

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERT FERRİT VE NdFeB TİPİ
MIKNATISLARIN KARAKTERİZASYONU VE
TERSİNİR OLMAYAN KAYIPLARIN YAPI ÜZERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Levent VURAL**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gültekin GÖLLER

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERT FERRİT VE NdFeB TİPİ
MIKNATISLARIN KARAKTERİZASYONU VE
TERSİNİR OLMAYAN KAYIPLARIN YAPI ÜZERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Levent VURAL
(506081412)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 04 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gültekin GÖLLER (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN (İTÜ)
Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (YTÜ)**

HAZİRAN 2010

Sevgili Aileme,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten değerli hocam Prof. Dr. Gültekin GÖLLER'e verdiği tavsiyeler, yaptığı olumlu eleştiriler ve sabrı için teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bilgi birikimini benimle paylaşan, yorumlarını ve katkılarını esirgemeyen Ar-Ge Uzmanı Sayın Dr. Feriha SERTÇELİK BİROL'a, tez çalışmasında yapılan deneylerde büyük yardımları olan Ar-Ge Teknisyeni Sayın Turgay GÖNÜL başta olmak üzere tüm Malzeme Teknolojileri Ailesi çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca İTÜ Biyomalzeme Araştırma ve Karakterizasyon Laboratuvarı araştırma görevlilerinden Sayın İpek AKIN ve teknisyen Sayın Hüseyin SEZER başta olmak üzere tüm çalışanlara yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışması için teknik imkan sağlayarak, Arçelik A.Ş. bünyesinde bu çalışmanın gerçekleşmesini destekleyen Ar-Ge Direktörü Sayın Dr. Cemil İNAN'a, Ar-Ge Direktörlüğü Mekanik Teknolojiler Yöneticisi Sayın Fatih ÖZKADI'ya ve Ar-Ge Malzeme Teknolojileri Ailesi Lideri Sayın Sibel ODABAŞ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince manevi desteğini esirgemeyen sevgili Pınar TANER'e ve tüm öğrenim hayatım boyunca elde ettiğim başarılarımı borçlu olduğum, her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili AİLEME teşekkürlerimi borç bilirim.

Mayıs 2010

Levent Vural

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgi ve Tezin Amacı	1
1.2 Manyetizma.....	3
1.2.1 Manyetik malzemeler	3
1.2.1.1 Diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemeler	4
1.2.2 Manyetik bölgeler ve bölge duvarları.....	6
1.2.3 Histerezis döngüsü ve manyetik özellikler	9
1.2.3.1 Manyetik malzemelerin özgül manyetik özellikleri	15
2. FERRİT VE NADİR TOPRAK MIKNATISLARI	19
2.1 Ferrit Miknatıslar.....	19
2.1.1 Ferritlerin kristal yapıları	20
2.1.2 Ferritlerin kimyasal özellikleri.....	22
2.1.3 Ferritlerin mikro yapı özellikleri	23
2.2 Nadir Toprak Miknatısları	27
2.2.1 Nadir toprak demir bor alaşımlarının kristal yapıları	28
2.2.2 Nadir toprak demir bor alaşımlarının kimyasal özellikleri	30
2.2.3 Nadir toprak demir bor alaşımlarının mikro yapı özellikleri.....	31
3. MANYETİK ÖZELLİKLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	33
3.1 Değişim Tipleri	33
3.2 Çevresel Faktörler	36
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
4.1 Numune Hazırlama.....	45
4.1.1 Metalografik işlemler	45
4.1.2 Öğütme işlemi	46
4.1.3 Presleme işlemi	46
4.2 Yapılan Deneyler.....	47
4.2.1 X-ışınları flüoresans ile kimyasal bileşim analizi	47
4.2.2 X-ışınları difraksiyon ile faz analizi	48
4.2.3 Taramalı elektron mikroskobu ile mikro yapı karakterizasyonu ve tane boyutu analizi	49
4.2.4 Diferansiyel taramalı kalorimetri ile Curie sıcaklığı ölçümü.....	51
4.2.5 Yoğunluk tayini.....	51
4.2.6 Porozite tayini	52

4.2.7 Sıcaklık etkisi ile tersinir olmayan kayıp tayini.....	52
4.2.8 Sıcaklık katsayılarının tayini	53
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER.....	55
5.1 Ferrit Mıknatıslar	55
5.1.1 X-ışınları flüoresans analizi sonuçları.....	55
5.1.2 X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları	57
5.1.3 Taramalı elektron mikroskopu ile mikro yapı karakterizasyonu ve tane boyutu analiz sonuçları.....	59
5.1.4 Curie sıcaklık ölçüm sonuçları	61
5.1.5 Yoğunluk ve porozite ölçüm sonuçları	63
5.1.6 Tersinir olmayan kayıp analiz sonuçları ve sıcaklık katsayısı değerleri...	64
5.1.7 Ferrit mıknatıslar genel değerlendirme	68
5.2 NdFeB Mıknatıslar.....	70
5.2.1 X-ışınları flüoresans analizi sonuçları.....	71
5.2.2 X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları	72
5.2.3 Taramalı elektron mikroskopu ile mikro yapı karakterizasyonu ve tane boyutu analiz sonuçları.....	74
5.2.4 Curie sıcaklık ölçüm sonuçları	77
5.2.5 Yoğunluk ölçüm sonuçları	78
5.2.6 Tersinir olmayan kayıp analiz sonuçları ve sıcaklık katsayısı değerleri...	79
5.2.7 NdFeB mıknatıslar genel değerlendirme.....	83
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
6.1 Sonuçlar	87
6.2 Öneriler.....	91
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	97

KISALTMALAR

B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
B_g	: Boşluklu Manyetik Akı Yoğunluğu
B_m	: Demanyetizasyon Eğrisi Üzerindeki Bir Noktadaki Manyetik Akı Yoğunluğu
B_r	: Kalıntı Manyetik Akı Yoğunluğu
B_s	: Manyetik Akı Yoğunluğu Doyma Sınırı
BH_{max}	: Maksimum Enerji Çarpımı
DSC	: Differential Scanning Calorimeter
H	: Manyetik Alan
H_c	: Koersivite
H_{cB}	: Endüktif Koersivite
H_{cJ}	: İçsel Koersivite
H_d	: Demanyetize Edici Manyetik Alan
IEC	: International Electrotechnical Commission
J	: Manyetik Polarizasyon
J_r	: Kalıntı Manyetik Polarizasyon
J_s	: Manyetik Polarizasyon Doyma Sınırı
M	: Mıknatıslanma
M_s	: Mıknatıslanma Doyum Sınırı
MMPA	: Magnetic Materials Producers Association
P_{ci}	: İçsel Manyetik İletkenlik Katsayısı
SEM	: Scanning Electron Microscope
T_c	: Curie Sıcaklığı
XRD	: X-Ray Diffraction
XRF	: X-Ray Fluoresence
α	: Kalıntı Manyetik Akı Yoğunluğu Termal Kararlılık Katsayısı
β	: İçsel Koersivite Termal Kararlılık Katsayısı
μ	: Manyetik Geçirgenlik
χ	: Manyetik Duyarlılık

