T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NDFEB MIKNATIS TOZLARININ YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİNİN KARAKTERİZASYONU

Sena FENERCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Doç. Dr. Öznur ÇAKIR

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NDFEB MIKNATIS TOZLARININ YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİNİN KARAKTERİZASYONU

Sena FENERCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 11.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Öznur ÇAKIR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Öznur ÇAKIR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Kemal ÖZDOĞAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Ercüment AKAT, Üye
Yeditepe Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Öznur ÇAKIR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan

"NdFeB Mıknatıs Tozlarının Yapısal Özelliklerinin İncelenmesinin Karakterizasyonu" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sena FENERCİ

İmza

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başlamamda ve bu değerli, geleceği parlak araştırmayı yapmamda katkısı olan; bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana rehberlik eden, tez konumun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar bütün süreçlerde en büyük destekçim ve motivasyon kaynağım, danışman hocam Doç. Dr. Öznur ÇAKIR'a,

Aldığım her kararı olumlu yönde şiddetle destekleyen ve bana sonsuz güvenen annem, babam başta olmak üzere değerli aileme,

Süreç boyunca ellerini omuzlarımda hissettiğim, her koşulda yanımda oldukları için kıymetli arkadaşlarıma,

Baştan sona tüm olumlu ve olumsuz süreçlerde anlayışla ve sabırla bekleyerek, stresime, tecrübelerime, sevinçlerime şahit ve ortak olan eşim Ahmet FENERCİ'ye sonsuz teşekkürler,

Sena FENERCİ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv
SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET I
ABSTRACT xv
1 MANYETİK MALZEMELER 1
1.1 Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması 2
1.1.1 Manyetizma Terimleri ve Birimler 3
1.2 Manyetizma Kavramları 5
1.2.1 Mıktanıslanma 5
1.2.1 Manyetik Duyarlılık 5
1.2.2 Manyetik Geçirgenlik 6
1.2.3 Curie Yasası ve Curie Weiss Yasası 10
1.2.4 Weiss Moleküler Alan Teorisi 16
1.3 Manyetik Domenler 16
1.3.1 Çoklu Domen Parçacıklarında Manyetizasyon 18
1.3.2 Domen Duvarı Sabitleme 19
1.3.3 Domen Çekirdeklenmesi 19
1.3.4 Koersivite 20
1.3.5 Histerezis Döngüsü 21
2 NEODİMYUMUN YAPISAL KARAKTERİZASYONU 23
2.1 Neodimyum 23
2.1.1 Tarihi 23
2.1.2 Elektriksel Özellikler 24
2.1.3 Manyetik Özellikleri 25

2.1.4 Fiziksel Özellikler 26
2.1.5 Neodimyum mıknatıslarının temel bileşenleri 26
2.1.6 NdFeB Kristal Yapısı 27
2.1.7 Element İlavesi 29
2.1.8 Nd-Fe-B mıknatıslarının temel özellikleri 30
2.1.9 Nd-Fe-B mıknatıslarının morfolojik özellikleri 32
2.1.10 Uygulamalar 33
2.1.11 Geri Dönüştürülmesi 34
2.1.12 Ülke Bazında Çalışmalar 36
2.2 Yapısal Karakterizasyon Cihazları 38
2.2.1 X-Işınları Toz Kırınımı Yöntemi (XRD) 38
2.2.2 Sem Taramalı Elektron Mikroskobu 40
2.2.3 PSA Tane Boyut Analiz Cihazı 42
3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 43
3.1 Hidrürleme ile Kırma 43
3.2 Öğütme Cihazları ve İşlemler 45
3.2.1 Bilyalı Değirmen Öğütme Cihazı 45
3.2.2 Gezegensel Öğütme Cihazı 47
3.3 X-Işını Kırınım Deseni Analizleri 48
3.4 Partikül Boyut Analizi 51
3.5 SEM Görüntüleri 52
KAYNAKÇA 55
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 57

SİMGE LİSTESİ

Al	Aliminyum
B	Manyetik İndüksiyon
BH_c	İndüktif Koersivite
BH_{max}	Maksimum Enerji Değeri
C	Curie sabiti
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
Dy	Disprozyum
e	Electrons
Eu	Avrupyum
Fe	Demir
Ga	Galyum
Gd	Gadolinyum
h	Planck sabiti
H	Manyetik Alan
Ho	Holmiyum
Hz	Hertz
J	Manyetik Polarizasyon
J_S	Doygun Polarizasyon
JH_S	İntrinsik Koersivite
K	Kelvin
kT	Boltzman sabiti
M	Mıknatıslanma
M_S	Doğal Mıknatıslanma
Mg	Magnezyum
Mn	Manganez
Mo	Molibden
n	Sarım sayısı
Nb	Niyobyum
Nd	Neodimyum
Ni	Nikel

O	Oksijen
Pr	Praseodim
r	Orbitin çapı
s	Özgül manyetizasyon
Si	Silisyum
Tb	Terbiyum
T_c	Curie Sıcaklığı C
T_N	Neel Sıcaklığı N
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
Z	Atom Numarası
Zr	Zirkonyum
W	Tungsten
μ	Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
μr	İlişkisel Geçirgenlik
χ	Manyetik Duyarlılık
γ	Moleküler Alan Katsayısı
ρ	Hava yoğunluğu
°C	Derece
°F	Fahrenhayt

KISALTMA LİSTESİ

BOREN	Bor Araştırma Enstitüsü
C.G.S	Santimetre-gram-saniye sistemi
M.K.S.	Metre-kilogram-saniye sistemi
MRI	Manyetik rezonans görüntüleme
PSA	Tane Boyut Analiz Cihazı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SI	Uluslararası Sistem
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
XRD	X-Işını Kırınımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Manyetik Malzemelerin Manyetik Karakterizasyonu **6**

Şekil 1.2 Periyodik Tabloda Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması **8**

Şekil 1.3 Curie Yasası **11**

Şekil 1.4 Curie-Weiss Yasası **12**

Şekil 1.5 Ferromanyetik Malzemenin Curie Sıcaklığı ile Paramanyetik Malzemeye Dönüşü **13**

Şekil 1.6 Tc Sıcaklığının Altında **14**

Şekil 1.7 Ferromanyetik Bir Katıda Doğal Mıknatıslanmanın Sıcaklıkla İlişkisi **14**

Şekil 1.8 Demir, Kobalt ve Nikel için Manyetizasyon **16**

Şekil 1.9 Manyetizasyonun Domenlere Bölünmesinin Şematik Gösterimi (a) Tek Domen, (b) İki Domen, (c) Dört Domen, (d) Kapanış Domenleri **17**

Şekil 1.10 180 Derece Alan Duvarının Şematik Temsili **18**

Şekil 1.11 Polik Kristalin Bir Malzemede Uygulanan Alana Bağlı Olarak Alan Hareketi **19**

Şekil 1.12 Nükleasyon ve Sabitleme Türü Koersivite Mekanizma Manyetizasyon Eğrileri **20**

Şekil 1.13 Bir Ferromanyetik veya Ferrimanyetik Malzeme İçin Tipik Histerezis Döngüsü **22**

Şekil 2.1 Nd2Fe14B Kristal Yapısı **28**

Şekil 2.2 Nd-Fe-B Faz Diyagramı **29**

Şekil 2.3 XRD Cihazı **38**

Şekil 2.4 Bragg Kırınımı **39**

Şekil 2.5 XRD Temel Yapısı **39**

Şekil 2.6 SEM Cihazı **41**

Şekil 2.7 Tane Boyut Analiz Cihazı Çalışma Prensibi **42**

Şekil 3.1 Hurda NdFeB Mıknatısı **43**

Şekil 3.2 Hurda NdFeB Mıknatısların içine konulduğu hazne **43**

Şekil 3.3 Hidrürlemenin Yapıldığı Reaktör **44**

Şekil 3.4 Hidrojen Akışının Olduğu Kısım **44**

Şekil 3.5 Hurda Mıknatısın Hidrürleme Sonucu Kırılmış Hali **45**

Şekil 3.6 Bilyalı Değirmen Öğütme Cihazı **45**

Şekil 3.7 Gezegensel Öğütme Cihazı İç ve Dış Yapısı **47**

Şekil 3.8 Hurda Mıknatısın Hidrürleme Sonucu Ham Halinin X-ışını Kırınım Deseni **48**

Şekil 3.9 Numunelerin Öğütme ve Rietveld Analiz Öncesi X-ışını Kırınım Deseni **48**

Şekil 3.10 RCY Adlı Hurda Mıknatıs Tozunun Bilyalı Değirmen Cihazında Öğütme Sonrası X-ışını Kırınım Deseni **49**

Şekil 3.11 RCY Adlı Hurda Mıknatıs Tozunun Bilyalı Değirmen Cihazında Öğütme Sonrası X-ışını Kırınım Deseni-2 ..... **49**

Şekil 3.12 RCY_P1 Adlı Hurda Mıknatıs Tozunun Gezegensel Öğütme Cihazında Öğütme Sonrası X-ışını Kırınım Deseni **50**

Şekil 3.13 RCY_P1 Adlı Hurda Mıknatıs Tozunun Gezegensel Öğütme Cihazında Öğütme Sonrası X-ışını Kırınım Deseni-2 ..... **50**

Şekil 3.14 RCY Adlı Hurda Mıknatıs Tozunun Bilyalı Değirmen Cihazı Öğütme Sonrası Tane Boyut Analizi **51**

Şekil 3.15 RCY_P1 Adlı Hurda Mıknatıs Tozunun Gezegensel Öğütme Cihazı Sonrası Tane Boyut Analizi **52**

Şekil 3.16 Farklı Bölge ve Büyütmelerde SEM Görüntüsü **53**

Şekil 3.17 Farklı Bölge ve Büyütmelerde SEM Görüntüsü-2 **53**

Şekil 3.18 Farklı Bölge ve Büyütmelerde SEM Görüntüsü-3 ..... **54**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Cgs ve S.I. Birimlerinde Manyetik Malzemeler Arasındaki İlişki **4**
Tablo 1.2 Farklı Türlerin Manyetik Davranışı **9**
Tablo 1.3 Kritik Sıcaklık ve Spin İlişkisi **15**
Tablo 2.1 Neodimyum Fiziksel Özellikleri **26**
Tablo 2.2 Geri Dönüşüm Sürecinde Çevreyi Etkileyen Faktörler **35**
Tablo 3.1 Bilyalı Değirmen Öğütme Cihazı Özellikleri **46**

ÖZET

NdFeB Mıknatıs Tozlarının Yapısal Özelliklerinin İncelenmesinin Karakterizasyonu

Sena FENERCİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Öznur ÇAKIR

Son zamanlarda sıklıkla çalışılan manyetik malzemeler sağlık, otomotiv, uzay, savunma sanayi sektöründe ve bunun gibi birçok alanlarda ihtiyaç duyulan malzemeler sınıfında önemli bir yer edinmiştir. Bu sektörlerde kullanılmak üzere kalıcı ve yüksek manyetik özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç artmıştır ve manyetik malzemeler nadir bir malzeme sınıfı olmaktan çıkmıştır. Nadir toprak elementleri arasında bulunan lantanitler, bazı ametal ve metal alaşımları gibi içerdiği mıknatıslanma özelliği sayesinde yüksek performans gerektiren alanlarda tercih edilmektedir. Elektrik, manyetik ve fiziksel özellikleri ile dikkatleri üzerine çeken bu malzemeler arasında en çok sert ferrit ve NdFeB tipi mıknatıslar kullanmaktadır. Nadir toprak mıknatısları, nadir toprak elementlerinden oluşan alaşımlardır. Bu araştırmada manyetik malzemelerin sınıflandırılmasından,

manyetik davranış ve özelliklerinden bahsedilmiştir. Akabinde, neodimyum elementinin keşfediliş tarihinden günümüze; elektrik, manyetik ve fiziksel özelliklerine, bu özelliklerin kullanıldığı uygulamalara değinilmiştir. Neodimyum temelli NdFeB mıknatıs tozlarının kristal yapısı, temel ve morfolojik özelliklerinden yola çıkarak kullanıldığı alanlar, geri dönüştürülmesi gibi uygulamalarla beraber yapısal özellikleri araştırılmıştır. Araştırma sırasında kullanılan XRD, SEM, PSA gibi laboratuar cihazları malzemelerin mikroyapısal ve manyetik özelliklerinin daha ayrıntılı analiz edilmesine imkan tanımıştır. Yapılan karakterizasyon çalışmaları sayesinde NdFeB mıknatıslarında manyetik özellikleri etkileyen faktörler arasında ilave edilen elementler ve faz farklılıklarının önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, manyetik malzemelerin geniş kullanım alanlarına yönelik bilgi vermekte olup; sağladığı enerji verimliliği, elektronik cihazların performansı gibi teknolojik gelişmelerde uygulanması için yeni perspektifler sunmakta ve gelecek araştırmalar için önemli bir temel sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik malzemeler, mıknatıs, NdFeB, elektriksel ve manyetik özellikler, neodimyum, yüksek performans, domenler.

ABSTRACT

The Characterization of Structural Properties of NdFeB Magnet Powder

Sena FENERCİ

Department of Physics

Program of Physics

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Öznur ÇAKIR

In recent times, magnetic materials, which are frequently studied, have gained significant importance in the class of materials needed in sectors such as healthcare, automotive, aerospace, and defense industries, among many others. The demand for permanent materials with high magnetic properties for use in these sectors has increased, and magnetic materials have ceased to be a rare class of materials. Lanthanides, which are among rare earth elements, and certain non-metal and metal alloys are preferred in high-performance demanding fields due to their magnetization properties. Among these materials, which draw attention with their electrical, magnetic, and physical properties, hard ferrite and NdFeB type magnets are the most commonly used. Rare earth magnets are alloys composed of rare earth elements. This study discusses the classification of magnetic materials, their magnetic behaviors, and properties. Subsequently, from the discovery of the element neodymium to the present, its electrical, magnetic, and physical properties, and the applications of these properties have been covered. The structural properties

of NdFeB magnet powders based on neodymium, such as their crystal structure, basic and morphological properties, areas of use, and recycling applications have been researched. Laboratory devices used during the research, such as XRD, SEM, and PSA, enabled a more detailed analysis of the microstructural and magnetic properties of the materials. Characterization studies have shown that added elements and phase differences play a significant role among the factors affecting the magnetic properties of NdFeB magnets. These findings provide information on the wide range of applications of magnetic materials, offer new perspectives for their application in technological developments such as energy efficiency and performance of electronic devices, and provide an important foundation for future research.

Keywords: Magnetic materials, magnetization, NdFeB, electrical and magnetic properties, Neodymium, High Performance, Domains

1
MANYETİK MALZEMELER

Bir manyetik alanı algılayabilen ve bu alana tepki verebilen özel tasarımlı sentetik malzemelerden veya doğada bulunan doğal manyetik malzemelerden oluşur. Bu malzemeler genellikle atomik veya moleküler düzenlemeleri içerdikleri için manyetik özelliklere sahiptirler. Manyetik malzemelerin temel özellikleri şunları içerir:

a) Manyetizma: Dış bir manyetik alan uygulandığında, manyetik malzemelerin kendiliğinden manyetik hale gelmesidir. Atomik veya moleküler düzeydeki manyetik momentlerin düzenlenmesi, malzemenin genel manyetik davranışını belirler.

b) Manyetik Alanın Etkisi: Dış bir manyetik alan altında manyetik bir polarizasyon sergilerler, böylece kendi manyetik alanını oluştururlar. Bununla beraber elektronik cihazlardan manyetik rezonans görüntüleme (MRI) sistemlerine kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin özellikleri, endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamalarda önemli bir rol oynar.

1.1 Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması

Atom, kendi ekseni etrafında dönen ve kendi yörüngesinde hareket eden bir dizi elektron içermektedir. Atomun manyetik momenti, tüm elektronik momentlerin vektörel toplamını temsil eder ve iki olası duruma yol açar.

a) Tüm elektronların manyetik momentleri birbirlerini nötrleştirici şekilde yönlendirir, bu da atomun genel net manyetik momentine sahip olmadığı diyamanyetizmaya yol açar.

b) Elektronik momentlerin nötrleşmesi sadece bölgesel olarak gerçekleşir ve atomda net bir manyetik moment kalır. Bu tip atomlardan oluşan maddeler, paramanyetizma, ferromanyetizma, antiferromanyetizma ve ferrimanyetizma gibi kategorilere ayrılır. Atomik momentin deneysel hesaplaması, bir elektronun manyetik momente katkısının, spin ve yörüngesel açısal momentumlarından gelen katkıların vektörel toplamı olduğu bilgisi temel alınarak elde edilmiştir. Atomun manyetik momenti, manyetizmanın temel özelliklerini belirler. Ayrıca, bir atomun çekirdeği ve çekirdeğin içindeki parçacıkların spinleri, atomun manyetik momentine katkıda bulunur. Bir elektron, çekirdek etrafında yörünge hareketi yaparken, çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik moment, kütleye ters orantılıdır.

Manyetik malzemeler, atomlarındaki manyetik momentlerin birbirleriyle etkileşimine bağlı olarak farklı manyetik düzenlemeler içerirler ve bu düzenlemelerin karakterizasyonunda, manyetik doygunluğun büyüklüğü belirleyici bir özelliktir. Maddelerin genelinde manyetik özellikler bulunsada bazı maddeler diğerlerine göre daha belirgin manyetik özelliklere sahiptir. Manyetik malzemeler, görev ve özelliklerine göre diamanyetizma, paramanyetizma, ferromanyetizma, ferrimanyetizma ve antiferromanyetizma olarak beş sınıfa ayrılmıştır.

Diamanyetik malzemelerde uygulanan manyetik alanın sıfır olduğu durumda malzeme içindeki atomlar net bir manyetik momente sahip değildir ve dış alan ile zıt yönelim göstermektedirler.

Paramanyetik malzemelerde uygulanan manyetik alanın sıfır olduğu durumda malzeme içindeki atomlar manyetik momentlere sahiptir ve bu manyetik momentler rastgele yönlendirilmiştir.

Ferromanyetik malzemelerde atomlar, harici bir manyetik alan olup olmadığına bakılmaksızın paralel hizalanmış aynı yönde spinlere sahip manyetik momentlere sahiptir, yani manyetik alan olmadığında bile net manyetizasyon bulundurmaktadır. Ferrimanyetik malzemelerde atomların spinleri zıt yönelime sahiptir, zıt yönelmiş momentlerin manyetizasyonu farklı olduğundan net bir manyetizasyona sahiptir. Antiferromanyetik malzemelerde atomlar, antiparalel hizalanmış manyetik momentlere sahiptir ve birbirini tamamen iptal eder. Uygulanan bir dış alan yokken net bir manyetizasyon yoktur.

