T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Yapısındaki Mıknatısların Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi; Manyetik ve Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi

MUSTAFA ARAS

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. MÜMİN ŞAHİN

EDİRNE 2013

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Yapısındaki Mıknatısların Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi; Manyetik ve Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi

MUSTAFA ARAS

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2013

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Taner TIMARCI
Makina Mühendisliği
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mümin ŞAHİN
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında bir Yüksek Lisans olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri İmza

Prof. Dr. Mümin ŞAHİN

Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI

Yrd. Doç. Dr. Deniz TAŞKIN

Tarih: 12/09/2013

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer almasına dikkat edildiğini beyan ederim.

06.08.2013

Mustafa ARAS

Yüksek Lisans Tezi

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Yapısındaki Mıknatısların Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi; Manyetik ve Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Tez çalışmasında **$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$** yapısındaki manyetik malzemelerin karakteristik ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için yüksek saflık değerine sahip NiO, ZnO ve Fe_2O_3 tozlarından x=0,15 x=0,50 ve x=0,85 değerleri için hazırlanan tozlar mekanik karıştırma yapılarak homojen $Ni_{1-x}Zn_xFe_20_4$ yapısında toz karışımları elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen toz karışımları hidrolik preste preslenmiş olup ardından 1000 ^oC, 1200 ^oC ve 1400 ^oC olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta 1'er saat süreyle sinterlenmişlerdir. Mekanik karıştırma sonucunda elde edilen toz karışımlarından toz metalurjisi yoluyla üretilen bulk numunelerin yapısal analizleri için SEM görüntülemesi, EDXRF analizleri yapılmış; VSM ile manyetik özellikleri belirlenmiştir.

SEM görüntülemelerinde sinterleme sıcaklığı ve bileşime bağlı olarak tane boyutlarının 100 nm ile 20 μm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. EDXRF analizi ile istenen birleşimlerin büyük ölçüde sağlandığı anlaşılmıştır. VSM sonuçlarına göre x=0,85 değeri için numuneler doyum manyetizasyon değerlerine ulaşmamışlardır. Numuneler x=0,50 için sinterleme sıcaklığına bağlı olarak 50-56 emu/g; x=0,15 değeri için 36-46 emu/g aralığında doyuma ulaşmışlardır.

Yıl **:** 2013

Sayfa Sayısı : 120

Anahtar Kelimeler **:** $Ni_{1-x}Zn_xFe_20_4$, toz metalurjisi, manyetik malzemeler, SEM, VSM

Master's Thesis

Production of Magnetic Materials having $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Structure with Powder Metallurgy Technique; Investigation of Their Magnetic and Characteristic Properties

T.U. Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this study, characteristics and magnetic properties of magnetic materials having $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ structure were investigated. Mechanical mixing of high purity NiO, ZnO and Fe_2O_3 powders were done to obtain homogenous $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ powder mixture for x=0.15, x=0.50 and x=0.85. These powder mixtures were pressed by using hydraulic press machine, and then subjected to sintering at different temperatures of 1000 ^oC, 1200 ^oC and 1400 ^oC for 1 hour. Obtained specimens were analysed with SEM imaging and EDXRF technique for the investigation of structural analysis; magnetic properties were determined using VSM.

When the SEM images were analyzed, it was observed that particles' dimensions ranging from 100 nm to 20 μm depent on the sintering temperature and mixing combination. It was confirmed by EDXRF that the desired combinations were obtained to a great extent. According to the VSM results, samples did not reach saturation magnetization values for x=0.85. Samples reached magnetization saturation between 50-56 emu/g for x=0.50 and between 36-46 emu/g for x=0.15 depending on the sintering temperature.

Year : 2013

Number of Pages : 120

Keywords : $Ni_{1-x}Zn_xFe_20_4$, powder metallurgy, magnetic materials, SEM, VSM

TEŞEKKÜR

Tez araştırmasının konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu katkılarından dolayı tez danışmanım sayın Prof. Dr. Mümin ŞAHİN (Trakya Üniversitesi)'e; proje deneyimlerinden yararlandığım sayın Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI (Trakya Üniversitesi)'ya; araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen sayın Prof. Dr. Orhan KAMER (İstanbul Teknik Üniversitesi)'e, Prof. Dr. Sait Eren SAN (Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü)'a, Doç. Dr. Erdoğan TARCAN (Kocaeli Üniversitesi)'a, Yrd. Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU (Kocaeli Üniversitesi)'na, Yrd. Doç. Dr. Harun BAYRAKDAR (Çanakkale 18 Mart Üniversitesi)'a, Öğr. Gör. Hasan KAYA (Kocaeli Üniversitesi)'ya, Arş. Gör. Ali TÜRKCAN (Kocaeli Üniversitesi)'a, Uzman Ahmet YETKİN (Trakya Üniversitesi)'e, Tuba ÇAYIR (Kocaeli Üniversitesi)'a, Gamze GÜNGÖR (Kocaeli Üniversitesi)'e, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nin değerli öğretim üyeleri ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Lisans öğrenimim sırasında manyetik malzemeler konusunda kapı aralayan değerli öğretim üyesi sayın Prof. Dr. T. Osman ÖZKAN (İstanbul Üniversitesi)'a saygılarımı sunarım.

Tez çalışması boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nin değerleri öğretim üyelerine, çalışma arkadaşlarıma ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmasına, tezde kullanılan kaynaklara, kullanılan araştırma olanaklarının kurulmasına ve çalışmasına; doğrudan veya dolaylı yoldan emeği geçen herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması Trakya Üniversitesi BAP birimi tarafından 2011/149 no'lu proje ile desteklenmiştir. Proje desteği için Trakya Üniversitesi BAP birimine teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa ARAS

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

TEŞEKKÜR ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SEMBOL LİSTESİ ..... **ix**

Kısaltmalar ..... **x**

TABLO LİSTESİ ..... **xi**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**

1. GİRİŞ **1**

2. MANYETİZMANIN TEMELLERİ **4**

2.1 Manyetizmaya Giriş ve Tarihçe **4**

2.2 Manyetizmaya Teorisi ve Genel Tanımlar **9**

2.3 Maxwell Denklemleri **17**

2.3.1 Maxwell Denklemlerinin Fiziksel Anlamları **18**

2.4 Domain Yapısı **19**

2.4.1 Domain Yapısını Belirleyen Enerji Türleri **21**

2.4.2 Manyetik Domainleri Gözleme Teknikleri **26**

2.4.3 Domainlerin Manyetik Alanda Hareketi ve Histerisis Eğrileri **31**

2.4.3.1 Histerisis Kaybı **35**

2.5 Manyetik Anizotropi **38**

2.5.1 Manyetokristal Anizotropi **38**

2.5.2 Şekil Anizotropisi **39**

2.6 Genel Olarak Mıknatısların Manyetik Karakteristikleri **40**

3. MALZEMELERİN MANYETİK AÇIDAN SINIFLANDIRILMASI **42**

3.1 Manyetizma Türlerine Giriş **42**

3.2 Diamanyetizma **43**

3.3 Paramanyetizma **48**

3.3.1 Süperparamanyetizma **50**

3.4 Ferromanyetizma **51**

3.4.1 Ferromanyetik Şekil Hatırlama Olayı **54**

3.5 Antiferromanyetizma **55**

3.6 Ferrimanyetizma **57**

4. MATERYAL VE METOD **66**

4.1 Nikel Çinko Ferrit'in Önemi ve Deneysel Aşamalar **66**

4.2 Toz Metalurjisi İle Üretim **68**

4.3 Taramalı Elektron Mikroskobisinin Temelleri **72**

4.4 X-Işını Spektroskopisi İle Analiz İşlemi **74**

4.5 Titreşimli Örnek Magnetometresi (VSM) Çalışma Prensipleri **76**

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA **78**

5.1 Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık ve Boyut Ölçümleri **78**

5.2 SEM Görüntüleri **82**

5.3 Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDXRF) Analizleri **99**

5.4 Manyetizasyon Ölçümleri **105**

5.5 Sonuçlar ve Tartışma **112**

5.6 Öneriler **114**

KAYNAKLAR **115**

ÖZGEÇMİŞ **120**

SEMBOL LİSTESİ

C	Curie Sabiti
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
B_0	Akım Tarafından Oluşturulan Manyetik Akı Yoğunluğu
B_m	Malzeme Üzerindeki Manyetik Akı Yoğunluğu
B_s	Doyma Mıknatıslanması
B_r	Kalıcı Mıknatıslık
BH_{max}	Maksimum Enerji Çarpımı
d	Düzlemler Arası Uzaklık
e^-	Elektronun Yükü
F	Manyetik Kuvvet
h	Planck Sabitesi
H	Uygulanan Manyetik Alan
H_c	Zorlayıcı Kuvvet (Koersivite)
I	Şiddet
J	Manyetik Polarizasyon
m	Elektron Kütlesi
μ	Maddenin Manyetik Geçirgenliği
$μ_0$	Uzayın Manyetik Geçirgenliği
$μ_r$	Relatif geçirgenlik
μ'	Diferansiyel geçirgenlik
M	Mıknatıslanma Vektörü
M_R	Kalıcı Mıknatıslanma
M_S	Doyum Mıknatıslanması
N	Sargı Sayısı
N	Avagadro Sayısı
Oe	Oersted
q	Yük
s	Spesifik Polarizasyon
T	Sıcaklık

T_C	Curie Sıcaklığı
T_N	Neel sıcaklığı
v	Hız
θ	Saçılma Açısı
λ	Dalga Boyu
μ_B	Bohr Magnetonu
ω	Açısal Hız
χ	Manyetik Alınganlık
ψ	Dalga Fonksiyonu

Kısaltmalar

EDXRF	Enerji Dağılımlı Spektrometre (Energy-Dispersive-X-Ray Fluorescence)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
VSM	Titreşimli Örnek Magnetometresi (Vibrating Sample Magnetometer)
WDXRF	Dalga Boyu Dağılımlı Spektrometre (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Maxwell Denklemleri..... **18**

Tablo 3.1: Bazı Eksi Duyarlı Elementlerin Mıknatıs Duyarlıkları..... **45**

Tablo 3.2 : Bazı Artı Duyarlı Elementlerin Mıknatıs Duyarlıkları..... **49**

Tablo 3.3: Çeşitli Ferromanyetik Malzemelerin Mıknatıslanma Doygunluğu **53**

Tablo 3.4: Malzemelerin Manyetik Özellikleri Açısından Sınıflandırılması..... **61**

Tablo 3.5: Çeşitli Malzemelerin Curie Sıcaklıkları..... **63**

Tablo 4.1: Deneysel Aşamalar..... **67**

Tablo 5.1: Bileşim1 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık Ölçümleri **78**

Tablo 5.2: Bileşim2 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık Ölçümleri **79**

Tablo 5.3: Bileşim3 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık Ölçümleri **79**

Tablo 5.4: Bileşim1 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Boyut Ölçümleri .. **80**

Tablo 5.5: Bileşim2 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Boyut Ölçümleri .. **80**

Tablo 5.6: Bileşim3 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Boyut Ölçümleri .. **81**

Tablo 5.7: Numunelerin EDXRF Analizi Sonucu Elde Edilen Atomik % İçerikleri .. **102**

Tablo 5.8: Numunelerin EDXRF Analizi Sonucu Elde Edilen Ağırlıkça % İçerikleri **103**

Tablo 5.9: Sinterleme Öncesinde Elde Edilmek İstenen Toz Karışımlarının…….
Atomik % İçerikleri..... **104**

Tablo 5.10: Sinterleme Öncesinde Elde Edilmek İstenen Toz Karışımlarının……...
Ağırlıkça % İçerikleri **104**

Tablo 5.11: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4 (0 \leq x \leq 1)$İçin Maximum Manyetik Moment(M→emu/g)…..
Değerleri ve Elde Edildiği Manyetik Alan (H→Oe) Değerleri……**105**

Tablo 5.12: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4 (0 \leq x \leq 1)$ İçin Eksi Yönde Maximum Manyetik……..
Moment (M→emu/g) Değerleri ve Elde Edildiği Manyetik Alan…….
(H→Oe) Değerleri..... **106**

Tablo 5.13: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$ İçin H_c Değerleri (Oe) **107**

Tablo 5.14: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$ İçin H=0 (Oe) Değerleri İçin.....
Numunelerin Manyetizasyon Değerleri..... **108**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: a) Magnesia Antik Kenti **4**

Şekil 2.1: b) Magnetit Taşı **4**

Şekil 2.1: c) Çinlilerin Kullandığı Pusula **4**

Şekil 2.2: "De Magnete" Adlı Kitaptan **5**

Şekil 2.3: Faraday'ın 29Ağustos 1831'de,Yaptığı Deneyde Kullandığı Demir Halka **5**

Şekil 2.4: Maksimum Enerjilerine Göre Sürekli Mıknatısların Tarihsel Gelişimi **8**

Şekil 2.5: Manyetik Kutupların Birbiri ile Etkileşimleri **9**

Şekil 2.5: a) Zıt Kutuplar Birbirini Çeker **9**

Şekil 2.5: b) Aynı Kutuplar Birbirini İter **9**

Şekil 2.6: Mıknatıslanmamış Bir Nesne ile Mıknatısların Etkileşimleri **9**

Şekil 2.7: a) Demir Tozları ile Mıknatıs Etkileşimi **9**

Şekil 2.7: b) Mıknatısta Manyetik Akı Çizgilerinin Gösterimi **9**

Şekil 2.8: Bir Elektronun Yörünge Hareketi Sonucu Sahip Olduğu Manyetik Moment… (r Yarıçaplı Bir Çember Üzerinde Dolanan Bir Elektron) **12**

Şekil 2.9: Elektronda Spinin Gösterimi **13**

Şekil 2.10: Elektromanyetik Dalga **17**

Şekil 2.11: Asal Mıknatıs Bir Metalde Domainlerin Gösterilişi **20**

Şekil 2.12: a) Bloch Duvarı **20**

Şekil 2.12: b) Neel Duvarı **20**

Şekil 2.13: Manyetik Bölgeler Arasındaki Bölge Duvarının Yapısı **21**

Şekil 2.14: Bir Mıknatıslı Malzemede, Domain Boyutlarının Küçülmesi Sonucu Dış….. Mıknatıs Alanda Meydana Gelen Küçülme **21**

Şekil 2.15: HMK Yapıdaki Demir Mıknatısın Kristal Yönlenimi (Demir <100> …… Yönlerinde <111> Yönlerinden Daha Kolay Mıknatıslanmaktadır.)..... **23**

Şekil 2.16: a) Domain Sınırında Mıknatıs Çift Kutuplarının Dizilimi..... **24**

Şekil 2.16: b) Mıknatıs Değişim Enerjisi, Mıknatıs Kristali Yönlülük Enerjisi ve Sınır... Genişliği Arasındaki İlişki. (Denge Sınır Genişliği 100 nm Civarındadır.) **24**

Şekil 2.17: Asal Mıknatıs Fe, Co ve Ni Elementlerinin Mıknatıs Gerinmesi Davranışı… (Mıknatıs Gerinmesi Uzamanın veya Büzülmenin Bir Yüzdesi Olup Bu…… Resimde Mikrometre/Metre Birimiyle Verilmiştir.) **25**

Şekil 2.18: Kübik Bir Mıknatıslı Malzemede Mıknatıs Gerinmesi **26**

Şekil 2.18: a) Eksi Mıknatıs Gerinmelerinin Mıknatıs Malzemenin Domain…… Sınırlarını Ayırışının Abartılı Gösterilişi..... **26**

Şekil 2.18: b) Artı Mıknatıs Gerinmelerinin Mıknatıs Malzemenin Domain……. Sınırlarını Ayırışının Abartılı Gösterilişi..... **26**

Şekil 2.18: c) Mıknatıs Gerinmesi Gerilmelerinin Daha Küçük Domain Boyutlu……. Bir Yapının Oluşumuyla Azalması **26**

Şekil 2.19: Si-Fe Numunede, Yüksek Alanlarda Bitter Yöntemi ile Gözlenen…….. Domainler..... **28**

Şekil 2.20: Si-Fe Numunede, Daha Düşük Alanlarda Bitter Yöntemi ile…….. Gözlenen Domainler Çizgilerin Genişliği Düzensizliklerden…….. Kaynaklanıyor Olabilir **28**

Şekil 2.21: Bitter Yöntemi ile Domainlerin Gözlenmesi..... **28**

Şekil 2.21: a) Yüzeyi İkiye Bölen Duvarın İçindeki Spinlerin Merkezdeki Bir……. Spin ile Temsil Edildiği, Yüzeye Dik Olan 180°'lik Domain Duvarı..... **28**

Şekil 2.21: b) Yüzeyin, Yansıtıcı Bir Mikroskop ile "Parlak Alan" Aydınlatması…… Altında İncelenmesi..... **28**

Şekil 2.21: c) Yüzeyin, Yansıtıcı Bir Mikroskop ile "Karanlık Alan" Aydınlatması……. Altında İncelenmesi..... **28**

Şekil 2.22: Kerr Yöntemi ile Domainlerin Gözlenmesi **29**

Şekil 2.23: Amorf Numunede Kerr Yöntemi ile Gözlenen Domainler..... **30**

Şekil 2.24: Faraday Yöntemi ile Domainlerin Gözlenmesi..... **30**

Şekil 2.25: Doyma Noktasına Kadar Manyetik Akının (M),……..
Manyetik Alan Şiddeti (H) İle Değişimi..... **31**

Şekil 2.26: Doyma Noktasından İtibaren Azalan Manyetik Alanın;……..
Manyetik Akıya Etkisi..... **32**

Şekil 2.27: Histerisis Çevriminin Elde Edilişi **33**

Şekil 2.28: Histerisis Eğrisi Çizimi **34**

Şekil 2.29: a) Yumuşak Manyetik Malzemelerin Genel Histerisis Eğrisi **35**

Şekil 2.29: b) Sert Manyetik Malzemelerin Genel Histerisis Eğrisi..... **35**

Şekil 2.30: Histerisis Kaybı **37**

Şekil 2.31: Mıknatıslanmamış ve Mıknatıslanmış Bir Malzemede Atomların Dizilişi . **38**

Şekil 2.32: Manyetik Anizotropiye Sahip Bir Kristaldeki Manyetik Eksenler **39**

Şekil 2.33: Manyetik Anizotropik Bir Malzemenin Manyetik Eksenlere Göre……..
H-M Grafiği **39**

Şekil 2.34: Eliptik Bir Parçacığın Manyetik Yapısı..... **40**

Şekil 3.1: Malzemelerin Manyetik Alınganlıklarının Karşılaştırılması **42**

Şekil 3.2: a) Diamanyetik Malzemenin Atomları..... **43**

Şekil 3.2: b) Diamanyetik Malzeme Atomlarının Dış Manyetik Alan Karşısında…….
Tepkisi **43**

Şekil 3.3: Diamanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği..... **44**

Şekil 3.4: Diamanyetik Bir Malzeme Etrafındaki Manyetik Alan..... **45**

Şekil 3.5: Diamanyetik Bir Malzemenin Manyetik Alan Kaynağı Tarafından İtilmesi. **46**

Şekil 3.6: Bir Süper İletkenin Manyetizasyonu **46**

Şekil 3.7: a) Birinci Tip Süper İletkenin Manyetik Alanının Sıcaklığa Bağımlılığı **47**

Şekil 3.7: b) İkinci Tip Süper İletkenin Manyetik Alanının Sıcaklığa Bağımlılığı **47**

Şekil 3.8: a) Paramanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi **48**

Şekil 3.8: b) Dış Manyetik Alan (H) Altında Paramanyetik Bir Malzemenin…….
Alabileceği En Düzenli Hal **48**

Şekil 3.9: Paramanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği **49**

Şekil 3.10: Parçacık Büyüklüğüne Bağlı Olarak Koersivite Değişimi **50**

Şekil 3.11: a) Ferromanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi..... **52**

Şekil 3.11: b) Dış Manyetik Alan Altında Ferromanyetik Bir Malzemenin Manyetik…..
Düzenlenimi **52**

Şekil 3.12: Ferromanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği **52**

Şekil 3.13: Ferromagnetik Şekil Hafıza Etkisi..... **54**

Şekil 3.14: Ferromagnetik Şekil Hafıza Alaşımlarından Elde Edilen…….
Sıcaklık Kontrollü Sensörlerin Çalışma Mekanizması..... **54**

Şekil 3.15: a) Antiferromanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi..... **55**

Şekil 3.15: b) Dış Manyetik Alan Altında Antiferromanyetik……...
Bir Malzemenin Düzenlenimi **55**

Şekil 3.16: Antiferromanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği **56**

Şekil 3.17: Eğik Antiferromanyetik Yapılar **56**

Şekil 3.18: Ferrimanyetizmanın Manyetik Moment Dizilimi..... **58**

Şekil 3.19: a) Ferrimanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi..... **59**

Şekil 3.19: b) Manyetik Alan Altında Ferrimanyetik Bir Malzemenin Düzenlenimi.... **59**

Şekil 3.20: Ferrimanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği..... **59**

Şekil 3.21: Atomik Manyetik Momentlerin, Ferrimanyetik Yapılarda Düzenlenimi **60**

Şekil 3.22: Malzemelerin Manyetik Geçirgenliklerinin Karşılaştırılması..... **60**

Şekil 3.23: Manyetizasyonun Sıcaklığa Bağlılığı **63**

Şekil 3.24: Paramanyetik ve Diamanyetik Malzemeler İçin……..
Mutlak Sıcaklık T İle χ Manyetik Alınganlığın Değişimi **63**
Şekil 3.25: Ferromanyetik Bir Malzeme İçin *M/MS(T)* ve $\chi^{-1}(T)$ Eğrileri..... **64**
Şekil 3.26: Antiferromanyetik Bir Malzemenin $\chi(T)$ ve $\chi^{-1}(T)$ Eğrileri **64**
Şekil 3.27: Alınganlık-Sıcaklık İlişkisi **65**
Şekil 3.28: Ferrimanyet İçin 1/χ- T Grafiği **65**
Şekil 4.1: Toz Metalurjisi Yöntemi İle Parça Üretim Aşamalarının Genel Taslağı **68**
Şekil 4.2: Mekanik Karıştırma İçin Tozların Hazırlanması..... **69**
Şekil 4.2: a) Tozların Tartım İşlemi..... **69**
Şekil 4.2: b) Tartım İşlemi Sonrası Tozlar **69**
Şekil 4.3: Presleme İşleminin Basamakları; 1. İşlem Başlangıcı, 2. Toz Doldurma, ……
3. Presleme Başlangıcı, 4. Preslemenin Bitişi, ……..
5. Preslenmiş Parçanın Çıkarılması. **70**
Şekil 4.4: Presleme İşlemi İçin Kullanılan Ekipmanlar **70**
Şekil 4.4: a) Hidrolik Pres **70**
Şekil 4.4: b) Kalıp **70**
Şekil 4.5: Çift-Küre Sinterleme Modeli **71**
Şekil 4.6: Taramalı Elektron Mikroskobu **73**
Şekil 4.6: a.) Taramalı Elektron Mikroskobunun Çalışma Düzeneği **73**
Şekil 4.6: b) Tez Çalışması İçin Kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu..... **73**
Şekil 4.7: VSM'in Şematik Gösterimi..... **76**
Şekil 5.1: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü **82**
Şekil 5.2: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **83**
Şekil 5.3: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **83**
Şekil 5.4: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü **84**
Şekil 5.5: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **84**

Şekil 5.6: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **85**

Şekil 5.7: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü **86**

Şekil 5.8: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **86**

Şekil 5.9: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **87**

Şekil 5. 10: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü . **87**

Şekil 5.11: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü **88**

Şekil 5.12: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü **88**

Şekil 5.13: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **89**

Şekil 5.14: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü **89**

Şekil 5.15: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü **90**

Şekil 5.16: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **90**

Şekil 5.17: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü **91**

Şekil 5.18: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü **91**

Şekil 5.19: Ismayadi Ismail ve Mansor Hashim'in Çalışmasında Yer Alan……..
$Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Yapısının 1000 ^{o}C'de 10 Saat Sinterlenmesiyle…….
Elde Edilen Yapı **92**

Şekil 5.20: Ismayadi Ismail ve Mansor Hashim'in Çalışmasında Yer Alan Görüntüsü **94**

Şekil 5.23: Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü **94**

Şekil 5.24: Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü **95**

Şekil 5.25: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **95**

Şekil 5.26: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü **96**

Şekil 5.27: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü **96**

Şekil 5.28: Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü .. **97**

Şekil 5.29: Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü **97**

Şekil 5.30: Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü **98**

Şekil 5.31: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği **99**

Şekil 5.32: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği **99**

Şekil 5.33: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği **99**

Şekil 5. 34: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği **100**

Şekil 5.35: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği **100**

Şekil 5.36: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği **100**

Şekil 5.37: Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği **101**

Şekil 5.38: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği **101**

Şekil 5.39 Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği **101**

Şekil 5.40: Bileşim 1 - 1000 ^{o}C - Numune 2 VSM Ölçüm Sonuçları **109**

Şekil 5.41: Bileşim 1 - 1200 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **109**

Şekil 5.42: Bileşim 1 - 1400 ^{o}C - Numune 1 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **109**

Şekil 5.43: Bileşim 2 - 1000 ^{o}C - Numune 1 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **110**

Şekil 5.44: Bileşim 2 - 1200 ^{o}C - Numune 1 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **110**

Şekil 5.45 Bileşim 2 - 1400 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **110**

Şekil 5.46: Bileşim 3 - 1000 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **111**

Şekil 5.47: Bileşim 3 - 1200 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **111**

Şekil 5.48: Bileşim 3 - 1400 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları **111**

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mıknatıs ve manyetizma kavramları günümüze kadar birçok insanda merak uyandırmış ve araştırma konusu olmuştur. Özellikle mıknatısların bazı cisimleri çekmeleri bazılarını ise çekmemeleri insanlara oldukça ilginç gelmiştir. İnsanlar bunun kaynağını bulabilmek için oldukça fazla zaman harcamışlardır. Bu gizemli dünyanın sırları ancak ve ancak son birkaç yüzyıldır aralanmaya başlamıştır fakat henüz tam anlamıyla ortaya çıkarılamamıştır.

Günümüz dünyasında manyetizmanın kullanım alanları hızla gelişmektedir. Başta mühendislik, tıp, fizik ve matematik alanı olmak üzere birçok alanda manyetizma bilgilerinden faydalanılmaktadır. Son yıllarda manyetik depolama (bellek uygulamaları) oldukça önemli bir olay haline gelmiştir. Bilgisayarlarda kullanılan disketler ve sabit diskler, CD ve DVD'ler inanılmaz boyutta bilgi ve belgeyi çok küçük hacimlerde depolayabilmektedir. Ses ve görüntü kaydetme ve iletme olaylarında da manyetizmanın uygulamalarını görüyoruz. Tıp ve biyomedikal mühendisliği alanında kullanılan MR cihazı ve görüntü işleme cihazlarının yanı sıra protein ayrıştırılmasında kullanılan manyetik parçacıklar, manyetizma ve manyetik malzemelerinin temel uygulanma alanlarından sadece birkaçıdır. Manyetizmanın anlaşılması aynı zamanda endüstriyel ölçüm ve denetim cihazları ile sistemleri konusunda da son derece önemlidir. Elektrik ölçü aletleri, röleler, selenoidler, manyetik anahtarlar, indüktörler, transformatörler, motorlar, jeneratörler ve sayamadığımız daha birçok cihaz manyetizma ilkelerine göre tasarlanmışlardır. [1] Bu alanda araştırmalar özellikle son yüzyıl içerisinde oldukça göz önünde olmuştur ve günümüzün en saygın ödüllerinden olan Nobel Ödülleri'ne layık görülmüşlerdir. Manyetizma konusunda yapılan çalışmalara verilen Nobel Ödülleri arasında:

1902 *Hendrık Antoon LORENTZ,* **(**Hollanda, Leyden Üniversitesi, d. 1853, ö. 1928) ve *Pieter ZEEMAN,* (Hollanda, Amsterdam Üniversitesi, d. 1865, ö. 1943)

"Manyetizmanın radyasyon üzerine etkileri konusundaki çalışmalarıyla verdikleri üstün hizmetler için"

1943 *Otto STERN,* (A.B.D. Carnegie Teknoloji Enstitüsü, Pittsburg, PA, d. 1888 (Sorau, o dönemde Almanya'da), ö. 1969), "Moleküler ışın yönteminin geliştirilmesine katkıları ve protonun manyetik momentini buluşu için"

1944 *Isıdor Isaac RABI*, (A.B.D., Columbia Üniversitesi, New York, NY, d. 1898, ö. 1988), "Atom çekirdeğinin manyetik özelliklerinin kaydı için kullanılan rezonans yöntemini buluşu için"

1952 *Felix BLOCH,* (A.B.D., Stanford Üniversitesi, Stanford, CA, d. 1905 (Zürih, İsviçre), ö. 1983) ve *Edward Mills PURCELL*, (A.B.D., Harvard Üniversitesi, Cambridge, MA, d. 1912, ö. 1997) "Hassas nükleer manyetik ölçümler için geliştirdikleri yeni yöntemler ve bu yolla yaptıkları keşifler için"

1955 *Polykarp KUSCH,* (A.B.D., Columbia Üniversitesi, New York, NY, d. 1911 (Blankenburg, o dönemde Almanya'da), ö. 1993) "Elektronun manyetik momentini duyarlı biçimde saptadığı için"

1970 Louıs NÉEL, (Fransa, Grenoble Üniversitesi, Grenoble, d. 1904, ö:2000) "Antiferromanyetizma ve ferrimanyetizma alanlarındaki, katı hal fiziğinde önemli uygulamalar bulan temel nitelikteki çalışmaları ve keşifleri için"

1977 *J. H. VAN VLECK,* (A.B.D., Harvard Üniversitesi, Cambridge, MA, d. 1899, ö. 1980) "Manyetik ve düzensiz sistemlerin elektronik yapısına ilişkin temel nitelikte kuramsal araştırmaları için"

2007 *Albert FERT* (Université Paris-Sud, Orsay, France, Unité Mixte de Physique CNRS/THALES, Orsay, Fransa d.1938) ve *Peter GRÜNBERG* (Forschungszentrum Jülich, Jülich, Almanya d. 1939,) "Dev Magnetorezistans buluşu için" dikkati çekmektedir. [2, 3]

Manyetizma ve mıknatıs kavramları ile ilgili ilk uygulamalardan biri iğne pusula olmuştur. İğne pusula, bir destek üzerine oturtulmuş olan ince bir mıknatıstan ibarettir. Buradaki destek, mıknatısın serbestçe dönmesini sağlar. Bir mıknatısın iki kutbu vardır. Bu kutuplar sayesinde yön tayini yapılabilmektedir. Burada daima manyetik kuzeye yönelen kutba, ***kuzey kutup*** denirken diğer kutba ise ***güney kutup*** adı verilir.

Elektrik yüklerindeki gibi; mıknatıslarda da benzer kutuplar birbirlerini iter farklı kutuplar ise birbirlerini çekerler.

Mıknatıslar, diğer mıknatıslara ve mıknatıslanabilecek maddelere bir kuvvet uygular. Her bir mıknatısın etrafında kuzey kutuptan güney kutba yönelen bir kuvvet alanı mevcuttur. Bir kâğıt üstünde bulunan demir tozlarının altına mıknatıs yerleştirilerek kuvvet alanı ve oluşan kuvvet çizileri rahatlıkla gözlemlenebilir. Bu manyetik kuvvet sayesinde diğer mıknatıslar ve mıknatıslanabilecek maddeler çekilir veya itilirler. Manyetik özelliklerini uzun süre sürdürebilen bir mıknatısa ***kalıcı mıknatıs*** adı verilir. Tarihte bilinen ilk kalıcı mıknatıslar demir, kobalt ve nikel esaslıdırlar. Bu üç metal kolayca mıknatıslanabilir ve manyetik özelliklerini uzun bir süre koruyabilirler. [5] Günümüzde ise yukarıdaki metallere çeşitli element ve birleşiklerle alaşımlanarak farklı kuvvetlere sahip manyetik malzemeler elde edilmektedir. Bunların başında AlNiCo, SmCo ve Ferrit esaslı mıknatıslar gelmektedir. Bu çalışmada da $\mathbf{Ni_{1-x}Zn_xFe_20_4}$ yapısındaki manyetik malzemelerin karakteristik ve manyetik özellikleri incelenecektir.

Tez çalışması giriş bölümü dahil olmak üzere 5 ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde manyetizmanın genel ilkeleri hakkında bilgi verilmiş olup üçüncü bölümde malzemelerin manyetik özellikleri ile bu bilgiler genişletilmiş ve pekiştirilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalara değinilmiş beşinci bölümde yapılan deneylerin sonuçları ve elde edilen verilerle literatür karşılaştırılması yapılmıştır.

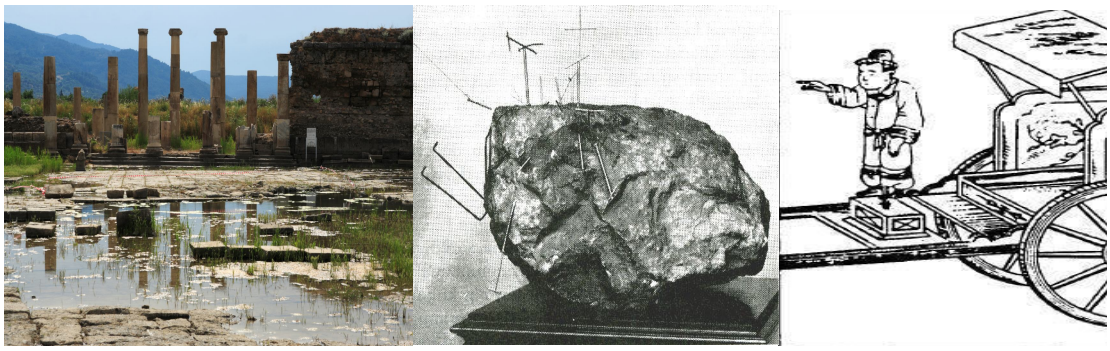
BÖLÜM 2

MANYETİZMANIN TEMELLERİ

2.1 Manyetizmaya Giriş ve Tarihçe

İlk çağlarda, Fe_3O_4(Magnetit) içeren kayaçların sürekli mıknatıs niteliğine sahip oldukları hem batı hem de doğu uygarlıkları tarafından bilinmekteydi.

"M.Ö. 2637 yılında Çin imparatorlarından *Hvang-ti'*nin arabasının üzerinde her yöne serbestçe dönebilen bir kadın heykelinin asılı olduğu ve bu heykelin bir kolunun sürekli olarak, içindeki mıknatıs taşı nedeni ile güney yönünü gösterdiği tarihçilerce bize aktarılmaktadır. Ünlü Alman doğa bilimcisi *Alexander von Humboldt* (1769-1859)'dan Çinlilerin M.Ö. 1100 yıllarında mıknatıs taşları ile mıknatısladıkları madeni iğnelerden pusula yaptıklarını ve Çinli denizcilerin denize açıldıklarında bu tür pusulalardan yararlandıklarını öğreniyoruz." [4]



(a) **(b)** **(c)**

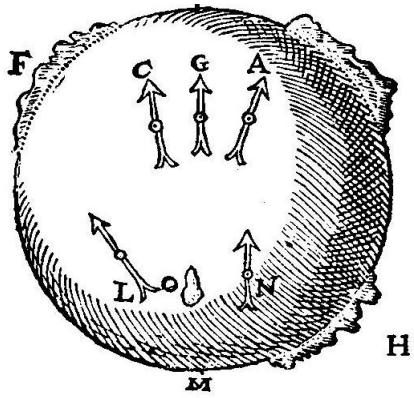
Şekil 2.1: a.) Magnesia Antik Kenti **b.)** Magnetit Taşı **c.)** Çinlilerin Kullandığı Pusula

Eski Çin'i izleyen önemli uygarlıklar Yunan ve onu izleyen Roma uygarlıklarıdır. Türkiye'de Aydın yakınlarında kurulmuş olan Magnesia antik kenti magnetit (mıknatıs taşı) minarelinin ilk bulunduğu yerlerden biri olarak tanınır.

(Magnesia ad Meandrum, Aydın ili, Germencik ilçesi Ortaklar bucağına bağlı Tekin köy sınırları içinde Ortaklar-Söke karayolu üzerinde yer almaktadır. Magnesia'nın ataları, bugünkü Yunanistan'ın Teselya Bölgesi'nde yaşayan Magnetler'dir.) [6]

Magnetit, kuzeyi bulma özelliği nedeni ile İngilizce olarak "lodestone" (yön taşı) denmesine neden olmuştur. Lodestone' un demir parçalarını çekme özelliği tarihte ilk olarak *LECRETUS* tarafından açıklanmaya çalışılmıştır. M.Ö. 600'lü yıllarda bulunan diğer bir keşif ise amber (kehribar) mineralinin bir tür kumaş parçasına sürtülmesi sonucunda amberin kendisinden küçük cisimleri çekebildiğinin fark edilmesi olmuştur. Bu olayın keşfi *Miletus'lu Thales*'e atfedilir. (M.Ö. 640-580) *Thales* daha da ileri giderek bu iki tür olay arasında ilişki kurmaya çalışmıştır. "Ne var ki bilim ve teknoloji tarihinin en önemli patlamalarından birine yol açan elektrik ile manyetizma arasındaki ilişkinin açıklanabilmesi ancak 2400 yıl sonra gerçekleşebilecektir."

Bu alanda yayımlanan ilk önemli yapıt olan "De Magnete" *(Mıknatıslara Dair)* (M.S.1600 yılında) kitabının yazarı bir İngiliz tıp doktoru olan *William Gilbert* (1544-1603)'dir. *Gilbert*'in bu kitabındaki en önemli katkısı dünyanın küresel bir mıknatıs olduğu ve pusula göstergesinin, dünyanın manyetik kutbunu gösterdiğini ortaya koymuş olmasıdır. Pusula göstergesinin kuzey-güney doğrultusu yanı sıra düşey yönde de sapma gösterdiğini ilk kez ortaya atan Gilbert olmuştur.



Şekil 2.2: "De Magnete" Adlı Kitaptan .



Şekil 2.3: Faraday'ın 29Ağustos 1831'de, Yaptığı Deneyde Kullandığı Demir Halka

1675 yılında *Boyle* mıknatıs malzemelerinin fiziksel özelliklerinin değiştirilmesiyle manyetik özelliklerinin değiştirilemeyeceğini, manyetik özelliklerin malzemenin iç yapısının bir sonucu olduğunu belirterek *Gilbert*'in gözlemlerini doğrulamıştır.

1750'de *John Michell* manyetik kutupların birbirleri üzerine ya itici ya da çekici kuvvetlerle etki ettiklerini ve bu kuvvetlerin söz konusu kutupların arasındaki uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değiştiğini göstermiştir. İki manyetik kutup arasındaki kuvvet, iki elektrik yükü arasındaki kuvvete benzemekle birlikte iki kuvvet arasında önemli bir fark vardır. Tek bir elektrik yükü mevcut olabilmekte ancak tek bir manyetik kutup olamamaktadır. Yani manyetik kutuplar N ve S (kuzey ve güney kutbu) her zaman çiftler halinde bulunurlar.

Manyetizmanın, elektrik ile ilgisi 1820 yılına kadar anlaşılamamıştır. 1820 yılında Kopenhag Üniversitesi'nde doğa felsefesi profesörü olan *Hans Christian Oersted* (1775-1851) pusula iğnesinin yakınındaki bir telden akım geçtiğinde pusula iğnesinin saptığını gördü. *Oersted*, bir telin içinden akım geçirildiğinde telin çevresinde manyetik alan oluştuğu sonucuna da vardı. Oersted yaptığı deneylerin sonuçlarını 21 Temmuz 1820 tarihinde Latince olarak yayımladı.

Yine aynı yıl Fransız matematikçi ve fizikçi *Andre Marie Ampere* (1775-1836) üzerinden akım geçen iki telin birbirlerine kuvvet etki ettiğini gözlemledi. Tellerden geçen akımlar aynı yönlü iken teller birbirini çekiyor, zıt yönlü iken itiyordu. *Ampere*, manyetik alan ile bu alanı doğuran akım arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak formülüze etmeyi (*Ampére Yasası*) başardı. *Andre Marie Ampere* maddenin manyetik özelliklerinin madde içinde dolaşan küçük atomik akımlardan kaynaklandığını savundu. Bu yaklaşım günümüzde artık kesinlik kazanmıştır. *Ampere*'in ortaya koyduğu bu yaklaşıma göre, elektrik yüklü parçacıklar hareket halinde ise ortamda bir değişiklik meydana gelir. İşte akım taşıyan bir bobinin ya da bir mıknatısın bulunduğu ortamda manyetik kuvvet olarak çıkan bu değişiklik, ***"manyetik alan"*** olarak isimlendirilir. [4]

Manyetik alan; elektrik akımı, daimi mıknatıslar ve elektrik alanın değişimi ile üç değişik yol ile oluşturulabilir. [7] *Oersted*, elektrik akımının manyetik alan oluşturduğunu bulmuştu. İngiliz fizikçi ve kimyacı *Michael Faraday*(1791-1867) mıknatısların elektrik akımı yarattığını ve değişen manyetik alanın elektrik alanı oluşturduğunu buldu. *Faraday*, kutuplar arasındaki etkilerin bir manyetik alandan ileri geldiği fikrini ileri sürmüştür. *Faraday* elektrik alanda olduğu gibi manyetik alanda da kuvvet çizgileri kavramını ortaya koymuştur. Kuvvet çizgileri (+) kutuptan çıkar, (-) kutupta son bulur. Manyetik alan çizgilerinin en yoğun olarak gözlendiği bölge kutuplardır. Herhangi bir noktadaki manyetik alan şiddeti, o noktadaki kuvvet çizgisi

yoğunluğuna eşittir. *Faraday* ayrıca mıknatısı sürekli bir bobinin içinde oynatarak telin içinde bir akım oluşturmayı başarmış ve bugün "jeneratör" adını verdiğimiz aletin temellerini atmıştır.

Bilimsel gelişmeye çok önemli ve özgün katkılarıyla (özellikle elektromanyetizma kuramı ile) *Maxwell*, belki ancak *Newton*'un ve *Einstein*'ın etkisiyle eş düzeyde tutulabilecek bir etki yaratmıştır. *Maxwell'*in manyetizma ile ilgili çalışmalarına ilerleyen bölümlerde değinilecektir.

1880 yılına gelindiğinde manyetizma değerlerinin açıklanmasında önemli bir adım olarak kabul edilen histerisis eğrilerinin keşfi *Warburg* tarafından ilk olarak demir için ortaya konulmuştur.

1895 yılında ise malzemelerinin manyetiklik özelliklerinin değiştiği sıcaklık olarak bilinen *Curie Sıcaklığı'*nın bulunmasını sağlayan *Curie Kanunları* öne sürülmüştür.

20. yüzyıla gelindiğinde manyetizma konusunda önemli gelişmeler olmuştur. Bu yüzyılın daha ilk yıllarında *Langerin* tarafından 1905 yılında açıklanan paramanyetizma ve diamanyetizma terimleri ile 1906 yılında *Weiss* tarafından açıklanan ferromanyetizma terimleri bugün manyetizmanın temel taşları olarak gözümüze çarpmaktadır.

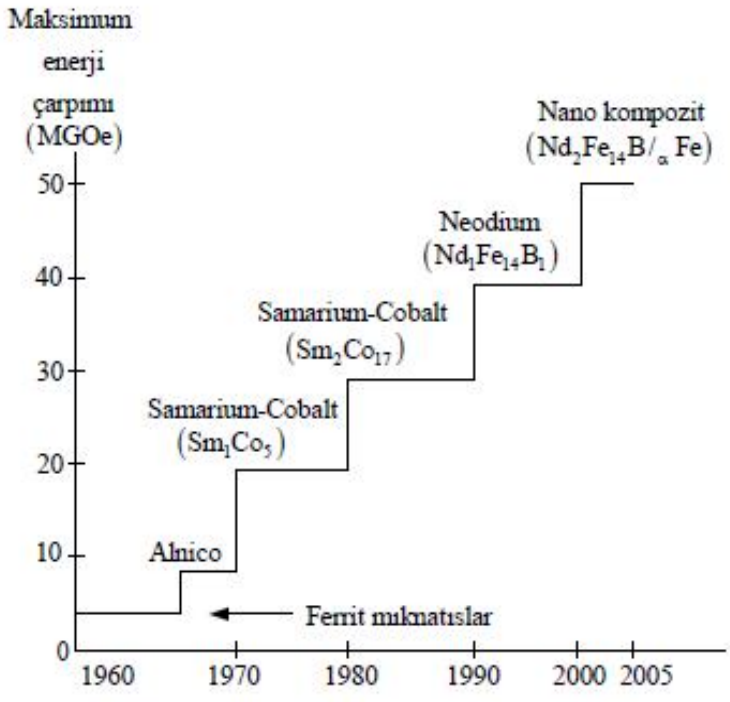
1920'li yıllara gelindiğinde kuantum mekaniğinin ortaya atılmasıyla açıklanmaya çalışılan elektron spin teorileri ve elektron değişim mekanizmalarını ele alan önemli teorilerin öne sürülmesi manyetizma konusunda büyük ilerlemelere yol açmıştır.

1920'li yıllardan itibaren havacılık ve uzay sanayi başta olmak üzere birçok alanda istenilen aralıklarda manyetik özellik sağlayabilecek malzemeler geliştirilmiştir.

Teknoloji 18. yüzyılda sürekli mıknatıs özelliğine sahip karbon-çelik alaşımlı malzeme üretebilecek düzeye gelebilmişti. 19. yüzyılın sonlarında imal edilen tungsten, krom ve kobalt çeliği mıknatıslarının manyetik enerji yoğunluğu nispeten düşüktü. Bu alaşımlar 20. yüzyıla kadar sürekli mıknatıs olarak kullanılmış yüksek enerjili alaşımlar üretilerek sürekli mıknatıs teknolojisi geliştirilmiştir. Yüksek enerjili sürekli mıknatıs alaşımları üretmeye yönelik kayda değer ilk önemli gelişmeler 1940'lı yılların başında Al, Ni, Co, Fe ve Cu alaşımlı ALNICOS sürekli mıknatıslarının üretimiyle gerçekleştirilmişti. Ancak, yüksek üretim maliyetinden dolayı ALNICOS sürekli

mıknatısların yerine, 1960'lı yıllarda üretilen düşük enerjili ve daha ucuz, baryum, stronsiyum veya kurşunun demir oksitle oluşturduğu ferrit alaşımlı sürekli mıknatıslar endüstride tercih edilmekteydi. Günümüz otomobil, uzay ve kontrol araçlarındaki elektrik motorlarının büyük bir kısmı Ferrit sürekli mıknatıslarından imal edilmektedir.

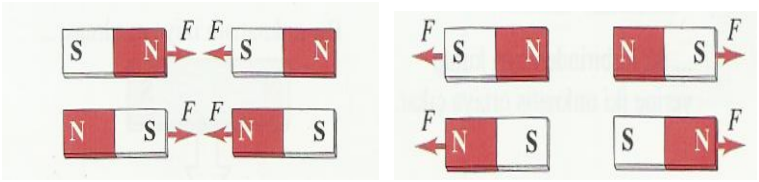
1950-1960 yılları arasında üretim teknolojisi nadir-toprak metalleri üretebilecek düzeye gelmişti. Bu tarihten sonra nadir-toprak alaşımlı sürekli mıknatısların üretilmesine yönelik yoğun araştırmalar başlatılmıştır. İlk nadir toprak sürekli mıknatıslar samaryum - kobalt (Sm-Co) alaşımından oluşmaktaydı. Bu alaşımın artık akı yoğunluğu AlNiCo'lardan ve demanyetizasyon alan şiddeti de sert Ferrit'ten daha yüksektir. Ancak kobalt madeninin stratejik öneme sahip bir malzeme olması nedeniyle bu alaşımlardan imal edilen sürekli mıknatıslar oldukça pahalıdır. Nadir toprak sürekli mıknatıs malzemeleri ile ilgili en son gelişme 1984 yılında en iyi samaryum-kobalt alaşımının özelliklerine sahip, ancak ondan çok daha ucuz olan neodyum-demir-bor (NdFeB) alaşımının imal edilmesi olmuştur.