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Malzemelerin manyetik özelliklerine göre karşılaştırmalı sınıflandırılması	6
Çizelge 1.2 : Malzemelerin manyetik özellikleriyle ilgili kavramlar ve birimleri.....	13
Çizelge 1.3 : Bazı manyetik malzemelerin doyum alanı ve Curie sıcaklığı.....	17
Çizelge 2.1 : Seramik mıknatısların (sert ferrit) MMPA 0100-00 standardına göre tipik manyetik özellikleri	20
Çizelge 2.2 : Nadir toprak mıknatısların kimyasal bileşim ve tipik manyetik özellikleri	27
Çizelge 3.1 : Çevresel etkilerin neden olduğu değişimler	34
Çizelge 3.2 : Çevresel etkilerin neden olduğu değişimler -2-.....	35
Çizelge 3.3 : Yeniden mıknatıslanabilir zaman değişimi	37
Çizelge 4.1 : Sert ferrit ve NdFeB esaslı mıknatıslara ait temel fiziksel özellikler ...	45
Çizelge 5.1 : Analizleri yapılan ferrit mıknatıslar	55
Çizelge 5.2 : Ferrit mıknatıslara ait kimyasal bileşim değerleri	56
Çizelge 5.3 : Ferrit mıknatısların sahip olduğu faz yüzdeleri.....	58
Çizelge 5.4 : Standartlarda belirtilen yoğunluk değerleri.....	63
Çizelge 5.5 : İki farklı zamanda analizi yapılan mıknatıslara ait yoğunluk değerleri.....	63
Çizelge 5.6 : İki farklı zamanda analizi yapılan mıknatıslara ait porozite değerleri.....	63
Çizelge 5.7 : Ferrit mıknatıslar için ölçüm şartları.....	64
Çizelge 5.8 : Sinomag Br = 382 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları ..	65
Çizelge 5.9 : Sinomag Br = 393 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları ..	66
Çizelge 5.10 : Ferrit mıknatıslara ait sıcaklık-manyetik özellik değişim sonuçları ...	68
Çizelge 5.11 : Ferrit mıknatısların sahip oldukları sıcaklık katsayıları.....	68
Çizelge 5.12 : Analizleri yapılan NdFeB mıknatıslar	70
Çizelge 5.13 : NdFeB mıknatıslara ait kimyasal bileşim değerleri.....	71
Çizelge 5.14 : NdFeB mıknatısların sahip olduğu faz yüzdeleri	74
Çizelge 5.15 : NdFeB mıknatıslara ait yoğunluk değerleri	78
Çizelge 5.16 : NdFeB mıknatıs ölçüm şartları.....	79
Çizelge 5.17 : Sinomag N40 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları.....	79
Çizelge 5.18 : One Magnet N40 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları ..	80
Çizelge 5.19 : NdFeB mıknatıslara ait sıcaklık-manyetik özellik değişim sonuçları ..	83
Çizelge 5.20 : NdFeB mıknatısların sıcaklık katsayıları	83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Periyodik tablo üzerinde elementlerin manyetik özelliklerinin gösterimi .	4
Şekil 1.2 : Manyetikliği giderilmiş ferromanyetik bir katının bölgeleri. Her bölgedeki momentlerin tümü dizilmiş fakat bölgelerin kendileri rasgele dizilmişlerdir, bundan dolayı net manyetiklik sıfır olur	7
Şekil 1.3 : Komşu bölgeler ve bölge duvarının şematik gösterimi	8
Şekil 1.4 : Bir ferromanyetik malzemede bölge büyümesi, dönmesi ve ilgili B - H manyetikleşme eğrisi	9
Şekil 1.5 : Sert ve yumuşak malzemelerin histerezis döngüsü	10
Şekil 1.6 : Histerezis döngüsü ve temel tanımlar (kırmızı eğri polarizasyon (J)).....	12
Şekil 1.7 : Bazı mıknatlara ait manyetik enerji (BxH) büyüklükleri	15
Şekil 2.1 : M tipi hegzagonal ferrite ait kristal yapı ve demire ve onu çevreleyen yapılara ait 5 konum	21
Şekil 2.2 : Sert ferritlere ait demanyetizasyon eğrileri ve mikro yapıları.....	25
Şekil 2.3 : İri öğütülmüş ve ince öğütülmüş numunelere ait mikro yapı ve demanyetizasyon eğrileri	26
Şekil 2.4 : NdFeB kristal yapısı	29
Şekil 2.5 : Nd ₂ Fe ₁₄ B fazının ve diğer Nd içeren fazların oluşumunu gösteren Nd-Fe-B üçlü faz diyagramı	29
Şekil 2.6 : Ortalama tane boyutu ile korozyon kaynaklı ağırlık kaybı arasındaki ilişki	31
Şekil 2.7 : Sinterleme sıcaklığı ile tane boyutu dağılımı arasındaki ilişki	32
Şekil 2.8 : Sinterleme sıcaklığının mıknatıs özellikleri üzerine etkisi	32
Şekil 3.1 : Alnico 5 mıknatısına ait zamana bağlı değişim.....	36
Şekil 3.2 : Ferrit ve Alnico mıknatıslarda çalışma sıcaklıklarının genel etkileri.....	38
Şekil 3.3 : Ferrit ve Alnico mıknatısların sıcaklıkla gösterdikleri değişim.....	38
Şekil 3.4 : Farklı sıcaklıklardaki demanyetizasyon eğrileri.....	39
Şekil 3.5 : Farklı sıcaklıklardaki demanyetizasyon eğrileri 2.....	39
Şekil 3.6 : Yapay temas sonrası boşluk akı yoğunluğunda meydana gelen değişim .	41
Şekil 3.7 : Ferrit mıknatıslara ait normal ve içsel demanyetizasyon eğrisi arasındaki fark	43
Şekil 4.1 : Struers TegraPol-11 otomatik zımpara ve parlatma cihazı	46
Şekil 4.2 : CMT TI-100 titreşimli değirmen öğütme cihazı	46
Şekil 4.3 : Hidrolik pres cihazı.....	47
Şekil 4.4 : XRF cihazının ölçüm metodu ve prensibi.....	48
Şekil 4.5 : Rigaku ZSX Primus II XRF cihazı.....	48
Şekil 4.6 : X-ışınlarının kristal içinde yansıması	49
Şekil 4.7 : PANalytical PW3040/60 X'Pert Pro XRD cihazı	49
Şekil 4.8 : Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) şematik görünüşü	50
Şekil 4.9 : JEOL JSM 7000F Field Emission-Scanning Electron Microscope cihazı .	50
Şekil 4.10 : TA Q200 DSC cihazı.....	51
Şekil 4.11 : Micromeritics AccuPyc 1330 gaz piknometresi cihazı	51
Şekil 4.12 : Farklı mıknatısların manyetik özelliklerinin sıcaklık ile değişimi	52

Şekil 4.13 : (a) MagnetPhysik permeagraf cihazı; (b) Milestone fırın	53
Şekil 5.1 : Sinomag Br = 382 mıknatısına ait XRD sonuçları.....	57
Şekil 5.2 : Sinomag Br = 393 mıknatısına ait XRD sonuçları.....	57
Şekil 5.3 : Sinomag Br = 382 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (a) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO) - Sinomag Br = 393 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (c) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (d) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO).....	60
Şekil 5.4 : Ferrit mıknatıslara ait ortalama tane boyutu dağılım grafiği	61
Şekil 5.5 : Sinomag Br = 382 mıknatısına ait DSC eğrisi.....	62
Şekil 5.6 : Sinomag Br = 393 mıknatısına ait DSC eğrisi.....	62
Şekil 5.7 : Sinomag Br = 382 mıknatısına ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği	65
Şekil 5.8 : Sinomag Br = 393 mıknatısına ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği	66
Şekil 5.9 : (a) Sinomag Br = 382 mıknatısına ait ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) Sinomag Br = 393 mıknatısına ait ikincil elektron görüntüsü (SEI).....	67
Şekil 5.10 : Ferrit mıknatıslara ait demanyetizasyon eğrileri.....	70
Şekil 5.11 : Sinomag N40 mıknatısına ait XRD sonuçları.....	73
Şekil 5.12 : One Magnet N40 mıknatısına ait XRD sonuçları	73
Şekil 5.13 : Mekanik parlatma ve dağlama sonrası kaybolan tane sınırlarına örnek bir mikro yapı.....	75
Şekil 5.14 : Sinomag N40 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (a) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO) – One Magnet N40 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (c) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (d) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO).....	76
Şekil 5.15 : NdFeB mıknatıslara ait ortalama tane boyutu dağılım grafiği.....	77
Şekil 5.16 : Sinomag N40 mıknatısına ait DSC eğrisi.....	77
Şekil 5.17 : One Magnet N40 mıknatısına ait DSC eğrisi	78
Şekil 5.18 : Sinomag N40 mıknatısına Ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği	80
Şekil 5.19 : One Magnet N40 mıknatısına ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği	81
Şekil 5.20 : (a) Sinomag N40 mıknatısına ait ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) One Magnet N40 mıknatısına ait ikincil elektron görüntüsü (SEI).....	82
Şekil 5.21 : NdFeB mıknatıslara ait demanyetizasyon eğrisi.....	85

