

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ni_{1-x} Cu_xFe₂ O₄ Spinel Ferrit Nanoparçacıklarının
Üretilmesi, Karakterizasyonu, Yapısal ve Manyetik
Özelliklerinin İncelenmesi**

Çilem İYİÖZ

Fizik Anabilim Dalı

Aralık, 2024

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

**Ni_{1-x}Cu_xFe₂O₄ Spinel Ferrit Nanoparçacıklarının Üretilmesi,
Karakterizasyonu, Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin
İncelenmesi**

Çilem İYİÖZ

Fizik Anabilim Dalı

Bu Yüksek Lisans Tezi/.../2024 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Bekir ÖZÇELİK (Danışman)
: Prof. Dr. Ahmet EKİCİBİL
: Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.
Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların
kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere
tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Manyetizma	1
1.1.1. Manyetizmanın Tarihsel Bir Bakış Açısı.....	2
1.1.2. Manyetik Malzemelerin Keşfi ve Gelişimi.....	2
1.1.3. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması	4
1.1.4. Manyetik Birimler.....	10
1.1.5. Nanopartiküller	12
1.1.6. Manyetik Nanopartiküller.....	14
1.1.7. Nikel Spinel Ferritler	18
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	21
3. MATERYAL VE METOT	31
3.1. Nanopartikül Üretim Yöntemleri.....	31
3.1.1. Klasik Katıhal Tepkime Yöntemi	31
3.1.2. Birlikte Çöktürme Yöntemi	33
3.1.3. Hidrotermal Yöntemi	33
3.1.4. Mikro Emülsiyon Yöntemi	34
3.1.5. Solvo Termal Yöntemi.....	35
3.1.6. Sol-jel Yöntemi.....	36
3.2. Karakterizasyon Yöntemleri.....	40
3.2.1. SEM (Scanning Electron Microscopy) ve EDS (Electron Dispersive Spectroscopy) .	40
3.2.2. FT-IR Cihazı (Fourier Transform Infrared Spektroskopisi)	41
3.2.3. XRD (X-ray Diffraction) Spektroskopisi	41
3.2.4. VSM (Vibrating Sample Magnetometer)	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
4.1. Giriş	45
4.2. Toz Örneklerinin Deneysel Analizlerinin Sonuçları	45
4.2.1. XRD Analizi.....	45
4.2.2. FT-IR Analizi	49
4.2.3. SEM Analizi.....	53

4.2.4. Manyetik Analiz.....	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	83



**$Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ Spinel Ferrit Nanoparçacıklarının
Üretilmesi, Karakterizasyonu, Yapısal ve Manyetik
Özelliklerinin İncelenmesi**

Çilem İYİÖZ

Danışman: Prof. Dr. Bekir ÖZÇELİK

Fizik Anabilim Dalı

ÖZ

Bu çalışmada, $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ spinel ferrit nanoparçacıklar $x=0, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1.0 konsantrasyonlarında sol-jel tekniği yöntemiyle üretilip, yapısal ve manyetik özellikleri incelendi. Üretilen nanomalzemelerin fiziksel özellikleri X-ışınları kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskopu (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) kullanılarak belirlendi. Titreşen örnek manyetometresi (VSM) kullanılarak manyetik özellikleri belirlendi. Ayrıca malzemenin manyetik ölçümleri 10 ve 300 K sıcaklıklarında saptandı. $x=1.0$ ve 0.25 konsantrasyonu için 10 K'de en yüksek ve en düşük manyetik geri çağırıcı alan (H_c) değeri, sırasıyla 295.34 Oe ve 134.48 Oe olarak bulundu. Ayrıca aynı konsantrasyonların 300 K'deki $x=1.0$ ve 0.0 konsantrasyonu için en yüksek ve en düşük değeri sırasıyla 78.68 Oe ve 180.19 Oe olarak saptandı. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre nanoparçacıkların parçacık boyutlarının ortalama olarak $12-17$ nm arasında değiştiği gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Spinel, Manyetik Nanopartikül, SEM, FT-IR, VSM

**Production, Characterization, Structural and Magnetic
Properties Investigation of $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ Spinel Ferrite
Nanoparticles**

Çilem İYİÖZ

Advisor: Prof. Dr. Bekir ÖZÇELİK

Department of Physics

ABSTRACT

This study focused on the synthesis and characterization of $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrite nanoparticles at concentrations of $x = 0.0, 0.25, 0.50, 0.75$, and 1.0 using the sol-gel technique. The structural and magnetic properties of the synthesized nanomaterials were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). Magnetic properties were assessed with a vibrating sample magnetometer (VSM). Additionally, the magnetic behavior of the materials was evaluated at both 10 K and 300 K temperatures. For the $x = 1.0$ and 0.25 concentrations, the highest and lowest coercive field (H_c) values at 10 K were found to be 295.34 Oe and 134.48 Oe , respectively. The highest and lowest values for the $x=1.0$ and $x=0.0$ concentrations were determined as 78.68 Oe and 180.19 Oe , respectively. Moreover, for the same concentrations at 300 K , the highest and lowest values were determined for $x=1.0$ and $x=0.0$ as 78.68 Oe and 180.19 Oe , respectively. SEM analysis indicated that the average particle size of the nanoparticles ranged between 12 and 17 nm .

Keywords: Spinel, Magnetic Nanoparticles, SEM, FT-IR, VSM

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca saygı ve ilgi duyduğum Fizik alanında beni yüksek lisans yapabileceğim konusunda cesaretlendiren yüksek lisansın her aşamasında sabrını ve desteğini esirgemeyen, inancımı her daim yüksek tutmamda başrol olan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Bekir ÖZÇELİK' e teşekkür ederim.

Ömrüm boyunca hem akademik hem de kişisel anlamda idol olarak gördüğüm, sabrı, bilgeliği ve kıymetli tecrübeleriyle her zaman yoluma ışık tutan, her adımında desteğini ve güvenini hissettiğim, Prof. Dr. Ahmet EKİCİBİL 'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca deneyimlerini benimle paylaşan Dr. Gizem ÇETİN' e teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak tez yazım aşamasında her zaman destek gösteren Arş. Gör. İbrahim ERGİN' e teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim Annem Fahriye İYİÖZ, Babam Nihat Cengiz İYİÖZ, Amcam Sedat İYİÖZ ve kardeşim Süleyman Çağdaş İYİÖZ 'e, her daim yanımda olan değerli dostlarım Mediha ÖZKAPLAN 'a, Naz AĞIRMAN 'a ve diğer kıymetli dostlarıma teşekkür ederim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Manyetik malzemelerin sınıflandırılması (Narang ve Pubby 2021).	10
Çizelge 4.1. Toz örneklerinin $x=0$ 'dan $x=1$ 'e kadar FT-IR analizleri.....	52
Çizelge 4.2. Toz örneklerinin $x=0$ 'dan $x=1$ 'e kadar SEM analizleri.	58
Çizelge 4.3. Toz örneklerinin $x=0$ 'dan $x=1$ 'e kadar 10K'de manyetik analizleri.....	71
Çizelge 4.4. Toz örneklerinin $x=0$ 'dan $x=1$ 'e kadar 300K'de manyetik analizleri.....	75



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. <i>M-H</i> grafiği yorumlanması.....	12
Şekil 1.2. Spinel ferrit birim hücre kristal yapı formu [Ozgur ve ark. 2009]	16
Şekil 1.3. Spinel ferrit birim hücre kristal yapısının normal ve ters formları.....	17
Şekil 3.1. Agat havan ve tokmak	32
Şekil 3.2. Alumina Krozeler.....	32
Şekil 3.3. Kare fırın	32
Şekil 3.4. Pelet yapımı için kalıp seti	32
Şekil 3.5. Pelet press sistemi	33
Şekil 3.6. $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ numunelerinin hazırlanmasında kullanılan akış şeması.....	38
Şekil 3.7. Nitratlı bileşiklerin hassas terazide tartılması	39
Şekil 3.8. Nitratlı bileşiğin hidrolize edilmesi.....	39
Şekil 3.9. Çözeltinin sinterlenmesi (jel oluşumu)	39
Şekil 3.10. Elde edilen sipinel ferrit.....	40
Şekil 3.11. Sipinel ferritin kalsine edilmiş hali.	40
Şekil 3.12. Toz numunelerinin iletkenliğinin sağlanması için altın kaplama kabı (sağ) ve SEM cihazına yerleştirilen numuneler (sol).....	40
Şekil 3.13. FT-IR cihazının çalışma akışı şeması.....	41
Şekil 3.14. XRD cihazının görüntüsü	42
Şekil 3.15. VSM cihazının görüntüsü.	43
Şekil 4.1. $x=0.0$ numunesinin XRD sonucu	45
Şekil 4.2. $x=0.25$ numunesinin XRD sonucu	46
Şekil 4.3. $x=0.5$ numunesinin XRD sonucu	46
Şekil 4.4. $x=0.75$ numunesinin XRD sonucu	47
Şekil 4.5. $x=1.0$ numunesinin XRD sonucu	47
Şekil 4.6. Tüm numunelerin birleştirilmiş XRD sonucu.....	48
Şekil 4.7. $x=0.0$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.....	49
Şekil 4.8. $x=0.25$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.....	50
Şekil 4.9. $x=0.5$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.....	50
Şekil 4.10. $x=0.75$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.....	51
Şekil 4.11. $x=1.0$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.....	51
Şekil 4.12. Tüm numunelerin birleştirilmiş FT-IR sonuçları.....	52
Şekil 4.13. $x=0.0$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü.....	53
Şekil 4.14. $x=0.0$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.....	53
Şekil 4.15. $x=0.25$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü.....	54

Şekil 4.16. x=0.25 numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.....	54
Şekil 4.17. x=0.5 numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü.....	55
Şekil 4.18. x=0.5 numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.....	55
Şekil 4.19. x=0.75 numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü.....	56
Şekil 4.20. x=0.75 numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.....	56
Şekil 4.21. x=1.0 numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü.....	57
Şekil 4.22. x=1.0 numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.....	57
Şekil 4.23. x=0.0 numunesinin EDS analizi.	58
Şekil 4.24. x=0.25 numunesinin EDS analizi.	59
Şekil 4.25. x=0.5 numunesinin EDS analizi.	59
Şekil 4.26. x=0.0 numunesinin EDS analizi.	60
Şekil 4.27. x=1.0 numunesinin EDS analizi	60
Şekil 4.28. x=0.0 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu.....	61
Şekil 4.29. x=0.25 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu	62
Şekil 4.30. x=0.5 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu.....	62
Şekil 4.31. x=0.75 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu	63
Şekil 4.32. x=1.0 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu.....	63
Şekil 4.33. Tüm numunelerin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu.....	64
Şekil 4.34. x=0.0 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu	64
Şekil 4.35. x=0.25 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu	65
Şekil 4.36. x=0.5 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu	65
Şekil 4.37. x=0.75 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu	66
Şekil 4.38. x=1.0 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu	66
Şekil 4.39. Tüm numunelerin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu.....	67
Şekil 4.40. x=0.0 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi.....	68
Şekil 4.41. x=0.25 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi.....	69
Şekil 4.42. x=0.5 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi.....	69
Şekil 4.43. x=0.75 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi.....	70

Şekil 4.44. $x=1.0$ numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	70
Şekil 4.45. Tüm numunelerin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	71
Şekil 4.46. $x=0.0$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	72
Şekil 4.47. $x=0.25$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	72
Şekil 4.48. $x=0.5$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	73
Şekil 4.49. $x=0.75$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	73
Şekil 4.50. $x=1.0$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	74
Şekil 4.51. Tüm numunelerin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

B	: Malzeme içerisinde oluşan manyetik alan
G	: Manyetik alan birimi, Gauss
K α	: Anizotropi sabiti
H _C	: Kritik manyetik alan
K	: Sıcaklık birimi, Kelvin
M	: Manyetizasyon, mıknatıslanma
Oe	: Manyetik alan birimi, Oersted
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
T	: Manyetik alan birimi, Tesla
FT-IR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi spektroskopisi
XRD	: X-ışını kırınımı
VSM	: Titreşimli örnek manyetometresi
(hkl)	: Miller indisleri
C	: Curie Sabiti
χ	: Manyetik duygululuk
pbnm	: P : İlkel örgü, b, n, m : Bu harfler, örgü noktalarının simetrilerini ve kristal eksenlere göre nasıl yerleştirildiklerini gösterir.
Fd-3m (227)	: F: Yüzey merkezli (FCC) örgü sistemi. d: Özel bir simetri işlemi veya konum. -3m: Kübik kristal sisteminde, -3 simetri ögesi ve m simetri ögesidir. (227):Uluslararası Kristalografi Tablosu'nda Fd-3m grubunun indeks numarasıdır.

1. GİRİŞ

Mıknatıs, Miletli Thales (M.Ö. 634-546) tarafından ilk kez demirin doğal bir manyetik mineral olan manyetit, Fe_3O_4 , tarafından çekilmesi olarak tanımlandığından beri insanları büyülemiştir. Son 2500 yıl boyunca insanlık, manyetizmayı navigasyon, enerji üretimi ve yüksek teknoloji uygulamaları için geniş çapta kullanmıştır. Mıknatıs ve çekim, Miletli Thales'in ardından eşanlamlı olarak kullanılacak kadar tanınmış bir anlam kazanmıştır. Herhangi bir ayrıntılı bilimsel açıklama, Dirac'ın bir elektronu harici bir elektromanyetik alanda rölativistik olarak ele almasıyla ortaya çıkan spin kavramı gibi mistik bir alana girebilir. Spin, yerleşik bir bilimsel kavram haline gelmiş olup, manyetizmayı anlama temelimizi, spin manyetik momenti oluşturan elektron spinine ve elektronik yüklerin hareketine ve buna bağlı orbital manyetik momente dayandırırız. En ilkel manyetik malzemeler, kayıtlı tarihin başlangıcından önce deneyimlenmiş ve manyetizma, fiziğin en eski konularından biri olmuştur. Yaşlı Pliny'nin (M.S. 23-79) *Historia Naturalis* adlı eserine göre mıknatıs adı, demir çivili ayakkabılarının yere yapıştığını bulan Magnes adlı bir çobandan gelmiştir. Ayrıca, Aydın, yakınlarındaki demir nesneleri çeken cevheri bilen Asya Minör'deki Magnesia'nın sakinleri Magnetlerden gelmiş olması da muhtemeldir. Yaklaşık 1500 yılından beri, navigasyonda kullanılmasından dolayı bu tür manyetik cevheri tanımlamak için lodestone adı kullanılmıştır. Modern dünyada lodestone'u, Dünya'nın manyetik alanına göre manyetik olarak hizalanmış spinel manyetiti ile ilişkilendiririz; bu hizalanma, sıcak lavanın soğuma süreci sırasında Dünya'nın manyetik alanının etkisinin bir sonucudur (Stohr ve Siegmann 2006).

Manyetik malzemeler, harici bir manyetik alana yerleştirildiklerinde manyetize olabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, keşfedildikleri andan itibaren insanları olağanüstü özellikleriyle büyülemişlerdir. Erken dönem insanları tarafından yön bulma amacıyla kullanılan lodestone, aslında manyetit Fe_3O_4 'tü. Lodestone, doğal manyetik özellikleri sayesinde ilk pusulaların yapımında kullanılmış ve insanların dünyayı keşfetmelerine yardımcı olmuştur. Manyetik malzemelerin bu benzersiz özellikleri, zamanla teknolojinin gelişmesine ve modern manyetik cihazların icat edilmesine de katkı sağlamıştır (Pullar 2012). Doğal manyetizmasına bağlı olarak, bu malzemeler harici manyetik alan tarafından ya çekilir ya da itilir. Toplu manyetik duyarlılığa bağlı olarak, manyetik malzemeler beş temel kategoriye ayrılabilir: diyamanyetik, paramanyetik, ferromanyetik, ferrimanyetik ve antiferromanyetik (Narang ve Pubby 2021)

1.1. Manyetizma

Manyetizma, elektrik yüklerinin hareketi sonucu oluşan manyetik alanların incelenmesini kapsayan hem klasik fizik hem de modern fizik açısından büyük öneme sahip bir disiplindir. Manyetizmanın prensipleri, elektromanyetizma teorisinin temelini oluşturarak, doğanın temel kuvvetlerinin anlaşılmasında ve birçok ileri teknolojinin geliştirilmesinde kritik rol oynar. Manyetizma, fiziksel dünya ve teknolojik gelişmeler açısından büyük bir öneme sahiptir.

Manyetizmanın temel prensipleri, manyetik alanların ve bu alanların madde üzerindeki etkilerinin anlaşılmasını içerir. Manyetizma, elektrik ve manyetik alanların birbiriyle etkileşimi üzerine kurulu olan elektromanyetizma teorisinin bir parçasıdır. Bu teori, Maxwell denklemleri ile matematiksel olarak ifade edilmiş olup ve modern fiziğin temel taşlarından birisi olarak bilinir.

1.1.1. Manyetizmanın Tarihsel Bir Bakış Açısı

Antik Çağlar: Manyetizmanın ilk gözlemleri Antik Çağlara kadar uzanır. M.Ö. 6. yüzyılda, Çinli bilim insanı Mozi (Moshizi) manyetik taşları tanımladı ve bunların doğal manyetizma gösterdiğini belirtti. Aynı dönemlerde Yunanlı filozoflar, manyetizma hakkında çeşitli teoriler geliştirdiler.

Ortaçağ: Manyetizma hakkındaki çalışmalar Ortaçağ'da sınırlıydı. Ancak Ortaçağ Avrupa'sında pusula gibi manyetizma ile ilgili bazı araçların kullanımı yaygındı. Bu dönemde manyetik pusulanın kuzey-güney yönündeki yönelimi, denizcilerin seyirlerinde kritik bir rol oynadı.

Yeniden Keşifler Çağı: 16. yüzyılın sonları ve 17. yüzyılın başlarında, bilim adamları manyetizma üzerine daha sistematik deneyler yapmaya başladılar. William Gilbert, 1600 yılında "De Magnete" adlı eserinde manyetizma üzerine detaylı bir araştırma yayımladı ve manyetizmanın dünyanın kendisinin bir özelliği olduğunu ileri sürdü.

Elektromanyetizmanın Keşfi: 19. yüzyılın başlarında, manyetizma ve elektrik arasındaki ilişki daha ayrıntılı olarak incelenmeye başlandı. Hans Christian Ørsted, 1820 yılında bir telin elektrik akımına maruz kaldığında manyetik bir alan oluşturduğunu keşfetti. Bu keşif, elektromanyetizmanın temelini oluşturdu ve manyetizma ile elektrik arasındaki bağlantıyı güçlendirdi.

James Clerk Maxwell ve Elektromanyetizma Teorisi: 19. yüzyılın ikinci yarısında, James Clerk Maxwell manyetizma ve elektrik üzerine kapsamlı bir teori geliştirdi. Maxwell'in denklemleri, manyetik alanlar ve elektrik alanları arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak tanımladı ve elektromanyetizmanın temel yasalarını ortaya koydu.

Modern Manyetizma: 20. yüzyıl ve sonrasında, manyetizma üzerine çalışmalar hızla ilerledi. Manyetizmanın uygulamalı yönleri, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tıbbi görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesinde ve manyetik veri depolama gibi teknolojilerde kullanılmıştır. Manyetizma, doğanın temel bir özelliğini keşfetme çabasıyla başlayan eski çağlardan modern bilimin karmaşık alanlarına uzanan bir serüveni temsil eder.

1.1.2. Manyetik Malzemelerin Keşfi ve Gelişimi

Manyetizma, malzemelerin manyetik özelliklerini anlamak ve geliştirmek için de önemli bir rol oynamıştır. 19. yüzyılın sonlarına doğru, manyetik malzemelerin özellikleri üzerine daha derinlemesine araştırmalar yapılmaya başlandı. Bu çalışmalar, manyetik alanların üretiminde ve manyetik cihazların tasarımında önemli ilerlemelere yol açtı.

Manyetizma ve Modern Fizik: Manyetizma, modern fizik teorisinin birçok yönünü etkilemiştir. Elektromanyetizma, kuantum mekaniği ve genel görelilik gibi temel fizik teorilerinin gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Manyetizma, fizikçilerin doğanın derinliklerini anlamak için kullandıkları temel bir araç olmaya devam etmektedir.

Teknolojik Uygulamalar: Manyetizma, birçok modern teknolojik uygulamanın temelini oluşturur. Manyetik malzemeler, elektrik motorlarından manyetik rezonans görüntüleme (MRI) cihazlarına kadar birçok alanda kullanılır. Manyetik depolama cihazları, manyetik sensörler, manyetik levitasyon sistemleri gibi birçok teknolojik gelişme, manyetizmanın anlaşılması ve kullanılmasına dayanır.

Manyetizma ve Uzay Bilimi: Manyetik alanlar, gezegenlerin ve yıldızların oluşumu ve evrimi üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Dünya'nın manyetik alanı, yaşamın korunmasında kritik bir rol oynar ve güneş rüzgarı gibi uzaydaki manyetik alanlardan kaynaklanan etkilere karşı koruma sağlar. Manyetik alanlar ayrıca astronomik gözlemler ve uzay keşifleri için de önemlidir. Manyetizma, doğanın temel bir özelliğini anlamaya yönelik keşiflerden, modern teknolojilerin geliştirilmesine ve evrenin derinliklerini anlamaya kadar geniş bir yelpazede etkiler ve uygulamalar sunar.

Manyetizma ve Malzeme Bilimi: Manyetik malzemelerin özellikleri ve davranışları, malzeme bilimi alanında önemli bir araştırma konusudur. Manyetik malzemelerin mikroyapıları ve manyetik alanlara tepkileri üzerine yapılan araştırmalar, manyetik cihazların tasarımı ve manyetik depolama teknolojilerinin geliştirilmesi için önemli ipuçları sağlar.

Nanomanyetizma, manyetizma olayının nanometre ölçeğindeki yapılar ve malzemeler üzerindeki etkilerini inceleyen bir araştırma alanıdır. Nanoteknoloji ve manyetizmanın kesişiminde bulunan bu alan, hem temel bilimsel araştırmalara hem de çeşitli uygulamalara ilham vermektedir.

Nanomanyetik Malzemelerin Üretimi: Nanomanyetik malzemeler, genellikle nano boyutta parçacıklar veya ince filmler halinde üretilir. Bu malzemeler, manyetik metallerin veya bileşiklerin özel üretim teknikleri kullanılarak nano boyutlara küçültülmesiyle elde edilir. Bu teknikler arasında fiziksel buhar biriktirme, kimyasal çöktürme, elektrokimyasal sentez ve top-down veya bottom-up yaklaşımlar gibi yöntemler bulunur.

Manyetik Nanoparçacıkların Özellikleri: Nano boyutlu manyetik parçacıkların özellikleri, büyük ölçekteki malzemelerden farklılık gösterebilir. Örneğin, manyetik nanoparçacıkların manyetik momentleri büyük ölçekteki malzemelere göre daha farklı yönlerde hizalanabilir ve manyetik alanlara daha hassas tepkiler verebilir. Ayrıca yüzey etkileri ve kuantum mekaniği gibi faktörler, nano boyutlu manyetik malzemelerin özelliklerini belirleyebilir.

Manyetik Özelliklerin Kontrolü: Nanomanyetik malzemelerin özellikleri genellikle üretim sürecinde kontrol edilebilir. Malzemenin kimyasal bileşimi, boyutu, şekli ve yapısal düzenlemeleri gibi faktörler, malzemenin manyetik özelliklerini belirleyebilir. Bu kontrol, manyetik özellikleri belirli uygulamalara uygun hale getirmek için kullanılır.

Uygulamalar: Nanomanyetik malzemelerin çeşitli uygulamaları vardır. Bunlar arasında manyetik depolama cihazları, manyetik sensörler, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) kontrast maddeleri, biyomedikal uygulamalar, manyetik hipertermi (kanser tedavisi için kullanılan bir yöntem), manyetik sıvılar ve manyetik nano parçacık taşıyıcı sistemler bulunur.

Manyetizma ve Nanoteknoloji: Nanomanyetizma, manyetizma olgusunun nanometre ölçeğindeki yapılar ve malzemeler üzerindeki etkilerini inceleyen bir alan olarak nanoteknolojinin önemli bir parçasıdır. Nanoteknoloji, malzemelerin ve cihazların nanometre ölçeğinde kontrol edilmesini ve tasarlanmasını içerirken, nanomanyetizma bu süreçte manyetik özelliklerin anlaşılması ve kullanılmasına odaklanır.

Manyetizma ve Kuantum Mekanik: Nanomanyetizmanın araştırıldığı bir başka önemli alan kuantum manyetizmasıdır. Kuantum mekanik, atomik ve moleküler ölçekteki parçacıkların davranışını açıklar. Nanomanyetizma, kuantum mekanikinin manyetik malzemeler üzerindeki etkilerini inceleyerek, nano boyutlu manyetik yapıların ve parçacıkların özelliklerini anlamamıza yardımcı olur.

Manyetik Nanoparçacıkların Sentezi: Manyetik nanoparçacıkların sentezi, nano manyetizmanın temel bileşenlerinden biridir. Bu parçacıklar, birçok farklı yöntemle sentezlenebilir, ancak en yaygın yöntemler arasında termal ayrışma, kimyasal çöktürme, sulu kimyasal reaksiyonlar ve mikro elektromekanik sistemler (MEMS) bulunur. Bu yöntemler, belirli büyüklüklerde, şekillerde ve manyetik özelliklerde nanoparçacıklar elde etmek için kullanılır.

Manyetik Malzemelerin Karakterizasyonu: Nanomanyetik malzemelerin karakterizasyonu, bu malzemelerin yapısal, manyetik ve optik özelliklerini belirlemek için önemlidir. Manyetik rezonans görüntüleme (MRG), manyetik ölçümler, elektron mikroskobu görüntüleme teknikleri ve manyetik alan altında manyetik ölçümler, nanomanyetik malzemelerin karakterizasyonunda sıkça kullanılan yöntemlerdir.

Biyomedikal Uygulamalar: Nanomanyetik malzemelerin biyomedikal uygulamaları, kanser tedavisi, hedeflenmiş ilaç teslimi, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) kontrast maddeleri ve biyomanyetik algılama gibi alanlarda büyük potansiyele sahiptir. Manyetik nanoparçacıklar, hücrelerin içine girebilir, biyolojik hedeflere taşınabilir ve manyetik alanlar altında kontrol edilebilir, bu da birçok biyomedikal uygulamada kullanılmalarını sağlar.

1.1.3. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması

Manyetik malzemeler dışarıdan uygulanan manyetik alana karşı verdikleri cevaba göre sınıflandırılırlar. Bunlar;

- **Diamanyetizma:** Belirli malzemelerin dış bir manyetik alan uygulandığında manyetik alanı zayıflatma eğilimini tanımlar. Diamanyetik maddeler, manyetik alana maruz kaldıklarında, manyetik alanın etkisi altında zayıf bir manyetik moment oluştururlar,

ancak bu moment manyetik alanın yönüne zıttır. Diamanyetik maddeler, dış manyetik alan uygulandığında küçük bir karşıt manyetik alan oluştururlar ve bu manyetik alan kaldırıldığında bu karşıt manyetik etki hemen kaybolur. Bu etki, maddelerdeki elektronların yörüngesel hareketleri nedeniyle ortaya çıkar ve tüm maddelerde az ya da çok bulunur.

Manyetik ve manyetik olmayan atomları içeren manyetik malzemeler, doğaları gereği diamagnetik özellikler taşır. Ancak, bu diamagnetik etki son derece zayıf olup, malzemenin içinde bulunan manyetik atomların güçlü etkileriyle neredeyse tamamen bastırılmaktadır. Öte yandan, süperiletken malzemeler, bu konuda dikkat çekici bir farklılık gösterir. Bu tür malzemeler, olağanüstü bir diamagnetizma sergileyerek, dış manyetik alanlara karşı son derece güçlü bir direnç geliştirme yeteneğine sahiptir. Süperiletkenlerin bu özel özelliği, onların duyarlılık katsayısının 1'e eşit olmasıyla kendini gösterir; bu da, süperiletkenlerin manyetik alanları tamamen dışarıda bıraktıkları anlamına gelir. Dolayısıyla, süperiletken malzemeler, manyetik alanların etkisini tamamen ortadan kaldırarak benzersiz bir davranış sergilerler (Lacheisserie, Gignoux ve Springer 2005)

Diamanyetik Malzemelerin Özellikleri

- **Zayıf manyetik tepki:** Diamanyetik maddeler, manyetik alanın etkisi altında zayıf bir manyetik moment oluştururlar. Bu moment, uygulanan manyetik alanın yönüne zıt yönlüdür.
- **Geçici manyetizasyon:** Diamanyetik malzemeler, manyetik alanın etkisi altında kalıcı bir manyetik moment oluşturmazlar. Yani, uygulanan manyetik alan ortadan kalktığında, diamanyetik özellikler de kaybolur.
- **Lenz yasası:** Diamanyetik malzemeler, Lenz yasasına uyarlar. Bu yasa, manyetik bir alana maruz kalan bir malzemenin içinde bir akım indükler ve bu akım, manyetik alanın değişimine zıt yönlüdür. Bu, manyetik alanın malzemedan itilmesine veya dışlanmasına yol açar.

Örnekler

- Bakır (Cu)
- Bizmut (Bi)
- Gümüş (Ag)
- Altın (Au)
- Grafit
- Su (H₂O)

- Civa (Hg)

Diamagnetik malzemelere örnek olarak çoğu organik madde, cıva (Hg) gibi metaller ve kritik sıcaklığın altındaki süperiletkenler verilebilir (Spiringer ve Heidelberg 2008). Çizelge 1 de manyetik malzemelerin sınıflandırılması ilgili özellikleri ve örnekleri içermektedir.

- **Paramanyetizma:** Manyetik özellikleri olan maddelerin bir sınıfıdır ve manyetik alanla etkileşimde bulunur. Paramanyetik maddeler, dış bir manyetik alan uygulandığında manyetik momentleri (manyetik dipoller) hizalanma eğilimindedir. Bu hizalanma manyetik alanın yönüne paralel olur ve manyetik alan kaldırıldığında hizalanma kaybolur.

Paramanyetizmanın Temel Özellikleri

- **Kutuplanma (Yönlendirme):** Paramanyetik maddeler, dış bir manyetik alan uygulandığında manyetik momentlerini hizalar. Bu hizalanma manyetik alanın yönüne paralel olur.
- **Geçici Manyetizasyon:** Manyetik alan kaldırıldığında, paramanyetik maddeler yönelimlerini kaybeder ve manyetik özelliklerini yok olur. Bu nedenle, paramanyetik maddeler kalıcı manyetizasyon göstermezler.
- **Curie Yasası:** Paramanyetik maddelerin manyetik duygunluğu, sıcaklık ile ters orantılı olarak değişir. Bu ilişki, Curie Yasası ile ifade edilir:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (1)$$

Burada, χ : manyetik duygunluk, C : Curie sabiti ve T : mutlak sıcaklığı (Kelvin cinsinden)

Bu yasa, sıcaklık arttıkça termal enerjinin manyetik dipollerin yönelmesini zorlaştırdığını ve dolayısıyla manyetik duyarlılığın azaldığını ifade eder. Paramanyetik maddelerin manyetik duygunluğu pozitifdir, bu da onların dış manyetik alan tarafından çekildiği anlamına gelir.

- **Elektron Konfigürasyonu:** Paramanyetik davranış, çoğunlukla atom veya molekülün eşleşmemiş elektronlarına bağlıdır. Eşleşmemiş elektronların manyetik momentleri dış manyetik alan tarafından yönlendirilir.

Örnekler:

- Alüminyum (Al)
- Platinyum (Pt)

- Gadolinyum (Gd) (yüksek sıcaklıklarda)

Paramanyetik maddeler, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi tıbbi görüntüleme teknolojilerinde, manyetik ayırma tekniklerinde ve bazı manyetik depolama cihazlarında kullanılabilir.

- **Ferromanyetizma:** Bir malzemenin manyetik alan içinde kendiliğinden kalıcı bir manyetik alan oluşturma yeteneği olarak tanımlanır. Ferromanyetik malzemeler, içerisindeki atomların manyetik momentlerinin bir araya gelerek uzun menzilli bir manyetik düzen oluşturduğu kristal yapıya sahiptirler. Bu düzen, maddenin manyetik özelliklerinin güçlü olmasını sağlar. Bu maddeler, manyetik alan içinde kendiliğinden kalıcı bir manyetizasyon gösterirler. Bu kalıcı manyetizasyon, malzeme uygulanan manyetik alanı kaldırdıktan sonra bile devam eder. Ferromanyetik maddeler, atomik veya moleküler düzeyde manyetik momentlere sahip olan ve bu momentlerin bir araya gelerek uzun menzilli bir manyetik düzen oluşturduğu kristal yapıya sahiptirler. Bu düzen, malzemenin manyetik özelliklerinin güçlü olmasını sağlar.

Ferromanyetik Malzemelerin Özellikleri

- **Manyetik doyunluk:** Ferromanyetik maddeler, uygulanan manyetik alanın şiddetini artırdıkça, bir noktada doygunluğa ulaşır. Yani, belirli bir noktadan sonra daha fazla manyetik alan uygulanması, malzemenin manyetizasyonunda artışa neden olmaz.
- **Ters manyetik alan:** Manyetik alan kaldırıldığında bile ferromanyetik maddeler kendi manyetik alanlarını korurlar. Bu, malzemenin kendiliğinden kalıcı bir manyetizasyon gösterdiği anlamına gelir.
- **Curie sıcaklığı:** Ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri, belirli bir sıcaklık olan Curie sıcaklığına kadar değişir. Curie sıcaklığının üzerinde, malzeme ferromanyetik özelliklerini kaybeder ve paramanyetik hale gelir.

Ferromanyetik maddeler, manyetik depolama cihazları (sabit diskler, manyetik bantlar), manyetik kilitler, manyetik malzemelerin imalatı, manyetik aygıtlar ve manyetik alanlarda kullanılan sensörler gibi birçok uygulamada önemli bir rol oynarlar. Ayrıca, elektromanyetik cihazlar, transformatörler ve indüktörler gibi birçok elektriksel cihazda da ferromanyetik malzemeler kullanılır. Bu tez kapsamında üretilen nanoparçacıkların manyetik sonuçları ferromanyetik özellik göstermektedir.

- **Antiferromanyetizma:** Antiferromanyetik maddeler, manyetik alan içinde kendiliğinden düzenli bir manyetizasyon gösterirler, ancak bu manyetizasyonun net

etkisi genellikle sıfıra yakındır. Bunun nedeni, antiferromanyetik malzemelerin içindeki manyetik momentlerin birbiriyle eşit ve zıt yönlerde yönlendirilir.

Anti-ferromanyetik Maddelerin Özellikleri

- **Anti-paralel manyetik düzen:** Anti-ferromanyetik malzemelerdeki manyetik momentler, komşu atomlar arasında anti-paralel bir düzende hizalanmıştır. Yani, bir atomun manyetik momenti diğerinin manyetik momenti ile tamamen zıttır.
- **Manyetik doyumluk eksikliği:** Anti-ferromanyetik malzemeler, uygulanan manyetik alana karşı doyumluk göstermezler. Bunun yerine, manyetik momentlerin anti-paralel düzeni, net manyetik bir etki göstermez.
- **Curie sıcaklığı:** Anti-ferromanyetik malzemeler de Curie sıcaklığına sahiptir. Curie sıcaklığının altında, anti-ferromanyetik düzen belirgin hale gelir ve malzeme manyetik hale gelir.

Anti-ferromanyetik malzemeler, manyetik depolama cihazlarında kullanılmazlar, ancak manyetik alan sensörleri, manyetik alanların algılanması ve manyetik geçişli hafıza gibi uygulamalarda önemli bir rol oynarlar. Ayrıca, antiferromanyetik materyaller, manyetik bir ortamda diğer malzemelerin manyetik özelliklerini değiştirebilir ve kontrol edebilirler. Bu özellikler, spintronik ve manyetoelektrik cihazlar gibi ileri teknolojilerin geliştirilmesinde potansiyel uygulamalar sunar.

