



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FENANTREN-İMİDAZOL TÜREVİ
DEMİROKSİT NANOPARÇACIKLARIN
SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

Uğur TAŞDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı

Ocak 2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Uğur TAŞDEMİR tarafından hazırlanan “Fenantren-İmidazol Türevi Demiroksit Nanoparçacıkların Sentezi ve Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 09/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mustafa TOPKAFA

.....

Danışman

Doç. Dr. Aslıhan YILMAZ OBALI

.....

Üye

Prof. Dr. Ahmed Nuri KURŞUNLU

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL
FBE Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 23201037 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that as required by these rules and conduct I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Uğur TAŞDEMİR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FENANTREN-İMİDAZOL TÜREVİ DEMİROKSİT NANOPARÇACIKLARIN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

Uğur TAŞDEMİR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aslıhan YILMAZ OBALI

2025, 171 Sayfa

Jüri

Danışman: Doç. Dr. Aslıhan YILMAZ OBALI
Prof. Dr. Ahmed Nuri KURŞUNLU
Prof. Dr. Mustafa TOPKAFA

Bu tez Fenantren-İmidazol türevli demiroksit (Fe_3O_4) nanoparçacıklarının sentezi ve ileri karakterizasyonunu kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Çalışmanın temel amacı Fenantren-İmidazol türevlerinin kimyasal stabilitesi ve biyolojik aktif özellikleri ile demiroksit nanoparçacıklarının manyetik özelliklerini birleştirerek yenilikçi ve çok yönlü bir hibrit materyal geliştirmektir. Bu materyalin optoelektronik biyomedikal ve çevresel uygulamalar için yüksek performanslı bir alternatif sunması hedeflenmiştir. Sentez sürecinde Fe_3O_4 nanoparçacıkları öncelikle SiO_2 kaplama ile stabilize edilmiş ardından CPTMS (3-kloropropil)trimetoksisilan ile fonksiyonel hale getirilmiştir. Son aşamada Fenantren-İmidazol türevleri yüzeye bağlanarak hibrit yapı elde edilmiştir. Bu sentez yöntemi yüksek verimlilik homojen kaplama ve kimyasal dayanıklılık sağlamıştır. Karakterizasyon çalışmaları sentezlenen hibrit materyalin fiziksel kimyasal ve manyetik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemiştir. FE-SEM, EDX ve STEM analizleri nanoparçacıkların düzenli morfolojik yapısını ve homojen kaplanma özelliklerini ortaya koymuş FT-IR ve XRD ile yüzeydeki fonksiyonel gruplar doğrulanmıştır. TGA/DSC termal analizleri materyalin yüksek termal dayanıklılığını göstermiş, VSM ölçümleri ise Fe_3O_4 çekirdeklerinin süperparamanyetik özelliklerini koruduğunu tespit etmiştir. Sonuçlar sentezlenen hibrit materyalin kimyasal stabilite optik ve manyetik özellikler açısından üstün nitelikler taşıdığını göstermiştir. Bu materyalin organik elektronik cihazlardan manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve hedefe yönelik ilaç taşıma sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma Fenantren-İmidazol türevleri ile demiroksit nanoparçacıklarının birleştirilmesine dayalı yenilikçi bir sentez yaklaşımı sunarak nanoteknoloji ve ileri malzemeler alanında önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: 9,10-Fenantrenkinon, Demiroksit, Hibrit Materyaller, nanoparçacık, Fe_3O_4 demiroksit, süperparamanyetizma.

ABSTRACT

MSc THESIS

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF PHENANTHRENE- IMIDAZOLE DERIVATIVE IRON OXIDE NANOPARTICLES

Uğur TAŞDEMİR

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Selçuk University
Nanotechnology And Advanced Materials Department**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Aslıhan YILMAZ OBALI

2025, 173 Pages

Jury

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Aslıhan YILMAZ OBALI

Prof. Dr. Ahmed Nuri KURŞUNLU

Prof. Dr. Mustafa TOPKAFA

This thesis comprehensively deals with the synthesis and further characterization of phenanthrene-imidazole derived iron oxide (Fe_3O_4) nanoparticles. The main objective of the study is to develop an innovative and versatile hybrid material by combining the chemical stability and biologically active properties of phenanthrene-imidazole derivatives with the magnetic properties of iron oxide nanoparticles. This material is intended to provide a high performance alternative for optoelectronic, biomedical and environmental applications. In the synthesis process, Fe_3O_4 nanoparticles were first stabilized with SiO_2 coating and then functionalized with CPTMS (3-chloropropyl)trimethoxysilane. In the last step, phenanthrene-imidazole derivatives were bonded to the surface and a hybrid structure was obtained. This synthesis method provided high efficiency, homogeneous coating and chemical resistance. Characterization studies investigated the physical chemical and magnetic properties of the synthesized hybrid material in detail. FE-SEM, EDX and STEM analyses revealed the regular morphological structure and homogeneous coating properties of the nanoparticles, while FT-IR and XRD confirmed the functional groups on the surface. TGA/DSC thermal analysis showed the high thermal stability of the material and VSM measurements revealed that the Fe_3O_4 cores retained their superparamagnetic properties. The results show that the synthesized hybrid material has superior chemical stability, optical and magnetic properties. It was concluded that this material can be used in a wide range of applications from organic electronic devices to magnetic resonance imaging (MRI) and targeted drug delivery systems. This study makes an important contribution to the field of nanotechnology and advanced materials by presenting an innovative synthesis approach based on combining phenanthrene-imidazole derivatives with iron oxide nanoparticles.

Keywords: 9,10-phenanthrenquinone, Iron oxide, Hybrid Materials, nanoparticle, Fe_3O_4 iron oxide, superparamagnetism.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans sürecim boyunca sahip olduğu engin bilgi birikimi ve deneyimle her aşamada yoluma ışık tutan, araştırma konusunu şekillendirmemden laboratuvar çalışmalarına ve tez yazımına kadar sabırla rehberlik eden, akademik gelişimimin yanı sıra manevi desteğini de daima hissettiren saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Aslıhan YILMAZ OBALI'ya,

Çalışma boyunca yapıcı eleştirileri ve değerli önerileriyle beni yeni bakış açıları kazanmaya teşvik eden jüri üyelerine ve akademik çevrede desteklerini esirgemeyen hocalarıma,

Hayatım boyunca bana sonsuz destek ve sevgi gösteren, onların sabrı, anlayışı ve teşvik edici sözleri sayesinde, karşılaştığım her engeli daha özgüvenli ve kararlılıkla aşılabildiğim, bana kattıkları değerler ve öğrettikleri her şey ile bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Tezcan TAŞDEMİR ve babam Cevdet TAŞDEMİR'e,

Yüksek lisans eğitimime başlamama vesile olan, her durumda bana güç ve neşe kaynağı olan, uzun çalışma saatlerinde beni anlayışla karşılayarak motivasyonumu yüksek tuttukları; sevgileri ve destekleriyle bu süreci ve hayatımı çok daha anlamlı kıldıkları için sevgili eşim Ümran ONARAN TAŞDEMİR ve biricik kızım Miray Ece TAŞDEMİR'e içtenlikle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Uğur TAŞDEMİR

KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Fenantren-İmidazoller.....	1
1.1.1. Fenantren-İmidazollerin Genel Özellikleri.....	1
1.1.2. Fenantren-İmidazollerin Sentez Metodları	5
1.1.2.1. o-Fenilendiamin ve Karbonil Bileşiklerinden Sentez.....	5
1.1.2.2. Diketon ve Aldehit Bileşiklerinden Sentez.....	6
1.1.2.3. Oksidatif Siklizasyon Yöntemleri ile Sentez	7
1.1.2.4. Metal Katalizli Sentez.....	7
1.1.2.5. Mikrodalga Destekli Sentez	8
1.1.2.6. Asidik İyoniklerin Kataliz Yöntemleri ile Sentez.....	9
1.1.2.7. Tek Pot (One-Pot) Multikomponent Reaksiyonlar ile Sentez	10
1.1.2.8. Pinner Reaksiyonu ile Sentez	11
1.1.2.9. Fotokimyasal Reaksiyonlar ile Sentez	12
1.1.2.10. Van Leusen Sentezi	13
1.1.2.11. Yeşil Kimya Yöntemleri ile Sentez	14
1.1.3. Fenantren-İmidazollerin Önemi ve Kullanım Alanları.....	14
1.2. Nanoparçacıklar	16
1.2.1. Nanoparçacıkların Genel Özellikleri	16
1.2.2. Nanoparçacıkların İleri Karakterizasyon Teknikleri	24
1.2.2.1. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	25
1.2.2.2. Raman Spektroskopisi	25
1.2.2.3. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)	25
1.2.2.4. Termal Gravimetrik Analiz (TGA).....	26
1.2.2.5. X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	27
1.2.2.6. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS veya EDX)	27
1.2.2.7. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM).....	27
1.2.2.8. Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu (STEM).....	28
1.2.2.9. Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM).....	28
1.2.3. Nanoparçacıkların Uygulamaları	29
1.3. Manyetizma	34
1.3.1. Paramanyetizma.....	36
1.3.2. Diyamanyetizma	38
1.3.3. Ferromanyetizma	40
1.3.4. Ferrimanyetizma	41
1.3.5. Antiferromanyetizma	43
1.3.6. Süperparamanyetizma.....	44
1.4. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıklar	44
1.4.1. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Sentez Metotları	47

1.4.1.1. Ortak Çöktürme Yöntemi	47
1.4.1.2. Hidrotermal Sentez Yöntemi	48
1.4.1.3. Mikroemülsiyon Sentez Yöntemi	49
1.4.1.4. Termal Parçalanma ile Sentez Yöntemi.....	50
1.4.1.5. Sol-Jel Sentez Yöntemi.....	52
1.4.1.6. Elektrokimyasal Sentez Yöntemi.....	53
1.4.2. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Yüzey Modifikasyonları	54
1.4.3. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Önemi ve Kullanım Alanları	58
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	62
2.1. Literatür Özetleri.....	62
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	77
3.1. Kullanılan Maddeler	77
3.2. Kullanılan Aletler	78
4. DENEYSEL BÖLÜM.....	79
4.1. 6-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-il)naftalin-2-ol, 1 Sentezi	79
4.2. 3-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-il)fenol, 2 Sentezi	80
4.3. 2-metoksi-6-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-il)fenol, 3 Sentezi.....	81
4.4. 1-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-yl)naftalin-2-ol, 4 Sentezi	82
4.5. Süperparamanyetik Manyetik (Fe ₃ O ₄) Nanoparçacık Sentezi.....	83
4.6. Silika Kaplı Manyetik Nanoparçacık (Fe ₃ O ₄ @SiO ₂) Sentezi.....	84
4.7. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @CPTMS Nanoparçacık Sentezi	84
4.8. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @CPTMS@1 Sentezi	85
4.9. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @CPTMS@2 Sentezi	85
4.10. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @CPTMS@3 Sentezi	86
4.11. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @CPTMS@4 Sentezi	87
4.12. 2-(6-(3-(trimetoksi)propoksi)naftalin-2-yl)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@1 Sentezi.....	87
4.13. 2-(3-(3-(trimetoksi)propoksi)fenil)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@2 Sentezi.....	88
4.14. 2-(3-(3-(trimetoksi)propoksi)fenil)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@3 Sentezi.....	88
4.15. 2-(3-(3-(trimetoksi)propoksi)fenil)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@4 Sentezi.....	89
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	90
5.1. Fenantren-İmidazol Türevi Moleküllerin Sentez Metotları ve Mekanizmaları... 90	
5.2. Fenantren-İmidazol Türevi Moleküllerin Spektroskopik Yöntemler ile Karakterizasyonu	95
5.3. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Karakterizasyonu.....	98
5.3.1. FT-IR Spektroskopisi.....	98
5.3.2. STEM Görüntüleme.....	99
5.3.3. FE-SEM Görüntüleme	101

5.3.4. EDX Görüntüleme	105
5.3.5. DSC Analizleri.....	119
5.3.6. TGA Analizleri	121
5.3.7. XRD Analizleri	124
5.3.8. VSM Analizleri.....	128
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	133
6.1. Sonuçlar	133
6.2. Öneriler	134
KAYNAKLAR	135
EKLER	149
FT-IR SPEKTRUMLARI	149
H-NMR SPEKTRUMLARI	155
C-NMR SPEKTRUMLARI	157

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

emu: Elektromanyetik Birim

Fe₃O₄: Manyetit

Oe: Oersted (Manyetik Alan Birimi)

RT: Oda Sıcaklığı (Room Temperature)

SiO₂: Silika

Kısaltmalar

CPTMS: (3-Chloropropyl)trimethoxysilane ((3-kloropropil)trimetoksisilan)

DSC: Differential Scanning Calorimeters (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)

EDX: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)

FE-SEM: Field Emission Scanning Electron Microscopy (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu)

FT-IR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)

NMR: Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi)

SEM: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu)

SPION: Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles (Süperparamanyetik Demir Oksit Nanoparçacıklar)

STEM: Scanning Transmission Electron Microscopy (Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu)

TEM: Transmission Electron Microscopy (Geçirimli Elektron Mikroskobu)

TEOS: Tetraethylorthosilicate (Tetraetilortosilikat)

TGA: Thermogravimetric Analysis (Termogravimetrik Analiz)

VSM: Vibrating Sample Magnetometer (Titreşimli Numune Manyetometresi)

XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy (X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi)

XRD: X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)



1. GİRİŞ

1.1. Fenantren-İmidazoller

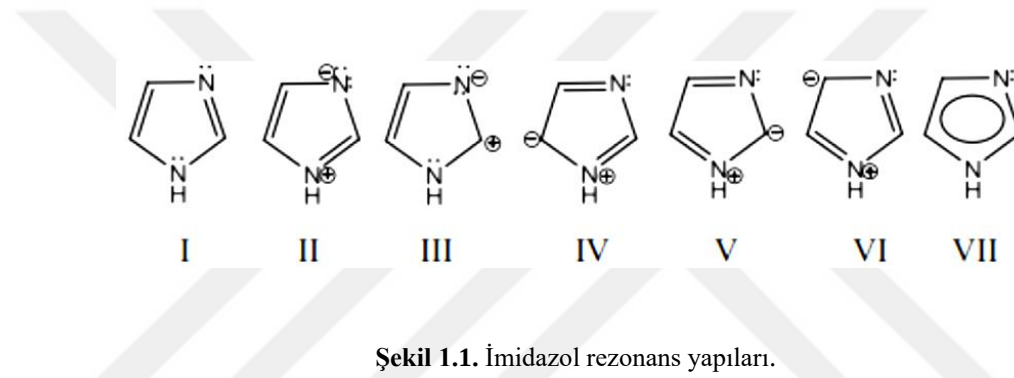
1.1.1. Fenantren-İmidazollerin Genel Özellikleri

Fenantren-İmidazoller fenantren ve imidazol halkalarının kimyasal sentez yoluyla birleştirilmesiyle oluşturulan karmaşık organik bileşiklerdir. Bu moleküller fenantren ve imidazol yapı taşlarının kimyasal ve fiziksel özelliklerini bir araya getirerek geniş bir uygulama yelpazesi sunar ve akademik araştırmalar ile endüstriyel uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Fenantren üç aromatik halkadan oluşan düzlemsel yapıda bir poliaromatik hidrokarbon olup kimyasal formülü $C_{14}H_{10}$ 'dur. Doğal olarak kömür katranı gibi kaynaklardan elde edilebilen fenantren aynı zamanda organik sentez yoluyla da üretilir. Molekölün aromatik yapısı geniş konjugasyon sistemi sayesinde yüksek kararlılık sergiler ve bu özellik organik elektronikler fotovoltaik cihazlar ve optoelektronik malzemelerde kullanımını mümkün kılmaktadır (Del Tito ve ark., 2020).

Fenantrenin elektronik özellikleri özellikle organik ışık yayan diyotlar (OLED'ler) ve organik fotovoltaik hücreler (OPV'ler) gibi uygulamalarda yüksek elektron mobilitesi ve iyi film oluşturma yeteneği ile cihaz performansını artırmada kritik rol oynar (Huang ve ark., 2019). Organik elektroniklerin yanı sıra biyomedikal araştırmalar ve farmasötik kimyada da önemli bir bileşen olan fenantren türevleri kanser tedavisinde kullanılan bazı ilaçların sentezinde büyük önem taşır. Biyolojik sistemlerle etkileşim yeteneği sayesinde çeşitli biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır. Spektroskopik analizlerde ise fenantren UV-Vis ve floresan spektroskopisi gibi yöntemlerle karakterize edilebilir. UV-Vis spektroskopisinde 300-400 nm aralığında floresan spektroskopisinde ise 350-400 nm aralığında karakteristik bantlar göstermesi aromatik yapısını ve konjugasyon derecesini ortaya koyar (Tschurl ve ark., 2006). Çevresel açıdan bakıldığında fenantren önemli bir poliaromatik hidrokarbon (PAH) olup yanma süreçleri sonucunda atmosfere salınarak toprak ve su kirliliğine yol açabilir. Biyolojik olarak zor parçalanabilmesi ve toksik etkileri çevresel izleme çalışmalarında fenantrenin önemli bir hedef bileşen olmasına yol açmıştır (Zhao ve ark., 2016). Fenantren kimyasal ve fiziksel özellikleri ile organik kimya malzeme bilimi ve çevre bilimlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Türevlerinin bilimsel ve teknolojik

uygulamalarda oynadığı rol hem temel bilimler hem de uygulamalı araştırmalar açısından oldukça değerlidir (Changjin, 2013).

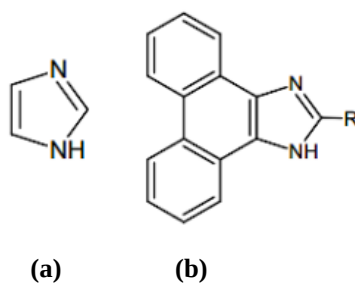
İmidazoller iki azot ve üç karbon atomundan oluşan beş üyeli bir heterosiklik bileşik sınıfıdır ve kimya ile biyoloji bilimlerinde önemli bir yere sahiptir. Kimyasal formülü $C_3H_4N_2$ olan imidazol halkası aromatik yapısı ve yapısal kararlılığı ile dikkat çeker. İmidazol molekülü I II III IV V ve VI gibi farklı Lewis yapılarının bir kombinasyonu olarak ele alınabilir. Bu Lewis yapılarının her biri imidazol molekülünün gerçek yapısını tam anlamıyla yansıtmaz. Ancak bu yapılar arasında meydana gelen hızlı ve sürekli geçişler imidazolün rezonans hibriti olarak bilinen tek ve ortalama bir yapıya sahip olduğunu ifade eder. İmidazolün aromatik karakteri VII numaralı şekilde daha net bir şekilde anlaşılabilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. İmidazol rezonans yapıları.

Halkada bulunan azot atomları imidazolün bazik ve amfoterik özellikler göstermesini sağlayarak biyolojik sistemlerde geniş işlevlere sahip olmasına katkıda bulunur. Bu özellik özellikle biyokimyasal süreçlerde proton transferi ve tamponlama kapasitesini artırır (Anderson ve Long, 2010). İmidazol halkasının pKa değeri yaklaşık 7 olup fizyolojik pH koşullarında hem protonlanabilir hem de deprotonlanabilir olmasını sağlar. Bu özellik imidazolü biyolojik sistemlerdeki enzimatik reaksiyonlarda ve metal iyonları ile kompleks oluşturan sistemlerde önemli bir aktör haline getirir (Romero ve ark., 2014). Sentetik kimyada imidazol türevleri geniş bir uygulama alanına sahiptir. Farmasötik sektöründe antifungal antibakteriyel ve antikanser ajanlar olarak kullanılırlar. Örneğin klotrimazol ve ketokonazol gibi antifungal ilaçlar mantar hücrelerinin zar yapısını bozarak etkili olur (Hossain ve Nanda, 2018). Ayrıca imidazol türevleri kanser tedavisinde kullanılan bazı ilaçların yapısında bulunur ve hücre bölünmesini engelleyerek kanser hücrelerinin çoğalmasını durdurur (Kerru ve ark., 2019). Kimyasal reaktivite açısından imidazol halkası elektrofilik aromatik süstitüsyon (EAS) reaksiyonlarına katılabilir ve bu da çeşitli türevlerinin sentezine olanak tanır.

Ayrıca imidazol türevleri koordinasyon kimyasında ligand olarak işlev görerek metal komplekslerinin stabilizasyonunda önemli rol oynar. Bu özellik imidazolün metal-organik çerçeveler (MOF'ler) gibi yapıların tasarımında kullanılmasına olanak tanır (Romero ve ark., 2014). İmidazoller kimyasal ve biyolojik özellikleri ile organik kimya malzeme bilimi ve biyomedikal araştırmalarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Türevlerinin farmasötik ve endüstriyel uygulamalardaki kritik rolleri hem temel bilimlerde hem de uygulamalı bilimlerde büyük bir öneme sahiptir. İmidazoller ilaç tasarımından malzeme sentezine kadar birçok alanda benzersiz özellikler sergileyerek bilimsel ve teknolojik gelişmelere katkı sağlarlar (Anderson ve Long, 2010). Fenantren-İmidazoller fenantrenin geniş konjugasyon özellikleri ve imidazol halkasının heterosiklik yapısının bir araya gelmesiyle organik kimya malzeme bilimi ve biyomedikal araştırmalarda geniş bir uygulama alanına sahiptirler (Şekil.1.2.). Fenantren-İmidazol yapıları elektronik ve optik özellikleri ile özellikle organik elektroniklerde ve biyomedikal uygulamalarda dikkat çekerler. Bu tür bileşiklerin benzersiz özellikleri onları modern teknoloji ve bilimsel araştırmaların vazgeçilmez bileşenleri haline getirir. Fenantren-İmidazollerin kimyasal reaktivitesi, imidazol halkasındaki azot atomları ve fenantren çekirdeğindeki aromatik yapılar tarafından belirlenir. Bu bileşikler, elektrofilik ve nükleofilik reaksiyonlara karşı yüksek reaktivite gösterir. Elektrofilik aromatik süstitüsyon reaksiyonlarına girerek çeşitli fonksiyonel grupların eklenmesine olanak tanır. Ayrıca, imidazol halkası, metal iyonları ile güçlü kompleksler oluşturabilir bu da fenantrenimidazol türevlerinin koordinasyon kimyasında ligand olarak kullanılmasını sağlar.



Şekil 1.2. İmidazol (a) ve süstitüe Fenantren-İmidazol (b) bileşiklerinin açık yapısı.

Fenantren ve imidazol yapı taşlarının kimyasal olarak birleştirilmesi bu bileşiklerin elektronik optik ve biyomedikal özelliklerini artırarak onları çok yönlü hale getirir. Bu özellikler Fenantren-İmidazol türevlerini modern bilim ve teknolojinin birçok alanında uygulanabilir hale getirir. Geniş uygulama yelpazesi bu bileşiklerin

bilimsel araştırmalarda ve ileri teknoloji ürünlerinde kritik bir role sahip olmasını sağlamaktadır. Fenantren-İmidazol türevlerinin öne çıkan uygulama alanlarından biri organik elektroniklerdir. Fenantren-İmidazol bazlı organik ışık yayan diyotlar (OLED'ler) geniş emisyon spektrumları ve yüksek fotostabilite özellikleri ile verimli ışık yayan cihazlar olarak kullanılmaktadır. Bu yapıların elektron mobilitesi OLED'ler ve organik fotovoltaiik hücreler (OPV'ler) gibi cihazların verimliliğini artırır. Özellikle mavi ve yeşil ışık yayan OLED'ler aydınlatma ve ekran teknolojilerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fenantren-İmidazol türevlerinin organik elektroniklerde sağladığı bu avantajlar enerji tasarruflu ve uzun ömürlü cihazların geliştirilmesine olanak tanır (Kula ve ark., 2018). Biyomedikal alanda Fenantren-İmidazol türevleri özellikle kanser tedavisinde kullanılan ilaçlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Bu bileşikler hücre içi proteinlerle etkileşime girerek apoptoz (hücre ölümü) mekanizmalarını aktive eder. Moleküler şaperon proteinlerinin (Hsp70) inhibisyonu yoluyla kanser hücrelerinin büyümesini engelleyebildikleri gösterilmiştir. Bu özellik Fenantren-İmidazol türevlerinin kanser tedavisinde etkili birer ajan olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Patel ve ark., 2016). Ayrıca Fenantren-İmidazol temelli bileşikler biyosensörlerde ve biyomedikal görüntüleme sistemlerinde biyolojik moleküllerle etkileşim kapasiteleri sayesinde moleküler dedektörler olarak da kullanılabilirler. Fenantren-İmidazol türevlerinin bir diğere önemli özelliğı kimyasal ve termal kararlılıklarının yüksek olmalarıdır. Bu bileşikler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları sayesinde ileri teknoloji ürünlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Polimer yapıların sertleştirilmesi metal komplekslerinin stabilize edilmesi gibi endüstriyel uygulamalarda Fenantren-İmidazol türevleri mekanik ve termal dayanıklılığı artırarak uzun ömürlü malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlarlar. Özellikle bu bileşiklerin metal-organik çerçeveler (MOF'ler) ile etkileşime girme yetenekleri çevresel uygulamalarda ağır metallerin ve toksik maddelerin sudan uzaklaştırılmasında etkili oldukları anlaşılmıştır. Bu özellikler çevresel temizleme süreçlerinde de bu bileşiklerin kullanımlarını mümkün hale getirmektedir (Eshghi ve ark., 2015). Fenantren-İmidazol türevlerinin fotofiziksel özellikleri de oldukça dikkat çekicidir. Bu bileşikler UV ve görünür ışık altında geniş emilim ve emisyon kapasiteleri sergilemektedir. Özellikle mavi ışık yayan yapıların yüksek floresans verimi Fenantren-İmidazol türevlerini optoelektronik cihazlarda ideal malzemeler haline getirmiştir. Organik fotodiyotlar (OPD'ler) ve lazer teknolojilerinde bu tür bileşiklerin kullanımı ileri teknoloji cihazlarının performansını önemli ölçüde arttırabilmektedir (Skonieczny ve ark., 2017).

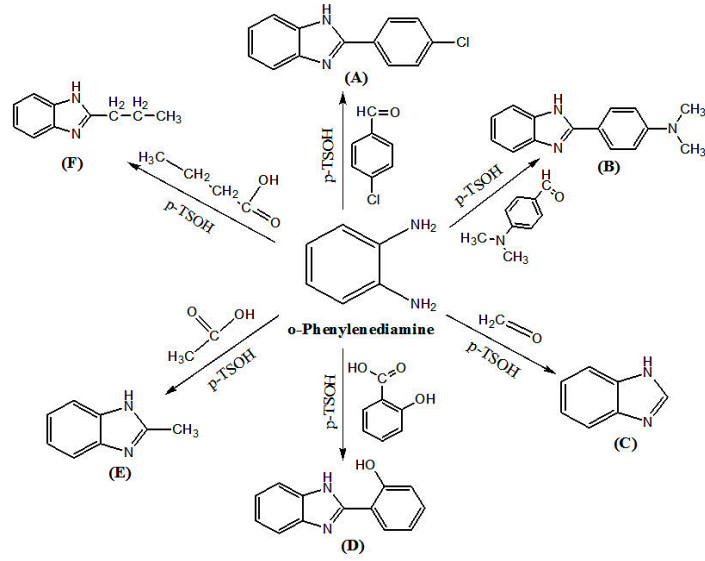
1.1.2. Fenantren-İmidazollerin Sentez Metodları

İmidazol halkasının oluşum reaksiyonu çeşitleri benzimidazol Fenantren-İmidazol vb. moleküllerin sentezleri için de kullanılmaktadır. Bu reaksiyon çeşitlerinin en yaygın olanları o-Fenilendiamin ve karbonil bileşiklerinden sentez, diketon ve aldehit bileşiklerinden sentez, oksidatif siklizasyon yöntemleri ile sentez, metal katalizli sentez, mikrodalga destekli sentez asidik iyoniklerin kataliz yöntemleri ile sentez, tek pot (one-pot) multikomponent reaksiyonlar ile sentez, Pinner reaksiyonu ile sentez, fotokimyasal reaksiyonlar ile sentez, Van Leusen sentezi, yeşil kimya yöntemleri ile sentezdir.

1.1.2.1. o-Fenilendiamin ve karbonil bileşiklerinden sentez

Fenantren-İmidazollerin sentezinde kullanılan yöntemlerden biri o-fenilendiamin ve karbonil bileşiklerinin reaksiyonu ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde o-fenilendiamin karbonil bileşikleri (örneğin aldehitler veya ketonlar) ile reaksiyona girerek Fenantren-İmidazol türevleri oluşturabilmektedirler. Reaksiyon genellikle asidik veya bazik katalizörler altında yapılır ve etanol veya metanol gibi çözücüler kullanılmaktadır. Reaksiyonun gerçekleşmesi için genellikle ısı gereklidir. Reaksiyon mekanizması o-fenilendiaminin karbonil bileşiği ile kondensasyon reaksiyonu geçirmesi ile başlar. Bu süreçte imidazol halkası oluşur ve bir mol su açığa çıkmaktadır.

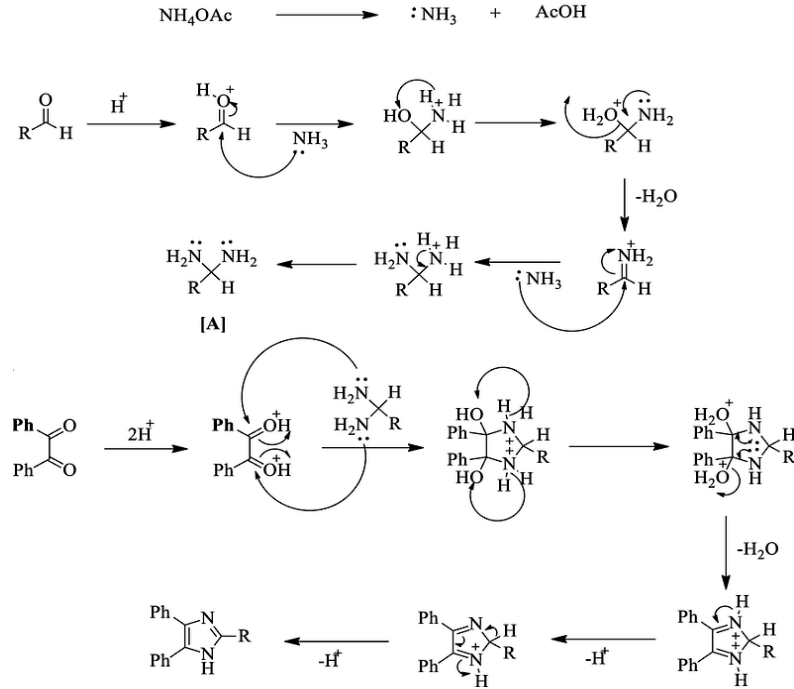
Bu ürünler çeşitli farmakolojik ve optik özelliklere sahip olabilir ve biyolojik aktiviteleri nedeniyle tıbbi kimyada önemli bir yere sahiptir. Fenantren-İmidazoltürevlerinin sentezi için bu yöntem verimli ve etkili bir yol olarak kabul edilir ve kimyasal sentezde önemli uygulamalara sahiptir. Benzimidazollerin sentezinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan bu yöntem (genellikle karboksilik asitler asit klorürler veya aldehitler) ile reaksiyonu ile elde edilmesidir. o-Fenilendiamin karbonil bileşiği ile asidik bir ortamda ısıtılır ve bu süreç suyun ayrılmasıyla halkalaşma reaksiyonunu teşvik eder ve benzimidazol halkası oluşur. Ayrıca 2-süstitüe benzimidazollerin sentezi o-Fenilendiamin ve formik asit ile gerçekleştirebilmektedir (Kadhim ve Kazim, 2018) (Şekil.1.3.).



Şekil 1.3. o-Fenilendiamin ve Karbonil bileşiklerinden Fenantren-İmidazol sentezi.

1.1.2.2. Diketon ve Aldehit bileşiklerinden sentez

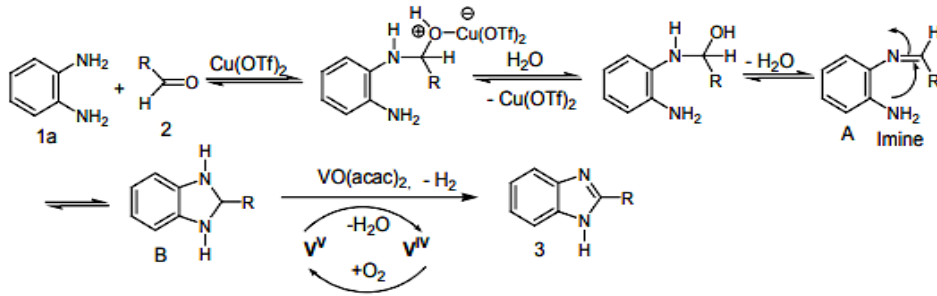
Bu yöntem diketon türevi bileşiklerin aldehitler ile bir amin kaynağı olarak amonyak amonyum asetat veya birincil aminleri kullanarak *Debus-Radziszewski* kenetlenme reaksiyonu vermesi sonucu oluşan imidazol sentez yöntemidir (Bratulescu, 2009; Siwach ve Verma, 2021) (Şekil.1.4.).



Şekil.1.4. Debus-Radziszewski imidazol oluşum mekanizması.

1.1.2.3. Oksidatif siklizasyon yöntemleri ile sentez

Oksidatif siklizasyon yöntemleri organik kimyada halka yapılarının oluşturulması için önemli bir stratejidir. Bu yöntemler oksidatif koşullar altında bir molekül içindeki reaktif grupların bir araya getirilerek halka kapanmasını teşvik eder. Oksidatifsiklizasyon karbon-karbon ve karbon-heteroatom bağlarının oluşturulması yoluyla çeşitli organik bileşiklerin sentezinde kullanılabilir. Bu yöntemlerde genellikle metal katalizörler örneğin paladyum bakır ve demir ya da organik katalizörler kullanılmaktadır. Böylece katalizörler reaksiyonun etkinliğini ve seçiciliğini artırır. Ayrıca oksidatifsiklizasyon süreçlerinde yaygın olarak oksijen hidrojen peroksit persülfatlar ve peroksiasitler gibi oksidanlar kullanılmaktadır. Oksidanlar reaksiyonun oksidatif doğasını sağlayarak gerekli oksidasyon durumlarını oluşturur. Uygun katalizör ve oksidan seçimi bu süreçlerde kritik öneme sahiptir. o-fenilendiaminlerin oksidatifsiklizasyonu benzimidazol türevlerinin sentezinde başka bir önemli yöntemdir. o-fenilendiaminlerin uygun bir oksitleyici varlığında siklizasyonu ile benzimidazol halkası oluşturulur. O-fenilendiaminlerin bakır(II) asetat ve hava oksijeni varlığında siklizasyonu 2-süstitüe benzimidazoller verir (Halder, 2020) (Şekil.1.5.).

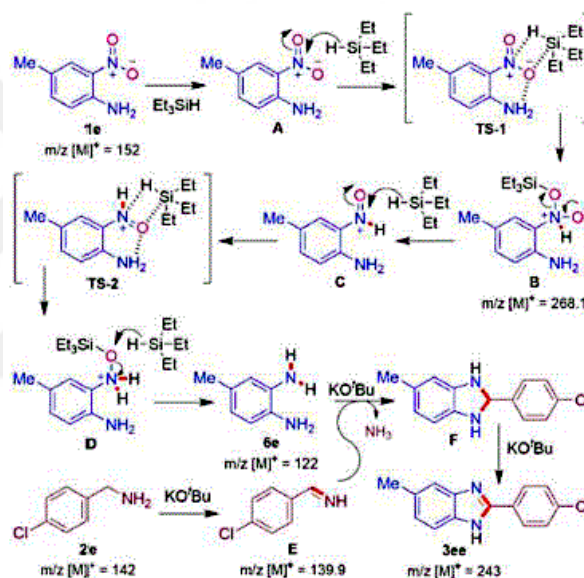


Şekil.1.5. 2-Aril-1H-benzimidazollerin sentezi mekanizma.

1.1.2.4. Metal katalizli sentez

Metal katalizli sentez yöntemleri organik kimyada çeşitli kimyasal reaksiyonları hızlandırmak ve kontrol etmek için metal katalizörlerin kullanıldığı stratejilerdir. Bu yöntemler hem laboratuvar ölçeğinde hem de endüstriyel üretimde yaygın olarak kullanılır ve birçok önemli organik bileşiğin sentezinde kilit rol oynar. Metal katalizörler reaksiyon mekanizmalarını değiştirerek daha hızlı ve seçici reaksiyonlar

sağlarlar. Paladyum platin rutenyum iridyum bakır ve demir gibi metaller yaygın olarak kullanılan katalizörlerdir. Metal katalizli sentez yöntemleri yüksek verim seçicilik ve reaktivite avantajları sunarlar. Bununla birlikte bazı metallerin yüksek maliyeti ve toksisitesi çevresel ve ekonomik açıdan zorluklar yaratabilir. Bu nedenle metal katalizörlerin geri dönüşümü ve daha çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi üzerine araştırmalar devam etmektedir. Metal katalizli reaksiyonlar benzimidazol türevlerinin sentezinde yüksek verimlilik ve seçicilik sağlayabilirler. Paladyum veya bakır gibi metallerin katalizör olarak kullanıldığı reaksiyonlarla arilhalojenürler ve o-fenilendiaminler arasında çapraz bağlanma reaksiyonları gerçekleştirilirler. Palladyum katalizli N-arilleme reaksiyonları ile çeşitli benzimidazol türevleri elde edilebilir (Kabi ve ark., 2021) (Şekil.1.6.).

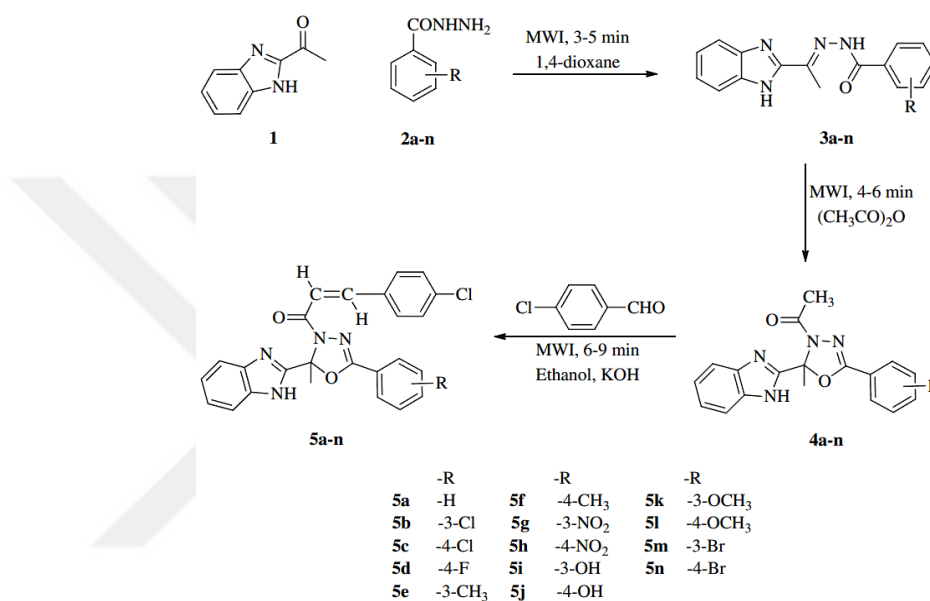


Şekil.1.6. Paladyum katalizli N-arilleme reaksiyonları mekanizması.

1.1.2.5. Mikrodalga destekli sentez

Mikrodalga destekli sentez yöntemi kimyasal reaksiyonların hızını artırmak ve verimliliğini iyileştirmek için mikrodalga ışınlarının kullanıldığı bir tekniktir. Bu yöntem geleneksel ısıtma yöntemlerine göre daha hızlı ve enerji açısından daha verimli bir alternatif sunmaktadır. Mikrodalga enerjisi kimyasal maddelerin doğrudan ve homojen bir şekilde ısınmasına olanak tanır ve bu da reaksiyon sürelerini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bununla birlikte bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin mikrodalga ile ısıtma her tür kimyasal sistem için uygun olmayabilir ve bazı durumlarda

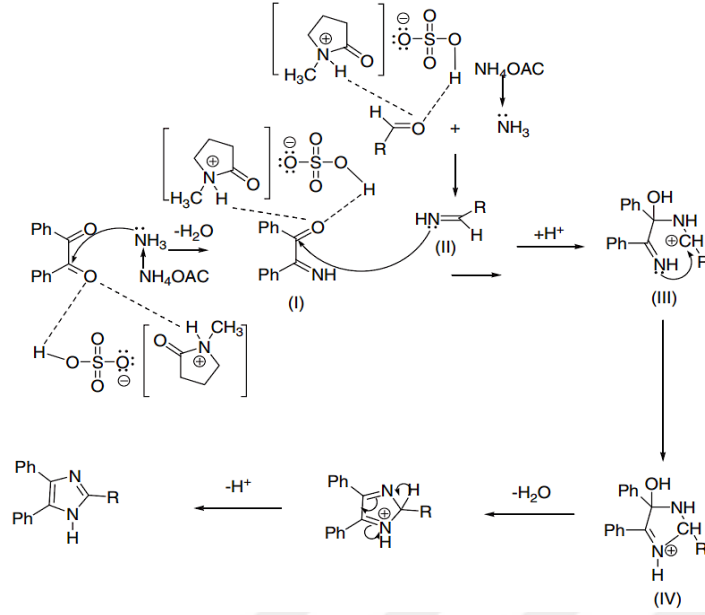
eşit olmayan ısınma veya aşırı ısınma sorunları ortaya çıkabilir. Ayrıca mikrodalga destekli cihazların maliyeti geleneksel ısıtma ekipmanlarına göre daha yüksek olabilir. Mikrodalga destekli sentez organik inorganik ve biyokimyasal reaksiyonlar dahil olmak üzere birçok alanda uygulanabilir. O-fenilendiamin ve karbonil bileşikleri mikrodalga ışını altında hızlı bir şekilde benzimidazol halkasına dönüştürülür. Mikrodalga destekli sentez ile hızlı ve verimli bir şekilde benzimidazol türevleri elde edilebilir (Desai ve Kotadiya, 2014) (Şekil.1.7.).



Şekil.1.7. 5a-n Başlıklı bileşiklerin sentezi için mikrodalga destekli sentez metodu.

1.1.2.6. Asidik iyoniklerin kataliz yöntemleri ile sentez

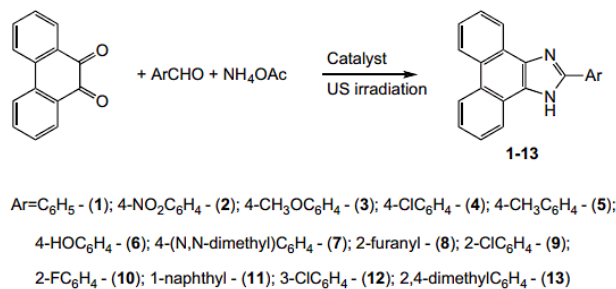
Asidik iyonik sıvılar kullanılarak yapılan kataliz yöntemi Fenantren-İmidazol türevlerinin sentezinde çevre dostu ve verimli bir süreç sunmaktadır. Bu yöntemde asidik karaktere sahip iyonik sıvılar hem katalizör hem de solvent olarak işlev görür. Brønsted asidik iyonik sıvılar reaksiyon ortamında proton donörü olarak hareket eder ve elektrofilik reaksiyonların gerçekleşmesini kolaylaştırır. Bu sıvılar yüksek termal ve kimyasal kararlılığa sahip oldukları için reaksiyonların daha sürdürülebilir ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır (Shaterian ve Ranjbar, 2011) (Şekil.1.8.).



Şekil.1.8. Brønsted asidik iyonik sıvı olarak N-metil-2-pirolidonyum hidrojen sülfat varlığında benzil benzaldehit ve amonyum asetat arasındaki kondenzasyon reaksiyonunun mekanizması.

1.1.2.7. Tek Pot (One-Pot) multikomponent reaksiyonlar ile sentez

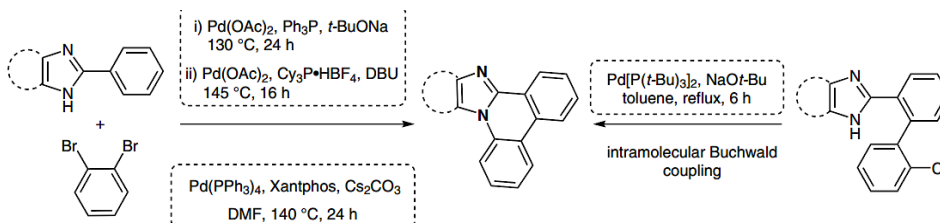
Fenantren-İmidazol türevlerinin sentezinde kullanılan tek pot multikomponent reaksiyonlar aynı kapta birden fazla başlangıç materyalinin katılımıyla istenen ürünün sentezlendiği etkili bir yöntemdir. Bu yöntem hem reaksiyon adımlarını azaltması hem de yüksek verim sağlaması nedeniyle Fenantren-İmidazol türevlerinin sentezi için tercih edilen bir stratejidir. Tek pot reaksiyonlar reaksiyon bileşenlerinin tek bir kapta birleştirilmesi ve basit reaksiyon koşullarıyla hızlı bir şekilde son ürüne ulaşılması prensibine dayanır. Bu yöntemde genellikle aromatik aldehytler 9,10-fenantrenkinon ve amonyum asetat gibi başlangıç materyalleri kullanılarak uygun asidik katalizörler altında yüksek verimle imidazol türevleri elde edilir. Multikomponent reaksiyonlar basitlikleri ve çeşitli fonksiyonel grupların aynı anda yapılandırılmasına olanak tanımaları sebebiyle oldukça avantajlıdır. *Damavandi ve arkadaşları'nın* tarafından yapılan bir çalışmada 2-aril-1H-fenantreno[9,10]dimidazol türevleri aromatik aldehytler 9,10-fenantrenkinon ve amonyum asetat kullanılarak ultrasonik ışınlama altında sentezlenmiştir. Bu çalışmada optimize edilmiş reaksiyon koşullarında geniş bir aromatik aldehyt yelpazesi kullanılarak yüksek saflıkta ve verimde ürün elde edilmiştir. Asit katalizli bu multikomponent sentez hızlı reaksiyon süresi ve saf ürün verimi açısından büyük avantaj sağlamaktadır (Damavandi, 2011) (Şekil.1.9.).



Şekil.1.9. 2-aril-1 H-fenantro[910- d]imidazol türevlerinin sentezi 1-13.

1.1.2.8. Pinner reaksiyonu ile sentez

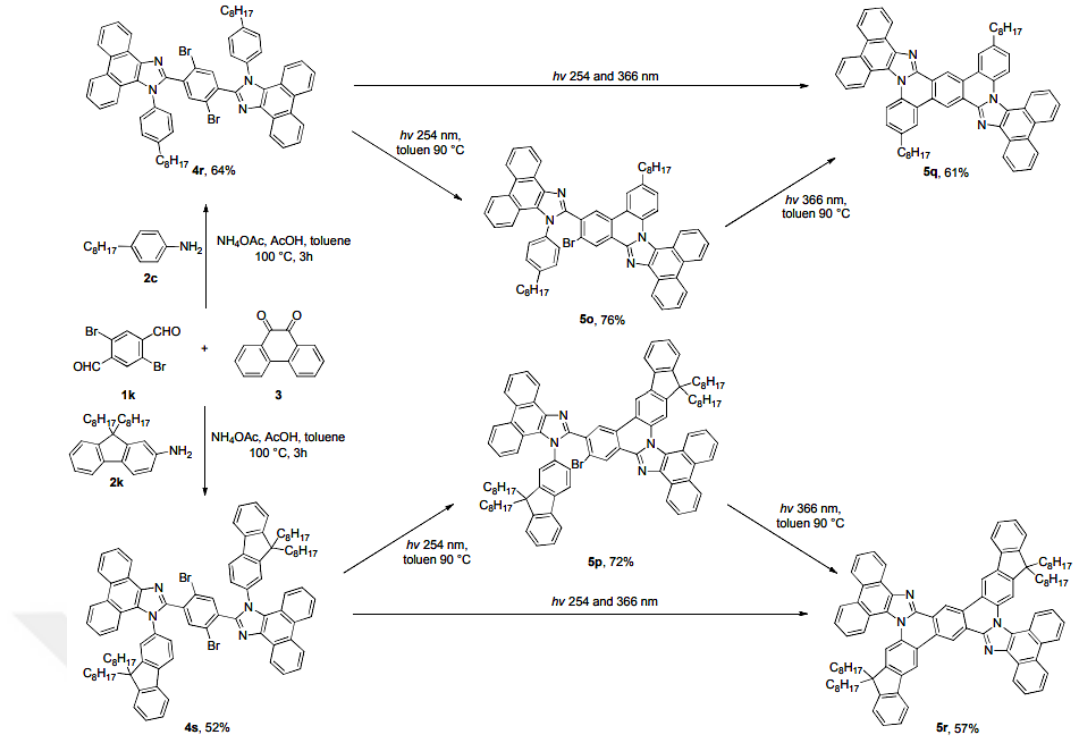
Pinner reaksiyonu nitril bileşiklerinin asidik ortamlarda alkol ile reaksiyona sokulması sonucu imino esterlerin olduğu ve ardından çeşitli çevrim mekanizmalarıyla siklik yapılar elde edilen bir reaksiyondur. Bu yöntem özellikle imidazol türevlerinin fenantren çekirdeklerine bağlanarak elde edilmesinde kullanılan önemli bir sentez stratejisidir. Bu bağlamda Pinner reaksiyonu fenantren türevlerinin ve imidazol halkasının birleşimi için çeşitli kimyasal yollar sunmaktadır. Pinner reaksiyonu genellikle bir fenantren türevi içeren nitril bileşiğinin asidik bir ortamda alkollerle reaksiyona sokulmasıyla başlar. Bu tepkime sonucunda oluşan imino eter türevleri uygun bir çevrim ile imidazol halkası oluşturur. Fenantren türevlerinde bu dönüşümdeki stratejiler fenantren halkasına bağlı yan grupların yönlendirici etkisiyle optimize edilebilir. Bu süreçte fenantren türevine bağlı uygun yan gruplar kullanılarak hedeflenen imidazol türevleri elde edilebilir. *Saini ve arkadaşları'nın* imidazoller üzerinden fenantren türevleri elde etmek amacıyla dört bileşenli bir reaksiyon kombinasyonu uygulamışlardır. Çalışmada fenantren bazlı imidazoller elde edilip bu yapıların çeşitli katalizörler yardımıyla fonksiyonelleştirildiği bir sentez yöntemi geliştirilmiştir (Saini ve ark., 2015). Bu stratejiler fenantren halkası ve imidazol türevlerinin kombinasyonunu amaçlayan sentez süreçleri için esnek çözümler sunmuştur (Şekil.1.10.).



Şekil.1.10. İmidazo[12-f]fenantridinlerin sentezi için yöntemler.

1.1.2.9. Fotokimyasal reaksiyonlar ile sentez

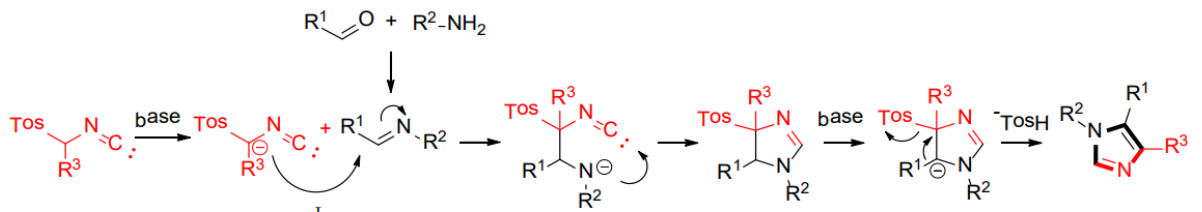
Fenantren-İmidazol türevlerinin sentezinde fotokimyasal reaksiyonlar UV ışığı kullanılarak gerçekleştirilen yenilikçi bir yöntemdir. Bu süreç genellikle bromofenantren türevlerinin UV ışığı altında intramoleküler arilasyonuna dayanır. Reaksiyon sırasında fenantren türevlerinde 254 nm ışık altında fotokimyasal olarak aktive edilen karbon-brom bağları kopar ve imidazol halkası üzerinde yeni bağlar oluşur. Bu genişlemiş π -sistemler ve yüksek verimli floresan özellikler gösteren ürünler elde edilmesini sağlar. Reaksiyonlar genellikle katalizör veya baz gerektirmez ve çeşitli fonksiyonel grupları tolere eder. Bu yaklaşım karmaşık aromatik yapılar oluşturmak için güçlü bir seçenek sunar ve yüksek saflıkta ürünler sağlar. Fotokimyasal reaksiyonların optik özelliklere dayalı avantajları Fenantren-İmidazol türevlerinin optoelektronik cihazlar ve ileri malzemeler için kullanım potansiyelini artırmaktadır (Skonieczny ve ark., 2017) (Şekil.1.11.).



Şekil.1.11. Bis-Fenantren-İmidazollerin sentezi ve fotokimyasal dönüşümü.

1.1.2.10. Van Leusen Sentezi

Van Leusen imidazol sentezi TosMIC (p-tosilmetil izosiyanür) ve uygun karbonil bileşikler kullanılarak imidazol türevlerinin sentezini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem hem geniş bir substrat toleransı hem de yüksek verimliliği ile öne çıkar. Fenantren türevlerinin imidazol halkası ile fonksiyonelleştirilmesi özellikle optoelektronik ve biyolojik uygulamalar açısından ilgi çekici bileşikler sunmaktadır. Van Leusen yöntemi fenantren çekirdeği ile imidazol halkasının birleştirilmesi için uygun bir strateji sağlamaktadır (Zheng ve ark., 2020) (Şekil.1.12).



Şekil.1.12. Van Leusen imidazol sentezinin mekanizması.

1.1.2.11. Yeşil kimya yöntemleri ile sentez

Yeşil kimya çevreye zarar vermeyen sürdürülebilir ve ekonomik açıdan verimli kimyasal süreçler ve ürünler geliştirmeyi hedefleyen bir bilim dalıdır. Kimyasal süreçlerin çevresel etkilerini en aza indirmeyi ve kaynak verimliliğini artırmayı amaçlayan bir dizi prensip üzerine kuruludur. Bu kapsamda çevre dostu çözücüler ve katalizörler kullanarak sürdürülebilir sentez yöntemleri geliştirilmektedir. Su veya etanol gibi çevre dostu çözücüler ve katalizörler kullanılarak gerçekleştirilen reaksiyonlar daha az toksik yan ürünlerle benzimidazol türevleri elde edilmesini sağlar. Su varlığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen sentezler çevre dostu ve ekonomik açıdan avantajlıdır (Chawla ve ark., 2022).

1.1.3. Fenantren-İmidazollerin Önemi ve Kullanım Alanları

Fenantren türevleri geniş aromatik yapıları ve konjuge π -sistemleri ile kimyasal ve biyolojik süreçlerde önemli bir yere sahiptir. İmidazol halkası ise yüksek reaktivite ve biyolojik aktivitesi ile öne çıkan bir yapı taşıdır. Fenantren ve imidazolün bir araya gelmesiyle elde edilen Fenantren-İmidazoller hem biyolojik hem de fiziksel kimya açısından dikkat çekici özelliklere sahiptir. Bu bileşikler fotofiziksel ve elektrokimyasal özelliklerinden dolayı çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Fenantren ve imidazol bileşiklerinin birleştirilmesi bu moleküllerin kimyasal kararlılık ve işlevsellik açısından önemlidir. Bu özellikleri sayesinde Fenantren-İmidazoller organik elektroniklerden biyomedikal alanlara kadar birçok disiplinde önemli bir yer edinmiştir. Bu moleküller geniş aromatik yüzeyleri sayesinde yüksek ışık verimi kararlılık ve reaktivite sergileyerek çeşitli kimyasal ve biyolojik süreçlerde etkili rol oynamaktadır (Dias ve ark., 2021). Fenantren-İmidazoller sahip oldukları kimyasal özellikler sayesinde çeşitli alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Başlıca kullanım alanları şunlardır:

Optoelektronik Cihazlar Fenantren-İmidazol türevleri geniş konjuge sistemleri sayesinde yüksek ışık verimliliği ve kararlılık gösterir. Bu özellikler bu türevlerin organik ışık yayan diyotlar (OLED) fotovoltaiik cihazlar ve organik transistörler gibi optoelektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca ışık emisyon karakteristiği sayesinde ışık yayan cihazların verimliliği ve stabilitesi artırılabilir (Kula ve ark., 2018).

Biyomedikal Uygulamalar İmidazol halkasının biyolojik aktiviteleri Fenantren-İmidazollerini farmasötik araştırmalarda öne çıkarır. Yapılan araştırmalarda bu bileşiklerin ısı şok proteinleri (Hsp70) inhibisyonu gibi biyolojik hedeflere etki edebileceği ve kanser tedavisinde kullanılabileceği gösterilmiştir (Patel ve ark., 2016). Ayrıca antimikrobiyal ve antikanser özellikleri ile ilaç geliştirme sürecinde yeni aday bileşikler olarak değerlendirilmektedirler.

İlaç tedavisi olarak kullanımı Fenbendazol ve mebendazol gibi Fenantren-İmidazol türevleri hayvanlarda yaygın parazit enfeksiyonlarını tedavi etmek için kullanılır. Bu ilaçlar özellikle gastrointestinal parazitlere karşı etkilidir (Sultana ve ark., 2022). İnsanlarda helmint enfeksiyonlarına karşı kullanılır. Bu bileşikler solucanlar gibi parazitlere karşı etkinlik gösterir. Bazı kanser türleri üzerinde antiproliferatif etkiler göstermiştir. Hücre bölünmesini engelleyerek kanser hücrelerinin büyümesini durdurabilirler (Sultana ve ark., 2022). Fenantren-İmidazol türevleri bazı bakteri ve mantar türlerine karşı antimikrobiyal aktivite göstermektedir. Bu özellikleri sayesinde cilt enfeksiyonları ve vajinal enfeksiyonların tedavisinde kullanılabilmektedir. Özellikle dirençli bakteri türlerine karşı etkili olmaları bu bileşikleri değerli kılmaktadır.

Katalizör Olarak Kullanımı Fenantren-İmidazoller kimyasal reaksiyonlarda verimli katalizörler olarak kullanılır. Özellikle oksidatif reaksiyonlar karbon-karbon bağ oluşumu ve hidrojen transfer reaksiyonlarında bu bileşiklerin yüksek etkinlik gösterdiği bilinmektedir. Kimyasal sentezlerde bu türevlerin kullanımı hem reaksiyon verimliliğini artırmakta hem de enerji tasarrufu imkan tanımaktadır (Skonieczny ve ark., 2017).

Fotofiziksel ve Fotokimyasal Uygulamalar Fenantren-İmidazoller geniş aromatik sistemleri nedeniyle yüksek floresans verimi ve fotostabilite gösterir. Bu özellikler onları floresan probalar biyosensörler ışık hasadı sistemleri ve fotoluminesan uygulamalar için ideal kılar. Organik ışık yayan cihazlarda (OLED) bu bileşiklerin kullanımı sayesinde daha verimli ve kararlı ışık emisyonu sağlanabilmektedir (Kula ve ark., 2021).

Fotodinamik Terapi Fenantren-İmidazoller ışığa duyarlılık özelliklerinden dolayı fotodinamik terapi (PDT) için de uygun adaylar olarak değerlendirilmektedir. Bu tür terapilerde ışıkla aktive edilen bu bileşikler hücreler üzerinde sitotoksik etki oluşturarak kanserli hücrelerin yok edilmesine imkan tanıyabilir. Bu bağlamda Fenantren-İmidazoller ışıkla kontrol edilebilen tedavi yöntemlerinde yenilikçi bir bileşik sınıfı olarak dikkat çekmektedir (Liu ve ark., 2020c).

Sensör ve Biyosensör Uygulamaları Fenantren-İmidazollerin kimyasal yapıları metal iyonları ve biyomoleküller ile etkileşime girme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle bu türevler kimyasal sensörler ve biyosensörlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Fenantren-İmidazollerin optik ve elektrokimyasal özellikleri hassas algılama sistemlerinin geliştirilmesinde önemli rol oynar (Zhao ve ark., 2017).

Organik Yarı İletken Malzemeler Fenantren-İmidazoller organik yarı iletken malzemelerin temel bileşenleri olarak kullanılabilir. Bu malzemeler özellikle organik transistörler ve organik fotodetektörler gibi elektronik cihazlarda yer bulur. Yüksek taşıma mobiliteleri ve elektronik kararlılıkları sayesinde bu bileşikler yarı iletken teknolojilerinde kritik bir rol oynar (Tavgeniene ve ark., 2017).

Fenantren-İmidazoller sahip oldukları kimyasal ve fiziksel özellikler sayesinde organik kimya biyoteknoloji malzeme bilimi ve optoelektronik alanlarında geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Bu çok yönlü bileşikler inovatif uygulamalara imkan tanıyarak araştırma ve endüstriyel geliştirme alanlarında büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir.

1.2. Nanoparçacıklar

1.2.1. Nanoparçacıkların Genel Özellikleri

Nanoparçacıklar boyutları 1 ila 100 nanometre arasında değişen ve bu küçük ölçeklerinden dolayı klasik fizik yasalarından ziyade kuantum mekaniği ilkelerine göre davranan madde parçacıklarıdır. Nanoparçacıkların boyutları atomlar ve moleküllerle karşılaştırılabilir kadar küçüktür ve bu özellik onlara benzersiz fiziksel kimyasal ve optik nitelikler kazandırmaktadır. Geleneksel malzemelere kıyasla nanoparçacıklar büyük bir yüzey alanı/hacim oranına sahip olup bu durum onların reaktivite ve katalitik etkinliklerini belirgin ölçüde artırmaktadır (Khan ve ark., 2019). Nanoparçacıklar kuantum mekaniği ilkeleri doğrultusunda özel özellikler sergilerler. Bu yapıların küçük boyutları enerji seviyelerinin ayrık hale gelmesine neden olur ve bu da optik ve elektronik özelliklerinde belirgin değişiklikler yaratır. Örneğin kuantum hapsi etkisi nanoparçacıkların boyutları küçüldükçe absorpsiyon ve emisyon spektrumlarında kaymalara yol açar. Yüksek yüzey enerjisi nedeniyle nanoparçacıklar yüzeydeki atomların daha az kararlı olması sonucu diğer reaktif türlerle kolayca etkileşime girme eğilimi gösterirler (Manzoor ve ark., 2009). Bu özellikler nanoparçacıkların optik

manyetik ve elektriksel performanslarını artırarak onları yenilikçi uygulamalar için uygun hale getirir. Ayrıca yüksek yüzey alanı/hacim oranı katalizör olarak kullanılan nanoparçacıkların etkinliğini artırırken reaktiviteyi optimize eder.

Yüksek Yüzey Alanı; Nanoparçacıklar küçük boyutları nedeniyle yüksek yüzey alanına sahiptir. Bu durum kimyasal reaksiyonlar için daha fazla aktif yüzey sağlar ve katalitik aktivitelerini artırır. Yüksek yüzey alanı nanoparçacıkların adsorpsiyon kapasitesini de artırarak onları çevresel uygulamalarda etkili hale getirir. Yüksek yüzey alanı nanoparçacıkların temel özelliklerinden biri olup bu parçacıkları birçok uygulama için ideal hale getiren faktörlerden biridir. Nanoparçacıklar boyutları küçüldükçe yüzey alanları önemli ölçüde artan malzemelerdir. Bu durum aynı hacimdeki daha büyük parçacıklara göre çok daha fazla yüzey alanına sahip olmalarını sağlar ve bu da onların kimyasal fiziksel ve biyolojik etkileşimlerini artırır. Nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı onların kimyasal reaktivitesini büyük ölçüde artırır. Küçük boyutları sayesinde daha fazla atom yüzeyde bulunur ve bu atomlar hacim içindeki atomlara kıyasla daha az koordinasyonla bağlıdır. Bu düşük koordinasyon atomların kimyasal reaksiyonlara katılımını kolaylaştırır ve onları daha reaktif hale getirir. Örneğin altın ve platin gibi metal nanoparçacıklar yüzey alanlarının yüksek olması nedeniyle kimyasal reaksiyonlarda katalizör olarak etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Bu metaller özellikle hidrojen üretimi otomobil katalizörleri ve yakıt hücreleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. *Polshettiwar ve Varma'nın (2010)* çalışmasında nano-boyuttaki malzemelerin kataliz ve yeşil kimya uygulamalarında sürdürülebilir alternatifler sunduğu belirtilmiştir. Çalışma nanokatalizörlerin geniş yüzey alanı ve etkin reaktivitesi ile kimyasal reaksiyonlarda önemli bir rol oynadığını ve çevresel açıdan daha uygun çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır (Polshettiwar ve Varma, 2010).