Tüm malzemeler, büyük ölçüde manyetik duyarlılıklarına bağlı olarak bu beş kategoriye ayrılabilirler. Diamanyetizma ve paramanyetizma, genellikle periyodik cetvelin elementlerinin manyetik özelliklerini açıklar ve oda sıcaklığında en yaygın iki tip manyetizmadır. Antiferromanyetizma saf elementlerde oda sıcaklığında gözlemlenebilen diğer bir manyetizma sınıfıdır. Manyetik duyarlılık değeri, her malzeme türü için belirli bir sıcaklık aralığında düşer, bu durum Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Ferromanyetizma malzemeler harici bir alan içermediğinden harici alana paralel hizalanmış kalıcı bir manyetik moment oluşturmaktadır. Doygunluk noktasında, manyetizasyonu etkilemeyen veya etkisi neredeyse hiç olmayan harici bir alanda artış olacaktır.[1],[9],[16].

1.1.1 Manyetizma Terimleri ve Birimler

Manyetik parametreleri ölçmek için iki farklı birim sistemi vardır: Gauss (CGS, santimetre-gram-saniye) ve Sistem Uluslararası (SI) sistemi (MKS, metre-kilogram-saniye). CGS birim sistemi uzun süredir kullanılırken, mühendislik ve diğer teknik alanlarda SI sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 1.1, iki sistem arasındaki ilişkileri ve dönüşümleri göstermektedir.[1]

Tablo 1.1 CGS ve S.I. sistemler arası bazı manyetik parametre ilişkileri.
(Burada: G = Gauss, Oe = Oersted, T = Tesla)[1]

Miktar	**CGS birimleri**	**S.I. Birimleri**	**Dönüşüm faktörü (cgs'den S.I.'a)**
Manyetik İndüksiyon (B)	**G**	**T**	$\mathbf{10^{-4}}$
Manyetik Alan (H)	**Oe**	**A/m**	$\mathbf{10^3 / (4\pi)}$
Mıknatıslanma (M)	**emu/cm^3**	**A/m**	$\mathbf{10^3}$
Manyetizasyon (4π M)	**G**	**-**	**-**
Manyetik Polarizasyon (J)	**-**	**T**	**-**
Özgül Manyetizasyon (s)	**emu/g**	**J/(T × kg)**	**1**
Geçirgenlik (μ)	**Boyutsuz**	**H/m**	$\mathbf{4\pi \times 10^{-7}}$
İlişkisel Geçirgenlik (μr)	**-**	**Boyutsuz**	**-**
Manyetik Duyarlılık (χ)	**emu/$cm^3 Oe^{-1}$**	**Boyutsuz**	**(4π)**
Maksimum Enerji Değeri (BH_{max})	**MG Oe**	**kJ/m^3**	$\mathbf{(10^2 / 4\pi)}$

1.2 Manyetizma Kavramları

1.2.1 Mıktanıslanma

M mıknatıslanması birim hacimdeki manyetik moment olarak tanımlanır. Elektronların yörünge üzerindeki hareketi mıknatıslanmaya ve madde içindeki manyetizmanın oluşmasına neden olur.

$$M = \frac{\mu}{v} \tag{1.1}$$

Daha önce de belirtildiği gibi, içinden I akımı geçen bir iletken etrafında manyetik alan oluşturur. L boyunda n sarım sayısını da bir bobinden I akımı geçerse içinde ve eksene paralel bir manyetik alan şiddeti (H) oluşur.

$$H = \frac{nI}{L} L \tag{1.2}$$

Dolayısıyla,

$$B = \mu H \tag{1.3}$$

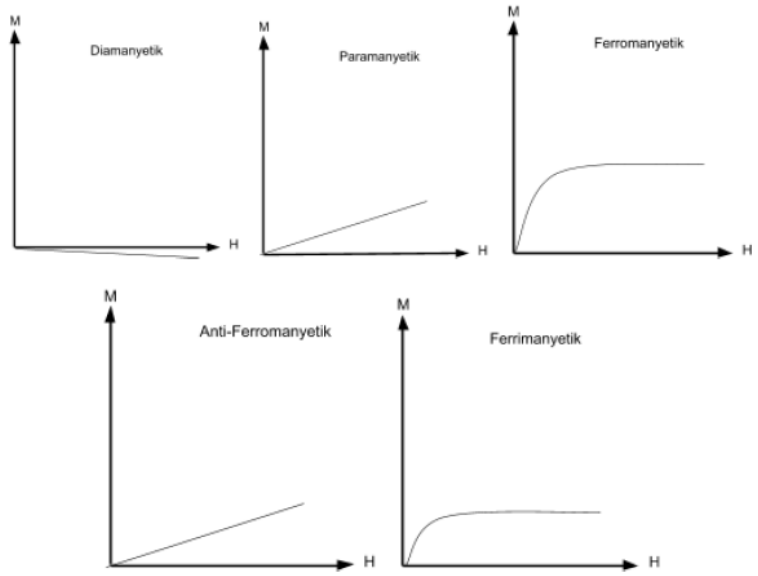
bağıntısı da buradan gelmektedir.[2],[3]

1.2.1 Manyetik Duyarlılık

Manyetik duyarlılık χ, hacimsel manyetik duyarlılık olarak da bilinen boyutsuz bir değerdir ve bir malzemenin manyetik alana tepkisindeki manyetizasyon derecesini temsil eder. Denklem aşağıda belirtildiği şekilde ifade edilebilir:

$$\chi = \frac{M}{H} \tag{1.4}$$

Duyarlılık değeri, malzemede birkaç farklı manyetizma türünü ayırt etmek ve manyetik davranışlarını tanımlamak için kullanılabilen önemli bir karakteristik özelliktir.



Şekil 1.1 : Manyetik malzemelerin manyetik karakterizasyonu[2]

1.2.2 Manyetik Geçirgenlik

Bir malzemenin manyetik yanıtını ve gücünü gösteren başka bir faktör de geçirgenlik μ'dür. Manyetik geçirgenlik (μ), bir malzemenin içindeki manyetik alanın geçişini ifade etmektedir. Her malzeme bir manyetik geçirgenliğe sahiptir. B manyetik akı yoğunluğunun, H mıknatıslanma kuvvetine oranıdır. Manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemelerde manyetik alan daha hızlı oluşmaktadır. Boşluğun manyetik geçirgenliği(μ_0) $4\pi\ 10^{-7}$H/m'dir.

Birim alan başına ölçülen manyetik akı, manyetik indüksiyon B olarak bilinir. H Manyetik alan, μ_0 = boşluktaki geçirgenlik olmak üzere aşağıdaki denklem verilir.

$$B = \mu_0 \, x \, H \tag{1.5}$$

1 Tesla'lık bir manyetik indüksiyon, dik bir akım taşıyan bir iletken üzerinde 1 Newton kuvvet üretebilir. Dış manyetik alan, manyetik alan (H) içinde bulunan bir maddenin toplam atomik momentini etkiler. Birim hacim başına bir manyetik

moment olarak bilinen manyetizasyon M, uygulanan alan H'yi etkileyen kendi indüksiyon alanını oluşturur.
Tanımlamak istediğimizde:

$$B = \mu_0 \, . \, (H + M) \tag{1.6}$$

Mutlak geçirgenlik μ şu şekilde tanımlanabilir:

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{1.7}$$

Denklemler 1.6 ve 1.7'yi birleştirerek şu elde edilir:

$$B = \mu_0 \bullet H \bullet (1 + \chi) = \mu_0 \bullet \mu_r \bullet H \tag{1.8}$$

Burada μ_r, malzemenin göreli geçirgenliğidir.

Denklem 1.8 ve 1.7'yi kullandığımızda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\mu = \mu_0 \bullet \mu_r \tag{1.9}$$

μ, μ_r veya χ, bir malzemenin manyetik alandaki manyetik yanıtını tanımlamak için kullanılabilir.

Ferromanyetizma, manyetik duyarlılık ($\chi = \frac{M}{H}$) değerlerinin artışını gösterir ve Curie sıcaklığı (Tc) boyunca soğutulurken ferromanyetizmanın başlangıcını gösterir. Manyetik duyarlılığın tersi, T ile aynı yönde değişmektedir ve $\frac{1}{\chi} = 0$ noktasında Curie sıcaklığına ekstrapole edilir. Bu, Curie-Weiss denklemi tarafından tanımlanır:

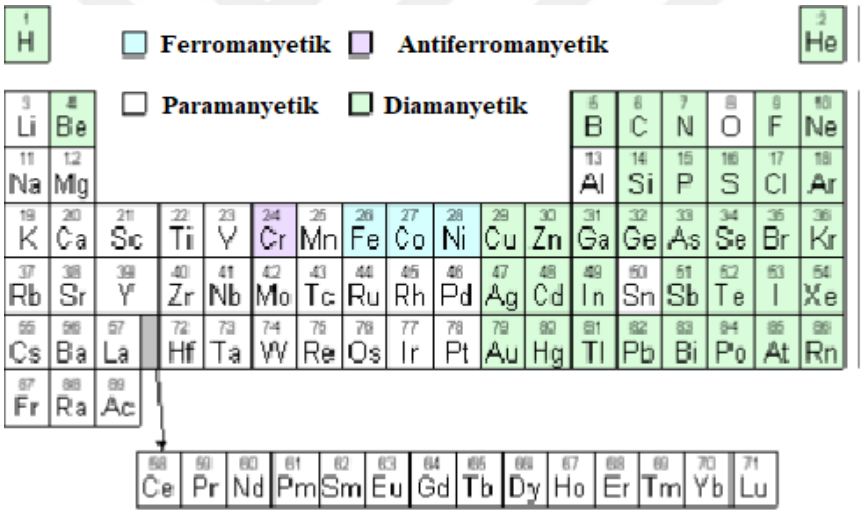
$$\chi = \frac{C}{(T - \theta)} \tag{2.0}$$

$$\frac{1}{\chi}=\frac{T}{C}=\frac{\theta}{C} \qquad (2.1)$$

Örneğin, $\frac{1}{\chi}$ = 0 olduğunda T = θ olur.

Burada, θ, Curie sabiti (-ve/+ve) birimleridir (K), θ Weiss teorisinden kaynaklanır. Ferromanyetikler için pozitif (+ve) ve antiferromanyetikler için negatif (–ve) olarak ifade edilir.[3],[4]

Şekil 1.2'de periyodik tablo ve elementlerin manyetik özellikleri ayrıca gösterilmiştir. Tabloda belirtildiği gibi yaklaşık olarak yarısının paramanyetik veya diamanyetik elementler olduğu görülmüştür. Tüm periyodik tablo elementleri, önceden bahsedilen manyetik türlerin içine girmektedir.



Şekil 1.2 Periyodik tabloda manyetik malzemelerin sınıflandırılması [1]

Farklı manyetizma sınıflarının etkileşimi ayrıca Tablo 1.2' gösterilmiştir.

Tablo 1.2 Farklı Türlerin Manyetik Davranışı [1],[9]

Manyetizma Türü	Duyarlılık	Atomik / Manyetik Davranış	Örnekler
Diamanyetizma	**Küçük ve Negatif**	**Atomlar manyetik momente sahip değildir**	**Au: -2.74x10^{-6}, Cu: -0.77x10^{-6}**
Paramanyetizma	**Küçük ve Pozitif**	**Atomlar rastgele yönlendirilmiş manyetik momentlere sahiptir**	**β-Sn: 0.19x10^{-6} Pt: 21.04x10^{-6} Mn: 66.10x10^{-6}**
Ferromanyetizma	**Büyük ve Pozitif**	**Atomlar paralel hizalanmış manyetik momentlere sahiptir**	**Fe: ~100,000**
Antiferromanyetizma	**Küçük ve Pozitif**	**Atomlar karışık paralel ve antiparalel hizalanmış manyetik momentlere sahiptir**	**Cr: 3.6x10^{-6}**
Ferrimanyetizma	**Büyük ve Pozitif**	**Atomlar antiparalel hizalanmış manyetik momentlere sahiptir**	**Ba Ferriti: ~3**

Antiferromanyetizma, küçük bir manyetik duyarlılığa sahiptir ve pozitiftir. Atomlar, hem antiferromanyetik hem de ferromanyetik maddelerde düzenli modelde hizalanan manyetik momentlere sahiptir. Komşu momentlerin birbirine antiparalel olması, bu iki malzeme sınıfı arasındaki farktır. Bir başka şekilde ifade etmek gerekirse, atomun manyetik moment değerleri eşit ve zıt yönlü olduğu için yapı içerisinde oluşan net manyetik moment değeri sıfırdır. Neel sıcaklığı, belirli

antiferromanyetik malzemelerin paramanyetik hale geldiği kritik sıcaklıktır. Belirli maddelerin manyetik özelliklerini belirlemek için Curie ve Neel sıcaklıkları kullanılır. Her ikisinin de yüksek sıcaklıkları vardır. Neel sıcaklığı ile Curie sıcaklığı arasındaki en önemli fark şudur: Neel sıcaklığında antiferromanyetik malzemeler paramanyetik hale gelirken, Curie sıcaklığında bazı malzemeler kalıcı manyetik özelliklerini kaybeder.[5] Ferrimanyetizmada ise bunlar kendiliğinden etkin manyetizmaya sahiptir ve atomik momentler eşit değildir. Bu durum ferritlerdeki Fe^{2+} ve Fe^{3+} gibi alt kafeslerdeki iyonların farklı olmasından kaynaklanır.

1.2.3 Curie Yasası ve Curie Weiss Yasası

Curie Weiss Yasası malzemenin kendi içinde belli bir sıcaklıkta meydana getirdiği kalıcı manyetizmasını açıklar. Kendi içinde mıknatıslanma özelliğinin dış manyetik alan olmadan görüldüğü Curie sıcaklığıdır. Paramanyetik malzemelerin manyetik özelliklerini tanımlayan ve özellikle yüksek sıcaklıklarda manyetik duyarlılığı açıklayan bu durum Curie-Weiss yasası olarak adlandırılır.[5]

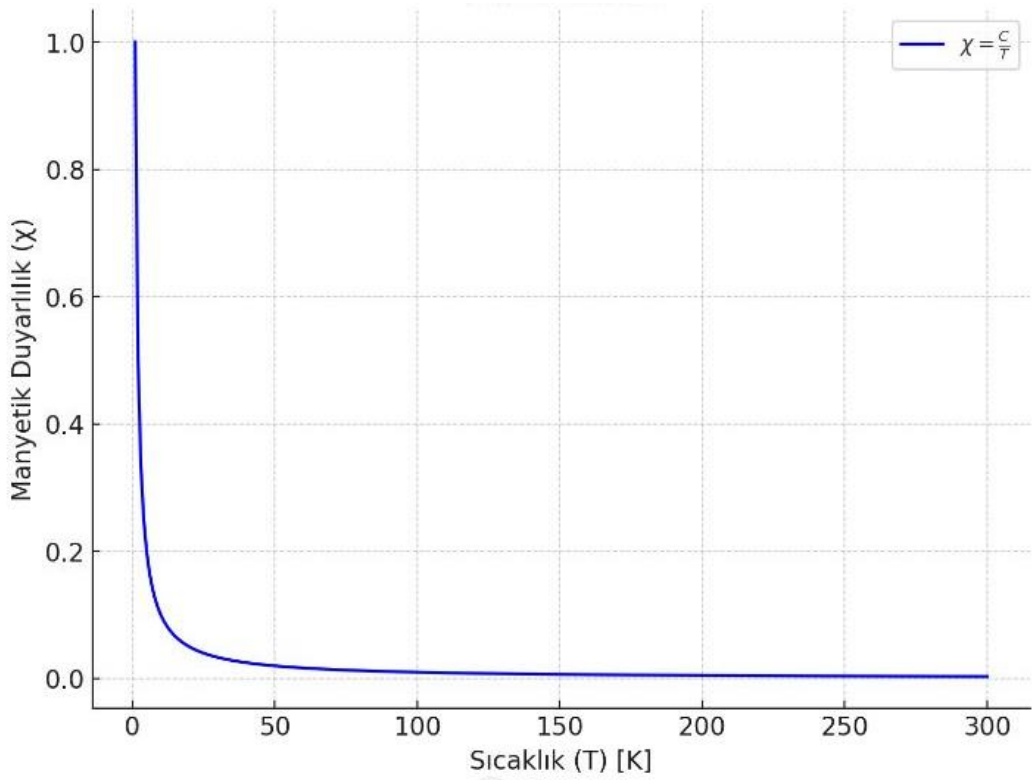
$$C = \frac{N\mu_m^2\mu_o}{3k} \tag{2.2}$$

Mıknatıslanma ve duyarlılık,

$$M = \frac{N\mu_m^2 B}{3kT} = \frac{N\mu_m^2\mu_o H}{3kT} \tag{2.3}$$

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{N\mu_m^2\mu_o}{3kT} = \frac{C}{T} \tag{2.4}$$

Olmak üzere Curie Yasası Denklem 2.4'te verilmektedir.

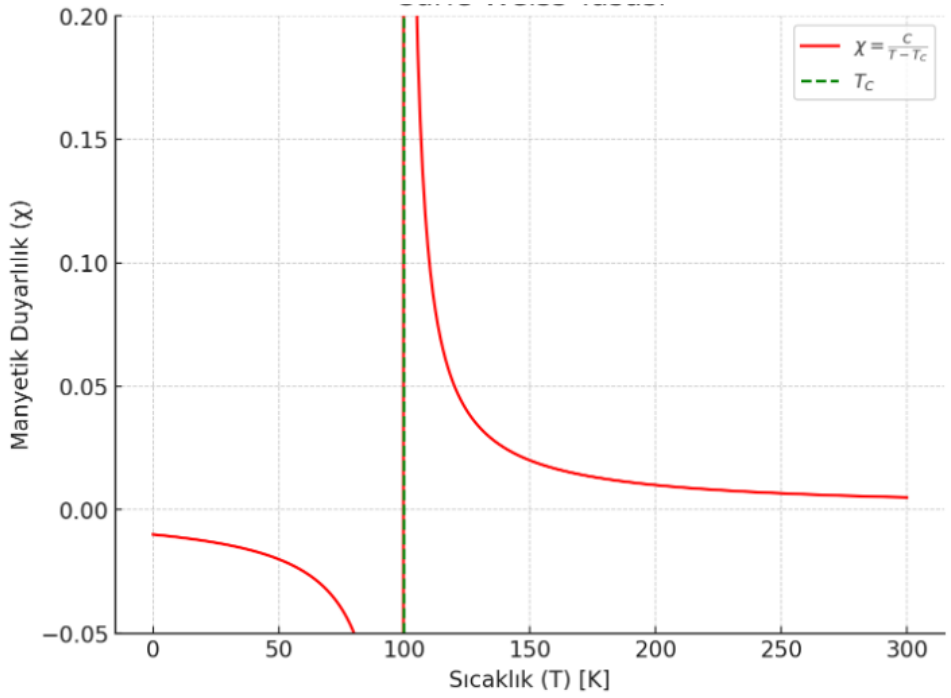


Şekil 1.3 Curie Yasası[6]

Weiss'in ferromanyetik malzemelerdeki manyetik momentler üzerinde etkileşen ve onları düzene sokan iç moleküler alanın olduğunu düşünmesine istinaden çalışmaların üzerinde durulmuştur.
Faz geçiş sıcaklığı Tc 'nin üstünde moleküler alanın izinli enerji seviyesi kT'den daha düşük olmakta ve malzeme manyetik momentlerinin yöneliminin gelişigüzel olduğu paramanyetik bir davranış sergilemektedir.