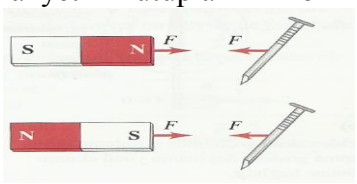
Şekil 2.4: Maksimum Enerjilerine Göre Sürekli Mıknatısların Tarihsel Gelişimi

2.2 Manyetizmaya Teorisi ve Genel Tanımlar

Hareket eden yüklerin manyetik etkileşimlerindeki ilişki anlaşılmadan önce, kalıcı mıknatıslar ve pusula iğneleri arasındaki etkileşmeler *manyetik kutuplar* kavramıyla tanımlanıyordu. Çubuk biçimindeki bir kalıcı mıknatıs veya bir *mıknatıs çubuk* dönme özgürlüğüne sahipse, bu ucu kuzey yönünü gösterir. Bu uca *kuzey kutbu* veya *N* kutbu denir. Diğer uç ise *güney kutbu* veya *S* kutbudur. Zıt kuvvetler birbirlerini çekerler ve benzer kutuplar birbirlerini iterler. İçinde demir olan ancak mıknatıslanmamış, diğer bir deyişle kuzey veya güneyi gösterme eğilimi olmayan bir nesne bir kalıcı mıknatısın *her iki kutbuna doğru* çekilir (Şekil 2.6). Buzdolabınızın mıknatıslanmamış demir olan kapısı ile magnet arasındaki çekme budur.

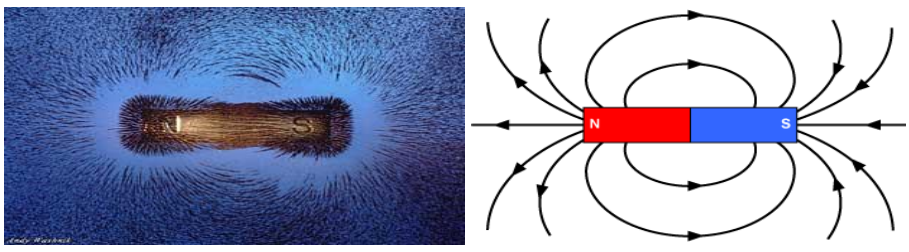


a.) Zıt Kutuplar Birbirini Çeker. **b.)** Aynı Kutuplar Birbirini İter.
Şekil 2.5: Manyetik Kutupların Birbiri ile Etkileşimleri



Şekil 2.6: Mıknatıslanmamış Bir Nesne ile Mıknatısların Etkileşimleri [8]

Mukavva gibi manyetik olmayan malzemeler üzerine demir tozları konursa ve bu mukavva bir çubuk mıknatısın üzerine getirilip titreştirilirse mukavva üzerinde bulunan demir tozları aşağıdaki şekildeki gibi dağılacaklardır. Demir tozlarının bu durumda aldığı biçim çubuk mıknatısın manyetik alan çizgilerini gösterecektir.



(a) **(b)**

Şekil 2.7: (a) Demir Tozları ile Mıknatıs Etkileşimi
(b) Mıknatısta Manyetik Akı Çizgilerinin Gösterimi [9,10]

Manyetik alan çizgileri ile ilgili olarak;

1. Manyetik hatlar süreklidir.
2. Manyetik çizgilerin yönü mıknatısın dışında kuzeyden güneye doğru, içinde ise güneyden kuzeye doğrudur.
3. Manyetik hatlar en kısa ve en kolay yolu takip eder.
4. Aynı yöndeki hatlar birbirini iter, fakat toplamsal etki gösterirler, yani bir uçtan bir uca doğru alanı kuvvetlendirirler. Ters yöndeki hatlar birbirini çeker ve birbirini iptal eder. Bir uçtan bir uca doğru olan alanı zayıflatır.
5. Manyetik hatlar manyetik olmayan malzemelerin içinden geçer.
6. Kuvvet hatları birbirini kesmez.

Manyetik kutup kavramı elektrik yüklere benzer görünebilir, kuzey ve güney kutuplar ile pozitif ve negatif yüklerle benzerlik kurabiliriz. Ancak bu benzerlik bizi yanıltabilir. Tek başlarına pozitif ve negatif yükler var olduğu halde, tek başına var olan manyetik kutupların bulunduğuna dair hiç bir deneysel bulgu yoktur; kutuplar her zaman çiftler halindedir. Bir çubuk mıknatıs ikiye ayrılırsa, her bir yeni uç yeni bir kutup olur. Tek başına bir manyetik kutup veya *manyetik tek kutbun* varlığı kuramsal fizik için yepyeni ufuklar açacaktır. Manyetik tek kutupların bulunması için birçok deney yapılmış, ancak henüz olumlu bir sonuç alınamamıştır.

Hareket eden yüklerin manyetik etkileşimlerindeki ilişki göz önüne alındığında ise maddelerin manyetik özelliklerinin kaynağı atomik manyetik momentlerdir. Atomik manyetik moment ve bunun oluşturduğu manyetik alan etkisi başlıca üç sebepten kaynaklanabilir:

1) Elektronların sahip oldukları spinden (Özellikle eşleşmemiş elektronların),
2) Elektronların çekirdek etrafındaki yörünge açısal momentumundan,
3) Elektronların dış manyetik alanda kazandıkları yörünge momentinden. [11]

Burada ilk iki etken manyetizmaya paramanyetik, üçüncüsü ise diamanyetik olarak katkıda bulunur. Diamanyetik malzemeler, mıknatıs alanı tarafından itilir. Yani, diamanyetik malzemenin, mıknatısın uygulandığı alanla zıt yönlü bir alanı var demektir. Buna diamanyetik moment denir. Soygazlar, hidrojen, helyum gibi malzemeler diamanyetik malzemelerdir. Fakat her diamanyetik malzemede, diamanyetik momenti

yalnız dış alan oluşturmaz. [12] (Diamanyetizma ve paramanyetizma konuları ileriki bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır.)

Atomların manyetik momentleri elektronların yörünge ve spin hareketinden yola çıkılarak incelenir. Elektrik yüklü cismin kapalı bir yörüngedeki hareketi sonucu oluşan manyetik moment:

$$\mu = I.\ A \tag{2.1}$$

dır. I akımı, A kapalı yörüngenin yüzey alanını ifade eder. Bir elektronun yörünge hareketi sonucu sahip olduğu manyetik moment benzer şekilde elektronun çekirdek etrafındaki yörüngesinin yüzey alanı ile elektronun yörünge hareketi sonucu oluşan akımın çarpımıdır. Çekirdek etrafında dolanan bir elektronun oluşturduğu akım:

$$I = e/T \tag{2.2}$$

dir. e elektronun yükü, *T* elektronun yörünge etrafındaki hareketi için periyottur. Sonuçta oluşan akım:

$$I = e.v/(2.\pi.r) \tag{2.3}$$

olur. **v** elektronun yörünge etrafındaki sabit hızı, r yörünge yarıçapıdır. Akım ilmeğinin oluşturduğu manyetik moment:

$$\mu = I.\ A = e.v.r/2 \tag{2.4}$$

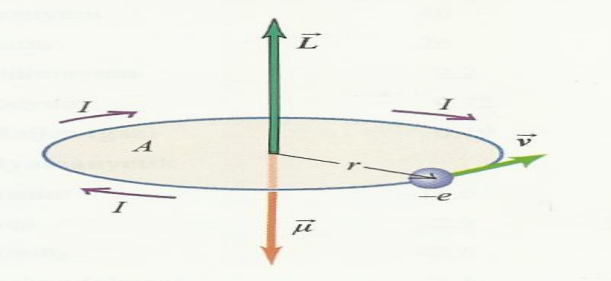
dir. Bu manyetik momenti başka bir şekilde ifade etmek için elektronun yörünge açısal momentumu ele alınabilir. Elektronun yörünge açısal momentumu:

$$L = m.v.\ r \tag{2.5}$$

dir. m elektron kütlesidir. Böylece elektronun yörüngesel manyetik momenti (Şekil 2.8'de şematik olarak verilmektedir)

$$\mu = e.L/(2.m) \qquad (2.6)$$

olur.



Şekil 2.8: Bir Elektronun Yörünge Hareketi Sonucu Sahip Olduğu Manyetik Moment (r Yarıçaplı Bir Çember Üzerinde Dolanan Bir Elektron) [8, 13]

r yarıçaplı dairesel yörüngede v süratiyle hareket eden bir elektron $\vec{L}$ açısal momentuma sahiptir ve yörünge manyetik dipol momenti $\vec{\mu}$, açısal momentumuna zıt yöndedir.

Bir atom içerisinde dönen bir elektron bir H dış alanına konduğunda açısal hızındaki değişme:

$$\Delta\omega = \pm eH/2m \qquad (2.7)$$

olur. Burada m elektronun kütlesidir. Bu durumda manyetik momentteki artma ya da azalma miktarı yaklaşık olarak

$$\Delta\mu = \pm e^2Hr^2/4m \qquad (2.8)$$

kadardır. [20, 27]

Elektronun "spin-dönme" hareketi de açısal momentum yaratır; bu da spin manyetik dipol momentine zıt yöndedir. [8]

Bir elektronun sahip olduğu net manyetik moment, elektronun yörünge etrafındaki hareketinden kaynaklanan manyetik moment ile spin hareketinden kaynaklanan manyetik momentin bileşkesidir (toplamıdır). Yörünge manyetik momentine benzer şekilde spin manyetik momenti:

$$\mu_s = e.L_S/m \qquad (2.9)$$

olan bir elektronun toplam manyetik momenti:

$$\mu_{Toplam} = \mu + \mu_{Spin} \qquad (2.10)$$

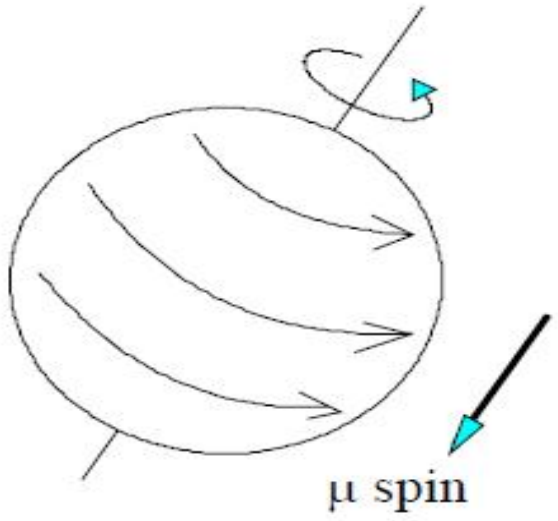
ile verilir. [11]

Denklem (2.6) çok kullanışlıdır çünkü atomun açısal momentumu kuantumludur; yani belirli bir yönde açısal momentumunun bileşeni daima *h/2πr*'nin tamsayı katıdır, burada *h* temel fizik sabitlerinden *Planck sabiti*dir. *h*'ın sayısal değeri;

$$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J.s} \qquad (2.11)$$

dir. Atomik ölçekte *e*'nin temel bir yük birimi olduğu gibi, *h*/2π niceliği de temel bir açısal kuantum birimidir.

Tüm maddelerin elektronları olduğu halde onların bir kısmının neden manyetik olmadıkları aşağıdaki gibi açıklanır. Maddelerin çoğundaki atomda bir elektronun manyetik momenti yine aynı atomun ters yönde dönen elektronunun manyetik momentiyle dengelenerek etkisiz hale getirilir. Sonuç olarak maddelerin çoğu, elektronlarının yörüngesel hareketlerinin oluşturduğu manyetik etki ya sıfır ya da çok küçüktür.



Şekil 2.9: Elektronda Spinin Gösterimi

Elektronun spin özelliği nedeniyle elektron manyetik momente katkıda bulunur. Kuantum mekaniğine göre spin özelliği dönen bir elektronun bir akım ilmeği oluşturması ve dolayısıyla manyetik moment oluşturmasından meydana gelir (Şekil 2.9). Bu momentin büyüklüğü; yörüngesel manyetik momentle aynı mertebededir. Spin açısal momentumunun büyüklüğü kuantum teorisine göre

$$S = (\frac{h}{2\pi})\frac{1}{2} = 5,2729.10^{-35} J.s \qquad \textbf{(2.12)}$$

dir. Bir elektron spininden oluşan iç manyetik momentin değeri

$$\mu = \frac{e}{2m}\left(\frac{h}{2\pi}\right) = \frac{eh}{4\pi m} \qquad \textbf{(2.13)}$$

[14] bulunur ve bu büyüklüğe "***Bohr Magneton"*** denir ve $\boldsymbol{\mu_B}$ ile gösterilir. Sayısal değeri;

$$\mu_B = 9,274 \,.\, 10^{-24} \text{ A. m}^2 = 9,274 \,.\, 10^{-24} \text{ J/T} \qquad \textbf{(2.14)}$$

J/T birimi manyetik alan içindeki manyetik momentin potansiyel enerjisi

$$U = -\vec{\mu}.\vec{B} \qquad \textbf{(2.15)}$$

hesaplanırken kullanışlıdır.

Elektronlar spin denilen kendilerine özgü (doğrusal momentumundan bağımsız) bir açısal momentuma sahiptir; yani yörüngede yapılan hareketten bağımsızdır, elektronun bir eksen etrafında dönmesi gibi gözümüzde canlandırabiliriz. Bu açısal momentumun bir manyetik momentum oluşturur ve oluşturduğu manyetik momentumun büyüklüğü bir Bohr magneton değerine çok yakındır. (Elektromanyetik alanın kuantizasyonu ile ilgili sorunlar yüzünden spin manyetik momenti 1,001 μ_B civarındadır.) [8]

Manyetik malzemeler, *süseptibilite* (χ:*Manyetik Alınganlık*) ve *permebilite* (μ:Manyetik Geçirgenlik) özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Malzemenin manyetik durumu manyetizasyon vektörü (M) denen bir nicelik ile belirtilir. Maddenin manyetizasyonunun kaynağında manyetik moment kavramı olup *hacim manyetizasyon* (M), maddenin birim hacmindeki net manyetik moment olarak tanımlanır. Birimi emu/cm^3'tür.:

$$\mathbf{M=m/V} \qquad \mathbf{(2.16)}$$

Kütle manyetizasyon (б, *M*) ise maddenin birim kütlesindeki net manyetik moment olarak tanımlanır ve CGS birimi emu/g 'dır. Manyetizasyon M, *manyetik alan şiddeti* H ile orantılıdır.

$$\mathbf{M=\chi.H} \qquad \mathbf{(2.17)}$$

χ manyetik alınganlık veya süseptibilite; boyutsuz bir çarpandır. Bağıl permebilite μ_r ise

$$\mathbf{\mu_r=\mu_o/\mu} \qquad \mathbf{(2.18)}$$

ile ifade edilir. Burada μ permebilite, μ_o boşluğun manyetik geçirgenlik sabitidir. μ_r bağıl permebilitenin süseptibilite ile olan ilişkisi gösterilmektedir. [15]

$$\mathbf{\mu_r = (1+\chi)} \qquad \mathbf{(2.19)}$$

M hacim manyetizasyon, m net manyetik moment, V maddenin hacmidir. Manyetik alan, hareketli elektrik yükleri tarafından oluşturulur ve manyetizmanın temel kavramlarından biridir. Manyetik alan bir mıknatıstan veya bir iletkenden geçen elektrik akımından kaynaklanabilir. Manyetik indüksiyon (manyetik akı yoğunluğu), manyetik alan tarafından oluşturulur ve ortamın manyetik alana karşı davranışını ifade eder. Manyetik alan (H) ve manyetik indüksiyon (B) birbirine manyetik geçirgenlik (permabilite) (μ) ile bağlıdır. Manyetik indüksiyon ile manyetik alan ilişkisi (2.20) bağıntısıyla verilebilir.

$$\mathbf{B = \mu .H} \qquad \textbf{(2.20)}$$

Maddenin manyetizasyonu manyetik indüksiyonu etkiler. *Manyetik indüksiyon* (manyetik akı yoğunluğu), manyetik alan tarafından oluşturulur ve ortamın manyetik alana karşı davranışını ifade eder. Manyetik alan (H) ve manyetik indüksiyon (B) birbirine manyetik geçirgenlik (permabilite) (μ) ile bağlıdır. Manyetik indüksiyon ile manyetik alan ilişkisi (2.21) bağıntısıyla verilebilir.

$$\mathbf{B = \mu_0 (H + M)} \qquad \textbf{(2.21)}$$

Burada $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$ Wb/A.m olup serbest uzayın manyetik geçirgenliğidir. H dış manyetik alan, M maddenin manyetizasyonudur. Manyetizasyon kavramından başka manyetik alınganlık (χ) ve manyetik geçirgenlik (μ) de maddelerin manyetik özelliklerini açıklamakta kullanılan kavramlardır. Manyetik alınganlık (χ), maddenin uygulanan manyetik alana gösterdiği tepkinin bir ölçüsüdür. Boyutsuz bir büyüklüktür. Manyetik alınganlık:

$$\mathbf{\chi = M/H} \qquad \textbf{(2.22)}$$

ile ifade edilir. Manyetik geçirgenlik (μ) de manyetik alınganlık gibi manyetik maddelerin karakteristik bir özelliğidir. Manyetik geçirgenlik:

$$\mathbf{\mu = B/H} \qquad \textbf{(2.23)}$$

ifadesiyle verilir. [11] Manyetik geçirgenlik kavramı iki manyetik kutup arasındaki itme veya çekme kuvvetinin belirlenmesinde de önemli rol oynar. İki manyetik kutup arasındaki itme çekme kuvveti *Coulomb Kanunu (1785)* ile belirlenir.

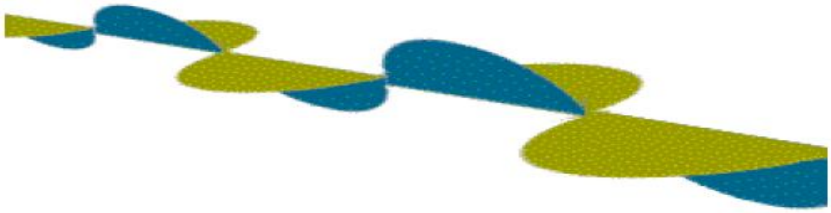
$$F_m = \frac{1}{\mu} . \frac{P_1 . P_2}{r^2} \qquad \textbf{(2.24)}$$

Burada μ manyetik geçirgenliği P_1 ve P_2 kutup şiddetlerini (Pozitif veya Negatif İşaretli Olabilir.) r ise uzaklığı ifade eder. [1]

2.3 Maxwell Denklemleri

"1864 yılında *James Clerk Maxwell* ışığın elektromanyetik dalgalardan oluştuğunu fark etti. Işığın değişen bir elektrik alanı ($\vec{E}$) ve yine değişen ve elektrik alana dik olan bir manyetik alan ($\vec{B}$)'dan oluştuğu önermesinde bulundu. $\vec{E}$ ve $\vec{B}$'nin oranı her noktada aynı idi. Ancak elektromanyetik dalgalar bildiğimiz su dalgasına, ses dalgasına veya ip üzerindeki dalgaya hiç benzemiyorlardı. Çünkü bunların ilerlemeleri için bir ortama ihtiyaçları yoktu. Bu da bize uzayda astronotların haberleşmek için niçin radyo dalgalarını kullandıklarını açıklar.

Maxwell elektromanyetik dalgaların uzay boşluğunda 2,998 . 10^8 m/s'lik ışık hızına eşit bir hızla hareket ettiğini göstermiştir. Her dalga gibi elektromanyetik dalgalar da devamlı dalgalardı."



Şekil 2.10: Elektromanyetik Dalga

"Burada açık renk manyetik alanı ve yönünü, koyu renk elektrik alanı ve yönünü göstermektedir. Elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine diktirler ve birlikte hareket ederler. Elektromanyetik dalga eksen çizgisi üzerinde tek bir yönde ve ışık hızıyla hareket eder.

Elektromanyetik alanlarla ilgilenen elektromanyetizmanın temel denklemleri *Maxwell denklemleri*dir. 19. yy fizikçilerinden *Clerk Maxwell, Gauss, Amper, Faraday kanunları*nı kullanarak, elektromanyetizmanın bu temel denklemlerini yazmıştır. Elektromanyetizmada *Gauss kanunu* elektrik veya manyetik alanların toplam akısıyla ilgilidir. *Amper kanunu* manyetik dolanımla, *Faraday kanunu* ise elektrik dolanımla ilgilidir. *Maxwell* bu kanunları tüm elektromanyetik alanları içerecek şekilde genişletmiştir. *Maxwell denklemleri* aşağıda verilmiştir:" [17]

Yük ve akım bulunmayan boş uzayda yani $\rho = 0$ ve $\vec{J} = 0$ olduğunda Maxwell denklemleri tablonun en sağındaki gibi ifade edilirler.

Tablo 2.1: Maxwell Denklemleri

	Diferansiyel Formu	*İntegral Formu*	*Boş Uzayda* ($\rho = 0$ *ve* $\vec{J} = 0$)
Elektrik Alanda Gauss Yasası	$\nabla.\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = 4.\pi.k.\rho$	$\oint \vec{E}.d\vec{A} = \frac{q}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla}.\vec{E} = 0$
Manyetik Alanda Gauss Yasası	$\nabla.\vec{B} = 0$	$\oint \vec{B}.d\vec{A} = 0$	$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0$
Faraday'ın İndüksiyon Yasası	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E}.d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Genelleştirilmiş Amper Yasası	$\nabla \times \vec{B} = \frac{\vec{J}}{\varepsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0 i + \frac{1}{c^2}\frac{\partial}{\partial t}\int \vec{E}.d\vec{A}$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Buradaki ∇ ile skaler çarpıma divejans, vektörel çarpıma ise rotasyon denmektedir.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \qquad \textbf{(2.25)}$$

şeklinde dik koordinatlarda diferansiyel ifade etmektedir. [19, 20]

2.3.1 Maxwell Denklemlerinin Fiziksel Anlamları

1. Elektrik Gauss Yasası

a.) Elektrik yükleri arasındaki etkileşme kuvveti, aralarındaki uzaklığın karesiyle ters, yüklerin çarpımıyla doğru orantılıdır.

b.) Yükler, bir iletkenin dış yüzeyinde yer alırlar. [21]

c.) Herhangi kapalı bir yüzeyden geçen toplam elektrik akısının bu yüzey içindeki net yükün ε_0'a bölümüne eşit olduğunu ifade eder. [18]

2. Manyetik Alanda Gauss Yasası

a.) Manyetik yükler yoktur.

b.) Tek kutuplu bir mıknatıs elde edilemez. [21]

c.) Kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akının sıfırdır. [18]

3. Faraday'ın İndüksiyon Yasası

a.) Kapalı bir iletken halkadan geçen manyetik akım değişirse halkada indüksiyon akımı oluşur.

4. Genelleştirilmiş Amper Yasası

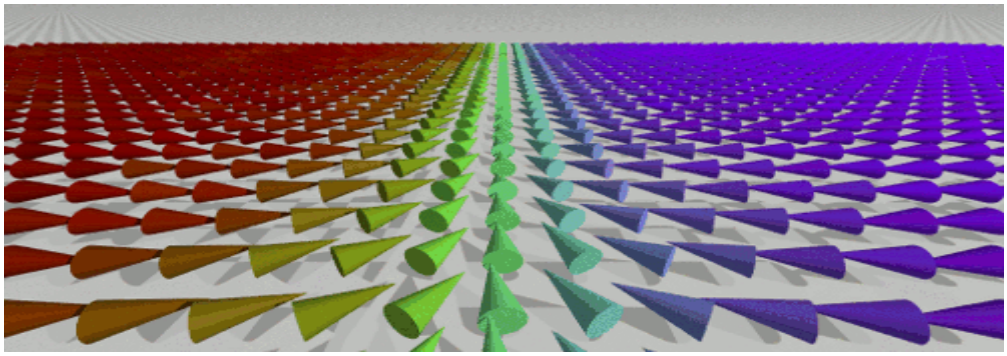
a.) Akım taşıyan tel etrafında manyetik alan oluşur.

b.) Işık hızı ortamın elektromanyetik özellikleriyle değişir. [21]

2.4 Domain Yapısı

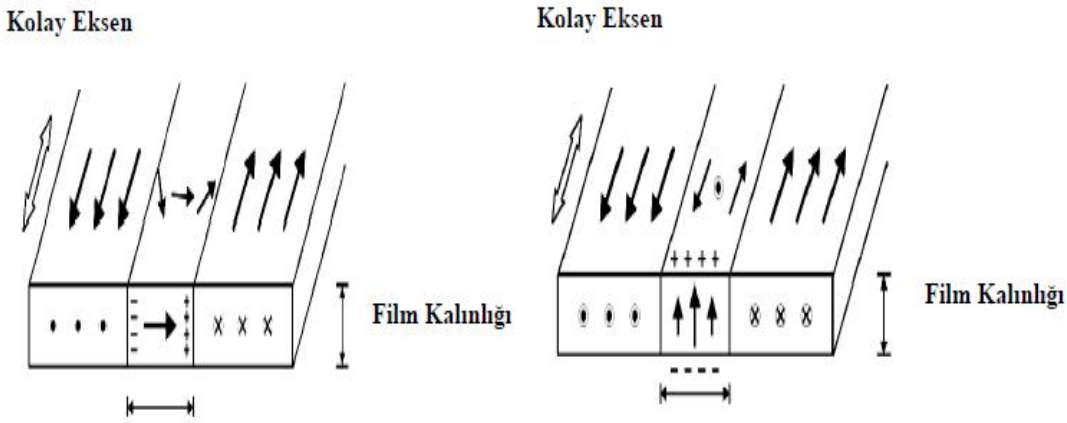
Eski ve kısmen günümüzde de kullanılabilen bir teori olan mıknatısın moleküler teorisine göre; mıknatıs olmayan ama mıknatıs olma hususiyetine sahip olan bir cisimde (-) ve (+) kutuplar bulunur. Cismin içindeki kutuplar cismin mıknatıs olmadan önce molekül halinde ve düzensiz gruplar halindedir. Manyetiklik hususiyeti kazandığı zaman, cismin içindeki moleküller düzene girer. (+) kutuplar (kuzey) ve (-) kutuplar (güney) zıt istikamete toplanırlar. Böylece tek bir manyetik alan ve tam bir manyetik kutupluluk elde edilir. Modern elektron teorisi de kısmen aynı noktaları kabul eder ama yük fikrini bırakır. Domain veya atom gruplarından meydana gelen tanecik fikrine ağırlık verir. Aynı yöne yönelmiş manyetik momentlerin oluşturduğu gruplara "***manyetik bölge"*** veya ***"manyetik domain"*** adı verilir.

Manyetik bölgeleri çok sayıda (10^{12}-10^{18}) atomik manyetik momentlerin bir araya gelerek oluşturdukları bölgelerdir. Domainlerin genişliği yaklaşık 0.005 cm; hacimleri yaklaşık olarak 10^{-12}-$10^{-8}$$m^3$ ya da daha küçüktür. Farklı yöne yönelmiş manyetik domainleri ayıran yüzeye ***"domain duvarı"*** adı verilir. Bu bölgeler içindeki momentlerin hepsi birbirine paralel olarak aynı yönde (kolay eksen yönünde) yönelmiş durumdadırlar. Her domainde bütün mıknatıs çift kutupları belirli yönde dizilmiştir, fakat domainlerin kendileri rastgele dizildikleri için net bir mıknatıslanma yoktur. Bu özelliği gösteren bir malzeme bir dış manyetik alan içerisine konulduğunda manyetik domainler dış manyetik alan yönünde yönelmeye ve domain duvarları kaybolmaya başlar. Bu durumda dış alan kaldırıldığında domainler yeniden eski durumuna dönemez ve dış manyetik alan olmadığı halde net bir manyetizasyon yani malzemede kalıcı bir mıknatıslanma gözlenir. Şekil 2.11'de bir manyetik malzeme içerisindeki manyetik bölgeler ve bu bölgelerin manyetik yönelimleri görülmektedir. [22]



Şekil 2.11: Asal Mıknatıs Bir Metalde Domainlerin Gösterilişi [23]

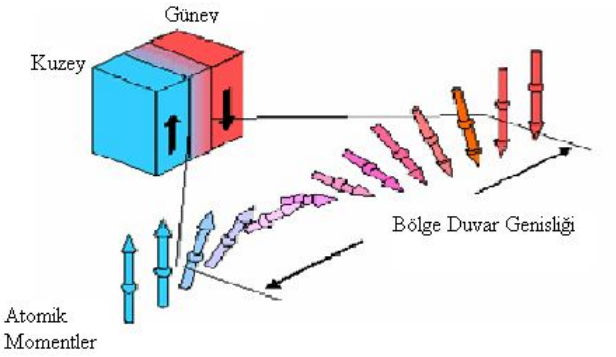
Domain duvarları için iki model geliştirilmiştir. Bu modeller Bloch ve Neel duvarı modelleridir. Bu duvar modelleri şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.12 : (a) Bloch Duvarı , **(b)** Neel Duvarı

Şekil 2.12 (a) 'da manyetik bölgeler arasındaki bölge duvarının (bloch duvarı) yapısını göstermektedir. İki farklı yönelimli manyetik bölge alırsak, bu manyetik bölgeler arasındaki bölgede iki farklı yönelimden ve değiş tokuş etkileşmelerinden dolayı, bu iki yönelimden değişik olarak başka yönelimli manyetik momentler oluşur. Bu yönelimler manyetik bölgelerin kolay eksen yönelimlerinden farklıdır ve bu yüzden de daha yüksek enerjiye sahiptirler. Bloch duvarlarının kalınlığı 100 nm civarındadır.

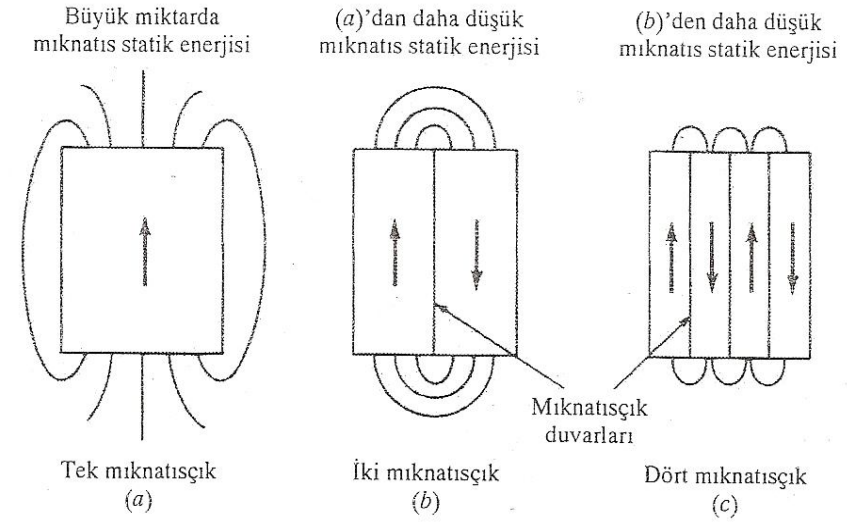
Neel domain duvarların için daha keskin geçişler ön görürken *Bloch* nispeten daha geniş bir bölgede daha yumuşak bir geçiş öngörmüştür.



Şekil 2.13: Manyetik Bölgeler Arasındaki Bölge Duvarının Yapısı [22]

2.4.1 Domain Yapısını Belirleyen Enerji Türleri

Bir asal mıknatıs malzemede domain yapısı birçok enerji türüyle belirlenir ve en kararlı yapı, malzemenin toplam potansiyel enerjisinin en düşük olduğu yapıdır. Bir mıknatıs malzemenin toplam potansiyel enerjisi şu enerjilerin katkılarının toplamıdır; (1) değişim enerjisi, (2) mıknatıs statik enerjisi, (3) mıknatıs kristal yönlenim enerjisi, (4) domain sınırı enerjisi, (5) mıknatıs gerinme enerjisi. Aşağıda bu enerjilere kısaca değinilmiştir.



Şekil 2.14: Bir Mıknatıslı Malzemede, Domain Boyutlarının Küçülmesi Sonucu Dış Mıknatıs Alanda Meydana Gelen Küçülme [22]

1. Değişim Enerjisi

Katı bir asal mıknatıs domaininin içindeki potansiyel enerji, atom çift kutuplarının tümü bir yönde dizildiğinde en küçüktür. Bir yönde dizilme artı bir değişim enerjisi gerektirir. Fakat domain içindeki potansiyel enerji en küçüğe inmiş olmakla birlikte, bir dış mıknatıs alanın oluşması sonucu domainin dış potansiyel enerjisi artmaktadır. (Şekil 2.14 (a)) [22]

2. Mıknatıs Statik Enerjisi

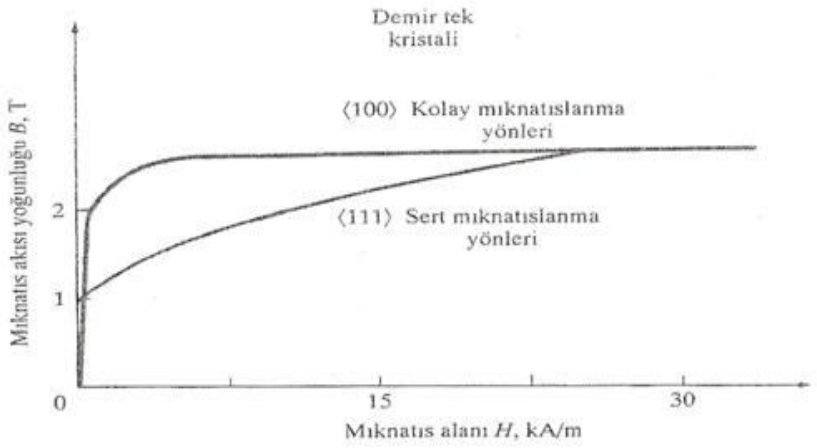
Mıknatıs statik enerjisi asal mıknatıs malzemelerin dışındaki alan tarafından meydana getirilen bir potansiyel mıknatıs enerjisidir. Şekil 2.14' te gösterildiği gibi, asal mıknatıs malzemelerde domainlerin oluşumuyla bu statik enerji en aza indirilebilir. Şekil 2.14 (a)'da görüldüğü gibi, birim hacim asal mıknatıs malzeme, tek domainli yapıda en yüksek statik enerjiye sahiptir. Şekil 2.14 (a)' daki tek domaini iki domaine bölmekle (Şekil 2.14 (b)), mıknatıs alanının şiddeti ve genişliği azaltılmıştır.

Tek domaini dörde bölmekle dıştaki mıknatıs alanı daha da azalır (Şekil 2.14 (c)). Bir asal mıknatıs malzemenin dışındaki mıknatıs alanının şiddeti doğrudan mıknatıs statik enerjisiyle ilişkili olduğundan, çok sayıdaki domainin oluşması malzemenin birim hacmindeki mıknatıs statik enerjisini azaltmaktadır. [22]

3. Mıknatıs Kristal Yönlenim Enerjisi

Domain sınırı enerjisini incelemeden önce, kristal yönleniminin asal mıknatıs malzemelerin mıknatıslanması üzerine etkisine bir bakalım. Bir asal mıknatıs malzeme tek kristalinde, mıknatıslanma manyetik alan uygulanan kristallerin, uygulanan alana göre yönlenimlerine bağlı olarak değişir. Şekil 2.15, HMK demir tek kristalinde <l00> ve <111> yönlerindeki mıknatıslanmada, mıknatıs akısı yoğunluğu (B) manyetik alan uygulanan (H) eğrilerini göstermektedir. Şekil 2.15'te gösterildiği gibi doyma mıknatıslanması en kolay (veya uygulanan en düşük alanla) <100> yönünde ve uygulanan en yüksek alanla <111> yönünde meydana gelmektedir. Bu nedenle <111> yönünün, YMK demir için mıknatıslanması zor (sert) yön olduğu söylenir. YMK nikel için ise <111> kolay mıknatıslanma yönü, <100> ise zor mıknatıslanma yönüdür. YMK nikelinde mıknatıslanmanın zor olduğu yön, YMK demirinin tam tersi olmaktadır.

Demir ve nikel gibi çok kristalli malzemelerde farklı yönlenimlerdeki taneler farklı alan kuvvetinde doyma mıknatıslığına ulaşacaktır. Yönlenimleri kolay mıknatıslanma yönünde olan taneler düşük kuvvetteki bir alan etkisinde mıknatıslanacakken, yönlenimleri zor mıknatıslanma yönünde olanlar, momentlerini uygulanan alan yönüne çevirmek zorunda olduklarından, daha yüksek alan kuvvetlerinde doyuma ulaşacaklardır. Yönlülük etkisi nedeniyle domainlerin tümünün dönmesi için yapılan işe mıknatıs kristal yönlenim enerjisi adı verilir.

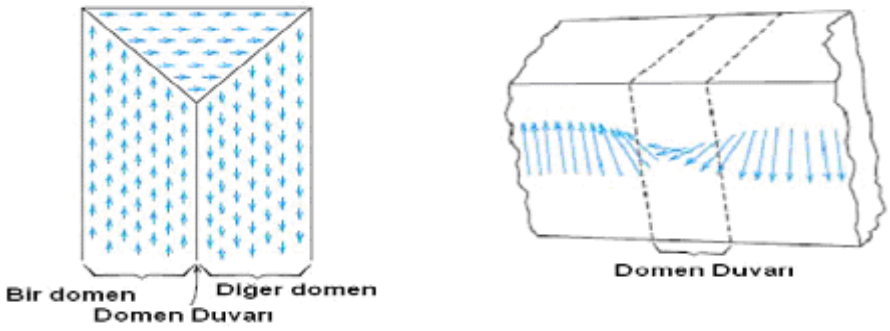


Şekil 2.15: HMK Yapıdaki Demir Mıknatısın Kristal Yönlenimi
(Demir <100> Yönlerinde <111> Yönlerinden Daha Kolay Mıknatıslanmaktadır.) [22]

4. Domain Sınırı Enerjisi

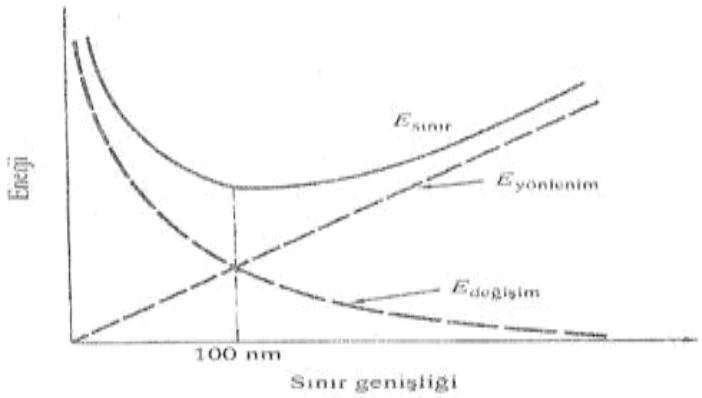
Bir domain sınırı, kristal yönlenimlerinin bir taneden diğerine değiştiği tane sınırlarına benzeyen, toplam mıknatıs momentleri farklı yönlenimde olan iki domain arasındaki sınırdır. Tanelerin aniden yön değiştirdiği yaklaşık 3 atom genişliğindeki tane sınırlarının aksine, bir domainin yönlenimi yaklaşık 300 atomluk bir tane sınırının genişliğinde meydana gelir. Bir domain sınırı mıknatıs momenti yönünün, tane sınırı genişliğince, azar azar 180^o dönme çizgi resimle Şekil 2.16 (a)'da gösterilmiştir. Bloch duvarları olarak isimlendirilen bu sınırlar domainleri birbirinden ayırır.

Domain sınırının genişliğinin fazla olmasının nedeni, sınırı oluşturan iki kuvvetin birbirini dengelemekte olmasıdır. Değişim kuvveti ve mıknatısın kristal yönlenim enerjisi, çift kutupların yönlenimleri arasındaki fark küçük olduğunda (Şekil 2.16 (a)), çift kutuplar arasındaki değişim kuvvetleri en aza iner ve değişim enerjisi küçülür (Şekil 2.16 (b))



Şekil 2.16: (a) Domain Sınırında Mıknatıs Çift Kutuplarının Dizilimi [27, 46]

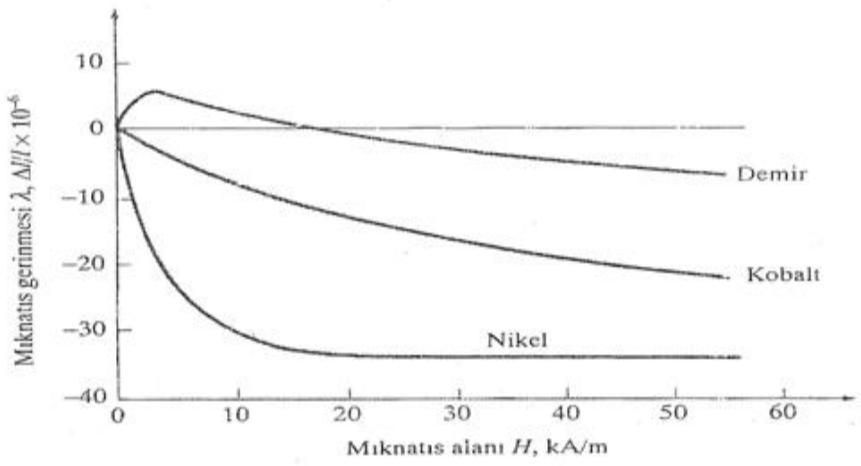
Bu durumda, değişim kuvvetleri domain sınırını genişletmeye çalışır. Fakat sınır genişledikçe daha fazla sayıda çift kutup kolay mıknatıslanma yönünden farklı yönlere dönmeye zorlanacak, dolayısıyla mıknatısın kristal yönlenim enerjisiyle mıknatısın kristal yönlenim enerjisi artacaktır (Şekil 2.16 (b)). Bu nedenle, sınırın genişliği, mıknatıs değişim enerjisiyle mıknatısın kristal yönlenim enerjilerinin toplamının en küçük olduğu değerde dengeye ulaşacaktır (Şekil 2.16 (b)).



Şekil 2.16: (b) Mıknatıs Değişim Enerjisi, Mıknatıs Kristali Yönlülük Enerjisi ve Sınır Genişliği Arasındaki İlişki (Denge Sınır Genişliği 100 nm Civarındadır.) [22]

5. Mıknatıs Gerinme Enerjisi

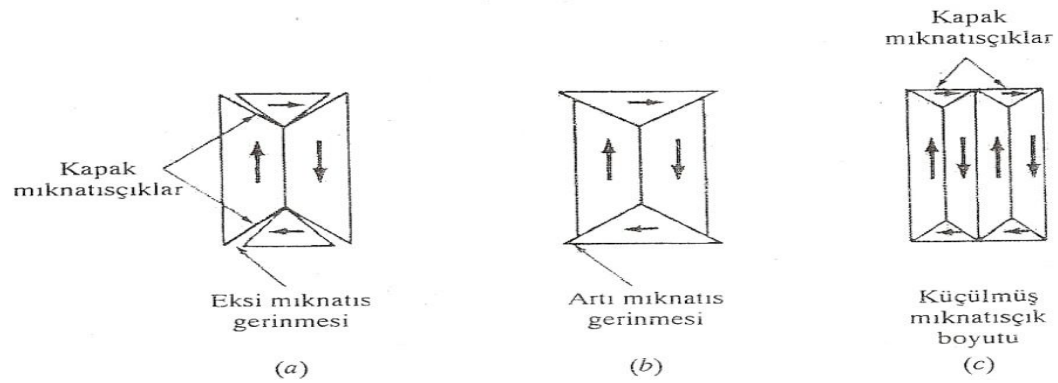
Asal mıknatıs bir malzeme mıknatıslandığında boyutları hafifçe değişir ve numune mıknatıslanma yönünde genişler veya büzülür (Şekil 2.17). Mıknatıslanmayla oluşturulan bu tersinir, esnek gerinme ($\Delta l/l$) mıknatıs gerinmesi diye adlandırılır ve 10^{-6}, lar düzeyindedir. Mıknatıs gerinmesinin yarattığı mekanik gerilmeler mıknatıs gerinme enerjisi diye adlandırılır. Demirin mıknatıs gerinmesi, düşük alanlarda artı, yüksek alanlarda eksidir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17: Asal Mıknatıs Fe, Co ve Ni Elementlerinin Mıknatıs Gerinmesi Davranışı (Mıknatıs Gerinmesi Uzamanın veya Büzülmenin Bir Yüzdesi Olup Bu Resimde Mikrometre/Metre Birimiyle Verilmiştir.)

Mıknatıs gerinmesi, asal mıknatıs malzemelerde, mıknatıslanma sırasında, elektron yönü çift kutup momentlerinin aynı yönde dizilmelerinin atomlar arası bağ boylarını değiştirmesine bağlanmaktadır. Çift kutup momentleri alanlarının birbirlerini çekip itmeleri, mıknatıslanma sırasında malzemenin büzülme ve genişlemesine yol açar.

Mıknatıs gerinmesinin, şekil 2.18 (a) ve 2.18 (b)' deki gibi kübik kristal malzemelerdeki domainlerin denge yapısını nasıl etkilediğine bir göz atalım. Kübik simetrileri nedeniyle kristallerin uçlarında kapak domainler adı verilen üçgen biçimli domainlerin meydana gelmesi, dıştaki mıknatıs alanının mıknatıs statik enerjisini yok eder ve dolayısıyla malzemenin enerjisini azaltır. Şekil 2.18 (a) ve 2.18 (b)' deki çok büyük domainlerin, sınır enerjileri en az olduğundan en düşük enerjiye ve en kararlı biçime sahip olmaları beklenirse de, mıknatıslanma sırasında oluşan mıknatıs gerinmesi gerilmeleri büyük domainlerde daha büyük olduğundan böyle olmamaktadır. Şekil 2.18 (c)' deki daha küçük domainler mıknatıs gerinmesi enerjisini düşürür, fakat domain sınır alanını ve enerjisini yükseltir. Buna göre, mıknatıs gerinme enerjisi ve domain sınır enerjisi toplamının en düşük olduğu durum domainin denge yapısını belirleyecektir.



Şekil 2.18: Kübik Bir Mıknatıslı Malzemede Mıknatıs Gerinmesi. a) Eksi Mıknatıs Gerinmelerinin Mıknatıs Malzemenin Domain Sınırlarını Ayırışının Abartılı Gösterilişi (b) Artı Mıknatıs Gerinmelerinin Mıknatıs Malzemenin Domain Sınırlarını Ayırışının Abartılı Gösterilişi. (c) Mıknatıs Gerinmesi Gerilmelerinin Daha Küçük Domain Boyutlu Bir Yapının Oluşumuyla Azalması

Özetle, asal mıknatıslarda oluşan domainlerin yapısı; değişim, mıknatısın kristal yönlenim enerjisi, domain sınırları ve mıknatıs gerinme enerjilerinin toplam mıknatıs enerjisine katkılarıyla belirlenir. Denge yapısı veya en kararlı yapı, bütün bu katkılardan sonraki toplam mıknatıs enerjisinin en düşük olduğu yapıdır. [22]

2.4.2 Manyetik Domainleri Gözleme Teknikleri

Manyetik domainlerin ilk önemli deneysel gözlemleri 1930 yılında Barkhausen ve 1931 yılında Bitter tarafından yapılmış olup bu gözlemler Weiss'in teorisinin doğruluğunun ispatında önemli rol oynamıştır. Bu tarihlerde sonra gerek doğrudan gerekse dolaylı olarak ferromanyetik domainlerin sayısız gözlemleri yapılmıştır.

