



Şekil 8. Fenol kırmızısı kalibrasyon grafiği (a) ve verdiği maksimum absorbanşı (b)

2.2. Adsorpsiyon Hesaplamaları

Bu çalışmada, FeONP üzerinde boyar madde adsorpsiyonuna ilişkin hesaplamalar belirli matematiksel denklemler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, çözelti

içerisindeki kalan boya konsantrasyonu (C_e) absorbans verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Ardından, adsorpsiyon verimi (%) ve birim adsorban başına adsorplanan boya miktarı (Q_e , mg/g) aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir. Tüm deneyler en az üç paralel olarak yürütülmüş, elde edilen sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde raporlanmıştır. Aşağıda verilen formüller kullanılarak (Eşitlik 1-3) gerekli hesaplamalar yapılmıştır (Bozbeyoğlu vd., 2022;Demirel vd., 2024).

$$Kalan\ boya = \left(\frac{mg}{L}\right) = (A - b)/E \quad (Eşitlik\ 1)$$

A: absorbans

b: y kesen

E: eğim

Adsorpsiyon % miktarı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı (Eşitlik 2).

$$Adropsiyon\ (\%) = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0}\right) \times 100 \quad E \quad (Eşitlik\ 2)$$

C_0 : Başlangıç adsorbant konsantrasyonu (mg/L)

C_e : Dengede çözeltide adsorplanmadan kalan adsorbant miktarı (mg/L)

Tüm deneyler en az üç paralel olarak gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler ortalama değerler ve bunlara ait standart sapmalar şeklinde raporlanmıştır. Çözelti fazında adsorplanmadan kalan boya konsantrasyonu (C_e) kullanılarak, 1 g FeONP tarafından adsorplanan boya miktarı (mg/g) Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır.

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (Eşitlik\ 3)$$

C_0 : Başlangıç adsorbant konsantrasyonu (mg/L)

C_e : Dengede çözeltide adsorplanmadan kalan adsorbant miktarı (mg/L)

Q_e : 1 g FeONP'nin tuttuğu boya miktarı (mg/g)

m : Adsorban miktarı (g)

V : Adsorbant hacmi (mL)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

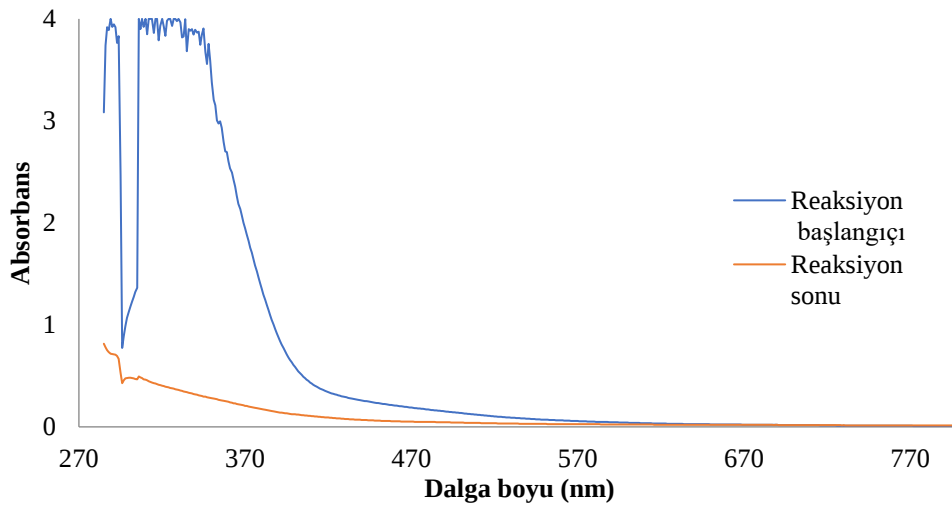
3.1. Demir Oksit Nanopartiküllerin Karakterizasyonu

3.1.1. UV-Vis Spektroskopisi ile FeONP Sentezinin Değerlendirilmesi

R. pseudoacacia meyve örnekleri toz haline getirildikten sonra uygun yöntemle elde edilen ekstraktlardan FeONP'leri üretme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun neticesinde FeONP'lerin sentezlenip sentezlenmediği noktası çalışmanın sürdürülebilirliği açısından test edilmiştir. Siyaha yakın bir renk oluşumu gözlenmiş (Şekil 9) ve bu durum FeONP'lerin oluştuğunun bir göstergesi olarak kabul görmektedir (Njagi vd., 2011; Aydoğan vd., 2022).

Şekil 9'da spektrum analizinde dikkat çeken en önemli bulgu, reaksiyon başlangıcında yüksek absorban değerleri gözlenirken, reaksiyon tamamlandığında absorbanın belirgin şekilde azalmasıdır. Bu durum, sentez sürecinde meydana gelen temel kimyasal değişimleri yansıtmaktadır.

Reaksiyonun başlangıç aşamasında ölçülen yüksek absorban değerleri, bitki ekstraktında bulunan organik bileşiklerin (fenolikler, flavonoidler vb.) optik özellikleriyle ilişkilidir. Bu bileşikler, UV-Vis bölgede güçlü adsorpsiyon yapma eğilimindedir. Ancak reaksiyon ilerledikçe, bu organik bileşikler demir iyonlarıyla etkileşerek nanoparçacık oluşumunda görev almakta ve böylece çözeltideki serbest organik madde konsantrasyonu azalmaktadır (Şekil 9).



Şekil 9. FeONP biyosentezi sırasında UV-Vis adsorban değerlerinin zamanla değişimi:

Reaksiyon başlangıcı ve sonu karşılaştırması

Reaksiyon sonunda absorbansın düşmesi, iki önemli olayın göstergesidir:

- Bitki ekstraktındaki indirgeyici ajanların demir iyonlarıyla reaksiyona girerek tükenmesi,
- Oluşan demir oksit nanoparçacıklarının, başlangıçtaki organik bileşiklere kıyasla farklı optik özellikler sergilemesi.

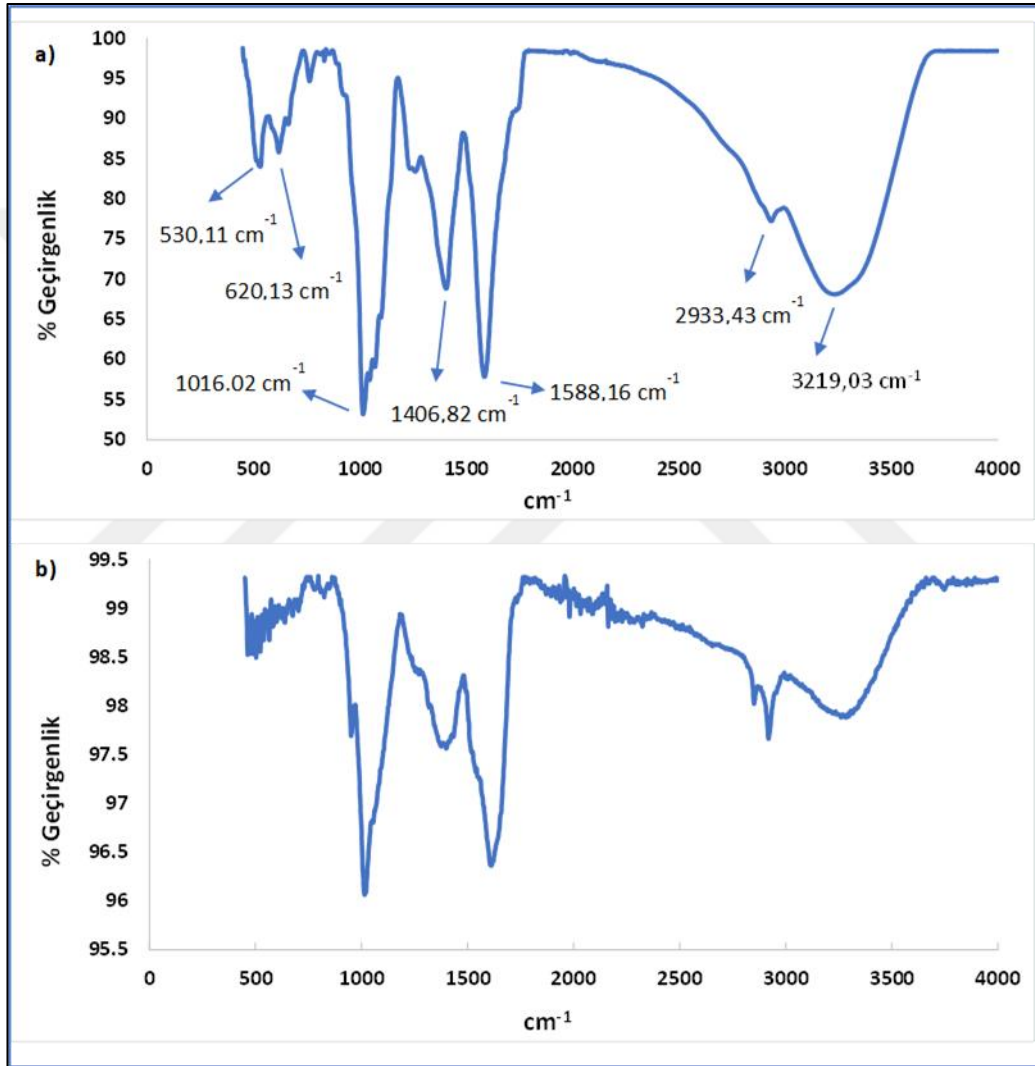
Özellikle 400-500 nm bölgesindeki absorbans değişimi, demir oksit nanoparçacıklarının karakteristik özelliklerini yansıtmaktadır. Absorbansın genel olarak azalma eğilimi, sentez sürecinin başarıyla tamamlandığını ve reaksiyon karışımındaki serbest organik bileşiklerin büyük ölçüde tükendiğini göstermektedir. Bu spektral değişimler, bitki ekstraktı kullanılarak gerçekleştirilen yeşil sentez yönteminin etkinliğini ortaya koymaktadır (Şekil 9). Reaksiyon sonunda elde edilen düşük absorbans değerleri, stabil nanoparçacık dispersiyonunun oluştuğuna işaret etmekte ve bu da %1.24'lük verimle uyumlu bulgular sunmaktadır. Sonuç olarak, UV-Vis spektrumundaki bu dinamik değişimler, biyolojik indirgeyici ajanlar kullanılarak kontrollü nanoparçacık sentezi yapılabileceğini göstermektedir.

3.1.2. Fourier-Transform Infrared (FT-IR) Spektrofotometre Analizi

FTIR analizi, bitki ekstraktı ve sentezlenen demir nanopartikülde bulunan fonksiyonel grupların belirlenmesi için kullanılmıştır. Bitki ekstraktının ve demir nanopartikülün FTIR spektrumu Şekil 10'da gösterilmiştir. 3300-3500 cm^{-1} aralığında özellikle ekstrakta (a) geniş bir bant gözlemlenmiştir ki bu, fenolik bileşenlerden kaynaklanan O-H (hidroksil) gerilme titreşimini gösterir. Demir nanopartikülde ise bu bölgede hafif kayma ve zayıflama görülmektedir. Buda O-H gruplarının demir iyonları ile etkileşime geçerek nanoparçacık yüzeyine bağlandığını gösterir. 1600-1700 cm^{-1} aralığında ekstrakta, karbonil (C=O) grubuna ait belirgin bir pik mevcuttur. Bu, karboksilik asit, keton veya aldehit gibi bileşikler gösterir. Aynı zamanda aromatik C=C bağları ya da amin gruplarına ait N-H bükülme titreşimleri bu bölgede yer alır. Demir nanopartikülde ise bu bölgede ki piklerin şiddeti azalmış ya da kaymış olarak görülür. Buda karbonil grubunun demir ile koordinasyon oluşturduğunu, yani nanoparçacıklara bağlandığını gösterir. 1000-1300 cm^{-1} aralığında, ekstrakta C-O ve C-N gerilme titreşimlerine ait pikler gözlemlenir. Bu, alkol, ester ya da amin gruplarının varlığını gösterir. FeONP örneğinde de bu bantlar mevcuttur, ancak şiddetlerinde farklılıklar vardır. Bu durum, bu grupların nanoparçacıkları stabilize edici ajanlar olarak bağlandığını gösterir. 500-600 cm^{-1} aralığında, demir nanopartikülde bu bölgede belirgin bir pik

görülmez. Ekstrakta bu bölgede yeni bir pik oluşmuştur. Bu, Fe–O bağlarına ait karakteristik bir banttır ve demir oksit nanoparçacıklarının oluştuğunu gösterir.

Bitki ekstraktı hem indirgeme ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ veya FeO) hem de stabilizasyon ajanı olarak davranmıştır. FeONP spektrumundaki yeni ve değişen bantlar, ekstrakt moleküllerinin nanoparçacık yüzeyine bağlandığını ve Fe–O bağlarının oluştuğunu açıkça göstermektedir. Bu değişimler, başarılı bir biyosentetik nanoparçacık üretimi yapıldığının kanıtıdır.