Platin nanoparçacıklar elektrokatalizör olarak yakıt hücrelerinde oksijen indirgeme reaksiyonlarında yüksek verimlilik sağlar. Nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı onların çevresel uygulamalar için önemli bir avantaj sağlamasına olanak tanımaktadır. Adsorpsiyon kapasitesinin artması nanoparçacıkların kirleticileri veya gazları yüzeyde tutma yeteneğini artırmaktadır. Bu su arıtma sistemlerinde metal oksit nanoparçacıklarının kullanılmasıyla toksik metallerin ve organik kirleticilerin sudan uzaklaştırılmasında etkin bir yol sunmaktadır. Özellikle demir oksit nanoparçacıkları arsenik gibi toksik elementlerin su kaynaklarından arındırılmasında başarılı bir şekilde kullanılır (Feng ve ark., 2012). Yüksek yüzey alanına sahip nanoparçacıklar optik ve

elektronik cihazlarda da önemli rol oynar. Metal nanoparçacıklar yüzey plazmon rezonansı (SPR) etkisi sayesinde ışığı belirli dalga boylarında emebilir veya yayabilir. Bu özellik biyosensörlerde tıbbi görüntüleme cihazlarında ve fotonik cihazlarda kullanılmalarını sağlar. Kuantum noktaları olarak bilinen yarı iletken nanoparçacıklar enerji seviyeleri arasındaki bant aralıkları nedeniyle ışık yayan diyotlar (LED'ler) ve güneş panellerinde kullanılır. Yüksek yüzey alanı bu parçacıkların daha etkin ışık emilimi ve yayılımı sağlamasına olanak tanır. Nanoparçacıklar yüksek yüzey alanları sayesinde biyomedikal uygulamalarda da kullanılır. İlaç taşıma sistemlerinde nanoparçacıklar ilaçların vücutta belirli bir hedefe yönlendirilmesine olanak tanır. Nanoparçacıkların yüzeyine biyolojik moleküller eklenebilir bu da belirli hücrelere veya dokulara yönlendirilmelerini sağlar. Bu tür sistemler daha düşük dozlarda ilaç kullanarak yan etkileri azaltırken tedavi etkinliğini artırabilir. Manyetik nanoparçacıklar manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tıbbi görüntüleme tekniklerinde kontrast ajan olarak kullanılabilir. Bu özellikler doktorların hastalıkları daha erken teşhis etmesine yardımcı olabilir.

Yüksek yüzey alanı birçok avantaj sağlasa da bazı zorluklar da beraberinde gelir. Nanoparçacıklar yüksek yüzey enerjileri nedeniyle birbirine yapışma veya toplanma eğilimindedir. Bu durum parçacıkların stabilitesini azaltabilir ve istenmeyen aglomerasyonlara neden olabilir. Bu sorunları gidermek için yüzey modifikasyonları veya stabilizatörler kullanılarak parçacıkların dağılımı kontrol edilebilir. Ayrıca yüksek yüzey alanı kontrolsüz reaksiyon hızlarına yol açabilir bu da yan ürünlerin oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle reaksiyon koşulları dikkatlice optimize edilmelidir. Yüksek yüzey alanı nanoparçacıkların çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasına olanak tanır ve bu onları nanoteknoloji alanında vazgeçilmez bir araç haline getirir. Kimya biyoloji malzeme bilimi ve mühendislik gibi birçok alanda yeni uygulama ve teknolojilerin geliştirilmesine katkıda bulunur.

Yüzey Enerjisi ve Aktivite; Nanoparçacıkların yüzey enerjisi ve aktivitesi bu küçük boyutlu malzemelerin çeşitli alanlardaki işlevselliğini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Yüzey enerjisi nanoparçacıkların yüzeylerindeki atom veya moleküllerin iç kısımlarındaki atomlara kıyasla daha fazla serbest enerjiye sahip olmasından kaynaklanır. Bu serbest enerji farkı yüzeydeki atomların daha reaktif olmasına neden olur ve nanoparçacıkların geniş bir yüzey alanı sunduğu düşünüldüğünde reaktivite önemli ölçüde artabilmektedir. Yüzey enerjisi aynı zamanda bu atomların yerel bağ yapısı ve komşu atomlarla olan etkileşimleri tarafından

belirlenir. Altın (Au) nanoparçacıkları üzerinde yapılan çalışmalar bu parçacıkların yüzey enerjisinin boyut ve şekil gibi faktörlere bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Örneğin nanokübik altın parçacıkları yüzey enerjisini kristal yapılarındaki (001) yüzey enerji seviyelerine yaklaştıırken nanoküre şeklindeki parçacıklar farklı yüzey morfolojileri nedeniyle daha yüksek yüzey enerjisine sahiptir (Esser, 14 Ağustos 2021). Bu farklılıklar yüzey enerjisinin boyut ve şekil kontrolü ile nasıl değiştirilebileceğini ve bunun fonksiyonel özelliklere etkisini vurgulamaktadır. Ayrıca serbest gümüş (Ag) nanoparçacıklarının yüzey enerjisi 7.2 J/m^2 gibi oldukça yüksek bir değere ulaşmaktadır bu özellik parçacıkların erime buharlaşma ve koalesme gibi süreçlerde önemli etkiler yaratır (Nanda ve ark., 2003).

Yüzey enerjisi aynı zamanda nanoparçacıkların büyüme mekanizmalarında ve kristal yapıların gelişiminde önemli bir rol oynar. Yüzey enerjisinin bu süreçlerdeki önemi atomların yüzeydeki hareketliliği ve yüzeyde oluşan enerjik dengesizliklerle ilişkilidir. Bu dinamikler nanoparçacıkların fonksiyonel özelliklerinin yanı sıra yüzey kararlılıklarını ve termodinamik dengelerini de belirler (Holec ve ark., 2020). Son olarak yüzey enerjisindeki değişimlerin nanoparçacıkların fonksiyonelizasyon reaksiyonlarında fizikokimyasal dönüşümleri izlemek için kullanılabileceği gösterilmiştir. Fonksiyonel grupların eklenmesi veya yüzey modifikasyonları polar ve dağılım bileşenlerinde değişikliklere neden olarak yüzey enerjisinin değişmesine yol açar. Bu tür değişiklikler kompleks moleküler yapıların oluşumu sırasında belirgin hale gelirken daha basit grupların yer değiştirmesi genellikle daha küçük enerji değişimleri ile sonuçlanabilmektedir (Honciuc ve Negru, 2023). Bu bulgular nanoparçacıkların yüzey enerjisini ve bunun kimyasal fiziksel ve biyolojik süreçlerdeki aktivitesini optimize etmenin önemini göstermektedir. Yüzey enerjisi üzerinde yapılan bu kontrol ve optimizasyonlar nanomalzemelerin çevresel uygulamalardan biyomedikal kullanımlara kadar geniş bir yelpazede kullanılabilirliğini artırmaktadır.

Biyomedikal uygulamalarda yüzey enerjisi nanoparçacıkların biyomoleküllerle etkileşimini artırır. Bu durum ilaç taşıma sistemlerinde ve biyosensörlerde kullanımlarını kolaylaştırır. Nanoparçacıklar biyomoleküller ile bağlanarak belirli hücre veya dokulara hedeflenebilir. Bu tür uygulamalar ilaçların doğrudan hedef bölgelere taşınmasına olanak tanır ve yan etkileri azaltırken tedavi etkinliğini artırır. Manyetik nanoparçacıklar ise manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tıbbi görüntüleme tekniklerinde kontrast ajan olarak kullanılabilir. Yüksek yüzey enerjisi bu nanoparçacıkların daha fazla biyolojik molekül ile etkileşime girmesine ve hedef

bölgelerde birikmesine olanak tanır. Yüzey enerjisinin kontrolü nanoparçacıkların performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Yüzey modifikasyonları yüzey enerjisini ayarlayarak nanoparçacıkların istenen özelliklerini geliştirebilir. Bu kimyasal bağların eklenmesi yüzey kaplamaları veya diğer kimyasal modifikasyonlar yoluyla sağlanabilir. Boyut ve şekil kontrolü de yüzey enerjisini etkileyen önemli faktörlerdendir. Özel şekiller ve küçük boyutlar yüzey enerjisini ve dolayısıyla reaktiviteyi artırabilir. Bu nedenle nanoparçacıkların sentezinde boyut ve şekil kontrolü hedeflenen uygulamalara uygun parçacıklar elde etmek için büyük önem taşır. Nanoparçacıkların yüzey enerjisi onların kimyasal fiziksel ve biyolojik özelliklerini belirleyen temel bir faktördür. Bu özellik onları kimya biyoloji malzeme bilimi ve mühendislik gibi birçok alanda yenilikçi uygulamalar için ideal hale getirir. Yüzey enerjisinin doğru bir şekilde yönetilmesi nanoparçacıkların çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda kullanılmasına olanak tanır ve bu da teknoloji ve bilim alanında önemli ilerlemelere katkıda bulunur.

Optik Özellikler; Nanoparçacıkların optik özellikleri boyutları şekilleri ve bileşimleri nedeniyle geleneksel malzemelerden farklılık gösterir ve bu özellikler geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmalarını sağlar. Metal nanoparçacıklar özellikle altın ve gümüş gibi metaller yüzey plazmon rezonansı (SPR) adı verilen belirgin bir optik özellik sergiler. SPR metal nanoparçacıkların yüzeyindeki serbest elektronların belirli bir ışık frekansına maruz kaldıklarında kolektif titreşimidir. Bu rezonans ışığın belirli dalga boylarında emilmesine ve saçılmasına neden olur ve bu da nanoparçacıkların renk değiştirmesine yol açar. Örneğin altın nanoparçacıklar boyutlarına ve şekillerine bağlı olarak kırmızıdan mora değişen renkler gösterebilir. SPR biyosensörlerde ve kimyasal sensörlerde kullanılır çünkü bu rezonansın frekansı nanoparçacıkların çevresiyle etkileşimlerine bağlı olarak değişir (Nair ve ark., 2018). Yarı iletken nanoparçacıklar kuantum noktaları olarak bilinen ve kuantum sınırlama etkileri gösteren bir optik özelliğe sahiptir. Kuantum noktalarının boyutu onların elektronik enerji seviyelerini ve dolayısıyla emilim ve yayılım spektrumlarını etkiler. Daha küçük kuantum noktaları daha geniş bant aralıklarına ve daha kısa dalga boylarında ışık yayılımına neden olur. Bu özellik kuantum noktalarının biyomoleküler etiketler LED'ler ve güneş hücreleri gibi optoelektronik uygulamalarda kullanılmasını sağlar. Kuantum noktalarının parlaklıkları ve kararlılıkları onları geleneksel floresan boyalara göre avantajlı kılar (Zhang ve Wang, 2017). Nanoparçacıkların boyutları ve şekilleri ışık saçılması ve absorpsiyonunda önemli rol oynar. Küçük boyutlu nanoparçacıklar ışığı Mie teorisi ile tanımlanan şekilde

saçarlar. Bu saçılma nanoparçacıkların boyutlarına şekillerine ve çevresel koşullara bağlı olarak farklılık gösterir. Metal nanoparçacıklar ışığı güçlü bir şekilde saçar ve bu özellik biyosensörlerin ve görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesinde kullanılır. Nanoparçacıkların optik absorpsiyonu boyutları küçüldükçe ve yüzey alanları arttıkça artar. Bu özellikle fototermal terapilerde güneş enerjisi uygulamalarında ve optoelektronik cihazlarda enerji verimliliğini artırmak için faydalıdır (O'Connor ve Zamkov, 2013).

Bazı nanoparçacıklar fotolüminesans özellikleri sergiler; yani belirli bir dalga boyunda ışık emildikten sonra daha uzun dalga boylarında ışık yayarlar. Yarı iletken kuantum noktaları yüksek parlaklık ve kararlılık ile karakterize edilen fotolüminesans özelliklere sahiptir. Bu özellik biyolojik görüntüleme ve tıbbi tanı uygulamalarında önemlidir. Kuantum noktalarının yayılım spektrumları biyobelirteçlerin izlenmesi ve hücresel süreçlerin incelenmesi gibi uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca organik-inorganik hibrit nanoyapılar da fotolüminesans özelliklerini gösterir ve bu aydınlatma ve görüntüleme uygulamalarında kullanılabilir. Nanoparçacıkların optik özellikleri uzun süreli kararlılık ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için idealdir. Özellikle kuantum noktaları geleneksel organik boyalara kıyasla fotostabiliteleri yüksektir bu da onların uzun süreli görüntüleme çalışmalarında kullanımını mümkün kılar. Metal nanoparçacıkların optik özellikleri çevresel koşullara ve kimyasal değişimlere karşı duyarlıdır bu da onların biyosensörlerde ve çevresel sensörlerde kullanılmasını sağlar. Optik kararlılık nanoparçacıkların verimli ve güvenilir bir şekilde çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlar (Pratap ve Soni, 2021). Nanoparçacıkların optik özellikleri boyut şekil ve çevresel etkenlerle yakından ilişkilidir. Bu özellikler onları çeşitli uygulamalar için ideal hale getirir ve nanoteknoloji alanındaki yenilikçi çözümler için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Gelişen teknoloji ve araştırmalar nanoparçacıkların optik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını ve daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayarak yeni ve daha gelişmiş cihazların geliştirilmesine olanak tanır.

Elektriksel ve Manyetik Özellikler; Nanoparçacıkların elektriksel ve manyetik özellikleri malzemelerin boyutları şekilleri ve kompozisyonları nedeniyle makroskobik malzemelere göre önemli farklılıklar gösterir. Bu özelliklerin anlaşılması optoelektronikten biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir yelpazede yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine olanak tanır.

Nanoparçacıkların elektriksel özellikleri özellikle metalik nanoparçacıklar için belirgin hale gelir. Bu tür nanoparçacıklar serbest elektronlarının yüzeyde hareket

edebilme kapasitesi sayesinde yüksek iletkenlik gösterirler. Altın ve gümüş gibi metal nanoparçacıklar yüzey plazmon rezonansı (SPR) adı verilen bir etki ile belirli dalga boylarındaki ışığı emebilir ve saçabilir. Bu rezonans nanoparçacıkların çevresiyle olan etkileşimlerine son derece duyarlıdır ve bu nedenle optoelektronik cihazlar biyosensörler ve kimyasal dedektörler gibi uygulamalarda kullanımları yaygındır (Esser, 14 Ağustos 2021). Buna ek olarak yarı iletken nanoparçacıklar kuantum noktaları olarak bilinen özel bir sınıfa aittir ve bu noktalar kuantum sınırlama etkileri gösterir. Kuantum sınırlama nanoparçacıkların boyutlarının elektron ve deliğin hareket ettiği alanla benzer boyutlarda olması durumunda ortaya çıkar. Bu durum enerji seviyelerini değiştirir ve elektronik özellikleri ayarlanabilir hale getirir. Kuantum noktalarının boyutları bant aralığını doğrudan etkileyerek daha geniş bant aralıklarına ve daha kısa dalga boylarında ışık yayılımına neden olur bu da onları LED'ler güneş hücreleri ve transistörlerde kullanmak için ideal hale getirir (Belous ve ark., 2014).

Manyetik nanoparçacıklar küçük boyutları ve geniş yüzey alanları nedeniyle süperparamanyetik özellikler gösterirler. Süperparamanyetizma manyetik nanoparçacıkların dış manyetik alan altında mıknatıslanması ancak bu alan kaldırıldığında hızla manyetizasyonlarını kaybetmesi özelliğidir. Bu özellik manyetik nanoparçacıkları manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi biyomedikal uygulamalarda kontrast ajan olarak kullanılabilir hale getirir. Ayrıca hedefe yönelik ilaç taşıma sistemlerinde kullanımları tedavilerin etkinliğini artırırken yan etkileri azaltma potansiyeline sahiptir (Vatta ve ark., 2006). Manyetik nanoparçacıklar manyetik sıvılardan manyetik veri depolama ve manyetik ayırmaya kadar çeşitli teknolojilerde de kullanılır.

Manyetik nanoparçacıkların elektriksel ve manyetik özellikleri boyut şekil ve çevresel koşullarla yakından ilişkilidir. Bu özelliklerin detaylı anlaşılması nanoteknoloji alanında daha verimli ve yenilikçi uygulamaların geliştirilmesine olanak tanır. Nanoparçacıkların boyut ve şekillerine bağlı olarak gösterdikleri benzersiz manyetik özellikler özellikle süperparamanyetik davranış gibi fenomenler ileri düzeyde manyetik cihazların ve biyomedikal tedavi yöntemlerinin tasarlanmasını mümkün kılar. Bu araştırmalar daha yüksek performanslı manyetik ve elektriksel cihazların geliştirilmesine katkıda bulunur ve teknolojinin birçok alanında önemli ilerlemeler sağlar (Mørup ve ark., 2010).

Biyouyumluluk ve Biyolojik Aktivite; Nanoparçacıklarınbiyoyumluluğu ve biyolojik aktivitesi onların biyomedikal uygulamalar ilaç taşıma sistemleri ve doku

mühendisliği gibi alanlarda kullanım potansiyelini belirleyen kritik faktörlerdir. Biyoyumluluk bir malzemenin canlı organizmalarla etkileşiminde toksik olmayan tahriş edici olmayan ve organizmanın fizyolojik süreçlerini olumsuz yönde etkilemeyen bir davranış sergilemesi anlamına gelir. Nanoparçacıkların biyolojik aktivitesi ise onların biyolojik sistemlerde belirli fonksiyonel etkiler gösterebilme yeteneği ile ilgilidir.

Nanoparçacıkların biyoyumluluğu kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi boyutu yüzey özellikleri ve yüzey modifikasyonları ile yakından ilişkilidir. Örneğin altın ve gümüş gibi metallerden yapılan nanoparçacıklar biyoyumlu olmaları ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Altın nanoparçacıklar biyomoleküllerin yüzeylerine kolayca bağlanabildiği için biyosensörlerde görüntüleme ajanlarında ve ilaç taşıyıcı sistemlerde kullanılır. Gümüş nanoparçacıklar ise antibakteriyel özellikleri ile tanınır ve yara tedavisinde ve enfeksiyon kontrolünde etkili bir rol oynar (Guo ve Wang, 2007). Polimerik nanoparçacıklar biyoyumlu özellikleri ve biyolojik olarak parçalanabilir olmaları nedeniyle biyomedikal alanda da tercih edilir. Polilaktik asit (PLA) ve poliglikolik asit (PGA) gibi polimerler ilaç taşıma sistemlerinde kontrollü salım sağlamak amacıyla kullanılır. Kontrollü salım ilacın hedef bölgeye zamanla ve belirli bir dozda salınmasını mümkün kılar böylece tedavi etkinliğini artırır ve yan etkileri azaltır (Chen ve ark., 2020).

Nanoparçacıkların biyolojik aktivitesi yüzeylerinde bulunan fonksiyonel gruplar veya kaplamalar ile modifiye edilerek özelleştirilebilir. Yüzey modifikasyonları nanoparçacıkların belirli hücrelere veya dokulara hedeflenmesini sağlayarak tedavinin etkinliğini artırabilir. Örneğin polietilen glikol (PEG) ile kaplanmış nanoparçacıklar vücutta daha uzun süre dolaşabilir ve böbrekler veya karaciğer tarafından hızla temizlenmez. Bu ilaç taşıma sistemlerinde daha etkin bir hedefleme sağlar. Ayrıca antikorlar veya peptitler ile kaplanan nanoparçacıklar belirli hücre reseptörlerine bağlanarak hedefe yönelik tedavilerde kullanılır (Saha ve ark., 2015). Nanoparçacıkların immünojenitesi yani bağışıklık sistemini uyarma potansiyeli biyoyumluluğun önemli bir yönüdür. Bazı nanoparçacıklar immün yanıtı artırabilir veya baskılayabilir. İmmün yanıtın kontrol edilmesi özellikle kanser tedavileri gibi uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Kanser tedavilerinde nanoparçacıklar tümör hücrelerini hedef alarak ilaçların veya gen terapilerinin doğrudan etki göstermesine olanak tanır. Ancak nanoparçacıkların immünojenitesinin dikkatlice değerlendirilmesi ve kontrol edilmesi

güvenli ve etkili biyomedikal uygulamaların geliştirilmesi için gereklidir (Zhang ve ark., 2019). Nanoparçacıkların biyoyouumluluğu ve biyolojik aktivitesi onların tasarımı ve üretim süreçleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu özelliklerin optimize edilmesi nanoparçacıkların biyomedikal alanda daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlar. Gelişen teknoloji ve araştırmalar nanoparçacıkların biyolojik sistemlerle etkileşimlerini daha iyi anlamamızı ve daha etkili tedavi yöntemleri geliştirmemizi mümkün kılmaktadır. Nanoparçacıkların biyoyouumluluğu ve biyolojik aktivitesi tıp ve biyoteknoloji alanında yenilikçi uygulamaların keşfedilmesine olanak tanıyan önemli bir araştırma alanıdır.

1.2.2. Nanoparçacıkların İleri Karakterizasyon Teknikleri

Nanoparçacıkların ileri karakterizasyon teknikleri bu malzemelerin yüzey özellikleri morfoloji kimyasal kompozisyon optik ve manyetik davranışları gibi detaylı özelliklerinin derinlemesine anlaşılmasına olanak tanımaktadır. Bu teknikler nanomalzemelerin tasarımı optimizasyonu ve uygulama alanlarının belirlenmesi için kritik bilgiler sunmaktadır. Karakterizasyon süreçleri nanoparçacıkların sentez sonrası performanslarını stabilitelerini ve potansiyel uygulamalarını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu süreçte parçacık boyutu şekli yüzey kimyası kristal yapısı ve optik özellikleri gibi çeşitli parametreleri ölçen farklı analitik teknikler ve araçlar kullanılır. Bu teknikler nanoteknoloji araştırmalarında geniş bir uygulama alanı bulmakla birlikte nanomalzemelerin geliştirilmesi ve optimize edilmesi için temel bilgiler sağlar. Özellikle bu tekniklerin etkin kullanımı nanoparçacıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerini daha iyi anlamamıza olanak tanıyarak çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda yenilikçi çözümler geliştirilmesini mümkün kılar. Başarılı bir şekilde karakterize edilen nanoparçacıklar hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için daha verimli ve güvenilir malzemelerin üretilmesine katkıda bulunur.

Bu karakterizasyon süreçlerinde kullanılan başlıca teknikler arasında Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Raman Spektroskopisi Termal Gravimetrik Analiz (TGA), X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS veya EDX), Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM) gibi teknikler bulunmaktadır. Bunlar, nanoteknoloji alanında çalışan araştırmacılar için vazgeçilmez araç ve yöntemlerdir.

1.2.2.1. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yüzey morfolojisi ve mekanik özellikleri analiz etmek için kullanılan gelişmiş bir karakterizasyon tekniğidir. AFM bir numunenin yüzeyini yüksek çözünürlükte tarayarak nanometre ölçeğinde detaylar sunmaktadır. Bu teknik bir piezoelektrik tüp ile kontrol edilen kirişin ucunda yer alan keskin bir prob kullanarak çalışır. Prob yüzeye yakın hareket ederken yüzeyle etkileşim halindedir ve bu etkileşim probun sapmasını ölçen bir lazer sistem tarafından algılanır. AFM sadece yüzey topografisini değil aynı zamanda malzemenin mekanik manyetik elektriksel ve kimyasal özelliklerini de inceleyebilir. Bu çok yönlülük AFM'yi farklı malzeme türlerinin karakterizasyonunda değerli bir araç haline getirir (Baer ve ark., 2010).

1.2.2.2. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi moleküler yapı kimyasal bağlar ve kristal yapı hakkında bilgi sağlayan bir vibrasyonel spektroskopi tekniğidir. Raman spektroskopisi lazer ışığını bir malzeme üzerine yönlendirerek moleküllerin titreşim modlarına bağlı olarak saçılan ışığı analiz eder. Bu saçılım malzemenin karakteristik frekanslarında ortaya çıkan Raman hatları oluşturur ve bu hatlar malzemenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi sağlar. Özellikle grafen karbon nanotüpler ve diğer karbon bazlı nano malzemelerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca Raman spektroskopisi malzemelerin faz değişikliklerini kristal yapısını ve gerilme durumlarını incelemek için de kullanılabilir (Titus ve ark., 2019).

1.2.2.3. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Moleküllerin kimyasal yapılarının ve fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için kullanılan güçlü bir analitik tekniktir. Bu teknik bir malzemenin kızılötesi (IR) ışını soğurma karakteristiğine dayanır ve moleküller arasındaki bağların titreşim frekanslarına bağlı olarak bilgi sağlar. FT-IR spektroskopisinde bir örnek üzerine gönderilen kızılötesi ışınlar moleküller tarafından belirli dalga boylarında soğurulur. Her kimyasal bağın belirli bir titreşim frekansı vardır ve bu frekanslar FT-IR

spektrumunda karakteristik bir desen oluşturur. Bu desenler moleküldeki farklı fonksiyonel grupların varlığını tespit etmek için kullanılır. Örneğin OH, C=O, C-H, N-H gibi fonksiyonel gruplar FT-IR analizleri ile kolaylıkla belirlenebilir.

Nanoparçacıkların karakterizasyonunda FT-IR özellikle nanoparçacıkların yüzey modifikasyonları kaplamalar veya stabilizatörlerle etkileşimleri gibi kimyasal değişimlerin izlenmesinde büyük öneme sahiptir. FT-IR yüzeydeki fonksiyonel grupları belirleyerek nanoparçacıkların yüzey kimyasını ve reaktivitelerini değerlendirmek için kullanılır. Ayrıca bu teknik biyomedikal uygulamalarda nanoparçacıkların biyomoleküllerle olan etkileşimlerini incelemek için de yaygın bir şekilde kullanılır. FT-IR'nin sağladığı spektral veri nanomalzemelerin sentezi ve yüzey kimyasal özelliklerinin optimizasyonunda kritik bilgiler sunmaktadır.

1.2.2.4. Termal Gravimetrik Analiz (TGA)

Termal analiz teknikleri malzemelerin termal özelliklerini incelemek için kullanılır ve nanoparçacıkların termal stabilitesi faz geçişleri ve termal bozunma davranışlarını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. İki ana termal analiz yöntemi Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) olarak bilinir. DSC malzemenin ısı akışını ölçerek faz geçişlerini (örneğin erime ve kristalleşme) belirlerken TGA malzemenin ağırlığının sıcaklıkla nasıl değiştiğini analiz eder. Bu ölçümler malzemenin termal dayanıklılığı ve bileşimi hakkında detaylı bilgi sağlar ve özellikle polimerik nanomalzemelerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılır (Lapresta-Fernández ve ark., 2014).

1.2.2.5. X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) bir malzemenin yüzeyinde bulunan atomların kimyasal durumlarını ve elementel bileşimini analiz eden bir tekniktir. XPS yüzeye X-ışınları göndererek yüzeyden yayılan fotoelektronları ölçer. Bu ölçümler her elementin bağ enerjisi ve kimyasal durumu hakkında bilgi sağlar bu da malzemenin yüzey modifikasyonlarını ve kimyasal değişimlerini anlamak için kullanılır. XPS yüzey kaplamaları ince filmler ve nanoparçacıklar üzerindeki elementel ve kimyasal analizler için idealdir ve malzemelerin yüzey işlemleri sırasında oluşabilecek kontaminasyonları ve oksitlenmeleri tespit etmek için de kullanılır (Baer ve ark., 2010).

1.2.2.6. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS veya EDX)

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS veya EDX) elektron mikroskopları ile entegre edilerek kullanılan bir tekniktir ve bir numunenin elementel bileşimini belirlemek için X-ışını emisyonlarını ölçer. Elektronlar numune yüzeyine çarptığında numuneden karakteristik X-ışınları yayılır. EDS bu X-ışınlarını ölçerek elementlerin orantılarını ve yerleşimlerini belirler. Bu teknik metalik ve metal oksit nanomalzemelerin kimyasal bileşimini analiz etmek ve ince filmler üzerindeki safsızlıkları ve elementelheterojenlikleri tespit etmek için kullanılır (Jose Chirayil ve ark., 2017).

1.2.2.7. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)

Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) bir numunenin atomik yapısını boyutunu ve morfolojisini incelemek için kullanılan yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme tekniğidir. TEM elektronların numune boyunca geçirilmesi ile çalışır ve elektronların maddeyle etkileşimi sonucunda elde edilen görüntüler numunenin iç yapısını ve atom düzenini gösterir. Bu teknik nanomalzemelerin kristal yapısının dislokasyonlarının ve faz sınırlarının detaylı bir şekilde incelenmesini sağlar. TEM ayrıca parçacıknanomalzemelerin dağılımını ve bileşimini analiz etmek için de kullanılır. Yüksek çözünürlük yetenekleri sayesinde TEM nanoparçacıkların boyut ve şekil kontrolünü değerlendirmek için kritik bir araçtır (Deepak ve ark., 2018).

1.2.2.8. Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu (STEM)

Nano ölçekteki malzemelerin yapısal ve kimyasal özelliklerini yüksek çözünürlükte incelemek için kullanılan ileri bir mikroskop tekniğidir. STEM geleneksel Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tekniklerinin özelliklerini birleştirir. Bu mikroskop nanomalzemelerin morfolojisi kristal yapısı bileşimi ve atomik yapısının detaylı analizine olanak sağlar. STEM TEM'e benzer şekilde elektron demeti kullanarak örnekten geçer; ancak STEM'de elektron demeti çok ince bir nokta halinde odaklanır ve bu nokta tarama yolu ile örnek üzerinde hareket ettirilir. Bu sayede örnek boyunca nokta bazlı veri toplanarak yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilir. STEM'in sunduğu bu tarama yeteneği görüntüleri kontrast olarak ayırmaya ve örneğin iç yapısının daha derinlemesine analiz edilmesine olanak tanır.

STEM aynı zamanda kimyasal analiz için Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ve Elektron Enerji Kayıp Spektroskopisi (EELS) gibi tekniklerle birleştirilerek kullanılabilir. Bu sayede hem yapısal hem de kimyasal bileşimlerin analizi yapılabilir. EDX ile STEM'in noktasal tarama yeteneği sayesinde örneğin belirli bölgelerindeki elementel bileşim haritaları oluşturulabilir. EELS ise elektronların enerji kayıplarına bağlı olarak malzemenin kimyasal ve elektronik özelliklerini analiz etmeye yarar. STEM'in sağladığı yüksek çözünürlük atomik düzeyde görüntüleme olanağı ve kimyasal analiz yeteneği bu tekniği nanoteknoloji malzeme bilimi biyoteknoloji ve yarı iletken araştırmalarında vazgeçilmez kılar. Bu özellikleri ile STEM nanoparçacıkların yüzey özelliklerinin kristal yapılarının malzeme kusurlarının ve arayüzlerinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlar. Ayrıca nanomalzemelerdeki faz geçişleri atomik düzeyde safsızlıkların tespiti ve nanoyapıların morfolojik değişikliklerinin gözlemlenmesi gibi uygulamalar için de etkin bir tekniktir.

1.2.2.9. Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM)

VSM analizinde malzemelerin manyetik özelliklerini incelemek için kullanılan hassas bir ölçüm cihazıdır. VSM bir malzemenin manyetik alan altındaki mıknatıslanma davranışını ve bu davranışın dış alanla nasıl etkileştiğini analiz eder. Bu cihaz nanomalzemelerin ve manyetik nanoparçacıkların manyetik özelliklerini incelemek için sıklıkla kullanılır ve temel olarak malzemenin manyetik momentini ölçer. VSM bir

örneği sabit bir manyetik alan içinde belirli bir frekansta titreştirerek çalışır. Titreşen örnek çevresindeki manyetik alanda bir değişiklik yaratır ve bu değişiklik örneğin manyetik momentine bağlı olarak indüklenen bir voltaj oluşturur. Bu indüklenen voltaj Hall problemleri veya bobinler tarafından algılanır ve bu sayede örneğin manyetik momenti ölçülür. VSM cihazında örneğin manyetik alan altındaki mıknatıslanma davranışı dış alan şiddeti değiştirilerek belirlenir.

1.2.3. Nanoparçacıkların Uygulamaları

Tıp ve Biyomedikal Uygulamalar; Nanoparçacıklar benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle tıp ve biyomedikal alanında geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Bu parçacıklar yüksek yüzey alanı özelleştirilebilir yüzey kimyası ve üstün optik elektriksel ve manyetik özellikleri sayesinde tıbbi teşhis tedavi ve biyomedikal araştırmalarda devrim niteliğinde yenilikler sunarak sağlık alanında önemli gelişmelere katkıda bulunmaktadır. Tıbbi teşhis alanında nanoparçacıklar yüksek duyarlılıkla tanı koymaya olanak tanır. Özellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve bilgisayarlı tomografi (CT) gibi görüntüleme tekniklerinde kontrast ajan olarak kullanılırlar. Manyetik nanoparçacıklar hedeflenen bölgelerde daha iyi kontrast sağlayarak hastalıkların erken teşhis edilmesine olanak tanır. Altın ve gümüş nanoparçacıklar optik özellikleri nedeniyle yüzey plazmon rezonansı (SPR) kullanılarak biyosensörlerde kullanılmaktadır. Bu biyosensörler düşük konsantrasyonlardaki biyomolekülleri tespit ederek kanser enfeksiyon ve genetik hastalıkların erken teşhisinde etkili bir araç sunmaktadır.

Nanoparçacıklar ilaç taşıma sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu parçacıklar ilaçları belirli hücrelere veya dokulara yönlendirebilir bu da tedavi etkinliğini artırırken yan etkileri azaltır. Polimerik nanoparçacıklar biyolojik olarak parçalanabilir özellikleriyle ilacın kontrollü salımını sağlar. Bu sistemler ilacın doğru zamanlamayla ve istenen dozda hedef bölgeye salınmasına olanak tanır. Ayrıca yüzeyleri fonksiyonel gruplar veya biyomoleküllerle modifiye edilerek nanoparçacıkların hedef hücrelere daha iyi yönlendirilmesi sağlanabilir. Kanser tedavisinde nanoparçacıklar yenilikçi çözümler sunmaktadır. Hedefe yönelik ilaç taşıma sistemleri kanser hücrelerini doğrudan hedef alarak kemoterapi ilaçlarının etkinliğini artırırken sağlıklı hücrelere olan zararını en aza indirir. Ayrıca manyetik nanoparçacıklar hipertermi tedavisi için kullanılır; bu yöntem manyetik alan altında

nanoparçacıkların ısıtarak tümör hücrelerini öldürmesine dayanır. Altın nanoparçacıklar ise fototermal tedavi için kullanılarak lazer ışığı altında ısıtarak tümör hücrelerini hedef alabilir.

Nanoparçacıklar doku mühendisliğinde de önemli bir rol oynamaktadır. Biyolojik olarak parçalanabilir polimerik nanoparçacıklar hücrelerin büyümesini ve farklılaşmasını destekleyen iskeleler olarak kullanılabilir. Bu iskeleler doku yenilenmesini ve onarımını teşvik eder bu da özellikle kemik kırık ve cilt gibi dokuların onarımında önemlidir. Ayrıca nanoparçacıklar biyolojik uyumlulukları sayesinde hücrelerle etkileşime girerek doku mühendisliğinde kullanılan biyomalzemelerin performansını artırabilir. Gen terapisi uygulamalarında da nanoparçacıklar kullanılmaktadır. DNA veya RNA moleküllerinin hücrelere taşınması için vektör olarak kullanılan nanoparçacıklar genetik hastalıkların tedavisinde umut verici araçlar sunmaktadır. Bu vektörler genlerin hedef hücrelere etkin bir şekilde iletilmesine olanak tanır ve gen ekspresyonunu düzenleyerek hastalıkların tedavisine katkıda bulunur.

Nanoparçacıkların tıp ve biyomedikal uygulamalarda sunduğu bu yenilikçi çözümler sağlık alanında önemli ilerlemelere olanak tanımaktadır. Gelişen teknoloji ve araştırmalar nanoparçacıkların daha etkin ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamakta ve bu da tıbbi tedavilerin başarısını artırmaktadır. Nanoparçacıkların biyoyumluluğu biyolojik aktivitesi ve özelleştirilebilir yapıları onları biyomedikal alanda vazgeçilmez araçlar haline getirmektedir. Nanoteknolojinin sağlık sektöründeki etkisi yeni tedavi yöntemlerinin ve teşhis tekniklerinin geliştirilmesiyle daha da artmakta ve bu da hastalıkların daha erken ve etkili bir şekilde tedavi edilmesine olanak tanımaktadır. Nanoparçacıklar ilaç taşıma sistemleri ve hedefe yönelik tedavilerde kullanılır. İlaçlar nanoparçacıklara yüklenerek belirli hücre veya dokulara daha etkili bir şekilde taşınabilir. Bu tedavilerin etkinliğini artırırken yan etkileri azaltır. Ayrıca manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tıbbi görüntüleme tekniklerinde kontrast maddesi olarak kullanılabilirler. Altın ve gümüş nanoparçacıklar anti-mikrobiyal özellikleri nedeniyle yara tedavisinde ve biyosensörlerde kullanılır (Wáng ve ark., 2013).

Çevresel Uygulamalar; Nanoparçacıklar çevresel uygulamalarda önemli bir rol oynayarak su arıtma hava temizleme toprak iyileştirme ve enerji üretimi gibi alanlarda yenilikçi çözümler sunmaktadır. Yüksek yüzey alanları kimyasal reaktivite ve özelleştirilebilir yüzey kimyası gibi özellikleri sayesinde çevre mühendisliğinde etkili

bir araç olarak kullanılırlar. Su arıtma sistemlerinde özellikle metal oksit nanoparçacıkları ağır metaller organik kirleticiler ve mikrobiyalkontaminantların giderilmesinde etkilidir. Örneğin demir oksit ve titanyum dioksit nanoparçacıkları arsenik ve pestisit gibi zararlı bileşenleri etkili bir şekilde adsorbe ederek su kalitesini artırır. Bu nanoparçacıklar fotokatalitik aktiviteleri sayesinde kirleticileri parçalayarak temiz su kaynaklarına katkı sağlamaktadır.

Hava temizleme uygulamalarında da nanoparçacıklar önemli bir yere sahiptir. Metal oksit nanoparçacıkları hava kirliliğine neden olan gazları ve parçacıkları etkisiz hale getirebilir. Titanyum dioksit nanoparçacıkları fotokatalitik özellikleri sayesinde hava kirleticilerini oksitler ve zararlı gazları daha az zararlı bileşiklere dönüştürür. Bu nanoparçacıklar hava temizleme sistemlerinde kaplama veya filtre olarak kullanıldığında etkinliklerini artırır ve çevresel kirliliğin azaltılmasına katkıda bulunur. Toprak kirliliği sanayi faaliyetleri ve tarım uygulamaları sonucunda önemli bir sorun haline gelmiştir ve nanoparçacıklar bu alanda da etkili çözümler sunmaktadır. Nanoscalezero-valentiron (nZVI) gibi demir bazlı nanoparçacıklar topraktaki organik kirleticileri ve ağır metallerin indirgenmesi veya adsorpsiyonu yoluyla etkili bir şekilde temizlenmesine olanak tanır. Bu süreçler toprak kirliliğinin azaltılmasına ve ekosistemlerin iyileştirilmesine yardımcı olur (Zhang ve ark., 2019).

Enerji üretimi alanında da nanoparçacıklar yenilikçi çözümler sunmaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinde özellikle fotovoltaiik hücrelerde kullanılan nanoparçacıklar ışık emilimini artırarak enerji verimliliğini yükseltir. Kuantum noktaları ve perovskitnanoparçacıkları güneş hücrelerinin enerji dönüşüm oranlarını artırmak için kullanılır. Ayrıca yakıt hücrelerinde ve bataryalarda kullanılan nanoparçacıklar enerji depolama kapasitesini ve pil ömrünü artırabilir bu da daha sürdürülebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine katkıda bulunur. Tarımda da nanoparçacıklar yenilikçi çözümler sunmaktadır. Nano gübreler ve nanopestisitler bitki büyümesini artırmak ve zararlıları kontrol altına almak için kullanılır. Bu tür ürünler besin maddelerinin bitkilere daha etkin bir şekilde iletilmesini sağlar ve çevresel etkiyi azaltır. Ayrıca nanoparçacıklar bitkilerin stres koşullarına karşı direncini artırabilir ve su kullanımını optimize edebilmektedir (Chen ve ark., 2020).

Nanoparçacıkların çevresel uygulamalardaki kullanımı mevcut çevresel sorunları çözmeye ve daha sürdürülebilir bir gelecek sağlamaya yardımcı olur. Bu yenilikçi çözümler çevresel etkilerin azaltılmasına ve doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunarak ekosistemlerin ve insan sağlığının korunmasına destek sağlar.

Gelişen teknoloji ve araştırmalar nanoparçacıkların çevresel uygulamalarda daha etkin ve güvenli bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu uygulamalar çevre mühendisliği alanında daha sürdürülebilir ve sağlıklı bir dünya için önemli bir adım oluşturmaktadır. Nanoparçacıkların çevresel alanlardaki kullanımı doğanın korunması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Enerji Üretimi ve Depolama; Nanoparçacıklar enerji üretimi ve depolama alanlarında çeşitli sistemlerin verimliliğini ve işlevselliğini artıran benzersiz özellikleri sayesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu parçacıklar enerji yoğunluğunu döngü kararlılığını ve şarj/boşaltma hızlarını artırarak pillerde katalizör ve elektrot malzemesi olarak önemli bir rol oynamaktadır. Nanoyapılı parçacıkların pillerde kullanılması yüksek kapasiteli ve uzun ömürlü yeni nesil enerji depolama cihazlarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Mahmud, 2023). Süperkapasitörlerde de nanoparçacıklar enerji ve güç yoğunluklarını artırmanın yanı sıra yüzey alanını ve iletkenliği geliştirerek hızlı enerji iletimi ve uzun ömürlü çalışma sağlamaktadır.

Güneş enerjisi dönüşümünde nanoparçacıklar güneş hücrelerinde ışık emilimini yük ayrışımını ve elektron taşınımını iyileştirerek verimliliği artırır. Ayrıca güneş yakıtı üretimi için fotokatalitik sistemlerde katalizör olarak kullanılırlar böylece sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunurlar. İnorganik-nano-karbon hibrit malzemeler nanoparçacıkları karbon nanotüpler veya grafen ile birleştirerek yüksek performanslı güneş hücreleri ve lityum-iyon piller gibi elektrokimyasal enerji depolama cihazları için üstün performans sergilemektedir (Wang ve Dai, 2013). Termal enerji depolamada nano-teknoloji termal iletkenliği ve kararlılığı artırarak faz değişim malzemelerini (PCM'ler) geliştirir. Nano geliştirilmiş PCM'ler termal enerjiyi daha verimli bir şekilde depolayıp serbest bırakabilir bu da konsantre güneş enerjisi santralleri gibi uygulamalar için çözümler sunmaktadır (Awad ve ark., 2021). İnorganik-nano-karbon hibrit malzemeler nanoparçacıkları karbon nanotüpler veya grafen ile birleştirerek yüksek performanslı güneş hücreleri ve lityum-iyon piller gibi elektrokimyasal enerji depolama cihazları için üstün performans sergilemektedir.

Yakıt hücrelerinde nanoparçacıklar elektrotların katalitik aktivitesini artırarak elektrokimyasal reaksiyonların daha iyi gerçekleşmesini sağlar (Pomerantseva ve ark., 2019). Bu nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı ve reaktivitesi sayesinde mümkün olur. Genel olarak nanoparçacıklar enerji üretimi ve depolama teknolojilerinde önemli ilerlemeler sunmakta ve bu sayede piller süperkapasitörler güneş hücreleri ve termal depolama sistemleri gibi sistemlerde daha yüksek verimlilik ve performans

sağlamaktadır. Bununla birlikte maliyet ölçeklenebilirlik ve uzun vadeli stabilite gibi zorlukların üstesinden gelinmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları gereklidir.

Elektronik ve Optik Uygulamalar; Nanoparçacıklar boyutlarının getirdiği avantajlar ve yüzey özellikleri sayesinde hem elektronik hem de optik uygulamalarda önemli fırsatlar sunmaktadır. Elektronik alanda nanoyapılar boyutlarının küçük olması nedeniyle yüksek yüzey alanına sahip olduklarından elektronik devrelerde daha az malzeme kullanılarak daha kompakt ve verimli devreler oluşturulabilir. Örneğin kuantum noktalar yüksek verimli LED'ler ve fotodetektörlerde kullanılmakta ve boyutlarına bağlı olarak ayarlanabilen optik özellikler sunmaktadır. Optik uygulamalarda nanoyapılar ışığı kontrol etme yetenekleri ile öne çıkmaktadır. Plazmonik nanoparçacıklar metal yüzeylerinde plazmon rezonansı oluşturarak ışığı yoğun bir şekilde yayabilmekte ve bu da sensörler görüntüleme ve bilgi teknolojileri gibi alanlarda kullanılabilir. Dielektrik nanoparçacıklar ise daha düşük kayıplarla ışığı yönlendirebilme özelliğine sahip olup nanoantenler ve metasurfaces gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Kuznetsov ve ark., 2016).

Nanoparçacıkların bir diğer önemli uygulama alanı biyomedikal görüntüleme ve tedavi yöntemleridir. Kuantum noktalar yüksek parlaklık ve stabilite sunarak biyolojik görüntüleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu nanoparçacıklar floresan özellikleri sayesinde kanser gibi hastalıkların erken teşhisinde etkili araçlar sunmaktadır (Biju ve ark., 2008). Ayrıca nanoyapılar ışığı emip ısıya dönüştürerek fototermal tedavilerde kullanılabilir ve bu da hedeflenen hücrelerin yok edilmesini sağlar (Joseph ve ark., 2020). Nanoparçacıklar devrelerin ve cihazların daha verimli hale getirilmesi ışık manipülasyonu ve biyomedikal uygulamalar gibi çeşitli alanlarda yenilikçi çözümler sunarak teknolojik ilerlemeyi desteklemektedir. Bu nedenle nanoparçacıkların özellikleri ve potansiyel uygulamaları üzerindeki araştırmalar devam etmekte ve daha geniş bir yelpazede uygulanabilirliklerini artırmaktadır.

Kataliz ve Kimyasal Sentez; Nanoparçacıklar kataliz ve kimyasal sentez alanlarında geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve bu alanlarda önemli ilerlemelere olanak tanımaktadır. Kataliz alanında nanoparçacıklar yüksek yüzey alanı ve aktif yüzey atomlarının fazlalığı nedeniyle etkili katalizörler olarak işlev görmektedir. Bu parçacıklar kimyasal reaksiyonları hızlandırmak ve seçiciliği artırmak için kullanılır. Özellikle geçiş metali nanoparçacıkları hidrojenasyon oksidasyon ve karbon-karbon bağ

oluşturma reaksiyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakır ve bakır bazlı nanoparçacıklar özellikle düşük maliyetli ve bol bulunan bakır metali temel alındığından kataliz alanında büyük ilgi görmektedir. Bu nanoparçacıklar farklı sentetik stratejiler ve koşullarla kimyasal ve fiziksel özelliklerinin modifiye edilebilmesi sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Gawande ve ark., 2016). Dendrimerkapsüllenmiş metal nanoparçacıklar kataliz uygulamaları için özel olarak tasarlanmış bir diğer nanoparçacık türüdür. Bu yapılar dendrimerlerin içine metal iyonlarının alınması ve ardından kimyasal indirgeme yoluyla sıfır değerlikli metal nanoparçacıklarının elde edilmesi ile hazırlanır. Bu tür katalizörler organik çözücüler ve süperkritik CO₂ gibi farklı ortamlar içinde etkili bir şekilde çalışabilir (Crooks ve ark., 2001).

Karbon nanoparçacıklar da kataliz alanında yeni bir sınıf olarak ortaya çıkmış ve fotokataliz asit-baz katalizi ve elektrokataliz gibi farklı reaksiyonlarda kullanılmaktadır (Testa ve ark., 2019). Nanoparçacıkların optik ve elektriksel özellikleri onları geleneksel katalitik sistemlere göre üstün kılmaktadır. Kimyasal sentezde ise nanoparçacık katalizi kompleks moleküllerin daha verimli bir şekilde sentezlenmesine olanak tanır. Bu alanda nanoparçacıkların kullanımı yeni metodolojilerin geliştirilmesi ve daha karmaşık moleküler yapılar oluşturulmasına olanak sağlar (Cong ve Porco, 2012). Nanoparçacıklar kataliz ve kimyasal sentez alanlarında yüksek reaktivite seçicilik ve uzun ömürlülük sunarak çevre dostu ve sürdürülebilir kimyasal süreçlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Somwanshi ve ark., 2020). Bu nedenle nanoparçacıkların katalitik uygulamalardaki potansiyeli daha geniş bir yelpazede uygulanabilirliklerini artırmak amacıyla araştırılmaya devam etmektedir.

1.3. Manyetizma

Manyetizma elektrik yüklerinin hareketi veya dönmesi sonucunda oluşan karmaşık bir fiziksel fenomendir ve genellikle elektromanyetizma teorisi altında incelenir. Bu fenomen temel fizik prensiplerine dayanır ve çeşitli alanlarda derinlemesine araştırmaları gerektiren bir konudur. Manyetizma katı hal fiziksinde önemli bir alan olup materyallerde spin ve orbital moment gibi fenomenlerle karakterize edilir ve teknolojiye uygulama alanları bulur (Fischer ve Ohldag, 2015). Manyetizmanın temel prensipleri manyetik kutuplar arasındaki çekim ve itme ile manyetik alan ve elektromanyetik kuvvet kavramlarını içerir (Meizhong, 2019). Manyetik alanlar fiziksel

sistemlerin çevresinde var olan ve manyetik etkileşimlerin gerçekleşmesini sağlayan alandır. Bu alanlar genellikle vektör alanlar olarak ifade edilir ve Maxwell denklemleri gibi matematiksel formüllerle tanımlanır. Manyetizma elektrik yükleriyle ilişkilidir ve Maxwell'in elektromanyetik teorisiyle tanımlanır ve elektrik motorları gibi teknolojik uygulamalara sahiptir (Arfken ve ark., 1984).

Manyetik alanlar manyetik malzemelerin özelliklerini manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu gibi kavramlarla karakterize edilir. Manyetik malzemeler doğal olarak manyetik özelliklere sahip olan maddelerdir ve atomik yapılarındaki elektronların manyetik momentlerinden kaynaklanır. Manyetik malzemelerin manyetik alanlarla etkileşimi mikroskobik seviyede incelenir ve bu etkileşimler genellikle manyetik momentlerin yönelimi ve manyetik alan enerjisi gibi konseptlerle açıklanır. Yoğun madde fiziği alanında araştırmacılar skyrmionlar ve biskyrmionlar gibi karmaşık manyetik yapıları anlama konusunda önemli ilerlemeler kaydetmişlerdir (Wang ve ark., 2016). Bu manyetik dokular spintronığa ve manyetik veri depolamaya potansiyel uygulamalara sahiptir. Malzeme biliminde manyetik nanoparçacıklar hedefe yönlendirilmiş ilaç taşıma ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) kontrast geliştirme gibi biyomedikal uygulamalar için yaygın bir şekilde araştırılmıştır (Pankhurst ve ark., 2009). Manyetizmanın temelleri elektromanyetizma ve kuantum mekaniği gibi alanlardaki ileri düzeydeki teorik ve deneysel çalışmalarla anlaşılmıştır. Bu çalışmalar manyetizmanın elektrik akımları manyetik alanların etkileşimleri manyetik rezonans gibi alanlardaki uygulamalarının anlaşılmasına katkı sağlamıştır. Kuantum manyetizması kuantum mekanik etkilerin belirgin olduğu yerlerde manyetik spinleri içerir ve kuantum kritikliğe kadar olan olgulara yol açar (Sachdev, 2007). Ayrıca manyetizmanın madde üzerindeki etkileri ve manyetik alanların kontrolü gibi konular nanoteknoloji ve malzeme bilimi gibi çağdaş alanlarda da büyük öneme sahiptir. Manyetizma karmaşık ve çok yönlü bir fenomen olup geniş bir disiplinler arası araştırma alanını kapsar. Kısacası manyetizma bir malzemenin manyetik özelliklerini tanımlayan geniş bir fenomenler yelpazesidir. Temel manyetizma türleri şunlardır: Ferromanyetizma antiferromanyetizma ferrimanyetizma paramanyetizma ve diyamanyetizma. Bunlar dışında amorf ve düzensizlik bağlamında katıların manyetik düzeninin karmaşık davranışlarını tanımlamak için miktomanyetizma metamanyetizma asperomanyetizma sperimanyetizma speromanyetizma spin camı ve küme camı gibi daha az bilinen ek türler bulunmaktadır (Hurd, 1982).

1.3.1. Paramanyetizma

Paramanyetizma yalnızca dış bir manyetik alanın varlığında meydana gelen bir manyetizma şeklidir. Bu bir malzemenin elektronların manyetik momentleriyle ilişkilidir. Paramanyetizmanın temelini oluşturan Langevin teorisi sonraki çalışmaların odaklandığı ve manyetizasyon süreci ile manyetik momentlerin anlaşılmasında kuantum teorisinin rolüne odaklandığı bir alanı oluşturur (Sucksmith ve Pearce, 1938; Cooke, 1949). Langevin teorisi manyetizma alanında temel bir model olarak kabul edilir ve paramanyetik malzemelerin davranışlarını açıklamak için önemli bir araçtır. Bu teori Fransız fizikçi Paul Langevin tarafından 1905 yılında geliştirilmiştir. Temel olarak Langevin teorisi bir malzemenin içindeki manyetik momentlerin dış bir manyetik alanın etkisi altında termal hareketlerle rastgele olarak hareket ettiğini öne sürer. Bu momentlerin hareketi genellikle dış manyetik alanın yönünde bir hedefe doğru gerçekleşir. Ancak termal hareketin etkisi altında manyetik momentlerde rastgele hareketler de gözlemlenir. Teori bir malzemenin toplam manyetizasyonunu açıklar. Dış bir manyetik alanın varlığı manyetik momentlerin hizalanmasına neden olur ve dolayısıyla malzemenin net manyetik momenti artar. Langevin teorisinin matematiksel formülasyonu malzemenin manyetik momentlerinin termal hareketlerini ve dış bir manyetik alanın etkisi altındaki yönlendirilmiş hareketlerini tanımlar. Langevin teorisi özellikle paramanyetik malzemelerin davranışlarını anlamak için kullanılır. Bu teori paramanyetizmanın kökenini termal hareketlerin ve dış manyetik alanın etkilerini temel alarak açıklar. Bu sayede malzemenin paramanyetik özellikleri ve manyetik davranışları hakkında anlamlı tahminler yapılabilir. Serbest radikaller moleküler dalga fonksiyonlarından dolayı paramanyetizma sergiler paramanyetik rezonans bunların araştırılması için hassas bir tekniktir (Fraenkel, 1957). Düşük sıcaklıklarda paramanyetik kristallerin manyetik özelliklerinin araştırılması kristal ortamındaki elektrik alanın neden olduğu enerji seviyelerinin Stark bölünmesiyle ilişkilendirilmiştir (Guha, 1945). Stark bölünmesi bir atomun elektrik alan etkisi altında gösterdiği enerji seviyelerindeki değişimi ifade eden bir fenomendir. Atom bir elektrik alanı tarafından etkilendiğinde atomun çekirdeğine karşı uygulanan elektrik alanı atomun içindeki elektronlar üzerinde bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet elektronların hareketi üzerinde etkili olur ve atomun enerji seviyelerinde değişiklikler meydana gelir. Elektrik alan

etkisi altında atomun enerji seviyelerinin ayrışması veya bölünmesi Stark etkisi olarak adlandırılır. Bu etki atomun içindeki elektronik durumların enerji seviyelerini etkiler ve belirli enerji seviyelerinin birbirinden ayrışmasına neden olur. Stark bölünmesi atomik spektral çizgilerin genişlemesine veya parçalanmasına yol açabilir. Bu durum atomun dışındaki elektronların elektrik alanın etkisi altında farklı enerji seviyelerine farklı şekillerde ayrılması sonucunda meydana gelir. Atomik ve moleküler spektroskopide manyetizma ve atom fiziği gibi birçok alanda Stark bölünmesinin etkileri önemli bir rol oynar. Bu etki elektrik alanının varlığında atomların davranışını ve enerji seviyelerini anlamak için önemli bir araç sağlar.

Paramanyetizmada eşleşmemiş elektronların manyetik momentleri dış bir manyetik alana hizalanır ve zayıf bir çekim oluşturur. Bu davranış lantanit içeren paramanyetik iyonik sıvılar (PILs) gibi paramanyetik malzemelere özgüdür (Knoop, 2023). Bu malzemeler yakın çekirdek spinleri için kısa T1 rahatlamasına neden olan paramanyetik türlerin varlığından dolayı paramanyetik davranış sergiler bu durumda paramanyetik rahatlamayı artırma (PRE) olarak bilinir (Schlagnitweit ve ark., 2015). Paramanyetizmanın içsel doğası parçacık boyutu etkilerinden kaynaklanan süperparamanyetizmadan farklıdır (Abdelbasir ve Shalan, 2019). Süperiletkenler bağlamında bir paramanyetik normal durumdan süperiletken bir duruma geçiş paramanyetizm sorumlu elektronların süper-elektronlardan manyetik alanlar aracılığıyla etkileşim gösterdiği bir ayrılma içerir (Hampshire, 1997). Paramanyetik türlerin varlığı nükleer spin rahatlaması hızlarını ve NMR pik genişliklerini önemli ölçüde etkileyebilir (Palke ve Stebbins, 2011). Ayrıca oda sıcaklığında mükemmel spin taşıma özelliklerine sahip paramanyetik yalıtkanların bulunabilirliği paramanyetik malzemelerde spintronikleri keşfetme fırsatları sunmaktadır (Zhu, 2023). Elektron paramanyetik rezonans (EPR) spektroskopisi malzemelerdeki ve biyolojik komplekslerdeki paramanyetik merkezleri karakterize etmek için önemli bir araçtır (Petasis ve Hendrich, 2015). Ayrıca inorganik katıların paramanyetik iyonlarla doplanması malzeme özelliklerini ayarlayabilir ve NMR spektroskopisinde dinamik nükleer polarizasyon (DNP) için endojen ajanları tanıtabilir (Chakrabarty ve ark., 2018). Mikro kristalin silikon gibi malzemelerdeki paramanyetik hataların incelenmesi hataların çoğunluğunun paramanyetik durumlar olduğunu ortaya koymaktadır (Finger ve ark., 2004). Dahası karbon malzemelerinde hidrojen moleküllerinin nükleer spinleri ile paramanyetik merkezler arasındaki etkileşim Raman spektroskopisi kullanılarak incelenebilir ve bu karbon malzemelerindeki paramanyetik hataların doğasına ilişkin içgörüler sunmaktadır

(Centrone, 2011). İnce filmlerdeki paramanyetik türlerin varlığı X-ışını fotoelektron spektroskopisi ve elektron paramanyetik rezonans spektroskopisi gibi teknikler kullanılarak karakterize edilebilir (Kakavandi ve ark., 2013).

Paramanyetizma çeşitli malzemelerde kritik bir rol oynar; malzemelerin manyetik özelliklerini ve dış manyetik alanlarla etkileşimlerini etkiler. Paramanyetik davranışın anlaşılması spintroniklerdenspektroskopik teknikler kullanarak malzemelerin karakterizasyonuna kadar geniş bir uygulama yelpazesinde hayati öneme sahiptir.

1.3.2. Diyamanyetizma

Diyamanyetizma bir malzemenin içindeki tüm manyetik momentlerin dış bir manyetik alanın varlığında zayıf bir şekilde itilmesi veya zıt yönlere hizalanması sonucu ortaya çıkan bir fenomendir. Bu fenomen malzemenin içinde bulunan elektronların manyetik momentlerinin dış bir manyetik alanın etkisiyle birbirlerine karşı hareket etmeleri sonucunda oluşur. Diyamanyetizma tüm malzemelerde evrensel olarak bulunan bir özelliktir. Ancak genellikle diyaşırı manyetik momentlere sahip malzemelerin manyetik tepkisi paramanyetik veya ferromanyetik malzemelerinkinden çok daha zayıftır. Bu nedenle diya manyetizması bir malzemenin manyetik davranışını belirleyen diğer türlerden daha az belirgindir. Diyamanyetik malzemeler bağlamında manyetik bir alan etrafında hareket eden yüklenmiş parçacıkların tamamlanmış siklotron yörüngeleri düzlemine dik bir düzlemde bir diyamanyetik katkı sergiler; bu paramanyetik katkılardan oluşan eksik yörüngeler tarafından karşılanır ve bir iptal etkisine yol açar (Kumar ve Kumar, 2009). Siklotron yüksek enerjili iyonlar veya protonlar üretmek amacıyla kullanılan bir tür parçacık hızlandırıcıdır. Bu cihaz sabit bir manyetik alan ve değişken bir elektrik alan kullanarak parçacıkları sarmal bir yörünge boyunca hızlandırır. Siklotron yörüngeleri bu parçacıkların manyetik alan etkisi altında izlediği dairesel veya sarmal yolları tanımlar. Bir yüklü parçacık bir manyetik alan içine girdiğinde hareket doğrultusuna dik bir kuvvetle karşılaşır. Bu kuvvet parçacığın doğrusal hareketini dairesel bir yörüngeye dönüştürür. Manyetik alanın büyüklüğü B parçacığın yükü q ve hızı v ile ilişkilidir. $F=qvB$ Bu kuvvet parçacığı sürekli olarak merkezi bir noktaya doğru çeker böylece parçacık dairesel bir yörüngede hareket eder. Yörüngenin yarıçapı r parçacığın kütlesi m hızı v yükü q ve manyetik alan B ile ilişkilidir. $r= qB/mv$ Siklotronlar sabit manyetik alanın yanı sıra değişken bir elektrik alan kullanır. Elektrik alan parçacıkların enerjilerini periyodik olarak artırarak daha

yüksek hızlara ulaşmalarını sağlar. Siklotronun merkezinde bulunan iki yarım daire şeklindeki "de" elektrotları arasında yüksek frekanslı bir alternatif akım uygulanır. Parçacıklar bu iki elektrot arasındaki boşluktan geçerken elektrik alan tarafından hızlandırılır ve her geçişlerinde enerji kazanırlar.

Diyamanyetizma üzerine yapılan araştırmalar atomikten makroskopik ölçeklere kadar uzanmakta olup hem klasik hem de kuantum çerçeveleri içermektedir. Çalışmalar diyamanyetik malzemelerin çeşitli manyetik alan koşullarında davranışlarını incelemiştir bunlar arasında homojen olmayan ve dalgalanan alanlar bulunmaktadır. Teorik ilerlemeler diyamanyetik katkıların relativistik teori ve termal dalgalanmalar konusundaki yeni görüşler sağlamıştır. Ayrıca malzemelerdeki dinamik diyamanyetik etkilerin ve artık manyetizmanın potansiyeli tanımlanmış bu da bu temel manyetik özelliğin anlaşılması ve kullanılması için yeni olanaklar sunmuştur.

Metalik bileşiklerde tipik olarak spinlerden kaynaklanan Pauli paramanyetizması orbitalardan kaynaklanan Landau diyamanyetizmasından genellikle üstün gelir buna bağlı olarak genel bir paramanyetik tepki oluşturur. Pauli paramanyetizması serbest elektron modelinde Landau diyamanyetizmasının büyüklüğünün üç katı olduğu şekilde dikkat çeker (Onosaka ve ark., 2012). Ayrıca zayıf manyetik bir alan içindeki diyamanyetik mikroparçacıkların manyetoforezi ferrofluid tarafından oluşturulan manyetizasyon gradyanı tarafından etkilenir diyamanyetik parçacıkların diyamanyetik akıntılara doğru negatif manyetoforeze uğramasına neden olur (Zhu, 2023). Landau diyamanyetizması malzemelerin içindeki elektronların hareketlerinden kaynaklanan manyetik bir özelliktir. Bu özellik malzeme içindeki elektronların manyetik alanlara tepkisini açıklar ve malzemenin içindeki elektronların yörüngesel hareketlerinin bir sonucudur. Landau diyamanyetizması malzemenin manyetik alanlara verdiği zayıf bir itme tepkisi olarak ortaya çıkar. Bu fenomen özellikle düşük sıcaklık ve yüksek manyetik alan koşullarında belirgin hale gelir. Elektronların Fermi enerjisi seviyesinin yüksek olduğu ve sıcaklığın düşük olduğu durumlarda Landau diyamanyetizması daha belirgindir. Genellikle metaller ve yarıiletkenler gibi elektriksel iletkenlik gösteren malzemelerde gözlemlenir. Landau diyamanyetizması elektronların Fermi yüzeyine paralel hareket etme eğiliminde olduğu durumlarda belirgin hale gelir. Elektronların Fermi yüzeyine dik hareket etmeye çalıştığı durumlarda ise Pauli paramanyetizması baskın olur. Bu nedenle Landau diyamanyetizması malzemenin manyetik özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir role sahiptir ve elektronların hareketinin ve düzenlenmesinin manyetik davranışa olan etkilerini incelemek için kullanılır. Pauli paramanyetizması

Pauli dışlama prensibi ile ilişkilendirilen ve bir maddenin manyetik özelliklerini açıklayan bir kavramdır. Bu fenomen paramanyetik bir davranıştır ve malzemenin içindeki elektronların manyetik momentlerinin dış bir manyetik alana verdiği tepkiyi tanımlar. Pauli paramanyetizması tam dolu bir elektron dış kabuğu olan atomlarda gözlemlenir ve genellikle bir malzemenin paramanyetik özelliklerinin belirgin bir bileşenidir. Bu durum malzeme içindeki elektronların dış manyetik alanla etkileşime girdiğinde elektronların çoğunun dörtlü kuantum sayısına göre dolu olan düşük enerji seviyelerine geçememesinden kaynaklanır. Teorik çalışmalar düşük sıcaklıklarda ve zayıf manyetik alanlar altında etkileşmeyen Fermi gazlarının hem Pauli paramanyetizmasını hem de Landau diyamanyetizmasını sergilediğini göstermiştir; diyamanyetik duyarlılığın paramanyetik duyarlılığın üçte biri olduğu bulunmuştur(Lai ve ark., 2018). Diyamanyetizma malzemelerin manyetik özelliklerinde kritik bir rol oynar ve dış manyetik alanlara tepkilerini etkiler. Diyamanyetik ve paramanyetik katkılar arasındaki karmaşık etkileşimi anlamak fizik malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında geniş bir uygulama yelpazesi için esastır.