İlk doğrulama, Barkhausen olayı ile domainlerin dolaylı yoldan belirlenmesidir. Barkhausen olayında domainlerin yeniden yönlenmesi, bir ferromanyetik içindeki manyetik indüksiyonda kesikli değişikliklere sebep olur. Bu kesikli değişiklikler, numune etrafına sarılmış bir bobinden alınan sinyallerin yükseltilmesiyle dedekte edilebilir. Yeterince doğru ölçülürse Barkhausen olayının diğer bulk özelliklerde de kesikliklere sebep olduğu görülebilir.

İkinci doğrulama, Bitter tarafından yapılan, ferromanyetik maddelerin yüzeyleri üzerindeki domain desenlerinin doğrudan gözlenmesidir. Yöntemde maddenin yüzeyi üzerine yayılmış taşıyıcı bir sıvı içinde asılı çok ince Fe_2O_3 parçacıkları kullanılmıştır. Gözlem için kullanılan ilk maddeler, geniş grainlere sahip olan demir ve demir-silikon

alaşımıdır. Desenler bir mikroskopla bakıldığı zaman parçacık birikintileri olarak gözlenmiştir. Parçacıklar manyetik alan gradiyentinin en büyük olduğu konumlarda birikmektedir, bunlar domain duvarlarının yüzeyi kestiği noktalardır. Daha sonraki yıllarda taşıyıcı sıvıdaki ferromanyetik parçacıkların kollodial çözeltileri kullanılmıştır. Domain gözlemlerinde uygun yüzey şartlarını elde etmek için, maddenin yüzey gerilmelerini kaldırmak amacıyla madde elektrolitik parlatma işleminden geçirilmelidir. Aksi takdirde gerilmeler domainlerin büyüklüğünü azaltacaktır.

Domainleri gözlemek için kullanılan çeşitli tekniklerden en bilinenleri iki grupta toplanabilir:

1. Domain duvarlarını açığa çıkaran teknikler (Bitter yöntemi, elektron mikroskobu).

Yalnız domainler, mıknatıslanma yönleri ne olursa olsun hemen hemen aynı görünürler fakat domain duvarları belirgin ayırt edilebilirdir.

2. Domainleri açığa çıkaran teknikler (Optiksel metotları içeren Kerr ve Faraday etkileri).

Farklı yönlerde mıknatıslanmış domainler farklı renklerde bölgeler olarak görünürler; domain duvarları ise bu farklı renkte bölgeleri ayıran çizgi şeklinde sınır olarak görünürler.

Bitter Yöntemi

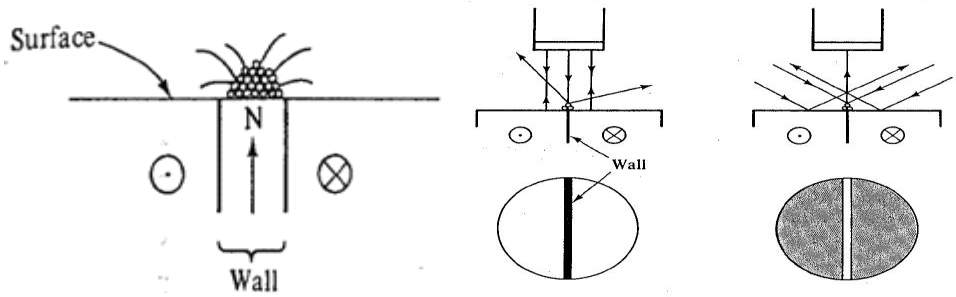
Kullanım kolaylığı nedeniyle en çok uygulanan yöntemdir denilebilir. Bitter tarafından 1931'de geliştirilen yöntem Fe_2O_3'ün kolloid parçacıklarından oluşan sıvının gözlem yapılacak maddenin cilalanmış yüzeyine uygulanışını içerir. Bitter kullandığı solüsyon aracılığıyla, şekil 2.19 ve 2.20'de gösterilen, manyetik domainlerin ilk fotoğraflarını çekmiştir. Gözlem için kullanılan ilk maddeler, geniş grainlere sahip olan demir ve şekil 2.19 ve 2.20'de fotoğrafları görülen demir-silikon alaşımıdır. Şekil 2.21 (a)' da yüzeyi ikiye bölen duvarın içindeki spinlerin merkezdeki bir tane ile temsil edildiği, yüzeye dik gösterilen 180°'lik duvarı ele alalım. Kuzey kutup şekildeki gibidir ve bu, yüzeyin üzerinden dağılan bir $\vec{H}$ alanının kaynağıdır. Kolloid parçacıkları bu düzgün olmayan alanın oluşturduğu bölgeye çekilirler ve bu sırada domain duvarının

kenarı boyunca çöküntü oluştururlar. Bundan sonra yüzey, yansıtıcı bir mikroskop ile "parlak alan" aydınlatması altında incelenirse (Şekil 2.21 (b)), domain duvarı aydınlık zemin üzerine siyah çizgi şeklinde görünecektir. Duvarın en üstünde bulunan kolloid parçacıkları, ışığın yan taraflara saçılmasına ve duvarın karanlık görünmesine sebep olurken duvarın her iki tarafında yer alan domainler, üzerlerine dikey olarak gelen ışığı mikroskoba geri yansıtırlar ve bu nedenle aydınlık görünürler. "Karanlık alan" aydınlatması altında gelen ışık malzemeye belli bir açı ile çarpar; domain duvarı karanlık bir zemin üzerinde aydınlık bir çizgi olarak görünür (Şekil 2.21 (c)); çünkü ışık sadece duvar boyunca yer alan parçacıklar tarafından mikroskoba doğru yansıtılır. Her iki durumda mikroskop altındaki domain duvarı görünümleri "Bitter modeli" veya "toz modeli" olarak adlandırılır.





Şekil 2.19: Si-Fe Numunede, Yüksek Alanlarda Bitter Yöntemi ile Gözlenen Domainler
Şekil 2.20: Si-Fe Numunede, Daha Düşük Alanlarda Bitter Yöntemi ile Gözlenen Domainler Çizgilerin Genişliği Düzensizliklerden Kaynaklanıyor Olabilir



(a) **(b)** **(c)**

Şekil 2.21: Bitter Yöntemi ile Domainlerin Gözlenmesi **(a)** Yüzeyi İkiye Bölen Duvarın İçindeki Spinlerin Merkezdeki Bir Spin ile Temsil Edildiği, Yüzeye Dik Olan 180°'lik Domain Duvarı **(b)** Yüzeyin, Yansıtıcı Bir Mikroskop ile "Parlak Alan" Aydınlatması Altında İncelenmesi **(c)** Yüzeyin, Yansıtıcı Bir Mikroskop ile "Karanlık Alan" Aydınlatması Altında İncelenmesi

Geçirgen Elektron Mikroskobu

Bu alet, elektronları geçirebilmesi açısından yeterince ince (1000 ˚A veya daha az kalınlıkta) malzemelerde domain duvarlarının gözlenmesini sağlar.

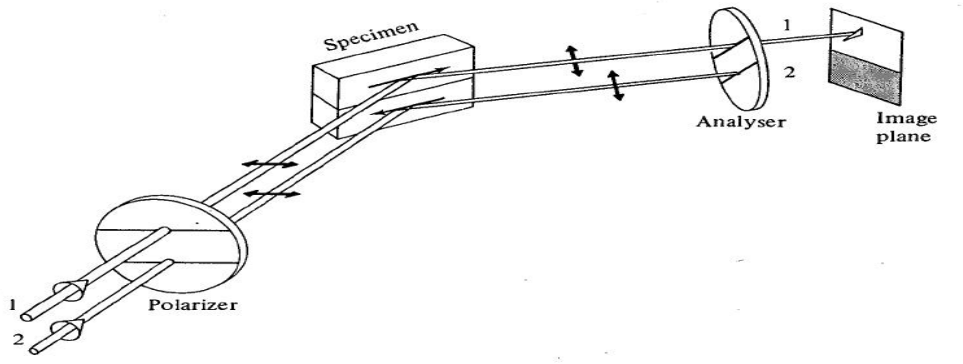
Bitter yöntemi ve elektron mikroskobu domain duvarlarının gözlenmesi için kullanılırken domainlerin gözlenmesi için de Kerr ve Faraday yöntemleri kullanılır. Bu iki manyeto-optik etki, domainleri birbirinden ayırt edebilmek için renkte veya aydınlık-karanlık derecelerinde bir fark oluştururlar.

Kerr Etkisi

Bu etki, bir ışık ışınının mıknatıslanmış malzemeden yansıması süresince polarizasyon düzleminin dönmesine dayanır. Dönme miktarı küçüktür, 1 dereceden çok az ve ışık ışınının düzlemiyle bağlantılı olan mıknatıslanmanın yönüne ve büyüklüğüne bağlıdır.

Kaynaktan çıkan ışık sadece düzlemsel polarize olmuş ışığı geçiren polarizör içine girer (Şekil 2.22). (Birbirine göre anti paralel mıknatıslanmış sadece iki domain içerdiği varsayılan malzeme de şekil 2.23'te yer almaktadır). 1 ışınının yansıması süresince polarizasyon düzleminin döndüğü yönden farklı bir yöne 2 ışınınınki döner çünkü ikisi, malzeme içinde zıt yönlerde domainler ile karşılaşmışlardır. Işık daha sonra bir analizör içinden geçerek bir teleskopa veya düşük-güç mikroskoba yönlenir. Analizör, yansımış olan 2 ışınını geçirmeyecek şekilde döndürülür, böylelikle bu ışın söndürülmüş olur ve aşağıdaki domain karanlık görünür.

Bu düzenek yardımıyla yüzey üzerinden çekilen fotoğraflarda şekil 2.23'e benzer şekilde manyetik domainler gözlenir.



Şekil 2.22: Kerr Yöntemi ile Domainlerin Gözlenmesi

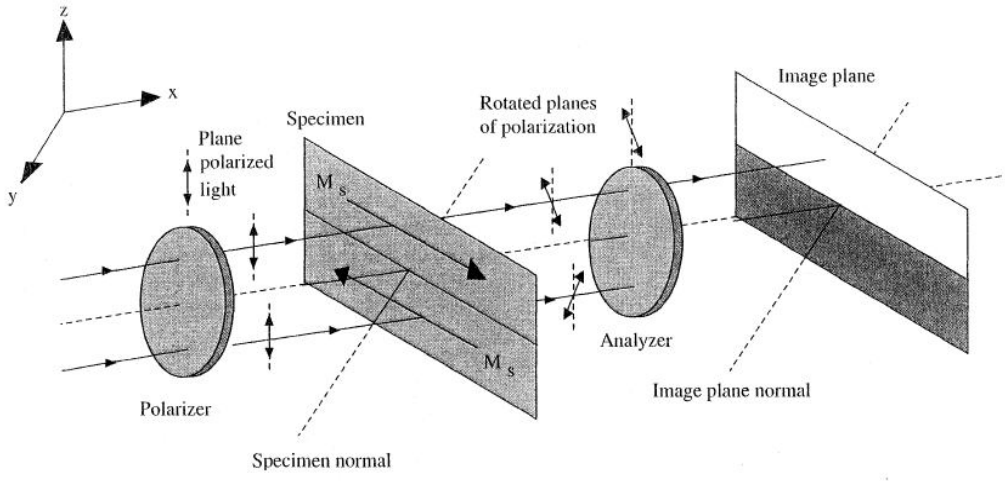


Şekil 2.23: Amorf Numunede Kerr Yöntemi ile Gözlenen Domainler

Kerr yöntemi, hareketli domain duvarlarına yönelik çalışmalarda daha kullanışlı, Bitter yöntemine göre bu alanda daha üstündür.

Faraday Etkisi

Faraday etkisi bir ışık ışınının polarizasyon düzleminin, ışının mıknatıslanmış bir malzemeden geçişi sırasında yönelmesine dayanır. Optik sistem, Kerr yöntemindeki ile aynıdır. Farklı olarak kaynak, polarizör, malzeme, analizör ve mikroskop, şekil 2.24' te gösterildiği gibi aynı sırada yer alır. Yöntem, ışığı geçirebilmesi için yeterince ince olan malzemelerin kullanımı ile sınırlıdır.



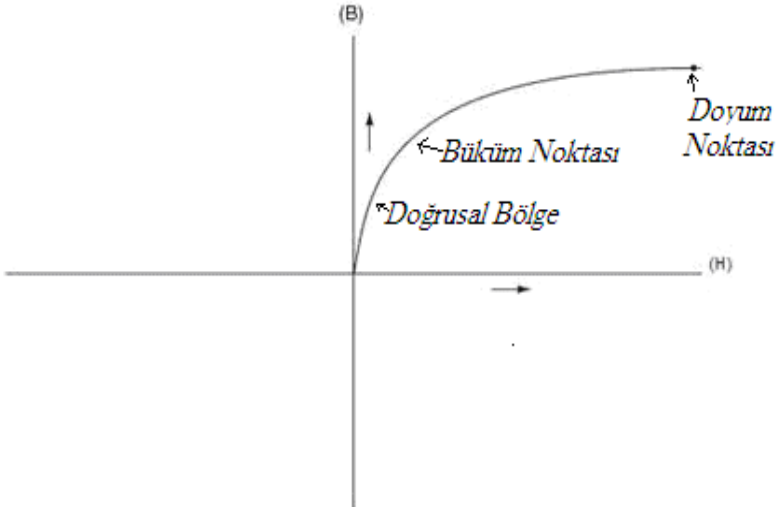
Şekil 2.24: Faraday Yöntemi ile Domainlerin Gözlenmesi [24]

2.4.3 Domainlerin Manyetik Alanda Hareketi ve Histerisis Eğrileri

Malzemeye bir manyetik alan etki ettiğinde alan doğrultusunda yönlenen domainler yönlenmemiş domainlere doğru genişler. Domainlerin büyüyebilmesi için bloch duvarlarının hareket etmesi gereklidir. Bunun için gerekli güç manyetik alan tarafından sağlanır. Başlangıçta domainler zorlukla büyürler ve çok küçük bir manyetizasyon üretebilmek için dahi manyetik alanda rölatif olarak büyük artışlar gerekir. Alanın şiddeti permeablite arttıkça, yönlenmiş domainlerin büyümesi daha kolay olur. Sonuç olarak istenmeyen yönlerde yönlenmiş domainler yok olur ve rotasyon domainlerin yönlenmesini tamamlar. Doymuşluk manyetizasyonu, bütün domainler yönlendiği zaman elde edilir. Bu aynı zamanda malzemeden elde edilebilecek en yüksek manyetizasyon değeridir. Malzemeye etki eden alan uzaklaştırıldığında, domain duvarları tarafından sağlanan direnç, domainlerin rastgele yönlenmesini önler. Böylece bazı domainler uygulanmış manyetik alan doğrultusunda yönlenmiş kalır ve kalıcı manyetizasyon (B_r) oluşur. Malzeme permanent malzeme gibi davranır.

Histerisis çevrimi, tam bir mıknatıslanma periyodunda malzemenin manyetik alan şiddeti H ile manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişkiyi gösterir.

Uyarma akımı dolayısı ile H manyetik alan şiddeti arttırıldıkça B manyetik akı yoğunluğu da doyma noktasına kadar artar. (Şekil 2.25) Doyum manyetizasyonu madde içindeki bütün manyetik momentlerin alan yönünde sıralanması durumudur.



Şekil 2.25: Doyma Noktasına Kadar Manyetik Akının (M), Manyetik Alan Şiddeti (H) İle Değişimi

BH grafiğinin doyum manyetizasyonuna kadar olan kısmı 3 bölümde incelenebilir.

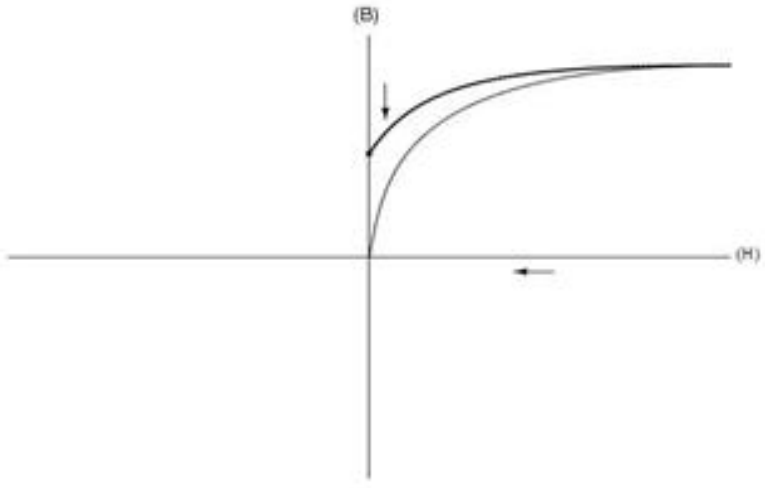
1. B'nin H'a oranla doğrusal değişim gösterdiği doğrusal bölge. Bu bölgede mıknatıslanmanın sağlandığı bölgedir.
2. Büküm noktası olarak adlandırılan bu bölgede B değeri H değerine oranla daha az bir değişim göstermektedir.
3. Bölge ise doyum bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede ferromanyetik malzeme manyetik doyuma ulaşmıştır. Bu noktadan sonra H değeri ne kadar artırılırsa artırılsın B değerinde bir değişim olmaz. [27, 48]

Doyum manyetizasyonu:

$$\mathbf{M_S = n.m} \qquad \textbf{(2.26)}$$

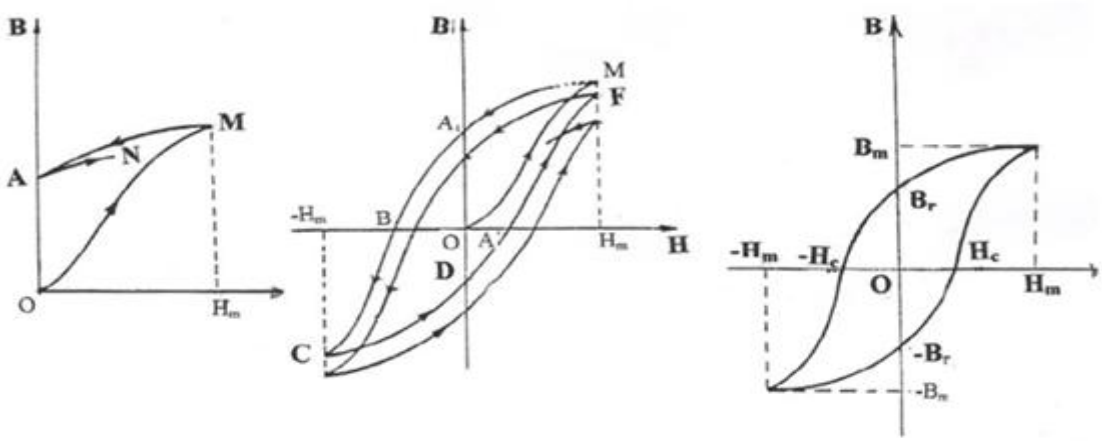
ile verilir. Burada n maddenin birim hacmindeki atom sayısı, m atomik manyetik momentlerin büyüklüğüdür. Histerisis eğrisi üzerinde gösterilen doyum manyetizasyonu, bu eğrinin elde edildiği sıcaklıktaki doyum manyetizasyonudur.

Bu noktadan itibaren uyarma akımı dolayısı ile H alan şiddeti azaltılarak geri dönülecek olursa manyetik akının (B) daha önce manyetik alan arttırılırken aldığı değerlerden daha büyük değerler alarak eğri boyunca azaldığı görülür.



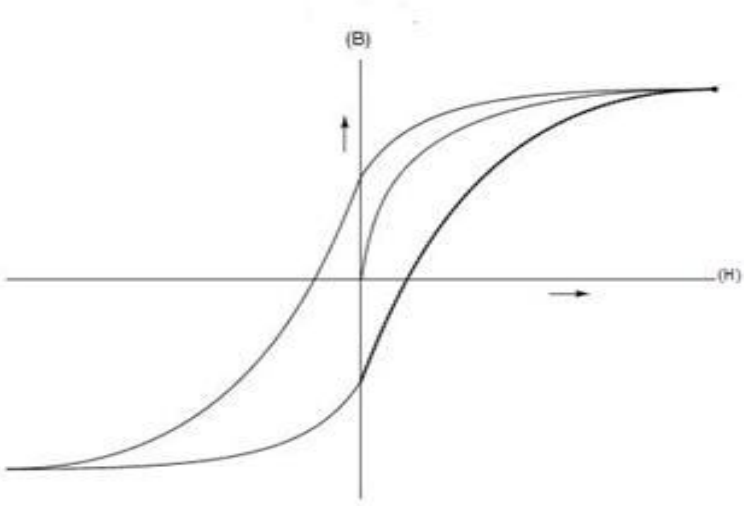
Şekil 2.26: Doyma Noktasından İtibaren Azalan Manyetik Alanın; Manyetik Akıya Etkisi

Uyarma akımı kesilerek H = 0 yapılsa bile B, belirli bir değer alır. H'nin aynı değerleri için B'nin farklı değerler alması olayına histerisis adı verilir.



Şekil 2.27: Histerisis Çevriminin Elde Edilişi

Eğer manyetik alan tekrar aynı yönde arttırılırsa manyetik akı yoğunluğu bu kez AN eğrisi boyunca artar. Histerisisden dolayı manyetik akının alacağı değer daha önce malzemenin geçirmiş olduğu manyetik hallere bağlı olmaktadır. Eğer A noktasına gelindikten sonra uyarma akımının yönü değiştirilerek manyetik alan şiddeti $-H_m$ değerine kadar arttırılırsa B manyetik akı yoğunluğu ABC eğrisi boyunca değişir. Bu sırada manyetik akı yoğunluğu OB ile ölçülen H değeri için sıfır olarak BC eğrisi boyunca yön değiştirir. Eğer C noktasından geri dönülürse alan şiddeti tekrar H_m değerini alıncaya kadar manyetik akı yoğunluğu CDF eğrisini takip eder. Bu işlem, birçok kez tekrarlanırsa aynı H_m değerleri için, iç içe yerleşen histerisis eğrileri elde edilir. Aynı H_m değerleri için, iç içe yerleşen histerisis eğrilerinin tepelerin, birleştirerek "histerisis eğrisi" denilen kapalı eğri elde edilir. (Şekil 2.28) [7, 22]



Şekil 2.28: Histerisis Eğrisi Çizimi

Bu eğri başlangıç (0,0) noktasına göre simetriktir. Histerisis bölgesinin ikinci bölgesindeki kısmına "mıknatıslanmayı yok etme eğrisi" adı verilir. Histerisisden dolayı bir H değerine birden fazla B değeri ve bir B değerine birden fazla H değeri karşılık düşer. Bu nedenle belli bir manyetik akı yoğunluğu elde etmek için gerekli olan alan şiddetinin saptanmasında bir belirsizlik vardır. Bu belirsizlik ancak malzemenin daha önce geçirdiği manyetik haller belli olduğunda ortadan kalkar.

H = 0 değerine karşılık düşen $\pm B_r$ değerine artık mıknatıslanma ya da kalıcı mıknatıslık ya da remenans manyetik akı yoğunluğu adı verilir. B=0 değerine karşılık düşen $\pm H_c$ değerine zorlayıcı kuvvet ya da coercive kuvvet adı verilir. Bu değerler özellikle daimi mıknatıslar için önemlidir. Farklı H_m maksimum değerleri için farklı H_c ve farklı B_r değerleri elde edilir. Çizelgelerde H_m'nin doyma bölgesinde bulunması halinde elde edilen B_r ve H_c değerleri verilir.

Bir maddenin uygulamalar için gerekli özelliklere sahip olup olmadığı maddenin histerisis eğrisi incelenerek anlaşılabilir. Maddenin manyetik karakteristikleri histerisis eğrisi üzerinde belirlenir. Histerisis eğrisi incelenerek maddenin doyum manyetizasyonu, kalıcı manyetizasyonu, koersivitesi(coercivity), manyetik geçirgenliği ve manyetik güç kaybı hakkında bilgi edinilir.

H_c zorlayıcı kuvvetinin değerine göre manyetik malzemeler, yumuşak ve sert manyetik malzemeler olarak sınıflandırılırlar. Öyle ki H_c'ye göre,

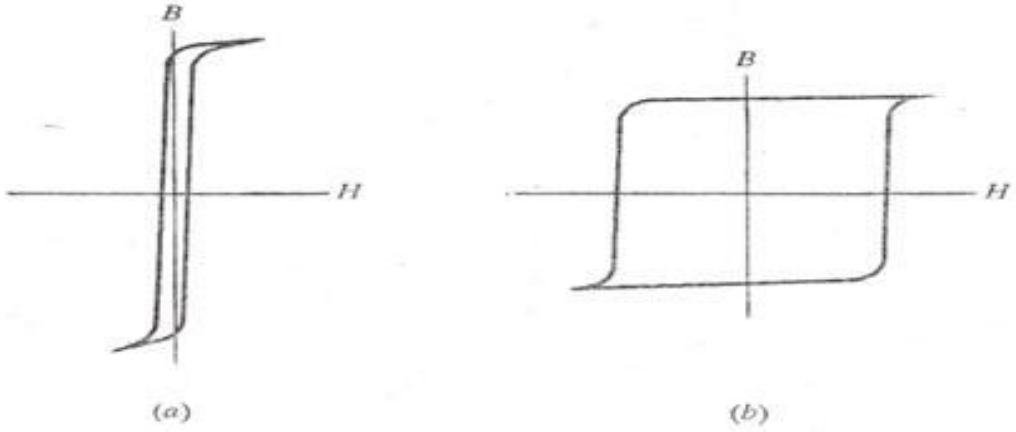
$H_c < 10$ A/cm: Yumuşak Manyetik Malzeme

$H_c > 10$ A/cm: Sert Manyetik Malzeme şeklinde tanımlanır.

Yumuşak manyetik bir malzeme kolayca mıknatıslanır ve mıknatıslığı giderilir, buna karşılık sert mıknatıslı bir malzemenin mıknatıslanması veya mıknatıslığının giderilmesi güçtür. İlk yıllarda yumuşak ve sert mıknatıslı malzemeler fiziksel olarak yumuşak ve sert olduklarından bu terimler yerleşmiştir. Bugün, bu malzemelerin fiziksel olarak yumuşak veya sert olmaları zorunlu olmadığından, yumuşak ve sert terimleri mıknatıslanmanın kolaylığı ve güçlüğü anlamında anlaşılmalıdır.

Yumuşak bir mıknatıs yüksek manyetik geçirgenlik (yüksek B_s) ve düşük zorlayıcı kuvvete sahiptir. Basit şekilde ifade edecek olursak; eğrinin alanı küçüktür. Bu özelliğe sahip tipik metaller, yumuşak demir, silikonlu demir ve birkaç özel alaşımdır. Ayrıca son yıllarda sanayide üretilen özel alaşımlı metalik camlarda yumuşak mıknatıs olarak kullanılmaktadır.

Demir-Silisyum(%3-4) alaşımı gibi yumuşak mıknatıslı malzemeler veya nikel demir alaşımlarından yapılan yumuşak mıknatıslar, transformatör çekirdeklerinde, motorlarda ve jeneratörlerde kullanılmakta olup düşük baskı kuvvetli dar bir histerisis halkasına sahiptir (Şekil 2.29 (a)). Diğer taraftan, kalıcı mıknatısların yapımında kullanılan sert mıknatıslı malzemeler veya sert mıknatıslar, yüksek baskı kuvvetli geniş histerisis halkasına sahiptir (Şekil 2.29 (b)).



Şekil 2.29: (a) Yumuşak Manyetik Malzemelerin Genel Histerisis Eğrisi
(b) Sert Manyetik Malzemelerin Genel Histerisis Eğrisi

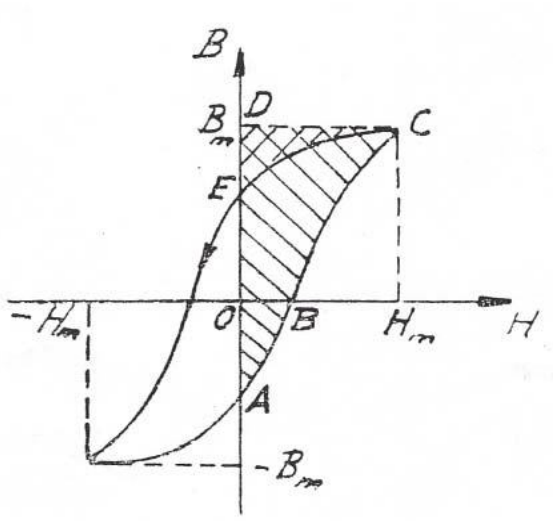
2.4.3.1 Histerisis Kaybı

Histerisis çevrimi, bir manyetik malzemenin bir çekirdeğin mıknatıslanırken ısı olarak kaybedilen enerjinin bir ölçüsüdür. Histerisis çevriminin elde edilmesinde en uygun yol, doğru akım kullanılmasıdır. Uyarma sargısında doğru akımın kullanılması ile manyetik alan şiddetinin yavaş değişimi sağlanacaktır. Böylece malzemede *girdap*

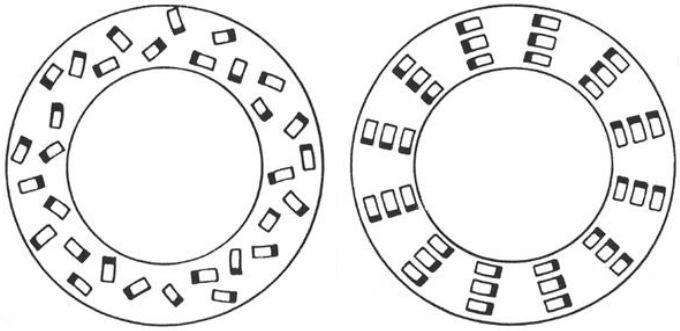
*akımları*nın (*Eddy akımları*) oluşumu önlenmiş olunacak, bunun sonucunda da histerisis kayıplarının daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesi söz konusu olacaktır. Bu yolla elde edilen histerisis çevrimi, bir mıknatıslanma periyoduna karşılık düşer ve *statik histerisis çevrimi* olarak adlandırılır.

Alternatif akım kullanılması durumunda mıknatıslanma periyodu sürekli olarak tekrarlandığından histerisis çevrimi dolayısıyla histerisis kaybı, uygulanan akımın periyoduna, başka bir deyişle frekansına bağlı olur. Histerisis kaybı, bir alternatif alana maruz kalan manyetik sacın ya da çekirdeğin toplam kaybı yerine sadece bir kısmını gösterir. Bilindiği gibi Faraday yasasına göre zamanla değişen bir alan içinde bulunan iletken ve manyetik malzemelerde bir gerilim indüklenir. İşte malzemede indüklenen bu gerilim sonucunda oluşan küçük elektrik akımları girdap akımları ya da *Eddy akımları* olarak bilinir. *Eddy* ya da *Foucult* kayıpları olarak da adlandırılan *girdap akım kayıpları*, alternatif akım ya da zamanla değişen alanların söz konusu olduğu durumlarda malzemede ya da çekirdekte ortaya çıkan ısı (Joule) kayıplarıdır. Yukarıda da belirtildiği gibi, Faraday yasasına göre zamanla değişken bir alan içinde bulunan iletkenlerde bir gerilim indüklenir. Aynı şekilde ferromanyetik malzemelerin moleküllerinde de bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilimler sonucu oluşan akımlar moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve böylece ferromanyetik malzeme, birçok kısa devre olmuş sargılar gibi davranır. Meydana gelen girdap akımları, manyetik alan frekansında olacağından elektronların birbirine sürtünmeleri neticesinde moleküller ve moleküllerin teşkil ettiği kısımlar ısınır. Isı kaynağı teşkil eden bu kısımlardan cidarlara doğru bir ısı akışı meydana gelir ve cisim ısınır dolayısıyla ısı kayıpları ortaya çıkar. Meydana gelen girdap akımları, manyetik alanın frekansı yanında malzeme cinsi, yapısı ve boyutlarına bağlıdır. Girdap akımlarının izledikleri yolları tam olarak belirlemek mümkün olmadığı gibi izledikleri yol da düzgün değildir. Girdap akımları, sadece malzemenin ısınmasına değil, aynı zamanda kendisini oluşturan alana ters yönde olacağından manyetik alanın da zayıflamasına neden olurlar. Bu akımların genlikleri (büyüklükleri); frekans ve manyetik akı yoğunluğu yanında malzemenin özgül direnci ve kalınlığına bağlıdır. İşte hem histerisis, hem de girdap akımları kayıplarını içeren histerisis çevrimine *dinamik histerisis çevrimi* adı verilir.

Doğru akım ile uyarmada bir mıknatıslanma çevriminin tamamlanması ya da alternatif akım ile uyarmada akımın bir periyodunu tamamlaması ile malzemede ya da çekirdekte bir histerisis çevrimi elde edilir. Alternatif akım uyarması ile elde edilen histerisis çevriminde, H manyetik alan şiddeti ve B manyetik akı yoğunluğunun tepe değerleri (genlikleri) alınır. Manyetik alan şiddeti sıfırdan H_m değerine yükseltildiğinde uyarma akımın sağlayan besleme kaynağından çekilen enerji çekirdeğin birim hacmi için ABCDA ile taralı yüzeyinin alanını ile orantılıdır. Diğer taraftan şekilden görüldüğü gibi, alan şiddeti H_m değerinden sıfır değerine düştüğünde (Şekil 2.27) indüksiyon da B_m değerinden B_r remenans değerine düşmektedir. B'de bir azalma meydana geldiğinden dB diferansiyeli negatiftir. Bu nedenle birim hacim için CDEC yüzeyi ile taralı yüzey ile orantılı enerji, besleme kaynağına geri iade edilen enerjidir. Bu enerji ile orantılı CDEC taralı alanı, ABCDA ile taralı alandan çıkartılırsa yarım periyoda karşılık düşen ve malzemenin ısınmasına neden olan histerisis enerjisi elde edilir. Böylece birim hacim için yarım periyoda karşılık düşen histerisis kaybı, OECBAO taralı yüzey ile orantılı olacaktır. Sonuç olarak diğer yarım periyot için de aynı durum geçerli olduğundan bir tam periyot için birim hacimdeki histerisis kaybı, histerisis çevrimi ile sınırlı yüzey ile orantılı olacaktır. Orantı katsayısı H ve B için seçilen ölçeklere bağlıdır. Fiziksel olarak histerisis kaybı, şekil 2.31'den de görüleceği gibi malzemenin mıknatıslanması esnasında atomların yön değişmeleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.30: Histerisis Kaybı



Şekil 2.31: Mıknatıslanmamış ve Mıknatıslanmış Bir Malzemede Atomların Dizilişi

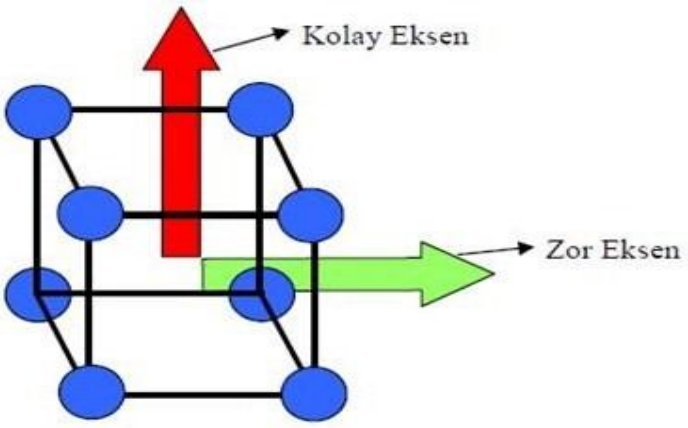
Bir malzemenin değişik frekanslarda histerisis çevrimlerine tabi tutulursa frekansın artımı ile zorlayıcı kuvvet büyür, kalıcı mıknatıslık ise küçülür ve histerisis kaybı artar. [7, 22]

2.5 Manyetik Anizotropi

Nano boyuttaki malzemelerde manyetik anizotropinin iki farklı kaynağı vardır. Bu kaynaklar manyeto kristal anizotropi ve şekil anizotropisidir. Malzemenin toplam anizotropik karakteri bu iki farklı anizotropinin ortak etkisi olarak tanımlanır. [22]

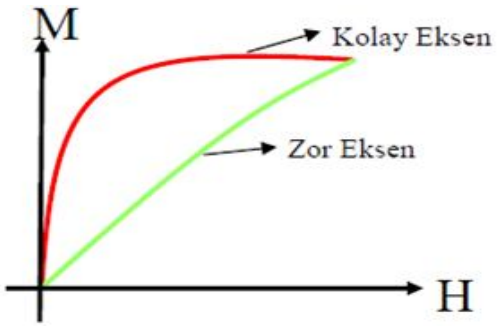
2.5.1 Manyetokristal Anizotropi

Manyetik malzemelere manyetik alan uyguladığımızda malzeme içerisindeki manyetik momentlerin düzenlendiklerini yani manyetik alan doğrultusunda yönlendiklerini biliyoruz. Bazı manyetik malzemelerde dışarıdan uyguladığımız manyetik alanın yönü önemlidir, çünkü manyetik anizotropi gösteren malzemelerdeki manyetik momentler kristalin bir doğrultusunda uyguladığımız dış manyetik alanın altında hemen düzenlenirken, başka bir doğrultusunda uyguladığımız dış manyetik alan için daha zor düzenlenirler. Yani burada manyetik düzenlenme kolay mı yoksa zor mu olacağı uyguladığımız alanın yönünün kristalin hangi doğrultusunda olacağına bağlıdır. İşte bu tip özellik gösteren malzemelere "manyetik anizotropik" malzemeler denir. Ayrıca düzenlenmenin hemen olduğu eksene "kolay eksen", düzenlenmenin daha geç olduğu eksene "zor eksen" denir. Bu olayı özetlersek kolay eksen doğrultusunda manyetik düzenlenme daha az dış manyetik alanla sağlanırken, zor eksen doğrultusunda düzenlenmenin sağlanması için yüksek dış alan gerekir. Şekil 2.32'de kristal bir yapının kolay ve zor eksenlerinin yönelimlerine bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.32: Manyetik Anizotropiye Sahip Bir Kristaldeki Manyetik Eksenler [22]

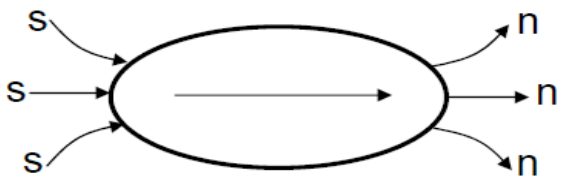
Şekil 2.33'te anizotropik bir manyetik malzemenin kolay ve zor eksenlerinin dış manyetik alana gösterdikleri tepkiler gösterilmiştir. Kolay ve zor eksenler arasındaki bu farklılık elektron yörüngelerindeki eşleşmeden kaynaklanır. Kolay eksen doğrultusundaki yörüngeler daha düşük enerji düzeylerindedirler. Bu nedenle, bu eksen doğrultusundaki manyetik momentleri yönlendirmek daha kolaydır. Zor eksen doğrultusundaki yörüngeler için ise bu olayın tam tersi geçerlidir.



Şekil 2.33: Manyetik Anizotropik Bir Malzemenin Manyetik Eksenlere Göre H-M Grafiği [22]

2.5.2 Şekil Anizotropisi

Manyetik parçacıklarda kendi yüzeylerinde tıpkı büyük mıknatıslar gibi manyetik kutuplar oluştururlar. Bu kutupların oluşumu daha çok bu parçacığın şeklinden kaynaklanan manyetik yüklerin parçacık yüzeyi üzerindeki dağılımıyla ilgilidir. Şekil 2.34 'te eliptik bir parçacığın manyetik yapısı verilmiştir.



Şekil 2.34: Eliptik Bir Parçacığın Manyetik Yapısı

Şekil 2.34'te görüldüğü gibi manyetik parçacık üzerinde oluşan manyetik kutuplardan dolayı parçacığın n kutbundan s kutbuna doğru bir manyetik alan oluşur. Bu durumda da görünen ok boyunca bu manyetik parçacık için bir kolay eksen tanımlanırken, bu eksene dik olan bütün durumlar için de bir zor eksen tanımlanır. Sonuç olarak tek bir parçacık için bu durumda şeklinden kaynaklı olan bir anizotropi tanımlanmış olur. [22]

2.6 Genel Olarak Mıknatısların Manyetik Karakteristikleri

Çalışma Sıcaklığı: Isı artışı mıknatısın geçirgenliğini ve giderici kuvvetinin azalmasını sağlamaktadır. Bunun için çalışma sıcaklığına dikkat etmek gerekir. Kritik bir sıcaklığın üzerinde sürekli bir mıknatıslar mıknatıslığını tamamen kaybederler.

Akı Yoğunluğu - Artık Mıknatısiyet (B_r): Akı yoğunluğu günümüzde 1,45 Wb/m^2 (Tesla)'ya kadar ulaşmıştır. Fakat sıcaklık arttıkça akı yoğunluğu azalmaktadır.

Maksimum Enerji Çarpımı $(BH)_{max}$: Sürekli mıknatısın akı üretme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Malzemenin ürettiği enerji ne kadar yüksek olursa, daha küçük boyuttaki mıknatıslarla daha yüksek enerji verimliliği sağlanabilir. Enerji üretimi B ve H çarpımı ile bulunur. Birimi MKS sisteminde $Joule/m^3$, CGS sisteminde Mega Gauss Oersted (MGOe)'dır. Mıknatısın maksimum enerji çarpımı ise, histerisis çevriminin ikinci çeyreğinde $(BH)_{max}$ çarpımının en büyük olduğu noktaya karşılık gelir.

Zorlayıcı (Koersif) Kuvvet (H_c) : Sürekli bir mıknatısın mıknatıslığını bütünüyle ortadan kaldırmak için mıknatısa ters yönde uygulanacak harici manyetik alan değeridir. Birimi A/m'dir. İyi bir kalıcı mıknatısın giderici kuvvetinin yüksek olması gerekir. Böylece mıknatısiyet özelliği dış etkiler tarafından kolayca yok edilemez.

Mekanik ve Elektrik Özellik: Yüksek hız gerektiren birçok motor uygulamalarında mıknatıstaki eddy akımları motorun ısınmasına sebep olan ciddi bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu ısı kayıplarının oluşmaması için mıknatıs malzemenin tasarımı sırasında yalıtımı iyileştirici metotlar uygulanmaktadır.

Maliyet: Yüksek performans gerektiren uygulamalarda maliyetin önemi daha da artmaktadır. Mıknatısın maliyeti yapısındaki nadir bulunan maddelerden gelmektedir. [26]

Parçacıklar Arası Değiş – Tokuş Etkileşimleri: Parçacıklar arası etkileşimler parçacıkların yüzeylerindeki atomların sayısı ile doğru orantılı artarken, parçacıklar arası uzaklıkla ters orantılı olarak azalmaktadır. Parçacık boyutu azaldıkça yüzey/hacim oranı artar ve bu da diğer atomlarla etkileşebilecek atomların sayısını arttırır, dolayısıyla da küçülen parçacık çevresindeki parçacıklarla daha çok etkileşmeye başlar. [22]

BÖLÜM 3

MALZEMELERİN MANYETİK AÇIDAN SINIFLANDIRILMASI

3.1 Manyetizma Türlerine Giriş

Malzemeler dışarıdan uygulanan manyetik alana karşı gösterdikleri tepkilere göre:

1. Diamanyetik ($\chi < 0$)

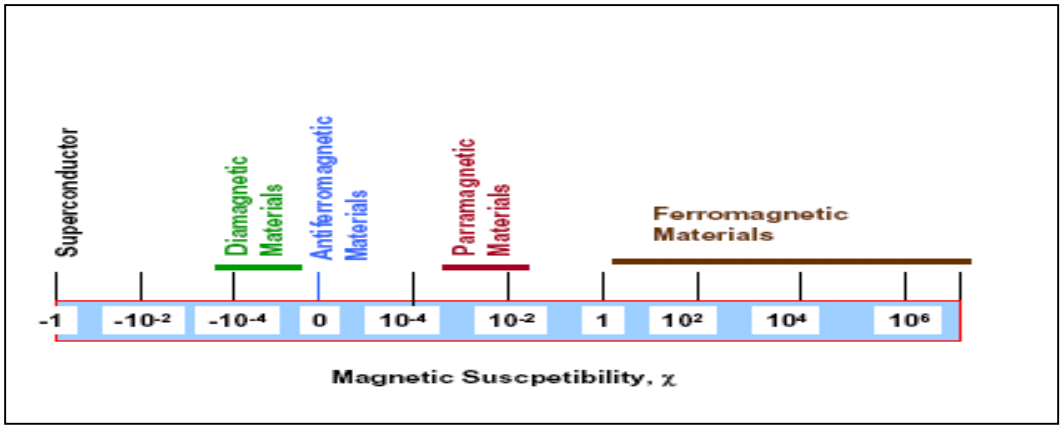
2. Paramanyetik ($\chi > 0$)

3. Ferromanyetik ($\chi \rightarrow \infty$)

4. Antiferromanyetik($\chi > 0$)

5. Ferrimanyetik($\chi > 0$)

malzemeler olarak sınıflandırılırlar. [12, 27, 29]

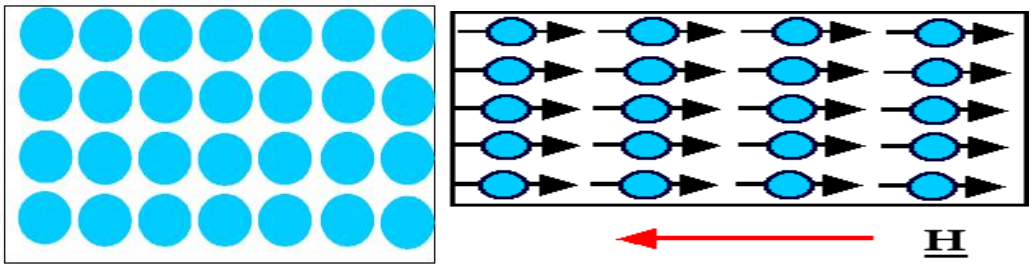


Şekil 3.1: Malzemelerin Manyetik Alınganlıklarının Karşılaştırılması [27, 28]

3.2 Diamanyetizma

İlk kez Fransız fizikçi *Paul Langevin* (1872–1946) tarafından 1905 yılında ortaya konulmuştur. [12, 27]

Diamanyetik malzemelerde, her bir atomun manyetik momentinin yönü diğerlerinden bağımsızdır. [27, 34] Diamanyetizmada, elektronun manyetizmaya katkısı elektronun yörünge etrafında dönmesinden dolayıdır. Son yörünge dolu olduğu için elektronun spin hareketinden gelen bir katkı yoktur. Toplam spin veya açısal momentum sıfırdır. Örnek; bakır, elmas, altın vb. [15, 27] Böylece, dış manyetik alan olmadığında net manyetik moment sıfırdır. [27, 34] Diamanyetik maddeler bir dış manyetik alan uygulandığında, bu maddeyi oluşturan atomların elektronların spin momentleri gelişigüzel doğrultuda dizilirler. Bu nedenle net bir manyetik özellik göstermezler, uygulanan dış alan varlığında zayıf bir mıknatıslanma kazanır ve bu dış alan kaldırıldığında mıknatıslanmalarını yitirirler. [27, 33] Diamanyetik malzemelerin yörüngelerde dolaşan elektronları dışarıdan uygulanan manyetik alana karşı başka bir manyetik alan oluştururlar. Bu durumda malzeme dışarıdan uygulanan manyetik alanı yavaşça itmiş olur.

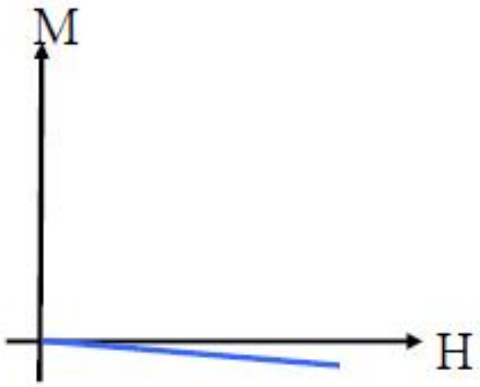


(a) **(b)**

Şekil 3.2: (a) Diamanyetik Malzemenin Atomları [22, 27, 35, 36]
(b) Diamanyetik Malzeme Atomlarının Dış Manyetik Alan Karşısında Tepkisi [27, 37]

Diamanyetiklerin kazandıkları mıknatıslanma, uygulanan alan ile ters yöndedir. Bu nedenle, diamanyetik duyarlılık negatiftir. [27, 33] Bu tip malzemeler negatif mıknatıslanmaya sahip manyetik malzemeler olarak düşünülebilir. Şekil 3.2 (a)'da görüldüğü gibi eğer her bir mavi daireyi bir atom olarak düşünürsek, bu atomların hiçbirinin net manyetik momentleri yoktur, sadece harici bir manyetik alanla karşılaştıklarında tepki veririler.