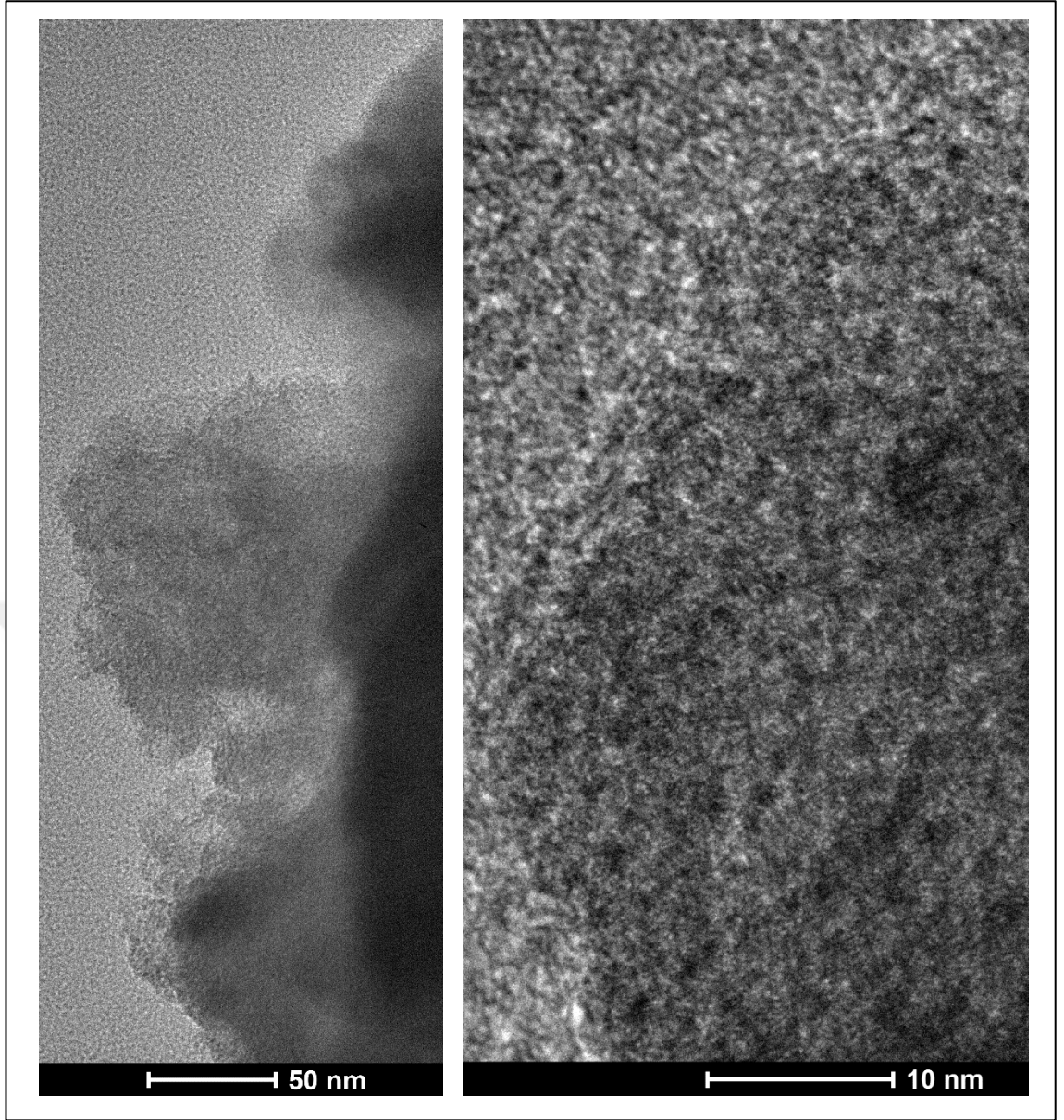


Şekil 10. Ekstraktın (a) ve demir nanopartikülün (b) FT-IR spektrumları

3.1.3. FeONP'lerin TEM ve EDX Analizleri

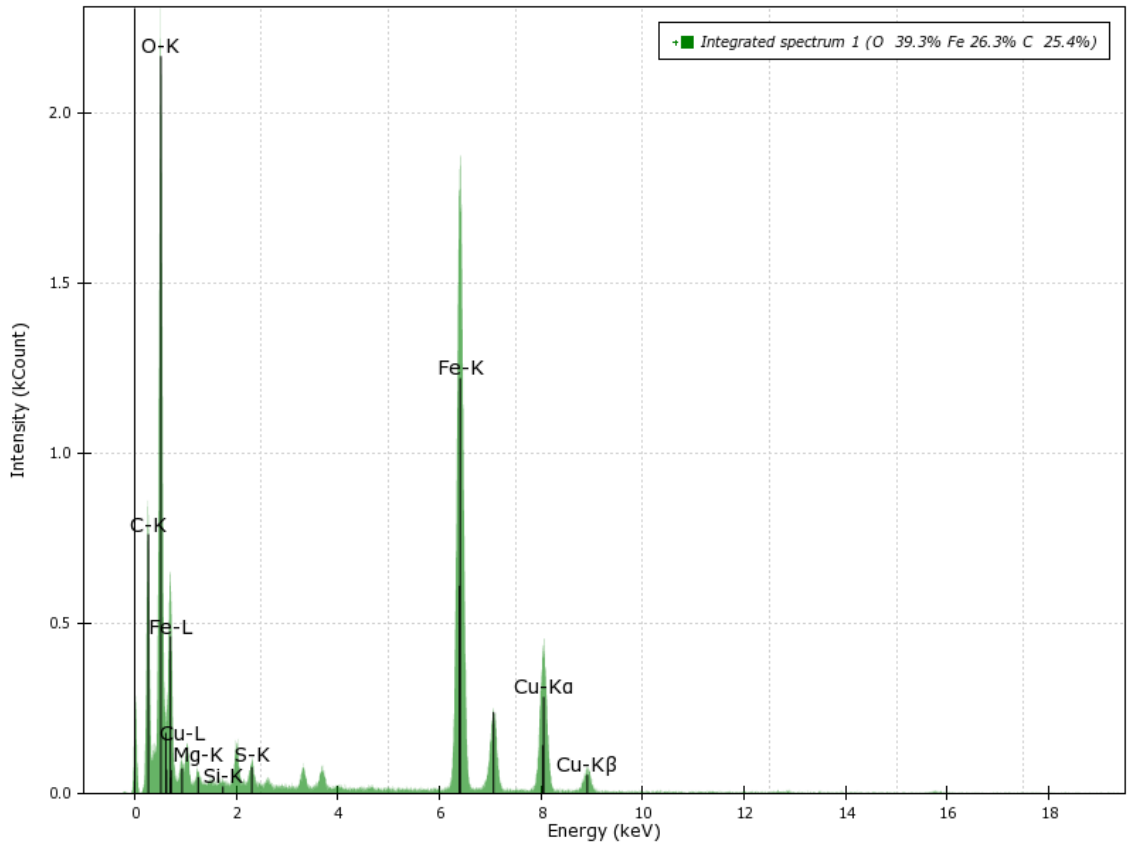
TEM, nanoteknoloji araştırmalarında yapısal ve kimyasal analiz açısından benzersiz çözünürlük sunan en güçlü karakterizasyon tekniklerinden biridir. Nanopartikül boyutu, morfolojisi, kristal yapısı ve faz dağılımı gibi parametrelerin atomik düzeyde değeriendirilmesi ancak TEM gibi gelişmiş cihazlarla mümkün olabilmektedir. TEM cihazı kullanılarak nanoparçacıklar, nanotüpler, grafen, grafen oksit ve polimer nanokompozitler gibi çeşitli malzemelerin mikroyapısal özellikleri belirlenebilmektedir. Bu yönleriyle TEM, nanomalzemelerin anlaşılması ve fonksiyonel özelliklerinin yönlendirilmesinde temel bir araç konumundadır (Asadabad ve Eskandari 2015). Meyve ekstraktlarından sentezlenen FeNOP'lerin geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri Şekil 11'de sunulmuştur. Görüntülerde, nanopartiküllerin boyutlarının 10 nm'nin altında olduğu gözlemlenmektedir.

Literatürde nanopartiküler boyutlarına göre sınıflandırılmış ve bu sınıflandırmada 50 ila 180 nm arasında olanlar “süperparamanyetik demir oksit nanopartiküller (SPION'lar)”, çapı 10 ila 50 nm arasında olanlar “ultra küçük süperparamanyetik demir oksit nanopartiküller (USPION)” olarak sınıflandırılırken, 10 nm'den daha küçük çapta olanlar ise “ok küçük SPION” olarak tanımlanmaktadır (Sharma ve Sharma 2017). SPION'lar γ -Fe₂O₃ (maghemite) veya Fe₃O₄ (magnetite) partikülleridir (Wahajuddin ve Arora, 2012). Çalışmada sentezlenen nanopartiküler Fe₃O₄ olması nanopartikküllerin SPION boyutlarında ölçölmesi ile uyumludur. Parçacık boyutu manyetik özellikleri önemli ölçüde etkiler, daha küçük nanopartiküller (NP'ler) daha büyük bir göreceli yüzey alanı sergiler bu da maddelerin taşınmasında (Losito vd., 2024) ve kirleticileri adsorpsiyonunda avantaj sağlar (Doan, 2023). Mevcut çalışmada boya gideriminde adsorpsiyon yüzdelerinin çok yüksek düzeyde olması bu nanopartikül oluşumlarının sonucu ile uyum göstermektedir.



Şekil 11. FeONP'lerin Geçirimli Elektron Mikroskop (TEM) görüntüleri

Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) mikro analiz yöntemi, örneklerde bulunan elementlerin tespiti amacıyla, karakteristik X-ışınlarının oluşumuna dayanan ve bir elektron mikroskobuna (SEM, TEM) dahil edilen bir elementel analiz tekniği olarak ifade edilebilir (Scimeca vd., 2018). Enerji EDX spektroskopisi, nanopartiküllerin elementel bileşimini belirlemek için kullanılır ve bu sayede sentezin başarılı olup olmadığına dair kanıtlar sağlar (Hussain vd., 2010; Titus vd., 2019). FeONP'lere ait EDX analiz sonuçları Şekil 12 ve Tablo 1'de sunulmuştur



Şekil 12. FeONP'lerin EDX analizleri

Enerji dağılımlı X-ışını (EDX) spektroskopisi ile yapılan analiz sonucunda, FeONP'lerin elementel bileşimin yüzde olarak büyük oranda (O) oksijen, karbon (C) ve (Fe) demir ve içerdiği belirlenmiştir. Atomik yüzdelere olarak, oksijen %39.32, karbon %25.38 ve demir %26.34 oranında tespit edilmiştir. Kütle yüzdesinde ise demirin baskın bir şekilde %48.81 ile öne çıkmıştır. Demir elementini ise sırasıyla oksijen (%23.50), bakır (%14.68) ve karbon (%11.18) izlemektedir. Magnezyum, silisyum ve sülfür elementleri, hem atom yüzdesi (sırasıyla %0.64, %0.26 ve %0.94) hem de kütle yüzdesi (sırasıyla %0.54, %0.25 ve %1.04) açısından değerlendirildiğinde, FeNP'lerde eser miktarlarda tespit edilmiştir.

Tablo 1. FeNP'lerin EDX analiz sonuçları

Atom	Element	Atom (%)	Kütle (%)
6	Karbon	25.38	11.18
8	Oksijen	39.32	23.50
12	Magnezyum	0.64	0.54
14	Silisyum	0.26	0.25
16	Sülfür	0.94	1.04
26	Demir	26.34	48.81
29	Bakır	7.13	14.68

Nanopartikül numunelerinde demir ve oksijen elementlerinin yüksek miktarlarda tespit edilmesi nanopartikülün yapısında demir oksitin (Fe_3O_4) olduğunu desteklemektedir (Winsett vd., 2019). Birçok çalışmada mevcut çalışmadan elde edilen verilerle uyumlu sonuçlar kaydedilmiştir. Örneğin, bitkilerden sentezlenen demir oksit nanopartiküllerinde demir ve oksijen atom yüzdeleri sırasıyla neem ağacı (*Azadirachta indica* A.Juss) yapraklarında %33,29 ve %66,71 (Zambri vd., 2019), ateş diken bitkisi meyvelerinde (*Pyracantha coccinea* Roem.) % 14.21 ve 47.33 (Karakullukçu vd., 2023), algal biyofilmde %8.65 ve %50.55 (Demirel vd., 2024), *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms bitkisi yaprağında %77.08 ve %22.97 (Jagathesan, G. ve Rajiv, 2018) şeklinde rapor edilmiştir.

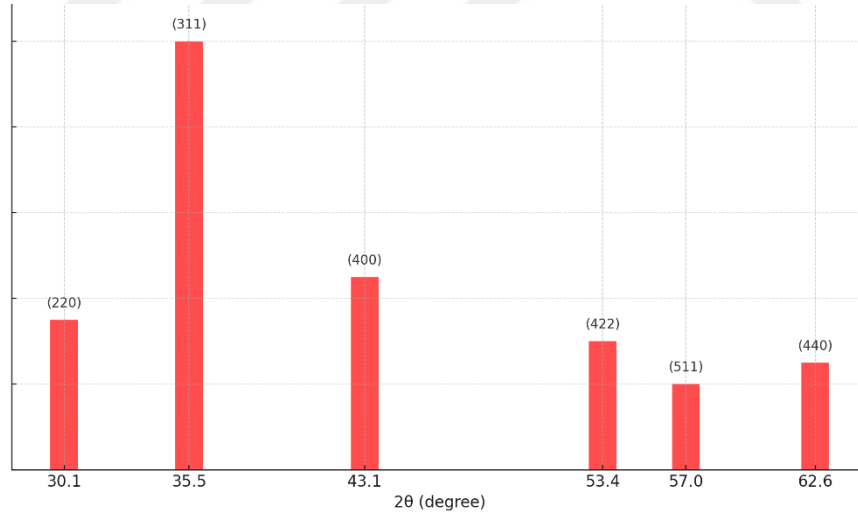
Karbon elementinin hem % atom hem de % kütle açısından oksijen ve demirden sonra gelmesi ve oransal olarak kayda değer miktarda olması bu elementin FeONP'nin önemli bir bileşeni olduğunu göstermektedir. Karbon elementi nanopartikülün yapısında bulunuyor olmasının muhtemel nedeni yeşil sentezde kullanılan bitki özütünün içerdiği organik bileşiklerin demir nanopartikül yüzeyini kaplamasıdır. Biyolojik yöntemlerde bitki ekstraktına dayalı metal nanopartikül sentezinde, fenolik bileşikler, flavonoidler, alkaloidler ve tanenler gibi fitokimyasalların indirgeme, stabilize etme ve kapatma kapasitesinden yararlanılmaktadır. Bitki özütünden elde edilen doğal kapatma ajanları stabiliteyi artırarak agregasyona karşı koruyucu bir tabaka oluşturarak direnç sağlar (Praharaj vd. 2025). Nitekim yeşil sentezle alakalı yapılan çalışmalarda demir nanopartikülün içeriğindeki karbon elementi oranları hem bitkinin türüne, kısmına hem de uygulanan yeşil sentez yöntemindeki şartların değişimine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Mango kabuğu ekstraktlarından elde edilen FeONP'lerde oransal ağırlık olarak demir (%48.5) ve oksijenden (%34.06) sonra karbon elementi %14.95 (Desalegn vd., 2019), algal biyofilmden elde edilenlerde %40.79 (Demirel vd., 2024), *Pyracantha coccinea* Roem. meyvesinden üretilen demir nanopartiküllerde %38.46 (Karakullukçu vd., 2023) ve atık çay ekstraktlarında ise % 16.22 olarak tespit edilmiştir (Gautam vd., 2018).

FeONP'de % atom ve % kütle olarak kayda değer miktarda tespit edilen bakır elementi EDX analizinde kullanılan bakır gridden kaynaklanmaktadır (Król-Gracz vd., 2011). EDX analizinde oransal olarak düşük miktarlarda tespit edilen sülfür elementi, sentezde kullanılan FeSO_4 öncül bileşiğinden kaynaklanmaktadır. Benzer bir bulguya Da'na (2018) çalışmasında da yer verilmiş ve sülfür oluşturduğu pikin FeSO_4 kaynaklı sülfat grubuna ait olduğu belirtilmiştir. Yeşil sentezle elde edilen FeONP'lerin EDX

analizinde tespit edilen eser miktardaki silisyum ve magnezyum elementleri mevcudiyeti, bitki ekstraktından, laboratuvar cam malzemelerinden veya sentez ya da numune hazırlığı sırasında oluşabilecek küçük çevresel kontaminasyonlardan kaynaklanması muhtemeldir. Elde edilen bu bulgular, demir oksit nanoparçacıklarının başarıyla sentezlendiğini ve oksitlenmiş bir yapıya sahip olduklarını göstermektedir.

3.1.3. FeONP'lerin XRD Analizleri

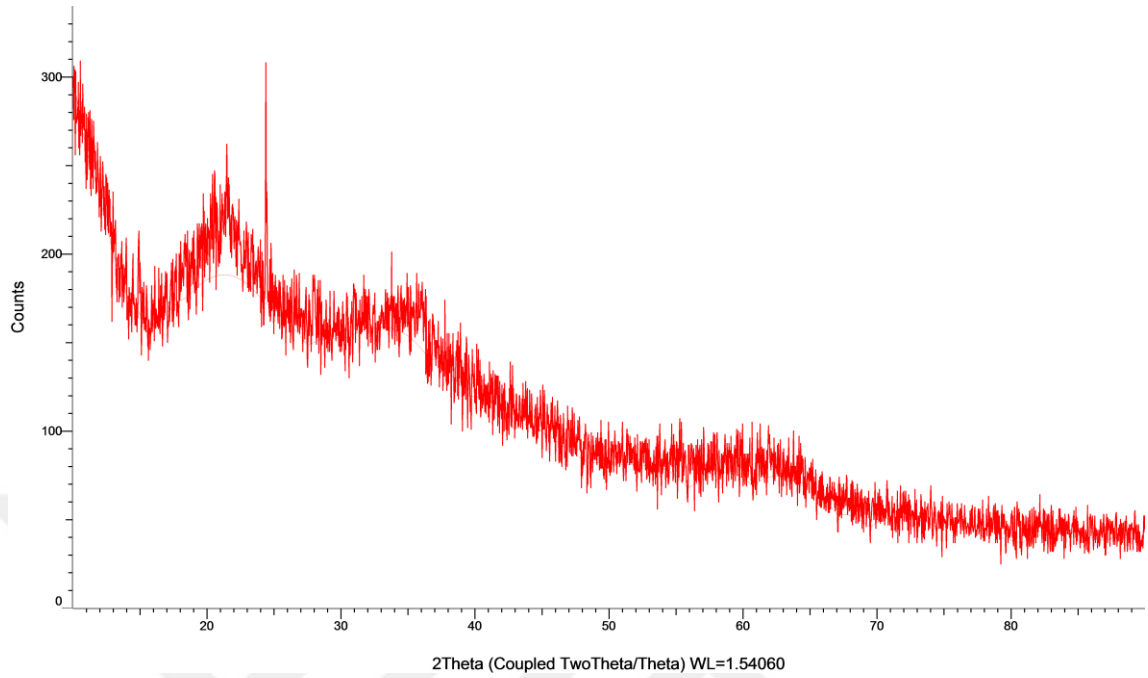
Metal nanopartiküllerin karakterizasyon teknolojileri arasında, X-ışını teknikleri kompozisyon, kristal yapı, yüzey durumu, bağlanma ortamı ve fiziksel özelliklerin değerlendirilmesini sağlar. X-ışını kırınımı (XRD), nanopartiküllerin kristal fazının ve kristalliğinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden birisidir (Dao vd., 2015). Mevcut çalışmada, *R. pseudoacacia* meyve ekstraktları kullanılarak yeşil sentez yolu ile üretilen demir oksit (Fe_3O_4) nanopartiküllerinin kristal yapısı, X-ışını kırınımı (XRD) deseni ile incelenmiştir. Öncelikle Şekil 13'de JCPDS Kart No: 19-0629'a (Fe_3O_4 – manyetit) ait teorik XRD pikleri gösterilmiştir. Teorik piklerin 2θ değerleri ve karşılık gelen Miller indisleri sırasıyla şöyledir: 30.1° (220), 35.5° (311, en yüksek yoğunluklu pik), 43.1° (400), 53.4° (422), 57.0° (511) ve 62.6° (440).