1.3.3. Ferromanyetizma

Ferromanyetizma bir malzemenin dış bir manyetik alan olmaksızın bile kendiliğinden manyetikleşme yeteneği gösteren bir fenomendir. Bu tür malzemeler yüksek sıcaklıklarda belirli bir manyetik alan uygulanmadığı zaman bile kalıcı bir manyetizasyon sergilerler. Bu olgu malzemenin iç yapısındaki mikroskobik manyetik bölgelerin (manyetik alanların) düzenlenmesinden kaynaklanır. Ferromanyetik malzemeler genellikle demir nikel kobalt gibi bazı geçiş metalleri ve bunların alaşımlarını içerir. Manyetizasyon bir dış manyetik alana tepki olarak malzemenin içindeki manyetik momentlerin hizalanmasıyla oluşur. Bu hizalanma malzemenin kendiliğinden bir manyetik alan üretmesine ve dış alandan ayrıldığında bile bu manyetizasyonun korunmasına neden olur. Ferromanyetizma manyetik depolama cihazları elektromanyetik makineler manyetik sensörler ve spintronik gibi birçok endüstriyel ve bilimsel uygulama için temel bir öneme sahiptir. Eşlenmemiş elektronların hizalanması harici bir manyetik alan veya elektrik akımı uygulanmadan devam ederse kalıcı bir mıknatıs üretir. Kalıcı mıknatıslar ferromanyetizmanın sonucudur. "Ferro" öneki demiri ifade eder çünkü kalıcı manyetizma ilk olarak manyetit Fe_3O_4 adı verilen bir doğal demir cevheri biçiminde gözlemlenmiştir. Manyetit parçaları

Dünya yüzeyinin üzerine veya yakınına dağılmış olarak bulunabilir ve bazen biri manyetize olur. Bu doğal olarak oluşan mıknatıslara mıknatıs taşları denir.

Ferromanyetizma genellikle demir gibi malzemelerin özgü olduğu düşünülen bir fenomen olup beklenmedik bir şekilde demir dışındaki malzemelerde de ortaya çıkabilmektedir (Sundaresan ve ark., 2006). Bu malzemeler arasında CaB_6 , CaO ve SiC gibi malzemeler içsel kusurlar nedeniyle ferromanyetizma sergileyebilmektedir (Sundaresan ve ark., 2006). Kusurlar maddelerdeki yapısal hatalar veya eksikliklerdir. Örneğin bir kristal yapısında atomların yer değiştirmesi eksik atomlar veya fazla atomlar gibi kusurlar olabilir. Bu tür kusurlar malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir ve bazen istenmeyen özelliklere neden olabilir. Dahası hafnium dioksit (HfO_2) gibi dielektrik oksitler doplama gerektirmeden ferromanyetik özellikler gösterebilmektedir (Song ve ark., 2009). Bu durum ferromanyetizmanın geleneksel manyetik maddelerden öte birçok malzemede esnek ve yaygın bir şekilde bulunma yeteneğini vurgulamaktadır. Farklı malzemelerdeki ferromanyetizmanın kökeni çeşitli mekanizmalarla ilişkilendirilmiştir. Örneğin, Fe-dopajlı SnO_2 ince filmlerde yüksek Curie sıcaklığının gözlemlendiği ferric iyonların bir elektron aracılığıyla bir oksijen kusurunda ferromanyetik bağlanması önerilmiştir (Coey ve ark., 2004). Dopantlar maddeye eklenen yabancı atomlar veya moleküllerdir. Bu dopantlar malzemenin elektriksel manyetik veya optik özelliklerini değiştirmek için kullanılabilir. Örneğin bir yarıiletken malzemeye bir katkı maddesi eklenerek malzemenin iletkenlik özellikleri kontrol edilebilir veya değiştirilebilir. Dopantlar malzemenin performansını artırmak veya belirli özelliklerini ayarlamak için yaygın olarak kullanılır. Farklı malzemelerdeki ferromanyetizmanın kökenlerini ve özelliklerini anlamak spintronik ve diğer teknolojilerde manyetik sistemleri geliştirmek için kritiktir.

1.3.4. Ferrimanyetizma

Ferrimanyetizma bir malzemenin iç yapısında yer alan farklı atomlar veya iyonların manyetik momentlerinin belirli bir düzende konumlanması sonucu oluşan bir fenomendir. Bu düzende atom veya iyonların manyetik momentleri farklı büyüklüklerde olabilir ve yönleri kısmen zıt yönlerde doğru hizalanmıştır. Bu durum malzemenin toplam manyetizasyonunun sıfırdan farklı bir değere sahip olmasına neden olur. Ferrimanyetik özellik çoğunlukla ferritler gibi bileşiklerde ve bazı manyetik seramiklerde gözlemlenir. Bu benzersiz manyetik davranış çeşitli bağlamlarda kapsamlı

bir şekilde incelenmiştir. Araştırmalar ferrimanyetiklerde hızlı alan tahrikli antiferromanyetikspin dinamiklerinin açısall momentum telafı sıcaklığında meydana gelebileceğini göstermiştir (Kim ve Jeong, 2016). Ayrıca ferrimanyetikskyrmionlar spintronik ve topolojik sistemlerdeki potansiyel uygulamaları için incelenmiştir (Woo ve ark., 2018). Dengelenmiş ferrimanyetiklerde akım tahrikli alan duvarları ve küçük skyrmionların incelenmesi spintronik ve nanometre ölçekli spin kontrolüne ilişkin öngörüler sağlamıştır (Caretta ve ark., 2018). Ferrimanyetizmanın önemli bir yönü açısall momentum telafı sıcaklığıdır; bu sıcaklık ferrimanyetiklerde gözlemlenen hızlı alan tahrikli antiferromanyetikspin dinamikleri için önemlidir (Kim ve Jeong, 2016; Ikebuchi ve ark., 2021).

Teorik çalışmalar *Heisenberg merdivenleri* ve spin zincirleri gibi çeşitli sistemlerdeki ferrimanyetizmanın doğasını incelemiş ve kısmi ferrimanyetizma ile ilişkilendirilen temel durum özelliklerini ve manyetik davranışları açıklığa kavuşturmuştur (Shimokawa ve Nakano, 2013; Sekiguchi ve Hida, 2017). Heisenberg merdivenleri manyetik malzemelerdeki spin-spin etkileşimlerini tanımlamak için kullanılan bir modeldir. Bu model birbirleriyle etkileşim halinde olan spinlerin belirli bir yapıya sahip olduğunu ve bu yapıların özellikle bir boyut boyunca düzenlendiğini varsayar. Heisenberg merdivenleri özellikle bir boyutta belirli bir sıra ve düzeni koruyan spin zincirlerinin teorik bir modelini oluşturur. Bu model her bir spinin diğer spinlerle etkileşimini belirleyen bir etkileşim terimi kullanır. Heisenberghamiltonyanında her iki spin arasındaki etkileşim spinlerin birbirlerine göre yönelimlerine ve uzaklıklarına bağlı olarak değişir. Bu model bir manyetik malzemenin manyetik özelliklerini anlamak ve açıklamak için kullanılır ve birçok farklı durumda uygulanabilir. Heisenberg merdivenleri özellikle spin zincirlerinin davranışını incelemek için önemlidir. Bu model manyetik malzemelerdeki spinlerin nasıl davrandığını anlamak ve malzemenin manyetik özelliklerini tahmin etmek için kullanılır. Heisenberg merdivenleri manyetik alanlardaki spin-davranış ilişkilerini ve manyetik malzemelerin faz geçişlerini anlamak için de önemlidir. Bu nedenle manyetik malzemelerin araştırılmasında temel bir teorik araç olarak kabul edilirler.

Marshall-Lieb-Mattis teoremi ikili kafes yapılarındaki manyetik özelliklerin anlaşılmasında ve ferrimanyetizmanın karmaşık sistemlerdeki çöküşünde önemli bir rol oynamıştır (Nakanishi ve Yamamoto, 2002; Nakano ve ark., 2011). Marshall-Lieb-Mattis teoremi birimsel iletkenin bir tane yarım dolu enerji bantına sahip bir elektron sisteminin belirli bir sıcaklıkta manyetik bir toplam momenta sahip olmayacağını

belirten bir teoremdir. Bu teorem elektronların Pauli dışlama prensibine tabi olduğu ve Fermi seviyesindeki tüm durumların dolu olması gerektiği kabulüne dayanır. Fermi seviyesi bir maddenin elektron dağılımında önemli bir rol oynayan kavramlardan biridir. Bu seviye mutlak sıfır sıcaklığında (0 Kelvin veya -273.15 Celsius) bir maddenin elektron dağılımındaki en yüksek enerjiye sahip elektron durumunu ifade eder. Elektronların bir atom veya bir katı madde içinde belirli enerji seviyelerinde bulunur. Fermi seviyesi bu enerji seviyelerinin en yükseği olarak kabul edilir ve maddeyi oluşturan elektronların bir kısmı bu seviyenin altında bir kısmı ise üstünde bulunur. Fermi seviyesi bir maddenin elektriksel iletkenlik ısı iletkenliği ve elektriksel özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Özellikle katı hal fiziğinde elektronik yapılarda ve yarı iletkenlerde Fermi seviyesi elektronların dolu ve boş enerji seviyelerini ayırmak için kullanılır. Bu seviye maddenin elektronik ve manyetik özelliklerinin anlaşılmasında temel bir kavramdır. Teorem birimsel iletkenler gibi belirli yapısal özelliklere sahip sistemlerdeki manyetik davranışı incelemek için kullanılır. Özellikle birçok spin-bağlı elektronun davranışını modellemek ve anlamak için önemlidir. Bu teorem spin sisteminin temel özelliklerini ve davranışlarını özellikle de manyetik özelliklerini anlamak için kullanılır. Marshall-Lieb-Mattis teoremi bir sistemin manyetik momentini hesaplamak ve sistemin hangi koşullarda manyetik bir momenta sahip olabileceğini belirlemek için önemli bir araçtır. Bu teorem manyetik malzemelerdeki faz geçişlerini ve manyetik davranışlarını anlamak için temel bir teorik araç olarak kabul edilir.

Ferrimanyetizma çeşitli malzemeleri ve olguları kapsayan zengin bir araştırma alanı olarak varlığını sürdürmektedir. Ferrimanyetiklerin manyetik özelliklerini yöneten temel prensiplerden yeni manyetik yapıların ve dinamiklerin keşfine kadar ferrimanyetizma alanındaki çalışmalar manyetik malzemelerdeki spinler arasındaki karmaşık etkileşimin değerli görüşlerini sağlamaya devam etmektedir.

1.3.5. Antiferromanyetizma

Antiferromanyetizma bitişik manyetik momentlerin zıt yönlere hizalanmasıyla karakterize edilen malzemelerde gözlenen bir fenomendir bu durumda toplam manyetik moment sıfırdır. Bu davranış komşu spinler arasındaki güçlü değişim etkileşimi nedeniyle meydana gelir ve spinlerin birbirine zıt yönlere hizalanmasına yol açar. Ferromanyetik malzemelerde tüm spinlerin aynı yönde hizalanmasıyla

karşılaştırıldığında antiferromanyetik malzemelerde bir iptal etme etkisi görülür bu durum da genel manyetizasyonun eksikliğine yol açar. Antiferromanyetik malzemeler dış manyetik alanlara karşı dayanıklılık saçak manyetik alanların olmaması ve ultra hızlı dinamikler gibi ferromanyetik sistemlere kıyasla birkaç avantaj sunarlar (Baltz ve ark., 2018). Bu malzemeler kararlı ve dış müdahalelere karşı dirençlidir bu da onları spintronik uygulamalar için umut vadeden adaylar haline getirir (Lebrun ve ark., 2018). Son zamanlardaki ilerlemeler spin-yörünge torku kullanılarak antiferromanyetik-ferrimanyetik-ağır-metal hetero yapılarında arayüzeyspinlerinin ayarlanabildiğini göstermiş ve spintronikte küçültme ve azaltılmış güç tüketimi potansiyeline dikkat çekmiştir (Liu ve ark., 2020b). Geleneksel tekniklerle zorlu olmalarına rağmen antiferromanyetik malzemeler gelecek nesil spintronik uygulamaları için mükemmel adaylar olarak ortaya çıkmıştır (Némec ve ark., 2018).

Antiferromanyetizma benzersiz özellikleri ve çeşitli uygulama potansiyeli ile spintronik alanında keşifler için zengin bir alan sunmaktadır. Antiferromanyetikspintronik alanındaki araştırmalar manyetik malzemeler ve spin tabanlı elektronikler alanında yenilikçi teknolojiler ve cihazlar için yol açmaktadır.

1.3.6. Süperparamanyetizma

Süperparamanyetizma nanometre boyutundaki manyetik parçacıkların termodinamik olarak belirgin manyetik anlık birleşmeler sergilemelerine rağmen birleşmiş manyetizasyonun kalıcı olmaması durumunu ifade eder. Bu durum manyetik parçacıkların boyutlarının kritik bir eşik değeri altına düşmesiyle ortaya çıkar. Süperparamanyetik parçacıklar tek tek manyetik momentlere sahip olan ve sıcaklık artışıyla manyetik birleşme gösteren nanoküçük parçacıklardır. Bu parçacıkların davranışı geleneksel manyetik malzemelerin davranışından önemli ölçüde farklılık gösterir.

1.4. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıklar

Süperparamanyetik demiroksit nanoparçacıklar (SPION'lar) nanoteknolojide çok yönlü ve önemli bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Doğal olarak bol miktarda bulunmaları toksik olmamaları ve düşük maliyetleri SPION'ları biyomedikal çevresel ve endüstriyel uygulamalarda umut vadeden bir malzeme haline getirmektedir. Bu

nanoparçacıklar manyetik katalitik ve optik özellikleriyle dikkat çeker. Kimyasal yapıları ve farklı kristal formları ile nanoteknoloji alanında geniş kullanım alanlarına sahiptirler ve en yaygın olarak hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ve manyetit (Fe_3O_4) formlarında bulunurlar (Sangaiya ve Jayaprakash, 2018).

Her bir demir oksit formu farklı fizikokimyasal özellikler sergiler ve bu özellikler onları belirli uygulamalar için uygun hale getirir. Manyetit (Fe_3O_4) süperparamanyetik özellikleri ile öne çıkar. Süperparamanyetizm nanoparçacık boyutları nanometre ölçeğine indirildiğinde manyetik alan ortadan kalktığında manyetik momentin sıfırlanmasını ifade eder. Bu özellik dış manyetik alan etkisiyle manyetik moment kazanabilen manyetitin manyetik alan kaldırıldığında hızla manyetik özelliklerini kaybedebilmesi anlamına gelir ve özellikle biyomedikal alanlarda avantaj sağlar. Manyetik alan altında kontrol edilebilir olması manyetitin hedefli ilaç taşıma ve manyetik rezonans görüntüleme gibi alanlarda kullanılmasını kolaylaştırır (Gupta ve ark., 2015).

Maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) yalnızca Fe^{3+} iyonları içerir. Bu maghemitin kimyasal stabilitesini artırır ve yüksek sıcaklık ya da oksidasyon koşullarında daha dayanıklı hale getirir. Ferrimanyetik özellik sergileyen maghemit manyetik kayıt materyalleri ve kataliz alanlarında tercih edilir. Manyetik doyum momentini manyetite kıyasla daha düşük olmasına rağmen yapısal stabilitesi nedeniyle bazı uygulamalarda avantaj sağlamaktadır.

Hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) diğer iki formdan oldukça farklı bir yapıya sahiptir. Yalnızca Fe^{3+} iyonlarından oluşan hematit trigonal bir yapıya sahiptir ve zayıf ferrimanyetik özellikler sergiler. Bu nedenle süperparamanyetik özellik göstermez ve biyomedikal uygulamalardan ziyade kataliz pigment üretimi ve su arıtımı gibi çevresel alanlarda tercih edilir. Hematit yüksek kimyasal kararlılığı sayesinde aşındırıcı koşullarda dahi yapısını koruyabilir.

Manyetit Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarını bir arada bulundurur; bu ikili oksidasyon durumu manyetiti elektriksel iletken hale getirir ve yarı iletken özellik kazandırır. Kristal yapısında Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarının düzenlenmiş yapısı manyetik anizotropiyi artırır ve dış manyetik alan yönüne göre farklı manyetik özellikler göstermesine neden olur. Manyetitin yüksek manyetik doyum momentine sahip olması da önemli bir özelliktir; bu uygulanan manyetik alan altında maksimum manyetizasyon seviyesine hızlı bir şekilde ulaşabileceği anlamına gelir ve yüksek performans gerektiren

uygulamalarda özellikle manyetik görüntüleme gibi alanlarda üstünlük sağlamaktadır (Teja ve Koh, 2009).

Manyetit belirli bir boyutun altına indirildiğinde süperparamanyetik özellikler göstermeye başlar. Süperparamanyetizm nanoskopik boyutlara indirilen manyetik nanoparçacıkların uygulanan dış manyetik alan kaldırıldığında kalıcı bir manyetik moment göstermemesi anlamına gelir. Bu özellik manyetik alan altında kolayca yönlenmesini ve istenilen bölgeye hedeflenmesini sağlar. Biyomedikal uygulamalarda özellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve hedefli ilaç taşıma sistemlerinde manyetit nanoparçacıklarının kullanılmasını mümkün kılar. Bu uygulamalarda manyetik alan kullanılarak manyetit nanoparçacıkları vücutta belirli noktalara yönlendirilerek etkin bir taşıyıcı ya da kontrast ajan olarak işlev görmektedir (Gupta ve ark., 2015).

Manyetitin kristal yapısında Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarının bir arada bulunması ona özel bir yarı iletken özellik kazandırır. Bu ikili oksidasyon durumu manyetit parçacıklarının elektriksel iletkenliğini artırır. Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarının kristal kafes yapısında düzenlenmiş konumları elektronların bu iyonlar arasında hareket etmesine olanak tanır ve böylece elektriksel iletkenlik sağlanır. Yarı iletken özelliklere sahip olan manyetit elektronik ve manyetik depolama alanlarında da kullanım imkânı sunmaktadır (Teja ve Koh, 2009).

Manyetitin en önemli manyetik özelliklerinden biri yüksek manyetik doyum momentine sahip olmasıdır. Manyetik doyum momenti uygulanan bir manyetik alan altında ulaşılabilecek maksimum manyetizasyon değerini ifade eder ve bu özellik manyetit parçacıklarının güçlü bir manyetik yanıt vermesini sağlar. Yüksek manyetik doyum özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda örneğin manyetik ayırma ve manyetik alan kontrollü biyomedikal taşıyıcı olarak kullanılmalarında büyük avantaj sağlar. Bu yüksek manyetizasyon özelliği manyetiti diğer demir oksit nanoparçacıklarından ayırarak tercih edilen bir materyal haline getirmektedir (Sangaiya ve Jayaprakash, 2018).

Manyetit kimyasal stabilitesi yüksek bir yapıya sahiptir bu da onu biyomedikal ve çevresel uygulamalarda uzun ömürlü ve dayanıklı bir seçenek haline getirir. Fe_3O_4 yapısındaki Fe^{2+} iyonlarının varlığı oksidasyon riskini artırsa da yüzey modifikasyonları ve kaplamalarla manyetit nanoparçacıklarının kararlılığı artırılabilir. Bu modifikasyonlar nanoparçacıkların biyouyumluluğunu ve hedeflenebilirliğini artırarak biyomedikal sistemlerde güvenli kullanılmasını sağlar. Manyetit nanoparçacıklarının süperparamanyetik özellikleri onları biyomedikal uygulamalarda popüler bir araç haline

getirir. Manyetik hedefleme sayesinde ilaç taşıyıcıları olarak kullanılmaları ilaçları doğrudan hastalıklı dokuya yönlendirme olanağı sağlar ve bu yan etkileri en aza indirir. Aynı zamanda manyetik hipertermi tedavisinde manyetit nanoparçacıklar vücutta ısı üreterek kanser hücrelerinin tedavisinde kullanılabilir. Çevresel uygulamalarda ise manyetik ayırma işlemlerinde etkin bir şekilde kullanılır. Manyetik alan altında kolayca toplanabilmesi sudaki kirleticilerin arıtılması gibi alanlarda kullanımını artırmaktadır (Assa et al. 2016).

1.4.1. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Sentez Metotları

Süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının (SPION) sentezinde kullanılan yöntemler nanoparçacıkların boyut morfoloji yüzey özellikleri ve manyetik davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğu için büyük bir öneme sahiptir. Farklı sentez yöntemleri çeşitli uygulama alanlarına yönelik olarak nanoparçacıkların özelliklerini optimize etmeye olanak tanır.

1.4.1.1. Ortak çöktürme yöntemi

Ortak çöktürme yöntemi (co-precipitation) süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının (SPION'lar) sentezinde en yaygın olarak kullanılan ve ekonomik bir yöntemdir. Bu teknik kimyasal çözelti ortamında Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarının bazik bir çözelti ile reaksiyona sokularak demir oksit nanoparçacıklarının çöktürülmesi esasına dayanır. Ortak çöktürme yöntemi hızlı ve verimli bir şekilde yüksek saflıkta ve homojen boyutta nanoparçacık elde etmeyi sağlar. Ortak çöktürme yönteminde ilk adım Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarının uygun oranlarda bir çözelti içerisinde çözündürülmesidir. Genellikle $FeCl_2$ ve $FeCl_3$ gibi demir tuzları kullanılır. Demir iyonlarının Fe^{2+} ve Fe^{3+} oranı genellikle 1:2 olarak ayarlanır; çünkü manyetit (Fe_3O_4) yapısının oluşabilmesi için bu oran gereklidir. Tepkime azotsuz ortamda gerçekleştirilmek istenirse bu oran 2:3 olarak uygulanabilir (Karaagac ve ark., 2013). Çözeltiye asidik özellik kazandırılması (genellikle HCl ile) demir iyonlarının stabil kalmasını sağlar. Demir iyonları içeren çözeltiye bazik bir çözelti (genellikle amonyak veya sodyum hidroksit) eklenir. Bu bazik ortam demir iyonlarının hidroksit iyonları ile reaksiyona girmesine neden olur ve çökelme başlar. Reaksiyon genellikle şu şekilde özetlenebilir:



Bu tepkime sonucunda manyetit (Fe_3O_4) çökelir. Fe_3O_4 oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerden biri pH değeridir. pH 8-14 aralığında tutulur; yüksek pH demir oksit oluşumunu hızlandırırken nanoparçacıkların boyutunu ve saflığını da etkiler. Çökeltile manyetit nanoparçacıkları saflaştırma amacıyla birkaç kez saf su veya etanol ile yıkanır. Bu yıkama işlemi reaksiyon ortamında kalan baz ve yan ürünlerin uzaklaştırılmasını sağlar. Yüksek saflık elde edilmesi özellikle biyomedikal uygulamalar için oldukça önemlidir; çünkü çökelti ortamında kalan safsızlıklar nanoparçacıkların biyouyumluluğunu etkileyebilir. Ortak çöktürme yöntemi ile sentezlenen manyetit nanoparçacıklarının yüzeyi kaplama işlemiyle modifiye edilebilir. Yüzey modifikasyonu nanoparçacıkların stabilitesini artırmak ve biyolojik uygulamalar için uygun hale getirmek amacıyla yapılır. Yüzey kaplamaları nanoparçacıkların aglomerasyonunu önleyerek uzun vadeli stabilite sağlar. Genellikle polimerler (polietilen glikol dekstran) veya silika kaplama gibi biyouyumlu materyaller kullanılır. Yüzey kaplaması nanoparçacıkların hedeflenen ortamlarda işlevlerini kaybetmeden etkinliğini sürdürmesine yardımcı olmaktadır.

1.4.1.2. Hidrotermal sentez yöntemi

Hidrotermal sentez yöntemi süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının sentezinde kullanılan yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleşen bir yöntemdir. Bu yöntemde demir tuzları gibi başlangıç maddeleri belirli bir çözücü içinde çözülerek kapalı bir reaktör olan otoklav içine yerleştirilir. Otoklavda oluşturulan yüksek sıcaklık ve basınç koşulları iyonların çözeltide hareketliliğini artırır kristalleşme sürecini hızlandırır ve nanoparçacıkların daha düzenli kristal yapıya sahip olmasını sağlar. Çözücü olarak genellikle su kullanılır ancak bazı durumlarda özel çözeltiler tercih edilerek reaksiyon ortamı optimize edilir.

Hidrotermal sentezde sıcaklık genellikle 100°C ile 300°C arasında tutulur ve basınç sıcaklığa bağlı olarak 1-10 MPa arasında değişir. Reaksiyon çözelti ortamında gerçekleştiği için demir iyonlarının çözeltide çözünmüş olması ve reaksiyonun pH dengesinin korunması büyük önem taşır. Demir tuzları ile hazırlanan çözeltiye amonyak veya sodyum hidroksit gibi bir baz eklenerek pH değeri ayarlanır. Genellikle pH 8-12 arasında tutulur; bu aralık manyetit formundaki demir oksit nanoparçacıklarının

oluşumu için uygundur. Hazırlanan bu çözelti otoklav içerisine alınarak yüksek sıcaklık ve basınç altında belirli bir süre boyunca reaksiyona bırakılır. Bu süre zarfında yüksek sıcaklık ve basınç demir oksit iyonlarının kontrollü bir şekilde çökmesini ve kristalleşmesini sağlar.

Otoklavda gerçekleştirilen hidrotermal reaksiyon süresi kristal yapının büyüklüğünü ve morfolojisini belirleyen önemli bir faktördür. Sıcaklık arttıkça parçacıkların büyümesi hızlanır ve daha büyük kristaller oluşur. Sıcaklığın yanı sıra reaksiyon süresi de önemlidir; uzun süreli reaksiyonlar kristal yapının daha düzenli hale gelmesini sağlar ancak çok uzun süreler parçacıkların birleşerek aglomerasyon yapmasına neden olabilir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra otoklav yavaşça soğutulur ve oluşan çökelti yıkama işlemi ile saflaştırılır. Saflaştırma sırasında çözeltide kalan baz ve safsızlıkların giderilmesi amacıyla saf su veya etanol ile birkaç kez yıkama yapılır. Bu işlem nanoparçacıkların biyoyumlu olması için gereklidir; çünkü safsızlıklar biyolojik uygulamalarda etkinliği olumsuz etkileyebilir.

Hidrotermal yöntemin en belirgin avantajlarından biri yüksek kristal kalitesine sahip demir oksit nanoparçacıklarının elde edilmesidir. Kapalı sistemde kontrollü koşullar altında gerçekleştiği için parçacık boyutu ve şekil üzerinde iyi bir kontrol sağlanır. Diğer sentez yöntemlerine kıyasla dar boyut dağılımı ve homojen bir yapı elde etmek mümkündür. Bu yöntemle üretilen nanoparçacıklar biyomedikal uygulamalarda oldukça önemlidir; çünkü yüksek manyetik doyum ve homojen yapılar MRI kontrast ajanı olarak kullanılmaları için avantaj sağlar. Hidrotermal sentez yöntemi kontrollü sıcaklık ve basınç koşulları sağlandığında üstün fiziksel ve kimyasal özellikler sunarak demir oksit nanoparçacıklarının biyomedikal ve endüstriyel alanlarda kullanılmasına olanak tanır. Yüksek kristal kalite ve homojen morfolojinin sağlanması bu yöntemin SPION sentezinde yaygın olarak tercih edilmesine katkıda bulunmaktadır.

1.4.1.3. Mikroemülsiyon sentez yöntemi

Mikroemülsiyon yöntemi süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının kontrollü boyut ve homojen dağılımla sentezlenmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntemde suda çözünmeyen bir fazın mikro damlacıklar şeklinde su içinde dağılması sağlanır böylece “su içinde yağ” veya “yağ içinde su” tipinde mikroemülsiyonlar oluşur. Yüzey aktif maddeler yani surfaktanlar bu damlacıkları çevreleyerek kararlı mikro boyutlu reaksiyon bölgeleri oluşturur. Reaktantların yani demir tuzlarının bu mikro

damlacıklar içinde çözünmesi ile her bir damlacık küçük bir reaktör gibi işlev görebilmektedir. Mikroemülsiyon yöntemi bu nedenle homojen ve kontrollü büyüklükte nanoparçacıklar elde etmek için kullanışlı bir ortam sağlayabilmektedir.

Mikroemülsiyon içinde demir iyonları genellikle Fe^{2+} ve Fe^{3+} formunda bulunur. Çözeltiye alkali bir çözelti örneğin amonyak eklenir böylece demir iyonları baz ile reaksiyona girer ve kontrollü bir şekilde çökelir. Yüksek pH demir oksitlerin özellikle manyetit yapısındaki demir oksitlerin oluşmasını sağlar. Reaksiyon sırasında her damlacık içinde Fe_3O_4 oluşumu gerçekleşir bu da istenen boyut ve şekle sahip süperparamanyetik nanoparçacıkların elde edilmesine olanak tanır. Mikroemülsiyon ortamı sayesinde her damlacık içinde gerçekleşen bu oluşum birbirinden bağımsız olarak ilerler böylece parçacıkların birbiriyle birleşme riski azaltılmış olur. Bu yöntem aynı zamanda daha dar boyut dağılımı sunar ve parçacıkların homojenliğini artırır. Mikroemülsiyonun yapısı ve bileşenlerinin konsantrasyonu elde edilen nanoparçacıkların büyüklüğü şekli ve dağılımı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Sürfaktan miktarı ve tipine göre damlacıkların boyutu değişir; daha fazla surfaktan daha küçük damlacıklar oluşturur ve bu da daha küçük boyutlu nanoparçacıklar elde edilmesine yol açar. Mikroemülsiyon yönteminde kullanılan yüzey aktif maddelerin miktarının dikkatlice ayarlanması damlacıkların yüzeyinde daha iyi bir koruma sağlar ve böylece parçacıkların birbirine yapışmasını veya aglomerasyonunu önler.

Sentez tamamlandıktan sonra mikroemülsiyon ortamı çözücü ile ayrılır ve demir oksit nanoparçacıkları yıkanarak saflaştırılır. Sentez sırasında kullanılan yüzey aktif maddeler nanoparçacıkların yüzeyinde kalabilir ve bu durum biyomedikal uygulamalarda nanoparçacıkların biyoyumlu hale getirilmesini kolaylaştırır. Mikroemülsiyon yöntemi dar boyut dağılımı ve homojen yapı elde etmede başarılı olsa da karmaşık yapıya sahip yüzey aktif maddeler ve çözücülerin kullanımı nedeniyle maliyetli ve düşük verimli olabilir.

1.4.1.4. Termal parçalanma ile sentez yöntemi

Termal parçalanma yöntemi süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının sentezinde yüksek sıcaklıkta ve kontrollü koşullar altında metal komplekslerinin parçalanmasını esas alan bir tekniktir. Bu yöntemde demir kaynakları olarak metal kompleksleri veya organik demir bileşikler kullanılır; örneğin demir pentakarbonil veya demir oleat gibi demir bileşikler organik çözücüler içinde çözülerek reaksiyona

sokulur. Termal parçalanma işlemi inert bir atmosferde (genellikle argon veya azot gazı kullanılarak) yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilir. Bu inert atmosfer reaksiyon sırasında oluşabilecek oksidasyonları engelleyerek istenen nanoparçacık yapısının korunmasını sağlar. Reaksiyon sırasında çözücü yaklaşık 200-400°C sıcaklık aralığında ısıtılır ve bu sıcaklık demir bileşiklerinin kontrollü bir şekilde bozunmasına ve demir oksit nanoparçacıklarının oluşumuna yol açar.

Termal parçalanma yöntemi kontrollü sıcaklık ve inert atmosfer şartları sayesinde demir oksit nanoparçacıklarının oldukça düzenli ve kristal yapıda sentezlenmesine olanak tanır. Bu yöntemde parçacıkların boyutu ve şekli üzerindeki kontrol kullanılan çözücü ve stabilizörlerle doğrudan ilişkilidir. Çözücü olarak genellikle yüksek kaynama noktasına sahip organik çözücüler (örneğin oktadesen veya benzil eter) tercih edilir; bu çözücüler yüksek sıcaklıklarda stabil kalır ve reaksiyon ortamında buharlaşmadan çözücünün homojenliğini sağlar. Stabilizörler ise reaksiyon sırasında parçacıkların büyümesini ve birleşmesini kontrol etmek için kullanılır ve nanoparçacıkların yüzeyine bağlanarak parçacıkların homojen büyümesini destekler. Reaksiyon sırasında demir kompleksi yüksek sıcaklıkla parçalanarak serbest Fe^{2+} veya Fe^{3+} iyonları oluşturur ve bu iyonlar çözücü içinde stabilizörlerle bir araya gelerek küçük çekirdekler halinde çöker. Bu çekirdekler kontrollü bir şekilde büyüyerek istenen boyutta nanoparçacıklar oluşturur. Termal parçalanma işlemi çekirdeklerin büyüme hızını kontrol ederek oldukça dar boyut dağılımına sahip parçacıklar üretir. Bu süreç boyunca yüksek sıcaklık kristal yapı oluşumunu destekleyerek yüksek manyetik doyum değerine sahip süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıkları elde edilmesini sağlar.

Termal parçalanma yöntemi diğer yöntemlere kıyasla daha homojen boyut ve şekle sahip nanoparçacıklar sunar; bu nedenle özellikle biyomedikal uygulamalar için tercih edilir. Bu yöntemin sağladığı üstün kristal yapı ve manyetik özellikler nanoparçacıkların biyomedikal görüntüleme ve ilaç taşıma gibi uygulamalarda etkili olmasını sağlar. Ancak bu yöntemin bazı dezavantajları da vardır; yüksek sıcaklık ve inert atmosfer gereksinimi hem ekipman maliyetini artırır hem de sürecin uygulanmasını karmaşık hale getirir. Reaksiyon koşullarının dikkatli bir şekilde ayarlanması ve özel çözücüler ile stabilizörlerin kullanılması gereklidir bu da yöntemin toplam maliyetini yükseltir.

1.4.1.5. Sol-Jel sentez yöntemi

Sol-jel yöntemi süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının sentezinde metal alkoksitlerin veya organometalik bileşiklerin hidrolizi ve kondensasyonu esasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde başlangıç maddesi olarak metal alkoksitler veya demir tuzları kullanılır. Sol-jel yöntemi demir oksit nanoparçacıklarının düşük sıcaklıkta sentezlenmesine olanak tanır ve bu özellik kontrollü boyut ve homojen yapıdaki nanoparçacıkların üretimini sağlar. Yöntem “sol” adı verilen kolloidal bir çözelti oluşturulmasıyla başlar ve bu çözelti kimyasal reaksiyonlar sonucunda jel benzeri bir yapıya dönüşür. Bu yapının kurutulması ve ısıtılması nihai olarak istenen demir oksit nanoparçacıklarının oluşumunu sağlamaktadır.

Sol-jel yönteminde öncelikle bir metal alkoksit veya demir tuzu su ve alkol gibi çözücülerle bir araya getirilir. Çözeltinin asidik veya bazik bir ortamda hazırlanması reaksiyonun hızı ve nanoparçacıkların morfolojisi üzerinde doğrudan etkilidir. Demir alkoksit çözeltide su ile reaksiyona girerek hidroliz olur ve bu işlem sonucunda Fe-OH bağları oluşur. Bu aşamadan sonra kondensasyon süreci başlar; burada Fe-OH grupları Fe-O-Fe bağları oluşturarak polimerik yapılar meydana getirir. Sol bu kondensasyon işlemiyle yavaş yavaş viskoz bir jel haline gelir ve yapı üç boyutlu bir ağ oluşturur. Reaksiyon süreci boyunca pH sıcaklık ve çözelti konsantrasyonu gibi parametreler nanoparçacıkların boyutu ve şekli üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Yüksek pH ve sıcaklık jel oluşumunu hızlandırırken daha düşük pH’ta reaksiyon daha yavaş ilerler ve parçacıklar daha küçük boyutlu ve homojen olabilir. Sol-jel yöntemi sayesinde sentezlenen demir oksit nanoparçacıkları kontrollü boyut dağılımı ve düzenli kristal yapıları sayesinde yüksek manyetik özellikler sergiler. Jel oluşumunu takiben jel yapısı kurutulmaya alınır ve kalan çözücü buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Bu işlem genellikle düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir çünkü yüksek sıcaklık jel yapısında istenmeyen değişikliklere yol açabilir. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra jel belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak (genellikle 200-400°C) sertleştirilir. Bu aşamada Fe_3O_4 veya $\gamma-Fe_2O_3$ formundaki demir oksit nanoparçacıkları oluşur ve böylece manyetik özellik kazanan bir yapı elde edilir.

Sol-jel yöntemi ile elde edilen nanoparçacıklar özellikle homojen boyut ve düzenli kristal yapıları nedeniyle biyomedikal uygulamalarda avantaj sağlar. Yüzey modifikasyonlarına uygun yapıda oldukları için biyoyumlu kaplamalarla kaplanarak biyolojik uygulamalarda güvenle kullanılabilirler. Sol-jel yöntemi demir oksit

nanoparçacıklarının yüksek saflıkta ve homojen yapıda üretimini sağlasa da bazı zorluklara da sahiptir. Reaksiyonun kontrollü bir şekilde ilerlemesi için kullanılan çözücülerin ve pH ayarlayıcıların dikkatlice seçilmesi ve çözelti koşullarının sabit tutulması gerekir. İşlemin karmaşıklığı ve kontrollü kurutma süreçleri yöntemin uygulanabilirliğini sınırlayabilir ve maliyeti artırabilmektedir.

1.4.1.6. Elektrokimyasal sentez yöntemi

Elektrokimyasal yöntem süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının sentezinde kullanılan elektriksel enerji yardımıyla çözelti içindeki metal iyonlarının indirgenmesini esas alan bir tekniktir. Bu yöntemde demir iyonları içeren bir çözeltiye elektrik akımı uygulanarak kontrollü şekilde demir oksit nanoparçacıkları üretilir. Elektrokimyasal yöntem yüksek saflıkta ve istenilen boyutlarda nanoparçacık sentezi için uygun olup özellikle boyut kontrolü saflaştırma kolaylığı ve düşük kimyasal tüketimi gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca nanoparçacıkların yüzey özelliklerini ayarlamak ve farklı uygulamalar için özelleştirilmiş yüzey kaplamaları eklemek mümkündür.

Elektrokimyasal yöntemde temel olarak iki elektrot kullanılır: katot ve anot. Bu elektrotlar genellikle inert bir çözücü (örneğin sulu veya alkol bazlı çözeltiler) içinde demir iyonlarının bulunduğu bir çözeltiye batırılır. Demir kaynakları olarak Fe^{2+} veya Fe^{3+} iyonları içeren tuzlar (genellikle demir klorür veya demir nitrat gibi) çözeltide çözündürülür. Akım uygulanmaya başlandığında anodun yüzeyinde demir iyonları çözeltiden geçiş yapar ve katoda doğru yönlendirilerek indirgenir. Bu süreçte demir iyonları indirgenirken oksitlenir ve Fe_3O_4 gibi demir oksit formları şeklinde çöker. Bu çökeltme süreci kontrollü bir şekilde gerçekleşir bu da nanoparçacıkların boyut ve şeklinin ayarlanmasını sağlar. Bu yöntemde uygulanan akım yoğunluğu nanoparçacıkların boyutu ve kristal yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük akım yoğunluğu küçük boyutlu ve homojen yapıdaki nanoparçacıkların oluşumunu desteklerken yüksek akım yoğunluğu kristal büyümesini hızlandırarak daha büyük boyutlu parçacıklar elde edilmesine yol açar. Ayrıca çözelti pH değeri de parçacıkların kimyasal yapısı ve manyetik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Genellikle nötr veya hafif bazik bir pH aralığında reaksiyon gerçekleştirilir; bu demir oksit nanoparçacıklarının stabil ve homojen bir yapıda oluşmasını sağlar. Elektrokimyasal yöntemle sentezlenen nanoparçacıkların yüzeyi uygulama alanlarına göre çeşitli kaplama işlemleriyle

modifiye edilebilir. Elektrot yüzeyine eklenen polimer veya organik moleküllerle yüzey modifikasyonu yapılabilir ve bu sayede nanoparçacıklar biyouyumlu hale getirilerek biyomedikal uygulamalarda güvenle kullanılabilir. Bu kaplama işlemi nanoparçacıkların bir araya toplanmasını önleyerek uzun vadeli stabilite sağlar ve aynı zamanda biyolojik sistemlerde hedeflenebilirlik gibi özellikler kazandırır.

Elektrokimyasal yöntemin önemli avantajları arasında yüksek saflık iyi boyut kontrolü ve düşük çevresel etki yer alır. Çözeltiye kimyasal madde eklemekten yalnızca elektrik enerjisi ile demir oksit nanoparçacıkları üretildiği için çevresel etkisi düşüktür. Ancak özel elektrot malzemeleri ve enerji tüketimi açısından maliyetli bir yöntem olabilir. Ayrıca elektrotların kimyasal yapısına ve çözeltinin kimyasal özelliklerine bağlı olarak üretim süresi değişebilir bu da sürecin verimliliğini etkileyen bir faktördür.

1.4.2. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Yüzey Modifikasyonları

Süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının yüzey kaplama yöntemleri özellikle biyomedikal ve endüstriyel alanlarda stabilite biyouyumluluk ve işlevsellik sağlamak amacıyla geniş bir malzeme yelpazesi kullanılarak yapılmaktadır. Yüzey kaplamaları SPION'ların bir araya toplanmasını (agglomerasyon) önleyerek uzun vadeli stabilite sağlar biyolojik ortamlarda etkinliğini artırır ve onları spesifik uygulamalara uyumlu hale getirir. Kaplama malzemeleri arasında silika karbon polimerler metaller metalhidroksitler ve metaloksitler bulunmaktadır.

Silika kaplama süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının yüzey modifikasyonlarında stabilite, biyouyumluluk ve çok işlevsellik kazandırmak amacıyla sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Tetraetilortosilikat (TEOS) gibi reaktiflerin kullanımıyla SPION yüzeyinde homojen ve ince bir silika tabakası oluşur. TEOS hidroliz ve kondensasyon reaksiyonları yoluyla silika tabakaları oluşturur ve bu da nanoparçacıkların yüzeyinde biyomoleküllerin ve diğer reaktiflerin kolayca bağlanmasına olanak tanır. TEOS kullanılarak elde edilen bu kaplama yöntemi özellikle biyomedikal alanlarda SPION'ların güvenle kullanılmasını sağlar (Kralj ve ark., 2010).

Silika kaplama SPION'ların fiziksel ve kimyasal stabilitesini artırırken nanoparçacıkların biyolojik ortamlarla uyumunu da geliştirmektedir. TEOS aracılığıyla yapılan silika kaplamalar özellikle yüzeyde bulunan hidroksil grupları aracılığıyla ek işlevsellik sağlar. Bu gruplar biyomoleküllerin ya da terapötik moleküllerin kolayca bağlanmasını sağlayarak SPION'ları ilaç taşıma manyetik rezonans görüntüleme ve

protein izolasyonu gibi biyomedikal uygulamalar için uygun hale getirir (Ren ve ark., 2008). Özellikle biyoyumluluğun artırılması ve oksidasyonun önlenmesi için oldukça ince ve homojen silika kaplamalar tercih edilir. TEOS'un kontrollü miktarlarda kullanımıyla silika kaplama kalınlığı genellikle birkaç nanometre seviyesinde tutulabilir. Bu nanoparçacıkların manyetik özelliklerini korurken oksidasyona karşı daha dirençli olmalarını sağlar. Kralj ve arkadaşları'nının çalışmasında TEOS aracılığıyla yapılan ince silika tabakasının nanoparçacıkların yüzey reaktivitesini önemli ölçüde artırdığı ve %10'un altında bir manyetik kayba neden olduğu belirtilmektedir (Kralj ve ark., 2010).

Buna ek olarak TEOS ile yapılan silika kaplamalar nanoparçacıkların biyoyumluluğunu artırırken hücresel toksisiteyi de azaltmaktadır. Malvindi ve arkadaşları'nın TEOS ile kaplanmış demir oksit nanoparçacıklarının biyolojik ortamlarda toksisiteyi azalttığını oksidatif stres seviyelerini düşürdüğünü ve hücre içindeki demir iyonlarının serbest kalmasını engelleyerek daha düşük bir toksik etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Malvindi ve ark., 2014).

Karbon kaplama süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının (SPION'lar) biyomedikal ve çevresel uygulamalarda stabilitesini ve biyoyumluluğunu artırmak amacıyla sıkça kullanılan bir tekniktir. Karbon kaplamalar SPION'lara kimyasal dayanıklılık kazandırırken oksidasyona karşı koruma sağlar ve bu nedenle biyomedikal uygulamalarda güvenle kullanılmalarını sağlar. Karbon katmanı nanoparçacıkların yüzeyini homojen bir şekilde sararak stabil bir yapı oluşturur ve aglomerasyon (birleşme) riskini azaltır. Bu yapı yüksek sıcaklıklara ve biyolojik ortamlara karşı dayanıklılık kazandırarak SPION'ların uzun süreli stabilitesine katkıda bulunur (Wu ve ark., 2020).

Karbon kaplamanın uygulanmasında polidopamin ve glikoz gibi karbon kaynakları kullanılarak karbon tabakaları oluşturulabilir. Wu ve arkadaşları'nının çalışmasında SPION'lar içi boş karbon küreler (HCS) ile kaplanarak biyoyumluluk ve oksidasyona karşı dayanıklılık artırılmıştır. Bu kaplama SPION'ların biyolojik ortamlarda çözünürlüğünü ve stabilitesini geliştirirken oksidatif stres seviyelerini düşük tutarak HepG2 hücrelerinde minimum toksisite sağlamıştır. Karbon kaplamanın biyomedikal uygulamalarda SPION'ların biyoyumluluğunu artırmak ve belirli hücrelerle etkileşiminde daha güvenilir hale getirmek açısından önemli bir etki yarattığı gözlemlenmiştir (Wu ve ark., 2020).

Diğer bir çalışmada Mendes ve arkadaşları'nın SPION'ların grafen benzeri çok katmanlı karbon kaplamalarla kaplanmasının uzun vadeli stabilite sağladığını ve biyouyumluluk kazandırdığını göstermiştir. Grafen kaplama nanoparçacıkların çevresel faktörlere karşı dayanıklılığını artırırken biyolojik ortamlarda güvenle kullanılabilecek özellikler sunmaktadır. Çalışmada oleik asit gibi karbon öncüllerinin kullanılmasıyla grafitleşme işlemi uygulanmış ve nanoparçacıklar yüksek sıcaklıkta ısıtılarak kaplanmıştır. Grafen tabakaları nanoparçacıkların oksidasyona karşı korunmasına ve uzun vadede biyouyumlu kalmasına yardımcı olur (Mendes ve ark., 2012).

Polimer kaplama süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının (SPION'lar) biyouyumluluğunu ve stabilitesini artırmak için yaygın olarak kullanılan bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Polimer kaplama sayesinde SPION'lar biyolojik sistemlerde daha uzun süre kalabilir hücresel toksisitenin azaltılması sağlanabilir ve hedefe yönelik ilaç taşıma gibi uygulamalarda etkinliği artırılabilir. Yaygın olarak kullanılan polimerler arasında polietilen glikol (PEG) ve dekstran bulunmaktadır. PEG kaplama SPION'ların biyolojik ortamlarda immün sistemi tarafından tanınmasını önler ve dolaşım sürelerini uzatarak biyolojik hedeflere ulaşma olasılığını artırır (Yu ve ark., 2012).

Dekstran kaplama ise özellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRI) uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Dekstran gibi biyouyumlu polimerler nanoparçacıkların hücresel alımını artırırken sitotoksiteyi azaltır ve nanoparçacıkların biyolojik ortamlarda kararlı kalmasını sağlar. Örneğin dekstran kaplı SPION'lar düşük sitotoksite gösterir ve hücre içinde etkin bir şekilde dağılır. Bu tür kaplamalar nanoparçacıkların hücresel mekanizmalarda güvenle kullanılabilmesi için önemlidir (Couto ve ark., 2015).

SPION'ların polimer kaplamaları biyouyumluluğun yanı sıra çeşitli işlevsellikler de sağlar. Polimer kaplı SPION'lar hedeflenmiş ilaç taşıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer yüzeyleri biyolojik sistemlerde nanoparçacıkların spesifik hücre veya dokulara yönlendirilmesine olanak tanır. Bu özellik kanser tedavisi gibi uygulamalarda etkili bir hedefleme sağlar. Abd Elrahman ve Mansour'un çalışmasında polimer kaplama ile yüzeyi modifiye edilen SPION'ların kanser hücrelerine yönelik hedeflemede başarı sağladığı ve ilaç salınımında etkinliğinin arttığı gösterilmiştir (Elrahman ve Mansour, 2019).

Metal kaplama süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda stabilite ve işlevsellik kazanması için önemli bir kaplama

yöntemidir. Özellikle altın gibi biyouyumlu metallerle yapılan kaplamalar nanoparçacıkların yüzeyine optik ve manyetik özellikler kazandırır. Altın kaplama SPION'lara biyolojik ortamlarla uyum sağlama yeteneği kazandırırken aynı zamanda yüzey plazmon rezonansı (SPR) etkisiyle biyosensör ve görüntüleme uygulamalarında kullanımını mümkün kılar (Gupta ve ark., 2007).

Altın kaplamanın yanı sıra gümüş gibi diğer metal kaplamalar da antibakteriyel özellik kazandırarak biyomedikal uygulamalarda SPION'ların etkinliğini artırır. Metal kaplamalar nanoparçacıkların biyolojik ortamlarda toksisiteyi azaltmasını sağlarken hedef hücre veya dokulara yönlendirilmesini de kolaylaştırır. Gümüş kaplama özellikle antibakteriyel ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle önem taşır ve SPION'ların biyosensör ve tıbbi cihazlarda kullanılabilirliğini artırır (Arias ve ark., 2018).

SPION'ların metal kaplaması biyomedikal uygulamalarda hedefleme açısından da avantaj sunmaktadır. Bu kaplama yöntemi nanoparçacıkların ilaç taşıma veya hipertermi uygulamaları için belirli hücrelere ya da tümör bölgesine hedeflenmesini sağlar. SPION'lara bağlı metallerle yapılan kaplama manyetik bir alan yardımıyla nanoparçacıkların istenen bölgede lokalize olmasına olanak tanır ve böylece hedefe yönelik tedavi ve görüntüleme alanında kullanım potansiyelini artırır (Demirer ve ark., 2015).

Metal hidroksit kaplamalar biyouyumluluk sağlamanın yanı sıra hücreye özgü hedeflemeyi de kolaylaştırır. Yüzey modifikasyonu SPION'ların hücresel alımı ve lokalizasyonunu iyileştirir; böylece nanoparçacıkların biyolojik sistemlerde istenen alanlarda toplanmasını sağlar. Zn/Al hidroksitlerle kaplanan SPION'lar aynı zamanda toksisiteyi azaltırken uzun süreli stabilite ve kontrollü ilaç salınımı da sunmaktadır. Bu kaplama ilacın doğrudan hedef dokuya ulaşmasına olanak tanır ve yan etkileri minimuma indirir.

Biyomedikal araştırmalarda SPION'ların metal hidroksit kaplamaları kanser tedavisi gibi hedefe yönelik uygulamalarda kontrollü salım sağlayarak etkili bir taşıyıcı sistem oluşturur. Metal hidroksit kaplamalar nanoparçacıkların reaktivitesini azaltırken stabilitesini artırır ve nanoparçacıkların biyolojik ortamlarda uzun vadeli etkinliğini sürdürmesini sağlar (Gupta ve Gupta, 2005). Bu özellikler SPION'ların biyomedikal uygulamalarda güvenle kullanılabilmesine olanak tanır.

Metal oksit kaplamalar süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının biyomedikal uygulamalarda dayanıklılığını artırmak ve kimyasal stabilitelerini sağlamak amacıyla kullanılır. Bu kaplama yöntemi SPION'ların yüzeyinde güçlü bir

koruyucu tabaka oluşturarak oksidasyona karşı dayanıklılık kazandırır ve biyolojik ortamda stabil kalmalarını sağlar. Demir oksit nanoparçacıklarının biyomedikal uygulamalarında sıklıkla tercih edilen metal oksitler arasında titanya (TiO_2) silika (SiO_2) çinko oksit (ZnO) ve manyetit (Fe_3O_4) bulunmaktadır. Bu kaplamalar özellikle SPION'ların manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve hedefe yönelik ilaç taşıma gibi biyomedikal alanlarda etkin kullanımını sağlar (Couto ve ark., 2015).

Silika kaplamaları SPION'ların kimyasal dayanıklılığını ve biyolojik ortamlarda çözünürlüğünü artırarak onları geniş bir biyomedikal uygulama yelpazesinde kullanılabilir hale getirir. Silika kaplama biyolojik moleküllerin veya terapötik ajanların SPION'lara bağlanmasını kolaylaştırır ve yüzey modifikasyonları için uygun bir ortam sunmaktadır. Özellikle tetraetilortosilikat (TEOS) ile yapılan silika kaplamalar nanoparçacıkların stabilitesini artırırken biyouyumluluğunu da sağlar (Gupta ve Gupta, 2005).

1.4.3. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Önemi ve Kullanım Alanları

Süperparamanyetik demiroksit nanoparçacıklar yüksek yüzey alanı ve reaktiviteye sahip olmaları nedeniyle kimya ve biyoteknoloji gibi çeşitli alanlarda önemli uygulamalara sahiptir. Biyomedikal alanda demir oksit nanoparçacıklar manyetik rezonans görüntüleme (MRI) için kontrast ajanı olarak kullanılır ve tümörlerin enfeksiyonların ve diğer patolojik durumların görüntülenmesinde yüksek hassasiyet sağlar (Mahmoudi ve ark., 2011). Bu nanoparçacıklar kan-beyin bariyerinin disfonksiyonlarını değerlendirmek ve nöroinflamatuvar patolojiler ile ilişkili lezyonları görüntülemek için kullanılmaktadır (Weinstein ve ark., 2010). Ayrıca hedeflenmiş ilaç taşıma sistemlerinde kullanılarak terapötik ajanların doğrudan belirli bölgelere iletilmesini sağlamakta ve kemoterapi gibi tedavilerin yan etkilerini azaltırken etkinliğini artırmaktadır. Demir oksit nanoparçacıklar hücre ayırma ve biyosensör uygulamalarında da kullanılmaktadır. Çevresel uygulamalarda ise bu nanoparçacıklar su arıtımında kirleticilerin uzaklaştırılmasında ve katalizör olarak görev alarak çevre temizliğine katkı sağlar. Özellikle ağır metallerin ve organik kirleticilerin uzaklaştırılmasında etkili araçlar olarak kullanılmaktadırlar. Demir oksit nanoparçacıklar pestisitlerin ve toksik maddelerin sudan uzaklaştırılmasında katalizör olarak görev yaparak çevre sağlığına önemli katkılarda bulunabilir (Siddiqi ve ark.,

2016). Enerji alanında demir oksit nanoparçacıklar lityum-iyon piller gibi enerji depolama cihazlarında elektrot malzemesi olarak kullanılır. Yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü sunarak enerji depolama kapasitesini artırır. Bu nanoparçacıklar enerji depolama cihazlarının performansını artırmak için kullanılarak pil teknolojilerinde önemli bir rol oynar. Katalitik uygulamalarda da yaygın olarak kullanılan demir oksit nanoparçacıklar yüksek yüzey alanları ve reaktif yüzey atomlarının fazlalığı sayesinde kimyasal reaksiyonların hızını artırabilir ve daha etkili katalitik süreçler sağlayabilir (Gawande ve ark., 2016). Demir oksitler suyu ve havayı temizlemek için katalizör olarak kullanılabilir ve çeşitli endüstriyel süreçlerde katalizör olarak görev alabilir. Demir oksit nanoparçacıkların çok yönlü özellikleri onları geniş bir uygulama yelpazesinde kullanışlı hale getirir. Sürekli araştırma ve geliştirme çalışmaları bu malzemelerin yeni ve yenilikçi uygulamalarda kullanılma potansiyelini artırmaktadır. Demir oksit nanoparçacıklar mevcut teknolojilerin geliştirilmesi ve yeni uygulamaların keşfi için önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir.

Demir oksit nanoparçacıkların biyomedikal uygulamalardaki rolü sadece MRI kontrast ajanları ile sınırlı değildir. Ayrıca bu nanoparçacıklar hedefe yönelik ilaç taşıma sistemlerinde ve gen terapilerinde kullanılabilir. Genellikle yüzeylerine biyoaktif moleküller bağlanarak belirli hücreler veya dokular hedeflenir ve böylece ilaçların sadece hastalıklı bölgelere ulaştırılması sağlanır. Bu tür akıllı ilaç dağıtım sistemleri kemoterapi gibi tedavilerin yan etkilerini önemli ölçüde azaltabilir (Dadfar ve ark., 2019). Nanoparçacıkların yüzeyleri biyouyumluluğu ve stabiliteyi artırmak için polimerler silika veya lipidlerle kaplanabilir. Bu kaplamalar parçacıkların biyolojik sistemlerde daha uzun süre stabil kalmasına ve istenen hedeflere ulaşmasına yardımcı olur. Çevresel bilimlerde demir oksit nanoparçacıklar su arıtma sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Demir oksitler arsenik ve kurşun gibi ağır metallerin sudan uzaklaştırılmasında başarılıdır. Ayrıca organik kirleticilerin pestisitlerin ve boyaların fotokatalitik yıkımı için de kullanılırlar. Bu nanoparçacıkların güneş ışığı veya yapay ışık altında kirleticileri parçalayarak daha az zararlı maddelere dönüştürebilme kabiliyetine dayanır.

Enerji sektöründe demir oksit nanoparçacıklar sadece lityum-iyon pillerde değil aynı zamanda güneş enerjisi sistemlerinde ve yakıt hücrelerinde de kullanılmaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinde demir oksit nanoparçacıklar fotovoltaiik cihazların etkinliğini artırmak için kullanılır. Yakıt hücrelerinde ise bu nanoparçacıklar oksijen indirgeme reaksiyonlarında katalizör olarak hizmet edebilir (Koo ve ark., 2012). Demir

oksit nanoparçacıkların kataliz alanındaki rolü kimyasal sentezlerde ve reaksiyon mühendisliğinde kritik öneme sahiptir. Hidrojenasyon ve oksidasyon reaksiyonlarında katalizör olarak kullanılan demir oksitler kimyasal süreçlerin verimliliğini artırabilir. Katalizörlerin yeniden kullanılabilirliği ve dayanıklılığı endüstriyel ölçekli uygulamalar için önemli avantajlar sunmaktadır.

Süperparamanyetik demiroksit parçacıklar bir manyetik alana maruz bırakıldığında manyetik anlık birleşme sergilerler ancak manyetik alan kaldırıldığında birleşmiş manyetizasyon kaybolur. Bu özellikleri nedeniyle süperparamanyetik malzemeler manyetik depolama manyetik rezonans görüntüleme (MRI) biyomedikal uygulamalar ve manyetik sıvılar gibi çeşitli alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir. Bu parçacıklar remanentmanyetizasyona sahip değildir ve bu da kolaylaştırılmış kolloidalstabiliteye yol açar (Ulbrich ve ark., 2016). Remanent manyetizasyon bir malzemenin bir dış manyetik alan altında doygunluğa ulaştıktan sonra manyetik alanın kaldırılmasına rağmen kalan kalıcı bir manyetik momentin varlığını ifade eder. Yani malzeme manyetik bir alana maruz kaldığında manyetik momentlerin bir kısmı hizalanır ve bu hizalanma manyetik alan kaldırıldıktan sonra bile devam eder. Bu kalan manyetizasyon miktarı malzemenin manyetik özelliklerinin bir ölçüsüdür ve malzemenin manyetik alanı absorbe edip daha sonra serbest bırakma yeteneğini gösterir. Remanent manyetizasyon bir malzemenin manyetik geçmişinin bir yansımasıdır ve genellikle doğrudan uygulanan manyetik alana bağlıdır. Bu kavram malzemenin manyetik özelliklerinin değerlendirilmesinde ve manyetik depolama teknolojilerinde önemli bir rol oynar. Örneğin sabit disk sürücülerindeki manyetik alanların kaydedilmesi ve okunması remanent manyetizasyonun etkili kullanımını gerektirir. Remanent manyetizasyonun büyüklüğü malzemenin kalıcılığına ve içsel manyetik yapısına bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle malzemenin bileşimi kristal yapısı ve sıcaklık gibi faktörler remanentmanyetizasyon üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olabilir. Bu fenomen fiziksel materyal bilimi manyetik malzemelerin karakterizasyonu ve manyetik cihazların tasarımı gibi alanlarda derinlemesine incelenmektedir.

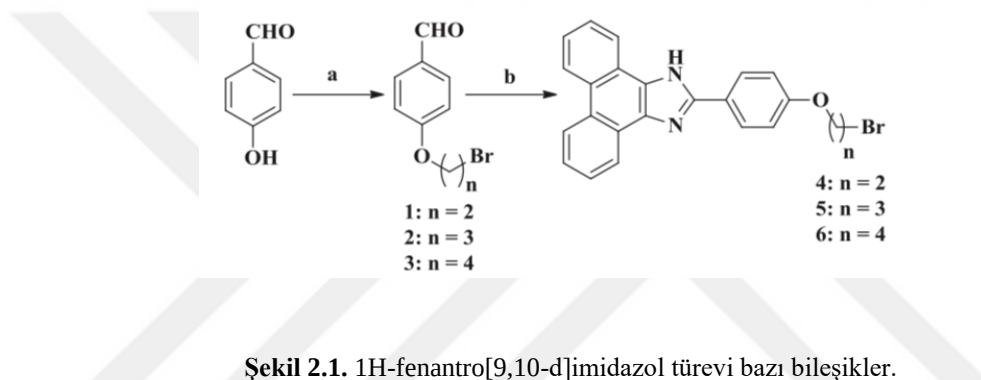
Bu özellik özellikle biyomedikal alanda avantajlıdır; burada süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklar manyetik alanlar altındaki süperparamanyetik davranışları biyolojik uyumlulukları ve yüksek stabiliteleri nedeniyle dikkat çekmektedir (Wu ve ark., 2021). SPION'lar manyetik özellikleri ve biyolojik uyumlulukları nedeniyle ilaç taşıma hücresel görüntüleme ve hedefe yönelik terapi gibi uygulamalar için yaygın bir şekilde araştırılmaktadır (Wang ve ark., 2007). SPION'ların karmaşık malzemelere

monte edilmesi makroskobik malzemelere süperparamanyetizmanın kazandırılması için kritiktir (Hu ve ark., 2019). Ayrıca süperparamanyetik koloidlerin manyetik alanlarda kontrollü agregasyonu araştırılmış ve homojen ve homojen olmayan manyetik alanların etkisi altında lineer agregatların oluşumu gözlemlenmiştir (Andreu ve ark., 2011). Çalışmalar ayrıca süperparamanyetik nanoparçacıkların nanometre ölçeğindeki davranışlarını incelemiş ve süperparamanyetizmayı doğru bir şekilde anlamak için bireysel nanoparçacık davranışını anlamının önemini vurgulamıştır (Sinwani ve ark., 2014). Ayrıca süperparamanyetik nanoparçacıkların polimer matrislerle birleştirilmesiyle biyomedikal uygulamalar için manyetik mikro cihazların üretilmesine olanak tanıyan bozunabilir manyetik parçacıkların geliştirilmesi de sağlanmıştır (Peters ve ark., 2015). Süperparamanyetik nanoparçacıklar benzersiz manyetik özellikleri nedeniyle görüntüleme ilaç taşıma ve doku mühendisliği gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır (Mahmoudi ve ark., 2009). Bu nanoparçacıkların süperparamanyetik doğası kemik mineralizasyonu ve kök hücre nakli gibi uygulamalarda kullanılmış; bu da yenileyici tıp ve doku onarımı alanındaki potansiyellerini göstermiştir (Paun ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2019). Dahası demir metalinde süperparamanyetizmanın radyasyon ile oluşturulması araştırılmış ve malzemelerdeki süperparamanyetik fazların oluşumu ve stabilitesine ışık tutulmuştur (Kuzmann ve ark., 2016). Nanoparçacıklardaki süperparamanyetizma biyomedikal malzeme bilimi ve nanoteknoloji gibi yenilikçi uygulamalar için geniş bir fırsat yelpazesi sunmaktadır. Süperparamanyetik nanoparçacıkların benzersiz manyetik özelliklerini anlamak ve kullanmak ilaç taşıma görüntüleme ve yenileyici tıp gibi alanları ilerletmek için hayati öneme sahiptirler.