Şekil 3.2 (b) ve şekil 3.3'te diamanyetik bir malzemenin dışarıda uygulanan bir manyetik alana (H) nasıl bir tepki verdiği görülmektedir. Bu tepki görüldüğü gibi, malzemenin ters taraftan bir manyetik alan (M) meydana getirmesidir. Ayrıca bu grafikten dış manyetik alanın arttıkça, malzemenin meydana getirdiği alanında arttığı görülmektedir.



Şekil 3.3: Diamanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği [22, 27, 35]

Diamanyetik malzemelerin manyetik alınganlıkları $\chi \approx -10^{-5}$ civarında olup manyetik alınganlıkları (χ) sıcaklıktan bağımsızdır (Mutlak sıfıra yaklaşılmadığı sürece), manyetik geçirgenliği (μ) manyetik alanın fonksiyonu olarak sabittir. [11, 27] Maddelerin μ geçirgenlikleri, μ_o serbest uzayın geçirgenliği arasında:

Diamanyetik maddelerde $\mu < \mu_o$ [14, 27]

Diamanyetik maddelerin net manyetik momentleri dış manyetik alan olmadığında sıfırdır. [11, 27] Tüm manyetik malzemeler diamanyetik bir bileşene (eksi duyarlığa) sahip olmakla birlikte kapalı bir elektron kabuğu altındaki elektronların toplam manyetik momentleri sıfır olacak şekilde çiftlenmiş He, Ne, Ar, Kr gibi soygazlar ve manyetik momenti zayıf (O_2 ve N_2 dışında) gazlar, su ve gümüş, bakır, altın, bizmut (Bi) gibi katılar bu gruba girerler. [15, 27, 38] Genel olarak tüm organik bileşikler ve organik olmayan maddelerin büyük bir kısmı diamanyetiktir. [27, 39] Mıknatıslı malzemelerde bulunan diamanyetik bileşen (eksi duyarlık) artı mıknatıs etkiler tarafından yok edilir. [27, 40]

Tablo 3.1: Bazı Eksi Duyarlı Elementlerin Mıknatıs Duyarlıkları [27, 40]

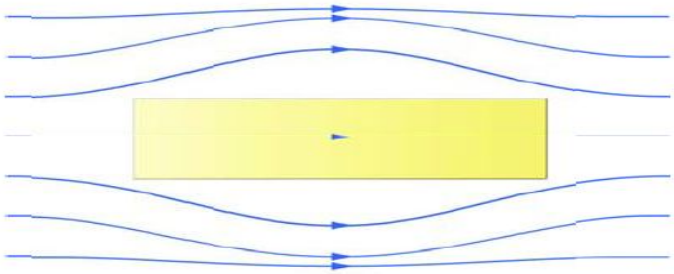
Eksi Duyarlı Elementler	*Mıknatıs Duyarlığı* $\chi_m \cdot -10^{-6}$
Kadmiyum	-0,18
Bakır	-0,086
Gümüş	-0,20
Kalay	-0,25
Çinko	-0,157

Lenz yasası, malzemelerin üzerinde meydana gelecek ani manyetik akı değişikliklerine karşı koyacak biçimde davranış sergileyeceğini söylemektedir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{-d\vec{B}}{dt} \qquad \textbf{(3.1)}$$

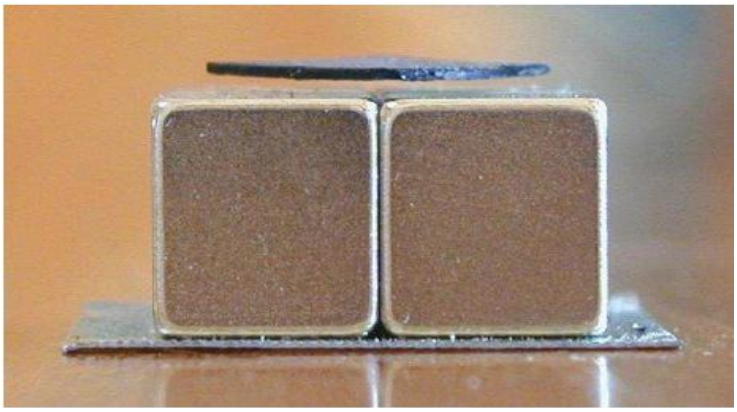
biçiminde verilen Faraday yasasının bir sonucu olan Lenz yasasına dayanarak tüm maddelerin diamanyetik davranış sergilemesi gerektiğini düşünebiliriz. Her ne kadar her madde diamanyetik özelliğe sahip olsa da çoğu kez diğer manyetik özellikler yanında küçük kalması dolayısı ile etkin manyetik davranış olarak ortaya çıkmazlar. Diamanyetizmanın etkin olarak gözlenmesi için maddenin çok düşük sıcaklıklara (-273 ^{o}K'e yakın sıcaklıklara) ya da yüksek manyetik alanlara maruz kalması gerekmektedir.

Diyamanyetizma, malzemelere manyetik akıyı dışarlama özelliği katması dolayısı ile de ilgi çekici görünmektedir. [27, 29]



Şekil 3.4: Diamanyetik Bir Malzeme Etrafındaki Manyetik Alan [27, 41]

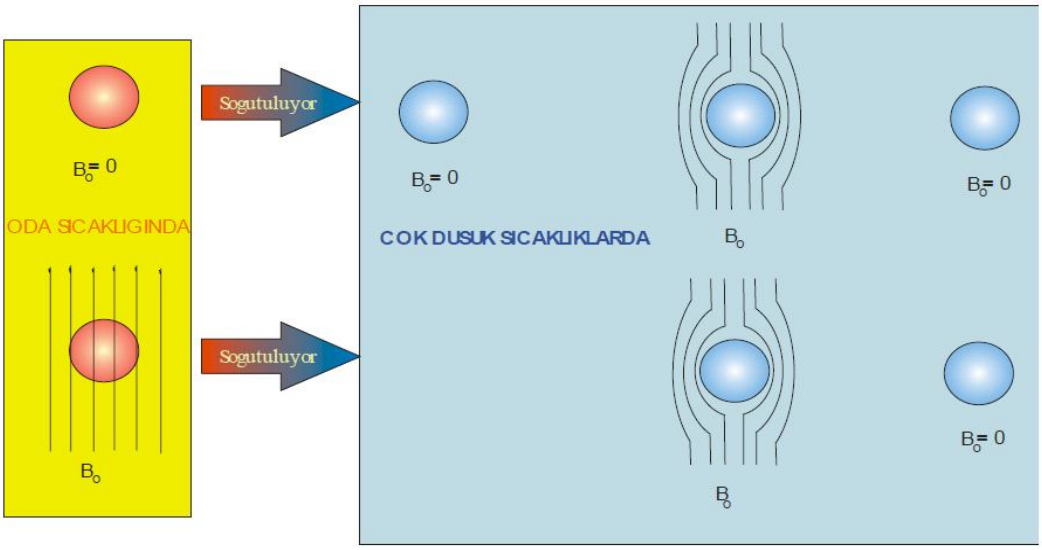
Bu etkiyi dört tane kalıcı mıknatıs üzerine konacak grafit ya da NdFeB tabanlı bileşikler ile gözlemlemek mümkündür. Mıknatıslar merkezde bir minimum manyetik alan oluşturacak biçimde düzenlenirler. Grafit örneği diamanyetik özelliği ve Lenz yasası gereğince mıknatısların üzerinde havada asılı kalır.



Şekil 3.5: Diamanyetik Bir Malzemenin Manyetik Alan Kaynağı Tarafından İtilmesi

Süper iletkenler belli bir kritik sıcaklığın altında sıfır elektriksel direnç gösteren malzemelerdir. Süper iletkenlerin bazıları süper iletken konuma geçtiklerinde diamanyetik özellik gösterirler. Bu konumdaki süper iletken kendine uygulanan dış alan içindeki manyetik akı sıfır oluncaya değin dışarı atar. Akıyı dışa atma olayına ***Meissner olayı*** adı verilir. [14, 27, 29]

Normal durumdayken dışardan uygulanan bir manyetik alan numuneye rahatlıkla nüfuz ederken, süper iletkenlerde uygulanan bu manyetik alana eşit ve ters bir alan oluştuğu için manyetik alan dışlanır, $B=0$. Bu sonuç deneysel olarak bulunmuştur. Meissner etkisi şekil 3.6'da verilmektedir.



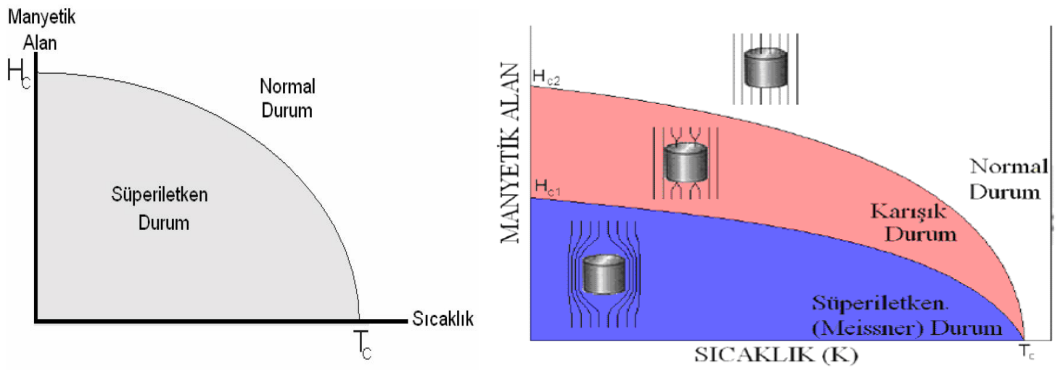
Şekil 3.6: Bir Süper İletkenin Manyetizasyonu

Bu etkiyi anlayabilmek için bir süper iletkeni kritik sıcaklığın altında sabit tutarak dış manyetik alanı sıfırdan başlayarak arttıralım. Süper iletkenin özdirenci sıfır olacağından Maxwell denkleminden $0 = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ olarak elde edilir. Bu da bize $\vec{B} = \vec{B}_0$ olduğunu vermektedir. Başlangıçtaki $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ alan sıfır olduğu için $\vec{B} = 0$ olarak bulunmuş olur. Yani süper iletkenlerde materyalin geçmişinden bağımsız olarak, eğer T<Tc ise süper iletkenin $\vec{B} = 0$ koşulu ancak mıknatıslanma, $\vec{M} = -\vec{H}$ olursa sağlanır. Bu bir mükemmel diamagnetizm ifadesidir. $\vec{M} = -\vec{H}$ olduğu için manyetik alınganlık, $\chi_m = -1$ olarak bulunur.

Abrikosov Ginzburg-Landau Teorisine göre süper iletkenlerin I. ve II. tip süperiletkenler olmak üzere iki kategoriye ayrıldıklarını göstermiştir. II. tip süperiletkenleri I. tip süper iletkenlerden ayıran önemli özellik bunların iki tane kritik manyetik alana sahip olmalarıdır. Bu yeni tip süper iletkenlere

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad \textbf{(3.2)}$$

biçiminde bir manyetik alan uygulandığında H_{c1} alt kritik alan değerinden H_{c2} üst kritik alan değerine kadar sürekli artan bir oranda süper iletken numuneye akının nüfuz edeceğini göstermiştir. Artan dış manyetik alana maruz bırakılan I. tip süper iletkenlerde ise H_c' de süper iletkenlik birden bire ortadan kalkmaktadır.



(a) **(b)**

Şekil 3.7: a) Birinci Tip Süper İletkenin Manyetik Alanının Sıcaklığa Bağımlılığı **b)** İkinci Tip Süper İletkenin Manyetik Alanının Sıcaklığa Bağımlılığı [27, 42]

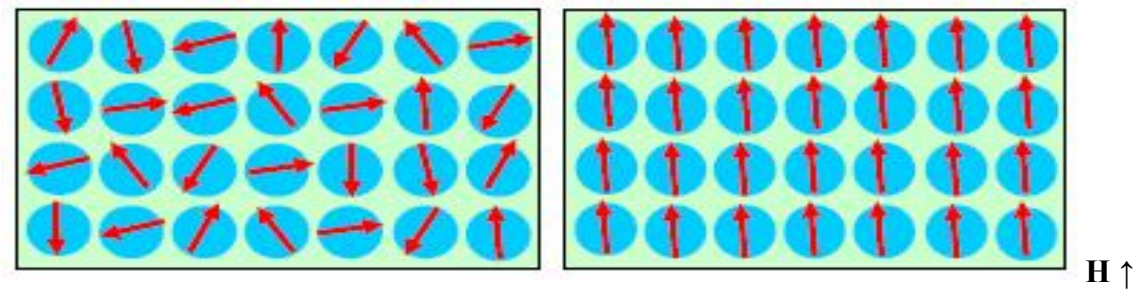
3.3 Paramanyetizma

Paramanyetizmanın ilk olarak anlaşılması 19. yüzyılda *Langevin* tarafından *Boltzman'ın* kurduğu temel istatistik yasalarının manyetizmaya uygulanması ile gerçekleşmiştir. Paramanyetik malzemenin birbirleri ile etkileşmeyen çok sayıda manyetik momentten meydana geldiğini farz eden *Langevin*, uygulanacak bir dış alan etkisi ile bu manyetik momentlerin minimum enerji ilkesi gereğince alan boyunca düzenleneceklerini ortaya koymuştur. [27, 29]

Elektronların katkıda bulunduğu paramanyetizma,

1. Toplam spini sıfırdan farklı dolayısıyla tek sayıda elektrona sahip olan atomlarda,
2. İç tabakaları tam dolu olmayan serbest atom ve iyonlarda,
3. Serbest elektron teorisine göre açıklanabilen bir manyetik alan içerisinde kolaylıkla hareket edebilen metallerde görülmektedir. [12,27]

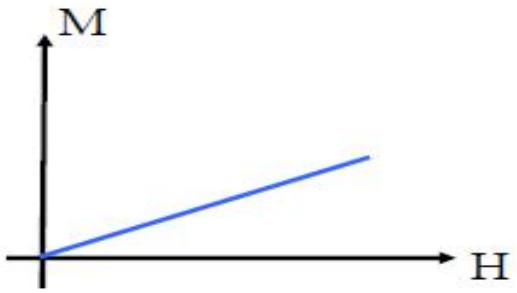
Paramanyetik malzemelerde her bir atom net manyetik momente sahiptir, fakat bu manyetik momentler örgü içerisinde rasgele yönlenmişlerdir. Bu rasgele yönelimden dolayı malzeme üzerinde herhangi bir dış manyetik alanın etkisi yokken bu malzemenin mıknatıslanması sıfırdır. Fakat dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında bu rasgele yönlenmiş manyetik momentler uygulanan alan doğrultusunda yönlenirler ve hepsi birlikte toplam bir manyetik alan oluşturlar. Şekil 3.8 (a)'da dışarıdan bir manyetik alan uygulanmıyor iken örgü içerisindeki atomların manyetik momentlerinin yönelimleri görülürken, Şekil 3.8 (b)'de malzemenin üzerine dışardan bir manyetik alan uygulandığında atomların manyetik momentlerinin yaklaşık olarak nasıl dizildikleri görülmektedir.



(a) **(b)**

Şekil 3.8: **(a)** Paramanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi
(b) Dış Manyetik Alan (H) Altında Paramanyetik Bir Malzemenin Alabileceği En Düzenli Hal

Şekil 3.8 (b)'de ise paramanyetik bir malzemenin üzerine dışardan bir manyetik alan uygulandığında gösterdiği tepki verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi dış manyetik alan (H) uygulanmaya başladığında malzeme içerisinde düzensiz olan atomik manyetik momentler düzenlenmeye başlamış ve dış manyetik alanla aynı yönde bir mıknatıslanma değeri oluşturmaya başlamışlardır. Ayrıca yine şekilden dış manyetik alanın arttıkça, malzemenin toplam mıknatıslanmasının da arttığı görülmektedir. Bu dış alanın daha fazla atomik manyetik momenti düzenlemesinden kaynaklanır.



Şekil 3.9: Paramanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği

Paramanyetizma, iyonik katılar ve metallerle karşılaştırıldığında süseptibilite iyonik katılarda büyük, metallerde küçüktür. Çünkü metallerde iletim bandındaki elektronlar, iyonik katılarda iletim bandındaki elektronlar gibi alan yönünde dönecek şekilde aynı serbestliğe sahip değildir. [15, 27]

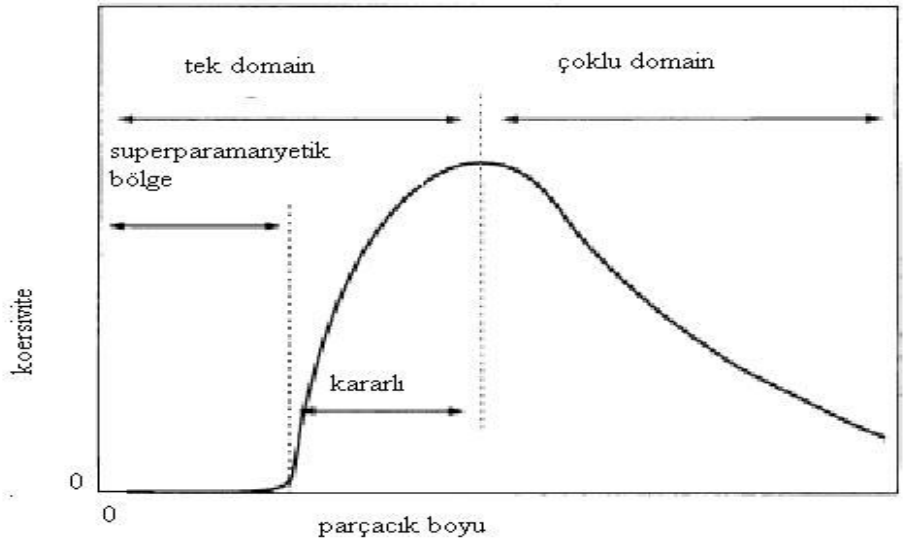
Artı duyarlılık, malzemede, 10^{-6} - 10^{-2} arasında bir mıknatıs duyarlığı oluşturur ve pek çok malzemede görülür. Bu durum Paramanyetik malzemelerin kalıcı mıknatıslar tarafından çekilmelerine (zıt kutuplarda çekme, aynı kutuplarda itme) yol açar. Mıknatıs duyarlığı arttıkça çekilme gücü de artar. [27, 40]

Tablo 3.2 : Bazı Artı Duyarlı Elementlerin Mıknatıs Duyarlıkları

Artı Duyarlı Elementler	*Mıknatıs Duyarlığı (χ_m . 10^{-6})*
Alüminyum	+0,65
Kalsiyum	+1,10
Oksijen	+106,2
Platin	+1,10
Titanyum	+1,25

3.3.1 Süperparamanyetizma

Parçacık boyutun küçülmesine bağlı olarak, manyetik enerji ile termal enerjinin, bir birini dengelediği ve parçacık içerisindeki momentlerin tamamen düzensiz oldukları duruma süperparamanyetik bölge ismini veriyoruz (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Parçacık Büyüklüğüne Bağlı Olarak Koersivite Değişimi

Süperparamanyetik bir yapı, pek çok paramanyetik davranışı sergiler. Bununla birlikte paramanyetik davranıştan farklı, malzeme ferro ve ferrimanyetik gibi yüksek mıknatıslanma değeri vardır. Süperparamanyetik malzemeleri önemli hale getiren birkaç özellik vardır. Bunları aşağıdaki maddelerle özetleyebiliriz.

1. Tüm spinleri aynı yönde yöneltmek için (doyum değerine ulaşması için) oldukça yüksek dış manyetik alan gerekmektedir. Bu da yüksek duygunluk değerine sahip olduğu anlamına gelir.

2. Süperparamanyetik malzemelerin koersivite değeri sıfırdır. Bu da, dış manyetik alan kaldırıldığında spinlerin sahip olduğu termal enerjinin, dış bir demanyetizasyon uygulamadan tekrar serbest düzenlenmelerine olanak sağlar. Eğer spinlerin sahip olduğu termal enerji azalırsa, yapı tekrar bir koersivite gösterir. Bu limit sıcaklık değerine "bloklama sıcaklığı" diyoruz. Bloklama sıcaklığının bir diğer önemi de, bu değerde yapının maksimum doyum değerini göstermesidir. [27, 43]

3.4 Ferromanyetizma

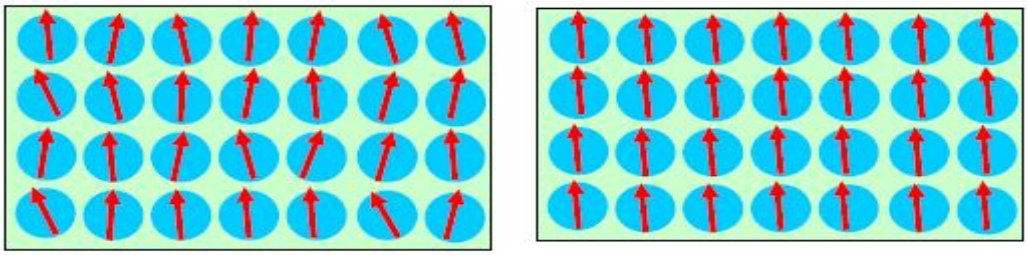
Diamanyetik ve paramanyetik maddeler uygulanan dış alan varlığında zayıf bir mıknatıslanma kazanır ve bu dış alan kaldırıldığında mıknatıslanmalarını yitirmelerine karşın, ferromanyetik maddeler uygulanan dış alan kaldırıldığında, uygulanan alan doğrultusunda kalıcı bir mıknatıslanma kazanırlar ve bazen ferromanyetik madde dış alan uygulanmamış olsa bile bir kalıcı mıknatıslanma kazanabilir. Ferromanyetik malzemelerin iç manyetik momentleri, paramanyetik malzemelere göre çok daha iyi düzenlenmiş olduğundan dolayı, ferromanyetik malzemeler çok güçlü bir şekilde çekilirler.

Ferromanyetik malzemelerin güçlü bir manyetik momente sahip olmasının nedeni, güçlü iç etkileşimlerinin olmasıdır ve bu iç etkileşimler sonucunda, manyetik momentler birbirine paralel duruma gelirler. Böylece, bu malzemelerin sıfırdan farklı net bir mıknatıslanması olur. Dolayısı ile ferromanyetik malzemeler, paramanyetik malzemelere göre dışarıdan uygulanan bir manyetik alan olmamasına rağmen kalıcı mıknatıslanmaya sahiptirler. Kalıcı manyetik momentin varlığı, elektron spinlerinin ve manyetik momentlerinin bir düzene sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Malzeme içerisinde, komşu atomların manyetik momentleri birbirlerine paralel ise, ferromanyetik yapı oluşur. Bu komşu atomların manyetik momentleri aynı büyüklükte ve aynı yönde ise, malzemeye basit ferromagnet, zıt yönlü ise antiferromagnet denir. (Antiferromagnet kavramı *antiferromanyetizma*nın temelini oluşturur.) Bu ferromanyetik maddeler ısı enerjisi ile ya da dış manyetik alanın oluşturduğu manyetik enerji ile mıknatıslık kazanmaktadırlar. Ferromanyetizma metallerde ve alaşımlarda karşılaşılan bir mıknatıslanmadır ve doğada çok fazla karşılaşılmaz. [27, 33]

Atomik sayıları 21 ile 28, 39 ile 45, 57 ile 78 arasında ve 89 ve büyük olan malzemelerde manyetik moment söz konusudur. En önemli aralık 21 ila 28 arasında olup, bu aralıkta bulunan vanadyum, krom, manganez, demir, nikel, kobalt ve bunların alaşımlarında net manyetik moment sıfırdan farklıdır. [27, 44]

Ferromanyetik bir malzemede her bir atom net bir manyetik momente sahiptirler ve bu atomların manyetik momentleri birbirleriyle etkileşir. Bu durumda bütün manyetik momentler birbirlerine paralel ve aynı yönlü bir yapı alırlar. Bu etkileşme ilk kez Weiss tarafından 1907'de moleküler alan teorisi olarak bulunmuştur. Bu teoriye göre alan altında ferro mıknatıslar bir doyum mıknatıslanmasına ulaşır, çünkü bütün

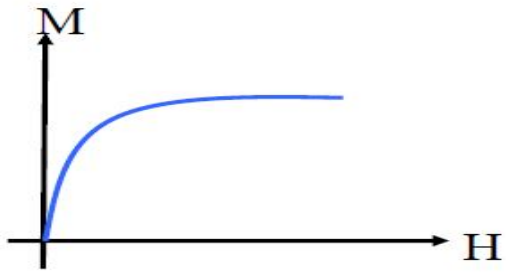
manyetik momentler aynı yönlü ve paralel olduğundan mıknatıslanmada artık daha fazla bir artış olmaz. Kuantum mekaniksel olarak, ferromanyetizmanın Heisenberg modelinde manyetik momentlerin paralel düzenlenmesi komşu manyetik momentler arasındaki değiş tokuş etkileşmeleriyle açıklanır. Şekil 3.11 (a)'da ferromanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin dizilimleri verilmiştir. Şekil 3.11 (b) 'de ise manyetik alan altındaki ferromanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin dizilimleri verilmiştir. [22, 27, 35, 45]



(a) **(b)**

Şekil 3.11: (a) Ferromanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi
(b)Dış Manyetik Alan Altında Ferromanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi

Şekil 3.12 'de ise ferromanyetik bir malzemenin üzerine dışardan bir manyetik alan uygulandığında gösterdiği tepki verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi dış manyetik alan (H) uygulanmaya başladığında malzeme içerisindeki atomlar daha fazla düzenlenirler ve malzemenin toplam mıknatıslanmasını arttırırlar. Dış alan daha arttığında ise malzemede artık düzenlenecek atom kalmadığından, toplam mıknatıslanma bir doyuma ulaşır.



Şekil 3.12: Ferromanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği

Ferromanyetik malzemeler kimi zaman net bir manyetik momente sahip değildirler bu nedenle manyetize olmuş malzemeler gibi davranmayabilirler. Oda sıcaklığında bulunan bir demir, bu duruma örnektir. Ferromanyetik malzemelerin her

zaman net bir manyetizasyona sahip olmamalarının sebebi, her birinin net manyetizasyonu farklı yönlere bakan domainlerden oluşuyor olmalarıdır. [24, 27]

Ferromanyetik malzemeler genelde doyma mıknatıslanmalarına bakılarak karşılaştırılırlar. [22, 27, 35]

Ferromanyetik malzemelerin süseptibilitesi diamanyetiklere ve paramanyetiklere göre büyüktür ($\chi \approx 50–10000$) ve doyum manyetizasyonu düşük alanlarda meydana gelmektedir. [11, 15, 27]

Tablo 3.3: Çeşitli Ferromanyetik Malzemelerin Mıknatıslanma Doygunluğu [27, 47]

Malzeme	*($x10^6$ A/m)*
Fe	1.71
Co	1.42
Ni	0.48
78 Pemalloy (%78 Ni, %22 Fe)	0.86
Supermalloy (%80 Ni, %15 Fe, %5 Mo)	0.63
Metglas 2605 ($Fe_{80}B_{20}$)	1.27
Metglas 2615 ($Fe_{80}P_{16}C_3B_1$	1.36
Permendur (%50 Co, %50 Fe)	1.91

Ferromanyetikler mühendislik uygulamalarında, yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olmalarından dolayı kullanılırlar. Diğer bir kullanım sebebi de ferromanyetiklerin kalıcı manyetizasyona sahip olabilme yeteneğidir. Fe (Demir), Ni (Nikel), Co (Kobalt), Gd (Godolinyum) (16^oC'nin Altında), Dy (Distoryum) ferromanyetik maddelerdir. Ferromanyetikler çok büyük rölatif geçirgenliğe (μ_r) ve alınganlığa (χ) sahiptir. [11, 27, 40] Bir ferromanyetik malzemenin manyetik özelliklerini göstermenin en iyi yolu farklı dış manyetik alanlar (H) için manyetik indüksiyonun (B) ya da manyetizasyonun (M) grafiğini çizmektir.

Bir ferromanyetik maddenin geçirgenliği, paramanyetik maddelerde olduğu gibi manyetik alanın fonksiyonu olarak sabit olmayıp diferansiyel geçirgenlik kavramı histerisis eğrisinden elde edilebilen önemli bir özelliktir. Diferansiyel geçirgenlik:

$$\mu' = \frac{dB}{dH} \qquad \textbf{(3.3)}$$

ile verilir. [11, 27]

Ferromanyetik maddelerin genel özellikleri aşağıda özetlenmektedir.

1- Bağıl manyetik geçirgenlikleri 1' den çok büyüktür.

2-Bağıl manyetik geçirgenlikleri, malzemenin cinsine, malzemeye daha önce uygulanan manyetik işlemlere ve manyetik alan şiddetinin değerine bağlı olarak değişkendir.

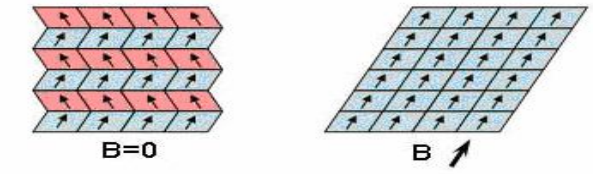
3- Paramanyetik ve diamanyetik maddelerde B manyetik akı yoğunluğu ile H alan şiddeti arasındaki doğrusal bir ilişki varken, ferromanyetik malzemelerde bu ilişki doğrusal değildir.

4- Manyetik histerisise sahiptir. [27, 46]

3.4.1 Ferromanyetik Şekil Hatırlama Olayı

Şekil hafıza alaşımlarında gözlenen şekil hafıza etkisi, termo-mekanik davranış, pseudoelastik davranış ve ferromagnetik sekil hafıza etkisi ile karakterize edilebilir. Ferromagnetik malzemedeki şekil hafıza etkisi, malzemeye bir manyetik alan uygulandığını gösterir. Ferromagnetik şekil hafıza etkisi düşük sıcaklık martenzit fazdaki tek kristal Ni_2MnGa alaşımının manyetik alanla zorlanma oluşturma çalışmaları esnasında ilk olarak Ullakko ve grubu (Ullakko vd., 1997) tarafından bildirilmiştir.

Ferromagnetik malzemeler atomik düzeyde uzun mesafeli manyetik düzen fenomeni sergilerler. Bu fenomen, bir alanda çiftlenmemiş elektron spinlerinin birbirleri ile paralel olarak sıralanmasına neden olur. Şekil 2.13'te ferromagnetik şekil hafıza alaşımlarının yapısında oluşan martensit varyantların manyetik alan uygulanması ile değişimi ve ferromagnetik sekil hafıza alaşımlarından elde edilen sıcaklık kontrollü sensörlerin çalışma mekanizması ise şekil 2.14'te görülmektedir.



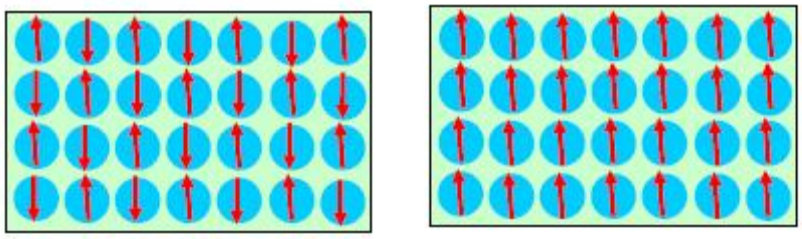
Şekil 3.13: Ferromagnetik Şekil Hafıza Etkisi



Şekil 3.14: Ferromagnetik Şekil Hafıza Alaşımlarından Elde Edilen Sıcaklık Kontrollü Sensörlerin Çalışma Mekanizması [27, 49]

3.5 Antiferromanyetizma

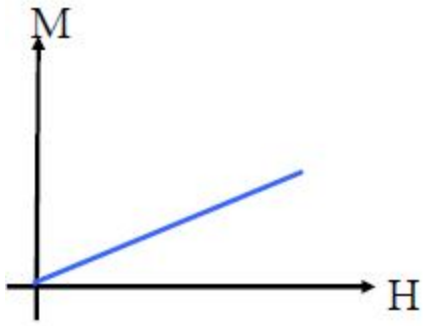
Antiferromanyetizma; paramanyetizmada olduğu gibi pozitif alınganlığı çok zayıf bir manyetizma türüdür. Antiferromanyetik malzemelerde atomlar net manyetik sahiptirler ve bu manyetik momentler birbirlerine paraleldir. Fakat birbirlerini yok edecek şekilde yönelimleri birbirlerine terstir. Bu yönelimlerin ters olmasının nedeni değiş tokuş etkileşimleridir. Bu durumda malzemede net bir manyetik moment olmadığından malzeme paramanyetik gibi davranmış olur, çünkü atomların manyetik momentleri birbirlerinin etkilerini yok ederler. Şekil 3.15 (a)'da antiferromanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin nasıl dizildikleri verilmiştir. [22, 27, 30, 35] Antiferromanyetik maddelerin atomlarının spin momentlerinin yarısı bir doğrultuda, diğer kısmı ise bu doğrultuya ters yönde dizilir. [27, 33] Doğada bu durumla fazla karşılaşılmaz. Eğer şekildeki vektörler, eşit kuvvetli düşünülürse; birbirlerinin etkilerini nasıl yok ettikleri görülmektedir. Şekil 3.15 (b)'de ise bu malzemeye dışardan bir manyetik alan uygulandığında atomik manyetik momentlerinin nasıl düzenlendikleri verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 3.15: (a) Antiferromanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi
(b) Dış Manyetik Alan Altında Antiferromanyetik Bir Malzemenin Düzenlenimi

Şekil 3.16'da ise antiferromanyetik bir malzemenin üzerine dışardan bir manyetik alan uygulandığında gösterdiği tepki verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi dış manyetik alan (H) uygulanmaya başladığında malzeme içerisinde dış manyetik alana ters yönelimli olan atomik manyetik momentler düzenlenmeye başlamış ve dış manyetik alanla aynı yönde bir mıknatıslanma değeri oluşturmaya başlamışlardır. Ayrıca yine şekilden dış manyetik alanın arttıkça, malzemenin toplam mıknatıslanmasının da arttığı görülmektedir.



Şekil 3.16: Antiferromanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği [22, 27, 35]

Antiferromanyetik bir malzeme, manyetik moment büyüklükleri birbirine eşit ve zıt yönlü iki örgüden oluşur. Manyetik alan yokluğunda, net mıknatıslanma sıfırdır ve yalnızca manyetik alan uygulandığında artı ve küçük değerli mıknatıslanma gözlenir. Antiferromanyetik malzemelerin manyetik duyarlılıkları 10^{-3} (SI) düzeyindedir. Néel, 1932 yılında moleküler alan teorisini antiferromanyetlere uygulayarak antiferromanyetizmanın teorisini büyük oranda geliştirmiştir (Cullity 1972).

MnO, NiO, CuO, MnO_2 Fe_3 antiferromanyetiktir. Hematit (αFe_2O_3) antiferromanyetizma ile birlikteyse zayıf ferromanyetizma gösterir. Bu durumdaki özelliklere "parasitik ferromanyetizma" denir. [27, 50]

Antiferromanyetik yapılardaki komşu spinler belli bir açıda eğilmiş olabilirler ki, bu yapılara "eğik antiferromanyetik" yapılar denir. Histerisis, kalıcı mıknatıslanma, Curie sıcaklık değeri gibi özellikler, antiferromanyetik yapılarda olmamasına rağmen, bu tip yapılarda mevcuttur.



Şekil 3.17: Eğik Antiferromanyetik Yapılar [27, 43]

Madde içinde birbirine paralel ve zıt yönlü atomların sayısı birbirine eşit değilse, bu durumda madde oldukça şiddetli mıknatıslanma gösterir. Genellikle ferritlerde görülen bu özellik ferrimanyetizma olarak isimlendirilir. Antiferromanyetizma, ferrimanyetizmanın özel bir halidir. [27, 30, 50]

3.6 Ferrimanyetizma

Ferrimanyetizma; *Neel* tarafından, ferritlerin manyetizasyonunu anlatmak üzere ortaya atılmış bir kavramdır. [27, 30]

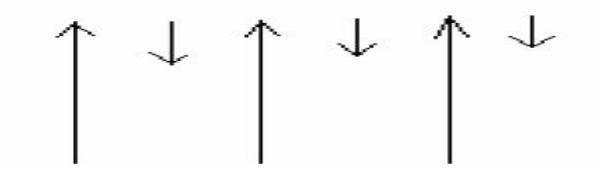
Ferritler, yarı iletkendirler ve çok büyük dirence sahiptirler bu yüzden de ferritler içinde uygulanan manyetik alanla akım girdabı olmayacaktır. Bu özellik, ferritleri yüksek frekans uygulamaları için ideal malzeme yapmaktadır. En önemli ferrimanyetik malzemeler olarak adlandırılan ferritler, demir ve diğer metallerin oksitleridir. Ferritler, ticari açıdan kullanışlı malzemeler olmakla birlikte *Snoek* ve arkadaşları tarafından 1933 -1945 yılları arasında geliştirilmişlerdir. Fakat 1948 yılında *Néel,* ferritleri kuramsal olarak açıklamaya çalışmış ve ilk olarak ferrimanyetizma olarak adlandırılmıştır. Farklı kristal yapıdaki manyetik ferritler, başlıca iki gruba ayrılırlar;

1. Kübik: Bunların genel formülleri MO Fe_2O_3'tür ve burada M; Mn, Ni, Fe, Co gibi çift değerli metal iyonlarıdır. Kobalt ferrit (CoO Fe_2O_3) sert manyetik, diğer kübik ferritler ise, yumuşak manyetik malzemelerdir.

2. Hegzagonal: Bu grup içinde en önemlisi Baryum ferritlerdir ($Ba_6Fe_2O_3$) ve sert manyetik malzemelerdir. [12, 27]

Ferrimanyetizma davranışını gösteren en yaygın madde magnetittir (Fe_3O_4) ayrıca doğada bulunan bazı titanyumlu bileşiklerde ferrimanyetizma özelliği göstermektedir. [27, 39, 50] Çok yüksek elektrik dirençleri yüksek manyetik geçirgenlikleri olduğu için ferritler teknolojik öneme sahiptir. Histerisis eğrileri ferritleri hafıza depolama için çok elverişli kılmıştır ve mikrodalga malzemeleri olarak da kullanılırlar. Elektrik endüstrisinde yalıtkan ve yüksek doyum mıknatıslanmasına sahip manyetik malzemelerin önemli bir yeri vardır. Ferromanyetik malzemeler iletken olduğu için akım kayıplarına neden olurlar ve teknolojik uygulamalar için elverişli değildirler. Ferrimanyetik malzemeler yalıtkan olmakla birlikte, ferromanyetlerde görülen yüksek mıknatıslanma değerlerine sahiptirler. Ayrıca ferromanyetlerde görülen kalıcı mıknatıslanma, ferrimanyetlerde de görülür. Fakat doğal mıknatıslanmaları, bütün spinlerin aynı yönde olduğu durumdan daha küçüktür. *Neél*, 1948 yılında bu tür malzemeler için bir teori geliştirmiştir. Bu teoriye göre, ferrimanyetik malzemeler,

mıknatıslanmaları birbirine zıt yönlü ve manyetik momentler aşağıdaki gibi değerleri eşit olmayan iki alt örgüden oluşur (Şekil 2.18).



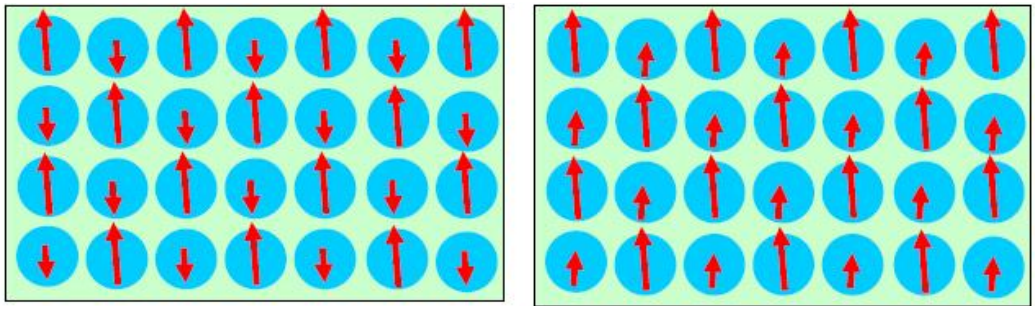
Şekil 3.18: Ferrimanyetizmanın Manyetik Moment Dizilimi [27, 39]

1. örgü noktasındaki manyetik iyon yukarı spin yönelimine, 2. örgü noktasındaki manyetik iyon aşağı spin yönelimine sahiptir. 1. ve 2. örgü noktalarında konuşlanan manyetik iyonların sayıları ve manyetik momentleri farklı olduğundan net bir manyetizasyon oluşur. [27, 30]

Ferrimanyetizmada madde içindeki atomların elektronlarının spin momentlerinin birbirine zıt yöndeki dizilim sayısı eşit değildir. Bu nedenle, madde şiddetli bir mıknatıslanma gösterir. Uygulanan dış alan olmasa bile ferrimanyetik madde kendiliğinden bir mıknatıslanma gösterir. [27, 33]

Ferrimanyetizma karmaşık kristal yapılarında görülür. Bu tip malzemelerde değiş tokuş etkileşmeleri manyetik momentleri paralel hale getirir. Fakat kristal içerisindeki bazı bölgelerin manyetik yönelimi kristalin genel yönelimine ters olur, bu bölgelerde toplam mıknatıslanmanın azalmasına neden olur. Bu malzemeler ferromanyetik malzemelere benzemekle birlikte doyma mıknatıslanmaları ferromanyetik malzemelerden daha düşüktür. [22, 27, 35] Ferrimanyetik malzemeler, hem ferromanyetik, hem de antiferromanyetik özellik gösteren malzemelerdir. Birleşen atomların manyetik momentleri anti paraleldir, ama büyüklükleri farklı olduğu için net bir mıknatıslanma gösterirler. [27, 43]

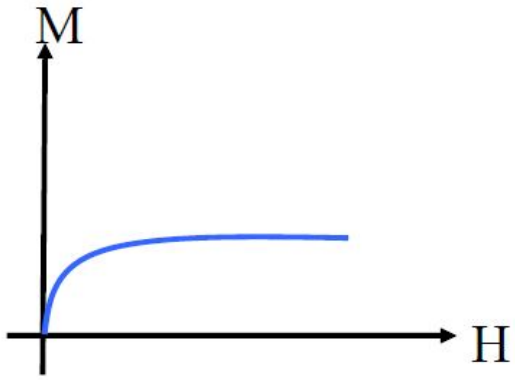
Şekil 3.19 (a)'da ferrimanyetik bir malzemenin atomlarının manyetik momentlerinin dizilimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi örgü içerisindeki manyetik momentler birbirine paraleldir. Fakat yönelimleri farklı olan atomların, manyetik kuvvetleri de birbirlerinden farklıdır. Şekil 3.19 (b)'de bu malzemeye dışardan bir manyetik alan uygulandığında, atomların manyetik momentlerini nasıl dizildikleri verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 3.19: (a) Ferrimanyetik Bir Malzemenin Manyetik Düzenlenimi
(b) Manyetik Alan Altında Ferrimanyetik Bir Malzemenin Düzenlenimi

Şekil 3.20'de ise ferrimanyetik bir malzemenin üzerine dışardan bir manyetik alan uygulandığında gösterdiği tepki verilmiştir. Bu tepki ferromanyetik bir malzemenin verdiği tepkiye oldukça benzemektedir. Fakat bu malzemelerin doyma mıknatıslanma değerleri ferromanyetik malzemelere göre daha düşüktür. Grafikten görüldüğü gibi dış manyetik alan (H) uygulanmaya başladığında malzeme içerisindeki atomlar düzenlenmiş, yani aynı yöne yönelmiştir. Sonuç olarak malzemenin toplam mıknatıslanmasını arttırmışlardır. Dış alan daha da arttığında ise, malzemede artık düzenlenecek atom kalmadığından, toplam mıknatıslanma doyum değerine ulaşmıştır.

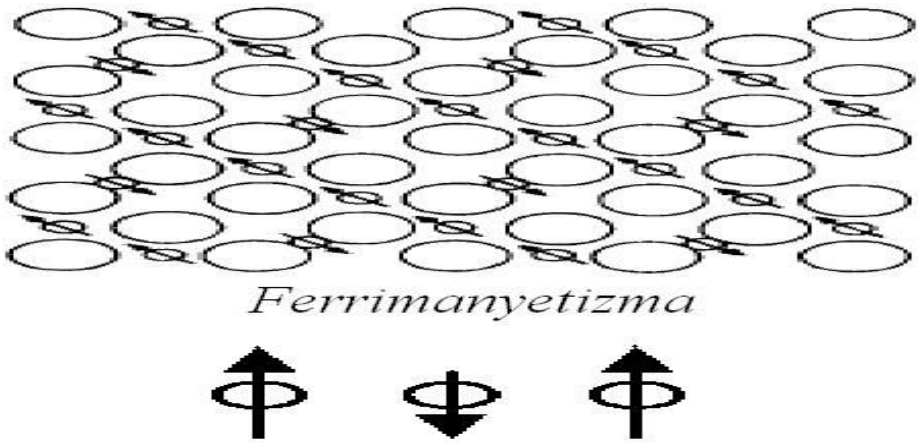


Şekil 3.20: Ferrimanyetik Bir Malzemenin M-H Grafiği [22, 27, 35]

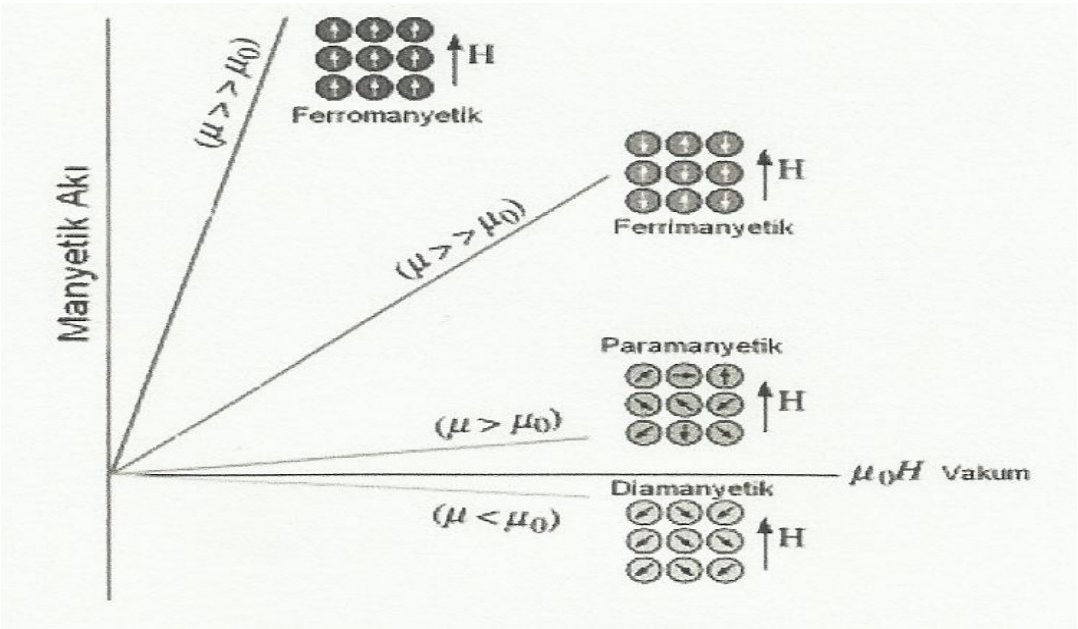
Neel'in geliştirdiği teoriye göre, ferrimanyetik malzemeler iki alt örgüden oluşuyordu. Manyetik alınganlık yazımını elde etmek için mıknatıslanmalara bağlı alınganlık;

$$\chi = \frac{(\vec{M}_A + \vec{M}_B)}{\vec{H}} \qquad \textbf{(3.4)}$$

eşitliği ile bulunur. Ferrimanyetik yapılar, sahip oldukları oksijenler ile birbirinden ayrılan iki örgüden (A ve B) meydana gelmiştir. Oksijen anyonları sayesinde değiş-tokuş etkileşimi meydana gelmektedir. Eğer etkileşim bu şekilde meydana geliyor ise, "direkt olmayan" veya "süper değiş-tokuş" etkileşimi olarak adlandırılır. Yapıdaki güçlü süper değiş-tokuş etkileşimi, A ve B örgülerindeki spinlerin anti paralel düzenlenmesini sağlar. Bunun sonucunda da "ferrimanyetik yapılar" oluşur.