SERT FERRİT VE NdFeB TİPİ MİKNATISLARIN KARAKTERİZASYONU VE TERSİNİR OLMAYAN KAYIPLARIN YAPI ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZET

Son yıllarda, kalıcı ve yüksek manyetik özellik gösteren mıknatıs malzemeler günlük yaşamımızda vazgeçemediğimiz elektronik eşyalarda, sağlık alanında, otomotiv endüstrisinde ve daha birçok alanda ihtiyaç duyulan malzemeler sınıfına girmektedir. Kalıcı mıknatıslık özelliği gösteren malzemeler tabiatta artık nadir olarak rastlanan bir malzeme sınıfı olmakla birlikte günümüzde özellikle nadir toprak elementleri, lantanitler, bazı ametal ve metal alaşımları mıknatıslanabilen malzemeler olarak yüksek performans istenen alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir.

Sürekli mıknatıs motorlarda genel olarak sert ferrit ve NdFeB tipi mıknatıslar kullanılmaktadır. M tipi ya da hegzaferritler olarak da bilinen sert ferritler seramik esaslı manyetik malzemelerdir ve ağırlıklı olarak karmaşık oksitlerden meydana gelirler. Mıknatıs olarak en yaygın olarak kullanılan ferritlere örnek $BaO.6Fe_2O_3$ veya $SrO.6Fe_2O_3$ verilebilmektedir. Nadir toprak mıknatısları önemli temel alaşım elementleri nadir toprak elementlerinden oluşan mıknatıs malzeme sistemleridir. Bu alaşımlar 2 nadir toprak atomuna karşılık 14 demir ve 1 bor atomu içeren alaşımlardır. Genel gösterimleri $RE_2TM_{14}B$ şeklindedir.

Bu mıknatısların malzeme özellikleri mıknatısların manyetik ve yaşlanma özelliklerini etkilemektedir. Bu tezde sert ferrit ve NdFeB mıknatıs malzemelerinin ayrıntılı malzeme karakterizasyonu yapılmış, manyetik yaşlanma deneyleri de yapılarak malzeme özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır.

Malzemelerin kimyasal bileşimleri X-ışınları flüoresans (XRF) cihazı ile, fazların tespiti X-ışınları difraksiyon (XRD) cihazı ile, tane boyutunun belirlenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile, Curie sıcaklığı ölçümü diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) cihazı ile, yoğunlukların tespiti piknometre cihazı ile ve manyetik özelliklerin ölçümü ise permeagraf cihazı ile yapılmıştır.

Karakterizasyon deneyleri sonucunda ferrit mıknatısların manyetik özelliklerinde meydana gelen farklılığın tane boyutu ve faz farklılıklarından meydana geldiği gözlenmiştir. Sıcaklık nedenli manyetik kayıplar açısından ferrit mıknatıslarda aşırı kayıpların yaşanmadığı gözlenmiştir. NdFeB mıknatıslar açısından manyetik özelliklerde farklılık yaratan etkilerin başında ilave edilen elementlerin ve faz farklılıklarının geldiği gözlenmiştir. Sıcaklık etkili kayıpların ise oldukça büyük oranlarda meydana geldiği ve yapıda var olan fazların bu kayıpları azaltmada etkili olduğu gözlenmiştir.

CHARACTERIZATION OF HARD FERRITE AND NdFeB MAGNETS AND THE EFFECT OF IRREVERSIBLE LOSSES ON THE STRUCTURE OF MAGNETS

SUMMARY

In recent years, magnet materials that are showing permanent and high magnetic properties encompass a wide variety of materials, which are used in a diverse range of applications like white goods, electronic goods, medical field and automotive industry. Permanent magnetism properties indicating material in nature is now rarely encountered a material class, although nowadays, especially rare earth elements, lanthanides, some non-metallic and metallic alloys are preferred in the high performance required areas as magnetizable materials.

Permanent magnet motors uses generally hard ferrite and NdFeB magnets. Hard ferrites also known as M-type or hexaferrites are ceramic-based magnetic materials and they generally contain complex oxides. $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ and $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ hard ferrites are the most popular hard ferrites. The rare earth magnets that contain mostly rare earth elements as basic alloying elements are important magnet systems. These alloys contain 2 rare earth atoms versus 14 iron and 1 boron atoms. Their general formula is $\text{RE}_2\text{TM}_{14}\text{B}$.

These magnet's magnetic and aging properties can be affected by material properties. In this thesis, the detailed characterization of hard ferrite and NdFeB magnet materials is planned for recognition of magnet materials. In addition, the changes on the material properties after magnetic aging are investigated.

The composition of materials measured by XRF, phase analysis characterized by XRD, grain size determination evaluated by the help of SEM, Curie temperature determination measured by DSC and density measured by pycnometer. Moreover, magnetic properties determination evaluated by permeagraph device.

As a result of experimental studies, the reasons of magnetic properties differences on ferrite magnets are grain size and phase differences. In addition, there is not enormous temperature induced magnetic losses in ferrite magnets. On the other hand, in the view of NdFeB magnets, the reasons of magnetic properties differences are additive elements and phase differences. In contrast to ferrite magnets, there are great magnetic losses by the temperature and these losses could diminish by existence of some phases.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgi ve Tezin Amacı

Bilinen en eski doğal sürekli mıknatıs malzemesi Fe_3O_4 'ün bir çeşidi olan, "load stone" adı verilen mıknatıs taşlarıdır. Zaman içerisinde bu malzeme ilk bulunduğu yer olan Thessaly'daki Magnesia (bugünkü Manisa yakınları) bölgesinin ismini alarak, mıknatıs şekline dönüşmüştür.

Sürekli mıknatıslarla ilgili ilk bilimsel incelemeyi William Gilbert yapmıştır. Daha sonra onu Canton, Aepinus, Coulomb ve Jamin izlemiştir. William Gilbert, 1600 yılında yayınladığı "De Magnete Magneticisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physidogia Nova" adlı araştırmasında mıknatıs taşlarının özelliklerini incelemiş ve bu taşların demire manyetik özellik kazandırabileceğini belirlemiştir. Gilbert'in bu eseri, fizik çalışmalarının bilimsel verilerle desteklenmesi gerekliliğini gösteren ilk çalışma olması nedeniyle ayrı bir öneme sahiptir.

1831 yılında ilk elektrik motorunun imal edilmesinden sonra, 19. yüzyılın sonlarında imal edilen tungsten, krom ve kobalt çeliği mıknatıslarının manyetik enerji yoğunluğunun olması nedeniyle ancak düşük güçlü sürekli mıknatıslı motorlar imal edilebilmiştir. 1930'lu yıllarda Tokyo Üniversitesinde yüksek akı yoğunluğu ve kabul edilebilir enerji düzeyindeki Alnico mıknatıslarının imal edilmesi ile Bell laboratuvarlarında birkaç hp gücündeki ticari amaçlı sürekli mıknatıslı motorların imalatına başlanmıştır. Uzay ve askeri amaçlı uygulamalar için ise birkaç kW gücünde sürekli mıknatıslı motorlar imal edilmiştir. Ancak Alnico malzemesinin koersif kuvvetinin oldukça düşük olması, bu motorlar üzerine sınırlama getirmiştir.

1950'li yıllarda seramik veya sert ferrit olarak adlandırılan sürekli mıknatıs malzemelerinin geliştirilmesiyle sürekli mıknatıslı makinelerin hem ticari hem de özel amaçlı uygulamaları artmıştır. Ferrit sürekli mıknatıs malzemelerinin artık akı yoğunlunun Alnicolara göre düşük olmasına rağmen koersif kuvvetinin yüksek olması, Alnico mıknatıslı motorlarda yaşanan değişik çevre koşullarına uyum sorununu çözümlenmiştir. Günümüz otomobil, uzay ve kontrol araçlarındaki elektrik motorlarının büyük bir kısmı ferrit sürekli mıknatıslardan imal edilmektedir.