Curie Weiss yasası,

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \tag{2.5}$$



Şekil 1.4 Curie-Weiss Yasası[6]

χ_m manyetik durgunluk, C malzemeye özgü Curie sabiti, T_c Curie sıcaklığı, T sıcaklıktır.
Bu denklem sıcaklığın faz geçiş sıcaklığına eşit olduğu (T= T_c) durumda birçok ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemede deneysel olarak gözlemlenen manyetik durgunluğun pik yaptığı durumu açıklamaktadır.

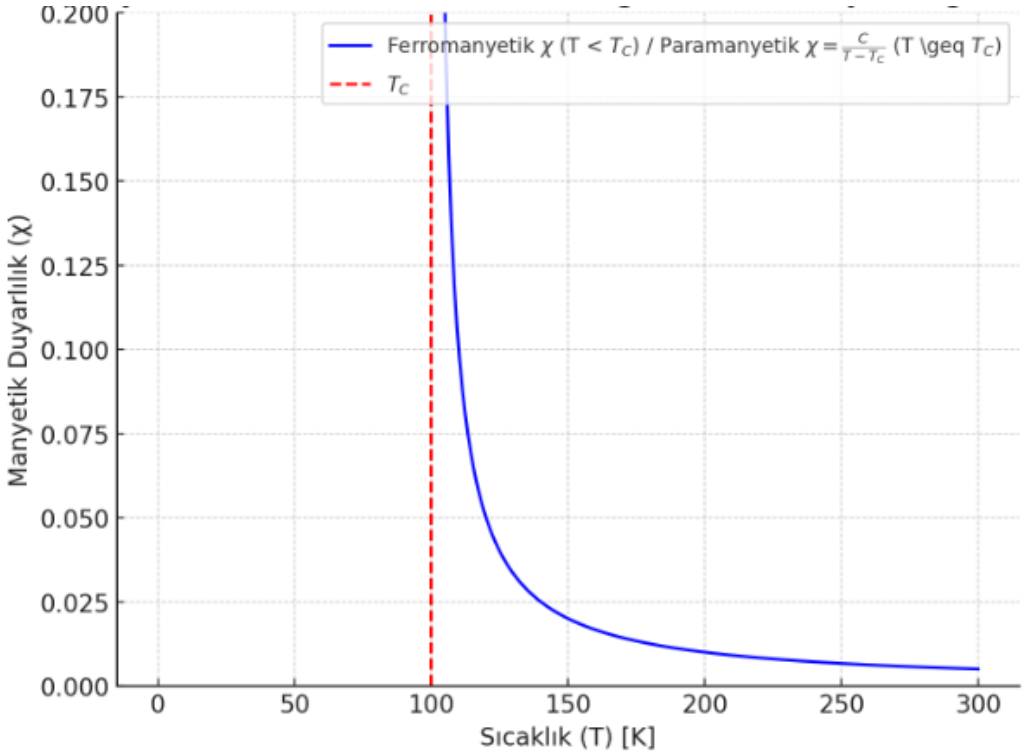
$$\chi = \frac{C}{T-T_c} \tag{2.6}$$

Burada θ 'nın doğrudan moleküler alan (H_m) ile ilişkili olduğu görülmektedir. Çünkü θ = ργC ve H_m= γM, olmak üzere γ moleküler alan katsayısıdır.

$$\frac{\boldsymbol{M}}{\boldsymbol{H+\lambda M}} = \frac{C}{T} \tag{2.7}$$

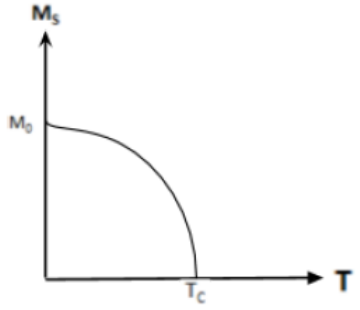
$$\frac{\boldsymbol{M}}{\boldsymbol{H}} = \frac{C}{T-\lambda C} = \frac{C}{T-T_c} \tag{2.8}$$

$\chi_{\boldsymbol{m}} = \frac{C}{T-\theta}$	(2.9)



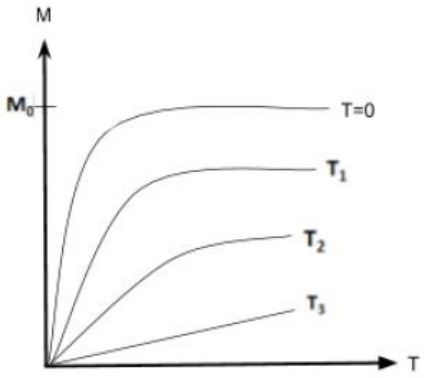
Şekil 1.5 Ferromanyetik malzemenin Curie sıcaklığı ile paramanyetikliğe dönüşüm grafiği [6]

θ bir sabittir ve Curie noktası olarak bilinir. θ pozitif olduğunda γ da pozitif olacağından, H_m ile M 'de aynı yönde olacaktır. θ değeri yaklaşık olarak T_c 'ye yakın olur. Curie sıcaklığı, belirli malzemelerin kalıcı manyetik özelliklerini kaybettikleri sıcaklıktır. İndüklenen manyetizma genellikle bu kayıp manyetizmanın yerini alabilir. Kalıcı manyetizma, malzemenin manyetik momentlerinin hizalanmasından kaynaklanırken, manyetik bir alanın varlığında düzensiz manyetik momentleri hizalamaya zorladığımızda indüklenen manyetizma ortaya çıkar. Sıralı manyetik momentler Curie sıcaklığında veya üzerinde düzensiz bir duruma dönüşür. Bu, malzemelerin ferromanyetikten paramanyetiğe dönüşmesine neden olur. Bu nedenle, mıknatısları daha yüksek sıcaklıklar zayıflatabilir. Dolayısıyla kendiliğinden manyetizma yalnızca Curie sıcaklığının altında meydana gelir. Manyetizmanın kritik bir sıcaklıkta kaybolduğunu keşfeden Pierre Curie sayesinde bu sıcaklık Curie sıcaklığı olarak bilinir. [2],[6]



Şekil 1.6 T_c Curie sıcaklığı altında doğal mıknatıslanmanın sıcaklıkla ilişkisi [7]

Ferromanyetik malzemeler için Curie sıcaklığı altında doğal mıknatıslanmanın Şekil 1.6'da verilen grafikte hızla azaldığı, normal sıcaklıkta düzenli bir artış olduğu Şekil 1.7'de verilen grafikte görülmektedir.

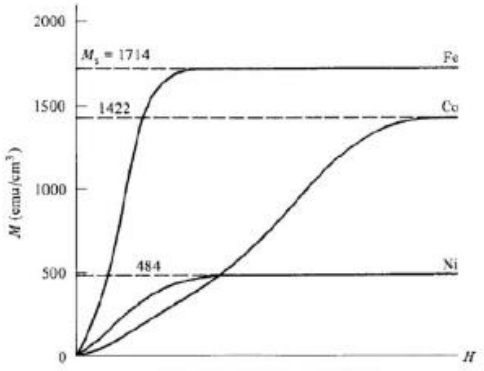


Şekil 1.7 Ferromanyetik bir katıda doğal mıknatıslanmanın sıcaklıkla ilişkisi[7]

Manyetik duyarlılık (χ), Ferromanyetik malzemelerdeki Curie sıcaklığında (T_c) sonsuz iken, paramanyetik malzemelerde ise 0 Kelvin sıcaklığında sonsuz olur. Bu sıcaklığın altında, etkileşimler termal uyarıların üstesinden gelir ve uygulanan manyetik alanın yokluğunda, doğal mıknatıslanma (M_S) ortaya çıkar. Bu durum ayrı momentlerin hepsinin paralel olmasına uygun olan 0 Kelvin sıcaklığında maksimum değerine ulaşır.

Tablo 1.3 Kritik Sıcaklık ve Spin İlişkisi [16]

Ferromanyetik 	**T_c'nin altında, spinler manyetik alan içinde paralel olarak hizalanır.**
Antiferromanyetik 	**T_N'nin altında, spinler manyetik alan içinde antiparalel olarak hizalanır.**
Ferrimanyetik 	**T_c'nin altında, spinler antiparalel olarak hizalanır ancak bozulmaz.**
Paramanyetik 	**Spinler rastgele sıralanmıştır. (T_c veya T_N'nin üzerindeki diğerlerinden herhangi biri)**
Diyamanyetik	**Sıcaklıkla değişmez.**



Şekil 1.8 Demir, Kobalt ve Nikel için manyetizasyon grafiği [8]

Şekil 1.8'de örnek olarak Fe Demir, Co kobalt ve Ni nikel için manyetizasyon grafiği verilmiştir. Her bir metal için doygunluk manyetizasyonunun M_s deneysel değerleri verilmiştir. Eğri M=0'dan M=M_s 'e kadar belirtilmiştir.
Her cm^3 yaklaşık 1700 emu manyetik momente sahiptir. θ 'nın doğrudan manyetik alanlar alakalı olduğu görülmektedir.

1.2.4 Weiss Moleküler Alan Teorisi

1907 yılında Weiss, içsel bir moleküler alan fikrini ortaya çıkardı, ancak kökenini tam olarak açıklayamadı. Heisenberg, 1927 yılında moleküler alanı değişim kuvvetleri açısından açıklamıştır. Açıklamasına göre moleküler alan teorisi, protonlar ve elektronlar arasındaki elektrostatik çekimden ve meydana gelen itici kuvvetlerden farklı bir çerçeveye sahiptir. Değişim kuvveti, elektronların spininin yönüne göre değişir. Bu, yakındaki atomların manyetik momentinin ya paralel ya da antiparalel dizilmesine neden olur. [1]

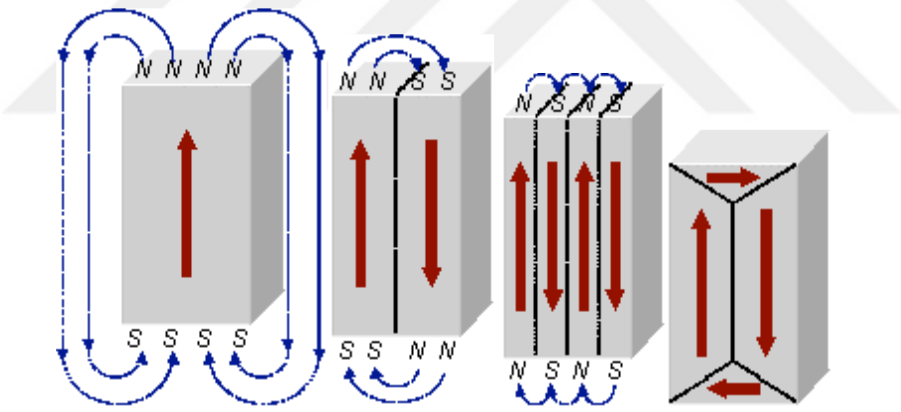
1.3 Manyetik Domenler

Bir çalışmada, bir malzeme öğesinin düzenli olarak manyetize edilmesi ve manyetik domenlerin genel sistem enerjisini azaltmada oynadığı rol, Şekil 1.9'da gösterilmiştir. Manyetik serbest kutupların demanyetizasyon alanı Hd'nin yüzeyde oluşması nedeniyle bu durum ortaya çıkmıştır.

Malzeme demanyetizasyon alanı tarafından karşıt kuvvet uygulanır. Malzemenin manyetizasyonu ve geometrisi, HD'nin büyüklüğüne katkıda bulunur. Örneğin, malzemenin uzunluk/çap oranı yüksekse, daha az manyetostatik enerji ve daha fazla demanyetizasyon alanı olacaktır. Manyetostatik enerji, manyetizasyonu iki farklı alana bölmek yoluyla yarıya düşürülür. Şekil (a)'da gösterilen manyetostatik enerji,

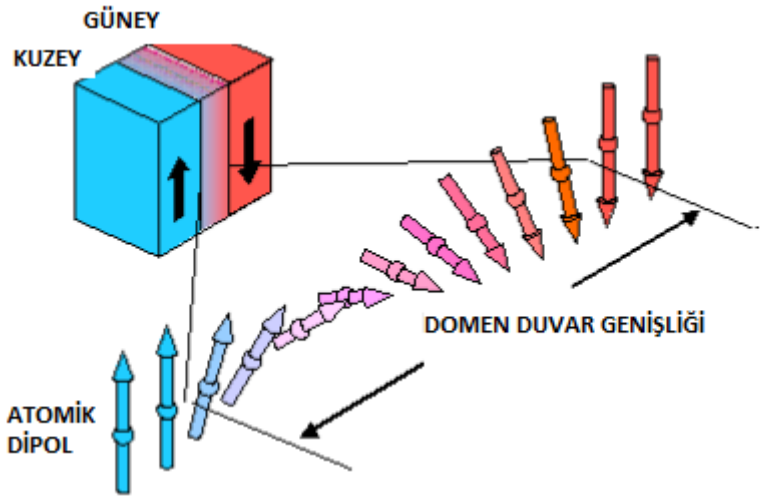
manyetik N domenlerini (Şekil (c)) böldüğünüzde dörtte birini oluşturur. Bir kapalı domenin yapısı, Şekil (d)'de gösterilir ve manyetostatik enerji sıfırdır. Malzemenin güçlü bir tek eksenli anizotropisi olmadığında ve komşu domenlerin 180º derecelik bir açıyla birbirine yerleştirilmediğinde meydana gelir. Domen yüklemesi, sistemin toplam enerjisini artırır. Domenler bölündükçe, domen duvarı oluşturmak için gereken güç azalacaktır.

Şekil 1.9'da domen duvarlarının şematik bir görüntüsünü göstermektedir. Bu duvarların içinde bulunan atomların manyetik dipol momentleri yalnızca manyetizasyonun yönlendirme yönünü değil, daha fazla enerji durumu oluşturur. Ayrıca, duvardaki atomik dipollerin birbirine 180 derecelik bir düzende olmaması, duvardaki değişim enerjisini artırır. Bu nedenle, domen duvarı enerjisi bir malzemenin kendi özelliğidir. Manyetik kristal anizotropisi, atomlar arasındaki etkileşimi belirler. Güçlü manyetik kristal anizotropisi daha kalın bir duvar tercih ederken, güçlü bir değişim etkileşimi daha ince bir duvar tercih eder. [1]



Şekil 1.9 Manyetizasyonun domenlere bölünmesinin şematik gösterimi (a) tek domen, (b) iki domen, (c) dört domen ve (d) kapanış domenleri[1]

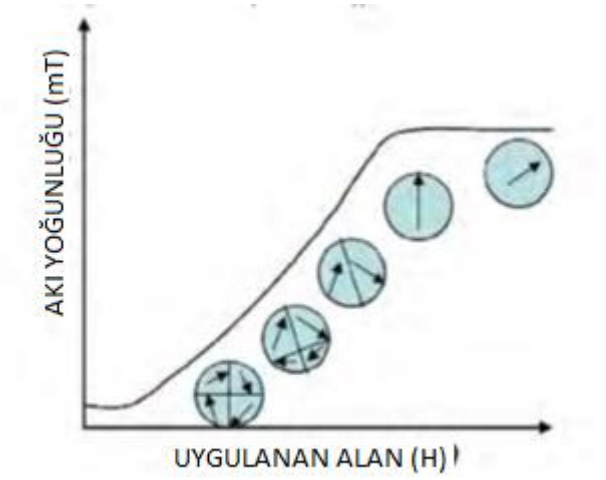
Kalın oklar manyetizasyonu temsil ederken, ince oklar demanyetizasyonu temsil etmektedir.