Örnekler:

- Krom (Cr)
- Manganez Oksit (MnO)
- Nikel Oksit (NiO)
- Hematit (Fe₂O₃)
- **Ferrimanyetizma:** Malzemelerin atomik veya moleküler manyetik dipol momentlerinin (spinler) birbirine paralel olarak hizalanması sonucunda, güçlü ve kalıcı bir manyetik alan oluşturma eğilimidir. Ferromanyetik maddeler, dış manyetik alan uygulandığında manyetize olur ve bu manyetizasyon manyetik alan kaldırıldıktan sonra da korunur. Bu malzemeler, dış manyetik alan olmaksızın bile kalıcı bir manyetik alan oluşturabilirler.

Ferromanyetizmanın Temel Özellikleri

- **Manyetik Histerezis:** Ferromanyetik malzemeler, manyetik alan uygulanıp kaldırıldığında manyetizasyonlarını tamamen kaybetmezler. Bu özellik, malzemenin

manyetizasyon-mıknatıslaşma eğrisinde (histerezis döngüsü) gözlemlenebilir. Histerezis döngüsü, malzemenin kalıcı manyetik özelliklerini ve manyetik retentivitesini (kalan manyetizasyonu) tanımlar.

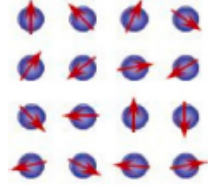
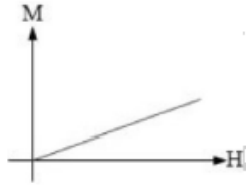
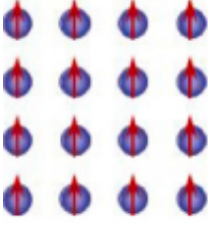
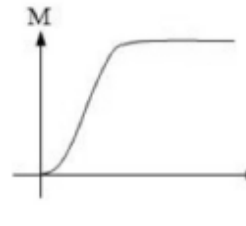
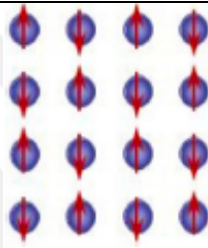
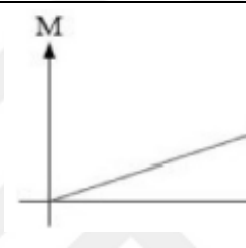
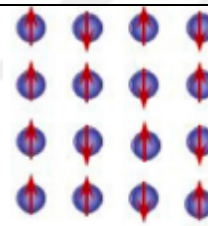
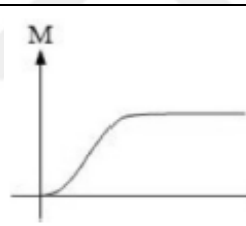
- **Manyetik Domenler:** Ferromanyetik maddeler, küçük manyetik bölgelerden (domenler) oluşur. Her domen, içindeki manyetik momentlerin paralel hizalandığı bir bölgedir. Domenlerin yönü, dış manyetik alanın etkisiyle hizalanarak net manyetizasyonu oluşturur.
- **Curie Sıcaklığı (T_C):** Ferromanyetik maddelerin manyetik düzenlemelerinin kaybolduğu ve paramanyetik hale geldikleri belirli bir sıcaklık vardır. Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı denir. Curie sıcaklığının üstünde, malzemenin termal enerjisi manyetik dipollerin düzenlenmesini bozar ve malzeme paramanyetik hale gelir.
- **Manyetik Alan Güçlendirme:** Ferromanyetik malzemeler, dış manyetik alanın şiddetini büyük ölçüde artırabilir. Bu etki, manyetik geçirgenlik (μ) ile ölçülür ve ferromanyetik maddelerde bu değer oldukça yüksektir.

Ferrimanyetik malzemeler, manyetik depolama cihazlarında, manyetik alan sensörlerinde, manyetik alanların algılanması ve manyetik geçişli hafıza gibi uygulamalarda önemli bir rol oynarlar. Bu özellikler, spintronik ve manyetoelektrik cihazlar gibi ileri teknolojilerin geliştirilmesinde potansiyel uygulamalar sunar. Manyetik depolama, elektrik motorları ve jeneratörlerde manyetik verimliliği arttırmak, manyetik sensörler ve transformatörlerde güç iletimi, güçlü, kalıcı mıknatıslar tıbbi ve endüstriyel alanda geniş kullanım alanlarına sahiptirler.

Örnekler:

- Demir (Fe)
- Kobalt (Co)
- Nikel (Ni)
- Samaryum Kobalt (SmCo) mıknatısları
- Gadolinyum (Gd) (düşük sıcaklıklarda)
- Manyetik çelikler ve alaşımlar (örn. alnikolar)
- Neodimyum Demir Bor (NdFeB) mıknatısları

Çizelge 1.1. Manyetik malzemelerin sınıflandırılması (Narang ve Pubby 2021).

Tür	Manyetik momentleri	M-H grafiği	Örnekler
Paramanyetik			Pirit, Biyotit, Siderit, Alüminyum, Geçiş metali iyonları
Ferromanyetik			Demir, Hidrojen, Kobalt, Nikel
Antiferromanyetik			Manganez, Krom, Hematit
Ferrimanyetik			Manyetit, Maghemit, Ferritler
Diamanyetik			Kuvars, Kalsit, su, İnert gazlar, organik Bileşikler

1.1.4. Manyetik Birimler

- **M (Manyetizasyon):** Manyetizasyon (M), bir malzemenin manyetik moment yoğunluğunu ifade eder ve birim hacim başına manyetik moment olarak tanımlanır. Bir malzeme manyetik bir alana maruz kaldığında, içindeki atomik manyetik momentler hizalanır ve bu hizalanma manyetizasyon olarak adlandırılır. Manyetizasyon, malzemenin manyetik özelliklerinin bir ölçüsüdür ve birimi Tesla/metrekare (T/m^2) cinsindendir.

- **H (Manyetik Alan Şiddeti):** Manyetik alan şiddeti (H), manyetik alanın kuvvetini ve yönünü tanımlayan bir vektör büyüklüktür. H , bir manyetik alanın kaynağı olan akım taşıyan iletkenlerin veya manyetik dipollerin ürettiği alanı ifade eder. Manyetik alan birimi amper/metre (A/m) cinsindendir. Manyetik alan, elektrik akımlarının ve serbest manyetik kutupların oluşturduğu manyetik alanın doğrudan bir ölçüsüdür.
- **Manyetik Duygunluk (χ):** Bir malzemenin manyetik alan altında manyetizasyonunun (M) bir ölçüsüdür. Manyetik duyarlılık, uygulanan manyetik alan (H) ile malzemenin manyetizasyonu arasındaki oran olarak tanımlanır.

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2)$$

Manyetik duyarlılık, malzemenin mikroskopik manyetik momentlerinin makroskopik manyetik özelliklere nasıl katkıda bulunduğunu anlatarak malzemenin manyetik alanlara karşı gösterdiği tepkiyi ölçen önemli bir parametredir ve malzemelerin manyetik özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir rol oynar.

- **B (Manyetik Akı Yoğunluğu):** Manyetik akı yoğunluğu (B), manyetik alanın bir malzeme içinde veya boşlukta oluşturduğu manyetik kuvvetin yoğunluğunu ifade eder. B , aynı zamanda manyetik indüksiyon olarak da adlandırılır ve manyetik alanın etkisi altında oluşan kuvvet hatlarının yoğunluğunu belirtir. B 'nin birimi Tesla (T) cinsindendir ve bir Tesla, bir metrekarelik alanda bir Weber'lik manyetik akıya eşittir. Manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti (H) ve malzemenin manyetik geçirgenliği (μ) ile ilişkilidir:

$$B = \mu H \quad (3)$$

- **Manyetik Geçirgenlik (μ):** Bir malzemenin manyetik alanı ne kadar iyi ilettiğini belirten bir ölçüdür. Mutlak ve bağıl manyetik geçirgenlik olarak iki temel bileşene ayrılır. Manyetik geçirgenlik, manyetik malzemelerin davranışlarını anlamak ve çeşitli uygulamalarda malzemelerin performansını belirlemek için kullanılır.
- **Mutlak Manyetik Geçirgenlik (μ):** Mutlak manyetik geçirgenlik, bir malzemenin manyetik geçirgenliğinin vakumunkiyle karşılaştırılmadan ölçülen değeridir.
- **Bağıl Manyetik Geçirgenlik (μ_r):** Bağıl manyetik geçirgenlik, bir malzemenin manyetik geçirgenliğinin vakumunkiyle karşılaştırılmasıdır.

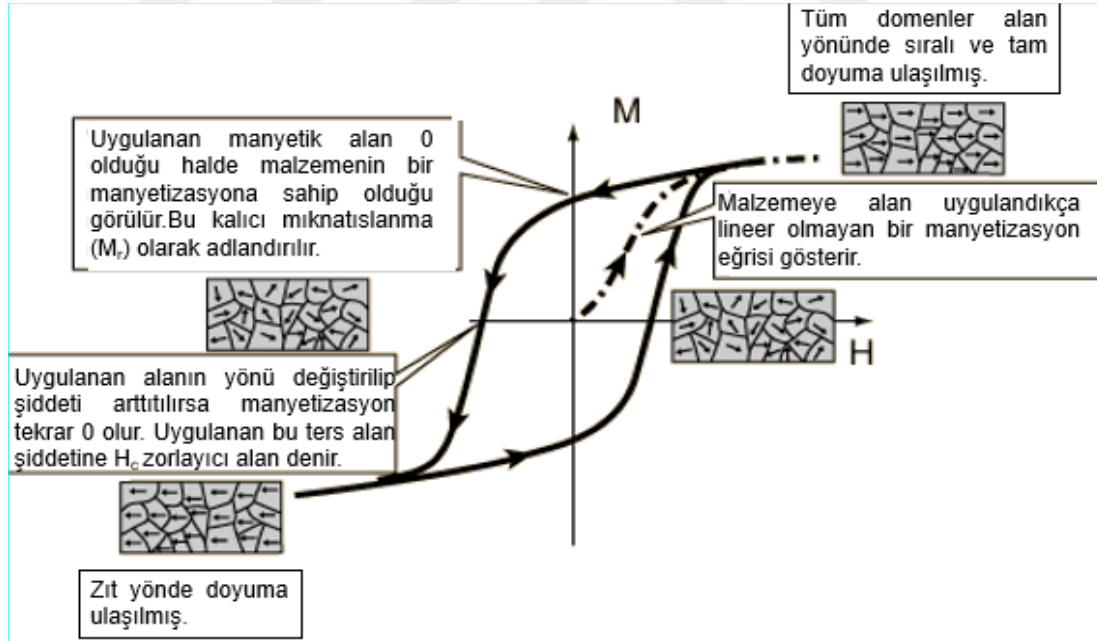
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

μ_0 : vakumun manyetik geçirgenliğidir ve yaklaşık olarak $4\pi \times 10^{-7}$ H/m'dir.

- **İlişkiler ve Özellikler:** Bu üç büyüklük arasında belirli bir ilişki vardır. Manyetik alan şiddeti (H), manyetik alanın kaynağı olan akımlar veya serbest manyetik kutuplar tarafından oluşturulur. Manyetik akı yoğunluğu (B) ise, Manyetik alanın malzeme içindeki etkisini ve malzemenin manyetik özelliklerini yansıtır. Manyetizasyon (M), malzemenin manyetik cevabını ve içindeki manyetik momentlerin yoğunluğunu temsil eder. B , H ve M arasındaki ilişki genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (5)$$

Sonuç olarak, M , H ve B terimleri manyetizmanın temel kavramları olup, manyetik malzemelerin ve manyetik alanların anlaşılmasında kritik öneme sahiptir ve M ile H arasındaki ilişki şekil 1.1'de açıklanmıştır.



Şekil 1.1. M - H grafiği yorumlanması

1.1.5. Nanopartiküller

Nanopartiküller, boyutları nanometre (nm) ölçeğinde olan (genellikle 1-100 nm aralığında) partiküllerdir. Bu küçük boyutları, onları hem fiziksel hem de kimyasal özellikler açısından benzersiz

kılar. Nanopartiküller, malzeme biliminden tıba, elektronikten çevre bilimlerine kadar birçok alanda önemli uygulamalara sahiptir.

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Nanopartiküllerin özellikleri, makro ölçekli benzerlerinden önemli ölçüde farklı olabilir. Bu özellikler şunları içerir:

- **Yüksek Yüzey Alanı:** Nanopartiküllerin küçük boyutları, büyük bir yüzey alanına sahip olmalarını sağlar. Bu, kimyasal reaktiviteyi ve katalitik aktivitelerini artırır.
- **Kuantum Etkileri:** Nanopartiküller, boyutları kuantum mekaniği ile tanımlanan ölçeklere yaklaştıkça, kuantum etkileri gösterebilirler. Bu, özellikle optik, elektronik ve manyetik özelliklerde belirgin değişikliklere yol açar.
- **Optik Özellikler:** Nanopartiküller, boyutlarına ve şekillerine bağlı olarak farklı optik özellikler sergilerler. Bu özellikler, plazmonik rezonans ve kuantum noktalardan kaynaklanır.

Üretim Yöntemleri

Nanopartiküller, iki ana yöntemle üretilebilir:

- **Top-Down Yöntemleri:** Daha büyük parçacıkların mekanik öğütme veya diğer fiziksel işlemlerle daha küçük parçalara ayrılmasıdır.
- **Bottom-Up Yöntemleri:** Atom veya molekül seviyesindeki yapı taşlarının bir araya gelerek nanopartikülleri oluşturmasıdır. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve sol-jel sentezi gibi yöntemler bu kategoriye girer.

Uygulama Alanları

Nanopartiküllerin geniş bir uygulama yelpazesi vardır:

- **Tıp ve Biyoteknoloji:** İlaç taşıma sistemleri, kanser tedavileri, biyosensörler ve görüntüleme ajanları olarak kullanılırlar.
- **Elektronik ve Optoelektronik:** Yarı iletken nanokristaller, kuantum noktalar ve diğer nano ölçekli yapı taşları, yüksek performanslı elektronik cihazların ve fotonik sistemlerin geliştirilmesinde kullanılır.
- **Malzeme Bilimi:** Nanokompozitler, güçlü ve hafif malzemeler üretmek için kullanılır. Nanoteller ve nanolifler, mekanik ve elektriksel özelliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynar.

- **Çevre Bilimleri:** Kirleticilerin giderilmesi, su arıtma ve çevre temizliği gibi alanlarda kullanılırlar. Nanopartiküller, ağır metallerin ve organik kirleticilerin etkili bir şekilde temizlenmesini sağlar.
- **Enerji:** Güneş hücreleri, yakıt hücreleri ve bataryalar gibi enerji üretim ve depolama sistemlerinde kullanılırlar. Nanopartiküller, enerji dönüşüm verimliliğini artırabilir ve yeni enerji çözümleri sunabilir.

Sonuç olarak, nanopartiküller, sahip oldukları benzersiz özellikler sayesinde bilim ve teknolojiye devrim niteliğinde gelişmelere yol açmaktadır. Bu küçük ancak etkili parçacıklar, birçok endüstri ve araştırma alanında büyük potansiyel sunmaktadır.

1.1.6. Manyetik Nanopartiküller

Ferritler: Manyetik malzemeler, dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında kendilerini manyetize eden özel maddelerdir. Bu malzemeler keşfedildiği günden bu yana, insanlığın ilgisini çeken çeşitli dikkat çekici özelliklere sahip olmuştur. Örneğin, erken dönemlerde yön bulma amacıyla kullanılan ve "Manyetik Taş" olarak bilinen malzeme, aslında doğal bir mineral olan magnetit (Fe_3O_4) idi. Doğal manyetizma açısından değerlendirildiğinde, bu tür malzemeler, uygulanan dış manyetik alana göre ya çekim kuvvetiyle içlerine doğru yönelir ya da itme kuvvetiyle dışarı doğru itilirler. Bu davranışları, kütle manyetik duyguluk (χ) olarak bilinen bir parametre ile ifade edilir. Manyetik malzemeler, bu duyguluk katsayılarına göre beş temel kategoriye ayrılmaktadır: diyamanyetik, paramanyetik, ferromanyetik, ferrimanyetik ve antiferromanyetik. Her bir kategori, malzemenin manyetik alanlara karşı gösterdiği farklı tepkileri ve özellikleri tanımlar. Bu sınıflandırma, malzemelerin manyetik davranışlarının daha iyi anlaşılmasını ve uygulama alanlarında uygun seçimlerin yapılmasını sağlar.

Ferritler, metal katyonlarının ve oksijen anyonlarının düzenli bir şekilde kristal örgü yapıları oluşturarak yer aldığı ferrimanyetik malzemeler grubuna aittir. Bu malzemeler, farklı metal iyonlarının çeşitli geometrik dizilimler sergileyerek ferrimanyetik özelliklerin ortaya çıkmasını sağlar. Ferritlerin kristal yapısı, manyetik alanlar altında belirli bir düzenleme ve yönlendirme göstererek, onları elektronik ve manyetik uygulamalarda son derece yararlı hale getirir. Bu nedenle, ferritler, hem yapısal hem de manyetik özellikler açısından önemli bir malzeme kategorisini temsil eder. Ferritler hem elektriksel dirençlidir hem de manyetik olarak ferrimanyetiktir. Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nden Yogoro Kato ve Takeshi Takei, ferrit bileşiğini ilk kez 1930 yılında sentezlediler. (Okamoto,2009) Bu malzemeler çok stabil ve çeşitli özelliklerle üretilebilirler. Uygulamaları etkileyici bir yelpazeyi kapsar; bunlar milimetre dalga entegre devreler, kalıcı mıknatıslar, transformatör çekirdekleri, anten çubukları, bellek çipleri, dönüştürücüler, aktivatörler, manyetik kaydediciler, bilgisayar bileşenleri, ilaç dağıtım sistemleri ve mikrodalga cihazları gibi alanları içerir.

Bu malzemelerin geniş kapsamı nedeniyle, malzeme bilimi araştırmacıları ferritlerin özelliklerini geliştirmeye özel bir ilgi göstermektedirler.

Günümüzde, mikrodalga teknolojisi daha yüksek frekanslara (mikrodalgalardan mm dalgalarına) ve daha geniş bant genişliklerine doğru ilerlemektedir. Teknolojinin hızına ayak uydurabilmek için malzeme bilimi ve mühendisliği uyumlu seçenekler sunmak zorunda kalmaktadır. Ferritler, çok yüksek özgül direnç, manyetik özellikleri şekillendirme konusunda dikkate değer esneklik, hazırlama kolaylığı, fiyat ve performansları göz önüne alındığında tüm bu mikrodalga uygulamaları için çözüm olarak ortaya çıkmışlardır. Sirkülasyon ve izolasyon gibi karşılıklı olmayan işlemler gerektiren uygulamalarda, ferrit cihazları için daha iyi bir alternatif yoktur.

Yapılarına bağlı olarak, ferritler dört genel kategoriye ayrılabilir: garnetler, orto-ferritler, hegzagonal ferritler ve spinel ferritler. Garnetler, "sert manyetik" özelliklere sahip ferritler sınıfıdır ve genel kimyasal bileşimi $R_3(Fe_5O_{12})$ şeklindedir, burada R nadir-toprak olarak tanımlanır. Garnetler üç tür kristalografik yapıya sahiptir: tetrahedral, octahedral ve dodecahedral. Yttrium garnet, granatların yaygın bir örneğidir. Orto-ferritler, orto-rombik kristal yapıya ve uzay grubu $Pbnm$ 'ye sahiptir. Bu ferritlerin kimyasal formülü $RFeO_3$, burada R nadir-toprak elementini ifade eder. Orto-ferritler genellikle zayıf ferromanyetik malzemelerdir. $LaFeO_3$ (Lantan Ferrit) ve $DyFeO_3$ (Disprosyum Ferrit)), orto-ferritlerin örnekleridir. Hegzagonal ferritler, kimyasal formülü $MFe_{12}O_{19}$ olan ferritlerdir, burada M barium, stronsiyum, kalsiyum veya kurşun olabilir. Hegzagonal ferritlerde iki tür kristalografik yapı bulunur: tetrahedral ve octahedral. Altıgen ferritlerin manyetik kolay eksenli karmaşık kristal yapıları vardır. Bu ferritler magnetik olarak serttir. (Pullar,2012)

Spinel Ferritler: Son yıllarda, spinel ferritlere olan ilgi artmıştır, bu da araştırma makalelerindeki artışla ilişkilidir. Örneğin, Scopus veritabanına göre, 2019'da yayımlanan araştırma makalelerinin sayısı rekor düzeyde olmuştur.

Dördüncü en önemli ferrit kategorisi spinel ferritlerdir. 'Spinel' terimi, genel formülü AB_2O_4 olan kübik yapı için kullanılır; burada A divalent katyonu, B ise trivalent katyonu temsil eder. Bu nedenle, spinel ferritler, Fe^{3+} olarak trivalent katyona sahip sıkı paketlenmiş kübik yapılar olarak tanımlanabilir, bu da tam yapısal formülü AFe_2O_4 yapar. Divalent katyon (A), demir, nikel, çinko, kobalt, mangan, magnezyum, bakır, kadmiyum veya bunların kombinasyonları olabilir. Bu ferritler, doğal olarak oluşan $MgAl_2O_4$ adlı 'spinel' adlı bir mineralin yapısıyla benzerlik gösterdikleri için adını alırlar. Bu ferritler ayrıca ferrospineller veya kübik ferritler olarak da adlandırılır ve doğal olarak yarı-iletken bir yapıya sahiptirler. (Ditta,2017)

Spinel ferritler, yüksek doymuş manyetizasyon, yüksek karelik oranı (M_r/M_s , high squareness ratio), büyük manyetokristalin anizotropi, düşük koersivite, yüksek elektrik direnci, yüksek geçirgenlik, düşük eddy akım kayıpları, yüksek Curie sıcaklığı ve mekanik sertlik gibi ilginç manyetik ve elektriksel özelliklere sahip malzemelerdir, bu özellikler araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Spinel ferritler, genellikle mikrodalga emiciler alanında ve 3–30 GHz frekans aralığında uygulamalar bulmakta ve geleneksel olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek termodinamik

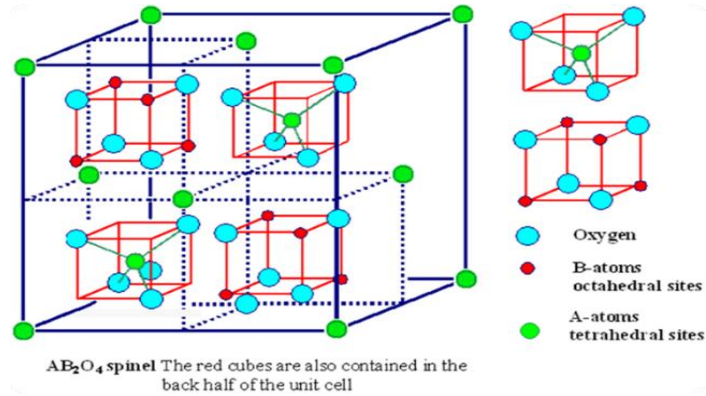
kararlılık, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek korozyon direnci gibi özelliklere sahip oldukları için metalurjik ve diğer yüksek sıcaklık alanlarında tercih edilirler.

Spinel ferritler, normalde altıgen ferritlerin yerine tercih edilir. Bunun nedenleri arasında, altıgen ferritlerin termal olarak uyarılmış kimyasal kararsızlık nedeniyle teknik engeller oluşturmaları ve saf altıgen ferrit (hexaferrit) malzemelerinin üretiminin zaman alıcı, maliyetli ve başarılı olmayabilecek bir prosedür olması sayılabilir.

Spinel Ferritlerin Yapısı: Spinel ferritlerin yapısı, kübik bir birim hücrede MFe_2O_4 formülü ile ifade edilir. Bu yapıda, oksijen anyonları ve divalent metal katyonları (M^{2+}) tetrahedral "A" site ve trivalent demir katyonları (Fe^{3+}) oktahedral "B" site'de bulunur. Bu yapı, spinel ferritlere benzersiz elektromanyetik özellikler kazandırır.

Spinel ferritler, normal spineller ve ters spineller olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Normal spinellerde, divalent metal katyonları (M^{2+}) A-konumunda bulunurken, trivalent demir katyonları (Fe^{3+}) tüm B-konumunda bulunur. Ters spinellerde ise bu durum tersidir.

Spinel ferrit MFe_2O_4 'ün kübik bir birim hücresi, 8 formül biriminden oluşur ve 56 iyon içerir. Bu, 32 (8 formül birimi * 4 iyon) oksijen anyonu, 8 (8 formül birimi * 1 iyon) M^{2+} katyonu ve 16 (8 formül birimi * 2 iyon) Fe^{3+} katyonunu içerir. Ferrit araştırmacıları tarafından gösterildiği gibi, büyük boyutlu oksijen iyonları, daha küçük divalent metal katyonlarının aralıklı konumlarını doldurarak sıkıca paketlenmiş bir yüzölçümü merkezli kübik (fcc) yapı oluşturur. (Wahba,2015). Bu yapı $Fd_{3m}O_k(227)$ uzay grubu ile karakterize edilir (Jalaiah ,2017).Bütün olarak, spinel birim hücresi elektriksel olarak nötr kalır. Şekil 2'de spinel ferrit yapısı göstermektedir.



Şekil 1.2. Spinel ferrit birim hücre kristal yapı formu [Ozgun ve ark. 2009]

Spinel yapısındaki iki tip kristalografik site bulunmaktadır. Birincisi dört oksijen iyonu tarafından çevrili olan tetrahedral "A" site, diğeri ise altı oksijen iyonu tarafından çevrili olan oktahedral "B" site'dir. Bir spinel birim hücresinde 8 A-sites ve 16 B-sites bulunmaktadır. Tetrahedral sitelerde bulunan iyonlar 'ağ oluşturmalar' olarak bilinirken, oktahedral sitelerde bulunanlar 'ağ değiştiricileri' olarak bilinir. Bu yapı, spinel ferritlere benzersiz elektromanyetik özellikler kazandırır.

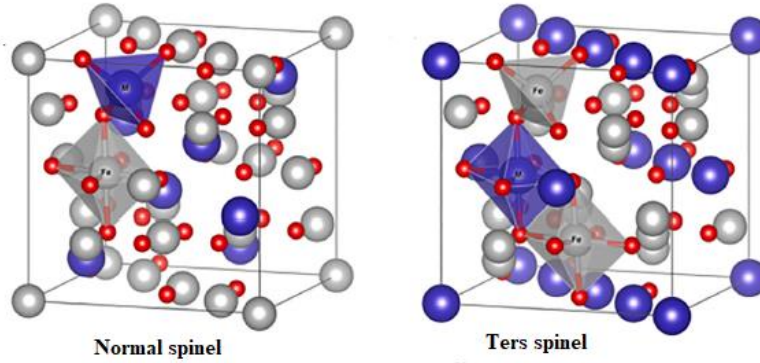
İki katyonik site üzerindeki divalent metal iyonlarının ve trivalent demir iyonlarının dağılımına dayanarak, spinel ferritler genel olarak iki kategoriye ayrılabilir:

a) Normal Spineller: Bu spinel ferritler, 8 adet *A*-konumunda, 8 adet divalent metal katyonu (M^{2+}) ve tüm 16 *B*-konumunda 16 adet trivalent demir katyonu (Fe^{3+}) içerir.

Formül şu şekildedir: $[M^{2+}]_8[Fe^{3+}]_{16}O_{24}$, burada *A* ve *B* sitelerinin zıt spin yönlendirmelerini temsil eder (Şekil 1.3 sol). Burada, Fe^{3+} iyonları ağ değiştirici olarak rol oynar, M^{2+} iyonları ise ağ oluşturuıcı olarak rol oynar. $ZnFe_2O_4$, $CdFe_2O_4$, normal spinel ferritlerin örnekleridir.

b) Ters Spineller: Bu spinel ferritler, 8 adet mevcut 16 *B*-konumunda, 8 tanesinde divalent metal katyonu (M^{2+}) ve kalan 8 *A*-konumunda 16 trivalent demir katyonu (Fe^{3+}) içerir. Formül şu şekildedir:

$[Fe^{3+}]_8[M^{2+}Fe^{3+}]_8O_{24}$, burada *A* ve *B* sitelerinin zıt spin yönlendirmelerini temsil eder (Şekil 1.3 sağ). Ters spinellerde, Fe^{3+} iyonları hem ağ oluşturuıcı hem de ağ değiştirici olarak işlev görür. Fe_3O_4 (manyetit veya demir ferriti), $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$ (Panatage,2012), Ni-Zn ferritleri, ters spinel ferritlerin örnekleridir. (Unal, 2014)



Şekil 1.3. Spinel ferrit birim hücre kristal yapısının normal ve ters formları [Taffa,ve ark. 2016]

Spinel ferritlerin tam kimyasal formülü $(M^{2+}Fe^{3+})_{1-x-\delta}[M^{2+}]_x[Fe^{3+}]_{2-x-\delta}O_4$ şeklindedir, burada parantezler ve köşeli parantezler sırasıyla tetrahedral ve oktahedral koordinasyonlu katyonik siteleri gösterir. γ işareti, *A*-sitelerinde (tetrahedral) bulunan Fe^{3+} iyonlarının bir fraksiyonu olarak tanımlanan tersinirlik (inversiyon) derecesini temsil eder. İnversiyon derecesi (γ), katkı (doped) varlığı (x) miktarıyla ilişkilidir ve (6) no' lu denklem ile ifade edilir:

$$\frac{n_A}{n_B} = \frac{\delta}{2 - x - \delta} \quad (6)$$

Burada n_A ve n_B sırasıyla A-sitelerinde ve B-sitelerinde bulunan demir iyonlarının sayılarıdır. Patange ve ark. bu formülü, Cr ile değiştirilmiş nikel spinel ferritler $NiFe_{2-x}Cr_xO_4$ ($x = 0-1$) için inversiyon parametresini (γ) hesaplamak için kullandılar. $x = 0.2$ olan bileşimin, tam ters spinel yapıya sahip olduğu rapor edildi. Diğer yandan, $x = 0.8$ olan $NiFe_{2-x}Cr_xO_4$ bileşiminin kısmen normal spinel yapıya sahip olduğu rapor edildi.

1.1.7. Nikel Spinel Ferritler

Divalent katyon olarak nikel (Ni) içeren spinel ferritlerdir. Ni-ferrit, $10^9 \Omega \text{ cm}$ 'den büyük bir direnç ile yüksek dirençli bir malzemedir. (Eindhoven, 1959). Nikel ferriti, ters spinel yapıya sahiptir. 8 tetrahedral boşluk (A-siteleri) Fe^{3+} iyonları tarafından işgal edilirken, 16 oktahedral boşluk (B-siteleri) Fe^{3+} ve Ni^{2+} iyonları tarafından eşit oranda işgal edilir. Saf nikel ferritleri için, inversiyon derecesi 1'dir. Yüksek elektrik direnci, düşük koersivite, orta doymuş manyetizasyon ve düşük histerezis kayıpları nedeniyle, nikel ferritleri yumuşak ferritler sınıfına dahil edilir. Bu yumuşak manyetik malzemeler aynı zamanda yüksek frekansta yüksek geçirgenlik, mekanik sertlik, elektrokimyasal kararlılık, makul maliyet ve düşük dielektrik ve eddy akım kayıpları gibi diğer olumlu özellikler sunar.

Bu özelliklerden dolayı, bu ferritler geniş bir uygulama yelpazesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır: anten üretimi (Rubinger,2007), biyomedikal uygulamalar ve tıbbi teşhis (Rahimia,2014), katalizörler (Ramankutty,2001), bilgisayar bellekleri (Chavan,2017), elektrikli cihazlar (Wu,2017), elektronik cihazlar (Mathe,2013), özellikle Hall-Heroult işlemi kullanılarak alüminyum üretimi için elektrometalurjik uygulamalar (Berchmans,2004), süperkapasitörde enerji depolama, biyoteknoloji (Misra,2010), ferro-sıvılar (Sousa,2012), gaz sensörleri (Chen,2010), yüksek yoğunluklu bilgi depolama (Köseoğlu,2009), yüksek kaliteli filtreler, izolatörler, kalıcı mıknatıslar (Akhtar,2017), bobinler, AC/DC dönüştürücüler, elektromanyetik gürültü bastırıcılar (Ghodake,2016), faz kaydırıcılar (Kulikowski,1990), yüksek frekanslı transformatörler (Dhaou,2017), indüksiyon ısıtma (Gao,2013), internet (Liu,2017), mikrodalga cihazlar (Vladikova,1990), manyetik dolgu maddeleri (Sozeri,2016), manyetik kayıt ortamları (Hussain,2012), manyetik sıvılar (Huo,2009), manyetik rezonans görüntüleme (Chen,2017), manyetik sensörler (Jia,2011), manyeto-direnç kafaları (Pikula,2008), manyeto-kalorik soğutma (Chen,1998), manyetik ayırma (Sozeri,2012), tıpta manyetik ilaç taşıyıcı ve hipertermi ajanı (Ashiq,2017), mikrodalga emilimi (Aggarwal,2019), çok katmanlı yonga bobinleri (Dhaou,2017), güç uygulamaları (Ji,2010), radyo frekans devreleri (Sinfrônio,2017), telekomünikasyon uygulamaları (Velmurugana,2010), transformatör çekirdekleri (Hcini,2017), spintronikler ve aktüatörler (Mani,2017), katı oksit yakıt hücreleri (Kumar,2013), su arıtma yöntemleri (Rana,2005) ve daha birçok alanda kullanılırlar.

Nikel spinel ferritler, çeşitli uygulama alanlarına sahip oldukları için spinel ferrit bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Bu nedenle, bu ferritler üzerinde birçok deney yapılmış ve farklı

sentez teknikleri kullanılmıştır. Bu sentez teknikleri, ferrit partiküllerinin hazırlanmasında farklı yaklaşımlar sunar:

Başlıca üretim yöntemleri; katıhal tepkime yöntemi, birlikte çöktürme yöntemi, hidrotermal yöntem, mikro emülsiyon yöntemi, solvotermal yöntem ve sol-jel yöntemidir. Bu yöntemler materyal metot kısmında detaylıca açıklanmıştır.





2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Ferritler, metal katyonlarının ve oksijen anyonlarının kristal kafeste farklı geometrik yapılandırmalar oluşturacak şekilde düzenlendiği ferrimanyetik malzemeler kategorisine aittir (Horvath, 2000). Ferrit malzemeler, manyetik özellikleri nedeniyle endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektronik cihazlarda, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda manyetik çekirdek olarak kullanılırlar. Ferritler, düşük elektriksel iletkenlikleri sayesinde enerji kaybını minimize eder ve elektromanyetik girişimleri azaltır. Bu özellikleri, onları endüktörler, transformatörler ve manyetik çekirdekler gibi bileşenler için ideal kılar.