Sürekli mıknatıs malzemeleri ile ilgili bir sonraki gelişme ise 1960 yılında ticari amaçlı nadir toprak sürekli mıknatıslarının imal edilmesi olmuştur. İlk nadir toprak sürekli mıknatıslar samaryum - kobalt alaşımından oluşmaktadır. Bu alaşımın artık akı yoğunluğu Alnicolardan ve koersif kuvveti de sert ferritten 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 en iyi samaryum-kobalt alaşımının özelliklerine sahip, ancak ondan çok daha ucuz olan neodim-demir-bor (NdFeB) alaşımının imal edilmesi olmuştur.

Son yıllarda, kalıcı ve yüksek manyetik özellik gösteren mıknatıs malzemeler günlük yaşamımızda vazgeçemediğimiz elektronik eşyalarda, sağlık alanında, otomotiv endüstrisinde ve daha birçok alanda ihtiyaç duyulan malzemeler sınıfına girmektedir. Kalıcı mıknatıslık özelliği gösteren malzemeler tabiatta artık nadir olarak rastlanan bir malzeme sınıfı olmakla birlikte günümüzde özellikle nadir toprak elementleri, lantanitler, bazı ametal ve metal alaşımları mıknatıslanabilen malzemeler olarak yüksek performans istenen alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir.

1982 yılından günümüze kadar uzanan yüksek manyetikleşme gösteren mıknatısların üretimi özellikle Avrupa ülkelerinde hız kazanmıştır. Üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, alaşım bileşenlerinin geliştirilmesi, kaplamaların geliştirilmesi, mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve tüm bunlarla birlikte manyetik özelliklerinin uzun süre korunabilmesi amacıyla araştırmalar yapılmış ve halen de yapılmaktadır [1].

Sürekli mıknatıs motorlarda genel olarak sert ferrit ve NdFeB tipi mıknatıslar kullanılmaktadır. Bu mıknatısların malzeme özellikleri mıknatısların manyetik ve yaşlanma özelliklerini etkilemektedir. Bu tezde sert ferrit ve NdFeB mıknatıs malzemelerinin ayrıntılı malzeme karakterizasyonu ve manyetik yaşlanma deneyleri yapılarak malzeme özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır.

1.2 Manyetizma

1.2.1 Manyetik malzemeler

Demir, kobalt ve nikel oda sıcaklığında mıknatıslandıklarında, çevrelerinde güçlü bir mıknatıs alanı yaratan üç metalik elementtir ve asal mıknatıslar olarak adlandırılır. Altında mıknatıslanmış bir demir çubuk bulunan bir kâğıdın üzerine serpilen küçük demir tozlarının dizilmesi mıknatıs alanının varlığını gösterir. Mıknatıslanmış çubuk iki kutba sahiptir ve mıknatıs çizgileri bir kutuptan çıkıp diğerine girer.

Genel olarak, doğada mıknatıslık çift kutuplu olup, bugüne kadar tek kutuplu mıknatıs bulunamamıştır. Bir mıknatıs alanın, birbirinden belirli bir uzaklıkla ayrılmış iki mıknatıs kutbu ya da merkezi vardır. Bu çift kutuplu davranış, atomik düzeyde de kendini gösterir. Mıknatıslı çift kutuplu atomlar genel malzemeyi oluşturur [2].

Mıknatıs malzemelerine mikro düzeyde bakıldığında; bir atomdaki her elektronun iki kaynaktan doğan manyetik momente sahip olduğunu söylemek mümkündür. Kaynakların ilki, elektronların çekirdek etrafındaki yörünge hareketiyle ilgilidir. Elektronlar hareketli yükler olarak küçük birer akım çevrimi olarak düşünüldüğünde, bu hareketleriyle dönme eksenleri boyunca bir manyetik momente sahip oldukları için küçük bir manyetik alan etkisi yarattıkları söylenebilir.

Ayrıca, her elektron bir eksen etrafında dönme hareketi yaptığından dönme eksenini boyunca yönelen diğer manyetik moment etkisi de bu dönme hareketinden kaynaklanmaktadır. Spin manyetik momentleri olarak adlandırılan bu momentler sadece yukarı yönlü ya da tam anti paralel olacak şekilde aşağı yönlü olabilmektedir. Böylece, atomdaki her bir elektron kalıcı bir yörüngesi ve spin manyetik momentleri olan küçük bir mıknatıs olarak düşünülebilir.

Her bir atomun içerisinde bazı elektron çiftlerinin yörüngesel momentleri bir diğerini etkisiz hale getirecek şekilde zıt yönlüdür. Bu durum spin momentleri için de geçerlidir. Bir atom için net manyetik moment böylece elektronlarının manyetik momentleri toplamı olmaktadır. Tüm elektron enerji seviyeleri dolu bir atom bu sebeplerden dolayı kalıcı olarak mıknatıslanamaz. Bu sınıf elementler soy gazları (He, Ne, Ar, vb) ve bazı iyonik malzemeleri içermektedir [3].

1.2.1.1 Diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemeler

Manyetizma tipleri malzemelerin mıknatıslanabilirlik davranışlarına göre diyamanyetizma, paramanyetizma ve ferromanyetizma olarak üçe ayrılır. Ferrimanyetizma ve antiferromanyetizma ise ferromanyetizmanın alt sınıflarıdır. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi doğadaki tüm elementler manyetik özellikleri açısından bu gruplardan birine girmektedir [4].

Malzeme davranışlarını ise elektron ve manyetik dipollerin dışarıdan uygulanan bir manyetik alana tepkileri belirlemektedir. Periyodik tablo incelendiğinde diyamanyetik ve paramanyetik malzemelerin ağırlıklı olduğunu görürüz. Öte yandan demir, nikel ve kobaltın ferromanyetik; kromun ise antiferromanyetik özellik gösterdiği görülmektedir. Ferromanyetik özellik göstermeyen tüm malzemeler genel olarak manyetik olmayan malzemeler olarak gruplandırılabilir.

1 H																	2 He						
		Ferromanyetik										Antiferromanyetik											
		Paramanyetik										Diamanyetik											
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Ac																					
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu							

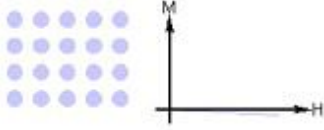
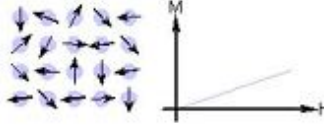
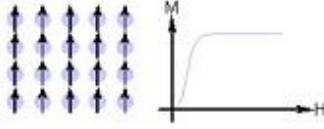
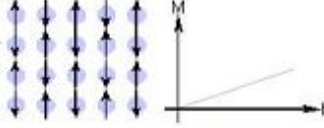
Şekil 1.1 : Periyodik tablo üzerinde elementlerin manyetik özelliklerinin gösterimi [1]

Diyamanyetik metaller manyetik alana karşı çok zayıf ve negatif duyarlılığa sahiptir. Diyamanyetik malzemeler manyetik alan tarafından çok az itilmektedir ve dış manyetik alan kaldırıldığında malzeme manyetik özelliklerini muhafaza edememektedir. Diyamanyetik malzemeler tüm elektronları eşleşmiş katılardır ve bunun sonucu olarak atom başına hiç bir geçirgen net manyetik momenti bulunmamaktadır. Diyamanyetik özellikler elektron orbitlerinin dış manyetik alan etkisi altında yeniden dizilmesiyle meydana gelmektedir. Periyodik tabloda bakır, gümüş, altın gibi birçok element diyamanyetik özellik göstermektedir.