Şekil 13. Fe_3O_4 JCPDS Kart No: 19-0629'a ait XRD pik konumları ve yoğunlukları

Mevcut çalışmada XRD analizleri sonucunda elde edilen XRD deseni şekil 14'de gösterilmiştir. JCPDS 19-0629'a ait teorik piklerin olduğu 2θ bölgelerinde, belirgin ve keskin pikler yerine geniş ve bastırılmış sinyaller olduğu gözlemlenmiştir. Bu XRD deseni, amorf yapının baskın olduğu, ancak Fe_3O_4 'e ait iz kristallik gösterebilecek bazı zayıf sinyaller içeren bir sistem olduğunu göstermektedir. Meyve ekstraktları kullanılarak

üretileen demir nanopartiküllerinde, X-ışını kırınımı (XRD) desenlerinin genellikle amorf yapıyı işaret ettiğı bildirilmektedir.



Şekil 14. FeNP'lere ait XRD deseni

Örneğın *Pyracantha coccinea* meyvelerinden elde edilen demir nanoparçacıklarının XRD deseninde, demir oksit nanoparçacıklarına özgü karakteristik pikler yerine amorf yapıya ait geniş bantlar gözlemlenmiştir (Karukullukçu et al., 2023). Benzer şekilde mango yaprakları, gül yaprakları, neem yaprakları ve karanfil tomurcukları kullanılarak sentezlenen demir nanopartiküllerinin XRD desenlerinde Fe_3O_4 'ün karakteristik pikleri belirgin bir şekilde tespit edilmiştir. Ancak bu çalışmada meyve içeriğine sahip tek kaynak olan ajwain tohumlarıyla üretilen nanopartiküllerde, yalnızca zayıf bir pik gözlemlenmiş ve kristallik derecesinin oldukça düşük olduğu, biyopolimerlerin kaplayıcı etkisi nedeniyle tipik bir biyosentezli amorf yapı oluştuğı bildirilmiştir (Afsheen et al., 2018). Literatürde, yalnızca bitkilerin yaprak, tohum veya çiçek gibi (Kouhbanani et al., 2019; Góral-Kowalczyk et al., 2024) diğerkısımlarından değil, meyve kısımlarından elde edilen ekstraktlarla sentezlenen demir nanoparçacıklarının da amorf yapıda olabileceğine dair bulgular mevcuttur. Örneğın *Dipteryx alata* Vogel meyvesinden elde edilen ekstraktla sentezlenen demir nanoparçacıklarında, XRD deseni amorf karakter göstermiştir (Corrêa et al., 2024). Bu bulgular, meyve ekstraktlarının içerdiği zengin biyopolimer yapılar nedeniyle kristal çekirdeklenmenin kısıtlanabileceğini ve bu durumun kristallenme üzerinde olumsuz bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Meyve

ekstraktları flavonoidler, fenolik asitler, karbonhidratlar, proteinler ve organik asitler gibi çok çeşitli biyoaktif bileşenler içerir. Bu maddeler demir iyonlarını indirgerken aynı zamanda yüzey kaplama ajanı gibi davranarak çekirdek büyümesini sınırlar. Bu da kristalin yapının tam oluşmasını engeller.

3.2. Boya Adsorpsiyon Çalışmaları

Üç farklı boya çözeltisi MM (pH 4.88), MY (pH 3.02) ve FR (pH 3.76) kullanılarak, MY ve PR için 2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 40.0, 100.0, 250.0 7 farklı boya çözeltisi, MM için ise bunlara ilave olarak 500.0 ve 1000.0 mg/L konsantrasyonlarında dokuz farklı boya çözeltisi elde hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözeltiler, sırasıyla 5.0 g/L, 10.0 g/L ve 20.0 g/L konsantrasyonlarında FeONP (demir nanoparçacıkları) ile 12 saat süreyle temas ettirilmiştir. Adsorpsiyon işlemi tamamlandıktan sonra, çözeltiler süzülerek adsorplanmadan kalan boya miktarları, UV-Görünür Bölge (UV-Vis) spektrofotometresi kullanılarak kantitatif olarak belirlenmiştir.

3.2.1. FeONP ve FeONP Sentezinde Kullanılan Toz Meyve Materyalinin Metilen Mavisi (MM) Adsorpsiyon Kapasitesinin Değerlendirilmesi

Elde edilen veriler Tablo 2 de verilmiş olup, bu tablolarda farklı başlangıç metilen mavisi (MM) konsantrasyonlarında çözeltilerde kalan boya miktarları ve buna bağlı olarak hesaplanan yüzde adsorpsiyon (%Adsorpsiyon) değerleri yer almaktadır. Bu verilerden yararlanılarak, gram adsorban başına adsorplanan boya miktarları Q_e (mg/g) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

Çözeltide adsorpsiyon işlemi sonrasında kalan MM derişimleri dikkate alınarak, 1.0 g FeONP başına adsorplanan MM miktarları (mg/g) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, adsorpsiyon kapasitesinin nicel değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda, farklı başlangıç konsantrasyonlarındaki MM çözeltileri ile yapılan adsorpsiyon testleri sonucunda FeONP'lerin adsorpsiyon kapasitesi belirlenmiş ve konsantrasyona bağlı değişimi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üretilen FeONP'nin metilen mavisi üzerindeki adsorplama performansının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamış ve nanopartiküllerin etkinliği hakkında önemli bilgiler sunmuştur.

Tablo 2. Farklı konsantrasyonlardaki FeONP' lerin MM adsorplama oranı

	1.25 g/L		2.50 g/L		5.00 g/L		1.25 g/L		2.50 g/L		5.00 g/L	
C ₀ mg/L	C _e mg/L		C _e mg/L		C _e mg/L		% Ads.		% Ads.		% Ads.	
2.50	0.01	±0.01	0.04	±0.01	0.07	±0.01	97.06	±0.26	98.52	±0.30	99.46	±0.26
5.00	0.14	±0.01	0.07	±0.02	0.02	±0.00	97.29	±0.07	98.62	±0.20	99.60	±0.37
10.00	0.28	±0.01	0.21	±0.04	0.16	±0.02	97.19	±0.11	97.94	±0.19	98.39	±0.19
20.00	0.47	±0.02	0.37	±0.03	0.37	±0.02	97.65	±0.11	98.13	±0.06	98.16	±0.65
40.00	1.00	±0.01	0.87	±0.03	0.71	±0.10	97.83	±0.03	97.50	±0.05	98.21	±0.24
100.00	3.39	±0.02	3.17	±0.05	1.68	±0.21	96.61	±0.02	96.83	±0.03	98.32	±0.21
250.00	23.32	±0.22	22.05	±0.03	13.18	±0.10	90.67	±0.09	91.18	±0.01	94.73	±0.04
500.00	196.58	±0.07	52.96	±0.12	48.72	±0.07	60.68	±0.01	89.41	±0.02	90.26	±0.01
1000.00	440.91	±0.67	261.53	±0.97	69.98	±0.37	55.91	±0.07	73.85	±0.10	93.00	±0.04

Ads. : Adsorpsiyon

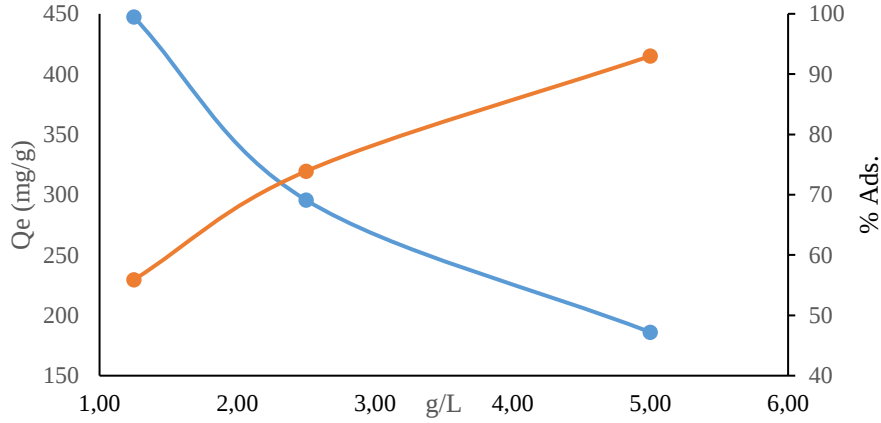
Adsorpsiyon verileri değerlendirildiğinde, düşük başlangıç konsantrasyonlarında (2.5–40 mg/L) tüm adsorban dozları için oldukça yüksek adsorpsiyon verimleri (%97'nin üzerinde) elde edildiği görülmektedir. Bu durum, sistemde mevcut aktif yüzey alanının düşük konsantrasyonlardaki kirleticileri tamamen tutmak için yeterli olduğunu göstermektedir. Adsorban miktarının artırılması, bu konsantrasyon aralığında adsorpsiyon veriminde yalnızca sınırlı bir artışa neden olmuş, bu da sistemin yüzey doyumuna ulaşmadan önce doygunluk eğilimi (plateau) gösterdiğine işaret etmektedir. Benzer şekilde, Padmavathy vd.. (2016) tarafından yapılan çalışmada, düşük başlangıç konsantrasyonlarında adsorban dozunun artırılmasının, adsorpsiyon verimi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı, çünkü tüm aktif bölgelerin hâlihazırda etkili bir biçimde kullanıldığı bildirilmiştir.

Orta düzey konsantrasyon aralığında (100–250 mg/L), özellikle düşük adsorban dozlarında adsorpsiyon yüzdesinde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu düşüş, 1.25 g/L'lik dozda yaklaşık %96 seviyesine kadar gerilerken, 5.00 g/L'lik dozda %98'in üzerinde sabit kalmıştır. Bu durum, daha yüksek adsorban dozlarının, sistemdeki fazla miktarda kirleticiyi uzaklaştırmak için daha fazla aktif yüzey sağlayarak adsorpsiyon kapasitesini koruduğunu göstermektedir. Çeşitli çalışmalarda da benzer şekilde, adsorban dozunun artırılmasının özellikle orta ve yüksek başlangıç konsantrasyonlarında daha etkili olduğu vurgulanmıştır (Vargas vd., 2011; Ho ve McKay, 1999).

Yüksek başlangıç konsantrasyonlarında (500–1000 mg/L) ise adsorban dozunun kritik bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. 1.25 g/L adsorban dozu kullanıldığında, adsorpsiyon yüzdesi %55.91'e kadar düşerken, 5.00 g/L dozunda bu değer %93'e ulaşmıştır. Bu fark, düşük adsorban dozunun sınırlı sayıda aktif bölge sunması nedeniyle yüksek kirletici yükünü karşılayamamasıyla açıklanabilir. Öte yandan, daha yüksek dozların sunduğu geniş yüzey alanı ve daha fazla bağlanma noktası, adsorpsiyon kapasitesinin korunmasına ve verimliliğin yüksek düzeyde sürdürülmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum, Langmuir izoterm teorisiyle de örtüşmektedir; bu teoriye göre sınırlı sayıda aktif bölge bulunduğunda, bu bölgeler doyduktan sonra adsorpsiyon verimi doygunluğa ulaşır ve artış sınırlı kalır (Langmuir, 1918).

Genel olarak değerlendirildiğinde, adsorban dozunun artırılması, özellikle yüksek başlangıç konsantrasyonlarında sistemin performansını optimize etmek için kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Adsorpsiyon yüzdesindeki düşüşün minimize edilmesi ve daha yüksek verimliliğin sürdürülebilmesi açısından adsorban dozunun yeterli düzeyde seçilmesi gereklidir. Literatürde de sıklıkla belirtildiği üzere, optimal adsorban miktarının belirlenmesi hem ekonomik hem de proses verimliliği açısından önem arz etmektedir (Foo ve Hameed, 2010).

Şekil 15'de görüldüğü gibi, artan adsorban miktarıyla % MM adsorpsiyonu artış gösterirken, gram adsorban başına adsorplanan MM miktarında düştüğü görülmektedir. Çünkü şekilden de görüleceği gibi % artış miktarı doğrusal olmadığı görülmektedir. Grafikte yer alan verilere göre, adsorban dozunun artırılması hem adsorpsiyon verimi (% adsorpsiyon) hem de birim kütle başına adsorpsiyon kapasitesi (Q_e) üzerinde belirgin etkiler göstermektedir. Adsorban dozu arttıkça, yani sistemde daha fazla yüzey alanı ve aktif bağlanma noktası sunuldukça, toplam adsorpsiyon verimi anlamlı şekilde artmaktadır. Bu durum, özellikle kirletici maddelerin daha etkin uzaklaştırılmasını sağladığı için çevresel uygulamalarda arzu edilen bir etkidir. Nitekim 1.25 g/L adsorban dozu ile %55.91 olan uzaklaştırma verimi, 5.00 g/L doz seviyesinde %93'e kadar yükselmektedir. Bu sonuç, adsorban dozunun artırılmasının, çözeltideki kirleticilerin daha büyük kısmının tutulmasına olanak sağladığını göstermektedir.



Şekil 15. 1000 mg/L sulu çözeltide MM' nin FEONP ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi

Öte yandan, adsorban dozunun artırılmasıyla birlikte birim adsorban başına düşen adsorpsiyon kapasitesi (Q_e) azalma eğilimi göstermektedir. Başka bir deyişle, sistemdeki toplam çözünmüş madde miktarı sabit olduğundan, artan adsorban kütlesi bu yükü daha geniş bir yüzeye yayar ve böylece bir gram adsorban başına düşen adsorplanan madde miktarı azalır. Bu, adsorbanın daha az “verimli” kullanılması anlamına gelir. Örneğin 1.25 g/L ile elde edilen 447.27 mg/g Q_e değeri, 5.00 g/L’de 186 mg/g’ye kadar düşmektedir. Bu eğilim, literatürde “doygunluk etkisi” veya “fazla adsorban kullanımı” olarak adlandırılmakta ve sıkça rapor edilmektedir (Zhang vd., 2024; Khenifi vd., 2010).

Bu verilere gör, düşük dozda yüksek Q_e elde edilmesi ekonomik açıdan avantaj sağlarken, yüksek dozda yüksek adsorpsiyon verimi çevresel açıdan daha etkili sonuçlar sunmaktadır. Dolayısıyla uygulama hedeflerine göre doz optimizasyonu yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Adsorpsiyon sistemlerinde bu tür eğilimler, adsorbanın yüzey özellikleri, aktif bölge yoğunluğu ve çözeltideki başlangıç konsantrasyonla yakından ilişkilidir. Hem verim hem de kapasite yönünden etkili bir süreç tasarımı için bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi büyük önem taşır.

Öğütülerek 0.125 mikron elekten geçirilen hammaddenin (meyveden elde edilmiş toz) adsorban olarak kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmada, farklı başlangıç boya konsantrasyonlarında (2.5–1000.0 mg/L) ve üç farklı adsorban dozunda (5.0, 10.0 ve 20.0 g/L) yapılan deneylerin sonuçları Tablo 3’de sunulmuştur. Deneysel veriler, adsorban dozunun ve başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon verimliliği üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Farklı konsantrasyonlardaki *Robinia pseudoacacia* meyvesinin toz materyalinin MM adsorplama oranı

	5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L		5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L	
C ₀ mg/L	C _e mg/		C _e mg/L		C _e mg/L		% Ads.		% Ads.		% Ads.	
2.50	0.00	±0.00	0.01	±0.01	0.02	±0.02	99.97	±0.26	99.78	±0.30	99.82	±0.26
5.00	0.05	±0.02	0.04	±0.03	0.02	±0.10	99.04	±0.20	99.22	±0.37	99.54	±0.07
10.00	0.36	±0.22	0.03	±0.05	0.02	±0.21	96.40	±0.11	99.65	±0.19	99.77	±0.19
20.00	0.24	±0.07	0.22	±0.03	0.49	±0.10	97.55	±0.11	98.82	±0.65	98.91	±0.06
40.00	0.52	±0.01	0.37	±0.12	0.08	±0.05	98.69	±0.03	99.08	±0.05	99.79	±0.24
100.00	1.35	±0.01	0.80	±0.04	0.85	±0.03	98.65	±0.02	99.20	±0.03	99.15	±0.21
250.00	2.98	±0.01	1.17	±0.03	0.94	±0.05	98.81	±0.09	99.53	±0.01	99.63	±0.04
500.00	62.66	±0.02	46.46	±0.04	44.61	±0.03	87.47	±0.01	90.71	±0.02	91.08	±0.01
1000.00	330.01	±0.54	292.36	±0.95	245.69	±0.34	67.00	±0.07	70.76	±0.10	75.43	±0.04

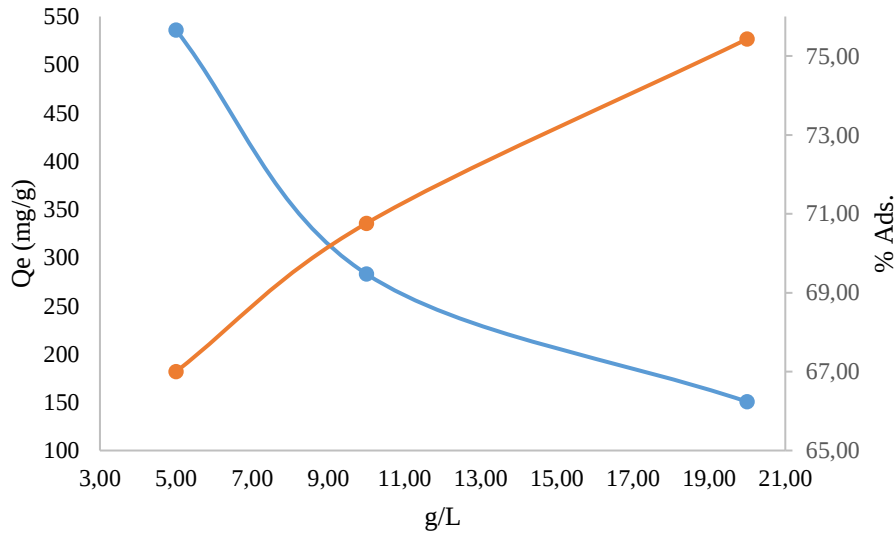
Ads. : Adsorpsiyon

Düşük başlangıç konsantrasyonlarında (2.5–10.0 mg/L), tüm adsorban dozlarında oldukça yüksek oranda boya uzaklaştırılması gerçekleşmiş; adsorpsiyon verimleri %96.4 ile %99.82 arasında değişmiştir. Özellikle 10.0 ve 20.0 g/L adsorban dozlarında neredeyse tam adsorpsiyon gözlenmiş olup, bu durum düşük derişimlerde adsorban yüzeyindeki aktif bölgelerin boya molekülleriyle etkin şekilde etkileşime girdiğini göstermektedir. Bu seviyelerde denge konsantrasyonlarının sıfıra yakın olması, adsorpsiyon kapasitesinin boya moleküllerinin tamamını yüzeye bağlayabilecek yeterlilikte olduğunu işaret etmektedir.