Ferritlerdeki ilk gerçek araştırma yayını 1953'te gerçekleştiren Hastings ve Corliss nötron saçılma yöntemiyle nikel ve çinko ferritlerin kimyasal ve manyetik özelliklerini oda sıcaklığında analiz ettiler. Analizlerine dayanarak, nikel ferritlerinin ters manyetik bir yapıya sahip olduğu ve özelliklerinin ferrimanyetizmanın Néel modeli ile iyi uyumlu olduğu deneysel olarak doğrulandı. 1953'te Ni ferritlerine ilişkin ilk araştırma raporundan sonra, bu ferritler bir sonraki 8 yıl boyunca dikkat çekmedi. 1961 yılında Shafer ve arkadaşlarının raporuyla yeniden ilgi uyandı. Bu çalışmada, Ni ferritinin faz denge koşulları yüksek sıcaklıklarda (1400 °C, 1500 °C ve 1600 °C) termogravimetrik (TG) analiz ve ani soğutma deneyleri kullanılarak belirlendi. Shafer, fazladan nikelin spinel kafeste çözünme miktarının, sentez sıcaklığı ve basınca bağlı olduğunu bildirdi (Shafer ve Chem 1961). Shafer ve arkadaşlarının fikri daha sonra iki araştırma grubu tarafından da takip edildi. Aynı yıl, Parker ve arkadaşları uygun ısı işlemi ile fazla nikel içeren kimyasal bileşimi $Ni_{1.029}Fe_2O_4$ olan spinel ferrit hazırladılar. Hazırlanan nikel fazlalığı ferritlerinin yüksek direnç uygulamaları için kullanışlı olabileceği önerildi (Parker ve ark. 1961). Üç yıl sonra, Elwell ve arkadaşları sentez sürecindeki sıcaklık ve basınç koşullarının ferritin bileşimini ve manyetik momentini etkilediğini deneysel olarak kanıtladılar. Spinel örgüsündeki bir oksijen atomunun eksikliğinin manyetik momentte yaklaşık 0.4 μB artışa neden olduğu öne sürüldü (Elwell ve ark. 1964). Hasting ve arkadaşlarının araştırma yaklaşımı, Youssef ve arkadaşları tarafından 1969'da tekrar kullanıldı. Bu amaçla da polarize nötronlar nikel ferritlerinin kimyasal ve manyetik yapılarındaki belirsizlikleri çözmek için kullanıldı. Youssef ve arkadaşları, nikel ferritlerinin ters spinel doğasını kanıtlamanın yanı sıra, saf nikel ferriti için oksijen parametresini (0.2573 ± 0.0003) ve net manyetik momentini (2.09 μB) belirlediler. Ayrıca, A-sitelerindeki ferrit iyonlarının manyetik momentini (4.86 μB), B-sitelerindeki ferrit iyonlarının manyetik momentini (4.73 μB) ve B-sitelerindeki nikel iyonlarının manyetik momentini (2.22 μB) değerleri de rapor edildi (Yousef ve ark. 1969).

Spinel ferrit terimi, metal oksitleri ve diğer elementlerden oluşan doğal bir malzeme olan spinel mineralinin adından türetilmiştir. Metal oksitleri toz halinde karıştırılır ve ardından seramik bir malzeme oluşturmak için bir fırında sinterlenir. Spinel ferritleri, AFe_2O_4 genel formülü ile temsil edilir; burada A, iki değerlikli metal katyonlarını (Ni^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} vb.) ifade eder. Bu yapı, A^{2+} ve Fe^{3+} iyonlarının iki farklı kristalografik bölgede yer aldığı, oksijen atomlarından oluşan

sıkı bir kübik yapı olarak gösterilebilir (Mokhosi ve ark. 2022, Malik ve ark. 2023). Bu bölgeler, sırasıyla tetrahedral (A-yeri) ve oktahedral (B-yeri) oksijen koordinasyonu olarak adlandırılır. Spinel yapısı, katyonik dolum için iki katyon yerinden oluşur. 8 A-yeri, metal katyonlarının oksijen ile tetrahedral koordinasyon yaptığı alanlardır ve 16 B-yeri, oktahedral koordinasyona sahiptir. A-yerleri, sekiz tane iki değerlikli A^{2+} katyonu ile dolduğunda ve B-yerleri, 16 tane üç değerlikli demir (Fe^{3+}) katyonu ile dolduğunda ferrit normal bir spinel olarak adlandırılır. A-yerleri, Fe^{3+} katyonlarının yarısı ile tamamen dolduğunda ve B-yerleri, A^{2+} ve diğer yarısı Fe^{3+} katyonları ile rastgele dolduğunda yapı ters spinel olarak adlandırılır (Tomar ve Jeevanandam 2020, Qin ve ark. 2021, Narang ve Pubby 2021).

Literatürde nanopartikül malzemeler ile ilgili daha fazla çalışmaya rastlamak mümkündür. Örneğin 2003 yılında, Hai ve ekibi, spin spre yay ferrit kaplama yöntemini kullanarak hazırlanan nikel ferritlerinin manyetik özelliklerini rapor etti. Daha sonra, Misra ve ark. 2003 bu ferritleri mikro-emülsiyon tekniği kullanarak hazırladı ve bunların manyeto-optik cihazlarda kullanılabilirliklerini inceledi. Mikro-emülsiyon yöntemi, malzemenin manyeto-optik cihazlar için uygun hale getirilmesi için dar bir boyut dağılımına sahip olmasını sağlamak amacıyla kullanıldı. Aynı yıl içinde, Ni ferrit hidrotermal işlem kullanılarak hazırlandı ve hava içinde sıvılaştırılmış petrol gazının (LPG) tespitinde kullanımı test edildi. Ni ferritin bu gaz algılama uygulaması için etkili olduğu bulundu. Ancak, gaz algılama özelliklerini iyileştirmek için %1 ağırlıkça paladyum eklenmesi gerektiği bildirildi ve bu durumun 200 °C çalışma sıcaklığında havadaki 25 ppm LPG'yi algıladığı rapor edildi (Satyanarayana ve ark. 2003). Daha sonra saf nikel ferrit sentezlemek için ters micelle (welter ile emülsiyon) yöntemi benimsendi ve bu da diğer yöntemlerle yapılan önceki raporlara göre önemli ölçüde daha küçük, 3 nm boyutunda kristalitler elde edildi. Bu yöntemle elde edilen ferritlerin kimyasal bileşimi $Ni_xFe_{3-x}O_4$ olarak tahmin edildi ve tahmini parçacık çapı yaklaşık 4 nm civarındaydı. Oda sıcaklığında ferrit için daha küçük bir doyum manyetizasyon değeri bildirildi (Kale ve ark. 2004).

Jung ve ekibi (2009), farklı öncüllerle spre yay piroliz yöntemi kullanarak hazırlanan nikel ferritlerinin özelliklerini inceledi. Organik bir katkı maddesi olarak sitrik asit kullanılarak, 30 ila 36 nm arasında değişen boyutlarda kristaller elde edildi ve farklı öncüler için 37 ila 42 emu g⁻¹ arasında değişen doyum manyetizasyonu rapor edildi.

Wang ve ekibi (2010), hidrotermal kristalleşme yöntemini kullanarak sentezlenen nikel ferrit nano taneciklerinin süper-paramanyetik doğasını bildirdi ve boyutlarının 5 ila 12 nm arasında değiştiğini belirtti.

Dixit ve ekibi (2012), lazer darbeleme biriktirme tekniği (pulsed laser deposition) kullanarak nikel ferrit hazırladı ve optik özelliklerini inceledi. Optik band aralığı 5.7 eV olarak bildirildi, bu değer önceki çalışmalardan önemli ölçüde farklıydı. Sonraki 4 yıl içinde, farklı araştırmacılar nikel ferritlerin özelliklerini iyileştirmek amacıyla modifiye edilmiş sol-jel yöntemleri kullanmışlardır. Li

ve ekibi (2014), sentez için şablon olarak pamuk/sünger kullanırken, Atif ve ekibi (2015), sentez sürecinde yakıt olarak üre kullanmışlardır.

Chauhan ve ekibi (2016) , farklı yakıtlarla hazırlanan saf nikel ferritlerini inceledi ve sitrik asit kullanımını en iyi seçenek olarak önerdi.

Ayrıca, bazı araştırmacılar nikel ferritleri farklı üretim yöntemleriyle ince film şeklinde üretmeye çalıştılar. Bu çalışmalar, ferritlerin manyetik ve optik özelliklerini incelemeyi amaçladı. Örneğin, Banks ve ekibi vakum buharlaştırma ve yüksek sıcaklık oksidasyon tekniği kullanarak nikel ferrit ince filmleri hazırladılar (Banks ve ark.1961).

J.S. Ghodake ve ekibi, $Ni_{0.6x}Zn_{0.35}Co_xFe_{2.05}O_4$ ($x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) ferritleri hazırlamak için sitrat-nitrat yanma yöntemini benimsemiş ve 0.26–0.48 μm aralığında tane boyutuna ve 39–52 nm aralığında kristalit boyutuna sahip tek fazlı ferritleri başarıyla elde etmişlerdir. Sentez prosedürü, stokiometrik karışımın 600 °C'de 1 saat boyunca hava içinde başlangıç ayrışmasını, ardından 1000 °C'de 1 saatlik ön sinterlemeyi ve son olarak 1000 °C'de 1 saatlik nihai sinterlemeyi içermektedir (Ghodake ve ark. 2016).

2016 yılında C. Stergiou $Ni_{0.25}Zn_{0.25}Co_{0.5}Fe_2O_4$ ferritlerinin mikro yapısı ve elektromanyetik özellikleri üzerindeki ön pişirme sıcaklığı (TP) ve sinterleme sıcaklığının (TS) rolünü analiz etti. Sentez için farklı TP (750 °C, 1000 °C) ve farklı TS (1200 °C, 1250 °C) kullanılarak geleneksel katı hal reaksiyon yöntemi kullanıldı. Hem TP hem de TS'nin önemli mikro yapısal farklılıklar oluşturduğu, ancak TS'nin mikrodalga elektromanyetik özellikleri etkilemede daha kritik bir parametre olduğu sonucuna varıldı. Yüksek TP ve yüksek TS'nin yüksek yoğunluklu seramikler ile sonuçlandığı gösterildi. Ön pişirme sıcaklığının düşürülmesi, yoğunlukta azalmaya ve gözeneklilikte artışa, sinterleme sıcaklığının düşürülmesi ise hem yoğunlukta hem de tane boyutunda azalmaya ve gözeneklilikte artışa yol açmaktadır. Hazırlanan ferritler için, sinterleme sıcaklığının 1250 °C'den 1200 °C'ye düşürülmesinin, tane boyutunda 3.4 μm 'den 2.1 μm 'ye azalma ile sonuçlandığı gösterildi (Stergiou 2016).

Chauhan ve ekibi 2016 yılında, farklı yakıtlar- sitrik asit, glisin ve DL-alanin - kullanarak saf nikel ferrit hazırlamış ve bunlar arasında en iyi seçeneğin sitrik asit olduğunu önermiştir.

Hcini ve çalışma arkadaşları 2017 yılında, Pechini'nin sol-jel tekniğini kullanarak Ni-Co ve Mg-Co ferritleri hazırladılar. Ni-Co ferritler, Mg-Co ferritlere kıyasla daha düşük sıcaklıkta ve daha kısa sürede sinterlendi. XRD karakterizasyonunda, $Fd3m$ uzay grubuna sahip saf spinel fazı belirtildi. SEM analizinde, ihmal edilebilir gözeneklilik ile yaklaşık 0.5 μm ortalama boyuta sahip uniform tane boyutu dağılımı gözlemlendi. Empedans analizi, 200-420 K sıcaklık aralığında ve 10^2 - 10^7 Hz frekans aralığında ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirildi.

Safari ve ark. 2017 yılında, ferriti plazma-ark yöntemiyle sentezlemiştir. Nano partikülleri sentezlemek için 3000 °C'yi aşan yüksek sıcaklıkta plazma arkı kullanılmıştır. Tozlar, 400A akım uygulanarak farklı atmosferlerde sentezlenmiştir. XRD sonuçları, $(Ni,Fe) Fe_2O_4$, ZnO ve $Fe_{0.72}OZn_{0.13}$ fazlarının varlığını göstermiştir. SEM analizi, dar boyut dağılımına sahip küresel

topaklanmış (aglomere) partikülleri ortaya koymuştur. Argon kullanılarak elde edilen partikül boyutunun (200 nm), hava ve oksijen kullanılarak elde edilen partikül boyutunun (100 nm) iki katı olduğu bildirilmiştir.

Meng ve ekibi 2017 yılında, sol-jel oto-yanma yöntemini kullanarak $\text{NiIn}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) ferritlerini hazırlamışlardır. Ferritlerde $x = 0.3$ 'e kadar saf spinel fazı gözlemlenirken, $x = 0.4$ için küçük miktarda In_2O_3 izleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, indiyum doping arttıkça örgü sabiti artmış, kristalit boyutu ise azalmıştır. Koersivite azalmış, doyum manyetizasyonu ise çan şeklinde bir tepki göstermiştir. SEM analizinde, homojen olmayan boyut dağılımına sahip topaklanmış taneler bildirilmiştir. Sentezlenen Ni-In ferritlerin, girdap akımı kayıplarını azaltma uygulamalarında kullanılmak üzere önerildiği belirtilmiştir.

Warsi ve çalışma arkadaşları, 2017 yılında praseodim ile katkılama yapılmış Ni-Li ferritleri inceledi. Ferritlerin sentezi için mikro emülsiyon yöntemi kullanıldı. XRD analizinde PrFeO_3 'ün ikincil fazı gözlemlendi. Örgü sabiti artan Pr konsantrasyonu ile artış eğilimi gösterirken, kristalit boyutu düzensiz bir eğilim gösterdi. Bu düzensiz değişim, büyük boyutlu Pr^{2+} iyon yerdeğiştirmesi nedeniyle oluşan ikincil fazın (orto-faz) gelişimi temelinde açıklandı.

Pubby ve ekibi 2018 yılında, Pechini'nin sol-jel yöntemiyle ancak farklı koşullarda nikel-kobalt ferritleri hazırladı. Örnekler, uygun tane boyutlarına ulaşmak için $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 6 saat boyunca sinterlendi. Elde edilen örgü sabiti ($8.33\text{--}8.38\text{ \AA}$), tane boyutu ($80\text{--}95\text{ nm}$) ve kristalit boyutun ($26.2\text{--}31.8\text{ nm}$) saptamışlardır. Bu değerlerde Hcini ve ekibi (2017) tarafından bildirilen değerlerden çok daha küçüktür.

Arboleda ve ekibi, 2018 yılında bu Ni-Zn ferritlerde Spin Seebeck etkisini bildirmiştir.

Ayrıca, Sr'nin hücre tutunumu ve büyümesi için gözenekli yüzeylere sahip iskeleler gibi diğer biyolojik amaçlı malzemelerin biyoyararlanımını artırabileceği belirtilmiştir (Tsai ve ark. 2018 ve Murugesan ve ark. 2022).

Tamayo ve ark. 2019 Mössbauer spektroskopisi tekniği ile, ferritlerde ters çevrilme derecesini (λ) hesapladılar. NiFe_2O_4 için recoilless f-faktörleri oranı, düşük sıcaklıklarda 1, oda sıcaklığında 0.94 olarak varsayılmaktadır. Bu çalışmada, NiFe_2O_4 , nikel oksit ve hematit karışımından sentezlenmiş ve çeşitli karakterizasyon teknikleriyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, NiFe_2O_4 'ün spinel yapısını doğrulamış ve ters çevrilme derecesinin ($\lambda = 0.96$) belirlendiği görülmüştür. Oda sıcaklığında 1.09 ± 0.01 değeri hesaplanmıştır.

Domínguez-Arvizu ve ark. (2019) geçiş metal spinel ferritleri olan MFe_2O_4 , bu reaksiyonda görünür ışık altında dikkat çekici bir aktivite sergilediğini rapor etmişlerdir. Ancak, bu malzemelerin optik özellikleri fotokatalitik kinetik çalışmalarda tam olarak belirlenmemiştir. Bu araştırmada, sentezlenen ve ticari NiFe_2O_4 nanopartikülleri karşılaştırılmıştır. NiFe_2O_4 , Pechini yöntemiyle sentezlenmiş ve her iki malzeme için yapısal, dokusal ve optik karakterizasyon XRD, TEM, TGA, BET yüzey alanı ve UV/Vis spektroskopisi ile gerçekleştirilmiştir. Hidrojen üretimi için fotokatalitik değerlendirme yapılmıştır. NiFe_2O_4 'ün optik özellikleri UV/Vis spektroskopisi ile ve Radyatif

Transfer Denklemi (RTE) için basitleştirilmiş bir teorik model olan Altı Akış Modeli (SFM) kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan tüm karakterizasyonlar ve elde edilen katsayılar, sentezlenen ferritin gözenekliliğine atfedilen absorpsiyon ve saçılma katsayıları arasındaki farkları bulmak için karşılaştırılmıştır.

Yaqoob ve ark. (2019) MFe_2O_4 ($M = Co, Ni, Cu, Zn$) spinel ferrit nanopartikülleri, mikrodalga yanma yöntemiyle metal nitratları ve üre kullanılarak hazırlanmıştır. X-ışını kırınımı analizi, $NiFe_2O_4$ ve $ZnFe_2O_4$ için tek faz oluşumunu, $CoFe_2O_4$ ve $CuFe_2O_4$ için ise ikincil fazların varlığını göstermektedir. Tavlama sonrası $CuFe_2O_4$ tek kübik faza dönüşmüştür. SEM görüntüleri, nanoskalada topaklanma olmuş parçacıklar göstermektedir. M-H eğrileri, $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$ ve $CuFe_2O_4$ için ferromanyetik, $ZnFe_2O_4$ için süperparamanyetik davranış sergilemektedir. Hazırlanan nanopartiküller, su çözeltilerinden kadmiyum (Cd^{2+}) ve kurşun (Pb^{2+}) uzaklaştırma testlerinde, maksimum adsorpsiyon kapasitesi olarak sırasıyla 69.4 ve 47.1 mg/g verimlilik göstermiştir. Seçicilikte, $CoFe_2O_4$ Cd^{2+} için, $ZnFe_2O_4$ ise Pb^{2+} için daha etkilidir.

Pubby ve ark. (2020) Pechini sol-jel yöntemiyle sentezlenen nikel kobalt ferritlerinin manyetik, elastik, dielektrik, mikrodalga emilim ve optik özellikleri incelenmiştir. Kobalt doping ile doygunluk manyetizasyonu, koersivite ve Curie sıcaklığı artmıştır. NC 0.90 bileşimi için yüksek (86.12 emu g^{-1}) ve düşük koersivite (694.7 Oe) kombinasyonu optimize edilmiştir. Curie sıcaklığı, Co miktarı 0.0'dan 1.0'a çıktıkça 602 °C'den 705 °C'ye yükselmiştir. FT-IR spektrumunda, 400–600 cm^{-1} aralığında karakteristik emilim bantları gözlemlenmiştir. Dielektrik ve empedans özellikleri, 20 Hz–120 MHz frekans aralığında empedans analizörü ile belirlenmiştir. Hazırlanan ferritler, 12.4–18 GHz frekans bandındaki uygulamaları için vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak değerlendirilmiştir. NC 0.90 bileşimi için 15.74 GHz frekansında -44.48 dB'lik minimum yansıma kaybı elde edilmiştir. 350 nm uyarım dalga boyunda optik spektrumlar, tüm bileşimlerde 330 nm civarında keskin zirveler göstermektedir.

Ozelik ve ark.(2021) tarafından su içinde subnanosaniye lazer koparma (ablasyon) yöntemiyle elde edilen $NiFe_2O_4$ nanoparçacıklarının (NP'ler) yapısal özelliklerini, manyetik davranışlarını, fotokatalitik özelliklerini ve kan uyumluluğunu incelemektir. Nanoparçacıkların yapısı ve boyut dağılımı, X-ışını Difraktometrisi (XRD) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Fotokatalitik özellikler, Metilen Mavisi (MeB) boyasının ortamda mevcut görünen ışık altında fotodegradasyonu üzerinden değerlendirilmiştir. $NiFe_2O_4$ nanoparçacıklarının fotokatalitik bozunma mekanizmasını belirlemek için dört farklı kinetik model değerlendirilmiş ve deneysel kinetik verilerin analizinde en uygun modelin sözde (pseudo) ikinci dereceden kinetik modeli olduğu tespit edilmiştir. $NiFe_2O_4$ nanoparçacıklarının hemokompatibilitesi, sağlıklı gönüllülerden alınan insan eritrositleri kullanılarak hemoliz testleri ile incelenmiştir. $NiFe_2O_4$ nanoparçacıklarının, 0,05, 1 ve 5 mg/ml konsantrasyonlarında istenmeyen hemoliz oranlarına neden olduğu, ancak bu nanoparçacıkların biyolojik olarak güvenli konsantrasyonunun 0,01 mg/ml'nin altında olduğu belirlenmiştir.

Yalcın ve ark. (2021) CoFe_2O_4 nanoparçacıkları ortak çöktürme yöntemiyle sentezlenmiştir. Kobalt ferritlerin yapısal, manyetik ve fotokatalitik özellikleri, kimyasal bileşimleri ve biyolojik özellikleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Yapısal ve morfolojik özellikler sırasıyla X-ışını difraksiyon analizi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. XRD verilerinden örgü parametreleri ve hücre hacimleri hesaplanmıştır. SEM görüntüleri, nanoparçacıkların düzgün yüzey morfolojisine ve küresel şekline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Hemolitik aktivite testlerinde, karakteristik siyah renkte bir çökelti oluşumu, heme-demir komplekslerinin oluşumuna dair net bir kanıt sağlamıştır. CoFe_2O_4 nanoparçacıklarının her iki konsantrasyonda da insan eritrositleri üzerindeki istenmeyen hemolitik etkisi, bu nanoparçacıklar tarafından üretilen reaktif oksijen türlerinin nispeten yüksek miktarına bağlanmıştır. Fotokatalitik aktivite testlerinde, sözde ikinci dereceden modele göre elde edilen teorik Co konsantrasyonu (0,82 mg/L), deneysel Co konsantrasyonu (0,95 mg/L) ile iyi bir uyum göstermiştir.

İçin ve ark. (2022) mekanokimyasal süreç kullanılarak, elde edilen selestit cevherinden stronsiyum karbonat ve değirmen atıklarından stronsiyum hekzaferrit tozları üretilmiştir. Stronsiyum karbonat ve selestit atıkları, stoichiometrik oranda hazırlanmış ve 16 saatlik mekanokimyasal işlem uygulanarak sert ferrit tozları elde edilmiştir. Mekanokimyasal sentez sürecinin ardından, toz karışımı 850–1000 °C sıcaklıklarında tavlansmıştır. Stronsiyum hekzaferrit tozlarının morfolojisi, kristal yapısı ve faz bileşimi, tavlama sıcaklığına bağlı olarak manyetik özelliklerin değişmesine neden olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda, en uygun tavlama sıcaklığı 975 °C olarak belirlenmiştir. Üretilen tozların H_c , Br ve $(BH)_{\max}$ değerleri, sırasıyla 5505 Oe, 347 mT ve 5.77 MGOe olarak ölçülmüştür. Tavlanan tozların Curie sıcaklığı ise 474 °C olarak tespit edilmiştir.

Yalcın tarafından (2022) Co-precipitation yöntemi ile sentezlenen $\text{CoCuFe}_2\text{O}_4$ nanopartiküllerinin (NP'ler) yapısal, morfolojik, manyetik, fotokatalitik ve hemolitik özelliklerini incelemektedir. Fotokatalitik ve biyolojik özellikler, kristal violet (CV) fotokatalitik bozunma reaksiyonları ve hemoliz deneyleri ile araştırılmıştır. X-ışını kırınım analizi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), nano boyutlu ferritlerin kristalin özellikleri ve morfolojik yapısını analiz etmek için kullanılmıştır. Fotokataliz testleri, $\text{CoCuFe}_2\text{O}_4$ NP'lerinin 254 nm ışınlamaya 420 dakika maruz kalması sonucunda toplam organik boyanın %64.9'unu degrade ettiğini göstermiştir. $\text{CoCuFe}_2\text{O}_4$ NP'lerinin koersivitesi (H_c) 1000 Oe, doyum manyetizasyonu (M_s) ise 15.44 emu/g olarak belirlenmiştir. Hemoliz testleri, 5.0 mg mL⁻¹ $\text{CoCuFe}_2\text{O}_4$ konsantrasyonuna maruz kalan insan eritrositleri için ortalama hemoliz oranının (AHR) %12.4, 1.0 mg mL⁻¹ konsantrasyona maruz kalanlar için ise yalnızca %2.2 olduğunu göstermiştir. Ayrıca, her iki $\text{CoCuFe}_2\text{O}_4$ konsantrasyonunda, nanopartikül yüzeyinde oluşan reaktif oksijen türlerinin (ROS) etkisiyle hemoglobin oksidasyonunu gösteren spektrofotometrik kanıtlar bulunmuştur.

Kumar ve ark. (2022) tarafından sitrik-jel oto-yanma yöntemi kullanılarak, $x = 0.000, 0.020, 0.030$ ve 0.040 değerlerinde seriyum katkılı nikel çinko ferriti $\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Ce}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ nanopartikülleri düşük sıcaklıklarda sentezlenmiştir. Üretilen tozların karakterizasyonu için X-ışını kırınım cihazı

(XRD) kullanılmıştır. XRD analizleri, tek fazlı kübik spinel yapısının varlığını doğrulamıştır. Nanopartiküllerin kristalin boyutu (D) 12.8 nm ile 22.7 nm arasında değişmektedir. Üretilen nanokompozitlerin antibakteriyel etkinliği, Auger difüzyon tekniği ile değerlendirilmiştir. Bu araştırma, $x = 0.00$ ile 0.04 arasında gram-pozitif ve gram-negatif bakteriyel aktiviteyi azaltabilen nanokompozitler önermektedir. Ayrıca, 20 Hz ile 2 MHz frekans aralığında dielektrik özellikler LCR köprüsü kullanılarak incelenmiştir. Bu süreçte, oktahedral yerlerde faz değişimleri ve Fe^{2+} ile Fe^{3+} iyonlarındaki elektronların zıplama mekanizması üretilmiştir.

Ergin ve ark. (2023) tarafından sol-jel oto-yanma yöntemi ile üretilen $Co_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ ($x = 0.0-1.0$) nanopartiküllerindeki Cu^{2+} dopinginin morfoloji, yapı, optik, manyetik ve Mössbauer özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. X-ışını kırınım (XRD) analizlerinde, temel olarak saf faz yapısına sahip Co-spinel gözlemlenmiştir. Kristal boyutları 28.77–36.25 nm arasında değişmektedir. Fourier dönüşüm infrared (FT-IR) spektrumuyla, nanopartiküllerin temel titreşim bantları 426 ve 602 cm^{-1} dalga boylarında bulunmuştur. Çoğu Co^{2+} iyonu A yerinde yer alırken, Cu^{2+} iyonları oktahedral alanda $x = 0.0, 0.25$ ve 0.50 için yer değiştirmektedir. $x = 0.75$ içeriği için Mössbauer sonuçları, bazı Cu^{2+} iyonlarının hem A hem de B yerlerinde bulunduğunu göstermektedir. Oda sıcaklığında yapılan magnetizasyon ölçümleri, Cu^{2+} yer değiştirmesinin manyetik özellikleri koersivite alanı (H_c), kalıcı magnetizasyonu (M_r) ve doyum magnetizasyonu (M_s) önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuştur. Oda sıcaklığında elde edilen manyetik histerezis eğrileri, tüm nanopartiküller için 51.5–64.4 $emu\ g^{-1}\ Ms$, 31–36 $emu\ g^{-1}\ Mr$ ve 429.5–1447.8 Oe H_c değerleriyle bilinen S-şeklindeki özellikleri göstermektedir.

El-Masry ve ark. (2023) tarafından $M-CoFe_2O_4$ ($M=Cu$ ve Zn) nanoferritleri, sitrat oto-yanma tekniği kullanılarak başarıyla hazırlanmıştır. Çalışma, yapı, morfoloji, termal, manyetik ve elektriksel özelliklerin kapsamlı bir incelemesini içermektedir. Tüm örnekler Fd-3m uzay grubuna ait bulunmuştur. $CoFe_2O_4$, $Cu-CoFe_2O_4$ ve $Zn-CoFe_2O_4$ nanopartiküllerinin kristalit boyutları sırasıyla 8, 15 ve 14 nm olarak ölçülmüştür. Örgü sabitleri ise sırasıyla 8.4 nm, 8.39 nm ve 8.42 nm'dir. Doping, elastik özellikleri artırmıştır; $Cu-CoFe_2O_4$ için Young modülü 278.97 GPa, kayma modülü 185.98 GPa olarak en yüksek değerleri göstermiştir. En yüksek doyum magnetizasyonu, saf örnek olan $CoFe_2O_4$ için 56.1 emu/g iken, $Cu-CoFe_2O_4$ ve $Zn-CoFe_2O_4$ için sırasıyla 46.9 ve 45 emu/g 'dir. En yüksek manyetik hassasiyet ise $Zn-CoFe_2O_4$ için 0.639 olarak elde edilmiştir. Termal iletkenlik, termal difüzyon ve özgül ısı, hazırlanan örneklerin sıcak disk tekniği ile oda sıcaklığında incelenmiştir. Cu ve Zn ile katkı yapılmış $CoFe_2O_4$ 'ün termal özelliklerinde bir artış gözlemlenmiş ve $Cu-CoFe_2O_4$ örneği en yüksek termal iletkenlik ($0.95\ W/m\cdot K$), termal difüzyon ($0.75\ mm^2/s$) ve özgül ısı ($0.85\ MJ/m^3\cdot K$) değerlerini göstermiştir.

Thakur ve ark. (2023) tarafından Cu katkılı $CoFe_2O_4$ ($Co_{1-x}Cu_xFe_2O_4$) nanopartikülleri, $x = 0.0, 0.2, 0.4$ ve 0.6 , sitrat öncü yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) deseni, Fd-3m uzay grubuyla saf kübik yapı oluşumunu doğrulamıştır. Yapısal saflık ve katyon dağılımı için Rietveld rafinasyonu yapılmıştır. Kristalit boyutu, $x = 0.2$ 'ye kadar 39.55 nm'den 41.80 nm'ye

yükselirken, daha fazla Cu^{2+} katkısıyla 36.27 nm'ye düşmüştür. örgü parametresi ilk olarak 8.378 Å'den 8.381 Å'ye artmakta, ardından 8.377 Å'ye azalmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak, düzensiz tane gelişimi gözlemlenmiştir. Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) tüm örneklerde yaklaşık 541 cm^{-1} ve 408 cm^{-1} 'de iki tepe göstermiştir; bu değerler dopant konsantrasyonu arttıkça sırasıyla 532.5 cm^{-1} ve 402.5 cm^{-1} 'ye düşmektedir. Sertlik sabiti ve elastik modül doping ile azalırken, Poisson oranı ve Pugh oranı sabit kalmıştır. titreşimli Örnek Magnetometresi (VSM) analizi, doyum manyetizasyonu değerinin 76.85 emu/g'den 43.62 emu/g'ye düştüğünü göstermektedir. Net manyetik moment 3.29 μB 'den 1.85 μB 'ye, etkin anizotropi sabiti ise 10.672 erg/g'den 4.461 erg/g'ye azalmıştır. Sonuç olarak, hazırlanan nanopartiküller endüstriyel uygulamalar için bir yol sunmaktadır.

İcin ve ark. (2023) tarafından stronsiyum hekzaferritlerinin manyetik ve termal özelliklerini Al, Cr ve Mn iyonları ile Fe yerine değiştirilerek geliştirmek ve yapı, morfoloji ve termal özelliklerdeki değişiklikleri ayrıntılı olarak açıklamaktır. $\text{SrFe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$ (M: Al, Cr, Mn; $x = 0.1, 0.3, 0.5$) tozları, çelik üretiminde atık olan mill scale'den mekanokimyasal sentez yöntemi ile üretilmiştir. Al^{3+} ikamesi faz yapısında değişiklik yapmazken, Cr^{3+} ve Mn^{3+} nanosize $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ve $\text{Mn}_8\text{Fe}_{2-8}\text{O}_4$ fazlarının oluşumuna neden olmuştur. Al ikame oranının artması, kristal boyutunu 176 nm'den 32 nm'ye düşürmüştür. Cr ikamesi de kristal boyutunu 78 nm'ye düşürürken, Mn ikamesi ters etki yaparak kristal boyutunu artırmıştır. Al^{3+} , Cr^{3+} ve Mn^{3+} ikameleri, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hegzagonal kristaldeki farklı ızgara sitelerinde yerleşimlerinden dolayı manyetik özelliklerde çeşitli etkilere yol açmıştır. Kalıntı veya kalıcı manyetizasyon (M_r) ve doyunluk manyetizasyonu (M_s), ikame iyonlarının türü ve oranına bağlı olarak sırasıyla 41.76 ve 69.94 emu/g olan başlangıç değerlerinden daha düşük bulunmuştur. En yüksek koersivite, $\text{SrFe}_{11.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{19}$ için 7116 Oe olarak gözlemlenmiştir. Curie sıcaklığı, Cr^{3+} ikamesi ile 515 °C'ye yükselirken, Al^{3+} ve Mn^{3+} ile sırasıyla 431 °C ve 426 °C'ye düşmüştür.

Ergin ve arkadaşları (2024) sol-jel oto-yanma tekniği ile sentezlenen $\text{Cu}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0, 0$ ile 1 arasında, 0,25 artışlarla) nanoparçacıklarında Sr^{2+} 'nin Cu^{2+} yerine eklenmesi durumunda yapısal, manyetik ve kan uyumluluk özelliklerini araştırmaktır. Eklenme oranından bağımsız olarak, sol-jel oto-yanma yöntemi ile elde edilen tozların boyutları 20 ila 40 nm arasında değişmektedir. Üretilen tozların özgül yüzey alanı 12 m^2/g olarak belirlenmiştir. X-ışını difraksiyon analizi, CuFe_2O_4 'ün tek fazlı bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Ancak, Sr^{2+} iyonunun ikame oranı arttıkça, çeşitli ikincil fazların ortaya çıktığı ve bu fazların oranlarının ikame oranıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Sentezlenen tozların manyetik özellikleri, katyonların alt örgü noktalarındaki dağılımıyla ilişkilendirilen manyetizasyon değişiklikleri sergilemektedir. Koersivite değerleri hem anizotropi hem de ikincil fazlardan etkilenmektedir. Sr ikamesiyle birlikte doyum manyetizasyonu, CuFe_2O_4 'te 31,3 emu/g'dan SrFe_2O_4 'te 7,6 emu/g'ye düşmektedir. En düşük koersivite değeri 429,5 Oe ile CuFe_2O_4 kompozisyonuyla hazırlanmış tozlarda gözlemlenirken, en yüksek değer 583,8 Oe ile $\text{Cu}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ kompozisyonuyla hazırlanmış nanoparçacıklarda ölçülmüştür. Ayrıca, kan uyumluluğu

deneyleri, $\text{Cu}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacıklarının oldukça düşük hemoliz oranlarına sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra, incelenen tüm numuneler, negatif kontrol testine kıyasla Soret bandı yoğunluğunda bir artış sergilemiş ve bu durum potansiyel biyo-uyumluluğa işaret etmiştir.

Mevcut araştırma eğilimi, saf nikel ferritlerinin yerine kompozitlere doğru kaymıştır. Araştırmacılar, nikel ferritlerini farklı malzemelerle kombinasyonlar deneyerek yeni özellikler elde etmeyi amaçlamaktadır. Örneğin, bir ferroelektrik malzeme ve bir ferrit malzemesi kompozitleri, zorlayıcılık, kalıcı manyetizasyon, geçirgenlik ve kayıpların kompozitteki ferrit içeriği arttıkça arttığı bildirilmiştir. Bu çalışmada $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrit nanoparçacıklarının üretilmesi, karakterizasyonu, yapısal ve manyetik özellikleri incelendi ve numuneler sol-jel tekniği kullanılarak $x=0, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1.0 konsantrasyonlarında üretildi. Maddenin nanopartikül özellikleri XRD, SEM, FT-IR kullanılarak belirlendi. Ayrıca malzemenin manyetik ölçümler 10 K ve 300 K sıcaklıklarında özellikleri araştırıldı. Yapılan önceki çalışmalar taramasında literatürde bu çalışmaya benzer bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu yüzden bu çalışma yapılarak literatüre yeni bir nanopartikül koyulması hedeflenerek ileride yapılacak çalışmalara katkı sağlanması beklenmektedir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Nanopartikül Üretim Yöntemleri

Nanopartiküllerin üretim aşamasında farklı metotlar kullanılmaktadır. Bu üretim metotları arasındaki farklılıklar, numunelerin manyetik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Bütün bu üretim metotlarında önemli olan nokta ise stokiometriye uygun bir biçimde numunelerin hazırlanmasıdır. Üretim metotları arasında yer alan bazı üretim metotları ise klasik katı hâl tepkime yöntemi, birlikte çöktürme yöntemi, hidrotermal yöntemi, mikro emülsiyon yöntemi, solvo termal yöntemi ve sol-jel yöntemidir. Bu bölümde bazı üretim metotları hakkında bilgilerden kısaca bahsedilecek, bu tez kapsamında üretilen örneklerin hazırlanma basamakları anlatılacak ve ölçümler için kullanılan yöntemler paylaşılacaktır.

