



T.C.

MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ PİLİ MALZEMESİ OLARAK

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ SENTEZİ,

KARAKTERİZASYONU VE PERFORMANSININ

BELİRLENMESİ

Ali KOÇHAN

TEZ Danışmanı

Doç. Dr. Mehmet Şakir ECE

Mardin 2024

T.C.
MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND
PERFORMANCE DETERMINATION OF
Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF AS SOLAR CELL MATERIAL

Ali KOÇHAN

TEZ Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Şakir ECE

Mardin 2024

T.C.
MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüz Kimya Anabilim Dalı 21204005 numaralı öğrencisi Ali KOÇHAN'ın hazırladığı “**Güneş Pili Malzemesi olarak $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ Sentezi, Karakterizasyonu ve Performansının Belirlenmesi** ” başlıklı çalışma, 12.06.2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında oybirliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri	Unvanı Adı, SOYADI	İmza
Başkan	Prof. Dr. İbrahim Aziz YAĞAN	
Üye	Doç. Dr. Mehmet Şakir ECE	
Üye	Doç. Dr. İhsan ALACABEY	

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20.. tarih ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Ahmet KAYAOĞLU

ETİK BEYAN

Mardin Artuklu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgileri etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tez çalışmasının hazırlık, bilgi, belge, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarda bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun davrandığımı,
- Tez çalışmasında kullanılan tüm eserlere eksiksiz atıf yaptığımı ve kullanılan tüm eserlere kaynaklar/kaynakçada yer verdiğimi,
- Tez çalışmasının özgün olduğunu,
- Tez çalışmasının Mardin Artuklu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı” ile tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabullendiğimi bildiririm.

İmza

Ali KOÇHAN

12.06.2024

ÖZET

MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ PİLİ MALZEMESİ OLARAK $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Ali KOÇHAN

Bu tez çalışmasında, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörler sentezlenip karakterize edilip güneş hücresi cihazlarının karmaşık yapısındaki sensör olarak kullanımını test edildi. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin yapısını karakterize etmek için FTIR analizi, SEM-EDS analizi, TEM analizi, VSM analizi, XRD analizi, TGA analizi ve BET analizi kullanıldı. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörler ile güneş hücresi cihazlarının karmaşık yapısındaki sensör olarak kullanımını testi gerçekleştirildi. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörler ≈ 10 nm çapa sahip olduğu, doyma manyetizasyon değerlerinin sırasıyla 61,64 emu/g, 37,31 emu/g ve 20,13 emu/g olduğu bulundu. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle değişimi ve kütle kaybının sırasıyla % 6.5, % 12 ve % 28.1 olduğu, kristal özelliklerinin yüzey merkezli kübik spinel yapı olduğu anlaşıldı. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin IUPAC sınıflamasına göre tip IV histerezis H3 döngüler sunduğu, mezogözenekli yapıya sahip olduğu tespit edildi. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin, güneş hücrelerinde elde edilen verimlerin sırasıyla %1.49, %1.77 ve verim %2.15 olduğu, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ 'nin en yüksek verim değerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen bulgular, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin güneş hücresi teknolojisinde umut verici bir duyarlılaştırıcı olarak kullanılabileceğini gösterdi. Ayrıca bu çalışmada, ucuz, kolay ve çevre dostu olarak hazırlanan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin güneş pili teknolojisinin kullanımındaki etkinliği ilk kez ortaya konuldu.

Anahtar Kelimeler: DSSC, Fotovoltaik, Magnetic Nano Catalysts, Modifikasyon

ABSTRACT

MARDİN ARTUKLU UNIVERSITY
THE GRADUATE EDUCATIONAL INSTITUTE
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND PERFORMANCE DETERMINATION OF $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ AS SOLAR CELL MATERIAL

Ali KOÇHAN

In this thesis, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts were synthesized and characterized and tested for their use as sensors in the complex structure of solar cell devices. FTIR analysis, SEM-EDS analysis, TEM analysis, VSM analysis, XRD analysis, TGA analysis and BET analysis were used to characterize the structure Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts were tested for their use as sensors in the complex structure of solar cell devices. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts were found to have a diameter of 10 nm $\approx$, and the saturation magnetization values were 61.64 emu/g, 37.31 emu/g and 20.13 emu/g, respectively. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ magnetic nano catalysts were found to have a mass change and mass loss of 6.5%, 12% and 28.1%, respectively, as a function of temperature, and their crystal properties were surface-centered cubic spinel structures. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts were found to present type IV hysteresis H3 loops according to IUPAC classification and have a mesoporous structure. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts have the highest efficiency value of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ magnetic nano catalysts with efficiencies of 1.49%, 1.77% and 2.15%, respectively, obtained in solar cells. The findings showed that Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts can be used as a promising sensitizer in solar cell technology. In addition, in this study, the effectiveness of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABP}$ magnetic nano catalysts, which are prepared cheaply, easily and environmentally friendly, in the use of solar cell technology was demonstrated for the first time.

Key Words: Adsorption, Magnetic Nano Catalysts, Modification, Photovoltaics

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitim sürecinde bilgi, birikim ve desteğini benden esirgemeyen ve bana her türlü imkanı sağlayan, yardımcı olan danışman hocam sayın Doç. Dr. Mehmet Şakir ECE'ye teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ömer ŞAHİN'e, Sayın Prof. Dr. Sabit HOROZ'a ve Sayın Doç. Dr. Sinan KUTLUAY'a teşekkür ederim. Motivasyonel desteğini esirgemeyen Prof. Dr. İbrahim Aziz Yağan'a ve Doç. Dr. İhsan ALACABEY'e teşekkür ederim. Tezim sırasında bilişim teknik desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen Bilişim Teknolojileri Öğretmeni Vejdin Koçhan ve Yüksek Ziraat Mühendisi Kadir Koçhan'a teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte çalışmalarımda her zaman yanımda olan ailem ve kıymetli eşime biricik kızıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

MARDİN, HAZİRAN, 2024

Ali KOÇHAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	iv
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiii
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM	5
KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
1.1. Nanoteknoloji	5
1.2. Nanoteknolojinin Tarihçesi	5
1.3. Nano Bilim Tanımı.....	7
1.4. Manyetizma	8
1.4.1. Diyamanyetizma	9
1.4.2. Paramanyetizma	10
1.4.3. Ferromanyetizma	10
1.4.5. Ferrimanyetizma.....	12
1.4.6. Antiferromanyetizma	13
1.4.7. Süperparamanyetizma	15
1.5. Histerezis Döngüsü	16
1.6. Manyetik Nanoparçacıklar.....	18
1.6.1. Elektron katalizli reaksiyonlar	19
1.6.2. Nano katalizörler	20
1.6.2.1. Demir oksit manyetik nanokatalizörlerin üretim yöntemleri.....	20
1.6.2.2. Birlikte çöktürme yöntemleri.....	21
1.6.2.3. Sol jel yöntemi	21
1.6.2.4. Mikroemülsiyon teknikleri.....	22
1.6.2.5. Solvothermal yöntemler	22
1.6.3. Nanoparçacıkların yüzey dokusu	22
1.6.4. Metal oksit nanoparçacıkların yüzey modifikasyonu teknikleri	23
1.6.4.1. Fiziksel teknikler.....	23
1.6.4.2. Kimyasal teknikler.....	24
1.7. Demir Oksit Manyetik Nanokatalizörler Ve Güneş Pilleri.....	24

1.7.1. DSSC.....	26
İKİNCİ BÖLÜM.....	28
LİTERATÜR ÖZETİ.....	28
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	32
MATERYAL VE METOT.....	32
3.1. Çözeltiler ve Kimyasallar.....	32
3.2. Manyetik Nano Katalizörlerin Sentezi	32
3.2.1. Fe ₃ O ₄ Manyetik Nano Katalizörlerin Sentezi.....	32
3.2.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ manyetik nano katalizörlerin sentezi	33
3.2.3. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @DABF manyetik nano katalizörlerin sentezi.....	34
3.3. Katalitik Mekanizma ve Güneş Pili Performans Analizi	35
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	38
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
4.1 FTIR Analizi.....	38
4.1.1. Fe ₃ O ₄ manyetik nano katalizörlerin FTIR analizi	38
4.1.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ manyetik nano katalizörlerin FTIR analizi	39
4.1.3. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin FTIR analizi	40
4.2. SEM Analizi	40
4.2.1. Fe ₃ O ₄ manyetik nano katalizörlerin SEM analizi.....	41
4.2.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ manyetik nano katalizörlerin SEM analizi.....	41
4.2.3. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin SEM analizi.....	42
4.3. SEM-EDS Analizi	43
4.3.1. Fe ₃ O ₄ manyetik nano katalizörlerin SEM-EDS analizi	43
4.3.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ manyetik nano katalizörlerin SEM-EDS analizi	44
4.3.3. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin SEM-EDS analizi	45
4.4. TEM Analizi	46
4.4.1. Fe ₃ O ₄ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi.....	47
4.4.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi	47
4.4.3. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin TEM analizi.....	48
4.5. VSM Analizi	50
4.5.1. Fe ₃ O ₄ manyetik nano katalizörlerin VSM analizi	50
4.5.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ manyetik nano katalizörlerin VSM analizi	50
4.5.3. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin VSM analizi.....	51
4.6. TGA Analizi.....	52
4.6.1. Fe ₃ O ₄ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi	52
4.6.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi	53
4.6.2. Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin TGA analizi	54
4.7. XRD Analizi.....	55
4.8. BET Analizi.....	56
4.9. Manyetik Nano Katalizörlerin Yüzeyinin DSSC Hücrelerine Uygunluğu	59
4.10. Güneş Hücresi Performans Analizi.....	60
SONUÇLAR.....	65
KAYNAKÇA.....	67
ÖZGEÇMİŞ	71

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 1 Farklı Manyetik Davranış Türlerinin Özeti	14
--	----

Tablo 4. 1. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin dokusal özellikleri	59
---	----

Tablo 4. 2. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlere ait elde edilen J_{sc} , V_{oc} , and η (%) değerleri.....	62
--	----

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Lycurgus Kupası. Cam, A) yansıyan ışıktaki yeşil, B) iletilen ışıktaki kırmızı-mor görüntüsü	6
Şekil 1. 2. Manyetizma türleri. a) paramanyetizma, b) ferromanyetizma, c) antiferromanyetizma, d) ferrimanyetizma e) zorlanmış ferromanyetizma.	9
Şekil 1. 3. Curie noktası	11
Şekil 1. 4. Aşağıdakiler için geçirgenliklerin basitleştirilmiş karşılaştırması: ferromıknatıslar (μ_f), paramıknatıslar (μ_p), diamıknatıslar (μ_d) ve boş alan (μ_0).	13
Şekil 3. 1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi	33
Şekil 3. 2. $Fe_3O_4@SiO_2$ manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi	34
Şekil 3. 3. $Fe_3O_4@SiO_2@DABF$ manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi	35
Şekil 3. 4. DSSC için basit bir mekanizma	36
Şekil 4. 1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu	38
Şekil 4. 2. $Fe_3O_4@SiO_2$ manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu	39
Şekil 4. 3. $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu	40
Şekil 4. 4. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları	41
Şekil 4. 5. $Fe_3O_4@SiO_2$ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları	42
Şekil 4. 6. $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları	43
Şekil 4. 7. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı)	44
Şekil 4. 8. $Fe_3O_4@SiO_2$ manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı)	45
Şekil 4. 9. $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı)	46
Şekil 4. 10. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin TEM analizi	47
Şekil 4. 11. $Fe_3O_4@SiO_2$ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi	48
Şekil 4. 12. $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi	49
Şekil 4. 13. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği	50
Şekil 4. 14. $Fe_3O_4@SiO_2$ manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği	51
Şekil 4. 15. $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği	51
Şekil 4. 16. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin TGA analizi	52
Şekil 4. 17. $Fe_3O_4@SiO_2$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi	53
Şekil 4. 18. $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi	54
Şekil 4. 19. Fe_3O_4 , $Fe_3O_4@SiO_2$ ve $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin XRD spektrumları	55
Şekil 4. 20. Fe_3O_4 , $Fe_3O_4@SiO_2$ ve $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin N_2 adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi	56
Şekil 4. 21. Fe_3O_4 , $Fe_3O_4@SiO_2$ ve $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin DFT gözenek boyutu dağılımları	57

Şekil 4. 22. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin BJH gözenek boyutu dağılımları.....	58
Şekil 4. 23 Manyetik nano katalizörlerin çok noktalı BET grafiği A) Fe_3O_4 , B) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ C) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$	60
Şekil 4. 24. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlere ait J-V eğrileri.	61
Şekil 4. 25. Performansın sıralı bir şekilde optimize edilmesi A) Fe_3O_4 B) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ C) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$	63



KISALTMALAR DİZİNİ

BET	:Yüzey Alanı Ölçümü
CB	:İletim Bandı
CE	:Karşı Elektrot
DNA	: Deoksiriboz Nükleik Asit
DFT	:Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi
DSSC	:Boyaya Duyarlı Güneş Pilleri
FTIR	:Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spektrofotometre)
FTO	:Flor katkılı Kalay Oksit
GO	:Grafen Oksit
HOMO	:En yüksek işgal edilen Moleküler Yörünge
LUMO	:En düşük boş Moleküler Yörünge
MNC	:Manyetik Nanokatalizör
MNP	:Manyetik Nanopartikül
PANI	:Polianilin
PCE	:Güç dönüşüm verimliliği
rGO	:İndirgenmiş Grafen Oksit
rpm	:Dakikadaki Devir Sayısı (revolutions per minute)
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SEM-EDS	:Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Dağılımlı Spektroskopi (Scanning Electron Microscope - Enerji Dispersiv Spektrum)
TEM	:Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope)
TEM	:Geçirimli Elektron Mikroskobu
TEOS	:Tetraetil Orthosilikat
TGA	:Termo Gravimetrik Analiz
Vb	:Valans bandı
RNA	:Ribo Nükleik Asit

SİMGELER DİZİNİ

°C	:Santigrat derece
Å	: Angström
Ag	: Gümüş
AU	: Altın
B	: Bor
C	: Karbon
Cm	: Santimetre
Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
Cr	:Krom
Emu	:Elektromanyetik birim (electromagnetic unit)
eV	: Elektron volt
Fe	: Demir
g	: Gram
Hc	:Zorlayıcılık
Hv	:Foton
I-V	:Akım-gerilim
K	:Kelvin
m²	: Metrekare
Mg	: Magnezyum
mmol	:Milimol
Mn	:Mangan
MS	:Doygunluk mıknatıslanmasına
N	:Azot
Ni	:Nikel
Nm	Nanometre
P	:Fosfor
PL	:Fotolüminesans
Pt	:Platin
Si	:Silisyum

SiO₂ :Silika
TiO₂ :Titanyum Dioksit
TN :Néel sıcaklığı
V :Voltaj
μm :Mikrometre



GİRİŞ

Modern çağın (sanayi devrimi) başlamasından bugüne kadar, sanayi, endüstri, teknoloji v.b. alanlarda fosil yakıtları (petrol, kömür ve doğal gaz) kaynaklı enerjiye bağımlı olan ilerlemeler gerçekleşti. İnsan nüfusundaki artışlar da, yüksek enerji taleplerine yol açtı. Fosil yakıtlarının gelecekte tükeneyeceği kuşkusuzdur. Bununla birlikte fosil yakıtları, canlı ve çevre sağlığını olumsuz şekilde etkiye (zararlı gaz emisyonu, küresel ısınma, sera etkisi v.b.) sahiptir. Modern dünya, çevre ve enerji konularında ciddi sorunlarla karşı karşıyadır. Bu nedenle, fosil yakıtlarına olan bağımlılığı azaltmaya çalışmaları gelişerek tükenme kaygısı bulunmayan verimli, çevreci, ekonomik, erişilebilir ve sürdürülebilir alternatif enerji kaynakları araştırılmaktadır (Ramos et al., 2022).

Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji arayışında güneş enerjisi ön plana çıkmaktadır. Ücretsiz, çevre dostu (minimal karbon emisyonu), güvenli, sağlıklı, verimli ve sürekliliği bir enerjidir. Kaynağına bakıldığında güneş enerjisi, diğer alternatif enerji kaynaklarına göre daha ekonomiktir. Bol miktarda bulunur, kaynağı neredeyse sınırsızdır, kaynağına her yerde erişilebilir. Bundan dolayı, güneş enerjisi sistemleri, son on yılda yenilenebilir enerji sistemleri arasında en çok ilgi gören sistemler arasında yer almaktadır (Rabaia et al., 2021).

Enerji sorununun çözümüne önemli ölçüde katkıda bulunmayı çabalayan bilimin, yeni ve daha ucuz malzemeler üzerinde araştırdığı ve geliştirdiği stratejilerden biri, güneş ışığını elektriğe dönüştüren, potansiyeli yüksek, ümit verici bir yenilenebilir enerji kaynağı olan fotovoltaik (PV) hücrelerin geliştirilmesidir. Güneş enerjisinin alternatif bir enerji kaynağı haline gelmesi için güneşin dalga boyunun tüm spektrumundan yararlanmaya yönelik yeni stratejilerle, çok işlevli güneş pilleri üretilmekte ve araştırılmaktadır (Basheer et al., 2014).

Güneş enerjisi sistemleri arasında, boyaya duyarlı güneş pili (DSSC) üzerine çalışmalara (diğer teknolojilere nispeten, güneşe maruz kalan binalarda pencere sistemleri gibi dış mekan uygulamalarına uyarlanabilirliği, aydınlatma, ısıtma, soğutma, v.b. kaynaklı enerji tüketimini karşılaması v.b. gibi daha fazla kritik ve bariz avantajlar

sağlaması) rağbet yüksektir. DSSC, yenilenebilir ve yeşil bir enerji dönüşüm cihazı olarak büyük ilgi görmektedir. Kurulumu kolaydır, hareketli mekanik aparata ihtiyaç duymaz. Teknolojik imalat kolaylığı mevcuttur. DSSC, düşük maliyetle yüksek verimlilikle elektrik üretebilmesi nedeniyle doğrudan güneş ışığından elektrik üretebilen fotovoltaik cihazlara gelecek vaat etmektedir (Yoon et al., 2011). DSSC, ince film güneş pillerinin bir alt sınıfıdır. Duyarlılaştırıcı (boya), elektrolit ve katalizör kaplı karşı elektrot, substrat (iletken film kaplı substrat veya iletken substrat), yarı iletken nanoyapı (fotoanod) gibi farklı bileşenlerden oluşur. DSSC'deki bu bileşenler, fotoakım verimliliğine katkıda bulunur (Ahmad et al., 2017). Tipik bir DSSC kurulumunda, geniş yüzey alanına sahip nanokristalin TiO_2 , transparent conducting oxide (TCO), genellikle flor katkılı SnO_2 ve FTO ile kaplanır. Burada fotonu elektrığe dönüştüren boyalar TiO_2 yüzeyine emilir. TiO_2 , geniş yüzey alanı, çok iyi elektron taşıma özelliği ve elektronları ile elektrolit (I_3^-) veya boya arasındaki yüksek rekombinasyon hızı ve yüksek fotoelektrik dönüşüm verimliliği nedeniyle tercih edilir (Yoon et al., 2011).

Açık devre voltajını (V_{oc}) ve foto-oluşturulan akım yoğunluğunu (J_{sc}) optimize eden katalizörlerin tasarımı ve üretimi, güneş pili verimliliği için önemli bir faktördür (Ahmad et al., 2017)

Geleneksel teknolojinin, yetersiz, pahalı olan sınırlı kaynaklarının ve bunların olumsuz çevresel etkilerinin aksine nanoteknoloji, son yirmi yıldan bu yana, enerji üretimi uygulamalarında güçlü bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Nano ölçekte sentez/imalat, karakterizasyon ve performans testi, teknolojik uygulamalar lehine devrim niteliğindedir. Bu özellikleri nedeniyle enerji üretimi uygulamalarında avantajlar sağlar. Nanoteknolojinin, güneş enerjisini elektrığe dönüştürmek, güneş enerjisini kullanmak, güneş enerjisini insan faaliyeti için ihtiyaç duyulan her türlü kullanılabilir cihaz ve ekipmana uyarlamak, cihazların ve ekipmanların performansını artırmak v.b. gibi arayışı mevcuttur (Abdalla et al., 2020). Ebatları 1-100 nm arasındaki yapıları, nanoteknolojinin kapsama alanındadır. 1-100 nm ölçek aralığı, farklı teknolojik uygulamalarda olasılıklar dünyasının kapılarını açıp, nano boyutlu malzemelerin tasarlanıp üretilmesine olanak sağlar. Nanomalzemeler ya tek bileşenli malzeme kullanılarak ya da alaşımlar, metaller, polimerler ve seramikler gibi bazı malzemelerin karışımından üretilirler. Nanomalzemeler, geleneksel malzemelerle kıyaslandığında, büyük miktarda yüzey atomu, uzaysal sınırlama, yüksek yüzey enerjisi ve daha az kusur gibi özel özelliklere sahiptir (Thakur et al., 2022).

Nanoteknoloji, verimliliğini artırmak için DSSC'nin fotoanodunu değiştirmede geniş bir malzeme yelpazesi sunar. Son zamanlarda, olağanüstü özelliklere sahip olmaları ve yaygın uygulamalara sahip olmaları nedeniyle Fe_3O_4 manyetik nano katalizörler DSSC fotoanodunda kullanılmaktadır. Manyetik manipülasyonda benzersiz süperparamanyetik davranışı gösteren Fe_3O_4 manyetik nano katalizörler, fotovoltaik cihazlar için potansiyel adaydırlar. Yüksek spesifik yüzey alanı, ve iyi dispersiyonu nedeniyle fotokatalizör olarak kullanılmaktadırlar. Toksik olmayan güvenilir uygun maliyetli bileşenlerden yeşil sentez ile üretilen Fe_3O_4 manyetik nano katalizörler, çevre dostudurlar (Ayinde et al., 2024). Fe_3O_4 manyetik nano katalizörler, sahip olduğu yüksek katalitik aktivite ve yüksek iletkenliği yetenekleri sayesinde counter electrode (CE) performansını arttırdığından çok pahalı olan Pt'e alternatifirler. Çünkü Pt yüksek maliyetlidir, kısıtlı uygulama imkanı sağlar (Bagavathi et al., 2016). Fe_3O_4 manyetik nano katalizörler, DSSC'nin fotoanodunda triiyodid indirgemesine yönelik üstün katalitik aktivite ve fotovoltaik performans göstermesi dikkat çekicidir. Bu, kübik ters spinel formda bulunan Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin, oktahedron bölgelerinde mevcut olan eşit sayıda iki değerlikli ve üç değerlikli demir iyonunun (Fe^{+2} ve Fe^{+3}) varlığına atfedilir. Ara yüzey yük transferinde, spinel formdaki eşit sayıda iki değerlikli ve üç değerlikli demir iyonları, daha düşük dirence yol açan elektron atlamalı taşımayı sağlayarak DSSC'lerin fotovoltaik verimliliğinde pozitif sinerjik etki sergilerler (Harnchana et al., 2019). Aglomerasyon, Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin mükemmel yüzeyleri dolayısıyla da fotovoltaik verimlilikleri için risktir. Bu riski bertaraf etmek, fotovoltaik verimliliklerini artırmak amacıyla aktif malzemelere destek olarak gözenekli malzeme kullanmak faydalıdır. Düzenli gözenek yapısı, tek biçimli gözenek boyutu ve yüksek yüzey alanı gibi benzersiz özelliklere sahip SiO_2 , mükemmel bir öncü yüzey aktifleştiricidir. SiO_2 , Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin yüzeyini aktifleştirdiğinde, aglomerasyon ve oksidasyon riski ortadan kalktığı gibi yapı kimyasal ve termal kararlılıkta kazanır, bu da manyetik nano katalizörlerin fotovoltaik aktivitelerinin geliştirilmesi için faydalıdır. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin yüzeyine yerleşen silanol grupları, yüzeyin farklı fonksiyonel gruplarla kolayca işlevsel hale gelmesi için geniş bir yelpaze sunar (Zisti et al., 2024).

Bu çalışmada, önce Fe_3O_4 manyetik nanokatalizörler sentezlendi, sonra Fe_3O_4 manyetik nanokatalizörlere SiO_2 bağlanıp $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanokatalizörler sentezlendi. Ardından $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanokatalizörler, 3,4-Diaminobenzofenon

(3,4-DABF) ile fonksiyonelleştirilip $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörler ilk kez bu çalışmada sentezlendi. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörler detaylı olarak karakterize edilerek güneş pili uygulamasında kullanıldı. Ayrıca $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörler ilk kez güneş pili uygulamasında kullanıldı. Bu çalışmada, DSSC'de departında sıklıkla kullanılan Pt'e alternatif olarak çok uygun maliyetli Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerin etkinliği gösterilip Fe_3O_4 'ün, SiO_2 'nin ve 3,4-DABF'in DSSC'lerin fotovoltaiik verimliliğindeki daha üstün aktivite ve pozitif sinerjik etkileri rapor edildi.

BİRİNCİ BÖLÜM

KAYNAK ARAŞTIRMASI

1.1. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji, enerji ile ilgili sorunları çözmek için geniş bir kaynak yelpazesi sağlayan bir teknolojidir. Gelişmekte olan bileşenler ve cihazlar 100 nm'den daha küçük olduğundan enerjiyi yakalamak, depolamak ve değiştirmek için yeni yollar sağlarlar. Güneş her gün nükleer füzyon süreciyle üretilen büyük miktarda enerji saçmaktadır. Güneş bile bir saniyede insanların zamanın başlangıcından beri uyguladığından daha fazla enerji yaymaktadır. Tüm dünyada güneş enerjisinin teknik potansiyelinin talep edilen mevcut toplam birincil enerjiden kat kat daha büyük olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada nano malzemeler yardımıyla güneş enerjisi toplama teknolojisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Nano malzemelerini etkin ve başarılı bir şekilde kullanan farklı modern güneş enerjisi toplama teknolojileri tartışılmıştır. Bir dizi cihaz arasında güneş kolektörü, yakıt hücresi, fotokataliz ve solar fotovoltaik, verimliliği arttırmak için nano malzemeleri kullanmıştır. Nano malzemeler kullanılarak gelen radyasyonun 9 kat artırılabilirdiği ve güneş kolektörünün verimliliğinin geleneksel düz plakalı güneş kolektörüne kıyasla %10 daha yüksek olduğu bulunmuştur (Abdin et al., 2013).

1.2. Nanoteknolojinin Tarihçesi

Nanopartiküller ve yapılar, MS 4. yüzyılda Romalılar tarafından insanlar tarafından kullanılmış ve bu, nanoteknolojinin antik dünyadaki en ilginç örneklerinden birini ortaya koymuştur. British Museum koleksiyonundan Lycurgus kupası, antik cam endüstrisindeki en göze çarpan başarılarından birini temsil etmektedir. Dikroik, camın bilinen en eski örneğidir. Dikroik cam, belirli aydınlatma koşullarında renk değiştiren iki farklı cam türünü tanımlanmaktadır. Bu, Kupanın iki farklı renge sahip olduğu anlamına gelir: cam doğrudan ışıktaki yeşil görünmektedir ve ışık camdan parladığında kırmızı-mor görünmektedir(Bayda et al., 2019).



Şekil 1. 1. Lycurgus Kupası. Cam, A) yansıyan ışıktaki yeşil, B) iletilen ışıktaki kırmızı-mor görüntüsü (Bayda et al., 2019).