Orta düzeydeki başlangıç konsantrasyonlarında (20.0–250.0 mg/L), adsorpsiyon verimliliği yüksek düzeyde seyretmeye devam etmiş; %97.6 ile %99.8 arasında değişmiştir. Özellikle 20.0 g/L adsorban dozunda, 250.0 mg/L gibi görece yüksek başlangıç konsantrasyonunda bile %99.63 oranında boya giderimi sağlanmıştır. Bu sonuç, adsorbanın sadece düşük değil, aynı zamanda orta seviyedeki kirlilik yüklerinde de etkili bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

500.0 ve 1000.0 mg/L gibi yüksek başlangıç konsantrasyonlarında ise adsorpsiyon veriminde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Özellikle 5.0 g/L adsorban dozunda 1000.0 mg/L başlangıç konsantrasyonunda %67.00 oranında bir giderim sağlanırken, 20.0 g/L dozda bu oran %75.43'e yükselmiştir. Bu durum, sistemdeki adsorban miktarının sabit kalması ve çözeltideki boya moleküllerinin adsorban yüzeyindeki aktif bölgelere göre

fazlalık oluşturması nedeniyle doyma noktasına yaklaşılmasıyla açıklanabilir. Artan adsorban dozu ile birlikte, sistemdeki aktif yüzey alanı da arttığı için adsorpsiyon verimi bu koşullarda da optimize edilebilmektedir. şekil 16’ da sunulan veriler, adsorban dozunun artmasıyla birlikte birim adsorpsiyon kapasitesi (Q_e , mg/g) ve boya giderim verimi (% adsorpsiyon) arasındaki ilişkiyi bilimsel bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır. Adsorban dozu 5.0 g/L’den 20.0 g/L’ye çıkarıldığında, birim adsorpsiyon kapasitesi sırasıyla 535.99, 283.05 ve 180.56 mg/g olarak önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum, sistemdeki sabit miktardaki boya moleküllerinin daha fazla adsorban yüzeyine dağılması sonucunda, birim kütle başına düşen adsorplanmış boya miktarının azaldığını göstermektedir (Foo ve Hameed, 2010; Tran vd., 2017). Başka bir deyişle, adsorban dozu artırıldığında aktif yüzey merkezlerinin tamamı etkin bir şekilde kullanılmadan fazla miktarda yüzey alanı sisteme kazandırılmış olur. Ayrıca, yüksek adsorban dozlarında parçacıklar arasında görülebilecek aglomerasyon (yani topaklanma) olasılığı, etkin yüzey alanını azaltarak Q_e değerinin düşmesine katkı sağlayabilir (Crini ve Badot, 2008).



şekil 16. 1000 mg/L sulu zeltide MM’sinin Robinia pseudocacia meyvesinin toz materyali ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi

Diğer taraftan, adsorban dozu arttıkça toplam boya giderim verimi artış göstermiş ve %67.00’den %75.43’e yükselmiştir. Bu artış, sistemde daha fazla aktif yüzey alanının bulunmasıyla, daha fazla boya molekülünün absorplanabilmesiyle açıklanabilir (Ahmad vd., 2021). Özellikle evresel arıtma uygulamalarında yüksek giderim verimi istenen bir hedef olduğundan, adsorban dozunun artırılması bu amaca uygundur.

Ancak bu noktada dikkat çekici bir denge söz konusudur: Qe değeri düşerken % adsorpsiyon artmakta, yani birim başına verim azalsa da toplam sistem verimi yükselmektedir. Bu durum, adsorpsiyon süreçlerinde sıkça karşılaşılan ve sistemin optimizasyonu açısından kritik bir dengeyi ifade eder (Tran vd., 2017). Uygulamanın hedefi yalnızca maksimum boya giderimini sağlamak ise yüksek adsorban dozları tercih edilebilir. Buna karşılık, ekonomik kullanım ve yüzey verimliliği göz önünde bulundurularak proses tasarımı yapılacaksa, daha düşük adsorban dozlarında daha yüksek Qe değerleri avantaj sağlayabilir.

Bu grafiksel analiz, adsorban miktarının sistem performansına olan etkisini hem kinetik hem de denge açısından ortaya koymakta ve ileri modelleme (Langmuir, Freundlich izotermi gibi) çalışmalarına temel oluşturmaktadır (Foo ve Hameed, 2010).

Genel olarak değerlendirildiğinde, adsorban dozunun artırılmasının düşük ve orta derişimlerde adsorpsiyon verimini küçük farklarla artırdığı, ancak yüksek derişimlerde daha belirgin bir etki yarattığı anlaşılmaktadır. Elde edilen veriler, kullanılan biyolojik kökenli adsorbanın geniş konsantrasyon aralığında etkili olduğunu ve özellikle düşük-orta kirlilik yüklerinde neredeyse tam boya giderimi sağlayabildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, söz konusu adsorbanın renk giderimi uygulamalarında sürdürülebilir ve etkili bir alternatif oluşturabileceği sonucuna varılabilir.

3.2.2. FeONP ve FeONP Sentezinde Kullanılan Toz Meyve Materyalinin Malaşit Yeşili (MY) Adsorpsiyon Kapasitesinin Değerlendirilmesi

Çalışmada farklı başlangıç konsantrasyonlarında (2.5, 5.0, 10.0, 50.0, 100.0 ve 250.0 mg/L) hazırlanmış malaşit yeşili (MY) boya çözeltileri, üç farklı FeONP (demir oksit nanoparçacık) dozu (1.25, 2.50 ve 5.00 g/L) ile 12 saat süreyle temas ettirilmiş ve bu süreç sonunda kalan boya konsantrasyonu (Ce) ile adsorpsiyon verimi (% Ads.) belirlenmiştir. Elde edilen veriler, adsorban dozu ve başlangıç boya konsantrasyonunun adsorpsiyon verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır (Tablo 4).

Düşük başlangıç konsantrasyonlarında (örneğin 2.5 mg/L), tüm adsorban dozlarında oldukça yüksek adsorpsiyon verimleri elde edilmiştir. Özellikle 2.50 ve 5.00 g/L adsorban dozlarında %99'un üzerinde boya giderimi gerçekleşmiştir. Bu durum, düşük konsantrasyonlarda adsorban yüzeyinde yeterli sayıda aktif merkezin bulunmasıyla açıklanabilir. Boya moleküllerinin adsorban yüzeyine tutunması için uygun boşluklar fazlasıyla mevcuttur ve sistem doyuma ulaşmamıştır.

Başlangıç konsantrasyonları arttıkça, adsorban dozuna bağlı olarak adsorpsiyon verimlerinde farklılıklar oluşmaya başlamıştır. Örneğin 250 mg/L başlangıç

konsantrasyonunda 1.25 g/L FeONP dozu ile %90.30 adsorpsiyon sağlanırken, 5.00 g/L dozu ile bu oran %98.93'e kadar çıkmıştır. Bu durum, yüksek kirletici yükü altındaki sistemlerde adsorban dozunun artırılmasının, adsorpsiyon verimini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Adsorban dozunun artması, çözeltideki toplam yüzey alanının ve aktif bağlanma bölgelerinin sayısının artmasına neden olur; bu da boya moleküllerinin daha etkili tutulmasını sağlar.

Bununla birlikte, tüm konsantrasyon aralıklarında yüksek oranda boya giderimi gözlemlenmesi, FeONP'lerin MY gibi katyonik boyaların uzaklaştırılmasında oldukça etkili bir adsorban olduğunu göstermektedir. Bu etkinlik, demir oksit nanoparçacıklarının geniş yüzey alanına sahip olması, yüzeydeki hidroksil gruplarının boyalarla elektrostatik veya kompleks oluşturuıcı etkileşimlere girmesi ve partiküllerin dispers halde sistemde etkili şekilde dağılabilmesi ile ilişkilendirilebilir. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla da uyum göstermektedir. Örneğin Ali vd. (2019), demir bazlı manyetik nanoparçacıkların boyar madde gideriminde yüksek performans sergilediğini belirtmiştir.

Tablo 4. Farklı konsantrasyonlardaki FeONP'lerin MY adsorplama oranı

	1.25 g/L		2.50 g/L		5.00 g/L		1.25 g/L		2.5 g/L		5.00 g/L	
C ₀ mg/L	C _e mg/		C _e mg/L		C _e mg/L		% Ads.		% Ads.		% Ads.	
2.50	0.01	±0.01	0.00	±0.01	0.06	±0.01	98.12	±0.24	99.45	±0.32	99.87	±0.32
5.00	0.10	±0.02	0.11	±0.02	0.10	±0.02	98.05	±0.21	97.84	±0.54	98.05	±0.12
10.00	0.21	±0.22	0.35	±0.05	0.14	±0.01	97.87	±0.16	96.51	±0.32	98.61	±0.12
50.00	1.54	±0.07	1.46	±0.02	1.42	±0.10	96.91	±0.56	97.08	±0.21	97.16	±0.14
100.00	4.10	±0.05	1.81	±0.12	1.64	±0.05	95.90	±0.76	98.19	±0.32	98.36	±0.35
250.00	24.25	±0.12	8.38	±0.32	2.67	±0.06	90.30	±0.54	96.65	±0.43	98.93	±0.43

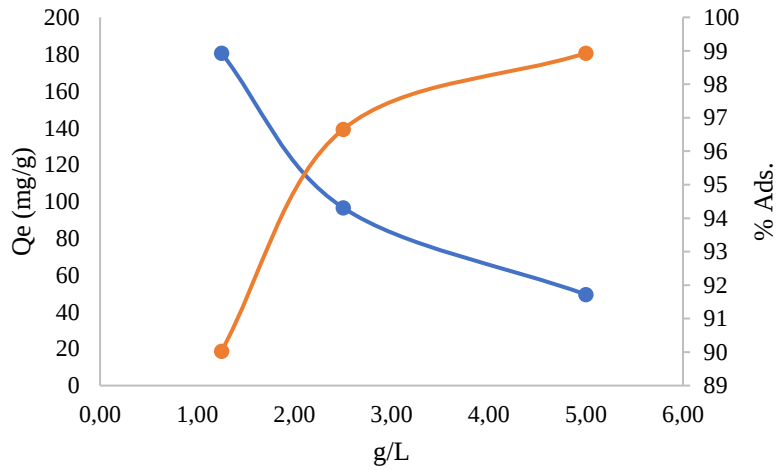
Ayrıca dikkat çeken bir diğer husus, yüksek başlangıç konsantrasyonlarında bile adsorpsiyon veriminin düşmemesidir. Genellikle adsorpsiyon sistemlerinde konsantrasyon arttıkça yüzeydeki aktif noktalar doyuma ulaşır ve verim düşer. Ancak bu çalışmada 250 mg/L gibi yüksek bir boya yükünde bile %98.93'e varan giderim elde edilmesi, FeONP'lerin yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu ve bu tür uygulamalar için endüstriyel potansiyele sahip olduklarını göstermektedir. Bu sonuçlar,

FeONP'lerin çevresel boyar madde kirliliğinin giderilmesinde sürdürülebilir ve etkili bir seçenek olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda elde edilen bulgular, adsorpsiyon verimliliğinin hem adsorban miktarına hem de başlangıç kirletici konsantrasyonuna bağlı olarak optimize edilebileceğini göstermekte; ayrıca nanoparçacık temelli malzemelerin çevre mühendisliği uygulamalarında kullanımı için güçlü bilimsel dayanaklar sunmaktadır.

Bu çalışmada FeONP (demir oksit nanoparçacıkları) dozunun MY adsorpsiyon performansına etkisi, hem birim gram adsorbana düşen boya miktarı (Q_e , mg/g) hem de genel giderim verimi (% Ads.) üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, klasik adsorpsiyon davranışları grafikte görüldüğü üzere, adsorban dozu arttıkça Q_e (mg/g) değeri azalmaktadır (Şekil 17). 1.25 g/L dozunda Q_e değeri 180.6 mg/g iken, 5.00 g/L dozunda bu değer 49.47 mg/g'ye düşmüştür. Bu düşüş, adsorpsiyon sistemlerinde yaygın olarak gözlemlenen bir durumdur ve şu şekilde açıklanabilir:

- Düşük dozda adsorban kullanıldığında, çözeltideki tüm boya molekülleri az sayıda aktif yüzey noktasına bağlanmak zorundadır. Bu nedenle, adsorban başına düşen adsorplanan boya miktarı daha fazladır.
- Adsorban miktarı arttıkça çözeltideki boya molekülleri daha fazla yüzey ile temas etme şansı bulur; ancak çözeltideki boya miktarı sabit olduğu için bazı aktif yüzeyler kullanılmadan kalır. Bu da birim gram adsorban başına düşen boya miktarını düşürür (Q_e azalır).



Şekil 17. 250 mg/L sulu çözeltide MY' nin FeONP ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi

Bu eğilim, literatürde adsorban dozunun artırılmasının adsorpsiyon kapasitesini ters orantılı şekilde etkilediğini ifade eden birçok çalışmayla örtüşmektedir (Foo ve Hameed, 2010).

Aynı grafik üzerinde % Adsorpsiyon değerlerine bakıldığında, adsorban dozu arttıkça genel giderim veriminin yükseldiği gözlemlenmektedir:

- 1.25 g/L için %90.30
- 2.50 g/L için %96.65
- 5.00 g/L için %98.93

Bu artışın nedeni, çözeltideki boya moleküllerinin daha fazla sayıda aktif yüzey noktasıyla temas ederek daha yüksek oranda tutulabilmesidir. Başka bir deyişle, sistem doygunluğa ulaşmadan adsorban miktarının artırılması, çözeltide kalan boya miktarını minimize eder.

Ancak dikkat edilmesi gereken nokta şudur: % Adsorpsiyon değerindeki artış, adsorban miktarındaki artışla doğrusal değildir. Örneğin, adsorban miktarı 2 katına çıkarıldığında % Ads. değerindeki artış sınırlı kalmaktadır. Bu durum, sistemin doygunluğa yaklaştığını ve belirli bir dozun ötesinde daha fazla adsorban kullanımının ekonomik olmayabileceğini göstermektedir. Literatürde bu tür durumlar için "optimum adsorban dozu" kavramı önerilir (Crini ve Badot, 2008).

- Düşük adsorban dozu, yüksek Q_e (adsorpsiyon kapasitesi) ancak nispeten düşük % Ads. (verim) ile karakterizedir.
- Yüksek adsorban dozu ise daha düşük Q_e ancak daha yüksek giderim verimi sunar.
- Bu ters eğilim, adsorbanın birim gram başına verimliliği ile toplam sistem verimliliği arasında optimizasyon gerektirdiğini gösterir.

Çalışmada kullanılan FeONP'lerin yüksek Q_e ve % Ads. değerleri göstermesi, bu malzemenin yüksek yüzey alanı, fonksiyonel grupların varlığı ve muhtemel elektrostatik etkileşimlerle MY'yi etkili biçimde uzaklaştırdığını ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, FeONP'lerin renkli atık suların arıtımında etkili bir aday olduğunu ve ileri adsorpsiyon uygulamaları için kullanılabileceğini desteklemektedir.