3.1.1. Klasik Katı Hal Tepkime Yöntemi

Klasik katı hal tepkime yöntemi, az maliyetli ve nispeten kolay olması sebebiyle en yaygın kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Bu yöntem numunelerin kristalleşmesi için uzun sinterleme süreci içermesine rağmen temel olarak öğütme ve sinterleme işlemlerine dayalıdır. Oksitler, karbonatlar ve nitratlar bu yöntemde başlangıç malzemeleri olarak kullanılır. İstenilen özellikte malzeme üretebilmek için başlangıçta kullanılan malzemelerin saflığı önem arz etmektedir. İlk önce bir elektronik terazi yardımıyla başlangıç malzemeleri molar oranlarıyla orantılı olacak şekilde tartılır. Sonrasında homojen bir karışım elde etmek ve parçacık boyutunu küçültmek için tartılan tozlar bir agat havana (Şekil 3.1) konularak öğütülür. Öğütme işleminde daha pratik olması açısından bilyalı değirmen de (ball milling) kullanılabilir. Öğütme işleminden sonra homojen ve küçük parçacıklar haline getirilen tozlar bir alumina kroze (Şekil 3.2) içerisine konularak yüksek sıcaklık fırınlarına (Şekil 3.3) kalsinasyon işlemi için yerleştirilir. Kalsinasyon işleminin amacı, numune içerisine öğütme ve karıştırma aşamasında girebilme ihtimali bulunan yabancı maddeleri ve başlangıç malzemesi olarak karbonatlar kullanılmışsa karbonatları sıcaklık yoluyla uzaklaştırmak ve sonraki ısı işlem için çekirdeklenme oluşmasını sağlamaktır. İlk kalsinasyon işlemi yapıldıktan sonra fırın içerisinden çıkarılan tozlar tekrar havanda öğütülüp 2. kez kalsine işlemine tabi tutulabilir. Kalsinasyon işlemi 750 ile 800°C arasında bir sıcaklığa ulaşabilir ve bu sıcaklık aralığı malzeminin yapısına göre değişiklik göstermektedir. Kalsinasyon işleminden sonra 2. adım olan sinterleme işlemidir fakat numunenin sinterleme aşamasına geçebilmesi için parçacıklar arasındaki mesafeyi azaltmak ve bu sayede atomlar arasındaki difüzyonu kolaylaştırmak için toz parçacıkları 3000 ile 5000 kg/cm² arasında basınç uygulayıp uygun kalıplarda (Şekil 3.4 ve 3.5) pelet haline getirilmelidir. Sinterleme işleminde malzemenin erime sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklığa kadar belirli bir hızla yükseltilir ve bu sıcaklıkta bekletilir. Buradaki beklemedeki amaç faz yapısının büyütülmesini sağlamak, atomların aralarında oluşturduğu bağları daha güçlü hale getirmek, malzemede oluşan bazı örgü kusurlarını ortadan kaldırmaktır. Daha sonrasında malzemeler oda sıcaklığına doğru

yavaşça soğutularak fırından çıkartılır. Eğer bu soğutma işlemi kontrollü bir şekilde yapılmazsa malzemede deformasyon ve dislokasyonlar oluşabilir.



Şekil 3.1. Agat havan ve tokmak [<https://www.boroxlab.com.tr>].



Şekil 3.2. Alumina Krozeler [<https://www.hammaddeler.com.tr>].



Şekil 3.3. Kare fırın [<https://www.alserteknik.com.tr>]



Şekil 3.4. Pelet yapımı için kalıp seti [<https://m.indiamart.com.tr>].



Şekil 3.5. Pelet press sistemi [<https://www.info-tek.com.tr>]

3.1.2. Birlikte Çöktürme Yöntemi

Bu yöntem, spinel ferritlerinin elde edilmesinde en eski yöntemlerden biridir ve kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla çözeltiden partiküllerin çökertilmesini içerir. Cam, seramik ve metal oksit nanopartiküllerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, iki değerlikli ve üç değerlikli metallerin belirli mol oranlarında kombinasyonunu içerir. Üç değerlikli metal parçacıklarının kaynağı olarak çözünebilen Fe(III) içeren tuzlar tercih edilir ve işlem genellikle bazik bir ortamda gerçekleştirilir.

Yüksek kaliteli ferrit malzemelerin üretilmesi için sentez sürecinde hassas pH kontrolü gereklidir ve bu, genellikle amonyum veya sodyum hidroksit çözeltileri kullanılarak sağlanır. Çözeltinin inert koşullar altında yoğun bir şekilde karıştırılması veya çalkalanması ve ısıtılması gerekir. Faz saf ferritlerin elde edilmesi için, elde edilen tozun 500 ila 1000°C arasında değişen sıcaklıklarda tavlama gerekmektedir.

3.1.3. Hidrotermal Yöntemi

Hidrotermal tekniklerde, reaksiyon karışımı, otoklav gibi kapalı sistemlerde suyun kaynama noktasının üzerine kadar ısıtılır ve numune yüksek basınç altında buhara maruz bırakılır. Sonuç olarak, dar bir boyut dağılımına, kontrol edilebilir bir bileşim ve morfolojiye sahip tozlar üretilir. Örneğin, 250°C'de $MgSO_4$ veya $(NH_4)_2SO_4$ varlığında hidrotermal muameleye tabi tutulmuş $Zr(SO_4)_2$ 'den iğne şeklinde monoklinik zirkon elde edilmektedir. Elde edilen zirkon parçacıklarının uzunluğu 0.3 ile 1.3 mikron, genişliği ise 0.1 ile 0.2 mikron arasında ölçülmüştür.

Bu yöntemde, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ veya $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ gibi bir demir tuzu ve genellikle metalin bir tuzu ($M(NO_3)_2$, MSO_4 veya MCl_2) kullanılır. Metalin türüne bağlı olarak, bu tuzlar su veya başka bir çözücü içinde çözülür. Karıştırılırken pH değeri 7 ila 12 arasında ayarlanır. Karışım, 12 ila 24 saat boyunca bir otoklavda ısıtılır ve doğal olarak oda sıcaklığına soğutulmadan önce yıkama, filtreleme veya santrifüjleme işlemleri yapılır. Elde edilen katı, yaklaşık 85°C'de gece boyunca kurutulur. Öncü

kimyasallar, bilyalı değirmende toz haline getirilir ve çözünme yerine mekano-termal işlem için kullanılır. Fe(III) tuzu, bir metal oksit (M_2O_3) tohumuna eklenir ve tohum-hidrotermal prosedürler kullanılarak işlem gerçekleştirilir. Yukarıda açıklanan süreç, ısıtma sırasında takip edilir.

Hidrotermal yöntem, belirli bir sıcaklık ve basınç altında kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bir sentez yöntemidir ve genellikle inorganik nanopartiküllerin sentezinde kullanılır. Hidrotermal yöntemin detayları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Prensip: Hidrotermal sentez, suyun özel fiziksel ve kimyasal özelliklerinden faydalanır. Yüksek sıcaklık ve basınç, suyun çözücü özelliklerini değiştirerek kimyasal reaksiyon hızını artırır ve belirli koşullar altında istenilen materyallerin oluşumunu sağlar.

Aşamalar:

1. **Reaktan Hazırlığı:** Hidrotermal sentez için gerekli reaktanlar hazırlanır. Bu reaktanlar genellikle metal tuzları veya organik bileşiklerdir.
2. **Reaksiyon Ortamının Hazırlanması:** Reaktanlar uygun bir reaksiyon kabına yerleştirilir ve su eklenerek reaksiyon ortamı oluşturulur. Bu aşamada, reaksiyonun gerçekleşeceği sıcaklık ve basınç ayarlanır.
3. **Reaksiyonun Gerçekleştirilmesi:** Reaksiyon kabı, önceden belirlenmiş sıcaklık ve basınç koşullarına getirilir. Bu koşullar altında reaksiyon başlar ve istenilen materyaller oluşur. Genellikle, bu aşama birkaç saat veya gün sürebilir.
4. **Soğutma ve Ürünün Toplanması:** Reaksiyon tamamlandıktan sonra, reaksiyon kabı soğutulur ve içindeki ürün toplanır. Elde edilen ürün, genellikle yıkama ve kurutma işlemlerine tabi tutulur.

Uygulamalar: Hidrotermal yöntem, birçok farklı materyalin sentezinde kullanılabilir. Özellikle metal oksit nanopartiküllerinin, metal sülfürlerin, metal hidroksitlerin ve metal organik çerçevelerin sentezinde yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, nanoteknoloji, malzeme bilimi, kataliz ve çevre bilimi gibi birçok alanda çeşitli uygulamalara sahiptir. Hidrotermal sentez, basit ekipman gereksinimleri ve geniş kullanım alanı nedeniyle araştırmacılar arasında popüler bir sentez yöntemidir.

3.1.4. Mikro Emülsiyon Yöntemi

Bu yöntem, sentez koşullarında yapılan küçük değişikliklerle nanopartiküllerin boyutunun kontrolünü ve dağılımını kolayca sağlar. Yöntemin üç ana bileşeni olan su, yağ ve yüzey aktif madde, parçacık boyutunu, geometrisini, morfolojisini, homojenliğini ve yüzey alanını kontrol etmeye olanak tanır. Genellikle, biri yağ/su emülsiyonu diğeri ise su/yağ emülsiyonu olmak üzere iki tür emülsiyon kullanılır. Her iki durumda da yüzey aktif maddeler, kritik micelle konsantrasyonunun (CMC) üzerinde bir konsantrasyona ulaşılır.

Mikroemülsiyon yöntemi, çözünmeyen bileşenlerin (genellikle yağlar veya hidrokarbonlar) suda çözünmesini sağlayarak homojen bir ortam oluşturan bir tekniktir. Bu yöntem, çözeltinin iki fazı (su ve yağ) arasındaki etkileşimlere dayanır. Mikroemülsiyon yöntemi, yüksek derecede kontrol edilebilir nanopartikül sentezi için ideal bir yöntemdir ve aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilir:

Prensip: Mikroemülsiyonlar, su ve yağ fazlarının homojen bir şekilde bir araya getirilmesiyle oluşan kararlı sistemlerdir. Bu sistem, yüzey aktif maddeler (sümfaktanlar) ve ko-sümfaktanlar kullanılarak stabilize edilir. Sümfaktanlar, su ve yağ fazları arasındaki etkileşimi kolaylaştırır ve mikroemülsiyonların oluşumunu mümkün kılar.

Aşamalar:

Sümfaktan ve Ko-sümfaktan Seçimi: İlk adım, uygun sümfaktan ve ko-sümfaktanların seçimidir. Bu bileşenler, su ve yağ fazları arasındaki etkileşimi kolaylaştırarak mikroemülsiyon oluşumunu sağlar.

Karışımın Hazırlanması: Sümfaktan, ko-sümfaktan, su ve yağ bileşenleri belirli bir oranla karıştırılarak homojen bir çözelti oluşturulur. Bu karışım, su ve yağ fazları arasında dengeli bir etkileşim sağlamak amacıyla titizlikle seçilir.

Emülsiyon Oluşturma: Karışım, genellikle bir karıştırıcı veya ultrasonik cihaz yardımıyla emülsifiye edilir. Bu işlem, su ve yağ fazlarının homojen bir şekilde bir araya gelmesini sağlar ve mikroemülsiyon oluşumunu başlatır.

Stabilizasyon: Emülsiyon, sümfaktan ve ko-sümfaktan molekülleri tarafından stabilize edilir. Bu moleküller, su ve yağ arasındaki arayüzey gerilimini azaltarak mikroemülsiyonun kararlılığını artırır.

Ürünün Toplanması: Mikroemülsiyon oluşturulduktan sonra, istenilen ürün toplanır ve gerektiğinde saflaştırma işlemine tabi tutulur.

Uygulamalar: Mikroemülsiyon yöntemi, farmasötik endüstrisinde ilaç taşıma sistemleri, kozmetik ürünlerde emülsifikasyon ve gıda endüstrisinde aroma taşıyıcıları gibi birçok alanda kullanılır. Ayrıca, nanoteknoloji alanında nanopartikül sentezinde de yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Mikroemülsiyonlar, farklı bileşenlerin homojen bir şekilde dağılmasını sağladığı için endüstriyel ve araştırma uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir.

3.1.5. Solvo Termal Yöntemi

Ferrit malzemeler, geliştirilmiş fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde biyomedikal uygulamalarda kullanılabilen ileri teknoloji materyallerdir. Bu tür malzemelerin üretiminde, solvo-termal yöntem yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntem, sentez sürecinde öncül maddelerin etkileşimini kolaylaştırmak amacıyla genellikle orta ila yüksek basınç (1 atm ile 10.000 atm) ve belirli bir sıcaklık aralığında (100°C ile 1000°C) çözücü kullanımını içerir.

Solvo-termal yöntemi, cam benzeri bir yapıya sahip ferrit malzemelerin boyut dağılımı, şekli ve özellikleri üzerinde hassas kontrol sağlamayı mümkün kılar. Sentez sırasında, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, çözücü türü, yüzey aktif maddeler ve öncül maddeler gibi değişkenler optimize edilerek farklı özelliklere sahip malzemeler üretilebilir. Bu yöntemle hem sıvı hem de susuz formda ferrit malzemelerin üretilmesi mümkündür.

3.1.6. Sol-jel Yöntemi

Sol-jel üretim tekniğinde, metal tuzlarının kullanıldığı bir yöntemdir. Bu metal tuzları, su ile çözdürüldüğünde oda sıcaklığında bir süre sonunda jel meydana gelir. Sol-jel üretim tekniğinin birçok avantajı bulunmaktadır; bunlar arasında, malzeme bileşenlerinin kontrol edilebilmesi ve pahalı enstrümanlara olan ihtiyaçların azalması öne çıkmaktadır. Bu yöntem, özellikle mikro yapı kontrolü sağlamak için yaygın olarak tercih edilmektedir. Ferrit malzemeleri, sınırlı boyut dağılımı ve kontrollü şekillerle homojen bir şekilde karıştırılabilir. Sol-jel yönteminde, sıcaklık 25 °C ile 200 °C arasında değiştirilebilir, böylece malzeme özellikleri hassas bir şekilde ayarlanabilir.

CuFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , CdFe_2O_4 gibi basit spinel ferritlerini sentezleme sürecinde sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, spinel ferritlerinin fizikokimyasal özellikleri ve katkı maddelerinin özellikleri dikkate alınmalıdır., Sol-jel yöntemi, cam ve seramik malzemelerin sentezinde kullanılan bir kimyasal sentez yöntemidir. Bu yöntem, bir sol (süspansiyon) aşamasından jel (katı jel) aşamasına geçişi içerir. Genellikle metal tuzlarının ve organik-inorganik hibrit malzemelerin sentezinde kullanılır.

Prensip: Sol-jel yöntemi, bir çözeltinin hidrolizi ve yoğunlaşma (kondensasyon) reaksiyonları yoluyla katı bir jel oluşturulmasını içerir. Bu reaksiyonlar, uygun reaktiflerin bir çözelti içindeki kimyasal reaksiyonları sonucu gerçekleşir. İlk olarak, metal tuzlar veya organik bileşikler gibi uygun reaktifler, bir çözücü içinde çözülür. Ardından, hidroliz ve kondensasyon reaksiyonları ile jel oluşumu gerçekleşir. Aşamalar:

Precursorların Hazırlanması: İlk adım, malzemenin öncül bileşenlerinin hazırlanmasıdır. Bu genellikle metal alkoksitler veya organik bileşikler içerir.

Hidroliz: Precursorlar, bir çözücü içinde hidrolize uğrar. Hidroksil grupları (OH^-) tarafından su moleküllerinin eklenmesiyle bu reaksiyon gerçekleşir.

Kondensasyon: Hidroliz sonucunda oluşan ürünler, çözeltideki diğer moleküllerle kondense olurlar. Bu reaksiyon, jel oluşumunu tetikler.

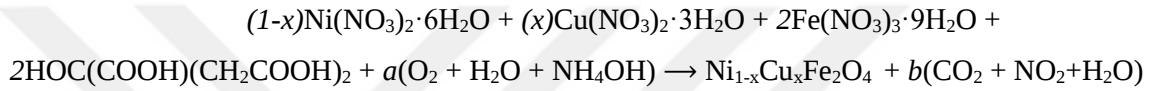
Jel Oluşumu: Hidroliz ve kondensasyon reaksiyonları sonucunda bir jel oluşur. Bu jel, çözeltinin viskozitesinin artmasıyla karakterizedir.

Kurutma: Oluşan jel, genellikle özel kurutma teknikleriyle kurutulur. Bu, jel materyalin katı hale dönüşmesini sağlar.

Uygulamalar: Sol-jel yöntemi, cam, seramik, membran, kaplama malzemeleri, katalizörler ve sensörler gibi birçok farklı malzemenin sentezinde kullanılır. Bu yöntem, malzemenin kimyasal bileşimini ve mikro yapısını kontrol etme yeteneği nedeniyle özellikle önemlidir. Ayrıca, bu yöntem nanoteknoloji ve biyomalzeme gibi gelişen alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sol-jel yöntemi, malzemenin homojen bir şekilde sentezlenmesini sağlayan esnek bir yöntemdir. Bu yöntem, malzemenin yapısal ve morfolojik özelliklerini kontrol etme yeteneği sayesinde birçok endüstriyel ve bilimsel uygulamada kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında sol-jel otomatik yanma reaksiyon yöntemi (Şekil 3.6) ile aşağıdaki kimyasal reaksiyon sonucunda $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ ($x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75$ ve 1.0) nanopartikül malzemeler üretilmiştir.



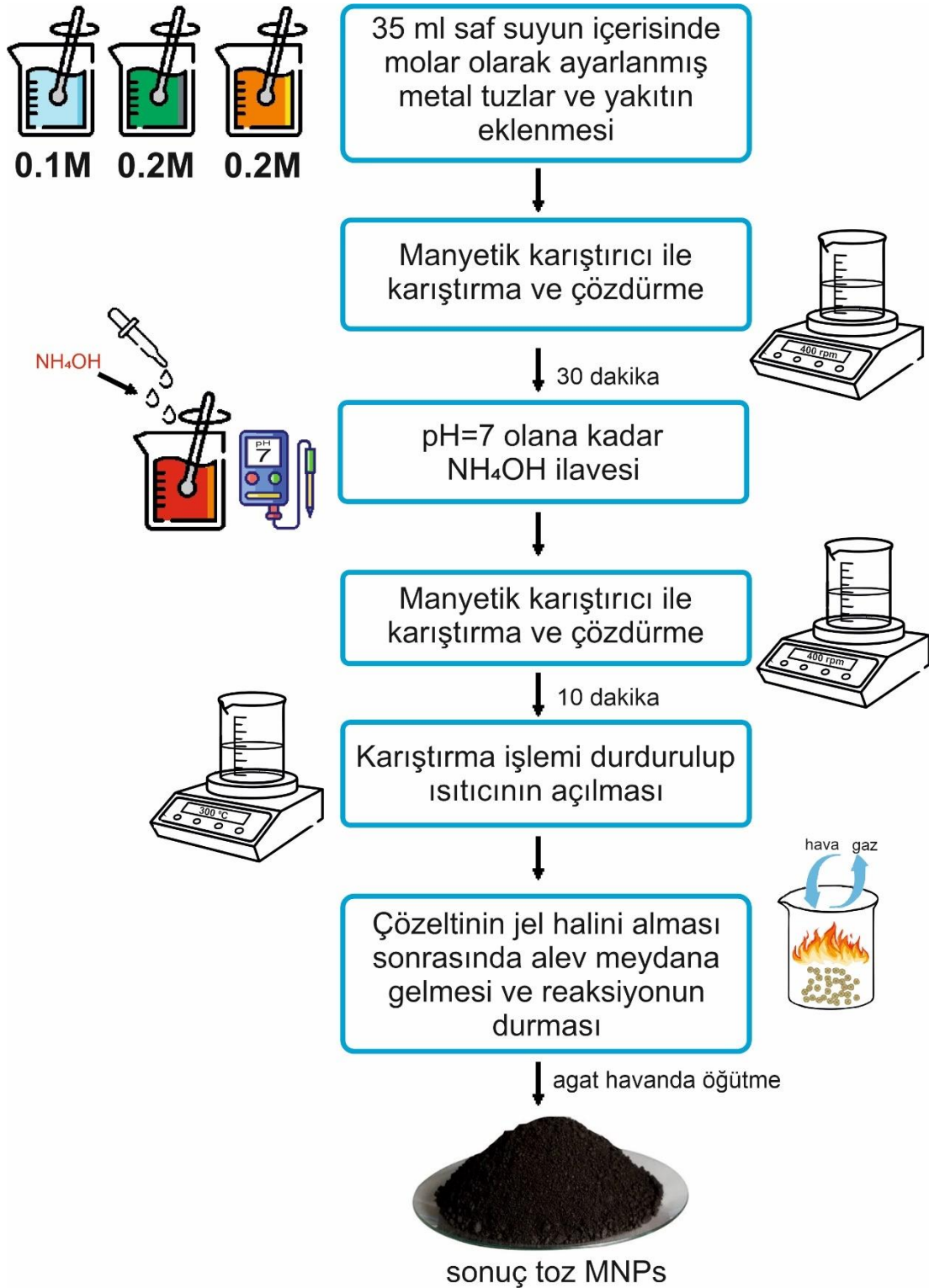
Bu yöntemle Çizelge 3.1’ de 3 gram nanopartikül üretebilmek için eklenmesi gereken nitratl bileşikler miktarı gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Son ürün 3 gr olacak reaksiyona girecek ana madde miktarları

	x=0.0	x=0.25	x=0.50	x=0.75	x=1.0
Ni(NO₃)₂	3.7176	2.7747	1.8455	0.9160	0
Cu(NO₃)₂	0	0.7684	1.5333	2.2831	3.0280
Fe(NO₃)₃	10.3290	10.2786	10.2547	10.1621	10.10282
C₆H₈O₇	4.9125	4.8886	4.8799	4.8443	4.8185

- $x=0.0$, $x=0.25$, $x=0.50$, $x=0.75$ ve $x=1.0$ için hesaplanan $Ni(NO_3)_2$, $Cu(NO_3)_2$, $Fe(NO_3)_3$ ve $C_6H_8O_7$ değerleri hassas terazide tartıldı. (Şekil 3.7)
- Beher içerisine konulan 35mL saf su içerisine hassas terazide tartılan bileşikler eklendi. (Şekil 3.8)
- Beher içerisine metal balık atılarak manyetik karıştırıcıda 30 dakika boyunca karıştırıldı.
- Karıştırma işlemi bitince pH değeri 7 olması için çözeltiye NH_4OH ilave edildi.
- 10 dk daha karıştırma işlemine tabi tutulup, içerisindeki balık çıkarıldı. Karıştırma işlemi durdurularak ısıtıcı açıldı. $300^\circ C$ ‘de jelleşip ardından yanması için ısıl işleme tabi tutuldu. (Şekil 3.9)

- Yanma sonunda yanan bileşik (Şekil 3.10) agat havan içerisinde dövülerek son haline getirildi. Ardından beher içerisinde toplanan manyetik NP'lerin beher altında tutulan mıknatıs ile etkileşimi gözlemlendi. (Şekil 3.11)



Şekil 3.6. $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ numunelerinin hazırlanmasında kullanılan akış şeması



Şekil 3.7. Nitratlı bileşiklerin hassas terazide tartılması (Ç.Ü Süperiletkenlik ve Manyetizma Lab)



Şekil 3.8. Nitratlı bileşiğin hidrolize edilmesi (Ç.Ü Süperiletkenlik ve Manyetizma Lab)



Şekil 3.9. Çözeltinin sinterlenmesi (jel oluşumu) (Ç.Ü Süperiletkenlik ve Manyetizma Lab).



Şekil 3.10. Elde edilen sipinel ferrit



Şekil 3.11. Beher içerisinde toplanan manyetik NP'lerin beher altında tutulan mıknatıs ile etkileşimi.

3.2. Karakterizasyon Yöntemleri

3.2.1. SEM (Scanning Electron Microscopy) ve EDS (Electron Dispersive Spectroscopy)

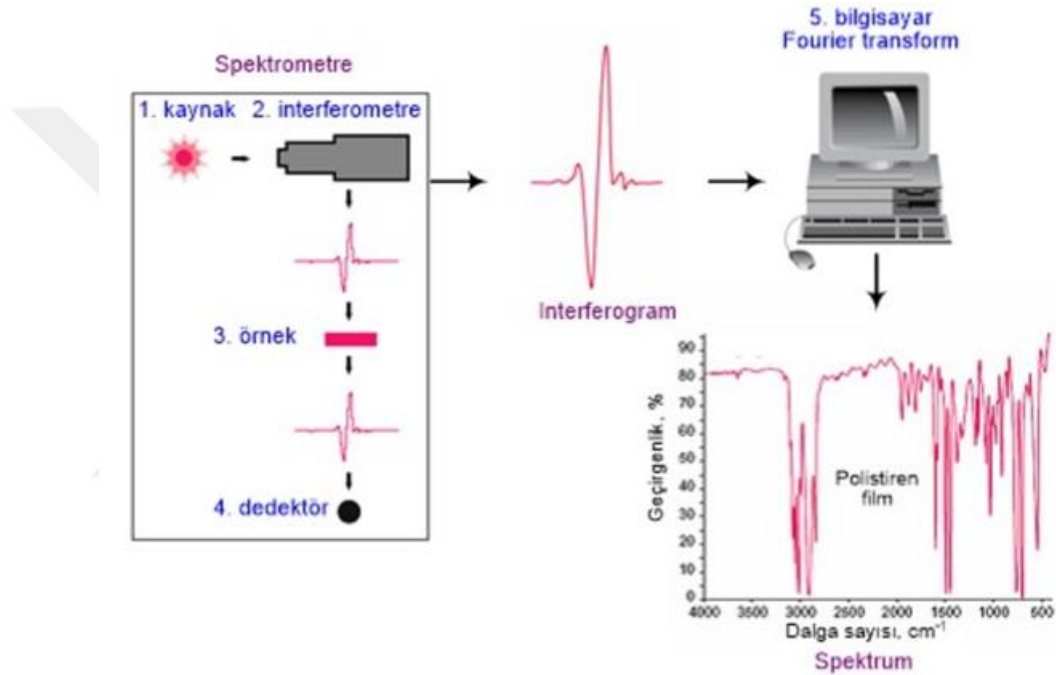
Şekil 3.12 de görülen SEM'de, yüksek enerjili elektronlar numune ile etkileşerek elektron ve foton sinyalleri oluşturur. Farklı açılarda saçılan elektronlar, dedektör (algılayıcı) tarafından toplanır ve toplanan sinyallerin mikroskop yazılımı ile işlenmesi sonucunda görüntüler elde edilir. İkincil elektronlar, malzeme topografisi ve geri saçılan elektronlar, atom numarasına ve kontrasta bağlı atomik kompozisyon hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca EDS dedektör ile noktasal, çizgisel veya bölgesel nitel ve nicel analiz ile elementlerin dağılım haritalaması yapılmaktadır.



Şekil 3.12. Toz numunelerinin iletkenliğinin sağlanması için altın kaplama kabı (sağ) ve SEM cihazına yerleştirilen numuneler (sol)

3.2.2. FT-IR Cihazı (Fourier Transform Infrared Spektroskopisi)

Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi (şekil 3.13), ayrı ayrı moleküllerin ve moleküler karışımların bileşiminin yapısını anlamak için kullanılan analitik bir metodolojidir. Kızılötesi ışık, molekülün içinde bulunan atomlar arasındaki titreşimsel bağ enerjileriyle doğrudan ilişkili olarak belirli frekanslarda emilir. Titreşimin bağ enerjisi ve orta kızılötesi ışığın enerjisi birbirine eşit olduğunda, bağ bu enerjiyi emebilir. Moleküldeki farklı bağlar, farklı enerjilerde titreşir ve bu yüzden kızılötesi radyasyonun farklı dalga boylarını emer. Bu, ayrı ayrı emilim bantlarının konumu (frekansı) ve şiddeti, toplam spektruma katkıda bulunarak molekülün karakteristik parmak izini oluşturur.



Şekil 3.13. FT-IR cihazının çalışma akışı şeması

3.2.3. XRD (X-ray Diffraction) Spektroskopisi

Şekil 3.14 de görülen X-Işını Kırınım yöntemi yani XRD, her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X ışınları karakteristik bir düzen içerisinde kırılması esasına dayanarak çalışır. Farklı olan her kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar.



Şekil 3.14. XRD cihazının görüntüsü

3.2.4. VSM (Vibrating Sample Magnetometer)

Manyetik malzeme karakterizasyonu için Şekil 3.15 de gösterilen VSM (Vibrating Sample Magnetometer) sistemi kullanılmaktadır. Malzemelerin manyetik alan duygunluğu (χ), doyum mıknatıslanma (M_s), tersinir alan (H_c), kalıcı mıknatıslanma (M_r) gibi temel manyetik parametreleri bu cihazlarla tespit edilmektedir. VSM manyetometresi nikel gibi mıknatıslanma değerleri bilinen malzemeler kullanılarak kalibre edilmektedir.

VSM cihazı, örneği sabit bir manyetik alan içinde küçük bir genlikte ve yüksek bir frekansta titreştirerek çalışır. Bu titreşim sonucunda, manyetik momentte meydana gelen değişiklikler bir dedektör tarafından algılanır ve ölçülür. Örnekteki manyetik momentin değişimi, örneğin manyetik alanla etkileşimine bağlı olarak cihaz tarafından kaydedilir ve analiz edilir.



Şekil 3.15. VSM cihazının görüntüsü (Ç.Ü Süperiletkenlik ve Manyetizma Lab).



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

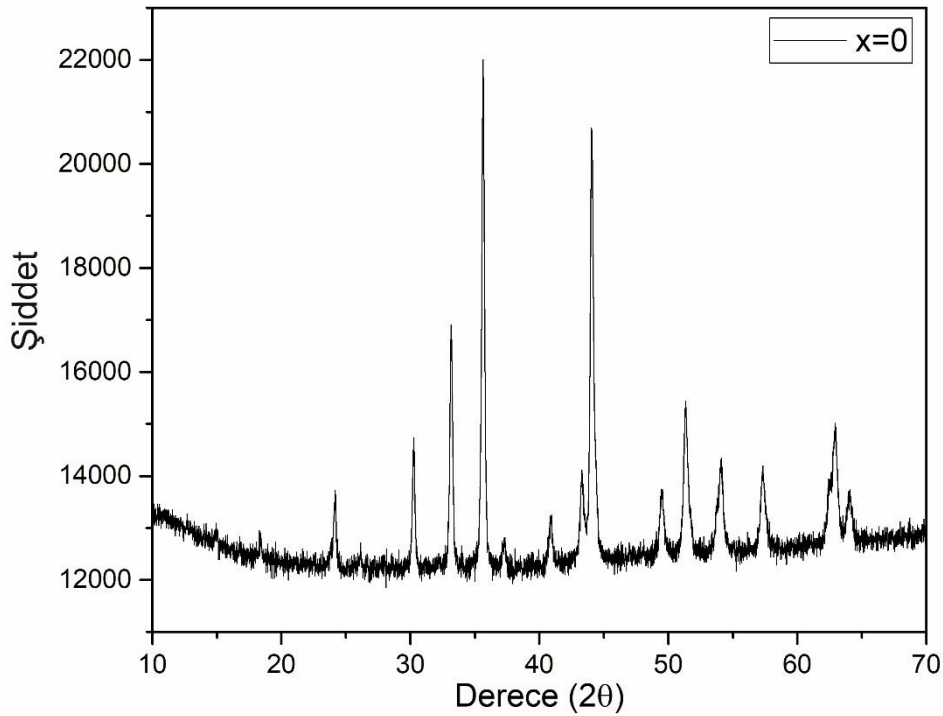
4.1. Giriş

Bu bölümde $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ spinel ferrit nanoparçacıklarının üretimi, karakterizasyonu ve hem yapısal hem de manyetik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Numuneler, sol-jel yöntemleri kullanılarak $x=0, 0.25, 0.5, 0.75$ ve 0.1 konsantrasyonlarında başarıyla sentezlenmiştir. Nanopartiküllerin yapısal özellikleri için X-ışını kırınımı (XRD), morfolojik analiz için taramalı elektron mikroskobu (SEM), elementel analiz için saçılan elektron spektroskopisi (EDS), moleküler bağların analizi için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve manyetik özelliklerin belirlenmesinde Titreşen örnek manyetometresi (VSM) teknikleri kullanıldı. Bu tekniklerden elde edilen veriler şunlardır:

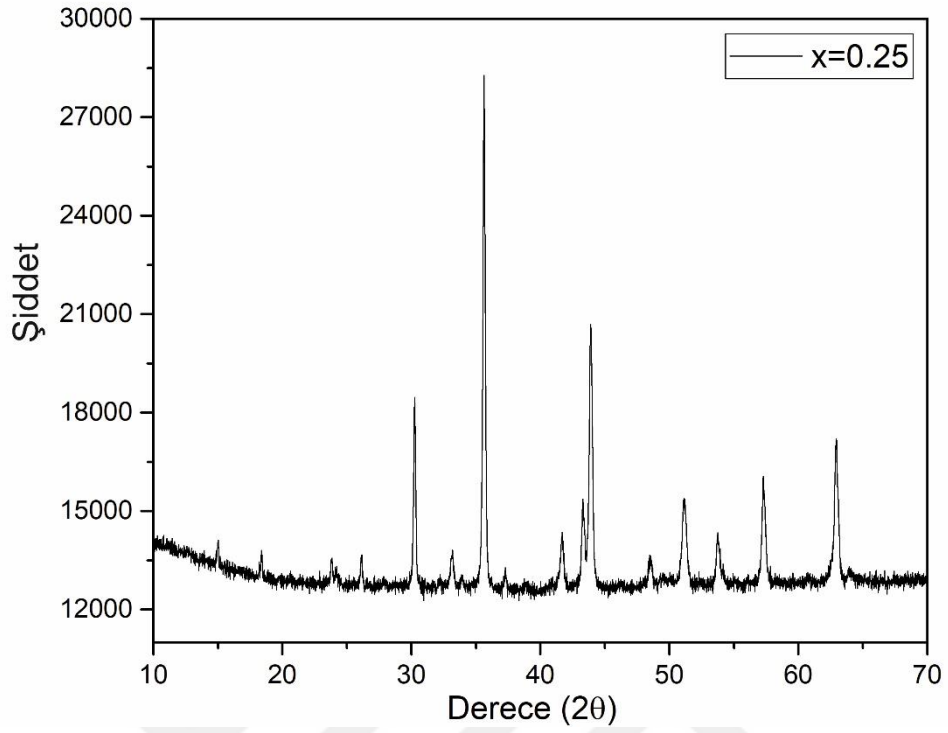
4.2. Toz Örneklerinin DeneySEL Analizlerinin Sonuçları

4.2.1. XRD Analizi

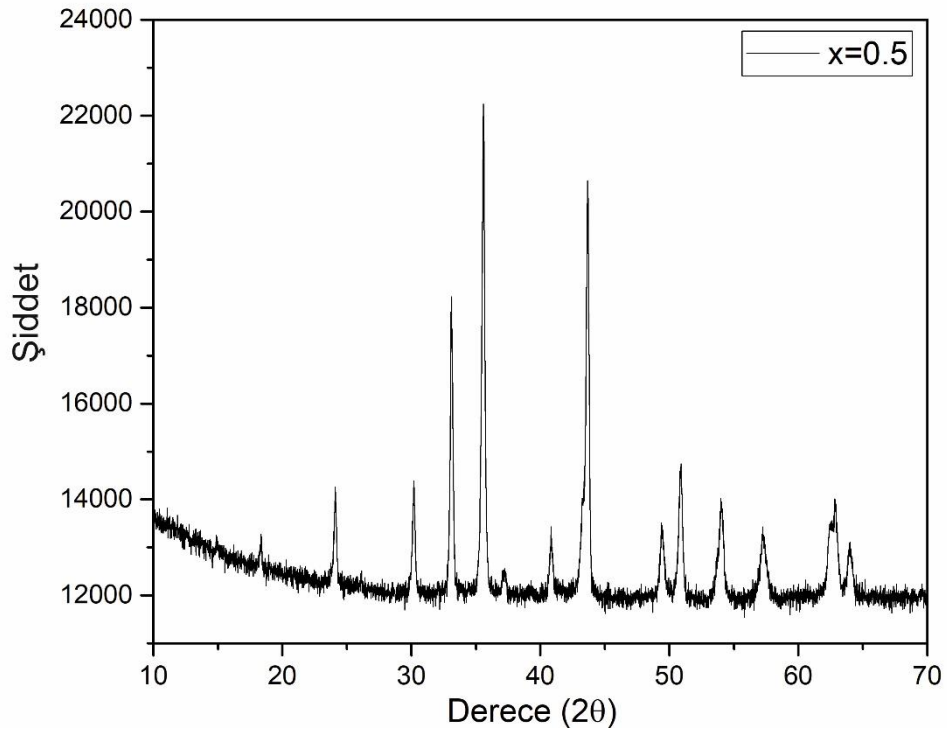
Numunelerin XRD ölçümleri için toz formları kullanıldı ve ölçüm hızı saniyede 0.0131303 derece olarak gerçekleştirildi.