1990 yılında bilim insanları, dikroizm olgusunu açıklamak için transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanarak bardağı analiz ettiler. Gözlenen dikroizm (iki renk), çapı 50-100 nm olan nanopartiküllerin varlığından kaynaklanmaktadır. X-ışını analizi, bu nanopartiküllerin gümüş-altın (Ag-Au) alaşımı olduğunu, Ag:Au oranının yaklaşık 7:3 olduğunu ve ayrıca bir cam matris içinde dağılmış yaklaşık %10 bakır (Cu) içerdiğini gösterdi. Au nanopartikülleri ışık Emilimi (~520 nm) sonucunda kırmızı bir renk üretmektedir. Kırmızı-mor renk, daha büyük parçacıklar tarafından Emilmeden kaynaklanırken, yeşil renk, > 40 nm boyutuna sahip Ag nanoparçacıklarının koloidal dispersiyonları tarafından ışık saçılımına atfedilir. Lycurgus kabı en eski sentetik nanomalzemelerden biri olarak kabul edilmektedir (Bayda et al., 2019).

Nanoteknoloji, yeni uygulamalara olanak sağladığı 1 ile 100 nm arasındaki boyutlarda maddenin anlaşılması ve kontrolü olarak tanımlanmaktadır. İnsanların nano partiküllere maruz kalması insanlık tarihi boyunca gerçekleşmiş olsa da sanayi devrimi sırasında hızlı bir şekilde artmıştır. Nano parçacıkların incelenmesi yeni değildir. "Nanometre" kavramı ilk olarak 1925 Nobel Kimya Ödülü sahibi Richard Zsigmondy tarafından ortaya atılmıştır. Nanometre terimini özellikle parçacık boyutunu karakterize etmek için icat edip mikroskop kullanarak altın kolloidler gibi parçacıkların boyutunu ölçen ilk kişi oldu. 1965 Nobel Fizik Ödülü sahibi Richard Feynman, caltech'teki 1959 Amerikan Fizik Derneği toplantısı sırasında maddeyi atomik düzeyde manipüle etme

kavramını tanıttığı "Altta Bolca Yer Var" başlıklı bir konferans sundu. Bu yeni fikir yeni düşünme biçimlerini ortaya koydu ve Feynman'ın hipotezlerinin doğruluğu o zamandan beri kanıtlandı. Bu nedenlerden dolayı modern nanoteknolojinin babası olarak kabul edilmektedir. Feynman'ın konferansından yaklaşık 15 yıl sonra Japon bilim adamı Norio Taniguchi, nanometre mertebesinde gerçekleşen yarı iletken süreçleri tanımlamak için "nanoteknoloji" terimini kullanan ilk kişi oldu. Nanoteknolojinin, malzemelerin bir atom veya bir molekül tarafından işlenmesi, ayrılması, birleştirilmesi ve deformasyonundan oluştuğunu savundu. Nanoteknolojinin altın çağı 1980'lerde Kroto, Smalley ve Curl'ün fullerenleri keşfetmesi ve Massachusetts Institute of Technology'den (MIT) Eric Drexler'in 1986 tarihli "Engines of Creation" adlı kitabında Feynman'ın "There is Plenty of Room at the Bottom" adlı eserindeki fikirleri ve Taniguchi'nin nano teknoloji terimini kullanmasıyla başladı. "Nanoteknolojinin Yaklaşan Çağı" adlı kitabında kullanmıştır. Drexler, kendisinin ve rastgele karmaşıklıkta diğer öğelerin bir kopyasını oluşturabilecek nano ölçekte bir "birleştirici" fikrini öne sürmüştür. Drexler'in nanoteknoloji vizyonu genellikle "moleküler nanoteknoloji" olarak adlandırılmaktadır. Bir başka Japon bilim adamı Lijima'nın karbon nano tüpleri geliştirmesiyle nano teknoloji bilimi daha da ilerlemiştir. 21'inci yüzyılın başlarında nano bilim ve nanoteknolojinin gelişmekte olan alanlarına olan ilgi artmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde Feynman'ın saygınlığı ve maddenin atomik düzeyde manipülasyonu kavramı ulusal bilim önceliklerinin şekillenmesinde önemli bir rol oynamıştır. (Hulla et al., 2015)

1.3. Nano Bilim Tanımı

Yunanca “nano” ön eki “cüce” kelimesinden türemiştir. Nanometre (nm), metrenin milyarda biri veya üç ile beş atom genişliği olarak tanımlanır; 10 Å'ye eşdeğerdir. Ancak nano ölçek terimi bazen 1 mm'den küçük malzemeler için bile kullanılır. Ayrıca 1 nm, 10^{-9} m veya insan saçı çapından 10.000 kat daha küçüktür. Nano malzeme, nano ölçekte morfolojik özelliklere sahip malzemeleri ifade eder. Nano bilim çalışmaları, aşağıdaki temel özelliklere sahip madde ve sistemlerle ilgilenen çalışmalar olarak tanımlanmaktadır (Nasrollahzadeh et al., 2019):

- i. En az bir boyutu 10 nm'den küçük olmalıdır.
- ii. Moleküler ölçekli yapıların (süreçlerin) fiziksel ve kimyasal özelliklerinin temel kontrolünü gösteren metodolojilerden faydalanır.

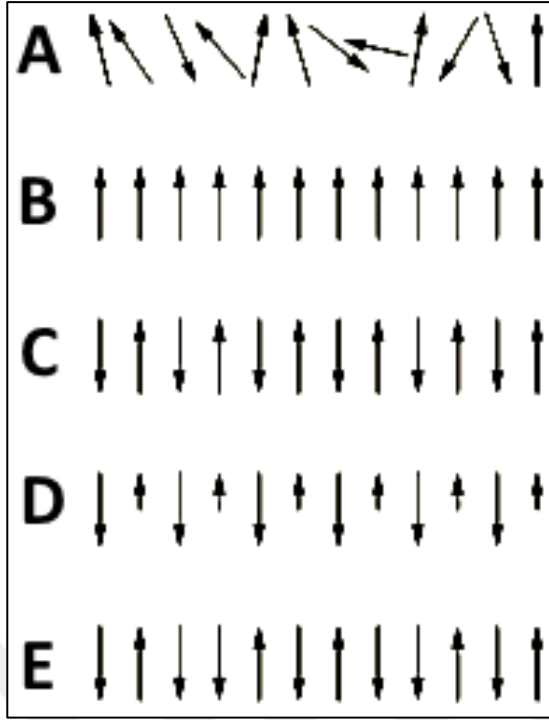
iii. Daha büyük yapıların imalatına izin verir.

Nanoteknoloji doğada hücreSEL yapıların bileşenlerini oluşturan proteinler, enzimler, karbonhidratlar, DNA, RNA ve virüsler gibi vücuttaki biyolojik varlıkların sentezi için kullanılır. Nano ölçekte yeni malzemelerin, süreçlerin ve olayların araştırılması ve yeni teorik ve deneysel araştırma tekniklerinin geliştirilmesi, yenilikçi nano ölçekli yapıların ve nano sistemlerinin ilerlemesi için yeni fırsatlar sağlar. Bir malzemenin boyutları büyük boyuttan 100 nm'nin altına düştüğünde özelliklerinde dramatik bir değişim meydana gelebilir. Nano ölçekte en çok arzu edilen özellikler, boyut sınırlaması, dağılım ve morfoloji, ara yüzey olayları ve kuantum etkilerinin baskınlığına dayalı olarak elde edilebilirliğıdir.(Nasrollahzadeh et al., 2019)

Nanobilim, malzemelerin atomik ve moleküler ölçekte manipölasyonu ile ilgilenen fizik, malzeme bilimi ve biyolojinin birleşimidir; nanoteknoloji ise nanometre ölçeğinde maddeyi gözlemleme, ölçme, işleme, birleştirme, kontrol etme ve üretme yeteneğıdir (Bayda et al., 2019).

1.4. Manyetizma

Manyetizmanın kökeni elektronların yörünge ve dönüş hareketlerinde ve elektronların birbirleriyle nasıl etkileşime girdiğinde yatmaktadır. Farklı manyetizma türlerini tanıtmmanın en iyi yolu, malzemelerin manyetik alana nasıl tepki verdiğini açıklamaktır. Aslında tüm maddeler manyetiktir, sadece bazı malzemeler diğerlerinden çok daha manyetiktir. Temel fark, bazı malzemelerde atomik manyetik momentlerin kolektif etkileşiminin olmaması, diğerlerinde ise atomik momentler arasında çok güçlü bir etkileşimin bulunmasıdır. Bir malzemenin manyetik davranışına dayalı birkaç ana grup sınıflandırması vardır. Tüm malzemelerde bulunan diyamanyetizma dışında eşlenmemiş elektronlar paramanyetizmada rastgele düzenlenir, eşleşmemiş elektronların tümü ferromanyetizmada hizalanır ve eşleşmemiş elektronlar antiferromanyetizmada birbirine zıt yönlerde sıralanır(Scepk, 2016).



Şekil 1. 2. Manyetizma türleri. a) paramanyetizma, b) ferromanyetizma, c) antiferromanyetizma, d) ferrimanyetizma e) zorlanmış ferromanyetizma (Scepk, 2016).

Ferromanyetik malzemelerin genel bir manyetik momenti varken antiferromanyetik malzemelerin manyetik momenti sıfırdır. Ferrimanyetik malzeme durumunda elektron spinleri birbirine antiparalel olarak yönlendirilir ancak her yöndeki spin sayısındaki eşitsizlik nedeniyle genel bir manyetik moment vardır. Antiferromanyetik malzemelerin hizalanmış dönüş ceplerine sahip olduğu güçlendirilmiş ferromanyetik tipler de vardır (Scepk, 2016).

1.4.1. Diyamanyetizma

Çok zayıf olmasına rağmen tüm maddelerin temel bir özelliğidir. Uygulanan bir manyetik alana maruz kaldığında yörüngedeki elektronların iş birlikçi olmayan davranışından kaynaklanır. Diyamanyetik maddeler, net manyetik momentleri olmayan atomlardan oluşur çünkü tüm yörünge kabukları doludur ve eşlenmemiş elektron yoktur. Başka bir deyişle alan sıfır olduğunda mıknatıslanma da sıfırdır. Ancak bir alana maruz bırakıldığında negatif bir mıknatıslanma üretilir ve dolayısıyla duyarlılık negatif

olur. Diamanyetik malzemeler, 1'den küçük bir göreceli manyetik geçirgenliğe ve 0'dan küçük bir manyetik duyarlılığa sahiptir. Diamanyetik malzemelerdeki negatif manyetik duyarlılık, uygulanan bir manyetik alan tarafından atomların elektron yörüngelerinde indüklenen bir akımın sonucudur ve genellikle 10^{-5} civarındadır. Manyetik moment tarafından indüklenen elektron akımı, uygulanan alaninkine zıt işarettedir. Diamanyetik malzemelerin diğer karakteristik özelliği duyarlılığın sıcaklıktan bağımsız olmasıdır(Scepk, 2016).

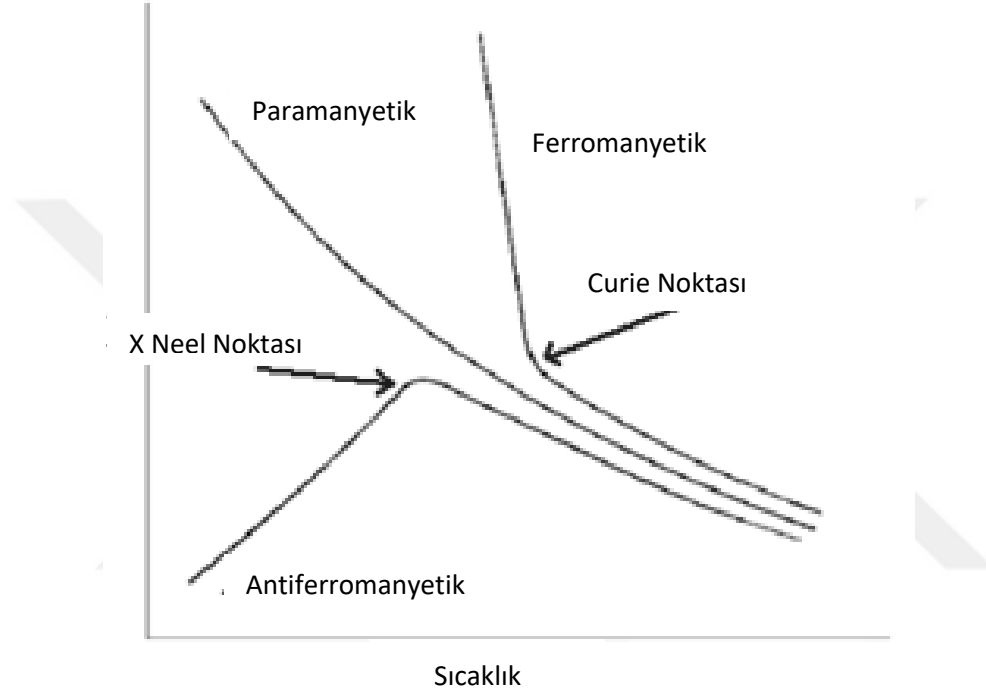
1.4.2. Paramanyetizma

Paramanyetik malzemenin yalnızca dışarıdan uygulanan bir manyetik alan varlığında çekildiği bir manyetizma şeklidir. Malzemedeki bazı atomlar veya iyonlar, kısmen dolu yörüngelerdeki eşleşmemiş elektronlar nedeniyle net bir manyetik momente sahiptir. Bununla birlikte bireysel manyetik momentler manyetik olarak etkileşime girmez ve diamanyetizmada olduğu gibi alan kaldırıldığında mıknatıslanma sıfırdır. Bir alan uygulandığında atomik manyetik momentlerin alan yönünde kısmi bir hizalanması olur, bu da küçük bir net pozitif mıknatıslanma ve pozitif duyarlılığa neden olur. Bu kesir alan gücüyle orantılıdır ve bu doğrusal bağımlılığı açıklar. Sıcaklık arttığında alanın bir fonksiyonu olarak mıknatıslanmadaki değişimler giderek daha doğrusal hale gelir. Duyarlılık genellikle oda sıcaklığında 10^{-3} ila 10^{-5} arasındadır. Paramanyetik malzemeler arasında magnezyum, molibden, lityum ve tantal bulunur. Ferromanyetik malzemelerin yaşadığı çekim doğrusal değildir ve çok daha güçlüdür(Scepk, 2016).

1.4.3. Ferromanyetizma

Ferromanyetizma yalnızca atomlar bir kafes şeklinde düzenlendiğinde ve atomik manyetik momentler birbirine paralel hizalanacak şekilde etkileşime girebildiğinde mümkündür. Bu etki; klasik teoride, ferromanyetik malzeme içinde ilk kez 1907'de Weiss tarafından öne sürülen bir moleküler alanın varlığıyla açıklanmaktadır. Bu alan, malzemeyi doygunluğa kadar mıknatıslamak için yeterlidir. Kuantum mekaniğinde Heisenberg ferromanyetizma modeli, manyetik momentlerin paralel hizalanmasını komşu momentler arasındaki değişim etkileşimi açısından tanımlar. Ferromanyetik malzemeler, atomik düzeyde uzun menzilli bir düzen olgusu sergiler ve bu durum, eşleşmemiş elektron dönüşlerinin manyetik bir alanda birbirine paralel olarak

sıralanmasına neden olur. Etki alanı içinde manyetik alan güçlüdür. Ancak toplu bir numunede birçok alan birbirine göre rastgele yönlendirileceğinden malzeme genellikle mıknatıslanmayacaktır. Ferromanyetizma, dışarıdan uygulanan küçük bir manyetik alanın, manyetik alanların birbiriyle hizalanmasına neden olabilmesi ve malzemenin mıknatıslandığı söylenmesiyle kendini gösterir. Daha sonra etki eden manyetik alan, genellikle malzemenin göreceli geçirgenliği olarak ifade edilen büyük bir faktörle artırılacaktır(Scepk, 2016).



Şekil 1. 3. Curie noktası (Scepk, 2016)

Ferromanyetik malzemelerde manyetik momentler Curie noktasının üzerindeki sıcaklıklarda rastgele sıralanır ve Curie noktasının altında sıralanır. Sıcaklık Curie noktasına doğru arttıkça, her bir alan içindeki hizalanma (mıknatıslanma) azalır. Curie noktasının üzerinde malzeme tamamen paramanyetiktir ve hizalanmış momentlerin mıknatıslanmış alanları yoktur(Scepk, 2016).

Paramanyetik malzemelerin aksine bu malzemelerdeki atomik momentler çok güçlü etkileşimler sergiler. Bu etkileşimler, 1000 Tesla mertebesinde bir alana eşdeğer yani dünya alanının gücünün yaklaşık 1000 milyon katı kadar çok büyük elektronik değişim kuvvetleri tarafından üretilir. Ferromıknatıslar arasında demir, nikel, kobalt, ve bazı nadir toprak elementleri (gadolinium, disprosyum). Ferromıknatıslar, harici bir manyetik alana maruz kaldıktan sonra bir dereceye kadar mıknatıslanmış kalma

eğiliminde olacaktır. Bu "manyetik geçmişlerini hatırlama" eğilimine histerezis denir. Sürüş alanı kaldırıldığında doyumluk mıknatıslanmasının korunan kısmına malzemenin kalıcılığı denir ve kalıcı mıknatıslarda önemli bir faktördür(Scepka, 2016).

Ferromanyetik malzemelerin iki belirgin özelliği, kendiliğinden mıknatıslanmaları ve manyetik düzen sıcaklığının varlığıdır. Kendiliğinden mıknatıslanma, bir alanın yokluğunda düzgün bir şekilde mıknatıslanmış mikroskobik hacim içinde var olan net mıknatıslanmadır. Bu mıknatıslanmanın büyüklüğü, 0 K' da, elektronların spin manyetik momentlerine bağlıdır. Kendiliğinden mıknatıslanma ile doyma mıknatıslanması arasındaki fark, manyetik alanlardan etkilenir. Doyma mıknatıslanması parçacık boyutundan bağımsız fakat sıcaklığa bağlı, kendine özgü bir özelliktir. Ferromıknatıslardaki elektronik değişim kuvvetleri çok büyük olmasına rağmen termal enerji sonunda değişimin üstesinden gelir ve rastgele bir etki yaratır. Tüm ferromanyetler, termal çalkalamanın bir sonucu olarak ferromanyetik özelliğin kaybolduğu bir maksimum sıcaklığa sahiptir (Şekil 1-3). Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı denir, Ni ve Fe için sırasıyla 627 K ve 1043 K'dir (Co için TC 1388 K'dir)(Scepka, 2016).

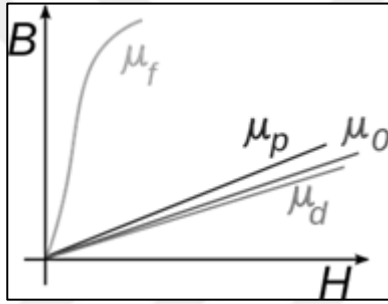
1.4.5. Ferrimanyetizma

Ferrimanyetizma yalnızca saf elementlerden daha karmaşık kristal yapıya sahip bileşiklerde görülür. Bu malzemeler içindeki değişim etkileşimleri, bazı kristal bölgelerdeki atomların paralel hizalanmasına ve diğerlerinin anti-paralel hizalanmasına yol açar. Malzeme, tıpkı ferromanyetik malzeme gibi manyetik alanlara ayrılır ve manyetik davranış da çok benzerdir ancak ferrimanyetik malzemeler genellikle daha düşük doyumluk mıknatıslanmasına sahiptir(Scepka, 2016).

Örneğin Baryum ferritte ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$) birim hücre, baryum ve oksijen iyonlarının manyetik momenti olmayan 64 iyon içerir, 16 Fe^{3+} iyonu paralel hizalanmış momentlere ve uygulanan alana paralel net mıknatıslanma sağlayan 8 Fe^{3+} antiparalel hizalanmış momentlere sahiptir. ancak iyonların yalnızca $\frac{1}{8}$ 'si malzemenin mıknatıslanmasına katkıda bulunduğundan nispeten düşük bir büyüklüktedir(Scepka, 2016).

1.4.6. Antiferromanyetizma

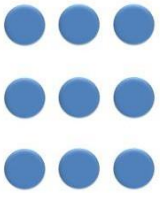
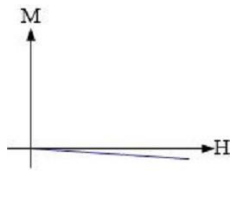
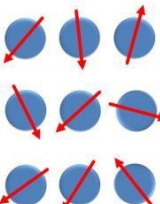
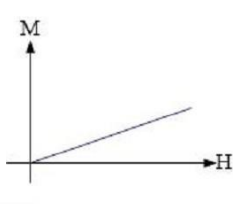
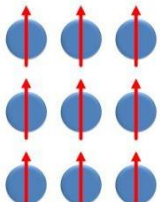
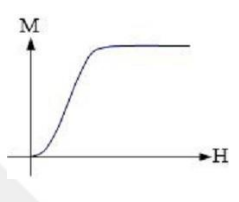
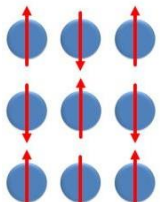
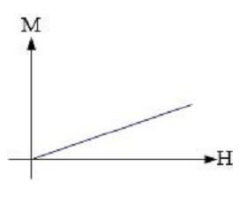
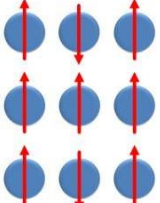
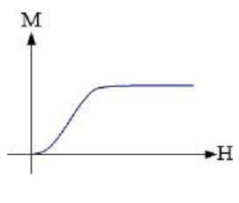
Makroskobik olarak paramanyetizmaya benzeyen antiferromanyetizma, manyetizmanın zayıf bir şeklidir yani zayıf ve pozitif duyarlılığa sahiptir. Periyodik tabloda oda sıcaklığında antiferromanyetizma sergileyen tek element kromdur. Antiferromanyetik malzemeler ferromanyetik malzemelere çok benzer ancak komşu atomlar arasındaki değişim etkileşimi atomik manyetik momentlerin antiparalel hizalanmasına yol açar. Bu nedenle manyetik alan sıfırlanır ve malzeme paramanyetik malzemeyle aynı şekilde davranır. Ferromanyetik malzemeler gibi bu malzemeler de Néel sıcaklığı T_N olarak bilinen bir geçiş sıcaklığının üzerinde paramanyetik hale gelir. Alınanlığın maksimumu, T_N 'nin altında manyetik momentlerin antiparalel düzenlenmesinin ortaya çıkmasından kaynaklanır(Scepka, 2016).



Şekil 1. 4. Aşağıdakiler için geçirgenliklerin basitleştirilmiş karşılaştırması: ferromıknatıslar (μ_f), paramıknatıslar (μ_p), diamıknatıslar (μ_d) ve boş alan (μ_0)(Scepka, 2016).

Manyetik geçirgenlik, manyetik indüksiyon ve manyetik alan yoğunluğu arasında var olan bir orantı sabitidir. Bu sabit, boş uzayda yaklaşık olarak metre başına $1,257 \times 10^{-6}$ Henry'ye (H/m) eşittir. Diğer malzemelerde bu değer, μ_0 ile sembolize edilen boş alan değerinden çok daha farklı olabilir ve genellikle büyük ölçüde daha büyük olabilir. Akı çizgilerinin birbirinden uzaklaşmasına neden olan ve vakumla karşılaştırıldığında manyetik akı yoğunluğunun azalmasına neden olan malzemelere diyamanyetik denir. Manyetik akıyı 1'den fazla fakat 10'dan küçük veya ona eşit bir faktörle yoğunlaştıran malzemelere paramanyetik denir. Akıyı 10'dan fazla faktörle yoğunlaştıran malzemelere ferromanyetik denir. Bazı maddelerin geçirgenlik faktörleri sıcaklığın artması veya düşmesiyle ya da uygulanan manyetik alanın yoğunluğuyla değişir (Şekil 1-4)(Scepka, 2016). Manyetik duyarlılık değeri her malzeme türü için belirli bir aralığa düşer ve Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. 1 Farklı manyetik davranış türlerinin özeti

Tip	Örnek	Atomik / Magnetik davranış		
Diamanyetizma	İnert gazlar; birçok metal Au, Cu, Hg; metalik olmayan elementler B, Si, P, S; iyonlar Na ⁺ , Cl ⁻ ; H ₂ , N ₂ molekülleri; H ₂ O	Atomların manyetik momenti yoktur. Duyarlılık küçük ve negatif, -10^{-6} ila -10^{-5}		
Paramanyetizma	Bazı metaller Al, bazı diatomik gazlar O ₂ , NO; geçiş metalleri ve nadir toprak metallerinin iyonları; nadir toprak oksitleri	Atomların rastgele yönlendirilmiş manyetik momentleri vardır. Duyarlılık küçük ve pozitif, 10^{-5} ila 10^{-3}		
Ferromanyetizma	Geçiş metalleri Fe, H, Co, Ni, ferromanyetik elementlerin alaşımları; bazı Mn, MnBi, Cu ₂ MnAl alaşımları	Atomların paralel hizalanmış manyetik momentleri vardır. Duyarlılık büyüktür (T _c 'nin altında)		
Anti-ferromanyetizma	Geçiş metalleri Mn, Cr ve bunların birçok bileşiği, MnO, CoO, NiO, Cr ₂ O ₃ , MnS, MnSe	Atomların antiparalel hizalanmış manyetik momentleri vardır. Duyarlılık küçük ve pozitif 10^{-5} ila 10^{-3}		
Ferrimanyetizma	Fe ₃ O ₄ (manyetit); demirin karışık oksitleri ve Sr ferrit gibi diğer elementler	Atomlar paralel ve antiparalel hizalanmış manyetik momentlere sahiptir. Duyarlılık büyüktür (T _c 'nin altında)		