Çalışmada, farklı başlangıç konsantrasyonlarına (2.5, 5.0, 10.0, 50.0, 100.0 ve 250.0 mg/L) sahip malaşit yeşili (MY) boya çözeltileri ile üç farklı dozda (5.0, 10.0 ve 20.0 g/L) *Robinia pseudoacacia* toz haline getirilmiş meyvenin adsorbanı 12 saat süreyle temas ettirilmiş ve bu süreç sonunda çözeltide kalan boya konsantrasyonu (C_e) ile adsorpsiyon verimi (% Ads.) hesaplanmıştır (Tablo 5). Elde edilen verilere göre, düşük başlangıç konsantrasyonlarında (özellikle 2.5 mg/L), tüm adsorban dozlarında oldukça yüksek oranda boya giderimi gerçekleşmiştir. Özellikle 10.0 ve 20.0 g/L adsorban dozlarında %99'un üzerinde adsorpsiyon verimi elde edilmiştir. Bu durum, adsorban

yüzeyinde yeterli miktarda aktif bölgenin bulunmasıyla açıklanabilir (Lagergren, 1898; Ho ve McKay, 1999).

Başlangıç konsantrasyonu 5.0 ve 10.0 mg/L'ye yükseltildiğinde, düşük adsorban dozunda (%94.70–95.78) adsorpsiyon veriminde hafif bir azalma gözlenmiş, ancak 20.0 g/L adsorban dozunda %99'un üzerinde tutarlı bir şekilde yüksek verim korunmuştur. Bu, artan adsorban dozunun boyanın aktif bölgelere difüzyonunu kolaylaştırarak daha etkili bir yüzey etkileşimi sağladığını göstermektedir (Foo ve Hameed, 2010).

Tablo 5. Farklı konsantrasyonlardaki *Robinia pseudoacacia* meyvesinin toz materyalinin MY adsorplama oranı

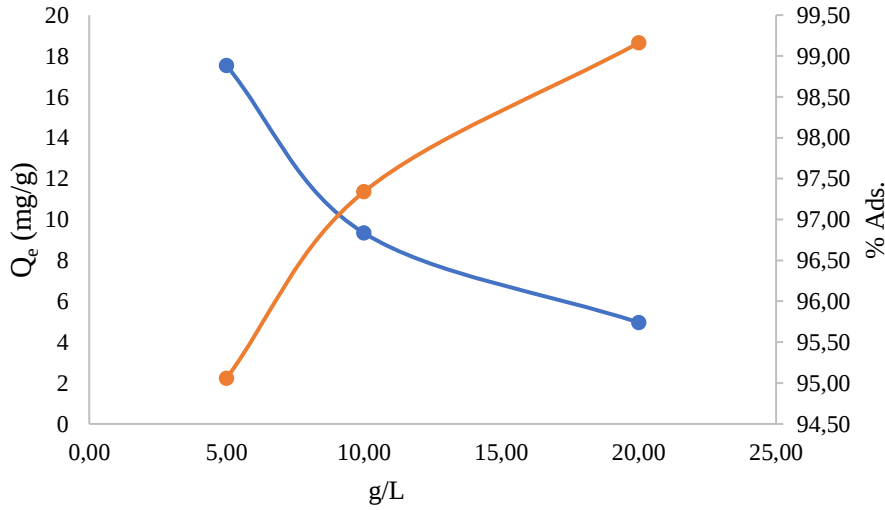
5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L		5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L	
C ₀ mg/L	C _e mg/	C _e mg/L	C _e mg/L	C _e mg/L	C _e mg/L	% Ads.	% Ads.	% Ads.	% Ads.	% Ads.	% Ads.
2.50	0.05 ±0.01	0.00 ±0.00	0.00 ±0.00	0.00 ±0.00	0.00 ±0.00	98.20 ±0.56	99.87 ±0.32	99.99 ±0.32			
5.00	0.27 ±0.02	0.54 ±0.01	0.03 ±0.01	0.03 ±0.01	0.03 ±0.01	94.70 ±0.76	89.25 ±0.43	99.35 ±0.22			
10.00	0.42 ±0.04	0.57 ±0.051	0.07 ±0.01	0.07 ±0.01	0.07 ±0.01	95.78 ±0.56	94.31 ±0.54	99.27 ±0.15			
50.00	0.80 ±0.05	1.17 ±0.02	0.13 ±0.01	0.13 ±0.01	0.13 ±0.01	98.40 ±0.64	97.67 ±0.32	99.33 ±0.11			
100.00	1.84 ±0.02	2.27 ±0.02	0.55 ±0.02	0.55 ±0.02	0.55 ±0.02	98.16 ±0.78	97.73 ±0.32	98.63 ±0.32			
250.00	12.34 ±0.02	6.64 ±0.03	0.84 ±0.01	0.84 ±0.01	0.84 ±0.01	95.06 ±0.65	97.34 ±0.43	99.16 ±0.44			

Ads. : Adsorpsiyon

Yüksek başlangıç konsantrasyonlarında (50.0, 100.0 ve 250.0 mg/L), adsorpsiyon veriminde genel olarak yüksek oranlar korunmuş olsa da, özellikle 5.0 g/L dozda %95.06'ya kadar düşüş gözlenmiştir. Bu durum, sabit miktardaki adsorbanın yüksek konsantrasyonlu boya çözeltisinde tüm boya moleküllerini bağlayacak yeterli aktif yüzey sunamamasıyla ilişkilidir. Benzer şekilde, 250.0 mg/L başlangıç konsantrasyonunda 20.0 g/L adsorban dozu ile %99.16 oranında yüksek verim elde edilmiştir; bu da daha yüksek dozlarda yüzey doyumunun önüne geçildiğini göstermektedir (Kumar vd., 2005).

Genel olarak, adsorpsiyon veriminin başlangıç boya konsantrasyonu ile ters, adsorban dozu ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, fizikokimyasal adsorpsiyon mekanizmalarının geçerli olduğunu ve sistemin Langmuir modeline yakın bir davranış sergileyebileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, çalışmanın sonuçları, akasya tohumu tozunun düşük maliyetli ve çevre dostu bir biyosorbent olarak boyar madde gideriminde etkili bir alternatif oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 18'deki

grafik, adsorban dozu arttıkça adsorpsiyon kapasitesi (Q_e , mg/g) ve adsorpsiyon verimi (% Ads.) arasındaki ilişkiyi açıkça ortaya koymaktadır. Görüldüğü üzere, adsorban dozu 5.00 g/L'den 20.00 g/L'ye çıkarıldığında adsorpsiyon verimi %95.06'dan %99.16'ya yükselmiştir. Bu durum, sistemde daha fazla aktif yüzey alanı ve bağlanma noktası sunulmasından kaynaklanmaktadır (Foo ve Hameed, 2010; Wang ve Guo, 2020).



Şekil 18. 250 mg/L sulu çözeltide MY'sinin Robina pseudoacacia meyvesinin toz materyali ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi

Ancak, birim kütle başına düşen adsorpsiyon kapasitesi (Q_e) adsorban dozu arttıkça düşüş göstermiştir: 17.53 mg/g'den 4.96 mg/g'ye gerilemiştir. Bu azalma, daha yüksek adsorban dozlarında aktif bölgelerin tam olarak kullanılmaması ve adsorban partikülleri arasında meydana gelen aglomerasyon nedeniyle yüzey alanının etkili bir şekilde değerlendirilememesiyle açıklanabilir (Kannan ve Sundaram, 2001).

Sonuç olarak, düşük adsorban dozlarında yüksek Q_e değerlerine ulaşılırken, yüksek dozlarda daha yüksek yüzdesel giderim sağlanmaktadır. Bu da sistemin optimizasyonu açısından uygulama hedeflerine göre dozaj ayarının dikkatli yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.2.3. FeONP ve FeONP Sentezinde Kullanılan Toz Meyve Materyalinin Fenol Kırmızısı (FR) Adsorpsiyon Kapasitesinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, farklı başlangıç konsantrasyonlarına ($C_0 = 2.50-250.00$ mg/L) sahip Fenol kırmızısı (FR) boya çözeltisinin, değişen miktarlarda FeONP (1.50, 2.00 ve 5.00

g/L) adsorbanları kullanılarak giderim etkinliği incelenmiştir. Elde edilen veriler, denge konsantrasyonları (C_e) ve adsorpsiyon yüzdeleri (% Ads.) üzerinden değerlendirilmiştir (Tablo 6).

Sonuçlar, genel olarak adsorban miktarındaki artışın adsorpsiyon verimini artırdığını göstermektedir. Özellikle düşük FR konsantrasyonlarında ($C_0 = 2.50$ mg/L), 5.00 g/L FeONP kullanımıyla %98.87 gibi oldukça yüksek bir giderim oranı elde edilmiştir. Benzer şekilde, 2.00 g/L FeONP için de %98.81 oranında yüksek bir adsorpsiyon verimliliği gözlenmiştir. Bu durum, düşük derişimli boya çözeltilerinde yüzeydeki aktif adsorpsiyon bölgelerinin fazlasıyla yeterli olduğunu ve adsorbanın doygunluk sınırına ulaşmadığını göstermektedir (Ali vd., 2019).

Tablo 6. Farklı konsantrasyonlardaki FeONP'lerin FR adsorplama oranı

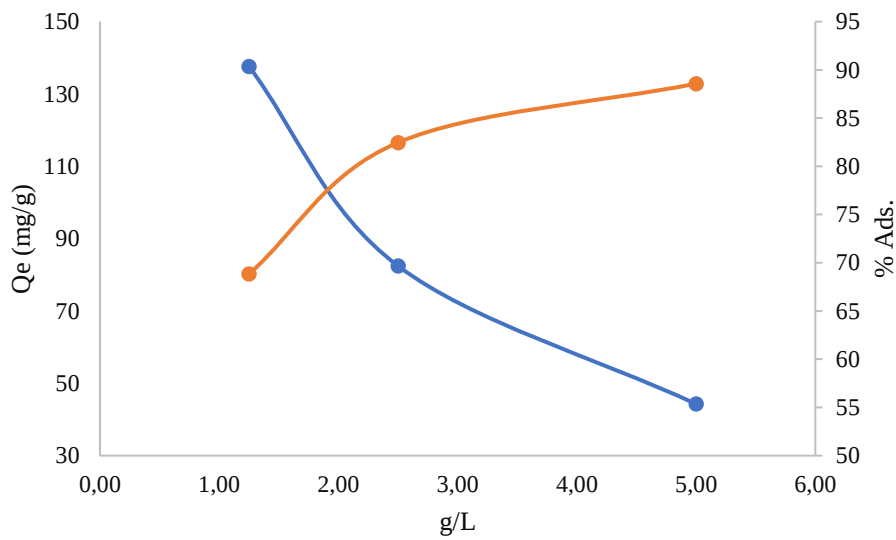
	1.50 g/L			2.00 g/L			5.00 g/L			1.50 g/L			2.00 g/L			5.00 g/L		
C_0 mg/L	C_e mg/			C_e mg/L			C_e mg/L			% Ads.			% Ads.			% Ads.		
2.50	0.27	±0.07		0.03	±0.09		0.03	±0.03		89.38	±0.93		98.81	±0.43		98.87	±1.18	
5.00	0.65	±0.15		0.54	±0.07		0.17	±0.03		86.93	0.03		89.24	±0.72		96.50	±0.55	
10.00	1.45	±0.07		1.46	±0.09		0.79±	±0.23		85.55	0.73		85.37	±0.86		92.08	±0.27	
50.00	9.95	±0.02		5.95	±0.05		3.77	±0.03		80.10	0.04		88.11	±0.17		92.46	±0.06	
100.00	25.74	±0.05		16.87	±0.09		8.50	±0.04		74.26	0.05		83.13	±0.09		91.50	0.04	
250.00	77.96	±0.05		43.86	±0.21		40.83	±0.65		68.81	0.02		82.46	±0.09		83.67	±0.86	

Ads. : Adsorpsiyon

Orta düzey konsantrasyonlarda ($C_0 = 10.00$ – 50.00 mg/L) adsorpsiyon verimliliği nispeten azalmış, ancak yüksek adsorban dozajlarında (%92'nin üzerinde) etkili bir giderim sağlanmıştır. Örneğin, 50.00 mg/L FR çözeltisinde 5.00 g/L FeONP kullanımı ile %92.46'lık bir giderim başarılmıştır. Bu durum, yüksek adsorban dozajının yüzey alanı ve aktif merkez sayısını artırarak daha fazla boya molekülünün adsorpsiyonuna olanak sağladığını göstermektedir (Pindiga vd., 2022). Yüksek başlangıç konsantrasyonlarında ($C_0 = 100.00$ ve 250.00 mg/L) ise adsorpsiyon oranlarında kısmi bir düşüş gözlemlenmiştir. 250.00 mg/L FR konsantrasyonunda, 1.50 g/L FeONP ile %68.81, 2.00 g/L ile %82.46 ve 5.00 g/L ile %88.57 oranında giderim sağlanmıştır. Bu azalma, adsorban yüzeyinde sınırlı sayıda aktif bölge olması ve daha yüksek konsantrasyonlarda bu bölgelerin doygunluğa ulaşmasıyla açıklanabilir (Ho ve McKay,

1999). Genel olarak değerlendirildiğinde, FR giderimi için FeONP etkili bir adsorban olarak öne çıkmakta, özellikle düşük ve orta düzey boya konsantrasyonlarında yüksek verimlilik göstermektedir. Adsorban miktarındaki artış, özellikle yüksek boya konsantrasyonlarında performansı belirgin şekilde artırmaktadır.

Şekil 19’da, 250 mg/L konsantrasyonundaki FR çözeltisinden *Robinia pseudoacacia* meyve tozundan yeşil sentez yoluyla elde edilen FeONP ile yapılan adsorpsiyon işleminde adsorban miktarının (g/L) denge adsorpsiyon kapasitesi (Q_e , mg/g) ve adsorpsiyon yüzdesi (% Ads.) üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 19. 250 mg/L sulu çözeltide FR'sinin FeONP ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi

Grafikten görüldüğü üzere, adsorban miktarı arttıkça Q_e değeri azalma eğilimindeyken, adsorpsiyon yüzdesi artış göstermektedir. Örneğin, adsorban miktarı 1 g/L'den 5 g/L'ye çıkarıldığında Q_e yaklaşık 135 mg/g'den 45 mg/g'ye düşerken, % adsorpsiyon yaklaşık %70'ten %90'ın üzerine çıkmaktadır. Bu durum, düşük adsorban miktarında her bir gram adsorbanın daha fazla FR molekülüyle temas ettiğini ve buna bağlı olarak birim kütle başına daha yüksek miktarda adsorbe ettiğini göstermektedir. Ancak adsorban miktarı arttıkça, adsorbanlar arasında partikül aglomerasyonu ve yüzey alanının efektif kullanımında azalma gibi etkenlerle birlikte adsorpsiyon kapasitesi düşmektedir (Gong vd., 2022). Öte yandan, artan adsorban miktarı sistemde daha fazla aktif yüzey sağlayarak toplam adsorpsiyon yüzdesini artırmakta ve çözeltideki FR konsantrasyonunun daha büyük kısmının giderilmesini sağlamaktadır. Bu durum,

özellikle endüstriyel atıksu arıtımı gibi uygulamalarda adsorban miktarının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Foo ve Hameed, 2010). Verilen çalışmada, farklı başlangıç konsantrasyonlarında (2.5–250 mg/L) hazırlanmış fenol kırmızısı (FR) boya çözeltilerinin, üç farklı dozda (5.0, 10.0 ve 20.0 g/L) kullanılan *Robinia pseudoacacia* meyve tozu adsorbanı ile 12 saat süreyle temas ettirilmesi sonucunda elde edilen adsorpsiyon verileri Tablo 7’de sunulmuştur. Bu veriler, adsorban dozunun ve başlangıç boya konsantrasyonunun adsorpsiyon verimliliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Düşük başlangıç konsantrasyonlarında (2.5 ve 5.0 mg/L), tüm adsorban dozlarında yüksek adsorpsiyon verimi gözlenmiştir. Özellikle 5.0 g/L adsorban dozunda, %99.06’ya varan yüksek adsorpsiyon oranı elde edilmiştir. Bu durum, düşük FR konsantrasyonlarında adsorban yüzeyinde yeterli sayıda aktif bölgenin bulunması sayesinde, boyar maddenin etkin bir şekilde uzaklaştırılabildiğini göstermektedir (Ho, 2022). Orta düzeydeki konsantrasyonlarda (10.0 ve 50.0 mg/L), adsorpsiyon oranlarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş, başlangıçta mevcut olan adsorban yüzeyinin sınırlı olması nedeniyle aktif yüzeylerin doyuma ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, 10.0 mg/L FR konsantrasyonunda 5.0 g/L adsorban ile %77.50 adsorpsiyon gerçekleşirken, aynı koşullarda 10.0 g/L adsorban kullanımıyla %18.94 gibi çok daha düşük bir adsorpsiyon oranı elde edilmiştir. Bu beklenmedik durum, muhtemelen çözeltideki FR miktarının düşük olmasına rağmen adsorbanın yüksek miktarda olması nedeniyle, taneciklerin birbiriyle etkileşime girerek aktif bölgeleri bloke etmesiyle açıklanabilir (Foo ve Hameed, 2010).