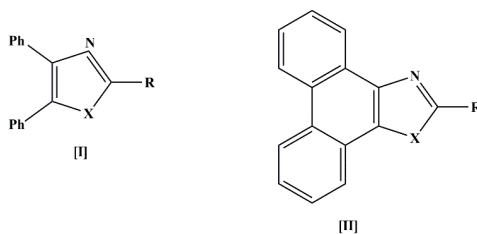
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Özetleri

Liu ve arkadaşları'nın bu çalışması yeni süstitüe Fenantren-İmidazollerini kapsamaktadır. Bu çalışmada, AD tedavisi için çok fonksiyonlu ajanlar olarak yeni tip 1H-fenantro[9,10-d]imidazol türevleri sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir. Sonuçlar bu türevlerin çoğunun güçlü A β agregasyonu önleyici aktivite sergilediğini göstermiştir. Bileşiklerin bazılarının Alzheimer hastalığı için güçlü, çok hedefe yönelik bir ajan olduğu bulunmuştur (Şekil 2.1.) (Liu ve ark., 2014).

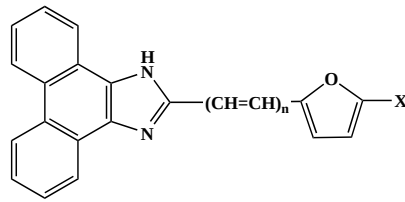


Cooper ve arkadaşlarının bu çalışmalarında 1H-fenantro[9,10-d]imidazol türevlerinin sentezleri yapılmıştır. Bu çalışmada, 4,5-difeniloksazoller, tiyazoller ve imidazollerin fotolizi ile fenantro[9,10-d] heterosiklik sisteminin oluşumu üzerinde çalışılmıştır (Şekil 2.2) (Cooper ve Wasserman, 1969).



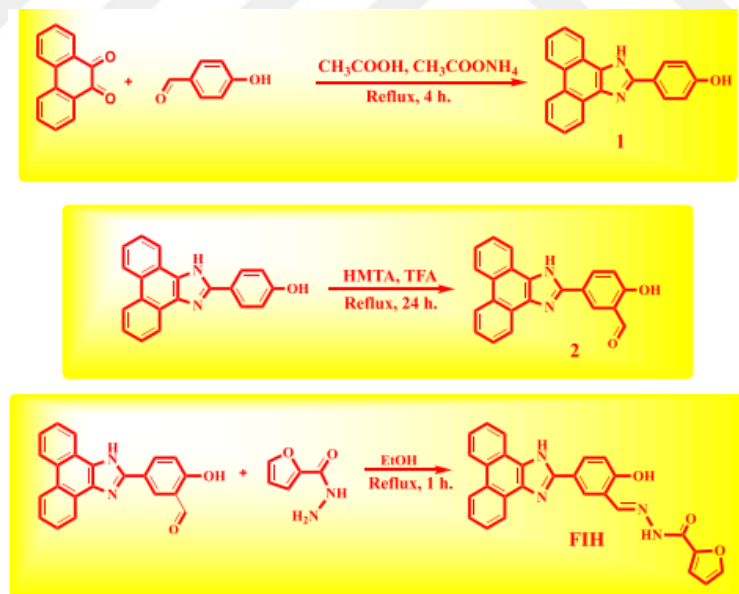
Pozharskii ve arkadaşlarının bu çalışmasında 9,10-fenantrakinin, furfural ve furfural türevleri ile amonyum asetat ve asetik asitli ortamda reaksiyona sokularak, 2-(2-furil)- ve 2-[b-(2-furil)-vinil]-fenantroimidazol türevleri elde edilmiştir. Bu

araştırmada ayrıca, fenantren yapısının furan ve imidazol halkası üzerine olan sterik etkileri üzerinde çalışılmıştır (Şekil 2.3) (Pozharskii ve ark., 1971).



Şekil 2.3. 2-(2-furil)- ve 2-[b-(2-furil)-vinil]-fenantroimidazol türevlerinin genel gösterimi.

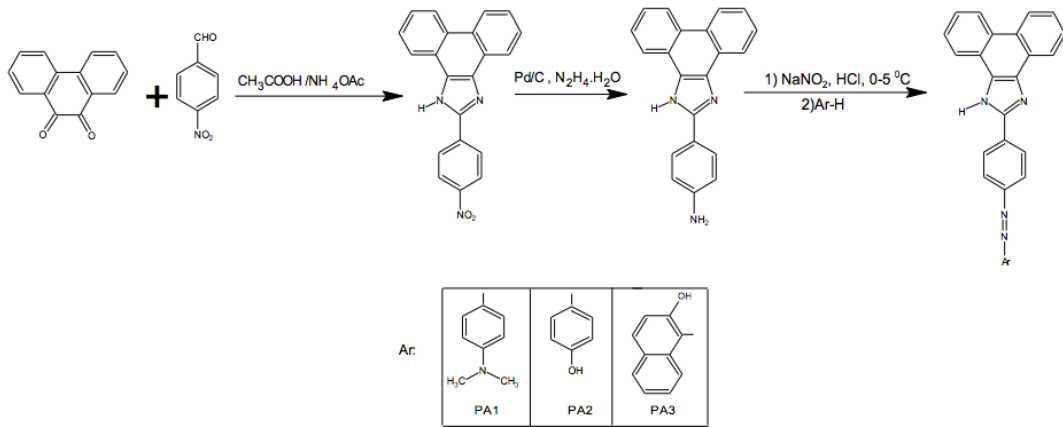
Kutluca Alıcı' nın yaptığı bu çalışmada floresans özellikli FIH sensörü sentezlenmiştir. ^1H -, ^{13}C , APT-NMR, element analizi ve ATR-FTIR spektroskopisi ile analizleri tamamlanmıştır. Üretilen FIH sensörünün metal iyonlarına karşı floresans özellikleri floresans ile spektroskopisi araştırılmıştır (Şekil 2.4.). Elde edilen sensörün Zn^{2+} iyonlarına karşı en yüksek floresans duyarlılığına sahip olduğu belirlenmiştir (Kutluca Alici, 2020).



Şekil 2.4. 1,2 ve schiff baz bileşiklerinin sentetik basamakları (FIH).

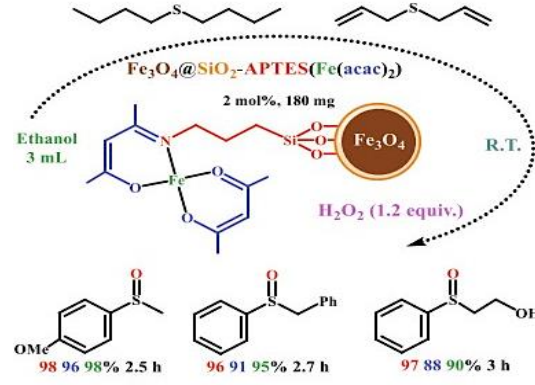
Çelik Erbaş ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışmada azo grubu içeren üç yeni fenantroimidazol türevi sentezlenmiştir ve bunların fotofiziksel özellikleri araştırılmıştır. Fenantroimidazol türevlerinin karakterizasyonları ve foto-stabilite çalışmaları UV-vis ve solvent ortamında floresans spektroskopisi ile gerçekleştirilmiştir.

Maksimum absorpsiyon ve emisyon dalga boyları, molar yok olma katsayıları, singlet enerji seviyeleri, fenantroimidazol-azo türevlerinin Stokes kayma değerleri ile fotofiziksel özelliklerinin incelenmesi tamamlanmıştır (Şekil 2.5.) (Çelik Erbaş ve Gülle, 2018).



Şekil 2.5. Fenantroimidazol-azo türevlerinin sentetik yolları.

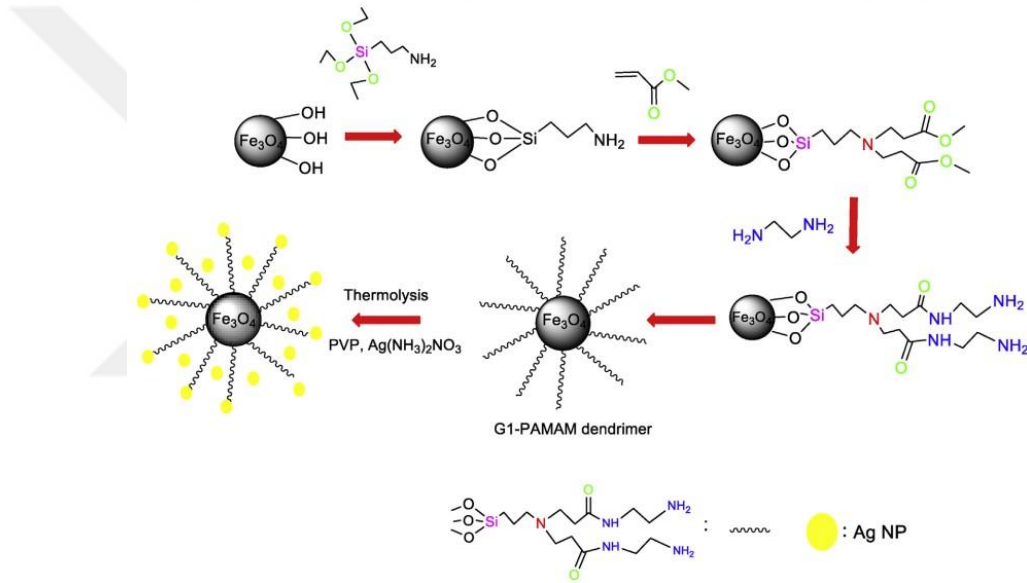
Sardarian ve arkadaşları'nın yaptıkları çalışma Fe_3O_4 'ün SiO_2 ile kaplandığı araştırmalar nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanında birçok önemli uygulama ve sentez yöntemi sunmaktadır. Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 ile kaplanması manyetik özellikleri korurken yüzey modifikasyonu için bir platform oluşturur. Bu araştırmalar arasında $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ dendrimer bazlı nanokatalizörlerin sentezlendiği çalışmalar öne çıkmaktadır. Bu çalışmalar Fe_3O_4 'ün SiO_2 ile kaplanarak yüzeyinin fonksiyonel hale getirilip katalizör olarak kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca organik komplekslerinin $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparçacıkları üzerine immobilize edilerek katalitik aktivite kazandırıldığı araştırmalar da önemli bulgular sunmaktadır. Benzer şekilde Schiff bazı-Cu komplekslerinin $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparçacıkları üzerine immobilize edilerek sentezlenen yapılar da katalitik uygulamalarda etkili bulunmuştur. Ayrıca $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}(\text{acac})_2$ komplekslerinin sülfür oksidasyon reaksiyonlarında kullanıldığı araştırmalar da bu alanın önemli katkılarından biridir. Bu çalışmalar Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 ile kaplanmasının çeşitli katalitik uygulamalarda kullanılabilecek etkili nanoyapılar oluşturduğunu göstermektedir (Şekil 2.6.) (Sardarian ve ark., 2021).



Şekil 2.6. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-APTES(Fe(acac)}_2\text{)}$ ile katalize edilen H_2O_2 ile sülfürlerin oksidasyonu.

Rakhtshah ve arkadaşları'nın bu çalışmasında Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 ile kaplanarak Schiff bazı bazlı Cu(II) kompleksleriyle modifikasyonu ve sülfürlerin oksidasyonunda katalitik uygulamalarını ele alınmaktadır. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ üzerine immobilize edilen Schiff bazı- Cu(II) kompleksleri sülfidlerin oksidasyonu ve tiyollerin oksidatif bağlanmasında kullanılmıştır. Bu nanokatalizörler yüksek manyetik özelliklerini koruyarak katalitik süreçlerde hem yüksek verim hem de seçicilik sağlamıştır. Çalışmada H_2O_2 kullanılarak sülfürlerin oksidasyonu gerçekleştirildi ve optimum şartlar altında yüksek dönüşüm oranları elde edildi. Nanokatalizörler farklı fonksiyonel gruplar içeren sülfürlerin oksidasyonunda da yüksek kimyasal seçicilik gösterdi. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2\text{-Cu(II)}$ bazlı nanokatalizörler kolay geri kazanılabilirlik ve tekrar kullanım özellikleri ile ön plana çıkmıştır. Bu çalışma nanomanyetik katalizörlerin çevresel olarak daha sürdürülebilir ve ekonomik katalitik süreçler için nasıl kullanılabileceğini göstermektedir (Şekil 2.7.) (Rakhtshah, 2022).

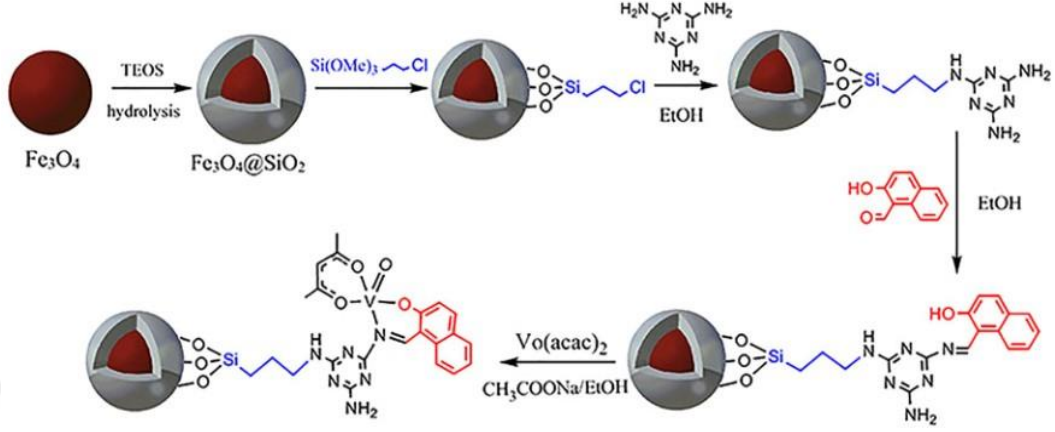
Kurtan ve Baykal'ın bu çalışması Fe_3O_4 manyetik çekirdeklerinin APTES ve PAMAM dendrimerleri ile fonksiyonelleştirilerek gümüş nanoparçacıklarıyla kaplandığı bir nanokatalizör sentezini ele almaktadır (Şekil 2.9.). Bu nanokatalizör 4-nitrofenolün 4-aminofenole indirgenmesi gibi çevre dostu katalitik reaksiyonlarda yüksek aktivite göstermiştir. Ayrıca manyetik özellikleri sayesinde dış bir manyetik alan kullanılarak kolayca geri kazanılabilir ve tekrar kullanılabilir. Yapılan deneylerde nanokatalizörün en az 5 kez kullanıldıktan sonra bile önemli bir aktivite kaybı yaşamadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sürdürülebilir katalizörlerin üretiminde manyetik nanoparçacıkların kullanımının verimli ve çevre dostu bir yaklaşım olduğunu vurgulamaktadır (Kurtan ve Baykal, 2014).



Şekil 2.9. Fe_3O_4 @APTES@PAMAM(G1)-Ag MRC'lerin oluşumunun şematik gösterimi.

Faraneh ve Asgharpour'un bu çalışmasında Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıkları üzerine melamin ve 2-hidroksinaftaldehit ile oluşturulmuş Schiff bazı ligandı kullanarak yeni bir oksovanadyum kompleksinin sentezini ele almaktadır. Modifiye edilmiş bu manyetik nanoparçacıklar özellikle alil alkoller ve olefinlerin epoksidasyonunda katalizör olarak kullanılmıştır. Fe_3O_4 çekirdekleri SiO_2 ile kaplandıktan sonra melamin ve 2-hidroksinaftaldehit ile fonksiyonelleştirilmiş ardından vanadyum kompleksleri ile modifiye edilmiştir. Bu nanokatalizör yüksek verimlilik ve seçicilik göstererek reaksiyonları hızlandırmış ve geraniol trans-2-hekzen-1-ol ve 1-okten-3-ol gibi çeşitli substratların epoksidasyonunda etkili olmuştur (Şekil 2.10.). Ayrıca bu katalizörün

yüksek manyetik geri kazanılabilirliği ve beş defa tekrar kullanıldıktan sonra bile etkinliğini koruması çalışmanın önemli sonuçlarındandır (Farzaneh ve Asgharpour, 2019).



Şekil 2.10. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{PTMS}@\text{Mel-Naph-VO}$ kompleksinin hazırlanışı.

Karunakaran ve arkadaşları'nın bu çalışmasında süperparamanyetik demir oksit (Fe_2O_3 ve Fe_3O_4) nanoparçacıkları ile fenantren-imidazol tabanlı bir floresan molekülünün etkileşimi araştırılmıştır. Çalışmada Fenantren-İmidazol türevi olan 2-(4-florofenil)-1-fenil-1H-fenantren[910-d]imidazol molekülü tasarlanmış ve sentezlenmiştir. Elektronik spektral analizler sonucunda bu molekülün demir oksit nanoparçacıklarının yüzeyine bağlandığı gözlemlenmiştir. Bağlanmanın ardından floresans artışı meydana gelmiş ve bu artış foto-indüklenmiş elektron transferi (PET) mekanizmasıyla açıklanmıştır. Araştırmacılar fenantren-imidazolün HOMO (en yüksek dolu moleküler orbital) ve LUMO (en düşük boş moleküler orbital) enerji seviyelerinin demir oksit nanoparçacıklarıyla bağlandığında düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu bağlanma fenantren-imidazol molekülünün azot atomu ile demir oksit nanoparçacıklarının yüzeyindeki Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonları arasındaki kimyasal afiniteyle açıklanmaktadır. Foto-uyarılmış fenantren-imidazolden demir oksitlerin iletim bandına elektron enjeksiyonu floresansın artmasına yol açmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada fenantren-imidazolün süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarına güçlü bir şekilde bağlanarak floresans özelliklerini geliştirdiği ortaya konmuştur (Karunakaran ve ark., 2013).

Laurent ve arkadaşları'nın bu çalışmasında süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının kanser tedavisinde hipertermi uygulamaları için kullanımını incelenmektedir. Bu inceleme SPION'ların benzersiz manyetik özellikleri mükemmel biyoyumlulukları ve çok yönlü biyomedikal potansiyelleri nedeniyle hem ilaç dağıtımı hem de kanser tedavisinde giderek daha fazla ilgi gördüğünü belirtmektedir. Hipertermi tedavisinde nanoparçacıklar manyetik alan altında ısı üreterek kanser hücrelerini hedef alır ve bu da tedavi sürecinde büyük bir avantaj sağlar. Ancak bu tedavi yönteminde başarı elde edebilmek için SPION'ların fizikokimyasal özelliklerinin titizlikle kontrol edilmesi gerekir çünkü üretilen ısının miktarı bu özelliklere bağlıdır. Makale bu alanda karşılaşılan kısıtlamalara ve son dönemde yapılan gelişmelere de değinmektedir. Özellikle nanoparçacıkların manyetik alan altındaki ısı etkisinin optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. SPION'ların boyutları şekilleri yüzey modifikasyonları ve manyetik özellikleri gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanması hipertermi tedavisinin etkinliğini artırabilir. Ayrıca SPION'ların doğru şekilde hedeflenmesi ve biyoyumluluğun sağlanması için yeni sentez yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği de belirtilmiştir. Bu nanoparçacıklar yalnızca kanser hücrelerini etkileyen ısı tedavilerinde değil aynı zamanda genel ilaç taşıma ve görüntüleme uygulamalarında da kullanılabilir (Laurent ve ark., 2011).

Hurtado-Gallego ve arkadaşları'nın bu çalışmasında süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının (SPION'lar) mikroalg *Chlamydomonas reinhardtii* üzerindeki toksisitesini ve bu organizmanın fizyolojik parametrelerinde meydana gelen değişiklikler incelenmektedir. SPION'lar biyomedikal ve çevresel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak bu nanoparçacıkların çevresel etkileri hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Bu çalışmada SPION'ların mikroalglerde toksisiteye neden olup olmadığını ve hangi mekanizmalarla bu toksik etkilerin ortaya çıktığını belirlemek amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. Sonuçlar SPION'ların doza bağlı bir toksik etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Akış sitometrisi ve fizyolojik parametrelerin değerlendirilmesi sonucunda SPION'lara maruz kalan mikroalglerde metabolik aktivitenin azaldığı oksidatif stres seviyelerinin arttığı ve mitokondriyal membran potansiyelinde değişiklikler meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca SPION süspansiyonlarının ışığı emme özelliği nedeniyle alglerin fotosentetik aktivitesinde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum fotosentezde önemli bir engel oluşturmuştur. Çalışma SPION'ların endositoz yoluyla *Chlamydomonas reinhardtii* hücrelerine ilk kez internalize edildiğini de göstermiştir. Bu bulgular SPION'ların doğru yönetilmediği

takdirde çevre için potansiyel bir risk teşkil edebileceğini ortaya koymaktadır. Çalışma SPION'ların çevresel ortamlarda canlı organizmalara zarar verebileceğini ve bu nedenle nanoparçacıkların kullanımı sırasında dikkatli olunması gerektiğini vurgulamaktadır (Hurtado-Gallego ve ark., 2020).

Santhosh ve Ulrih'in bu çalışmasında süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının (SPION'lar) kanser tedavisinde hem teşhis hem de tedavi amaçlı kullanımını (teranostik) incelenmektedir. SPION'lar küçük boyutları ve süperparamanyetik özellikleri sayesinde kanser biyolojisi alanında teşhis izleme hedefleme ve tedavi gibi birçok farklı rol oynayabilen büyük bir potansiyele sahiptir. Bu nanoparçacıklar manyetik özellikleri sayesinde tümörlere etkin bir şekilde yönlendirilerek kanser tedavisinde kişiselleştirilmiş tedavi olasılıklarını artırmaktadır. Makale SPION'ların kanser teşhisinde ve tedavisinde nasıl kullanıldığını açıklamaktadır. Nanoparçacıklar manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tanısal tekniklerde kontrast ajanı olarak kullanılmakta ve aynı zamanda manyetik hedefleme ile kanser hücrelerine ilaç taşınmasını sağlamaktadır. SPION'lar manyetik özellikleri sayesinde tümör bölgesine odaklanarak ilacın doğrudan kanserli hücrelere ulaştırılmasına yardımcı olur. Bu durum tedavi etkinliğini artırırken sağlıklı hücrelere zarar verme riskini en aza indirir. Çalışma ayrıca SPION'ların sentezi sürecinde karşılaşılan zorluklar ve elde edilen son gelişmeleri de tartışmaktadır. SPION'ların biyomedikal kullanımları için belirli boyutlara ve manyetik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle doğru sentez yöntemleri ve yüzey kaplamalarının kullanımı nanoparçacıkların biyoyumluluğunu ve etkinliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. SPION'ların farklı organik ve inorganik yüzey kaplamaları ile modifikasyonu biyolojik ortamda daha kararlı olmalarını ve hedef hücrelere daha etkin bir şekilde ulaşmalarını sağlamaktadır (Santhosh ve Ulrih, 2013).

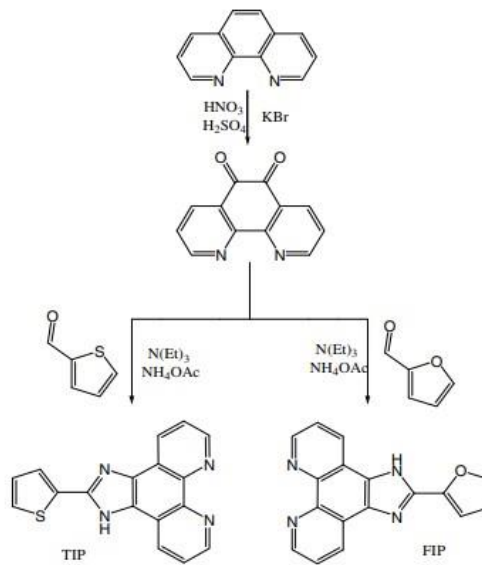
Antony ve Samrot' in bu çalışmasında süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıkları (SPION'lar) kullanılarak antimikrobiyal çalışmalar için geliştirilen yeni bir ilaç taşıma sistemi üzerinde durulmaktadır. Çalışmada $FeCl_3$ ve $FeCl_2$ kullanılarak kimyasal çöktürme yöntemiyle SPION'lar üretilmiştir. Bu nanoparçacıklar demir oksitlere indirgenmiş ve çıplak halde sentezlenmiştir. Daha sonra bu çıplak SPION'lar ilaç yüklemeli bir çekirdek-kabuk sistemi oluşturmak amacıyla işlenmiştir. Çekirdek-kabuk yapı çıplak SPION'ların oleik asit ile fonksiyonelleştirilmesi İtrakonazol adı verilen bir ilaçla etiketlenmesi ve sonunda mikrobiyal kaynaklı bir polyeester olan poli(hidroksibütirat) (PHB) ile kaplanmasıyla elde edilmiştir. Çalışmada

her aşama taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Üretilen bu çekirdek-kabuk yapısı yavaş bir ilaç salınım profili göstermiştir. Antibakteriyel ve antifungal özellikler açısından yapılan deneylerde çekirdek-kabuk yapısının bakteri (*Pseudomonas aeruginosa* ve *Brevibacillus brevis*) ve mantar (*Candida albicans*) üzerinde yayma yöntemiyle uygulandığında mikrobiyal aktiviteyi engellediği gözlenmiştir. Ayrıca çıplak SPION'ların X-ray görüntülemeye iyi bir kontrast ajanı olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Samrot ve ark., 2021).

Mahmoudi ve arkadaşları'nın bu çalışması süperparamanyetik demir oksit nanoparçacıklarının (SPION'lar) sitotoksitesi ve hücre ortamı bileşenleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmadır. SPION'lar tıbbi uygulamalarda hedefe yönelik ilaç taşıma ve görüntüleme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nanoparçacıkların toksisitesini araştırmak özellikle gelecekte hastaların bu tür farmasötik ürünlere maruz kalma olasılığının artması nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Çalışmada kaplanmamış ve polivinil alkol (PVA) ile kaplanmış SPION'lar dar bir boyut dağılımına sahip olacak şekilde iyi bilinen bir çöktürme yöntemi ile sentezlenmiştir. Bu nanoparçacıkların toksisitesi fare fibroblast hücre hattı (L929) üzerinde incelenmiştir. Araştırma kapsamında SPION'ların hücre ortamında neden olduğu değişiklikler zeta potansiyel ölçümleri ultraviyole görünür spektroskopisi (UV/vis) ve MTT testi ile analiz edilmiştir. Bulgular SPION'larla tedavi edilen hücrelerde gaz kabarcıklarının oluştuğunu ve bunun SPION'ların biyomoleküllerle etkileşime girme eğiliminden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Çalışma SPION'ların toksisitesinin ortamın pH ve bileşiminde meydana gelen değişikliklerle açıklanabileceğini göstermiştir. Ayrıca nanoparçacıkların hücre ortamında yol açtığı bu değişikliklerin hücrelerin yaşama olasılığını düşürdüğü ve toksisiteyi artırdığı belirtilmiştir. Bu çalışmada SPION'ların in vitro toksisite değerlendirmesini daha titiz bir şekilde yapmak için yeni bir prosedür önerilmiştir. Bu prosedür in vivo ve in vitro toksisite çalışmalarındaki ilişkiyi iyileştirme amacını taşımaktadır. Önerilen bu yeni yöntem nanoparçacıkların toksik etkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirme olanağı sağlamaktadır (Mahmoudi ve ark., 2011).

Moghadam ve arkadaşları'nın bu çalışması imidazol türevli yeni paladyum(II) komplekslerinin sentezi sitotoksite değerlendirmesi ve insan serum albümini ile etkileşimleri üzerine odaklanmaktadır. Çalışmada konjuge p-sistemine sahip bir dizi heterosiklik bileşik sentezlenmiştir. Bu bileşikler arasında 2-aril-imidazo[45-f][110]-fenantroline analogları sentezlenmiş ve ardından bu bileşiklerin üç yeni paladyum(II) kompleksi hazırlanmıştır. Komplekslerin yapıları spektroskopik yöntemler ve elemental

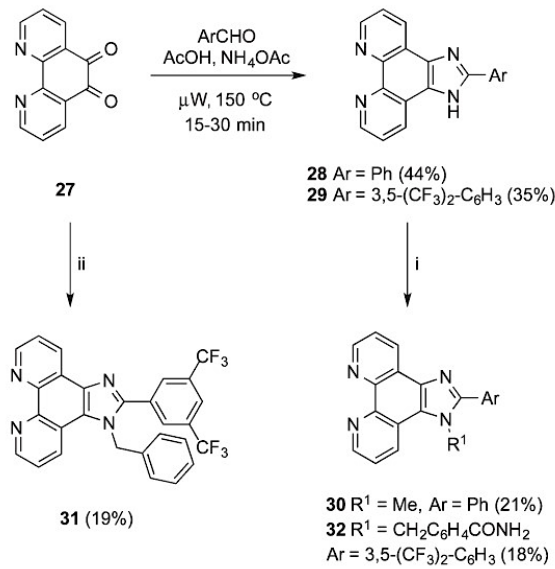
analiz ile belirlenmiştir. Bu kompleksler arasında 2-(furan-2-il)-1H-İmidazo[45-f][110]fenantroline (FIP) ve 2-(tiyofen-2-il)-1H-İmidazo[45-f][110]- fenantroline (TIP) ligantları bulunmaktadır. Sentezlenen komplekslerin biyolojik aktiviteleri kronik miyeloid lösemi hücre hattı (K562) üzerinde test edilmiştir. Sitotoksite testleri bu komplekslerin lösemi hücre hattı üzerinde güçlü inhibe edici etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca insan serum albümini (HSA) ile bu komplekslerin etkileşimleri izotermal titrasyon kalorimetrisi kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar bu komplekslerin HSA üzerinde pozitif kooperatif bağlanma özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca HSA ile bu kompleksler arasındaki bağlanma bölgelerinin sayısının altı olduğu belirlenmiştir. Moleküler yerleştirme (docking) tekniği kullanılarak deneysel sonuçlar doğrulanmış ve komplekslerin HSA ile bağlanma afiniteleri yüksek bulunmuştur. Moleküler yerleştirme sonuçları daha küçük komplekslerin daha yüksek etkileşim afinitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgular imidazol türevli paladyum komplekslerinin biyolojik uygulamalar için büyük potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 2.11.) (Eslami Moghadam ve ark., 2016).



Şekil 2.11. Amonyum asetat varlığında TIP ve FIP ligantlarının sentezi.

Patel ve arkadaşları'nın bu çalışmasında imidazol halkası içeren fenantren veya fenantroline kaynaştırılmış bileşiklerin sentezi ve biyolojik aktivitelerini incelenmektedir. Bu imidazol halkası biyolojik olarak aktif birçok bileşikte yaygın olarak bulunmaktadır ve bu tür imidazol içeren iskeletler ilaç keşif programlarında başlangıç noktaları olarak büyük önem taşımaktadır. Çalışmada yeni bir dizi fenantren

veya fenantroline kaynaştırılmış imidazol bileşiği sentezlenmiştir. Bu bileşiklerin insan kolon meme ve melanom kanseri hücre hatlarına karşı büyüme inhibisyonu açısından güçlü etkileri olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu bileşikler moleküler şaperon heat shock protein 70'in (Hsp70) inhibisyonunda etkili bulunmuş ve bu da Hsp90 şaperon yolunun onkogenik müşteri proteinlerinin azalmasına neden olmuştur. Bu süreç sonunda hücrelerde apoptoz (hücre ölümü) indüklenmiştir. Araştırma bu bileşiklerin Hsp70 yolunu hedef alarak kansere karşı potansiyel tedavi edici ajanlar olabileceğini göstermektedir. Hsp70'in inhibisyonu kanser hücrelerinin hayatta kalmasını destekleyen proteinlerin azalmasına ve sonuçta apoptozun tetiklenmesine yol açmıştır. Çalışmada elde edilen veriler fenantren ve fenantroline kaynaştırılmış imidazollerin sadece kanser hücre büyümesini engelleyici etkilerinin değil aynı zamanda bu hücrelerde moleküler seviyede hücre ölümüne neden olabilecek biyokimyasal yolları hedeflediklerini de göstermektedir (Şekil 2.12.) (Patel ve ark., 2016).



Şekil 2.12. İmidazo[4,5-f][1,10]fenantrolin türevlerinin sentezi.

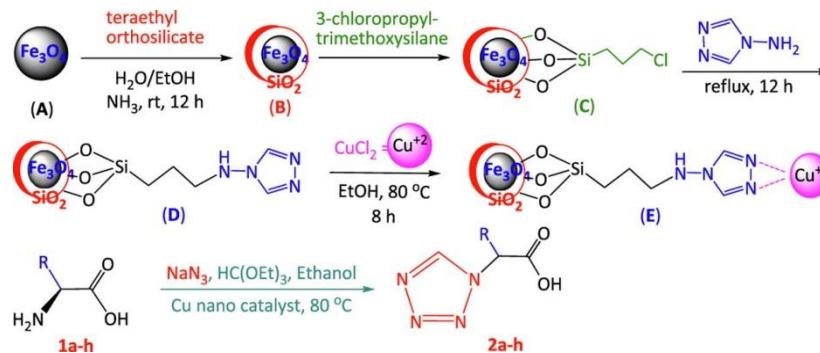
Yu ve arkadaşları'nın bu çalışmasında fenoksazin grubu içeren iki yeni Fenantren-İmidazol türevlerinin sentezi ve fotofiziksel özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada bu türevler element analizi NMR, MS ve FT-IR spektrumları ile karakterize edilmiştir. Ayrıca tek kristal X-ışını kırınımı kullanılarak yapı doğrulamaları yapılmıştır. Elde edilen bileşiklerin fotofiziksel ve elektrokimyasal özellikleri sistematik bir şekilde araştırılmıştır. Moleküllerin temel hal geometrileri ve elektron dağılımları

HOMO ve LUMO enerji seviyeleri yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) ve zaman bağımlı yoğunluk fonksiyonel teorisi (TD-DFT) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bileşiklerin termal stabiliteleri ve elektrokimyasal özellikleri de incelenmiştir. Termal analizler bu moleküllerin yüksek sıcaklıklarda kararlılığını göstermiştir. Ayrıca fotofiziksel özellikler açısından bu türevlerin hem çözelti içinde hem de katı hâlde iyi floresans özelliklerine sahip olduğu bulunmuştur. Bileşiklerin floresans emisyonları onları potansiyel olarak ışık yayan cihazlar veya biyolojik görüntüleme ajanları olarak kullanılabilecekleri birer aday yapmaktadır. Yoğun elektronik konjugasyon içeren bu yeni bileşiklerin optoelektronik uygulamalar için potansiyel taşıdığı belirtilmiştir. Çalışmada bu yeni fenantreno-izoquinolin türevlerinin yüksek termal kararlılıkları ve belirgin fotofiziksel özellikleri ile dikkat çektiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak fenoksazin grubu içeren bu fenantreno-imidazol türevleri hem organik elektronik cihazlarda hem de biyolojik görüntüleme uygulamalarında kullanılabilecek umut verici malzemeler olarak tanımlanmıştır (Yu ve ark., 2009).

Rostami ve Shiri'nin bu çalışmasında $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-CPTMS-Guanidin-SO}_3\text{H}$ manyetik nanokatalizör kullanılarak çözücüsüz koşullarda polisüstitüe pirrol türevlerinin çok bileşenli tek kapta sentezi ele alınmıştır. Araştırmacılar anilin türevleri β -diketonlar veya β -ketoesterler ve β -nitrostiren türevlerinin reaksiyonunu incelemiş ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-CPTMS-Guanidin-SO}_3\text{H}$ nanokatalizörünü kullanarak yüksek verimlilikte ve çevre dostu bir sentez yöntemi geliştirmişlerdir. Bu manyetik nanokatalizör yeniden kullanılabilir özelliği sayesinde birçok kez reaksiyona sokulabilmekte ve her seferinde etkinliğini koruyarak tekrar kullanılabilmektedir. Nanokatalizörün hazırlanma sürecinde Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıkları (MNP'ler) önce silika (SiO_2) ile kaplanmış ardından 3-kloropropiltrimetoksisilan (CPTMS) ile modifiye edilmiş ve sonrasında guanidin ve SO_3H grupları ile modifiye edilmiştir. Bu yapısal değişiklikler nanokatalizörün yüksek verimli katalitik aktivite göstermesine olanak tanımıştır. Nanokatalizörün yapısal karakterizasyonu FTIR, SEM, EDS, XRD, TGA ve VSM gibi tekniklerle gerçekleştirilmiştir (Rostami ve Shiri, 2019).

Ariannezhad ve arkadaşları'nın bu çalışmasında $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS-AT}$ (3-kloropropiltrimetoksisilan ve 4-amino-124-triazol ligantları ile fonksiyonelleştirilmiş Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıkları) kullanılarak bakır nanoparçacıklarının sentezi ve çeşitli 1-fenil-1H-tetrazol türevlerinin üretimi için katalizör olarak kullanımı ele alınmıştır. Araştırmacılar önce Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıklarını hazırlamış ardından bunları Tetraetilortosilikat ile kaplayarak $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparçacıklarını elde

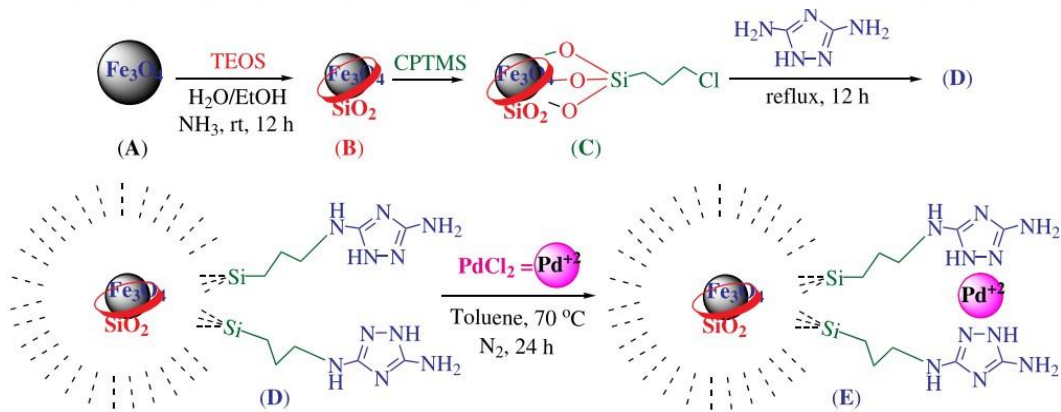
etmişlerdir. Bu nanoparçacıklar (3-kloropropil)trimetoksisilan (CPTMS) ve 4-amino-124-triazol (AT) ligantları ile fonksiyonelleştirilmiştir (Şekil 2.13.). Son aşamada bu fonksiyonelleştirilmiş nanoparçacıklar CuCl_2 ile reaksiyona sokularak bakır nanoparçacıklarına dönüştürülmüştür. Sentezlenen Cu nanoparçacıkları çeşitli amino asitlerin sodyum azid ve trietilortoformat (TEOF) ile reaksiyona girdiği bir reaksiyonda tetrazol türevlerinin üretiminde katalizör olarak kullanılmıştır. Reaksiyonlar etanol çözeltisinde 80°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir ve yüksek verimlilikte tetrazol türevleri elde edilmiştir. Çalışma Cu nanoparçacıklarının tetrazol türevlerinin sentezinde yüksek etkinlik gösterdiğini ve bu katalizörlerin tekrar kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur. Bu katalizör sistemi çevre dostu bir yöntem olarak değerlendirilmiştir çünkü manyetik nanoparçacıklar kolayca geri kazanılabilir ve tekrar kullanılabilir. Ayrıca bu çalışma Cu nanoparçacıklarının yüksek stabiliteye sahip olduğunu ve reaksiyon sonrası aktivitesini kaybetmeden birçok kez kullanılabileceğini göstermiştir. Karakterizasyon teknikleri olarak FT-IR, XRD, SEM, TEM, TGA/DTA ve VSM gibi yöntemler kullanılarak katalizörün yapısal özellikleri doğrulanmıştır. Bu çalışma manyetik nanoparçacıkların organik sentezde etkin katalizörler olarak kullanılabileceğini ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantaj sağladığını ortaya koymaktadır (Ariannezhad ve ark., 2019).



Şekil 2.13. Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS-AT-Cu(II) nanoparçacığının sentez mekanizması ve katalizör olarak kullanımının gösterimi.

Habibi ve arkadaşları'nın bu çalışmasında Fe₃O₄ manyetik nanoparçacıkları (MNP'ler) üzerine yeni palladyum (Pd) nanoparçacıkları desteklenerek hazırlanan bir nanokatalizörün sentezi ve katalitik uygulamalarını incelemektedir. Bu çalışma organik sentezde kullanılan palladyum nanoparçacıklarının stabilitesini ve geri

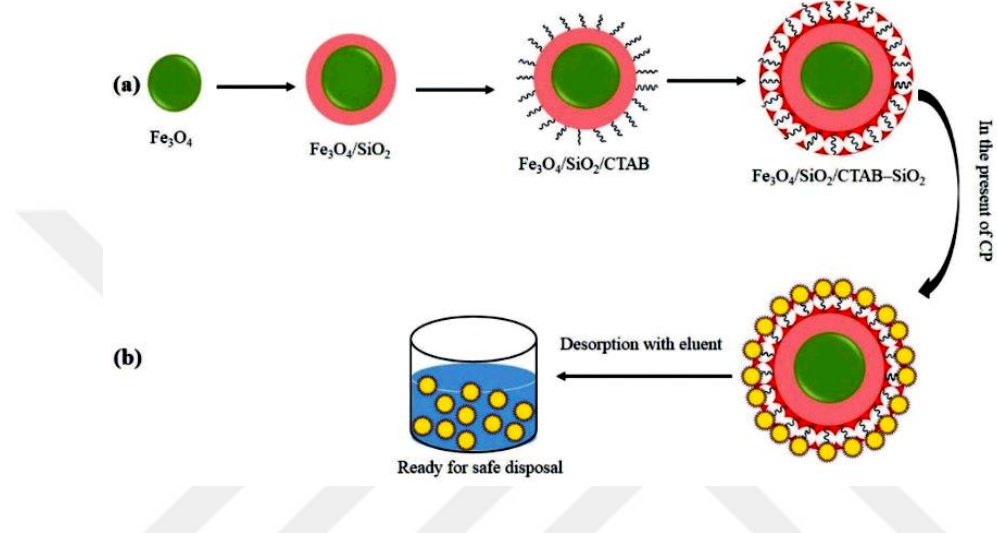
kazanılabilirliğini artırmayı hedeflemiştir. Çalışmada Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıkları önce silika (SiO_2) ile kaplanmış ardından 3-kloropropiltrimetoksisilan (CPTMS) ile işlevselleştirilmiştir. Daha sonra 35-diamino-1,2,4-triazol (DAT) ligandı ile fonksiyonelleştirilmiş ve son aşamada PdCl_2 ile reaksiyona sokularak palladyum nanoparçacıkları bu yapıya eklenmiştir (Şekil 2.14.). Elde edilen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@\text{DAT}@\text{Pd}$ nanokatalizör yapısal ve fiziksel özelliklerini doğrulamak amacıyla çeşitli analizlere tabi tutulmuştur. Bu analizler arasında elemental analiz (CHN) FTIR, XRD, EDX, SEM, TEM, TGA ve VSM yer almıştır. Bu analizler nanokatalizörün başarılı bir şekilde sentezlendiğini ve yüksek manyetik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Nanokatalizörün katalitik performansı 2-imino-3-fenil-2,3-dihidrobenzo[d]- oksazol türevlerinin sentezinde test edilmiştir. Bu reaksiyon organik kimyada önemli bir sentez yolu olan oksazol türevlerinin hazırlanması için kullanılmıştır. Katalizör yüksek verimlilik göstermiş ve reaksiyonun tamamlanma süresini önemli ölçüde kısaltmıştır. Ayrıca katalizör reaksiyon sonrasında bir mıknatıs yardımıyla çözelti içinden kolayca ayrılabilmiş ve birkaç kez geri kazanılarak tekrar kullanılabilmiştir. Bu özellikler nanokatalizörün çevre dostu ve ekonomik bir seçenek olduğunu vurgulamaktadır (Habibi ve ark., 2018).



Şekil 2.14. Pd nano-katalizör sentezi.

Zandipak ve arkadaşları'nın bu çalışmasında Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıkları üzerine kaplanmış SiO_2 ve CTAB (setiltrimetilamonyum bromür) ile yeni bir nanoparçacık olan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CTAB}-\text{SiO}_2$ 'nin sentezini ve su örneklerinden siklofosamid (CP) adı verilen bir kanser ilacının uzaklaştırılması için kullanımını incelemektedir. Çalışmada basit bir sol-jel tekniği kullanılarak bu nanoparçacık

hazırlanmış ve seçici aşındırma yöntemi ile oldukça seçici adsorpsiyon kabiliyeti geliştirilmiştir (Şekil 2.15.). Nanoparçacığın karakterizasyonu TEM, SEM, XRD, FTIR ve VSM gibi çeşitli teknikler kullanılarak yapılmıştır. Nanoparçacıklar yüksek yüzey alanına ($157.8 \text{ m}^2/\text{g}$) ve yüksek doygunluk manyetizasyonuna (67.5 emu/g) sahip olarak tespit edilmiştir. Nanoparçacık manyetik özellikleri sayesinde dış bir mıknatıs yardımıyla kolayca geri kazanılabilir ve tekrar kullanılabilir olduğu ispatlanmıştır (Zandipak ve ark., 2020).



Şekil 2.15. (a) Fe₃O₄@SiO₂@CTAB-SiO₂ nanoparçacığının sentezi ve (b) CP giderim mekanizması için şematik diyagram.

Kargar ve arkadaşları'nın bu çalışmasında Fe₃O₄ manyetik nanoparçacıkları ile kaplanmış SiO₂'ye dayanan yeni bir manyetik geri kazanılabilir nanokatalizör olan Fe₃O₄@SiO₂-IL/[Mo₆O₁₉]'un sentezi ve katalitik uygulamalarını incelemektedir. Bu çalışmada manyetik Fe₃O₄@SiO₂ nanoparçacıkları alkil-imidazolyum iyonik sıvıları ile modifiye edilmiş ve daha sonra hekzamolibdat anyonları ile işlevselleştirilmiştir. Elde edilen Fe₃O₄@SiO₂-IL/[Mo₆O₁₉] nanokatalizörü FT-IR, TGA, SEM, TEM, XRD ve VSM gibi tekniklerle karakterize edilmiştir (Rajakumar ve ark., 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Maddeler

Çalışmada kullanılan tüm kimyasal maddeler Alfa Aesar, Sigma Aldrich firmalarından temin edilmiştir. 9,10-fenantrendion, 6-hidroksi-2-naftaldehit, 3-hidroksi

benzaldehit, 2-hidroksi-3-metoksi benzaldehit, 2-hidroksi-1-naftaldehit ticari olarak satın alınmıştır.

3.2. Kullanılan Aletler

- FT-IR Spektrometresi: FT-IR BrukerVertex 70 Spectrometer, Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü-KONYA.

-¹H-NMR Spektrometresi: Bruker 400-MHz Spectrometer, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji AUM (BİTAM)-KONYA

-¹³C-NMR Spektrometresi: Bruker 100-MHz Spectrometer, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji AUM (BİTAM)-KONYA

-Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu (FE-SEM EDX EBSD ve STEM) ZEISS GeminiSEM 500, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji AUM (BİTAM)-KONYA

-X Işını Difraktometresi: XRD PANalytical EMPYREAN XRD, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji AUM (BİTAM)-KONYA

-pH metre: Orion Expondoble Ion Analyzer EA 940, Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü-KONYA.

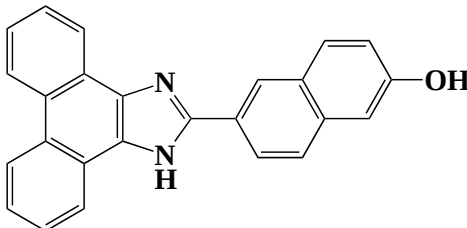
-Erime Noktası Tayin Cihazı: BüchiMelting Point B-540, Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü-KONYA.

-TGA: MettlerToledo TGA/DSC STAR System, Necmettin Erbakan Üniversitesi KONYA.

-VSM: Sıcaklığa ve Alana bağlı Manyetizasyon Ölçümü, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (ÇÜMERLAB)-ADANA.

4. DENEYSEL BÖLÜM

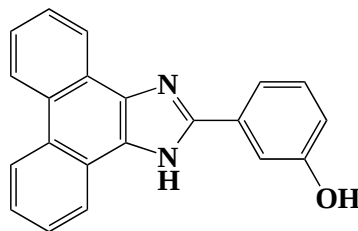
4.1. 6-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-il)naftalin-2-ol, 1 Sentezi



9,10-fenantrendion ile 6-hidroksi-2-naftaldehit arasındaki reaksiyonun gerçekleştirilmesi için başlangıç maddeleri olarak 9,10-fenantrendion ve 6-hidroksi-2-naftaldehit kullanılmıştır. İlk olarak 9,10-fenantrendion (1.00 mmol 208.2 mg) ve 6-hidroksi-2-naftaldehit (1.00 mmol 172.2 mg) ayrı erlenlere alınmıştır. Her iki erlene de 5 mL asetik asit eklenmiştir. Hem 9,10-fenantrendion hem de 6-hidroksi-2-naftaldehit çözeltileri manyetik karıştırıcı altında asetik asitin kaynama noktasına (118°C) kadar ısıtılarak maddelerin tamamen çözünmesi sağlanmıştır. 6-Hidroksi-2-naftaldehit çözeltisinin bulunduğu erlene amonyum asetat (28 mmol 2.16 g) yavaşça eklenmiş ve karışımın homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Bu karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıyla karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra 9,10-fenantrendion çözeltisi bir damlalık yardımıyla 6-hidroksi-2-naftaldehit ve amonyum asetat karışımının bulunduğu balona damla damla ilave edilmiştir. İlave sırasında karışım sürekli olarak karıştırılmıştır. Reaksiyon karışımı 118°C'de 6 saat boyunca geri soğutucu altında karıştırılarak ısıtılmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve üzerine su eklenerek reaksiyon sonlandırılmıştır. Elde edilen katı ürün vakum altında süzölmüş ve birkaç kez soğuk etanol ile yıkanarak saflaştırılmıştır.

E.N.: 212 °C, verim % 85, FT-IR (cm⁻¹): 3462 cm⁻¹ (O-H), 3051 cm⁻¹(N-H), 1615 cm⁻¹ (C=N), 1605 cm⁻¹ (N-H), 1520 cm⁻¹ (C=C), 1480 cm⁻¹ (O-H), 1405 cm⁻¹ (C-N), 1251 cm⁻¹ (C-O), 750 cm⁻¹ (C-H). ¹H-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm) = 13.60 (s, OH, 1H), 10.8 (s, NH, 1H), 7.1-9.0 (m, Ar-H, 13H). ¹³C-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm)= 174, 155, 120, 110.

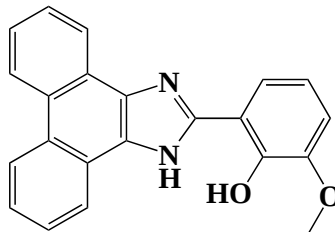
4.2. 3-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-il)fenol, 2 Sentezi



9,10-fenantrendion (1.00 mmol 208.2 mg) ve 3-hidroksi benzaldehit (1.00 mmol 122.1 mg) ayrı erlenlere alınmıştır. Her iki erlene de 5 mL asetik asit eklenmiştir. 9,10-fenantrendion ve 3-hidroksi benzaldehit çözeltileri manyetik karıştırıcı altında asetik asitin kaynama noktasına (118°C) kadar ısıtılmış ve maddeler tamamen çözülene kadar karıştırılmıştır. 3-Hidroksi benzaldehit çözeltisinin bulunduğu erlene amonyum asetat (28 mmol 2.16 g) yavaşça eklenmiş ve karışımın homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Bu karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra 9,10-fenantrendion çözeltisi bir damlalık yardımıyla 3-hidroksi benzaldehit ve amonyum asetat karışımının bulunduğu balona damla damla ilave edilmiştir. İlave sırasında karışım sürekli olarak karıştırılmıştır. Reaksiyon karışımı geri soğutucu altında 118°C sıcaklıkta 6 saat boyunca karıştırılarak ısıtılmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve üzerine su eklenerek reaksiyon sonlandırılmıştır. Elde edilen katı ürün vakum altında süzölmüş ve birkaç kez soğuk etanol ile yıkanarak saflaştırılmıştır.

E.N.: 313 °C verim % 87, FT-IR (cm⁻¹): 3420 cm⁻¹ (O-H), 3057 cm⁻¹(N-H), 1656 cm⁻¹ (C=N), 1599 cm⁻¹ (N-H), 1536 cm⁻¹ (C=C), 1484 cm⁻¹ (O-H), 1421 cm⁻¹ (C-N), 1244 cm⁻¹ (C-O), 754 cm⁻¹ (C-H). ¹H-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm) = 13.39 (s, OH, 1H), 12.0 (s, NH, 1H), 7.3-9.8 (m, Ar-H, 12H). ¹³C-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm)= 172, 158, 118, 114.

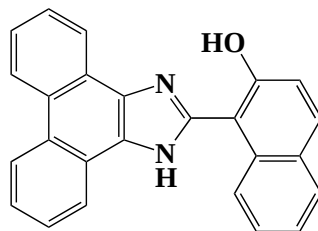
4.3. 2-metoksi-6-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-il)fenol, 3 Sentezi



9,10-fenantrendion (1.00 mmol 208.2 mg) ve 2-hidroksi-3-metoksi benzaldehit (1.00 mmol 152.1 mg) ayrı erlenlere alınmıştır. Her iki erlene de 5 mL asetik asit eklenmiştir. 9,10-fenantrendion ve 2-hidroksi-3-metoksi benzaldehit çözeltileri manyetik karıştırıcı altında asetik asitin kaynama noktasına (118°C) kadar ısıtılmış ve maddeler tamamen çözülene kadar karıştırılmıştır. 2-Hidroksi-3-metoksi benzaldehit çözeltisinin bulunduğu erlene amonyum asetat (28 mmol 2.16 g) yavaşça eklenmiş ve karışımın homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Bu karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra 9,10-fenantrendion çözeltisi bir damlalık yardımıyla 2-hidroksi-3-metoksi benzaldehit ve amonyum asetat karışımının bulunduğu balona damla damla ilave edilmiştir. İlave sırasında karışım sürekli olarak karıştırılmıştır. Reaksiyon karışımı geri soğutucu altında 118°C sıcaklıkta 6 saat boyunca karıştırılarak ısıtılmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve üzerine su eklenerek reaksiyon sonlandırılmıştır. Elde edilen katı ürün vakum altında süzölmüş ve birkaç kez soğuk etanol ile yıkanarak saflaştırılmıştır.

E.N.: 186 °C verim % 90, FT-IR (cm⁻¹): 3499 cm⁻¹ (O-H), 3199 cm⁻¹(N-H), 1706 cm⁻¹ (C=N), 1652 cm⁻¹ (N-H), 1613 cm⁻¹ (C=C), 1566 cm⁻¹ (O-H), 1457 cm⁻¹ (C-N), 1247 cm⁻¹ (C-O), 1056⁻¹ (Ar-O-CH₂), 754 cm⁻¹ (C-H). ¹H-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm) = 13.04 (b, s, OH, 1H), 13.04 (s, NH, 1H), 6.8-8.99 (m, Ar-H, 11H), 3.5 (s, O-CH₃, 3H). ¹³C-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm)= 173, 148, 147, 114, 113, 55.

4.4. 1-(1H-fenantro[9,10-d]imidazol-2-yl)naftalin-2-ol, 4 Sentezi

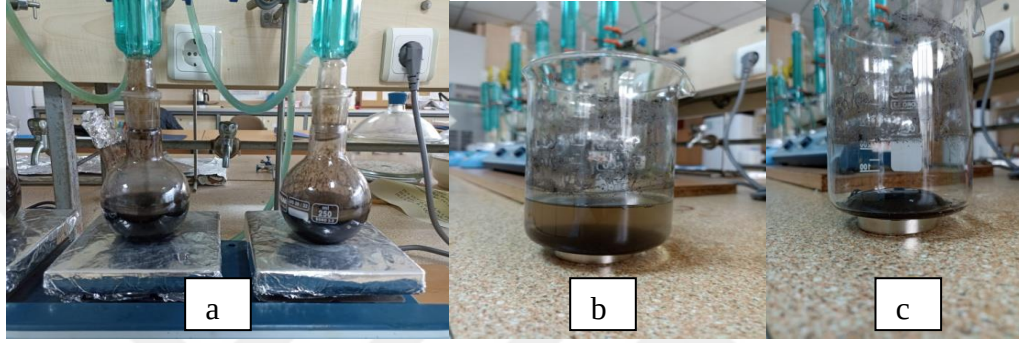
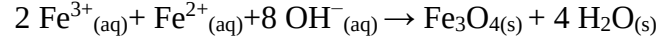


9,10-fenantrendion (1.00 mmol 208.2 mg) ve 2-hidroksi-1-naftaldehit (1.00 mmol 172.2 mg) ayrı erlenlere alınmıştır. Her iki erlene de 5 mL asetik asit eklenmiştir. 9,10-fenantrendion ve 2-hidroksi-1-naftaldehit çözeltileri manyetik karıştırıcı altında asetik asitin kaynama noktasına (118°C) kadar ısıtılmış ve maddeler tamamen çözülene kadar karıştırılmıştır. 2-Hidroksi-1-naftaldehit çözeltisinin bulunduğu erlene amonyum asetat (28 mmol 2.16 g) yavaşça eklenmiş ve karışımın homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Bu karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra 9,10-fenantrendion çözeltisi bir damlalık yardımıyla 2-hidroksi-1-naftaldehit ve amonyum asetat karışımının bulunduğu balona damla damla ilave edilmiştir. İlave sırasında karışım sürekli olarak karıştırılmıştır. Reaksiyon karışımı geri soğutucu altında 118°C sıcaklıkta 6 saat boyunca karıştırılarak ısıtılmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra karışım oda sıcaklığına soğutulmuş ve üzerine su eklenerek reaksiyon sonlandırılmıştır. Elde edilen katı ürün vakum altında süzölmüş ve birkaç kez soğuk etanol ile yıkanarak saflaştırılmıştır.

E.N.: 220°C verim %83, FT-IR (cm⁻¹): 3457 cm⁻¹ (O-H), 3050 cm⁻¹ (N-H), 1653 cm⁻¹ (C=N), 1616 cm⁻¹ (N-H), 1560 cm⁻¹ (C=C), 1467 cm⁻¹ (O-H), 1518 cm⁻¹ (C-N), 1249 cm⁻¹ (C-O), 746 cm⁻¹ (C-H). ¹H-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm) = 11.95 (b, s, OH, 1H), 10.98 (s, NH, 1H), 7.4-8.90 (m, Ar-H, 14H). ¹³C-NMR (DMSO-d₆): δ (ppm)= 172, 165, 120, 112.

4.5. Süperparamanyetik Manyetit (Fe₃O₄) Nanoparçacık Sentezi

Fe₃O₄ (manyetit) nanoparçacıklarının sentezi için kimyasal çöktürme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde demir (II) ve demir (III) tuzları uygun oranlarda karıştırılmış ve bazik ortamda çöktürülerek Fe₃O₄ nanoparçacıkları elde edilmiştir (Şekil 4.1.).



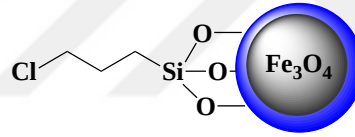
Şekil 4.1. Fe₃O₄ nanoparçacık sentez aşamaları (a) geri soğutucu ile karıştırma işlemi (b) Fe₃O₄ yıkama işlemi (c) manyetik alan yardımı ile Fe₃O₄ ayırma işlemi.

İlk olarak FeCl₃·6H₂O (8.1 g 30 mmol) ve FeCl₂·4H₂O (2.5 g 20 mmol) 100 mL'lik bir üç boyunlu balon içerisine alınmış ve üzerine 50 mL saf su eklenmiştir. Karışım oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışıma 10 mL %25'lik amonyak çözeltisi yavaşça damla damla ilave edilmiştir. Amonyak eklenmesi sırasında karışımın pH'ı hızla bazik hale gelmiştir (pH ≈ 10). Karışım manyetik karıştırıcı ile ısıtılarak 80°C'ye çıkarılmış ve 1 saat boyunca ısıtılarak karıştırılmaya devam edilmiştir. Bu süre zarfında karışımın rengi siyaha dönmüş ve manyetik Fe₃O₄ nanoparçacıklarının olduğu gözlenmiştir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra oluşan siyah çökelti manyetik bir kuvvet kullanılarak çözelti içerisinden ayrılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez saf su ve etanol ile yıkanarak safsızlıklardan arındırılmıştır. Son olarak yıkanan Fe₃O₄ nanoparçacıkları vakum altında kurutularak elde edilmiştir.

4.6. Silika Kaplı Manyetik Nanoparçacık ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) Sentezi

Fe_3O_4 nanoparçacıkları kurutulduktan sonra silika kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun için Fe_3O_4 nanoparçacıkları (1.0 g) 100 mL saf etanol içerisinde çözülmüş ve üzerine 5 mL saf su ve 2 mL amonyak eklenmiştir. Karışım manyetik karıştırıcı altında 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra silika kaynağı olarak (TEOS) (1.0 mL) karışıma yavaşça damla damla eklenmiştir. Bu esnada karışım sürekli olarak karıştırılmaya devam edilmiştir. TEOS ilavesinden sonra karışım oda sıcaklığında 12 saat boyunca karıştırılmış ve silika kaplama işlemi tamamlanmıştır. Silika ile kaplanmış Fe_3O_4 nanoparçacıkları ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) reaksiyon tamamlandıktan sonra manyetik bir kuvvet kullanılarak çözelti içerisinde ayrıştırılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez saf su ve etanol ile yıkanarak safsızlıklardan arındırılmış ve son olarak vakum altında kurutularak saf $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparçacıkları elde edilmiştir.

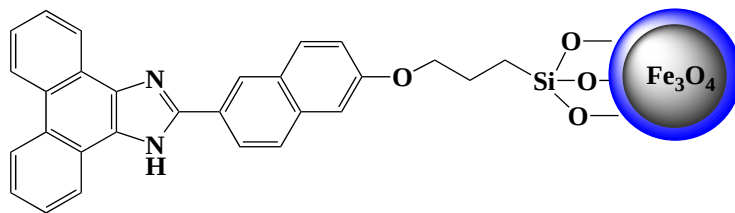
4.7. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ Nanoparçacık Sentezi



$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanoparçacıklarına (3-kloropropil)trimetoksisilan (CPTMS) bağlama işleminde ultrasonik banyo kullanılarak reaksiyon verimi artırılmıştır. Önceden sentezlenmiş $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparçacıkları (1.0 g) 100 mL susuz toluen içinde bir erlen içerisinde alınmıştır. Çözelti ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca homojen bir dağılım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra (CPTMS 1.0 mL) çözeltinin üzerine eklenmiştir. Karışım ultrasonik banyoda 60°C'de 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ nanoparçacıkları manyetik bir kuvvet kullanılarak çözelti içerisinde ayrıştırılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez toluen ile yıkanarak reaksiyon yan ürünlerinden arındırıldıktan sonra vakum altında kurutularak saf $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ nanoparçacıkları elde edilmiştir.

Verim: %85, FT-IR (cm^{-1}): 1066 cm^{-1} (Si-O-Si), 796 cm^{-1} (Si-O), 448 cm^{-1} (Fe-O).

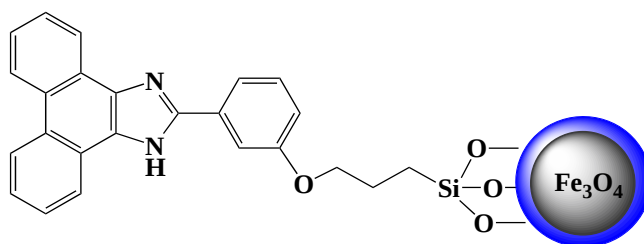
4.8. Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@1 Sentezi



Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS (1.0 g) susuz tolüen (50 mL) içerisinde homojen bir çözelti elde edilene kadar ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra **1** (1.00 mmol 362.43 mg) bu çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@1 nanoparçacıkları manyetik bir kuvvet yardımıyla çözelti içerisinde ayrıştırılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez tolüen ile yıkanarak yan ürünlerden arındırılmış ve vakum altında kurutularak saf Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@1 elde edilmiştir. Bu reaksiyon sonucunda Fe₃O₄@SiO₂ nanoparçacıklarına **1**'i başarıyla bağlanarak hem manyetik hem de organik özelliklere sahip fonksiyonel bir nanoparçacık yapı oluşturulmuştur.

Verim: %87, FT-IR (cm⁻¹): 1061 cm⁻¹ (Si-O-Si), 794 cm⁻¹ (Si-O), 444 cm⁻¹ (Fe-O).