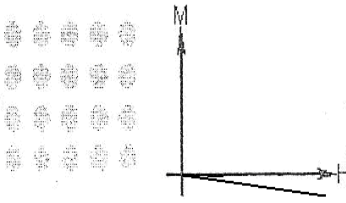
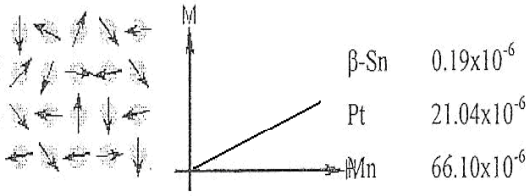
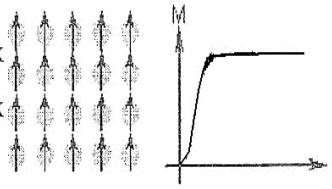
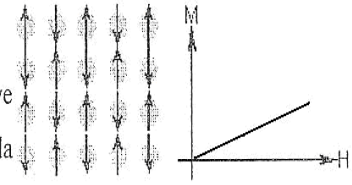
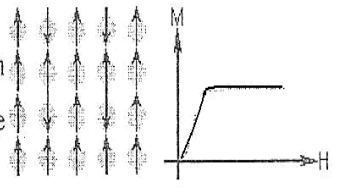


Şekil 3.21: Atomik Manyetik Momentlerin, Ferrimanyetik Yapılarda Düzenlenimi [27, 43]



Şekil 3.22: Malzemelerin Manyetik Geçirgenliklerinin Karşılaştırılması

Tablo 3.4: Malzemelerin Manyetik Özellikleri Açısından Sınıflandırılması

Manyetizma Çeşidi	Alınganlık	Atomik / Manyetik Davranış		Örnek/ Alınganlık	
Diamanyetizm	Küçük & Negatif.	Atomlar manyetik momente sahip değildir.		Au Cu	-2.74×10^{-6} -0.77×10^{-6}
Paramanyetizma	Küçük & Pozitif	Atomlar rast gele yönlenmiş manyetik momentlere sahiptir.		β-Sn Pt Mn	0.19×10^{-6} 21.04×10^{-6} 66.10×10^{-6}
Ferromanyetizma	Büyük & Pozitif, mikroyapıya bağlı olarak uygulanan alanın fonksiyonudur.	Atomlar paralel olarak hizalanmış manyetik momentlere sahiptir.		Fe	~100,000
Antiferromanyetizma	Küçük & Pozitif	Atomlar karışık paralel ve paralel olmayan hizalarda manyetik momente sahiptir.		Cr	3.6×10^{-6}
Ferrimanyetizma	Büyük & Pozitif, mikroyapıya bağlı olarak uygulanan alanın fonksiyonudur.	Atomlar paralel olmayan hizalarda manyetik momente sahiptir.		Ba ferrite	~3

Sıcaklığın Mıknatıslar Üzerindeki Etkileri

1895 yılında *Pierre Curie* demirin manyetik özelliğinin sıcaklıkla değiştiğini bulmuştur. Demanyetizasyon karakteristiğinin en çok etkilendiği fiziksel olay sıcaklık değişimleridir. Manyetik malzemelerin mıknatıs çekim kuvvetleri genellikle sıcaklıkla ters orantılı şekilde değişim gösterir. Bu durum *Curie* ve *Curie-Weiss* yasaları ile açıklanabilir. *Curie Yasası*'na göre manyetik alınganlık (χ) aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\chi = \frac{C}{T} = \frac{M}{B} \tag{3.5}$$

Burada "C" Curie sabitidir ve şu şekildedir:

$$C = \frac{N\mu_B^2}{k} \tag{3.6}$$

Alınganlık ifadesinden görüldüğü gibi dışarıdan manyetik alan uygulandığında malzemenin içerisindeki manyetik momentler düzenlenir ve mıknatıslanma artar. Fakat ısı arttırıldığında ısısal titreşimlerden dolayı mıknatıslanma (M) ve dolayısıyla alınganlık (χ) değeri azalır. Çünkü ısısal titreşimler yüzünden atom hareket etmeye başlar ve bu atomun manyetik momentinin de yön değiştirmesine neden olur. Bu da toplam mıknatıslanmanın azalmasına neden olur. Fakat *Curie yasası* farklı manyetik momentlerin birbirleriyle etkileşmediği durumlarda işe yarar. Eğer bu etkileşmelerin olduğunu varsayarsak bu sefer devreye *Curie*-Weiss *yasası* devreye girer. Bu yasa ise şu şekilde ifade edilir:

$$\chi = \frac{C}{T - Q} \tag{3.7}$$

Burada Q bir sıcaklık sabitidir. Bu sabit sıfır, artı ya da eksi işaretli bir değer alabilir. Q = 0 olduğunda Curie-Weiss yasası Curie yasasına dönüşür. Yani bu durumda malzeme içerisindeki manyetik momentler birbirleriyle etkileşmemektedir. Eğer Q sıfırdan farklıysa bu sefer malzeme içerisinde bulunan manyetik momentler arasındaki etkileşmeler göz önüne alınır. [22, 27, 35, 36]

Diamanyetik bir malzemenin yüksek mıknatıslanma şiddeti gösterebilmesi için maddenin çok düşük sıcaklıklara (-273 ^{o}K'e yakın sıcaklıklara) ya da yüksek manyetik alanlara maruz kalması gerekmekte olduğundan oda sıcaklığı ve üzeri sıcaklıklarda diğer parametrelerin sabit kalması koşuluyla diamanyetik maddelerin manyetik alınganlığı (χ) sıcaklıktan bağımsızdır denilebilir.

Paramanyetik maddelerde, sıcaklık arttıkça χ değeri değişmez veya azalır. Ferromanyetik ve antiferromanyetik maddeler ısıtıldıklarında manyetik özelliklerini kaybederek paramanyetik maddelere dönüşürler. [15, 27, 31]

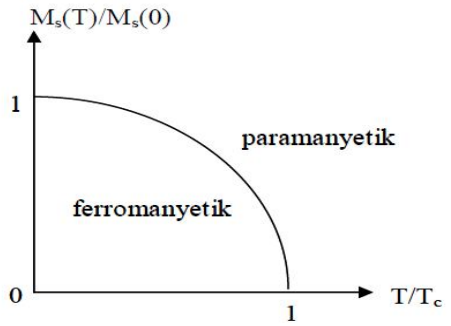
***Curie Sıcaklığı (T_C)* : Ferromanyetizma ↔ Paramanyetizma**

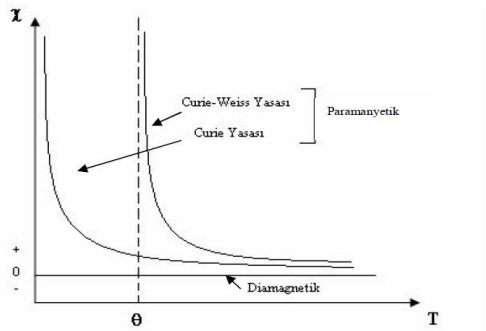
***Néel Sıcaklığı (T_N)* : Antiferromanyetizma ↔ Paramanyetizma**

Tablo 3.5: Çeşitli Malzemelerin Curie Sıcaklıkları [27, 47]

Malzeme	*Curie Sıcaklığı (^{o}C)*
Fe	770
Ni	358
Co	1130
Gd	20
$Nd_2Fe_{14}B$	312
AlNiCo	850
$SmCo_5$	720
Sert Ferritler	400-700

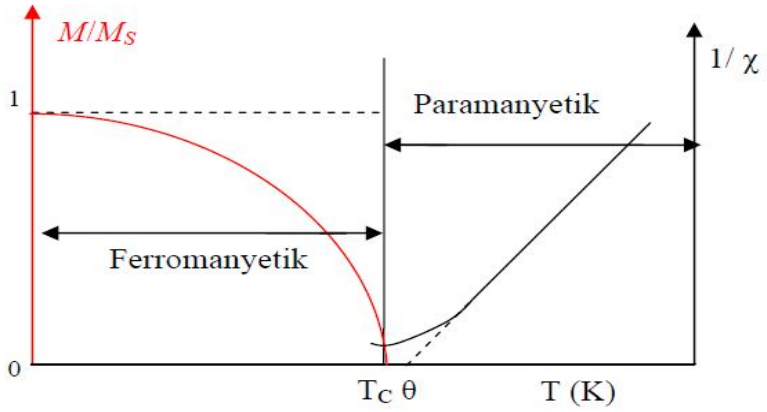
Lântanitler; sıcaklık azaldıkça, paramanyetikten antiferromanyetiğe sonra ferro manyetiğe geçer.





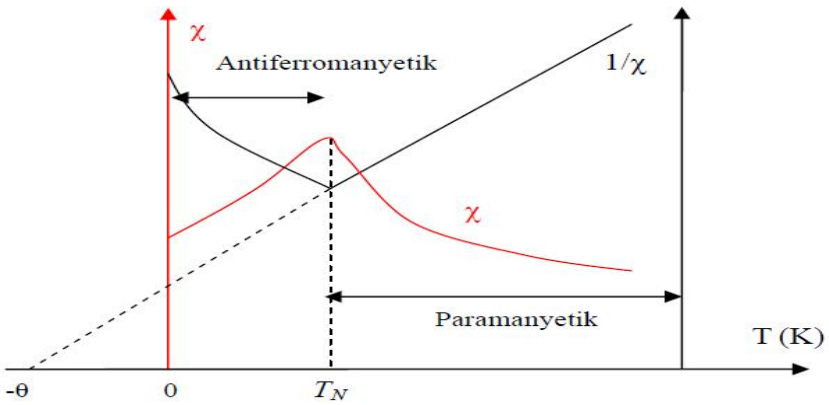
Şekil 3.23: Manyetizasyonun Sıcaklığa Bağlılığı
Şekil 3.24: Paramanyetik ve Diamanyetik Malzemeler İçin Mutlak Sıcaklık T İle χ Manyetik Alınganlığın Değişimi

Şekil 3.24 paramanyetik ve diamanyetik malzemeler için, χ'in T ile değişimini göstermektedir. Paramagnetler için 1/χ'in T'ye göre değişimini çizecek olursak, eğimli düz bir çizgi şeklinde olacaktır ve bu çizgi başlangıç noktasından geçecektir (Curie davranışı) ya da T = θ değerinde sıcaklık ekseninde kesişecektir (Curie-Weiss davranışı). [12, 27]

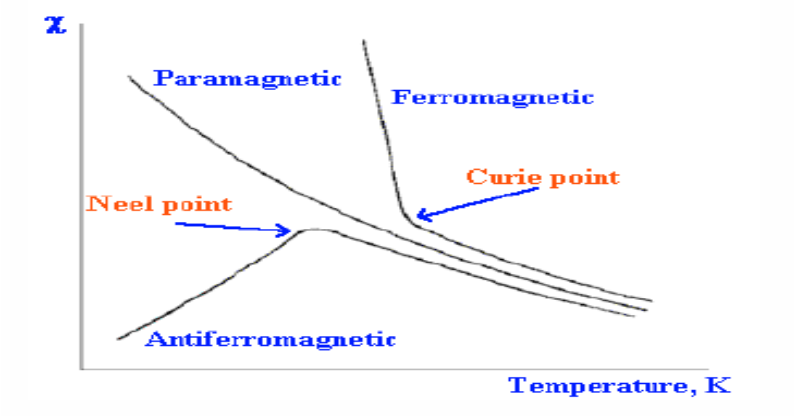


Şekil 3.25: Ferromanyetik Bir Malzeme İçin *M/MS(T)* ve $\chi^{-1}(T)$ Eğrileri [27, 45]

Antiferromanyetizmada alınganlık sıcaklık eğrisinde *Neel Sıcaklığı* olarak adlandırılan bir faz büküm noktası bulunmaktadır. Sıcaklık azaldıkça alınganlıkta azalır. Ferromanyetik malzemeler için Curie sıcaklığı anti ferromanyetik malzemeler için Neel sıcaklığının üzerinde ise sıcaklık arttıkça spinler daha gelişigüzel olmaya başlar ve sıcaklık arttıkça alınganlık azalır. Antiferromanyetik malzemelerde *Neel Sıcaklığı*nın altındaki sıcaklıklarda spinler sıfır net manyetik moment ile anti paralel düzenlenim içinde düzenlidir. [27, 30]



Şekil 3.26: Antiferromanyetik Bir Malzemenin *χ(T)* ve $\chi^{-1}(T)$ Eğrileri



Şekil 3.27: Alınganlık-Sıcaklık İlişkisi

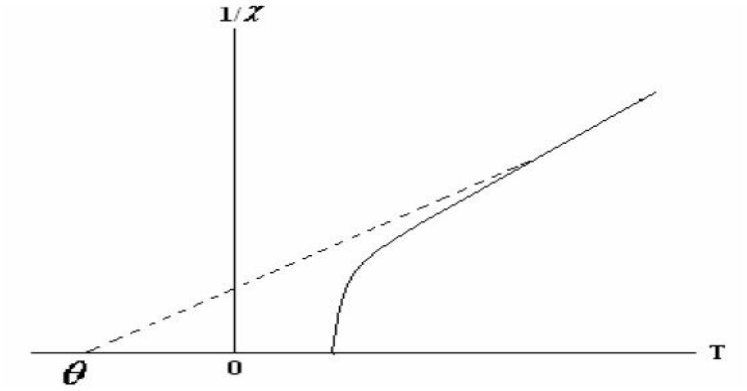
Ferrimanyetik malzemelerde mıknatıslanma, sıcaklık artıkça hızla azalır, Curie sıcaklığına ulaştığında ise kaybolur ve paramanyetik bölgede sıcaklık ile alınganlığın tersinin (1/χ) değişimi, çizgisel değildir. Bu nedenle, ferrimanyetik malzemeler Curie yasasına uymazlar. [12, 27, 33]

Bu yazım alınganlığın tersi olarak şekil de görüldüğü gibi, asimptotu

$$\frac{1}{\chi} = \frac{T}{C} + \frac{1}{\chi_0} \qquad \textbf{(3.8)}$$

olan bir hiperbol denklemi şeklinde karşımıza çıkar. Aşağıdaki şekilde bir ferrimanyet için 1/χ - T eğrisi görülmektedir.

Ferrimanyetik yapılarda ferromanyetik yapılar gibi histerisis eğrisi, doğal mıknatıslanma, Curie sıcaklığı, kalıcı mıknatıslanma özellikler göstermektedir.



Şekil 3.28: Ferrimanyet İçin 1/χ- T Grafiği [27, 3]

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOD

4.1 Nikel Çinko Ferrit'in Önemi ve Deneysel Aşamalar

Malzemelerin manyetik ve elektriksel özellikleri; bilimsel, endüstriyel ve tıbbi yönden önem taşıyan pek çok alanda ilgi odağı olmuştur. Malzemelerin manyetik özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar neticesinde birçok yeni manyetik malzemeler üretilmeye ve endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Manyetik malzemeler; biyomedikal, bilgisayar teknolojileri, enerji, çevresel biyoloji, katalizörler, sensörler, elektronik, elektromanyetik parazitlenme problemi gibi farklı alanlarda; görüntüleme, manyetik kayıt, manyetik soğutucu ve manyetik yazıcı özelliklerinin geliştirilmesi ve benzeri şeklinde birçok uygulama alanı bulmaktadırlar. Diğer yandan, daha geniş ölçekli üretimler için ferrit tozları ile bir polimer içerisinde akışkan bir karışım yapılıp boyama tekniği ile ya da plakalar haline getirilip, soğurucu kaplama malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Dolayısıyla bu konuda çok yoğun araştırmalar süre gelmekte ve her geçen gün daha da yoğunlaşarak devam etmektedir. [51]

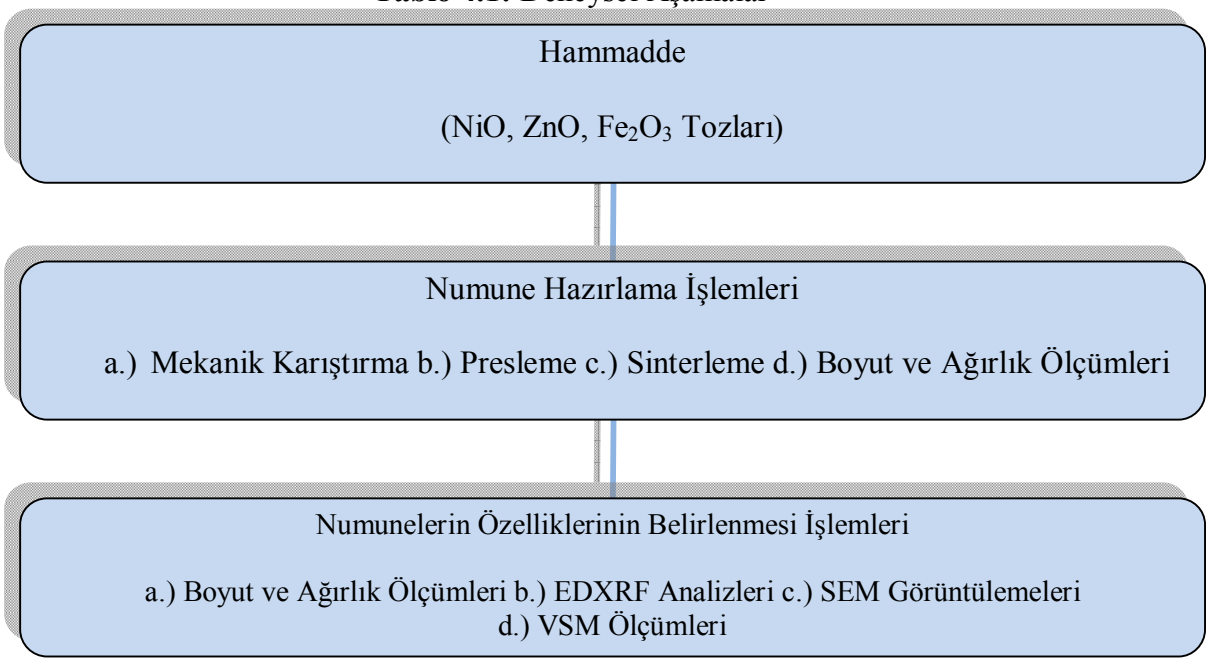
Son yüzyıla damgasını vuran gelişmelerden olan televizyon ve görüntü teknolojisinin günümüzdeki seviyeye ulaşmasında rol oynayan etkenlerden biri de çinko oksidin nikel-demir alaşımlarının manyetik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmesinin keşfidir. Hollandalı bilim adamı *Snoek,* 1946 yılında yaptığı araştırma sonucunda çinko oksidin belirli oranda NiO ile yer değiştirdiğinde ferrit esaslı malzemelerin manyetik özelliklerini arttırdığını bulmuştur. Örneğin %35' lik bir ZnO ilavesi ferritin başlangıç manyetik geçirgenliğini (permeability) %3000 oranında arttırdığı görülmüştür. 1948 yılında Philips şirketinden *Neel*, bu etkinin temellerini açıklamıştır. Buna göre yapıya ilave edilen Zn^{+2} atomları Fe^{+3} atomlarını tetrahedral konumlarından iterek, Ni^{+2} atomlarının terk ettiği oktahedral konuma geçmesi ile bu birimdeki manyetik özellik taşıyan atom sayısının artmasına sebebiyet vermektedir. Tetrahedrallere oranla sayıca daha çok manyetik atom bulunduran oktahedral üniteler manyetik özelliklerin keskin bir

şekilde artmasının en büyük nedenidir. Manyetik özellikleri arttırmasının yanında, ilave edilen çinko oksit yapının Curie sıcaklığını düşürür ve elektriksel kayıpları azaltır. [52]

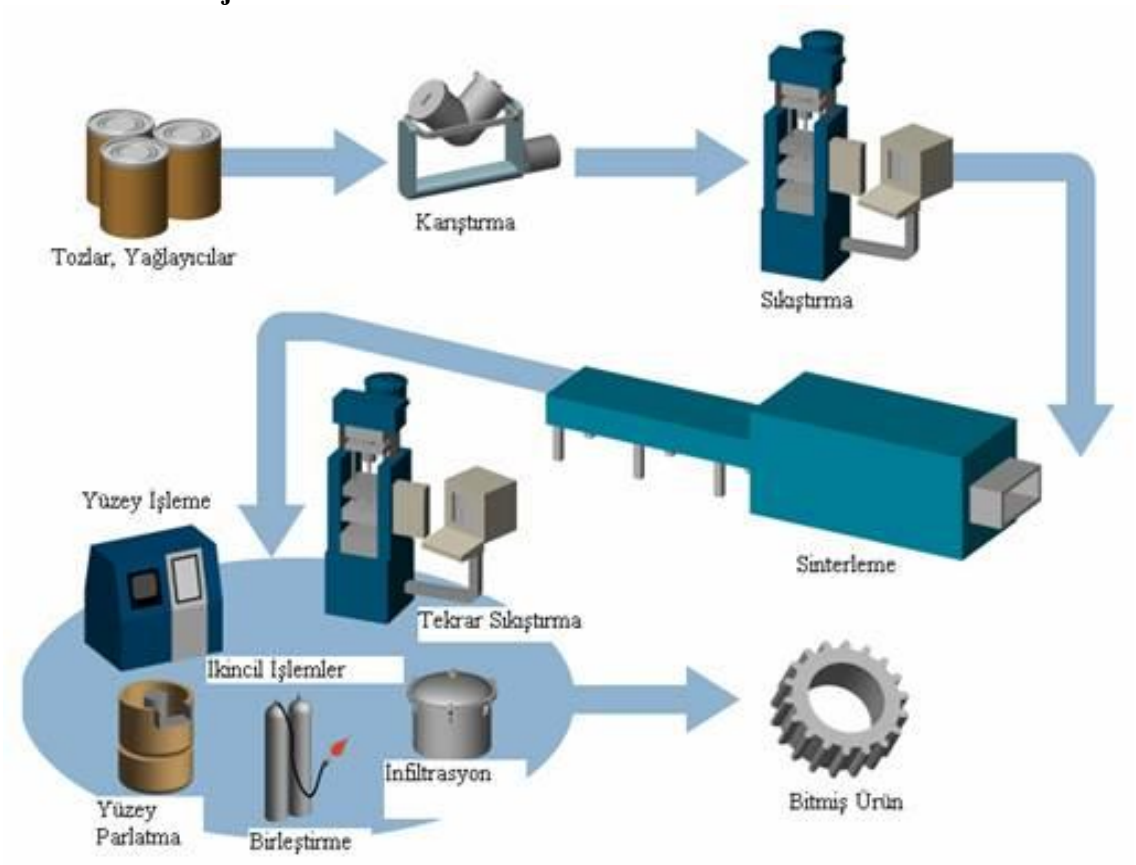
Bu tez çalışması, NiO, ZnO ve Fe_2O_3 farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen yapıların manyetik özelliklerinin belirlenmesi ve uygulamaya kazandırılmasını içermektedir.

Tez çalışması doğrultusunda, ($NiO_{1-x}ZnO_xFe_2O_3$ ($0 \leq x \leq 1$)) elde edilmiştir. Çalışmada NiO, ZnO, Fe_2O_3 tozlarından $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($0 \leq x \leq 1$) Bileşim 1 için x=0,85 Bileşim 2 için x=0,50 ve Bileşim 3 için x=0,15 mol değerleri için stokiyometriye uygun olarak hazırlanan tozlar mekanik karıştırma yapılarak numuneler için homojen toz karışımı elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen toz karışımlardan toz metalurjisi yoluyla elde edilen bulk yapıların yapısal analizleri SEM görüntülemesi, EDXRF analizleri yapılmış VSM ile manyetik özellikleri belirlenmiştir.

Tablo 4.1: Deneysel Aşamalar



4.2 Toz Metalurjisi İle Üretim



Şekil 4.1: Toz Metalurjisi Yöntemi İle Parça Üretim Aşamalarının Genel Taslağı [53]

Toz Metalurjisi (TM), çapak alma gibi bitirme işlemlerine neredeyse hiç ihtiyaç duyulmadan nihai ürüne yakın; parça imal etme ve ileri teknoloji malzemelerin-alaşımların imal edilmesine imkân veren faklı bir imalat yöntemidir. TM çeşitli metal ve seramik tozların imal edilmesi, bu tozların değişik ısıl ve mekanik deformasyon prensiplerinin uygulanarak birleştirilmesi ile kullanışlı mühendislik parçalara dönüştürülmesini amaçlar. Bu dönüşüm başlıca istenilen boyutta üretilen tozların homojen bir şekilde karıştırılması, toz karışımın kalıp içerisinde sıkıştırılması, toz tanelerinin birbirleriyle bağ oluşturmaları için atmosfer kontrollü ve gerekli sıcaklıkta-sürede sinterleme işleminin yapılması basamaklarını içerir. Genel bir ifade ile tanımlanacak olursa TM; farklı boyut, tip, şekil ve sıkıştırılabilme özelliğine sahip tozların, % ağırlık oranlarının belirlenip homojen olarak karıştırılması, karışımın uygun ortamda sıkıştırılmasıyla istenilen şekle veya forma dönüştürülerek yoğunluk kazandırılması daha sonra mukavemet ve yoğunluğun arttırılması için sinterleme yapılması esası ile parça imal etme tekniği olarak nitelendirilmektedir. [54]

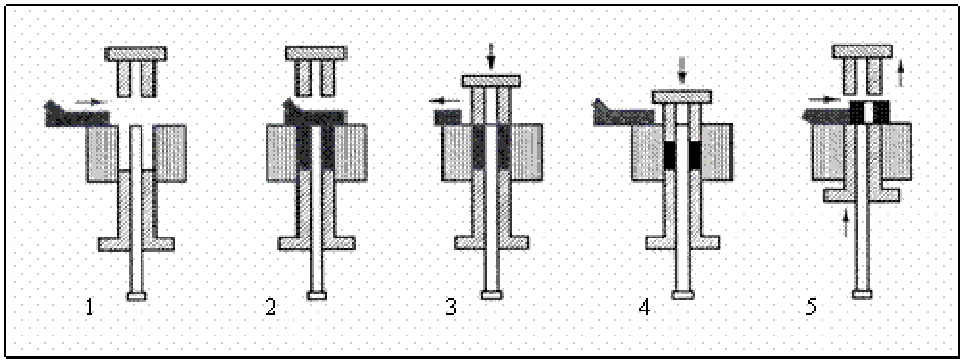
Tez çalışması için NiO, ZnO, Fe_2O_3 tozlarından $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($0 \leq x \leq 1$) x=0,15 x=0,50 ve x=0,85 değerleri için stokiyometriye uygun olarak hassas tartıda tartılarak hazırlanan tozlara homojen toz karışımı elde edilmesi için mekanik karıştırma uygulandı.



(a) **(b)**

Şekil 4.2: Mekanik Karıştırma İçin Tozların Hazırlanması
(a) Tozların Tartım İşlemi **(b)** Tartım İşlemi Sonrası Tozlar

Mekanik karıştırmanın ardından elde edilen toz karışımları hidrolik preste presleme işlemine tabi tutulmuştur. Presleme işlemi genel olarak bir yük altında serbest yapıdaki toz partiküllerinin istenilen şekle dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. Mekanik karıştırma sonrası tozların sıkıştırılmasındaki ana amaç ham yoğunluk ve dayanımın elde edilmesidir. Bu işlem için deneysel çalışmada hidrolik pres kullanılmıştır. Ancak presleme işlemi için, mekanik ve pnömatik presler de kullanılmaktadır. Presleme düzeneğe eklenecek ekipmanlarla istenilen sıcaklıkta yapılabilir. Tez çalışmasında presleme oda sıcaklığında yapılmış olup herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmamıştır. Şekil 4.2'de tipik bir presleme işleminin basamakları görülmektedir.



Şekil 4.3: Presleme İşleminin Basamakları; 1. İşlem Başlangıcı, 2. Toz Doldurma, 3. Presleme Başlangıcı, 4. Preslemenin Bitişi, 5. Preslenmiş Parçanın Çıkarılması [53]

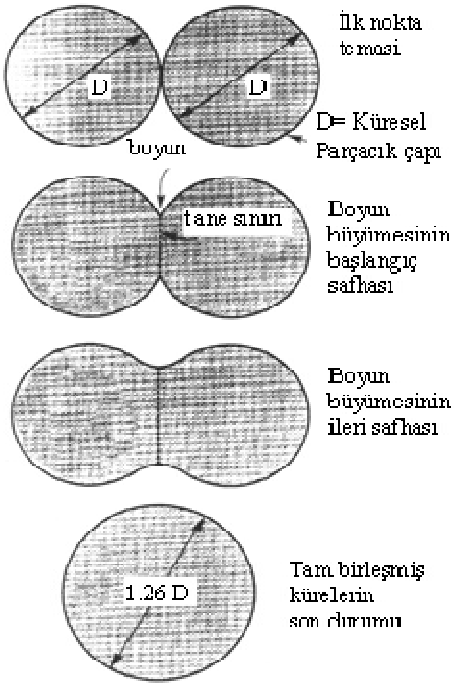


(a) **(b)**

Şekil 4.4: Presleme İşlemi İçin Kullanılan Ekipmanlar
(a) Hidrolik Pres **(b)** Kalıp

Presleme işleminin ardından numunelere hava atmosferinde 1000 ^{o}C, 1200 ^{o}C ve 1400 ^{o}C sıcaklıklarda 1'er saat sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi genel olarak, gözenekli yapıda bir şekil kazandırılmış tozların yüzey alanının küçülmesi, partikül temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısıl olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. Sıkıştırılmış tozlar arasındaki bağlantı yapışma, mekanik kitlenme ve benzeri türden zayıf bağlar olup kristal kafes içerisindeki bağ dayanımına kıyasla çok zayıf kalmaktadır. Bu sebeple; sıkıştırılmış ham yoğunluktaki T/M parçalarına mukavemet kazandırmak ve yoğunluğunu arttırmak

amacıyla ergime noktasının altındaki sıcaklıkta ısıl işlem uygulanır. Sinterlemenin başlarken noktasal olarak temas halinde bulunan toz parçacıklarının katı-hal bağına dönüşümü gerçekleşir. Sinterleme işlemi sırasında, nokta teması ile başlayan, ara parçacık bağının gelişmesi ile devam eden mekanizmaya çift-küre sinterleme modeli ile gösterilmektedir. (Şekil 4.4) Bu modelde, küre şeklindeki parçacıkların temasının sonucunda oluşan boyun büyümesiyle yeni bir tane sınırı oluşur ve iki parçacık tek bir parçacık oluşturacak şekilde birleşir.



Şekil 4.5: Çift-Küre Sinterleme Modeli

Sinterleme sıcaklığı, tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının 2/3 veya 4/5'i alınarak tespit edilir. Çoklu sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığı yüksek olan bileşenin ergime sıcaklığının altında, ergime sıcaklığı düşük olan bileşenin ergime sıcaklığının üzerinde seçilir. Demir alaşımları genellikle 1000 – 1300 °C, refrakter metaller 2000 – 2900 °C arasındaki sıcaklıklarda sinterlenirler. Sinterleme sıcaklığı ve süresi kullanılan malzemeye göre değişir. Toz kütlelerinde, sahip oldukları büyük yüzeylerden dolayı yüzey enerjisi mevcuttur. Sinterleme sırasında tozların birbiriyle bağlanması ve toz yüzeylerinin düzelmesiyle yüzey alanları azalır ve böylece yüzey enerjisinin de azalması gerçekleşmiş olur. [53]

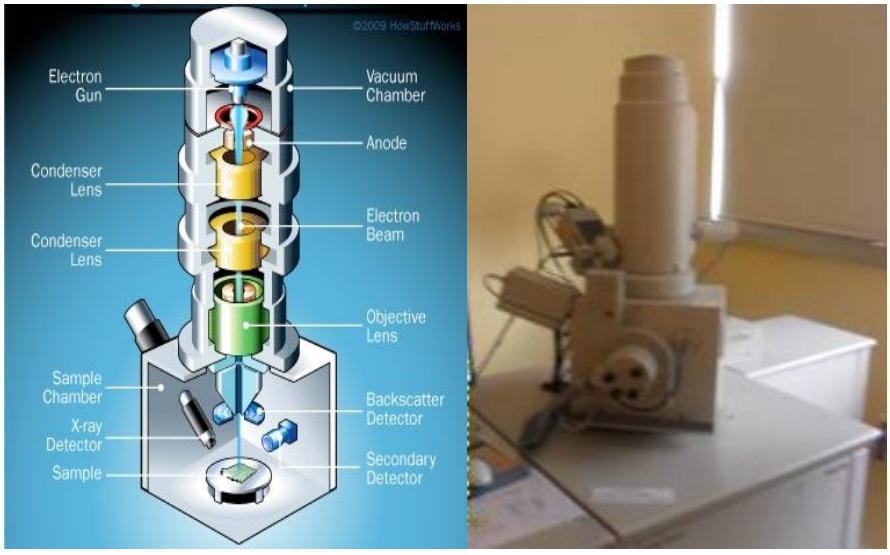
4.3 Taramalı Elektron Mikroskobisinin Temelleri

Taramalı elektron mikroskobisinde amaç optik mikroskopta elde edilemeyen büyütmelerin elektron demetleri yardımıyla elde edilip malzeme yüzeylerinin ve mikro yapılarının incelenmesidir. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) genel işleyişi şu şekildedir. SEM'de, katı numune yüzeyi yüksek enerjili bir elektron demetiyle taranır ve yüzeyden çeşitli türlerde sinyaller oluşturulur. SEM'de (1) taramalı elektron mikroskopisinin temelini oluşturan geri saçılmış ve ikincil elektronlar ve (2) elektron mikroprob analizde kullanılan X- ışını emisyonu yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek veya çok sayıda mercekten oluşan kondensör mercek sistemi, elektron demetinin objektif merceklere ulaştırılmak üzere yönlendirir, objektif mercekler ise numune yüzeyine çarpan elektron demetinin boyutlarından sorumludur. Mercekler genellikle silindirik simetrik olup, 100-150 mm yüksekliğindedir. SEM ile tarama, objektif merceklerin arasına konulmuş iki çift elektromanyetik sarım ile sağlanır. Sarım çiftlerinden bir tanesi, demeti numune boyunca (x) yönünde kaydırırken, diğer çift (y) yönünde saptırır. Tarama sarımlarına uygulanan sinyaller analog veya dijitaldir. Dijital taramanın üstünlüğü, elektron demetinin hareketinin ve incelenecek bölgeyi bulmasının daha iyi şekilde tekrarlanabilir olmasıdır. Numuneden alınan sinyal kodlanır ve demetin (x) ve (y) pozisyonlarını dijital olarak temsil eden formda kaydedilir. Elektron demetinin (x) ve (y) yönünde tarama yapmasını sağlayan sinyalleri yöneten sistem, aynı anda katot ışınları tüpünün (CRT) dikey ve yatay eksenlerinin taranmasını gerçekleştirir. CRT üzerindeki nokta şiddetini kontrol eden bir dedektör çıkış sinyalini kullanarak numunenin bir haritasını oluştururken numunenin yüzeyindeki belirli bir alanda oluşturulan sinyalin CRT ekranında buna karşılık gelen bir nokta ile birebir korelasyonu sağlanır. SEM ile görüntüde sağlanabilecek büyütme (M);

$$M = W / w \qquad \textbf{(4.1)}$$

ile verilir. Burada W, CRT ekranın genişliği, w ise numune boyunca tek bir tarama çizgisinin genişliğidir. W bir sabit olduğundan w'yi azaltmak suretiyle büyütme (M) arttırılabilir. Büyütme faktörü ile numune boyunca tarama genişliği arasındaki ters orantı sebebiyle sonsuz küçük bir noktaya odaklanan elektron demetiyle sonsuz bir büyütme gerçekleştirilebilir. Fakat diğer birçok faktör, ulaşabilecek büyütme oranını 10

kat ile (10 x), 100 000 kat (100 000 x) arasında sınırlar. SEM'de numunelerin hızlı bir şekilde değiştirilebilmesi için numune, numune tutucu ve numune odaları uygun olarak tasarlanmalıdır. Numune tutucular veya raflar, çoğu cihazda bir kenarı birkaç cm'den büyük örneklerin incelenmesine olanak sağlayacak özelliktedir. Bunun yanı sıra numune tutucular x, y, ve z yönlerinde hareket ettirilebilir ve her bir eksen etrafından döndürülebilirler ve bu sayede numunelerin bütün yüzeyleri gözlenebilir. SEM'de çalışması en kolay olan numuneler elektriği iletenlerdir. Bunun sebebi engellenmemiş veya yavaşlatılmamış bir şekilde toprağa akan elektronların yük birikimi nedeniyle oluşan gerçek olmayan yapay verileri en aza indirmesidir. Bunun yanı sıra, elektrik iletkenliği iyi numuneler genellikle ısıyı da iyi ilettiklerinden ısısal bozunma olasılığı da daha azdır. Fakat ne yazık ki çoğu biyolojik ve mineralojik numuneler iletken değildir. İletken olmayan numunelerin SEM görüntülerini elde etmek için çeşitli teknikler mevcuttur. Fakat en çok uygulanan teknikler numune yüzeyine tozlaşma veya vakum da buharlaştırma uygulanarak ince bir metalik film tabakasıyla kaplanmasıdır. Yüzey kaplama işlemlerinde dikkat edilecek nokta, aşırı kalın kaplamanın yüzey ayrıntılarını örtmesidir. Bu nedenle optimum kalınlığın seçilmesi gerekir. [36] Tez çalışmasında yer alan numunelerin mikroyapı görüntülemeleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Philips XL 30 SFEG marka taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır.



(a) **(b)**

Şekil 4.6: Taramalı Elektron Mikroskobu
(a) Taramalı Elektron Mikroskobunun Çalışma Düzeneği [55]
(b) Tez Çalışması İçin Kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu

4.4 X-Işını Spektroskopisi İle Analiz İşlemi

X ışını spektrometreleri genel olarak karakteristik pik şiddetlerinin belirlenebilmesi ve numuneden gelen çok enerjili ışın demetini enerjisine göre ayırır. Spektrometre seçiminde dört önemli faktör rol oynar. Bunlar;

-Ayırma gücü
- Karakteristik pik
-Enerji veya dalga boyu aralığı
-Temel sayma seviyesi

Bu faktörlerin hiçbiri birbirinden bağımsız değildir. Bir spektrometrenin, piklerin ayrılması için yeterli ayırma gücüne sahip olması şarttır. Aynı zamanda spektrometre, ilgilenilen dalga boyu ve enerji bölgesinde ölçüm yapabilme imkanı vermelidir. Yukarıda yer alan faktörler arasındaki bağıntıyı bir örnekle açıklayacak olursak; ayırma gücünün sabit tutulması, mutlak pik şiddetinin düşmesine neden olur. X-ışını spektrometrelerinin ayırma gücü, pikleri ayırma kabiliyeti olarak tarif edilir. Ayırma gücü, herhangi bir kaynak-dedektör mesafesinde kalibre edilmiş kaynaklarla belirlenebilir.

X- ışını spektrometreleri iki kısımda incelenmektedir.

1- Enerji dağılımlı spektrometreler (EDXRF)
2- Dalga boyu dağılımlı spektrometreler (WDXRF)

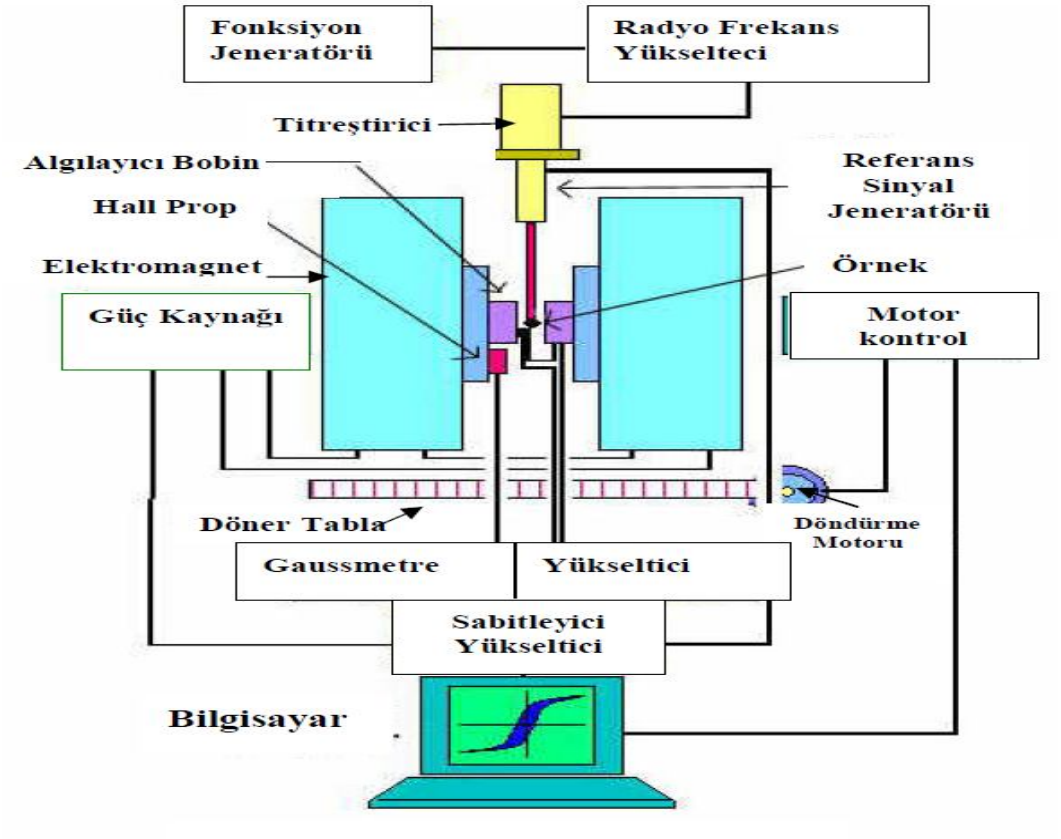
Enerji dağılımlı X- ışını spektrometreleri ile dalga boyu dağılımlı X- ışını spektrometreleri arasında dikkat edilmesi gereken önemli bir fark bulunmaktadır. Bu fark temelde cihazların çalışma prensipleriyle ilgili olup; enerji dağılımlı X- ışını spektrometreleri enerji aralığındaki tüm elementleri aynı anda ölçebilirken, dalga boyu dağılımlı sistemler sadece programlanmış oldukları elementleri ölçebilirler. Her iki sistemde oldukça özel olup; çok yüksek hassasiyete ve aşırı düşük konsantrasyonlu veya çok düşük boyutlu numuneler ile çalışma imkânlarına sahiptirler. Dalga boyu dağılımlı sistemlerde ayırma gücü; 10-100 eV aralığında olup analiz edici kristalin açısal dağılımına ve kolimatör diverjansına bağlıdır. Enerji dağılımlı sistemlerde ise ayırma

gücü; dedektöre ve dedektör amplifikatörüne bağlıdır. Enerji dağılımlı spektrometreler, uyarıcı kaynak, dedektör ve sayma sistemlerinin bir araya getirilmesiyle oluşurlar. EDXRF sistemlerinde dedektörler genel olarak, Si(Li) veya Ge(Li) şeklindedir ve bu sistemlerin ayırma gücü yaklaşık olarak dedektörünkine eşit olduğundan dedektör seçimi çok önemlidir. EDXRF sistemlerinde veriyi oluşturmak, pulsları birbirinden ayırmak ve belirlemek için çok kanallı analizör kullanılır.

Dalga boyu dağılımlı spektrometre sistemi (WDXRF); X ışını tüpü, numune tutucu, birincil kolimatör, kristal ve ardışık sayıcılardan oluşur. WDXRF sistemleri bir kristal ve bir sayıcıdan meydana gelen tek kanallı analizör olarak kullanılabileceği gibi birçok kristal ve detektörden meydana gelen çok kanallı spektrometre olarak da kullanılabilir. Çoklu kristal ve dedektör kullanılması durumunda elementler eş zamanlı olarak ölçülebilir. [56, 57]

Tez çalışmasında yer alan numunelerin elementel içeriğinin tanımlanması amacıyla EDXRF analizleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Philips XL 30 SFEG marka taramalı elektron mikroskobuna bağlı olarak çalışan EDAX marka elementel analiz dedektörü ile yapılmıştır.

4.5 Titreşimli Örnek Magnetometresi (VSM) Çalışma Prensipleri



Şekil 4.7: VSM'in Şematik Gösterimi

Titreşimli Örnek Magnetometresi (VSM : Vibration Samples Magnetometer) ile incelenen numunenin manyetik karakterini belirlenmesi için kullanılan manyetizasyon eğrisi elde edilir. VSM sistemi, örnek titreştirici, elektromagnet gibi ölçüm kısımları, güç kaynağı, kontrol panelleri gibi elektronik kısımlar ile bunlara bağlanmış bir bilgisayardan oluşur. Buna ilaveten düşük sıcaklıklarda ölçüm yapılacaksa elektromagnete bağlı soğutma sistemine ihtiyaç vardır.

VSM, elektromanyetik indüksiyon esasına göre çalışır. Faraday'ın indüksiyon kanununa göre kapalı bir devredeki manyetik akı değişimi, devrede bir indüksiyon e.m.k. oluşturur. Elektromanyetik indüksiyon kavramı, manyetik akı değişiminin indüklenen e.m.k.'ne eşit olduğu söylenerek açıklanır. İndüksiyon e.m.k.'nin oluşabilmesi için manyetik akının zamanla değişmesi gerekir. Bunu gerçekleştirmenin iki yolu mevcuttur. Bunlardan bir tanesi zamanla değişen manyetik alan uygulamak, diğeri ise dc manyetik alana konan örneği titreştirmektir. VSM'in çalışma prensibi,

manyetik alanda titreşen örnekle manyetik akı değişimi oluşturulması ve bu manyetik akı değişimi sonucu oluşan indüksiyon e.m.k.'nin ölçülmesine dayanır. İndüklenen e.m.k. titreşen örneğin manyetizasyonu ile orantılı olduğundan örneğin manyetizasyonu belirlenebilir.