Paramanyetik metaller manyetik alana karşı az ve pozitif duyarlılığa sahiptir. Bu malzemeler manyetik alan tarafından çok az çekilmektedir ve dış manyetik alan kaldırıldığında malzeme manyetik özelliklerini muhafaza edememektedir. Paramanyetik özellikler bazı eşleşmemiş elektronların varlığı nedeniyle ve elektron orbitlerinin dış manyetik alan etkisi altında yeniden dizilmesiyle oluşmaktadır. Paramanyetik malzemeler magnezyum, molibden, lityum ve tantal gibi elementleri içermektedir.

Ferromanyetik malzemeler manyetik alana karşı çok ve pozitif duyarlılığa sahiptir. Manyetik alan tarafından kuvvetli bir çekime sahiptir ve alan etkisi kaldırıldığında dair manyetik özelliklerini korumaktadır. Ferromanyetik malzemeler eşleşmemiş elektronlara sahiptir ve bu da net manyetik moment oluşturmaktadır. Manyetik bölgelerin varlığı nedeniyle güçlü manyetik özelliklere sahiptirler. Bu bölgelerde büyük çoğunluktaki atomların momentleri (10^{12} – 10^{15}) paralel dizilmektedir bundan dolayı bölge içindeki manyetik kuvvet yüksektir. Bir ferromanyetik malzeme mıknatıslanmamış durumda iken bölgeler rastgele bir düzendedirler ve net manyetik alan sıfırdır. Mıknatıslayan bir kuvvet uygulandığında bölgeler düzene girerler ve kuvvetli bir manyetik alan üretirler. Ferromanyetik malzemelere örnek olarak demir, nikel ve kobalt verilebilir. Bu malzemelerin bileşenleri genellikle manyetik parçacık yöntemiyle kontrol edilmektedir. Eğer atomlar arası çiftleşme yeteri kadar büyükse manyetik alanın yokluğunda üç önemli sınıflama söz konusudur. Bunlar; ferrimanyetizma, ferromanyetizma ve anti-ferromanyetizmadır [4]. Bu manyetizma tiplerinin atomik/manyetik davranışları, duyarlılıkları açısından genel karşılaştırılması Çizelge 1.1’de yapılmaktadır.

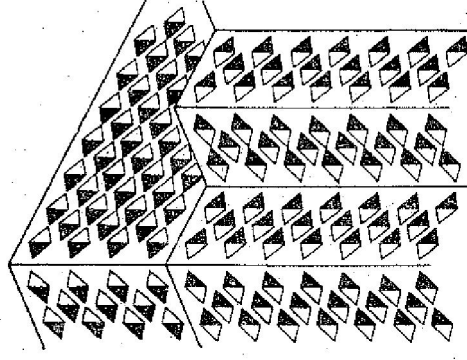
Çizelge 1.1 : Malzemelerin manyetik özelliklerine göre karşılaştırmalı sınıflandırılması [1]

Manyetizma	Duyarlılık	Atomik / Manyetik Davranış	Örnek / Duyarlılık
Diamanyetizma	Küçük & negatif.	Atomların manyetik momenti yoktur. 	Au -2.74×10^{-6} Cu -0.77×10^{-6}
Paramanyetizma	Küçük & pozitif.	Atomların manyetik momentleri rastgele yönelmiştir. 	β -Sn 0.19×10^{-6} Pt 21.04×10^{-6} Mn 66.10×10^{-6}
Ferromanyetizma	Büyük & pozitif, uygulanan alanın fonksiyonu, mikro yapıya bağlıdır.	Atomlar paralel şekilde hizalanmış manyetik momentlere sahiptir. 	Fe $\sim 100,000$
Antiferromanyetizma	Küçük & pozitif.	Atomlar paralel ve anti-paralel şekilde düzenlenmiş manyetik momentleri vardır. 	Cr 3.6×10^{-6}

1.2.2 Manyetik bölgeler ve bölge duvarları

Ferromanyetik malzemeler manyetik özelliklerini sadece atomların taşıdığı manyetik momentten değil ayrıca manyetik bölgeler olarak bilinen malzemenin yaptığı küçük bölgelerden kazanmaktadır. Her bir bölgede atomik dipollerin hepsi tercihli bir yönde birlikte eşleşmiştir. Bu dizilme malzemenin eriyik halden katı hale geçerken meydana gelen katılaşma sürecinde oluşmaktadır. Manyetik bölgeler manyetik kuvvet mikroskobu (MFM) kullanılarak tespit edilebilmektedir.

Ortalama bir bölge içerisinde $10^{12} - 10^{18}$ atom momentleri dizilmiştir. Her bir tek kristal sistemde ise yaklaşık 10^6 bölge bulunmaktadır. Malzeme herhangi bir uygulanan manyetik alan yokluğunda bu bölgeler malzeme içinde rastgele dizilirler ve net bir mıknatıslanma ortaya çıkmaz (Şekil 1.2). Harici bir manyetik alan, H, uygulanması halinde bölgelerdeki manyetik momentler dizilmek üzere kademeli olarak dönmeye başlarlar ve aynı yönde bir mıknatıslanma, M, verirler. Böylece bölgelerin birkaçı veya tamamı dizilmiş duruma gelmektedir. Dizili hale gelen manyetik bölge sayısı arttıkça malzeme içindeki manyetik alan da o kadar yüksek olmaktadır. Tüm bölgeler dizildiğinde malzeme manyetik açıdan doyumluğa ulaşmıştır denir. Malzeme manyetik açıdan doyumluğa ulaştıktan sonra dışarıdan uygulanan hiçbir ek manyetik kuvvet etki etmemektedir [1].

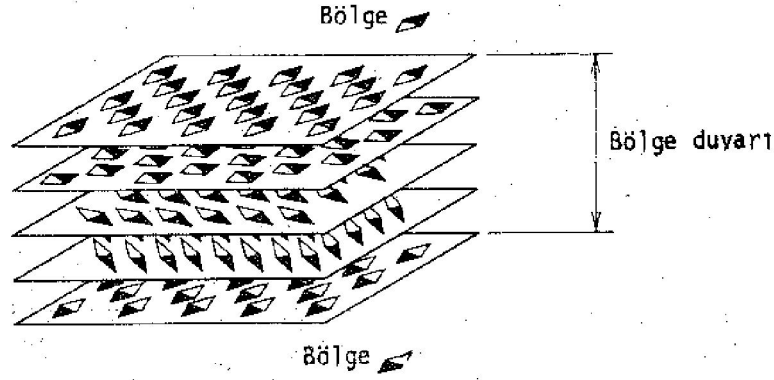


Şekil 1.2 : Manyetikliği giderilmiş ferromanyetik bir katının bölgeleri. Her bölgedeki momentlerin tümü dizilmiş fakat bölgelerin kendileri rasgele dizilmiştir, bundan dolayı net manyetiklik sıfır olur [5]

Manyetik bölgeler sistemdeki enerjiyi düşürmek üzere mevcuttur. Homojen olarak manyetize edilmiş tek bir bölgeden oluşan bir numune oldukça büyük bir manyeto statik enerjiye sahiptir. Bu da demanyetize eden alan, H_d , üreten numunenin yüzeyindeki serbest manyetik kutuplardan kaynaklanır. H_d büyüklüğü numune geometrisine ve manyetizasyona bağlıdır ve uygulanan manyetik alanının tersi yöndedir.

Manyetizasyonun iki veya daha fazla bölgeye bölünmesiyle manyeto statik enerji de bölünür, diğer bir deyişe N sayıda bölgeye sahip mıkmatista bu enerji $1/N$ kadar azalır ve komşu bölgelerin birbirine göre 180° açıyla yerleşmek zorunda olmadıkları bir yönde anizotropik olmayan kapalı bir bölgede sıfıra ulaşır [1].