1.4.7. Süperparamanyetizma

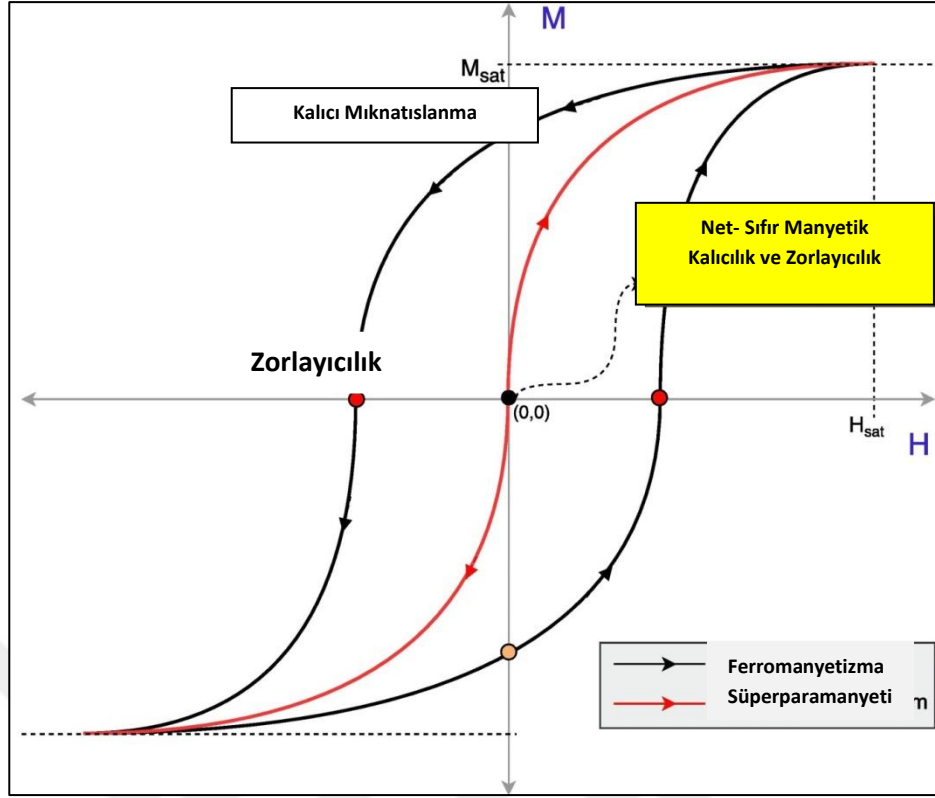
Uygulanan manyetik alana güçlü bir tepki gösteren ve manyetik alan kaldırıldıktan sonra nötr kalan bir malzemenin geliştirilmesi oldukça arzu edilen bir durumdur. Diyamanyetik ve paramanyetik malzemeler, manyetik alan kaldırıldıktan sonra nötr duruma dönmelerine rağmen, dış manyetik alan altında çok zayıf mıknatıslanmaya sahiptirler. Diğer taraftan, ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin çok alanlı yapısı, dipollerin, farklı alanların iç manyetik alanının net sıfır mıknatıslanmaya ulaşmak için birbirini iptal edeceği başlangıç konumlarına yeniden yönlendirilmesini engeller. Süperparamanyetik nanopartiküllerin (SPMNP'ler), dış manyetik alan altında güçlü manyetizmaya ve manyetik alan kaldırıldıktan sonra sıfır manyetizmaya (histerezis yok) sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Süperparamanyetizma, ferromanyetik veya ferrimanyetik kristaller, dış manyetik alanın yönü boyunca güçlü bir şekilde mıknatıslanabilen yalnızca tek bir alan yapısı elde etmek amacıyla nano ölçekte sentezlendiğinde elde edilir. Manyetik alanın yokluğunda, nanopartiküller ya Néel gevşemesine, yani bir yönden diğerine iç dönüş değişimine ya da Brownian gevşemesine, yani parçacıkların ortamdaki termal dalgalanmalar nedeniyle fiziksel dönüşüne maruz kalır; bunların her ikisi de nanopartiküllerin rastgele manevra yapmasına neden olur. Böylece, nanopartiküllerin dipol oryantasyonu dönmeye göre değişir, dolayısıyla genel mıknatıslanma değeri sıfıra rastgele ayarlanır. Bu benzersiz özelliğe sahip manyetik nanopartiküller (SPMNP'ler), özellikleri harici bir manyetik alan aracılığıyla uyarlanabildiğinden akıllı nanopartiküller veya fonksiyonel nanopartiküller olarak da adlandırılır. Demir, kobalt, nikel gibi manyetik elementlerden veya bunların kimyasal bileşiklerinden oluşan SPMNP'ler, çıplak formda veya çeşitli fonksiyonel gruplarla kaplandıktan sonra çeşitli uygulamalarda büyük potansiyeller sunar. Özellikle ferritler, kolay hazırlanabilmeleri, bol miktarda bulunabilmeleri ve biyogüvenliklerinden dolayı SPMNP'lerin en çok araştırılan türüdür. Çoğu manyetik malzemenin kritik çapı nanometre boyut aralığına, tipik olarak 10-100 nm aralığına düşer. Örneğin demir, manyetit ve maghemit parçacıklarının kritik çapının sırasıyla 15 nm, 30 nm ve 40 nm olduğu tahmin edilmektedir. Nanopartiküllerin kritik çaplarına göre dikkatli bir şekilde sentezlenmesi önemlidir, çünkü aşırı derecede küçük çaplı parçacıklar düşük doygunluk mıknatıslanması sağlar ve büyük boyutlu parçacıklar süperparamanyetik davranışlarını kaybeder. Malzemelerin manyetik davranışı, uygulanan manyetik alan eğrilerine karşı mıknatıslanmanın grafiğinin çizilmesiyle

karakterize edilir. Manyetik alan altında güçlü mıknatıslanma ve sıfır manyetik kalıcılığın birleşik olumlu özellikleri, SPMNP'leri diğer manyetik kategorilerdeki malzemelerden ayırır. Bu tür manyetik özelliklerden dolayı, tek alanlı manyetik parçacıklar, çeşitli alanlarda çok alanlı benzerlerine göre üstün performans sergiler. Mükemmel performanslarından dolayı bir dizi ticari ürün SPMNP'lerden yararlanmaktadır. SPMNP'ler, ortam titreşimlerinden ferroakışkan enerji hasadı ve gelişmiş ısı transferi gibi enerji uygulamalarında araştırılmıştır. Çevresel araştırmalar, SPMNP'lerin endüstriyel atıklardan kirletici maddelerin kolay ve hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağladığını ve emici maddelerin yenilenmesini ve atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesini sağladığını göstermiştir. (Sezer et al., 2021)

1.5. Histerezis Döngüsü

Bir malzemenin manyetik özellikleri hakkında histerezis döngüsünü inceleyerek çok fazla bilgi öğrenilebilir. Örneğin ferromanyetik bir malzeme bir yönde mıknatıslandığında mıknatıslama alanı kaldırıldığında malzeme sıfır mıknatıslanmaya geri dönmeyecektir. Bu histerezis malzemedeki manyetik alanların varlığıyla ilgilidir. Manyetik alanlar yeniden yönlendirildikten sonra onları başlangıçtaki mıknatıslanma durumuna geri döndürmek biraz enerji gerektirir(Scepka, 2016).

Başka bir deyişle histerezis döngüsü, ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanmasının geçmişe bağlı doğasını gösterir. Örnek bir histerezis döngüsü Şekil 1-5'te gösterilmektedir. İlk başta manyetik alan sıfır alan değerinden arttığında malzeme doğrusal olmayan bir mıknatıslanma eğrisini (başlangıç mıknatıslanma eğrisi olarak da adlandırılır) takip eder. Alanın belirli bir değerinde malzeme, alanların hizalanmasıyla doygunluğa kadar mıknatıslanmaya başlar. Malzeme doyuma ulaştığında mıknatıslama alanı sıfıra düşürülebilir ve malzeme, mıknatıslanma derecesini muhafaza eder. Mıknatıslanmayı tekrar sıfıra getirmek için tahrik eden manyetik alanın tersine çevrilmesi ve büyük bir değere yükseltilmesi gerekir veya mıknatıslığın giderilmesi sıcaklık değişimiyle de gerçekleştirilebilir(Scepka, 2016).



Şekil 1. 5. Ferromanyetik bir malzeme için histerezis eğrisi. Numunenin mıknatıslanmasının (M) manyetik alan kuvvetine (H) bağılılığı, çünkü H , mıknatıslamayı yönlendiren harici olarak uygulanan alanın bir ölçüsüdür(Scepka, 2016; Sezer et al., 2021).

Döngünün kritik parametreleri; kalıcılık (M_r), içsel zorlayıcılık (H_c) ve doyum mıknatıslanmasıdır (M_s). Doyum mıknatıslanması, mıknatıslanmanın maksimum değeridir ve yalnızca numune içindeki dönüş momentlerinin sayısına bağlıdır. Kalıcı mıknatıslanma, uygulanan alanın sıfıra düşürülmesinden sonraki mıknatıslanmanın büyüklüğüdür. Zorlayıcılık, numunenin mıknatıslanmasını doygunluktan sıfıra döndürmek için gereken alandır. Kalıcılığı ve zorlayıcılığı düşük olan malzemeler yumuşak malzemeler olarak adlandırılırken sert malzemelerde zıt parametreler ortaya çıkar. Curie sıcaklığının yanı sıra bu parametreler tüm mıknatısların temel davranışını tanımlar(Scepka, 2016).

Farklı manyetik malzemelerin histerezisinde önemli farklılıklar vardır. Histerezis döngüsü içindeki alanın bir çevrimde harcanan enerji olduğu bilinmektedir. Bu nedenle dar bir histerezis döngüsü, enerji dağılımını en aza indirmek için motor çekirdekleri gibi sistemler için arzu edilen mıknatıslanmanın tekrar tekrar tersine çevrilmesinde az miktarda dağılan enerjiye işaret eder. Geniş bir döngü, sürüş alanı kaldırıldığında doygunluk alanının büyük bir bölümünün korunduğu durumu temsil

eder. Bu, manyetik kayıt ve bellek cihazları için arzu edilen bir durumdur(Scepk, 2016).

1.6. Manyetik Nanoparçacıklar

Manyetik nanoparçacıklar (MNP'ler), birçok teknolojik uygulamada kullanılmak üzere kapsamlı bir şekilde araştırılan bir nanomalzeme sınıfıdır. MNP'ler algılama teknolojilerinde, hafıza depolama cihazlarında, manyetik ayırmada, manyetik etiketlemede ve katalitik işlemlerde kullanılmaktadır. Biyomedikal uygulamalarda MNP'ler, hipertermi tedavileri için ısıtmayı tetiklemek, manyetik görüntüleme için kontrast etkileri sağlamak ve hedeflenen ilaç dağıtımının uzaktan kontrolü için kullanılmaktadır. Manyetik malzemeler arasında demir oksit NP'ler, mükemmel biyouyumlulukları nedeniyle umut verici nanomalzemelerdir. Demir oksit NP'lerin biyouyumluluğu, bu NP'lerin ileri tıbbi teknoloji uygulamaları için ticarileştirilmesine yönelik önemli araştırma çabalarının ana itici gücüdür. Çok sayıda demir oksit bilinmesine rağmen "demir oksitler" terimi tipik olarak üç türe karşılık gelir: Fe_3O_4 (manyetit), $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (hematit) ve $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemit). Tüm demir oksitler arasında Fe_3O_4 üstün manyetik özelliklerinden dolayı daha fazla ilgi görmüştür. Son yirmi yılda, Fe_3O_4 NP'leri üzerine yapılan araştırmalar, yalnızca homojen çekirdek manyetik Fe_3O_4 NP'lerinin sentezinde değil, aynı zamanda gelişmiş nano mimarilerin (çekirdek-kabuk, kompozitler, işlevselleştirilmiş yüzeyler vb.) hazırlanmasında ve bunların uygulanmasında da dikkate değer ilerleme kaydedildi. Fe_3O_4 , üstün manyetik özellikleri, elektronik iletkenliği ve biyouyumluluğu nedeniyle diğer demir oksitlerden veya ferrit spinel oksitlerden ($\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mg}$ vb. ile MFe_2O_4) daha fazla ilgi görmüştür. Fe_3O_4 'ün manyetik özellikleri kristal yapısıyla açıklanabilir. Manyetit, oktahedral ara bölgelerin %25'ini kaplayan Fe^{2+} katyonları, oktahedral bölgelerin %25'ini ve tetrahedral bölgelerin %12,5'ini kaplayan Fe^{3+} katyonlarından ve birim hücrelerinde otuz iki O^{2-} anyonundan oluşan kübik ters spinel kristal yapısına sahiptir. Oktahedral deliklerdeki Fe^{3+} ve Fe^{2+} katyonlarının manyetik momentleri ferromanyetik olarak bağlanmıştır. Ancak tetrahedral bölgelerdeki Fe^{3+} iyonları, oktahedral bölgelerdeki Fe^{3+} iyonlarının ters yönünde manyetik dipollere sahiptir. Bu nedenle Fe_3O_4 , kristal yapısının tetrahedral ve oktahedral bölgelerinde antiferromanyetik olarak bağlanmış Fe^{3+} katyonları nedeniyle yüksek doygunluk mıknatıslanmasına (MS) ve düşük zorlayıcılığa (HC) sahip ferrimanyetik bir malzemedir. Bazen Fe_3O_4 için

ferromanyetik özellikler veya ferromanyetizma terimi de kullanılır; bu, onun manyetik alanın yokluğunda manyetik özellikler sergilediğini gösterir. Diğer demir oksit fazlarına gelince maghemit de ferrimanyetik bir malzemedir ve hematit zayıf bir ferromanyetik malzeme olarak kabul edilir. Manyetit (Fe_3O_4) ve maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) için doyma mıknatıslanmasının (MS) maksimum değerleri sırasıyla 98 emu/g ve 82 emu/g'dir, oysa hematitin ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) doyma mıknatıslanması değerleri yaklaşık 2 ila 4 emu/g'dir. Fe_3O_4 'ün diğer avantajlı özellikleri, enerji depolama cihazı uygulamaları için önemli olan yüksek elektrokimyasal aktivitesi ve yüksek teorik kapasitesidir. Bu ana özelliklere ek olarak doğal bolluk, ucuzluk ve çevre dostu olması, Fe_3O_4 bazlı NP'lerin büyük ölçekli uygulamalarına olanak tanıyan ek avantajlardır (Nguyen et al., 2021).

1.6.1. Elektron katalizli reaksiyonlar

Katalizör olarak elektronun paradigması altında çeşitli reaksiyonlar mevcuttur. Elektron kataliz zinciri mekanizmaları başlatma adımları gerektirir. Prensip olarak, uygun indirgeme potansiyeline (termodinamik) ve bir elektronu makul bir hızda aktarma yeteneğine (kinetik) sahip herhangi bir başlatıcı bir zinciri başlatabilir. Örneğin indirgeyici metaller, elektron katalizi için geniş bir potansiyel başlatıcı kaynağı sunar. Bunun bir sonucu olarak, eklenen bir kimyasal varlık tarafından katalize edildiği söylenen bazı reaksiyonlar bunun yerine elektronlar tarafından katalize edilebilir. Bu gibi durumlarda, katalizör adı verilen madde bunun yerine bir başlatıcı görevi görür ve yayılma adımlarında görünmez. Aslında birçok farklı 'katalizörün' aynı reaksiyon için çalıştığı gözlemi, elektron katalizli reaksiyonlara dair bir ipucu olabilir. Başlatıcılar ve katalizörlerin her ikisi de küçük miktarlarda kullanılır ancak farklı roller üstlenirler. Başlatıcılar zincirleri başlatır; Katalizörler bunların yayılmasına yardımcı olur. Daha da önemlisi, katalizörler katalitik döngüde ortaya çıkarken başlatıcılar görünmez. Bunlar büyük farklılıklardır ve 'katalitik miktarlarda' mevcut gerekli reaksiyon bileşenlerinin katalizör, başlatıcı veya her ikisi olup olmadığı netleşene kadar hiçbir mekanizmanın anlaşıldığı söylenemez. Elektron katalizli zincirlerdeki radikal anyon ara ürünlerinin karşı iyonları olması gerekir. Tipik olarak bunlar başlatıcıdan gelen metal iyonlarıdır. Bir karşı iyonun doğası, onunla ilişkili radikal anyonun yapısını, stabilitesini ve reaktivitesini doğal olarak etkileyebilir. Elektron katalizli reaksiyonlar prensipte hem elektrokimyasal hem de fotokimyasal olarak başlatılabilir. Benzer şekilde, ışık enerjisi, katalitik bir döngüyü başlatmak üzere bir elektronu serbest bırakmak için kullanılabilir ve ışığın rolü, kuantum verimi ölçülerek araştırılabilir. Bu, bir fotonun,

sonlandırılmadan önce (ortalama olarak) 6.000 döngü boyunca yayılan bir zinciri başlattığı anlamına gelir. Elektron katalizli reaksiyonlarda kimyasal, elektrokimyasal veya ışık enerjisi, öncülleri ürünlere yönlendirmek için değil, başlatma için harcanır. Genellikle bu itici güç zaten yerleşiktir çünkü ürünler daha stabildir (Studer & Curran, 2014).

1.6.2. Nano katalizörler

Nanomalzemelerin katalizde uygulanması büyük ilgi görmüştür. Nanokatalizörler benzersiz bir şekilde seçiciliğe, reaktiviteye, muazzam yüzey alanlarına ve genişletilmiş katalitik verimliliğe sahiptir. Homojen ve heterojen kataliz uygulamaları gelişen bir alandır. Yeşil bir süreç aracılığıyla mükemmel verimliliğe sahip, son derece seçici ve hızlı katalitik sistemler geliştirilmektedir. Çevre dostu kataliz üzerine yapılan araştırmalar, pek çok sorunun hafifletilmesine katkıda bulunmaktadır. Araştırmacılar mükemmel stabilite, seçicilik ve aktiviteye sahip ideal nanokatalizörü yeşil yöntemlerle elde etmeye devam etmektedir. (Umaz, 2024a)

1.6.2.1. Demir oksit manyetik nanokatalizörlerin üretim yöntemleri

Yüksek aktiviteleri nedeniyle platin, paladyum, rutenyum ve rodyum bazlı katalizörler kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Rutenyum, hidrojen üretiminde oldukça aktif ve yaygın olarak araştırılan bir katalizördür. Ancak bu katalizörler yüksek maliyetleri ve sınırlı bulunuşları nedeniyle pahalıdır. Daha az maliyetli, ancak yine de etkili bir şekilde çalışan katalitik sistemlerin geliştirilmesi önemlidir. Pratik uygulama sınırlamaları olan pahalı elemanların aksine, son zamanlarda alternatif enerji yaklaşımı çalışmaları, ucuz bileşenlere sahip, erişilebilirlik, iyi katalitik aktivite, yüksek spesifik yüzey alanı ve farklı morfolojiler sağlayan etkili katalizörler geliştirmeye başlamıştır. Alternatif enerji araştırmalarında bir yaklaşım olarak düşük üretim maliyetleri ile yüksek verimlilik stratejisi ortaya çıkmıştır. Nano ölçekte geliştirilen malzemeler, geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında benzersiz yeteneklere sahiptir. Buna bağlı olarak nanokatalizörler enerji üretimine özel katkılar sunmaktadır. Araştırmacılar, kolay hazırlanma, kolay izolasyon ve düşük maliyet gibi avantajlara sahip olduğundan hidrojen üretim çalışmalarında manyetik nano-katalizörlerden faydalanmaktadırlar. Fe_3O_4 manyetik nano-katalizörleri birçok yöntem kullanılarak hazırlanmaktadır. Fe_3O_4 katalitik reaksiyonlarda önemli bir manyetik nano-katalizördür. Fe_3O_4 manyetik nanokatalizörün, mıknatıslanma yeteneklerinden dolayı bir mıknatıs tarafından

reaktörden zahmetsizce uzaklaştırılır. Manyeto-dipol kuvvetleri topaklanma eğilimini artırır. Bu nedenle Fe_3O_4 ve SiO_2 gibi uygun ajanlarla kaplama yapılması gerekmektedir. Kaplama işlemi aynı zamanda yüksek termal/kimyasal stabilite sağlar, oksidasyon direncini artırır, solvent içinde yüksek dispersiyon sağlar, katalitik reaksiyonlarda performansı artırır, yeniden kullanımda deformasyonu önler ve yüksek verimlilik sağlar. Ayrıca diğer fonksiyonel gruplara geniş bir bağlanma yelpazesi sunar. Tasarlanan fonksiyonel gruplar silika kabuğa sıkı ve sıkı bir şekilde bağlanabilmektedir. Ayrıca Fe_3O_4 manyetik nanokatalizörün hazırlanması düşük maliyet gerektirir. Önceden üretilmiş Fe_3O_4 manyetik nanokatalizörün yüzeyinde organosilan işlevselliklerinin daha yüksek ve daha kontrol edilebilir homojen yüzey kaplamasına olanak tanır (Umaz, 2024b).

1.6.2.2. Birlikte çöktürme yöntemleri

Birlikte çöktürme, oda sıcaklıklarında veya yükseltilmiş bir sıcaklıkta inert bir atmosfer altında bir baz ekleyerek IO-NM'leri (metal oksitler ve ferritler) sulu tuz çözeltilerinden sentezlemenin çok basit ve kullanışlı bir yolu olarak kabul edilir. Faraji ve arkadaşlarına göre (2010) demir oksit nanopartikülleri (Fe_3O_4 veya Fe_2O_3) ve ferritler genellikle sulu bir ortamda hazırlanır (Kasem et al., 2019).

1.6.2.3. Sol jel yöntemi

Sol-jel işlemi, çeşitli nanoyapıların özellikle metal oksit nanopartiküllerinin sentezi için daha kimyasal bir yöntemdir (ıslak kimyasal yöntem). Bu yöntemde moleküler öncü (genellikle metal alkoksit) su veya alkol içinde eritilir ve hidroliz/alkoliz yoluyla ısıtılıp karıştırılarak jelle dönüştürülür. Hidroliz/alkoliz işleminden elde edilen jel ıslak veya nemli olduğundan jelin istenilen özelliklerine ve uygulamasına bağlı olarak uygun yöntemler kullanılarak kurutulması gerekir. Sol-jel yöntemi uygun maliyetli bir yöntemdir ve düşük reaksiyon sıcaklığı nedeniyle ürünlerin kimyasal bileşimi üzerinde iyi bir kontrol sağlanır. Sol-jel yöntemi, seramik yapımı sürecinde kalıplama malzemesi olarak kullanılabilir ve çeşitli uygulamalarda ince metal oksit filmleri arasında bir ara madde olarak kullanılabilir. Sol-jel yöntemiyle elde edilen malzemeler çeşitli optik, elektronik, enerji, yüzey mühendisliği, biyosensörler, farmasötik ve ayırma teknolojilerinde (kromatografi gibi) kullanılmaktadır. Sol-jel yöntemi, farklı kimyasal bileşime sahip nanopartiküllerin sentezi için geleneksel ve endüstriyel bir yöntemdir. (Bokov et al., 2021).

Günümüzde nanopartiküllerin üretimi ve sentezi için sol-jel yöntemi (çözelti yöntemi), buhar fazında sıkıştırma yöntemi, mekanik alaşımlama yöntemi veya yüksek enerjili peletlerle çarpışma yöntemi, plazma yöntemi ve elektrokimyasal yöntemler gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bahsedilen yöntemlerin tümü büyük miktarlarda nanomateryal üretme yeteneğine sahip olmasına rağmen sol-jel yöntemi diğer mevcut yöntemlere göre daha yüksek popülerliğe ve endüstriyel uygulamaya sahiptir. Eşsiz özellikleri ve karakteristikleri nedeniyle bu yöntem, endüstriyel ölçekte aynı boyutta yüksek kaliteli nanopartiküller üretme kapasitesine sahiptir. Bu yöntem aynı anda iki veya daha fazla türde nanoparçacık üretme kapasitesine sahiptir; bu, iki veya daha fazla metal (veya metal oksit) öncülünün belirli oranlarda karıştırılmasıyla alaşım ürünlerinin tek adımda sentezlendiği anlamına gelir. Elbette alaşım ürünlerini tek adımda sentezleme yeteneğine sahip plazma yöntemi ve elektrokimyasal yöntemler gibi başka yöntemler de vardır ancak bunların sol-jel yönteminden temel farkı, sol-jel yönteminin endüstriyel ölçekte olmasıdır (Bokov et al., 2021).

1.6.2.4. Mikroemülsiyon teknikleri

Bu yaklaşımda, reaksiyon kapları olarak emülsiyon damlacıkları su, yüzey aktif madde ve yağı içeren üçlü bir sistemde oluşturulur. Daha sonra emülsiyon damlacıklarında metal öncüllerinin çökeltme işlemi meydana gelir ve dar boyutlu metal oksit parçacıkları oluşur. (Ahangaran & Navarchian, 2020)

1.6.2.5. Solvothermal yöntemler

Solvothermal yaklaşım, metal komplekslerinin inert ortamda basınç yardımıyla termal bozunmasına dayanmaktadır. NP'lerin boyutu ve toplanması, reaksiyon koşulunda uygun yüzey aktif maddenin kullanılmasıyla kontrol edilebilir. (Ahangaran & Navarchian, 2020)

1.6.3. Nanoparçacıkların yüzey dokusu

Yüzey termodinamik özellikleri, NP'lerin parçacık boyutundan etkilenen fizikokimyasal özellikleri üzerinde en etkili faktörlerdir. NP'lerin atomlarının çevresi yığın halindeki atomlarınkinden oldukça farklıdır. Toplu ölçeklerde atomlar her yönde benzer atomlarla çevrilidir. Sonuç olarak, dökme malzeme içindeki atomlar üzerinde saf bir kuvvet alanı yoktur. NP'lerin yüzeyindeki atomlar, atomların arayüzünün yalnızca bir yönünde çevrelenmiştir. Bu nedenle, NP'lerin yüzeyi, yüzeyde "yüzey enerjisi"

olarak ek bir enerji ortaya çıkaran asimetrik bir kuvvet alanı gösterir(Ahangaran & Navarchian, 2020).

NP'lerin aşırı yüzey enerjisi, parçacıkların toplanması veya moleküllerin adsorpsiyonu ile azaltılabilir. Agregasyon, metalik ve metalik olmayan NP'lerin spesifik uygulamaları için ciddi bir yüzey problemidir. NP'lerin yüksek yüzey enerjisi, NP'lerin toplanmasını etkileyen en önemli faktördür. NP'lerin toplanması parçacık boyutunu artırır, dolayısıyla NP'lerin yüzey enerjisi azalır. NP'ler birbirine bitişik olduğunda, NP'ler arasında van der Waals etkileşim kuvvetleri meydana gelir. NP'lerin toplanması aynı zamanda parçacıklar arasındaki kimyasal bağlanmaya ve parçacıklar arası elektrostatik etkileşimlere de neden olabilir. NP'lerin dağılımının ve toplanmasının kontrol edilmesi, NP uygulamasının geliştirilmesi için çok önemlidir. NP'lerin yüzey modifikasyonu, NP'lerin toplanmasını azaltmak için en etkili tekniktir(Ahangaran & Navarchian, 2020).

1.6.4. Metal oksit nanoparçacıkların yüzey modifikasyonu teknikleri

NP'lerin toplanmasını önlemenin en popüler yöntemlerinden biri yüzey modifikasyonudur. Bu teknik, süspansiyonlardaki NP'lerin stabilitesini artırabilir ve NP'lerin organik matrisler veya biyolojik ortamlarla uyumluluğunu artırabilir. Metal oksit NP'lerin yüzeyi, NP'ler ve değiştiriciler arasındaki fizikokimyasal etkileşimler kullanılarak değiştirilebilir. Bu bölümde NP'lerin yüzey modifikasyonuna yönelik fiziksel ve kimyasal teknikler anlatılacaktır(Ahangaran & Navarchian, 2020).

1.6.4.1. Fiziksel teknikler

Fiziksel yüzey modifikasyonu, nanoparçacık yüzeyinin iyonik veya polimerik yüzey aktif maddelerle kaplanması yoluyla gerçekleştirilebilen NP'lerin yüzey stabilitesini arttırmanın en kolay tekniklerinden biridir . Yüzey aktif maddelerin kimyasal yapısı hem hidrofobik grupları (kuyrukları) hem de hidrofilik grupları (başları) içerir. Yüzey modifikasyon işlemi, hidrofilik grubun elektrostatik etkileşim veya kimyasal bağlanma yoluyla NP yüzeyine adsorpsiyonuna dayanmaktadır. Yüzey aktif maddeler parçacıklar arasındaki etkileşimleri azaltabilir ve arayüzey kuvvetlerinin etkilerini en aza indirebilir. Yüzey aktif maddenin süspansiyon halindeki parçacık yüzeyine adsorpsiyonu, yüzey gerilimini ve parçacıkların toplanma hızını azaltır. Sonuç olarak parçacıkların stabilitesi artar. Fiziksel modifikasyon yaklaşımında, değiştiriciler NP'lerin yüzeyinde zayıf van der Waals kuvvetlerine veya hidrojen bağlarına sahiptir.