Şekil 1.10 180º derece alan duvarının şematik temsili[1]

1.3.1 Çoklu Domen Parçacıklarında Manyetizasyon

Bir manyetik alan arttıkça bir alan duvarı hareket etmektedir. Manyetik domenlere manyetik alan uygulandığında paralel yönde sürekli olarak büyümektedir. Malzemenin aynı yönde hizalandığı durumlarda ve alan yeterince yüksek olduğunda, manyetizasyonun kolay yönlendirme yönünde tek bir domen olacaktır. Daha yüksek bir alana uygulandığında ise manyetizasyon yönü, kolay ekseninden uzaklaşacak ve manyetizasyon doygunluğuna ulaşılana kadar dönecektir. Bu dönme işlemi uygulanan alanla paralel yönde güçlü bir sonuçlanmış manyetizasyonun olduğu tek bir domenin oluşmasına neden olur. [1],[21]



Şekil 1.11 Polikristalin bir malzemede uygulanan alana bağlı olarak alan hareketi[1]

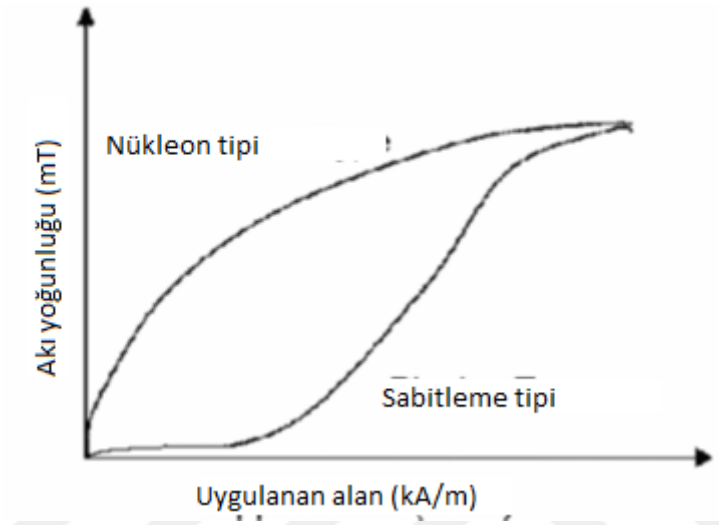
1.3.2 Domen Duvarı Sabitleme

Herhangi bir kalıcı mıknatısın karakterizasyonu, koersivite alan tarafından belirlenir. Yumuşak bir mıknatıs, manyetizasyon domenlerini tersine çevirmek için küçük bir koersivite alana sahip bir malzemedir. Ancak, çekirdeklenmenin ve domen duvarının hareket ettirilmesinin zor olduğu durumlarda, büyük bir koersivite alana ihtiyaç duyulur. Bu durum kalıcı mıknatıs davranışına yol açar ve tüm bu süreç domen duvarı sabitleme eylemini tanımlar. [1],[21]

1.3.3 Domen Çekirdeklenmesi

Daha önce belirtildiği gibi, çekirdeklenmenin tersine döndüğünde oluşan zorluklar, kalıcı mıknatıs davranışına yol açarak büyük bir koersivite alanın oluşmasına sebep olur. Mikroyapıda pürüzsüz ve ince tanelerin daha fazla geliştirilmesi için de ısıl işlem kullanılarak ileri yönde geliştirilebilir. Tanelerin yapısı bozulduğunda, bu ters domenlerin çekirdeklenmesini kolaylaştırabilir. Tanelere uygulanan baskı azaldığında, domen çekirdeklenmesi için gereken alanı artmaktadır. Böylece, taneler arasındaki sınırların daha fazla düzleşmesini sağlar ve buna bağlı olarak koersivite de artacaktır. Tüm bu süreçler malzeme doygunluğa ulaştıktan sonra ters bir alan uygulandığında gerçekleşir ve ters domenlerin çekirdeklenmesindeki zorluk nedeniyle manyetizasyonun demanyetizasyonuna karşı yüksek direnç oluşturur. Şekil 1.12'de 2 tip koersivite mekanizmanın manyetik davranışını gösterir; yani, nükleasyon ve sabitleme tipi. Nükleasyon tipinde, dış bir manyetik

alan olduğunda domen duvarları serbestçe hareket eder ve dik bir manyetizasyon eğrisi oluşur. İkinci tip sabitleme durumunda, domenlerin sabitlenmesinden kaynaklanan düşük başlangıç manyetizasyonu olur. Malzemenin hızlı bir manyetizasyon oluşturması istendiğinde sabitleme alanı (Hp) aşılabilir.[1]



Şekil 1.12 Nükleasyon ve sabitleme türü koersivite mekanizma manyetizasyon eğrileri

1.3.4 Koersivite

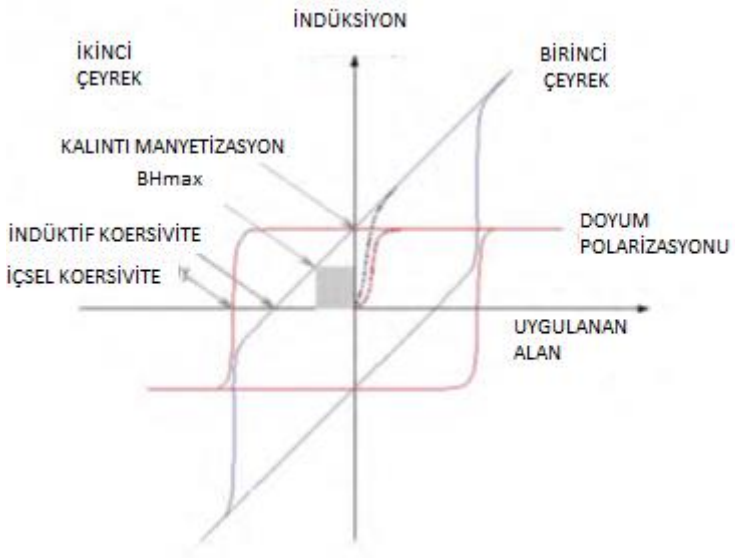
Malzeme içindeki manyetik domenleri kontrol ederek, koersivite arttırılabilir veya azalttırılabilir. Domenlerin çekirdeklenmesinin zor olması veya domen duvarlarının kolayca hareket etmemesi, sert bir manyetik malzeme için gereklidir. Domenlerin kolay dönmesini önlemek ve malzemenin manyetik stabilitesini artırmak için, malzeme güçlü bir uniaksial manyetokristalin anizotropiye sahip olmalıdır. Bu, malzemenin kristal yapısının belirli bir manyetik eksende manyetik momentlerin daha güçlü bir şekilde hizalanmasına neden olduğu ve bu eksen dışındaki yönlerde hizalanmalarının da zor olduğu anlamına gelmektedir. Böylece, domenlerin yön değiştirmesi zorlaşır ve malzemenin manyetik özellikleri daha kararlı, güvenli hale gelir. Bir manyetik domenin boyutu bir tek tane içindeyse, malzeme 'tek domen parçacıkları'na sahiptir ve manyetizasyonun yönünün kolay dönmesini önlemek için yeterli yüksek anizotropiye sahiplerse, parçacıklar kalıcı manyetik olur ve çok

zor demanyetize edilirler. Kristal boyutunun ~50 nm olduğu eritme dökümü yapılan NdFeB mıknatıslarda koersivite mekanizma gözlemlenebilir.

Kalıcı mıknatıslar ayrıca domen duvarlarını sabitleyerek demanyetizasyona karşı direnç sağlayabilirler ve koersivite elde etmek için yeni domenlerin çekirdeklenmesini zorlaştırırlar. Sinterlenmiş NdFeB kalıcı mıknatıslar, manyetik olmayan bir tane sınır fazı kullanarak tane sınırlarını düzeltir ve domen nükleasyon alanlarını kaldırır. Her kristal birkaç domen içerdiği için, nükleasyon kontrolünde kalıcı mıknatıslar kolayca manyetize edilebilir. Bununla birlikte, yeni ters domenlerin çekirdeklenmesine neden olması nedeniyle demanyetize etmek zordur.[1]

1.3.5 Histerezis Döngüsü

Bir manyetik malzemeyi karakterize etmek için Şekil 1.13'te gösterilen histerezis döngüsü kullanılır. 1. Kadran, doygun polarizasyon (J_s) ve manyetizasyon (M_s) olarak bilinen özellikleri belirlemek için kullanılabilir. Remanans, Br veya Jr, manyetizasyon alanı uygulandıktan ve manyetik alan çıkarıldıktan sonra oluşturulan alanlardır. İndüktif Koersivite(BH_c), indüksiyonu sıfıra çıkarmak için gereken ters alandır. İntrinsik Koersivite (JH_c), manyetizasyonu sıfıra çıkarmak için gereken ters alandır. İkinci bölümde, B x H çarpımı maksimum değeri "BH_{max}" olarak adlandırılır. BH_{max}, kalıcı mıknatıs malzemelerinin başarısını gösterir.



Şekil 1.13 Bir ferro- veya ferri-manyetik malzeme için tipik bir histerezis döngüsü[1]

Verilen malzemenin belirli bir bileşimi için maksimum mümkün olan enerji değeri $(js)^2/4$'tür(mükemmel kare şeklinde manyetizasyon eğrisi için).

Yeterince yüksek bir alan uygulandıktan sonra, negatif yönde doygunluk polarizasyonu elde edilir. Uygulanan alan daha sonra azaltılır ve tekrar pozitif yönde uygulandığında tam histerezis döngüsü elde edilir. Alan sürekli olarak pozitif ve negatif yönlere değiştirilir ve yeterli büyüklükteyse, polarizasyon ve indüksiyon histerezis döngüsünde saat yönünün tersine döner. Her döngüde malzemenin absorbe ettiği enerji miktarını gösteren döngünün içinde bulunan alan ve döngünün şekli, belirli bir maddenin manyetik alanına nasıl tepki verdiğini gösterir.

Bir benzer çalışmada, BH_{max}, kalıcılık, koersivite ve manyetik özellikleri içerir. İncelemeye tabi tutulan manyetik malzemelerin davranışını incelemek ve karşılaştırmak için bunlar kullanılır. Bu, kalıcı mıknatıs malzemelerinin BH_{max}'ının nasıl büyüdüğünü göstermektedir. Hacim başına iş yapma yeteneğini ölçmek için bu birim kullanılır. [1]

2
NEODİMYUMUN YAPISAL KARAKTERİZASYONU

2.1 Neodimyum

Neodimyum, kimyasal sembolü Nd olan bir elementtir. Atom numarası 60 olan, periyodik tablodaki lantanit serisinin bir parçasıdır. Bu element, nadir toprak metalleri grubundan gelir ve oldukça reaktif, parlak gümüş gri renge sahip bir metaldir. Neodimyum, özellikle mıknatıs uygulamalarında kullanılan güçlü mıknatısların (neodimyum mıknatısları) ana bileşenlerinden biridir. Bu mıknatıslar, küçük boyutlarına rağmen büyük manyetik alanlar üretebilme özellikleri nedeniyle elektronik cihazlardan, bilgisayar disk sürücülerine kadar birçok uygulamada kullanılır. Ayrıca, neodimyum bazlı mıknatıslar hoparlörlerde, mikrofonlarda ve tıbbi cihazlarda da bulunabilir. Neodimyum, özellikle endüstriyel, savunma sanayi ve teknolojik uygulamalarda kullanılan önemli bir elementtir. Güçlü mıknatıs üretiminde elzem bir element olan neodimyum, göz cerrahisi ve kozmetik cerrahinin yanı sıra deri kanserlerinin tedavisinde kullanılan yüksek güçlü kızılötesi yeşil lazerlerin üretiminde öne çıkararak sağlık sektöründe de yer almaktadır. Cam renklendirmede kullanılan bu element, göktaşlarının ve kayaçların yaşlarını da belirlemek için kullanılır. Neodimyum, mesafe ölçme cihazları, astronomik filtreler, kaynak üretim gözlükleri ve dikiz aynaları gibi çeşitli ürünlerde de bulunabilir. [15]

2.1.1 Tarihi

Avusturyalı kimyager Carl Auer von Welsbach, 1885 yılında ilk kez neodimyumu keşfetti. Welsbach, didimyumdan Neodimyum'u ayırmayı başardı. Didimyum, lantanit serisinin bir parçası olan praseodim (Pr) ve neodimyim (Nd) iki elementlerin karışımıdır. Carl Auer von Welsbach, didimyum karışımını spektroskop kullanarak inceledi. Son olarak praseodim ve neodimyum arasındaki

iki ayrı elementi izole etmeyi başardı. Neodimyum adını, Yunanca "neo" (yeni) ve "didymos" (ikiz) kelimelerinden türeterek, didimyumdan ayrılan "yeni ikiz" elementi ifade etmek için kullanmıştır.

İlk olarak 1925 yılında ABD'de neodimyum üretimi gerçekleştirildi. Bu dönemden itibaren neodimyum, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan güçlü mıknatısların ana bileşenlerinden biri olarak öne çıktı. Daha sonraki yıllarda, neodimyum ve özellikle neodimyum mıknatısları, bilgisayar teknolojisi, elektronik cihazlar, tıbbi ekipmanlar ve enerji üretimi gibi birçok farklı alanda kullanılmaya başlandı. Neodimyum mıknatısları, küçük boyutlarına rağmen yüksek manyetik güç sağlamaları nedeniyle birçok modern teknolojik uygulamada kilit bir rol oynamaktadır.

2.1.2 Elektriksel Özellikler

Neodimyum, bir element olarak metalik özelliklere sahiptir ve genel olarak iletken bir malzemedir. Elektriksel özellikleri şunlardır:

a. İletkenlik: Neodimyum, elektriği iyi bir şekilde ileten bir metaldir. Bu özellik, genellikle metalik özelliklere sahip olan elementlerin bir özelliğidir.

b. Elektrik Direnci: Neodimyum, düşük bir elektrik direncine sahiptir, yani elektrik akısına karşı direnç gösterme eğilimi düşüktür.

c.Erime Noktası: Neodimyum'un erime noktası yüksektir (1010 °C veya 1850 °F civarında), bu da onun yüksek sıcaklıklarda stabil bir şekilde kalabilen bir malzeme olduğunu gösterir.

Bu özellikler, neodimyumun özellikle elektronik ve manyetik uygulamalarda kullanılmasını sağlar. Manyetik özellikleri, mıknatıslar ve manyetik depolama cihazları gibi birçok teknolojik uygulamada değerli kılar.

2.1.3 Manyetik Özellikleri

Neodimyum güçlü manyetik özelliklere sahip bir element olmasından kaynaklı, neodimyum mıknatısları olarak bilinen özel mıknatısların üretilmesinde kullanılır.

1.Yüksek Manyetik Alan: Neodimyum mıknatısları, diğer mıknatısların çoğundan daha yüksek bir manyetik alan üretebilir. Bu özellikleri sayesinde küçük boyutlarına rağmen büyük miktarda manyetik enerji depolayabilirler.

2.Yüksek Manyetik İndüksiyon: Manyetik indüksiyon, bir mıknatısın çevresindeki bir alana uyguladığı manyetik etkidir. Neodimyum mıknatısları, yüksek manyetik indüksiyon değerlerine sahiptir, bu da uygulamada daha fazla manyetik güç elde etmesini sağlar.

3.Yüksek Koersivite: Koersivite, bir mıknatısın dış bir manyetik alan etkisi altındayken kendi manyetik alanını muhafaza etme yeteneğini ifade eder. Neodimyum mıknatısları yüksek koersiviteye sahiptir, bu da onların uzun süreli kalıcı ve güçlü manyetik özelliklere sahip olmalarını sağlar.

4.Dayanıklılık ve Stabilite: Neodimyum mıknatısları, çeşitli koşullara karşı dayanıklıdır ve stabil manyetik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri, endüstriyel uygulamalarda uzun ömürlü ve güvenilir performans sağlar.

2.1.4 Fiziksel Özellikler

Tablo 2.1 Neodimyum fiziksel özellikler [20]

Atom Numarası (Z): 60	**Kaynama Noktası: 3,074°C (5,556°F)**
Atom Ağırlığı: 144.24 u (atomik kütle birimi)	**Renk: Parlak gümüşi-beyaz**
Yoğunluk: 7.01 g/cm³	**Kristal Yapısı: Altıgen kaplama şeklinde yoğun paketlenmiş kristaller (heksagonal kristal yapısı)**
Erime Noktası: 1,021°C (1,870°F)	**Özgül Isı: 0.19 J/g·K**

2.1.5 Neodimyum mıknatıslarının temel bileşenleri

Neodimyum-demir-bor (Nd-Fe-B) mıknatısları, güçlü ve yüksek performanslı mıknatıslar olarak tanınmakta olup genellikle "neodimyum mıknatısı" veya "neodimyum demir bor mıknatısı" olarak anılmaktadır. Bu mıknatıslar, nadir toprak elementi Neodimyum (Nd), Demir (Fe) ve Bor (B) kombinasyonu ile üretilen bir alaşımdan meydana gelir.

Neodimyum (Nd): Ana elementtir ve mıknatısın temel manyetik özelliklerini sağlar.

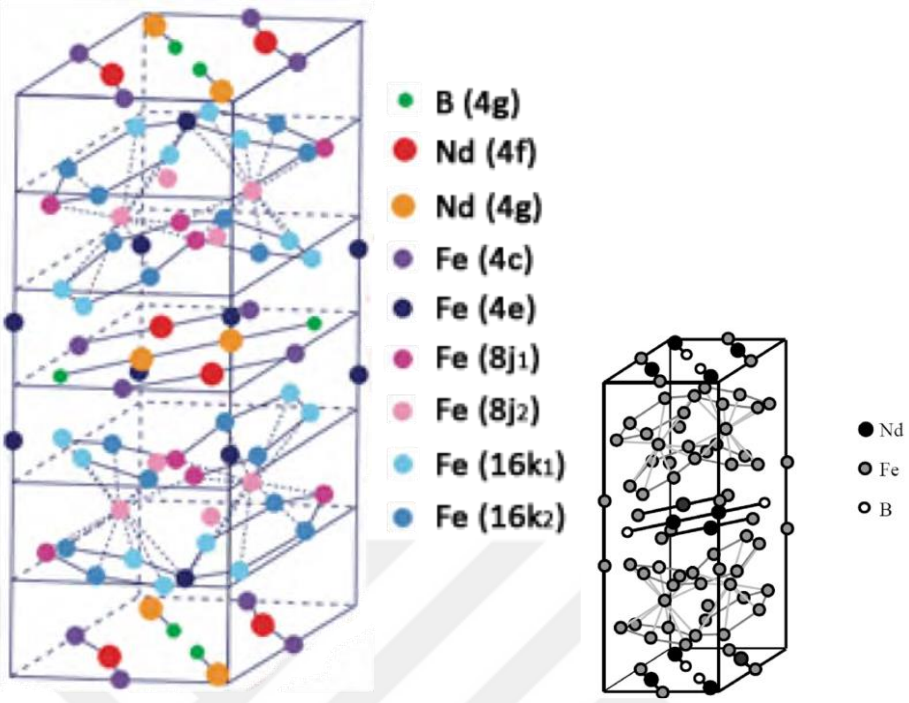
Demir (Fe): Mıknatısın yapısal dayanıklılığını artırmak ve manyetik özellikleri iyileştirmek için kullanılır.

Bor (B): Mıknatısın direncini ve işlenebilirliğini artırarak manyetik özellikleri optimize etmeye yardımcı olur.