VSM ile manyetizasyonun ölçümü yapılırken algılayıcı bobinler, arasındaki boşlukta örnek varken ve örnek yokken ölçülen manyetik indüksiyon arasındaki fark hesaplanır. Ölçüm sonucu elde edilen veriler uygulanan manyetik alana göre manyetizasyonun değişimini vermekle sınırlıdır. Ölçüm yapıldıktan sonra elde edilen verilerin keyfi değerler olmaktan çıkması için bir standarda göre değerlendirilmesi gerekir. Örneğin gerçek manyetizasyon değerinin ortaya konması için sistem, manyetik moment değeri bilinen standart numune ile kalibre edilir. Tez çalışmasında yer alan numuneler için kalibrasyonda, numunelerimizin boyutlarına benzer Ni standart kullanılmıştır. Ni standardın bilinen manyetik moment değerinin, VSM ile ölçülen manyetik moment değerine oranı kalibrasyon sabiti olarak hesaplanıp numunelerimizin gerçek manyetik moment değerleri ortaya konmuştur. Kalibrasyondan sonra VSM, tüm ölçümler için aynı hesaplamayı yaparak ölçülen örnek için gerçek manyetik moment değerlerinin, uygulanan manyetik alana karşı değişimini vermiştir. Problem öngörülen ölçümlerin ardından da kalibrasyon yapılmış ve ölçümler tekrarlanmıştır. Örnek tutucunun istenen açılarla döndürülmesiyle farklı yönlerde uygulanan manyetik alan altında ölçüm yapmak da mümkündür ancak tez çalışmasında yer alan örneklerde numuneler arası karşılaştırma yapabilmek için örnekler örnek tutucuya aynı açıyla yerleştirilmiştir. İstenen değerler arasında istenen aralıklarla uygulanan manyetik alana karşı ölçülen manyetik moment değerleriyle numunelerin histerisis eğrileri elde edilmiştir.

Tez çalışmasında; ölçümler için kullanılan elektromagnet ± 8000 Oe manyetik alan aralığında çalışabilmektedir. Sistem yazılımı, VSM'in çalışmasını kontrol etmesinin yanı sıra kalibrasyonda ve dataların toplanıp anlamlandırılmasında ve gösterilmesinde de kullanılır. Numunelerin manyetik ölçümleri İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Magnetizma Laboratuarı'nda bulunan VSM sistemi ile yapılmıştır. [11, 46]

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık ve Boyut Ölçümleri

Numunelerin fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinmek amacıyla numune hazırlanmasının çeşitli aşamalarında hassas terazi yardımıyla ağırlık, dijital kumpas yardımıyla boyut ölçümleri yapılmıştır. Alınan ölçümler aşağıda tablolar halinde verilmektedir.

Tablo 5.1: Bileşim 1 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık Ölçümleri

Bileşim 1 ($NiO_{0,15}ZnO_{0,85}Fe_2O_3$)							
Sinterleme Sıcaklığı (^oC)		Pres Öncesi Ağırlık (g)	Sinterleme Öncesi Ağırlık (g)	Sinterleme İşlemine Kadar Olan % Ağırlık Kaybı	Sinterleme Sonrası Ağırlık (g)	Sinterleme Esnasında % Ağırlık Kaybı	Manyetik Ölçüm Ağırlığı (g)
1000	**N1***	1	0,9754	2,4600	0,9527	2,3273	Manyetik Ölçüm Yapılmadı
	N2	1	0,9741	2,5900	0,9500	2,4741	0,0924
1200	**N1**	1	0,9646	3,5400	0,9400	2,5503	0,1263
	N2	1	0,9567	4,3300	0,9255	3,2612	Manyetik Ölçüm Yapılmadı
1400	**N1**	1	0,9746	2,5400	0,9389	3,6630	0,1126
	N2	1	0,9389	6,1100	0,9071	3,3869	Manyetik Ölçüm Yapılmadı

*N1 → Numune 1

Tablo 5.2: Bileşim 2 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık Ölçümleri

Bileşim 2 ($NiO_{0,50}ZnO_{0,50}Fe_2O_3$)							
Sinterleme Sıcaklığı (°C)		Pres Öncesi Ağırlık (g)	Sinterleme Öncesi Ağırlık (g)	Sinterleme İşlemine Kadar Olan % Ağırlık Kaybı	Sinterleme Sonrası Ağırlık (g)	Sinterleme Esnasında % Ağırlık Kaybı	Manyetik Ölçüm Ağırlığı (g)
1000	**N1**	1	0,9776	2,2400	0,9454	3,2938	0,0737
	N2	1	0,9808	1,9200	0,9474	3,4054	Manyetik Ölçüm Yapılmadı
1200	**N1**	1	0,9839	1,6100	0,9498	3,4658	0,0764
	N2	1	0,9820	1,8000	0,9475	3,5132	Manyetik Ölçüm Yapılmadı
1400	**N1**	1	0,9830	1,7000	0,9423	4,1404	0,1397
	N2	1	0,9805	1,9500	0,9406	4,0694	Manyetik Ölçüm Yapılmadı

Tablo 5.3: Bileşim 3 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Ağırlık Ölçümleri

Bileşim 3 ($NiO_{0,85}ZnO_{0,15}Fe_2O_3$)							
Sinterleme Sıcaklığı (°C)		Pres Öncesi Ağırlık (g)	Sinterleme Öncesi Ağırlık (g)	Sinterleme İşlemine Kadar Olan % Ağırlık Kaybı	Sinterleme Sonrası Ağırlık (g)	Sinterleme Esnasında % Ağırlık Kaybı	Manyetik Ölçüm Ağırlığı (g)
1000	**N1**	1	0,9515	4,8500	0,9042	4,9711	Manyetik Ölçüm Yapılmadı
	N2	1	0,9797	2,0300	0,9344	4,6239	0,1062
1200	**N1**	1	0,9742	2,5800	0,9311	4,4241	Manyetik Ölçüm Yapılmadı
	N2	1	0,9241	7,5900	0,8801	4,7614	0,1066
1400	**N1**	1	0,9724	2,7600	0,9234	5,0391	Manyetik Ölçüm Yapılmadı
	N2	1	0,9713	2,8700	0,9227	5,0036	0,1093

Tablo 5.4: Bileşim 1 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Boyut Ölçümleri

Bileşim 1 ($NiO_{0,15}ZnO_{0,85}Fe_2O_3$)						
Sinterleme Sıcaklığı (^oC)		Sinter Öncesi Çap/ Yükseklik (cm)		Sinter Sonrası Çap/Yükseklik (cm)		Sinterlemede % Hacim Küçülmesi
1000	**N1***	15,06	2,26	14,32	2,29	**8,3857**
	N2	15,03	2,48	14,34	2,41	**11,5403**
1200	**N1**	15,02	2,57	11,60	2,14	**50,3343**
	N2	15,10	2,30	12,32	1,81	**47,6136**
1400	**N1**	15,04	2,53	11,36	1,87	**57,8321**
	N2	15,16	2,65	11,26	1,93	**59,8219**

Tablo 5.5: Bileşim 2 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Boyut Ölçümleri

Bileşim 2 ($NiO_{0,50}ZnO_{0,50}Fe_2O_3$)						
Sinterleme Sıcaklığı (^oC)		Sinter Öncesi Çap/ Yükseklik (cm)		Sinter Sonrası Çap/Yükseklik (cm)		Sinterlemede % Hacim Küçülmesi
1000	**N1***	14,99	2,76	13,56	2,51	**25,5815**
	N2	15,01	2,46	13,59	2,27	**24,3571**
1200	**N1**	15,04	2,75	12,17	2,12	**49,5236**
	N2	15,03	2,54	12,49	2,01	**45,3526**
1400	**N1**	14,99	2,80	11,19	2,04	**59,3997**
	N2	14,99	2,79	11,16	2,01	**60,0684**

Tablo 5.6: Bileşim 3 Numunelerinin Sinterleme Öncesi ve Sonrası Boyut Ölçümleri

Bileşim 3 ($NiO_{0,85}ZnO_{0,15}Fe_2O_3$)						
Sinterleme Sıcaklığı (^oC)		Sinter Öncesi Çap/ Yükseklik (cm)		Sinter Sonrası Çap/Yükseklik (cm)		Sinterlemede % Hacim Küçülmesi
1000	**N1***	15,16	1,92	13,46	1,75	**28,1497**
	N2	15,00	2,33	13,27	2,10	**29,4621**
1200	**N1**	15,04	2,40	12,26	1,96	**45,7337**
	N2	15,08	2,02	*11,95-12,73*	*3,01-1,74*	**-**
1400	**N1**	15,06	2,44	11,45	1,97	**53,3300**
	N2	15,00	2,41	11,56	1,82	**55,1474**

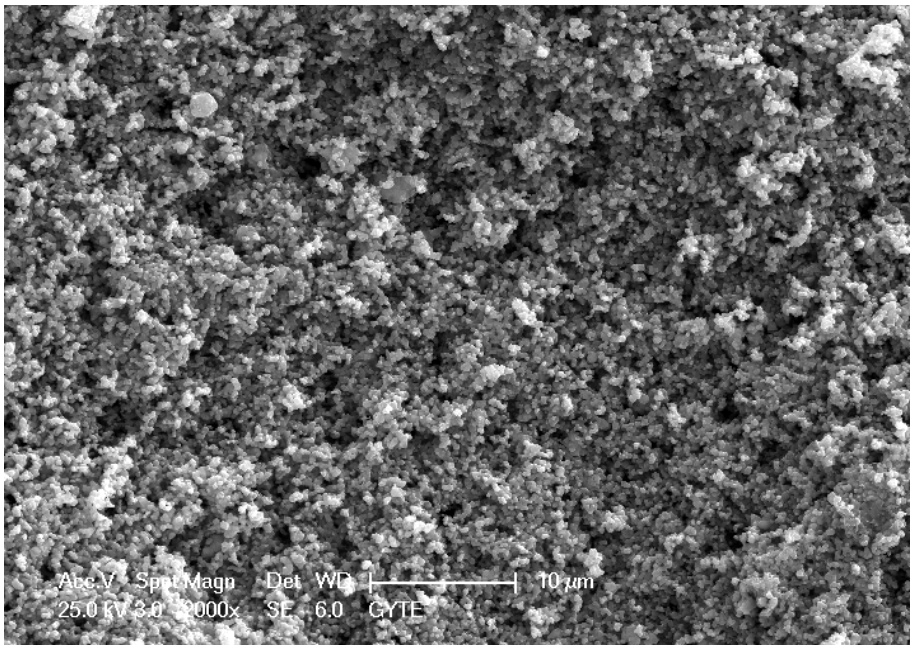
Numunelerimizin üretim aşamalarında yapılan boyut ve ağırlık ölçümleri yukarıdaki tablolarda detaylı olarak verilmiştir. Numune ağırlıkları 0,0001 g hassasiyetli hassas tartı ile boyutları ise 0,01 cm hassasiyetli dijital kumpas ile ölçülmüştür. Numunelerin ağırlık ve boyut ölçümleri tekrarlanarak ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır. Tablolar incelendiğinde %1,61-7,59 aralığında sinterleme işlemine kadar olan % ağırlık kaybı görülmektedir. Bunun sebebi presleme sırasında kullanılan kalıba konulan tozların dışarı taşması ve fiziksel olarak sinterleme öncesi numunelerin temas ettikleri yüzeylere (boyut ölçümleri sırasında kumpas, ağırlık ölçümleri sırasında hassas teraziye ve sinterleme aşamasına kadar durdukları yüzeyler, çalışma sırasında eldiven vb.) sırasında bir miktar nüfuz etmiş olmalarıdır. Aslında gram olarak 0,01 gram ila 0,08 gram gibi düşük ağırlık kayıpları meydana geliş olup bu da deney esnasında dikkatli ve hassas çalışıldığının bir göstergesidir. Ancak bunun yanında presleme sırasında kullanılan kalıbın dizaynı değiştirilerek ve numuneleri presleme sonrası sinterleme aşamasına kadar nispeten daha az tutunacakları veya hiç tutunmayacakları bir yüzeyde bekletilmesi, çap ve boyut ölçümleri sırasında kumpasa, ağırlık ölçümleri esnasında hassas terazi yüzeyine, çalışma sırasında kullanılan eldivenlere bulaşmamasında vb. dikkat edilerek ve sonuçta nispeten daha hassas çalışılmasıyla

sinterleme aşamasına kadar olan ağırlık kaybı azaltılıp elde bulunan hammadde daha verimli kullanılabilir. Bunun yanında sinterleme esnasında numunelerin içindeki nem vs. uçmasından ve sinterlemenin yapıldığı alümina plaka üzerine numunelerin bir kısmının tutunmasından dolayı %2,32 ile %5,04 aralığında ağırlık kayıpları yaşanmıştır. Tablolara dikkat edildiğinde ağırlık kayıplarının sinterleme sıcaklığıyla paralel olarak arttığı görülmektedir. Bu öngörülen bir sonuçtur.

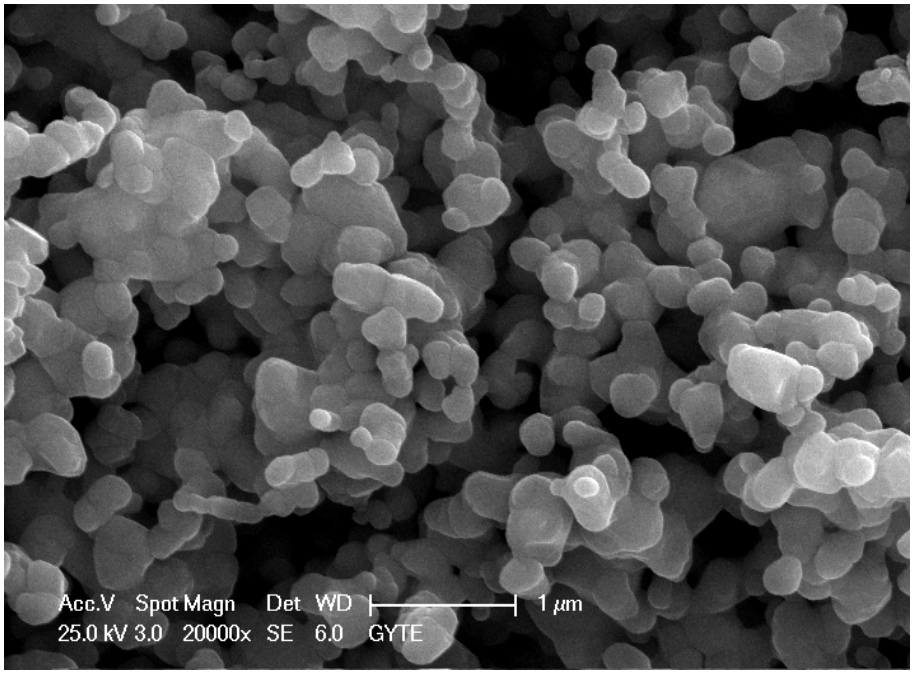
Boyut ölçümü tablolarında numunelerin presleme sonrasında ve sinterleme sonrasında çap/yükseklik ölçümleri ile % hacim küçülmeleri yer almaktadır. Numunelerimizde sıcaklık ve bileşime bağlı olarak %8,38 ila %60,06 aralığında % hacim küçülmeleri gözlemlenmektedir. (Tablo 5.6'da yer alan Bileşim 3'ün 1200 ^{o}C Numune 2 sinterleme esnasında diğer numunelere nispeten homojen bir boyut küçülmesine uğramamıştır. Bunun için % hacim küçülmesi hesaplanmamıştır.)

5.2 SEM Görüntüleri

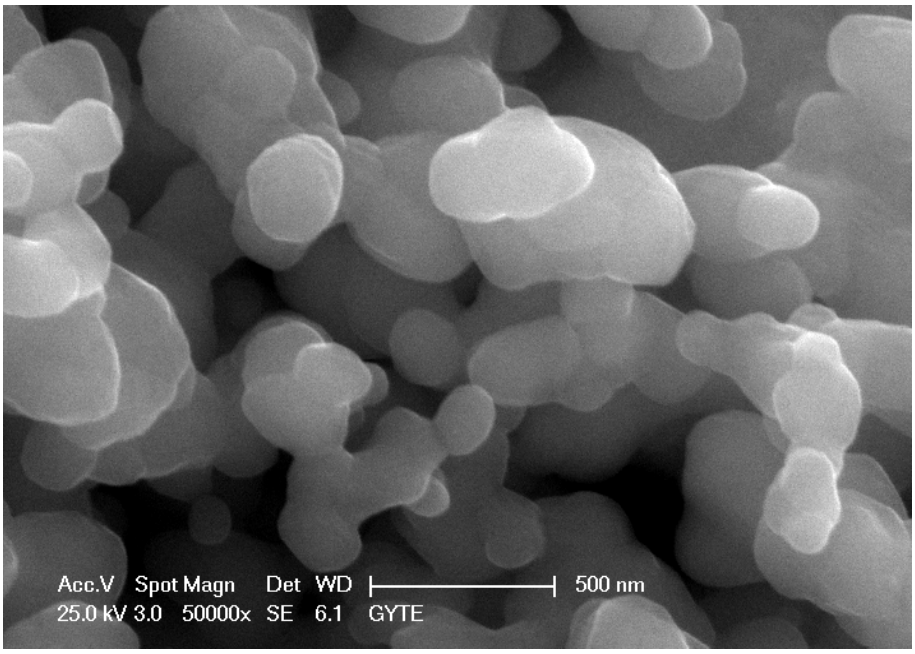
Tez çalışmasında yer alan numunelerin mikroyapı görüntülemeleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Philips XL 30 SFEG marka taramalı elektron mikroskobunda yapılmış olup tane boyutu ve yapısının karşılaştırılmalı olarak değerlendirilebilmesi için 2000, 20000 ve 50000 büyütmelerde görüntülemeler alınmıştır.



Şekil 5.1: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü

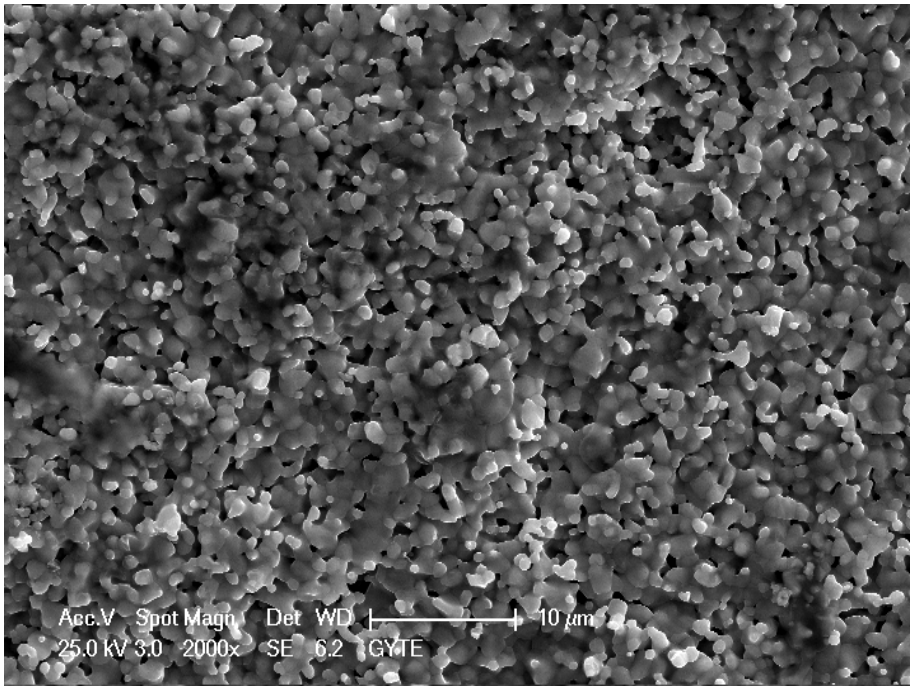


Şekil 5.2: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü

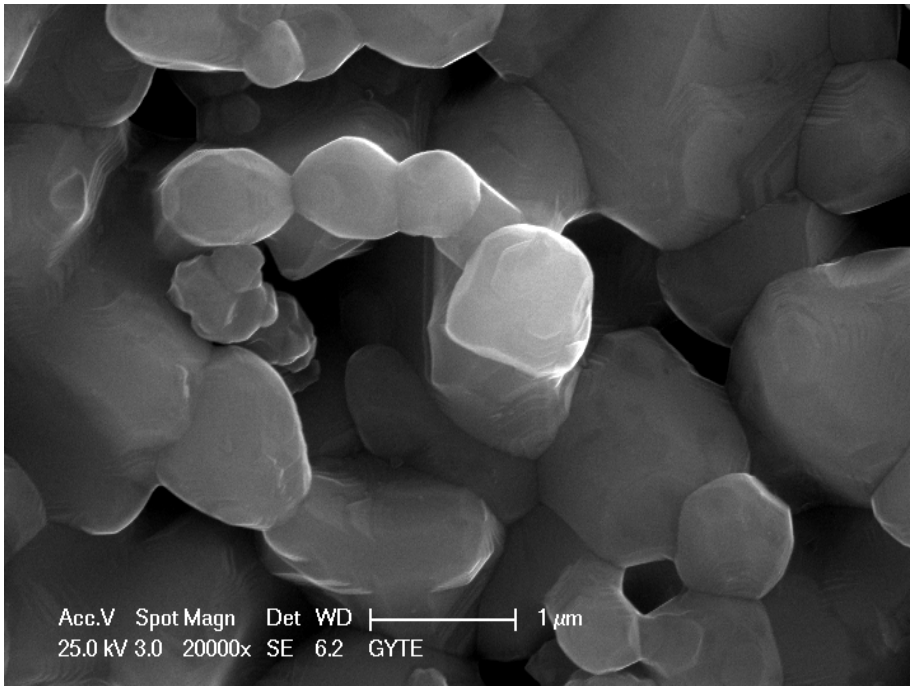


Şekil 5.3: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü

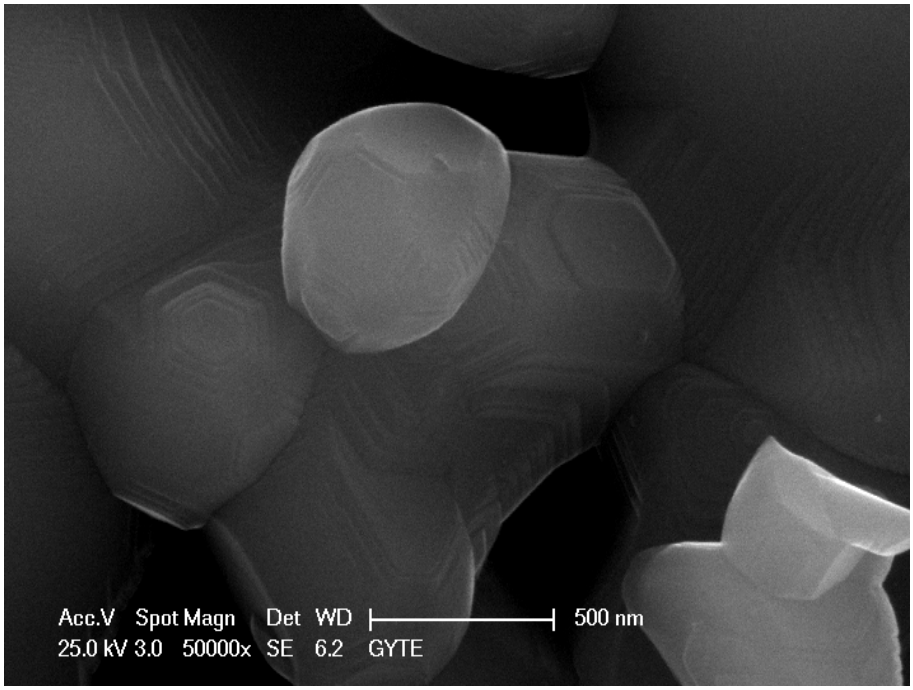
Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin SEM fotoğraflarında 200 ila 500 nm arasında tane boyutuna sahip boyun verme aşamasına yeni geçmiş taneler görülmektedir. Tane şekilleri genellikle küresele yakın olmakla birlikte tane boyutu büyüdükçe şekilleri de küreselden uzaklaşmaktadır.



Şekil 5.4: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü



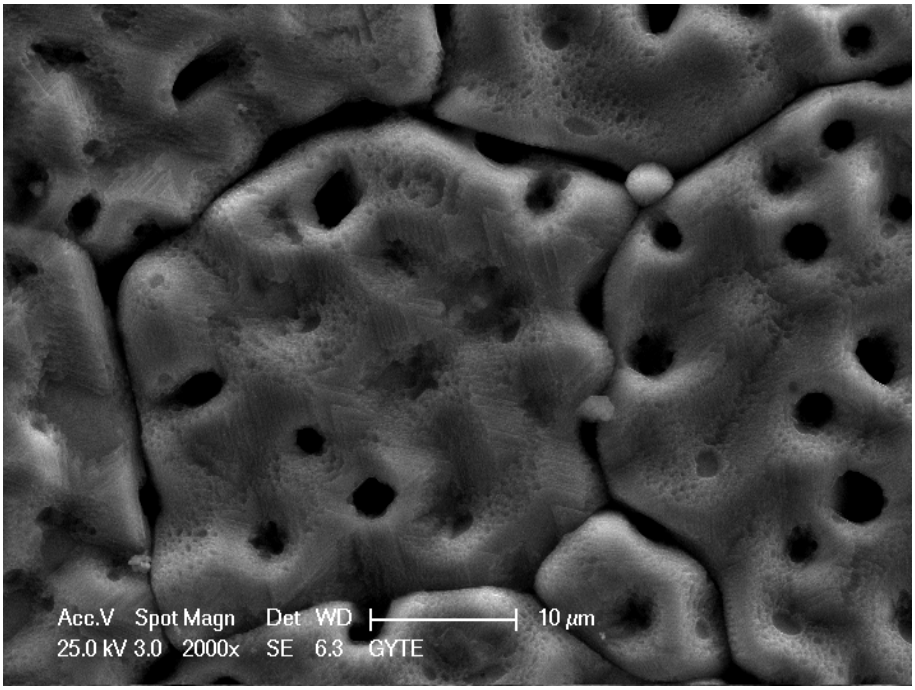
Şekil 5.5: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü



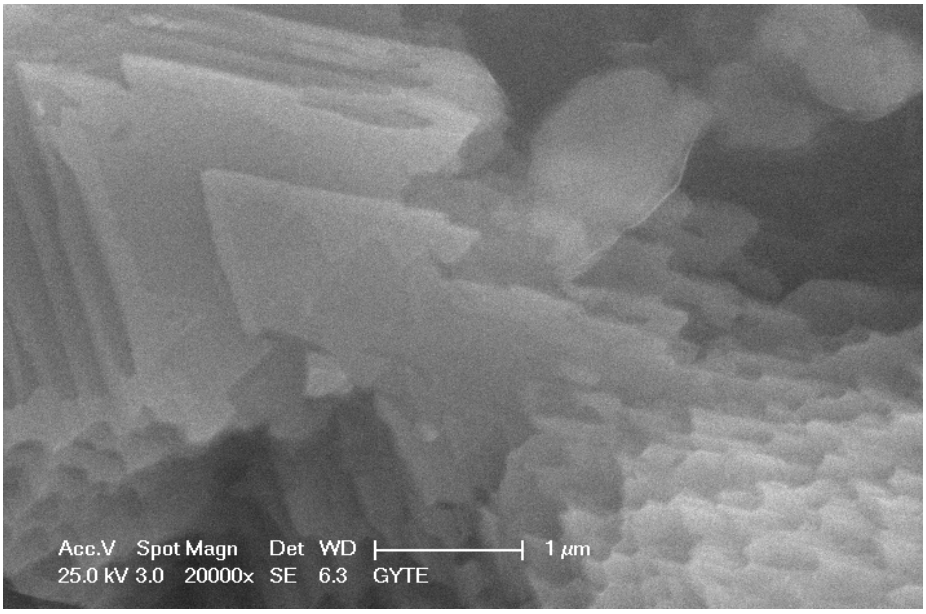
Şekil 5.6: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü

Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin SEM fotoğraflarında sıcaklığın etkisiyle tane boyutlarının büyüdüğü görülmektedir. Mikro yapı fotoğraflarında 400 nm ila 1 μm arasında tane boyutuna sahip boyun verme aşamasına yeni geçmiş taneler ile boyun vermenin ileri safhalarındaki taneler görülmektedir. Tane şekilleri genellikle küresele yakın olmakla birlikte tane boyutu büyüdükçe ve boyun vermenin ileri safhalarına geçildikçe şekilleri de küreselden uzaklaşmaktadır. Şekil 5.6'da boyun verme aşamasının ileri safhasında olan 2 taneye yeni tutunmuş küresele yakın şekilli bir tane görülmektedir. Ayrıca 1000 ^{o}C ve 1200 ^{o}C'de sinterlenmiş numunelerde 500 nm ile 1 μm arasında taneler arası boşluklar görülmektedir.

A.M. EL-SAYED 'in makalesinde 1250 ^{o}C 4 saat sinterlenmiş $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ x=0,1/0,3/0,5/0,7/0,9 için SEM incelemeleri mevcuttur. Makalede yer alan tanelerin morfolojileri tez çalışmasında yer alan morfolojilerle paralellik göstermektedir. Ancak sinterleme süresinin etkisinden kaynaklanan tane boyutlarında büyümeler gözlemlenmektedir.[58]



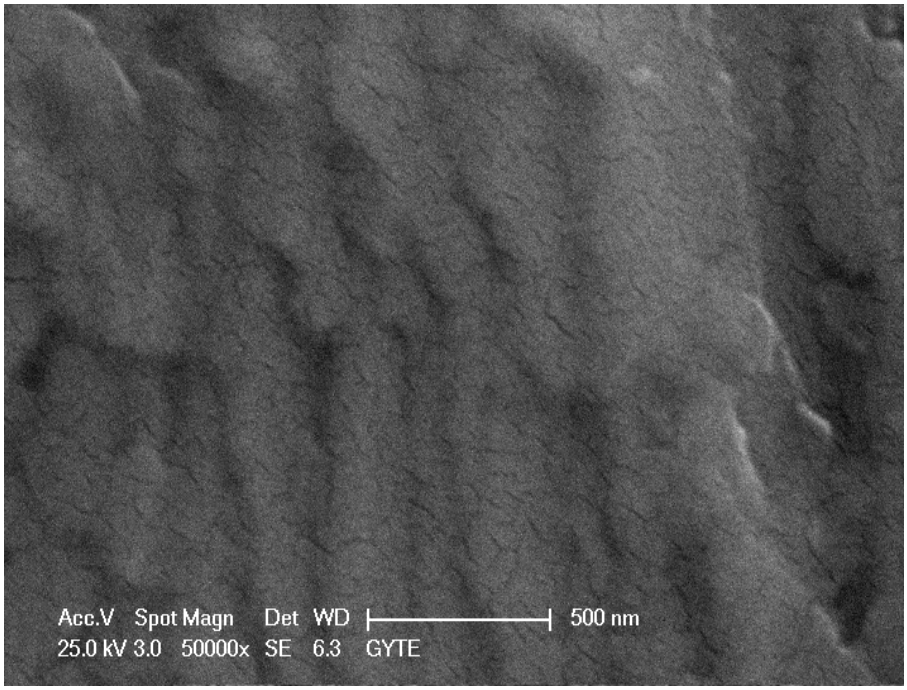
Şekil 5.7: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü



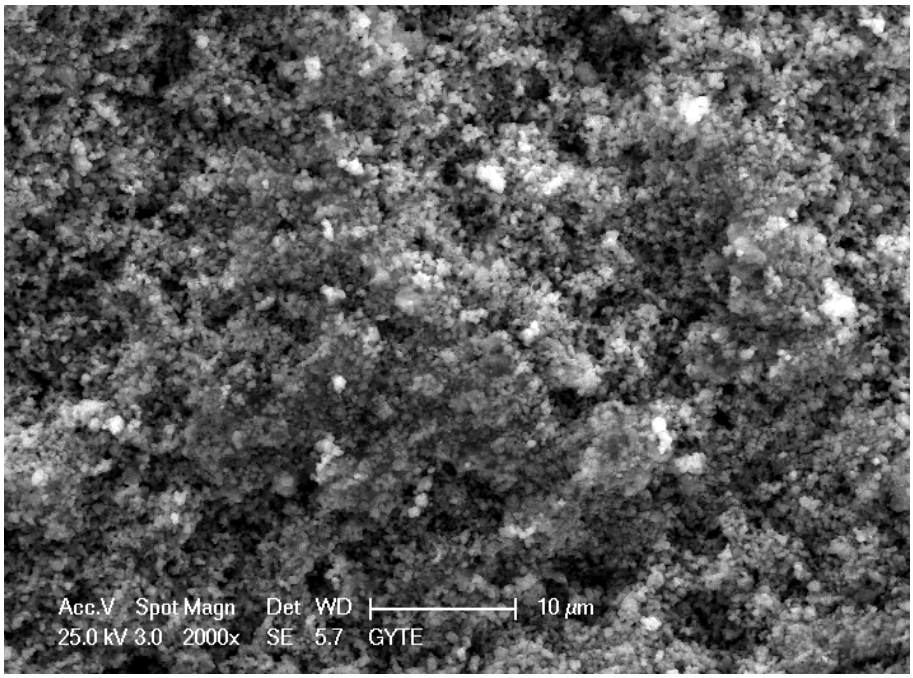
Şekil 5.8: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü

Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin SEM fotoğraflarında 1200 ^{o}C de sinterlenen numunelerde görünen ileri boyun verme aşaması geçilmiş ve tanelerde birleşmeler gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda 15μm ila 20μm çapında taneler oluşmuştur. Bu büyük tanelerin içinde ortalama çapı 1μm civarında olan 5-8 adet civarı

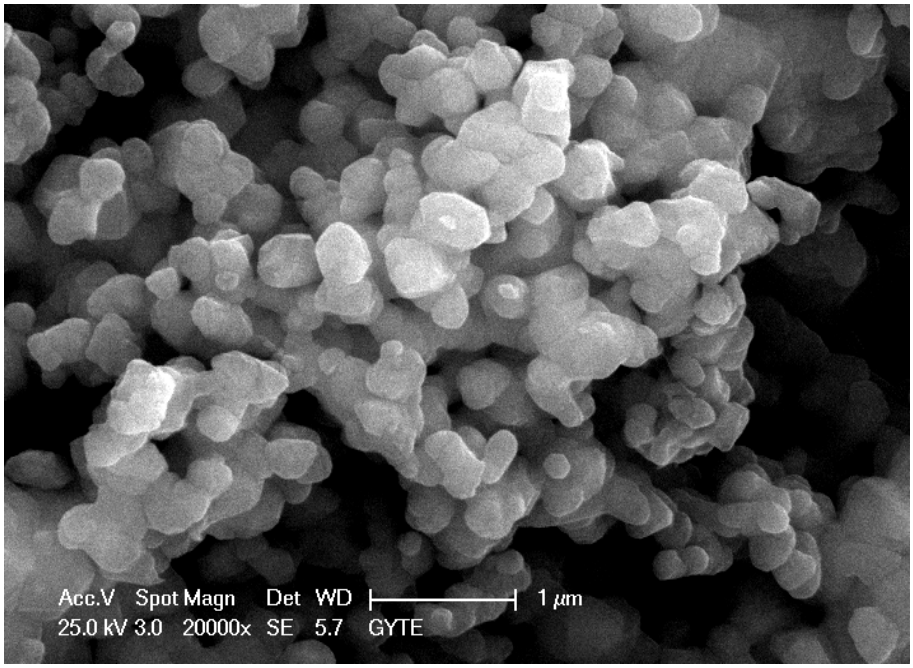
tane içi kapalı boşluklar görülmektedir. Bu tanelerin yanında nispeten daha küçük taneler de mevcuttur. Ayrıca büyük tanelerin birbiri arasındaki sınırlarda 200 nm ile 1 μm arasında boşluklar bulunmaktadır.



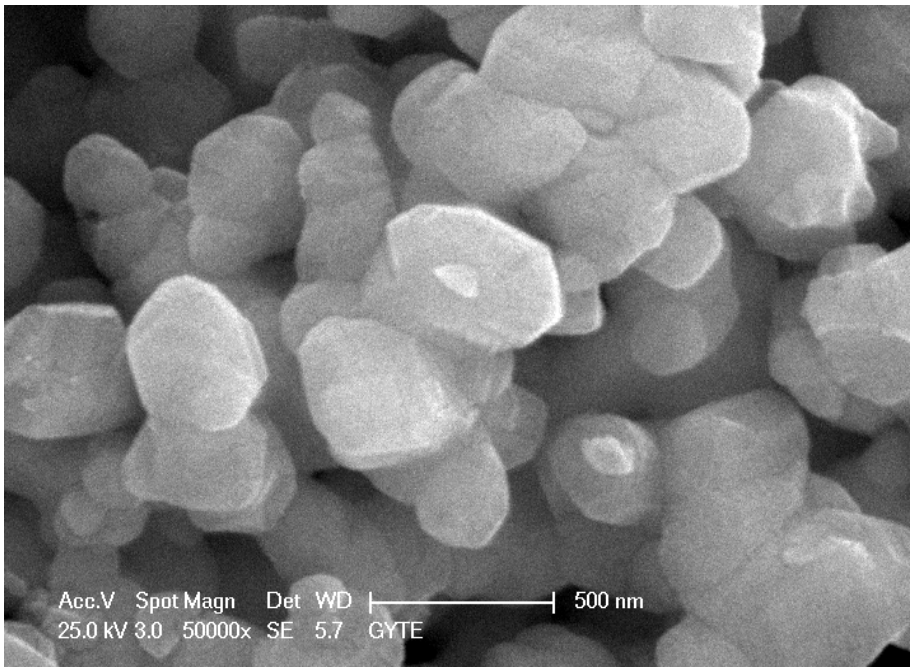
Şekil 5.9: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü



Şekil 5. 10: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü

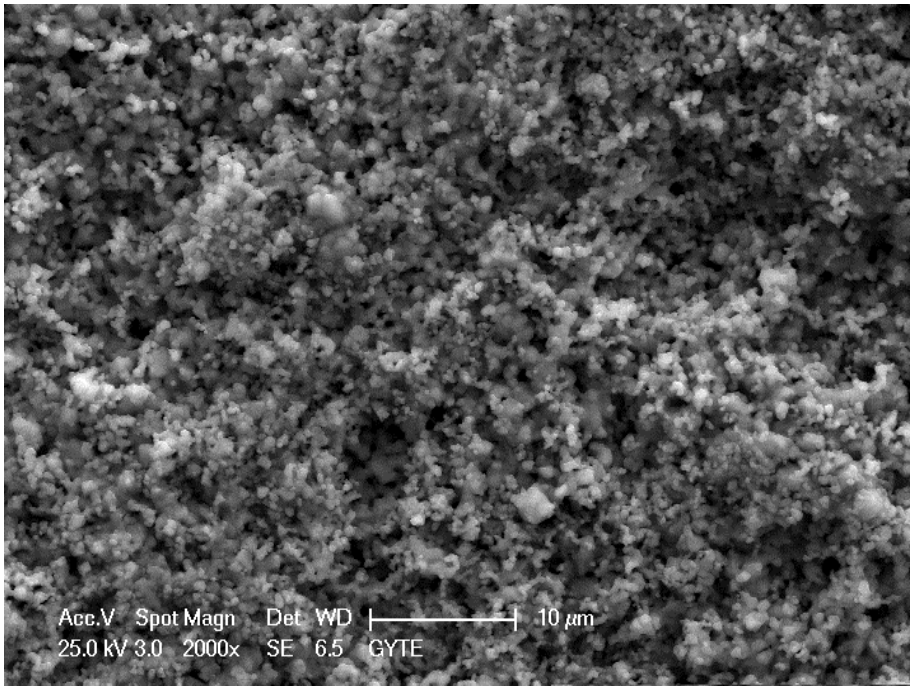


Şekil 5.11: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü

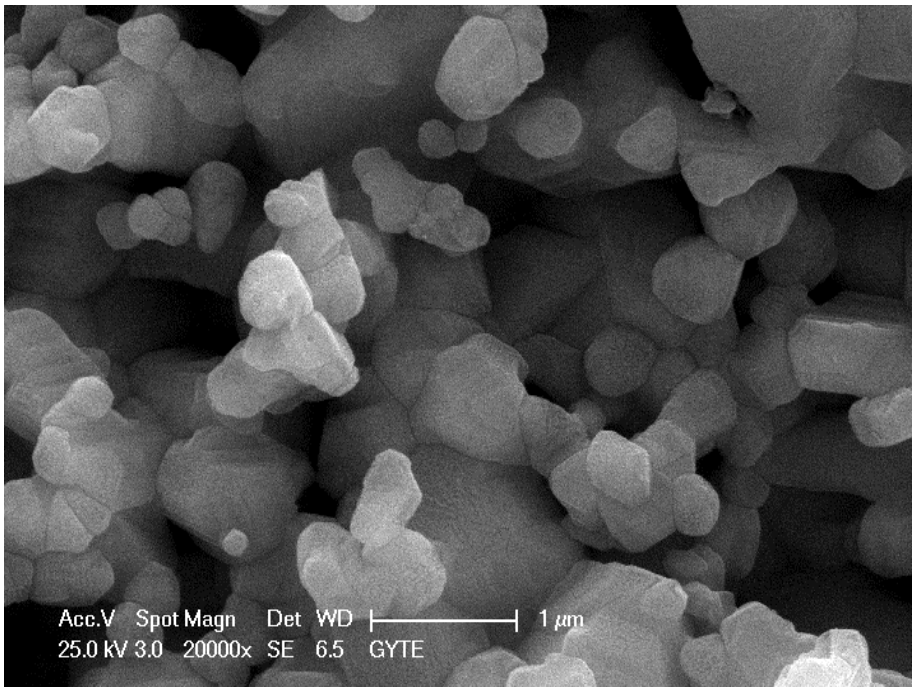


Şekil 5.12: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü

Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'in mikro yapı fotoğraflarında 200 nm civarı tane boyutuna sahip küresellikten uzaklaşmaya başlamış taneler ile birkaç tanenin bir arada tutunduğu yapılar görülmektedir. Taneler arası boşluklar mevcuttur.



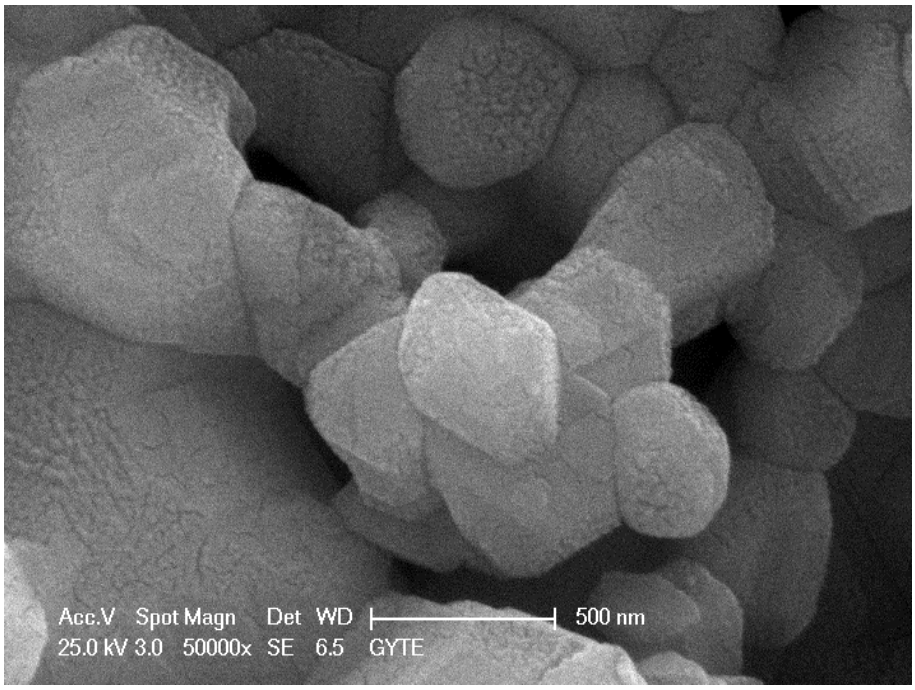
Şekil 5.13: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü



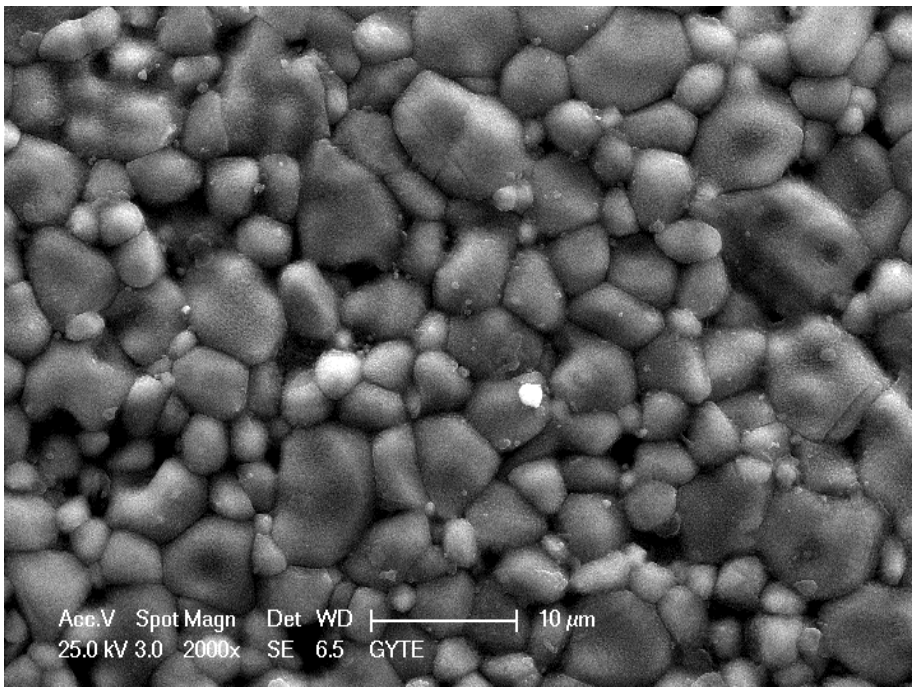
Şekil 5.14: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü

Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'de 1000 ^{o}C'de sinterlemeye göre tanelerin birleştiği ve birleşmiş tanelerde tane sınırlarının ortadan kalktığı görülmektedir. Bunun yanında boyun verme aşamasının ilk aşamasında birbirine yeni tutunmuş boyutları 200

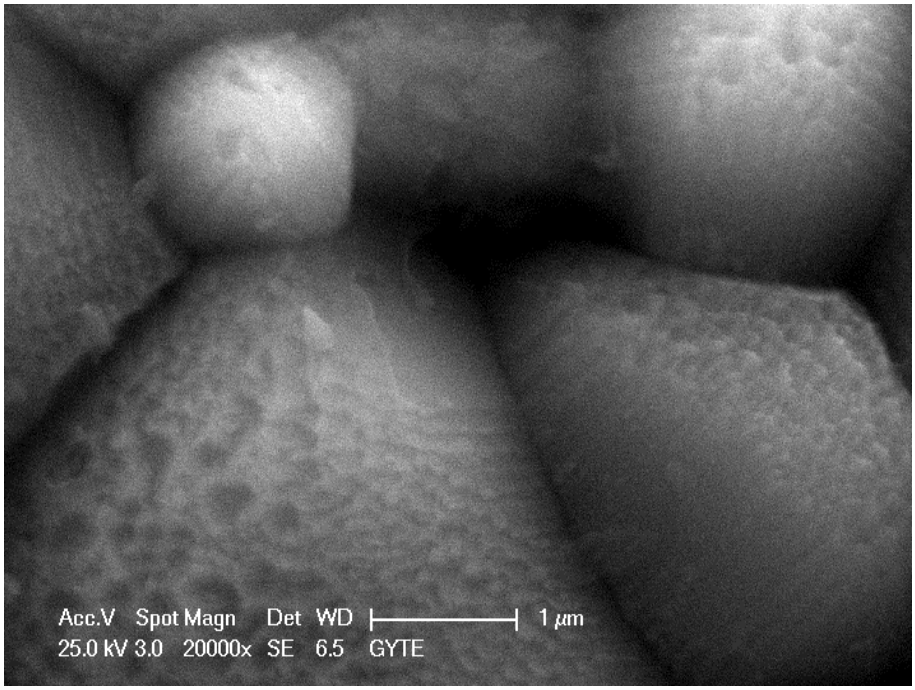
nm ile 500 nm arasında olan küçük boyutlu tanelerde mevcuttur. Taneler arası boşlukların 1000 ^{o}C'de sinterlemeye göre küçüldükleri gözlemlenmektedir.