Tablo 7. Farklı konsantrasyonlardaki *Robinia pseudocacia* meyvesinin toz materyalinin FR adsorplama oranı.

	5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L		5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L	
C ₀ mg/L	C _e mg/		C _e mg/L		C _e mg/L		% Ads.		% Ads.		% Ads.	
2.50	0.02	±0.01	0.04	±0.00	0.10	±0.01	95.91	±0.32	98.33	±0.35	99.06	±0.52
5.00	0.27	±0.05	3.22	±0.02	0.65	±0.57	35.64	±0.38	87.07	±0.29	94.57	±0.74
10.00	2.25	±0.05	8.11	±0.03	2.95	±0.43	18.94	±0.32	70.48	±0.38	77.50	±0.65
50.00	19.42	±0.07	19.33	±0.01	18.80	±0.06	61.15	±0.56	61.33	±0.49	62.40	±0.48
100.00	42.13	±0.04	23.06	±0.05	41.06	±0.01	57.87	±0.69	58.94	±0.18	76.94	±0.47

Tablo 7. (Devamı)

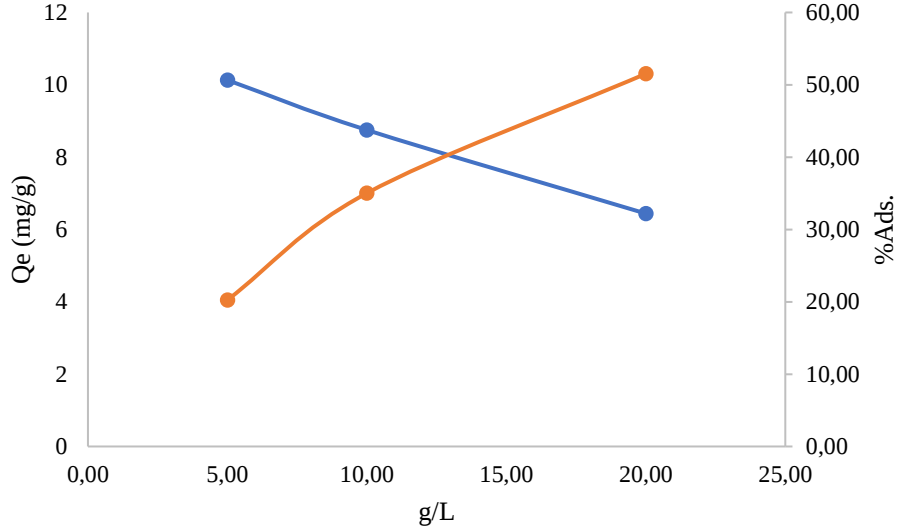
5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L		5.0 g/L		10.0 g/L		20.0 g/L	
C ₀ mg/L	C _e mg/	C _e mg/L	C _e mg/L	C _e mg/L	C _e mg/L	% Ads.	% Ads.	% Ads.	% Ads.	% Ads.	% Ads.
250.00	199.36 ±0.02	162.46 ±3.06	121.17 ±0.05	20.25 ±0.76	35.02 ±0.43	51.53 ±0.15					

Ads. : Adsorpsiyon

Yüksek başlangıç konsantrasyonlarında (100 ve 250 mg/L), adsorban dozundaki artışın adsorpsiyon yüzdesi üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Örneğin, 250 mg/L başlangıç konsantrasyonunda adsorban dozunun 5.0 g/L'den 20.0 g/L'ye çıkarılması, %20.25'lik adsorpsiyon oranını %51.53'e kadar artırmıştır. Bu, yüksek konsantrasyondaki boyar maddeyi uzaklaştırmak için daha fazla aktif yüzeye ihtiyaç duyulduğunu açıkça göstermektedir (Bharathi ve Ramesh, 2013). Ancak, yine de % adsorpsiyon oranlarının, düşük başlangıç konsantrasyonlarına kıyasla düşük seviyelerde kaldığı gözlenmiştir. Bu da, yüksek konsantrasyonlarda aktif bölge sayısının yetersiz kalabileceğini ve adsorpsiyon sürecinin sınırlı hale geldiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, düşük konsantrasyonlarda yüksek adsorpsiyon verimi sağlanabilirken, yüksek konsantrasyonlarda etkin FR giderimi için adsorban miktarının artırılması gerekmektedir. Ancak bu artışın belirli bir düzeyin üzerinde ekonomik ve fiziksel sınırlar doğuracağı da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, FR gibi suda çözünür boyar maddelerin uzaklaştırılmasında optimum adsorban dozu ve temas süresinin belirlenmesi çevresel ve ekonomik açıdan önem arz etmektedir.

Şekil 20, 250 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip fenol kırmızısı (FR) çözeltisinden *Robinia pseudoacacia* meyve tozu ile yapılan adsorpsiyon sürecinde, farklı adsorban dozlarının (5.0, 10.0 ve 20.0 g/L) adsorpsiyon kapasitesine (Q_e, mg/g) ve adsorpsiyon verimliliğine (% Ads.) etkisini göstermektedir. Verilere göre, adsorban miktarı arttıkça % adsorpsiyon oranı belirgin şekilde artarken, birim kütle başına düşen adsorplanmış boya miktarı (Q_e) azalmaktadır. Örneğin; 5.0 g/L adsorban kullanıldığında yaklaşık %20.25 FR giderimi ile maksimum Q_e değeri (~10.1 mg/g) elde edilirken, 20.0 g/L adsorban kullanımında %51.53 giderim sağlanmış ancak Q_e değeri 6.1 mg/g'ye düşmüştür.



Şekil 20. 250 mg/L sulu çözeltide FR ‘ sinin Robinia pseudoacacia meyvesinin toz materyali ile uzaklaştırılmasına adsorban miktarı etkisi

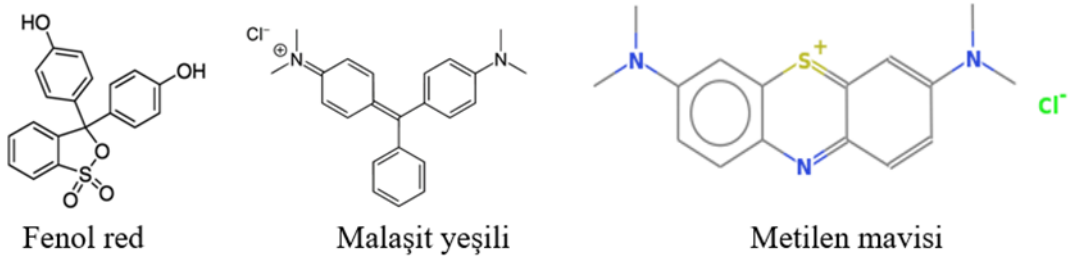
Bu durum, literatürde de sıkça bildirildiği gibi, adsorban miktarının artmasıyla birlikte adsorpsiyon yüzey alanının ve aktif bölge sayısının çoğaldığını; ancak aynı miktardaki FR moleküllerinin daha fazla yüzeye dağıldığını ve böylece adsorban başına düşen adsorpsiyon miktarının azaldığını göstermektedir (Singh vd., 2017). Ayrıca yüksek adsorban dozlarında partikül aglomerasyonu sonucu aktif yüzey alanının etkin kullanımının azalması da Q_e değerinin düşmesine katkı sağlayabilir (Gong vd., 2022). Bu grafik FR gibi anyonik boyaların uzaklaştırılmasında adsorban dozunun artırılmasının adsorpsiyon verimliliğini artırdığı, ancak birim adsorban başına düşen adsorpsiyon kapasitesini azalttığı dengesini ortaya koymaktadır. Optimum adsorban dozunun belirlenmesi, işlem maliyeti ve verimlilik açısından oldukça kritik bir parametredir. Yapılan bu çalışmada, fenol kırmızısı (FR), malaşit yeşili (MY) ve metilen mavisi (MM) boyar maddelerinin adsorpsiyon davranışları incelenmiş ve adsorpsiyon kapasiteleri $MM > MY > FR$ şeklinde sıralanmıştır. Bu sonuçlar, boya moleküllerinin kimyasal yapıları ve çözelti pH'nın adsorpsiyon sürecine olan etkisiyle açıklanabilir.

Çalışmada kullanılan boya çözeltilerinin doğal pH değerleri ölçülmüş ve sırasıyla MM için 4.88, MY için 3.02 ve FR için 3.76 olarak belirlenmiştir. MM'nin daha zayıf asidik pH değerlerine sahip olması, bu moleküllerin adsorpsiyon sürecinde daha etkin olmasını sağlamıştır. Bu pH değerinde adsorban yüzeyi muhtemelen daha negatif yüklüdür ve boya molekülleri katyonik elektrostatik çekim artmasının mümkün kılabilir. Özellikle MM'nin en yüksek adsorpsiyon kapasitesine ulaşmasında hem pH değerinin uygunluğu hem de moleküler yapısındaki fonksiyonel grupların etkisi önemli bir rol

oynamıştır. Metilen mavisinin yapısında bulunan azot (N) ve sülfür (S) grupları, adsorban yüzeyi ile güçlü etkileşimler kurmasını sağlamıştır. Asidik pH koşullarında protonlanabilen bu fonksiyonel gruplar, yüzeydeki aktif bölgelerle elektrostatik çekim ve hidrojen bağları oluşturarak adsorpsiyon verimliliğini artırmıştır.

Sonuç olarak, boya moleküllerinin adsorpsiyon davranışları üzerinde pH'nın ve fonksiyonel grupların kritik bir etkisi bulunmaktadır. MM'nin yüksek adsorpsiyon kapasitesi, uygun pH koşulları ve etkileşime giren fonksiyonel grupların varlığı sayesinde gerçekleşmiştir. MY ve FR'nin daha düşük performans göstermesi ise moleküler yapıları ve çözelti koşulları ile ilişkilendirilebilir. Bu bulgular, ileride yapılacak çalışmalarda adsorpsiyon süreçlerinin optimizasyonu için önemli bir referans oluşturmaktadır.

Çalışmada incelenen boya moleküllerinin yapısal analizleri (Şekil 21), MM'nin diğer boyalara kıyasla neden daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi gösterdiğini moleküler düzeyde açıklamaktadır. Metilen mavisi molekülünde bulunan azot ve sülfür atomları, adsorban yüzeyiyle güçlü elektrostatik ve kimyasal etkileşimler kurmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, molekülün düzlemsel yapısı ve fonksiyonel grupların uygun uzaysal konumlanması, yüzeye bağlanma verimliliğini artırarak adsorpsiyon kapasitesini olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 21. Çalışmada kullanılan maddelerin molekül şekilleri

Endüstriyel atık suların arıtılmasında boyalar, önemli bir çevresel sorun teşkil etmektedir. Yüksek organik yük ve renk parametrelerinden sorumlu olan bu kirleticiler, doğal su kaynaklarına deşarj edilmeden önce mutlaka uzaklaştırılmalıdır. Geleneksel arıtım yöntemleri, genellikle yüksek maliyetleri ve uzun işlem süreleri nedeniyle pratik uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bu noktada, nanoteknolojik yaklaşımlar son yıllarda umut vaat edici alternatifler sunmaktadır. Nanopartiküller, yüksek yüzey alan-hacim oranları ve reaktif yüzey özellikleri sayesinde boya gideriminde son derece etkili performans göstermektedir (Oasgie vd., 2021). Özellikle manyetik demir

nanopartikülleri, bu alanda dikkat çekici düzeyde avantajlara sahiptirler. Bu nanopartiküller, manyetik ayırma yöntemiyle arıtım sonrasında kolayca sistemden ayrılabilmekte ve yeniden kullanılabilir. Bu özellik hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlamaktadır (Lu vd., 2007).

Fenol kırmızısı gibi kompleks yapılı boyaların adsorpsiyon mekanizmalarının anlaşılması, atık su arıtımında daha etkili yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Nanoteknoloji temelli yaklaşımlar, özellikle manyetik nanopartiküllerin kullanımı, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşmada önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu alanda yapılacak ileri çalışmalar hem adsorpsiyon verimliliğini artıracak hem de sürdürülebilir arıtım teknolojilerinin gelişimine katkıda bulunacaktır.



4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, *Robinia pseudoacacia* meyve ekstraktı kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle elde edilen demir oksit nanoparçacıklarının karakterizasyonu UV, Vis, TEM, EDX, XRD ve FTIR analizleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon sonucu toplanan veriler 10 nm'den küçük amorf yapıda Fe₃O₄ nanopartiküllerinin sentezlendiğini göstermektedir.

Robinia pseudoacacia meyve ekstraktı kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle elde edilen demir oksit nanoparçacıklarının (FeONP) ve sentez sürecinde kullanılan meyvenin toz haline getirilmesi ile elde edilen tozun, üç farklı boyar madde olan Metilen Mavisi (MM), Malaşit Yeşili (MY) ve Fenol Kırmızısı (FR) üzerindeki adsorpsiyon performansları detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel bulgular, adsorban tipi, adsorban dozu ve başlangıç boya konsantrasyonunun adsorpsiyon verimliliği ve kapasitesi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, adsorpsiyon kapasitesi açısından sıralama MM > MY > FR şeklinde belirlenmiştir. Bu sıralama, hem adsorplanan boya miktarı (Q_e, mg/g) hem de sistemdeki giderim yüzdesi (% Ads.) temelinde değerlendirilmiştir:

- Metilen Mavisi (MM): En yüksek adsorpsiyon kapasitesi MM çözeltisinde elde edilmiştir. Özellikle düşük ve orta düzey başlangıç konsantrasyonlarında (%97'nin üzerinde) yüksek giderim oranları ve düşük dozda yüksek Q_e değerleri gözlemlenmiştir. Bu durum, MM molekülünün yapısal özellikleri ile FeONP'nin yüzeyinde yer alan fonksiyonel gruplar arasındaki elektrostatik çekimlerle açıklanabilir. Ancak MM'nin katyonik karakteri ve nötr pH'a yakın çalışma koşulları, adsorbanla etkileşim kapasitesini sınırlayabilmekte ve daha yüksek başlangıç konsantrasyonlarında doyma eğilimi göstermektedir.
- Malaşit Yeşili (MY): MY'nin adsorpsiyon kapasitesi MM'ye göre düşük olmakla birlikte, %99'a kadar ulaşan yüksek giderim oranları elde edilmiştir. Bu da MY'nin yüzey ile güçlü kompleks ve π - π etkileşimleri kurabildiğini göstermektedir. Ancak adsorban dozunun artırılmasıyla birlikte birim adsorban başına düşen Q_e değerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Bu, MY moleküllerinin daha yaygın yüzey temasına sahip olmasına rağmen, adsorban verimliliğinin adsorban dozu ile ters orantılı bir şekilde etkilendiğini göstermektedir.

- Fenol Kırmızısı (FR): FR, bu üç boya arasında en düşük adsorpsiyon kapasitesine sahip olmakla birlikte, özellikle düşük başlangıç konsantrasyonlarında yüksek adsorpsiyon verimleri göstermiştir. Ancak yüksek konsantrasyonlarda sistemin yüzey doyumuna erken ulaşması ve partikül aglomerasyonu gibi etkiler nedeniyle verim düşmüştür. FR molekülü, içerdiği sülfonat ve hidroksil grupları sayesinde adsorban yüzeyi ile güçlü elektrostatik ve hidrojen bağları kurabilse de, bu etkileşimler MM ve MY'ye göre daha sınırlı kalmıştır.