2.1.6 NdFeB Kristal Yapısı

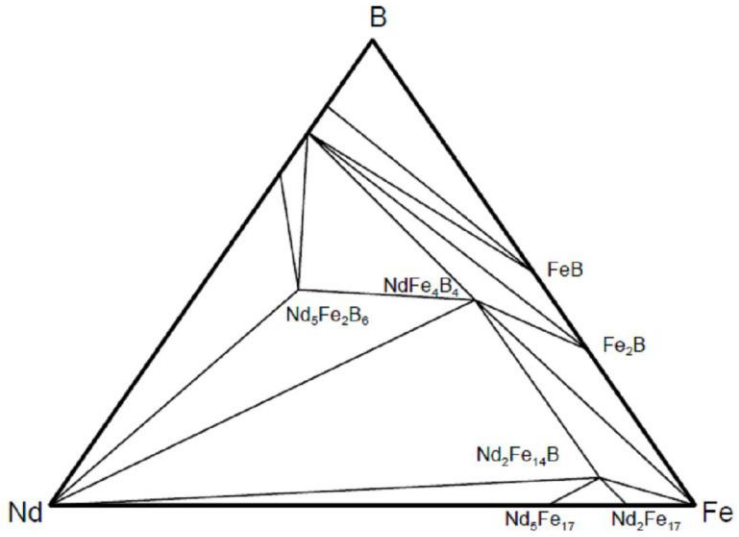
Neodimyum'un kristal yapısı, hegzagonal kristal sistemi altında bulunan altın sarısı bir yapıdır. Bu kristal yapısı, bir lantanit serisi elementi olan neodimyum için genel olarak tipiktir. Bu hegzagonal kristal yapı, neodimyum atomlarının düzenli bir şekilde dizildiği altıgen bir örgü sistemini içerir. Her neodimyum atomu, çevresindeki diğer atomlarla belirli bir düzen içinde bağlar yapar. Neodimyum kristal yapısının bu özellikleri, elementin fiziksel ve kimyasal özelliklerine katkıda bulunur. Örneğin, bu kristal yapısı, neodimyum mıknatıslarının (neodimyum demir bor mıknatısları) güçlü manyetik özelliklerini açıklar. Manyetik özellikler, atomların düzenli bir şekilde dizildiği ve manyetik momentlerin birleştiği bir kristal yapısı ile ilişkilidir. Kristal yapıları genellikle Nd-Fe-B mıknatıslarının tipik özelliklerini belirleyen üç faza sahiptir. Bu fazlar arasında, ferromanyetik özelliklere sahip olan ve büyük bir hacmi kaplayan $Nd_2Fe_{14}B$ fazı bulunmaktadır, bu faz rastgele borür fazında taneler içerir ve Nd-ce zengin tane sınırlarını içerir. Alışımdaki diğer fazlar, kısmi kompozisyona bağlı olarak değişiklik gösterir. $Nd_2Fe_{14}B$ fazı sert bir manyetik fazdır ve yüksek doygun manyetizasyon ile artık mıknatıslanma özelliklerine sahiptir. Bu ana faz Primitif tetragonal kristal yapısına sahiptir ve birim hücrede 68 atom içerir.

Bu atomların 56 tanesi j1, j2, k1, k2, c ve e kristallografik bölgelerinde demir atomlarıdır, 8 tanesi f ve g bölgelerinde neodimyum atomlarıdır ve 4 tanesi g bölgesinde bor atomlarıdır. Borür fazının yaklaşık $NdFe_4B_4$ kompozisyona sahip olduğu görülmektedir. Bu fazın varlığı manyetik özellikleri artırmaz, ancak yapıda yumuşak demir faz oluşumunu engeller. Manyetik özellikleri geliştiren Nd-ce zengin tane sınırları, özellikle $Nd_2Fe_{14}B$ tanelerini çevreler. Bu faz aynı zamanda sıvı faz sinterleme işlemi için kritik bir rol oynar. Ayrıca bu fazın ferromanyetik $Nd_2Fe_{14}B$ fazına göre kompleks bir manyetik yapı oluşturmaları, mekanik açıdan daha yumuşak ve kimyasal açıdan daha reaktif olmasından kaynaklıdır. Bu durum tutarlı yönlenme ölçümlerinin yapılmasını sağlar.



Şekil 2.1 $Nd_2Fe_{14}B$ kristal yapısı[9]

Nd – Fe – B kristal yapısının üçlü faz diyagramlarında manyetik ana faz olarak $Nd_2Fe_{14}B$ fazının hangi kompozisyon oranlarında meydana geldiğini ve bu tip mıknatısta bulunan fazları görmemiz mümkün olmaktadır. Nd-Fe-B üçlü faz diyagramındaki Nd-ce zengin fazları, Nd-Fe-B alaşımlarında üretimde kullanılan kompozisyona bağlı olarak hacimce genellikle %5 ila %15 arasında bulunmaktadır. Bu fazlar, genellikle tane sınırlarında konumlanmıştır ve $Nd_2Fe_{14}B$ fazının plastik deformasyona uğraması sürecine yardımcı olur. Ayrıca, bu fazların koersiviteyi arttırmadaki önemli etkiside gözlemlenmiştir. Temel olarak Nd, Fe ve B içeren bu fazlara ek olarak, Co, Si ve Al gibi elementler de yapıya eklenmiştir.



Şekil 2.2 Nd-Fe-B faz diyagramı[9]

2.1.7 Element İlavesi

Neodimyum demir bor alaşımlarının kimyasal özellikleri, temel elementlerin bu mıknatısların kimyasal yapısına olan etkileri ve daha düşük oranlarda bulunan elementlerin mikro yapı, manyetik özellikler ve korozyon üzerindeki etkileri son derece kritiktir. Kimyasal kompozisyonları üzerinde yapılan çeşitli değişiklikler, farklı özellikler elde etme potansiyelini beraberinde getirir. Yapıdaki elementlerin mıknatısın özelliklerine etkisi şu şekildedir:

Uygun miktarda Dy, Pr, Eu, Gd, Ho veya Tb ilavesi, NdFeB mıknatısın JH_c değerlerinde artış sağlayabilir.

1.Co ilavesi, mıknatısın korozyon direncini artırabilir.

2.Dy, Tb, Eu, Gd, Al ve Ga ilavesi, mıknatısın yüksek sıcaklıklarda tersinir olmayan demanyetizasyonunu engellemede etkin olabilir.

3.Nb, W, Mo gibi elementler, manyetik özellikleri iyileştirmede rol oynayabilir.

4.Mg ve Zr ilavesi, Hc özelliğinde artışa yol açabilir.

5.Al, Ga ve Nb elementlerinin eklenmesi, koersivite ve termal kararlılık üzerinde olumlu etkiler yapabilir. Dy ve Co'nin birlikte kullanılması, Curie sıcaklığını ve JH_c değerini artırarak Br'nin sıcaklık katsayısını ve tersinir olmayan akı kayıplarını azaltabilir.

6.Nb ve Ga ilavesi, mıknatısın Hc değerinde iyileşme sağlayabilir, ancak Curie sıcaklığında hafif bir düşüşe neden olabilir.

7.Nb ilavesi, tane boyutunu küçültmede ve korozyon hızını azaltmada etkili olabilir.

8.Nd, Pr, Dy, Ho ve Tb elementleri, mıknatısın uzun süreli çalışması sonrasında manyetik özelliklerinin bozulmasını önleme özelliğine sahip olabilir.

NdFeB mıknatıslarında, ferrit mıknatıslar gibi üretim faktörleri tane boyutunu etkilemektedir. NdFeB mıknatıslarda, tane boyutunu ve bu nedenle manyetik özellikleri en çok etkileyen etkenlerden biri sinterleme sıcaklığıdır. Hem manyetik özellikler hem de tane boyutu açısından istenilen değerlere ulaşabilmek için sinterleme sıcaklığı mümkün olan en uygun şekilde ayarlanmalıdır.

Manyetik özellikleri etkileyen faktörler, bir mıknatısın performansını doğrudan çevresel koşullarla ilişkilendirmektedir. Bu koşullar, mıknatıs malzemesini aşağıdaki şekillerde manyetik alan seviyesinde etkileyebilir:

1.Her bir manyetik alanın içerdiği atom enerji seviyelerindeki değişim.

2.Manyetik bölgelerin boyutları, şekilleri veya dizilme yönlerindeki değişim.
3.Ardışık manyetik bölgeler arasındaki manyetik geçirgenliğin değişimi.

Yukarıda bahsedilen tüm bu olaylar, metalurjik değişiklikleri içerir ve malzemede kalıcı değişikliklere neden olabilir. Bu değişiklikler basit bir remagnetizasyon ile geri alınamaz.[9],[12],[14]

2.1.8 Nd-Fe-B mıknatıslarının temel özellikleri

Yüksek Manyetik Performans: Nd-Fe-B mıknatısları, yüksek manyetik performansa sahiptir ve ferrit mıknatıslara kıyasla çok daha güçlüdür.

Yüksek Koersivite: Koersivite, bir mıknatısın manyetizasyonunun tersine çevrilebilmesi için gereken enerjiyi ölçer. Nd-Fe-B mıknatısları yüksek koersiviteye sahiptir, yani manyetik alanın etkisi altında hızla demagnetize olmazlar.

Yüksek Enerji Değeri: Nd-Fe-B mıknatısları, yüksek enerji değerine sahip olmalarıyla bilinir ve birim hacim başına depolanan enerji miktarını ifade eder.

Hassas İşleme Gerektirir: Nd-Fe-B mıknatısları, hassas bir işleme süreci gerektirir ve genellikle sinterleme yöntemi ile üretilirler.

Kırılgandır: Bu mıknatıslar kırılgan olabilir ve belirli uygulamalarda dikkatlice kullanılmalıdır.

Bu özellikler sayesinde Nd-Fe-B mıknatısları, birçok sağlık, otomotiv, savunma sanayi, endüstriyel ve tüketici uygulamasında tercih edilen güçlü mıknatıslardır. Ancak, neodimyum gibi nadir toprak elementlerinin sınırlı rezervleri ve çevresel endişeler, bu mıknatısların üretimi ve kullanımıyla ilgili bazı sürdürülebilirlik sorunlarını gündeme getirmiştir. Bu nedenle, alternatif mıknatıs malzemeleri üzerindeki araştırmalarda devam etmektedir.

Nadir toprak kalıcı mıknatıslar, birçok elektrikli ve elektronik cihazın yanı sıra bir dizi diğer uygulamanın vazgeçilmez bir bileşenidir. Rüzgar enerjisi, elektrikli araçlar, tam otomatik endüstriyel makineler gibi yeni gelişen teknolojilerde ve robotlarda sıkça tercih edilirler.

Bu mıknatıslar geri dönüştürülebilir özellik taşıyan, ancak enerji ve zaman açısından maliyetli olan mıknatıslardır. Tamamen çözünerek geri kazanılma yeteneği, maliyetlerini ve çevresel etkilerini artırır. Bu durum, gelecekte daha sürdürülebilir enerji ve mobilite teknolojilerine yönelik talebin artacağı bir ortamda, insanlığın daha az yakıt tüketmesine ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmasına katkıda bulunacaktır. Böylece yalnızca elektronik ve bilgi teknolojilerinde değil, aynı zamanda elektrik motorları, jeneratörler, araçlar, elektrikli bisikletler, scooterlar ve rüzgar türbinleri gibi alanlardada yaygın olarak kullanılmaktadır. Mobilite ve temiz enerji teknolojilerindeki talebin artmasıyla birlikte, dönen ve hareketli sistemler içeren uygulamalar tasarlamak ve inşa etmek için en yüksek güç yoğunluğuna sahip olan Nd–Fe–B, bu uygulamalar için ideal bir malzemedir.

Nd–Fe–B kalıcı mıknatısların çoğunluğu, sektörde toz metalurjisi yöntemiyle üretilmektedir. Bu süreç, Nd-Fe-B pullarının şerit dökümle üretilmesiyle başlar, ardından pullar toz haline getirilir. Hidrojen işleme ve jetle öğütme gibi aşamalardan geçen tozlar, manyetik presleme ile anizotropik yeşil cisimlere dönüştürülür. Son olarak, bu cisimler sinterlenir, tavlanır, kesilir, taşlanır ve cilalanır. Gelişmiş endüstriyel işlemler, sinterleme sonrası ısıyı da içerebilir.

2.1.9 Nd-Fe-B mıknatıslarının morfolojik özellikleri

Bu mıknatısların fiziksel yapısı ve görünümü, genellikle mikroskobik seviyede incelendiğinde çeşitli morfolojik özellikleri içermektedir. Nd-Fe-B mıknatısları, bu mikroskobik düzeyde detaylı bir şekilde ele alındığında aşağıdaki morfolojik özelliklere sahip olabilir:

a. Tane Büyüklüğü: Nd-Fe-B mıknatısları, genellikle mikroskobik tane yapısına sahiptir. Üretim yöntemine, sinterleme şartlarına ve kullanım amacına bağlı olarak tane büyüklükleri değişebilir.

b. Kristal Yapı: Bu mıknatıslar, genellikle heksagonal kristal yapıya sahiptir. Bu kristal yapı, mıknatısların temel manyetik özelliklerini belirlemede kilit bir faktördür.

c. Zonlama: Üretim süreci sırasında, farklı bileşenlerin veya fazların belirgin bölgeler (zonlar) oluşturduğu durumlar ortaya çıkabilir. Bu zonlama, mıknatısın performansını etkileyebilir.

d. Yüzey Pürüzlülüğü: Mıknatısların yüzey pürüzlülüğü, özellikle uygulama bağlamında önemlidir. Düzgün bir yüzey, mıknatısın diğer malzemelerle etkileşimini ve performansını etkileyebilir.

e. Tane Sınırı Yapısı: Nd-Fe-B mıknatısları, tane sınırlarında özel yapılar içerebilir. Tane sınırı özellikleri, mıknatısın mekanik ve manyetik özelliklerini etkileyebilir.

Bu özellikler, Nd-Fe-B mıknatıslarının performansını ve uygulamadaki davranışını belirleyen kritik faktörlerdir. Mıknatısların üretim teknikleri, işleme koşulları ve kullanım amacı, bu morfolojik özellikler üzerinde büyük etki yapabilir. Bu nedenle, mıknatısların özelliklerini anlamak ve optimize etmek için detaylı bir morfolojik analiz önemlidir.

2.1.10 Uygulamalar

1. Manyetik Uygulamalar: Neodimyum, güçlü manyetik özellikleri nedeniyle özellikle mıknatıs üretiminde kullanılır. Neodimyum mıknatısları, hoparlörler, mikrofonlar, bilgisayar disk sürücüleri, elektrik motorları, manyetik rezonans görüntüleme (MRG) cihazları gibi birçok elektronik ve tıbbi cihazda kullanılır.

2. Lazer Teknolojisi: Neodimyun lazerlerde kullanılan katı hal bir maddenin (neodimyum-YAG lazeri gibi) temel bir bileşenidir. Bu lazerler, endüstriyel işlemlerde, tıbbi uygulamalarda ve askeri sistemlerde kullanılır.
3. Çeşitli Elektronik Cihazlar: Neodimyum televizyonlar, bilgisayar monitörleri, kulaklıklar ve diğer elektronik cihazlarda renkli ekranların üretiminde kullanılan fosfor kaplama malzemelerinde de kullanılır. Büyük ev kategorisinde mikrodalgalar, elektrikli fanlar, ev aletleri, elektrikli süpürgeler (elde taşınan cihazlar dahil ve daha küçük elektrikli süpürgeler) BT ve telekomünikasyon ekipmanı olarak yazıcılar ve fotokopi ekipman, cep hesap makineleri, cep telefonları, masaüstü bilgisayarlar, mini bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar, fotovoltaik paneller: radyo setleri, televizyon, setler ve video kameralar, Elektrikli ve elektronik aletler: matkaplar, testereler ve tornavidalar gibi aletler, elektrik motorları, elektrikli scooterlar, alarmlar vb.

4. Enerji Depolama: Neodimyum mıknatısları, rüzgar türbinleri ve elektrikli araçların motorlarında enerjiyi etkili bir şekilde depolamak ve dönüştürmek için kullanılır.
5. Tıbbi Cihazlar: Manyetik rezonans görüntüleme (MRG) cihazları, neodimyum mıknatısları içerir ve vücut içindeki dokuların detaylı görüntülerini elde etmek için kullanılır.
6. Savunma ve Uzay Endüstrisi: Neodimyum savunma sistemlerinde ve uzay endüstrisinde kullanılan bazı cihazlarda da önemli bir rol oynar.

Neodimyum'un bu çeşitli kullanım alanları, elementin güçlü manyetik özelliklerinin yanı sıra dayanıklılığı ve kararlılığı nedeniyle bu uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. Ancak, neodimyum madenciliği ve işlenmesi sırasında çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik konularına dikkat edilmesi önemlidir.

Genel olarak neodimyum ve neodimyum mıknatıslarıyla ilgili araştırma ve geliştirmelerin devam ettiği, bu alanda yeni teknolojilerin ve uygulamaların geliştirildiği söylenebilir. Bu tür gelişmeler, daha etkili mıknatısların tasarlanması, enerji depolama teknolojilerinin iyileştirilmesi, manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve lazer teknolojilerindeki ilerlemeler gibi çeşitli alanlarda olabilir. Yenilikler genellikle endüstriyel uygulamalarda, elektronik cihazlarda, enerji sektöründe ve sağlık alanında fayda sağlamaktadır.[15]

2.1.11 Geri Dönüştürülmesi

Dünyada doğal kaynak miktarının azalması ve buna ilişkin endişelerin artması, atılan elektronik malzeme miktar sayısının artması, Avrupa Birliği ve Türkiye'nin üretilenden çok NdFeB ithal etmesi Neodimyum'un geri dönüştürülmesinde ve tekrar hayata kazandırılmasında büyük rol oynamaktadır. Tüm ülkeler için yaklaşık %95 olarak Çin'e bağımlılık söz konusu olmaktadır. Neodimyum, genellikle neodimyum mıknatıslarında kullanılan bir elementtir. Neodimyum mıknatısları, endüstriyel ve tüketici elektroniklerinde yaygın olarak bulunur. Bu mıknatıslar genellikle alaşımlar içinde kullanıldığından, geri dönüşüm süreci biraz karmaşıktır. Ancak, neodimyum mıknatıslarının geri dönüşümü, nadir toprak elementlerini tekrar kazanma ve çevresel etkileri azaltma açısından önemlidir. Neodimyum mıknatıslarının geri dönüşümü aşağıdaki adımları içerebilir:

1. Toplama: Eski elektronik cihazlar, mıknatıslar toplanır ve geri dönüşüm sürecine tabi tutulur.
2. Ayırma: Neodimyum mıknatısları içindeki nadir toprak elementlerini geri kazanmak için özel yöntemler kullanılarak malzeme ayırt edilir.
3. Rafine Edilme: Ayırt edilen malzeme rafine edilir ve istenmeyen katkı maddelerinden arındırılır.
4. Yeniden Kullanım veya Yeniden İşleme: Elde edilen neodimyum ve diğer malzemeler, yeni mıknatısların üretiminde kullanılabilir veya başka endüstriyel süreçlerde yeniden işlenebilir.