Bu nedenle, fiziksel olarak değiştirilmiş NP'ler termal ve solvolitik olarak kararsızdır . Son zamanlarda, TiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 ve Al_2O_3 -CuO gibi NP'lerin yüzey aktif maddeler kullanılarak yüzey modifikasyonu birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir(Ahangaran & Navarchian, 2020).

1.6.4.2. Kimyasal teknikler

Kimyasal yüzey modifikasyonu, daha sonraki uygulamalar için kararlı bir nanosisteme yol açabilecek nanomateryal yüzey özelliklerini geliştirmek için etkili bir yöntemdir . Bu teknikler, değiştirici ve NP yüzeyi arasındaki kovalent bağlanmaya dayanmaktadır. Tioller , aminler, organofosfor molekülleri, karboksilik asitler, polimerler ve silanlar gibi çeşitli birleştirme maddeleri NP'lerin çeşitli ortamlarda dağılımını geliştirmek için kullanılmıştır(Ahangaran & Navarchian, 2020).

1.7. Demir Oksit Manyetik Nanokatalizörler Ve Güneş Pilleri

Enerji, insanın hayatta kalması ve sosyal gelişimi için hayati öneme sahiptir. Ancak yenilenemeyen enerjinin kullanımı ciddi çevre sorunlarına ve aşırı sera gazı emisyonuna neden oluyor. Bu nedenle güneş, gelgit ve rüzgâr enerjisi gibi büyük ölçekli enerji santralleri olmadan insanların kullanımına yönelik etkin bir şekilde toplanabilen çeşitli temiz enerji kaynaklarından yararlanmak büyük önem taşımaktadır. Bunlar arasında güneş enerjisi, doğada en bol bulunan ve sürdürülebilir enerjilerden biri olup insanın enerji ihtiyacını karşılamak için iletim ortamına ihtiyaç duymadan kolaylıkla elde edilebilmektedir(Xu et al., 2020). Fosil yakıtların yaygın kullanımının yerini alacak yenilikçi, verimli ve düşük maliyetli güneş pillerinin geliştirilmesine acil ihtiyaç vardır. Güneş ışınımını kullanılabilir elektriğe dönüştürerek güneş enerjisini toplayan bu cihazlar, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerjinin gelecekteki gelişimi için hayati önem taşıyor. Güneş enerjisi, insanların ihtiyaç duyduğu tüm enerjiyi sağlayabilen tek sürdürülebilir enerji kaynağıdır. Aslında dünyanın bir yılda kullandığı enerjiden daha fazlası bir saat içinde dünyaya çarpmaktadır(Ferrag et al., 2021).

Güneş pilleri tercih edilen temiz enerji cihazlarından biridir, özellikle DSSC'ler, nispeten yüksek PCE, kolay hazırlanma ve düşük maliyet avantajlarına sahip bir güneş pili sınıfıdır. Işık emiliminden sorumlu DSSC'lerin fotoanodu genellikle nano kristalli TiO_2 katmanından ve şeffaf iletken cam üzerinde modifiye edilmiş boyadan oluşur. DSSC'lerin elektroliti normalde boya moleküllerinin indirgenmesinden ve

yenilenmesinden sorumlu olan I^- / I^{3-} redoks çiftleridir. Karşı elektrot (CE), katalitik elektrolitlerde redoks çiftlerinin yenilenmesinden sorumludur. CE'nin katalitik performansı tüm hücrenin akışkanlığını ve verimliliğini büyük ölçüde etkileyebilir. Kabul edilen CE malzemesi değerli metal platindir; ancak platin pahalıdır ve büyük ölçekli endüstriyel üretim için uygun değildir. Bu nedenle yüksek performanslı, düşük maliyetli, kaynak açısından zengin CE malzemelerinin geliştirilmesi büyük ilgi gördü. Bazı çalışmalarda, DSSC'lerde CE olarak farklı oranlarda diğer metallerle (Mo, Co, Ni, Fe, vb.) platin bazlı alaşımlar kullanıldı. Ancak bu malzemeler hâlâ belli miktarda Pt içermektedir ve yüksek maliyet, pratik uygulamayı kısıtlayan önemli bir faktördür. Katalitik aktivite ve arayüzey yük transfer özelliklerine sahip, farklı morfolojilere ve yüksek spesifik yüzey alanlarına sahip, değerli olmayan metal bileşiği bazlı CE malzemelerinin geliştirilmesi önemlidir(Xu et al., 2020).

Polimer bazlı güneş pilleri, basit sentezleri ve düşük maliyetleri nedeniyle enerji dönüşümü ve depolaması için umut verici yeşil adaylardır. İletken polimerler; yüksek iletkenlik, yüksek stabilite, düşük maliyetli sentez ve kimyasal özelliklerin kolay manipülasyonu gibi mükemmel avantajlar nedeniyle güneş pillerinin imalatında redoks aktif katman malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Güneş pillerinde uygulanan iletken polimerlerden biri polianilin (PANI) polimerleri, düşük maliyetle çeşitli renkler ve asit/baz katkılama hassasiyeti ile çoklu oksidasyon durumları sağlar. Ayrıca benzersiz iletim mekanizmaları ve stabiliteleri nedeniyle karşı elektrot, aktif katmanda donör ve anot tampon katmanı olarak kullanılmaktadır. Daha spesifik olarak Fe_3O_4 nanopartikülleri sıklıkla güneş pillerinin aktif redoks katmanındaki polimerleri katkılar için kullanılır. Fe_3O_4 nanopartiküllerinin organik polimer güneş pillerinin fotovoltaiik verimliliğini arttırmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu da manyetik, elektronik ve fotovoltaiik cihazlar gibi pek çok uygulamalarda olağanüstü elektriksel ve manyetik özelliklere sahip Fe_3O_4 , kaplanıldığında yüksek stabiliteye eriştiğini göstermektedir(Ferrag et al., 2021).

Demir oksitler, üstün optoelektronik özellikler ve ince dağılım açısından dikkat çekicidir. Manyetit (Fe_3O_4) nanopartikülleri (NP), geniş yüzey alanı ve iyi dağılım nedeniyle çeşitli disiplinlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fe_3O_4 NP, diğer demir oksitlere göre eşit sayıda iki değerlikli ve üç değerlikli iyonun (Fe^{2+} , Fe^{3+}) varlığı nedeniyle güneş pillerinde üstün optoelektronik özellikler ve gelişmiş optik absorpsiyon sergilemektedir (Qureshi et al., 2021).

1.7.1. DSSC

Mevcut çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi, enerjinin düşük maliyetli olması nedeniyle uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Güneşten sadece 1 saatte alınan enerji, insanın bir yıl boyunca tükettiği enerjiden çok daha fazladır. Güneş pilleri güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmaktadır. 1954 yılında ABD'deki Bell Laboratuvarlarında güneş pilinin keşfi, araştırma ve bilim camiasında bir dönüm noktası oldu. Güneş pillerinin gelişimi üç nesil içerir: birinci, ikinci ve üçüncü nesil güneş pilleri. Birinci nesil güneş pilleri, popüler olan ve köklü bir teknoloji olan monokristalin ve polikristalin silikon hücrelere dayanıyordu ancak ikinci nesil güneş pillerinin aksine, bunların yaygın küresel uygulamalarını engelleyen karmaşık işlemler nedeniyle üretim maliyetleri çok yüksekti. Organik/inorganik perovskit güneş pilleri, inorganik güneş pilleri, organik tandem güneş pilleri gibi yeni ortaya çıkan üçüncü nesil güneş pilleri, kuantum nokta güneş pilleri ve boyaya duyarlı güneş pilleri (DSSC'ler) ticarileştirilmek üzere halen üretim aşamasındadır. Üçüncü nesil güneş pilleri arasında DSSC, düşük üretim maliyeti, uzun ömür, düşük ışık performansı, çeşitlilik ve mekanik sağlamlık gibi avantajlarından dolayı günümüzde büyük ilgi görmektedir. 1991 yılında Oregan ve Grätzel %7,1 fotoelektrik dönüşüm oranına sahip ilk DSSC'yi geliştirdiler. Bu temel yapı ve düşük maliyetli teknolojiler, DSSC'nin performansını artırmaya yönelik araştırmalara olan ilgiyi daha da artırdı. DSSC'nin temel bileşenleri bir duyarlılaştırıcı, çalışma elektrotu (fotoanod), bir karşı elektrot (CE) ve bir elektrolit içerir. Fotoanodun geliştirilmesinde yarı iletken nanoyapılar kullanılmaktadır. Fotoanot için nano yapraklar, nano koniler, nano çubuklar, nano teller, nano tüpler veya bunların karışımları gibi farklı nano yapılar kullanılmıştır. Küçük dirençli ve görünür ışık geçirgenliği (400–700 nm) >%80 olan indiyum kalay oksit (ITO) veya flor katkılı kalay oksit (FTO) kaplı levhalar, elektron enjeksiyonuna ve iletimine izin veren şeffaf iletken oksit (TCO) cam alt tabaka olarak kullanılıyor. Bir fotoanot, boya duyarlılaştırıcıdaki fotojenlenmiş elektronları ayırıp toplama elektroduna doğru aktarmaktadır. Verimli fotoanot malzemeleri keşfetmek için TiO_2 , SnO_2 , ZnO_2 , In_2O_3 , CeO_3 ve NbO_3 vb. gibi çeşitli metal oksitler fotoanot olarak kullanılmıştır. DSSC'ler için ideal bir fotoanod, daha hızlı elektronik taşıma, yüksek spesifik yüzey alanı ve daha az arayüzey elektron rekombinasyonu gereksinimlerini karşılamalıdır. Platin (Pt) kaplı TCO, CE için en verimli kombinasyon olduğundan yaygın olarak CE olarak kullanılır. Pt'nin maliyeti çok yüksek olduğundan, CE'de Pt'nin

yerini alacak uygun maliyetli alternatif bir malzeme keşfetmek son derece önemlidir. Grafen levhalar, amorf karbon ve karbon nanotüpler gibi karbon bazlı malzemeler, bu malzemelerin Pt içermeyen karşı elektrotlar olarak olumlu özelliklere sahip olması nedeniyle güçlü malzemelerdir. Tipik bir DSSC, bir redoks iyodür/triiyodür aracısına ve bir Pt CE'ye sahip bir sıvı elektrolitten oluşur. DSSC'nin bir birim olarak performansı, bileşenlerinin etkinliğine bağlıdır; bu nedenle bileşenlerin her birindeki ilerleme, DSSC'nin genel performansında iyileşmelere yol açar. DSSC'de güneş ışığı, yarı iletken (TiO_2) film üzerindeki boyaya çarpan şeffaf TCO üst teması yoluyla hücreye girer. Foton, absorbe edilecek kadar büyük bir enerjiyle boyaya ulaşır ve boya molekülü temel durumundan uyarılır. Uyarılan boya molekülleri oksitlenir ve TiO_2 'nin iletken bandına (CB) bir elektron enjekte edilir. Daha sonra elektronlar gözenekli TiO_2 ince filminden geçerek TCO'ya giderler ve burada harici devre aracılığıyla anottan katoda geçerek döngüyü tamamlar ve akımı üretirler. Oksitlenmiş boya, bir elektrolit içindeki iyodürden bir elektron alarak onu bir tri-iyodüre oksitleyerek yenilenir. Tri-iyodür daha sonra kayıp elektronu geri kazanmak için mekanik olarak hücrenin tabanına yayılır, burada Pt CE dış devreden geçtikten sonra elektronları yeniden yerleştirir (Devadiga et al., 2021).

İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

Bagavathi ve ark. (2016) Demir oksit-karbon siyahı ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CB}$) nanokompoziti, boyaya duyarlı güneş pilinde (DSSC) geleneksel Pt'ye uygun maliyetli bir alternatif karşı elektrot olarak önerdiler. Üç farklı ağırlık oranındaki (1:1, 1:2 ve 2:1) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CB}$ nanokompoziti basit bir çözelti karıştırma işlemi ile hazırladılar ve çeşitli teknikler ile karakterize ettiler. Üç $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CB}$ nanokompozit CE'nin performansı, I^-/I_3^- redoks çiftini içeren bir elektrolit ile temas halinde N719 boyayla duyarlılaştırılmış TiO_2 (P25) fotoanodundan oluşan geleneksel bir DSSC'de Fe_3O_4 , CB ve Pt'ye göre değerlendirdiler. Çeşitli karşı elektrotlarla bir araya getirilen DSSC'lerin fotoakım voltajı (J–V) özellikleri, 80 mW cm^{-2} ışık yoğunluğunda değer elde ettiler. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CB}$ nanokompozit (1:2) CE ile bir araya getirilen DSSC, püskürtmeli Pt'den (%4,1) daha üstün olan %6,1'lik yüksek güç dönüşüm verimliliği açısından iyi fotovoltaiik performansı gösterdiğini belirttiler. Basit hazırlama, mükemmel elektrokatalitik aktivite ve düşük maliyetli malzemenin, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CB}$ nanokompozitinin DSSC'lerde kullanım için CE'den Pt'ye umut verici bir alternatif olduğunu rapor ettiler(Bagavathi et al., 2016).

Harnchana ve ark. (2019), Fe_3O_4 nanopartikülleri uygun maliyetli indirgenmiş grafen oksit tabakaları ile modifiye edip ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-rGO}$), demir öncüsü olarak demir (III) nitrat, karbon kaynağı olarak glikoz, destekleyici malzeme olarak NaCl ve CH_4 kullanılarak kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği yoluyla üretilen çeşitli teknikler ile karakterize ettiler. Üretilen Fe_3O_4 nanopartiküllerinin standart bir Fe_3O_4 bileşiğinden daha yüksek bir ortalama oksidasyon durumuna sahip olduğunu buldular. Hiyerarşik $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-rGO}$ 'nun, boyaya duyarlı bir güneş pilinde (DSSC) triiyodürün iyodüre indirgenmesine yönelik mükemmel bir katalitik aktivite sergilediği ve %6,65'lik bir güneş pili verimliliği sağlayabildiği, Pt tabanlı DSSC'den (%6,37) daha üstün olduğunu rapor ettiler (Harnchana et al., 2019).

El-Shafai ve ark. (2020), Grafen oksit ($\text{GO@Fe}_3\text{O}_4$) nanokompozitine dayalı olarak sentezlenen ferro ferrik oksit QD'lerin elektrokimyasal özellikleri Döngüsel

Voltammetri, akım-gerilim (I-V) ve Fotolümens (PL) analizi ile incelediler. Nanokompoziti, çeşitli teknikler ile karakterize ettiler. Elektron-delik çifti rekombinasyonu, GO@Fe₃O₄'ün N719 boyasına kıyasla Rose Bengal boyasının ile düşük elektron transferine sahip olduğu fotolüminesans (PL) analizi ve I-V tekniği ile kanıtladılar. GO'nun Fe₃O₄'e yüklenmesi, hafif toplama kapasitesini arttırdığını ve yük taşıyıcı rekombinasyonunu azalttığını, böylelikle GO/Fe₃O₄ nanokompozitinin güneş pili üretiminde umut verici olabileceğini ifade ettiler (El-Shafai et al., 2020).

Kutluay ve ark. (2021) mangan (Mn) katkılı amin grupları (Fe₃O₄@SiO₂@IPA) ile fonksiyonelleştirilmiş Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nanomalzeme üretilip, karakterize edip, güneş pili uygulamasında kullandılar. Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn, birlikte çökeltme ve sol-jel teknikleri yoluyla üretiler. Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn manyetik nanomalzemeleri çeşitli teknikler ile karakterize ettiler. Spinel yapılı Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn'nin enerji bant aralığı yaklaşık 2,48 eV olarak belirlendi. Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn'nin IUPAC'a göre tip IV-H3 histerezis döngüsü gösterdiğini ifade ettiler. BET verilerinden Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn'nin spesifik yüzey alanlarının sırasıyla 60,85, 28,99 ve 40,41 m²/g olduğunu belirlediler. Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn gözenek boyutu dağılımları BJH yöntemiyle sırasıyla 8,55, 1,53 ve 1,70 nm olarak hesapladılar. Ayrıca Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn'nin baskın gözenek genişliklerinin DFT yöntemiyle sırasıyla ~5.58, ~0.88 ve ~17.92 nm olarak ölçtüler. Au/CuO/Fe₃O₄@SiO₂@IPA-Mn/ZnO/SnO₂: F güneş pili cihazı, tampon katman olarak mevcut Fe₃O₄@SiO₂@IPA -Mn kullanılarak oluşturdular. Fe₃O₄@SiO₂@IPA-Mn tabanlı güneş pili cihazının güç dönüşüm verimi (%) 2,054 olarak rapor ettiler. Bu bulguyla, Fe₃O₄@SiO₂@IPA-Mn'nin güneş pili teknolojisinde umut verici bir duyarlılaştırıcı olarak kullanılabileceğini gösterdiler. Ayrıca bu çalışmada, geçiş metallerinden ucuz ve kolay bulunabilen manganın manyetik nanomalzemelerle modifikasyonunun güneş pili teknolojisinin kullanımındaki etkinliği ilk kez ortaya koydular(Kutluay et al., 2021).

Qureshi ve ark. (2021), fotoanodunu SnO₂-TiO₂ nanokompoziti ve karşı elektrotu (CE) düşük maliyetli bir platin (Pt) içermeyen hibrit Fe₃O₄@rGO ile özelleştirerek, boyaya duyarlı bir güneş pilinin (DSSC) fotovoltaiik parametreleri üzerindeki modifikasyonun etkisini analizini gerçekleştirdiler. SnO₂-TiO₂ ve hibrit Fe₃O₄@rGO nanokompozitlerinin hazırlanmasını, bir solvotermal sentez tekniğiyle

gerçekleştirdiler. Sentezlenen nanokompozitleri, çeşitli teknikler ile karakterize ettiler. $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2$ nanokompozit bazlı fotoanod, DSSC'de sırasıyla geleneksel Pt ile %3,28 ve hibrit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{rGO}$ CE ile %1,96 oranında uygun güç dönüşüm verimliliği (PCE) sergilediğini buldular. DSSC, hibrit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{rGO}$ CE ile platinin %60 PCE'sine yaklaştığını ifade ettiler. Bu verimliliği, geniş bant aralıklı $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2$ nanokompozitinin oluşumu ve rGO nano tabakalarına sabitlenmiş Fe_3O_4 nanopartiküllerinin düzgün dağılımı nedeniyle gelişmiş yük aktarımı ve gelişmiş boya yüklemesiyle izah ettiler. Çalışma ile $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2$ fotoanod ve hibrit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{rGO}$ CE'nin sinerjik kombinasyonunun, DSSC'deki Pt ile karşılaştırıldığında oldukça verimlilik sergilediğini ve dolayısıyla geleneksel Pt'ne alternatif etkili bir ikamemalzeme olduğunu rapor ettiler (Qureshi et al., 2021).

Ece ve ark. (2021) nikel (Ni) ile kaplanmış L-Arginin ile immobilize edilmiş $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanopartikülleri sentezleyip çeşitli tekniklerle karakterize edip, güneş pili verimliliğindeki yetenekleri değerlendirdiler. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin}$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin-Ni}$ MNP'ler birlikte çöktürme ve sol-jel yöntemleriyle hazırladılar. Hazırlanan Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin}$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin-Ni}$ MNP'lerin spesifik yüzey alanının sırasıyla 60,85, 28,99 ve 29,84 m^2/g olduğu buldular. Barrett-Joyner-Halenda (BJH) yöntemiyle belirlenen gözenek boyutu dağılımından Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin}$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin-Ni}$ MNP'lerin gözenek yarıçaplarının mezogözenek ve ortalama gözenek yarıçapı aralığında olduğu anlaşıldı. sırasıyla yaklaşık 11.03, 9.11 ve 28.45 nm'ye eşitti. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin}$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin-Ni}$ MNP'lerinden hazırlanan yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) yöntemiyle hesaplanan yarı gözenek genişliklerinin sırasıyla 5,58, ~ 0,88 ve ~ 17,98 nm olduğunu ölçtüler. Spinel yapılı MNP'lerin enerji bant aralığı yaklaşık 3,10 eV olarak belirlendi. $\text{Au/CuO/Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginine-Ni/ZnO/SnO}_2\text{:F}$ güneş pili cihazı, mevcut $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin-Ni}$ MNP'lerin tampon katmanı olarak kullanılmasıyla oluşturdular. Hazırlanan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginin-Ni}$ MNP tabanlı güneş pili cihazının güç dönüşüm verimliliği (%) %1,84 olarak hesaplanmıştır. Bu sayısal sonuç ile, hazırladıkları $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{L-Arginine-Ni}$ MNP'lerin güneş pili yapısında umut verici bir tampon katman olarak kullanılabileceğini gösterdiler(Ece et al., 2021).

Sadegh ve ark. (2021), $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PANI}$ 'nin süperparamanyetik nanokompoziti, katı hal (solvent içermeyen) yerinde polimerizasyon yöntemi kullanılarak sentezleyip

karakterize edip polimer güneş pillerinde uygulama için tasarladılar. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PANI}$ 'yı çeşitli teknikler ile karakterize ettiler. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PANI}$ 'nin manyetik özellikleri, 44.09 emu/g doyma mıknatıslanmasıyla süperparamanyetik özellik sergilediğini, voltametri ölçümlerinde hem HOMO (-5,26eV) hem de LUMO (-3,65eV) seviyelerinin konumunu belirlendiğini, kimyasal bant aralığı 1,61eV aralığında olduğunu buldular. Güneş pilli uygulamasında maksimum güç dönüşüm verimliliğini %1,53, açık devre voltajı (V_{oc}) 0,46V ve kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) 4,24mA/cm² olduğunu buldular.Yaptıkları çalışma ile, güneş pillerinin ticareti için umut verici yeni bir yaklaşım sunduklarını ifade ettiler (Sadegh et al., 2021).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

3.1. Çözeltiler ve Kimyasallar

Reaksiyonlarda kullanılan bütün çözeltiler ve kimyasallar analitik saflıktadır. 3,4-diaminobenzofenon ($C_6H_5COC_6H_3(NH_2)_2$) Fluka şirketinden, amonyak (NH_3 , %28.0) VWR şirketinden, etanol (CH_3CH_2OH , %99.9) İSOLAB şirketinden, demir(II) klorür tetrahidrat ($FeCl_2 \cdot 4H_2O$, %98) ve tetraetil orthosilikat (TEOS, $Si(OC_2H_5)_4$) Alfa Aesar Kimya Şirketinden, Demir(III) klorür heksahidrat ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$, %99.9) MERCK şirketinden temin edildi.

3.2. Manyetik Nano Katalizörlerin Sentezi

İleri derecede yükseltgenmenin önlenmesi için Fe_3O_4 , $Fe_3O_4@SiO_2$ ve $Fe_3O_4@SiO_2@diaminobenzofenon$ manyetik nano katalizörlerin sentezleri inert ortamda (argon gazı) yapıldı. manyetik nano katalizörler, sentez öncesinde sonikasyona maruz bırakıldı. Reaksiyonlar üç boyunlu balonlarda gerçekleştirildi. Sentez esnasında ısıtıcı-karıştırıcı, 1000 rpm'de (revolutions per minute) çalıştırıldı. Manyetik nano katalizörlerin ortamdaki izolasyonları, manyetik ayırma yöntemiyle (güçlü bir mıknatıs yardımıyla) gerçekleştirildi. Manyetik nano katalizörlerin yıkanmaları, sırasıyla su (3 kez) ile daha sonra etil alkol (3 kez) ile yapıldı. Manyetik nano katalizörlerin kurutulma işlemi etüvde 8 saat boyunca 70 °C'de gerçekleştirildi. Manyetik nano katalizörlerin muhafaza edilmesi kapalı kaplarda serin ortamda yapıldı.