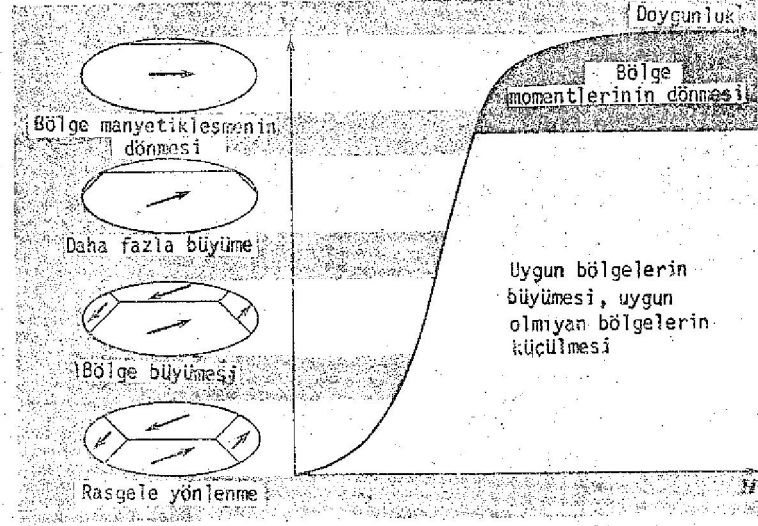
Komşu bölgeler ise birbirlerinden bölge duvarları ile ayrılır (Şekil 1.3). Bölge duvarlarının enerjisi bölgelerden daha yüksektir ve bölge alanıyla doğru orantılıdır. Bölge duvarı enerjisi malzemeye özgün bir özelliktir. Manyeto kristalin anizotropinin derecesine ve komşu atomlar arasındaki değişim etkileşim kuvvetine bağlıdır. Duvar kalınlığı da bu parametrelerle ilişkili olarak değişir. Mıkmatistaki kuvvetli bir anizotropi duvar kalınlığını daraltırken kuvvetli bir değişim etkileşimi ise daha geniş bir duvar kalınlığına sebep olacaktır.



Şekil 1.3 : Komşu bölgeler ve bölge duvarının şematik gösterimi [5]

Bir bölge içerisindeki atomik momentler manyeto kristalin anizotropi gösterirler. Böylece bölge içerisindeki momentler birbirlerine paralel hizalandıkları için bölgeler lokal manyetik doyum bölgelerini temsil ederler. Homojen malzemelerde bölgeler malzemenin enerjisini düşürecek şekilde oluşurlar. Homojen olmayan malzemelerde ise, bölge yapısı inklüzyonlar, dislokasyonlar, kristal sınırları, iç gerilmeler gibi safsızlık ve kusurlardan etkilenirler. Inklüzyonlar etraflarını çevreleyen malzemedan farklı manyetik özellik gösterirler. Bölgeler mikroskobik boyuttadır ve bir polikristal malzeme için her bir tane birden fazla bölge içerebilir. Makroskobik boyutta bir numunede çok sayıda bölge mevcuttur ve Şekil 1.3’de de görüldüğü üzere her biri farklı manyetizasyon oryantasyonuna sahiptir.

Bölgeler manyetizasyonun üç farklı rejimi için farklı mobilite göstermektedir. İlki tersinir bölge duvarı hareketidir. H manyetik alanı bir miktar arttırıldığında ilk olarak gözlemlenen harekettir. Manyetize olmamış matriste; kusurlar, empürite atomları ve çökeltiler başlangıçta bölge duvarlarına tutunmaktadır ve küçük manyetik alan değerleri bu etkileşimi engelleyememektedir, çevrimsel olarak histerezis mevcut değildir. Manyetik alan arttırıldığında, tersinmez bölge duvarı dönüşümü gerçekleşir. Alan kaldırılırsa histerezis görülür. Tercihli olarak dizilen bölgeler H manyetik alanına doğru yönlenmeyen bölgeleri yok ederek büyürler (Şekil 1.4). Polikristal malzemelerdeki manyetik alan, manyetizasyonu kolay yönlere kaydırarak yeter kuvvette değildir. Bölge duvarları çok yüksek hızlarda hareket ederler. Duvarlar yeni bölgelere tutunurlar ve kalıntı manyetizasyon manyetik alan kaldırıldığında yok olur. Manyetizasyonun bu ikinci aşamasında çevrimsel olarak doyum haline nazaran daha küçük histerezisler oluşur.



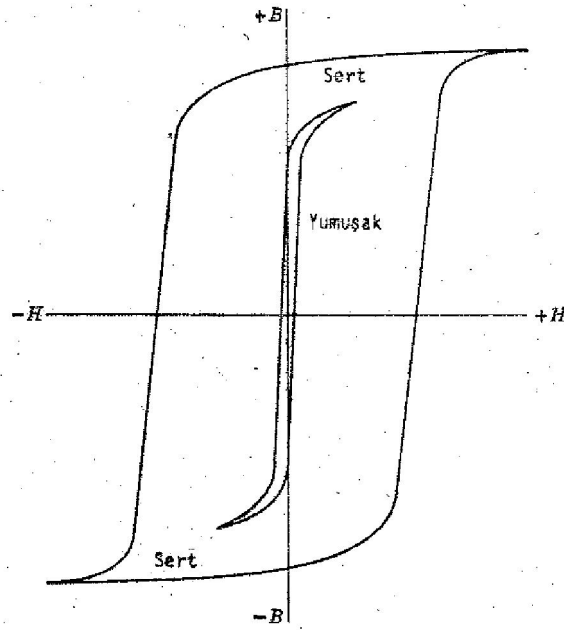
Şekil 1.4 : Bir ferromanyetik malzemede bölge büyümesi, dönmesi ve ilgili B - H manyetikleşme eğrisi [5]

Son olarak çok yüksek manyetik alanlarda bölge dönme hareketiyle manyetizasyon H manyetik alanı yönüne çevrilir. Durum; manyetik akı yoğunluğu doyuma ulaşana kadar manyetizasyonun kolayca gerçekleştiği yönlerden, zor gerçekleştiği yönlere dönüş olarak da açıklanabilir. Alan kaldırıldığında histerezis etkisi sebebiyle tamamen olmasa da bu etkiler tersine döner. Demanyetize edici alan, önceki yolun takip edilmesini engelleyici, zıt yönlü bölgeler üretir ve histerezis etkisi görülür [1].

1.2.3 Histerezis döngüsü ve manyetik özellikler

Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin davranışlarının çok önemli bir bölümü mikro yapıya, faz yapısına ve mevcut yapısal kusurlara bağlıdır. Diyamanyetik ve paramanyetik malzemelerde manyetik özetkilenme birinci derecede önemlidir ve yalnız özetkilenmeyi pek az etkileyen yapı ikinci derece bir rol oynar. Ferromanyetik malzemelerde, manyetik akı doyma sınırı B_s , ortalama atomsal momente bağlı olduğundan bileşimin birinci derecede fonksiyonudur. Bununla beraber geçirgenlik, koersif kuvvet ve histerezis eğrisinin genel şekli yapıya ve dolayısıyla malzemenin ısı, kimyasal, mekanik ve manyetik geçmişine karşı çok hassastır.

Manyetik bir malzemenin histerezis eğrisinin şekli uygulama yönünden çok önemlidir. Manyetik malzemenin en geniş kullanım alanı transformatör, motor, endüktör ve üreteçlerin çekirdekleridir. Bir endüktör veya transformatördeki bir ferromanyetik çekirdek manyetikleşmeden dolayı akı yoğunluğunu birkaç kat artırır ve böylelikle cihaz daha fazla enerji taşıyabilir. Bununla beraber enerjinin bir kısmı manyetik histerezisten dolayı kaybolur. Enerji kaybını azaltmak için histerezis eğrisi içindeki alan mümkün olduğu kadar küçük, fakat geçirgenlik ve doyma akısı mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır (Şekil 1.5). Küçük histerezis kayıplarına sahip malzemeler yumuşak manyetik malzemeler denir [6].