Neodimyum mıknatıslarının geri dönüşümü, nadir toprak elementlerini korumak ve doğal kaynakları daha verimli kullanmak adına oldukça önemlidir. Ancak, şu anda neodimyum mıknatıslarının geri dönüşümü, ticari olarak sürdürülebilir bir ölçekte gerçekleştirilen bir süreç değildir. Bu alandaki araştırma ve teknolojik gelişmelerle birlikte, nadir toprak elementlerinin geri dönüşümü konusundaki yöntemler ve pratikler zaman içinde evrimleşebilir.[13]

Tablo 2.2 Geri dönüşüm sürecinde çevreyi etkileyen faktörler [13]

Kategori	**Faktör**
Küresel Isınma	**Karbon dioksit, Fosil**
Asitleşme	**Kükürt dioksit**
Kanserojenler	**Arsenik**
Kanserojen Olmayanlar	**Kurşun**
Solunum Etkileri	**Kükürt dioksit**
Ötrofikasyon	**Azot Oksit**
Ozon Tabakası Tükenmesi	**Metan, bromotriflorür**
Ekotoksisite	**Alüminyum**
Duman (Smog)	**Azot oksitler**

Geri dönüştürülmüş NdFeB mıknatısların performansını artırmak amacıyla, strip döküm aşamasında neodimyum ve praseodimyum gibi ham malzemeler eklendiği bilinmektedir. Ancak, bu eklenen malzemelerin miktarları nispeten küçük olduğundan, geri dönüşüm yaklaşımının çevresel etkisi, virgin mıknatıs üretimine kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle, çoğu etki kategorisinde; özellikle karsinojenik, nonkarsinojenik, ozon azalması, ekotoksisite ve smog kategorilerinde, virgin malzemelerin eklenmesi süreçlerinin en önemli katkıyı sağladığı belirlenmiştir. Daha spesifik olarak, geri dönüşüm sürecine eklenen bakırın karsinojenik etkiler üzerinde en büyük etkiye sahip olmaktadır. Cevher madenciliği sırasında üretilen uranyumun ozon azalması üzerinde en büyük etkiyi sağladığı ortaya çıkarılmıştır. Kaplama malzemesi olarak eklenen nikel asitleşme ve solunum için en önemli etkiyi yapmaktadır. Diğer etki kategorileri küresel ısınma ve ötrofikasyon için, enerji santrallerinde sert kömür yakma ve kara üzerinde üretilen ham petrol işlemleri sırasıyla en büyük etkilere sahiptir. Genel olarak, enerji santrallerinde sert kömür yakma işlemi, çoğu etki kategorisinde en yüksek katkıyı sağlayan süreç olmakla beraber, virgin malzemelerin eklenmesi süreci, mıknatıstan geri dönüşüm yaklaşımı için etki kategorisinde en yüksek etkiyi sağlar.[13]

2.1.12 Ülke Bazında Çalışmalar

Neodimyum, nadir toprak elementlerinden biri olup genellikle monazit ve bastnäsite madenlerinde bulunur. Bu madenler dünya genelinde farklı bölgelerde çeşitli miktarlarda mevcut olabilir. Ancak, neodimyumun en büyük üreticilerinden bazıları şunlardır:

1. Çin, dünya genelinde neodimyum üretiminin büyük bir kısmını kontrol eder. Çin, nadir toprak elementleri konusunda geniş rezervlere sahiptir ve madenlerden çıkartılan neodimyumu işleyen birçok tesis bulunmaktadır. Bu işlemler sırasında yüksek teknoloji ve bilgi sahibidirler.

2. Avustralya, dünya genelinde nadir toprak elementleri üreten bir diğer önemli ülkedir. Burada özellikle Mount Weld madeni, neodimyumun çıkarıldığı ve işlendiği bir bölgedir.

3. Brezilya, neodimyum üretiminde önemli bir oyuncudur. Burada da çeşitli nadir toprak element madenleri bulunmaktadır.

4. Malezya, nadir toprak elementlerinin çıkarıldığı ve işlendiği bir diğer ülkedir. Bu, neodimyumun bir bileşeni olan didimyumun (praseodim ve neodim karışımı) çıkarıldığı yerlerden biridir.

5. Güney Afrika, nadir toprak elementleri açısından zengin rezervlere sahip bir başka ülkedir. Bu ülkeler, neodimyumun doğal kaynaklarını çıkartma, işleme ve dünya genelinde dağıtma süreçlerinde önemli roller oynamaktadır. Ancak, nadir toprak elementlerinin çıkartılması ve işlenmesi çevresel ve sürdürülebilirlik konularını da beraberinde getirdiği için bu konuda dikkatli bir denetim ve yönetim gerektirmektedir.

2.2 Yapısal Karakterizasyon Cihazları

2.2.1 X-Işınları Toz Kırınımı Yöntemi (XRD)

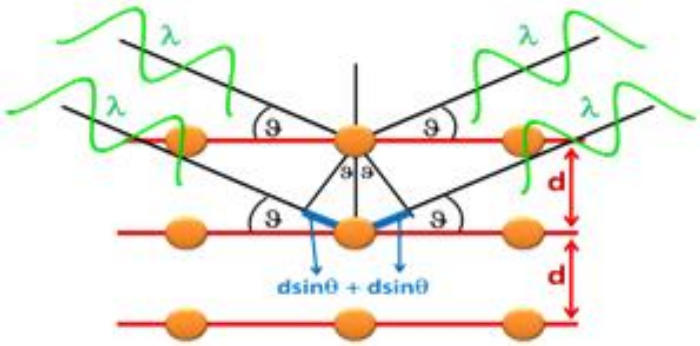


Şekil 2.3 XRD cihazı

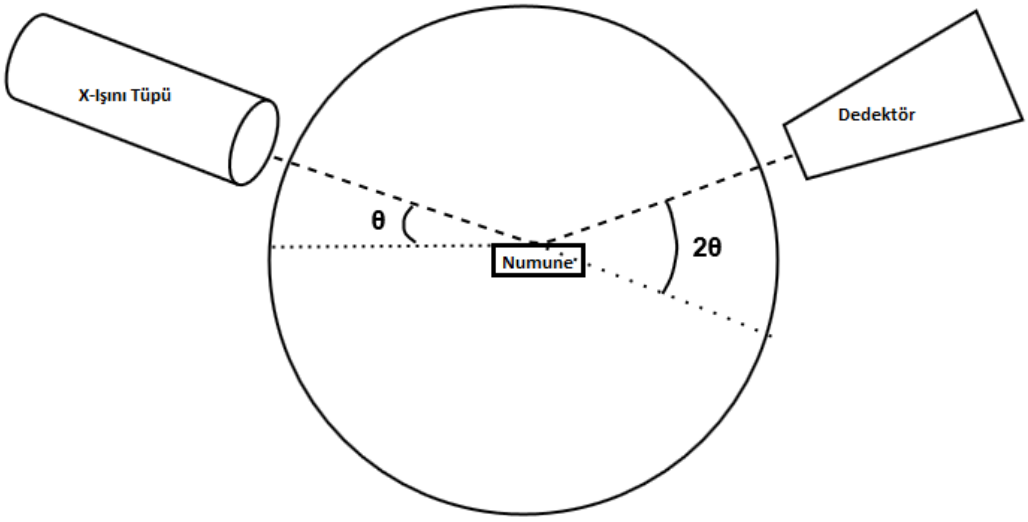
X-ışını kırınımı (XRD) çalışma prensibi, malzemelerin kristal yapısını incelemek için X-ışınlarının kullanılması esasına dayanır. Bir malzeme kristali, düzenli aralıklarla dizilmiş atomik düzlemlerden oluşur. X-ışınları, yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır ve bir kristal yapıya çarptığında, bu atomik düzlemlerden kırılırlar. Kırılan X-ışınları, belirli açılarla saçılır ve bu saçılma deseni, malzemenin iç yapısı hakkında bilgi verir. XRD cihazında, numuneye yönlendirilen X-ışınları, atomik düzlemlerden kırıldıktan sonra bir dedektör tarafından algılanır. Bu kırınım desenleri, Bragg Yasası'na göre analiz edilerek ($n\lambda=2d\sin\theta$), kristal düzlemler arasındaki mesafeler ve atomik düzen hakkında bilgi sağlar. Dedektör tarafından toplanan veriler, bilgisayar yazılımı kullanılarak analiz edilir ve bu analiz sonucunda malzemenin kristal yapısı, faz bileşimi ve diğer yapısal özellikleri belirlenir. XRD'nin temel prensibi, kristal yapılarının, X-ışınlarının belirli açılarla kırınımı sonucu oluşan desenlerin analiz edilmesiyle karakterize edilmesine dayanır.

Temel X-ışını kırınımı (XRD) yapısı, X-ışını kaynağı, monokromatör, numune tutucu, gonyometre, dedektör ve bilgisayar/yazılım bileşenlerinden oluşur. X-ışını kaynağı, yüksek enerjili X-ışınlarını üreten bir tüptür ve genellikle metal bir hedefe

(örneğin, bakır) çarpan elektronlar yoluyla X-ışınlarını üretir. Monokromatör, X-ışınlarını belirli bir dalga boyuna ayırarak daha net kırınım desenleri elde edilmesini sağlar. Numune tutucu, analiz edilecek numunenin sabitlenip doğru pozisyonda tutulduğu bölümdür. Gonyometre, X-ışını kaynağını, numuneyi ve dedektörü belirli açılarda döndürerek kırınım desenlerinin doğru açılarda alınmasını sağlar. Dedektör, numuneden kırılan X-ışınlarını algılar ve bu kırınım desenlerini elektronik sinyallere dönüştürür. Son olarak, bilgisayar ve yazılım bu verileri analiz eder, kırınım desenlerinden kristal yapı ve faz bileşimi gibi yapısal özellikleri belirler ve sonuçları görselleştirir. Bu bileşenler birlikte çalışarak malzemelerin kristal yapılarını detaylı bir şekilde inceleme imkanı sağlar.



Şekil 2.4 Bragg kırınımı



Şekil 2.5 XRD temel yapısı

XRD, katı malzemelerin kristalografik özelliklerini belirleme konusunda oldukça güçlü bir araçtır ve malzeme bilimi, metalurji, mineraloji, biyoloji ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

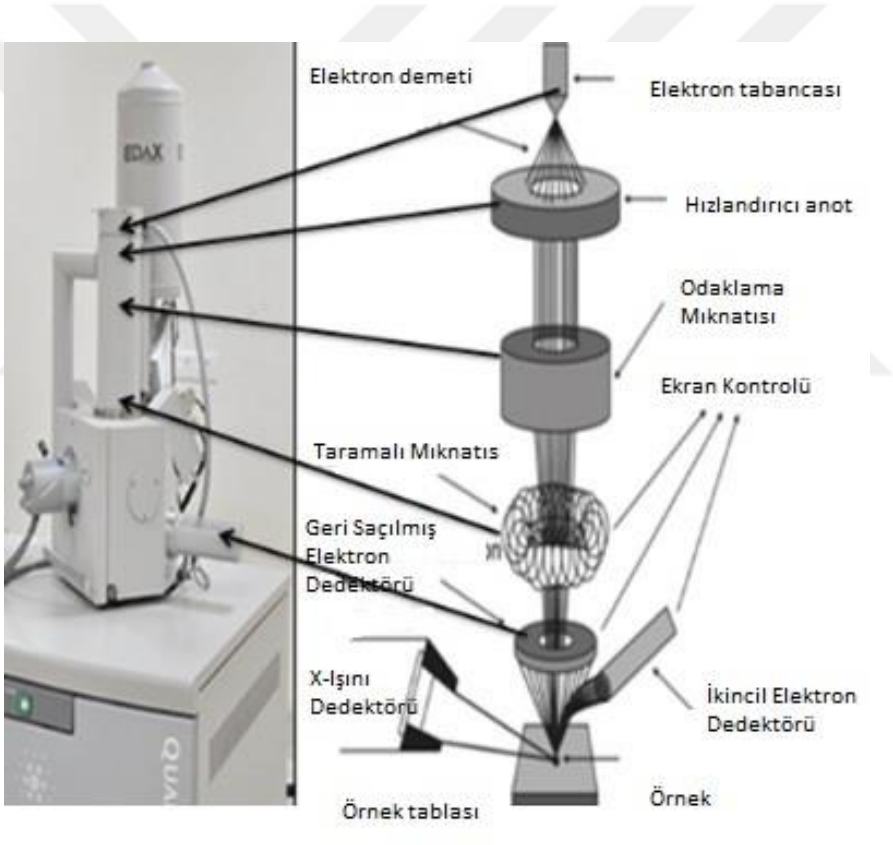
2.2.2 SEM Taramalı Elektron Mikroskobu

Malzemelerin yüzey yapısını ve morfolojisini yüksek çözünürlükle incelemek ve araştırmak için kullanılan mikroskop türlerinden biri de taramalı elektron mikroskobudur. SEM, bir elektron demetinin malzeme yüzeyine odaklanması ve yüzeyden yayılan sinyallerin toplanması prensibine dayanır. Elektron demeti, malzeme yüzeyine çarptığında, yüzeyden ikincil elektronlar ve geri saçılan elektronlar gibi çeşitli sinyaller yayılır. Malzemenin yüzey topografyasını, kompozisyonunu ve diğer özelliklerini detaylı bir şekilde görüntülemek için bu sinyaller kullanılmaktadır. SEM, nanometre ölçeğinde görüntüleme kapasitesine sahiptir ve yüksek derinlik alanı ile yüzeyin üç boyutlu yapısını ortaya koyar. Bu nedenle, malzeme bilimi, elektronik, biyoloji ve tıp gibi birçok alanda, yüzey morfolojisinin analizi, hata tespiti, malzeme karakterizasyonu ve nanoteknoloji araştırmaları gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Bir metal numunenin incelemesinde, öncelikle SEM için uygun hale getirilir. Bu adım genellikle numunenin temizlenmesi ve gerektiğinde ince bir altın veya karbon kaplama ile kaplanmasıyla yapılır. Bu kaplama, numunenin yüzeyinden elektronların daha iyi saçılmasını sağlar ve daha net görüntüler elde edilmesine yardımcı olur. Hazırlanan numune, SEM odasına yerleştirilir ve numune tutucu üzerine sabitlenir. Numune, SEM içindeki vakum ortamında olmalıdır çünkü elektron demetinin serbestçe hareket edebilmesi ve numuneye odaklanabilmesi için hava yokluğu gereklidir. SEM operatörü, numuneyi incelemek için elektron demetini belirli bir alan veya noktaya odaklar. Elektron demeti genellikle numunenin yüzeyine dik bir açıyla yönlendirilir ve genellikle nanometre boyutunda odaklanabilir. Odaklanmış elektron demeti, belirlenen alandan veya noktadan başlayarak numune yüzeyini taramaya başlar. Bu tarama genellikle satır satır gerçekleşir ve her bir noktada numuneden yansıyan veya saçılan elektronlar

toplanır. Numuneden saçılan ve geri yansıyan elektronlar, SEM'in dedektörleri tarafından algılanır. Toplanan sinyaller, bilgisayar yazılımı tarafından işlenir ve analiz edilerek numunenin yüzeyinin yüksek çözünürlüklü bir görüntüsü oluşturulur.

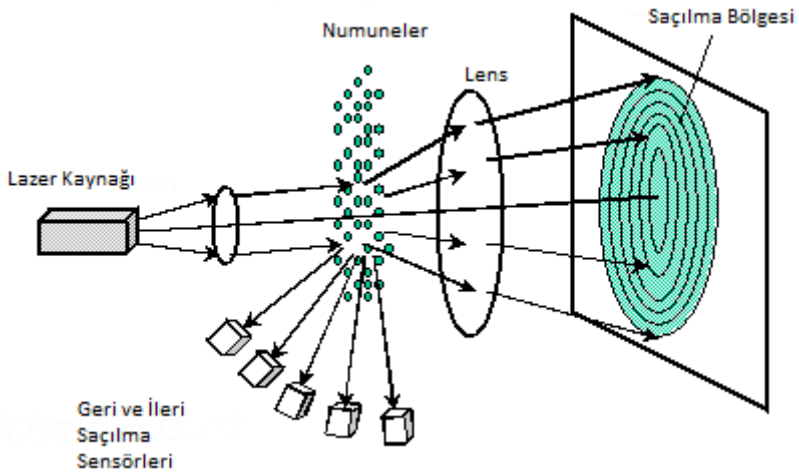
Analiz ve veri yorumlama kısmında ise elde edilen görüntüler, numunenin yüzey morfolojisini, topografyasını, kompozisyonunu ve diğer yapısal özelliklerini analiz etmek için kullanılır. SEM görüntüleri, numunenin mikroyapısını incelemek ve özellikle çok küçük detayları gözlemlemek için güçlü bir araçtır.



Şekil 2.6 SEM Cihazı[22]

2.2.3 PSA TANE BOYUT ANALİZ CİHAZI

Partikül boyut analizi, bir örnekte bulunan parçacıkların boyut dağılımlarını tanımlamak için kullanılır. Partikül boyut analizi, emülsiyonların, süspansiyonların, aerosollerin ve çeşitli katı malzemelerin parçacık boyutlarını ölçmek için de kullanılabilir. Partikül boyutu analizi, birçok sektörde kaliteyi ve üretim sürecini ve ürünün performansını belirlemek için kullanılır. Parçacık boyutu analizinin herhangi bir yöntemi, parçacık boyutunu bir sayı olarak gösterir. Tüm parçacık boyutu analiz teknikleri, bir parçacığın tek boyutlu özelliklerini "eşdeğer bir kürenin" boyutuyla ilişkilendirir. Bu, kullanılan tekniğe göre yüzey alanı veya hacim ölçümleri kullanılarak gerçekleştirilir. Partikül boyutu dağılımlarının veya tane dağılımlarının analizi için küçük ve oldukça kullanışlı bir araçtır. Partikül boyutu dağılımlarını incelemek için statik ışık saçılımı veya lazer kırınımı yöntemini kullanır. Kısa dalga boylu (635 nm) lazer ışığı karakterize edilecek partiküllere çarpar ve ardından partikül boyutuna göre saçılır. Sabit dedektörler, ileri, yan ve ters yönde saçılma yoğunluğunun açısal bağımlılığını ölçer. Veri hazırlama, Fraunhofer veya Mie teorisine göre numunenin hacmine göre partikül boyutu dağılımını sağlar.