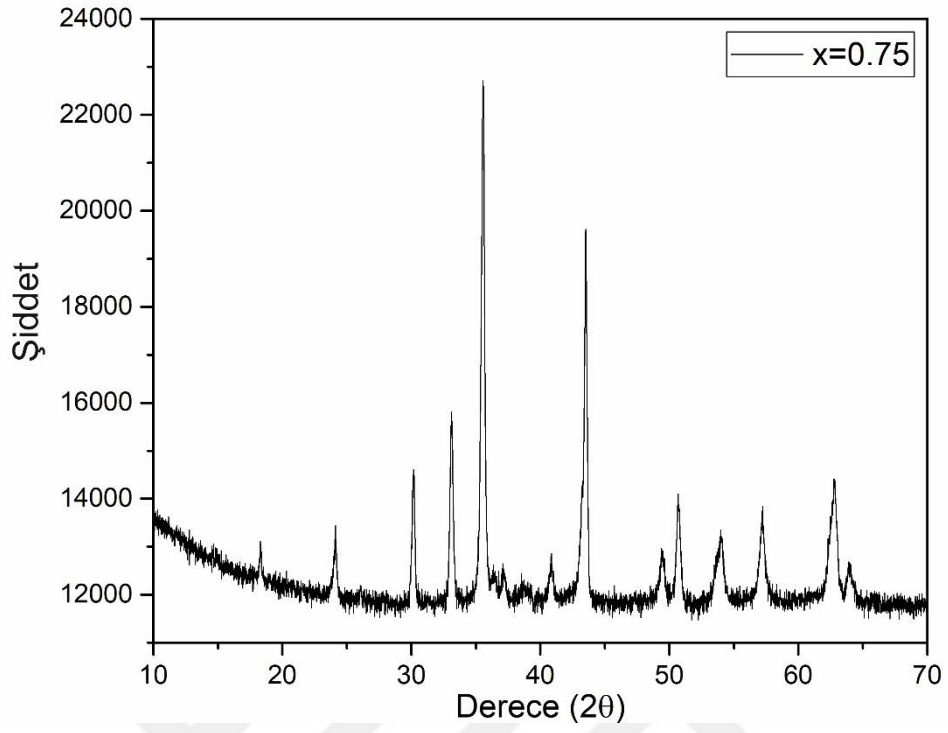
Şekil 4.1. $x=0.0$ numunesinin XRD sonucu



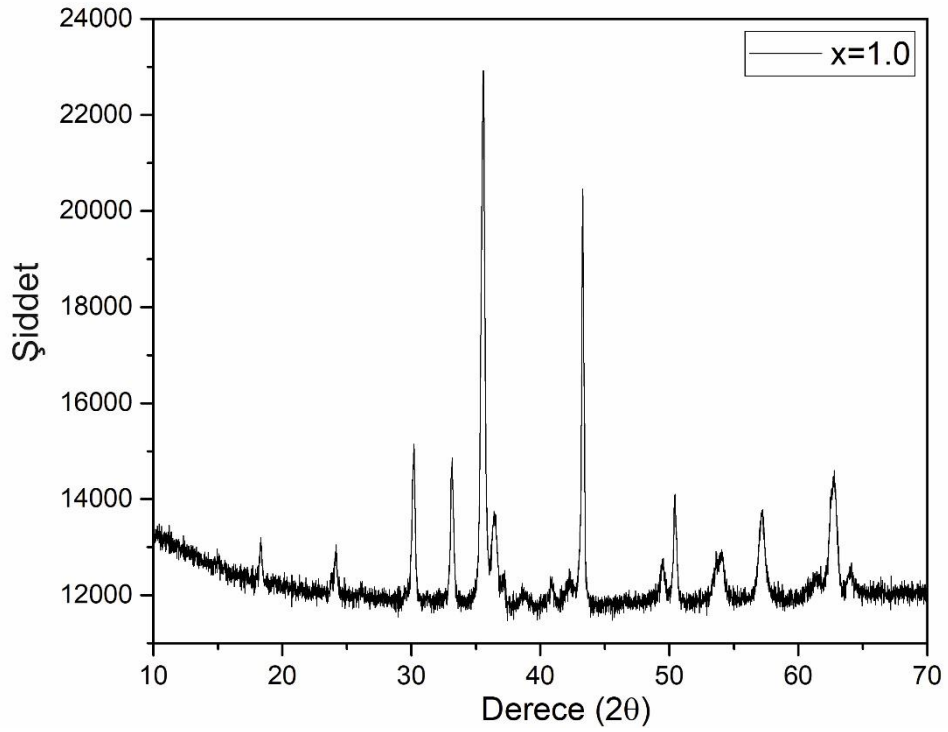
Şekil 4.2. $x=0.25$ numunesinin XRD sonucu



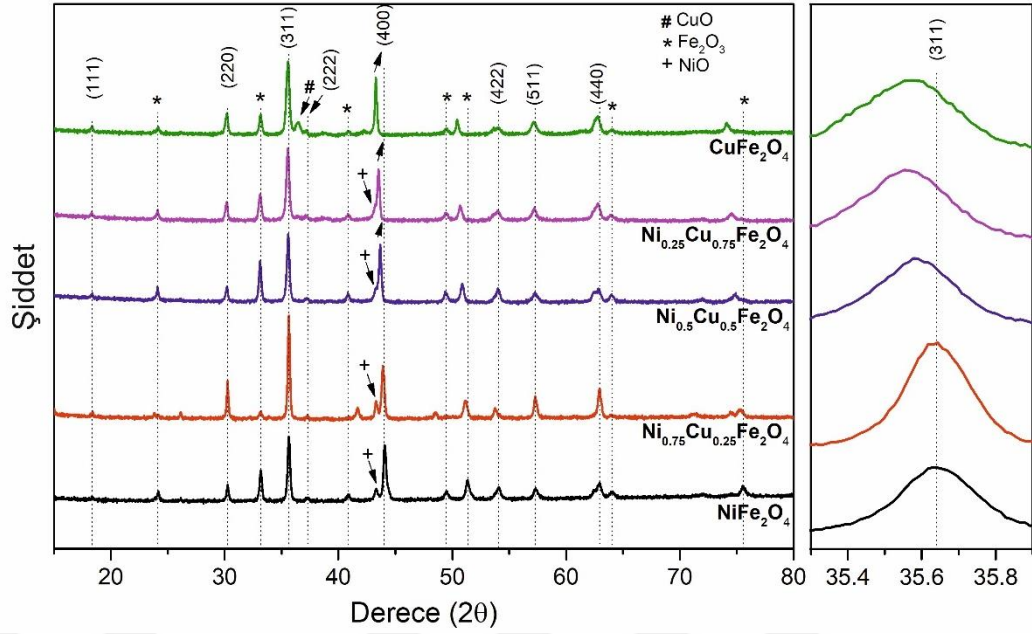
Şekil 4.3. $x=0.5$ numunesinin XRD sonucu



Şekil 4.4. $x=0.75$ numunesinin XRD sonucu



Şekil 4.5. $x=1.0$ numunesinin XRD sonucu



Şekil 4.6. Tüm numunelerin birleştirilmiş XRD sonucu

Çizelge 4.1. Toz örneklerinin birim hücre a , b , c parametreleri ve birim hücre hacmi değerleri

	$x=0.0$	$x=0.25$	$x=0.5$	$x=0.75$	$x=1.0$
$a=b=c$ (Å)	8.355	8.354	8.367	8.374	8.373
$V=a^3$ (Å ³)	583.2	582.9	585.8	587.2	587.1

Kübik yapıdaki $Ni_{1-x}Cu_xFe_2O_4$ spinel yapısındaki HighScore programı kullanılarak hem safsızlığın belirlenmesinde hem de $a=b=c$ parametrelerinin, Cu katkısına göre değişimi çizelge 4.1’de listelenmiştir. Bu sonuçlara Bragg yasası (denklem 7) ve düzlemler arası mesafe ve miller indislerinden elde edilen birim hücre parametreleri (denklem 8) hesaplandı.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (7)$$

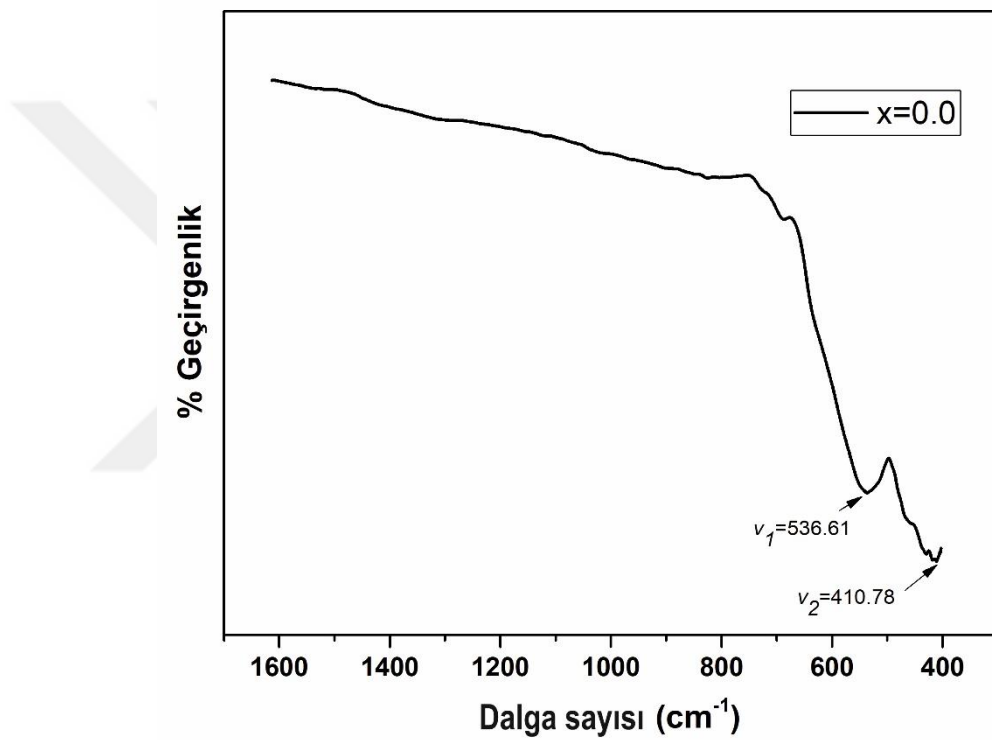
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (8)$$

Bu sonuçlara göre Cu katkısının birim hücre parametresi ve hacim üzerindeki etkisi oldukça düşük değerdedir. Şekil 4.6 ya göre (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511) ve (440) pikleri karakteristik spinel yapısına ait pikler olup bu pikler 98-003-7429 pdf katalog numrasına göre belirlendirildi. #, * ve + pikleri sırayla CuO, Fe₂O₃ ve NiO piklerine aittir. Bu pikler ise sırasıyla 98-003-1059, 98-024-7034 ve 47-1049 pdf katalog numaralarından belirlendi. Şekil-4.6 da görülen en yüksek pik değerinin (311) artan Cu miktarıyla sol tarafa doğru kaydığı saptanmıştır. Bu kaymanın nedeninin, Ni (0.63 Å^o) ve Cu (0.73 Å^o) iyonlarının çaplarının farklı oluşundan kaynaklandığı

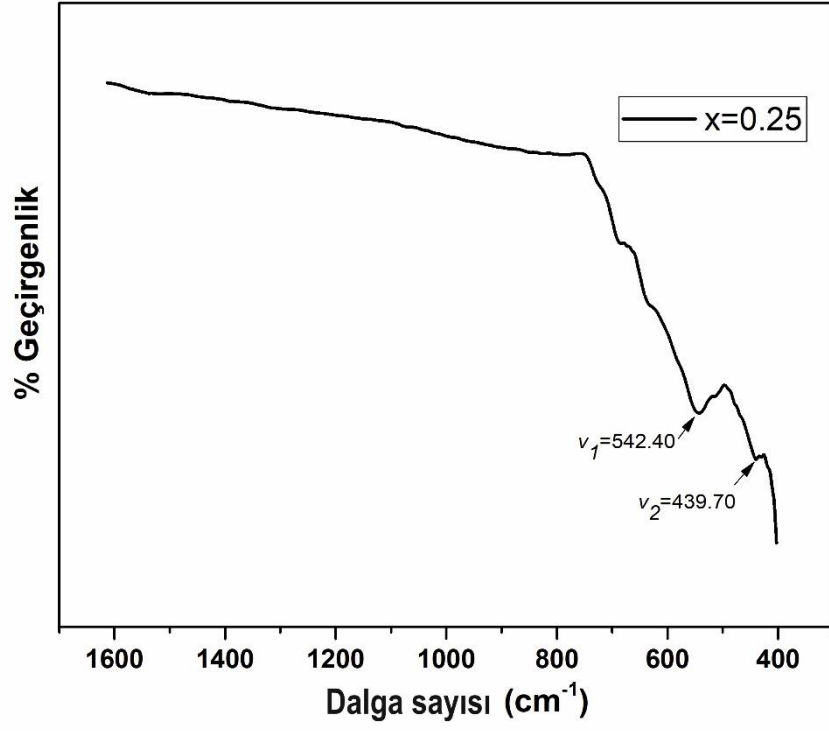
yorumu yapılabilir.

4.2.2. FT-IR Analizi

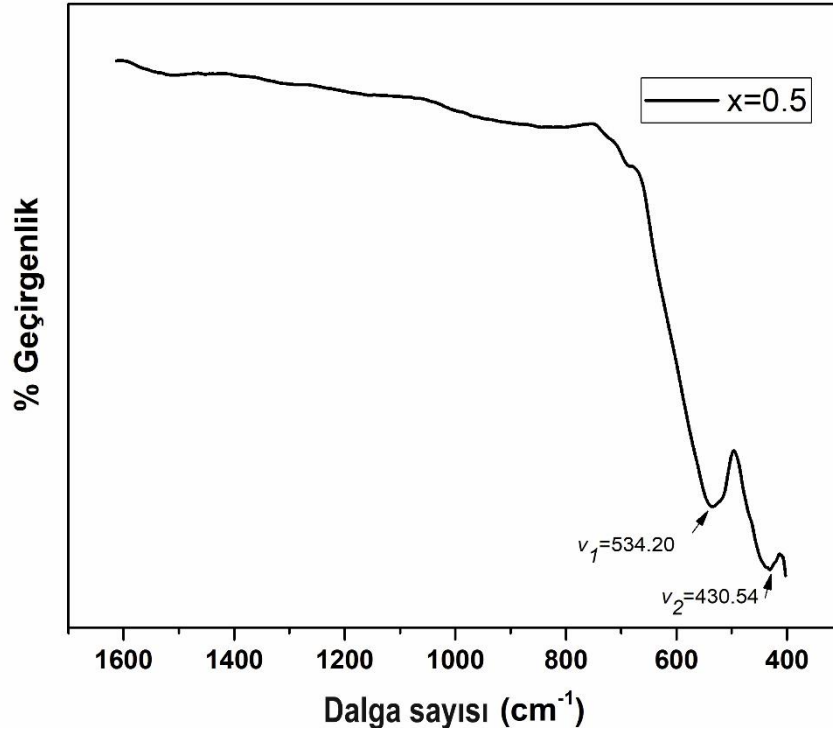
Kızılötesi spektroskopisi, moleküllerin bağ yapısını açıklamak için bir araç olarak kullanılır. Spinel yapı (AB_2O_4) içinde, iki bağ türü için titreşim frekansları $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığına düşer. Özellikle, A-O bağının titreşim frekansı ($400\text{--}500\text{ cm}^{-1}$) tetrahedral bölgeye (A bölgesi) karşılık gelirken, B-O bağının titreşim frekansı ($500\text{--}600\text{ cm}^{-1}$) oktahedral bölgeye (B bölgesi) karşılık gelir. Bu analiz tekniğine göre üretilen nanopartiküllerin toz formları kullanıldı ve bu sonuçlar sırasıyla Şekil 4.7 den Şekil 4.11 e kadar verilmiştir.



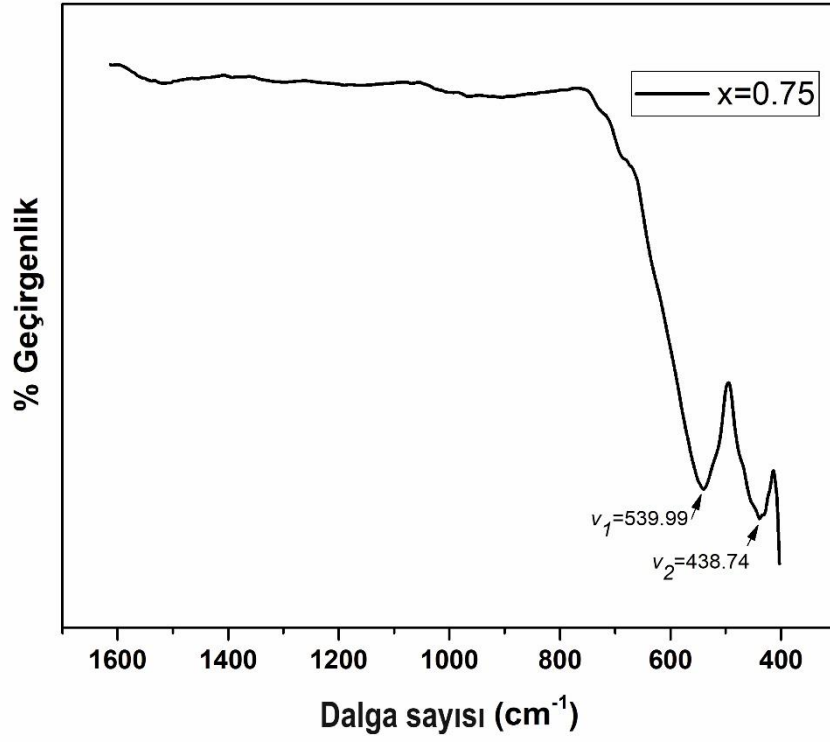
Şekil 4.7. $x=0.0$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.



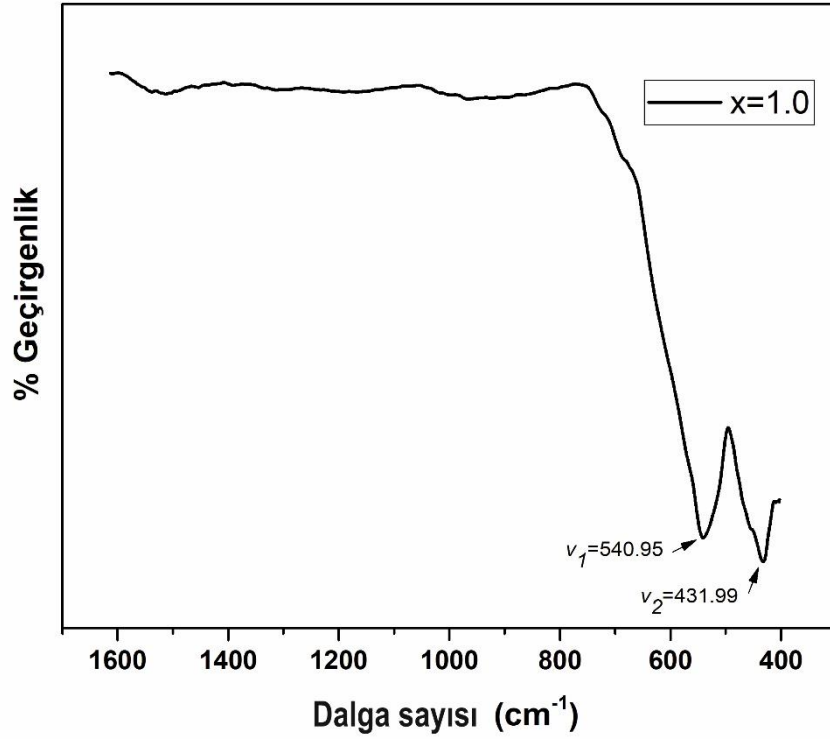
Şekil 4.8. $x=0.25$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.



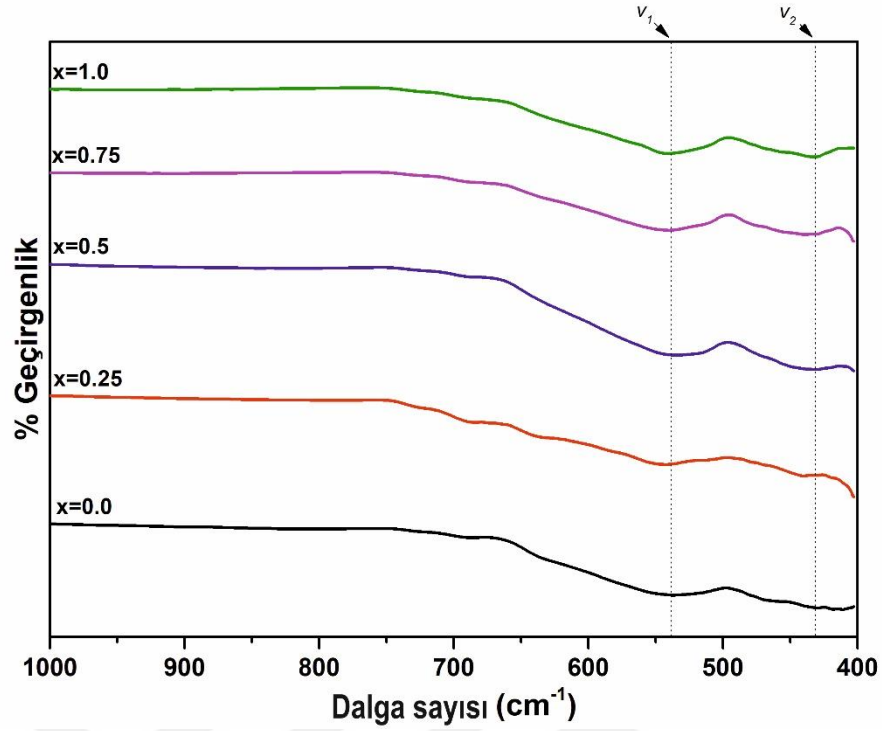
Şekil 4.9. $x=0.5$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.



Şekil 4.10. $x=0.75$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.



Şekil 4.11. $x=1.0$ numunesinin FT-IR analizi sonucu.



Şekil 4.12. Tüm numunelerin birleştirilmiş FT-IR sonuçları.

FT-IR spektrumunun bir sonucu olarak, 400–600 cm^{-1} dalga sayıları arasında normalde spinel yapıya işaret eden iki tepe gözlemlendi. Çizelge 4.2’de spinel tepeler ve K_T ve K_0 değerleri tüm FT-IR analizleri sonucunda verilmektedir. Burada K_T ve K_0 değerleri spinel tepelerden ve katyonların moleküler ağırlıklarından (M_1 ve M_2) yararlanarak ve % geçirgenlik piklerine ait dalga sayılarında bulunmaktadır. Tetrahedral ve Oktohedral yapılarıdaki bağların kuvvet sabitleri (K_T ve K_0) değerleri Waldron metoduna göre (Sarmah ve ark. 2023) denklem 8 ve 9’daki gibi hesaplanır ve bu sonuçlar çizelge 4.2 de listelenmiştir.

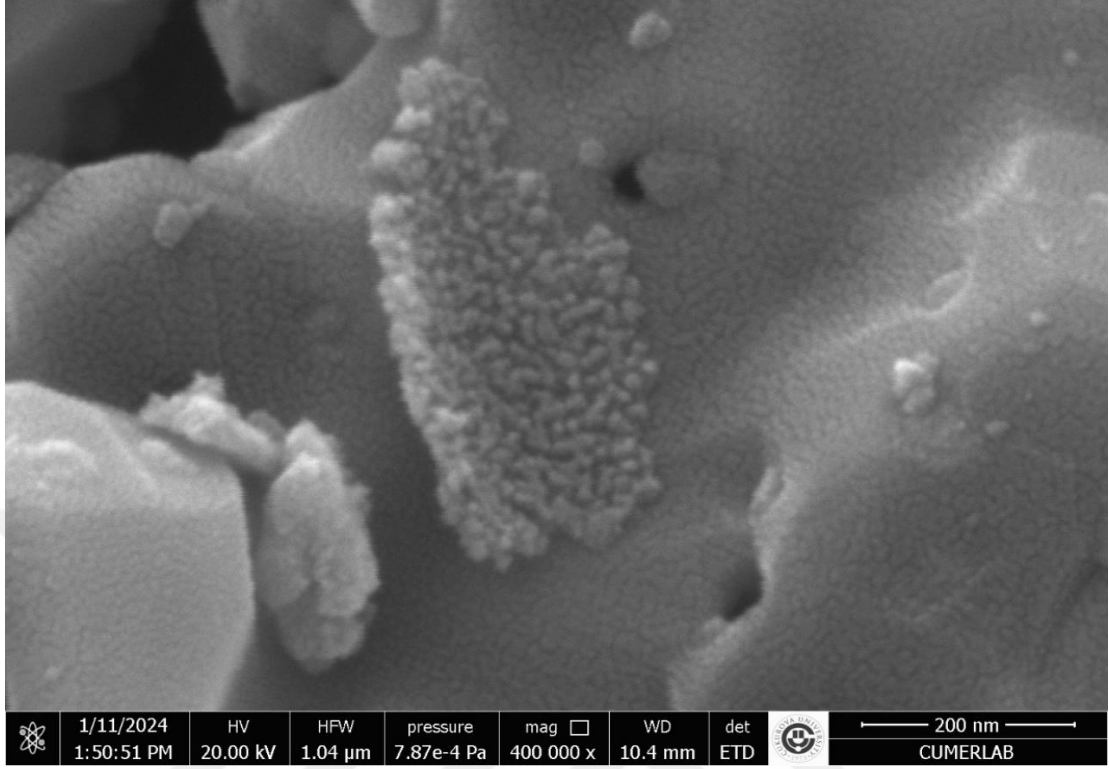
$$K_T = 7.62 \times M_1 \times V_1^2 \times 10^{-7} \text{ N/m} \quad (9)$$

$$K_0 = 5.31 \times M_2 \times V_2^2 \times 10^{-7} \text{ N/m} \quad (10)$$

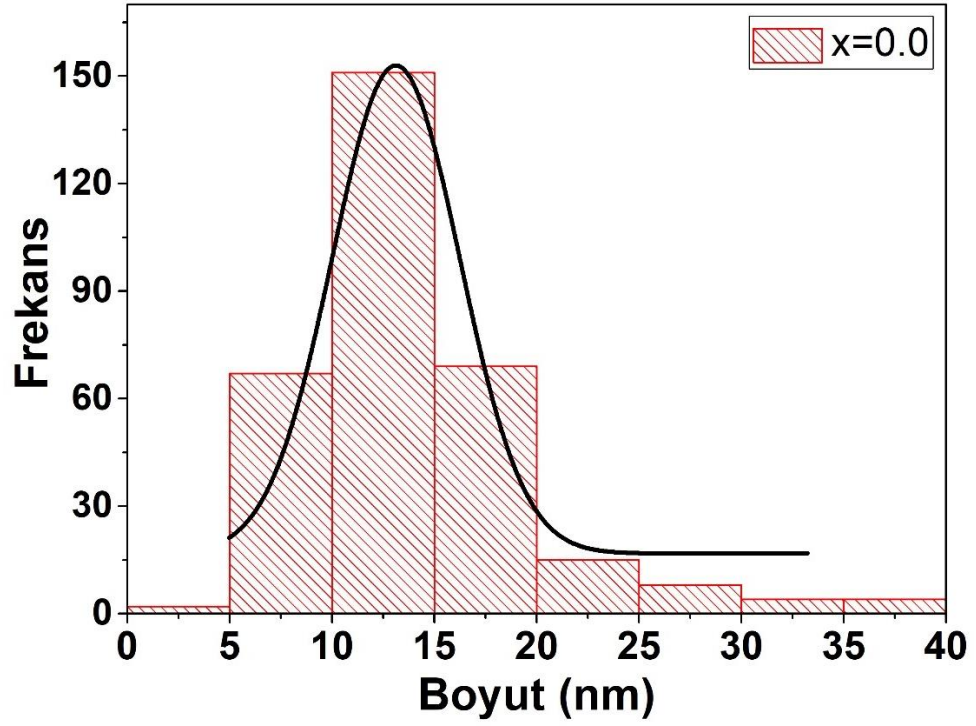
Çizelge 4.2. Toz örneklerinin $x=0$ ’dan $x=1$ ’e kadar FT-IR analizleri.

	$x=0.0$	$x=0.25$	$x=0.5$	$x=0.75$	$x=1.0$
$V_1 (\text{cm}^{-1})$	536.61	542.40	534.20	539.99	540.95
$V_2 (\text{cm}^{-1})$	410.78	439.7	430.54	438.74	431.99
$K_T (\times 10^2 \text{ N/m})$	2.52	2.60	2.55	2.62	2.66
$K_0 (\times 10^2 \text{ N/m})$	1.03	1.19	1.13	1.21	1.18

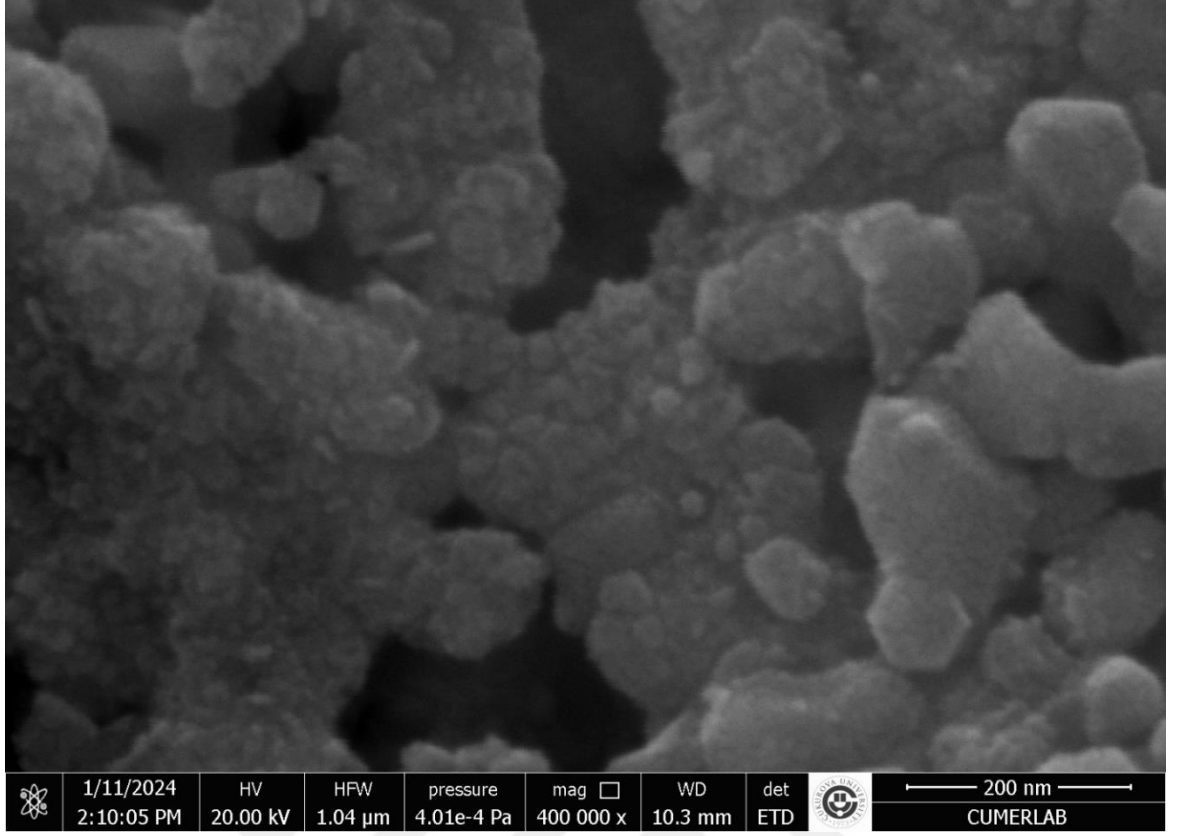
4.2.3. SEM Analizi



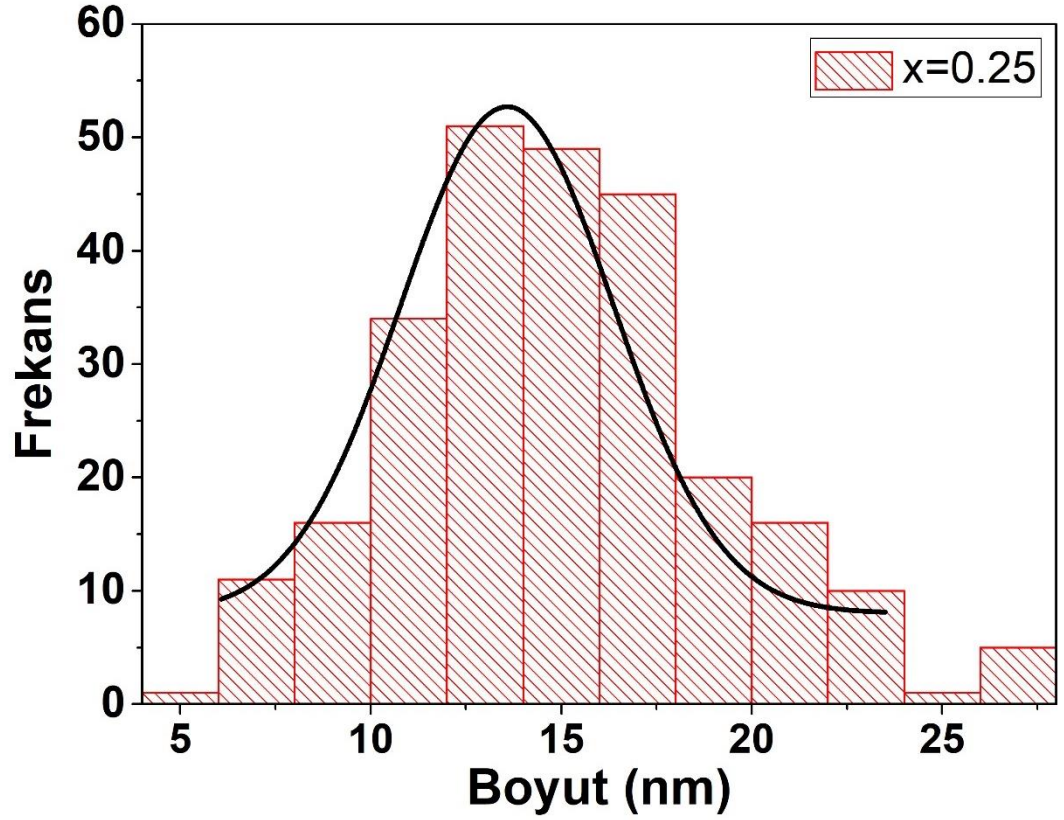
Şekil 4.13. $x=0.0$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü



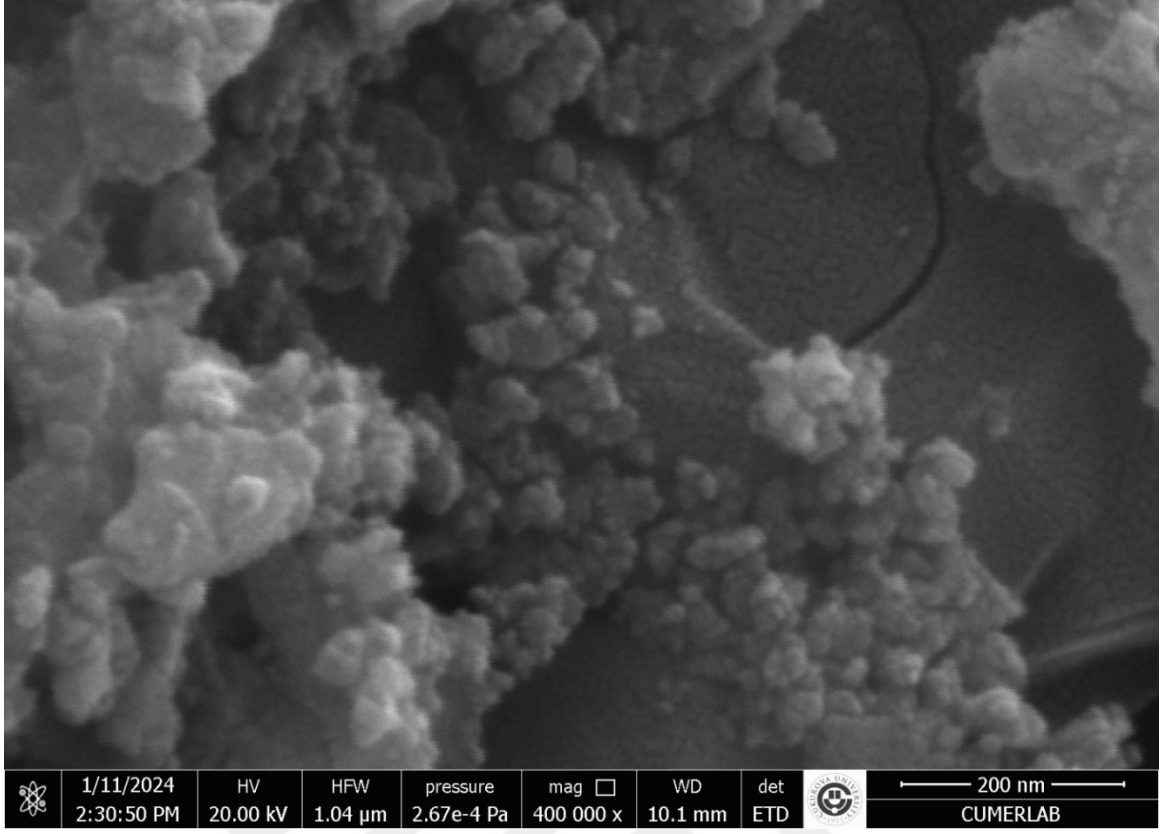
Şekil 4.14. $x=0.0$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.