Sonuç olarak, çalışmada kullanılan demir oksit nanoparçacıkları ve hammaddesi, özellikle düşük ve orta düzeydeki boya konsantrasyonlarında yüksek adsorpsiyon verimliliği sunmuştur. $MM > MY > FR$ sıralaması, boya moleküllerinin kimyasal yapısı, pH koşulları ve adsorban-yüzey etkileşimleri bağlamında değerlendirilmiştir. Ayrıca, adsorban dozunun artırılmasının verim artışı sağlarken, birim kütle başına adsorpsiyon kapasitesinde azalma yarattığı ve bu durumun sistem optimizasyonu açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular, biyosentezlenmiş FeONP'nin boyar madde giderimi alanında sürdürülebilir, düşük maliyetli ve etkili bir adsorban olarak kullanılabileceğini ve ileri çevresel arıtım teknolojilerinde önemli bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Abbas, Q., Yousaf, B., Ullah, H., Ali, M. U., Ok, Y. S. ve Rinklebe, J. (2020). Environmental transformation and nano-toxicity of engineered nano-particles (ENPs) in aquatic and terrestrial organisms. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(23), 2523-2581. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1705721>
- Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., ... Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 300, 102597. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>
- Abuzeid, H. M., Julien, C. M., Zhu, L. ve Hashem, A. M. (2023). Green Synthesis of Nanoparticles and Their Energy Storage, Environmental, and Biomedical Applications. *Crystals*, 13(11), 1576. <https://doi.org/10.3390/cryst13111576>
- Acar, B.Ç. ve Yüksekdağ, Z. (2023). Deri Endüstrisinde Krom Kullanımı ve Biyolojik Yöntemlerle Krom Giderimi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 1006-1029. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1089874>
- Afsheen, S., Tahir, M. B., Iqbal, T., Liaqat, A. ve Abrar, M. (2018). Green synthesis and characterization of novel iron particles by using different extracts. *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 935-944. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.137>
- Ahmad, M. A., Yusop, M. F. M., Zakaria, R., Karim, J., Yahaya, N. K. E., Yusoff, M. A. M., ... Abdullah, N. S. (2021). Adsorption of methylene blue from aqueous solution by peanut shell based activated carbon. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1246-1251. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.789>
- Ahmed, A., Arian, M. F., ve Khan, M. Q. (2022). Nanomaterials recycling standards. In *Nanomaterials Recycling* (pp. 249-268). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90982-2.00012-3>
- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R. ve Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Alfutaimani, A. S., Alharbi, N. K., Alahmari, A., Alqabbani, A., ve Aldayel, A. M. (2024). Exploring the landscape of Lipid Nanoparticles (LNPs): A comprehensive review of LNPs types and biological sources of lipids. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 100305.
- Al-Harbi, N. ve Abd-Elrahman, N. K. (2024). Physical methods for preparation of nanomaterials, their characterization and applications: a review. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 1-22.

- Ali, I., Asim, M. ve Khan, T. A. (2012). Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of environmental management*, 113, 170-183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028>
- Ali, I., Peng, C., Naz, I. ve Amjed, M. A. (2019). Water purification using magnetic nanomaterials: an overview. *Magnetic Nanostructures: Environmental and Agricultural Applications*, 161-179.
- Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in microbiology*, 14, 1155622. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>
- Anastopoulos, I., Hosseini-Bandegharai, A., Fu, J., Mitropoulos, A. C. ve Kyzas, G. Z. (2018). Use of nanoparticles for dye adsorption. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(6), 836-847. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1398661>
- Anşın, R. ve Özkan, Z.C. (2006). *Tohumlu Bitkiler (Spermatophyta) Odunsu Taksonlar*, Trabzon: KTÜ Basımevi.
- Arslan, E.S. (2019). İklim Değişimi Senaryoları ve Tür Dağılım Modeline Göre Kentsel Yol Ağaçlarının Ekosistem Hizmetleri Bağlamında Değerlendirilmesi: Robinia pseudoacacia L. Örneği, *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 20(2): 142-148. <https://doi.org/10.18182/tjf.559883>
- Asadi Asadabad, M., ve Eskandari, J. M. (2015). Transmission electron microscopy as best technique for characterization in nanotechnology. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 45(3), 323-326. <https://doi.org/10.1080/15533174.2013.831901>
- Ayanda, O. S., Mmuoegbulam, A. O., Okezie, O., Durumin Iya, N. I., Mohammed, S. A. E., James, P. H., ... Badamasi, H. (2024). Recent progress in carbon-based nanomaterials: critical review. *Journal of Nanoparticle Research*, 26(5), 106.
- Aydogan, T., Dumanlı, F. T. Ş. ve Derun, E. M. (2022). Effect of lemon peel extract concentration on nano scale Fe/Fe₃O₄ synthesis. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1423-1427.
- Bahrulolum, H., Nooraei, S., Javanshir, N., Tarrahimofrad, H., Mirbagheri, V. S., Easton, A. J. ve Ahmadian, G. (2021). Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector. *Journal of Nanobiotechnology*, 19, 1-26.
- Banfield, J. F. ve Zhang, H. (2001). Nanoparticles in the environment. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 44(1), 1-58. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.44.01>
- Baran, M.F. ve Saydut, A. (2019), Altın Nanomalzeme Sentezi ve Karakterizasyonu, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(3), 1033-1040. <https://doi.org/10.24012/dumf.551865>
- Barasarathi, J., Abdullah, P. S. ve Uche, E. C. (2022). Application of magnetic carbon nanocomposite from agro-waste for the removal of pollutants from water and

wastewater. *Chemosphere*, 305, 135384.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135384>

- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M. ve Rizzolio, F. (2019). The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
- Beni, A. A. ve Jabbari, H. (2022). Nanomaterials for environmental applications. *Results in Engineering*, 15, 100467. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100467>
- Bharathi, K. S. ve Ramesh, S. T. (2013). Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review. *Applied Water Science*, 3, 773-790.
- Bhardwaj, P., Singh, B. ve Behera, S. P. (2021). Green approaches for nanoparticle synthesis: emerging trends. *Nanomaterials*, 167-193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822401-4.00015-5>
- Bhushan, B. (Ed.). (2017). *Springer handbook of nanotechnology*. Springer.
- Bizimbitkiler (2013). <<http://www.bizimbitkiler.org.tr>>, [er. tar.: 05 12 2024].
- Bordiwala, R. V. (2023). Green synthesis and applications of metal nanoparticles.-A review article. *Results in Chemistry*, 5, 100832. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100832>
- Bozbeyoglu, P., Duran, C., Baltaci, C. ve Gundogdu, A. (2020). Adsorption Of Methylene Blue from Aqueous Solution with Sulfuric Acid Activated Corn Cobs: Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamics Assessment. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 7(3), 239-256. <https://doi.org/10.17350/HJSE19030000193>
- Bukhari, A., Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A., Zain, H., Saeed, R., Naseer, Y. (2021). Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles using different plants' parts for antimicrobial activity and anticancer activity: a review article. *Coatings*, 11(11), 1374. <https://doi.org/10.3390/coatings11111374>
- Chandrakala, V., Aruna, V. ve Angajala, G. (2022). Review on metal nanoparticles as nanocarriers: Current challenges and perspectives in drug delivery systems. *Emergent Materials*, 5(6), 1593-1615.
- Coelho, L.M., Rezende, H.C., Sousa, P.A.R., Melo, D.F.O., Coelho, N.M.M. (2015). *Bioremediation of Polluted Waters Using Microorganisms*, DOI: 10.5772/60770.
- Corrêa, C. R. R., de Siqueira, A. B., Matos Lopes, P. R., Ambrosio, J. A. R., Simioni, A. R., de Vasconcelos, L. G. ve Moraes, E. B. (2024). Green synthesis of iron nanoparticles from the baru (*Dipteryx alata*) endocarp extract for the efficient removal of rhodamine B and caffeine from water through the heterogeneous Fenton process. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(4), 771-789. <https://hdl.handle.net/11449/298552>
- Crini, G. ve Badot, P. M. (2008). Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch

- studies: A review of recent literature. *Progress in Polymer Science*, 33(4), 399–447. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.11.001>
- Da'na, E., Taha, A. ve Afkar, E. (2018). Green synthesis of iron nanoparticles by *Acacia nilotica* pods extract and its catalytic, adsorption, and antibacterial activities. *Applied Sciences*, 8(10), 1922. <https://doi.org/10.3390/app8101922>
- Dao, A. T. N., Mott, D. M. ve Maenosono, S. (2015). *Characterization of metallic nanoparticles based on the abundant usages of X-ray techniques*. In Handbook of nanoparticles (pp. 217-244). Springer International Publishing.
- Deepa, K., Sridhar, A. ve Panda, T. (2023). Biogenic gold nanoparticles: current applications and future prospects. *Journal of Cluster Science*, 34(3), 1163-1183.
- Demirel, İ. T., Akar, B., Baltacı, C., Karpuz, Ö. ve Gülbahar, E. 2024. Biogenic Iron Oxide Nanoparticles Based on Algal Biofilm Formed in the Wastewater Treatment Plant and Their Dye Removal Performance. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 9(2), 174-183. <https://doi.org/10.35229/jaes.1421336>
- Desalegn, B., Megharaj, M., Chen, Z. ve Naidu, R. (2019). Green synthesis of zero valent iron nanoparticle using mango peel extract and surface characterization using XPS and GC-MS. *Heliyon*, 5(5).
- Dindar, E., Şağban, F.O.T. ve Başkaya, H.S. (2010), Kirlenmiş Toprakların Biyoremediasyon ile Islahı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 15, Sayı 2.
- Doan, L. (2023). Modifying superparamagnetic iron oxide nanoparticles as methylene blue adsorbents: a review. *ChemEngineering*, 7(5), 77. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7050077>
- Dobrucka, R. ve Ankiel, M. (2019). Possible applications of metal nanoparticles in antimicrobial food packaging. *Journal of Food Safety*, 39(2), e12617. <https://doi.org/10.1111/jfs.12617>
- Eren, N.B. (2022). *Dünyada ve Türkiye’de Nanoteknoloji*. Sağlık & Bilim, 7.
- Foo, K. Y. ve Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical engineering journal*, 156(1), 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Gautam, A., Rawat, S., Verma, L., Singh, J., Sikarwar, S., Yadav, B. C. ve Kalamdhad, A. S. (2018). Green synthesis of iron nanoparticle from extract of waste tea: An application for phenol red removal from aqueous solution. *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, 10, 377-387. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.08.003>
- Gedikli, H. (2022). Türk siyah ve yeşil çayı ekstraktlarının ve bu ekstraktlardan yeşil sentez yoluyla üretilen demir nano parçacıklarının bazı gıdalarda aflatoksinlerin azaltılması üzerine bir araştırma, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.

- Ghosh, N., Das, S., Biswas, G. ve Haldar, P. K. (2022). Review on some metal oxide nanoparticles as effective adsorbent in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 85(12), 3370-3395. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.153>
- Gong, Y., Wang, Y., Lin, N., Wang, R., Wang, M. ve Zhang, X. (2022). Iron-based materials for simultaneous removal of heavy metal (loid) s and emerging organic contaminants from the aquatic environment: Recent advances and perspectives. *Environmental Pollution*, 299, 118871. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118871>
- Góral-Kowalczyk, M., Grządka, E., Orzeł, J., Góral, D., Skrzypek, T., Kobus, Z. ve Nawrocka, A. (2024). Green Synthesis of Iron Nanoparticles Using an Aqueous Extract of Strawberry (*Fragaria× ananassa* Duchesne) Leaf Waste. *Materials*, 17(11), 2515. <https://doi.org/10.3390/ma17112515>
- Gour, A. ve Jain, N. K. (2019). Advances in green synthesis of nanoparticles. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 47(1), 844-851. <https://doi.org/10.1080/21691401.2019.1577878>
- Göker, Y. (1982). Yalancı akasya (*Robinia pseudoacacia* L.)’nın teknolojik özellikleri ve kullanım yerleri. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 32(1), 99-104.
- Güven, G. ve Sızmaç, Ö. (2020). Çevre İçin Yeşil Sentez, Yeşil Sentez İçin Broyler Beslemede Kullanılan Alg, *Türkiye Klinikleri Veteriner Bilimleri Dergisi*, 11(1), 30-7.
- Harish, V., Ansari, M. M., Tewari, D., Gaur, M., Yadav, A. B., Garcia-Betancourt, M. L., ... Barhoum, A. (2022). Nanoparticle and nanostructure synthesis and controlled growth methods. *Nanomaterials*, 12(18), 3226. <https://doi.org/10.3390/nano12183226>
- Ho, S. (2022). Low-cost adsorbents for the removal of phenol/phenolics, pesticides, and dyes from wastewater systems: A review. *Water*, 14(20), 3203. <https://doi.org/10.3390/w14203203>
- Ho, Y. S. ve McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Holmannova, D., Borsky, P., Svadlakova, T., Borska, L. ve Fiala, Z. (2022). Carbon nanoparticles and their biomedical applications. *Applied Sciences*, 12(15), 7865. <https://doi.org/10.3390/app12157865>
- Horikoshi, S. A. T. O. S. H. I. ve Serpone, N. I. C. K. (2013). Introduction to nanoparticles. *Microwaves in nanoparticle synthesis: fundamentals and applications*, 1-24.
- Hosseinihashemi, S. K., HosseinAshrafi, S. K., Goldeh, A. J., Salem, M. Z. (2016). Antifungal and antioxidant activities of heartwood, bark, and leaf extracts of *Robinia pseudoacacia*. *BioResources*, 11(1), 1634-1646.

- Hudzovskyi, A., Demianenko, I. ve Levzun, I. (2024). The impact of metal oxide-based nanofertilisers on the physicochemical properties of agricultural plants. *Scientific Journal'Biological Systems: Theory & Innovation/Biologični Sistemi: Teoriâ Ta Ìnnovaciï*, 15(3).
- Hussain, A., Lakhan, M. N., Hanan, A., Soomro, I. A., Ahmed, M., Bibi, F. ve Zehra, I. (2023). Recent progress on green synthesis of selenium nanoparticles-a review A comprehensive study on green synthesis of selenium nanoparticles-review. *Materials Today Sustainability*, 100420. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100420>
- Hussain, I., Singh, N. B., Singh, A., Singh, H. ve Singh, S. C. (2016). Green synthesis of nanoparticles and its potential application. *Biotechnology letters*, 38, 545-560.
- Hussain, M., Ceccarelli, R., Marchisio, D. L., Fino, D., Russo, N., & Geobaldo, F. (2010). Synthesis, characterization, and photocatalytic application of novel TiO₂ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 157(1), 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.043>
- Huston, M., DeBella, M., DiBella, M. ve Gupta, A. (2021). Green synthesis of nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(8), 2130. <https://doi.org/10.3390/nano11082130>
- Ihsanullah, I., Jamal, A., Ilyas, M., Zubair, M., Khan, G., Atieh, M.A. (2020), Bioremediation of dyes: Current status and Prospects, *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101680. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101680>
- Ishtiaq, M., al-Rashida, M., Alharthy, R. D. ve Hameed, A. (2020). Ionic liquid-based colloidal nanoparticles: applications in organic synthesis. In *Metal nanoparticles for drug delivery and diagnostic applications* (pp. 279-299). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816960-5.00015-X>
- Jagathesan, G. ve Rajiv, P. (2018). Biosynthesis and characterization of iron oxide nanoparticles using Eichhornia crassipes leaf extract and assessing their antibacterial activity. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 13, 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.11.014>
- Jain, K., Takuli, A., Gupta, T. K., ve Gupta, D. (2024). Rethinking nanoparticle synthesis: a sustainable approach vs. traditional methods. *Chemistry-An Asian Journal*, 19(21), e202400701.
- Janas. Jana, S. Maiti, S. ve Jana (2017). Biopolymer-based Composites: Drug Delivery and Biomedical Applications, Elsevier, Woodhead Publishing, Duxford Cambridge, Mass.
- Jiang, Z., Li, L., Huang, H., He, W. ve Ming, W. (2022). Progress in laser ablation and biological synthesis processes:“Top-Down” and “Bottom-Up” approaches for the green synthesis of Au/Ag nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 14658. <https://doi.org/10.3390/ijms232314658>
- Joudeh, N., & Linke, D. (2022). Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 262.

- Jović, D., Jačević, V., Kuča, K., Borišev, I., Mrdjanovic, J., Petrovic, D., ... Djordjevic, A. (2020). The puzzling potential of carbon nanomaterials: general properties, application, and toxicity. *Nanomaterials*, 10(8), 1508. <https://doi.org/10.3390/nano10081508>
- Juwarkar, A.A., Singh, S.K., Mudhoo, A. (2010). A Comprehensive overview of elements in bioremediation, *Reviews in Environmental Science and Bio/ Technology*, 9, 215-288.
- Kannan, N. ve Sundaram, M. M. (2001). Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study. *Dyes and pigments*, 51(1), 25-40. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(01\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(01)00056-0)
- Kara, B. (2022). Robinia Pseudoacacia ve Robinia Hispida Bitki Özütlerinin Biyolojik Aktivitelerinin, Fenolik ve Mineral Bileşimlerinin Araştırılması, Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.
- Karakullukçu, V., Akar, B., Baltacı, C., Düzgün, A. Ö. ve Karpuz, Ö. (2023). Characterization, Antioxidant and Antimicrobial Activities of Iron Nanoparticles Synthesized Using Firethorn Fruit (*Pyracantha coccinea* Roemer) Extracts. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 13(2), 255-265.
- Khan, I., Saeed, K. ve Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, 12(7), 908-931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Khatoon, U. T. ve Velidandi, A. (2025). An Overview on the Role of Government Initiatives in Nanotechnology Innovation for Sustainable Economic Development and Research Progress. *Sustainability*, 17(3), 1250. <https://doi.org/10.3390/su17031250>
- Khenifi, A., Derriche, Z., Mousty, C., Prévot, V. ve Forano, C. (2010). Adsorption of glyphosate and glufosinate by Ni₂AlNO₃ layered double hydroxide. *Applied Clay Science*, 47(3-4), 362-371. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.055>
- Kouhbanani, M. A. J., Beheshtkhoo, N., Taghizadeh, S., Amani, A. M. ve Alimardani, V. (2019). One-step green synthesis and characterization of iron oxide nanoparticles using aqueous leaf extract of *Teucrium polium* and their catalytic application in dye degradation. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 10(1), 015007.
- Kösesakal, T. (2011). Organik Kirleticilerin Bitkilerle Temizlenmesi: Alınma ve Parçalanma Mekanizmaları, *Fen Bilimleri Dergisi*, Marmara Üniversitesi, 23(3), 123-139.
- Krishnaswamy, K. ve Orsat, V. (2017). Sustainable delivery systems through green nanotechnology. In *Nano-and microscale drug delivery systems* (pp. 17-32). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52727-9.00002-9>
- Król-Gracz, A., Michalak, E., Nowak, P. ve Dyonizy, A. (2011). Photo-induced chemical reduction of silver bromide to silver nanoparticles. *Open Chemistry*, 9(6), 982-989.