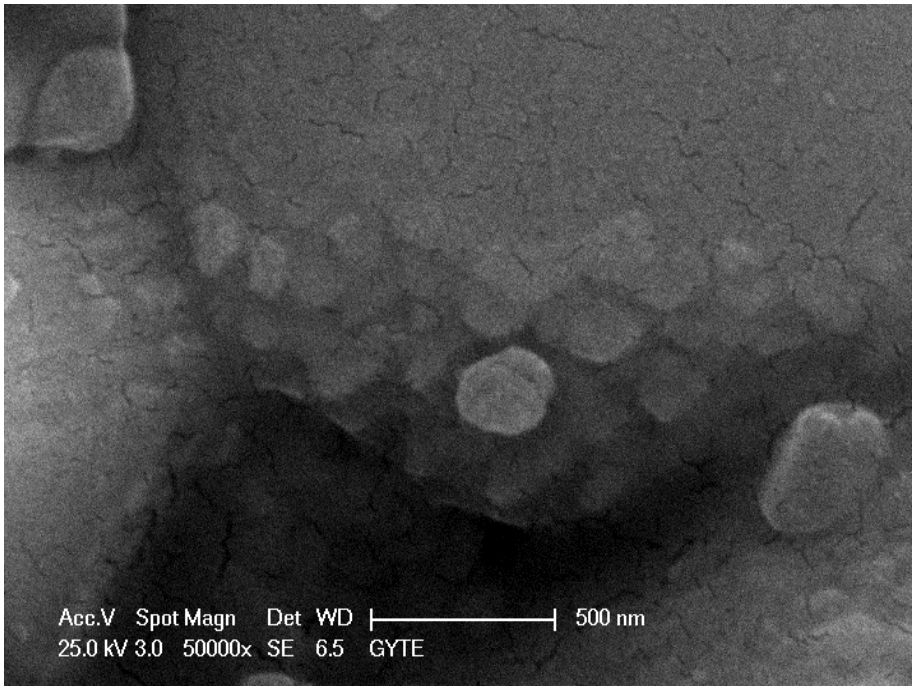
Şekil 5.15: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü



Şekil 5.16: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü



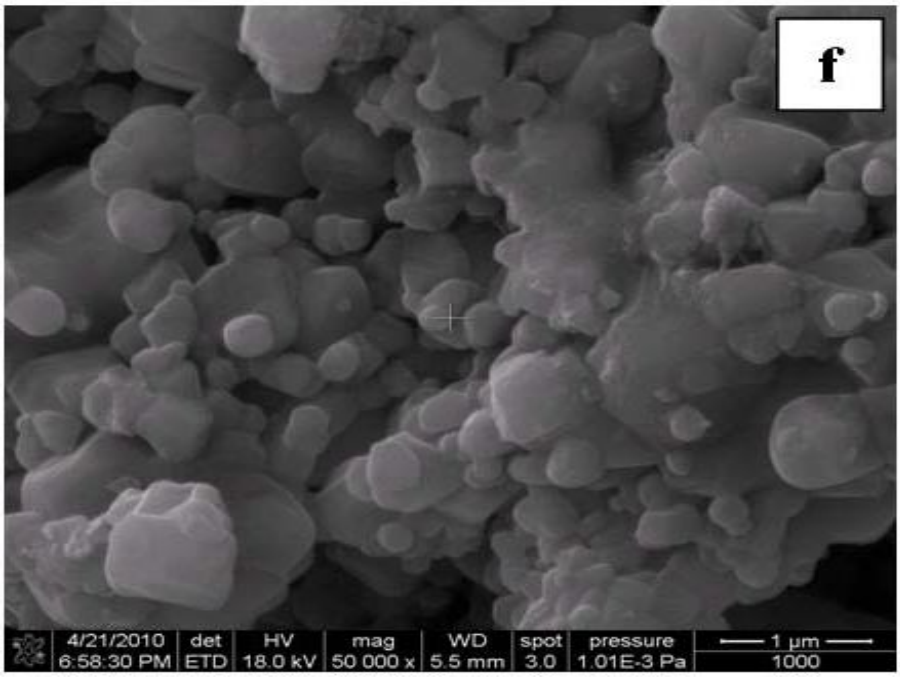
Şekil 5.17: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü



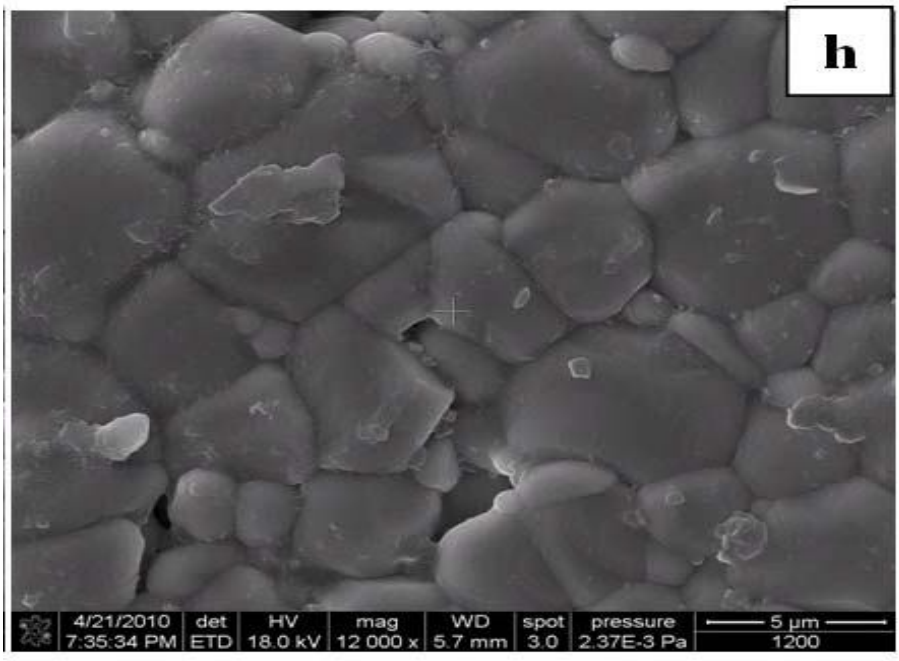
Şekil 5.18: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü

Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin SEM görüntülemelerinde boyutları 7-8 µm'ye varan iri taneler ile 1 µm civarı olan küçük taneler görülmektedir. İri tanelerin

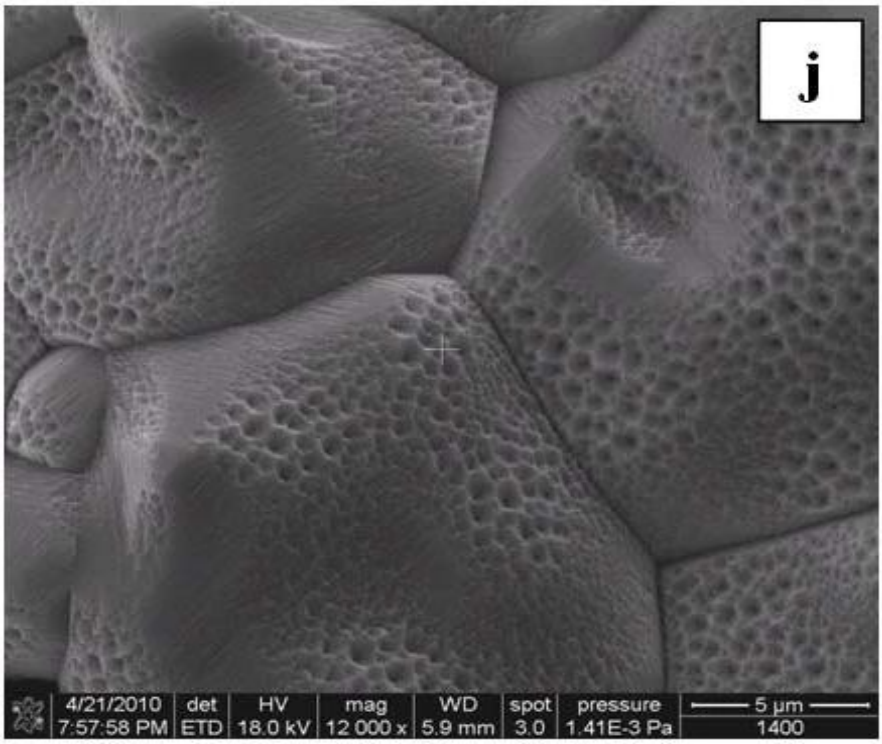
düzenlenmelerinin tam olmamasından kaynaklanan 500 nm ile 1µm arasında boşluklar görülmekle birlikte tanelerin iyi düzenlendikleri yönlerdeki sınırlarında 500 nm'nin çok altındaki boşluklar mevcuttur.



Şekil 5.19: Ismayadi Ismail ve Mansor Hashim'in Çalışmasında Yer Alan $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Yapısının 1000 ^oC'de 10 Saat Sinterlenmesiyle Elde Edilen Yapı [60]

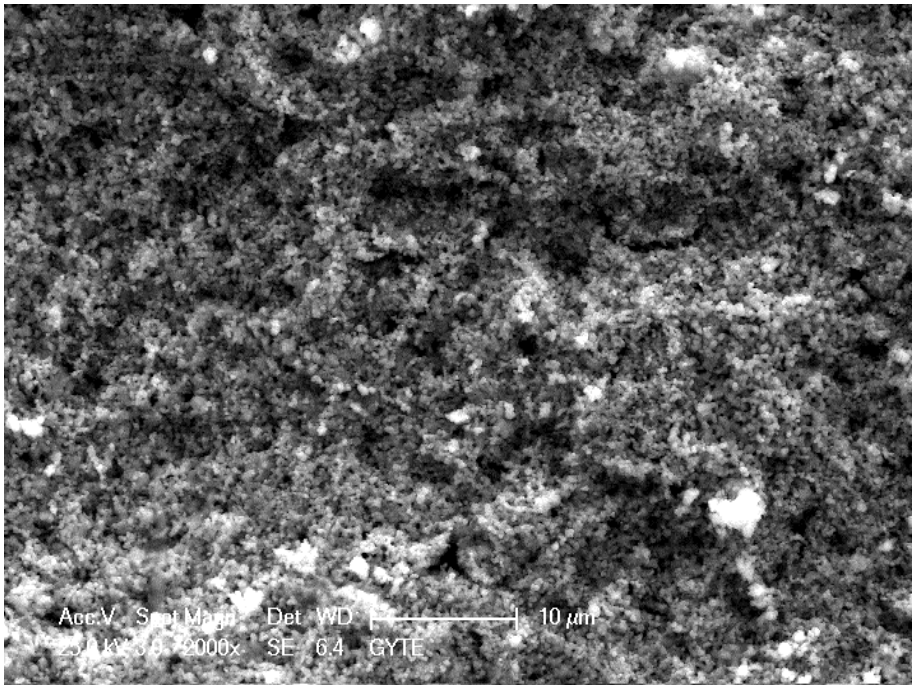


Şekil 5.20: Ismayadi Ismail ve Mansor Hashim'in Çalışmasında Yer Alan $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Yapısının 1200 ^oC'de 10 Saat Sinterlenmesiyle Elde Edilen Yapı [60]

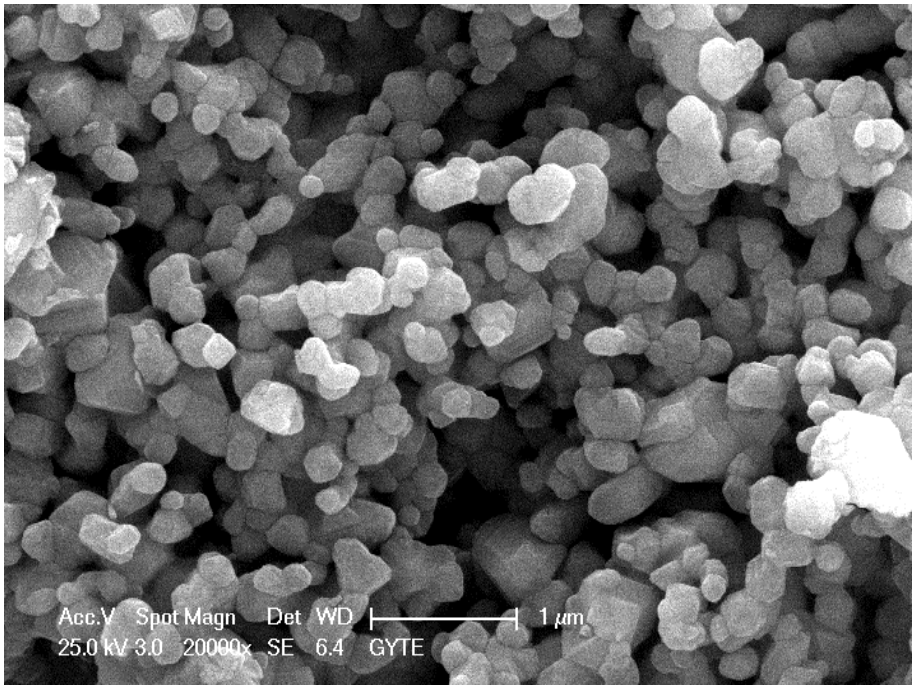


Şekil 5.21: Ismayadi Ismail ve Mansor Hashim'in Çalışmasında Yer Alan $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Yapısının 1400 ^oC'de 10 Saat Sinterlenmesiyle Elde Edilen Yapı [60]

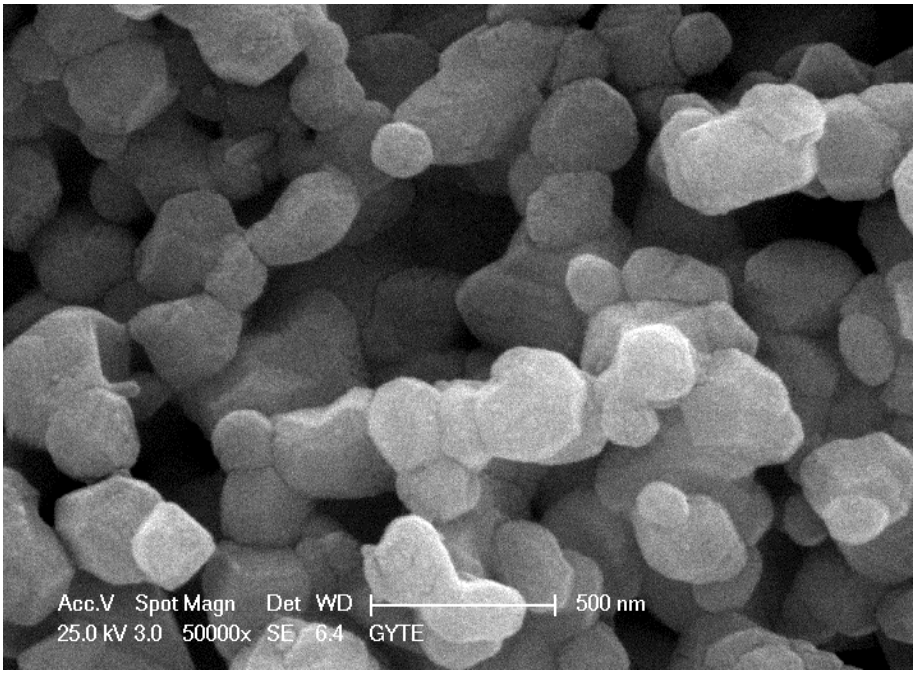
Ismayadi ISMAİL ve Mansor HASHİM'in çalışmasında $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ yapısını 500 ^oC ile 1400 ^oC'de 10 saat hava atmosferinde sinterlenmiş yapıdaki tane büyümeleri ile yapının manyetik özelliklerini belirlemeye çalışmıştır. Yukarıda karşılaştırma amacıyla Ismayadi Ismail ve Mansor Hashim'in çalışmasında yer alan $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ yapısının 1000 ^oC, 1200 ^oC ve 1400 ^oC'de 10 Saat sinterlenmesiyle elde edilen mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Yukarıda verilen fotoğraflarla tez çalışmasında elde edilen fotoğraflar morfoloji açısından birbirine benzemektedir. Ancak sinterleme sürelerinin farklı oluşundan kaynaklanan tane boyutlarında, tane içi boşluklar ve taneler arasındaki boşlukların boyutlarında farklılıklar mevcuttur. Sinterleme süresinin artmasıyla birlikte tane boyutlarında artış; tane içi boşluklar ve taneler arasındaki boşlukların boyutlarında küçülme gözlemlenmektedir. [60] Bunun yanında A.C.F.M. COSTA ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ yapısı 1100 ^oC, 1200 ^oC 1300 ^oC ve 1400 ^oC'de 2 Saat sinterlenmiş olup mikro yapıları ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada yer alan örneklerin morfolojileri tez çalışmasında elde edilen örneklerle paralellik göstermekte olup sinterleme süresinden kaynaklanan farklılar mevcut ve değerlendirmeye açıktır. [61]



Şekil 5.22: Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü

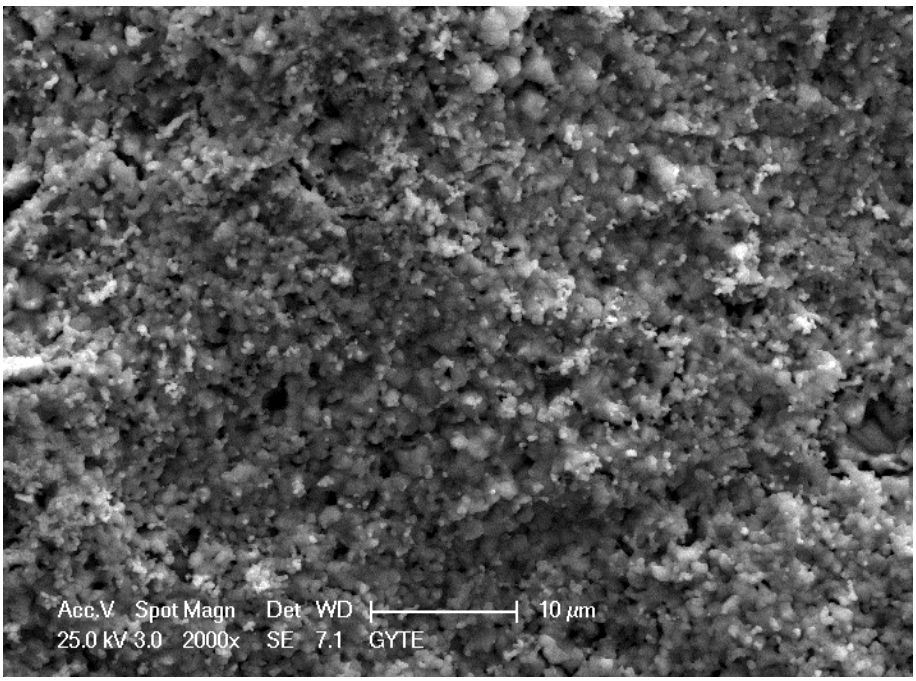


Şekil 5.23: Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü

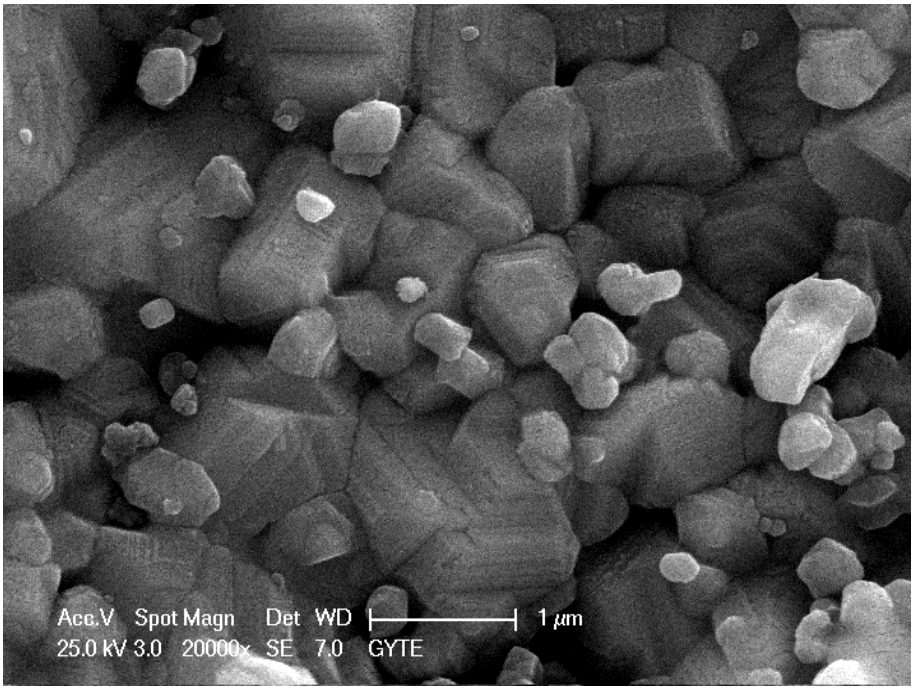


Şekil 5.24: Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü

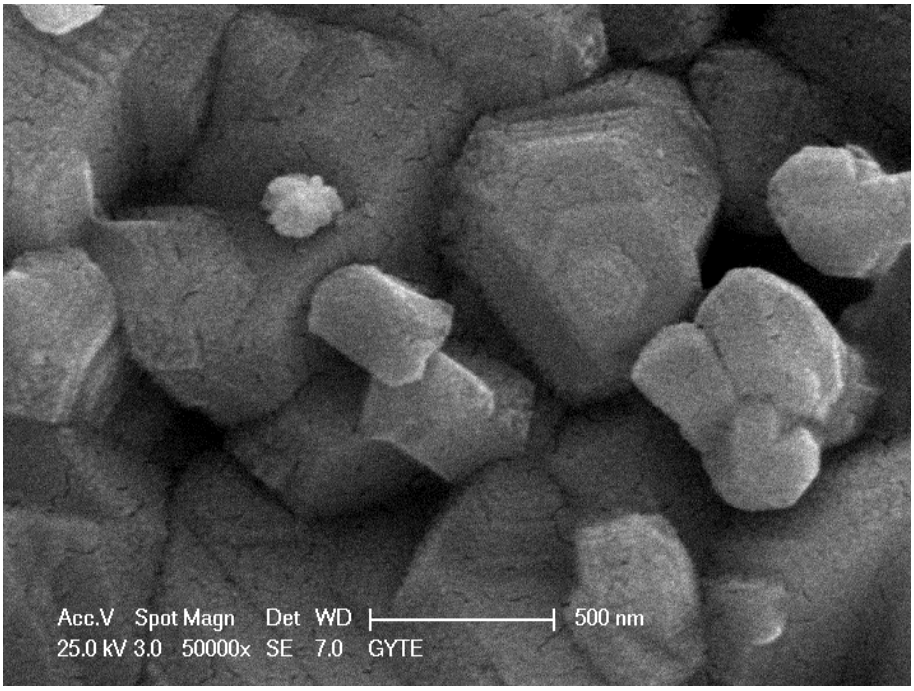
Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin SEM görüntülemelerinde 100 - 500 nm arasında boyuta sahip küresele yakın şekilli taneler boyun verme aşamasının başlangıç safhalarında görülmektedirler. Bununla birlikte az da olsa ileri boyun verme safhasında bulunan taneler mevcuttur. Taneler arasında 1µm'ye varan boşluklar göze çarpmaktadır.



Şekil 5.25: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü



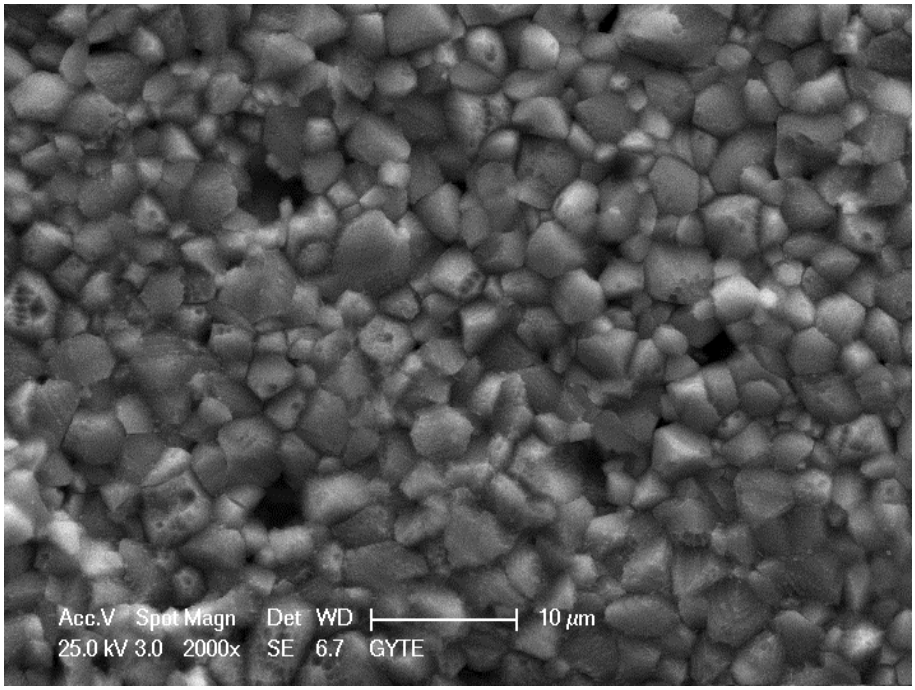
Şekil 5.26: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü



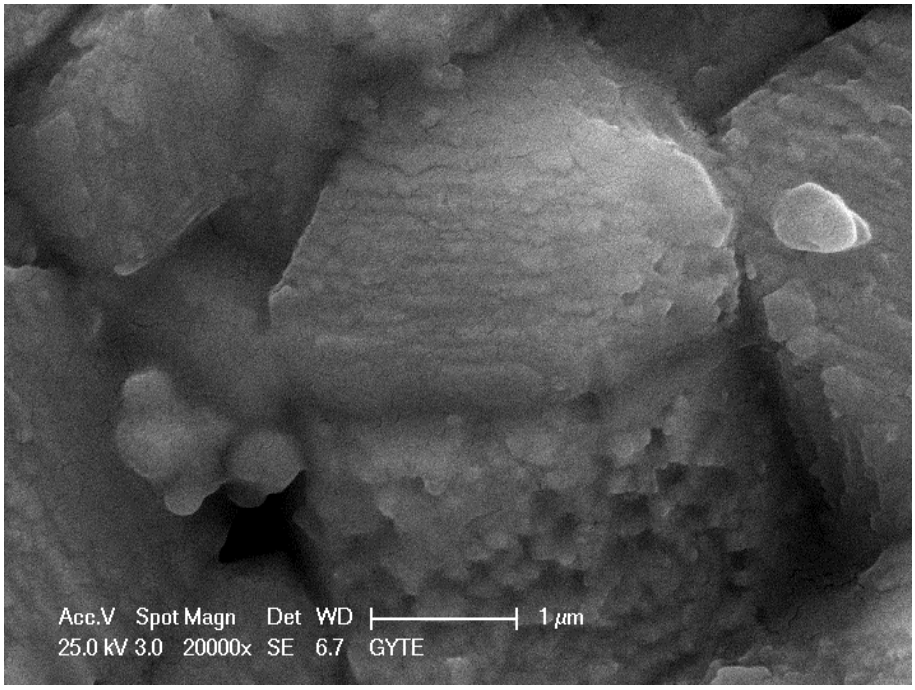
Şekil 5.27: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü

Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin görüntülerinde 500 nm ile 2 μm arasında iri taneler boyun verme aşamasını tamamlamış olarak görülmektedir. Bunun yanında

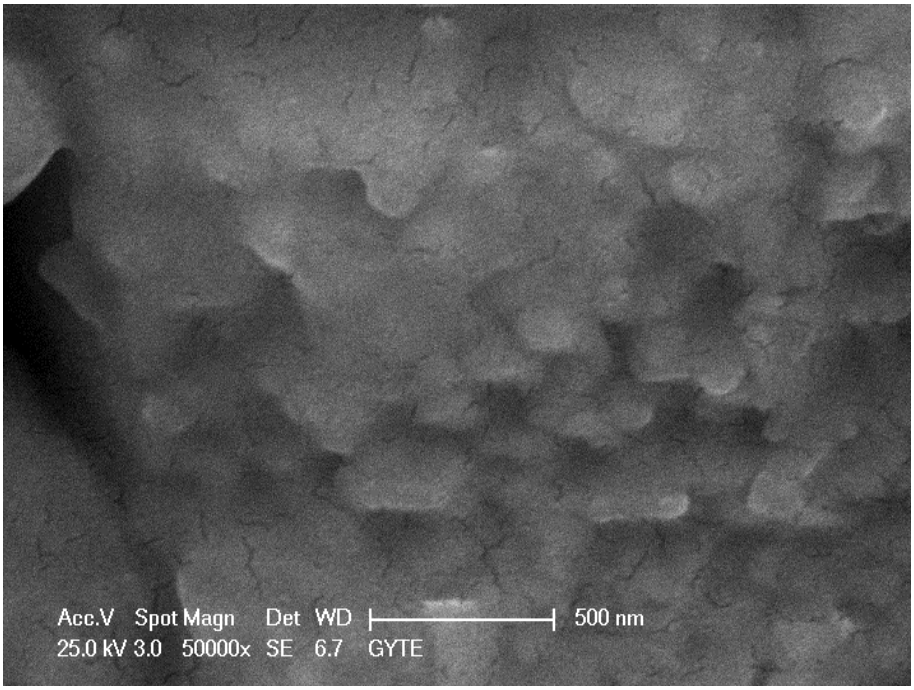
200 nm ile 500 nm arasında ufak tanelerde diğer büyük tanelere tutunmaya başlamış olarak gözlemlenmektedir. İri taneler küresellikten uzak rijit köşelere sahiptir. Küçük taneler ise nispeten küresele yakın şekildedirler.



Şekil 5.28: Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 2000 Büyütmede SEM Görüntüsü



Şekil 5.29: Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 20000 Büyütmede SEM Görüntüsü

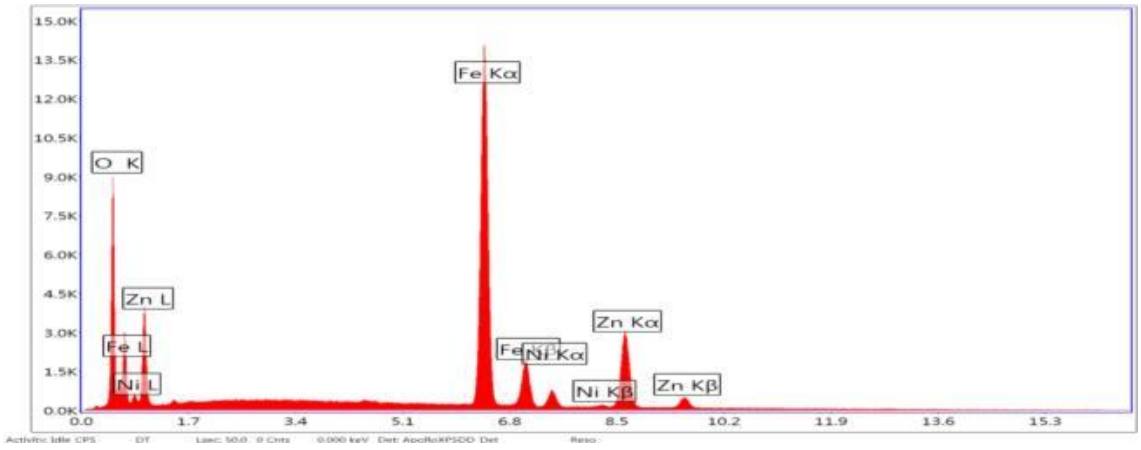


Şekil 5.30: Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin 50000 Büyütmede SEM Görüntüsü

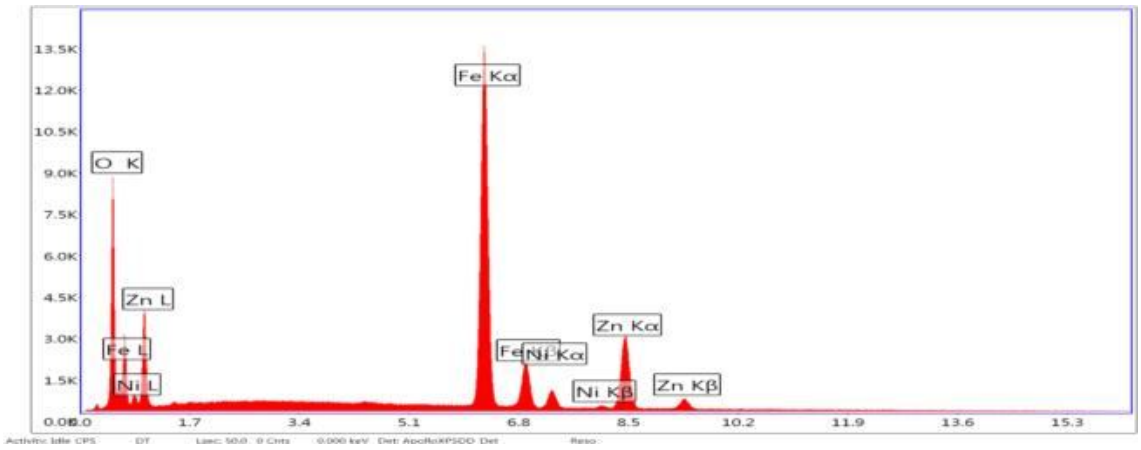
Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'de 1 μm ile 8 μm arasında boyutlara sahip taneler görülmektedir. Yer yer 1-3 μm'lik büyük boşluklar görülmesine rağmen yapıdaki boşluk miktarı oldukça azalmış ve bulk yoğunluk artmıştır. Taneler küresellikten uzak ve bazıları keskin köşelere sahiptirler.

R.V. MANGALARAJA ve arkadaşlarının çalışmasında $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$ yapısının 1150 ^{o}C, 1250 ^{o}C ve 1350 ^{o}C'lerde sinterlenmiş yapıların karakterizasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışmada yer alan mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde bileşim, metod ve sinterleme sıcaklığına bağlı boyut ve morfoloji farklılıkları görülmektedir. [62]

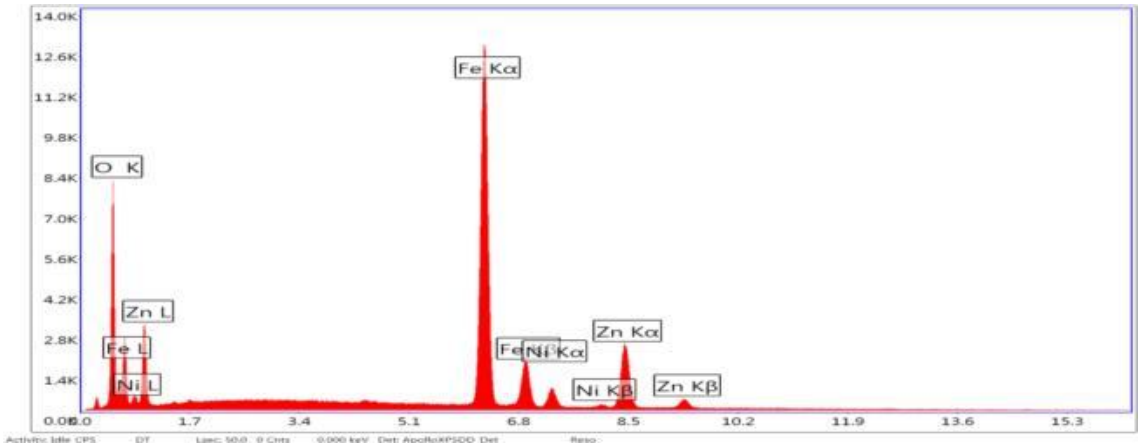
5.3 Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDXRF) Analizleri



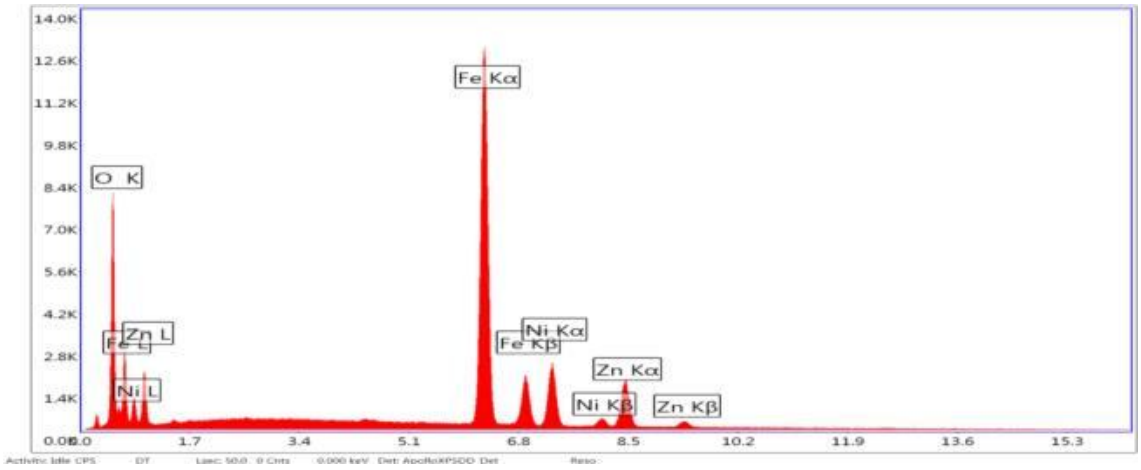
Şekil 5.31: Bileşim 1 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği



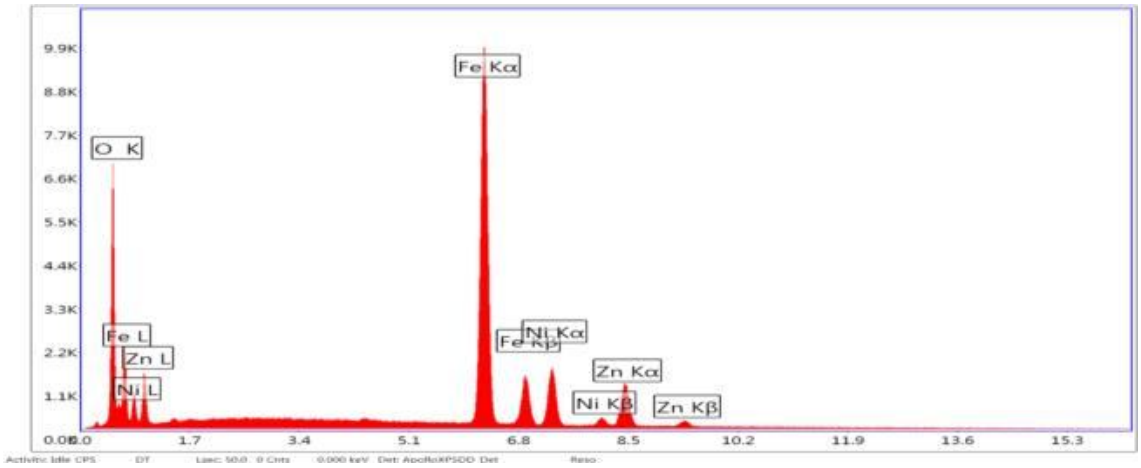
Şekil 5.32: Bileşim 1 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği



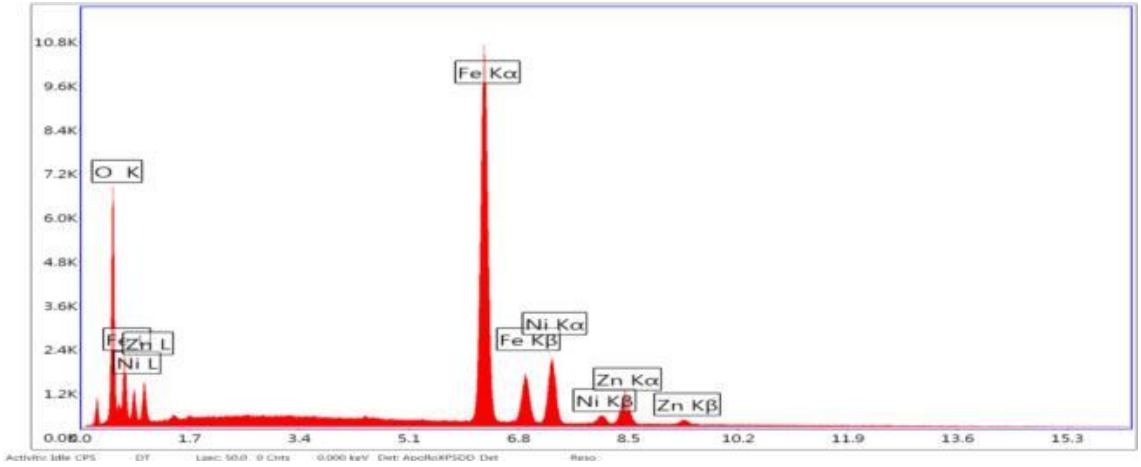
Şekil 5.33: Bileşim 1 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği



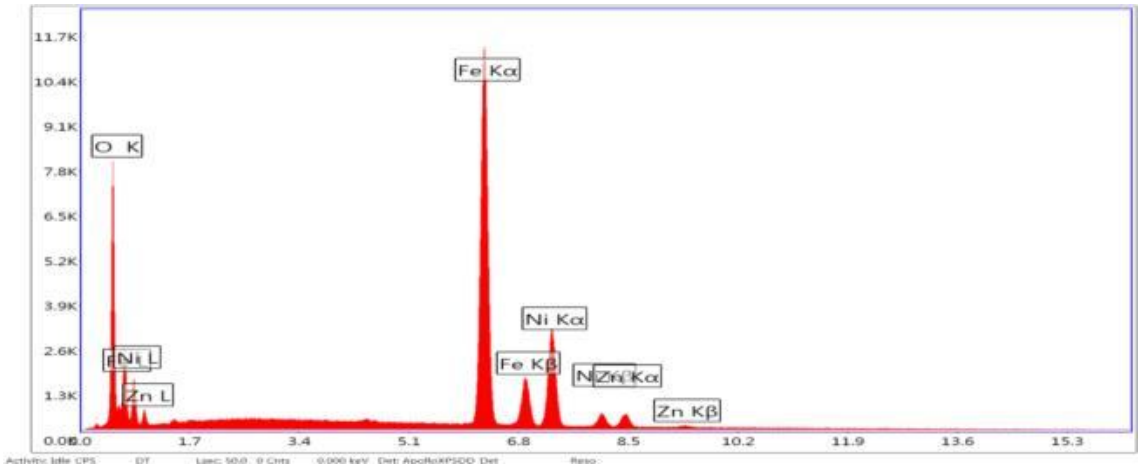
Şekil 5. 34: Bileşim 2 – 1000 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği



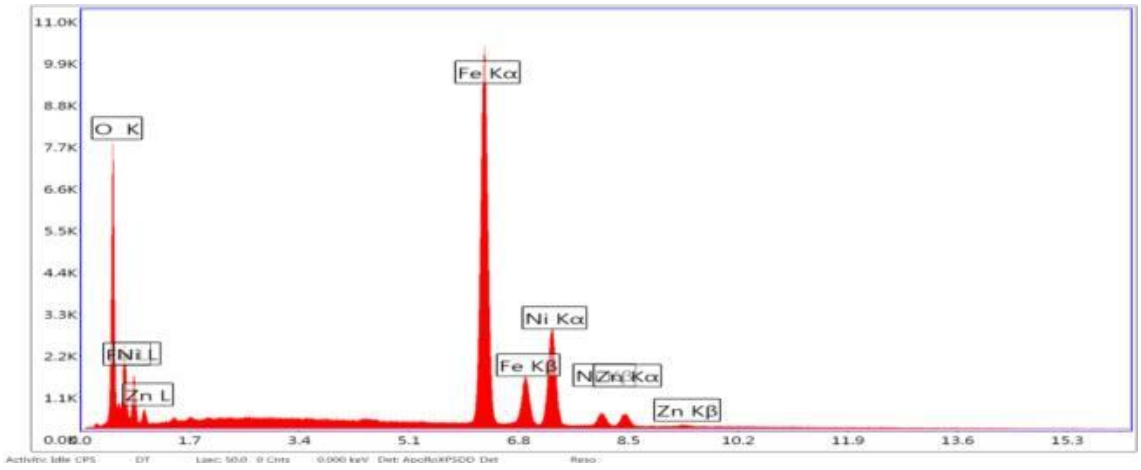
Şekil 5.35: Bileşim 2 – 1200 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği



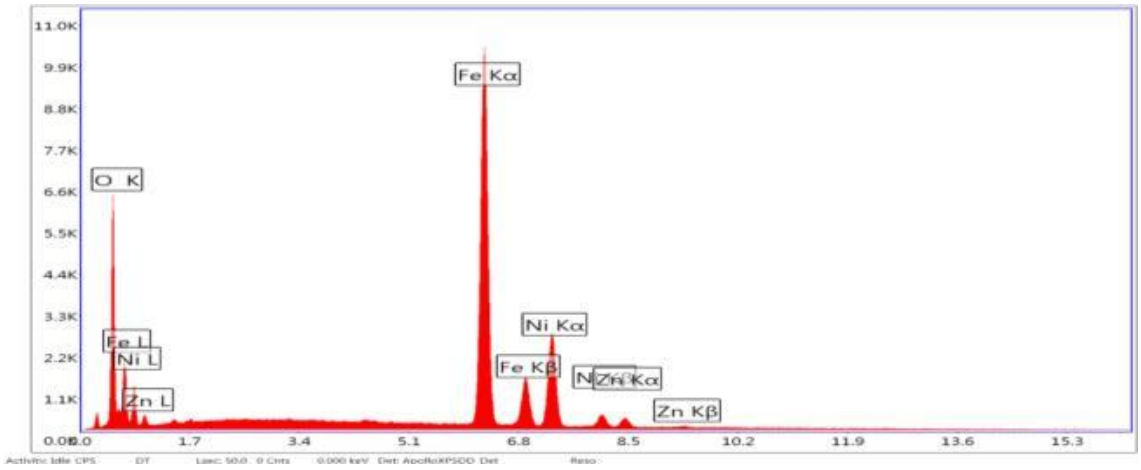
Şekil 5.36: Bileşim 2 – 1400 ^{o}C – Numune 1'nin EDXRF Analiz Grafiği



Şekil 5.37: Bileşim 3 – 1000 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği



Şekil 5.38: Bileşim 3 – 1200 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği



Şekil 5.39 Bileşim 3 – 1400 ^{o}C – Numune 2'nin EDXRF Analiz Grafiği

EDXRF grafikleri incelendiğinde Ni, Zn, O, Fe pikleri gözümüze çarpmakla birlikte numune içeriğinde yer alan ppm seviyesindeki safsızlıklardan kaynaklanan çok ufak tanımlanmamış piklerde mevcuttur. Bu piklerin sebebi kullanılan hammaddelerdeki empüriteler ve çalışma koşulları sebebiyle çevreden bulaşabilecek safsızlıklardır. EDXRF grafiklerinde elde edilen piklerin şiddetleri grafiğin ait olduğu numune içerisinde mevcut bulunan atomların miktarları ile doğru orantılıdır. Tablo 5.7'de EDXRF analizi sonucu elde edilen atomik % içerikleri, tablo 5.8'de numunelerin EDXRF analizi sonucu elde edilen ağırlıkça % içerikleri detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5.7: Numunelerin EDXRF Analizi Sonucu Elde Edilen Atomik % İçerikleri

Numune Kodu	Ni	Zn	O	Fe
Bileşim 1 1000 ^{o}C Numune 2	1.99	12.27	54.92	30.81
Bileşim 1 1200 ^{o}C Numune 1	2.06	12.02	55.31	30.61
Bileşim 1 1400 ^{o}C Numune 2	2.25	10.82	54.53	32.4
Bileşim 2 1000 ^{o}C Numune 1	7.17	7.45	53.96	31.42
Bileşim 2 1200 ^{o}C Numune 1	6.6	6.72	55.85	30.83
Bileşim 2 1400 ^{o}C Numune 1	7.85	5.55	54.33	32.27
Bileşim 3 1000 ^{o}C Numune 2	11.44	2.12	55.6	30.84
Bileşim 3 1200 ^{o}C Numune 2	11.23	1.95	57.16	29.66
Bileşim 3 1400 ^{o}C Numune 2	12.09	1.53	52.87	33.5

Tablo 5.8: Numunelerin EDXRF Analizi Sonucu Elde Edilen Ağırlıkça % İçerikleri

Numune Kodu	Ni	Zn	O	Fe
Bileşim 1 1000 °C Numune 2	3.32	22.8	24.97	48.91
Bileşim 1 1200 °C Numune 1	3.45	22.45	25.27	48.83
Bileşim 1 1400 °C Numune 2	3.76	20.09	24.77	51.38
Bileşim 2 1000 °C Numune 1	11.94	13.81	24.48	49.76
Bileşim 2 1200 °C Numune 1	11.26	12.76	25.96	50.02
Bileşim 2 1400 °C Numune 1	13.19	10,38	24.87	51.56
Bileşim 3 1000 °C Numune 2	19.63	4.06	25.99	50.32
Bileşim 3 1200 °C Numune 2	19.64	3.79	27.24	49.34
Bileşim 3 1400 °C Numune 2	20.13	2.84	23.98	53.05

Tablo 5.7 de verilen EDXRF analizi sonucu elde edilen atomik % içerikleri ve tablo 5.8 de verilen numunelerin EDXRF analizi sonucu elde edilen ağırlıkça % içeriklerinin sinterleme öncesinde teorik olarak hesaplanan ideal değerlerle karşılaştırılması amacıyla tablo 5.9 ve tablo 5.10 oluşturulmuştur. EDXRF analizlerinden yola çıkılarak oluşturulan tablolar ile ideal karışım tabloları karşılaştırılsa tablolar arasında atomik bazda Ni'de +%0,10 ile -%0,54 arasında Zn'da +%0,31 ile -%1,59 O'de +%0,02 ile -%4,27, Fe'de +%4,93 oranlarında sıcaklık ve bileşimle değişen farklılıklar mevcuttur.