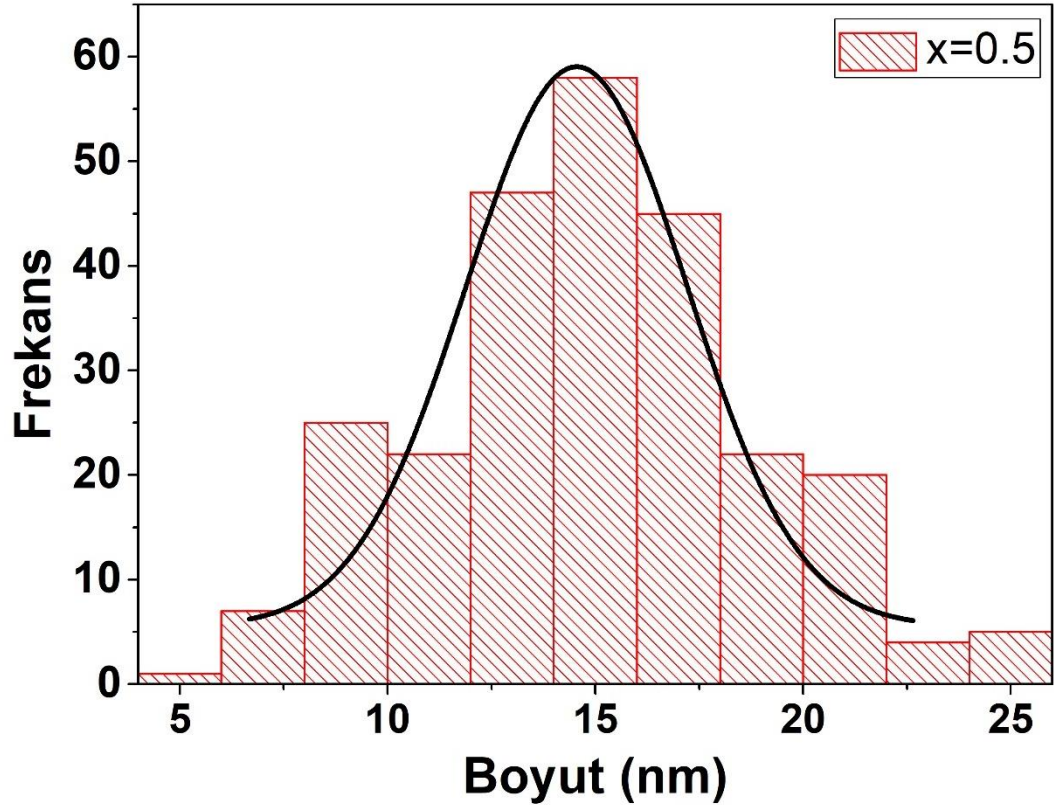
Şekil 4.15. $x=0.25$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü



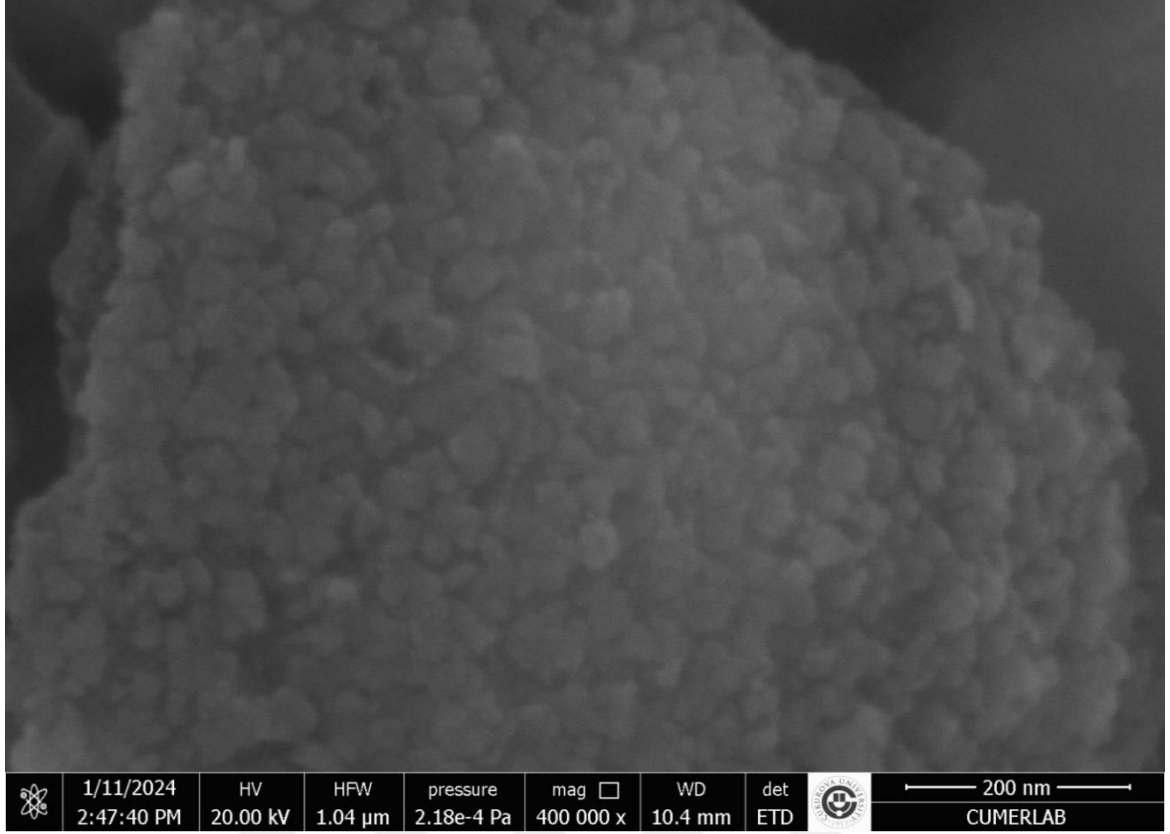
Şekil 4.16. $x=0.25$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.



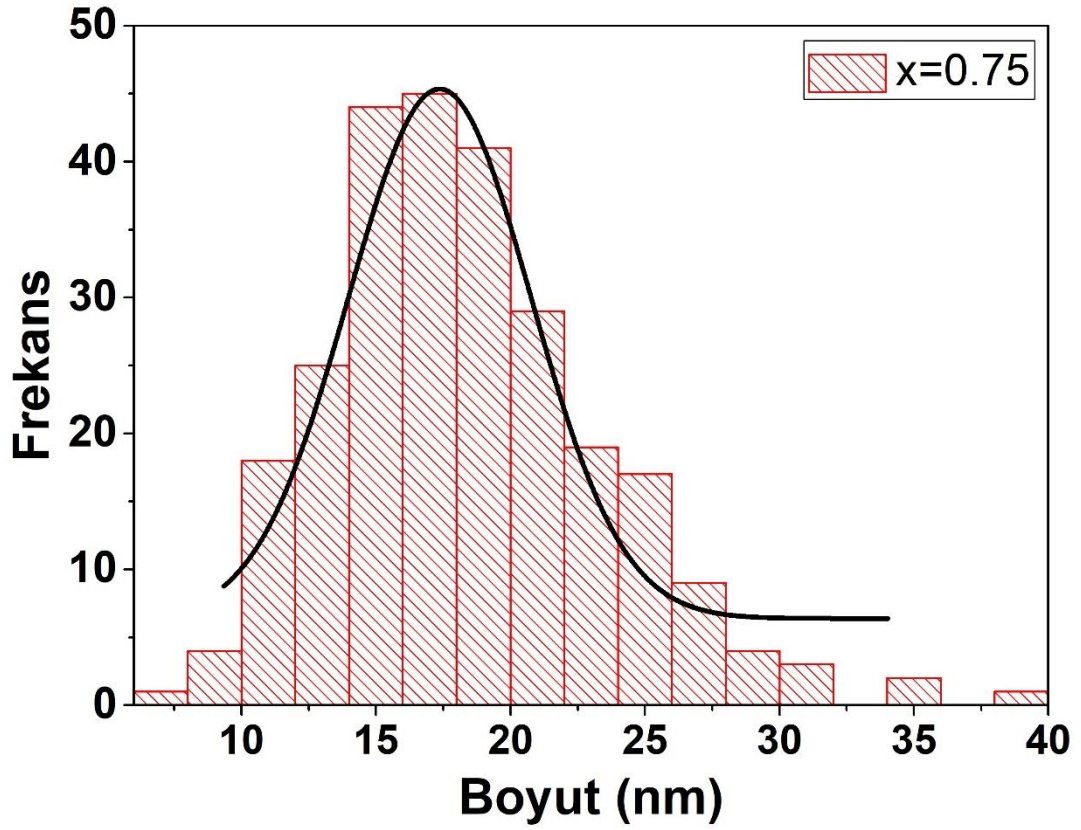
Şekil 4.17. $x=0.5$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü



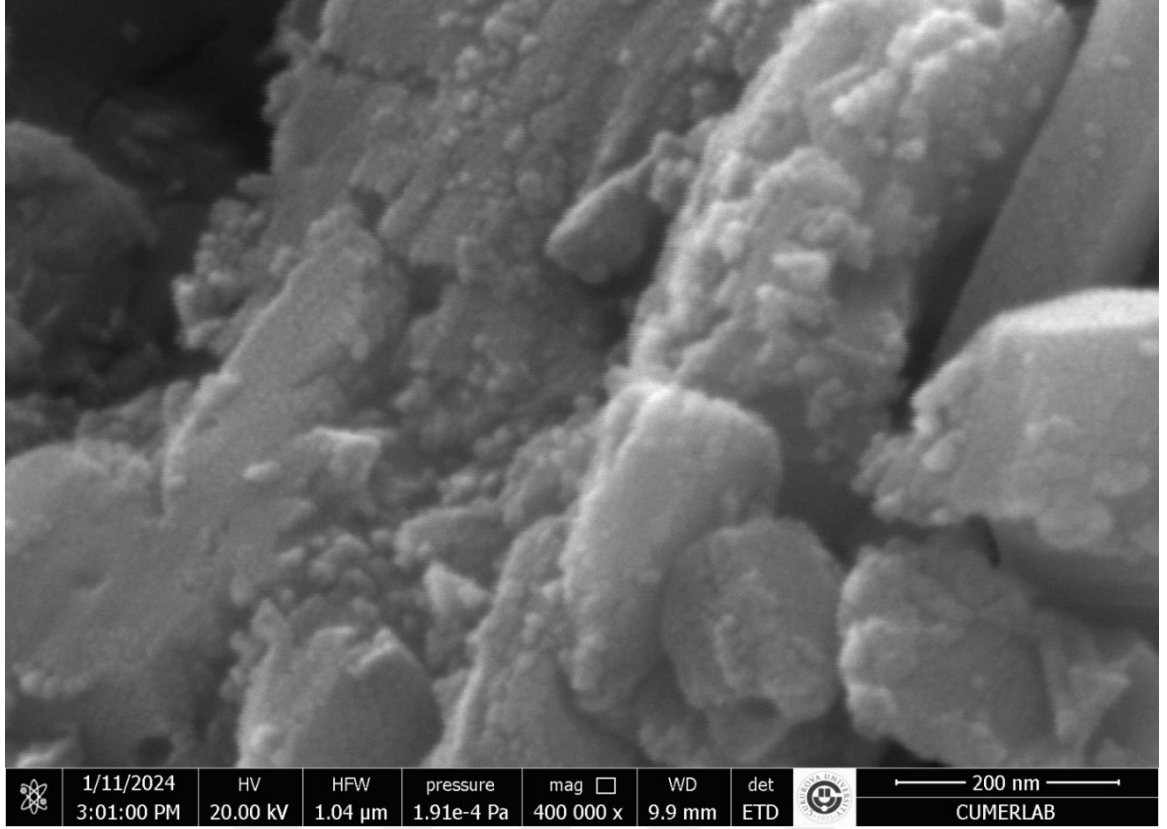
Şekil 4.18. $x=0.5$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.



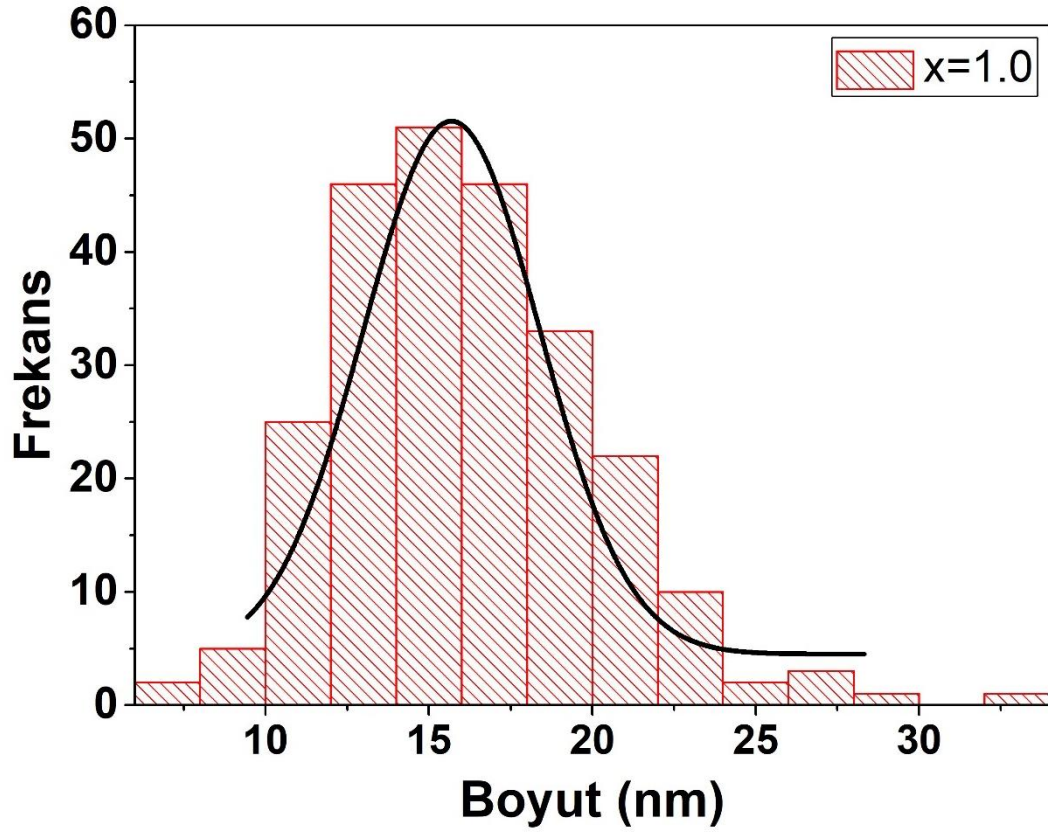
Şekil 4.19. $x=0.75$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü



Şekil 4.20. $x=0.75$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.



Şekil 4.21. $x=1.0$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsü

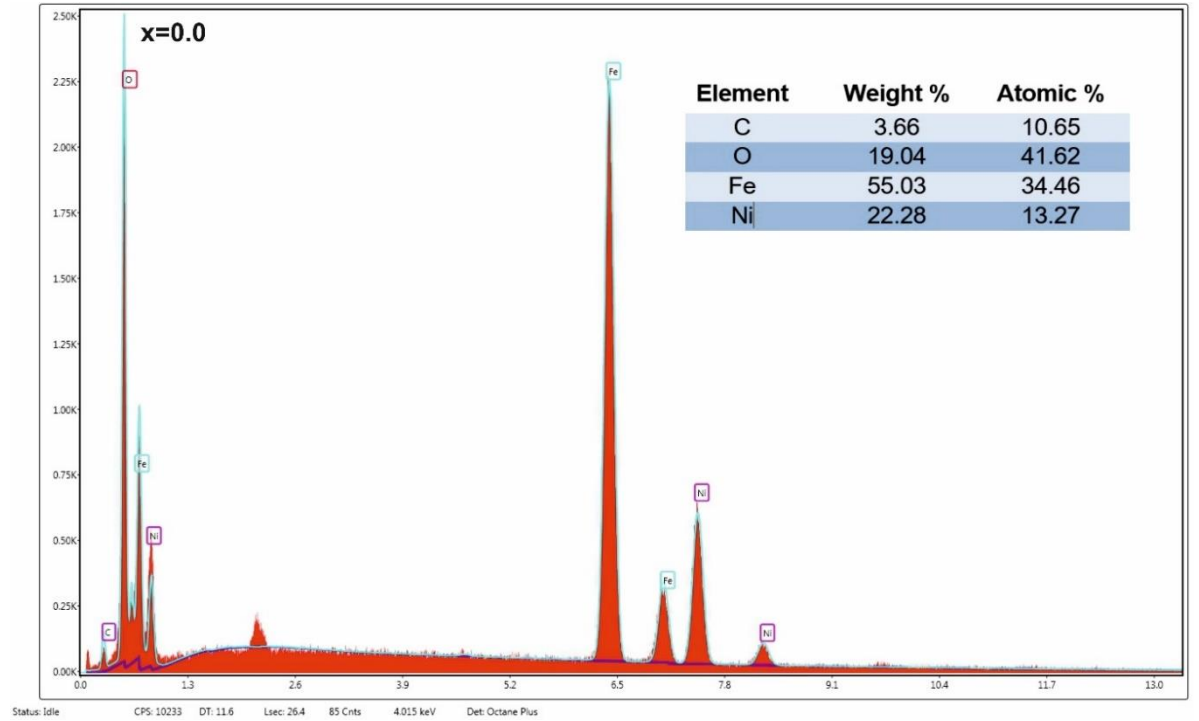


Şekil 4.22. $x=1.0$ numunesinin 400000x büyütmedeki SEM görüntüsünden yola çıkarak elde edilen ortalama tane boyutu analizi.

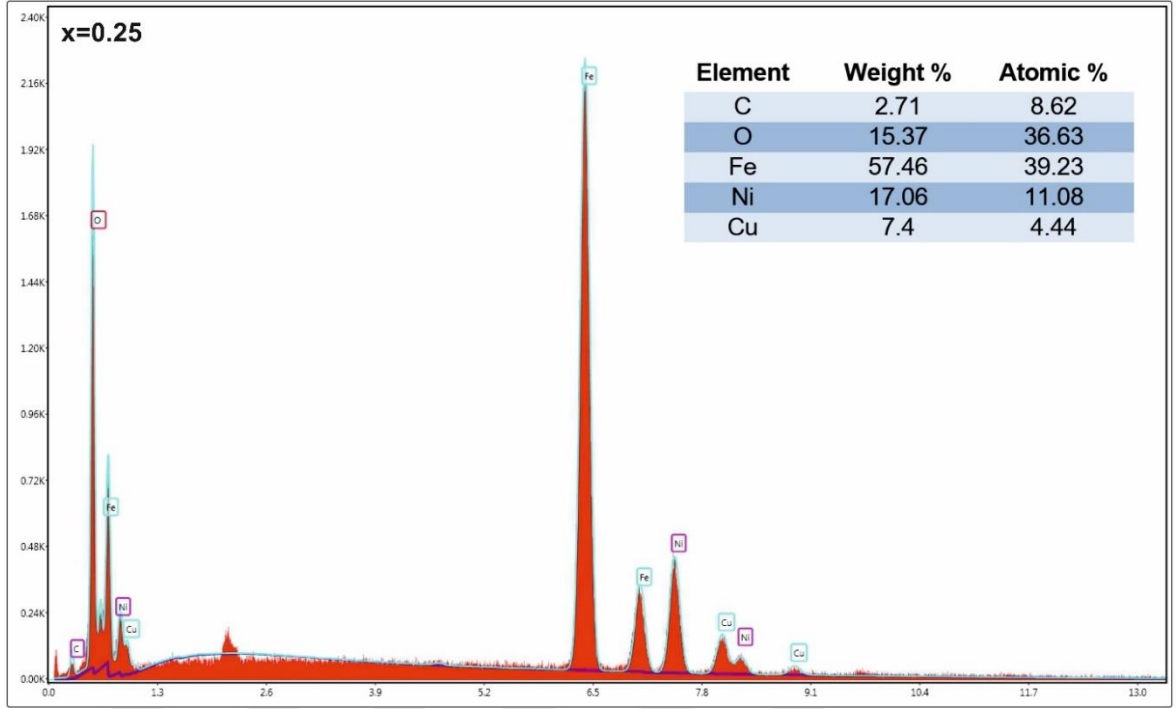
Şekil 4.13 ile 4.22 arasında SEM cihazının geri saçılan elektron modu kullanılarak $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0,0, 0,25, 0,50, 0,75$ ve $1,0$) nanopartiküllerinin yüksek büyütmede (400kx) elde edilen görüntüleri görünmektedir. Şekiller incelendiğinde nanopartikül tanecik boyutu en fazla $x=0,75$ 'te oluşurken en az $x=0,0$ 'da oluşmuştur. Tanecik boyutu $x=0$ 'dan $x=0,75$ 'kadar artmıştır daha sonra bir miktar azalmıştır. Bu sonuçlar çizelge 4.3'te listelenmiştir.

Çizelge 4.3. Toz örneklerinin $x=0$ 'dan $x=1$ 'e kadar SEM analizleri.

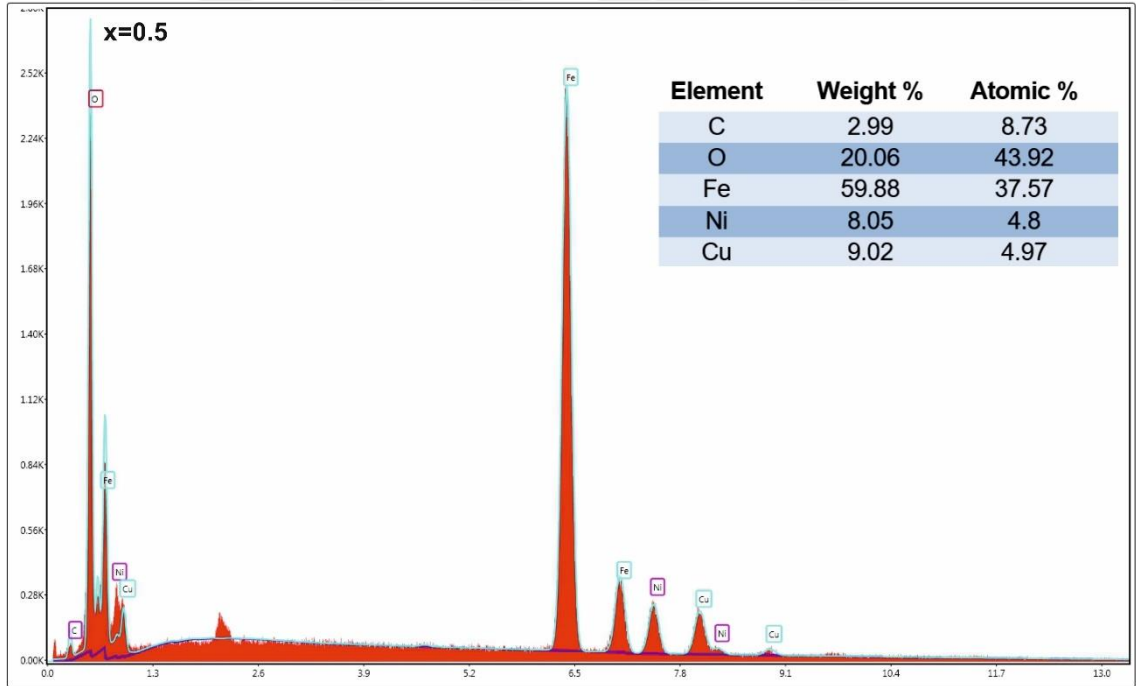
	$x=0,0$	$x=0,25$	$x=0,5$	$x=0,75$	$x=1,0$
Ortalama Tanecik Boyutu (nm)	12.59	14.72	14.86	17.39	15.61



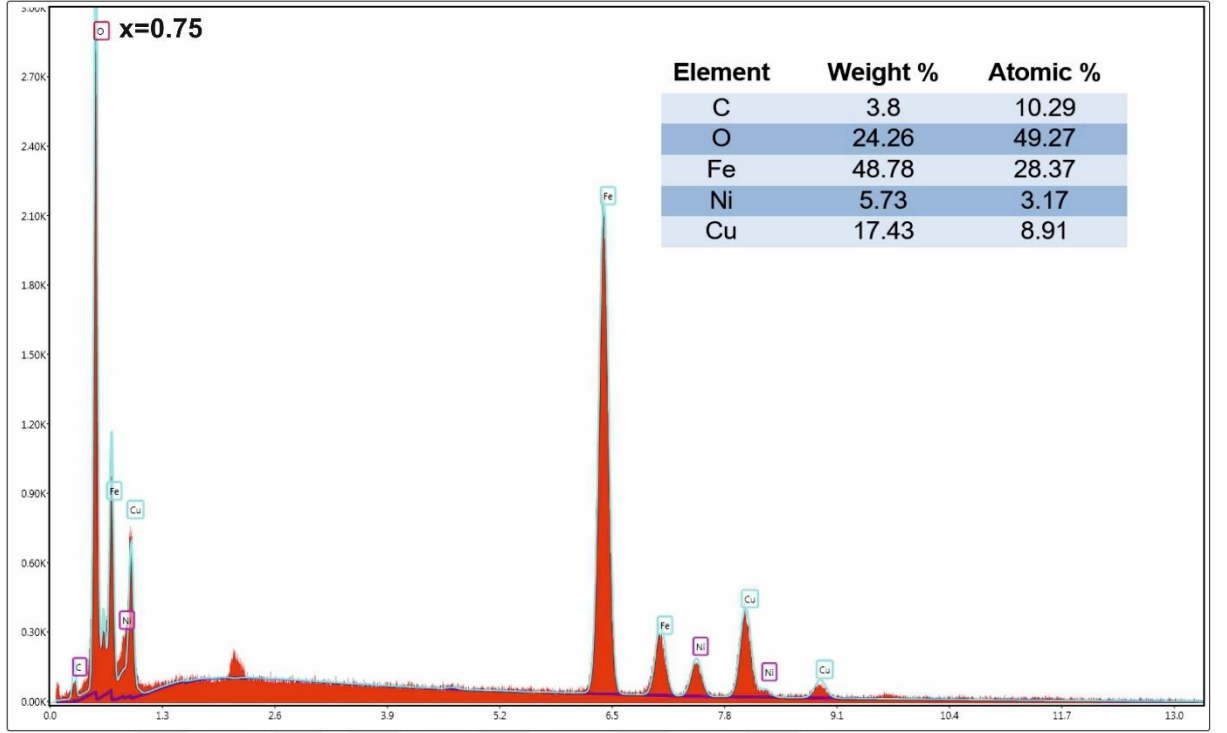
Şekil 4.23. $x=0,0$ numunesinin EDS analizi.



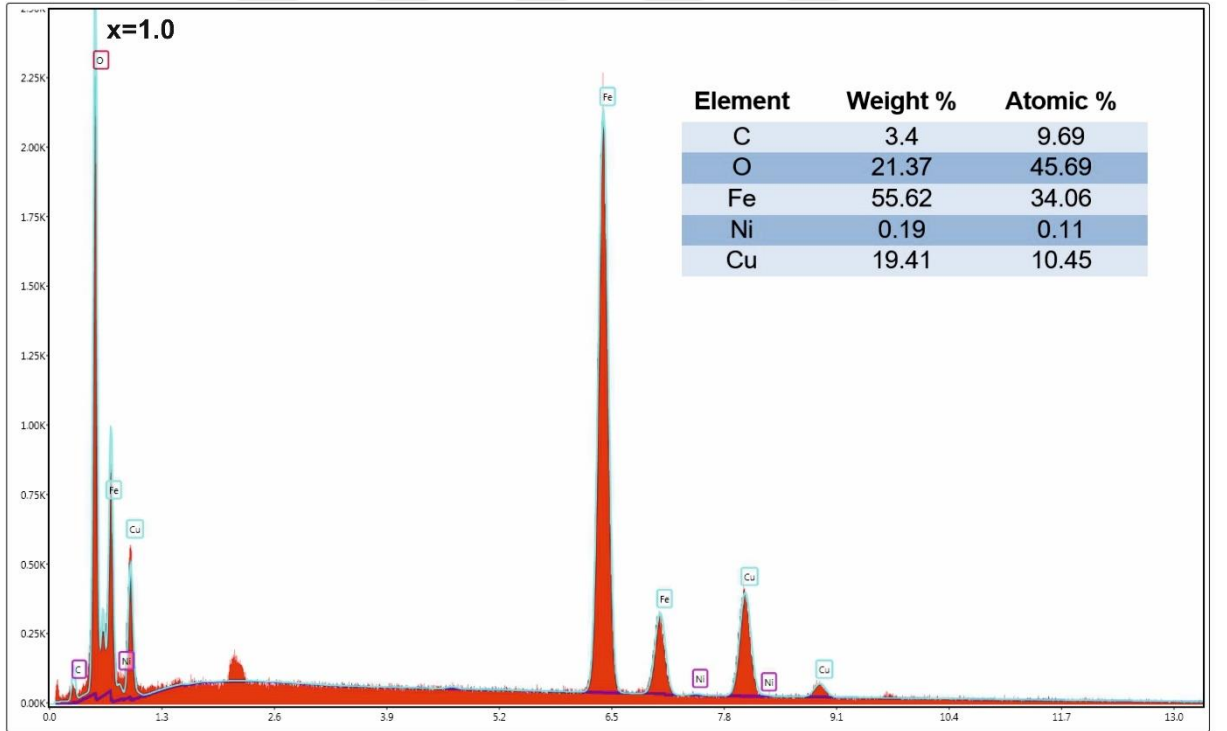
Şekil 4.24. x=0.25 numunesinin EDS analizi.



Şekil 4.25. x=0.5 numunesinin EDS analizi.



Şekil 4.26. x=0.0 numunesinin EDS analizi.

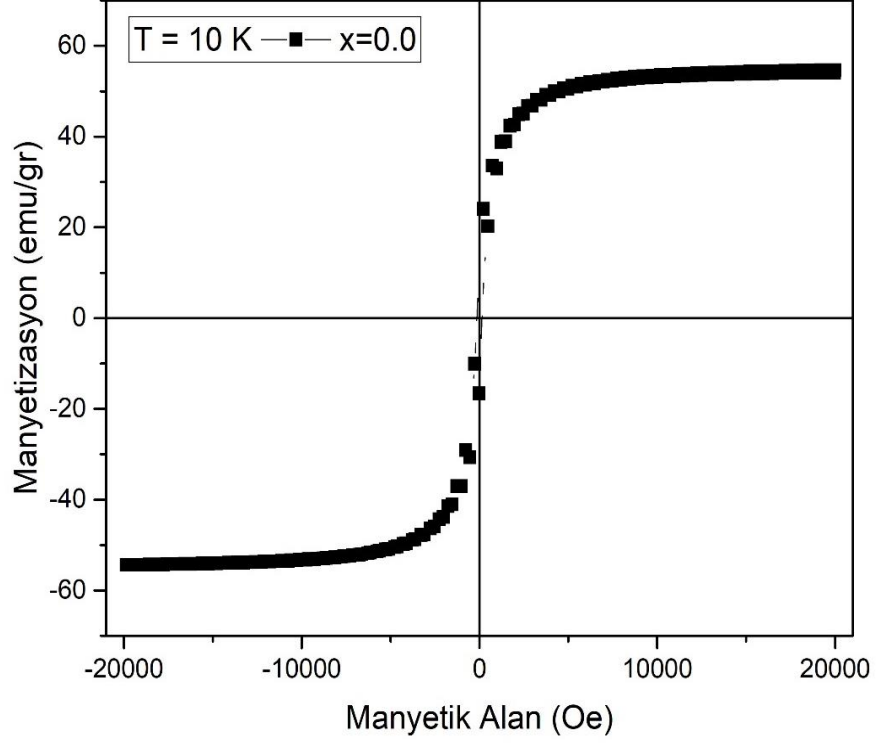


Şekil 4.27. x=1.0 numunesinin EDS analizi

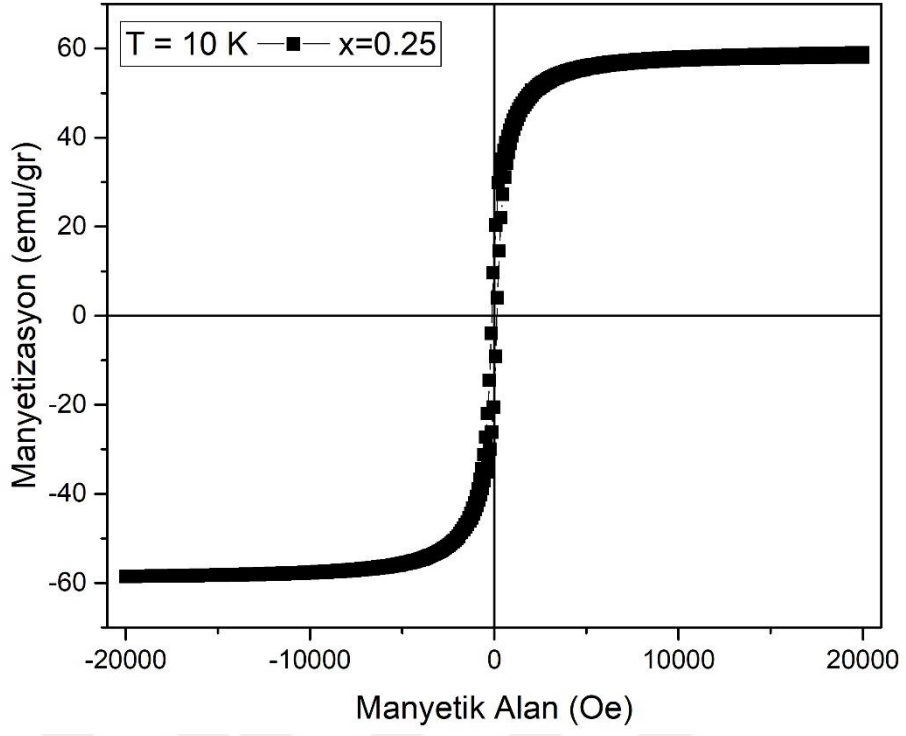
Şekil 4.23 ile 4.27 arasında EDS tekniği kullanılarak $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0,0, 0,25, 0,50, 0,75$ ve $1,0$) nanopartiküllerinin hem ağırlıkça hem de % sayısı olarak analizlerini göstermektedir. Değerler incelendiğinde nanopartikül $x=0$ 'da Ni sayısı oldukça yeterli görünmektedir. Bununla beraber Cu parçacıkları $x=0,25$ 'ten itibaren artış göstererek Ni sayısı azalarak $x=0,75$ 'e kadar

beklenen gibidir. Ancak $x=1.0$ Cu değeri oldukça iyi iken hiç olmaması gerek Ni çok düşük miktarda görülmektedir. Bunun sebebi karıştırma kabında çok düşük miktarda Ni olmasından kaynakladığı düşünülmektedir.