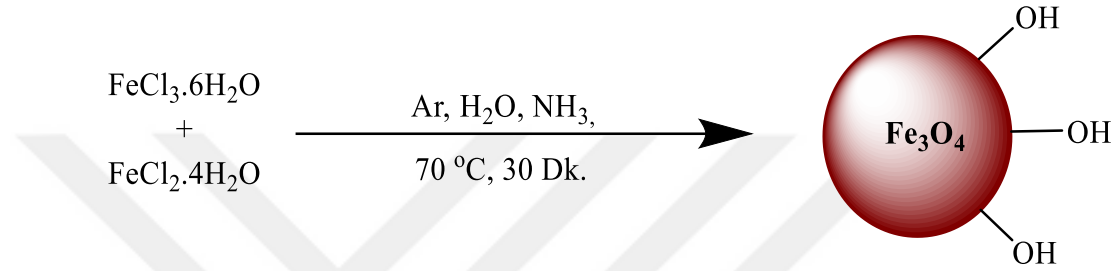
3.2.1. Fe_3O_4 Manyetik Nano Katalizörlerin Sentezi

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin sentezi birlikte çökelme yöntemiyle gerçekleştirildi. Fe^{2+}/Fe^{3+} stokiometrik orana (Denklem (1)) $\frac{1}{2}$ olacak şekilde 2 mmol $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ve 4 mmol $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, balonda bulunan 40 ml saf su içerisinde oda sıcaklığında 30 dakika boyunca karıştırıldı. Reaksiyon sisteminin sıcaklığı 70 °C'ye çıkartıldı. Çözelti üzerine 10 mL 8 M NH_3 (birlikte çökelmenin gerçekleşebilmesi için)

eklendi. Başlangıçta turuncu renkte olan çözelti NH_3 eklenmesiyle, siyah renge dönüştü. Oluşan siyah çökeleğin (Fe_3O_4 (manyetit)) 30 dakika daha karıştırılmasına devam edildi. Reaksiyon sistemi soğutulduktan sonra Fe_3O_4 manyetik nano katalizörler ortamdan izole edildi. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin yıkama işlemleri gerçekleştirilip kurutma işlemi yapıldı (Kutluay et al., 2021). Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



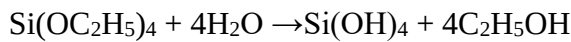
(1)



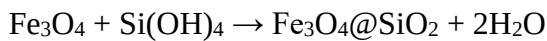
Şekil 3. 1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi

3.2.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin sentezi

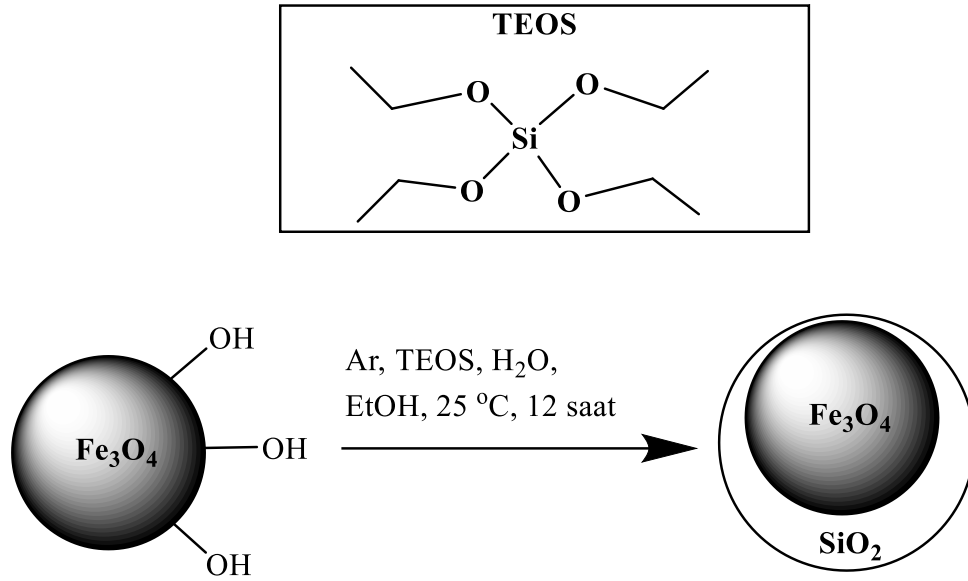
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörler, sol-gel yöntemiyle sentezlendi (Denklem (2) ve Denklem (3)). 1 g Fe_3O_4 manyetik nano katalizörler, balonda bulunan 25 mL su ve 50 mL etil alkol içerisinde karıştırıldı. Daha sonra 15 mL NH_3 ve 4 mmol TEOS ilave edildi. Çözelti oda koşullarında 12 saat boyunca karıştırıldı. Reaksiyon sistemi kapatıldıktan sonra elde edilen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin, ortamdan izole edildi. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin yıkama işlemleri gerçekleştirilip kurutma işlemi yapıldı (Ece, 2023; Umaz, 2024b). $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



(2)



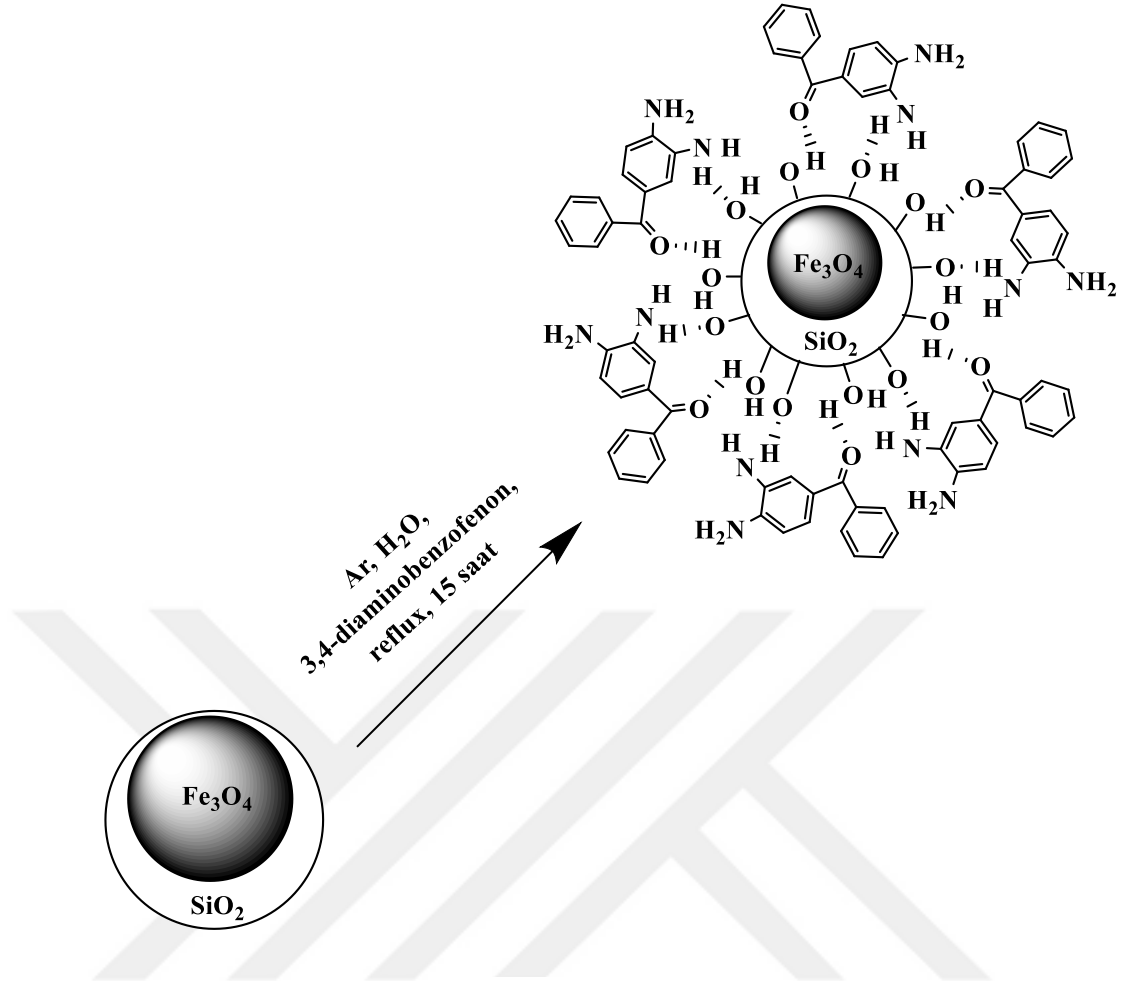
(3)



Şekil 3. 2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi

3.2.3. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{DABF}$ manyetik nano katalizörlerin sentezi

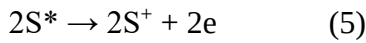
1g $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörler, balonda bulunan 50 mL su içerisinde karıştırıldı. Daha sonra 2 g 3,4-Diaminobenzofenon ilave edildi. Çözelti 15 saat boyunca reflux edildi. Reaksiyon sistemi kapatıldıktan sonra elde edilen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{DABF}$ manyetik nano katalizörler, ortamdan izole edildi. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{DABF}$ manyetik nano katalizörlerin yıkama işlemleri gerçekleştirilip kurutma işlemi yapıldı (Güngör & Ece, 2023). $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{DABF}$ manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 3. Fe₃O₄@SiO₂@DABF manyetik nano katalizörlerin sentezinin şematik gösterimi

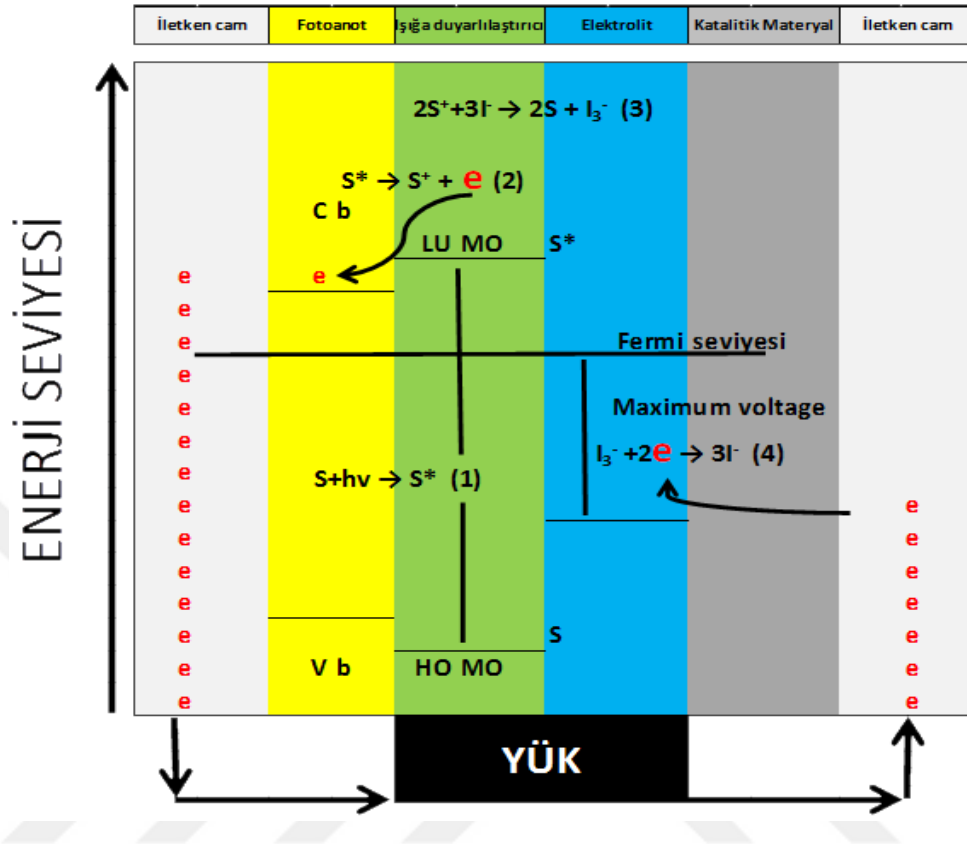
3.3. Katalitik Mekanizma ve Güneş Pili Performans Analizi

DSSC için basit bir mekanizma Şekil 4'te gösterilmektedir. (Vb: Valans bandı; CB: İletim bandı; hv: Foton, S: Boya; S*: Uyarılmış boya, HOMO: En yüksek işgal edilen moleküler yörünge; LUMO: En düşük boş moleküler yörünge).



Denklem (4), (5), (6), (7)'da verilen sıralı ve döngüsel mekanizmada, güneşten enerji alan elektronlar uyarılır. Uyarılmış elektronlar fotoanottan harici elektrik devresine akar. Devre CE'de tamamlanır. Elektrolit tabakasında elektron iyot/triiodür (I⁻/I₃⁻)

reaksiyonunu gerçekleştirir. Son olarak elektrolit, boyaya elektron vererek boyayı yeniden üretir (Mansa et al., 2013).



Şekil 3. 4. DSSC için basit bir mekanizma (Mansa et al., 2013)

Boya duyarlı güneş hücrelerinin aktif katmanını için kullanılacak boya, 0,5 mM'lik N719 çözeltisi olarak hazırlandı. Fe_3O_4 , $Fe_3O_4@SiO_2$ ve $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin fotovoltaiik özellikleri boya duyarlı güneş hücresi (Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)) tekniğiyle, gerilim (V) verilerine göre elde edilen akım yoğunluğu (J) kullanılarak hesaplandı. Fe_3O_4 , $Fe_3O_4@SiO_2$ ve $Fe_3O_4@SiO_2@3,4-DABF$ manyetik nano katalizörlerin, FTO (Flor katkılı Kalay Oksit) iletken cam altlıklar üzerine kaplanmış TiO_2 üzerinde büyütülerek DSSC duyarlılaştırıcı olarak kullanıldı. Akım yoğunluğu (J) – voltaj (V) J–V ölçümü için, fotoelektrot olarak flor katkılı kalayoksit (FTO, $13X\text{ sq}^2$) iletken cam substratlar kullanıldı. TiO_2 , FTO substratları üzerine kaplandı, ardından $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 45 dakika boyunca sinterlendi. Güç dönüşüm verimlilikleri η , aşağıdaki Denklem (8) ve Denklem (9) kullanılarak hesaplandı.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (8)$$

$$FF = \frac{P_m}{J_{sc} V_{oc}} = \frac{J_{mp} V_{mp}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (9)$$

Denklem (8) de ve Denklem (9) de P_m : maksimum çıkış gücü yoğunluğu, P_{in} : gelen ışığın güç yoğunluğu, J_{sc} : kısa devre akım yoğunluğu, V_{oc} : açık devre voltajı, FF : doldurma faktörü, J_{mp} : maksimum güç noktasına karşılık gelen akım ve V_{mp} : maksimum güç noktasına karşılık gelen voltaj'ı ifade etmektedir (Güngördü Solğun et al., 2018).



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

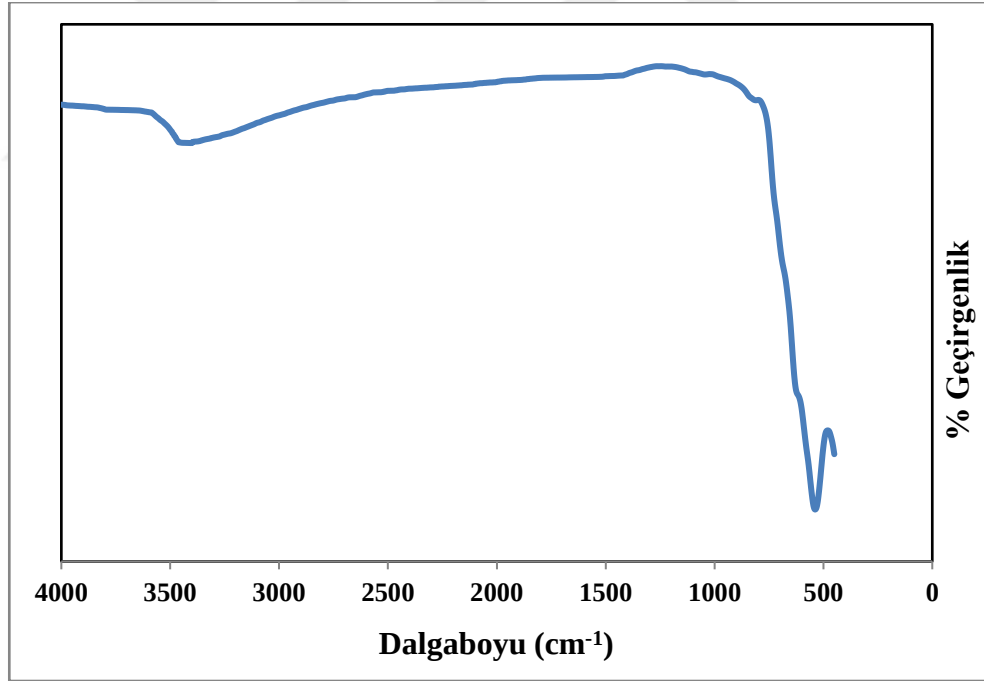
BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 FTIR Analizi

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin yapısındaki bağların durumunu karakterize etmek için FTIR analizi kullanıldı.

4.1.1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin FTIR analizi

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



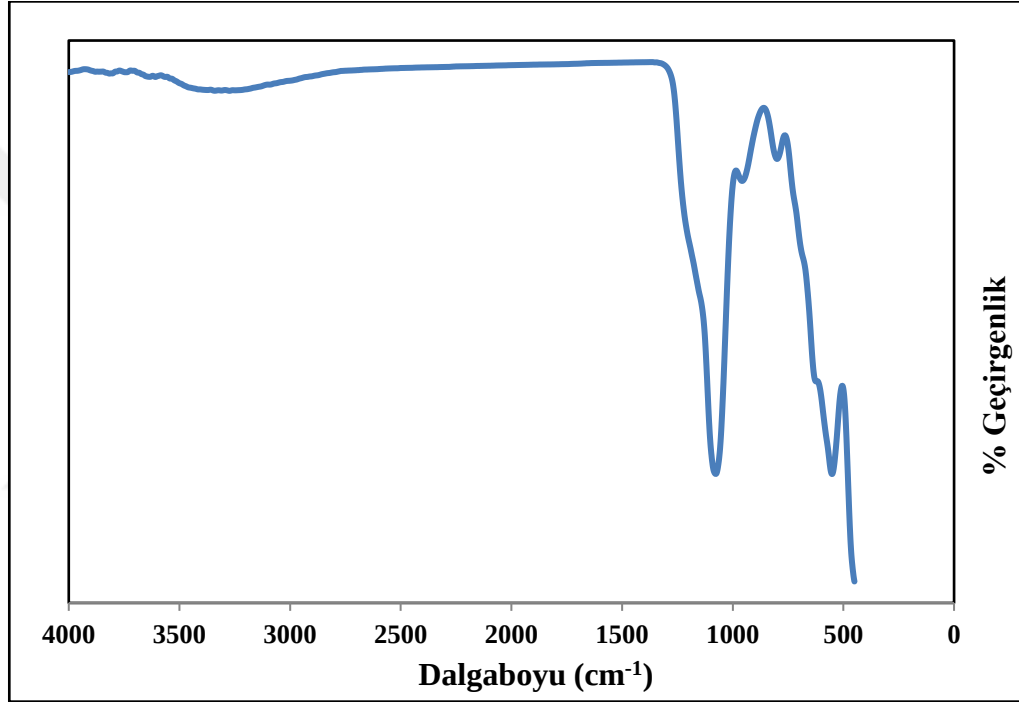
Şekil 4. 1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu 550 cm⁻¹'de görülen pik, Fe-O'nun (metal-oksijen) gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu pik

karakteristik pik olup Fe_3O_4 sentezini doğrulamaktadır. 3500 cm^{-1} 'de görülen geniş pik, O-H titreşim pikidir. Elde edilen pikler literatürle (Qin et al., 2023) uyumludur.

4.1.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin FTIR analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

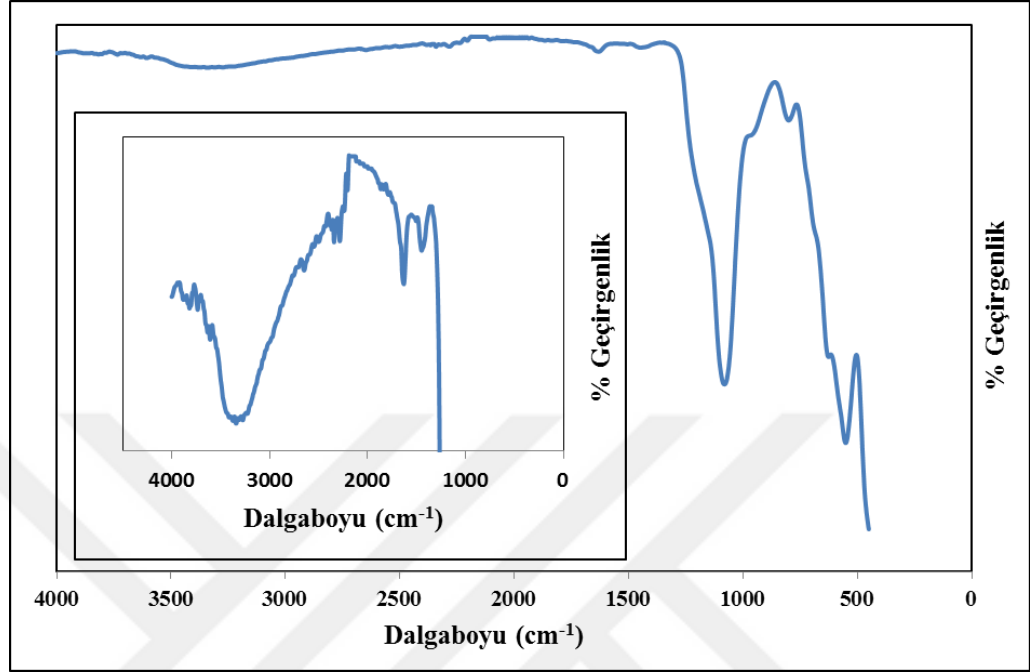


Şekil 4. 2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumunda 558 cm^{-1} 'de pik Fe-O bağına ait karakteristik piktir. 1088 cm^{-1} 'de ve 994 cm^{-1} 'de görülen pikler sırasıyla Si-O-Si simetrik gerilme titreşimine ve Si-O gerilme titreşimlerine, 808 cm^{-1} 'de görülen pik de asimetric gerilme titreşimlerine aittir. Bu karakteristik pikler olup $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin sentezini doğrulamaktadır. 3400 cm^{-1} 'de görülen geniş pik, O-H titreşim pikidir. Elde edilen pikler literatürle (Khalid et al., 2023) uyumludur.

4.1.3. Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin FTIR analizi

Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 3. Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin FTIR spektrumu

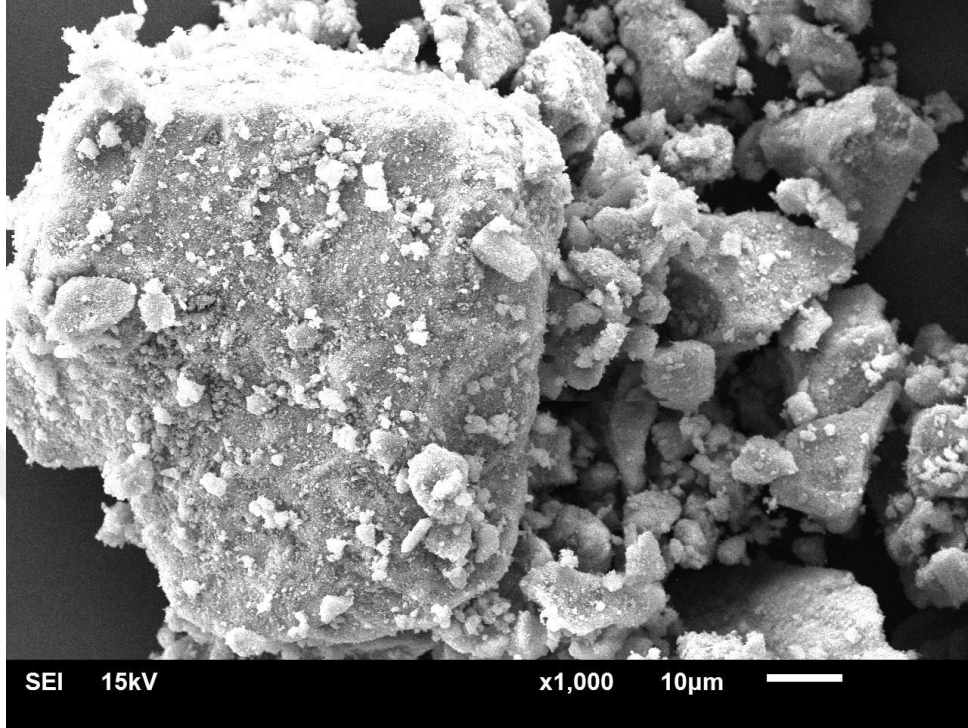
Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörleriN FTIR spektrumunda görülen 560 cm⁻¹'de pik Fe-O bağına ait karakteristiktir. 820 cm⁻¹'de, 992 cm⁻¹'de ve 1094 cm⁻¹'de görülen pikler sırasıyla Si-O-Si simetrik gerilmesi, Si-OH ve Si-O-Fe asimetrik gerilme titreşimlerine aittir. 1450 cm⁻¹'de görülen pik, C-H bükülme titreşimine aittir. 1670 cm⁻¹'de görülen pik, N-H bükülme titreşimine aittir. N-H ve O-H gerilme titreşimleri üst üste binerek 3350 cm⁻¹'de civarında geniş yoğun pik sergilemişlerdir. Bu pikler Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin sentezini doğrulamaktadır. Elde edilen pikler literatürle (Sarker et al., 2023) uyumludur.

4.2. SEM Analizi

Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin şekilleri, boyutları, yüzey morfolojilerini karakterize etmek için sentezlenen manyetik nanoadsorbentlerin SEM analizleri yapılmıştır.

4.2.1. Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin SEM analizi

Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları şekil 4.4’de gösterilmiştir.

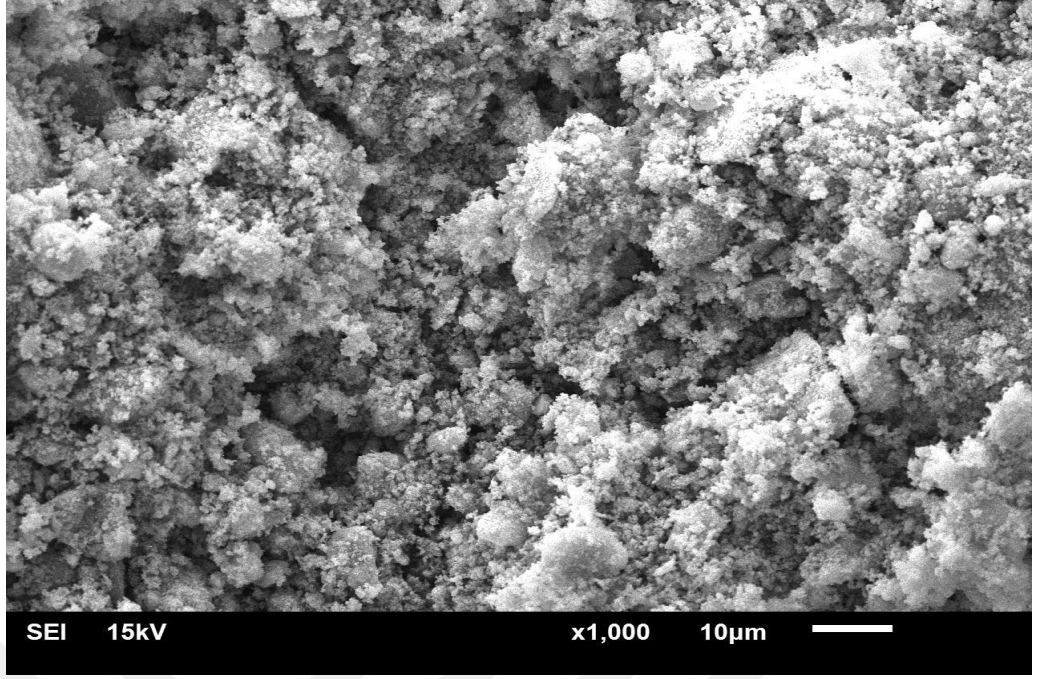


Şekil 4. 4. Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları

Şekil 4.4.’de gösterilen Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrograflarında parçacık yüzeyinin küresel ve pürüzlü olduğu, ortalama çapının 100 nm’den az olduğu anlaşılmıştır. Aglomerasyon görülmektedir, aglomerasyonun nedeni parçacıklar arasında gerçekleşen manyetik dipol moment etkileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Thangaraj et al., 2016) uyumludur.

4.2.2. Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörlerin SEM analizi

Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

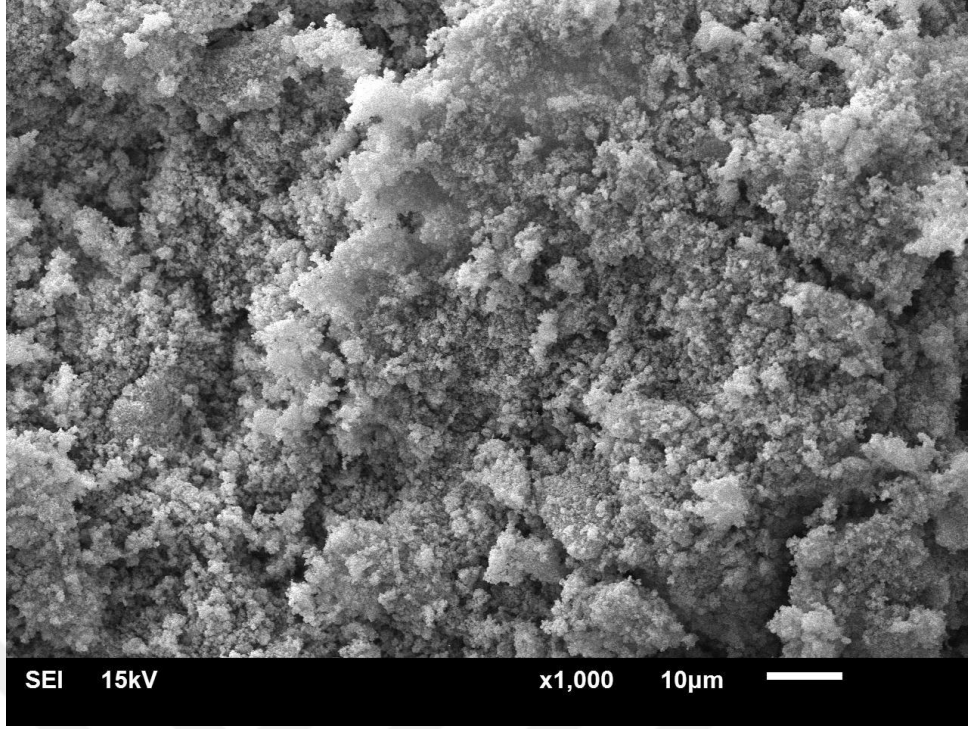


Şekil 4. 5. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları

Şekil 4.5.'de gösterilen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrograflarında yüzeyin küresel olduğu anlaşılmaktadır. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin yüzeyindeki girintiler ve çıkıntılar, Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin yüzeyindeki girintilere ve çıkıntılara nazaran artmıştır. Yüzeydeki bu değişim, silika ile kaplamanın başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Noma et al., 2020) uyumludur.