- Kumar, A., Bisht, B. S., Joshi, V. D. ve Dhewa, T. (2011). Review on bioremediation of polluted environment: a management tool. *International journal of environmental sciences*, 1(6), 1079-1093.
- Kumar, K. V., Ramamurthi, V. ve Sivanesan, S. (2005). Modeling the mechanism involved during the sorption of methylene blue onto fly ash. *Journal of colloid and interface science*, 284(1), 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.09.063>
- Kumar, R., Pulikanti, G. R., Shankar, K. R., Rambabu, D., Mangili, V., Kumbam, L. R., ... Yogesh, M. (2022). Surface coating and functionalization of metal and metal oxide nanoparticles for biomedical applications. In *Metal Oxides for Biomedical and Biosensor Applications* (pp. 205-231). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823033-6.00007-7>
- Kumari, S., Raturi, S., Kulshrestha, S., Chauhan, K., Dhingra, S., András, K., ... Singh, T. (2023). A comprehensive review on various techniques used for synthesizing nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 1739-1763. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.291>
- Lagergren, S. (1898) About the Theory of So-Called Adsorption of Soluble Substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24, 1-39.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Liu, Y. ve Feng, N. (2015). Nanocarriers for the delivery of active ingredients and fractions extracted from natural products used in traditional Chinese medicine (TCM). *Advances in Colloid and Interface Science*, 221, 60-76. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.04.006>
- Losito, D. W., Souza, N. I., Martins, T. S., Britos, T. N., Schumacher, M. L. ve Haddad, P. S. (2024). A review of superparamagnetic nanoparticles applications and regulatory aspects in medicine and environmental areas. *Journal of Materials Science*, 59(34), 16038-16068.
- Lu, A.H., Salabas, E. E. ve Schüth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte Chemie International edition*, 46(8), 1222-1244.
- Mahbub, T. ve Hoque, M. E. (2020). Introduction to nanomaterials and nanomanufacturing for nanosensors. *Nanofabrication for smart nanosensor applications*, 1-20. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820702-4.00001-5>
- Malik, S., Muhammad, K. ve Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A Revolution in Modern Industry. *Molecules*, 28(2), 661. <https://doi.org/10.3390/molecules28020661>
- Marinas, I. C., Oprea, E., Geana, E. I., Chifiriuc, C. ve Lazar, V. (2014). Antimicrobial and antioxidant activity of the vegetative and reproductive organs of Robinia

- pseudoacacia. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 79(11), 1363-1378. <https://doi.org/10.2298/JSC140304049M>
- Mehta, M., Bui, T. A., Yang, X., Aksoy, Y., Goldys, E. M. ve Deng, W. (2023). Lipid-based nanoparticles for drug/gene delivery: an overview of the production techniques and difficulties encountered in their industrial development. *ACS Materials Au*, 3(6), 600-619. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00032>
- Mohammad, Z. H., Ahmad, F., Ibrahim, S. A. ve Zaidi, S. (2022). Application of nanotechnology in different aspects of the food industry. *Discover Food*, 2(1), 12.
- Mondal, P., Nandan, A., Ajithkumar, S., Siddiqui, N. A., Raja, S., Kola, A. K. ve Balakrishnan, D. (2023). Sustainable application of nanoparticles in wastewater treatment: Fate, current trend & paradigm shift. *Environmental research*, 232, 116071. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116071>
- Muneer, M., Mughal, S. S., Pervez, S., Mushtaq, M., Shabbir, N., Aslam, A., ... Abbas, F. (2020). Diagnosis and treatment of diseases by using metallic nanoparticles-A review. *International Journal of Global Science*, 3, 27-35.
- Mutaf, T., Çalışkan, G., Öncel, S.Ş. ve Elibol, M. (2023). Metal nanopartiküllerin mikroalgler aracılığı ile yeşil sentezi, *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(1), 81-89. <https://doi.org/10.12714/egejfas.40.1.12>
- Nair, G. M., Sajini, T. ve Mathew, B. (2022). Advanced green approaches for metal and metal oxide nanoparticles synthesis and their environmental applications. *Talanta Open*, 5, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100080>
- Nguyen, N. T. T., Nguyen, L. M., Nguyen, T. T. T., Liew, R. K., Nguyen, D. T. C. ve Van Tran, T. (2022). Recent advances on botanical biosynthesis of nanoparticles for catalytic, water treatment and agricultural applications: A review. *Science of the Total Environment*, 827, 154160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154160>
- Niska, K., Zielinska, E., Radomski, M. W. ve Inkielewicz-Stepniak, I. (2018). Metal nanoparticles in dermatology and cosmetology: Interactions with human skin cells. *Chemico-Biological Interactions*, 295, 38-51. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2017.06.018>
- Njagi, E. C., Huang, H., Stafford, L., Genuino, H., Galindo, H. M., Collins, J. B., ... ve Suib, S. L. (2011). Biosynthesis of iron and silver nanoparticles at room temperature using aqueous sorghum bran extracts. *Langmuir*, 27(1), 264-271. <https://doi.org/10.1021/la103190n>
- Okwundu, O. S., Aniekwe, E. U. ve Nwanno, C. E. (2018). Unlimited potentials of carbon: different structures and uses (a Review). *Metallurgical and Materials Engineering*, 24(3), 145-171. <https://doi.org/10.30544/388>
- Osagie, C., Othmani, A., Ghosh, S., Malloum, A., Esfahani, Z.K. ve Ahmadi, S. (2021). Dyes adsorption from aqueous media through the nanotechnology: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 2195-2218. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.085>

- Padmavathy, K. S., Madhu, G., & Haseena, P. V. (2016). A study on effects of pH, adsorbent dosage, time, initial concentration and adsorption isotherm study for the removal of hexavalent chromium (Cr (VI)) from wastewater by magnetite nanoparticles. *Procedia Technology*, 24, 585-594 <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.127>
- Pandit, C., Roy, A., Ghotekar, S., Khusro, A., Islam, M. N., Emran, T. B., ... ve Bradley, D. A. (2022). Biological agents for synthesis of nanoparticles and their applications. *Journal of King Saud University-Science*, 34(3), 101869. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101869>
- Parveen, K., Banse, V. ve Ledwani, L. (2016, April). Green synthesis of nanoparticles: Their advantages and disadvantages. AIP conference proceedings (Vol. 1724, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.4945168>
- Pindiga, N. Y., Walid, A. H., Abdullahi, A. O. ve Mohammad, A. B. (2022). Kinetic, equilibrium and thermodynamic study of the adsorption of Pb (II) and Cd (II) ions from aqueous solution by the leaves biomass of guava and cashew plants. *Online Journal of Chemistry*, 2(1), 23-38. <https://doi.org/10.31586/ojc.2022.263>
- Pinto, M., Ramalho, P. S. F., Moreira, N. F. F., Gonçalves, A. G., Nunes, O. C., Pereira, M. F. R. ve Soares, O. S. G. P. (2020). Application of magnetic nanoparticles for water purification. *Environmental Advances*, 2, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100010>
- Polarz, S. (2011). Shape matters: anisotropy of the morphology of inorganic colloidal particles–synthesis and function. *Advanced Functional Materials*, 21(17), 3214-3230. <https://doi.org/10.1002/adfm.201101205>
- Praharaj, C., Patel, G. K. ve Nara, S. (2025). Plant biomass-derived nanomaterials for biosensing and bioimaging applications. *Industrial Crops and Products*, 230, 121074. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121074>
- Rafatmah, E. ve Hemmateenejad, B. (2023). Metal nanoparticles for sensing applications. *Fundamentals of Sensor Technology*, 311-366. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88431-0.00019-3>
- Rafique, M., Sadaf, I., Rafique, M. S. ve Tahir, M. B. (2017). A review on green synthesis of silver nanoparticles and their applications. *Artificial Cells, Nanomedicine, And Biotechnology*, 45(7), 1272-1291. <https://doi.org/10.1080/21691401.2016.1241792>
- Raina, N., Sharma, P., Slathia, P. S., Bhagat, D., ve Pathak, A. K. (2020). Efficiency enhancement of renewable energy systems using nanotechnology. *Nanomaterials And Environmental Biotechnology*, 271-297.
- Roy, A., Sharma, A., Yadav, S., Jule, L. T. ve Krishnaraj, R. (2021). Nanomaterials for remediation of environmental pollutants. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2021(1), 1764647. <https://doi.org/10.1155/2021/1764647>
- Saleh, T. A. (2022). Surface science of adsorbents and nanoadsorbents: properties and applications in environmental remediation (Vol. 34). Academic Press.

- Salem, S. S., & Fouda, A. (2021). Green synthesis of metallic nanoparticles and their prospective biotechnological applications: an overview. *Biological Trace Element Research*, 199(1), 344-370.
- Saraç, H., Durukan, H. ve Demirbaş, A. (2022). Sivas ve Tokat İllerinden Toplanan Akasya Bitkisi Yapraklarının (*Robinia pseudoacacia* L.) Bazı Besin Elementi Konsantrasyonları ve Antioksidan Enzim Aktivitelerinin Belirlenmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 11(2), 311-318. <https://doi.org/10.29278/azd.1127747>
- Sau, T. K. ve Rogach, A. L. (2010). Nonspherical noble metal nanoparticles: colloid-chemical synthesis and morphology control. *Advanced materials*, 22(16), 1781-1804. <https://doi.org/10.1002/adma.200901271>
- Schindler, M., Xu, J. ve Hochella Jr, M. F. (2024). Abiotic and biotic-controlled nanomaterial formation pathways within the Earth's nanomaterial cycle. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 646.
- Scimeca, M., Bischetti, S., Lamsira, H. K., Bonfiglio, R. ve Bonanno, E. (2018). Energy Dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis. *European Journal Of Histochemistry: EJH*, 62(1), 2841. <https://doi.org/10.4081/ejh.2018.2841>
- Seçmen, Ö., Gemici, Y., Görk, G., Bekat, L., & Leblebici, E. (2000). Tohumlu bitkiler sistematiği. Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi, 116, 394.
- Selmani, A., Kovačević, D. ve Bohinc, K. (2022). Nanoparticles: From synthesis to applications and beyond. *Advances in colloid and interface science*, 303, 102640. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102640>
- Shah, T. R., Babar, H. ve Ali, H. M. (2021). Energy harvesting: role of hybrid nanofluids. *Emerging Nanotechnologies for Renewable Energy*, 173-211. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821346-9.00011-0>
- Sharma, H. S. ve Sharma, A. (Eds.). (2017). Nanomedicine in central nervous system injury and repair. Academic Press.
- Singh, H., Chauhan, G., Jain, A. K. ve Sharma, S. K. (2017). Adsorptive potential of agricultural wastes for removal of dyes from aqueous solutions. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.030>
- 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, 1-24.
- Soltys, L., Olkhovyy, O., Tatarchuk, T. ve Naushad, M. (2021). Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles: Principles of green chemistry and raw materials. *Magnetochemistry*, 7(11), 145. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7110145>
- Speranza, G. (2021). Carbon nanomaterials: Synthesis, functionalization and sensing applications. *Nanomaterials*, 11(4), 967. <https://doi.org/10.3390/nano11040967>

- Szczyglewska, P., Feliczak-Guzik, A. ve Nowak, I. (2023). Nanotechnology–general aspects: A chemical reduction approach to the synthesis of nanoparticles. *Molecules*, 28(13), 4932. <https://doi.org/10.3390/molecules28134932>
- Thakur, M., Sharma, A., Chandel, M. ve Pathania, D. (2022). Modern applications and current status of green nanotechnology in environmental industry. *Green Functionalized Nanomaterials For Environmental Applications*, 259-281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823137-1.00010-5>
- Thangavelu, L., Veeraragavan, G. R., Mallineni, S. K., Devaraj, E., Parameswari, R. P., Syed, N. H., & Bhawal, U. K. (2022). [Retracted] Role of Nanoparticles in Environmental Remediation: An Insight into Heavy Metal Pollution from Dentistry. *Bioinorganic chemistry and applications*, 2022(1), 1946724.
- Titus, D., Samuel, E. J. J. ve Roopan, S. M. (2019). Nanoparticle characterization techniques. *Green Synthesis, Characterization And Applications Of Nanoparticles*, 303-319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00012-5>
- Tran, H. N., You, S. J., Hosseini-Bandegharai, A. ve Chao, H. P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review. *Water Research*, 120, 88-116. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014>
- Tübives. (2024). Turkish Plants Data Service. 5 Aralık 2024 tarihinde http://194.27.225.161/yasin/tubives/index.php?sayfa=1&tax_id=2450 adresinden erişildi.
- Vargas, A. M. M., Cazetta, A. L., Kunita, M. H., Silva, T. L. ve Almeida, V. C. (2011). Adsorption of methylene blue on activated carbon produced from flamboyant pods (*Delonix regia*): Study of adsorption isotherms and kinetic models. *Chemical Engineering Journal*, 168(2), 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.067>
- Vural, A., Demir, S. ve Boyno, G. (2018). Biyoremediasyon ve Fungusların Biyoremediasyonda Kullanılması. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 28(4), 490-501. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.418430>
- Wahajuddin, N. ve Arora, S. (2012). Superparamagnetic iron oxide nanoparticles: magnetic nanoplatforms as drug carriers. *International Journal Of Nanomedicine*, 3445-3471.
- Wang, J. ve Guo, X. (2020). Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. *Chemosphere*, 258, 127279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>
- Winsett, J., Moilanen, A., Paudel, K., Kamali, S., Ding, K., Cribb, W., ... ve Neupane, S. (2019). Quantitative determination of magnetite and maghemite in iron oxide nanoparticles using Mössbauer spectroscopy. *SN Applied Sciences*, 1, 1-8.
- Yakut, Ş.M. ve Karataş, M. (2021). Nanosentezde Yeşil Mühendislik Kavramı ve Çevre Mühendisliğindeki Yeri, Düzce Üniversitesi *Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9, 1267-1281. <https://doi.org/10.29130/dubited.799609>

- Yusefi, M., Shameli, K., Ali, R.R., Pang, S.W. ve Teow, S.Y. (2020). Evaluating anticancer activity of plant-mediated synthesized iron oxide nanoparticles using Punica granatum fruit peel extract. *Journal of Molecular Structure*, 1204, 127539. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127539>
- Zambri, N. D. S., Taib, N. I., Abdul Latif, F. ve Mohamed, Z. (2019). Utilization of neem leaf extract on biosynthesis of iron oxide nanoparticles. *Molecules*, 24(20), 3803. <https://doi.org/10.3390/molecules24203803>
- Zhang, J., Cheng, Y., Cheng, X., Cheng, M., An, H., Yin, J. ve Zhu, K. (2024). Effect of Adsorbed Phase Density on Excess Adsorption in Coal: An Experimental Study Based on High-Pressure Adsorption. *Energy & Fuels*, 38(16), 15270-15283. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01681>
- Zielińska, A., Carreiró, F., Oliveira, A. M., Neves, A., Pires, B., Venkatesh, D. N., ... ve Souto, E. B. (2020). Polymeric nanoparticles: production, characterization, toxicology and ecotoxicology. *Molecules*, 25(16), 3731. <https://doi.org/10.3390/molecules25163731>

ÖZGEÇMİŞ

Semra DEMİR, İlköğretim ve lise eğitimini Manisa Turgutlu'da tamamladı. 2007 yılında başladığı Önlisans eğitimini Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Sütçüler Prof. Dr. Hasan Gürbüz Meslek Yüksekokulu İşletme Bölümünü 2009 yılında tamamlamıştır. Lisans eğitimlerini ise; Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümünü 2011 yılında, 2013 yılında başladığı Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Tarımsal Biyoteknoloji Bölümünü 2017 yılında tamamlamıştır. 2011-2022 yılları arasında Balıkesir Üniversitesinde Memur olarak çalışmış ve 2022 yılından itibaren Gümüşhane İl Tarım ve Orman Müdürlüğünde Ziraat Mühendisi olarak göreve başlamış ve halen bu görevini devam ettirmektedir. 2023 yılında Gümüşhane Üniversitesi Biyoteknoloji Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Semra DEMİR, evli ve bir çocuk annesidir.