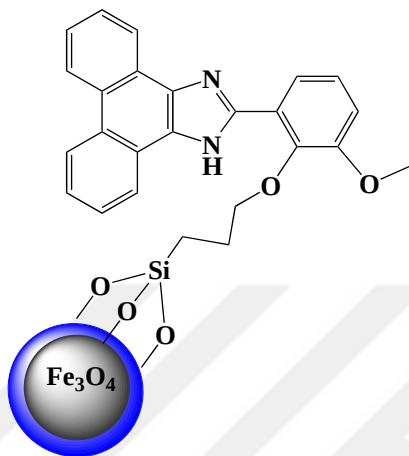
4.9. Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@2 Sentezi



Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS (1.0 g) susuz tolüen (50 mL) içerisinde homojen bir çözelti elde edilene kadar ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra **2** (1.00 mmol 312.37 mg) çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@2 nanoparçacıkları manyetik bir kuvvet yardımıyla çözelti içerisinde ayrıştırılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez tolüen ile yıkanarak yan ürünlerden arındırılmış ve vakum altında kurutularak saf Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@2 elde edilmiştir.

Bu işlem sonucunda $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparçacıkları ile **2** başarıyla bağlanarak hem manyetik özelliklere hem de organik işlevselliğe sahip bir nanoparçacık elde edilmiştir. Verim: %88, FT-IR (cm^{-1}): 1059 cm^{-1} (Si-O-Si), 794 cm^{-1} (Si-O), 441 cm^{-1} (Fe-O).

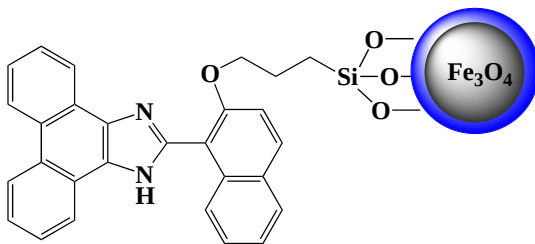
4.10. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@\mathbf{3}$ Sentezi



$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ (1.0 g) susuz toluen (50 mL) içerisinde ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılarak homojen bir çözelti elde edilmiştir. Daha sonra **3** (1.00 mmol 342.40 mg) çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Bu işlem sırasında **3**'ün hidroksil (-OH) ve metoksi grupları ile CPTMS'in kloropropil kısmı arasında kovalent bağlar oluşmuştur. Reaksiyon tamamlandıktan sonra $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@\mathbf{3}$ nanoparçacıkları manyetik bir kuvvet yardımıyla çözelti içerisinde ayrılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez toluen ile yıkanarak yan ürünlerden arındırılmış ve vakum altında kurutularak saf $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@\mathbf{3}$ elde edilmiştir.

Verim: %86, FT-IR (cm^{-1}): 1059 cm^{-1} (Si-O-Si), 796 cm^{-1} (Si-O), 443 cm^{-1} (Fe-O).

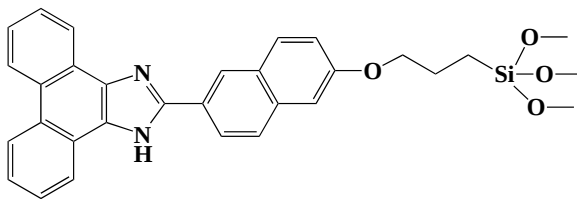
4.11. Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@4 Sentezi



Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS (1.0 g) susuz tolüen (50 mL) içerisinde ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılarak homojen bir çözelti elde edilmiştir. Daha sonra **4** (1.00 mmol 362.43 mg) çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Bu işlem sırasında **4**'ün hidroksil (-OH) grubu ile CPTMS'in kloropropil kısmı arasında kovalent bağlar oluşmuştur. Reaksiyon tamamlandıktan sonra Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@4 nanoparçacıkları manyetik bir kuvvet yardımıyla çözelti içerisinde ayrılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez tolüen ile yıkanarak yan ürünlerden arındırılmış ve vakum altında kurutularak saf Fe₃O₄@SiO₂@CPTMS@4 elde edilmiştir.

Verim: %87, FT-IR (cm⁻¹): 1055 cm⁻¹ (Si-O-Si), 796 cm⁻¹ (Si-O), 444 cm⁻¹ (Fe-O).

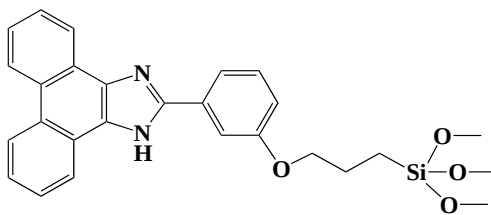
4.12. 2-(6-(3-(trimetoksi)propoksi)naftalin-2-yl)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@1 Sentezi



Öncelikle CPTMS (1.0 g) susuz tolüen (50 mL) içerisinde çözölmüş ve homojen bir çözelti elde edilene kadar ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından **1** (1.00 mmol 362.43 mg) bu çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Oluşan nanoparçacıklar süzölmüş, birkaç kez tolüen ile yıkanmış ve vakum altında kurutularak elde edilmiştir.

Verim: %89, FT-IR (cm⁻¹): 1598 cm⁻¹ (C=N), 1438 cm⁻¹ (NH), 1099 cm⁻¹ (Si-O-Si), 1018 cm⁻¹ (Ar-O-C), 749 cm⁻¹ (Si-O).

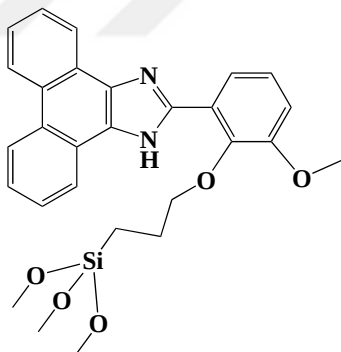
4.13. 2-(3-(3-(trimetoksi)propoksi)fenil)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@2 Sentezi



Öncelikle CPTMS (1.0 g) susuz tolüen (50 mL) içerisinde çözölmüş ve homojen bir çözelti elde edilene kadar ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından **2** (1.00 mmol 312.37 mg) bu çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Oluşan nanoparçacıklar süzölmüş, birkaç kez tolüen ile yıkanmış ve vakum altında kurutulularak elde edilmiştir.

Verim: %88, FT-IR (cm⁻¹): 1592 cm⁻¹ (C=N), 1461 cm⁻¹ (NH), 1123 cm⁻¹ (Si-O-Si), 1037 cm⁻¹ (Ar-O-C), 750 cm⁻¹ (Si-O).

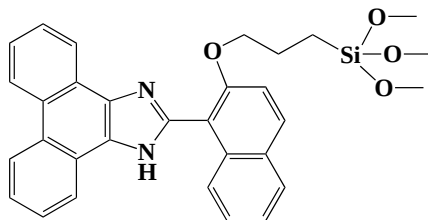
4.14. 2-(3-(3-(trimetoksi)propoksi)fenil)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@3 Sentezi



Öncelikle CPTMS (1.0 g) susuz tolüen (50 mL) içerisinde çözölmüş ve homojen bir çözelti elde edilene kadar ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından **3** (1.00 mmol 342.40 mg) bu çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Oluşan nanoparçacıklar süzölmüş, birkaç kez tolüen ile yıkanmış ve vakum altında kurutulularak elde edilmiştir.

Verim: %87, FT-IR (cm⁻¹): 1595 cm⁻¹ (C=N), 1413 cm⁻¹ (NH), 1120 cm⁻¹ (Si-O-Si), 1054 cm⁻¹ (Ar-O-C), 750 cm⁻¹ (Si-O).

4.15. 2-(3-(3-(trimetoksi)propoksi)fenil)-1H-fenantro[9,10-d]imidazol, CPTMS@4 Sentezi



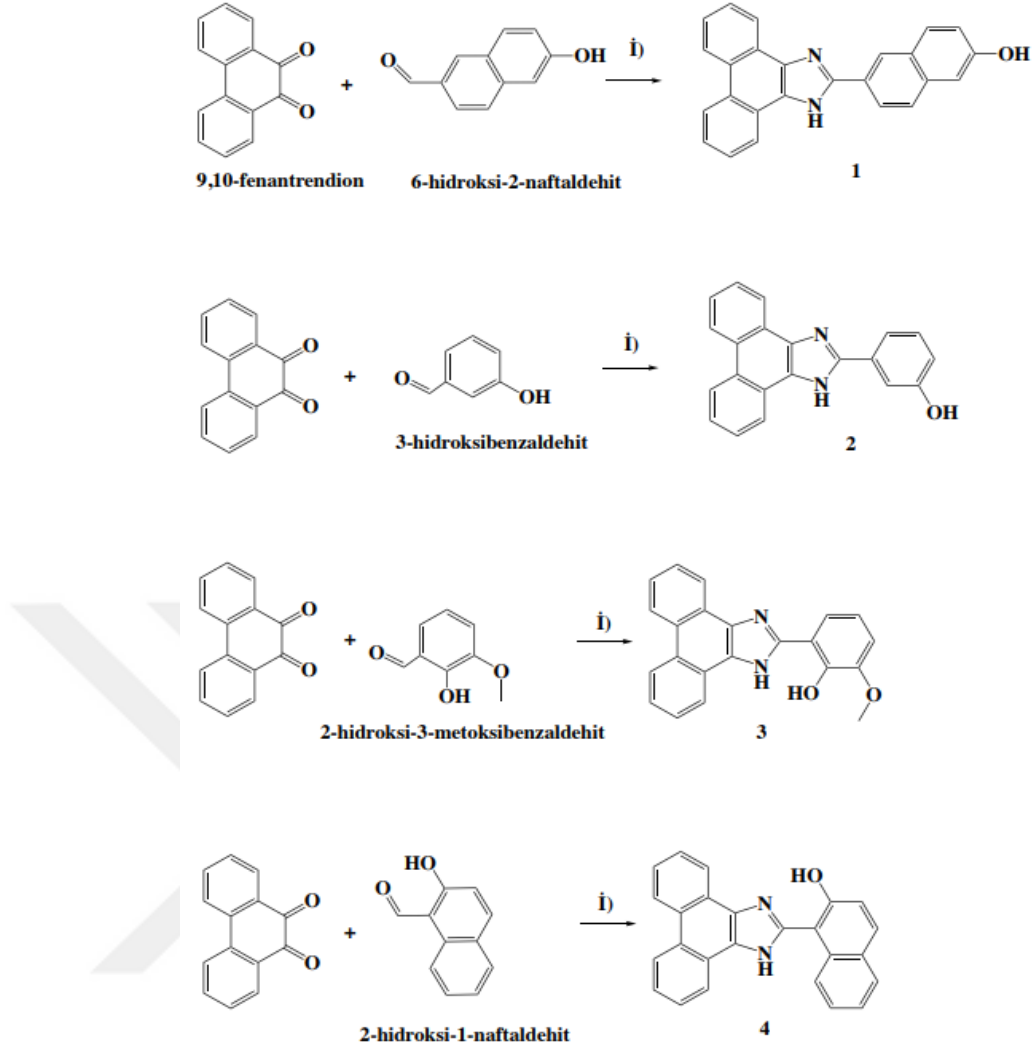
Öncelikle CPTMS (1.0 g) susuz toluen (50 mL) içerisinde çözölmüş ve homojen bir çözelti elde edilene kadar ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından **4** (1.00 mmol 362.43 mg) bu çözeltiye eklenmiş ve karışım 80°C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Nanoparçacıklar birkaç kez toluen ile yıkanmış ve vakum altında kurutularak elde edilmiştir.

Verim: %86, FT-IR (cm⁻¹): 1654 cm⁻¹ (C=N), 1420 cm⁻¹ (NH), 1152 cm⁻¹ (Si-O-Si), 1061 cm⁻¹ (Ar-O-C), 760 cm⁻¹ (Si-O).

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

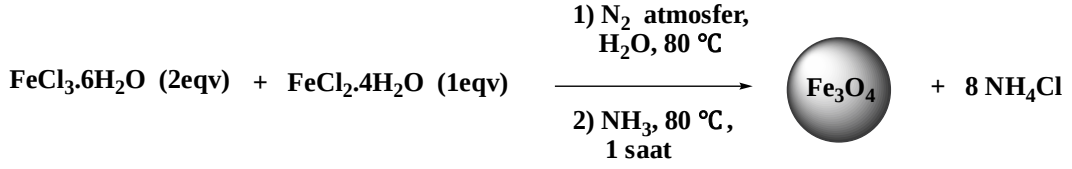
5.1. Fenantren-İmidazol Türevi Moleküllerin Sentez Metotları ve Mekanizmaları

Bu çalışmada ana başlangıç maddesi olarak 9,10-fenantrendion kullanılmıştır. OH-uçlu Fenantren-İmidazol türevlerinin sentezi 9,10-fenantrendion ile aromatik aldehitlerin (6-hidroksi-2-naftaldehit, 3-hidroksibenzalehit, 2-hidroksi-3-metoksibenzaldehit, 2-hidroksi-1-naftaldehit) uygun bir ortamda tepkimeye girmesiyle gerçekleştirilmiştir. Tepkime amonyum asetat ve glasyal asetik asit varlığında geri soğutucu altında yürütülmüştür. Bu süreçte 9,10-fenantrendion'un elektrofilik karbonil grupları aromatik aldehitlerin kimyasal olarak aktif bölgeleriyle etkileşime girerek tepkimenin temel taşı olmuştur. Amonyum asetat ise imidazol halkasının kapanması için gerekli azot kaynaklarını sağlamış ve tepkimenin tamamlanmasını desteklemiştir. Tepkime mekanizması önce aromatik aldehitlerin 9,10-fenantrendion ile birleşmesi ardından da halkalaşma ile imidazol halkasının oluşmasını içermektedir. Tepkime sırasında OH grupları hedef bileşiklerin uç bölgelerinde yer almış ve bu bileşiklerin kimyasal özelliklerini zenginleştirmiştir. Sonuçta yüksek saflıkta ve kararlı yapıda OH uçlu Fenantren-İmidazol türevleri elde edilmiştir (Şekil 5.1). Hedef organik bileşiklerin saflığı erime noktası ölçümü ve spektroskopik analizler (FT-IR ve ¹H-NMR ve ¹³C-NMR) ile doğrulanmıştır. Elde edilen erime noktası değeri ve spektral veriler literatürde belirtilen değerlerle uyumlu bulunmuştur.



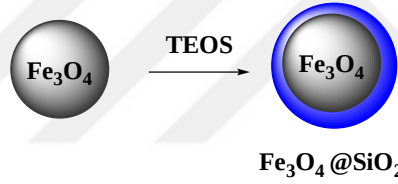
Şekil 5.1. OH-uçlu Fenantren-İmidazol türevlerinin sentez mekanizmaları. (i) Amonyum asetat, glasiyal asetik asit.

Süperparamanyetik manyetit (Fe_3O_4) nanoparçacıkları kontrollü bir kimyasal çöktürme yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tuzları 3:2 oranında karıştırılarak azot atmosferi altında saf su içerisinde 80°C sıcaklıkta çözülmüştür. Karışıma amonyak çözeltisi yavaşça eklenerek çöktürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon ortamında manyetik özelliklere sahip Fe_3O_4 nanoparçacıkları oluşmuş ardından bu ürün bir manyetik alan kullanılarak toplanmış ve saflaştırılmıştır. Oluşan nanoparçacıklar kurutulup yapılandırılarak sonraki işlemlere hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.2).



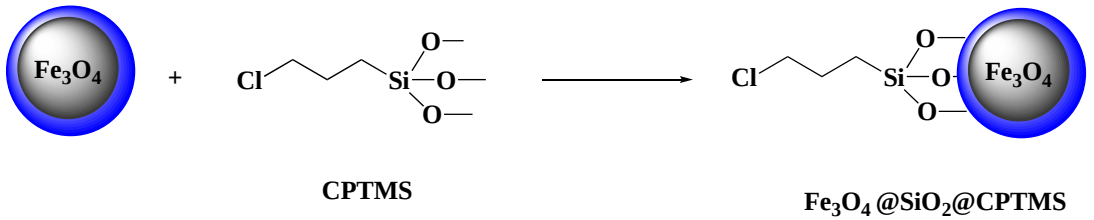
Şekil 5.2. Süperparamanyetik manyetit (Fe_3O_4) nanoparçacık sentezi.

Silika kaplı manyetik nanoparçacıklar ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) manyetit nanoparçacıklarının yüzeyine silika kaplama uygulanarak hazırlanmıştır. Fe_3O_4 nanoparçacıkları Tetraetilortosilikat (TEOS) kullanılarak sol-jel yöntemiyle kaplanmıştır. Bu süreçte Fe_3O_4 nanoparçacıkları etanol saf su ve amonyak çözeltisi içerisinde homojenize edilmiştir. Daha sonra TEOS eklenerek silika tabakası yüzeyde kontrollü bir şekilde oluşturulmuştur. Son ürün santrifüj ve yıkama işlemlerinin ardından kurutulmuş ve incelemeye hazır hale getirilmiştir. Silika kaplama nanoparçacıkların yüzey özelliklerini geliştirerek daha kararlı ve işlevsel hale gelmesini sağlamıştır (Şekil 5.3).



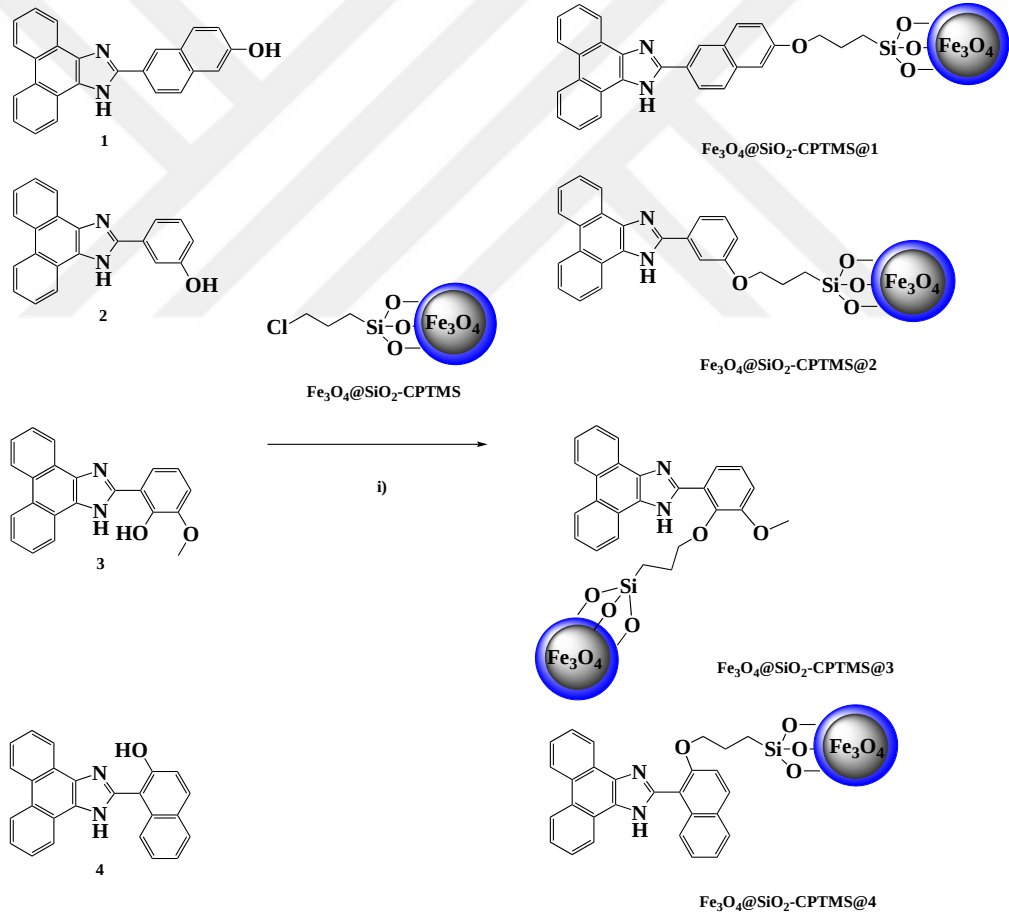
Şekil 5.3. Silika kaplı manyetik nanoparçacığın ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$) sentezi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ nanoparçacıklarının sentezinde silika kaplı Fe_3O_4 nanoparçacıklarının yüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Yüzey modifikasyonu için (3-kloropropil)trimetoksisilan (CPTMS) kullanılmıştır. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ nanoparçacıkları etanol ve su karışımı içerisinde çözülmüş ve karışıma CPTMS eklenmiştir. Karışım ısıtma altında sürekli karıştırılarak reaksiyonun tamamlanması sağlanmıştır. CPTMS ile kaplama işlemi nanoparçacıkların yüzeyine reaktif gruplar ekleyerek fonksiyonel bir yapı oluşturmuştur (Şekil 5.4).



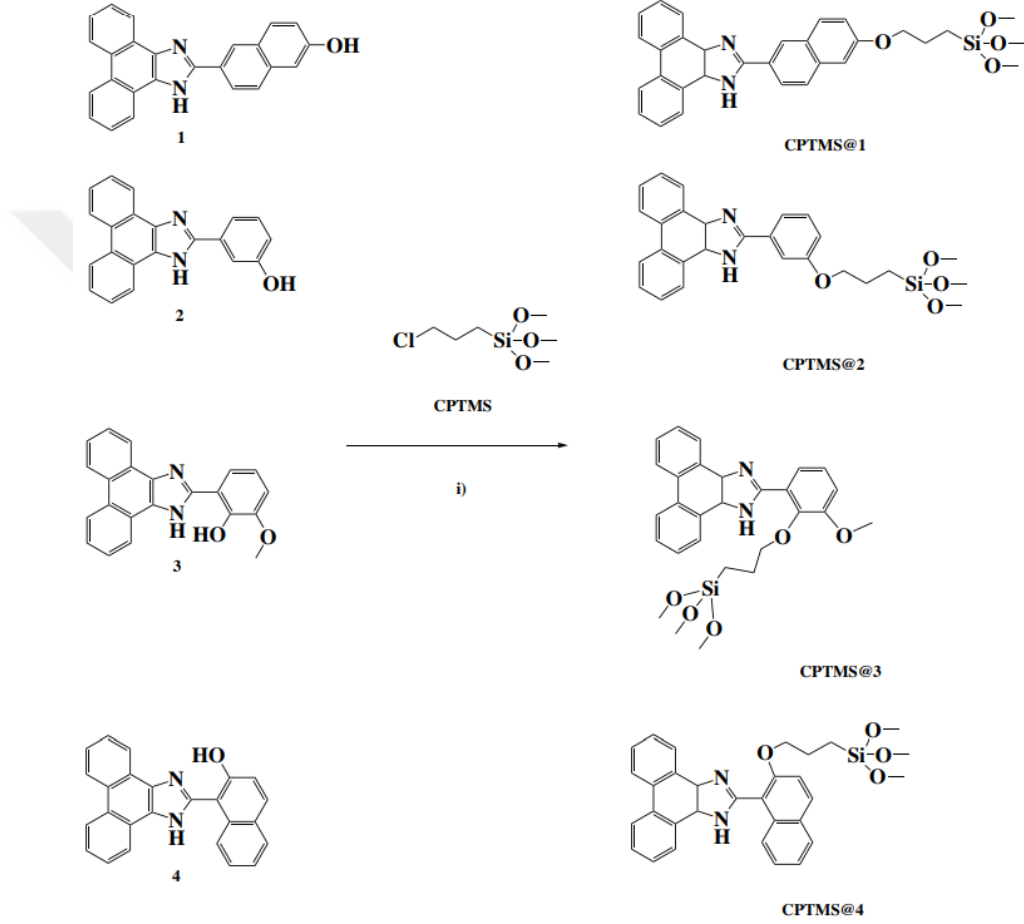
Şekil 5.4. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ nanoparçacığının sentezi.

Manyetik $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ nanoparçacıklarının sentezinde öncelikle CPTMS ile modifiye edilmiş silika kaplı manyetik nanoparçacıklar ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$), Fenantren-İmidazol türevleri ile tepkimeye sokulmuştur. Fenantren-İmidazol türevlerinin (1/2/3/4) yüzeydeki OH gruplarıyla, CPTMS ile modifiye edilmiş silika kaplı manyetik nanoparçacıkların klor uçlarının reaksiyona girmesi sonucu eterik bağların oluşturulmasıyla bu reaksiyon mekanizmaları gerçekleşmiştir. Reaksiyon koşulları tepkimenin seçici bir şekilde gerçekleşmesini sağlamış ve her bir türev yüzeye başarılı bir şekilde bağlanmıştır (Şekil 5.5). Nanoparçacıkların yapısı, boyutları, manyetik özellikleri çeşitli tekniklerle aydınlatılmıştır. Elde edilen Fe_3O_4 nanoparçacıkları literatürde belirtilen manyetik ve fiziksel özelliklere uygun bulunmuştur (Shi ve ark., 2014).



Şekil 5.5. Manyetik $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ nanoparçacıklarının sentez mekanizması.

CPTMS@1/2/3/4 nanoparçacıklarının sentezi; klor uçlu CPTMS (3-kloropropiltrimetoksisilan) ve farklı OH uçlu Fenantren-İmidazol türevlerinin (1/2/3/4) bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Reaksiyonlar uygun çözücüler ve sıcaklık koşullarında yürütülmüş her bir Fenantren-İmidazol türevinin yüzeye etkili bir şekilde bağlanması sağlanmıştır. Reaksiyonlar genellikle ısıtma altında ve sürekli karıştırma ile gerçekleştirilmiş yüksek verim sağlanmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. CPTMS@1/2/3/4 nanoparçacıklarının sentez mekanizması.

5.2. Fenantren-İmidazol Türevi Moleküllerin Spektroskopik Yöntemler ile Karakterizasyonu

Tez çalışmasında sentezlenen OH uçlu Fenantren-İmidazol türevi moleküller **1,2,3** ve **4** FT-IR ve ^1H -NMR ve ^{13}C -NMR Spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Çalışmada elde edilen **1**'in FT-IR analizi (Spektrum 1) kimyasal yapısını ortaya koyan karakteristik absorpsiyon bantlarını belirlemiştir. Spektrumda 3462 cm^{-1} dalga boyunda gözlemlenen pik serbest O-H gruplarının gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. Bu durum yapısında alkol veya fenol gibi polar fonksiyonel grupların bulunduğunu göstermektedir. 3051 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1615 cm^{-1} dalga boyundaki pik C=N gerilme titreşimlerini göstermektedir. Bu pik **1**'in yapısında fenantren ve imidazol halkaları gibi poliaromatik yapılar bulunduğunu doğrulamaktadır. 1605 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme piki ve 1520 cm^{-1} dalga boylarında gözlenen pikler C=C gerilme titreşimleridir. 1480 cm^{-1} dalga boyundaki pik O-H eğilme piki olup OH uçlarının varlığını doğrulamaktadır. 1405 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler C-N gerilme titreşimlerine işaret etmekte olup **1**'in yapısında amin gruplarının bulunduğunu göstermektedir. 1251 cm^{-1} dalga boylarında tespit edilen pikler C-O gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu durum **1**'in yapısında alkol gibi C-O bağları içeren fonksiyonel grupların bulunduğunu göstermektedir. 750 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler ise aromatik C-H bükülme titreşimlerine işaret etmektedir ve bu da **1**'in aromatik yapılar içerdiğini doğrulamaktadır. Ayrıca bu pik fenantren düzlem dışı eğilme için de spesifiktir(Jung ve ark., 2005).

2'nin FT-IR analizini inceleyecek olursak (Spektrum 2) spektrumda 3420 cm^{-1} dalga boyunda gözlemlenen pik serbest OH gruplarının gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. Bu **2**'nin yapısında alkol veya fenol gibi polar fonksiyonel grupların bulunduğunu göstermektedir. 3057 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1656 cm^{-1} dalga boyundaki pik C=N gerilme titreşimlerini göstermektedir. Bu pik **2**'nin yapısında fenantren ve imidazol halkaları gibi poliaromatik yapılar bulunduğunu doğrulamaktadır. 1599 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme piki ve 1536 cm^{-1} dalga boylarında gözlenen pikler C=C gerilme titreşimleridir. 1484 cm^{-1} dalga boyundaki pik O-H eğilme piki olup OH uçlarının varlığını doğrulamaktadır. 1421 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler C-N gerilme titreşimlerine işaret etmekte olup **2**'nin yapısında amin gruplarının bulunduğunu

göstermektedir. 1244 cm^{-1} dalga boylarında tespit edilen pikler C-O gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu durum **2**'nin yapısında alkol gibi C-O bağları içeren fonksiyonel grupların bulunduğunu göstermektedir. 754 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler ise aromatik C-H bükülme titreşimlerine işaret etmektedir ve bu da **2**'nin aromatik yapılar içerdiğini doğrulamaktadır. Ayrıca bu pik fenantren düzlem dışı eğilme için de spesifikdir.

3'ün FT-IR analizi (Spektrum 3) incelemesinde spektrumda 3499 cm^{-1} dalga boyunda gözlemlenen pik serbest O-H gruplarının gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. Bu **3**'ün yapısında alkol veya fenol gibi polar fonksiyonel grupların bulunduğunu göstermektedir. 3199 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1706 cm^{-1} dalga boyundaki pik C=N gerilme titreşimlerini göstermektedir. Bu pik **3**'ün yapısında fenantren ve imidazol halkaları gibi poliaromatik yapılar bulunduğunu doğrulamaktadır. 1652 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme piki ve 1613 cm^{-1} dalga boylarında gözlenen pikler C=C gerilme titreşimleridir. 1566 cm^{-1} dalga boyundaki pik O-H eğilme piki olup OH uçlarının varlığını doğrulamaktadır. 1457 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler C-N gerilme titreşimlerine işaret etmekte olup **3**'ün yapısında amin gruplarının bulunduğunu göstermektedir. 1247 cm^{-1} dalga boylarında tespit edilen pikler C-O gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1056 cm^{-1} dalga boyundaki pik Ar-O-CH₂ spesifik piki olup yapıdaki metoksi varlığını kanıtlamaktadır. 754 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler ise aromatik C-H bükülme titreşimlerine işaret etmektedir ve bu da **3**'ün aromatik yapılar içerdiğini doğrulamaktadır. Ayrıca bu pik fenantren düzlem dışı eğilme için de spesifikdir.

4'ün FT-IR analizi (Spektrum 4) incelendiğinde spektrumda 3457 cm^{-1} dalga boyunda gözlemlenen pik serbest O-H gruplarının gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. Bu **4**'ün yapısında alkol veya fenol gibi polar fonksiyonel grupların bulunduğunu göstermektedir. 3050 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1653 cm^{-1} dalga boyundaki pik C=N gerilme titreşimlerini göstermektedir. Bu pik **4**'ün yapısında fenantren ve imidazol halkaları gibi poliaromatik yapılar bulunduğunu doğrulamaktadır. 1616 cm^{-1} dalga boyundaki pik N-H gerilme piki ve 1560 cm^{-1} dalga boylarında gözlenen pikler C=C gerilme titreşimleridir. 1518 cm^{-1} dalga boyundaki pik O-H eğilme piki olup OH uçlarının varlığını doğrulamaktadır. 1467 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler C-N gerilme titreşimlerine işaret etmekte olup **4**'ün yapısında amin gruplarının bulunduğunu göstermektedir. 1249 cm^{-1} dalga boylarında tespit edilen pikler C-O gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir.

746 cm^{-1} dalga boylarında gözlemlenen pikler ise aromatik C-H bükülme titreşimlerine işaret etmektedir ve bu da **4**'ün aromatik yapılar içerdiğini doğrulamaktadır. Ayrıca bu pik fenantren düzlem dışı eğilme için de spesifikdir.

1'in ^1H -NMR spektrumunda (Spektrum 14) yapıdaki Fenantren-İmidazol'e ait OH grubunun kimyasal kayma değeri 13,60 ppm' de görülür. NH grubuna ait kimyasal kayma değeri 10,80 ppm' dir. 7,1 ppm-9,0 ppm aralığında görülen kimyasal kayma değerleri aromatik gruplara aittir. Bu kimyasal kayma değerleri **1**'in oluştuğunu doğrular. **2**'nin ^1H -NMR spektrumunda (Spektrum 15) yapıdaki Fenantren-İmidazol'e ait OH grubunun kimyasal kayma değeri 13,39 ppm' de görülür. NH grubuna ait kimyasal kayma değeri 12,00 ppm' dir. 7,3 ppm-9,8 ppm aralığında görülen kimyasal kayma aromatik gruplara aittir. Bu kimyasal kayma değerleri **2**'nin oluştuğunu doğrular. **3**'ün ^1H -NMR spektrumunda (Spektrum 16) yapıdaki Fenantren-İmidazol'e ait OH ve NH grubunun kimyasal kayma değeri 13,04 ppm' de görülmektedir. 6,8 ppm-8,99 ppm aralığında görülen kimyasal kayma aromatik gruplara aittir. 3,5 ppm' de görülen kimyasal kayma metoksi yapısındaki O-CH₃ grubuna aittir. Bu kimyasal kayma değerleri **3**'ün oluştuğunu doğrular. **4**'ün ^1H -NMR spektrumunda (Spektrum 17) yapıdaki Fenantren-İmidazol'e ait OH grubunun kimyasal kayma değeri 11,95 ppm' de görülür. NH grubuna ait kimyasal kayma değeri 10,98 ppm' dir. 7,40 ppm-8,90 ppm aralığında görülen kimyasal kayma aromatik gruplara aittir. Bu kimyasal kayma değerleri **4**'ün oluştuğunu doğrular.

1'in ^{13}C -NMR (DMSO-d₆) spektrumunda (Spektrum 18): δ (ppm)= 174 ppm'deki kayma imidazol beşli halkaya ait uç karbon, 155 ppm'deki kayma naftalin-OH bağındaki karbon, 120 ppm ve 110 ppm'deki kaymalar imidazol beşli halkanın fenantrene bağlandığı iki karbonun varlığını açıkça göstermektedir. **2**'nin ^{13}C -NMR (DMSO-d₆) spektrumunda (Spektrum 19): δ (ppm)= 172 ppm'deki kayma imidazol beşli halkaya ait uç karbon, 158 ppm'deki kayma benzen-OH bağındaki karbon, 118 ppm ve 114 ppm'deki kaymalar imidazol beşli halkanın fenantrene bağlandığı karbonların varlığını açıkça göstermektedir. **3**'ün ^{13}C -NMR (DMSO-d₆) spektrumunda (Spektrum 20): δ (ppm)= 173 ppm'deki kayma imidazol beşli halkaya ait uç karbon, 148 ppm ve 147 ppm'deki kayma benzen-OH bağındaki karbon, 114 ppm ve 113 ppm'deki kaymalar imidazol beşli halkanın fenantrene bağlandığı iki karbon ve son olarak 55 ppm'deki kayma O-CH₃ metoksi karbonunun varlığını açıkça göstermektedir. **4**'ün ^{13}C -NMR (DMSO-d₆) spektrumunda (Spektrum 21): δ (ppm)= 172 ppm'deki kayma imidazol beşli halkaya ait uç karbon, 165 ppm'deki kayma naftalin-OH

bağındaki karbon, 120 ppm ve 112 ppm'deki kaymalar imidazol beşli halkanın fenantrene bağlandığı karbonların varlığını açıkça göstermektedir. Bu kimyasal kaymalar Fenantren-İmidazol oluşumlarını kanıtlamaktadır.

5.3. Süperparamanyetik Demiroksit Nanoparçacıkların Karakterizasyonu

Sentezlenen nanoparçacıklar FT-IR Spektroskopisi, STEM Görüntüleme, FE-SEM Görüntüleme, EDX Görüntüleme, DSC ve TGA Analizleri, XRD ve VSM ile karakterize edilmiştir.

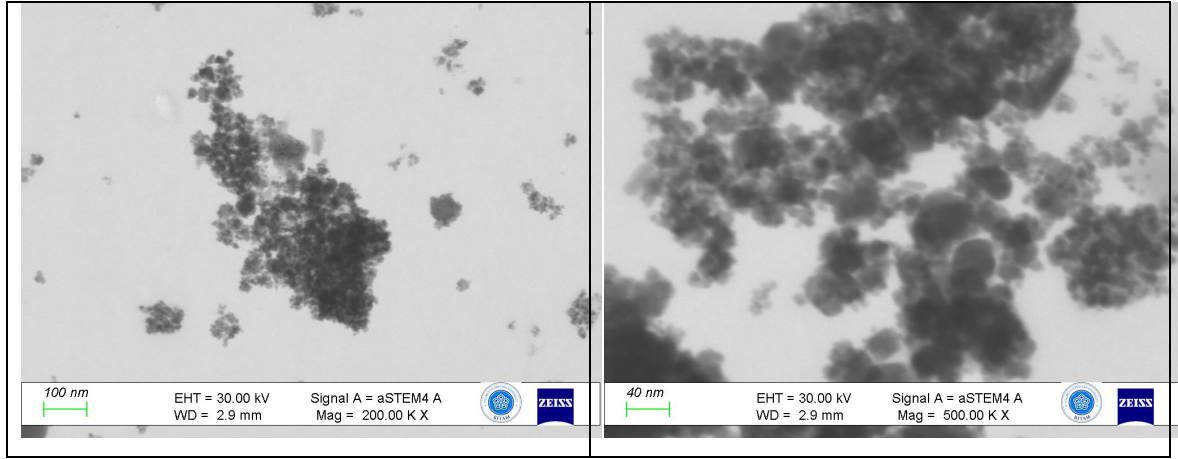
5.3.1. FT-IR Spektroskopisi

CPTMS@1/2/3/4 nanoparçacıklarının FT-IR spektrumları Spektrum 5, 6, 7, 8' de verilmiştir. Spektrumlardaki Si-O-Si pikleri sırasıyla: 1099 cm^{-1} , 1123 cm^{-1} , 1120 cm^{-1} , 1152 cm^{-1} 'de görülmektedir; Ar-O-C pikleri sırasıyla: 1018 cm^{-1} , 1037 cm^{-1} , 1054 cm^{-1} , 1061 cm^{-1} 'de görülmektedir; Si-O pikleri de sırasıyla: 749, 750, 750, ve 760 cm^{-1} 'da görülmektedir. Bu analizlerdeki Ar-O-C pikleri CPTMS@1/2/3/4'ün yapılarının oluştuğunu göstermektedir.

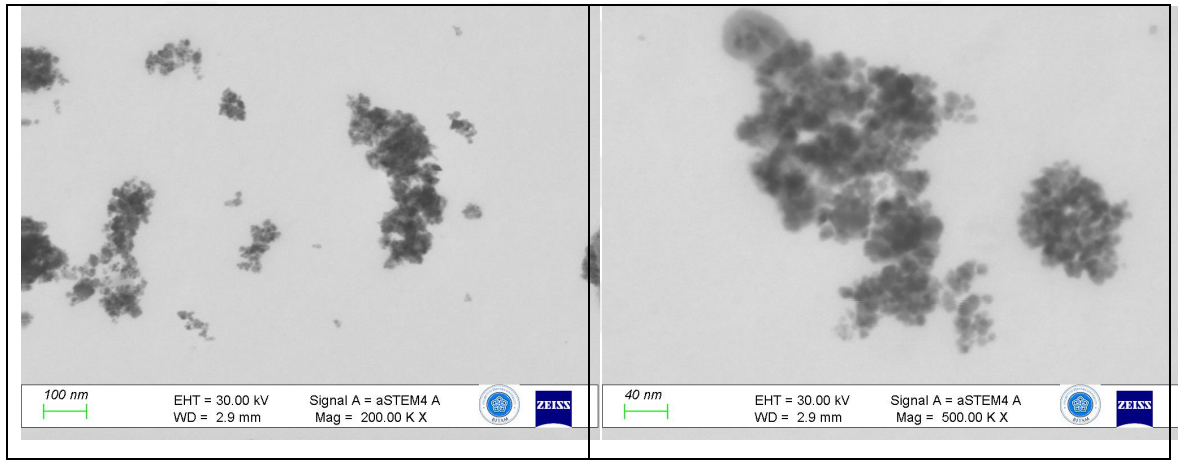
Süperparamanyetik demiroksit nanoparçacıkların hepsinde 3300-3500 cm^{-1} aralığında gözlemlenen geniş bant molekül yüzeyinde yer alan hidroksil (-OH) gruplarının varlığını veya higroskopik nemin varlığını işaret etmektedir. 2800-3000 cm^{-1} bölgesinde yer alan pikler C-H bağlarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Bu titreşimler CPTMS ((3-kloropropil)trimetoksisilan) yapısına bağlı alkil gruplarını ve molekülde bulunan organik zincirlerin varlığını desteklemektedir. Ayrıca bu pikler SiO_2 destekli yapıların bağlanma özelliklerini göstermektedir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ 'nin FT-IR analizi (Spektrum 9) kimyasal yapısının karakteristik özelliklerini ortaya koymaktadır. 1066 cm^{-1} 'de Si-O-Si pikleri, 796 cm^{-1} 'de Si-O pikleri, 448 cm^{-1} 'de Fe-O pikleri gözlenmiştir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ 'ün FT-IR analizleri Spektrum 10, 11, 12, 13'de görülmektedir. Sırasıyla süperparamanyetik demiroksit nanoparçacıklarda; 1061 cm^{-1} , 1059 cm^{-1} , 1059 cm^{-1} , 1055 cm^{-1} 'de Si-O-Si pikleri, 794 cm^{-1} , 794 cm^{-1} , 796 cm^{-1} , 796 cm^{-1} 'de Si-O pikleri, 444 cm^{-1} , 441 cm^{-1} , 443 cm^{-1} , 444 cm^{-1} 'de Fe-O pikleri gözlenmiştir.

5.3.2. STEM Görüntüleme

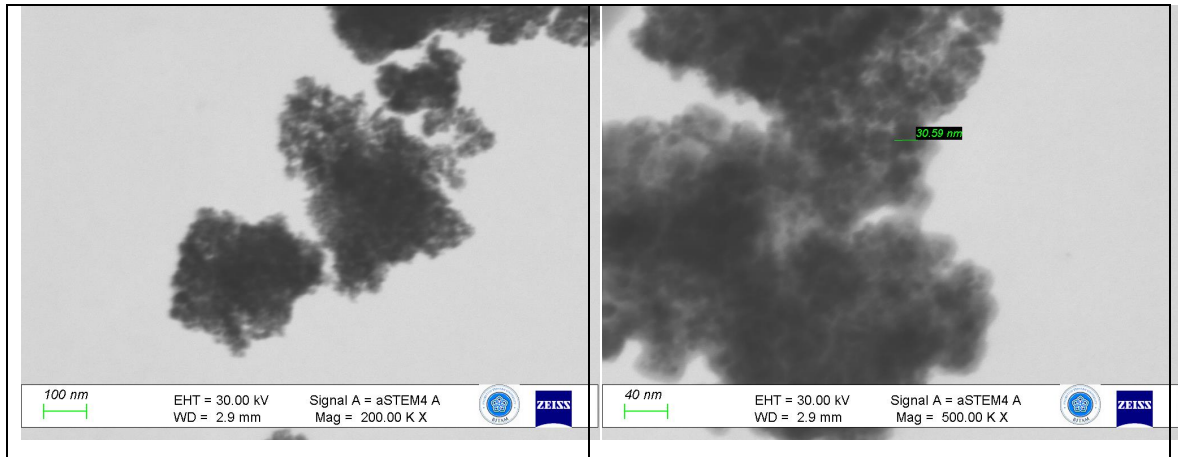
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ nanoparçacıklarının STEM görüntüleri (Şekil 5.7, 5.8, 5.9, 5.10) nanoparçacıkların morfolojisinin küresel olduğunu ve yapıdaki homojenliği detaylı bir şekilde gözler önüne sermektedir. STEM görüntülerinde Fe_3O_4 manyetik çekirdeklerinin düzenli bir şekilde SiO_2 ile kaplandığı ve yüzeyde düzgün bir dağılım gösterdiği açıkça görülmektedir. Fe_3O_4 çekirdeklerinin yüksek kontrastlı olarak gözlemlenmesi elektron ışınlarına karşı daha fazla saçılma özelliğine sahip olan demir atomlarının yoğunluğunu ortaya koymaktadır. SiO_2 kaplaması ise daha düşük kontrastlı ve amorf bir yapıda olup Fe_3O_4 çekirdeğini düzgün bir şekilde sararak yapıyı stabilize etmektedir. STEM görüntülerinde çekirdek-kaplama arasındaki net ayrım SiO_2 'nin homojen bir kaplama sağladığını ve bu kaplamanın Fe_3O_4 çekirdeklerinin yüzeyine güçlü bir şekilde tutunduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca STEM görüntülerinde görülen parçacık boyutu dağılımı da oldukça homojen olup yaklaşık 10-30 nm aralığında gözlemlenmiştir. Bu durum sentezin başarılı olduğunu ve nanoparçacıkların birbirleriyle agregasyon göstermediğini dolayısıyla homojen bir yapı sağlandığını ortaya koymaktadır. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ yapısındaki CPTMS ve 1/2/3/4'ün varlığı STEM görüntülerinde doğrudan gözlemlenebilir olmamakla birlikte yüzeydeki kaplamanın pürüzsüz ve düzenli bir şekilde olması bu organik grupların başarılı bir şekilde yüzeye bağlandığını göstermektedir (Ángeles-Pascual ve ark., 2018). STEM görüntülerinde yüzeyde herhangi bir bozulma veya düzensiz yapı gözlemlenmemiş olup bu da kaplamanın sağlam ve homojen olduğunu kanıtlamaktadır. Bu bulgular sentez işleminin başarılı geçtiğini ve Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 ve CPTMS ile düzgün bir şekilde kaplandığını ve bu kaplamaların nanoparçacık yapının yüzeyinde güçlü bir şekilde tutunduğunu göstermektedir. STEM analizi Fe_3O_4 çekirdeği ile SiO_2 ve CPTMS kaplamaları arasındaki morfolojik bütünlüğü doğrulamak için kritik bir rol oynamıştır ve elde edilen sonuçlar nanoparçacıkların sentez işleminden sonra yüksek yapısal stabiliteye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Garcia-Osorio ve ark., 2021).



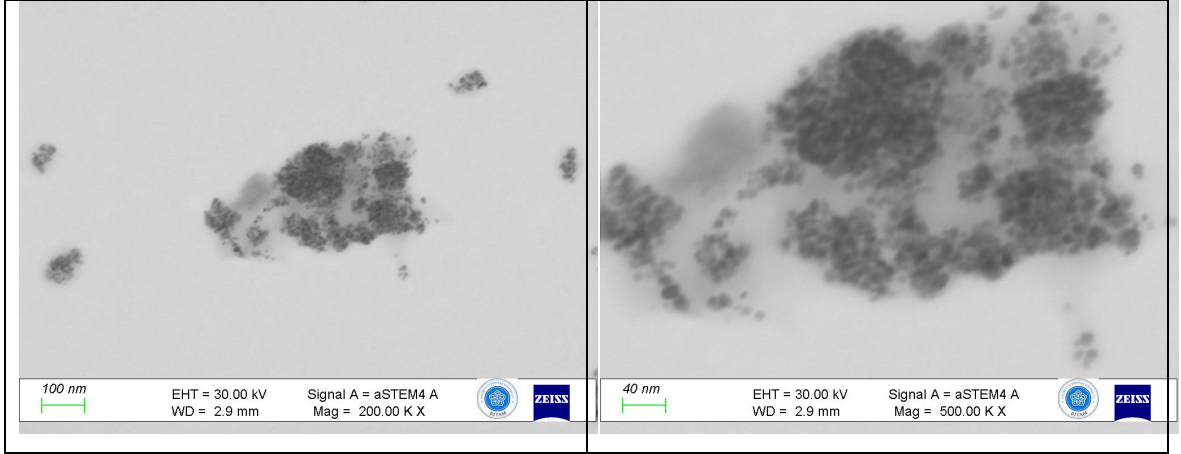
Şekil 5.7. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının STEM görüntüleri.



Şekil 5.8. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının STEM görüntüleri.



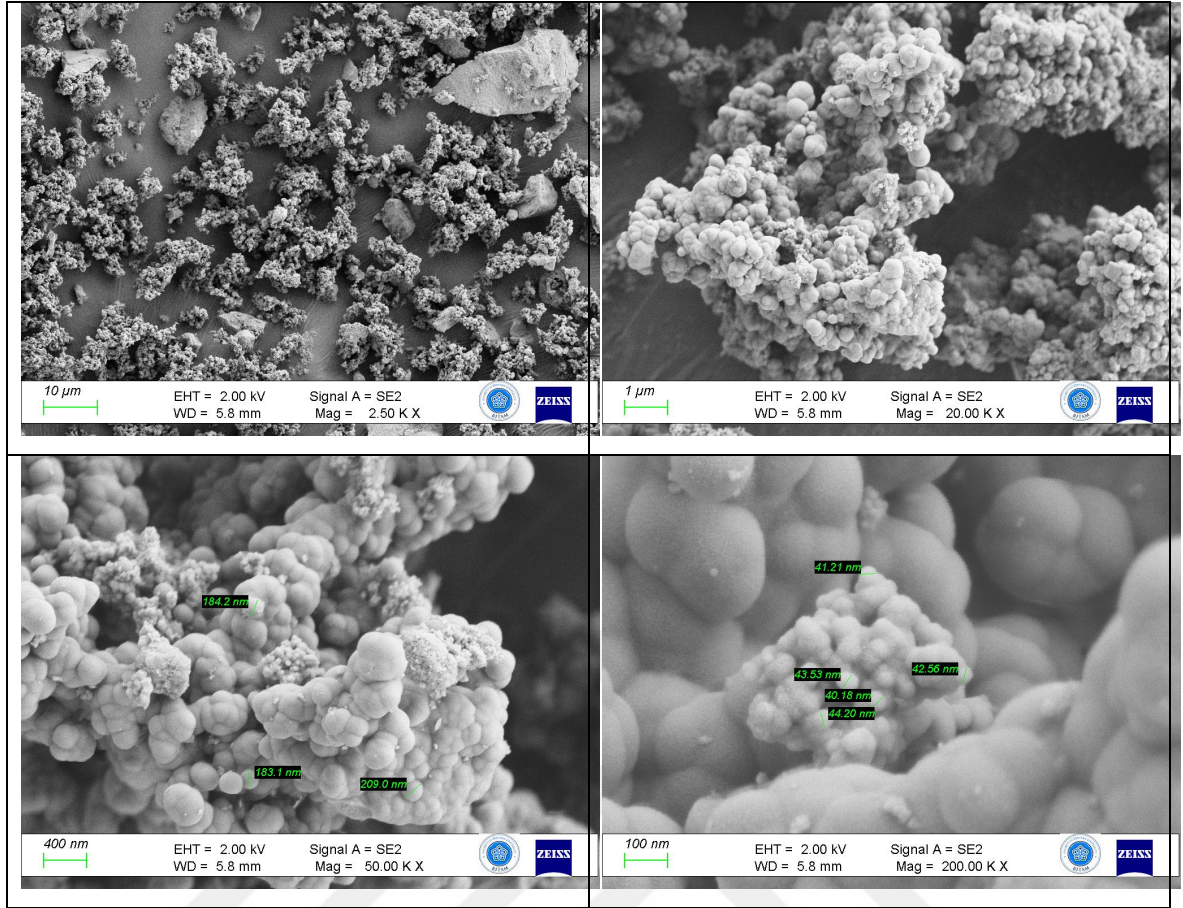
Şekil 5.9. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının STEM görüntüleri



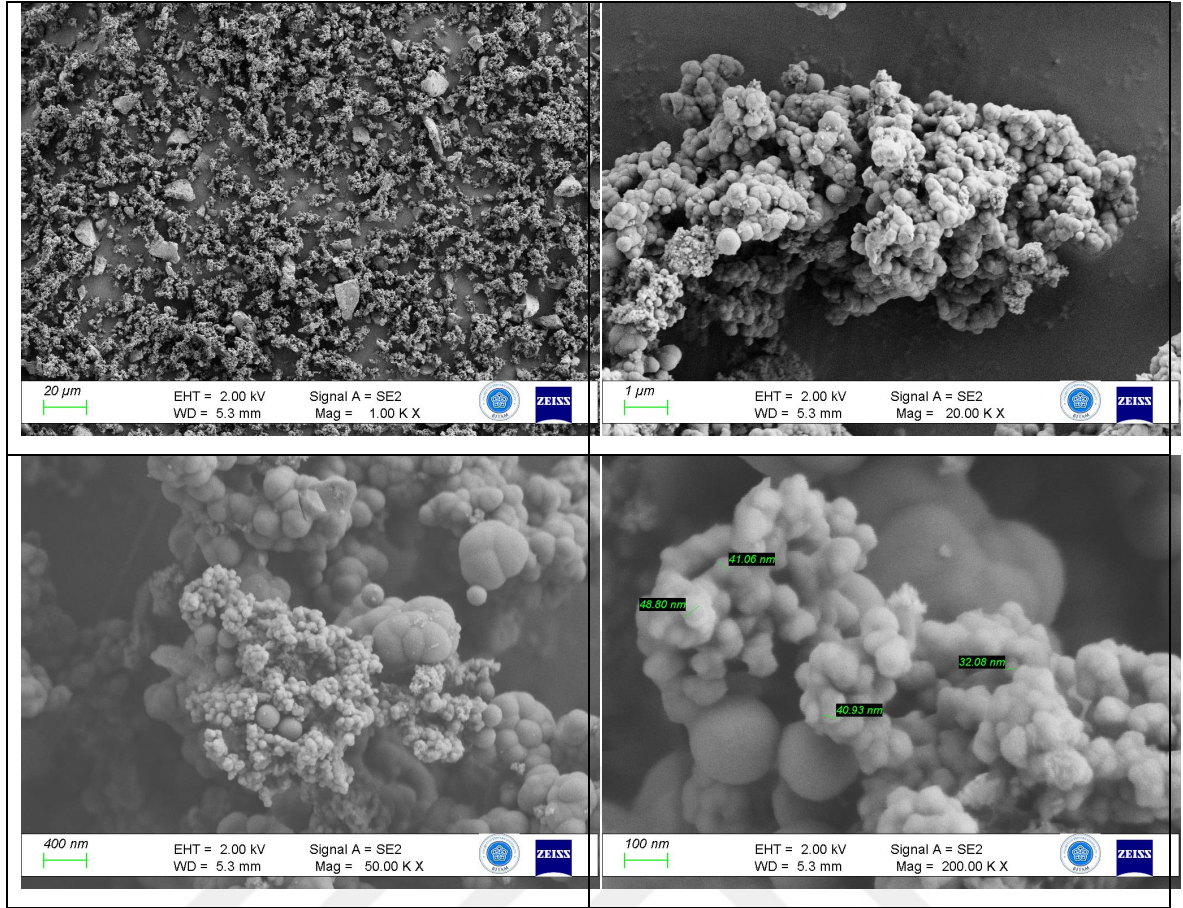
Şekil 5.10. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının STEM görüntüleri.

5.3.3. FE-SEM Görüntüleme

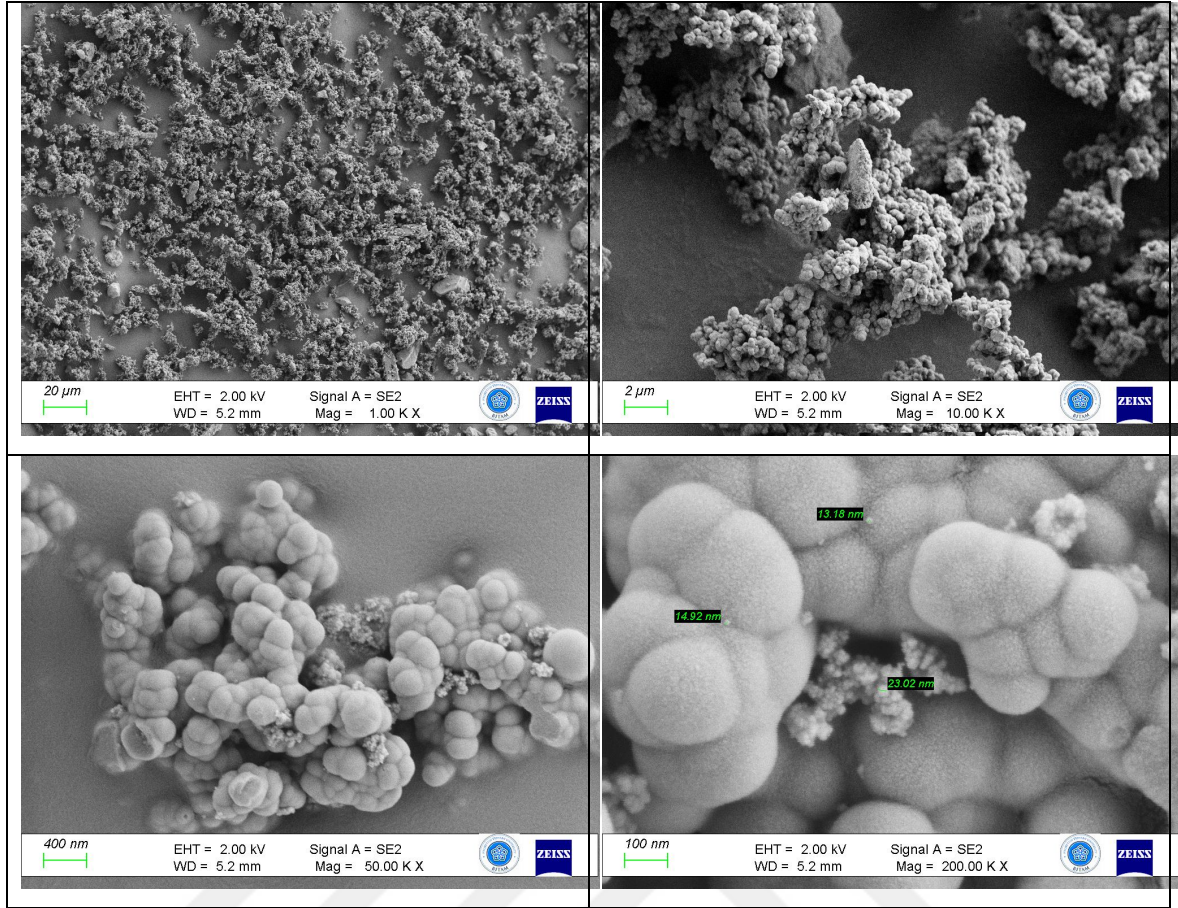
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ 'e ait FE-SEM analiz sonuçları (Şekil 5.11, 5.12, 5.13 ve 5.14) nanoparçacıkların yüzey morfolojisinin incelenmesinde önemli bilgiler sağlamıştır. Görüntülerde Fe_3O_4 manyetik çekirdeklerinin SiO_2 kaplamasıyla düzenli bir şekilde çevrelendiği ve yüzeyde homojen bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. FE-SEM görüntülerine bakıldığında sentezlenen nanoparçacıkların boyutları sırasıyla yaklaşık 40-44 nm, 32-41 nm, 13-23 nm, 24-29 nm arasında görülmüştür, bu boyut dağılımı sentez sürecinin kontrollü bir şekilde gerçekleştiğini ve agregasyonun önlenmiş olduğunu göstermektedir. Yüzeyde belirgin bir düzensizlik veya parçacık birikimi olmaması SiO_2 kaplamasının çekirdeklerle etkili bir şekilde bağlandığını ve homojen bir yüzey oluşturduğunu doğrulamaktadır. Yapılan FE-SEM analizi $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ 'ün yüzey kaplamasının düzgünlüğünü ve homojenliğini doğrulamakla kalmamış aynı zamanda kaplama işlemi sırasında parçacıkların boyutlarının eşit dağılım gösterdiğini de ortaya koymuştur. Bu morfolojik yapı nanoparçacıkların istenen özelliklere sahip olduğunu ve kaplama işleminin başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir (Yusuf ve ark., 2023). Nanoparçacıkların homojen dağılımı ve yüzeyin düzgünlüğü nanoparçacığın olası uygulamalarda yüksek performans sergileyeceğinin bir göstergesidir.



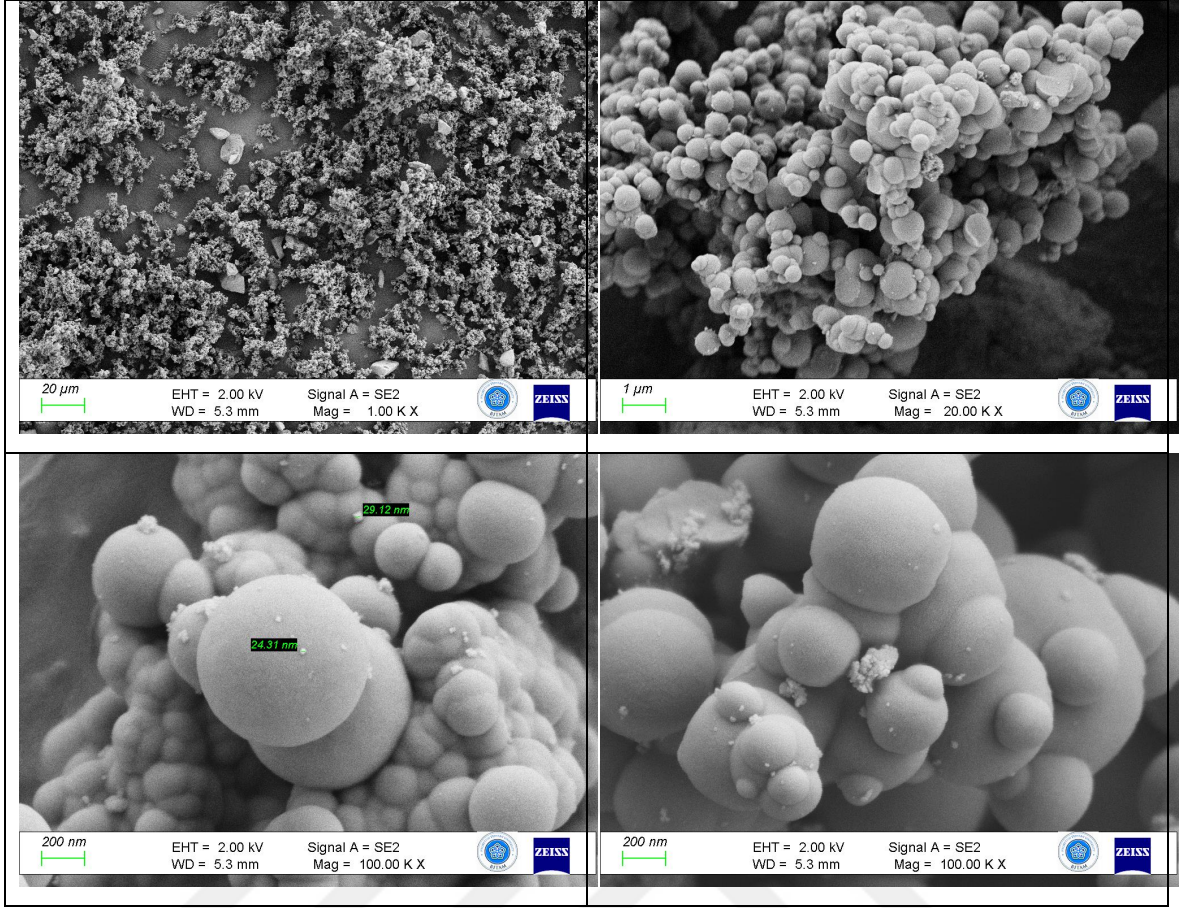
Şekil 5.11. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının FE-SEM görüntüleri.



Şekil 5.12. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının FE-SEM görüntüleri.



Şekil 5.13. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının FE-SEM görüntüleri.

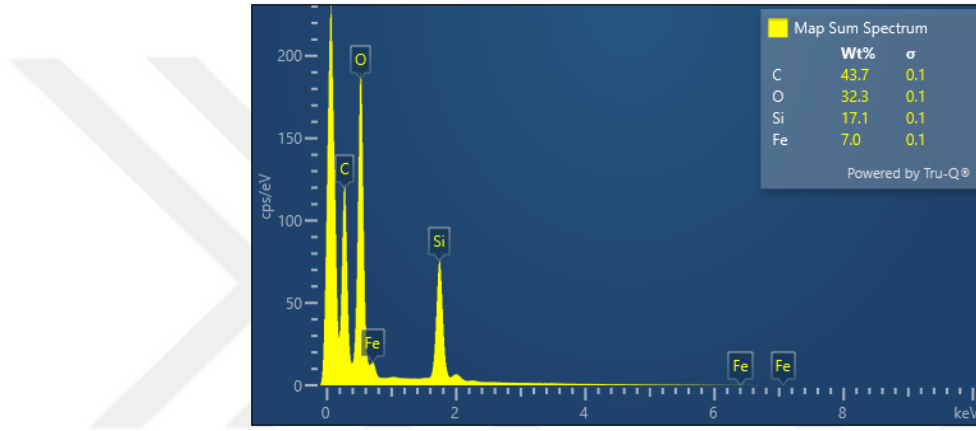


Şekil 5.14. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının Fe-SEM görüntüleri.