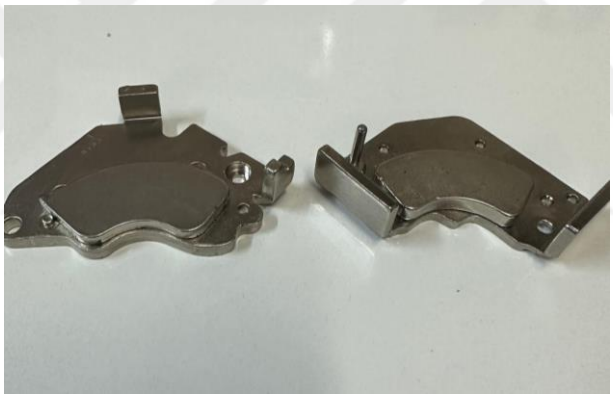


Şekil 2.7 Tane boyut analiz cihazı çalışma prensibi

3
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Hidrürleme ile Kırma

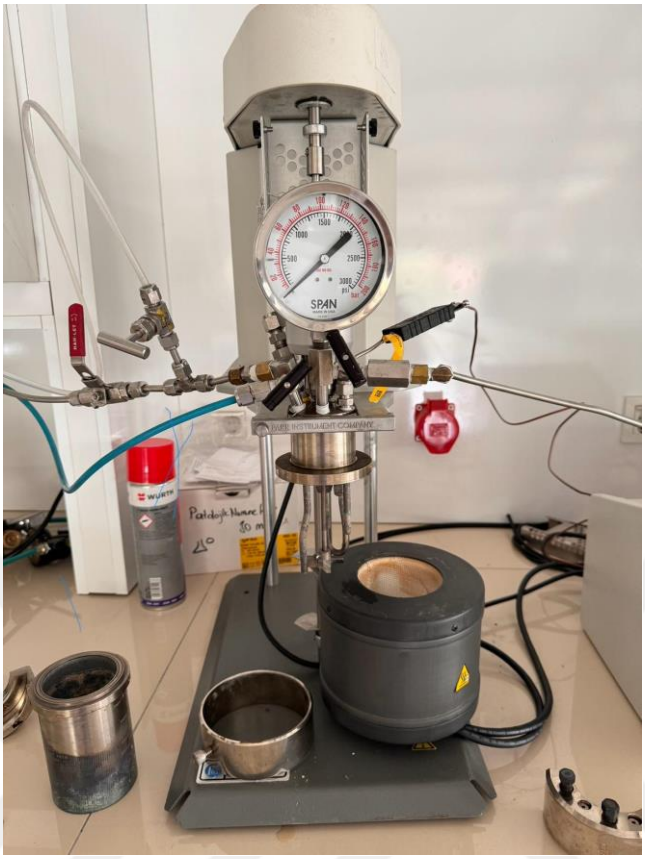
Öncelikle şekilde gösterilen geri dönüşümden aldığımız hurda mıknatısımız el yardımıyla kırılarak, şekil de gösterilen hazne içine yerleştirildi. Kırma işlemleri için hidrürleme yöntemi kullanıldı. Reaktörden hidrojen geçirmeden önce argon gazı geçirilerek vakumlandı, bu işlem 5 defa tekrarlandı. Temiz ve oksijensiz olduğuna emin olunduğunda hidrojen akışı başlatıldı.



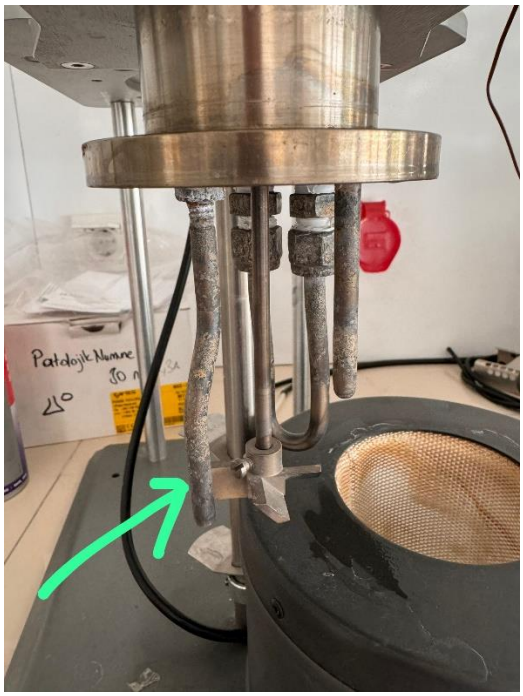
Şekil 3.1 Hurda NdFeB mıknatısı



Şekil 3.2 Hurda NdFeB mıknatısların içine koyulan hazne



Şekil 3.3 Hidrürlemenin yapıldığı reaktör



Şekil 3.4 Hidrojen akışının olduğu kısım



Şekil 3.5 Hurda mıknatısın Hidrürleme sonucu kırılmış hali

Hidrürleme yöntemi deney şartları gereği 1 atmosfer basınçta, oda sıcaklığında, 2 saat boyunca gerçekleştirildi. Reaktörde bulunan kapalı sistemde hidrojen akışına maruz kalan geri dönüşümden hurdaya çıkmış mıknatıs hidrojenle kırılarak, demanyetize hale getirildi. Mıknatısı hidrojenden çıkardığımız zaman demanyetize parçalara dönüşmüş olduğu ve Hurda olmasına rağmen hala manyetizma içermekte olduğu görülmüştür.

3.2 Öğütme Cihazları ve İşlemler

3.2.1 Bilyalı Değirmen Öğütme Cihazı



Şekil 3.6 Bilyalı Değirmen Öğütme Cihazı

0,2 - 10gram arasında değişen numune boyutlarını barındıran, çift kelepçeli, yüksek enerjili bilyalı değirmendir. Kuru, kırılgan numunelerin öğütülmesi, mekanik alaşımlama, bulamaç öğütme, tozların karıştırılması ve emülsiyonların karıştırılması için kullanılmaktadır. Sertleştirilmiş çelik, paslanmaz çelik, tungsten karbür, alümina seramik, zirkonya seramik, silikon nitrür, akik, polistiren, metakrilat, polistiren ve polikarbonat dahil olmak üzere çok çeşitli öğütme ve karıştırma şişeleri mevcuttur.

Tablo 3.1 Bilyalı değirmen öğütme cihazı özellikleri

GERİLİM	**115V/60Hz veya 230V/50Hz**
BOYUTLAR	**24 inç (61 cm) x 17 inç (43 cm) x 11 inç (28 cm)**
FLAKON KAPASİTESİ	**İki standart flakonu veya iki çoklu numune adaptörünü barındırır.**
KELEPÇE HAREKETİ	**2 1/3 inç (5,9 cm) ileri geri, 1 inç (2,5 cm) yan yana**
KELEPÇE HIZI	**115 volt-1060 devir/dakika 230 volt - 875 devir/dakika**
ZAMANLAYICI/KONTROL SİSTEMİ	**Programlanabilir 100 dakikalık zamanlayıcı. Membran kontrol paneli toz kirliliğini ortadan kaldırır.**

SPEX 8000D öğütme cihazı ile öğütme şartları:

1.Top/toz oranı: 30/1

2.Bilye çapı: 3mm

3.Süre: 1 Saat

3.2.2 Gezegensel Öğütme Cihazı



Şekil 3.7 Gezegensel öğütme cihazı iç ve dış yapısı

Gezegensel Öğütme Cihazı PM 400, öğütme kavanozları ve bilyaları kullanarak yüksek enerjili çarpışmalarla malzemeleri ince partiküller haline getiren bir cihazdır. Kavanozlar merkezi bir disk etrafında dönerken kendi eksenleri etrafında da döner, bu çift yönlü hareket bilyaların malzemelere güçlü bir şekilde çarpmasını sağlar. 30 ila 400 rpm arasında ayarlanabilir hız ve hız oranları ile partili işleme yapılabilir, bu sayede partikül boyutları nanometre seviyesine kadar küçültülebilir. Çeşitli malzemelerle kontaminasyonsuz öğütme mümkündür.

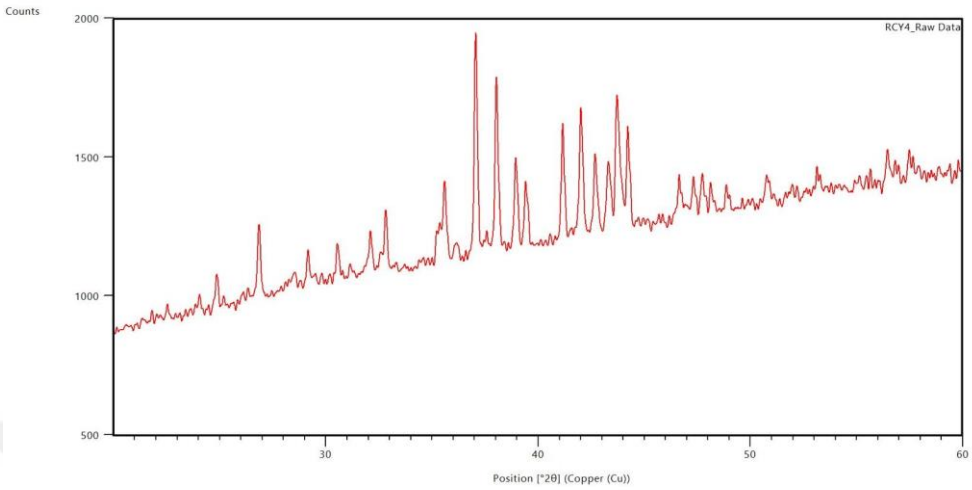
Retsch PM 400 gezegensel öğütme şartları:

1.Top/toz oranı: 20/1

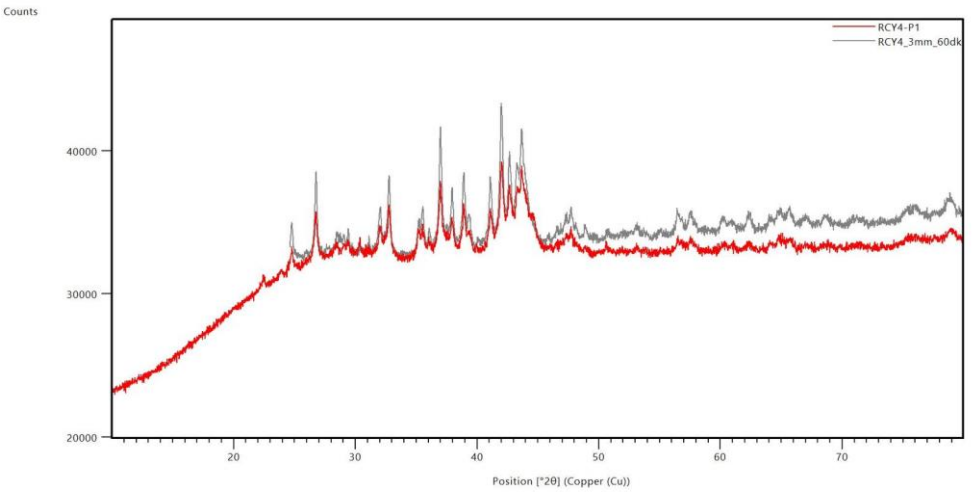
2.Bilye çapı:5mm

3.Süre:1 saat

3.3 X-Işını Kırınım Deseni Analizleri

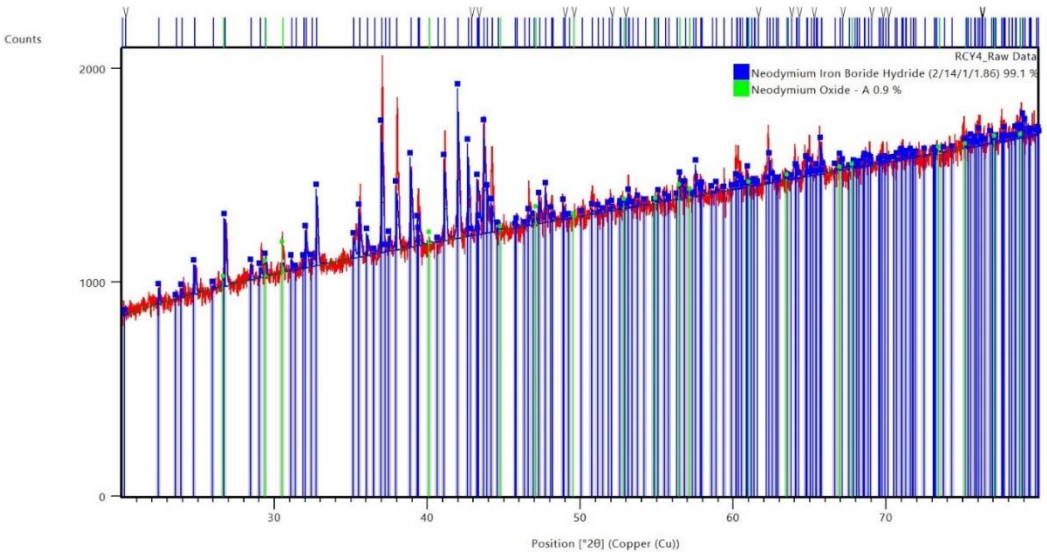


Şekil 3.8 Hurda mıknatısın hidrürleme sonucu ham halinin X-ışını kırınım deseni

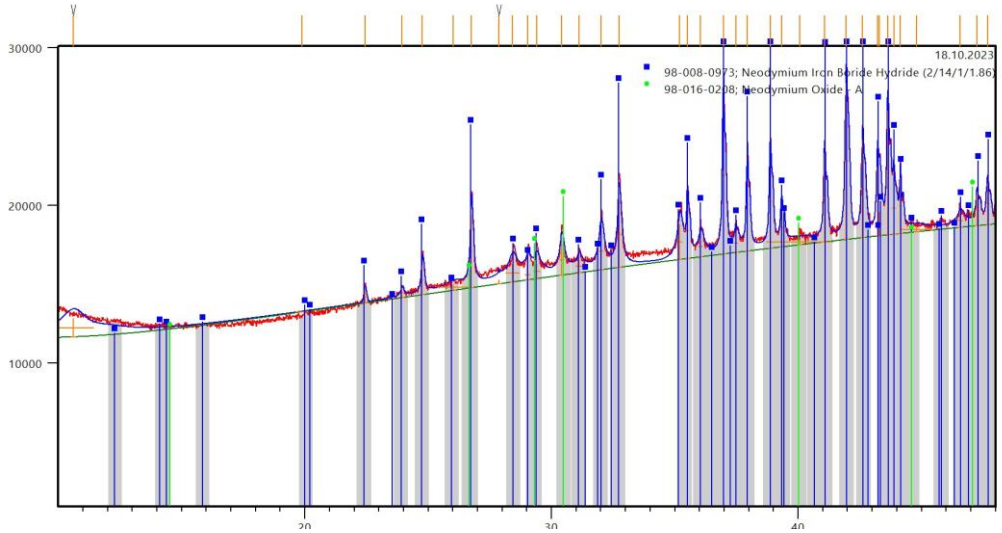


Şekil 3.9 Numunelerin öğütme ve Rietveld analiz öncesi X-ışınımı kırınım deseni

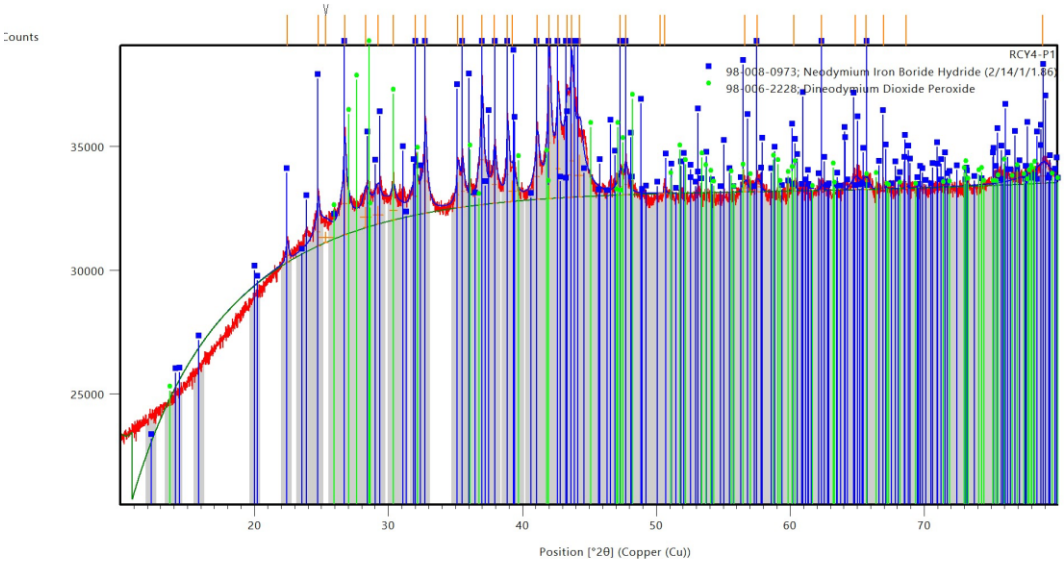
Numunelerin öğütme ve Rietveld analiz öncesi X-ışınımı kırınım desenleri alınmıştır. Daha sonra iki farklı öğütme cihazındaki numuneler kullanılarak, karşılaştırma işlemleri için XRD cihazında Rietveld analizleri yapıldı.