4.2.3. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin SEM analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları şekil 4.6'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 6. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrografları

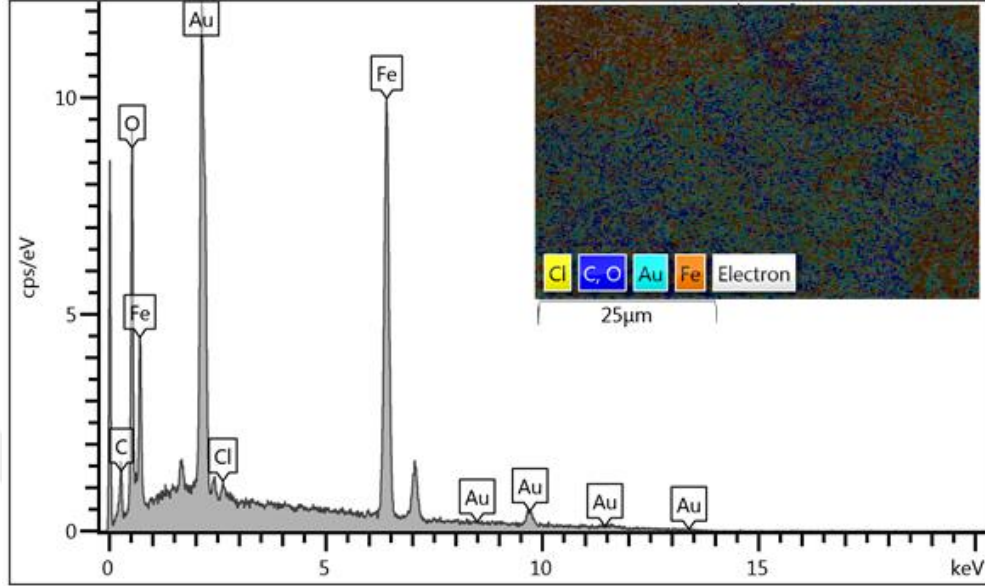
Şekil 4.6.'de gösterilen $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin SEM mikrograflarında yüzeyin küresel olduğu anlaşılmaktadır. Parçacıkların iyi dağılıma sahip olduğu görülmektedir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin yüzeyindeki girintiler ve çıkıntılar, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin yüzeyindeki girintilere ve çıkıntılara nazaran artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünde artış gözlenmektedir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin yüzeyinde gerçekleşen bu değişim, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin 3,4-DABF ile kaplanmasının başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Maryam & Ali, 2023) uyumludur.

4.3. SEM-EDS Analizi

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin temel elementel bileşimlerini belirlemek için Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Dağılımlı Spektroskopi ile karakterizasyonu gerçekleştirildi.

4.3.1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin SEM-EDS analizi

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı) Şekil 4.7'te gösterilmiştir.

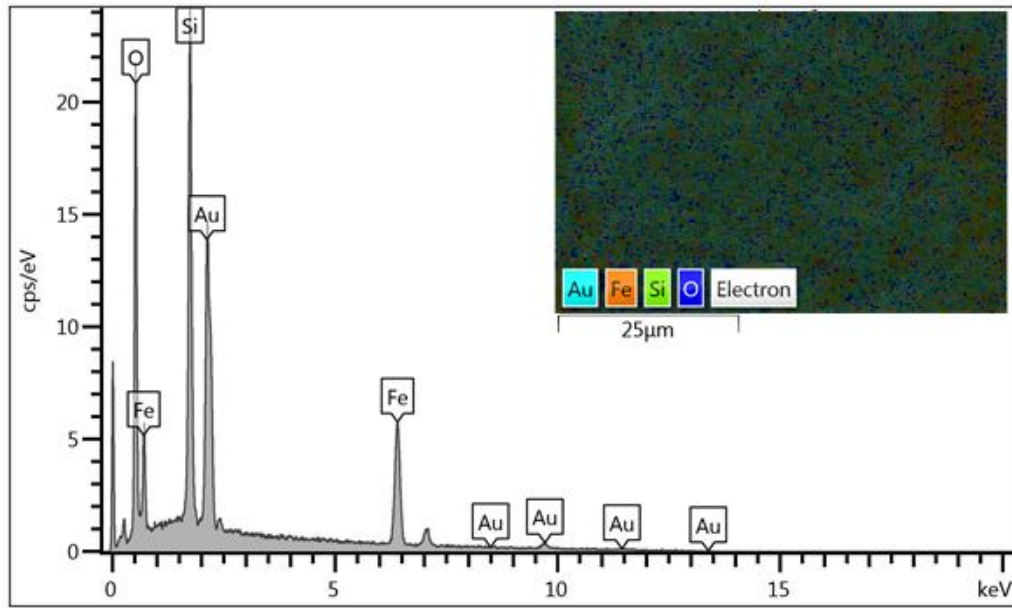


Şekil 4. 7. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı)

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin Şekil 4.7’de verilen temel element bileşenlerine ait haritalı fraksiyonunda, Fe ve O elementlerinin kendi yapısı içinde düzgün bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Manyetik nano katalizörlerin bu dağılımında homojenliğin iyi olduğu anlaşılmaktadır. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin yapısında Fe ve O elementlerinin bulunduğunu göstermektedir. Cl, Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin sentezinde kullanılıp izole olamamış demir tuzlarından kaynaklanmaktadır. C, Fe_3O_4 manyetik nano adsorbentlerin sentezi sırasında yıkamalarda kullanılan ve yapıdan izole olamamış çözücünden (etil alkol) kaynaklanmaktadır. Elementel haritalanma ve temel element bileşenlerinin fraksiyonu Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin başarıyla sentezlendiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Kurnaz Yetim & Hasanoğlu Özkan, 2021) uyumludur.

4.3.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin SEM-EDS analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı) Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

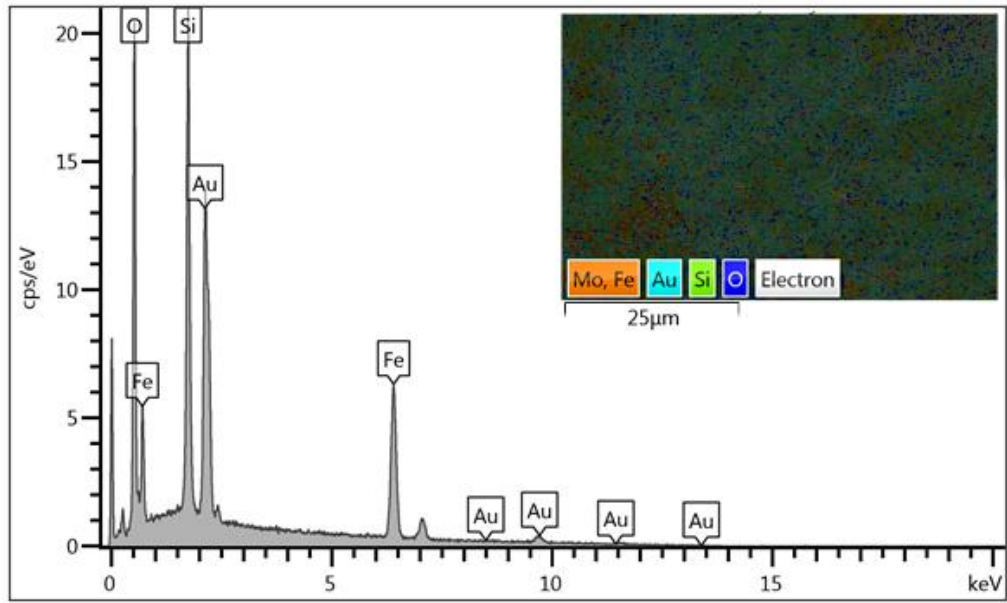


Şekil 4. 8. Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı)

Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörlerin Şekil 4.8’de verilen temel element bileşenlerine ait haritalı fraksiyonunda, Fe, O ve Si elementlerinin kendi yapısı içinde düzgün bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Manyetik nano katalizörlerin bu dağılımında homojenliğin iyi olduğu anlaşılmaktadır. Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerinin yapısında Fe, O ve Si elementlerinin bulunduğunu göstermektedir. Elementel haritalanma ve temel element bileşenlerinin fraksiyonu, Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin TEOS ile kaplandığını, Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörleri başarıyla sentezlendiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Kurnaz Yetim & Hasanoğlu Özkan, 2021) uyumludur.

4.3.3. Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin SEM-EDS analizi

Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı) Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 9. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerine ait fraksiyonu (haritalı)

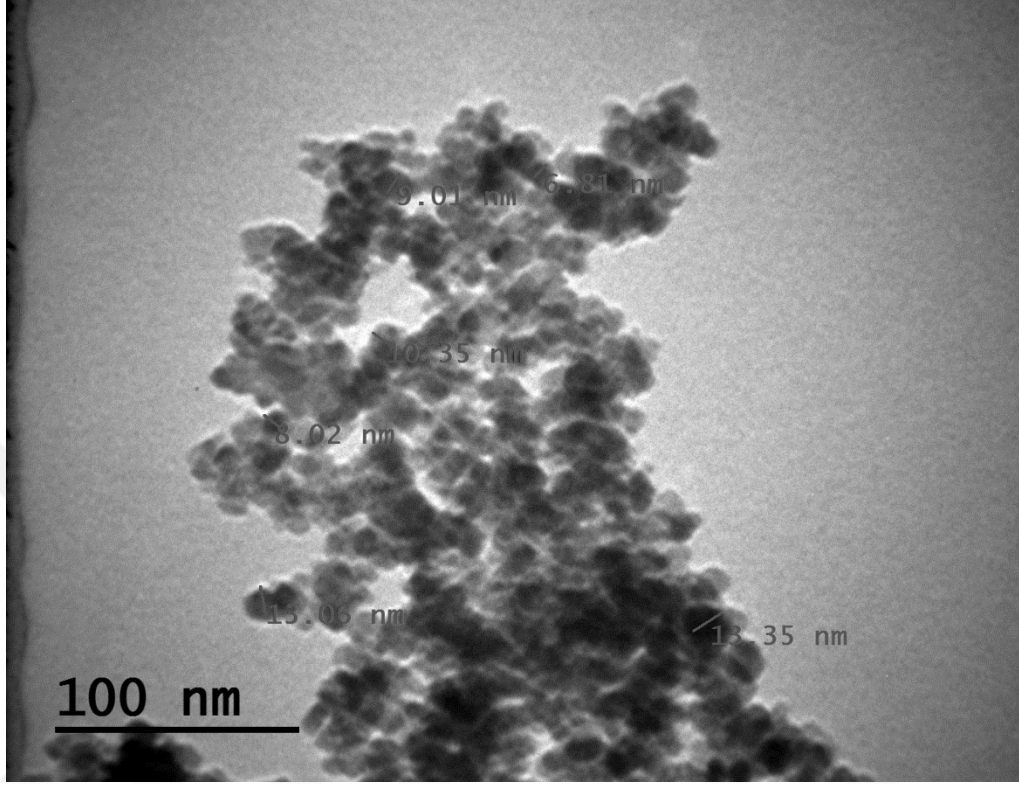
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin Şekil 4.9’da verilen temel element bileşenlerine ait haritalı fraksiyonunda, Fe, O, Si, N, ve C (Şekil 4.6’da verilen temel element bileşenlerinin fraksiyonunda $K\alpha=0.277$ piki C’a ve $K\alpha=0.392$ piki N’a aittir, cihaz tarafından yazılmamıştır, Mo ise aygıtsal kirliliktir.) elementlerinin kendi yapısı içinde düzgün bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Manyetik nano katalizörleri bu dağılımında homojenliğin iyi olduğu anlaşılmaktadır. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin temel element bileşenlerinin yapısında Fe, O, Si, N, ve C elementlerinin bulunduğunu göstermektedir. Elementel haritalanma ve temel element bileşenlerinin fraksiyonu, Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin 3,4-DABF ile kaplandığını, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin başarıyla sentezlendiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Kurnaz Yetim & Hasanoğlu Özkan, 2021) uyumludur.

4.4. TEM Analizi

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin nano ve kristal yapısının belirlemek için Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) ile karakterizasyonu gerçekleştirildi.

4.4.1. Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi

Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin nano ve kristal yapısı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

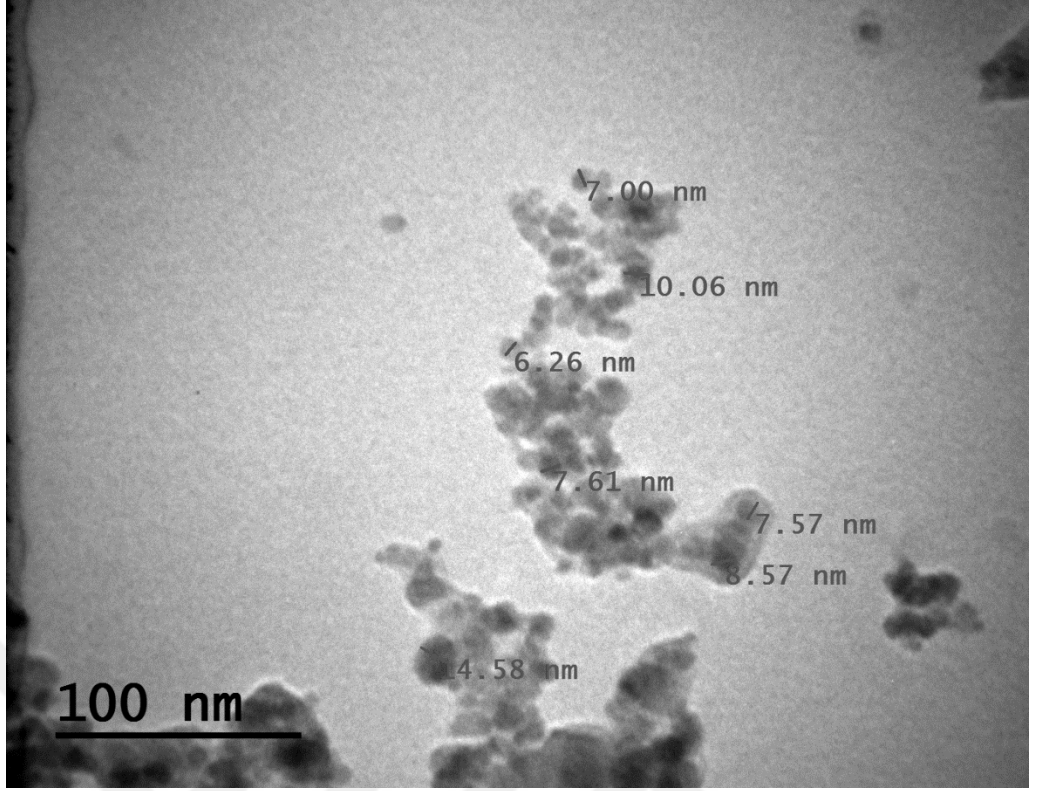


Şekil 4. 10. Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi

Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin TEM görüntüsünde, Fe₃O₄ manyetik nano katalizörlerin küresele yakın bir morfolojiye sahip oldukları anlaşılmaktadır. Nanoküreler ~10 nm çapa sahiptir. TEM görüntüsünde ayrıca aglomerasyon gözlemlenmektedir. Bu aglomerasyon manyetodipol etkileşimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Wu et al., 2023) uyumludur.

4.4.2. Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi

Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörlerin nano ve kristal yapısı Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

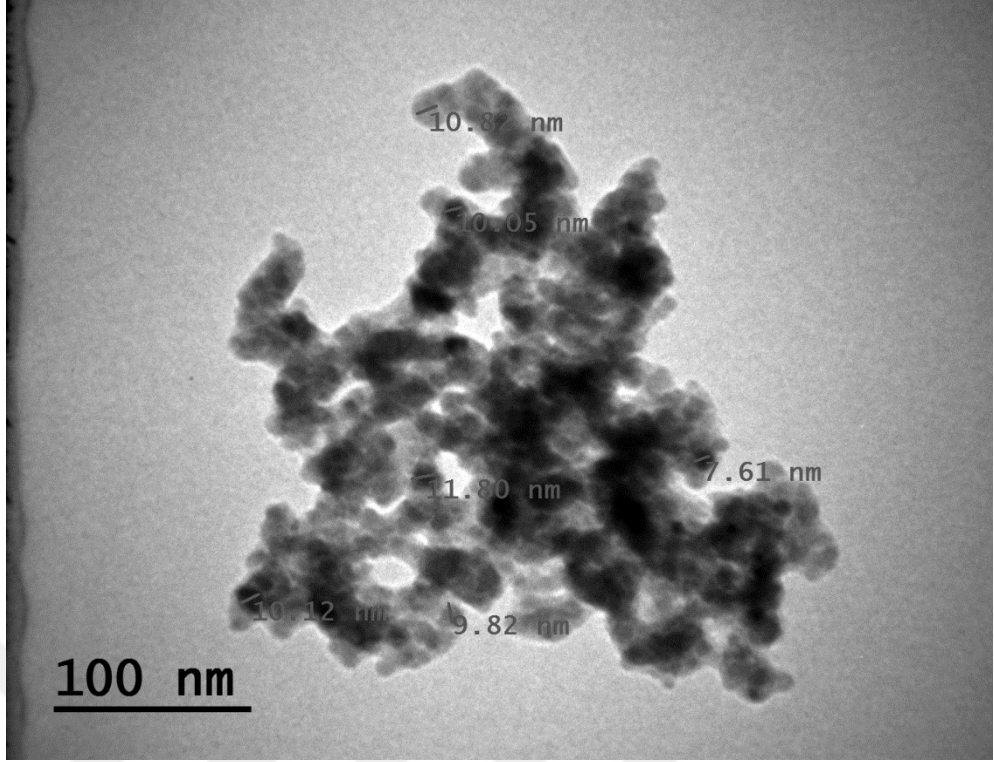


Şekil 4. 11. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörleri TEM görüntüsünde, nano kürelerin (küresele yakın bir morfoloji) düzgün bir dağılım sergilediği anlaşılmaktadır. Nanoküreler ~ 7 nm çapa sahiptir. Ayrıca Fe_3O_4 'te kıyasla aglomerasyonun azaldığı görülmektedir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 'nin çekirdek-kabuk yapısı, Fe_3O_4 çekirdeğinin karanlık alanı ve SiO_2 'nin parlak alanı ile doğrulanmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürle (Romdoni et al., 2023) uyumludur.

4.4.3. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin nano ve kristal yapısı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 12. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin TEM analizi

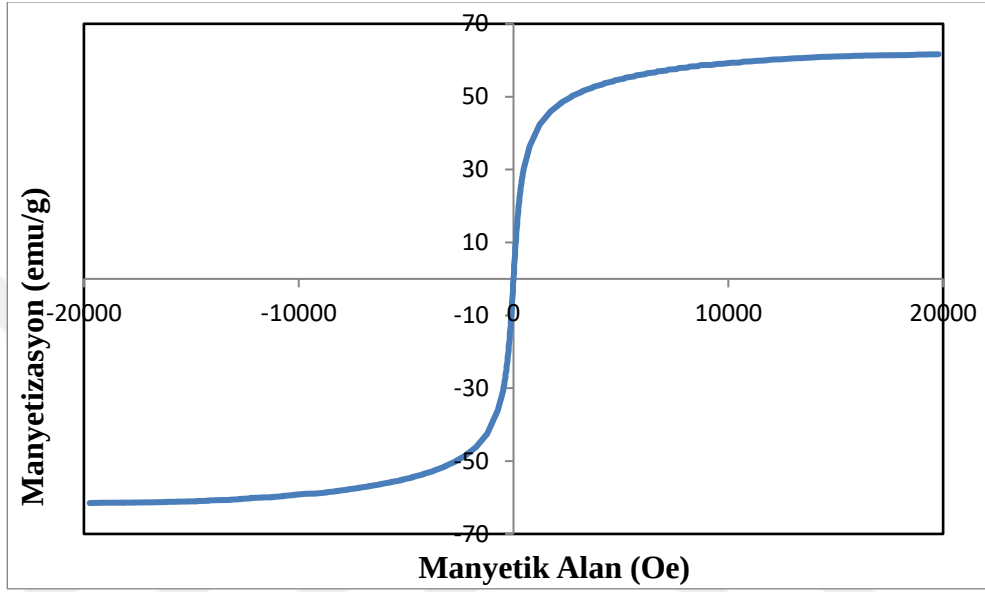
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin TEM görüntüsünde, nano kürelerin (küresele yakın bir morfoloji) düzgün bir dağılım sergilediği anlaşılmaktadır. Nanoküreler ~9 nm çapa sahiptir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ çekirdek-kabuk yapısı, Fe_3O_4 çekirdeğinin karanlık alanı ve $\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ 'in parlak alanı ile doğrulanmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürle (Fayyazi et al., 2023) uyumludur.

4.5. VSM Analizi

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliklerini belirlemek için VSM analizleri gerçekleştirildi.

4.5.1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin VSM analizi

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

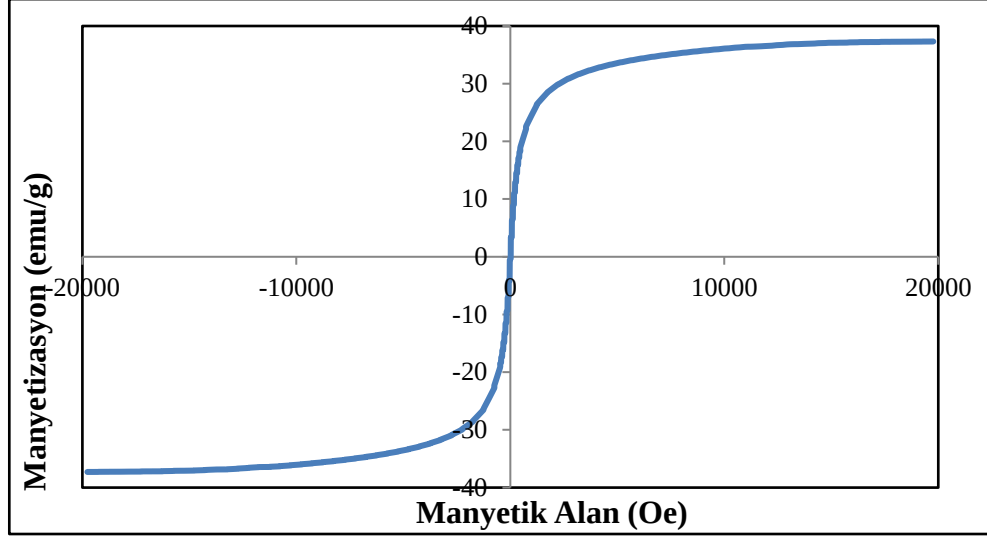


Şekil 4. 13. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin doyma manyetizasyon değeri 61,64 emu/g olarak ölçüldü. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin süperparamanyetik karakterde olduğu anlaşıldı. Elde edilen sonuçlar literatürle (Shabzendedar et al., 2020) uyumludur.

4.5.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin VSM analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

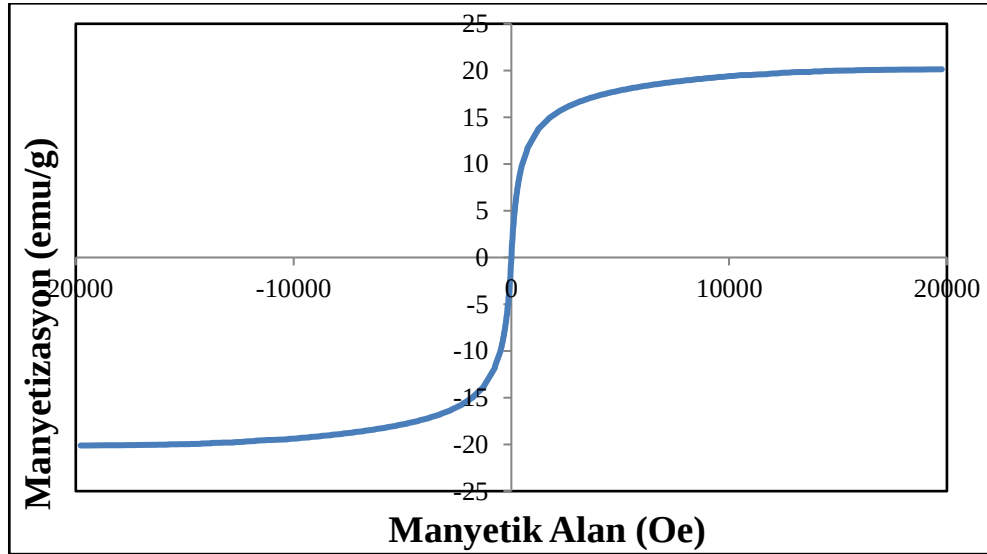


Şekil 4. 14. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin doyma manyetizasyon değeri 37,31 emu/g olarak ölçüldü. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin süperparamanyetik karakterde olduğu anlaşıldı. Elde edilen sonuçlar literatürle (Kızıltaş et al., 2020) uyumludur.

4.5.3. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin VSM analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 15. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin manyetik özelliği

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin doyma manyetizasyon değeri 20,13 emu/g olarak ölçüldü. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin süperparamanyetik karakterde olduğu anlaşıldı. Elde edilen sonuçlar literatürle (Esmaeilpour et al., 2012) uyumludur.

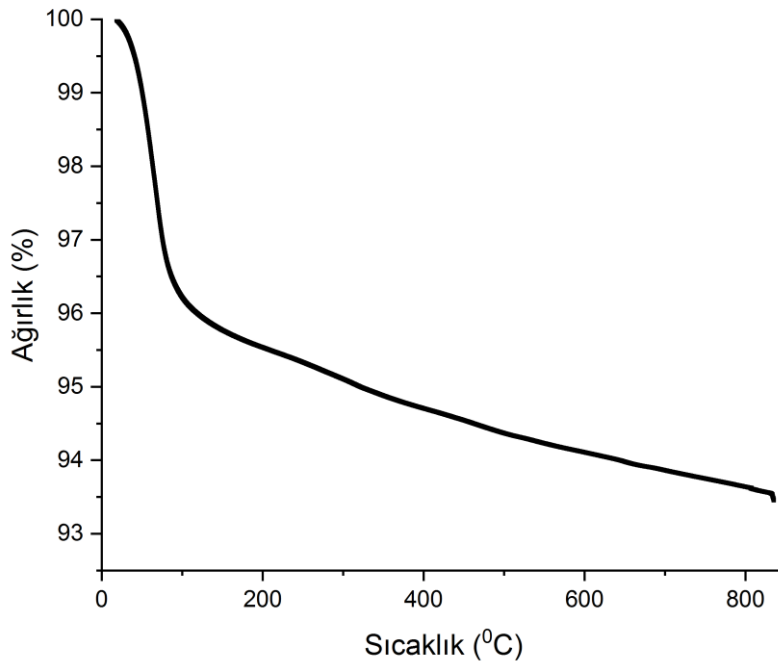
Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin doyma mıknatıslanma değerlerindeki sıralı azalma, sıralı modifikasyonunun başarıyla gerçekleştiğini gösterdi.

4.6. TGA Analizi

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle değişimi ve kütle kaybı TGA analizi ile belirlendi.