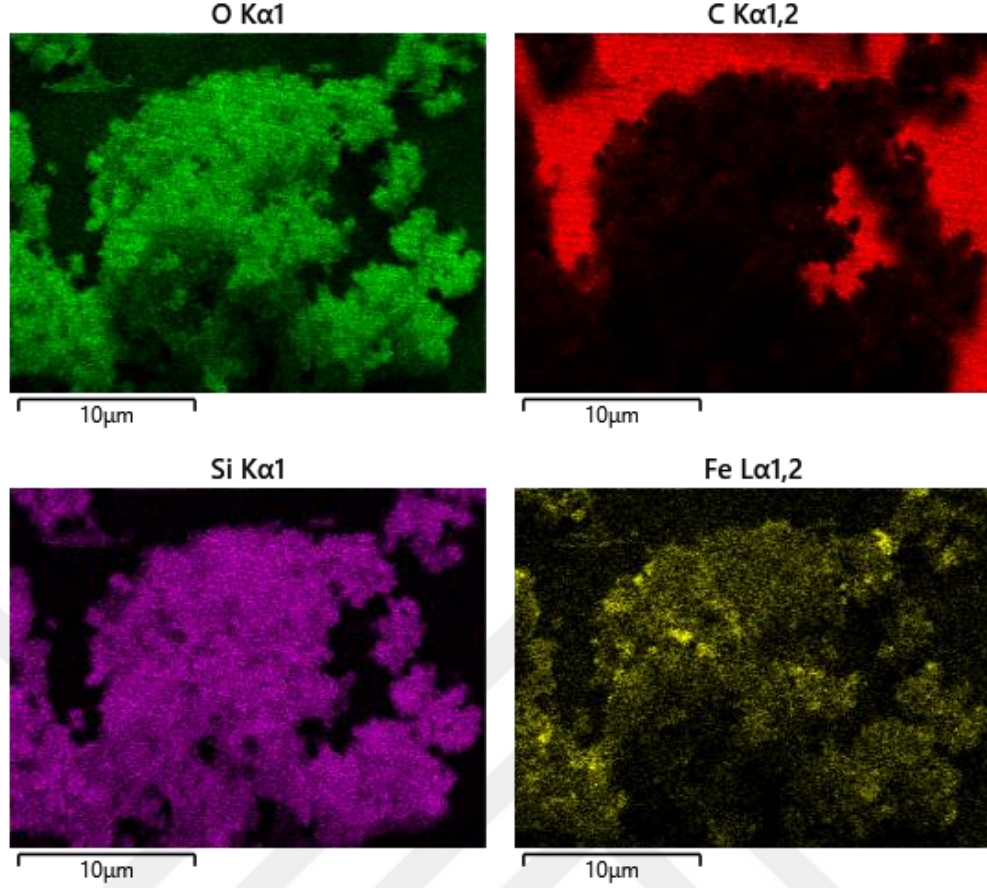
5.3.4. EDX Görüntüleme

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'e ait EDX analizi elementel bileşimini ortaya koymuştur (Şekil 5.15). Elde edilen spektrumda yüksek oranlarda karbon (C) oksijen (O) silisyum (Si) ve demir (Fe) elementleri tespit edilmiştir. Karbon oranı % 43.7 olarak belirlenmiştir ve bu yüzeyde bulunan organik kaplama maddesi CPTMS'den kaynaklanmaktadır. Bu oran CPTMS'in yüzeye başarılı bir şekilde bağlandığını ve organik kaplamanın etkin bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Oksijen oranı ise % 32.3 olup bu oksijen atomları hem SiO_2 kaplamasından hem de CPTMS'in yapısındaki oksijen gruplarından gelmektedir. Oksijenin bu kadar yüksek oranda bulunması SiO_2 kaplamanın başarılı bir şekilde Fe_3O_4 çekirdeklerini sardığını ve CPTMS'in de yüzeyde etkili bir şekilde bağlandığını doğrulamaktadır. Silisyum elementi % 17.1 oranında tespit edilmiştir. Bu SiO_2 kaplamanın Fe_3O_4 çekirdeklerine başarılı bir şekilde uygulanmış olduğunu göstermektedir. Silisyumun varlığı Fe_3O_4 çekirdeklerinin

düzgün bir şekilde kaplandığını ve yüzey modifikasyonunun etkili olduğunu göstermektedir. Demir oranı % 7.0 olarak belirlenmiştir ve bu oran Fe_3O_4 manyetik çekirdeklerinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen bu değer demir oksit çekirdeklerinin yapısında yer aldığını ve SiO_2 kaplamasının altında bulunduğunu göstermektedir. Genel olarak EDX analizi Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 ile homojen bir şekilde kaplandığını ve CPTMS'in yüzeye başarıyla entegre edildiğini doğrulamaktadır. Elementel dağılım sentez sürecinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini ve yüzeydeki organik kaplama ile birlikte çekirdek yapıların stabil olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar kaplama işleminin ve yüzey modifikasyonunun etkinliğini kanıtlamaktadır (Yusoff ve Suresh, 2023).



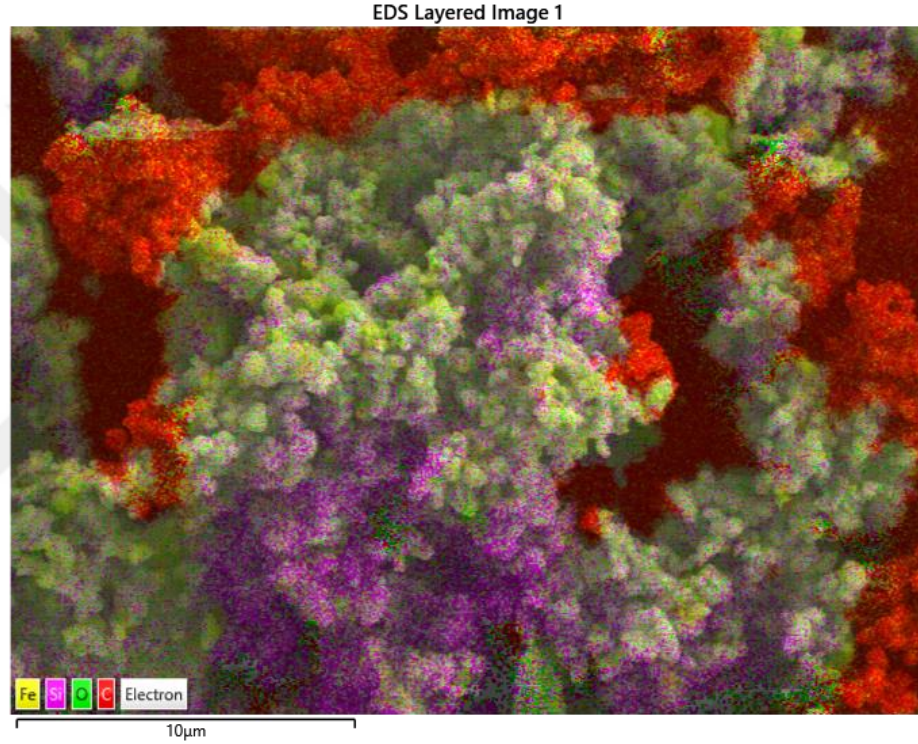
Şekil 5.15. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının EDX grafiği.



Şekil 5.16. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının EDX O, C, Si ve Fe atomları yoğunluk görselleri.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'e ait enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) elemental bileşim haritalaması $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'de bulunan elementlerin yüzeydeki dağılımını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır (Şekil5.16). Görsellerde karbon (C) oksijen (O) silisyum (Si) ve demir (Fe) elementlerinin dağılımı ayrı ayrı gösterilmiş son görüntüde ise bu elementlerin birleşik hali sunulmuştur. Bu analiz $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'in homojen yapısı ve elementlerin başarılı bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Karbon (C) elementinin homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu durum $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'in yüzeyinde bulunan organik kaplama (CPTMS) ile ilişkilendirilebilir. CPTMS'in varlığı karbon içeriğinin yüksek olmasını açıklamakta ve organik kaplamanın yüzeye düzgün bir şekilde entegre olduğunu göstermektedir. Oksijen (O) elementinin dağılımı gösterilmektedir. Oksijen hem SiO_2 kaplamasında hem de CPTMS yapısında yer aldığı için $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'in yüzeyinde geniş bir dağılım göstermektedir. Oksijenin homojen dağılımı SiO_2 kaplamasının tüm yüzeyi kapladığını ve Fe_3O_4 çekirdeklerini

başarılı bir şekilde sardığını doğrulamaktadır. Silisyum (Si) elementinin dağılımını göstermektedir. Silisyumun yüzeyde yoğun olarak bulunması SiO_2 kaplamasının etkili bir şekilde Fe_3O_4 çekirdeklerinin üzerine kaplandığını ve yüzeyde homojen bir yapı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Silisyumun düzgün dağılımı kaplamanın yüzeyde başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Demir (Fe) elementinin dağılımı gösterilmektedir. Demir Fe_3O_4 çekirdeklerinden kaynaklanmaktadır ve çekirdeklerin kaplamanın altında yer aldığı gözlemlenmektedir. Demir elementinin yüzeyde daha sınırlı bir dağılıma sahip olması SiO_2 kaplamasının Fe_3O_4 çekirdeklerini tamamen sardığını doğrulamaktadır (Maleki ve ark., 2017).

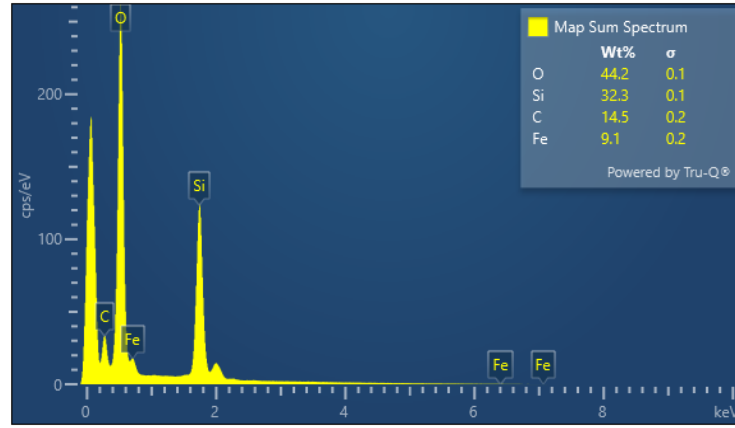


Şekil 5.17. $\text{Fe}_3\text{O}_4@SiO_2@CPTMS@1$ nanoparçacığının O, C, Si ve Fe atomlarının üst üste haritalandırması.

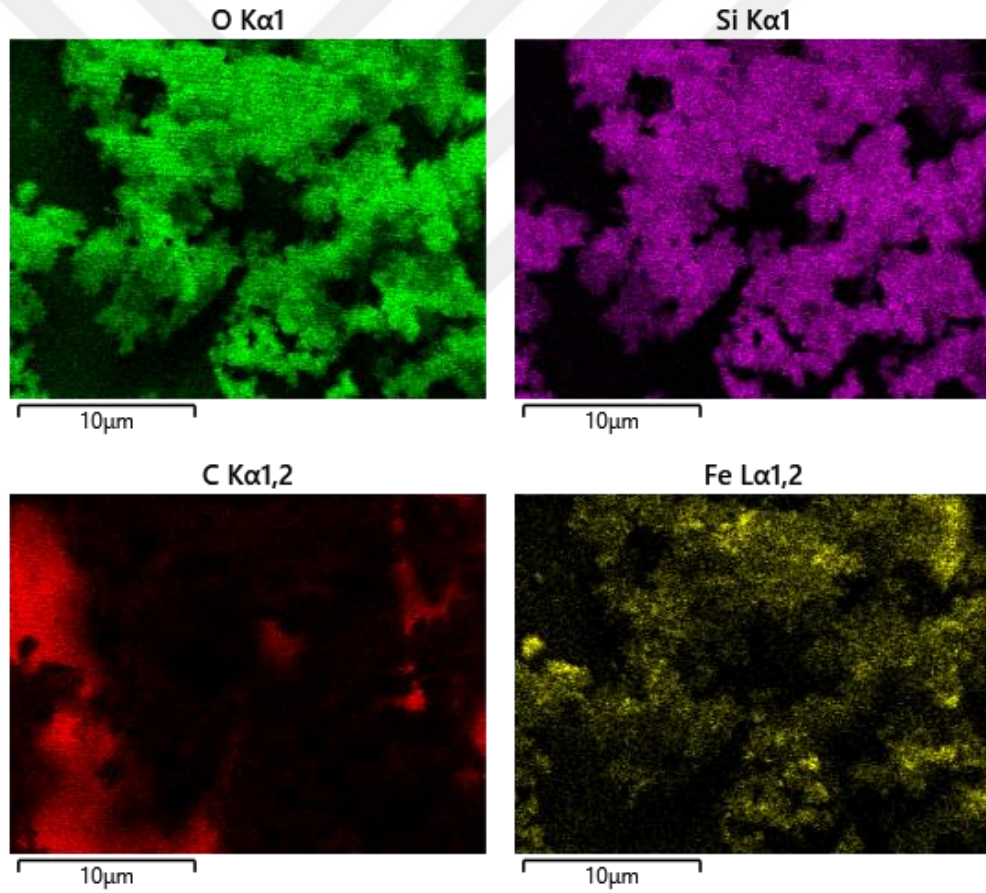
Şekil 5.17 bu elementlerin üst üste bindirilmiş haritalamasını göstermektedir. Görüntüde karbon oksijen silisyum ve demir elementlerinin homojen bir şekilde bir arada bulunduğu ve birbirleriyle dengeli bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu haritalama hem organik kaplamanın (CPTMS) hem de inorganik kaplamanın (SiO_2) yüzeyde başarılı bir şekilde entegre edildiğini ve Fe_3O_4 çekirdeklerinin bu kaplamalar tarafından etkili bir şekilde korunduğunu ortaya koymaktadır. Bu EDX elemental haritalama sonuçları $\text{Fe}_3\text{O}_4@SiO_2@CPTMS@1$ 'in yüzey morfolojisinin ve kimyasal bileşiminin homojen olduğunu doğrulamakta ve kaplama işleminin başarıyla

gerçekleştirildiğini göstermektedir. Elementlerin düzgün dağılımı nanoparçacığın sentez sürecinin başarılı olduğunu ve yüzey modifikasyonunun etkin bir şekilde gerçekleştiğini doğrulamaktadır (Amelia ve ark., 2020).

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'ye ait EDX analizi (Şekil 5.18) yüzeydeki elementlerin kompozisyonunu detaylı olarak incelememize olanak sağlamaktadır. Analiz sonuçları $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'nin yüksek oranda oksijen (O) silisyum (Si) karbon (C) ve demir (Fe) bulunduğunu göstermektedir. Oksijenin %44.2'lik oranı SiO_2 kaplamanın varlığını işaret etmekte olup bu kaplamanın Fe_3O_4 çekirdeklerini çevreleyerek yüzeyde homojen bir yapı sağladığını doğrular niteliktedir. SiO_2 katmanı Fe_3O_4 çekirdeklerinin yüzeyde oksidasyona karşı korunmasına yardımcı olmakta ve nanoparçacığın çevresel etkilere karşı daha kararlı bir yapı sergilemesine olanak tanımaktadır. Bu sonuçlar SiO_2 'nin yüzey modifikasyonunda etkin bir bileşen olduğunu ve homojen kaplamalar sağladığını belirten literatür bulgularıyla uyumludur. Silisyumun %32.3 oranında bulunması SiO_2 kaplamanın $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'nin büyük bir kısmını oluşturduğunu göstermektedir. Silisyum yüzeyde oksijen ile birlikte dengeli bir kaplama sağlayarak nanoparçacığın yüzey özelliklerini ve kimyasal stabilitesini artırmaktadır. Silisyumun bu oranda bulunması Fe_3O_4 çekirdeklerinin üzerinde bir koruyucu katman oluşturulduğunu ve kaplamanın başarılı olduğunu kanıtlamaktadır. Bu durum nanoparçacığın su ve çevresel nem gibi dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırmakta böylece Fe_3O_4 çekirdeklerinin manyetik özelliklerinin korunmasını sağlamaktadır. Karbonun % 14.5 oranında bulunması yüzeydeki organik CPTMS tabakasının varlığını yansıtmaktadır. CPTMS'in yüzeye bağlanması SiO_2 kaplamasının üzerine organik grupların entegre edilmesiyle sağlanmıştır. Bu organik kaplama yüzeyde fonksiyonel grupların varlığını gösterir ve yüzeyin kimyasal olarak modifiye edilebilirliğini artırır. Organik kaplamalar yüzeyde fonksiyonel bağların oluşumunu kolaylaştırarak nanoparçacığın biyomedikal uygulamalarda veya kataliz işlemlerinde kullanılabilirliğini genişletir. CPTMS'in varlığı ve karbonun belirgin oranı literatürdeki benzer kaplama çalışmalarıyla tutarlıdır. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'de % 9.1 oranında tespit edilen demir Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 kaplamanın altında korunduğunu ve manyetik çekirdeklerin yüzeyde kaplama tarafından etkin bir şekilde sarıldığını doğrulamaktadır. Fe_3O_4 çekirdeklerinin varlığı nanoparçacığın manyetik özelliklerini koruduğunu ve kaplamanın altında stabil bir yapı sergilediğini gösterir. Demir çekirdeklerinin bu şekilde korunması özellikle manyetik ayırma ve manyetik hipotermi gibi uygulamalarda nanoparçacığın etkinliğini artırmaktadır.



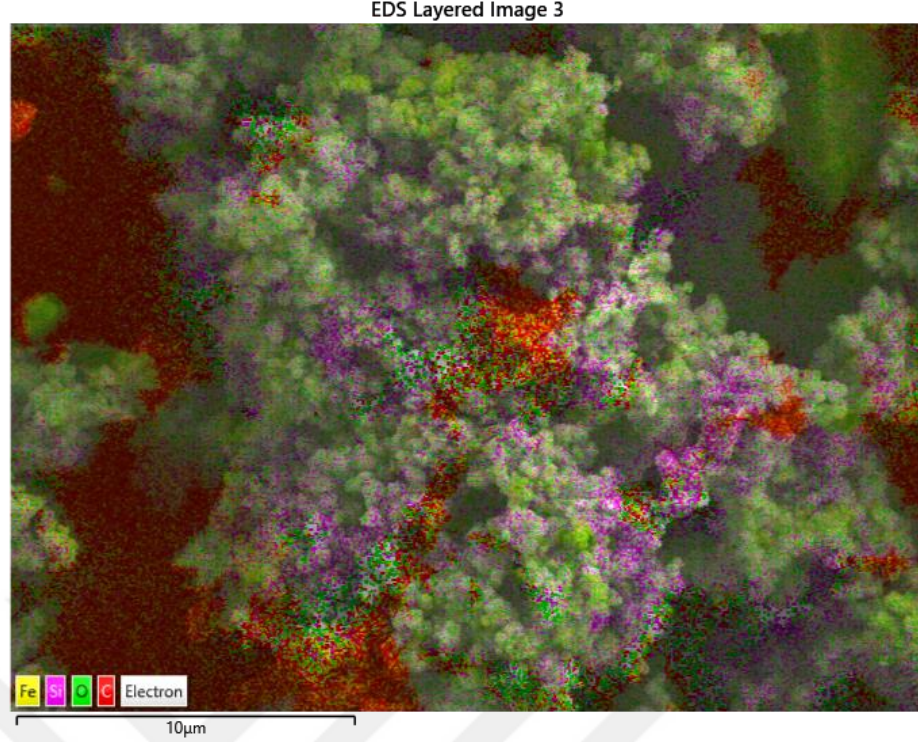
Şekil 5.18. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının EDX grafiği.



Şekil 5.19. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının EDX O, C, Si ve Fe atomları yoğunluk görselleri.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'ye ait EDX elemental haritalama görüntüleri (Şekil 5.19) yüzeydeki elementlerin dağılımını ayrıntılı olarak ortaya koymaktadır. Görsellerde karbon (C) silisyum (Si) oksijen (O) ve demir (Fe) elementlerinin yüzeyde

nasıl dağıldığı ayrı ayrı gösterilmiştir. Karbon haritalama görüntüsü organik kaplamanın (CPTMS) yüzeyde homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Karbonun bu şekilde geniş bir dağılım sergilemesi CPTMS'in yüzeye başarılı bir şekilde bağlandığını ve organik kaplamanın $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ yapısında homojen bir yapı oluşturduğunu doğrulamaktadır. Silisyumun haritalama görüntüsü SiO_2 kaplamanın yüzeyde geniş bir şekilde dağıldığını ve kaplama işleminin Fe_3O_4 çekirdeklerini tamamen sardığını göstermektedir. Bu da silisyum içeriğinin homojen bir kaplama sağlayarak çekirdekleri koruduğunu kanıtlamaktadır. Oksijen haritalama görüntüsü SiO_2 kaplamasıyla uyumlu olarak oksijenin geniş bir şekilde yayıldığını ve yüzeyde düzenli bir dağılım sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu düzenli oksijen dağılımı SiO_2 kaplamasının Fe_3O_4 çekirdeklerini koruyucu bir tabaka şeklinde sardığını ve yüzeyde stabilite sağladığını göstermektedir. Oksijenin varlığı SiO_2 'nin hem fiziksel hem de kimyasal dayanıklılığı artırdığını işaret eder. Demir haritalama görüntüsü ise Fe_3O_4 çekirdeklerinden kaynaklanmaktadır ve demirin yüzeydeki dağılımı daha sınırlıdır. Demir SiO_2 kaplamasının altında kaldığı için yoğunluğu diğer elementlere göre daha düşük olarak gözlemlenmektedir. Bu durum Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 katmanıyla kaplanmış olduğunu ve manyetik özelliklerin korunduğunu göstermektedir. Genel olarak bu EDX haritalama analizleri $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'nin yüzey kaplamasının ve kimyasal modifikasyonunun başarılı bir şekilde yapıldığını doğrulamaktadır. Elementlerin düzgün dağılımı hem organik hem de inorganik kaplamanın yüzeyde dengeli bir yapı sağladığını göstermekte ve nanoparçacığın sentez sürecinin başarıyla gerçekleştirildiğini kanıtlamaktadır. Bu homojen yapı kaplama işleminin etkinliğini ve nanoparçacığın olası uygulamalar için stabilitesini artırmaktadır (Hapca ve ark., 2015).

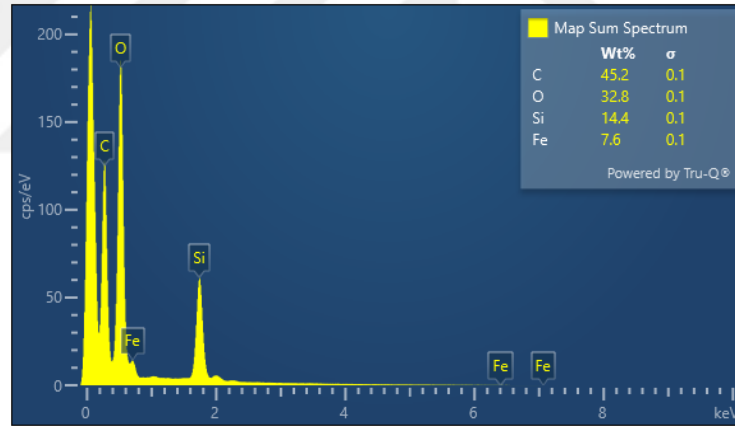


Şekil 5.20. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının O, C, Si ve Fe atomlarının üst üste haritalandırması.

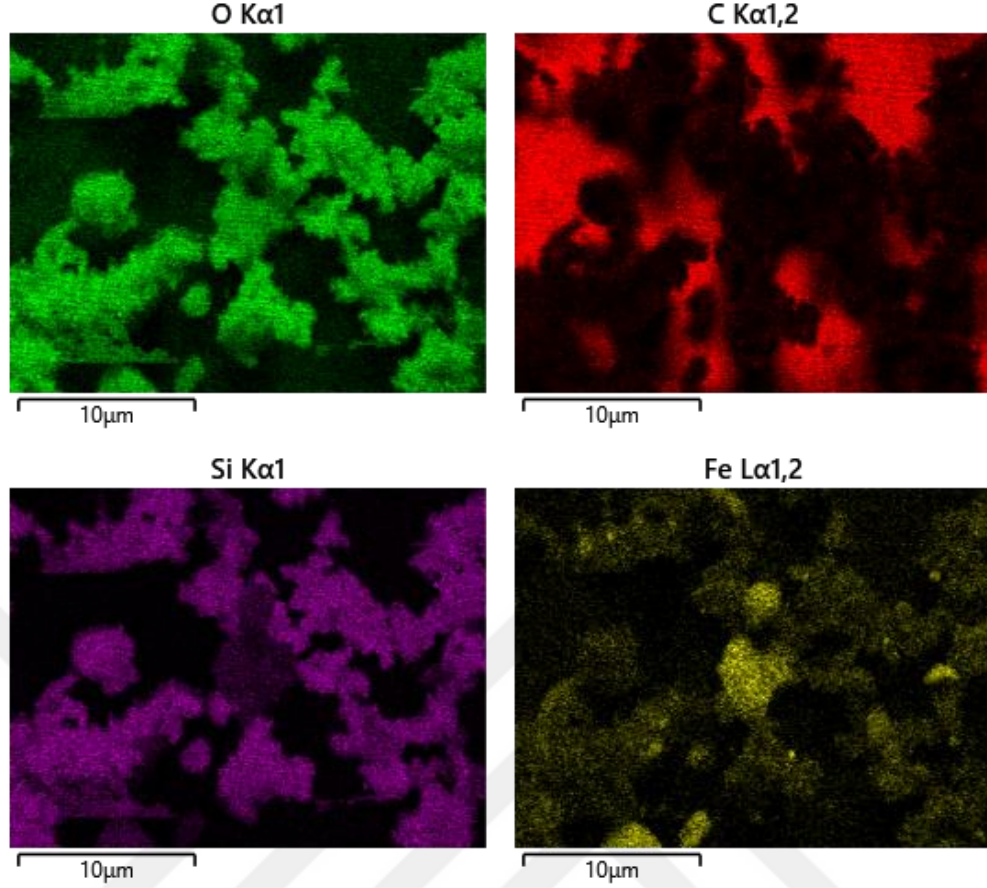
Elemental haritalama görüntüsü (Şekil 5.20) Fe (sarı) Si (mor) O (yeşil) ve C (kırmızı) elementlerinin $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'deki dağılımını göstermektedir. Bu elementlerin matris boyunca homojen bir şekilde dağılmış olması Fe_3O_4 çekirdeğinin SiO_2 katmanı tarafından iyi bir şekilde kaplandığını göstermektedir. Karbon sinyali muhtemelen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ yapısındaki organik fonksiyonel gruplardan kaynaklanmaktadır. Silisyumun yapıda düzenli bir şekilde bulunması silika kabuğunun başarılı bir şekilde oluştuğunu ve manyetik çekirdeği stabilize ettiğini göstermektedir. Oksijen ve demirin örtüşmesi demir oksidin varlığını doğrularken karbonun dağılımı organik silan modifikasyonlarıyla uyum göstermektedir. Bu analiz $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ yapılarına dair literatürde yer alan benzer çalışmalarla da uyumlu sonuçlar sunmaktadır (Yuan ve ark., 2018).

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'e ait EDX analizi (Şekil 5.21) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'nin yüzeyinde bulunan elementlerin kompozisyonunu detaylı olarak sunmaktadır. Analiz spektrumunda karbon (C) oksijen (O) silisyum (Si) ve demir (Fe) elementlerinin yüzdesel ağırlıkları belirlenmiştir. Karbonun %45.2'lik oranı yüzeydeki organik kaplamadan (CPTMS) kaynaklanmaktadır ve bu organik maddenin yüzeye etkin bir şekilde bağlandığını göstermektedir. Bu kaplama

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün yüzeyinde organik grupların varlığını işaret eder ve yüzey modifikasyonunun başarılı olduğunu doğrular. Oksijen %32.8 oranında tespit edilmiştir. Oksijenin bu yüksek yüzdesi $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'de bulunan SiO_2 kaplamadan kaynaklanmaktadır ve oksijenin geniş dağılımı yüzeyde homojen bir kaplama sağlandığını gösterir. Silisyumun %14.4 oranında bulunması ise SiO_2 'nin yüzeyde etkili bir şekilde kaplandığını ve yüzeyde kimyasal stabilite sağladığını göstermektedir. Bu kaplama Fe_3O_4 çekirdeklerini koruyarak $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün çevresel dayanıklılığını artırır ve yapının stabilitesini sağlar. Demir oranı % 7.6 olarak ölçülmüştür ve bu oran Fe_3O_4 manyetik çekirdeklerin varlığını işaret etmektedir. Demirin yüzeyde düşük oranda bulunması SiO_2 kaplamanın Fe_3O_4 çekirdeklerini başarıyla kapladığını ve koruyucu bir tabaka oluşturduğunu göstermektedir. Bu kaplama manyetik çekirdeklerin oksidasyondan korunmasına ve yüzey modifikasyonunun etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine yardımcı olmaktadır(Yusoff ve Suresh, 2023).



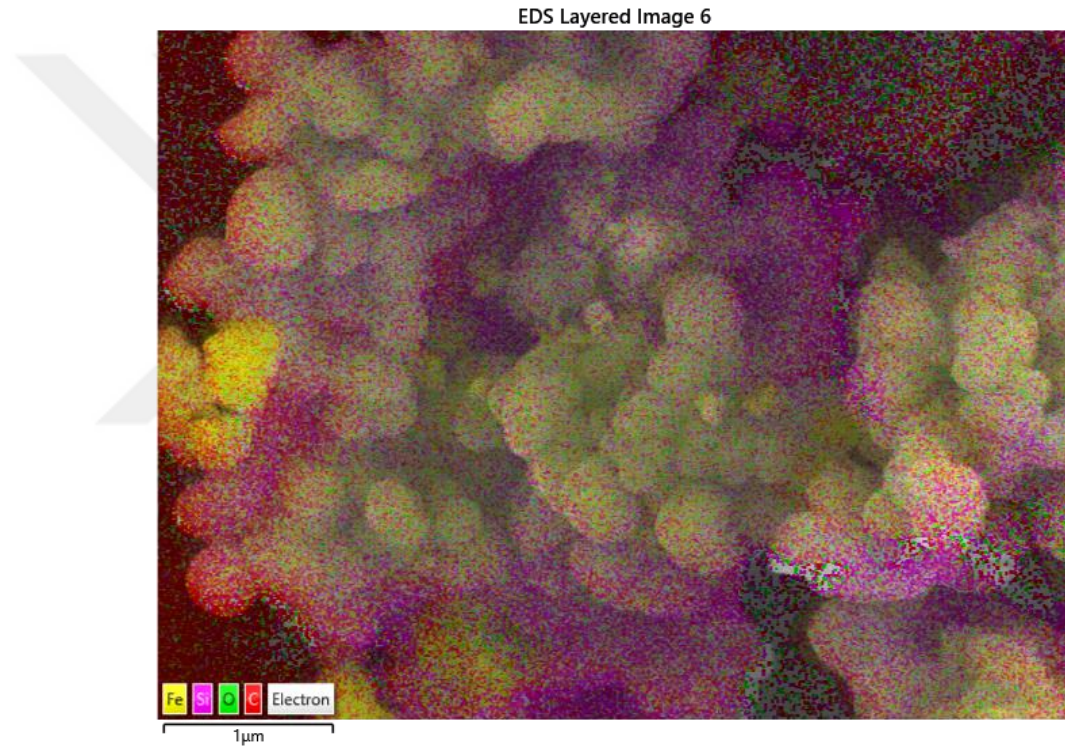
Şekil 5.21. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının EDX grafiği.



Şekil 5.22. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının EDX O, C, Si ve Fe atomları yoğunluk görselleri.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün EDX haritalama görüntüleri (Şekil 5.22) yüzeydeki elementlerin dağılımını detaylı bir şekilde göstermektedir. Karbon oksijen silisyum ve demir elementlerinin yüzeyde homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Karbon haritalama görüntüsü CPTMS'in organik yapısının yüzeye iyi bir şekilde tutunduğunu ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün yüzeyinde geniş bir karbon dağılımının olduğunu göstermektedir. Bu durum organik kaplamanın yüzeyde homojen bir şekilde yayıldığını ve yüzey modifikasyonunun başarılı bir şekilde yapıldığını doğrular. Organik maddenin eşit dağılımı nanoparçacığın stabilitesini artıran önemli bir faktördür. Oksijen haritasında yüzeyde SiO_2 'nin varlığını ve oksijenin yüzey kaplamasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu da oksijenin silisyumla birlikte düzenli bir kaplama oluşturduğunu ve SiO_2 tabakasının Fe_3O_4 çekirdeklerini başarılı bir şekilde sardığını göstermektedir. Oksijenin bu dengeli dağılımı kaplamanın koruyucu etkisini desteklemektedir. Silisyumun haritalama görüntüsü SiO_2 kaplamanın yüzeyde yoğun bir şekilde bulunduğunu ve yüzey modifikasyonunun etkili bir şekilde

gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Silisyumun homojen dağılımı Fe_3O_4 çekirdeklerinin silika katmanıyla kaplanarak stabil ve korunaklı bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Bu nanoparçacığın fiziksel ve kimyasal dayanıklılığını artıran önemli bir özelliktir. Demir haritalama görüntüsü ise Fe_3O_4 çekirdeklerinin yüzeydeki dağılımını göstermektedir. Demirin daha sınırlı bir alana yayılması çekirdeklerin SiO_2 ve organik kaplama altında korunduğunu ve yüzeyde homojen bir dağılım sağlandığını doğrulamaktadır. Bu kaplama demir oksit çekirdeklerin oksidasyondan korunmasını sağlayarak $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün manyetik özelliklerinin korunmasına yardımcı olur (Nikmah ve ark., 2019).

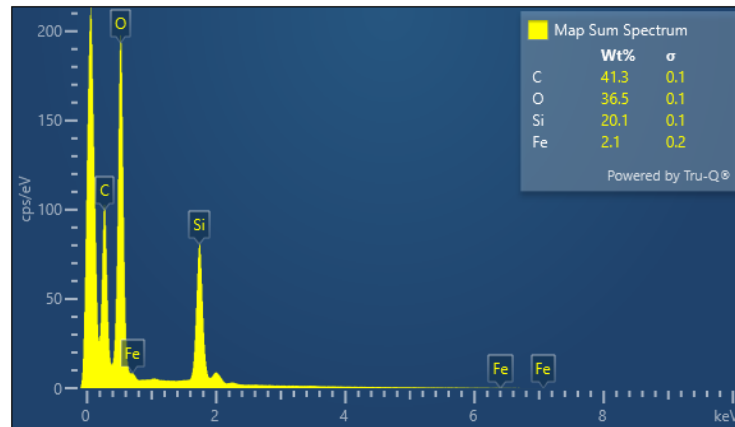


Şekil 5.23. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının O, C, Si ve Fe atomlarının üst üste haritalandırması.

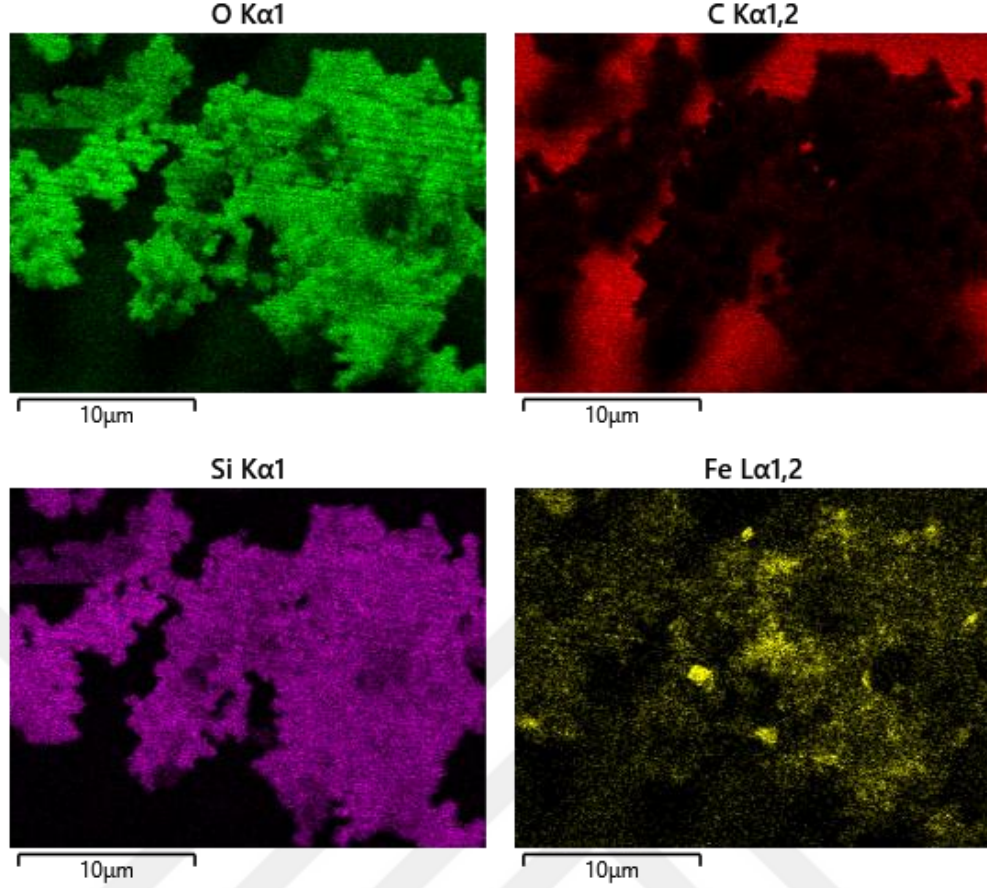
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün bu birleşik EDX haritalama görüntüsü (Şekil 5.23) yüzeydeki elementlerin dağılımını bir arada göstermektedir. Bu görüntüde Fe (demir) Si (silisyum) O (oksijen) ve C (karbon) elementlerinin homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu nanoparçacığın düzgün bir kaplama sağladığını ve bileşenlerin birbirine entegre olduğunu doğrulamaktadır. Fe_3O_4 çekirdeklerinin silika (SiO_2) kaplaması ile tamamen kaplanmış olması Si ve O elementlerinin geniş bir yüzey alanında yayılmasına katkıda bulunur. Oksijenin yoğun varlığı SiO_2 katmanının

varlığını desteklerken Fe'nin dağılımı çekirdeklerin silika ile kaplandığını ve oksidasyon etkilerinden korunduğunu gösterir. Karbonun yüzeydeki varlığı organik modifikasyonların (örneğin CPTMS) nanoparçacık yüzeyine başarıyla tutunduğunu ve homojen bir yapıda dağıldığını işaret eder (Esmaili-Shahri ve Es'haghi, 2015).

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ 'ün EDX analizi (Şekil 5.24) yüzeydeki elementlerin yüzdesel kompozisyonunu detaylı bir şekilde göstermektedir. Spektrumda karbon (C) oksijen (O) silisyum (Si) ve demir (Fe) elementlerinin yüzdesel ağırlıkları belirlenmiştir. Karbonun % 41.3 oranında bulunması yüzeydeki organik kaplamanın (muhtemelen CPTMS) varlığını göstermektedir. Organik kaplamanın varlığı yüzeyin modifikasyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini ve yüzeyde organik bileşiklerin homojen bir dağılım sağladığını göstermektedir. Oksijenin % 36.5'lik oranı SiO_2 kaplamanın yüzeyde geniş bir alanda bulunduğunu ve oksijenin bu kaplamada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Silisyumun % 20.1 oranında bulunması ise silika kaplamanın başarılı bir şekilde yüzeye tutunduğunu ve Fe_3O_4 çekirdeklerinin çevresini kapladığını göstermektedir. Bu kaplama yüzeyde kimyasal stabilite sağlarken Fe_3O_4 çekirdeklerinin oksidasyondan korunmasını da sağlar. Demir oranının % 2.1 gibi düşük bir seviyede bulunması Fe_3O_4 çekirdeklerinin silika ve organik katmanlar tarafından etkili bir şekilde kaplandığını göstermektedir. Bu demir çekirdeklerin dış çevreye karşı korunmasını sağlarken kaplamanın manyetik çekirdek üzerinde homojen bir dağılım oluşturduğunu da göstermektedir (Rajput ve ark., 2016).

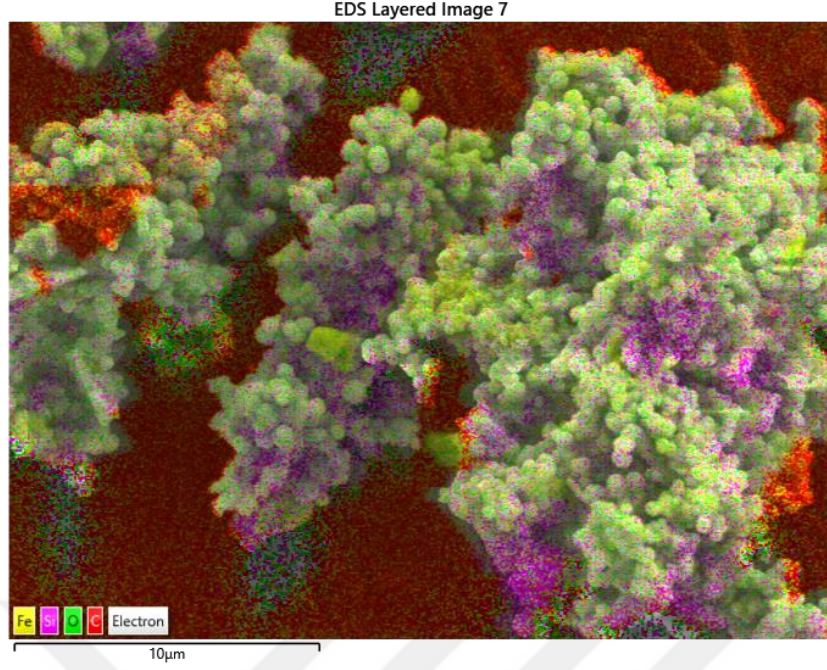


Şekil 5.24. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının EDX grafiği.



Şekil 5.25. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının EDX O, C, Si ve Fe atomları yoğunluk görselleri.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ 'ün EDX elemental haritalama analizine (Şekil 5.25) göre yüzeydeki karbon oksijen silisyum ve demir elementlerinin homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu homojen dağılım $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün yüzeyinde gerçekleşen kaplama işleminin etkinliğini göstermektedir. Karbonun yüzeyde yoğun bulunması organik bileşenlerin (örneğin CPTMS) başarılı bir şekilde yüzeye bağlandığını ve kaplama sürecinin verimli olduğunu işaret eder. Oksijenin dağılımı silika kaplamanın (SiO_2) yapısında önemli bir rol oynadığını ve yüzeyde geniş bir alana yayıldığını göstermektedir. Silisyumun varlığı ise Fe_3O_4 çekirdeklerinin silika tabakası ile çevrelendiğini doğrulamaktadır bu da çekirdeklerin oksidasyon ve dış etkilere karşı korunmasını sağlar. Demir dağılımı çekirdeklerin kaplama tabakasının altında kaldığını ve homojen bir çekirdek-kaplama ilişkisi olduğunu işaret eder (Tongying ve ark., 2017).

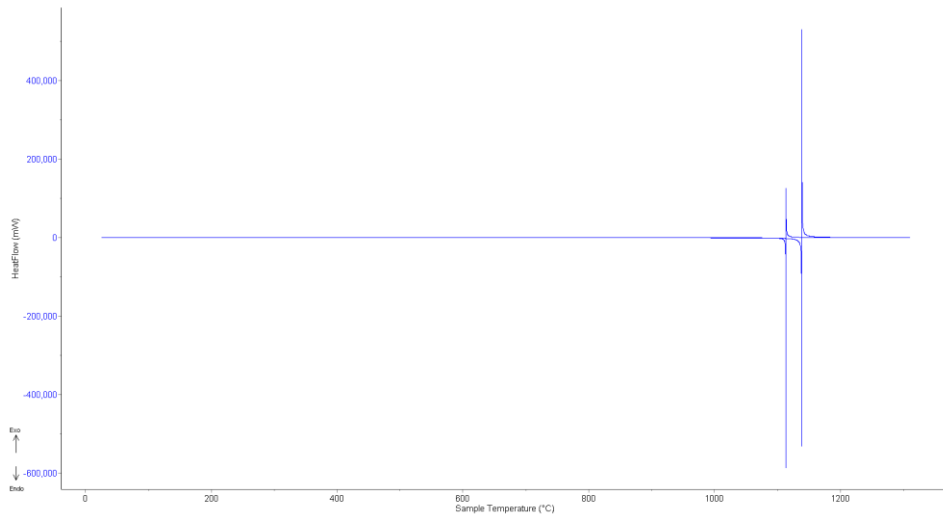


Şekil 5.26. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının O, C, Si ve Fe atomlarının üst üste haritalandırması.

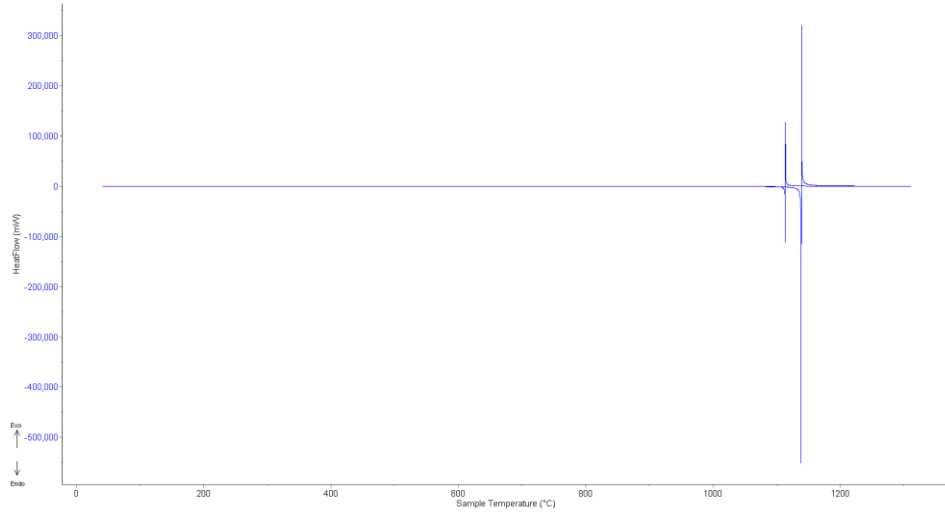
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ 'ün EDX elemental haritalama görüntüsü (Şekil 5.26) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ 'deki Fe Si O ve C elementlerinin yüzeydeki dağılımını göstermektedir. Elementlerin yoğunluk ve dağılımları yüzey kaplamasının homojenliğini ve sentez işleminin verimliliğini değerlendirmede önemlidir. Bu görüntüde Fe_3O_4 çekirdeklerinin SiO_2 kaplama ile etkili bir şekilde kaplandığı ve organik kaplamaların yüzeye başarılı bir şekilde bağlandığı görülmektedir. Fe elementinin dağılımı manyetik çekirdeklerin yüzeyde varlığını ve homojen dağılmasını gösterirken Si ve O elementlerinin yoğun varlığı ise silika kaplamanın etkinliğini doğrulamaktadır. Ayrıca C elementinin varlığı yüzeydeki organik modifikasyonların başarılı bir şekilde tutunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar Fe_3O_4 çekirdeklerinin silika ve organik kaplamalarla homojen bir şekilde kaplandığını ve bu kaplamaların yüzeyde dengeli bir şekilde dağıldığını doğrular (Skorikov ve ark., 2021).

5.3.5. DSC Analizleri

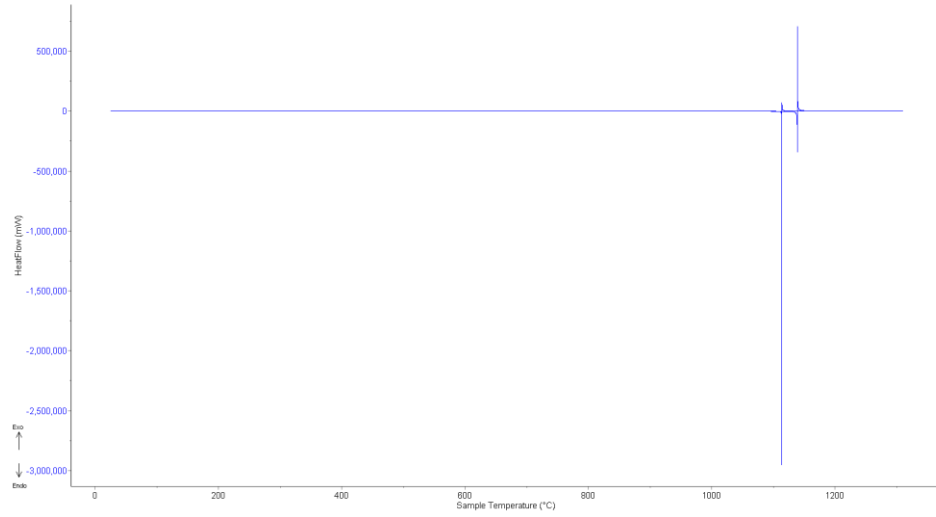
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ 'ün Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) Grafiği (Şekil 5.27, 5.28, 5.29, 5.30) verilmiştir. 0°C ile 900°C arasındaki bölgede sabit bir ısı akışı görülmektedir. Bu durum belirtilen sıcaklık aralığında belirgin bir faz değişimi veya kimyasal reaksiyon olmadığını işaret eder. Grafikte $\sim 1000^\circ\text{C}$ civarında belirgin bir endotermik pik gözlemlenmektedir. Bu malzemenin bu sıcaklıkta erime faz değişimi veya kimyasal reaksiyon geçirdiğini göstermektedir. Endotermik pikten sonra kısa bir süre içinde ekzotermik bir pik gözlemlenmektedir. Bu maddenin yeniden kristalleşmesi veya başka bir faza dönüşümünü işaret eder. Analizde yaklaşık 1000°C civarında belirgin bir ekzotermik pik gözlemlenmektedir. Bu pik bir veya birden fazla termal olayın gerçekleştiğini göstermektedir. Öncelikle bileşiğin içindeki organik kısımların bu sıcaklıkta tamamen ayrışabilir veya karbonizasyonu meydana gelebilir. Organik bileşiklerin ayrışma süreçleri genellikle ekzotermik olup grafikte ani bir ısı salınımı olarak kendini gösterir. Literatürde Fe_3O_4 nanoparçacıklarının yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümlerine uğradığı bilinmektedir (Bowles, 1997). Örneğin maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) fazına dönüşüm veya hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) fazına dönüşüm gibi. Bu faz dönüşümleri ekzotermik reaksiyonlardır ve DSC grafiğinde gözlemlenen pikin nedeni olabilir. Ayrıca 1100°C civarında başlayan organik bileşenlerin bozunması da ekzotermik bir etkiye neden olabilir. Bu pikin muhtemel nedeni Fe_3O_4 nanoparçacıklarının yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümüne uğraması olabilir.



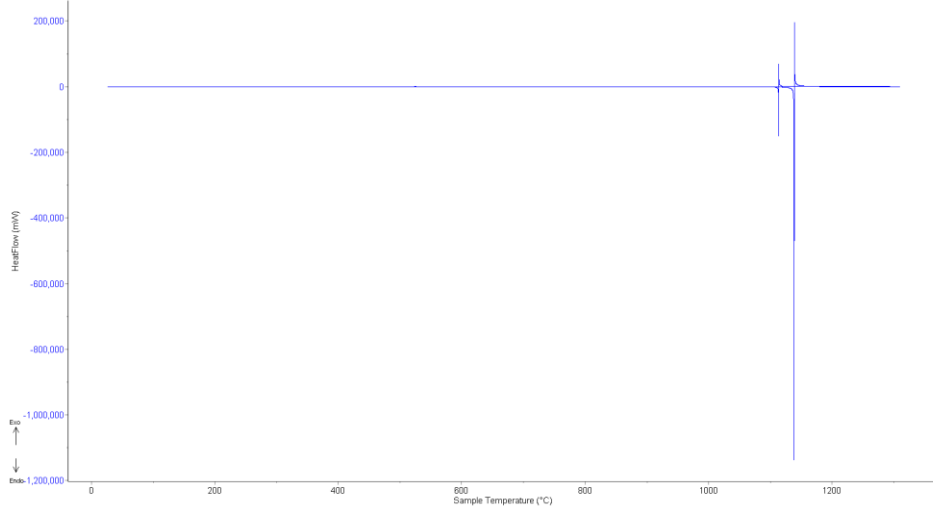
Şekil 5.27. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının DSC grafiği.



Şekil 5.28. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının DSC grafiği.



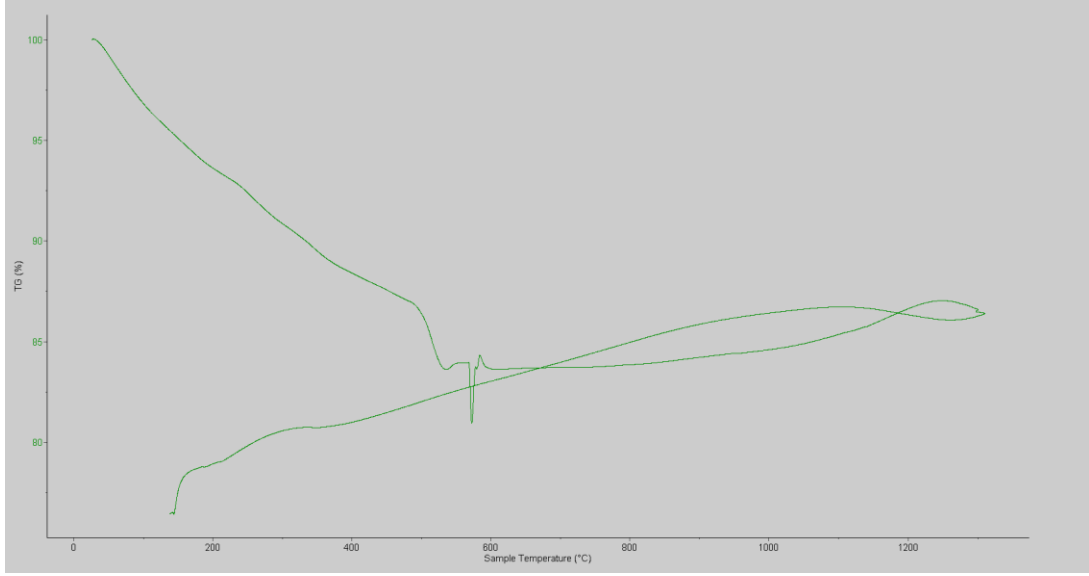
Şekil 5.29. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının DSC grafiği.



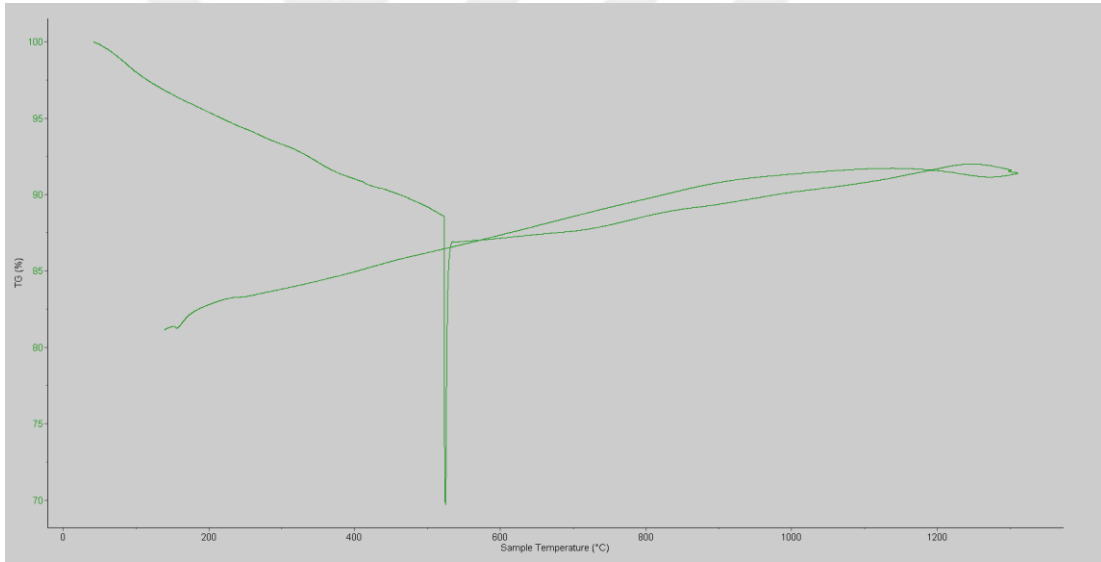
Şekil 5.30. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının DSC grafiği.

5.3.6. TGA Analizleri

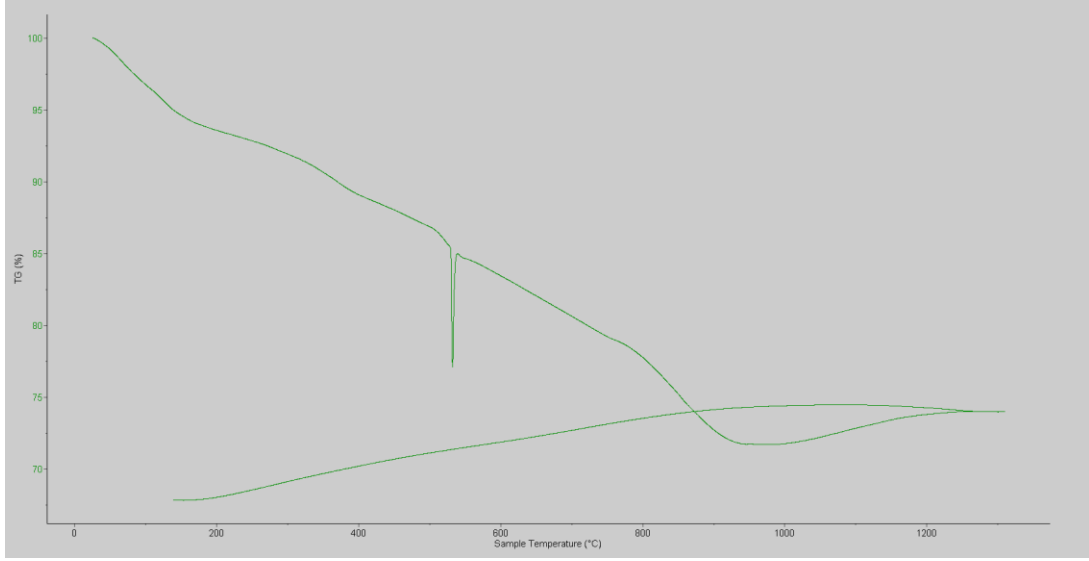
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ nanoparçacıkların TGA Grafiği verilmiştir. (Şekil 5.31, 5.32, 5.33, 5.34) 0-200°C arasında gözlemlenen kütle kaybı muhtemelen yüzeyde adsorbe olmuş su veya çözünmemiş organik çözücülerin buharlaşmasını göstermektedir. 200-600°C arasında belirgin bir kütle kaybı görülmektedir. Bu nanoparçacığın organik bileşenlerin termal bozunmasını (Jayabharathi ve ark., 2020) ve SiO_2 'nin yüzey modifikasyonlarının ayrışmasını göstermektedir (Hernandez-Padron ve ark., 2013). 600°C'den sonra kütle kaybının stabil hale gelmektedir. Bu durum Fe_3O_4 çekirdeğinin ve SiO_2 kabuğunun termal olarak oldukça stabil olduğunu gösterir (Alizadeh ve ark., 2012). Nanoparçacıklar beklenildiği gibi özellikle yüksek sıcaklıklarda (600°C ve üstü) oldukça stabil bir yapıya sahiptir. Bu malzemenin yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun olabileceğini gösterir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ 'ün yüksek sıcaklıklarda stabil kalması malzemenin elektronik manyetik veya katalitik uygulamalarda kullanılabilirliğini artırır (Liu ve ark., 2020a).



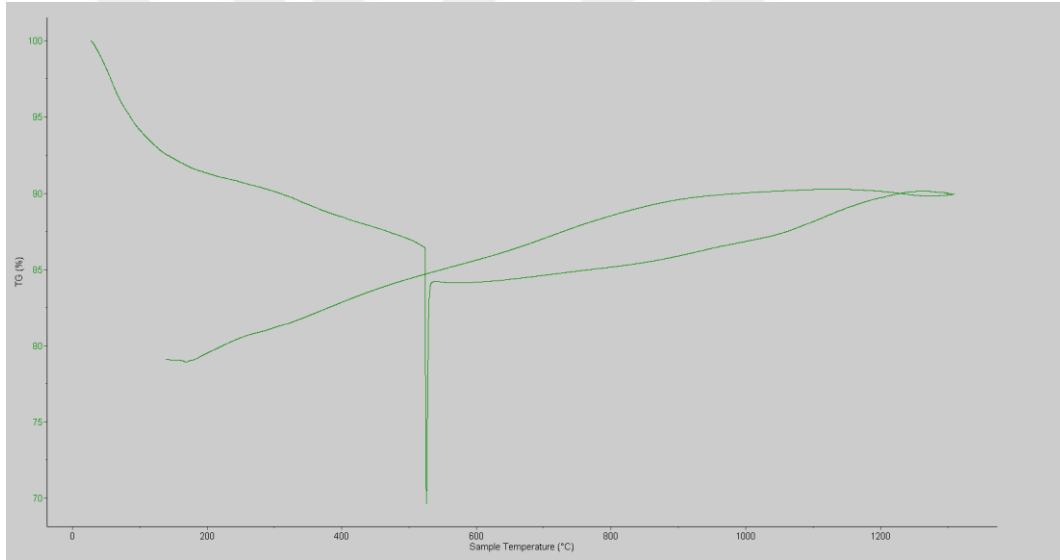
Şekil 5.31. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının TGA grafiği.



Şekil 5.32. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının TGA grafiği.



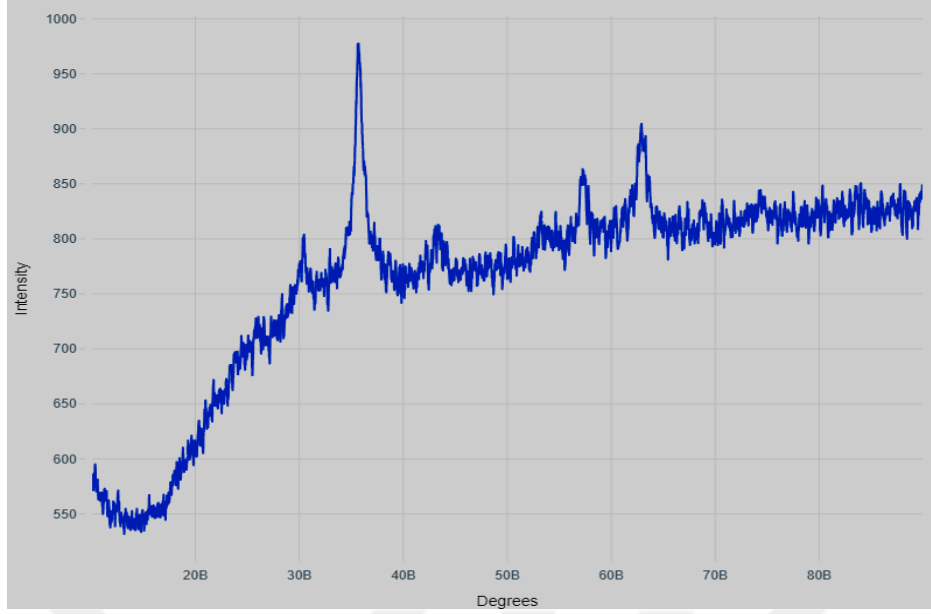
Şekil 5.33. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının TGA grafiği.



Şekil 5.34. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının TGA grafiği.