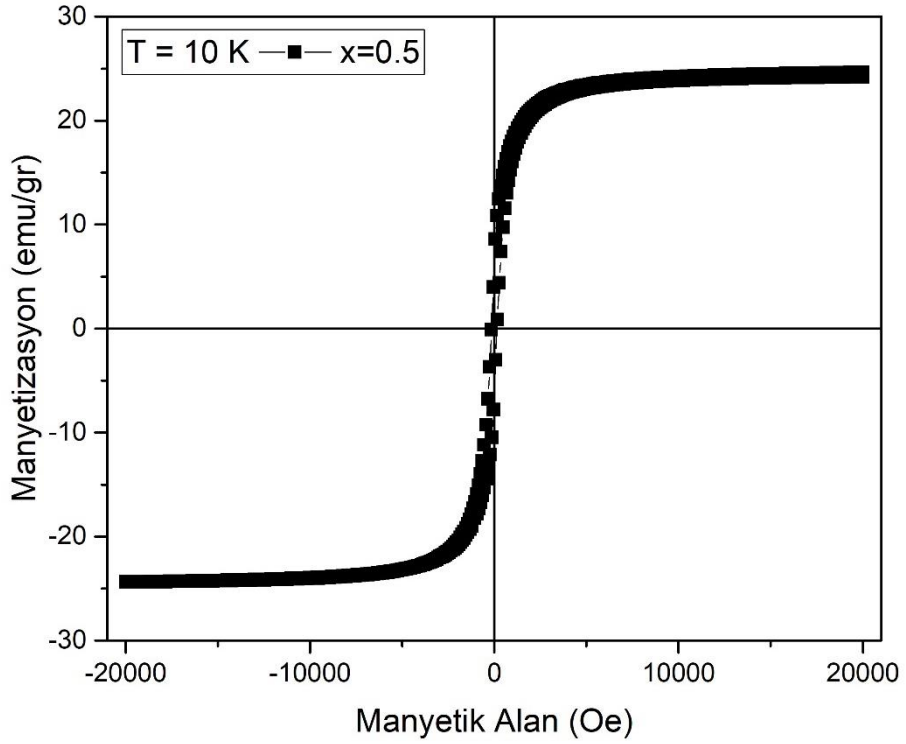
4.2.4. Manyetik Analiz



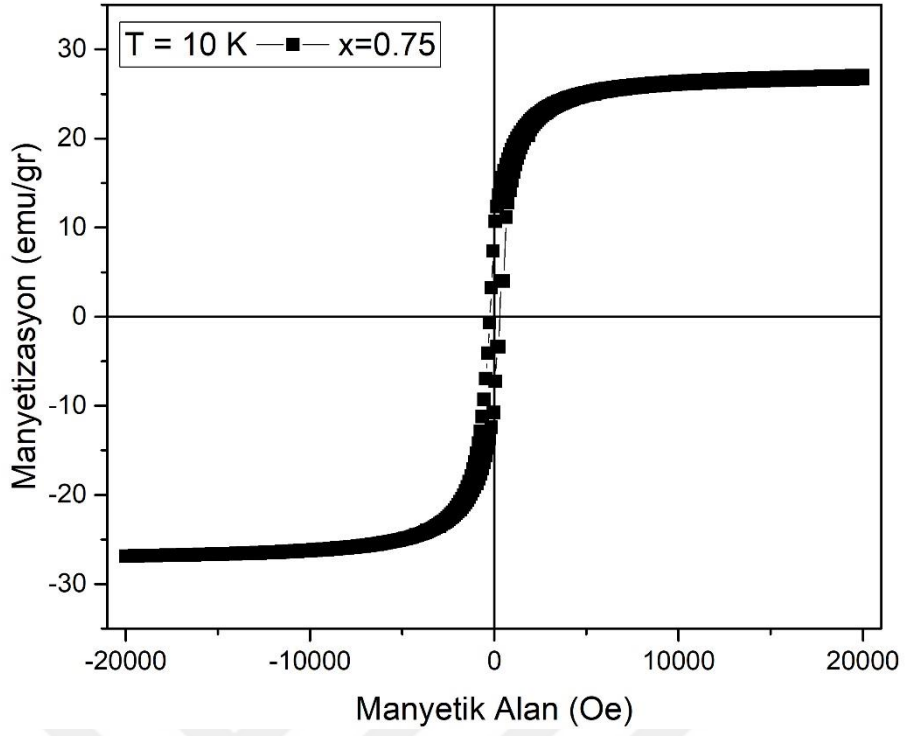
Şekil 4.28. $x=0.0$ numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



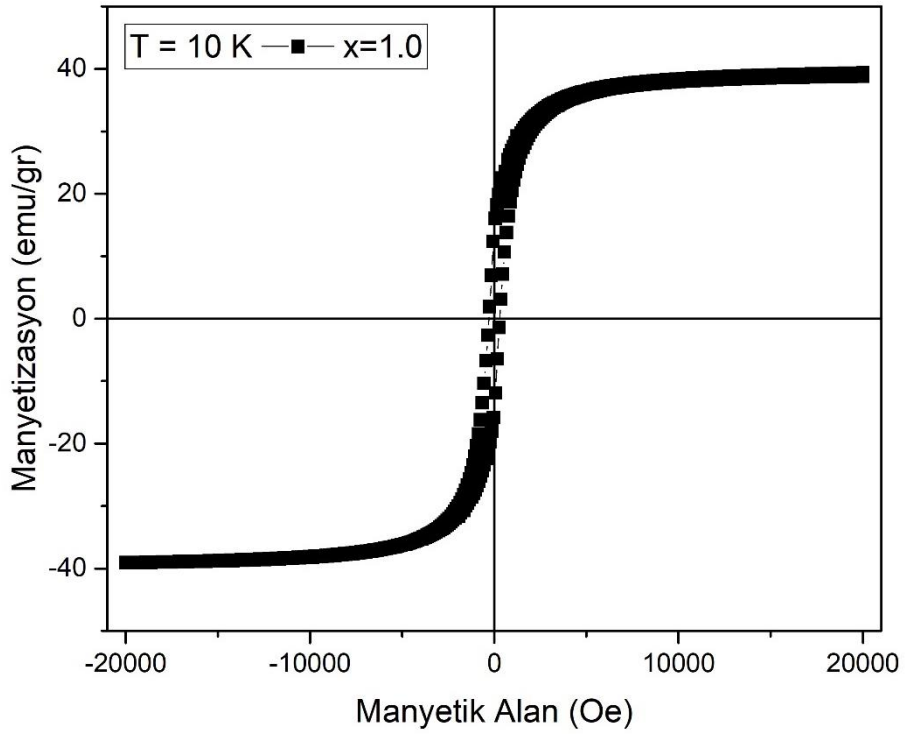
Şekil 4.29. $x=0.25$ numunesinin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



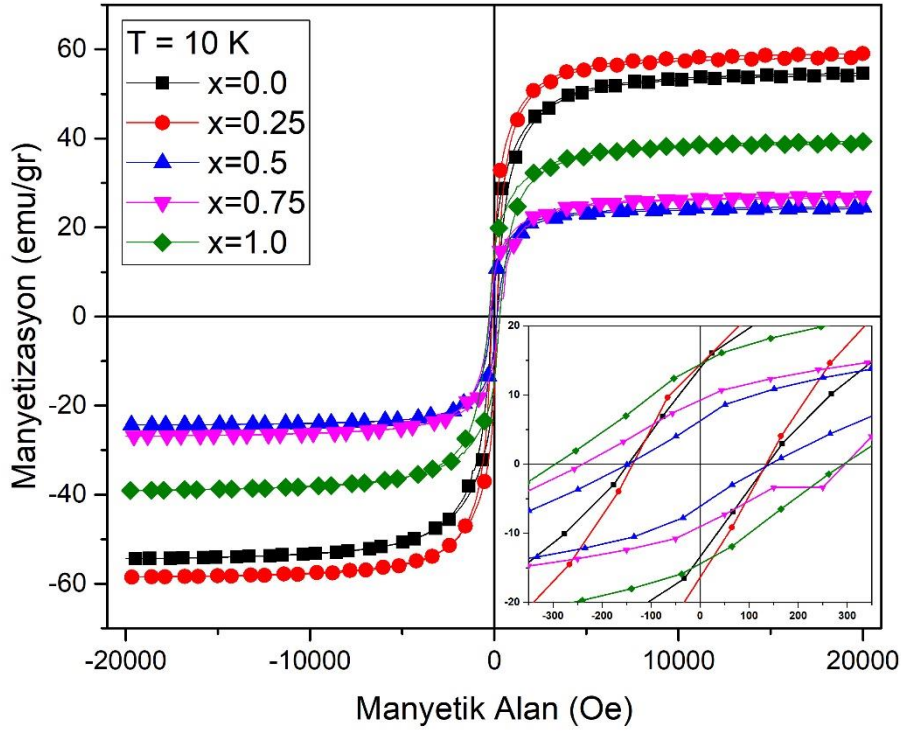
Şekil 4.30. $x=0.5$ numunesinin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



Şekil 4.31. $x=0.75$ numunesinin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu

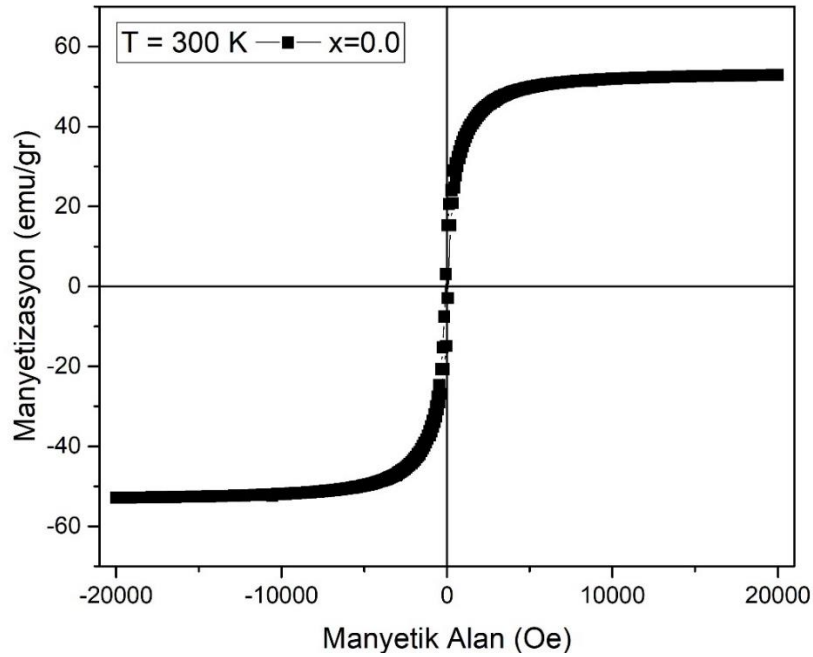


Şekil 4.32. $x=1.0$ numunesinin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu

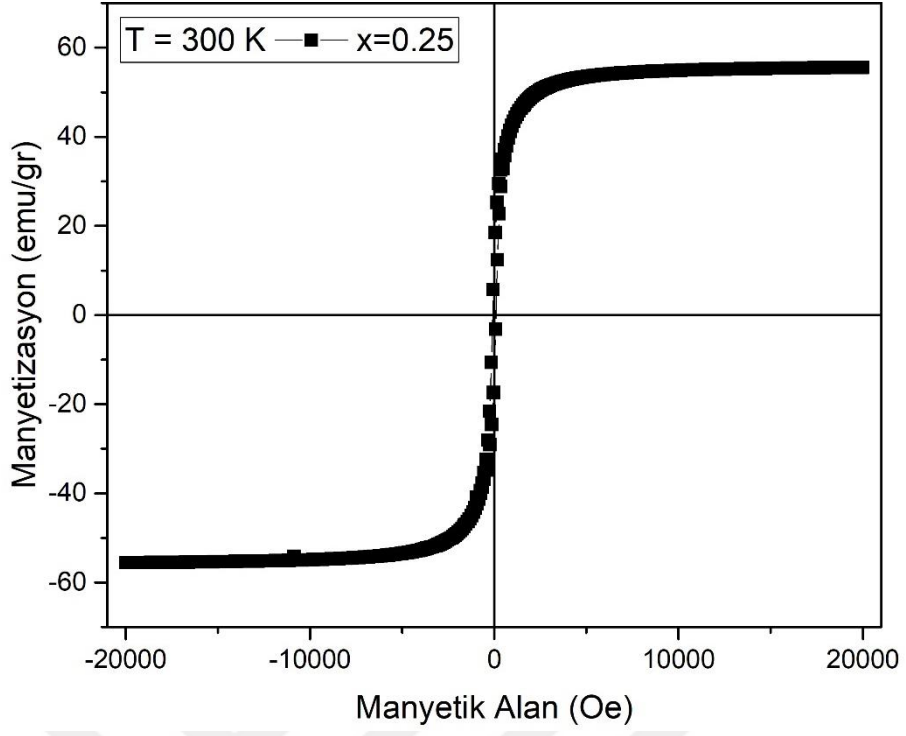


Şekil 4.33. Tüm numunelerin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu

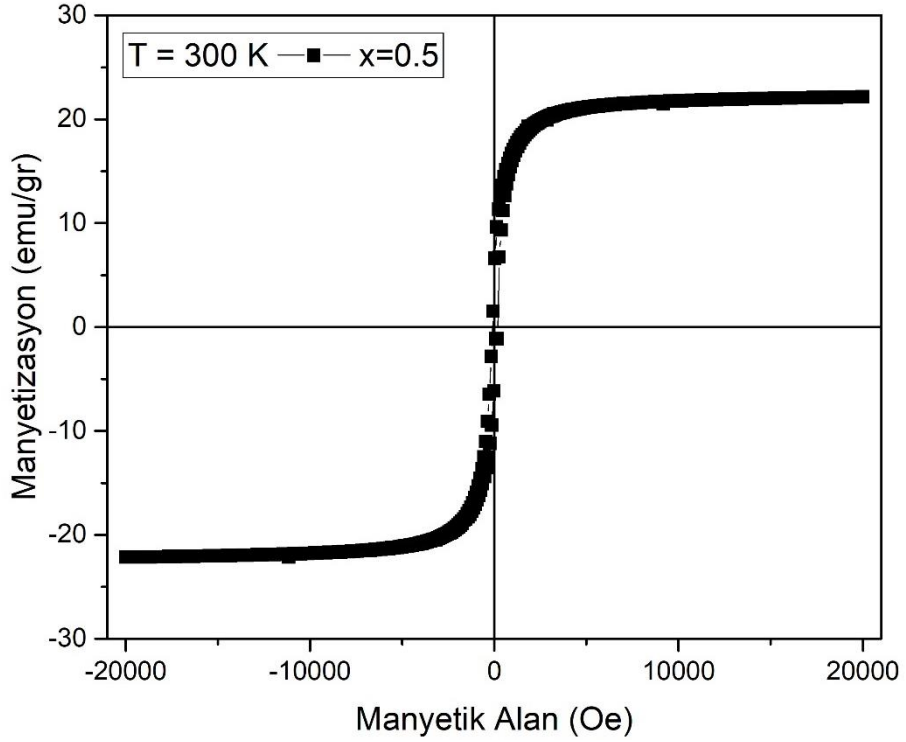
Şekil 4.28 ile 4.33 arasındaki grafikler 10 K'de $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartikülün $x=0.0$ ile $x=1.0$ arasındaki manyetizasyonun ile manyetik alan arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekiller incelendiğinde manyetizasyon ile manyetik alan ilişkisinde, doyum mıknatıslanma değerinin en fazla $x=0.25$ 'te olduğu görünürken, aynı değerin $x=0.5$ 'te en az olduğu görülmektedir. Tüm malzemeler incelendiğinde malzemelerin süperparamanyetik bir davranış sergilediği söylenilebilir.



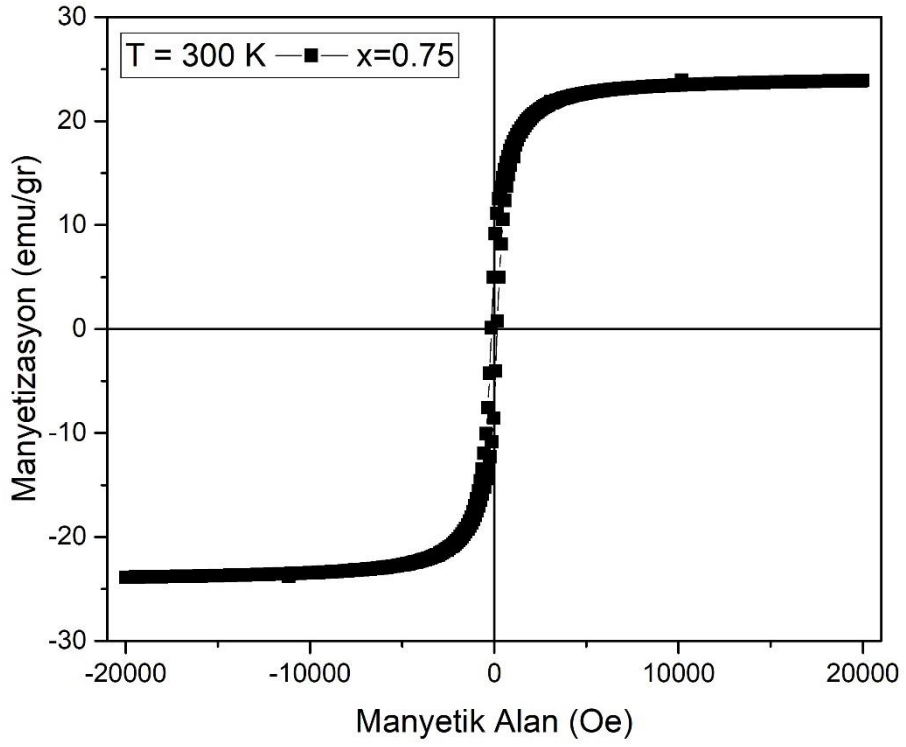
Şekil 4.34. $x=0.0$ numunesinin 300 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



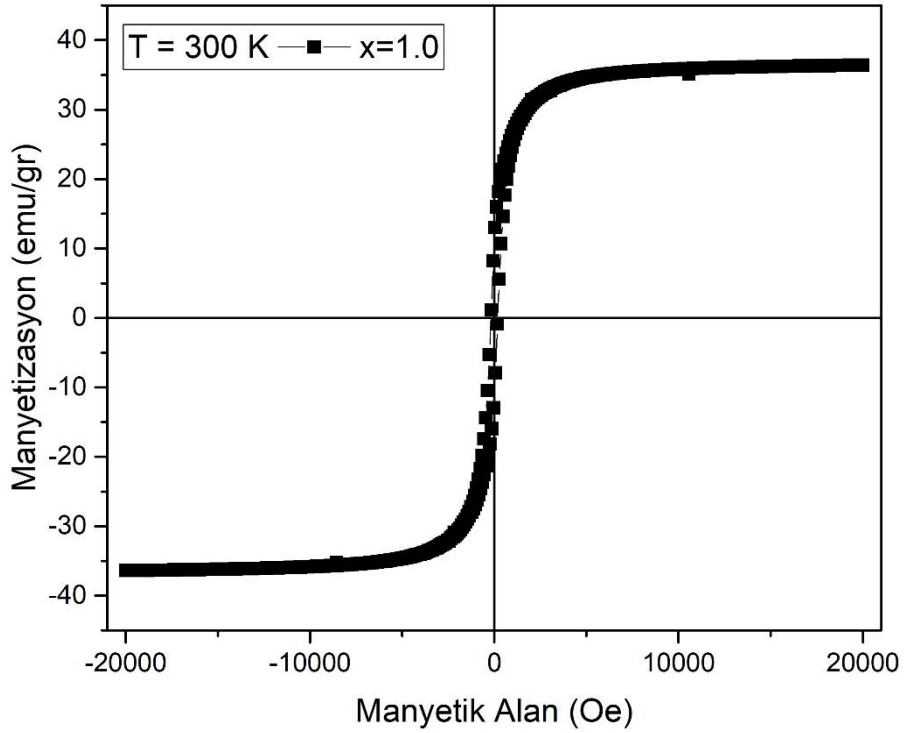
Şekil 4.35. $x=0.25$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



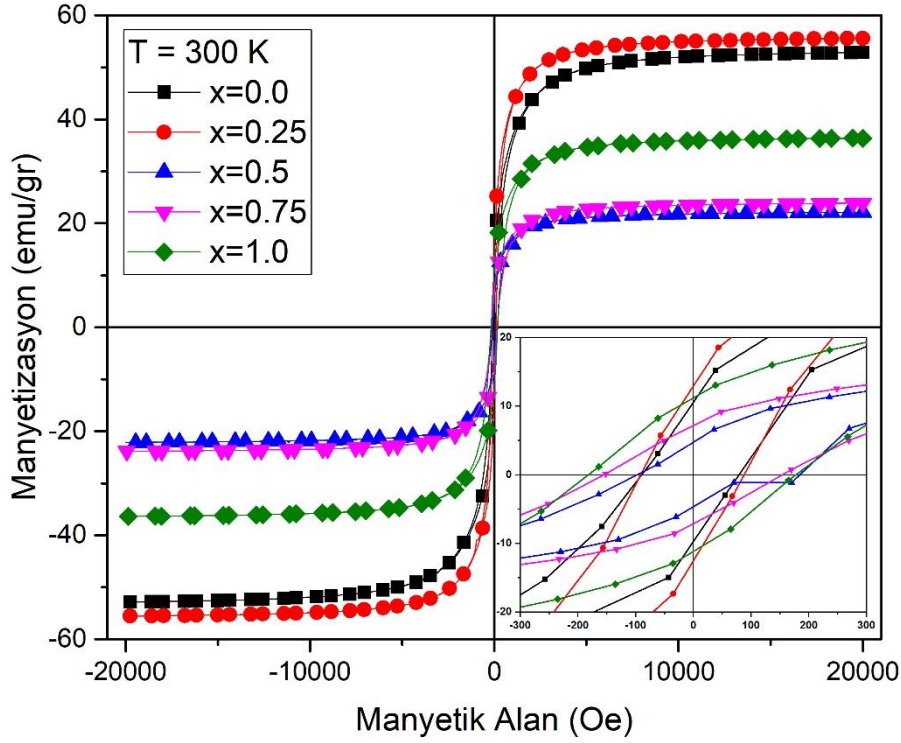
Şekil 4.36. $x=0.5$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



Şekil 4.37. $x=0.75$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



Şekil 4.38. $x=1.0$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu



Şekil 4.39. Tüm numunelerin 300 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucu

Şekil 4.34 ile 4.39 arasındaki grafikler 300 K'de $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartikülün $x=0.0$ ile $x=1.0$ arasındaki manyetizasyonun ile manyetik alan arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekiller incelendiğinde manyetizasyon ile manyetik alan ilişkisinde, doyum mıknatıslanma değerinin en fazla $x=0.25$ 'te olduğu $x=0.50$ 'te ise en az olduğu görülmektedir. Tüm malzemeler incelendiğinde malzemelerin kalıcı mıknatıslanmasının iyi olduğu görülmektedir. Numunelerin arasındaki histeresis eğrilerinde katkılama durumlarından bağımsız olduğu gözlemlendi.

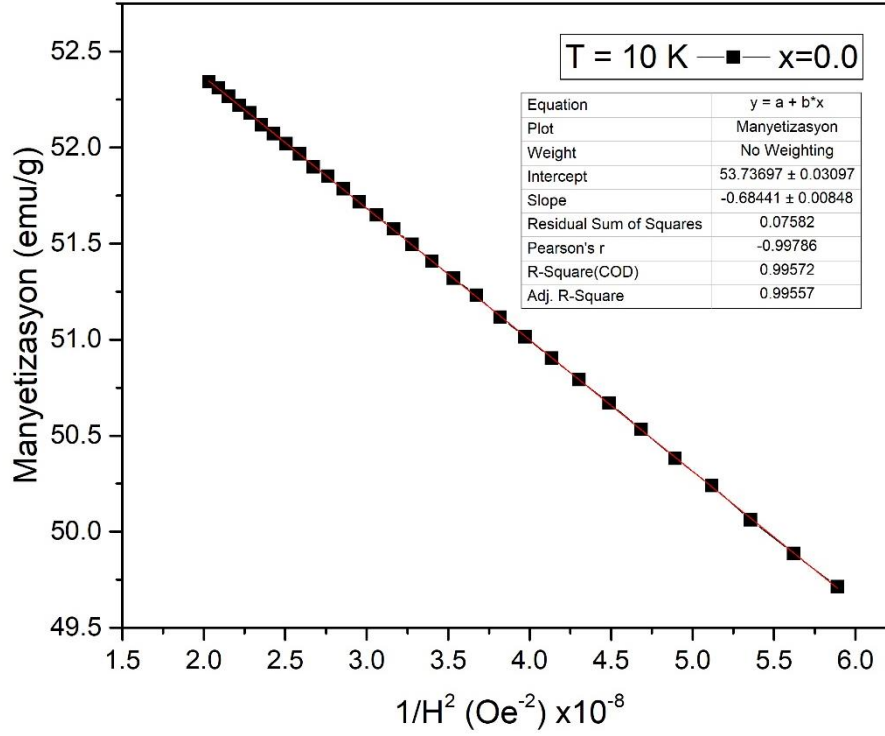
Histeresis eğrisindeki doyum mıknatıslanma değeri civarında manyetizasyon ile manyetik alan arasındaki ilişki denklem-11 ile verilir (Fang ve ark., 1998).

$$M = M_s \left[1 - \frac{\beta}{H^2} \right] \quad (11)$$

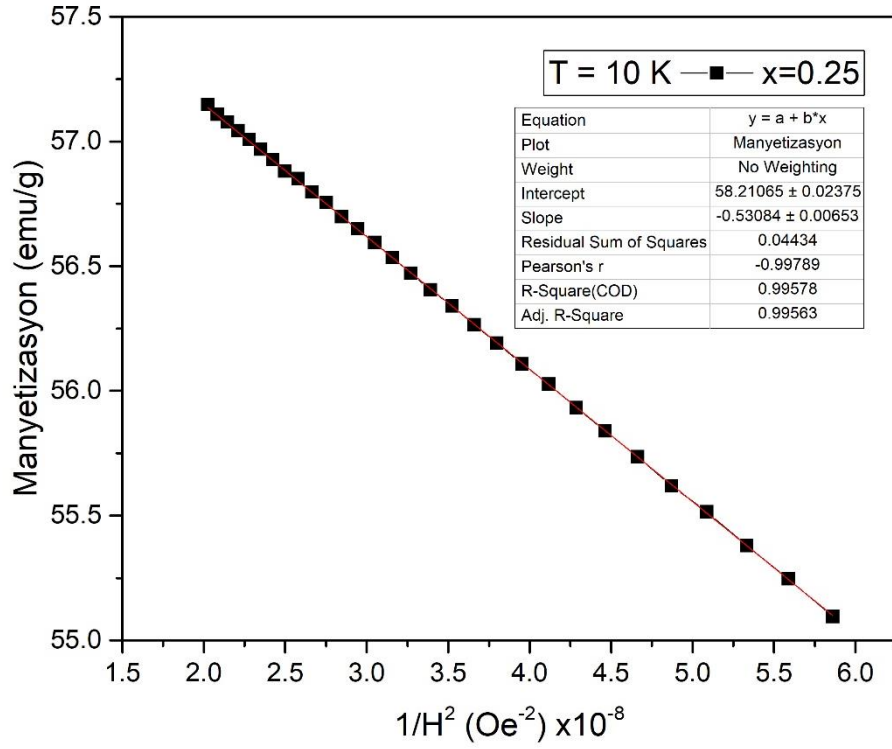
burada M_s doyum manyetizasyonu, β -manyeto-kristal anizotropisine ilişkin bir parametredir ve H dışarıdan uygulanan alandır. Şekil 4.40-4. 45'te gösterildiği gibi, $T=10$ K için, M 'nin $1/H^2$ 'ye göre grafiğini çizerek, doyum manyetizasyonu (M_s) ve oda sıcaklığına yakın β değeri sırasıyla eğimden ve y eksenini kesişiminden belirlenir. Belirlenen değerler Çizelge-4.4'de verilmiştir. Manyetik anizotropi sabiti eşitlik-11'ten elde edilen sonuçlar kullanılarak denklem-12' den kolaylıkla bulunur (Fang ve ark., 1998). Elde edilen β ve K_a değerleri Çizelge-4.4' de sunulmuştur.

$$K_a = M_s \sqrt{\frac{15\beta}{4}}$$

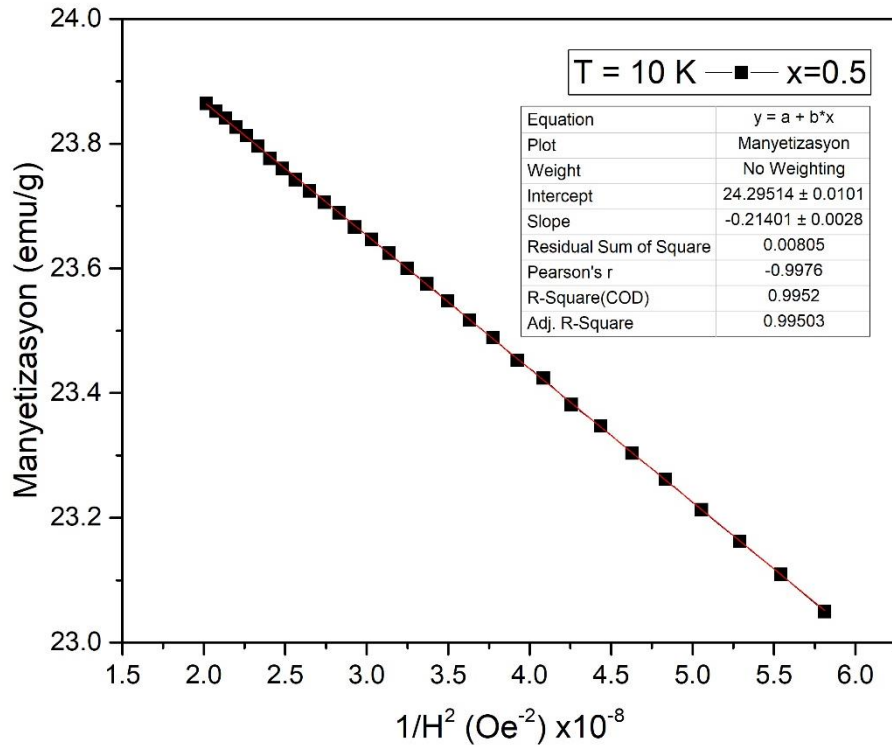
(12)



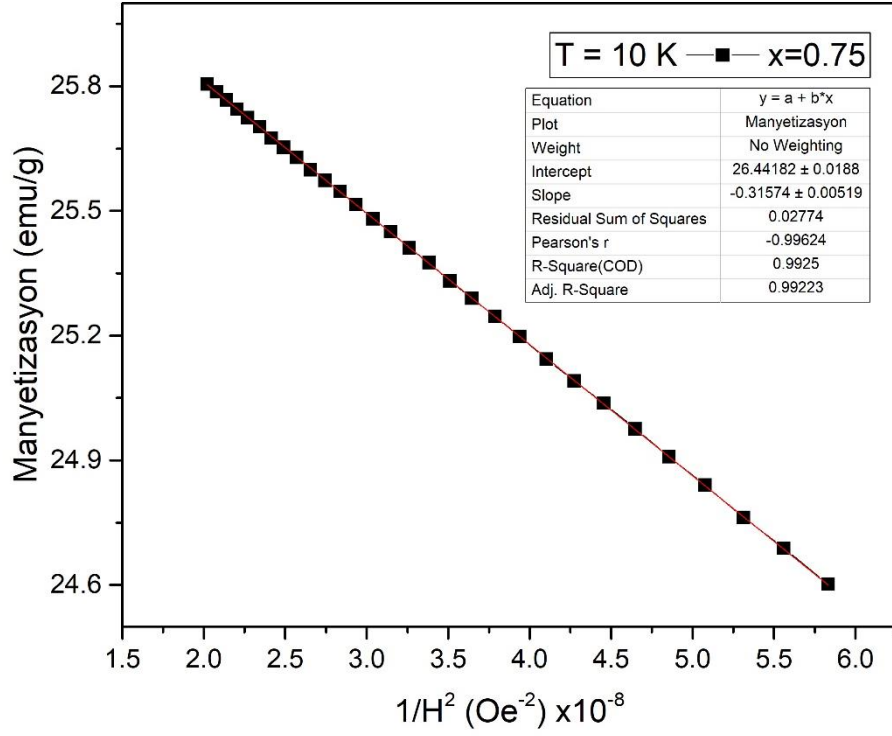
Şekil 4.40. x=0.0 numunesinin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