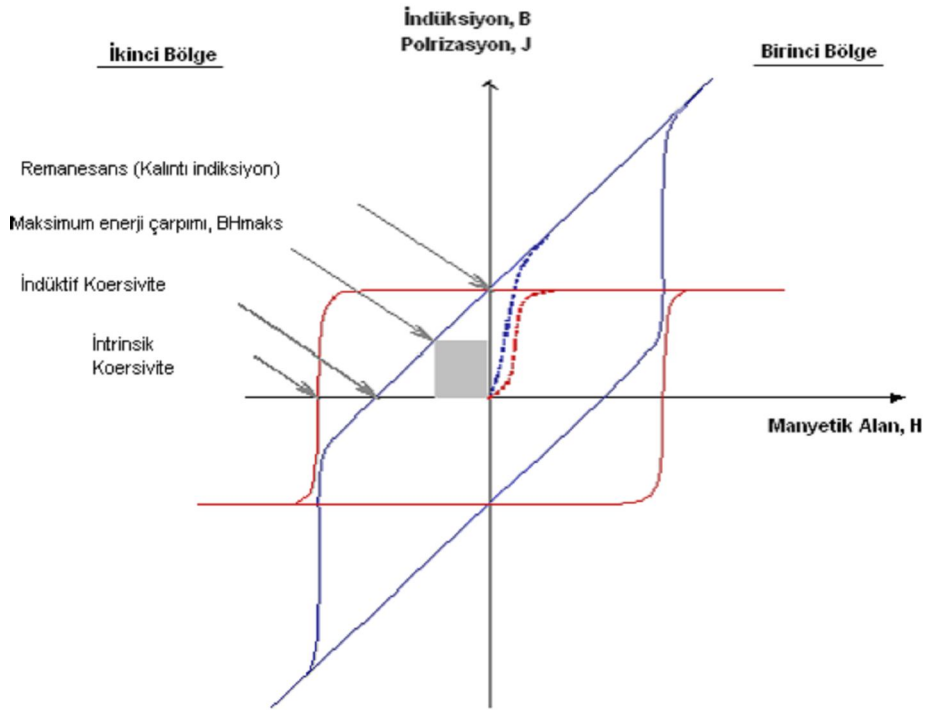
Şekil 1.5 : Sert ve yumuşak malzemelerin histerezis döngüsü [5]

Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler doğrusal olmayan bir manyetizasyon eğrisine ve bir histerezis davranışına sahiptir. Histerezis davranışı ve kalıcı mıknatıslanma (manyetizasyon) bölge duvarlarının hareketiyle açıklanabilir. Doyum manyetizasyonuna ulaşıldıktan sonra uygulanan ters alan etkisiyle bölge yapısı değişimi de tersine döner. Öncelikle, tercihli eksenlerde pozitif yönde uygulanan manyetik alan yönünde yönlenmiş manyetik momentler ters alan etkisiyle negatif yöne doğru dönme hareketi gösterirler. Daha sonra yeni alan yönünde hizalanan manyetik momentlere sahip bölgeler oluşur ve önceki pozitif alan etkisindeki bölgeleri yok ederek büyürler. Buradaki kritik nokta, ters alan etkisine direnç gösteren bazı bölge duvarlarının varlığıdır. Bu sebeple kalıntı akı yoğunluğu gözlenmekte ve histerezis davranışı oluşmaktadır. Uygulanan alan sıfıra ulaştığında, halen önceki uygulanan alan yönünde yönelen bölgeler bulunmaktadır. Negatif yönde alan uygulamaya devam edildiğinde, kalan kalıntı manyetik indüksiyon ortadan kalkar ve net indüksiyon sıfıra ulaşır. Demanyetizasyonu sağlayan bu H değeri H_c ile gösterilir ve koersivite olarak adlandırılır. Bu koersivite kuvveti; bölgelerin hareketinin, manyetik olmayan inklüzyonlar, içsel gerilmeler, latis hataları, homojen olmayan bölgeler ve boşluklar tarafından engellenmesi sonucu oluşur [1].

Mıknatısların manyetik karakteristiklerini belirlemede bazı temel kavramlar bulunmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda da bu değerler elde edilmekte ve bunların arasındaki ilişkilerden yararlanılarak mıknatısın manyetik özellikleri hakkında bilgiler elde edilebilmektedir. Bu ölçümlerde kritik olan özellikleri B_r , H_{cb} , H_{cj} , J , $(BH)_{max}$ şeklinde sıralamak mümkün olmaktadır. Bu özelliklere ait kavramlar Çizelge 1.2’de gösterilmektedir.. Ayrıca bu özellikler arasında temel bir bağıntıdan da bahsetmek mümkün olmaktadır. $B=\mu_0(H+J)$ ilişkisinden faydalanılarak B-H ya da J-H grafikleri çizildiğinde bu ilişki ve histerezis davranışı gözlemlenebilmektedir. Bu doğrusal olmayan bir ilişkidir. Aslında bu durum, malzemenin manyetik alana tepkisinin uygulanan alandan önceki manyetizasyon (mıknatıslanma) durumuna da bağlı olduğunu göstermektedir.

B-H grafiği “histerezis döngüsü” olarak isimlendirilmektedir. Histerezis; Yunanca kökenli bir kelime olup geri kalma, gecikme anlamına gelmektedir. Bu evrimin gerçekleşmesi için harcanan enerji çizilen dngn i alanına eşittir. Histerezis döngüsü; ferromanyetik bir malzemenin manyetik akısının değişen manyetikleşme kuvvetine bağlı olarak ölçülmesi ile elde edilir.

Bir mıknatısın manyetikleşme özelliklerinin belirlenebilmesi ve tanımlanması için mutlaka histerezis eğrisine bakılır. Histerezis döngüsü üzerindeki önemli noktalar şekil 1.6’da gösterilmiştir. Bu şekilde, iki çevrim aynı eksen takımında verilmiştir: kırmızı halka polarizasyon ($J = \mu_0 M = B - \mu_0 H$), mavi halka ise indüksiyon eğrisidir. şekil 1.6’da gösterilen histerezis eğrisinden pek çok manyetik özellik belirlenmesi mümkündür. 1. Bölgede doyum polarizasyonu (saturation polarization, J_s) ve buna bağlı olarak doyum manyetizasyonu ölçülür. Ancak en yararlı ve kullanılan bilgiler 2. bölgeden elde edilir ve genelde manyetik verilerin gösteriminde bu bölge kullanılır.



şekil 1.6 : Histerezis döngüsü ve temel tanımlar (kırmızı eğri polarizasyon (J)) [1]

Çizelge 1.2 : Malzemelerin manyetik özellikleriyle ilgili kavramlar ve birimleri [1]

Kavram	Kısaltma	Birim (SI, CGS)		Birim Dönüşümü
Manyetik Akı yoğunluğu, manyetik indüksiyon	B	Tesla(Wb/m ²)	gauss	1Wb/m ² =10 ⁴ gauss
Manyetik alan yoğunluğu	H	A.dönme/m	Oersted (Oe)	1 A.dönme/m = 4π x 10 ⁻³ Oe
Manyetizasyon	M, I	A.dönme/m	Oersted (Oe)	1 A.dönme/m = 10 ⁻³ maxwell/cm ²
Kalıntı akı yoğunluğu, remanesens	B _r	Tesla(Wb/m ²)	gauss	1Wb/m ² =10 ⁴ gauss
Koersivite, koersif kuvvet	H _c	A.dönme/m	Oersted (Oe)	1 A.dönme/m = 4π x 10 ⁻³ Oe
Maksimum manyetik enerji	BH _{maks}	kJ/m ³	Gauss.oersted	kJ/m ³ ≡ 7,95 GOe
Demanyetizasyon alanı	H _d	A.dönme/m	Oersted (Oe)	1 A.dönme/m = 4π x 10 ⁻³ Oe
Bağıl / - manyetik alan geçirgenliği	μ _r , μ ₀	birimsiz, Wb/A.m	Birimsiz, emu	- , 4π x 10 ⁻⁷ Wb/Am/m =1 emu
Manyetik duyarlılık	X _m , X' _m	birimsiz	-	X _m = 4πX' _m

Manyetik alan (Magnetic field) (H): Bir mıknatısın mıknatıssal (manyetik) özelliklerini gösterebildiği alandır. Mıknatısın çevresinde oluşan çizgiler de, mıknatısın o bölgede oluşturduğu manyetik alan çizgileri olarak adlandırılır. Mıknatıssal alan çizgilerinin yönü kuzeyden (N) güneye (S) doğrudur. Manyetizmada manyetik yük her durumda çift kutupludur.