5.3.7. XRD Analizleri

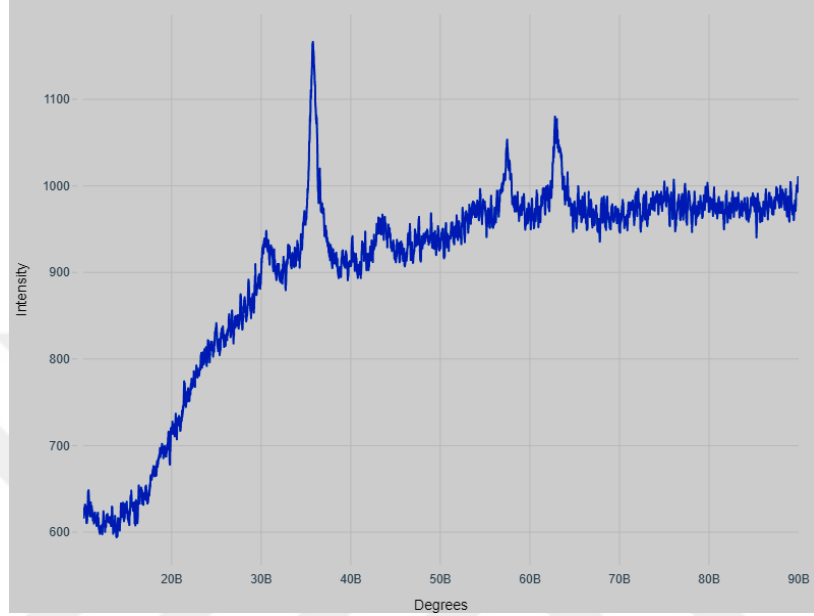
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'in XRD sonuçları verilmiştir (Şekil 5.35). Fe_3O_4 'ün kristal yapısı tipik olarak belirli 2θ değerlerinde keskin pikler oluşturur. Bu değerler $2\theta \approx 30.1^\circ$, $2\theta \approx 35.5^\circ$, $2\theta \approx 43.1^\circ$, $2\theta \approx 57.0^\circ$ ve $2\theta \approx 62.6^\circ$ olarak belirtilir (Tripathy ve ark., 2022). Grafikte görülen bu piklerin keskin ve yüksek yoğunlukta olması Fe_3O_4 'ün iyi kristalize olmuş olduğunu gösterir. Bu süperparamanyetik demiroksit nanoparçacıkların sentezi sırasında kristal yapısının korunduğunu ve yüksek kristalin yapıya sahip olduğunu doğrular. Grafikteki veriler 2θ değerlerinde birkaç belirgin pik gösterir 30° civarı bölgede keskin bir pik Fe_3O_4 'ün $2\theta \approx 30.1^\circ$ karşılık gelir. Pik yoğunluğu yaklaşık 850-900 arasında olup Fe_3O_4 'ün yüksek kristalin yapısını doğrular. 35.5° civarı Fe_3O_4 'ün pik yoğunluğu yaklaşık 950 civarındadır. Bu grafikte en yoğun piktir ve süperparamanyetik demiroksit nanoparçacıkların dominant kristal yapısını gösterir (Lotfi ve ark., 2019). 43.1° 57.0° 62.6° bu değerlerde de Fe_3O_4 'ün diğer düzlemlerine karşılık gelen pikler görülmektedir her biri yaklaşık 800-850 yoğunluk arasında değişir. SiO_2 genellikle amorf bir yapı sergiler ve bu nedenle XRD deseninde geniş ve düşük yoğunluklu bir pik olarak kendini gösterir (Liang ve ark., 2011). Grafikte 20° - 30° arasında geniş bir tepe görülmektedir bu da SiO_2 'nin amorf yapısını işaret eder. Amorf yapılar belirgin kristal pikler yerine geniş ve düşük yoğunluklu pikler üretir bu da kaplamanın amorf karakterini doğrular. SiO_2 'nin amorf yapısı grafikte belirgin bir şekilde gözlemlenmiş bu da kaplamanın başarılı bir şekilde gerçekleştiğini gösterir. 1 organik bir molekül olarak genellikle belirgin XRD pikleri üretmez. Ancak kaplamanın varlığı süperparamanyetik demiroksit nanoparçacıkların ve SiO_2 piklerinde hafif genişlemelere veya yoğunluk değişikliklerine neden olabilir. Grafikte bu etki mevcut piklerde hafif genişlemeler veya yoğunluk farklılıkları olarak gözlemlenebilir. Organik moleküllerin kristal yapılar üzerinde bu tür etkileri genellikle yüzeydeki modifikasyonlar ve kaplamaların sonucudur.



Şekil 5.35. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının XRD grafiği.

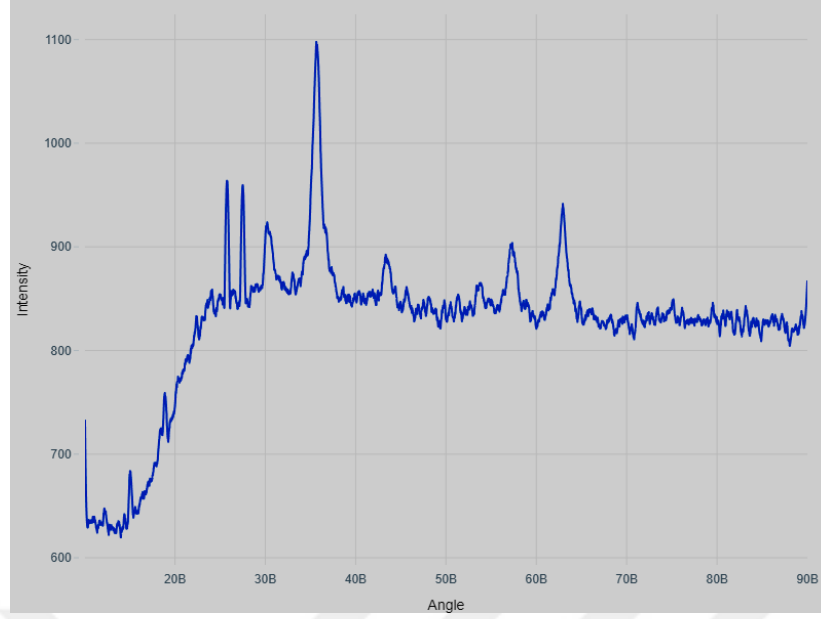
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'nin XRD grafiği (Şekil 5.36) incelendiğinde Fe_3O_4 nanoparçacıklarının karakteristik pikleri açıkça görülmektedir. Fe_3O_4 'ün kristal yapısı tipik olarak belirli 2θ değerlerinde keskin pikler oluşturur. Gözlemlenen en belirgin pikler yaklaşık 38° , 65° ve 78° civarlarında bulunmaktadır. 38° civarındaki pik en yoğun ve keskin olanıdır. Bu piklerin keskin ve yüksek yoğunlukta olması Fe_3O_4 nanoparçacıklarının iyi kristalize olmuş olduğunu ve sentez sırasında kristal yapısının korunduğunu doğrular. Grafikte gözlemlenen düşük arka plan gürültüsü ve keskin pikler Fe_3O_4 nanoparçacıklarının yüksek saflıkta olduğuna işaret eder. Piklerin dar genişliği nanoparçacıkların boyutunun nispeten büyük olduğunu ve/veya kristal kusurlarının az olduğunu düşündürür. 20° - 30° arasında geniş ve düşük yoğunluklu bir tepe gözlemlenmektedir. Bu geniş tepe SiO_2 kaplamasının amorf yapısını işaret eder. Amorf SiO_2 belirgin kristal pikler yerine geniş ve düşük yoğunluklu bir tepe üretir bu da kaplama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini gösterir. 2 organik bileşiği genellikle belirgin XRD pikleri üretmez. Ancak bu organik molekülün varlığı Fe_3O_4 ve SiO_2 piklerinde hafif genişlemelere veya yoğunluk değişikliklerine neden olabilir. Grafikte bu etki mevcut piklerde hafif genişlemeler veya yoğunluk farklılıkları olarak gözlemlenebilir. Organik moleküllerin kristal yapılar üzerinde bu tür etkileri genellikle yüzeydeki modifikasyonlar ve kaplamaların sonucudur. Sonuç olarak bu XRD analizi nanoparçacığın yapısal özelliklerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Grafik iyi

kristallenmiş Fe_3O_4 çekirdeğini amorf SiO_2 kaplamasını ve organik molekül modifikasyonunu başarıyla göstermektedir. Bu sentezlenen malzemenin istenilen yapıya sahip olduğunu ve her bir bileşenin (Fe_3O_4 çekirdeği SiO_2 kaplaması ve organik modifikasyon) başarıyla bir araya getirildiğini doğrulamaktadır.



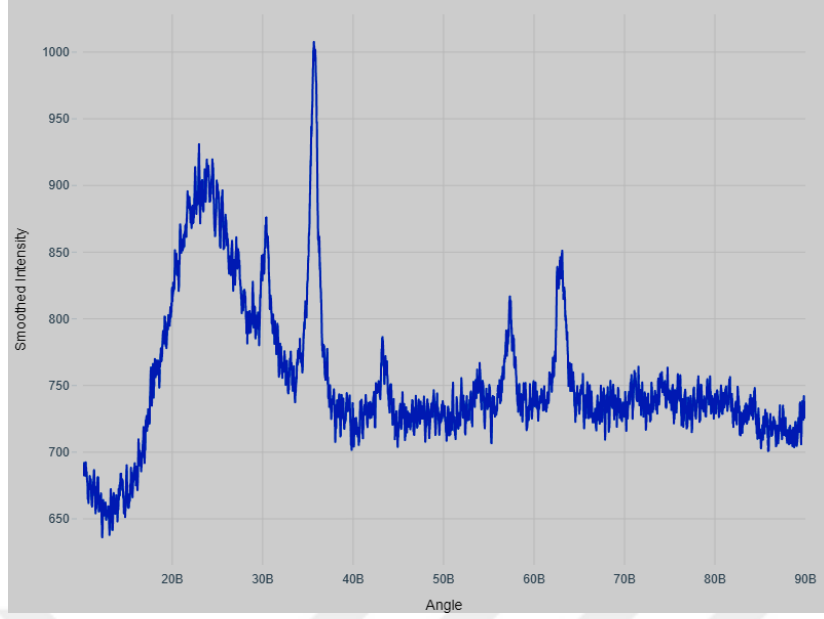
Şekil 5.36. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının XRD grafiği.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün XRD grafiği verilmiştir(Şekil 5.37). XRD grafiği belirli açılarda keskin pikler göstererek kristal yapının varlığını ortaya koymaktadır. Bu grafik malzemenin yüksek kristallığını yansıtan belirgin ve iyi tanımlanmış pikler sergilemektedir. Özellikle 35° ve 60° civarında gözlenen güçlü yansımalar Fe_3O_4 ve SiO_2 bileşenlerinin karakteristik özelliklerini yansıtmaktadır. 30.1° 35.5° 43.1° 57.0° ve 62.6° gibi belirli 2θ değerlerindeki keskin pikler Fe_3O_4 'ün kristalografik düzlemlerine karşılık gelmekte olup iyi kristalize olmuş bir manyetit yapısını göstermektedir. Ayrıca 20° ile 30° arasında gözlemlenen geniş bir tepe SiO_2 kaplamasının amorf doğasını işaret etmektedir ki bu silika için tipiktir. Bu amorf özellik geniş ve düşük yoğunluklu piklerle doğrulanmakta olup kaplamanın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Organik molekül olan 3'ün varlığı kristal yapıyla etkileşimleri ve yüzey modifikasyonlarını yansıtarak piklerde hafif genişlemelere veya yoğunluk değişikliklerine neden olabilir.



Şekil 5.37. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının XRD grafiği.

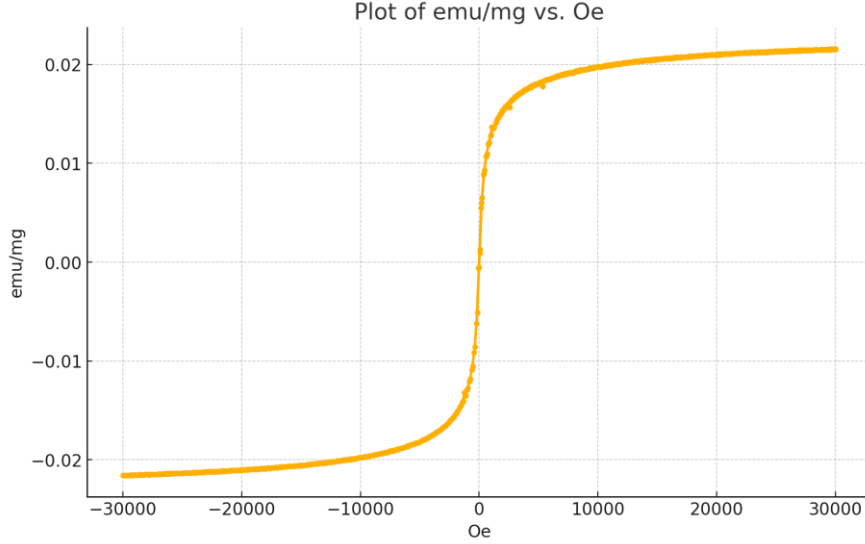
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ 'ün XRD grafiği verilmiştir (Şekil 5.38). Grafikte 20° ile 90° arasında değişen 2θ açılarında malzemenin karakteristik X-ışını kırınım desenini gösteren bir dizi pik gözlemlenmektedir. Bu piklerin konumu yoğunluğu ve genişliği malzemenin kristal yapısı kristal boyutu ve kusurları hakkında detaylı bilgi sağlar. Grafikte en belirgin pikler 30° ve 36° civarında gözlemlenmektedir. Bu pikler literatürdeki Fe_3O_4 'ün XRD verileriyle uyumludur (Ghinwa ve Noubactep, 2023). Bu piklerin yüksek yoğunluğu ve keskinliği Fe_3O_4 nanoparçacıklarının malzemede iyi kristalleştiğini ve belirgin bir kristal yapıya sahip olduğunu gösterir. Ayrıca 43° 57° ve 63° civarında daha düşük yoğunluğa sahip pikler de görülmektedir. Bu piklerin varlığı Fe_3O_4 'ün kristal yapısının malzemede korunduğunu ve kaplamaların kristal yapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını gösterir. Grafikte geniş ve düşük yoğunluklu bir pik 20° - 25° aralığında gözlemlenebilir. Bu geniş pik amorf bir yapıya işaret eder ve SiO_2 kaplamasına atfedilebilir (Liang ve ark., 2011). Amorf SiO_2 belirli bir kristal yapıya sahip olmadığı için keskin pikler yerine geniş bir tepe oluşturur. Organik bileşen olan 4'ün XRD grafiği üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemektedir. Organik moleküllerin XRD desenleri genellikle zayıf ve geniş pikler gösterir ve bu pikler Fe_3O_4 ve SiO_2 piklerinin yoğunluğu yanında ihmal edilebilir düzeyde kalabilir. Ancak organik kaplamanın varlığı Fe_3O_4 ve SiO_2 piklerinin genişliğinde ve yoğunluğunda hafif değişikliklere neden olabilir.



Şekil 5.38. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının XRD grafiği.

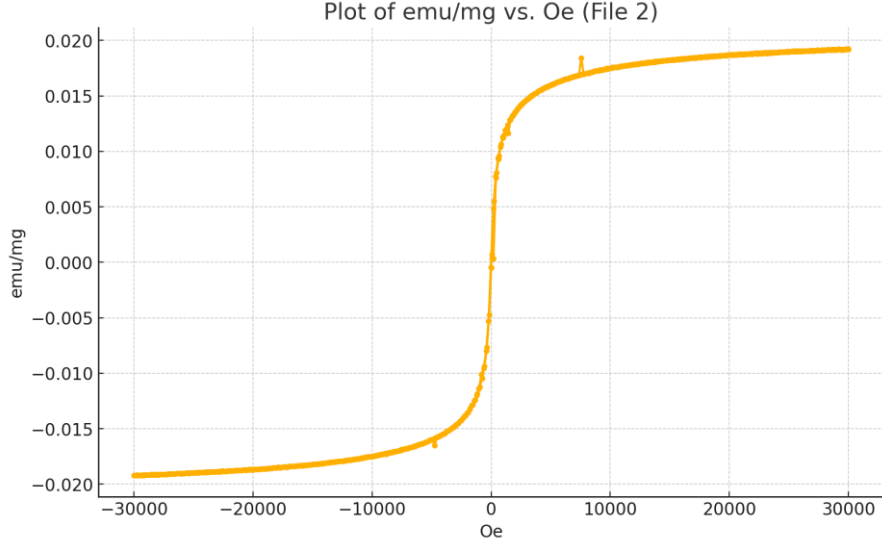
5.3.8. VSM Analizleri

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ 'ün manyetik özelliklerini belirlemek amacıyla Vibrasyonel Numune Manyetometresi (VSM) analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.39, 5.40, 5.41, 5.42). Analiz tüm numuneler için 300 K sıcaklıkta -30.000 Oe ile +30.000 Oe arasında değişen manyetik alanlar uygulanarak yapılmıştır. Bu yöntem $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ 'ün manyetik momentlerini uygulanan manyetik alan altındaki davranışlarına göre ölçerek süperparamanyetik özellikleri ve manyetik stabiliteleri hakkında bilgi sağlamıştır. Elde edilen veriler her bir numunenin manyetik yapısının ve yüzey modifikasyonlarının etkilerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır.



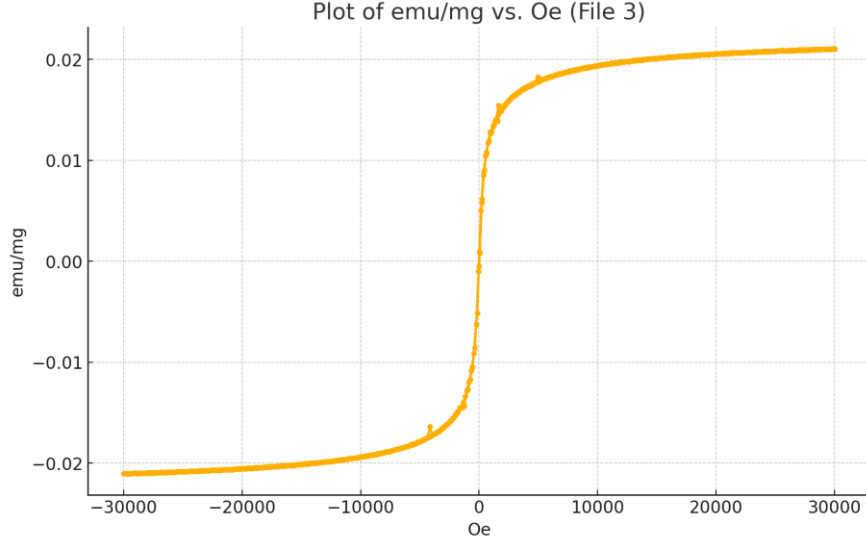
Şekil 5.39. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ nanoparçacığının VSM grafiği.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'in manyetik özellikleri üzerinde yapılan VSM analizi malzemenin süperparamanyetik özelliklerini detaylı şekilde ortaya koymuştur. Süperparamanyetik davranış sıfır koersivite ve sıfır remanent manyetizma ile karakterize edilmiştir. Bu özellik malzemenin dış manyetik alan kaldırıldığında manyetik kalıntı bırakmaması anlamına gelir ve özellikle biyomedikal uygulamalarda önem taşır(Hafid ve ark., 2010). Manyetik doyum değerinin grafikte sabit bir plato oluşturduğu gözlemlenmiştir. Fe_3O_4 çekirdeğinin manyetik katkısı silika kaplama ve CPTMS fonksiyonel gruplarıyla korunmuş ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ 'in manyetik özellikleri zayıflatılmamıştır. Bu durum kaplama işlemlerinin çekirdek yapısını kimyasal ve fiziksel olarak stabilize ettiğini göstermektedir(Munasir ve ark., 2019). Grafikteki manyetik alan ve manyetizasyon arasındaki lineer olmayan ilişki Fe_3O_4 çekirdeğinin süperparamanyetik doğasını doğrulamaktadır. Bu tür süperparamanyetik malzemeler manyetik rezonans görüntüleme (MRI) manyetik hedefleme ve manyetik hipertermi gibi biyomedikal uygulamalarda kullanıma uygundur(Xuemei ve ark., 2016).



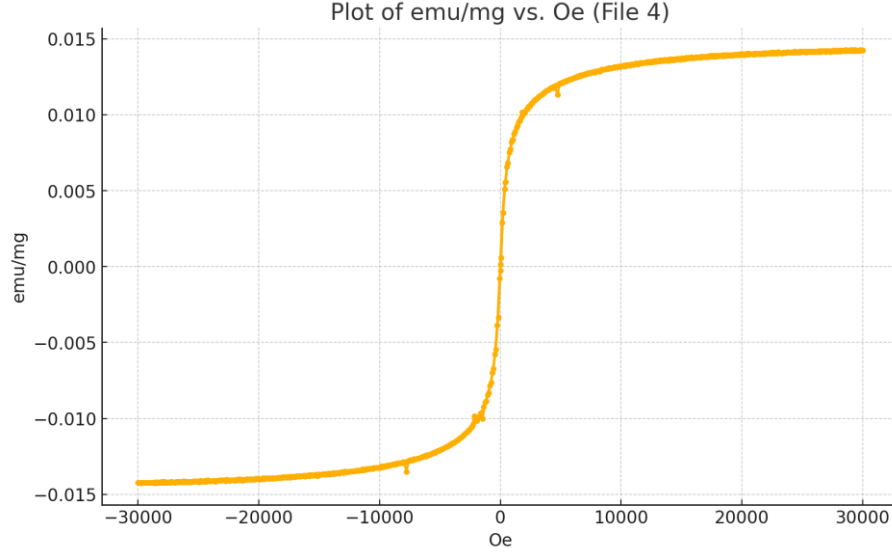
Şekil 5.40. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ nanoparçacığının VSM grafiği.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'ye ait VSM analizi malzemenin manyetik özelliklerini detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Grafikte görülen manyetik momentin (emu) manyetik alan (Oe) ile ilişkisi süperparamanyetik davranışı açıkça göstermektedir. Süperparamanyetik malzemelerde sıfır koersivite ve sıfır remanent manyetizma gözlenmesi dış manyetik alan kaldırıldığında net bir manyetik momentin kalmamasını ifade eder. Bu özellik özellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRI) manyetik hedefleme ve manyetik hipertermi gibi biyomedikal uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadır (Hafid ve ark., 2010). Manyetik doyum değerinin (saturation magnetization) sabit bir plato oluşturduğu alan bölgesi Fe_3O_4 çekirdeklerinin manyetik katkılarının silika kaplama ve CPTMS fonksiyonel grupları ile korunmuş olduğunu göstermektedir. Bu kaplama işlemi çekirdeklerin manyetik özelliklerini zayıflatmaksızın kimyasal olarak stabilize etmeyi başarmıştır (Zhao et al. 2014). Grafikteki doğrusal olmayan manyetik alan-moment eğrisi Fe_3O_4 çekirdeklerinin boyutunun nanoskopik düzeyde olduğunu ve süperparamanyetik özelliklerin korunduğunu göstermektedir. Süperparamanyetik malzemelerde gözlemlenen hızlı manyetizasyon ve doygunluk davranışı manyetik uygulamalarda yüksek performans sunmaktadır. Bu durum $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ 'nin yalnızca manyetik özelliklerini değil aynı zamanda kaplama ve yüzey modifikasyonu ile geliştirilmiş fonksiyonel potansiyelini de doğrulamaktadır (Munasir et al. 2019).



Şekil 5.41. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ nanoparçacığının VSM grafiği.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'e ait VSM analizi süperparamanyetik özelliklerini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Grafik sıfır koersivite ve sıfır remanent manyetizma özelliklerini net bir şekilde göstermektedir. Bu durum $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün dış manyetik alan kaldırıldığında manyetik moment bırakmadığını ve süperparamanyetik bir davranış sergilediğini ifade eder. Bu özellik manyetik rezonans görüntüleme (MRI) manyetik hedefleme ve manyetik hipertermi gibi biyomedikal uygulamalar için büyük avantaj sağlamaktadır (Hafid et al. 2010). Manyetik doyum (saturation magnetization) bölgesindeki plato Fe_3O_4 çekirdeklerinin manyetik özelliklerinin silika kaplama ve CPTMS modifikasyonlarıyla etkili bir şekilde korunduğunu göstermektedir. Kaplama işlemi Fe_3O_4 çekirdeklerinin çevresel koşullara karşı korunmasını sağlarken yüzeydeki CPTMS gruplarının kimyasal reaktivitesini artırmıştır. Manyetik doyum momenti $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ 'ün homojen bir manyetik yapıya sahip olduğunu ve yüzey kaplamalarının manyetik özellikleri olumsuz yönde etkilemediğini ortaya koymaktadır (Zhao et al. 2014). Grafikteki doğrusal olmayan manyetik alan-moment eğrisi Fe_3O_4 çekirdeklerinin nanoskopik boyutlarda olduğunu ve süperparamanyetik özelliklerin korunarak yüzey modifikasyonunun başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir. Bu davranış manyetik malzemenin özellikle tanı ve tedavi uygulamalarında yüksek verimlilikle kullanılabileceğini işaret eder (Munasir et al. 2019).



Şekil 5.42. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ nanoparçacığının VSM grafiği.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ 'e ait VSM (Vibrasyonel Numune Manyetometresi) grafiği malzemenin manyetik alan (Oe) ile manyetik moment (emu) arasındaki ilişkisini göstermektedir. Grafikte süperparamanyetik özelliklerin varlığı açıkça görülmektedir. Süperparamanyetik özellikler sıfır koersivite ve sıfır remanent manyetizma ile karakterize edilmiştir. Bu durum malzemenin dış manyetik alan kaldırıldığında manyetik moment bırakmadığını ve kümelenme riski olmaksızın kullanılabilceğini göstermektedir. Bu özellik biyomedikal uygulamalarda özellikle manyetik hedefleme ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi alanlarda büyük avantaj sağlar (Gao ve ark., 2016). Manyetik doyum (saturation magnetization) noktasında gözlemlenen sabit plato Fe_3O_4 çekirdeklerinin manyetik özelliklerinin silika kaplama ve CPTMS yüzey modifikasyonlarıyla korunmuş olduğunu göstermektedir. Bu kaplama işlemi çekirdeklerin oksidasyona karşı korunmasını sağlarken manyetik özelliklerin zayıflamasını önlemiş ve kimyasal reaktiviteyi artırmıştır (Munasir et al. 2019). Grafikteki doğrusal olmayan manyetik alan-moment eğrisi Fe_3O_4 çekirdeklerinin nanoskopik boyutta olduğunu ve süperparamanyetik özelliklerin yüzey modifikasyon işlemleri sırasında korunmuş olduğunu göstermektedir. Hızlı manyetizasyon ve doyuma ulaşma davranışı malzemenin manyetik alan altındaki duyarlılığını ve stabilitesini göstermektedir. Bu durum biyomedikal uygulamalar için kritik öneme sahiptir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında fenantren-imidazol türevi demiroksit nanoparçacıkların sentezi amaçlanmış ve başarıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıkları üzerine SiO_2 kaplanarak yüzey fonksiyonelleştirilmiş ardından (3-kloropropil)trimetoksisilan (CPTMS) bağlanarak organik Fenantren-İmidazol türevi (1/2/3/4) ile modifiye edilmiştir. Bu sayede dört farklı nanoparçacık yapı ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$) sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir.

X-ışını kırınımı (XRD) analizleri sentezlenen Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıklarının iyi kristalleşmiş yapıda olduğunu ve yüzey modifikasyonu sırasında Fe_3O_4 'ün kristal yapısının korunduğunu ortaya koymuştur. SiO_2 kaplamasının amorf yapısı XRD desenlerinde gözlemlenmiştir. Ayrıca fenantren-imidazol türevinin bağlanması sonucunda piklerde genişlemeler ve yoğunluk değişimleri tespit edilmiş bu da yüzey modifikasyonunun başarıyla gerçekleştirildiğini kanıtlamaktadır. Termogravimetrik analizler (TGA) nanoparçacıkların termal stabilitesini incelemek için yapılmıştır. TGA sonuçlarına göre nanoparçacıklar 600°C 'ye kadar yüksek termal dayanım sergilemiştir. 600°C 'ye kadar gözlenen kütle kaybı yüzeyde adsorbe olan su ve çözücü moleküllerinin uzaklaşmasına ve organik bileşenlerin bozunmasına bağlanmıştır. Organik kısımlar yanarak uzaklaşırken Fe_3O_4 ve SiO_2 çekirdeklerinin yüksek sıcaklıklarda stabil kaldığı görülmüştür. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizleri nanoparçacıkların termal geçişlerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. DSC analizleri özellikle 1000°C civarında gözlemlenen endotermik ve ekzotermik pikler aracılığıyla malzemede faz geçişleri ve organik bileşenlerin bozunması hakkında bilgi sağlamıştır. Fenantren-İmidazol türevinin varlığı malzemelerin termal özelliklerine önemli ölçüde katkı yapmış ve bu DSC piklerinde belirgin olarak gözlemlenmiştir. VSM analiz sonuçları $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ 'ün sıfır koersivite ve sıfır remanent manyetizma özellikleri sergilediğini göstermiştir. Bu durum Fe_3O_4 çekirdeklerinin süperparamanyetik davranışını koruduğunu ve dış manyetik alan kaldırıldığında manyetik kalıntı bırakmadığını doğrulamaktadır. Tüm numunelerde manyetik doyum (saturation magnetization) değerleri silika kaplama ve CPTMS

fonksiyonel gruplarının çekirdek üzerindeki manyetik katkıyı zayıflatmadığını göstermiştir. Bu veriler kaplama işlemlerinin manyetik çekirdekleri kimyasal ve fiziksel olarak stabilize ederek biyomedikal ve nanoteknolojik uygulamalar için ideal bir yapı sağladığını ortaya koymuştur. Bu çalışmada sentezlenen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ yapıları başarılı bir şekilde karakterize edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalara uyum göstermiştir. Sentezlenen nanoparçacıkların hem manyetik özellikler sergilediği hem de organik yapılar ile işlevsellik kazandığı görülmüştür. Özellikle Fe_3O_4 manyetik çekirdeği sayesinde bu yapılar manyetik ayırma gibi uygulamalara uygun hale gelirken Fenantren-İmidazol türevi gibi organik moleküller ile fonksiyonelleştirme sayesinde katalizör biyosensör veya ilaç taşıma sistemleri gibi çeşitli alanlarda kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Bu tez kapsamında geliştirilen nanoparçacıklar gelecekte biyomedikal uygulamalar katalitik sistemler veya manyetik ayırma teknolojileri gibi çeşitli ileri teknoloji alanlarında kullanıma uygun fonksiyonel ve termal olarak dayanıklı yapılar olarak değerlendirilebilir. Ayrıca bu yapılar çeşitli modifikasyonlarla geniş bir uygulama yelpazesi için daha da geliştirilme potansiyeline sahiptir.

6.2. Öneriler

Bu tez kapsamında sentezlenen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1/2/3/4$ nanoparçacıklarının yapısal ve termal karakterizasyonları başarıyla yapılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında bu çalışmanın geliştirilmesi ve yeni uygulamalara yönelik öneriler şu şekildedir:

Fenantren-İmidazol türevi yerine farklı organik moleküller veya biyomoleküller kullanılarak nanoparçacıkların yüzeyi daha çeşitli fonksiyonlarla modifiye edilebilir. Bu sayede farklı uygulama alanları (biyosensörler ilaç taşıma sistemleri vb.) için özelleştirilebilecek çok daha çeşitli yapılar üretilebilir. Sentezlenen nanoparçacıkların manyetik ayırma veya katalitik süreçlerdeki etkinliği özellikle endüstriyel ölçekli uygulamalarda incelenmelidir. Bu bağlamda reaksiyon hızlarının ve verimlerinin artırılabilmesi yöntemler üzerinde çalışmalar yapılabilir. Katalitik aktivitenin artırılması için nanoparçacıkların yüzey alanı artırılarak modifikasyonlar denenebilir. Biyomedikal uygulamalara yönelik olarak sentezlenen nanoparçacıkların biyoyuymumluluğu ve biyolojik ortamlarla etkileşimi daha ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir. Hücre kültürü çalışmaları ve in vivo testlerle nanoparçacıkların ilaç

taşıma hedefleme ve biyosensör gibi uygulamalardaki performansı değerlendirilebilir. Nanoparçacıkların stabilitesini artırmak ve yüzey fonksiyonlarını daha kararlı hale getirmek amacıyla farklı kaplama teknikleri (polimer kaplama çift katmanlı kaplamalar) üzerinde çalışmalar yapılabilir. Bu yöntemler nanomalzemelerin dayanıklılığını artırabilir ve çevresel etkilerden korunmasını sağlayabilir. Manyetik özellikler sergileyen bu nanoparçacıkların çevre kirliliğinin giderilmesinde özellikle ağır metal iyonlarının manyetik ayırma yöntemi ile uzaklaştırılmasında kullanımı araştırılabilir. Bu amaçla yapılacak çalışmalar nanoparçacıkların çevresel teknolojilerdeki kullanım potansiyelini ortaya koyabilir. Fe_3O_4 çekirdeği ve Fenantren-İmidazol türevinin elektrokimyasal özelliklerinden yararlanarak nanoparçacıkların enerji depolama süperkapasitörler veya yakıt hücrelerinde kullanım potansiyeli değerlendirilebilir. Elektrokimyasal performansın artırılması için bu alanda yeni sentez stratejileri geliştirilebilir.

Bu öneriler doğrultusunda geliştirilen nanoparçacıkların farklı alanlarda daha fazla uygulama potansiyeline sahip olacağı ve ilerleyen çalışmalarda daha fazla özelleştirilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelbasir, S. M. ve Shalan, A. E., 2019, Intriguing Properties and Applications of Functional Magnetic Materials.
- Alizadeh, A., Khodaei, M. M., Beygzadeh, M., Kordestani, D. ve Feyzi, M., 2012, Biguanide-functionalized Fe₃O₄/SiO₂ magnetic nanoparticles: an efficient heterogeneous organosuperbase catalyst for various organic transformations in aqueous media, *Bull. Korean Chem. Soc*, 33 (8), 2547.
- Amelia, T., Saputro, R. E., Hidayat, N., Taufiq, A., Diantoro, M., Sunaryono, S., Mufti, N. ve Hidayat, A., 2020, Synthesis and structural characterization of iron chromite nanoparticles: A preliminary study, *Journal of Physics: Conference Series*, 1595 (1), 012027.
- Anderson, E. B. ve Long, T. E., 2010, Imidazole- and imidazolium-containing polymers for biology and material science applications, *Polymer*, 51 (12), 2447-2454.
- Andreu, J. S., Camacho, J. ve Faraudo, J., 2011, Aggregation of Superparamagnetic Colloids in Magnetic Fields: The Quest for the Equilibrium State, *Soft Matter*, 7 (6), 2336.
- Ángeles-Pascual, A., Piñón-Hernández, J. R., Estevez-González, M., Pal, U., Velumani, S., Pérez, R. ve Esparza, R., 2018, Structure, magnetic and cytotoxic behaviour of solvothermally grown Fe₃O₄@Au core-shell nanoparticles, *Materials Characterization*, 142, 237-244.
- Arfken, G., Griffing, D. F., Kelly, D. ve Priest, J., 1984, MAGNETISM AND THE MAGNETIC FIELD, 602-627.
- Ariannezhad, M., Habibi, D. ve Heydari, S., 2019, Copper nanoparticles: A capable and versatile catalyst for the synthesis of diverse 1-phenyl-1H-tetrazoles from amino acids, *Polyhedron*.
- Arias, L. S., Pessan, J. P., Vieira, A. P. M., Lima, T. M. T., Delbem, A. C. B. ve Monteiro, D. R., 2018, Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications: A Perspective on Synthesis, Drugs, Antimicrobial Activity, and Toxicity, *Antibiotics*, 7.
- Awad, A., Ahmed, W. ve Waleed, M., 2021, Chapter 18 - Nanotechnology for energy storage, In: *Emerging Nanotechnologies for Renewable Energy*, Eds: Ahmed, W., Booth, M. ve Nourafkan, E.: Elsevier, p. 495-516.
- Baer, D. R., Gaspar, D. J., Nachimuthu, P., Techane, S. D. ve Castner, D. G., 2010, Application of surface chemical analysis tools for characterization of nanoparticles, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 396 (3), 983-1002.
- Baltz, V., Manchon, A., Tsoi, M., Moriyama, T., Ono, T. ve Tserkovnyak, Y., 2018, Antiferromagnetic Spintronics, *Reviews of Modern Physics*, 90 (1).
- Belous, A., Solopan, S., Yelenich, O., Osinsky, S., Bubnovskaya, L. ve Bovkun, L., 2014, Synthesis and properties of ferromagnetic nanoparticles for potential biomedical application, *2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 245-249.
- Biju, V., Itoh, T., Anas, A., Sujith, A. ve Ishikawa, M., 2008, Semiconductor quantum dots and metal nanoparticles: syntheses, optical properties, and biological applications, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391 (7), 2469-2495.
- Bowles, J., 1997, The Iron Oxides: Structure, Properties Reactions Occurrence and Uses (Review), *Mineralogical Magazine - MINER MAG*, 61, 740-741.
- Bratulescu, G., 2009, Synthesis of 4,5-Substituted Imidazoles by a Fast Condensation of 1,2-Diketones and Urotropine in Heterogeneous Medium, *Synthesis-stuttgart*, 2009, 2319-2320.

- Caretta, L., Mann, M., Büttner, F., Ueda, K., Pfau, B., Günther, C., Hessing, P., Churikova, A., Klose, C., Schneider, M., Engel, D., Marcus, C., Bono, D., Bagschik, K., Eisebitt, S. ve Beach, G. S. D., 2018, Fast Current-Driven Domain Walls and Small Skyrmions in a Compensated Ferrimagnet, *Nature Physics*, 13 (12), 1154-1160.
- Centrone, A., 2011, Probing the Paramagnetic Interactions Between the Unpaired Electronic Spins of Carbon Atoms and the Nuclear Spins of Hydrogen Molecules With Raman Spectroscopy, *Journal of Raman Spectroscopy*, 42 (12), 2165-2167.
- Chakrabarty, T., Goldin, N., Feintuch, A., Houben, L. ve Leskes, M., 2018, Paramagnetic Metal-Ion Dopants as Polarization Agents for Dynamic Nuclear Polarization NMR Spectroscopy in Inorganic Solids, *Chemphyschem*, 19 (17), 2139-2142.
- Changjin, L., 2013, Review on the remediation of phenanthrene in contaminated soils, *Soil and Environmental Sciences*.
- Chawla, A., Kaur, G. ve Kumar, A., 2022, International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research Green Chemistry as a Versatile Technique for the Synthesis of Benzimidazole Derivatives: Review, *International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research*, 2, 148-159.
- Chen, Y., D'Amario, C., Gee, A., Duong, H. T. T., Shimoni, O. ve Valenzuela, S. M., 2020, Dispersion stability and biocompatibility of four ligand-exchanged NaYF₄: Yb, Er upconversion nanoparticles, *Acta Biomaterialia*, 102, 384-393.
- Coey, J. M. D., Douvalis, A. P., Fitzgerald, C. B. ve Venkatesan, M., 2004, Ferromagnetism in Fe-Doped SnO₂ Thin Films, *Applied Physics Letters*, 84 (8), 1332-1334.
- Cong, H. ve Porco, J. A., Jr., 2012, Chemical Synthesis of Complex Molecules Using Nanoparticle Catalysis, *ACS Catalysis*, 2 (1), 65-70.
- Cooke, A. H., 1949, Paramagnetic Relaxation, *Nature*, 163, 305-305.
- Cooper, J. L. ve Wasserman, H. H., 1969, Photolysis of 4,5-diphenyl-oxazoles, -thiazoles, and -imidazoles. Formation of phenanthro[9,10-d]-heterocyclic systems, *Journal of the Chemical Society D: Chemical Communications* (5), 200-201.
- Couto, D., Freitas, M., Carvalho, F. ve Fernandes, E., 2015, Iron Oxide Nanoparticles: An Insight into their Biomedical Applications, *Current medicinal chemistry*, 22 15, 1808 - 1828.
- Crooks, R. M., Zhao, M., Sun, L., Chechik, V. ve Yeung, L. K., 2001, Dendrimer-Encapsulated Metal Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Applications to Catalysis, *Accounts of Chemical Research*, 34 (3), 181-190.
- Çelik Erbaş, S. ve Gülle, S., 2018, Synthesis and Photophysical Behaviours of Novel Phenanthro[9,10-d] imidazole Substituted Azo Dyes in Solvent Media, *Celal Bayar University Journal of Science*, 14 (3), 285-289.
- Dadfar, S. M., Roemhild, K., Drude, N. I., von Stillfried, S., Knüchel, R., Kiessling, F. ve Lammers, T., 2019, Iron oxide nanoparticles: Diagnostic, therapeutic and theranostic applications, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 138, 302-325.
- Damavandi, S., 2011, New approach to the multicomponent one-pot synthesis of 2-aryl-1H-phenanthro[9,10-d]imidazoles, *Heterocyclic Communications*, 17 (1-2), 79-81.
- Deepak, F. L., Anumol, E. A. ve Li, J., 2018, Advanced Electron Microscopy Techniques Toward the Understanding of Metal Nanoparticles and Clusters, In: *Metal Nanoparticles and Clusters: Advances in Synthesis, Properties and*

- Applications, Eds: Deepak, F. L., Cham: Springer International Publishing, p. 219-287.
- Del Tito, A., Abdulla, H. O., Ravelli, D., Protti, S. ve Fagnoni, M., 2020, Photocatalyzed syntheses of phenanthrenes and their aza-analogues. A review, *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 16, 1476-1488.
- Demirer, G. S., Okur, A. C. ve Kızılel, S., 2015, Synthesis and design of biologically inspired biocompatible iron oxide nanoparticles for biomedical applications, *Journal of materials chemistry. B*, 3 40, 7831-7849.
- Desai, N. C. ve Kotadiya, G. M., 2014, Microwave-assisted synthesis of benzimidazole bearing 1,3,4-oxadiazole derivatives: screening for their in vitro antimicrobial activity, *Medicinal Chemistry Research*, 23 (9), 4021-4033.
- Dias, G. G., Paz, E. R. S., Nunes, M. P., Carvalho, R. L. d., Rodrigues, M. O., Rodembusch, F. S. ve Júnior, E. N. d. S., 2021, Imidazoles and Oxazoles From Lapachones and Phenanthrene-9,10-dione: A Journey Through Their Synthesis, Biological Studies, and Optical Applications, *The Chemical Record*, 21 (10), 2702-2738.
- Elrahman, A. A. A. ve Mansour, F. R., 2019, Targeted magnetic iron oxide nanoparticles: Preparation, functionalization and biomedical application, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*.
- Eshghi, H., Rahimizadeh, M., Hasanpour, M. ve Bakavoli, M., 2015, A novel imidazolium-based acidic ionic liquid as an efficient and reusable catalyst for the synthesis of 2-aryl-1H-phenanthro[9,10-d]imidazoles, *Research on Chemical Intermediates*, 41 (7), 4187-4197.
- Eslami Moghadam, M., Divsalar, A., Abolhosseini Shahrnoy, A. ve Saboury, A. A., 2016, Synthesis, cytotoxicity assessment, and interaction and docking of novel palladium(II) complexes of imidazole derivatives with human serum albumin, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 34, 1751 - 1762.
- Esmaeili-Shahri, E. ve Es'haghi, Z., 2015, Superparamagnetic Fe₃O₄@SiO₂ core-shell composite nanoparticles for the mixed hemimicelle solid-phase extraction of benzodiazepines from hair and wastewater samples before high-performance liquid chromatography analysis, *Journal of separation science*, 38 23, 4095-4104.
- Esser, B., Funston, A., & Etheridge, J., 14 Ağustos 2021, Investigating nanoparticle surface energetics using 4D-STEM, *Acta Crystallographica Section A*.
- Farzaneh, F. ve Asgharpour, Z., 2019, Synthesis of a new schiff base oxovanadium complex with melamine and 2-hydroxynaphtaldehyde on modified magnetic nanoparticles as catalyst for allyl alcohols and olefins epoxidation, *Applied Organometallic Chemistry*, 33 (5), e4896.
- Feng, L., Cao, M., Ma, X., Zhu, Y. ve Hu, C., 2012, Superparamagnetic high-surface-area Fe₃O₄ nanoparticles as adsorbents for arsenic removal, *Journal of Hazardous Materials*, 217-218, 439-446.
- Finger, F., Neto, L. B., Carius, R., Dylla, T. ve Klein, S., 2004, Paramagnetic Defects in Undoped Microcrystalline Silicon, *Physica Status Solidi (C)*, 1 (5), 1248-1254.
- Fischer, P. ve Ohldag, H., 2015, X-rays and magnetism, *Reports on Progress in Physics*, 78.
- Fraenkel, G., 1957, PARAMAGNETIC RESONANCE OF FREE RADICALS, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 67.
- Gao, Z., Liu, X., Deng, G., Zhou, F., Zhang, L., Wang, Q. ve Lu, J., 2016, Fe₃O₄@mSiO₂-FA-CuS-PEG nanocomposites for magnetic resonance imaging

- and targeted chemo-photothermal synergistic therapy of cancer cells, *Dalton transactions*, 45 34, 13456-13465.
- Garcia-Osorio, D., P. Nogueira, H., Gonçalves, J. M., Toma, S. H., Garcia-Segura, S. ve Araki, K., 2021, SPION-decorated organofunctionalized MCM48 silica-based nanocomposites for magnetic solid-phase extraction, *Materials Advances*, 2 (3), 963-973.
- Gawande, M. B., Goswami, A., Felpin, F.-X., Asefa, T., Huang, X., Silva, R., Zou, X., Zboril, R. ve Varma, R. S., 2016, Cu and Cu-Based Nanoparticles: Synthesis and Applications in Catalysis, *Chemical Reviews*, 116 (6), 3722-3811.
- Ghinwa, A. ve Noubactep, C., 2023, Characterizing the Impact of Contact Time in Investigating Processes in Fe0/H2O Systems, p.
- Guha, B. C., 1945, Magnetic Properties of some Paramagnetic Crystals at Low Temperatures, *Nature*, 155, 364-364.
- Guo, S. ve Wang, E., 2007, Synthesis and electrochemical applications of gold nanoparticles, *Analytica Chimica Acta*, 598 (2), 181-192.
- Gupta, A. K. ve Gupta, M., 2005, Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications, *Biomaterials*, 26 (18), 3995-4021.
- Gupta, A. K., Naregalkar, R. R., Vaidya, V. D. ve Gupta, M., 2007, Recent advances on surface engineering of magnetic iron oxide nanoparticles and their biomedical applications, *Nanomedicine*, 2 1, 23-39.
- Gupta, N., Fischer, A. R. ve Frewer, L. J., 2015, Ethics, Risk and Benefits Associated With Different Applications of Nanotechnology: A Comparison of Expert and Consumer Perceptions of Drivers of Societal Acceptance, *Nanoethics*, 9 (2), 93-108.
- Habibi, D., Heydari, S., Afsharfarnia, M. ve Moghimpour, F., 2018, Preparation of novel palladium nanoparticles supported on magnetic iron oxide and their catalytic application in the synthesis of 2-imino-3-phenyl-2,3-dihydrobenzo[d]oxazol-5-ols, *Applied Organometallic Chemistry*, 32.
- Hafid, M., Dalili, W., Yazami, S. I. ve Merzouk, N. K., 2010, Growth and characterization of Fe₃O₄ nanoparticles in silica matrix, *Phase Transitions*, 83, 627 - 633.
- Halder, S., 2020, Vanadyl Acetylacetonate-Copper (II) Trifluoro Methane Sulfonate Catalyzed Eco-friendly Synthesis of Substituted Benzimidazoles in Aqueous Media, *Oriental Journal of Chemistry*, 36, 687-694.
- Hampshire, D. P., 1997, Magnetic Properties of the Flux Line Lattice in Paramagnetic Superconductors, *Journal of Physics Condensed Matter*, 9 (10), 2239-2258.
- Hapca, S., Baveye, P. C., Wilson, C., Lark, R. M. ve Otten, W., 2015, Three-Dimensional Mapping of Soil Chemical Characteristics at Micrometric Scale by Combining 2D SEM-EDX Data and 3D X-Ray CT Images, *PLOS ONE*, 10 (9), e0137205.
- Hernandez-Padron, G., Acosta-Torres, L., Rojas-González, F. ve Castaño, V., 2013, Anticorrosives, encapsulates, catalytic supports and other novel nanostructured materials, *Bulletin of Materials Science*, 35.
- Holec, D., Dumitraschkewitz, P., Vollath, D. ve Fischer, F. D., 2020, Surface Energy of Au Nanoparticles Depending on Their Size and Shape, *Nanomaterials*, 10 (3), 484.
- Honciuc, A. ve Negru, O.-I., 2023, Monitoring the Surface Energy Change of Nanoparticles in Functionalization Reactions with the NanoTraPPED Method, *Nanomaterials*, 13 (7), 1246.

- Hossain, M. ve Nanda, A. K., 2018, A Review on Heterocyclic: Synthesis and Their Application in Medicinal Chemistry of Imidazole Moiety.
- Hu, M., Butt, H. J., Landfester, K., Bannwarth, M. B., Wooh, S. ve Thérien-Aubin, H. s., 2019, Shaping the Assembly of Superparamagnetic Nanoparticles, *ACS nano*, 13 (3), 3015-3022.
- Huang, D., Xu, B., Wu, J., Brookes, P. C. ve Xu, J., 2019, Adsorption and desorption of phenanthrene by magnetic graphene nanomaterials from water: Roles of pH, heavy metal ions and natural organic matter, *Chemical Engineering Journal*, 368, 390-399.
- Hurd, C., 1982, Varieties of magnetic order in solids, *Contemporary Physics*, 23, 469-493.
- Hurtado-Gallego, J., Pulido-Reyes, G., González-Pleiter, M., Salas, G., Leganés, F., Rosal, R. ve Fernández-Piñas, F., 2020, Toxicity of superparamagnetic iron oxide nanoparticles to the microalga *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chemosphere*, 238, 124562.
- Ikebuchi, T., Hirata, Y., Funada, S., Tsukamoto, A., Ito, H., Suzuki, K., Hoshi, K., Tsuji, N., Sakurai, H., Shiota, Y., Moriyama, T. ve Ono, T., 2021, Estimation of Angular Momentum Compensation Temperature in GdFe Film by Magnetic Compton Scattering, *Journal of the Magnetism Society of Japan*, 45 (1), 1-5.
- Jayabharathi, J., Sivaraj, S., Thanikachalam, V. ve Balu, B. s. S. S., 2020, Efficient blue electroluminescence with an external quantum efficiency of 9.20% and CIE $y < 0.08$ without excimer emission, *RSC Advances*, 10, 25059-25072.
- Jose Chirayil, C., Abraham, J., Kumar Mishra, R., George, S. C. ve Thomas, S., 2017, Chapter 1 - Instrumental Techniques for the Characterization of Nanoparticles, In: Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization, Eds: Thomas, S., Thomas, R., Zachariah, A. K. ve Mishra, R. K.: Elsevier, p. 1-36.
- Joseph, B., James, J., Eapen, N., Kalarikkal, N. ve Thomas, S., 2020, Chapter 3 - Nano-optics for healthcare applications, In: Nano-Optics, Eds: Thomas, S., Grohens, Y., Vignaud, G., Kalarikkal, N. ve James, J.: Elsevier, p. 33-46.
- Jung, Y. C., Sahoo, N. G. ve Cho, J. W., 2005, Polymeric Nanocomposites of Polyurethane Block Copolymers and Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes as Crosslinkers, *Macromolecular Rapid Communications*, 27 (2), 126-131.
- Kabi, A. K., Gujjarappa, R., Roy, A., Sahoo, A., Musib, D., Vodnala, N., Singh, V. ve Malakar, C. C., 2021, Transition-Metal-Free Transfer Hydrogenative Cascade Reaction of Nitroarenes with Amines/Alcohols: Redox-Economical Access to Benzimidazoles, *The Journal of Organic Chemistry*, 86 (21), 14597-14607.
- Kadhim, A. j. ve Kazim, A. C., 2018, Synthesis and Characterization of Benzimidazole by Using o-Phenylenediamine with Different Aldehydes and Carboxylic Acids in the Presence of p-TSOH as a Catalyst, *Oriental Journal of Chemistry*.
- Kakavandi, R., Savu, S.-A., Caneschi, A. ve Casu, M. B., 2013, Paramagnetic Character in Thin Films of Metal-Free Organic Magnets Deposited on $\text{TiO}_2(110)$ Single Crystals, *The Journal of Physical Chemistry C*, 117 (50), 26675-26679.
- Karaagac, O., Köçkar, H., Burcak, Gurmen, E. ve Ebin, B., 2013, Reduction and characterizations of iron particles: influence of reduction parameters.
- Karunakaran, C., Jayabharathi, J., Venkatesh Perumal, M., Thanikachalam, V. ve Thakur, P., 2013, Electronic properties of phenanthrimidazoles as hole transport

- materials in organic light emitting devices and in photoelectron transfer to ZnO nanoparticles, *Journal of Physical Organic Chemistry*, 26.
- Kerru, N., Bhaskaruni, S. V. H. S., Gummidi, L., Maddila, S. N., Maddila, S. ve Jonnalagadda, S. B., 2019, Recent advances in heterogeneous catalysts for the synthesis of imidazole derivatives, *Synthetic Communications*, 49, 2437 - 2459.
- Khan, I., Saeed, K. ve Khan, I., 2019, Nanoparticles: Properties, applications and toxicities, *Arabian Journal of Chemistry*, 12 (7), 908-931.
- Kim, E. M. ve Jeong, H.-J., 2016, Current Status and Future Direction of Nanomedicine: Focus on Advanced Biological and Medical Applications, *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 51 (2), 106-117.
- Knoop, J. E., 2023, Synthesis, Characterization, and Magnetic Properties of Lanthanide-Containing Paramagnetic Ionic Liquids: An Evan's NMR Study, *Acs Applied Engineering Materials*, 1 (11), 2831-2846.
- Koo, B., Xiong, H., Slater, M. D., Prakapenka, V. B., Balasubramanian, M., Podsiadlo, P., Johnson, C. S., Rajh, T. ve Shevchenko, E. V., 2012, Hollow Iron Oxide Nanoparticles for Application in Lithium Ion Batteries, *Nano letters*, 12 (5), 2429-2435.
- Kralj, S., Makovec, D., Čampelj, S. ve Drofenik, M., 2010, Producing ultra-thin silica coatings on iron-oxide nanoparticles to improve their surface reactivity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322 (13), 1847-1853.
- Kula, S., Szlapa-Kula, A., Kotowicz, S., Filapek, M., Bujak, K., Siwy, M., Janeczek, H., Maćkowski, S. ve Schab-Balcerzak, E., 2018, Phenanthro[9,10-d]imidazole with thiophene rings toward OLEDs application, *Dyes and Pigments*, 159, 646-654.
- Kula, S., Ledwon, P., Maroń, A. M., Siwy, M., Grzelak, J., Szalkowski, M., Maćkowski, S. ve Schab-Balcerzak, E., 2021, Synthesis, photophysical properties and electroluminescence characterization of 1-phenyl-1H-phenanthro[9,10-d]imidazole derivatives with N-donor substituents, *Dyes and Pigments*, 192, 109437.
- Kumar, N. ve Kumar, K. V., 2009, Classical Langevin Dynamics of a Charged Particle Moving on a Sphere and Diamagnetism: A Surprise, *Epl (Europhysics Letters)*, 86 (1), 17001.
- Kurtan, U. ve Baykal, A., 2014, Fabrication and characterization of Fe₃O₄@APTES@PAMAM-Ag highly active and recyclable magnetic nanocatalyst: Catalytic reduction of 4-nitrophenol, *Materials Research Bulletin*, 60, 79-87.
- Kutluca Alici, M., 2020, Phentrioimidazole Based Fluorescence “Turn on” Sensor for Highly Sensitive Detection of Zn²⁺ Ions, *Journal of Fluorescence*, 30 (2), 269-273.
- Kuzmann, E., Stichleutner, S., Homonnay, Z., Havancsák, K., Chisholm, C. U., El-Sharif, M., Skuratov, V. A., Nakanishi, A. ve Nomura, K., 2016, Generation of Superparamagnetism in Metallic A-Iron by Swift Heavy Ion Irradiation, *Radiation Physics and Chemistry*, 127, 165-168.
- Kuznetsov, A. I., Miroshnichenko, A. E., Brongersma, M. L., Kivshar, Y. S. ve Luk'yanchuk, B., 2016, Optically resonant dielectric nanostructures, *Science*, 354 (6314), aag2472.
- Lai, L.-Q., Li, Z., Yu, Y. ve Liu, Q., 2018, Third-Order Magnetic Susceptibility of an Ideal Fermi Gas, *Communications in Theoretical Physics*, 70 (5), 619.
- Lapresta-Fernández, A., Salinas-Castillo, A., Anderson de la Llana, S., Costa-Fernández, J. M., Domínguez-Meister, S., Cecchini, R., Capitán-Vallvey, L. F., Moreno-Bondi, M. C., Marco, M. P., Sánchez-López, J. C. ve Anderson, I. S.,

- 2014, A General Perspective of the Characterization and Quantification of Nanoparticles: Imaging, Spectroscopic, and Separation Techniques, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 39 (6), 423-458.
- Laurent, S., Dutz, S., Häfeli, U. O. ve Mahmoudi, M., 2011, Magnetic fluid hyperthermia: focus on superparamagnetic iron oxide nanoparticles, *Advances in Colloid and Interface Science*, 166 1-2, 8-23.
- Lebrun, R., Ross, A., Bender, S., Qaiumzadeh, A., Baldrati, L., Cramer, J., Brataas, A., Duine, R. A. ve Kläui, M., 2018, Tunable Long-Distance Spin Transport in a Crystalline Antiferromagnetic Iron Oxide, *Nature*, 561 (7722), 222-225.
- Liang, Y., Ouyang, J., Wang, H., Wang, W., Chui, P. ve Sun, K., 2011, Synthesis and characterization of core-shell structured SiO₂@YVO₄:Yb³⁺,Er³⁺ Microspheres, *Applied Surface Science*, 258, 3689.
- Liu, J., Qiu, J., Wang, M., Wang, L., Su, L., Gao, J., Gu, Q., Xu, J., Huang, S.-L., Gu, L.-Q., Huang, Z. ve Li, D., 2014, Synthesis and characterization of 1H-phenanthro[9,10-d]imidazole derivatives as multifunctional agents for treatment of Alzheimer's disease, *Biochimica et biophysica acta*, 1840 9, 2886-2903.
- Liu, R., Huang, W., Pan, S., Li, Y., Yu, L. ve He, D., 2020a, Covalent immobilization and characterization of penicillin G acylase on magnetic Fe₂O₃/Fe₃O₄ heterostructure nanoparticles prepared via a novel solution combustion and gel calcination process, *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1587-1596.
- Liu, X., Edmonds, K. W., Zhou, Z. ve Wang, K. Y., 2020b, Tuning Interfacial Spins in Antiferromagnetic–Ferromagnetic–Heavy-Metal Heterostructures via Spin-Orbit Torque, *Physical Review Applied*, 13 (1).
- Liu, Z.-Y., Zhang, J., Sun, Y.-M., Zhu, C.-F., Lu, Y.-N., Wu, J.-Z., Li, J., Liu, H.-Y. ve Ye, Y., 2020c, Photodynamic antitumor activity of Ru(II) complexes of imidazo-phenanthroline conjugated hydroxybenzoic acid as tumor targeting photosensitizers, *Journal of Materials Chemistry B*, 8 (3), 438-446.
- Lotfi, S., Nikseresht, A. ve Rahimi, N., 2019, Synthesis of Fe₃O₄@SiO₂/Isoniazid/Cu(II) magnetic nanocatalyst as a recyclable catalyst for a highly efficient preparation of quinolines in moderate conditions, *Polyhedron*, 173, 114148.
- Mahmoudi, M., Simchi, A., Imani, M. ve Häfeli, U. O., 2009, Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles With Rigid Cross-Linked Polyethylene Glycol Fumarate Coating for Application in Imaging and Drug Delivery, *The Journal of Physical Chemistry C*, 113 (19), 8124-8131.
- Mahmoudi, M., Sant, S., Wang, B., Laurent, S. ve Sen, T., 2011, Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs): Development, surface modification and applications in chemotherapy, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 63 (1), 24-46.
- Mahmud, M. Z. A., 2023, A Concise Review of Nanoparticles Utilized Energy Storage and Conservation, *Journal of Nanomaterials*, 2023 (1), 5432099.
- Maleki, A., Aghaei, M., Hafizi-Atabak, H. R. ve Ferdowsi, M., 2017, Ultrasonic treatment of CoFe₂O₄@B₂O₃-SiO₂ as a new hybrid magnetic composite nanostructure and catalytic application in the synthesis of dihydroquinazolinones, *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 260-266.
- Malvindi, M. A., De Matteis, V., Galeone, A., Brunetti, V., Anyfantis, G. C., Athanassiou, A., Cingolani, R. ve Pompa, P. P., 2014, Toxicity Assessment of Silica Coated Iron Oxide Nanoparticles and Biocompatibility Improvement by Surface Engineering, *PLOS ONE*, 9.

- Manzoor, U., Islam, M., Tabassam, L. ve Rahman, S. U., 2009, Quantum confinement effect in ZnO nanoparticles synthesized by co-precipitate method, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 41 (9), 1669-1672.
- Meizhong, W., 2019, Magnetism and electromagnetism, *Understandable Electric Circuits: Key concepts*.
- Mendes, R. G., Bachmatiuk, A., El-Gendy, A. A., Melkhanova, S. V., Klingeler, R., Büchner, B. ve Rummeli, M. H., 2012, A Facile Route to Coat Iron Oxide Nanoparticles with Few-Layer Graphene, *Journal of Physical Chemistry C*, 116, 23749-23756.
- Mørup, S., Hansen, M. F. ve Frandsen, C., 2010, Magnetic Interactions Between Nanoparticles, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 1, 182-190.
- Munasir, Setyaningsih, N., Yanasin, S., Supardi, Z. A. I., Taufiq, A. ve Sunaryono, 2019, Phase and Magnetic Properties of Fe₃O₄/SiO₂ Natural Materials-Based Using Polyethylene Glycol Media, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 515.
- Nair, A. K., Mayeen, A., Shaji, L. K., Kala, M. S., Thomas, S. ve Kalarikkal, N., 2018, Chapter 10 - Optical Characterization of Nanomaterials, In: Characterization of Nanomaterials, Eds: Mohan Bhagyaraj, S., Oluwafemi, O. S., Kalarikkal, N. ve Thomas, S.: Woodhead Publishing, p. 269-299.
- Nakanishi, T. ve Yamamoto, S., 2002, Intrinsic Double-Peak Structure of the Specific Heat in Low-Dimensional Quantum Ferrimagnets, *Physical Review B*, 65 (21).
- Nakano, H., Shimokawa, T. ve Sakai, T., 2011, Collapse of Ferrimagnetism in Two-Dimensional Heisenberg Antiferromagnet Due to Frustration, *Journal of the Physical Society of Japan*, 80 (3), 033709.
- Nanda, K. K., Maisels, A., Kruis, F. E., Fissan, H. ve Stappert, S., 2003, Higher Surface Energy of Free Nanoparticles, *Physical Review Letters*, 91 (10), 106102.
- Němec, P., Fiebig, M., Kampfrath, T. ve Kimel, A. V., 2018, Antiferromagnetic Opto-Spintronics, *Nature Physics*, 14 (3), 229-241.
- Nikmah, A., Taufiq, A. ve Hidayat, A., 2019, Synthesis and Characterization of Fe₃O₄/SiO₂ nanocomposites, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 276.
- O'Connor, T. ve Zamkov, M., 2013, Optical Properties of Nanocomposites, In: UV-VIS and Photoluminescence Spectroscopy for Nanomaterials Characterization, Eds: Kumar, C., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 485-529.
- Onosaka, A., Yamaura, J. i., Hirose, T. ve Hiroi, Z., 2012, Large Diamagnetism of $AV_{2}Al_{20}$ (A=Y and La), *Journal of the Physical Society of Japan*, 81 (12), 123702.
- Palke, A. C. ve Stebbins, J. F., 2011, Paramagnetic Interactions in the ³¹P NMR Spectroscopy of Rare Earth Element Orthophosphate (REPO₄, Monazite/Xenotime) Solid Solutions, *American Mineralogist*, 96 (8-9), 1343-1353.
- Pankhurst, Q. A., Thanh, N. T. K., Jones, S. ve Dobson, J., 2009, Progress in Applications of Magnetic Nanoparticles in Biomedicine, *Journal of Physics D Applied Physics*, 42 (22), 224001.
- Patel, A., Sharp, S. Y., Hall, K., Lewis, W., Stevens, M. F. G., Workman, P. ve Moody, C. J., 2016, Fused imidazoles as potential chemical scaffolds for inhibition of heat shock protein 70 and induction of apoptosis. Synthesis and biological evaluation of phenanthro[9,10-d]imidazoles and imidazo[4,5-f][1,10]phenanthrolines, *Organic & biomolecular chemistry*, 14 16, 3889-3905.