4.6.1. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin TGA analizi

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin TGA analizi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

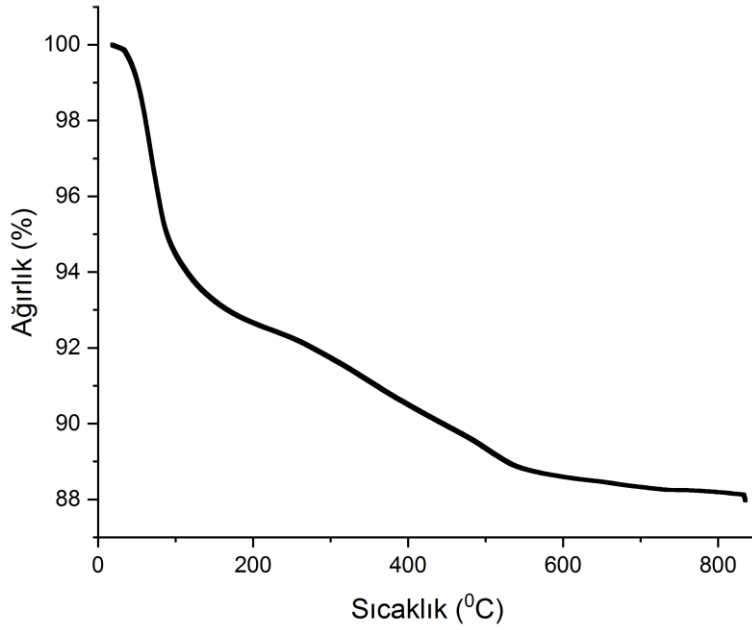


Şekil 4. 16. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin TGA analizi

Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin TGA analizinde ağırlık kaybı % 6.5 olarak belirlenmiştir. 150 °C'nin altında gerçekleşen ağırlık kaybı fiziksel olarak adsorbe edilen sudan ve manyetik nano katalizörlerin yıkanmasında kullanılan etanolden kaynaklandığı düşünülmektedir. 150 °C-850°C arasında gerçekleşen kayıplar termal bozunma ve kristal suyun ayrışmasından kaynaklıdır. Elde edilen sonuçlar literatürle (Wang et al., 2020) uyumludur.

4.6.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



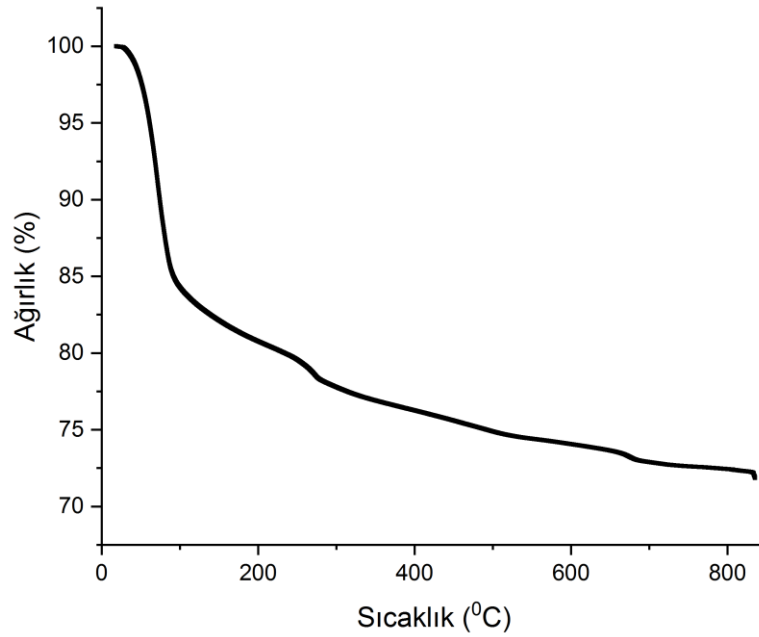
Şekil 4. 17. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizinde ağırlık kaybı % 12 olarak belirlenmiştir. 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleşen ağırlık kaybı manyetik nano katalizörlerin yüzeyinde fiziksel olarak adsorbe edilen su ve etanolün silika tabakasının yüzeyinden desorpsiyonuna bağlanabilir. 200 °C – 850 °C arasında gerçekleşen kayıplar termal bozunma, kristal suyun ayrışması ve amorf hidroksilin

kısmi ayrışmasından kaynaklanabilir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Feyzi & Norouzi, 2016) uyumludur.

4.6.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

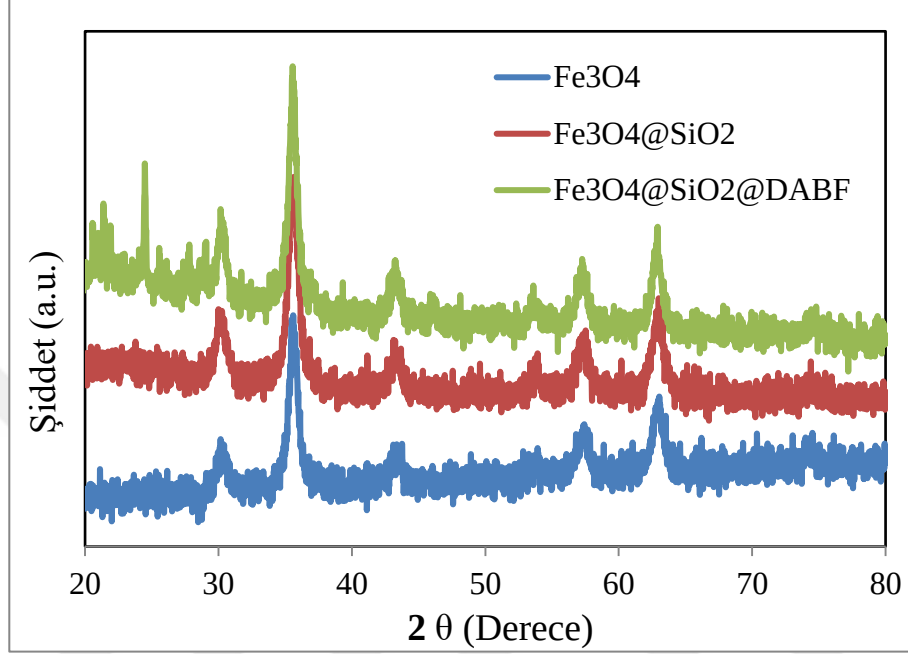


Şekil 4. 18. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizi

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin TGA analizinde ağırlık kaybı % 28.1 olarak belirlenmiştir. 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleşen ağırlık kaybı manyetik nano katalizörlerin yüzeyinde fiziksel olarak adsorbe edilen su ve etanolün silika tabakasının yüzeyinden desorpsiyonuna bağlanabilir. 200 °C – 850 °C arasında gerçekleşen kayıplar termal bozunmasından, kristal suyun ayrışmasından, amorf hidroksilin kısmi ayrışmasından, fonksiyonel grupların ayrışmasından kaynaklanabilir. Elde edilen sonuçlar literatürle (Liu et al., 2016) uyumludur.

4.7. XRD Analizi

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin kristal yapı özellikleri XRD ile gerçekleştirilip XRD spektrumları şekil 4.19'da verilmiştir.



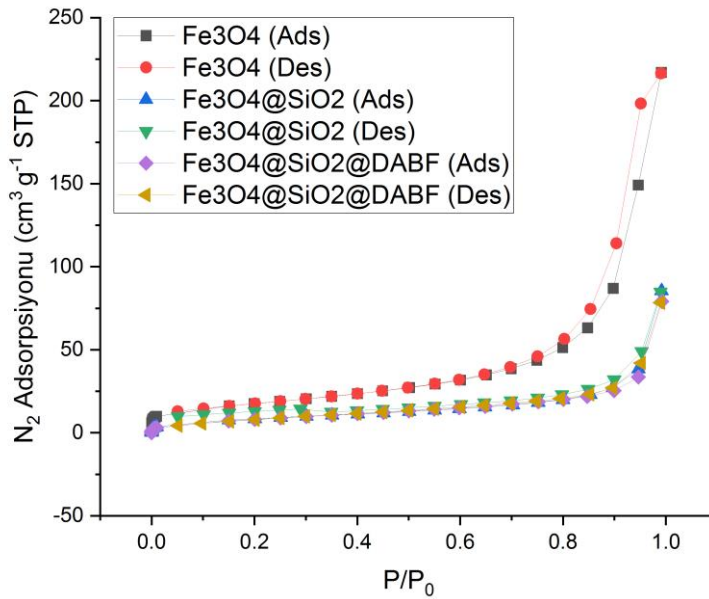
Şekil 4. 19. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin XRD spektrumları

Şekil 4.19'da verilen Fe_3O_4 , manyetik nano katalizörlerin XRD spektrumunda sırasıyla $2\theta = 29,8^\circ, 36,2^\circ, 43,1^\circ, 57,1^\circ$ ve $62,8^\circ$ 'deki pikler, sırasıyla (2 2 0), (3 1 1), (4 0 0), (5 1 1), (4 4 0) kristal düzlemlerle ilişkilidir. Bu pikler, standart Fe_3O_4 (yüzey merkezli kübik spinel yapı) XRD spektrumunun karakteristik tepe noktalarıyla tutarlıdır. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin XRD spektrumunda elde edilen pikler, hem $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörlerin XRD spektrumunda hem de $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin XRD spektrumunda mevcuttur. Bu piklerin varlığı, kaplanmış Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin kristal yapısının kaplama işlemi sırasında değişmediğini ve Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin yüzey modifikasyonu ve konjugasyonunun, Fe_3O_4 manyetik nano katalizörlerin fiziksel özelliklerini etkilemediğini gösterdi. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin XRD spektrumlarında gözlemlenen $2\theta=20^\circ\text{-}27^\circ$ aralığında mevcut olan pik, amorf SiO_2 'nin varlığına atfedilebilir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$

manyetik nano katalizörlerin amorf SiO_2 pikindeki artışın, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin yapısındaki Fe_3O_4 yoğunluğunun azalmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir (VSM analizi de bunu desteklemektedir). Analiz sonuçları Fe_3O_4 'ün kristal yapısının deforme olmadığını ve Fe_3O_4 'ün sırasıyla silika ve 3,4-DABF ile başarılı bir şekilde kaplandığını gösterdi. Elde edilen sonuçlar (Güngör & Ece, 2023) literatürle tutarlıdır.

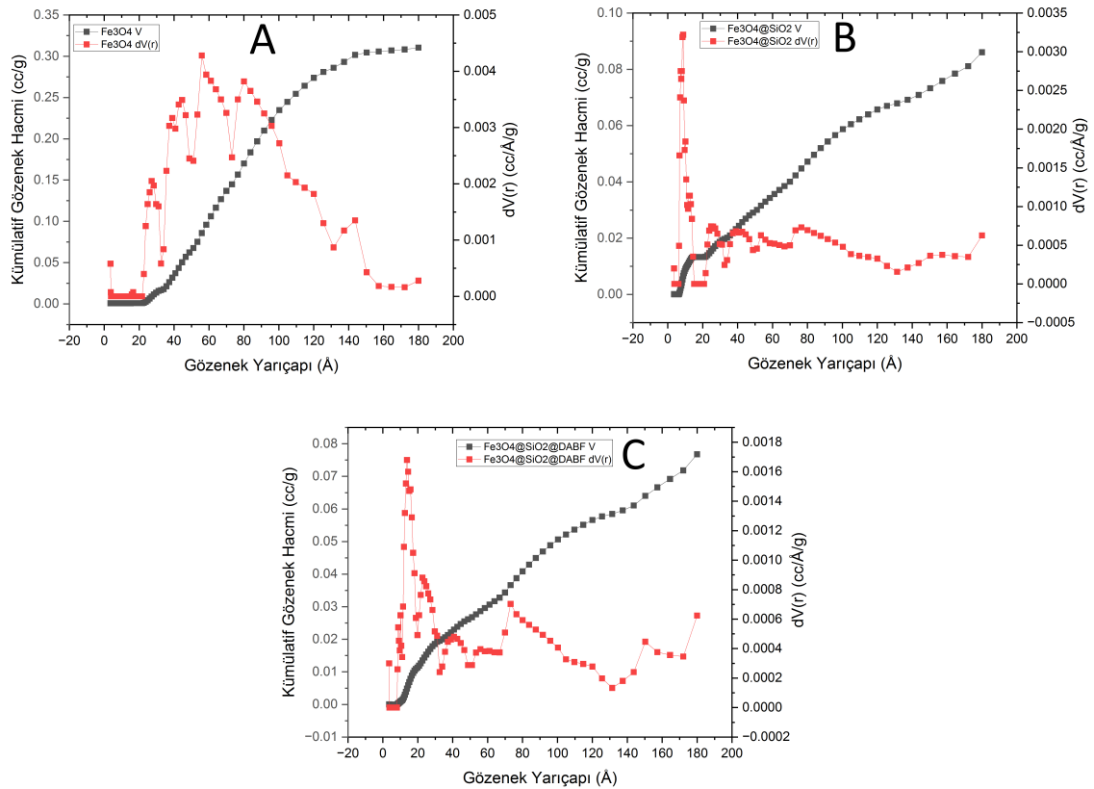
4.8. BET Analizi

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin N_2 adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin yüzeyi, 77.350 K ve 751.4 mmHg'de nitrojen ile güçlü etkileşim göstermiştir. Ölçülen N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi, kılcal yoğunlaşma fenomeninin meydana geldiğini göstermektedir. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) sınıflamasına göre tip IV histerezis H3 döngüler sunduğu anlaşılmıştır. Tip IV histerezisi manyetik nano katalizörlerin mezogözenekli yapısını doğrulamaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürle (Wei et al., 2022) uyumludur.



Şekil 4. 20. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin N_2 adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi

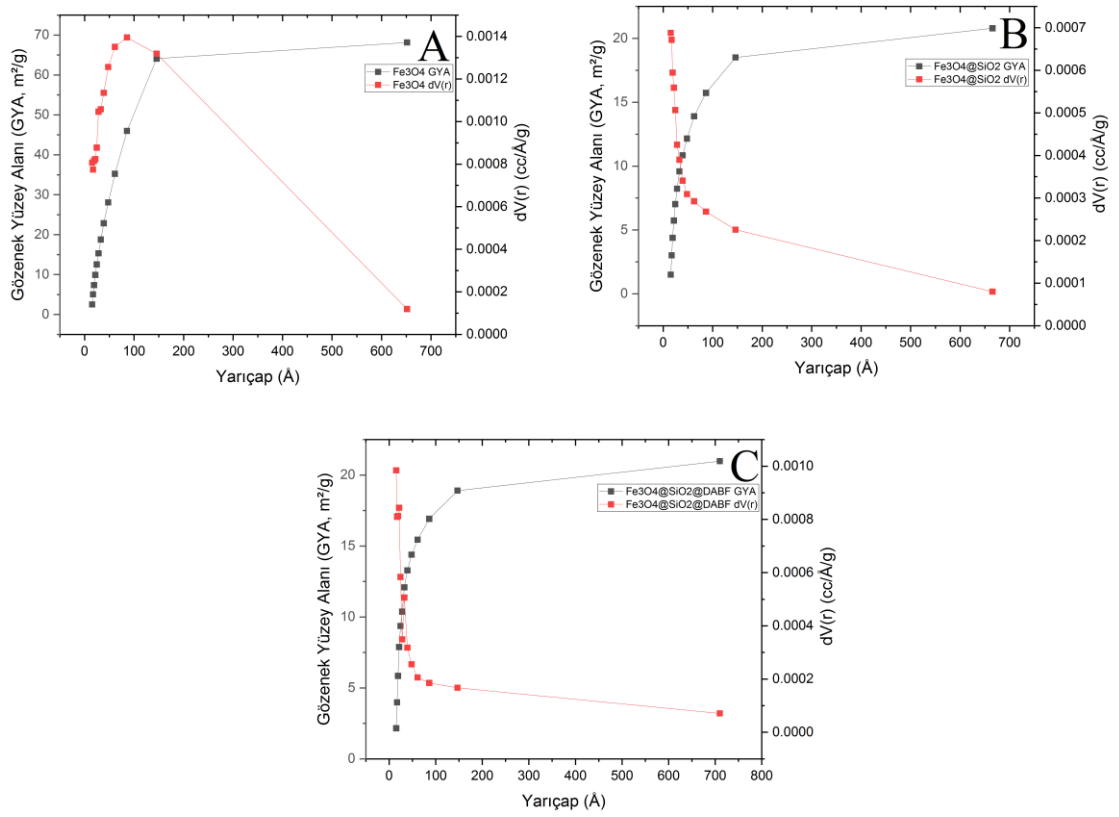
Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin Yoğunluk fonksiyonel teorisi (Density Functional Theory (DFT)) gözenek boyutu dağılımları Şekil 4.21’de gösterilmiştir. DFT modeli kullanılarak hesaplanan gözenek boyutu dağılım eğrilerinde Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin 20 nm’ye kadar çok daha geniş bir gözenek boyutu dağılımı gösterdiği anlaşılmıştır. Histerezis ve gözenek boyutu dağılımındaki farklılıklara bakıldığında SiO_2 ve 3,4-DABF ile kaplamanın gözenek yapısını uyarlamada etkili olduğu anlaşılmıştır. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin gözenek genişliği sırasıyla 5.58 nm, 0.88nm ve 1.38 nm olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürle (Zubir et al., 2014) uyumludur.



Şekil 4. 21. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin DFT gözenek boyutu dağılımları

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin BJH gözenek boyutu dağılımları Şekil 4.22.’de verilmiştir. Barrett-Joyner-Halenda (BJH) modeli kullanılarak hesaplanan gözenek boyutu dağılım eğrilerinde Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin gözenek yüzey

alanları sırasıyla 62.805 m²/g, 20.791 m²/g ve 20.979 m²/g, gözenek yarıçapları sırasıyla 85.539 Å, 15.309 Å ve 15.294 Å, gözenek hacimleri sırasıyla 0.333 cc/g, 0.126 cc/g ve 0.116 cc/g, ortalama gözenek yarıçapları sırasıyla 11.03 nm, 9.10 nm ve 8.23 nm olarak ölçüldü. IUPAC, gözenekleri boyutlarına göre üç kategoriye ayırır: makro gözenekler (d > 50 nm), mezogözenekler (2 < d < 50 nm) ve mikro gözenekler (d < 2 nm). Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin ortalama gözenek yarıçapları IUPAC'a göre mezogözenekler kategorisindedir. (Ayed et al., 2023; Ece, 2023; Güngör & Ece, 2023)



Şekil 4. 22. Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin BJH gözenek boyutu dağılımları

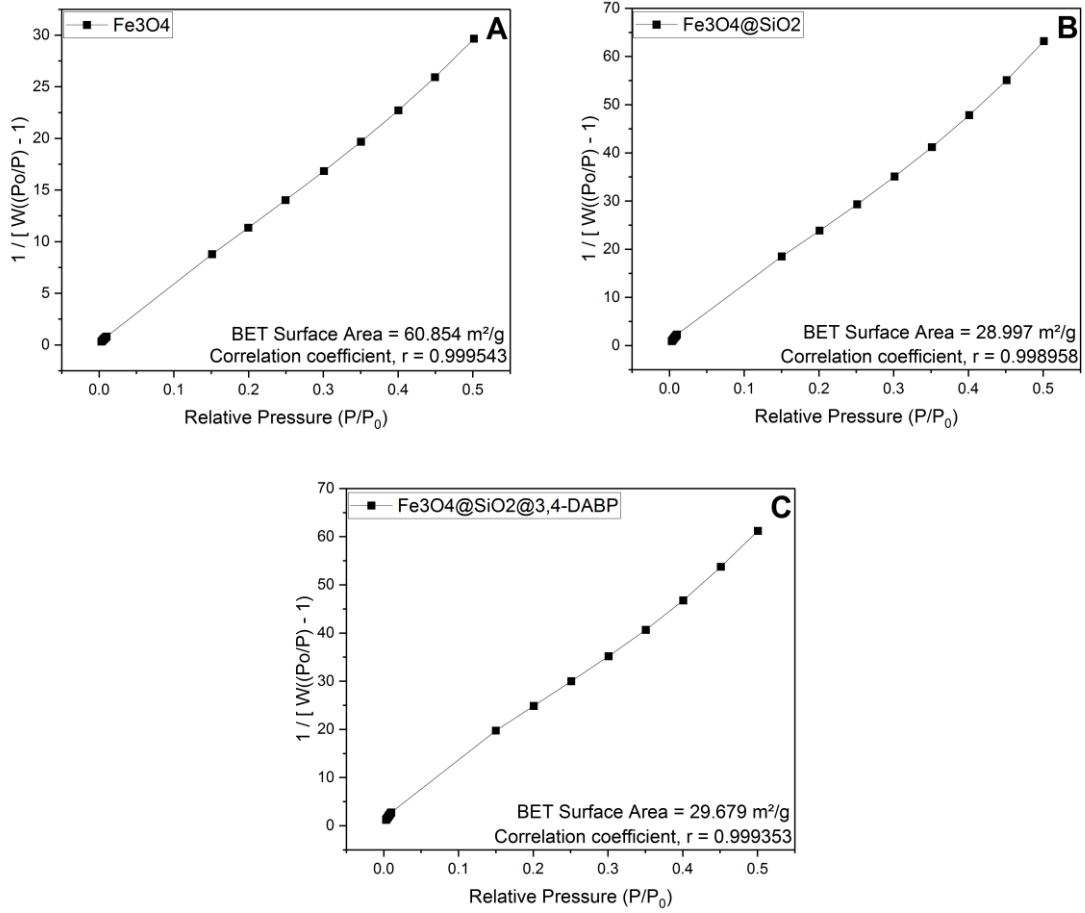
Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin dokusal özellikleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin dokusal özellikleri

	Fe_3O_4	$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$
BET Yöntemi Yüzey Alanı	60.854 m ² /g	28.997 m ² /g	29.679 m ² /g
V-t yöntemi Dış yüzey alanı	60.854 m ² /g	28.997 m ² /g	29.679 m ² /g
BJH Yöntemi Yüzey Alanı	62.805 m ² /g	20.791 m ² /g	20.979 m ² /g
BJH Yöntemi Gözenek Hacmi	0.333 cc/g	0.126 cc/g	0.116 cc/g
BJH Yöntemi Gözenek Yarıçapı Dv(r)	85.539 Å	15.309 Å	15.294 Å
Kr(87K) İnce film PS Yöntemi Gözenek Yarıçapı Dv(log r)	35.035 Å	35.063 Å	35.084 Å
DH Yöntemi Yüzey Alanı	63.631 m ² /g	21.132 m ² /g	21.368 m ² /g
DH Yöntemi Gözenek Hacmi	0.325 cc/g	0.123 cc/g	0.113 cc/g
DH Yöntemi Gözenek Yarıçapı Dv(r)	85.539 Å	15.309 Å	15.294 Å
HK Yöntem Modu	2.713 Å	2.738 Å	3.912 Å
HK Yöntemi Mikro Gözenek Hacmi	0.025 cc/g	0.012 cc/g	0.011 cc/g
SF yöntemi Modu	4.660 Å	4.753 Å	4.753 Å
SF yöntemi Mikro Gözenek Hacmi	0.018 cc/g	0.007 cc/g	0.006 cc/g
DFT Yöntemi Gözenek hacmi	0.310 cc/g	0.086 cc/g	0.077 cc/g
DFT Yöntemi Yüzey alanı	49.555 m ² /g	25.096 m ² /g	17.951 m ² /g
DFT Yöntemi Alt güven sınırı	3.589 Å	3.589 Å	3.589 Å
DFT Yöntemi Yarım gözenek genişliği (Mod)	55.865 Å	8.828 Å	13.845 Å
Gözenekler için toplam gözenek hacmi	3.356e-01 cc/g (Radius less than 1114.03 Å at P/Po = 0.991322)	1.320e-01 cc/g (Radius less than 1139.7 Å at P/Po = 0.99152)	1.222e-01 cc/g (Radius less than 1229.47 Å at P/Po = 0.992146)
Ortalama gözenek yarıçapı	1.10306e+02 Å	9.10727e+01 Å	8.23782e+01 Å

4.9. Manyetik Nano Katalizörlerin Yüzeyinin DSSC Hücrelerine Uygunluğu

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin çok noktalı BET grafiği Şekil 4.23.'te gösterilmiştir. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlere ait çok noktalı BET grafiği Şekil 4.23.'te verilmiştir. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerin Bet Yüzey Alanları sırasıyla 60.854 m²/g, 28.997 m²/g, 29.679 m²/g bulunmuştur. SiO_2 'nin Fe_3O_4 üzerine ve 3,4-DABF'in $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ üzerine düzgün dağılımı anlaşılmaktadır. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerin düzgün dağılımlı ve yüksek yüzey alanları, düşük maliyetli onları DSSC'e departına uygun potansiyelde bir aday haline getirmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürle [26] uyumludur.

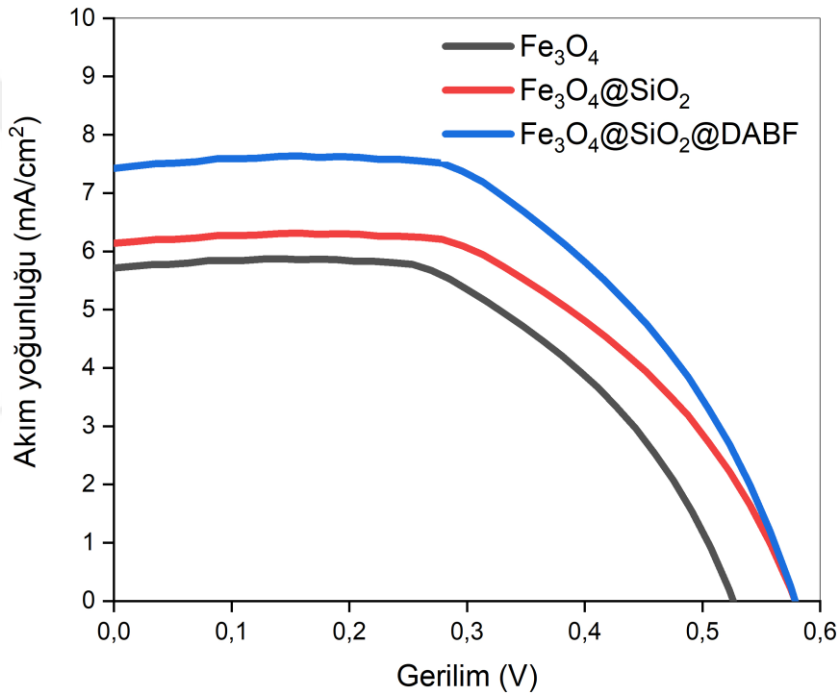


Şekil 4. 23 Manyetik nano katalizörlerin çok noktalı BET grafiği A) Fe₃O₄, B) Fe₃O₄@SiO₂ C) Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF

4.10. Güneş Hücresi Performans Analizi

Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin akım yoğunluğu ve gerilim arasındaki ilişkiyi detaylı bir şekilde gösteren J-V eğrilerinin grafiği Şekil 4.23.'de gösterilmiştir. Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörleri için kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve verimlilik η (%) değerleri Tablo 4.2.'de sunulmuştur. Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörleri, güneş hücrelerinde farklı verim değerlerine sahiptir. Fe₃O₄ manyetik nano katalizörleri için elde edilen verim %1.49, Fe₃O₄@SiO₂ manyetik nano katalizörleri için elde edilen verim %1.77 ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörleri için elde edilen verim %2.15 bulunmuştur. Fe₃O₄, Fe₃O₄@SiO₂ ve Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerinden elde edilen verimler karşılaştırıldığında, Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörlerin en yüksek verim değerine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu, 3,4-DABF kaplamasının güneş hücresi performansını artırdığına işaret edebilir. Fe_3O_4 manyetik nano katalizörleri ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nano katalizörleri arasındaki verim farkının incelendiğinde, SiO_2 kaplamasının, hücre performansını artırmaya katkıda bulunduğunu açıklamak için önemlidir. SiO_2 'nin yüzey düzenlemesi, elektron transferini iyileştirebilir ve reaktif yüzey grupları sayesinde hücrenin fotokimyasal aktivitesini artırabilir kapasite özelliği göstermiştir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörleri için elde edilen en yüksek verim, 3,4-DABF katmanının hücre performansına olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. 3,4-DABF, hücrenin yüzey özelliklerini geliştirebilir, reaksiyon hızını artırabilir ve hücre stabilitesini iyileştirebilir özelliktedir. (Güngördü Solğun et al., 2018)



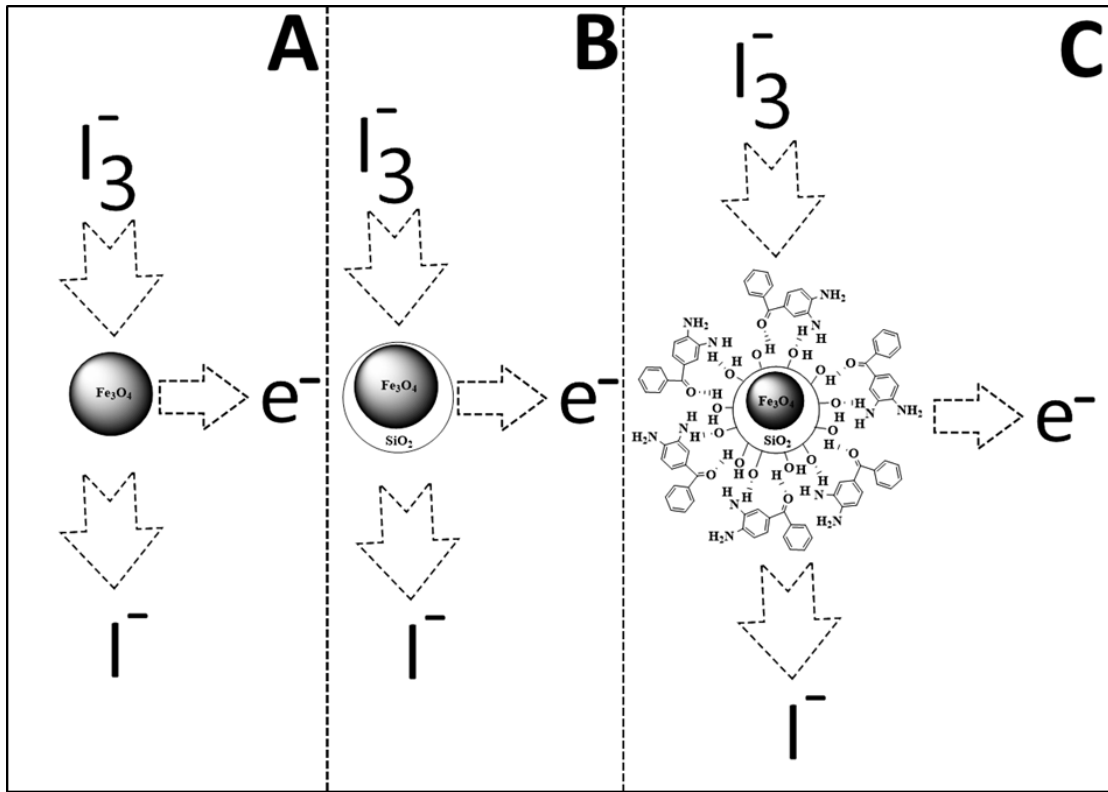
Şekil 4. 24. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlere ait J-V eğrileri.