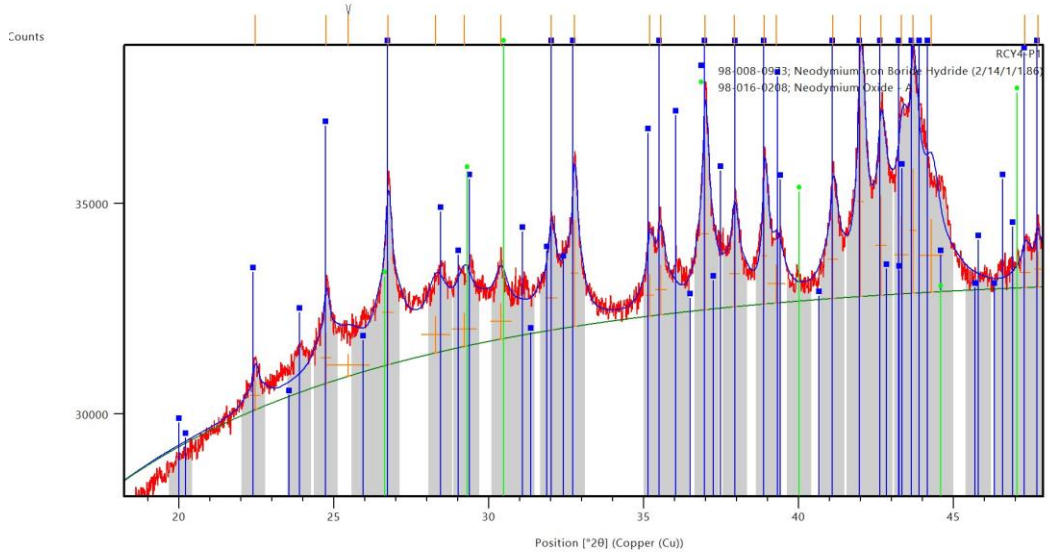
Şekil 3.10 RCY adlı mıknatıs tozunun bilyalı değirmen cihazında öğütme sonrası X-ışını kırınım deseni



Şekil 3.11 RCY adlı mıknatıs tozunun bilyalı değirmen cihazında öğütme sonrası X-ışını kırınım deseni-2



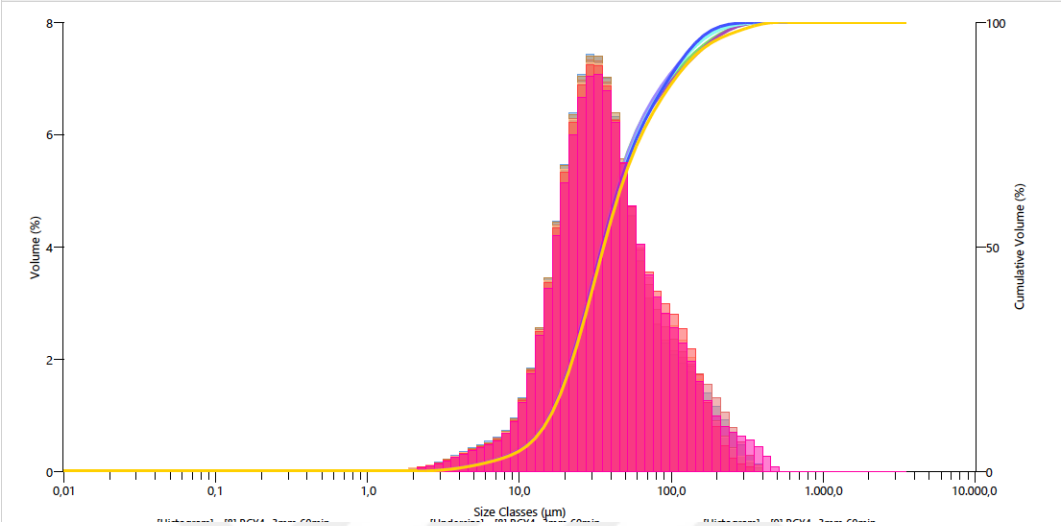
Şekil 3.12 RCY_P1 mıknatıs tozunun Gezegensel öğütme cihazında öğütme sonrası X-ışını kırınım deseni



Şekil 3.13 RCY_P1 mıknatıs tozunun Gezegensel cihazında öğütülmüş halinin X-ışını kırınım deseni-2

Böylece 2 farklı öğütme cihazı XRD cihazında karşılaştırılmıştır. XRD çalışması sırasında TENMAK BOREN Araştırma Enstitüsü laboratuvarında Panalytical marka XRD ve 1,54 angstrom dalga boyu kullanılmıştır. Çalışmaları garanti altına almak adına partikül boyut analizleri yapılmıştır.

3.4 Partikül Boyut Analizi



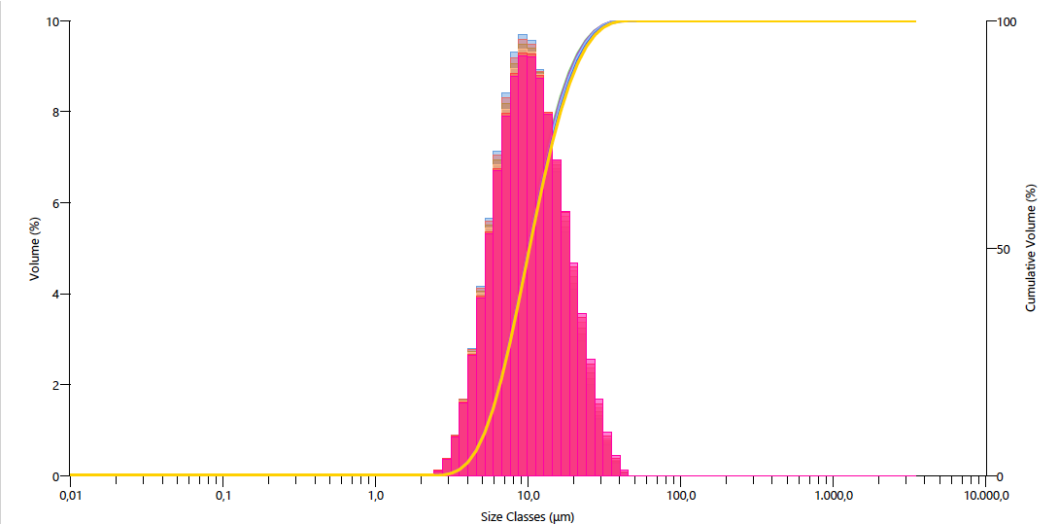
Şekil 3.14 RCY adlı hurda mıknatısın bilyalı değirmen öğütme cihazı sonrası tane boyutu analizi

Dv(90)= 114 µm

Dv(50)= 33.9 µm

Dv(10)=13.9 µm

D [4;3] = 51.4 µm



Şekil 3.15 RCYP1 adlı hurda mıknatısın Gezegensel öğütme cihazı sonucu tane boyutu analizi

Dv(90)= 19,4 µm

Dv(50)= 9.83 µm

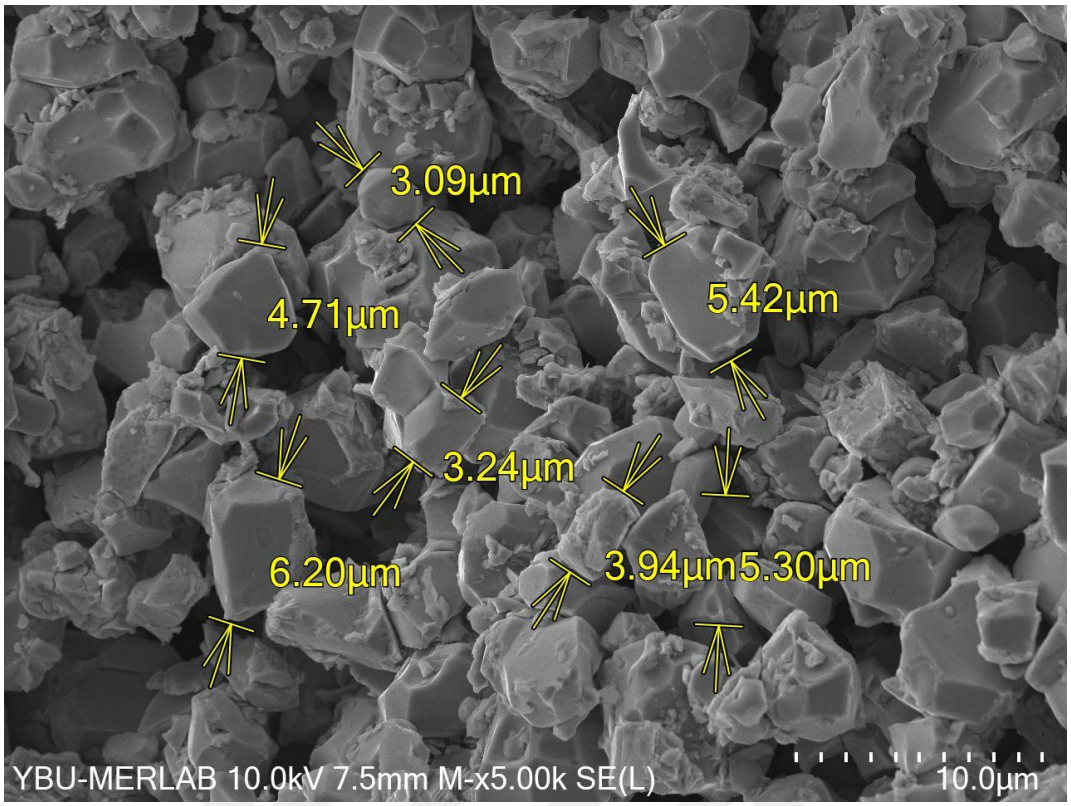
Dv(10)=5.20 µm

D [4;3] = 11.3 µm

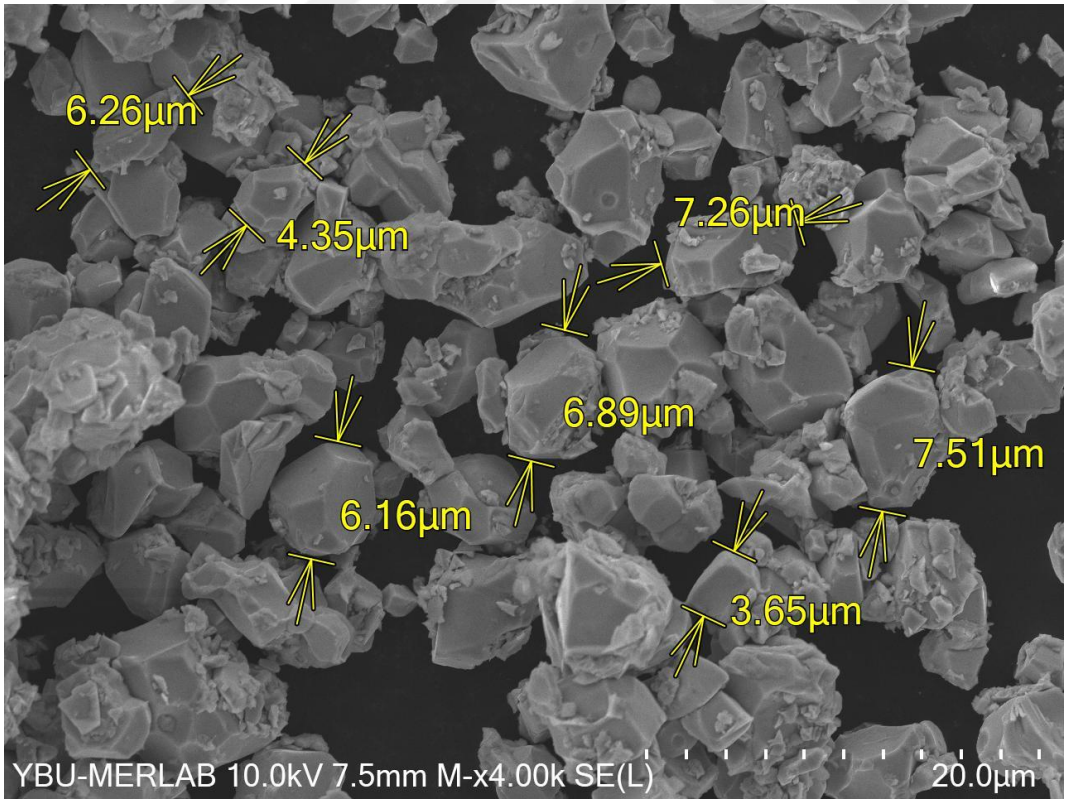
Partikül boyut analiz sonuçları, istenilen tane boyutlarına Retsch PM 400 gezegensel öğütme cihazıyla ulaşıldığını göstermektedir. Tane boyutu 10 mikron dolaylarındadır ve tane dağılımı olması gereken Gauss eğrisine sahiptir.

3.5 SEM Görüntüleri

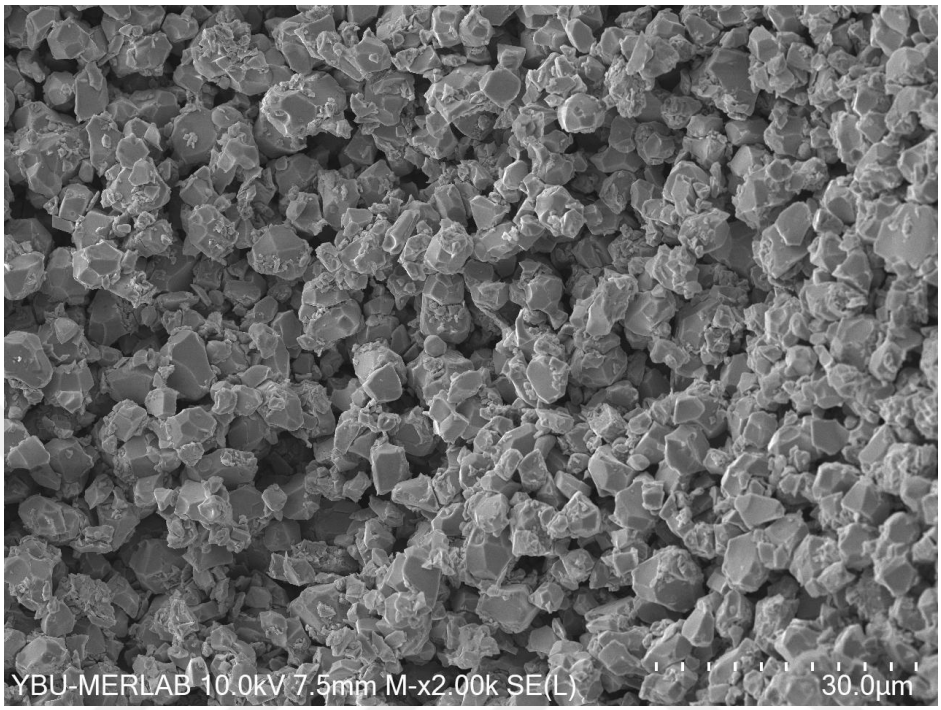
SEM cihazını kullanarak çalışma sonuçları tekrar teyit edildi. Geri dönüşüm hurda mıknatısının gezegensel öğütücü sonrasında SEM analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.16 Farklı bölge ve büyütmelerde SEM görüntüsü



Şekil 3.17 Farklı bölge ve büyütmelerde SEM görüntüsü-2



Şekil 3.18 Farklı bölge ve büyütmelerde SEM görüntüsü-3

SONUÇ:

Rietveld analizi ile görüldüğü üzere bu piklerin NdFeBHx uyumludur. Aynı zamanda X-ışınımı kırınım deseninden hidrojenin yapıya girdiği ve yapıya girmesiyle birim hücrede hacim genişlemesine yol açtığı görülmektedir. Dolayısıyla sistemde Neodimyumca zengin fazların arasına girerek sistemi kırdığı da görülmektedir. İki öğütme cihazının karşılaştırılması sonucunda; gezegensel öğütme sistemindeki parçacık boyutlarının daha iyi olduğu hem partikül boyut analiz cihazında hem de SEM sonuçlarında görülmektedir. Son aşamayla birlikte NdFeB mıknatısının karakterizasyon çalışması tamamlanmıştır. Gelecek çalışmalarda mıknatıs çalışmaları ayrıntılı incelenecek ve NdFeB mıknatıslarından sinterlenmiş mıknatıs üretimi yapılacaktır. Üretilen mıknatısların ayrıntılı karakterizasyon çalışmaları yapılarak, dünyaya ve geri dönüşüme katkıları aktarılacaktır.

KAYNAKÇA

[1] Adrwish Salahadin Muhammed Ali, 2013, The Processing and Characterisation of Recycled NdFeB based Magnets, University of Birmingham

[2] Akyol Sena, 2020, Fe3O4 Ferrit Üretimi ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

[3] Çakır Öznur,2020, ‘’Maddenin Elektrik ve Manyetik Özelliklerine Giriş’’, Ders Notları, Fizik Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi

[4] Köksal F. Ve Köseoğlu R., 2015, ‘’Katıhal Fiziği’’
[5] Madhu, 2019, ‘’Difference Between Curie Temperature and Neel Temperature’’, Encyclopedia Britannica, Encyclopedia Britannica Inc.

[6] KITTEL, Katıhal Fiziğine Giriş

[7] Yorulmaz İrem, 2012, ‘’Antiperovskit Mangan Karbid Sistemlerin Üretimi ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi’’, Yıldız Teknik Üniversitesi

[8] 1948, Introduction to to magnetic materials’’, Ferromagnetism, London

[9] Vural Levent, 2010, SERT FERRİT VE NdFeB TİPİ MIKNATISLARIN KARAKTERİZASYONU VE TERSİNİR OLMAYAN KAYIPLARIN YAPI ÜZERİNE ETKİSİ, İstanbul Teknik Üniversitesi

[10] Karaçam R., “Bi2S3- Nano Kompozitlerin Üretilmesi, Yapısal ve Manyetik Fe3O4 Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.

[11] Malzeme Bilimi, Metalografi, (2008), https://www.metalurjik.com/taramali-elektron-mikroskobu-sem.

[12] Anna Dańczak, Ida Chojnacka, Sabina Matuska, Kamila Marcola, Anna Leśniewicz, Maja Wełna, Andrzej Żak, Zbigniew Adamski, Leszek Rycerz, 2017, The recycling-oriented material characterization of hard disk drives with special emphasis on NdFeB magnets, Wroclaw University of Science and Technology

[13] Hongyue Jin, Peter Afiuny, Timothy McIntyr, Yuehwern Yih, John W. Sutherland, 2016, Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production Versus Magnet-to-Magnet Recycling, Purdue University

[14] Oliver Diehl, Mario Schonfeldt, Eva Brouwer, Almut Dirks, Karsten Rachut, Jurgen Gassmann, Konrad Guth, Alexander Buckow, Roland Gauß Rudolf Stauber, Oliver Gutfleisch, 2018, Towards an Alloy Recycling of Nd–Fe–B Permanent Magnets in a Circular Economy, Technische Universität Darmstadt/ Delft University of Technology/ University of Birmingham

[15] Lixandru A., Venkatesan P., Jönnson C., Poenaru I., Hall B., Yang Y., Walton A., Güth K., Gauß R., Gutfleisch O., Identification amd recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment, 2017, University of Birmingham, Technische Universitat Darmstadt

[16] Umut Evrim, 2012, Magnetik Nanoparçacıkların Magnetik Özellikleri ve Spin Dinamiği. Hacettepe Üniversitesi

[17] Özkendir Osman Murat, 2017, Neodyum Katkısının FeBO3 Oksit Malzemesinin Kristal ve Elektronik Özelliklerine Etkisi, Mersin Üniversitesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Dergisi

[18] Özgür Mustafa, 2017, Neodimyum-144, 145-Çekirdeklerinin Durum Yoğunlukları ve Gama Kuvvet Fonksiyonları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

[19] Tunalı Merve, 2019, Recovery of Silver and Neodymium From Aqueous Solutions By Using Microalgae, Boğaziçi University

[20] Şeker Seda, 2023, Neodimyum Aljinat Boncukların Boyar Madde Giderimde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Munzur Üniversitesi

[21] Charles Kittel, 2005, Katıhal Fiziğine Giriş

[22] M. Kannan, 2018, Scanning Electron Microscopy: Principle, Components and Applications

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Sena FENERCİ – Öznur ÇAKIR ‘‘NdFeB Mıknatıs Tozlarının Yapısal Özelliklerinin İncelenmesinin Karakterizasyonu’’ 4.Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi / 24-25 Mayıs 2024, ICENSS, ANKARA