- Paun, I. A., Calin, B. S., Mustaciosu, C. C., Mihailescu, M., Moldovan, A., Crisan, O., Leca, A. ve Luculescu, C., 2019, 3D Superparamagnetic Scaffolds for Bone Mineralization Under Static Magnetic Field Stimulation, *Materials*, 12 (17), 2834.
- Petasis, D. T. ve Hendrich, M. P., 2015, Quantitative Interpretation of Multifrequency Multimode EPR Spectra of Metal Containing Proteins, Enzymes, and Biomimetic Complexes, 171-208.
- Peters, C., Hoop, M., Pané, S., Nelson, B. J. ve Hierold, C., 2015, Degradable Magnetic Composites for Minimally Invasive Interventions: Device Fabrication, Targeted Drug Delivery, and Cytotoxicity Tests, *Advanced Materials*, 28 (3), 533-538.
- Polshettiwar, V. ve Varma, R. S., 2010, Green chemistry by nano-catalysis, *Green Chemistry*, 12 (5), 743-754.
- Pomerantseva, E., Bonaccorso, F., Feng, X., Cui, Y. ve Gogotsi, Y., 2019, Energy storage: The future enabled by nanomaterials, *Science*, 366 (6468), eaan8285.
- Pozharskii, F. T., Oleinikova, L. Y. ve Pupkova, L. G., 1971, Synthesis and transformations of 2-(2-furyl)- and 2-[β -(2-furyl)vinyl] phenanthr [9,10]imidazoles, *Chemistry of Heterocyclic Compounds*, 7 (8), 950-952.
- Pratap, D. ve Soni, S., 2021, Review on the Optical Properties of Nanoparticle Aggregates Towards the Therapeutic Applications, *Plasmonics*, 16 (5), 1495-1513.
- Rajakumar, G., Raja, V., Singh, S., Govindarasu, M., Sabura, S., Rekha, K., Rajeswari, V. D., Alharthi, S. S., Vaiyapuri, M., Sudarmani, R., Jesurani, S., Venkidasamy, B. ve Thiruvengadam, M., 2022, Green Synthesis and Characterization of Cobalt Oxide Nanoparticles Using Psidium Guajava Leaves Extracts and Their Photocatalytic and Biological Activities, *Molecules*, 27 (17), 5646.
- Rajput, S., Pittman, C. U. J. ve Mohan, D., 2016, Magnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb²⁺) and chromium (Cr⁶⁺) removal from water, *Journal of colloid and interface science*, 468, 334-346.
- Rakhtshah, J., 2022, A comprehensive review on the synthesis, characterization, and catalytic application of transition-metal Schiff-base complexes immobilized on magnetic Fe₃O₄ nanoparticles, *Coordination Chemistry Reviews*, 467, 214614.
- Ren, C., Li, J., Liu, Q., Ren, J., Chen, X., Hu, Z. ve Xue, D., 2008, Synthesis of Organic Dye-Impregnated Silica Shell-Coated Iron Oxide Nanoparticles by a New Method, *Nanoscale Research Letters*, 3 (12), 496.
- Romero, D. H., Heredia, V. E. T., García-Barradas, O., López, M. E. M. ve Pavón, E. S., 2014, Synthesis of Imidazole Derivatives and Their Biological Activities, *Journal of Computational Biology*, 2.
- Rostami, H. ve Shiri, L., 2019, Fe₃O₄@SiO₂—CPTMS—Guanidine—SO₃H-catalyzed One-Pot Multicomponent Synthesis of Polysubstituted Pyrrole Derivatives under Solvent-Free Conditions, *Russian Journal of Organic Chemistry*, 55 (8), 1204-1211.
- Sachdev, S., 2007, Quantum magnetism and criticality, *Nature Physics*, 4, 173-185.
- Saha, B., Saikia, J. ve Das, G., 2015, Correlating enzyme density, conformation and activity on nanoparticle surfaces in highly functional bio-nanocomposites, *Analyt*, 140 (2), 532-542.
- Saini, H. K., Dhiman, S., Pericherla, K. ve Kumar, A., 2015, Synthesis of Imidazo[1,2-f]phenanthridines through Palladium-Catalyzed Intramolecular C–C Bond Formation, *Synthesis*, 47, 3727 - 3732.
- Samrot, A. V., Saigeetha, S., Mun, C. Y., Abirami, S., Purohit, K., Cypriyana, P. J. J., Dhas, T. S., Inbathamizh, L. ve Kumar, S., 2021, Utilization of Carica Papaya

- Latex on Coating of SPIONs for Dye Removal and Drug Delivery, *Scientific Reports*, 11 (1).
- Sangaiya, P. ve Jayaprakash, R., 2018, A Review on Iron Oxide Nanoparticles and Their Biomedical Applications, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 31 (11), 3397-3413.
- Santhosh, P. B. ve Ulrih, N. P., 2013, Multifunctional superparamagnetic iron oxide nanoparticles: promising tools in cancer theranostics, *Cancer letters*, 336 1, 8-17.
- Sardarian, A. R., Kazemnejadi, M. ve Esmaeilpour, M., 2021, Functionalization of superparamagnetic Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles with a Cu(II) binuclear Schiff base complex as an efficient and reusable nanomagnetic catalyst for N-arylation of α -amino acids and nitrogen-containing heterocycles with aryl halides, *Applied Organometallic Chemistry*, 35 (1), e6051.
- Schlagnitweit, J., Tang, M., Baias, M., Richardson, S., Schantz, S. ve Emsley, L., 2015, Nanostructure of Materials Determined by Relayed Paramagnetic Relaxation Enhancement, *Journal of the American Chemical Society*, 137 (39), 12482-12485.
- Sekiguchi, K. ve Hida, K., 2017, Partial Ferrimagnetism in $S = 1/2$ Heisenberg Ladders With a Ferromagnetic Leg, an Antiferromagnetic Leg, and Antiferromagnetic Rungs, *Journal of the Physical Society of Japan*, 86 (8), 084706.
- Shaterian, H. R. ve Ranjbar, M., 2011, An environmental friendly approach for the synthesis of highly substituted imidazoles using Brønsted acidic ionic liquid, N-methyl-2-pyrrolidonium hydrogen sulfate, as reusable catalyst, *Journal of Molecular Liquids*, 160 (1), 40-49.
- Shi, H., Tan, L., Du, Q., Chen, X., Li, L., Liu, T., Fu, C., Liu, H. ve Meng, X., 2014, Green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles with controlled morphologies using urease and their application in dye adsorption, *Dalton transactions*, 43 33, 12474-12479.
- Shimokawa, T. ve Nakano, H., 2013, Nontrivial Ferrimagnetism of the Heisenberg Model on the Union Jack Strip Lattice, *Journal of the Korean Physical Society*, 63 (3), 591-595.
- Siddiqi, K. S., ur Rahman, A., Tajuddin ve Husen, A., 2016, Biogenic Fabrication of Iron/Iron Oxide Nanoparticles and Their Application, *Nanoscale Research Letters*, 11 (1), 498.
- Sinwani, O., Reiner, J. W. ve Klein, L., 2014, Monitoring Superparamagnetic Langevin Behavior of Individual SrRuO₃ nanostructures, *Physical Review B*, 89 (2).
- Siwach, A. ve Verma, P. K., 2021, Synthesis and therapeutic potential of imidazole containing compounds, *BMC Chem*, 15 (1), 12.
- Skonieczny, K., Jaźwiński, J. ve Gryko, D. T., 2017, The Synthesis of Imidazo[1,2-f]phenanthridines, Phenanthro-[9,10-d]imidazoles, and Phenanthro[9',10':4,5]imidazo[1,2-f]-phenanthridines via Intramolecular Oxidative Aromatic Coupling, *Synthesis*, 49 (20), 4651-4662.
- Skorikov, A., Heyvaert, W., Albecht, W., Pelt, D. M. ve Bals, S., 2021, Deep learning-based denoising for improved dose efficiency in EDX tomography of nanoparticles, *Nanoscale*, 13 (28), 12242-12249.

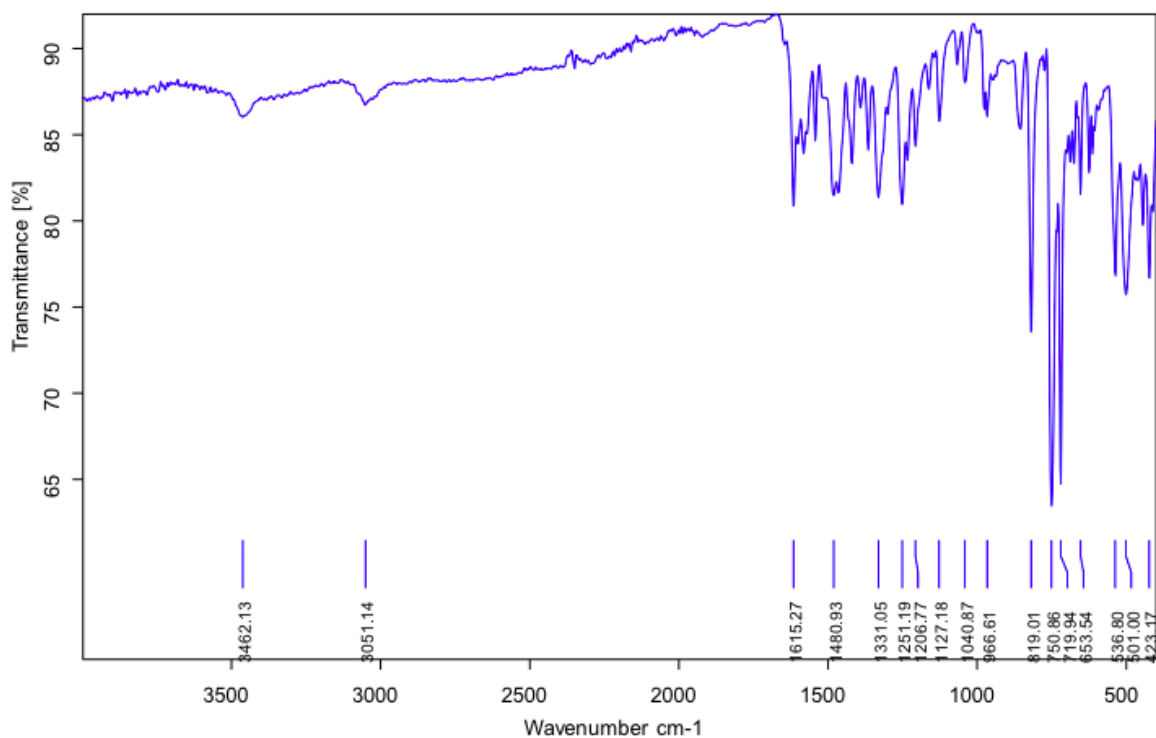
- Somwanshi, S. B., Somvanshi, S. B. ve Kharat, P. B., 2020, Nanocatalyst: A Brief Review on Synthesis to Applications, *Journal of Physics: Conference Series*, 1644 (1), 012046.
- Song, B., Bao, H. Q., Li, H., Lei, M., Peng, T., Jian, J., Liu, J., Wang, W., Wang, W. ve Chen, X., 2009, Observation of Glassy Ferromagnetism in Al-Doped 4h-SiC, *Journal of the American Chemical Society*, 131 (4), 1376-1377.
- Sucksmith, W. ve Pearce, R. R., 1938, The paramagnetism of the ferromagnetic elements, *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 167, 189-204.
- Sultana, T., Jan, U., Lee, H., Lee, H. ve Lee, J. I., 2022, Exceptional Repositioning of Dog Dewormer: Fenbendazole Fever, *Current Issues in Molecular Biology*, 44 (10), 4977-4986.
- Sundaresan, A., Bhargavi, R., Rangarajan, N., Siddesh, U. ve Rao, C. N. R., 2006, Ferromagnetism as a Universal Feature of Nanoparticles of the Otherwise Nonmagnetic Oxides, *Physical Review B*, 74 (16).
- Tavgeniene, D., Krucaite, G., Baranauskyte, U., Wu, J.-Z., Su, H.-Y., Huang, C.-W., Chang, C.-H. ve Grigalevicius, S., 2017, Phenanthro[9,10-d]imidazole based new host materials for efficient red phosphorescent OLEDs, *Dyes and Pigments*, 137, 615-621.
- Teja, A. S. ve Koh, P.-Y., 2009, Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 55 (1), 22-45.
- Testa, C., Zammataro, A., Pappalardo, A. ve Trusso Sfrazzetto, G., 2019, Catalysis with carbon nanoparticles, *RSC Advances*, 9 (47), 27659-27664.
- Titus, D., James Jebaseelan Samuel, E. ve Roopan, S. M., 2019, Chapter 12 - Nanoparticle characterization techniques, In: Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles, Eds: Shukla, A. K. ve Iravani, S.: Elsevier, p. 303-319.
- Tongying, P., Lu, Y.-G., Hall, L. M. G., Lee, K., Sulima, M., Ciston, J. ve Dukovic, G., 2017, Control of Elemental Distribution in the Nanoscale Solid-State Reaction That Produces $(\text{Ga}_{1-x}\text{Zn}_x)(\text{N}_{1-x}\text{O}_x)$ Nanocrystals, *ACS nano*, 11 (8), 8401-8412.
- Tripathy, M., Sahoo, S. K., Mishra, M. ve Hota, G., 2022, Chapter 11 - Iron-based functional nanomaterials: synthesis, characterization, and adsorption studies about arsenic removal, In: Design, Fabrication, and Characterization of Multifunctional Nanomaterials, Eds: Thomas, S., Kalarikkal, N. ve Abraham, A. R.: Elsevier, p. 239-266.
- Tschurl, M., Boesl, U. ve Gilb, S., 2006, The electron affinity of phenanthrene, *The Journal of Chemical Physics*, 125 (19).
- Ulbrich, K., Holá, K., Šubr, V., Bakandritsos, A., Tuček, J. ve Zbořil, R., 2016, Targeted Drug Delivery With Polymers and Magnetic Nanoparticles: Covalent and Noncovalent Approaches, Release Control, and Clinical Studies, *Chemical Reviews*, 116 (9), 5338-5431.
- Vatta, L. L., Sanderson, R. D. ve Koch, K. R., 2006, Magnetic nanoparticles: Properties and potential applications, *Pure and Applied Chemistry*, 78 (9), 1793-1801.
- Wang, B., Chen, Y., Zhan, S., Shu, L., Faure, M., Cluzel, D., Charvet, J. ve Laurent-Charvet, S., 2007, Primary Carboniferous and Permian Paleomagnetic Results From the Yili Block (NW China) and Their Implications on the Geodynamic Evolution of Chinese Tianshan Belt, *Earth and Planetary Science Letters*, 263 (3-4), 288-308.

- Wang, H. ve Dai, H., 2013, Strongly coupled inorganic–nano-carbon hybrid materials for energy storage, *Chemical Society Reviews*, 42 (7), 3088-3113.
- Wang, W., Zhang, Y., Xu, G., Peng, L., Ding, B., Wang, Y., Hou, Z., Zhang, X., Li, X., Liu, E., Wang, S., Cai, J., Wang, F., Li, J., Hu, F., Wu, G., Shen, B. ve Zhang, X., 2016, A Centrosymmetric Hexagonal Magnet With Superstable Biskyrmion Magnetic Nanodomains in a Wide Temperature Range of 100–340 K, *Advanced Materials*, 28 (32), 6887-6893.
- Wáng, Y. X. J., Xuan, S., Port, M. ve Idée, J. M., 2013, Recent Advances in Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles for Cellular Imaging and Targeted Therapy Research, *Current Pharmaceutical Design*, 19 (37), 6575-6593.
- Weinstein, J. S., Varallyay, C. G., Dosa, E., Gahramanov, S., Hamilton, B., Rooney, W. D., Muldoon, L. L. ve Neuwelt, E. A., 2010, Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles: Diagnostic Magnetic Resonance Imaging and Potential Therapeutic Applications in Neurooncology and Central Nervous System Inflammatory Pathologies, a Review, *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 30 (1), 15-35.
- Woo, S. H., Song, K., Zhang, X., Zhou, Y., Ezawa, M., Liu, X., Finizio, S., Raabe, J., Lee, N. J., Kim, S. I., Park, S. Y., Kim, Y., Kim, J. Y., Lee, D., Lee, O., Choi, J. W., Min, B. C., Koo, H. C. ve Chang, J., 2018, Current-Driven Dynamics and Inhibition of the Skyrmion Hall Effect of Ferrimagnetic Skyrmions in GdFeCo Films, *Nature Communications*, 9 (1).
- Wu, H., Hu, Y., Wang, J., Gao, X., Qian, X. ve Tang, M., 2021, Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles: Cytotoxicity, Metabolism, and Cellular Behavior in Biomedicine Applications, *International Journal of Nanomedicine*, Volume 16, 6097-6113.
- Wu, J., Ding, J., Wang, P., Zhang, L., Lu, A. H., Zhang, X. Q., Chen, C. ve Wang, L., 2020, Cellular Uptake, Stability, and Safety of Hollow Carbon Sphere-Protected Fe₃O₄ Nanoparticles, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20 4, 2584-2591.
- Xuemei, H., Changjie, Z., Yanlong, T., Shuliang, D., Xiang, Z. ve Jiupeng, Z., 2016, Preparation of functionalized Fe₃O₄@SiO₂ magnetic nanoparticles for monoclonal antibody purification, *Chemical Research in Chinese Universities*, 32, 889-894.
- Yu, G.-B., Sun, B., Pei, Y., Xie, S., Yan, S., Qiao, M., Fan, K., Zhang, X. X. ve Zong, B., 2009, Fe₃O₄@C Spheres as an Excellent Catalyst for Fischer–Tropsch Synthesis, *Journal of the American Chemical Society*, 132 (3), 935-937.
- Yu, M., Huang, S., Yu, K. J. ve Clyne, A. M., 2012, Dextran and Polymer Polyethylene Glycol (PEG) Coating Reduce Both 5 and 30 nm Iron Oxide Nanoparticle Cytotoxicity in 2D and 3D Cell Culture, *International Journal of Molecular Sciences*, 13 (5), 5554-5570.
- Yuan, Y., Feng, Y., Zhao, X., Yang, M., Lu, H., Li, J., Du, Y., Li, Y. ve He, X., 2018, Microwave absorption performance of in situ synthesized Fe₃O₄-SiO₂ hybrid fibres with enhanced environmental stability, *Ceramics International*, 44 (6), 6673-6680.
- Yusoff, F. ve Suresh, K., 2023, The Influence of Silica Dioxide in the Electrocatalytic Performances of rGO/Fe₃O₄ as Oxygen Reduction Electrocatalyst, *Solid State Phenomena*, 354, 143-149.
- Yusuf, A., Almotairy, A. R. Z., Henidi, H., Alshehri, O. Y. ve Aldughaim, M. S., 2023, Nanoparticles as Drug Delivery Systems: A Review of the Implication of

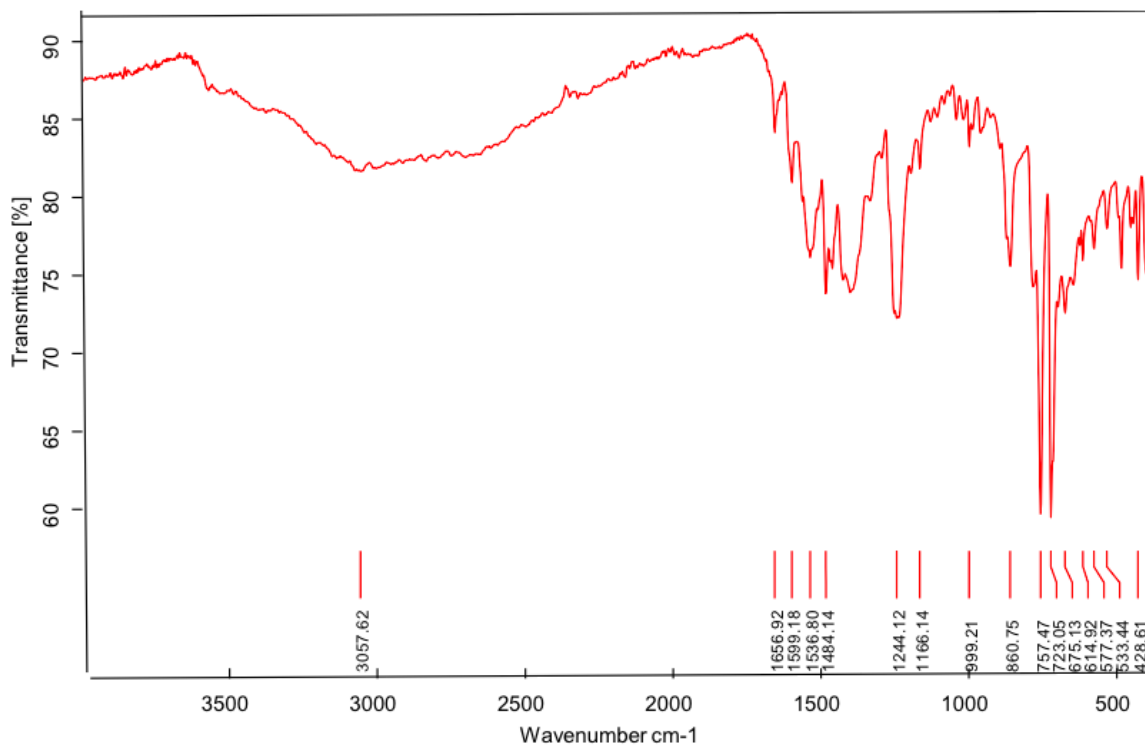
- Nanoparticles' Physicochemical Properties on Responses in Biological Systems, *Polymers*, 15 (7), 1596.
- Zandipak, R., Sobhan Ardakani, S. ve Shirzadi, A., 2020, Synthesis and application of nanocomposite Fe₃O₄@SiO₂@CTAB-SiO₂ as a novel adsorbent for removal of cyclophosphamide from water samples, *Separation Science and Technology*, 55, 456 - 470.
- Zhang, Y.-x. ve Wang, Y.-h., 2017, Nonlinear optical properties of metal nanoparticles: a review, *RSC Advances*, 7 (71), 45129-45144.
- Zhang, Y., Li, M., Gao, X., Chen, Y. ve Liu, T., 2019, Nanotechnology in Cancer Diagnosis: Progress, Challenges and Opportunities, *Journal of Hematology & Oncology*, 12 (1).
- Zhao, B., Liu, T., Fang, Y., Wang, L., Kan, W., Deng, Q. ve Song, B., 2017, A new selective chemosensor based on phenanthro[9,10-d] imidazole-coumarin with sequential "on-off-on" fluorescence response to Fe³⁺ and phosphate anions and its application in live cell, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 246, 370-379.
- Zhao, N., Zhang, Q. ve Wang, W., 2016, Atmospheric oxidation of phenanthrene initiated by OH radicals in the presence of O₂ and NO_x — A theoretical study, *Science of The Total Environment*, 563-564, 1008-1015.
- Zheng, X., Ma, Z. ve Zhang, D., 2020, Synthesis of Imidazole-Based Medicinal Molecules Utilizing the van Leusen Imidazole Synthesis, *Pharmaceuticals*, 13 (3), 37.
- Zhu, Z., 2023, Highly Efficient Spin Transport in a Paramagnetic Insulator at Room Temperature, *Advanced Physics Research*, 3 (2).

EKLER

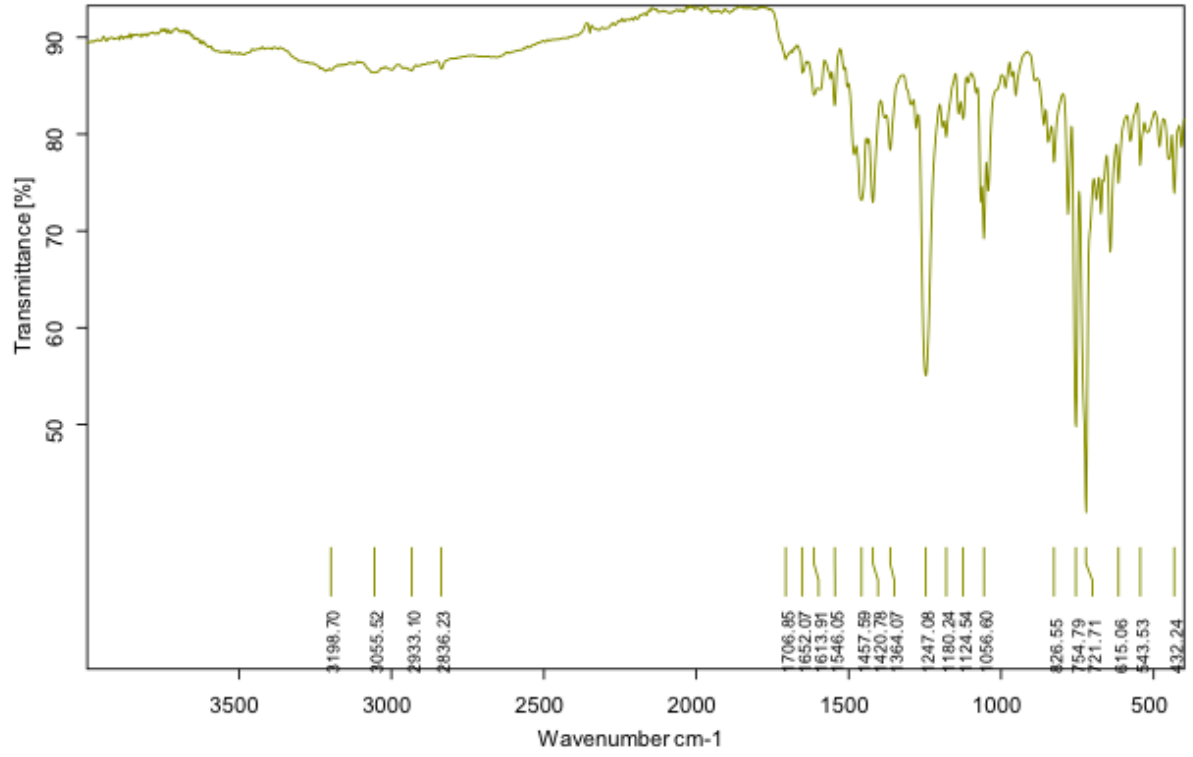
FT-IR SPEKTRUMLARI



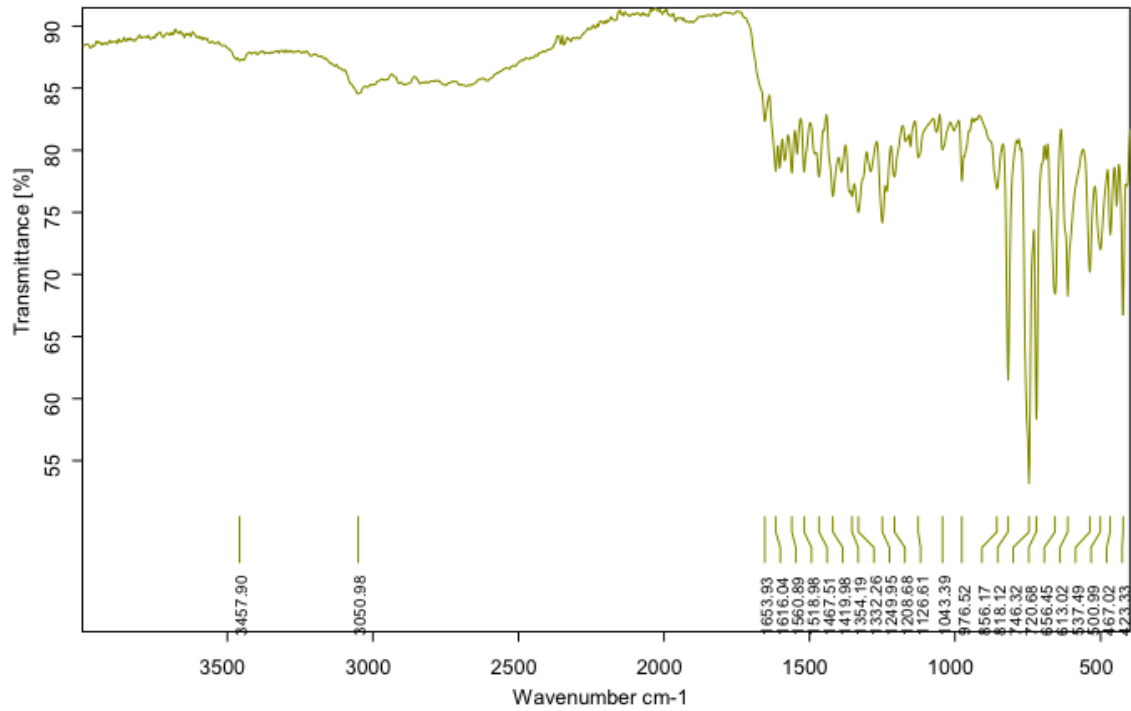
Spektrum 1. 1'in FT-IR spektrumu.



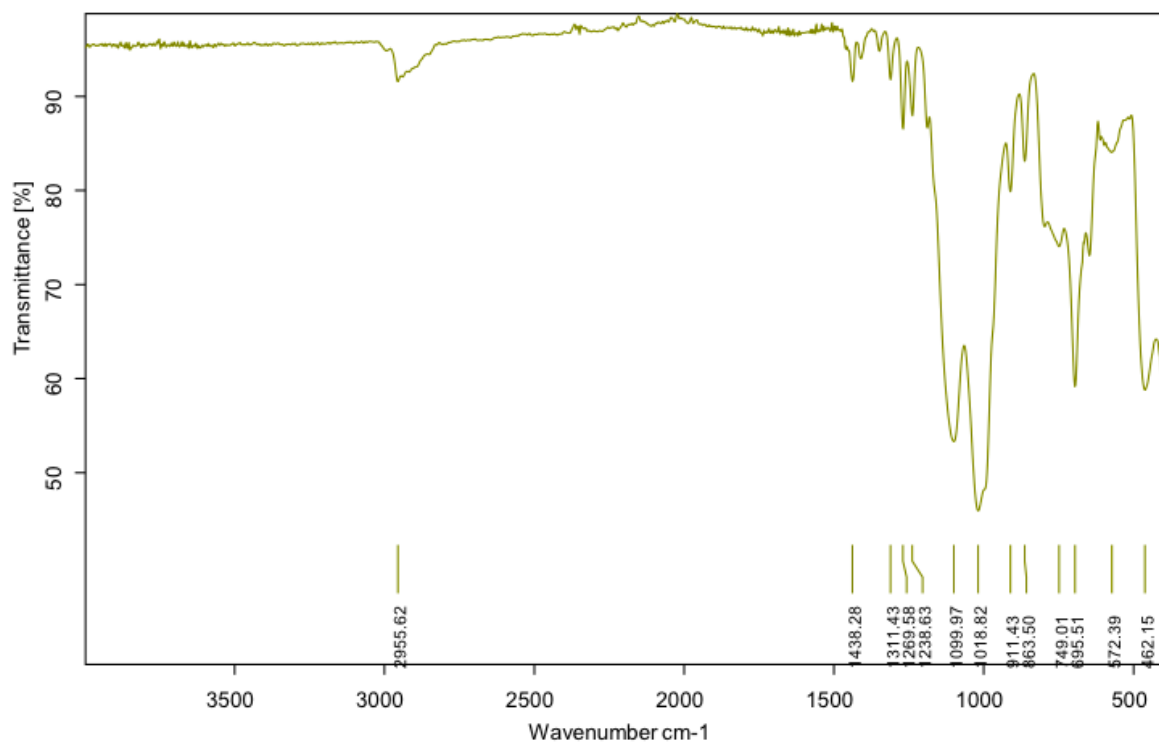
Spektrum 2. 2'nin FT-IR spektrumu.



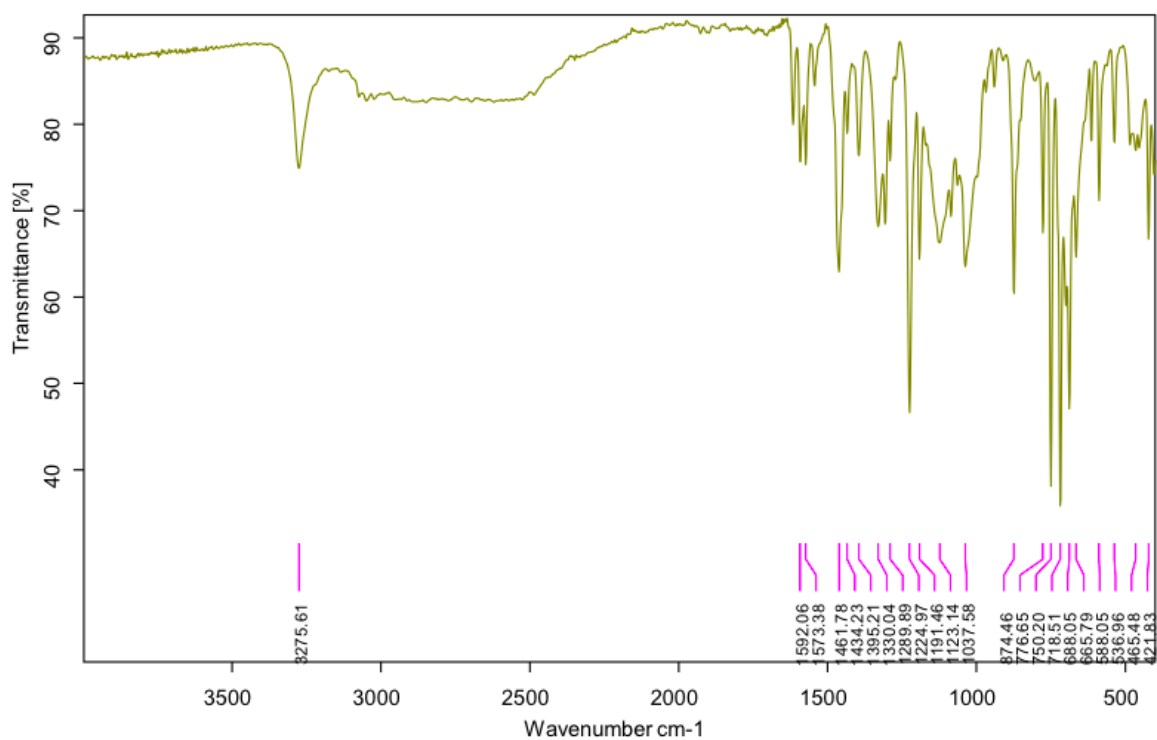
Spektrum 3. 3'ün FT-IR spektrumu.



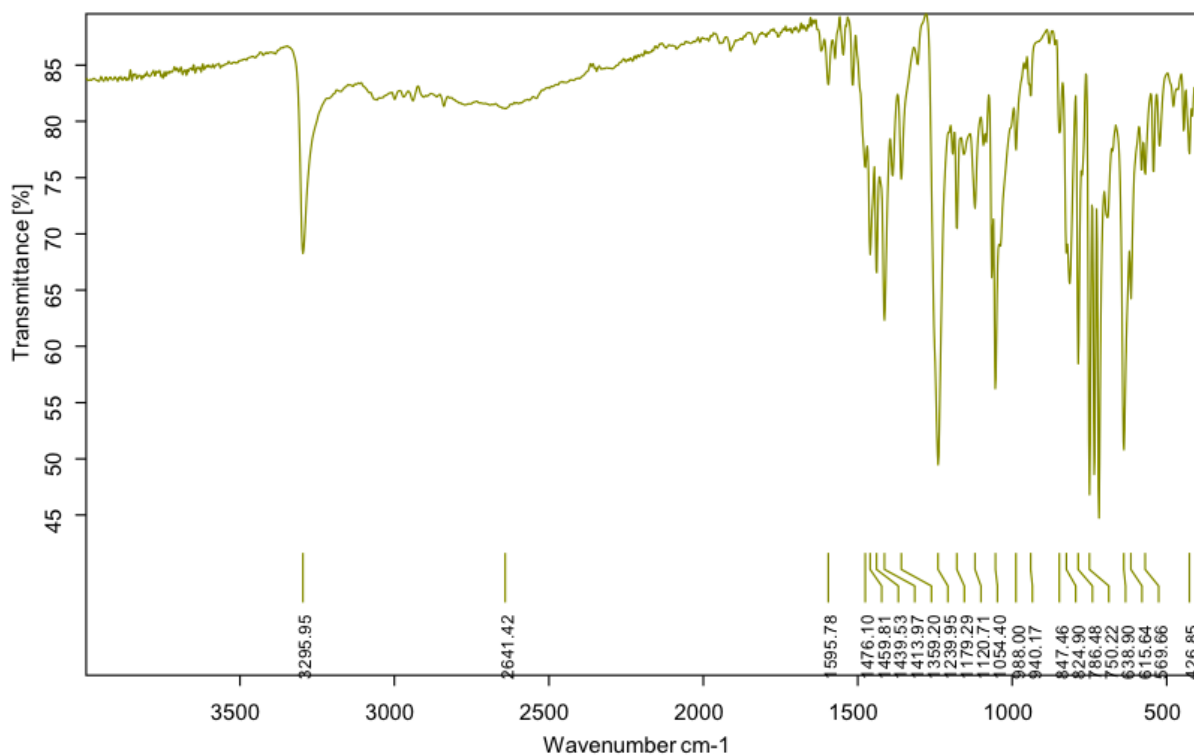
Spektrum 4. 4'ün FT-IR spektrumu.



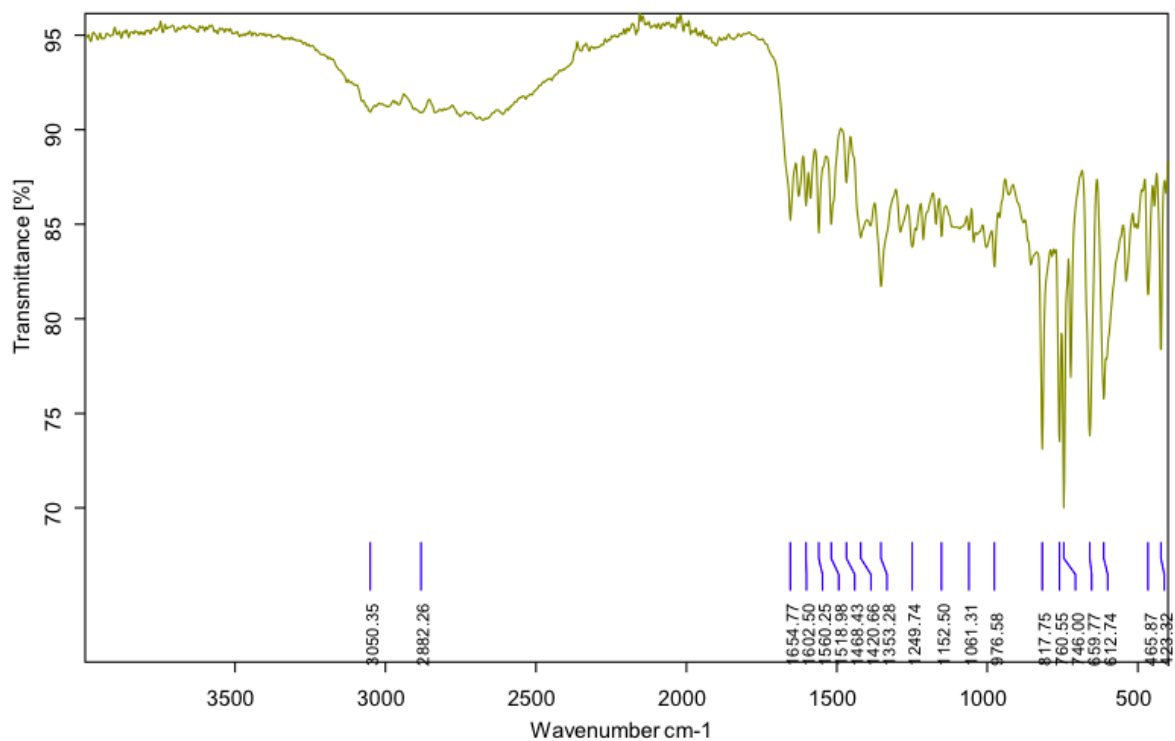
Spektrum 5. CPTMS@1 FT-IR spektrumu.



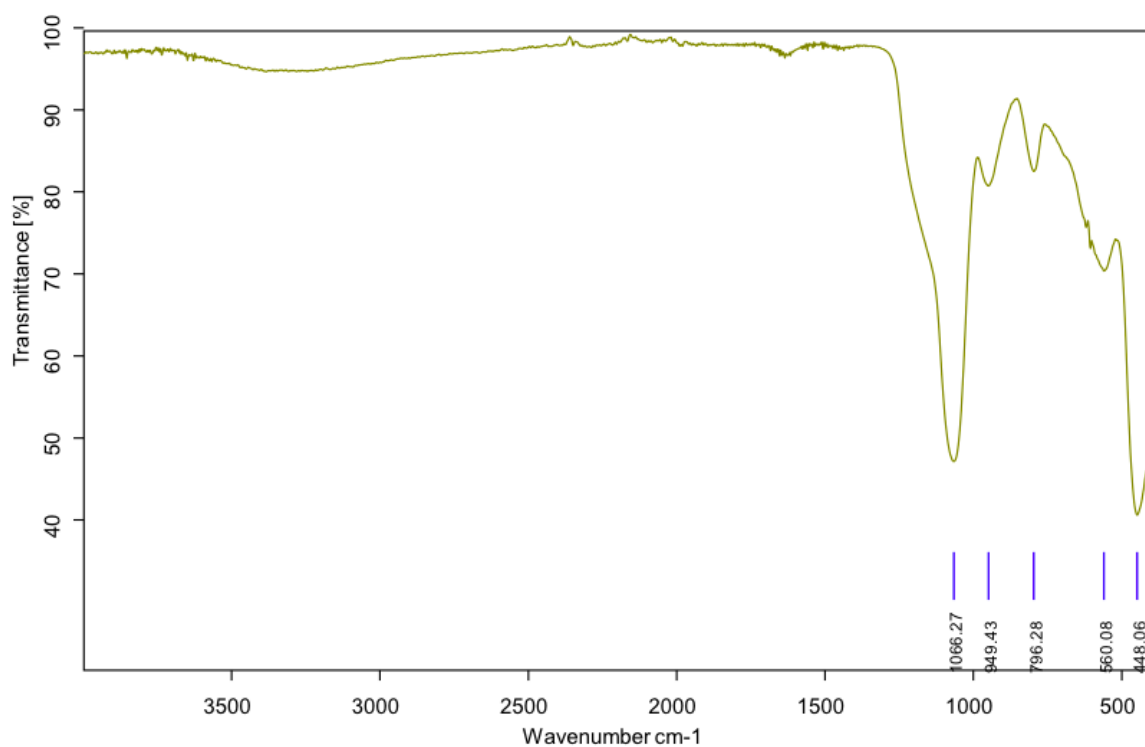
Spektrum 6. CPTMS@2 FT-IR spektrumu.



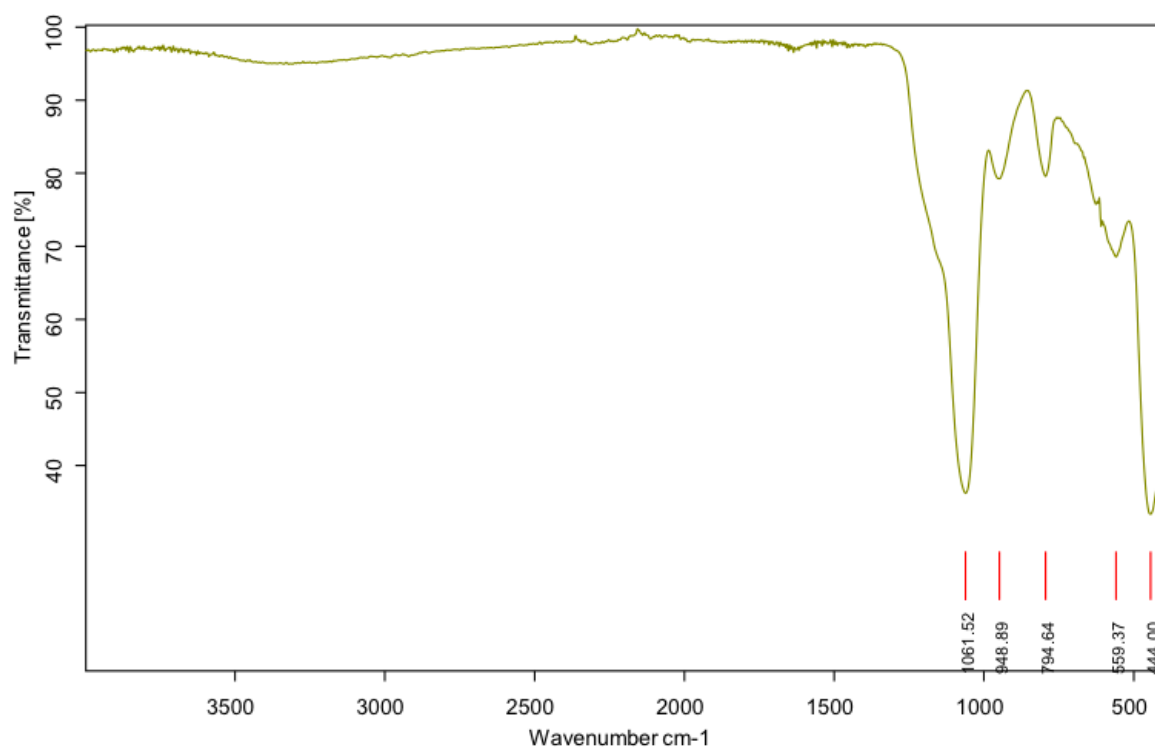
Spektrum 7. CPTMS@3 FT-IR spektrumu.



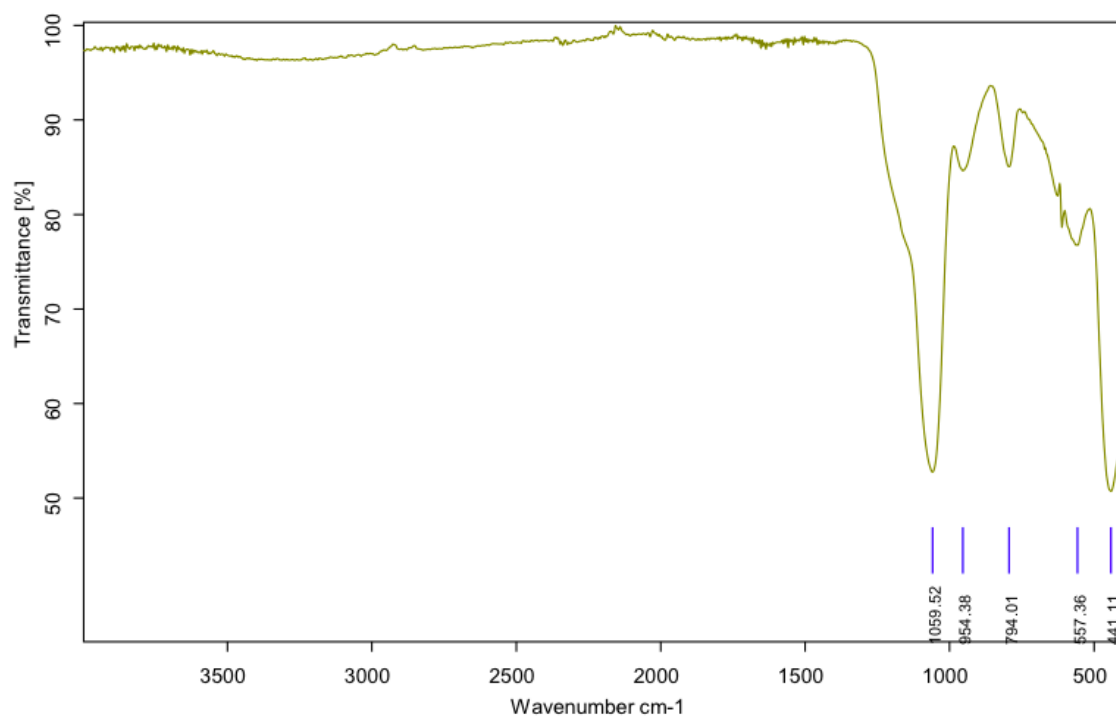
Spektrum 8. CPTMS@4 FT-IR spektrumu.



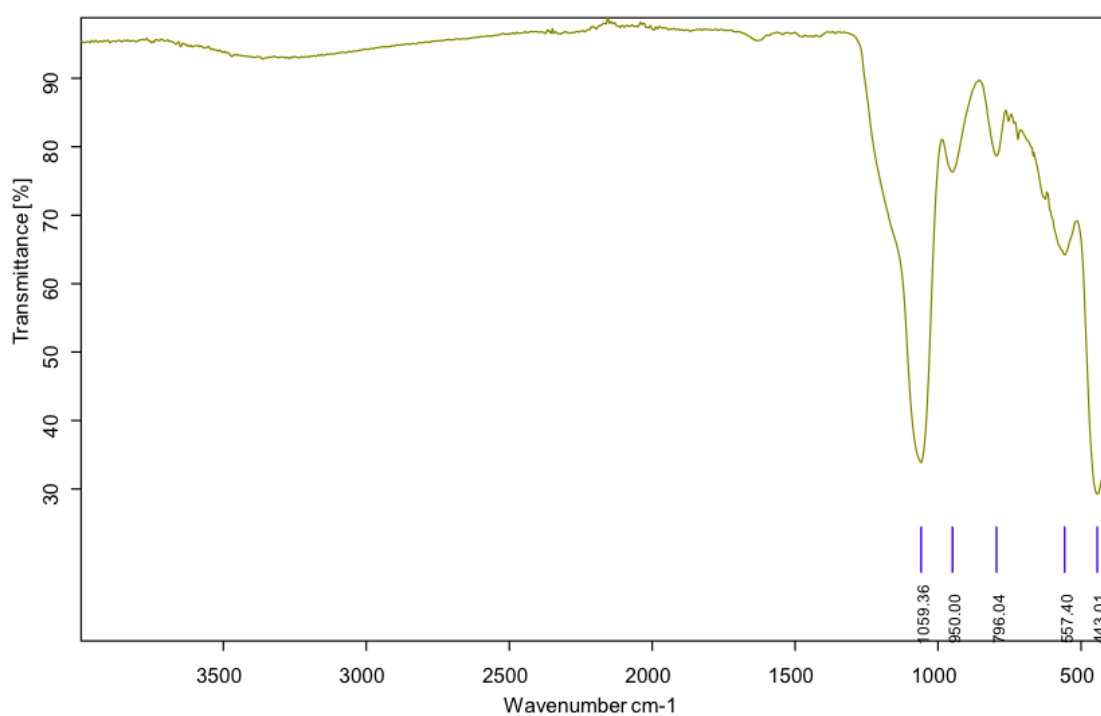
Spektrum 9. $\text{Fe}_3\text{O}_2@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}$ FT-IR spektrumu.



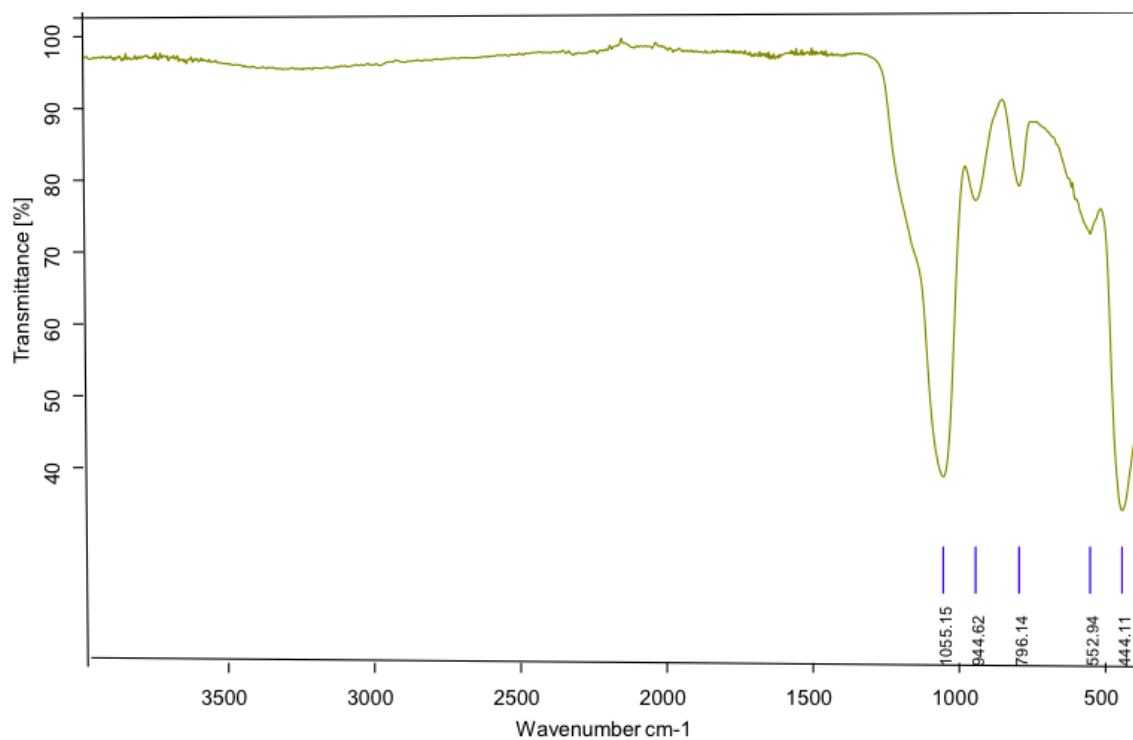
Spektrum 10. $\text{Fe}_3\text{O}_2@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@1$ FT-IR spektrumu.



Spektrum 11. $\text{Fe}_3\text{O}_2@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@2$ FT-IR spektrumu.

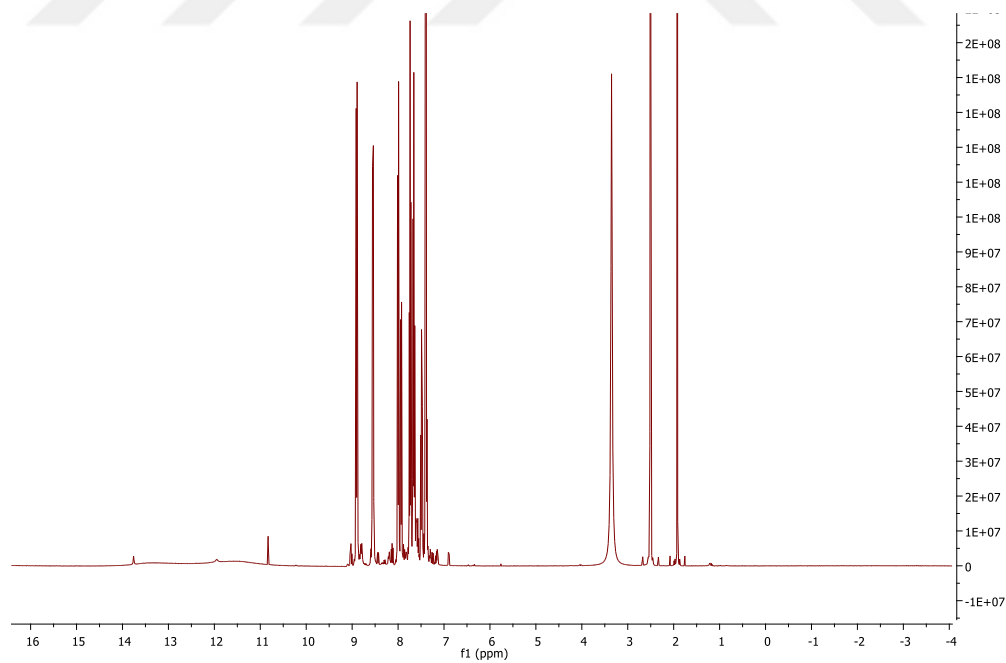


Spektrum 12. $\text{Fe}_3\text{O}_2@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@3$ FT-IR spektrumu.

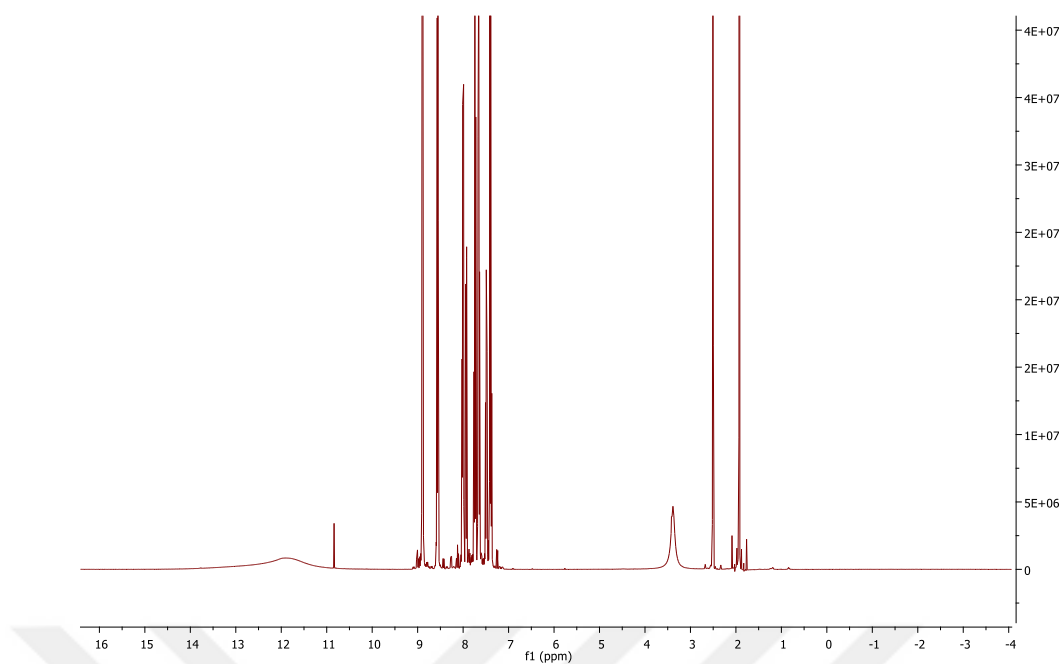


Spektrum 13. $\text{Fe}_3\text{O}_2@\text{SiO}_2@\text{CPTMS}@4$ FT-IR spektrumu.

^1H -NMR SPEKTRUMLARI

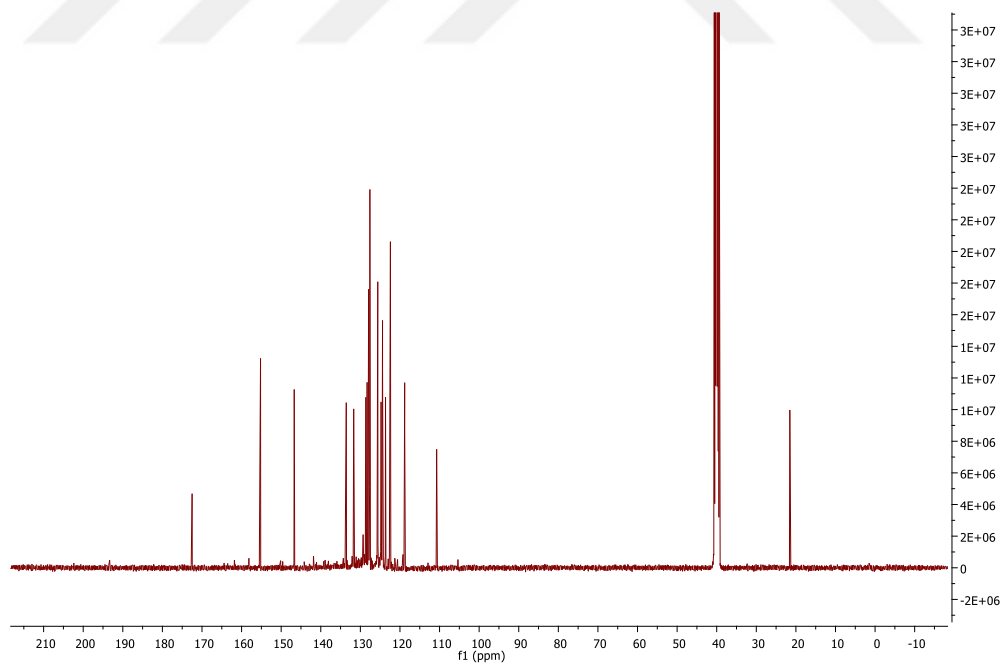


Spektrum 14. $1'$ in ^1H -NMR spektrumu.

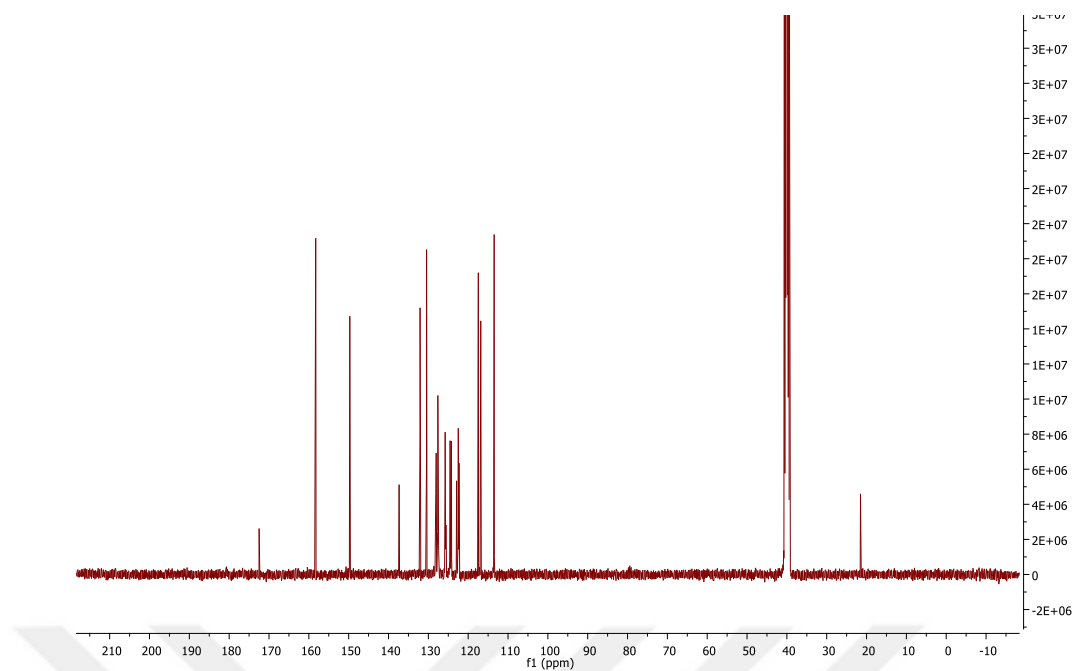


Spektrum 17. 4'ün ^1H -NMR spektrumu.

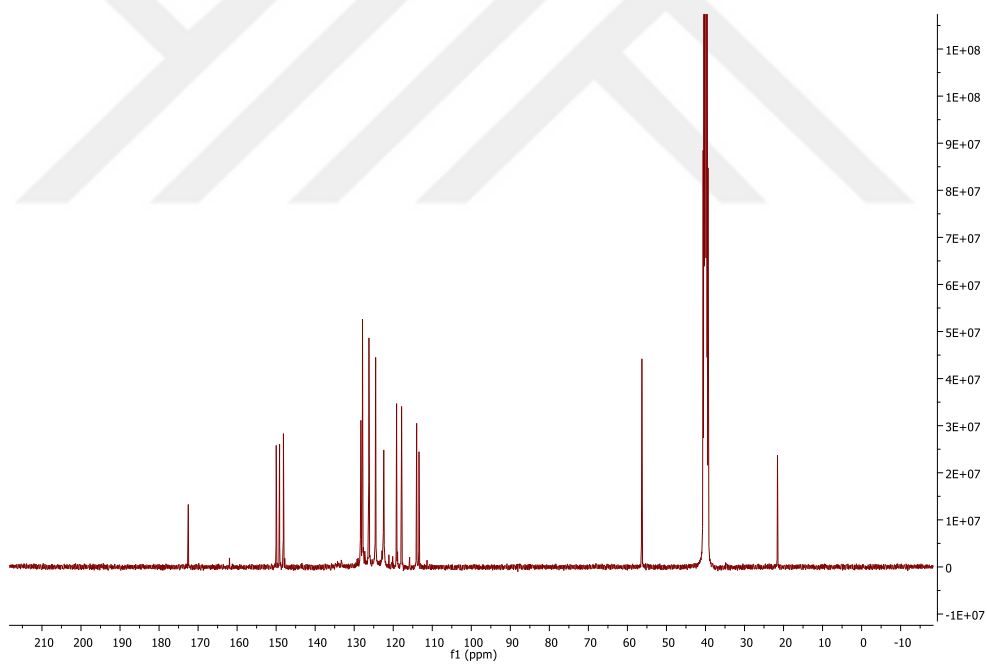
^{13}C -NMR SPEKTRUMLARI



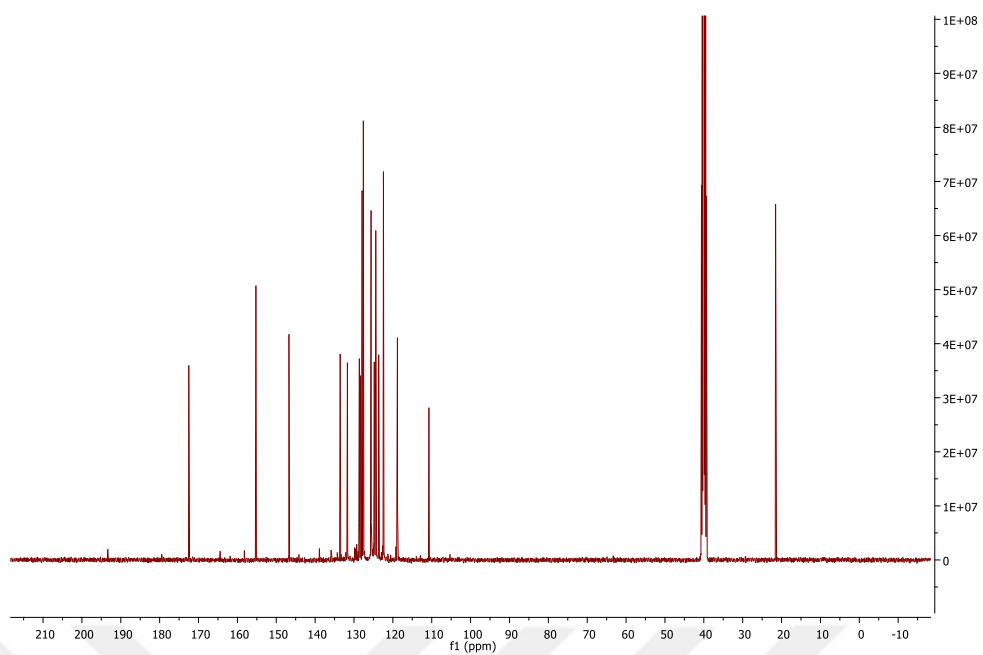
Spektrum 18. 1'in ^{13}C -NMR spektrumu.



Spektrum 19. 2'nin ^{13}C -NMR spektrumu.



Spektrum 20. 3'ün ^{13}C -NMR spektrumu.



Spektrum 21. 4'ün ^{13}C -NMR spektrumu.