Tablo 4. 2. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlere ait elde edilen J_{sc} , V_{oc} , and η (%) değerleri

Manyetik nano katalizörler	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	η (%)
Fe_3O_4	5.73	0.52	1.49
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$	6.14	0.58	1.77
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$	7.43	0.58	2.15

Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerin performansları literatüre uygun şekilde literature (Baytar et al., 2024; Wang, Yao, & Li, 2018) optimize edilmiştir (Şekil 4.25.). Literatürde (Baytar et al., 2024; Wang, Yao, & Li, 2018) Fe_3O_4 'ün hiyerarşik modifikasyonda katman sayısının artkça, daha fazla elektron transfer yolu sağlayabilmesi nedeniyle daha üstün performans sergileyebileceği rapor edilmiştir. Şekil 4.25 ve Tablo 2., hiyerarşik katman sayısı artkça, manyetik nanokatalizörlerin daha üstün performans sergileyebileceğini ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ (üç katman) > $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ (iki katman) > Fe_3O_4 (tek katman)) göstermektedir. Bu sonuç, 3,4-DABF kaplamasının güneş hücresi performansını artırdığını, hücre performansına olumlu etkiye bulunduğunu göstermektedir. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerin güneş ışığı spektrumunu yakaladığını ve verimli şekilde ışığı emdiği anlaşılmaktadır. Fotonları emdikten sonra, fotovoltaiik süreci başlatan ve foto-uyarılmış elektronların transferini destekleyen elektron-delik çiftleri üretir. Ortaya çıkan yük ayrımı, rekombinasyonu önler, foto-uyarılmış taşıyıcıların ömrünü uzatır ve DSSC'nin yük toplama verimliliğini artırır. Artan katmanlar, elektronik bant yapısını değiştirerek, bant aralığı içindeki ara enerji seviyelerini açarak ve yük taşıyıcılarının etkili bir şekilde ayrılmasını ve taşınmasını kolaylaştırarak DSSC performansını daha da geliştirebilir. 3,4-DABF, hücrenin yüzey özelliklerini geliştirebilir, reaksiyon hızını artırabilir ve hücre stabilitesini iyileştirebilir özelliğindedir. Bununla beraber $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerinde bulunan C-C, C=C, =O ve -NH fonksiyonel grupları, dipol-dipol, p-p, elektrostatik, van der Waals gibi etkileşimlerin electron transport trafiğine pozitif katkı sağladığı

muhtemeldir. Ayrıca Fe_3O_4 ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanokatalizörleri arasındaki verim farkının incelendiğinde, SiO_2 kaplamasının, hücre performansını artırmaya katkıda bulunduğunu göstermektedir. SiO_2 'nin yüzey düzenlemesi, elektron transferini iyileştirebilir ve reaktif yüzey grupları sayesinde hücrenin fotokimyasal aktivitesini artırabilir kapasite özelliği göstermiştir. Fe_3O_4 ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanokatalizörler yarı gözenekli bir yapıya sahip olduğundan, hem DSSC'deki reaktanların erişilebilirliği artmış hem de elektronların taşınmasını/transferini kolaylaştıran büyük ve etkili katalitik bölgeler (kolay) şarj/deşarj) arttığı için katalitik verim de arttı.



Şekil 4. 25. Performansın sıralı bir şekilde optimize edilmesi A) Fe_3O_4 B) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ C) $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$

manyetik nano katalizörleri Pt'nin DSSC'deki Fe_3O_4 destekli hassaslaştırıcılarla literatür karşılaştırması Tablo 4. 3'te verilmiştir.

Tablo 4. 3. DSSC'de Pt'nin Fe₃O₄ destekli hassaslaştırıcılarla karşılaştırılması

Sensitizers	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	η (%)	Ref.
Pt	0.75	13.7	7.48	(Wang, Yao, Zuo, et al., 2018)
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @3,4-DABP	0.58	7.43	2.15	<i>Bu çalışma</i>
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @IPA-Mn	0.54	7.6	2.054	(Kutluay et al., 2021)
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @L-Arginine-Ni	0.57	6.46	1.84	(Ece et al., 2021)
Fe ₃ O ₄ @PANI	0.46	4.24	1.53	(Sadegh et al., 2021)

Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörleri benzer hassaslaştırıcılara göre nispeten yüksek verime sahiptir. Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörleri, dış kabuklarında geçiş metalleri bulunmamasına rağmen nispeten yüksek verime sahiptir. Ucuz Fe₃O₄@SiO₂@3,4-DABF manyetik nano katalizörleri, pahalı Pt. ile karşılaştırıldığında çok iyi verimlilik gösterdi.

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörler sentezlendi. Sentezler gerçekleştirilirken, birlikte çökme ve solgel sentez yöntemlerinden yararlanıldı. Manyetik nanoparçacıklar FTIR analizi, SEM-EDS analizi, TEM analizi, VSM analizi, XRD analizi, TGA analizi ve BET analizi ile karakterize edildi. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin ≈ 10 nm çapa sahip olduğu, doyma manyetizasyon değerlerinin sırasıyla 61,64 emu/g, 37,31 emu/g ve 20,13 emu/g olduğu bulundu. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle değişimi ve kütle kaybının sırasıyla % 6.5, % 12 ve % 28.1 olduğu, kristal özelliklerinin yüzey merkezli kübik spinel yapı olduğu anlaşıldı. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörleri IUPAC sınıflamasına göre tip IV histerezis H3 döngüler sunduğu, mezogözenekli yapıya sahip olduğu tespit edildi. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin, güneş hücresi cihazlarının karmaşık yapısındaki sensör olarak kullanımını detaylı bir şekilde incelendi. Bu bileşiklerin karmaşık fotovoltaiik özelliklerini aydınlatmak amacıyla, akım yoğunluğu (J) - gerilim (V) ölçümleri gerçekleştirildi. Kaydedilen J-V eğrilerini titizlikle analiz ederek, bu karmaşık örneklerin güç dönüşüm verimlilikleri hakkında değerli içgörüler elde edildi. Elde edilen sonuçlar, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin mükemmel birer katalizör görevi gördüğünü göstermektedir. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin, güneş hücrelerinde elde edilen verimlerin sırasıyla %1.49, %1.77 ve verim %2.15 olduğu, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörleri en yüksek verim değerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada hiyerarşik katman sayısı artıka, manyetik nanokatalizörlerin daha üstün performans sergilediği ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ (üç katman) > $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ (iki katman) > Fe_3O_4 (tek katman)) görülmüştür. Bu sonuç, 3,4-DABF kaplamasının güneş hücresi performansını artırdığını, hücre performansına

olumlu etkide bulunduğunu göstermektedir. Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerin güneş ışığı spektrumunu yakaladığını ve verimli şekilde ışığı emdiği anlaşılmaktadır. Fotonları emdikten sonra, fotovoltaiik süreci başlatan ve foto-uyarılmış elektronların transferini destekleyen elektron-delik çiftleri üretir. Ortaya çıkan yük ayrımı, rekombinasyonu önler, foto-uyarılmış taşıyıcıların ömrünü uzatır ve DSSC'nin yük toplama verimliliğini artırır. Artan katmanlar, elektronik bant yapısını değiştirerek, bant aralığı içindeki ara enerji seviyelerini açarak ve yük taşıyıcılarının etkili bir şekilde ayrılmasını ve taşınmasını kolaylaştırarak DSSC performansını daha da geliştirebilir. 3,4-DABF, hücrenin yüzey özelliklerini geliştirebilir, reaksiyon hızını artırabilir ve hücre stabilitesini iyileştirebilir özelliktedir. Bununla beraber $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nanokatalizörlerinde bulunan C-C, C=C, =O ve -NH fonksiyonel grupları, dipol-dipol, p-p, elektrostatik, van der Waals gibi etkileşimlerin electron transport trafiğine pozitif katkı sağladığı muhtemeldir. Ayrıca Fe_3O_4 ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanokatalizörleri arasındaki verim farkının incelendiğinde, SiO_2 kaplamasının, hücre performansını artırmaya katkıda bulunduğunu göstermektedir. SiO_2 'nin yüzey düzenlemesi, elektron transferini iyileştirebilir ve reaktif yüzey grupları sayesinde hücrenin fotokimyasal aktivitesini artırabilir kapasite özelliği göstermiştir. Fe_3O_4 ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ manyetik nanokatalizörler yarı gözenekli bir yapıya sahip olduğundan, hem DSSC'deki reaktanların erişilebilirliği artmış hem de elektronların taşınmasını/transferini kolaylaştıran büyük ve etkili katalitik bölgeler (kolay) şarj/deşarj) arttığı için katalitik verim de arttı. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörleri benzer hassaslaştırıcılara göre nispeten yüksek verime sahiptir. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörleri, dış kabuklarında geçiş metalleri bulunmamasına rağmen nispeten yüksek verime sahiptir. Ucuz $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörleri, pahalı Pt. ile karşılaştırıldığında çok iyi verimlilik gösterdi. Elde edilen bulgular, Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin güneş hücresi teknolojisinde umut verici bir duyarlılaştırıcı olarak kullanılabileceğini gösterdi. Ayrıca bu çalışmada, ucuz, kolay ve çevre dostu olarak hazırlanan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@3,4\text{-DABF}$ manyetik nano katalizörlerin güneş pili teknolojisinin kullanımındaki etkinliği ilk kez ortaya konuldu. Bu sonuçlar, güneş hücreleri için daha etkili nanomalzemelerin tasarımına yönelik gelecekteki araştırmalara ışık tutabilir.

KAYNAKÇA

- Abdalla, A. M., Elnaghi, B. E., Hossain, S., Dawood, M., Abdelrehim, O., & Azad, A. K. (2020). Nanotechnology utilization in energy conversion, storage and efficiency: A perspective review. *Advanced Energy Conversion Materials*, 1(1), 30-54.
- Abdin, Z., Alim, M. A., Saidur, R., Islam, M. R., Rashmi, W., Mekhilef, S., & Wadi, A. (2013). Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 26, 837-852.
- Ahangaran, F., & Navarchian, A. H. (2020). Recent advances in chemical surface modification of metal oxide nanoparticles with silane coupling agents: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 286, 102298.
- Ahmad, M. S., Pandey, A. K., & Abd Rahim, N. (2017). Advancements in the development of TiO₂ photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 89-108.
- Ayed, S. B., Mansour, L., Vaiano, V., Harrath, A. H., Ayari, F., & Rizzo, L. (2023). Magnetic Fe₃O₄-natural iron ore/calcium alginate beads as heterogeneous catalyst for Novacron blue dye degradation in water by (photo) Fenton process. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 438, 114566.
- Ayinde, A. G., Sola, A. P., Oluwaseun, A., Kolawole, S. Y., & Ray, F. G. (2024). Enhanced photovoltaic performance of green synthesized Fe₃O₄ nanostructures embedded in TiO₂ photoanode for dye sensitized solar cells. *Optik*, 171642.
- Bagavathi, M., Ramar, A., & Saraswathi, R. (2016). Fe₃O₄-carbon black nanocomposite as a highly efficient counter electrode material for dye-sensitized solar cell. *Ceramics International*, 42(11), 13190-13198.
- Basheer, B., Mathew, D., George, B. K., & Nair, C. R. (2014). An overview on the spectrum of sensitizers: the heart of dye sensitized solar cells. *Solar Energy*, 108, 479-507.
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019). The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 112.
- Baytar, O., Şahin, Ö., Horoz, S., & Kutluay, S. (2024). Solar Cell Efficiency Enhancement Via Mulberry Molasses-Based Carbon Quantum Dot-Supported CdS and CdS-Mn Nanomaterials. *Waste and Biomass Valorization*, 1-10.
- Bokov, D., Turki Jalil, A., Chupradit, S., Suksatan, W., Javed Ansari, M., Shewael, I. H., Valiev, G. H., & Kianfar, E. (2021). Nanomaterial by sol-gel method: synthesis and application. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 1-21.
- Devadiga, D., Selvakumar, M., Shetty, P., & Santosh, M. (2021). Recent progress in dye sensitized solar cell materials and photo-supercapacitors: A review. *Journal of Power Sources*, 493, 229698.
- Ece, M. Ş. (2023). Synthesis, characterization and investigation of some physical textures of magnetite-silica-L-Proline nanoparticles modified with some transition metals (Co, Mn, Cu, Ni). *Materials Science and Engineering: B*, 292, 116417.
- Ece, M. Ş., Ekinci, A., Kutluay, S., Şahin, Ö., & Horoz, S. (2021). Facile synthesis and comprehensive characterization of Ni-decorated amine groups-immobilized Fe₃O₄@SiO₂ magnetic nanoparticles having enhanced solar cell efficiency. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(13), 18192-18204.
- El-Shafai, N. M., Abdelfatah, M. M., El-Khouly, M. E., El-Mehasseb, I. M., El-Shaer, A., Ramadan, M. S., Masoud, M. S., & El-Kemary, M. A. (2020). Magnetite nano-spherical

- quantum dots decorated graphene oxide nano sheet (GO@ Fe₃O₄): electrochemical properties and applications for removal heavy metals, pesticide and solar cell. *Applied Surface Science*, 506, 144896.
- Esmailpour, M., Sardarian, A. R., & Javidi, J. (2012). Schiff base complex of metal ions supported on superparamagnetic Fe₃O₄@ SiO₂ nanoparticles: An efficient, selective and recyclable catalyst for synthesis of 1, 1-diacetates from aldehydes under solvent-free conditions. *Applied Catalysis A: General*, 445, 359-367.
- Fayyazi, F., Haghshenas, D. F., Kowsari, E., & Ghazitabar, A. (2023). Synthesis of a three-dimensional reduced graphene oxide aerogel decorated with (Fe₃O₄@ SiO₂-NH₂)-COC₂H₄COOH for adsorption of heavy metal cations. *Journal of Molecular Liquids*, 386, 122512.
- Ferrag, C., Noroozifar, M., Modarresi-Alam, A. R., & Kerman, K. (2021). Encapsulation of poly (m-aminobenzodioxol)-Fe₃O₄ superparamagnetic nanorods and iron (III) thiocyanate complex in hydrogel toward hybrid solar cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105612.
- Feyzi, M., & Norouzi, L. (2016). Preparation and kinetic study of magnetic Ca/Fe₃O₄@ SiO₂ nanocatalysts for biodiesel production. *Renewable energy*, 94, 579-586.
- Güngör, Ç., & Ece, M. Ş. (2023). Competitive adsorption of VOCs (benzene, xylene and ethylbenzene) with Fe₃O₄@ SiO₂-NH@ BENZOPHENONE magnetic nanoadsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 475, 146034.
- Güngördü Solğun, D., Horoz, S., & Ağırtaş, M. S. (2018). Synthesis of novel tetra (4-tritylphenoxy) substituted metallophthalocyanines and investigation of their aggregation, photovoltaic, solar cell properties. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 48(10), 508-514.
- Harnchana, V., Chaichachad, S., Pimanpang, S., Saiyasombat, C., Srepusharawoot, P., & Amornkitbamrung, V. (2019). Hierarchical Fe₃O₄-reduced graphene oxide nanocomposite grown on NaCl crystals for triiodide reduction in dye-sensitized solar cells. *Scientific Reports*, 9(1), 1494.
- Hulla, J., Sahu, S., & Hayes, A. (2015). Nanotechnology: History and future. *Human & experimental toxicology*, 34(12), 1318-1321.
- Kasem, K. K., Mostafa, M., & Abd-Elsalam, K. A. (2019). Iron-Based Nanomaterials: Effect on Soil Microbes and Soil Health. *Magnetic Nanostructures: Environmental and Agricultural Applications*, 261-285.
- Khalid, A., Ahmed, R., Taha, M., & Soliman, T. (2023). Fe₃O₄ nanoparticles and Fe₃O₄@ SiO₂ core-shell: synthesize, structural, morphological, linear, and nonlinear optical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 947, 169639.
- Kiziltaş, H., Tekin, T., & Tekin, D. (2020). Synthesis, characterization of Fe₃O₄@ SiO₂@ ZnO composite with a core-shell structure and evaluation of its photocatalytic activity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104160.
- Kurnaz Yetim, N., & Hasanoğlu Özkan, E. (2021). Synthesis of Au-doped magnetic nanocomposites: structural, magnetic, and catalytic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 24766-24774.
- Kutluay, S., Horoz, S., Şahin, Ö., Ekin, A., & Ece, M. Ş. (2021). Highly improved solar cell efficiency of Mn-doped amine groups-functionalized magnetic Fe₃O₄@ SiO₂ nanomaterial. *International Journal of Energy Research*, 45(14), 20176-20185.
- Liu, Y., Fu, R., Sun, Y., Zhou, X., Baig, S. A., & Xu, X. (2016). Multifunctional nanocomposites Fe₃O₄@ SiO₂-EDTA for Pb (II) and Cu (II) removal from aqueous solutions. *Applied Surface Science*, 369, 267-276.
- Mansa, R., Yugis, A., Liow, K., Chai, S., Ung, M., Dayou, J., & Sipaut, C. (2013). A brief review on photoanode, electrolyte, and photocathode materials for dye-sensitized solar cell based on natural dye photosensitizers. *Developments in Sustainable Chemical and Bioprocess Technology*, 313-319.
- Maryam, D., & Ali, E. A. (2023). Synthesis of Fe₃O₄@ SiO₂@ Pr-NH₂@ DAP as a magnetic recyclable nano-catalyst for efficient synthesis of pyranothiazolopyrimidines and 4H-pyrans under solvent-free condition.

- Nasrollahzadeh, M., Sajadi, M. S., Atarod, M., Sajjadi, M., & Isaabadi, Z. (2019). *An introduction to green nanotechnology*. Academic Press.
- Nguyen, M. D., Tran, H.-V., Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe₃O₄ nanoparticles: structures, synthesis, magnetic properties, surface functionalization, and emerging applications. *Applied Sciences*, 11(23), 11301.
- Noma, S. A. A., Ulu, A., Koytepe, S., & Ateş, B. (2020). Preparation and characterization of amino and carboxyl functionalized core-shell Fe₃O₄/SiO₂ for L-asparaginase immobilization: A comparison study. *Biocatalysis and Biotransformation*, 38(5), 392-404.
- Qin, Y., Ahmed, A., Iqbal, S., & Usman, M. (2023). Construction of β -cyclodextrin modified Fe₃O₄ composites with enhanced peroxymonosulfate activation towards efficient degradation of norfloxacin. *Molecular Catalysis*, 547, 113368.
- Qureshi, A. A., Javed, S., Javed, H. M. A., Akram, A., Mustafa, M. S., Ali, U., & Nisar, M. Z. (2021). Facile formation of SnO₂-TiO₂ based photoanode and Fe₃O₄@ rGO based counter electrode for efficient dye-sensitized solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 123, 105545.
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K.-J., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, 754, 141989.
- Ramos, J. L., Pakuts, B., Godoy, P., García-Franco, A., & Duque, E. (2022). Addressing the energy crisis: using microbes to make biofuels. In (Vol. 15, pp. 1026-1030): Wiley Online Library.
- Romdoni, Y., Kadja, G. T., Kitamoto, Y., & Khalil, M. (2023). Synthesis of multifunctional Fe₃O₄@ SiO₂-Ag nanocomposite for antibacterial and anticancer drug delivery. *Applied Surface Science*, 610, 155610.
- Sadegh, F., Modarresi-Alam, A. R., Noroozifar, M., & Kerman, K. (2021). A facile and green synthesis of superparamagnetic Fe₃O₄@ PANI nanocomposite with a core-shell structure to increase of triplet state population and efficiency of the solar cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104942.
- Sarker, M. Z., Rahman, M. M., Minami, H., Sarker, M. S. I., Islam, M. S., & Ahmad, H. (2023). A potential recyclable catalyst: In situ growth of bimetallic Cu-Ag nanoalloy on the magnetic SiO₂/Fe₃O₄-SiO₂-NH₂ nanocomposite support using a green approach. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 668, 131447.
- Scepka, T. (2016). Noninvasive control of magnetic state in ferromagnetic nanodots by Hall probe magnetometry. *Doctoral Degree*, Slovak University of Technology.
- Sezer, N., Arı, İ., Bicer, Y., & Koc, M. (2021). Superparamagnetic nanoarchitectures: Multimodal functionalities and applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 538, 168300.
- Shabzendedar, S., Modarresi-Alam, A. R., Noroozifar, M., & Kerman, K. (2020). Core-shell nanocomposite of superparamagnetic Fe₃O₄ nanoparticles with poly (m-aminobenzenesulfonic acid) for polymer solar cells. *Organic Electronics*, 77, 105462.
- Studer, A., & Curran, D. P. (2014). The electron is a catalyst. *Nature chemistry*, 6(9), 765-773.
- Thakur, M., Sharma, A., Chandel, M., & Pathania, D. (2022). Modern applications and current status of green nanotechnology in environmental industry. In *Green functionalized nanomaterials for environmental applications* (pp. 259-281). Elsevier.
- Thangaraj, B., Jia, Z., Dai, L., Liu, D., & Du, W. (2016). Lipase NS81006 immobilized on Fe₃O₄ magnetic nanoparticles for biodiesel production. *Ovidius Univ Ann Chem* 27: 13-21. In.
- Umaz, A. (2024a). Fe₃O₄@ SA MNCs Synthesis, Characterization, and First-time Use in Hydrogen Production by NaBH₄ Hydrolysis. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 11(1), 205-216.
- Umaz, A. (2024b). Synthesis and characterization of novel magnetic nano-catalyst (Fe₃O₄@ SiO₂@ EDDHA-Fe) and their hydrogen production activity. *Ceramics International*.

- Wang, J., Mao, M., Atif, S., & Chen, Y. (2020). Adsorption behavior and mechanism of aqueous Cr (III) and Cr (III)-EDTA chelates on DTPA-chitosan modified Fe₃O₄@ SiO₂. *Reactive and Functional Polymers*, 156, 104720.
- Wang, W., Yao, J., & Li, G. (2018). Dual-functional Fe₃O₄@ N-rGO catalyst as counter electrode with high performance in dye-sensitized solar cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 823, 261-268.
- Wang, W., Yao, J., Zuo, X., & Li, G. (2018). High efficiency nitrogen-doped core-shell carbon spheres as counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Materials Letters*, 227, 172-175.
- Wei, Z., Ma, X., Zhang, Y., Guo, Y., Wang, W., & Jiang, Z.-Y. (2022). High-efficiency adsorption of phenanthrene by Fe₃O₄-SiO₂-dimethoxydiphenylsilane nanocomposite: Experimental and theoretical study. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126948.
- Wu, J., Ke, K., Qin, N., Lin, E., Kang, Z., & Bao, D. (2023). Magnetically retrievable Fe₃O₄@ SiO₂@ ZnO piezo-photocatalyst: Synthesis and multiple catalytic properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 636, 167-175.
- Xu, H., Zhu, G., & Jin, Z. (2020). Electron migration optimization through nanostructural control of hierarchical Fe₃O₄ based counter electrodes for high-performance dye-sensitized solar cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 869, 114214.
- Yoon, S., Tak, S., Kim, J., Jun, Y., Kang, K., & Park, J. (2011). Application of transparent dye-sensitized solar cells to building integrated photovoltaic systems. *Building and Environment*, 46(10), 1899-1904.
- Zisti, F., Al-Behadili, F. J. M., Nadimpour, M., Rahimpour, R., Mengelizadeh, N., Alsalamy, A., Abdullah, M. D., & Balarak, D. (2024). Synthesis and characterization of Fe₃O₄@ SiO₂-supported metal-organic framework PAEDTC@ MIL-101 (Fe) for degradation of chlorpyrifos and diazinon pesticides. *Environmental Research*, 245, 118019.
- Zubir, N. A., Yacou, C., Motuzas, J., Zhang, X., & Diniz da Costa, J. C. (2014). Structural and functional investigation of graphene oxide-Fe₃O₄ nanocomposites for the heterogeneous Fenton-like reaction. *Scientific reports*, 4(1), 4594.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Ali KOÇHAN
Yabancı Dili	İngilizce
Orcid Numarası	0000-0003-0771-4404
Ulusal Tez Merkezi Referans Numarası	10450843
Lise	Kızıltepe Lisesi – 2007
Lisans	Dicle Üniversitesi Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi – 2015
Yüksek Lisans	Mardin Artuklu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Ana Bilim Dalı
Mesleki Deneyim	Açı Eğitim Kurumları 2016 - 2018 Etik Eğitim Kurumları 2018 – 2024 Uğur Okulları 2021 – 2023
Akademik Çalışmalar	