Tablo 5.9: Sinterleme Öncesinde Elde Edilmek İstenen Toz Karışımlarının Atomik % İçerikleri

Bileşim Kodu ve İçeriği	Ni	Zn	O	Fe
Bileşim 1 **($NiO_{0,15}ZnO_{0,85}Fe_2O_3$)**	2,14285714	12,14285714	57,14285714	28,57142857
Bileşim 2 **($NiO_{0,50}ZnO_{0,50}Fe_2O_3$)**	7,14285714	7,14285714	57,14285714	28,57142857
Bileşim 3 **($NiO_{0,85}ZnO_{0,15}Fe_2O_3$)**	12,14285714	2,14285714	57,14285714	28,57142857

Tablo 5.10: Sinterleme Öncesinde Elde Edilmek İstenen Toz Karışımlarının Ağırlıkça % İçerikleri

Bileşim Kodu ve İçeriği	Ni	Zn	O	Fe
Bileşim 1 **($NiO_{0,15}ZnO_{0,85}Fe_2O_3$)**	3,66727363	23,15149246	26,65707032	46,52416359
Bileşim 2 **($NiO_{0,50}ZnO_{0,50}Fe_2O_3$)**	12,34472946	13,75275123	26,91980646	46,98271284
Bileşim 3 **($NiO_{0,85}ZnO_{0,15}Fe_2O_3$)**	21,19494065	4,166894922	27,18777330	47,45039113

Elde edilen sonuçlar ile teorik olarak hesaplanan değerler arasında mevcut bulunan farklılıklar öncelikle kullanılan hammaddelerin içeriğindeki empüritelerden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında üretim koşulları da bu farklılıklarda etkilidir. Ancak Ni ve Zn'da bu kadar düşük seviyelerde farklılık göstermesi hassas çalışıldığının bir göstergesidir. Ayrıca sıcaklığa bağlı olarak O'nin uçmasıyla Fe oranında artış meydana gelmiştir. Teorik değerler ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkın azaltılması için öncelikle kullanılan hammaddelerin saflık değerleri yükseltilebilir. Bunun yanında; mekanik karıştırma süresi arttırıldığı takdirde numunelerin elde edileceği tozların homojenliği arttırılarak EDXRF analizlerinde ölçüm sonuçları numune üzerindeki bölgeler arasındaki farklılıklardan arındırılır. Böylece daha doğru ölçümler elde edilir.

5.4 Manyetizasyon Ölçümleri

Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin manyetizasyon ölçümleri İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Magnetizma Laboratuarı'nda bulunan VSM cihazı ile oda sıcaklığı koşullarında yapılmıştır. VSM cihazında yapılan manyetizasyon ölçümleri ile malzemelerin; manyetik özellikleri hakkında bilgi edinildi.

Tablo 5.11: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$ İçin Maximum Manyetik Moment (M→emu/g) Değerleri ve Elde Edildiği Manyetik Alan (H→Oe) Değerleri

Sıcaklık (^oC)	***x=0,85***		***x=0.5***		***x=0,15***	
	1. Numune	**2. Numune**	**1. Numune**	**2. Numune**	**1. Numune**	**2. Numune**
1000 ^oC	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M**= 3,4197	**M_S**=50,4371	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M_S**=45,1762
		H=7786,10	**H**=7817,10			**H**=7734,10
1200 ^oC	**M**=1,8712	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M_S**=53,2879	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M_S**=36,6931
	H=7886,00		**H**=7789,50			**H**=6912,00
1400 ^oC	**M**=4,2460	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M_S**=55,9300	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M_S**=45,3890
	H=8008,20		**H**=7739,60			**H**=7730,70

***Manyetik Moment Değerleri Birimi (emu/g)**

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$ x=0,85 değeri için numuneler doyum manyetizasyon değerlerine ulaşmamışlardır. Bundan dolayı grafiklerden okunan maksimum manyetizasyon değerleri tablolarda yer almıştır. K.H. WU ve arkadaşları ile F. Lİ ve arkadaşlarının çalışmaları tez çalışmasında elde edilen değerlerle karşılaştırılabilir. F. Lİ ve arkadaşlarının çalışmasında $ZnFe_2O_4$ yapısının farklı üretim koşullarında üretilen numuneler için 10000 Oe civarı alan şiddeti için 1 ile 4 emu/g arasında manyetizasyon değerleri elde etmiştir ve örnekler tez çalışmasındaki bileşim 1 numunelerinde Ni miktarının azlığı ile ortaya çıkan durum ile paralel değerler göstermekle birlikte

tez çalışmasındaki gibi örnekler doyuma ulaşmamıştır. Tez çalışmasında yer alan x=0,50 değeri için hazırlanan numuneler sinterleme sıcaklığına bağlı olarak 50-56 emu/g aralığında; x=0,15 değerindeki numuneler ise sinterleme sıcaklığı ile 36-46 emu/g aralığında doyuma ulaşmıştır. K.H. WU ve arkadaşlarının çalışmasında $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ için yaklaşık 30 emu/g doyum manyetizasyon değeri bulunmuştur. Elde ettiğimiz sonuçlar göz önüne alındığında literatüre uygun ve doyum manyetizasyon değerleri (x=0,50 ve x=0,15 örnekleri için) oldukça yüksek çıkmıştır. [63, 64]

Tablo 5.12: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$ İçin Eksi Yönde Maximum Manyetik Moment (M→emu/g) Değerleri ve Elde Edildiği Manyetik Alan (H→Oe) Değerleri

Sıcaklık (°C)	***x=0,85***		***x=0.5***		***x=0,15***	
	1. Numune	**2. Numune**	**1. Numune**	**2. Numune**	**1. Numune**	**2. Numune**
1000 °C	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M**=-3,3263	**M**=-50,4371	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M**=-44,8218
		H=-7687,90	**H**=-7721,50			**H**=-6906,10
1200 °C	**M**=-1,7977	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M**=-52,609	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M**=-36,242
	H=-7841,50		**H**=-7691,90			**H**=-6705,10
1400 °C	**M**=-4,1724	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M**=-55,3027	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**M**=-44,5049
	H=-7966,60		**H**=-7638,70			**H**=-7628,20

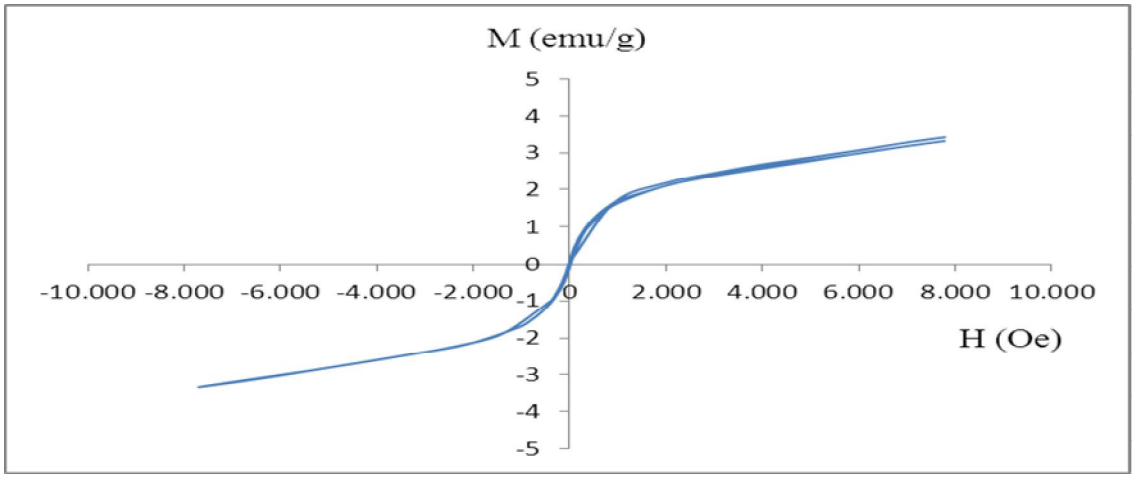
Tablo 5.13: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$ İçin H_c Değerleri (Oe)

Sıcaklık (^oC)	***x=0.5***		***x=0,15***	
	1. Numune	**2. Numune**	**1. Numune**	**2. Numune**
1000 ^oC	**H_c**= 15,50085	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**H_c**= 37,09835
1200 ^oC	**H_c**= 3,1632	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**H_c**= 9,3386
1400 ^oC	**H_c**= 0,94975	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**H_c**= 5,35945

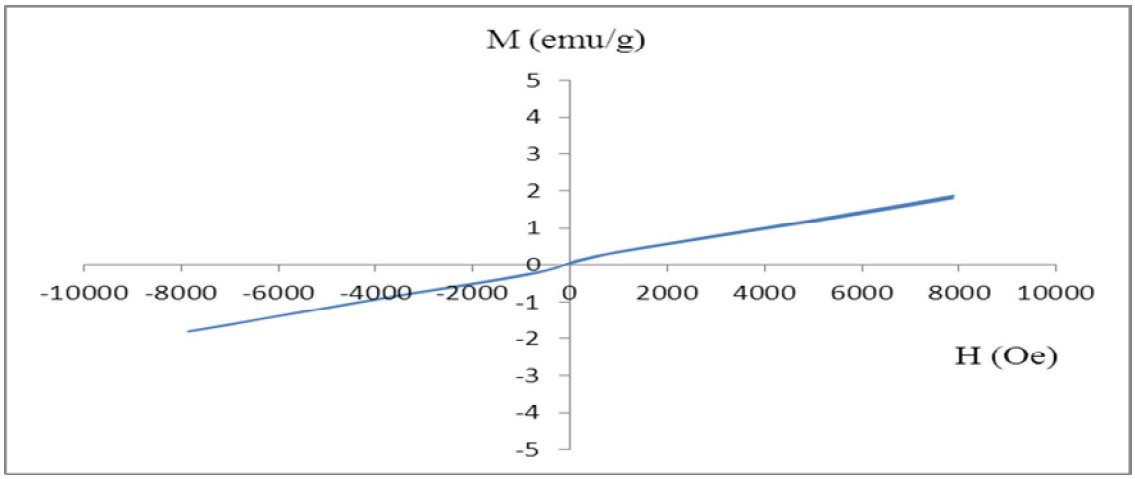
Harun BAYRAKDAR çalışmasında sol-jel ve yüzey aktif madde destekli hidrotermal sentez yöntemi ile elde edilmiş olan nanometalik toz numunelerinin yapısal ve manyetik özelliklerini incelemiştir. Numuneleri arasında $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$'in x=0, x=0,5 ve x=1 değerleri bulunan numunelerde mevcuttur. H. BAYRAKDAR çalışmasında 300 ^oK'de yaptığı ölçümler sonucunda x=0 için H_c=96,19 Oe x=0,5 için H_c=58,11 Oe x=1 değeri için H_c=16,84 Oe olarak bulmuştur. H. BAYRAKDAR'ın çalışmasından elde ettiği sonuçlar tez çalışmasındaki sonuçlarla birlikte yorumlandığında yapıda Ni oranı arttıkça H_c değerinin artış gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır. [51] Ayrıca tez çalışmasından elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak sinterleme sıcaklığı arttıkça H_c değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Ancak bu ters orantının H_c değerinin sıfıra yaklaştıkça ne kadarlık bir değişime tekabül edeceği farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilecek numunelerin ölçümleriyle görülebilir.

Tablo 5.14: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $(0 \leq x \leq 1)$ İçin H=0 (Oe) Değerleri İçin Numunelerin Manyetizasyon Değerleri

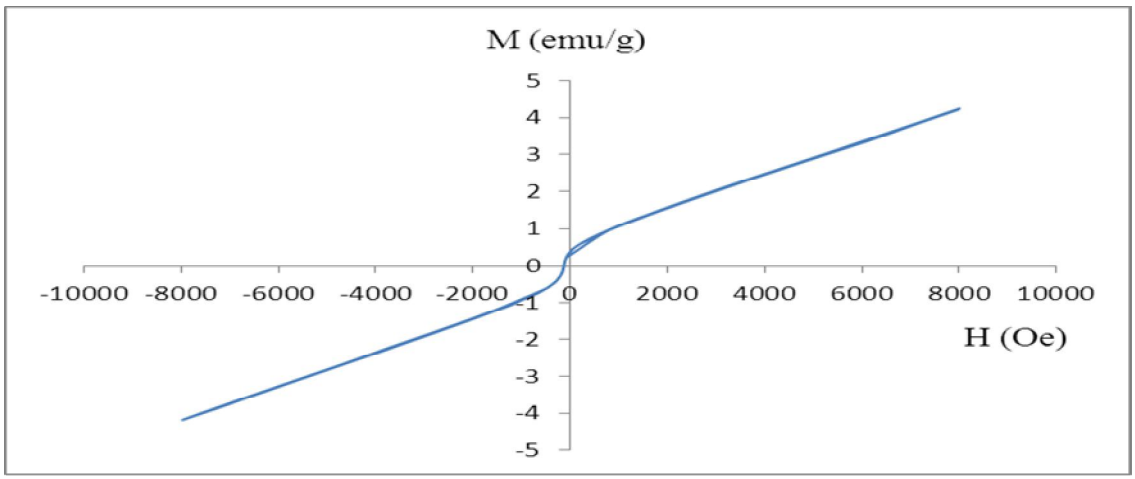
Sıcaklık (^oC)	***x=0.5***		***x=0,15***	
	1. Numune	**2. Numune**	**1. Numune**	**2. Numune**
1000 ^oC	**+Mr**= 1,3426	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**+Mr**= 1,6724
	-M_r= -0,9492			**-M_r**= -1,3549
1200 ^oC	**+Mr**= 0,3009	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**+Mr**= 0,5681
	-M_r= -0,0709			**-M_r**= -0,2734
1400 ^oC	**+Mr**= 0,1097	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	Manyetik Ölçüm Yapılmadı	**+Mr**= 0,2273
	-M_r= 0,0350			**-M_r**= -0,1000



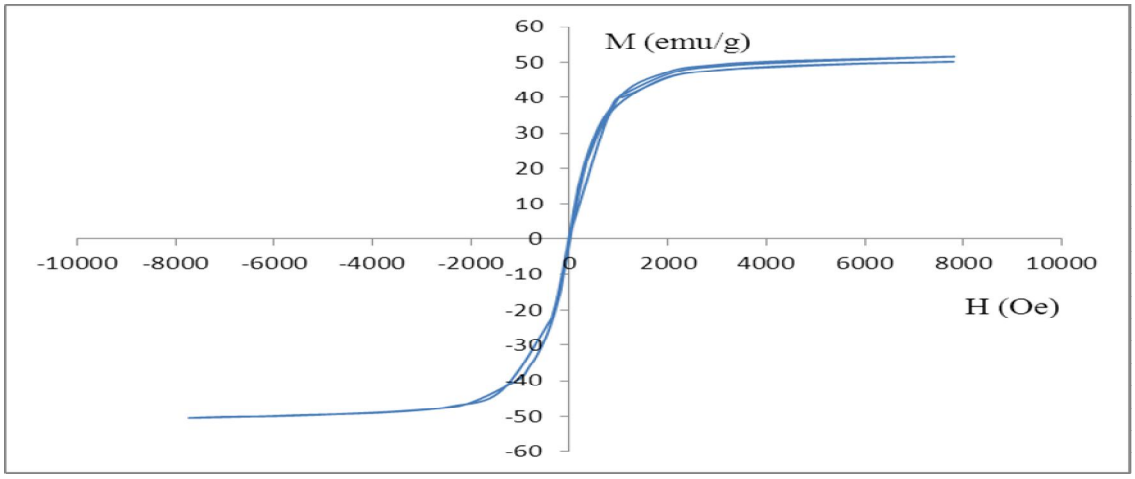
Şekil 5.40: Bileşim 1 - 1000 ^{o}C - Numune 2 VSM Ölçüm Sonuçları



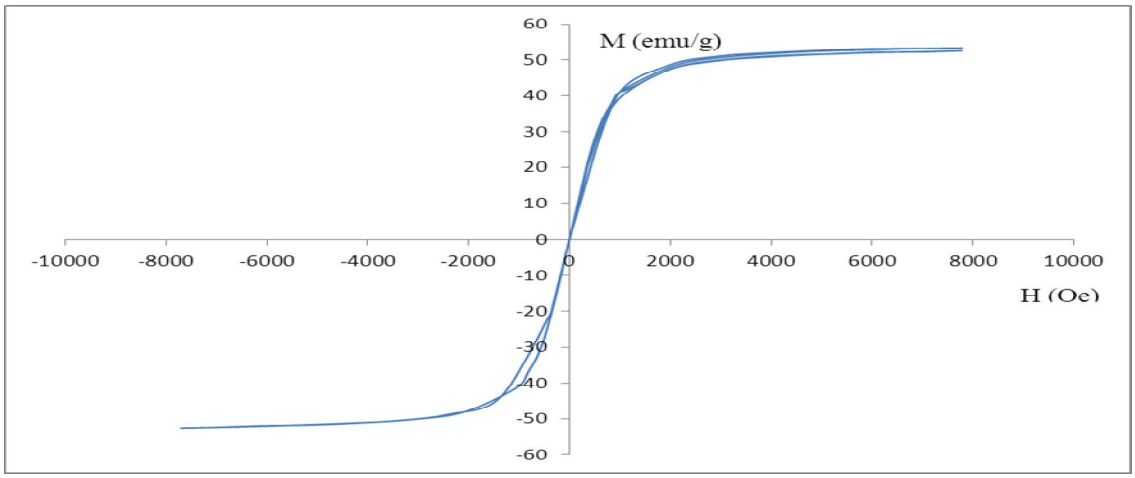
Şekil 5.41: Bileşim 1 - 1200 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları



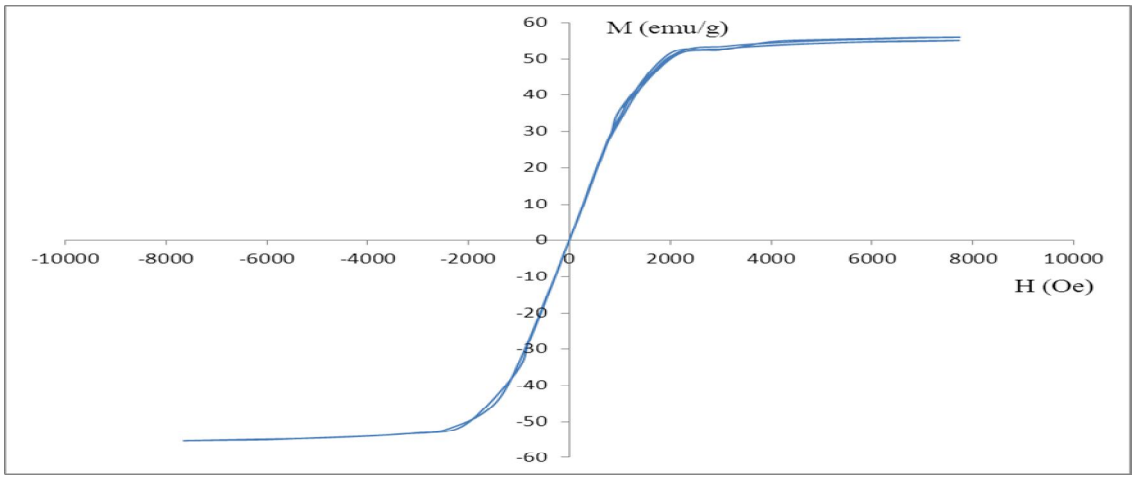
Şekil 5.42: Bileşim 1 - 1400 ^{o}C - Numune 1 İçin VSM Ölçüm Sonuçları



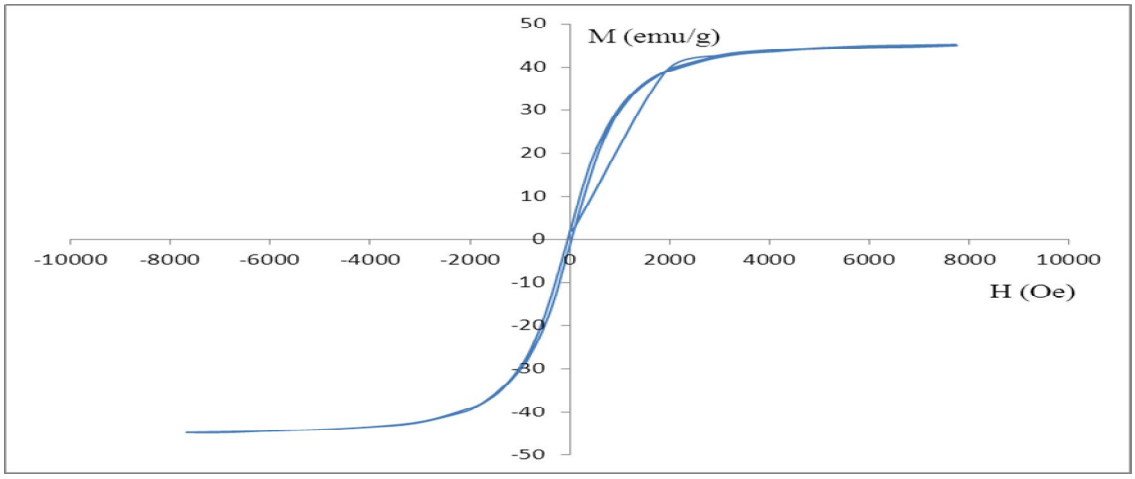
Şekil 5.43: Bileşim 2 - 1000 ^{o}C - Numune 1 İçin VSM Ölçüm Sonuçları



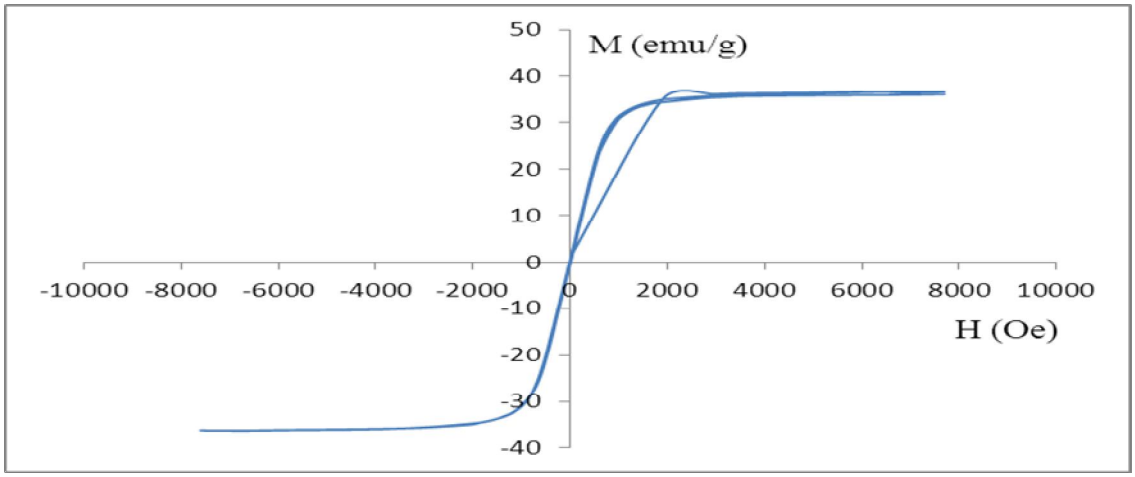
Şekil 5.44: Bileşim 2 - 1200 ^{o}C - Numune 1 İçin VSM Ölçüm Sonuçları



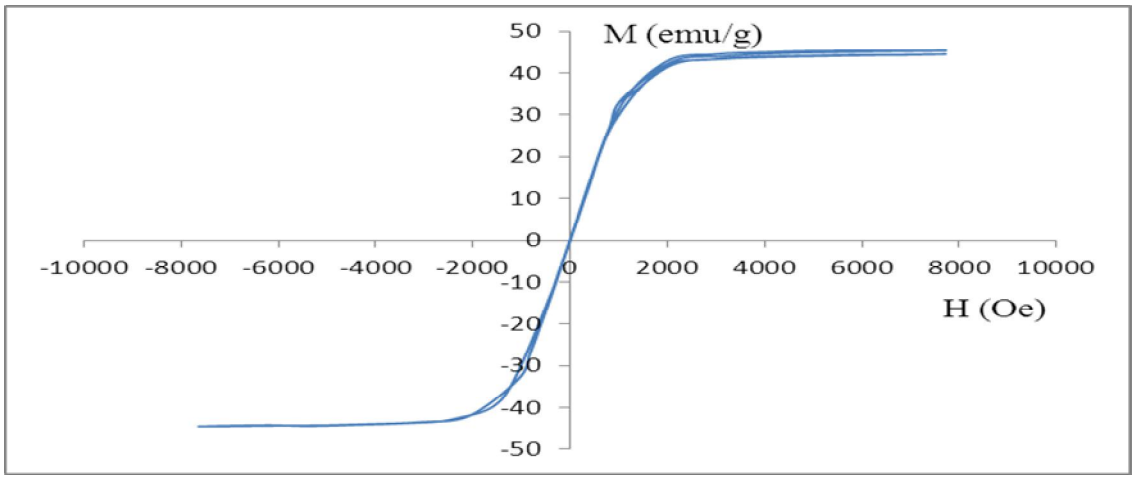
Şekil 5.45: Bileşim 2 - 1400 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.46: Bileşim 3 - 1000 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.47: Bileşim 3 - 1200 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.48: Bileşim 3 - 1400 ^{o}C - Numune 2 İçin VSM Ölçüm Sonuçları

5.5 Sonuçlar ve Tartışma

Tez çalışması $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ yapısındaki mıknatısların toz metalurjisi yöntemiyle üretimi; manyetik ve karakteristik özelliklerinin incelenmesini içermektedir.

Tez çalışmasının deneysel kısmının ilk aşamasında hammaddeler temin edilmiş ve numunelerin hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada kullanılan hammaddelere $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ yapısının x=0,15/x=0,50/x=0,85 değerleri için mekanik karıştırma uygulamıştır. Numunelerin fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinmek amacıyla numune hazırlanmasının çeşitli aşamalarında 0,0001 g hassasiyetli hassas terazi yardımıyla ağırlık, 0,01 cm hassasiyetli dijital kumpas yardımıyla boyut ölçümleri yapılmıştır. Alınan ağırlık ve boyut ölçümleri tekrarlanarak ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır ve ölçülen değerlerin detaylı bilgilerini içeren tablolar oluşturulmuştur. Tez içerisindeki ilgili tablolar incelendiğinde %1,61-7,59 aralığında sinterleme işlemine kadar olan % ağırlık kaybı görülmektedir. Bunun sebebi presleme sırasında kullanılan kalıba konulan tozların dışarı taşması ve fiziksel olarak sinterleme öncesi numunelerin temas ettikleri yüzeylere (boyut ölçümleri sırasında kumpas, ağırlık ölçümleri sırasında hassas teraziye ve sinterleme aşamasına kadar durdukları yüzeyler, çalışma sırasında eldiven vb.) sırasında bir miktar nüfuz etmiş olmalarıdır. Esasen gram olarak 0,01 gram ila 0,08 gram gibi düşük ağırlık kayıpları meydana geliş olup bu da deney esnasında dikkatli ve hassas çalışıldığının bir göstergesidir. Sinterleme esnasında numunelerin içindeki nem vs. uçmasından ve sinterlemenin yapıldığı alümina plaka üzerine numunelerin bir kısmının tutunmasından dolayı da %2,32 ile %5,04 aralığında ağırlık kayıpları yaşanmıştır. Tezde yer alan ilgili tablolara dikkat edildiğinde ağırlık kayıplarının sinterleme sıcaklığıyla paralel olarak arttığı görülmektedir. Bu öngörülen bir sonuçtur.

Boyut ölçümü tablolarında numunelerin presleme sonrasında ve sinterleme sonrasında çap/yükseklik ölçümleri ile % hacim küçülmeleri yer almaktadır. Numunelerimizde sıcaklık ve bileşime bağlı olarak %8,38 ila %60,06 aralığında % hacim küçülmeleri gözlemlenmektedir.

Tez çalışması için elde edilen elektron mikroskobu görüntülerinde bileşim ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak 200 nm ile 20 μm aralığında değişen tane boyutları görülmektedir. 200-400 nm aralığındaki taneler genellikle küresel şekilli olmakla birlikte sinterlemenin etkisiyle büyüyen taneler küresel şeklinden uzaklaşmaktadırlar.

Sinterleme sıcaklığının artmasıyla teneler arasında bulunan boşluk miktarı oldukça azalmış ve bulk yoğunluk artmıştır.

Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak meydana gelen bu değişimler çift küre sinterleme modeline uygun olarak gerçekleşmektedir. Ancak uygulanan sıcaklıklara bağlı olarak çift küre sinterleme modelinin son aşaması olan kürelerin tam birleşmesi evresi birçok tane için tamamlanamadığı görülmektedir. Bunun yanında sıcaklık ve bileşime bağlı olarak çift küre sinterleme modelinin ilk aşaması olan ilk nokta teması, boyun büyümesinin başlangıç safhası, boyun büyümesinin ileri safhaları mikroyapı fotoğraflarında net bir şekilde görülmektedir.

EDXRF grafikleri incelendiğinde Ni, Zn, O, Fe pikleri gözümüze çarpmakla birlikte numune içeriğinde yer alan ppm seviyesindeki safsızlıklardan kaynaklanan çok ufak tanımlanmamış piklerde mevcuttur. Bu piklerin sebebi kullanılan hammaddelerdeki empüriteler ve çalışma koşulları sebebiyle çevreden bulaşabilecek safsızlıklardır. EDXRF analizlerinden yola çıkılarak oluşturulan tablolar ile ideal karışım tabloları karşılaştırılsa tablolar arasında üretim şartları sebebiyle atomik bazda Ni'de +%0,10 ile -%0,54 arasında Zn'da +%0,31 ile -%1,59 O'de +%0,02 ile -%4,27, Fe'de +%4,93 oranlarında sıcaklık ve bileşimle değişen farklılıklar mevcuttur.

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($0 \leq x \leq 1$) x=0,85 değeri için numuneler doyum manyetizasyon değerlerine ulaşmadıklarından grafiklerden okunan maksimum manyetizasyon değerleri tablolarda yer almıştır. Tez çalışmasında yer alan x=0,50 değeri için hazırlanan numuneler sinterleme sıcaklığına bağlı olarak 50-56 emu/g aralığında; x=0,15 değerindeki numuneler ise sinterleme sıcaklığı ile 36-46 emu/g aralığında doyuma ulaşmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar göz önüne alındığında literatüre uygun ve doyum manyetizasyon değerleri (x=0,50 ve x=0,15 örnekleri için) oldukça yüksek çıkmıştır. [63, 64]

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak sinterleme sıcaklığı arttıkça H_c değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Ancak bu ters orantının H_c değerinin sıfıra yaklaştıkça ne kadarlık bir değişime tekabül edeceği farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilecek numunelerin ölçümleriyle görülebilir.

5.6 Öneriler

Tez çalışması sırasında önceden hesap edilen ve edilmeyen birçok zorlukla karşılaşılmıştır. Bunların başlıcası tez için kullanılan hammaddelerin teminindeki ve çalışma aşamasında sağlığa zararlı duruma gelebilecek olmasıdır. Bunun için oldukça dikkatli çalışılmalıdır. Çalışmanın presleme aşamasında kullanılan kalıba konulan tozların dışarı taşması ve fiziksel olarak sinterleme öncesi numunelerin temas ettikleri yüzeylere (boyut ölçümleri sırasında kumpas, ağırlık ölçümleri sırasında hassas teraziye ve sinterleme aşamasına kadar durdukları yüzeyler, çalışma sırasında eldiven vb.) sırasında bir miktar nüfuz etmiş olmaları kaçınılmazdır. Bunu önlemek için presleme sırasında kullanılan kalıbın dizaynı değiştirilerek ve numuneleri presleme sonrası sinterleme aşamasına kadar nispeten daha az tutunacakları veya hiç tutunmayacakları bir yüzeyde bekletilmesi, çap ve boyut ölçümleri sırasında kumpasa, ağırlık ölçümleri esnasında hassas terazi yüzeyine, çalışma sırasında kullanılan eldivenlere bulaşmamasında vb. dikkat edilerek ve sonuçta nispeten daha hassas çalışılmasıyla sinterleme aşamasına kadar olan ağırlık kaybı azaltılıp elde bulunan hammadde daha verimli kullanılabilir. Bunun yanında tez çalışmasında karşılaşılan problemlerden biriside VSM ölçümleri sırasında karşılaşılan; kalibrasyon ve çalışma zorluğudur. VSM sistemi aşırı hassas bir sitemdir numune tutucunun içinde kalan en ufak bir toz zerreciği dahi ölçümlerinize etki edebilmekte ve gerçek değerlerden sapma gösterebilmektedir. Bunun yanında sistemin yaptığı ölçümlerin doğrulanması ve karşılaştırılması için sürekli kalibrasyon yapılması gerekmektedir.

Bu tez çalışması ile literatüre kazandırılan bilgilerin daha da gelişmesi için tez çalışmasında yer alan deneylerin bileşim ve sıcaklık vb. parametreler değiştirilerek denenmesi gerekmektedir. Bu denemeler yapılırken literatür iyi taranmalı ve literatürde olmayan parametrelerin literatüre kazandırılması amaçlamalıdır. Ancak bundan önceki çalışmaların doğrulanması ve mukayese amaçlı olarak literatürdeki parametreler kullanılarak da denemeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Ö. ŞENYURT, R. AKDAĞ, ***"Doğru Akım Devre Analizi"***

[2] TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi 372. Sayının Eki, ***"Nobel Bilim Ödülleri 1901-1998",*** (1998)

[3] *http://www.nobelprize.org/*

[4] Elektrik Mühendisleri Odası İş Alanları ve Tanımları Komisyonu, ***"Mühendislik ve Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisleri (EEBM) İş Alanları I. (Tartışma Metni) (2. BASKI)",*** TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayın No: EG/2004/8 ISBN 975 395 754 8 (2004)

[5] M. KILIÇKAYA, ***"Temel Fizik",*** T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Anadolu Üniversitesi, (1996)

[6] *http://www.germencik.bel.tr/17/Ilcemiz-Tarihi.aspx*

[7] E. TACER, İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi, ***"Elektromekanik Enerji Dönüşümü (Birinci Ve İkinci Bölümler) Ders Notları 2004 -2005",*** İstanbul, (2004)

[8] H. YOUNG, R.FREEDMAN, ***"Sears and Zemansk's UNIVERSITY PHYSICS WITH MODERN PHYSICS 12th Edition",*** PEARSON Addison Wesley ISBN : 978-03215-0076-2 Çevirisi", Çevirenler : H. ÜNLÜ, A. GİZ, M. HORTAÇSU, N. POSTACIOĞLU, S. AKTÜRK; Sarıyıldız Ofset ISBN: 978-605-4248-01-8, Ankara, (2010)

[9] *http://secilfizik.tripod.com/index-1.html*

[10] *http://www.ece.neu.edu/faculty/nian/mom/work.html*

[11] Ö. KARAAĞAÇ, ***"CoCu Alaşım Filmlerin Elektrodepozisyonu, Yapısal ve Manyetik Özellikleri Üzerine Depozisyon Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi",*** T.C. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2007)

[12] R. ÇAKIR, ***"$R_{1-x}R'_xFe10Si_2$ İntermetalik Alaşımının Yapısal ve Magnetik Özelliklerinin İncelenmesi",*** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2006)

[13] R. SERWAY, R. BEICHNER, ***"PHYSICS For Scientists and Engineers with Modern Physics 5th Edition"*** Saunders Coolege Publishing ISBN: 0-03-022657-0 (2000), Çevirisi: K. ÇOLAKOĞLU, Palme Yayıncılık, ISBN: 975-8624-08-3, Ankara (2009)

[14] *http://www.scribd.com/doc/2673633/maddenin-manyetik-ozellikleri*

[15] S. COŞKUN, ***"Manyetik Alanın İnsan Eritrosit Karbonik Anhidraz İzoenzinleri (hCA-I ve Hca-II) Üzerine İn Vitro Etkisinin Araştırılması",*** T.C. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Balıkesir, (2007)

[16] *http://ebookbrowse.com/jem207-ders07-pdf-d341827498*

[17] D. ELHASOĞLU, ***"Elektromanyetik Kirliliğin Zararlı Etkileri"***, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2006)

[18] Y. GÜNGÖR, ***"FM Bandında (92.4 Mhz) Ankara Bölgesi İçin Elektromagnetik Alan Şiddet Dağılımının İncelenmesi"***, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2005)

[19] *http://www.smps.us/*

[20] M. TAŞKAN, ***"Elektrik ve Manyetizma"***

[21] M. ZOR, Ö. ORHUN, M. ŞENYEL, M. TANIŞLI, A. AYBEK, S. AKSAY, K. ÖZDAŞ ***"Fizik",*** T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları No: 1060
Açıköğretim Fakültesi Yayınları No: 586, Eskişehir, (1998)

[22] M. ARAS, A. KAYAALP, ***"Yumuşak Manyetik Malzemeler ve Özellikleri"*** İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, (2009)

[23] *http://www.nanoscience.de/nanojoom/index.php/en/methods/theory/37-montecarlo-simulation.html*

[24] H. ÜNAL, ***"Manyetik Malzemelerin Mıknatıslanma Mekanizmalarının İki Boyutlu Isıng Modeliyle İncelenmesi",*** T.C. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2009)

[25] *http://kutuphanem.bilgievi.gen.tr/indir.aspx?id=133*

[26] S. ÖZÇIRA, ***"Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları",*** Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2007)

[27] M. ARAS, "***Malzemelerin Manyetik Açıdan Sınıflandırılması",*** Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2012

[28] N. KARACAN, ***"Manyetizma",*** *http://w3.gazi.edu.tr/web/nkaracan/koordinasyon/koordinasyon.htm* veya *https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fw3.gazi.edu.tr%2F~nkaracan%2Fkoordinasyon%2FJT-manyetizma.ppt&ei=HcxSUrvoMcTctAaLmoG4Bw&usg=AFQjCNH3gh0iRAo3m91C4aIOx7BuL9ibwA&sig2=nsMbl0qU2uftv-wZlc08FA&bvm=bv.53537100,d.Yms*

[29] IARS Kuramsal Yoğun Madde Fiziği Serisi, ***"İleri İstatistik Mekanik ve Yoğun Madde Fiziğinde Uygulamaları Çalıştayı Ders Notları",*** Marmaris Kuramsal ve Uygulamalı Fizik Araştırma Enstitüsü(ITAP) Atatürk Üniversitesi Erzurum, (2007)

[30] T. YILMAZ, ***"Saçtırma Tekniğiyle Hazırlanan Kobalt İnce Filmlerinin Manyetik Karakterizasyonu",*** Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D. , (2008)

[31] N. KARACAN, ***"Deney 11 Manyetizma"***, *http://w3.gazi.edu.tr/web/nkaracan/inorglab/manyetizma.pdf*

[32] A. ARAN, ***"MAL 201-Malzeme Bilgisi 2007-2008 Bahar Ders Notları",*** İTÜ, İstanbul, (2007)

[33] F. BİLİM, ***"Potansiyel Alan Verileri Yardımıyla Kayaçlardaki Kalıntı Mıknatıslanma Özelliğinin Araştırılması",*** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği A.B.D. , (2004)

[34] N. AKDOĞAN, ***"İnce Filmlerde Manyeto-Optik Ölçümler",*** Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D., (2004)

[35] A. TEKEREK, ***"$LaMn_2Si_2$ Alaşımının Nanoparçacıklarının Manyetik ve Yapısal Özellikleri",*** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği A.B.D., (2007)

[36] G. BULUN, ***"3d-Geçiş Metali Ni Katkılı $Zn_{1-X}Ni_XO$ ve 4f-Lântanit Gd Katkılı $Zn_{1-X}Gd_XO$ Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri",*** Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D., Adana, (2010)

[37] A. OZANSOY, ***"Manyetizma",*** Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü, *80.251.40.59/science.ankara.edu.tr/aozansoy/Manyetizma.ppt* , (2007)

[38] O. KONEZ, ***"Manyetik Rezonans Görüntüleme",*** http://www.konez.com/

[39] E. AKGÜN, ***"Nadir Toprak Elementli Bileşiklerin Manyetik, Yapısal ve Termal Karakterizasyonu",*** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D. , Ankara, (2007)

[40] M. EROL, ***"KYM 345 2007-2008 Ders Notları Bl 4"***, (2007)

[41] M. KAYNAR, ***"Metal Ferrit Nanoparçacıkların Hazırlanması ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi",*** Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği A.B.D. , Ankara, (2007)

[42] Ö. ÇİÇEK, ***"Nano Boyutta Katkılandırılmış MgB_2 Süper İletkenin Manyetik Karakterizasyonu",*** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D., Ankara, (2007)

[43] M. CAN, ***"Manyetik Nanoparçacıkların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması",*** Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği A.B.D. , Ankara, (2005)

[44] A. ŞABCİYAN, ***"Özel Mıknatıslayıcı Tasarımı",*** İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği A.B.D., İstanbul, (2007)

[45] İ. DİNÇER, ***"$RMN_{2-X}T_XX_2$ (R: Hafif Nadir Yer Elementi, T: Fe, Co, X: Si, Ge)Alaşımlarının Kristal ve Manyetik Yapılarının X-Işını ve Nötron Toz Kırınımı İle İncelenmesi",*** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D. , Ankara, (2005)

[46] E. ÇÖKTÜREN, ***"Ferromanyetik Filmlerde Oluşan Yüzey Manyetik Anizotropisinin Nümerik Çözümlenmesi",*** Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D., Edirne, (2008)

[47] M. SOLAK, ***"Sıcaklık, Stres ve Diğer Çevresel Faktörlerin Manyetik Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması",*** Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D. , Zonguldak, (2006)

[48] Ş. DEMİRBAŞ, ***"ELK-301 Elektrik Makinaları-1",*** *http://w3.gazi.edu.tr/~demirbas/*, (2009)

[49] A. IŞIK, ***"FePd Ferromagnetik Şekil Hafıza Alaşımının Kristalografisi",*** Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D. , Isparta, (2007)

[50] A. BÜYÜKSARAÇ, ***"Kapadokya ve Çevresinin Paleotektonik Evriminin Jeofizik Yöntemlerle İncelenmesi",*** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği A.B.D., Ankara, (2002)

[51] H. BAYRAKDAR, ***"$BaTiO_3$, $Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$, $Co_xZn_{1-x}Fe_2O_4$, $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$, $Cu_xNi_{1-x}Fe_2O_4$, $Cu_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ ve $Cu_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ Örneklerinin Elektromanyetik Soğurma Özelliklerinin İncelenmesi",*** Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D., Kocaeli, (2011)

[52] M. ÖZER ***"Şekil ve Boyut Kontrollü Çinko Oksit Tozunun Solvotermal Yöntemle Sentezlenmesi",*** Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği A.B.D., Eskişehir, (2006)

[53] *http://rahmiunal.net/toz/powdermet.html*

[54] B.YALÇIN, **"Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması",** Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği A.B.D., Isparta , (2007)

[55] *http://science.howstuffworks.com/scanning-electron-microscope2.htm*

[56] Y. ŞAHİN, ***"Çekirdek Fiziginin Esasları",*** Atatürk Üniversitesi Yayınları, Erzurum, 340, (1999)

[57] U. DURMUŞ, ***"Yarıiletken Kristallerinin Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi",*** Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D., Edirne, (2009)

[58] A.M. EL-SAYED, ***"Influence of Zinc Content on Some Properties of Ni–Zn Ferrites",*** Ceramics International 28, 363–367, (2002)

[59] A. C. F. M. COSTA, M.R. MORELLİ, R. H. G. A. KİMİNAMİ, **"*Microstructure and Magnetic Properties of $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Synthesized by Combustion Reaction",*** J Mater Sci, 42, 779–783 (DOI 10.1007/s10853-006-1440-6), (2007)

[60] I.ISMAİL, M.HASHİM ***"Structural and Magnetic Properties Evolution of Fine-Grained $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Series Synthesized via Mechanical Alloying",*** Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(11), 1865-1877, ISSN 1991-8178, (2011)

[61] A.C.F.M. COSTA, E. TORTELLA, M.R. MORELLİ, R.H.G.A. KİMİNAMİ, ***"Synthesis, Microstructure and Magnetic Properties of Ni–Zn Ferrites",*** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 256, 174–182, (2003)

[62] R.V. MANGALARAJA, S. ANANTHAKUMAR, P. MANOHAR, F.D. GNANAM, ***"Initial Permeability Studies of Ni-Zn Ferrites Prepared by Flash Combustion Technique",*** Materials Science and Engineering A355, 320-324, (2003)

[63] K.H. WU, T.H. TİNG, C.I. LİU, C.C. YANG, J.S. HSU, **"Electromagnetic and Microwave Absorbing Properties of $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$/Bamboo Charcoal Core–Shell Nanocomposites",** Composites Science and Technology 68, 132–139, (2008)

[64] F. Lİ, H. WANG, L. WANG, J.WANG, ***"Magnetic Properties of $ZnFe_2O_4$ Nanoparticles Produced by a Low-Temperature Solid-State Reaction Method",*** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 309, 295-299, (2007)



MUSTAFA ARAS
E-mail: mustafa-aras-@hotmail.com / mustafa.aras@kocaeli.edu.tr

Doğum Tarihi: 06.08.1987

Doğum Yeri: Edirne/Uzunköprü

Uyruğu: T.C.

Medeni Hali: Bekar

Askerlik Durumu: Tecilli

Yabancı Dili: İngilizce

İş Durumu: Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği (Araştırma Görevlisi)

Eğitim Durumu:

Yüksek Lisans

Trakya Üniversitesi(Edirne/Merkez)

Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

1. Lisans Programı

İstanbul Üniversitesi(İstanbul/Avcılar)

Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Lisans Programı

2. Lisans Programı

Anadolu Üniversitesi

Açıköğretim Fakültesi İşletme Lisans Programı

Lise

Kepirtepe Anadolu Öretmen Lisesi(Kırklareli/Lüleburgaz)

(Ortaöğretim/Devlet Parasız Yatılı)

İlköğretim

Raşit Efendi İlköğretim Okulu (Edirne/Keşan)