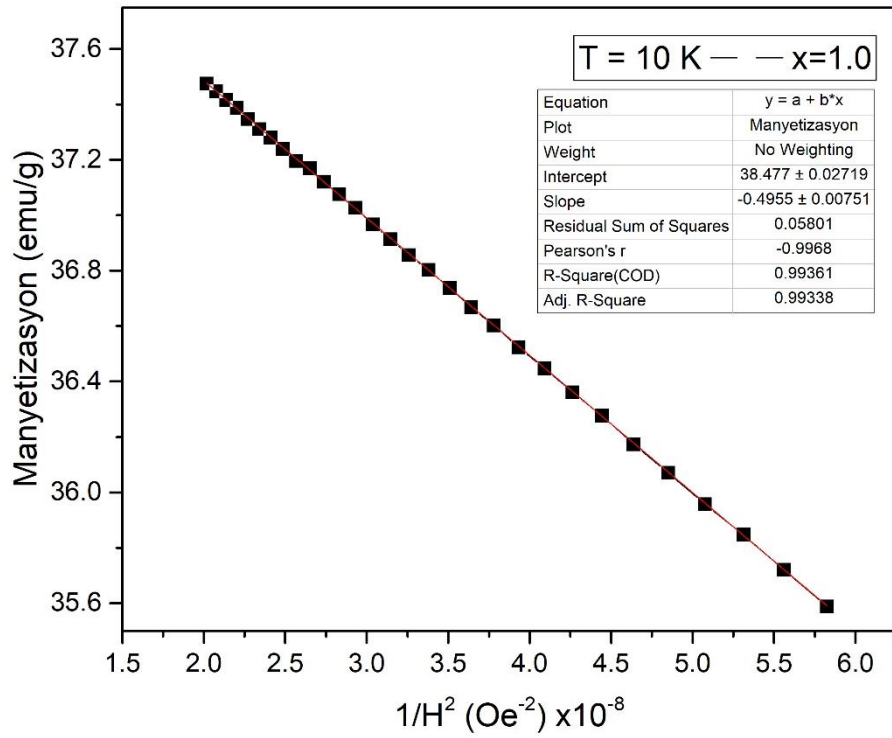
Şekil 4.41. x=0.25 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



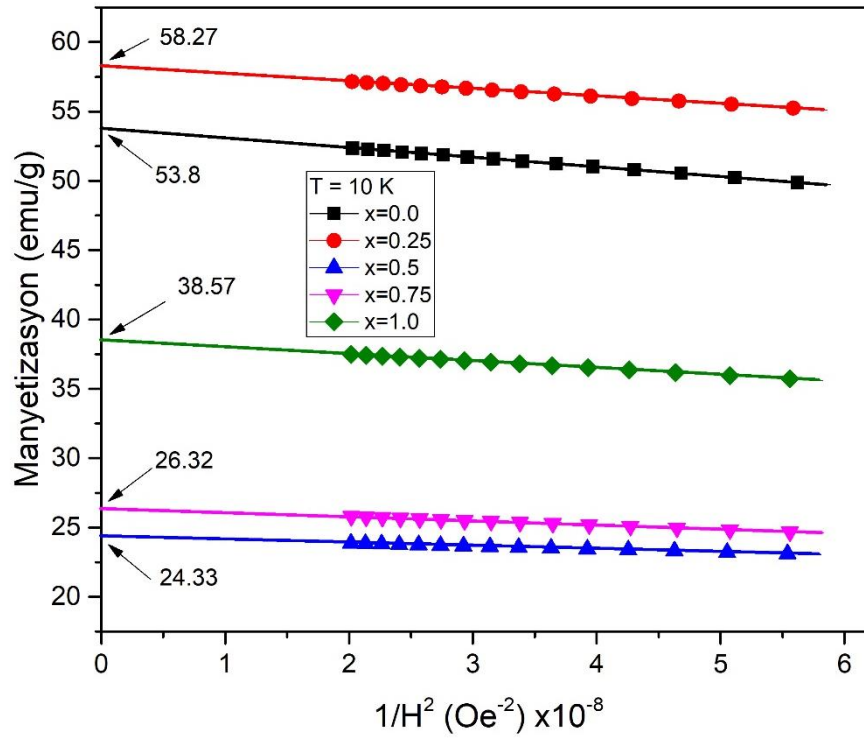
Şekil 4.42. x=0.5 numunesinin 10 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



Şekil 4.43. x=0.75 numunesinin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



Şekil 4.44. x=1.0 numunesinin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



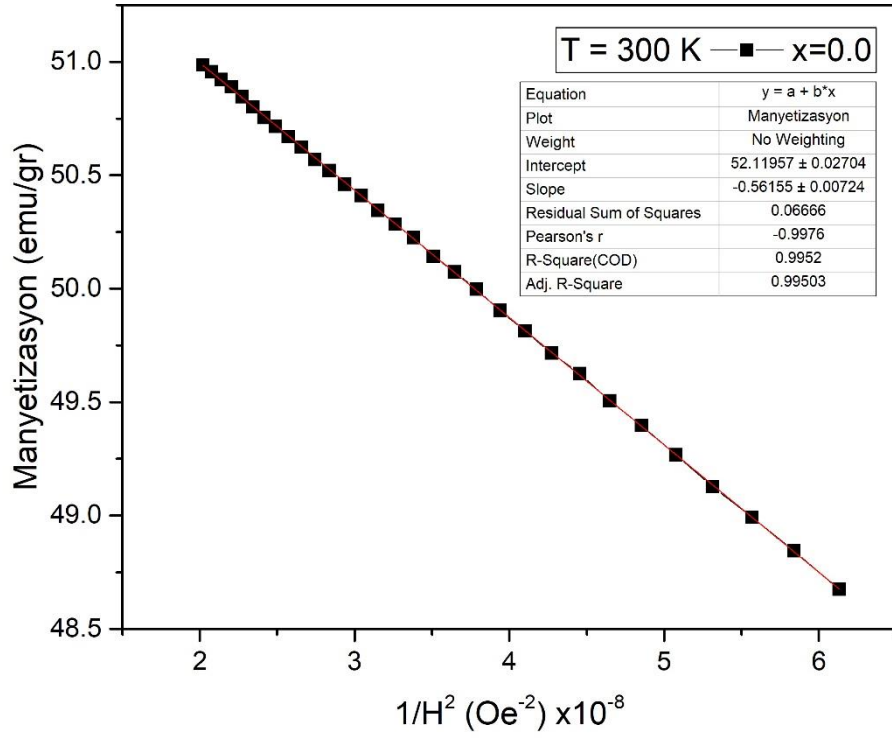
Şekil 4.45. Tüm numunelerin 10 K'deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi

Şekiller incelendiğinde, manyetizasyonun, $1/H^2$ karşı çizilen grafiğinden de görüleceği üzere, doyum mıknatıslanma değerinin en fazla $x=0.25$ 'te 58,27 emu/gr olduğu görünürken en az $x=0.5$ 'te 24,33 emu/gr olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar Çizelge 4.4'te listelenmiştir.

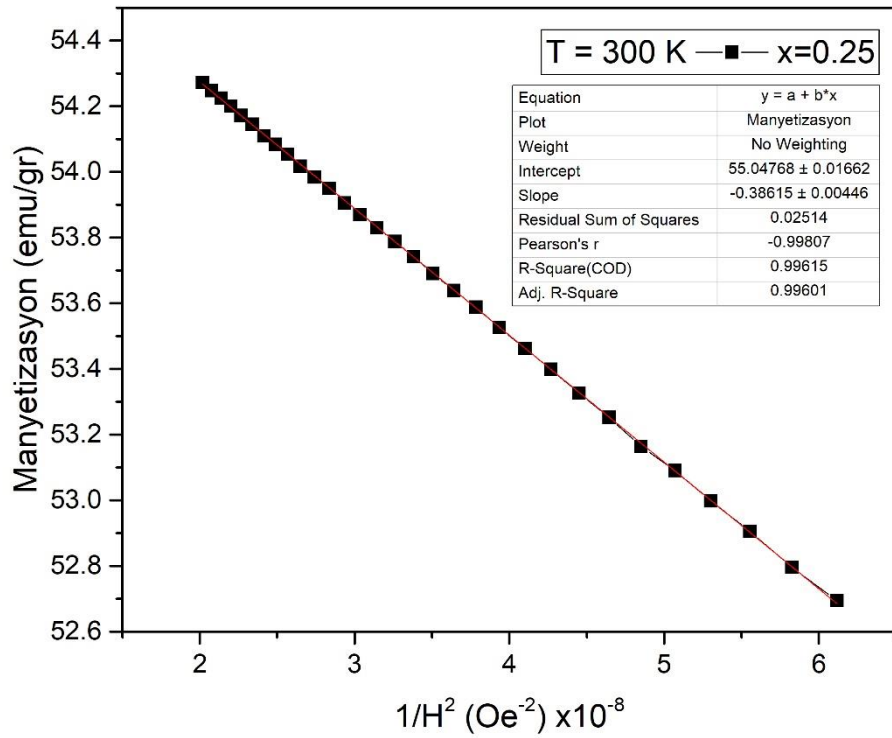
Çizelge 4.4. Toz örneklerinin $x=0.0$ 'dan $x=1.0$ 'e kadar 10K'de manyetik analizleri.

	$x=0.0$	$x=0.25$	$x=0.5$	$x=0.75$	$x=1.0$
M_S (emu/g)	53,8	58,27	24,33	26,32	38,57
M_R (emu/g)	13,85	14,34	6,23	9,26	14,44
H_C (Oe)	137,33	134,48	142,73	258,94	295,34
β constant ($\times 10^8$)	-0,684	-0,531	-0,214	-0,316	-0,496
K_a anizotropi katsayısı ($\times 10^5$) (erg/g)	8,62	8,22	2,18	2,86	5,26

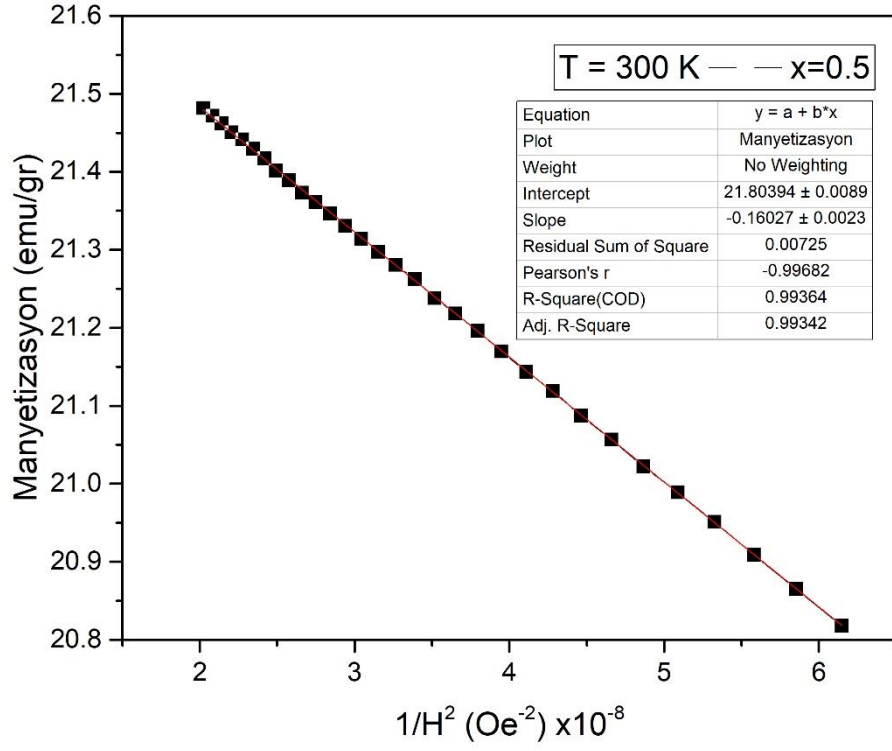
Yukarıda $T=10$ K için yapılan hesaplamalar, $T=300$ K için tekrarlanırsa, Şekil 4.46-4.51 grafikleri elde edilir.



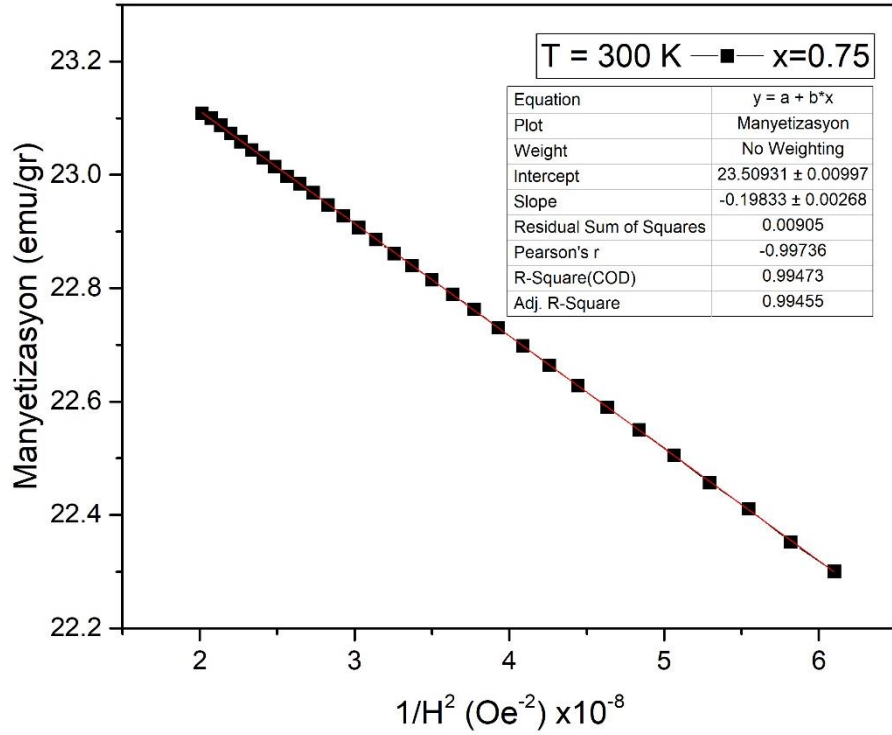
Şekil 4.46. x=0.0 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



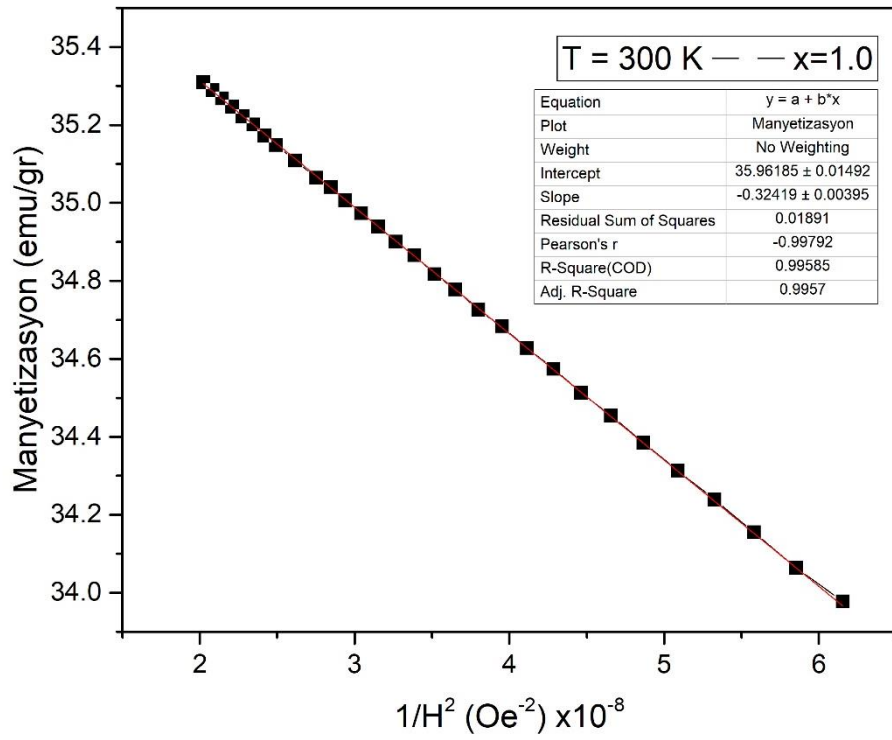
Şekil 4.47. x=0.25 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



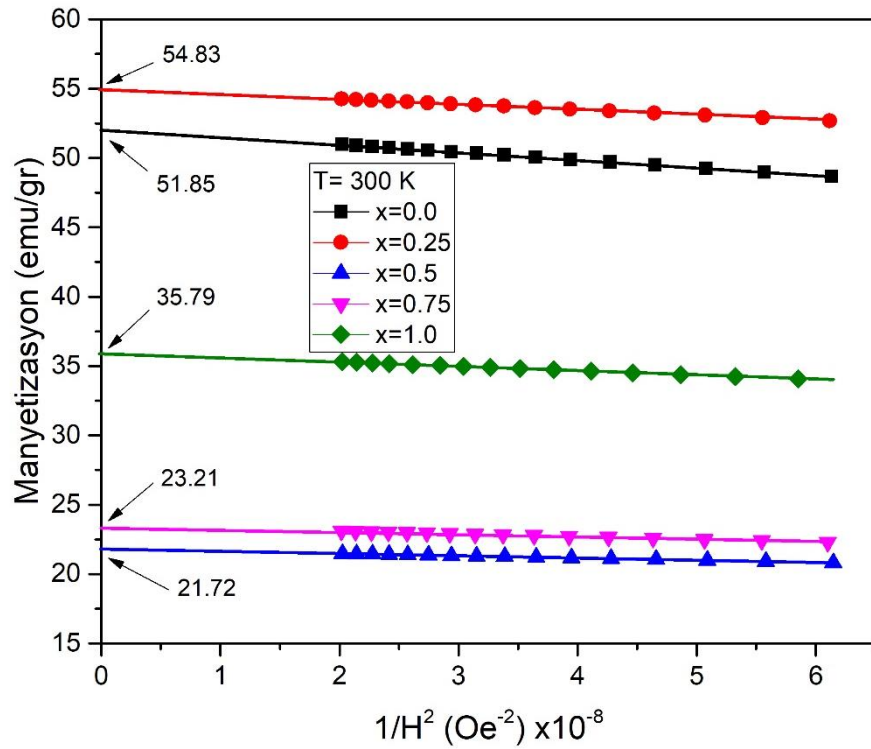
Şekil 4.48. x=0.5 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



Şekil 4.49. x=0.75 numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



Şekil 4.50. $x=1.0$ numunesinin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi



Şekil 4.51. Tüm numunelerin 300 K deki manyetik alana bağlı manyetizasyon sonucundan elde edilen manyetizasyon- $1/H^2$ ilişkisi

Şekil 4.46 ile 4.51 arasındaki grafikler 300 K'de $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartikülün $x=0.0$ ile $x=1.0$ arasındaki manyetizasyonun ile $1/H^2$ arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekiller incelendiğinde manyetizasyon ile $1/H^2$ grafiğinden de görüleceği üzere, doyum mıknatıslanmasının en fazla $x=0.25$ 'te 54,83 emu/gr olduğu, $x=0.5$ 'te 21,72 emu/gr ve azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar ise Çizelge 4.5 te listelenmiştir.

Çizelge 4.5. Toz örneklerinin $x=0$ 'dan $x=1$ 'e kadar 300K'de manyetik analizleri.

	$x=0.0$	$x=0.25$	$x=0.5$	$x=0.75$	$x=1.0$
M_S (emu/g)	51,86	54,83	21,72	23,21	35,79
M_R (emu/g)	10,33	12,89	4,72	7,16	11,06
H_C (Oe)	78,68	89,55	129,43	154,81	180,19
β constant ($\times 10^8$)	-0,562	-0,386	-0,160	-0,198	-0,324
K_a anizotropi katsayısı ($\times 10^5$) (erg/g)	7,52	6,59	1,68	2	3,91



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrit nanoparçacıklarının üretilmesi, karakterizasyonu, yapısal ve manyetik özellikleri incelendi ve nanoparçacıklar sol-jel tekniği kullanılarak $x=0, 0.25, 0.5, 0.75$ ve 0.1 konsantrasyonlarındaki değişimler incelendi. Maddenin kristalik özelliklerinin belirlenmesinde X-ışını kırınımı spektroskopisi (XRD), morfolojisinde (Taramalı Elektron Mikroskobu) SEM, yapısal bağların özelliklerinin belirlenmesinde Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve manyetik özelliklerinin belirlenmesinde Titreşen Örnek Manyetometresi (VSM) kullanılarak, üretilen manyetik nanopartiküllerin karakterizasyonları yapıldı.

Malzemenin XRD kırınım desenleri incelendiğinde bileşiğin kristal yapısı tüm konsantrasyonda spinel kristal yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Malzemenin FT-IR spektrumun $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ dalga sayıları arasında incelendiğinde onun spinel yapıya ait olduğunu işaret eden iki tepenin gözlemlendiği görüldü.

SEM cihazının geri saçılan elektron modu kullanılarak $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1.0) nanopartiküllerinin yüksek büyütmede ($400\times$)’de görüntüleri elde edildi. Görüntüler incelendiğinde nanopartikül tanecik büyüklüğünün en fazla $x=0.75$ ’te oluşurken en az $x=0$ ’da oluşmuştur. Tanecik büyüklüğü, $x=0$ ’dan $x=0.75$ ’kadar artmıştır daha sonra bir miktar azalmıştır. Bunun anlamı Ni yerine gelen Cu elementinin artan konsantrasyonları tanecik boyutlarını azda olsa arttırmıştır.

EDS görüntülerinde Malzeme katkılamaında Cu parçacıkları $x=0.25$ ’ten itibaren artış göstererek Ni sayısı azalarak $x=0.75$ ’e kadar beklenen gibidir. Ancak $x=1.0$ Cu değeri oldukça iyi iken hiç olmaması gerek Ni belirli miktarda görünmektedir. Bunun nedeni konstaminasyon (kirlilik) sorunundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca malzemenin manyetizasyon ölçümleri incelendiğinde sıcaklık 10 K ’den 300 K ’ne çıkarıldığından malzemenin mıknatıslanma ile manyetik alan arasındaki ilişkisinin olumlu yönde arttığı bulundu.

Bu çalışmalardan sonra, bu tez kapsamında üretilen malzemelerin kan uyumluluğu, katalitik ve anti-bakteriyel özellikleri çalışılabilir.

Aynı zamanda üretmiş olduğumuz numunelerin Mössbauer analizleri yapılarak Fe’nin d orbitallerinin manyetik karakterizasyonu yapılabilir.

Farklı üretim teknikleri kullanılarak da üretim yapılarak karakterizasyon analizleri yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Aggarwal N., Bindra Narang S., J. Electron. Mater. 49 (2019) 668–680.
- Akhtar M.N., Khan M.A., Ahmad M., Nazir M.S., Imran M., Ali A., Sattar A, Murtaza G, J. Magn. Mater. 421 (2017) 260–268.
- Ali R., Khan M.A., Manzoor A., Shahid M., Haider S., A.S. Malik, M. Sher, I. Shakir, M.F. Warsi, J. Magn. Mater. 429 (2017) 142–147.
- Anonim 1: [<https://www.boroxlab.com.tr>].
- Anonim 2: [<https://www.hammaddeler.com.tr>].
- Anonim 3: [<https://www.alserteknik.com.tr>]
- Anonim 4: [<https://www.info-tek.com.tr>]
- Anonymous 1: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/ferro.html>
- Anonymous 2: [<https://m.indiamart.com.tr>].
- Arboleda J.D., Arnache O., Aguirre M.H., Ramos R., Anadon A., Ibarra M.R., Solid Stat Commun. 270 (2018) 140–146.
- Ashiq M.N., Ehsan M.F., Iqbal M.J, Gul I.H, J. Alloys Compds 509 (16) (2011) 5119–5126.
- Atif M., Nadeem M., Siddique M., Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. 120 (2) (2015) 571–578.
- Banks E., Riederman N.H., Schleuning H.W., Silber L.M., J. Appl. Phys. 32 (3) (1961) S44–S45.
- Berchmans L.J., Selvan R.K., Kumar P.N.S., Augustin C.O., J. Magn. Mater. 279 (2004) 103.
- Chauhan L., Shukla A.K., Sreenivas K., Ceram. Int. 42 (10) (2016) 12136–12147.
- Chavan P., Naik L.R., Belavi P.B., Chavan G., Ramesha C.K., Kotnala R.K., J. Electron Mater. 46 (2017) 188–198.
- Chen L., Dai H., Shen Y., Bai J., J. Alloys Compd 491 (2010) L33–L38.
- Chen Q., Zhang Z.J., Appl. Phys. Lett. 73 (11) (1998) 3156.
- Chen W., Liu D., Wu W., Zhang H., Wu J., J. Magn. Mater. 422 (2017) 49–56.
- Dhaou M.H., Hcini S., Mallah A., Bouazizi M.L., A. Jemni, Appl. Phys. A 123 (2017) 8.
- Ditta A., Khan M.A., Junaid M., Khalil R.M.A., Warsi M.F, Physica B 507 (2017) 27–34.
- Dixit G., Singh J.P., Srivastava R.C., Agarwal H.M., Chaudhary R.J., Adv. Mater. Lett. 3 (1) (2012) 21–28.
- Dominguez-Arvizu J.L., Jimenez-Miramontes J.A., Salinas-Gutierrez J.M., Melendez-Zaragoza M.J., Lopez-Ortiz A., Collins-Martinez V., Int. J. Hydrogen Energy 44 (24) (2019) 12455–12462.
- Eindhoven, Philips Technical Library, (1959).
- El-Masry M.M, Mahmoud AE-r, Morshidy H. Y and Ramadan R 2023 Cu²⁺- and Zn²⁺-doped cobalt spinel ferrite: insights on structural, thermal conduction, electric, magnetic and elastic properties J. Mater. Sci., Mater. Electron. 34 383.
- Elwell D., Parker R., Philos. Mag. 10 (104) (1964) 253–261.

- Ergin İ., İçin K., Güngüneş H. and Özçelik B. 2023 Detailed studies on structural, morphological, optical, magnetic and mossbauer properties of Cu-substituted cobalt ferrite nanoparticles Phys. Scr. 98 035807.
- Fang H.C., Yang Z, Ong C.K., Li Y., Wang C.S., J. Magn. Magn Mater. 187 (1998) 129-135
- Gao P., Hua X., Degirmenci V., Rooney D., Khraisheh M., Pollard R., Bowmen R.M, Rebrov E.V, J. Magn. Magn. Mater. 348 (2013) 44–50.
- Ghodake J.S., Kamble R.C., Shinde T.J., Maskar P.K., Suryavanshi S.S., Magn J..Magn. Mater. 401 (2016) 938–942.
- Hai T.H., Van H.T.B., Phong T.C., Abe M., Condens Phys. B. Matter 327 (2–4) (2003) 194–197.
- Hcini S., Selmi A., Rahmouni H., Omri A., Bouazizi M.L., Ceram. Int. 43 (2017) 2529–2536.
- Horvath M.P., J. Magn. Magn. Mater. 215–216 (2000) 171–183.
- Huo J., M. Wei., Mater. Lett. 63 (2009) 1183–1184.
- Hussain S.T., Gilani S.R., Ali S.D., Bhatti H.S., J. Alloy. Compd. 544 (2012) 99–104.
- Icin K., Akyol S., Alptekin F., Yıldız A., Sünbül S.E., Ergin İ. and Öztürk S 2023 A comparative study of the correlation among the phase formation, crystal stability and magnetic properties of $\text{SrFe}_{12-x}\text{M}_x\text{O}_{19}$ ($\text{M}=\text{Al}^{3+}$, Cr^{3+} and Mn^{3+} , $x=0-0.5$) ferrite permanent magnets J. Solid State Chem. 324 124126.
- Için K., Öztürk S., Çakıl D., Sünbül S.E., Ergin İ. and Özçelik B. 2022 Investigation of nano-crystalline strontium hexaferrite magnet powder from mill scale waste by the mechanochemical synthesis: effect of the annealing temperature Mater. Chem. Phys. 290 126513.
- Ji H., Lan Z., Yu Z., Xu Z., IEEE Trans. Magn. 46 (2010) 974–978.
- Ji H., Lan Z., Yu Z, Xu Z, IEEE Trans. Magn. 46 (2010) 974–978.
- Jia Z., Misra R.D.K., Mater. Technol. 26 (2011) 191–199.
- Jung D.S., Kang Y.C., Magn. J. Magn. Mater. 321 (2009) 619–623.
- Kale A., Gubbala S., Misra R.D.K. Magn, J. Magn. Mater. 277 (2004) 350.
- Köseoğlu Y., Baykal A., Gözüak F., Kavas H, Polyhedron 28 (2009) 2887–2892.
- Kulikowski J, J. Magn. Magn. Mater. 41 (1990) 56.
- Kumar N.H., Ravinder D and Edukondalu A 2022 Synthesis, structural, antimicrobial activity and dielectric properties of Ce^{3+} -doped Ni–Zn nano-ferrites Appl. Phys. 128 978.
- Kumar P.R., Mitra S, RSC Adv. 3 (2013) 25058–25064.
- Lacheisserie E. T., Gignoux D. and Springer M., New York, pp.79-83, 2005.
- Li,D.Y. Sun Y.K., Xu Y., Ge H.L., Wu Q., Yan C., Ceram. Int. 41 (2015) 4581.
- Liu Z., Peng Z., Lv C, Fu X, Ceram. Int. 43 (2017) 1449–1454.

- Malik A.Q., Singh H., Kumar A., Aepuru R., Kumar D., Mir TG., Ain Q, Bhat A A and Mubayi A2023 An overview on magnetic separable spinel as a promising material for photocatalysis and waste water treatment ES Energy&Environment 19 744.
- Mani A.D., Soibam I, Physica B 507 (2017) 21–26.
- Mathe V.L., R.B. Kamble, Mater. Res. Bull. 48 (4) (2013) 1415–1419.
- Meng F., Shang X., Zhang W., Zhang Y., Phys. B 504 (2017) 69–73.
- Misra R.D.K., Kale A., Srivastava R.S., Senkov O.N., Mater. Sci. Technol. 19 (6)(2003) 826–830.
- Misra R.D.K., Mater. Technol. 25 (2010) 118.
- Mokhosi S.R., Mdlalose W, Nhlapo A and Singh M2022 Advances in the synthesis and application of magnetic ferrite nanoparticles for cancer therapy Pharmaceutics 14 937.
- Murugesan V., Vaiyapuri M. and Murugeasan A. 2022 Fabrication and characterization of strontium substituted chitosan modify hydroxyapatite for biomedical applications Inorg. Chem. Commun. 142 109653.
- Narang S.B., Pubby K., Nickel Spinel Ferrites: A review. J. Magn. Magn. Mater. 519 (2021) 167163.
- Okamoto A. IEEE Globecom Workshops 2009 1 42 (10.1009/GLOCOMW.2009.5360693).
- Ozgur U., Alivo Y., Morkoç H., Mater J. Mater Sci. Electron. 20 (2009) 789–834.
- Panatage S.M., Shirsath S.E, Jadhav S.S, Jadhav K.M, Phys. Status Solidi A 209(2012) 347–352.
- Parker R., Smith M.S., Chem J. Phys. Solids 21 (1–2) (1961) 76–80.
- Pikula T., Oleszak D., Pekala M., Jartych E., J. Magn. Magn. Mater. 320 (2008) 413–420.
- Poplawsky R., Wright M.R., J. Crystals Growth 1 (3) (1967) 139–148.
- Pubby K., Meena S.S., Yusuf S.M., Narang S. B, Magn. J. Magn. Mater. 466, (2018) 430–445.
- Pubby K., Vijay Babu K., Bindra Narang S., Mater. Sci. Eng. B 255 (2020) 114513.
- Pullar R.C., Prog. Mater. Sci. 57 (2012) 1191–1334.
- Qin H., He Y., Xu P., Huang D., Wang Z., Wang H., Wang Z., Zhao Y., Tian Q and Wang C2021 Spinel ferrites (MFe_2O_4): synthesis, improvement and catalytic application in environment and energy field Adv. Colloid Interface Sci. 294 102486.
- Rahimia M., Eshraghi M., Kameli P., Ceram. Int. 40 (2014) 15569–15575.
- Raikher Y.L., J. Magn. Magn. Mater. 242–245 (Part 1) (2002) 572–574.
- Ramankutty C.G., Sugunan, S, Appl. Catal. A General 218 (2001) 39–51.
- Rana S., Rawat J., Misra R.D.K., Acta Biometer. 1 (2005) 691.
- Rubinger C.P.L., Gouveia D.X., Nunes J.F., Salgueiro C.C.M., Paiva J.A.C., Grac A.M.P.F., Andre P., Costa L.C., Microw. Opt. Technol. Lett. 49 (2007) 53–60.
- Safari A., Gheisari Kh., Farbod M., Magn J. Magn. Mater. 421 (2017) 44–51.
- Sarmah S., Patra K.P., Maji P.K., Ravi S. and Bora T. 2023 A comparative study on the structural, magnetic and dielectric properties of magnesium substituted cobalt ferrites Ceram. Int. 49 1444–63.
- Satyanarayana L., Reddy K.M., Manorama S.V., Mater. Chem. Phys. 82 (1)(2003) 21.

- Shafer M.W., J. Chem Phys. 65 (11) (1961) 2055–2062.
- Sinfrônio F.S.M, Santana P.Y.C, Coelho S.F.N., Silva F.C., Menezes A.S.D, Sharma S.K., J. Electron. Mater. 46 (2) (2017) 1145–1154.
- Sousa M.H., Hasmonay E., Depeyrot J., Tourinho F.A., Bacri J.C., Dubois E., Perzynski R., Sozeri H., Durmus Z., Baykal, A, Mater. Res. Bull. 47 (2012) 2442–2448.
- Sozeri H., Genç F., Ünal B., Baykal A., Aktaş B., J. Alloy Compd. 660 (2016) 324–335.
- Springer, Getzlaff M., Heidelberg Berlin, pp. 3-5, 2008.
- Stergiou C., Magn J. Magn. Mater. 426 (2016) 629–635.
- Stohr J. and Siegmann H.C., Magnetism: From fundamentals to nanoscale dynamics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-10, 2006.
- Taffa D.H., Dillert R., Ulpe A.C., Bauerfeind K.C.L., Bredow T., Bahnemann D.W., Wark M., Photon J. Energy 7 (1) (2016) 012009.
- Tamayo S. H., Garcia K.E., Barrero C.A., J. Magn. Magn. Mater. 471 (2019). 242–249.
- Thakur A., Verma R., Wan F., Ravelo B., Edelman I., Ovchinnikov S. and Thakur P. 2023 Investigation of structural, elastic and magnetic properties of Cu²⁺ ions substituted cobalt nano ferrites J. Magn. Magn. Mater. 581 170980.
- Tomar D. and Jeevanandam P. 2020 Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles with different morphologies via thermal decomposition approach and studies on their magnetic properties J. Alloys Compd. 843 155815.
- Tsai S-W, Yu W-X., Hwang P-A., Huang S-S., Lin H-M., Hsu Y-W. and Hsu F-Y. 2018 Fabrication and characterization of strontium substituted hydroxyapatite-CaO-CaCO₃ nanofibers with a mesoporous structure as drug delivery carriers Pharmaceutics 104.
- Unal B., Baykal A., Supercond J. Nov. Magn. 27 (2014) 469–479.
- Velmurugana K., Karuppananvenkatachalapathy V., Sendhilnathan S, Mater. Res. 13 (2010) 299–303.
- Vladikova D., Ilkov L., Karbanov S., Phys. Status Solidi A 121 (1990) 249–255.
- Wahba A.M., Mohamed M.B., J. Magn. Magn. Mater. 378 (2015) 246–252.
- Wang L., J. Ren, Wang Y., Liu X., Y. Wang, Alloys J. Compd. 490 (1–2) (2010) 656–660.
- Warsi M.F., Gilani Z.A., Al-Khalli N.F., Sarfraz M., Khan M.A., M.N. Anjum, I. Shakir, Ceram. Int. 43 (17) (2017) 14807–14812.
- Wu X., Chen W., Wu W., Li H., Lin C., J. Electron. Mater. 46 (2017 JEM) 199-207.
- Yalcin B. 2022 Exploration of the potential of Co/Cu co-doped Fe₂O₄ for medical applications: nanostructure, catalytic properties, and blood compatibility J. Nanopart. Res. 24 271
- Yaqoob K. Al, Bououdina M., Akhter M.S., Najar B. Al, Vijaya J.J., Mater. Chem. Phys. 232 (2019) 254–264.
- Youseef S.I., Natera M.G., Begum R.J., Srinivasan B.S., Murthy N.S.S., Chem J. Phys.. Solids 30 (8) (1969) 1941–1948

ÖZGEÇMİŞ

Çilem İYİÖZ ilk,orta ve lise öğrenimini Adana’da tamamladı. Lisans eğitimini 2009-2013 yıllarında Korkutata Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde tamamladı. Bir süre özel sektörde çalıştıktan sonra, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik bölümünde Yüksek Lisans yaptı.