Manyetik akı (Magnetic induction) yoğunluğu (B): Birim yüzeyden geçen manyetik alan çizgileri sayısının ölçüsüne manyetik akı denir. Manyetik akı yoğunluğu; birim yüzeydeki manyetik alan miktarıdır. Manyetik alan yoğunluğuna, manyetik indüksiyon (B) adı verilir.

Geçirgenlik parametresi, (Magnetic permeability) (μ): B manyetik alan yoğunluğunun H manyetik alanına oranıdır. Bir asal mıknatıs manyetik alan içine konulduğunda mıknatıs alanın yoğunluğu artar. Geçirgenlik, bir H dış manyetik alanının malzeme üzerinde B manyetik akısını indükleyebilmesinin bir ölçüsüdür. Malzemenin manyetikleşebilirliğinin derecesini gösterir. Kolayca mıknatıslanabilen malzemeler yüksek, zor mıknatıslanan malzemeler ise düşük manyetik geçirgenlik parametresine sahiptir.

Kalıntı akı yoğunluğu (Remanence) (B_r veya J_r): Uygulanan manyetik alan kaldırıldıktan sonra mıknatısta kalan manyetik akı yoğunluğudur.

Endüktif koersivite (Inductive coercivity, H_{cB}): Endüksiyonu sıfıra indirmek için uygulanması gereken ters alandır.

İçsel koersivite (Intrinsic coercivity, H_{cJ}): Mıknatıslanmayı sıfıra indirmek için uygulanan ters alandır.

Maksimum enerji çarpımı $((BH)_{max})$: B ve H değerlerinin çarpımının en yüksek değeridir ve mıknatısın ulaşabileceği en yüksek performans hakkında bilgi verir. Bu özellik mıknatısların en önemli tanımlarındandır.

Kare şekil faktörü (Squareness factor): Başlangıç manyetizasyon eğrisinin ve histerezis halkasının şekli de malzemedeki manyetik bölge davranışı hakkında bilgi verir. Bu halkanın kare sekline ne kadar yakın olduğunu tanımlayan 0 ve 1 arasında değişen boyutsuz bir faktördür

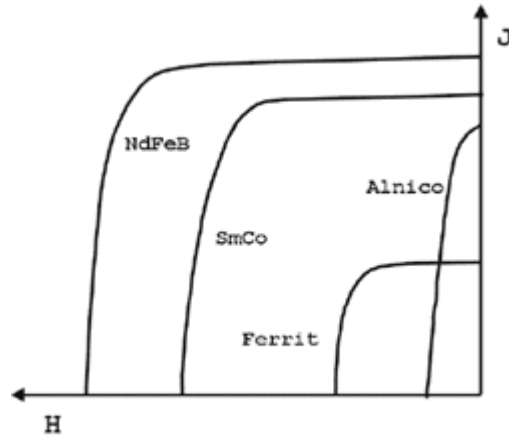
Manyetik duyarlılık (Magnetic susceptibility) (X): Manyetikleşme M, manyetik indüktansta artmayı temsil eder. Manyetik duyarlılık X, malzeme tarafından üretilen büyümeyi veren manyetikleşme ve uygulanan alan arasındaki orandır. Histerezis davranışının gözlemlendiği B-H eğrileri, her zaman uygulanan alanı tersine çevirmeden önce manyetik doyuma ulaşılan dek manyetik alan uygulanmadığı için histerezis döngü boyutları uygulanan alana göre de farklılık gösterebilir. Döngünün herhangi bir noktasında ters alan etkisi başlatılarak farklı histerezis döngüleri oluşturularak demanyetizasyon sağlanabilir. Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerde demanyetizasyonu sağlamanın yollarından biri yönleri değişen ve büyüklükleri azalan H manyetik alanlarının tekrarlı olarak çevrimler halinde uygulanmasıdır.

Geniş histerezise sahip malzemelerin özellikleri:

- Düşük geçirgenlik (μ)
- Yüksek koersivite (H_c)
- Yüksek manyetik direnç
- Yüksek kalıntı mıknatıslanma (B_r)

Dar histerezise sahip malzemelerin özellikleri:

- Yüksek geçirgenlik (μ)
- Düşük koersivite (H_c)
- Düşük manyetik direnç
- Düşük kalıntı mıknatıslanma (B_r)



Şekil 1.7 : Bazı mıknatıslara ait manyetik enerji ($B \times H$) büyüklükleri

Şekil 1.7’de farklı mıknatıslar için çizilebilecek en büyük histerezis eğrisinin ikinci bölgesinin alanı olarak bilinen; (BH_{max}), enerji çarpımı değerleri görülmektedir. Bu değer bir histerezis karakteristiği olup kalıcı mıknatıslar için uygulamalarda oldukça önemlidir. Enerji çarpımı değeri kalıcı (sert) bir mıknatısın demanyetize edilebilmesi için verilmesi gereken enerji miktarını göstermektedir. BH_{max} değeri büyüdükçe mıknatısın demanyetize edilmesi güçleşir. 80 kJ/m^3 ’ten daha büyük BH_{max} değerine sahip kalıcı mıknatıslar yüksek enerjili mıknatıslar olarak sınıflandırılır. Yeni geliştirilen farklı kompozisyonları bulunan intermetalik bileşikler mi knatısları bu sınıfa girmektedir. Bunlardan ikisi ticari boyutta ilgi görmüştür. İlki $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ve diğeri ise SmCo_5 mıknatıslarıdır.

1.2.3.1 Manyetik malzemelerin özgül manyetik özellikleri

Manyetik malzemelerin malzemenin mikro yapısından (tane boyutu, tane ve kristal yönelmesi vs.), etkilenmeyen ve malzemeye özgü olan içsel manyetik özellikleri mevcuttur. Bunlar Curie sıcaklığı, içsel doyum manyetizasyonu ve manyeto kristalin anizotropidir.

Curie Sıcaklığı (T_c): Sıcaklık malzemelerin diğer özelliklerini de etkilediği gibi manyetik özellikleri üzerinde de etkilidir. Isı etkisiyle enerjileri ve dolayısıyla titreşim hareketleri artan atomlarda hizalanan manyetik momentlerin bu harekete bağlı olarak rastgele yönelme göstermeye başlamaları sebebiyle manyetik özelliklerde azalma görülmektedir. Bir dış manyetik alan etkisinde dahi artan sıcaklık manyetik momentlerin düzenlenmelerini engellemektedir.

Ferromanyetik, antiferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler için atomik termal hareketler komşu atomik dipol momentlerini etkisiz hale getirerek dipollerin düzensiz hale gelmelerine sebep olmaktadır. Bu durum ferrimanyetik ve ferromanyetik malzemeler için doyum manyetizasyonu M_s 'yi düşürür. Manyetizasyon değeri termal titreşim hareketlerinin en az olduğu 0 K'de en yüksek değerine ulaşır, artan sıcaklığa bağlı olarak azalır ve ani olarak Curie sıcaklığında (T_c) sıfır değerine düşer. T_c sıcaklığı ve üzerinde tüm ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler paramanyetik davranış gösterirler. Bu sebeple Curie sıcaklığı kalıcı mıknatıslarda özellikle çalışma koşulları konusunda son derece belirleyici rol oynar. T_c sıcaklığı malzemeden malzemeye değişiklik göstermektedir [3].

Doyum manyetizasyonu (M_s): Bir malzeme tarafından üretilebilen en yüksek manyetik alanın bir ölçüsüdür. Bu özellik malzemeyi oluşturan atomların çift kutuplu momentlerinin mukavemetine ve ne kadar yoğun olarak paketlenmelerine bağlı olacaktır. Atomik çift kutuplu moment atomların yapısı ve bileşiğin toplam elektronik yapısından etkilenir. Atomik momentlerin paketlenme yoğunluğu ise kristal yapısı (örn. momentler arasındaki mesafe) ve yapıdaki manyetik olmayan elementlerin varlığından etkilenir. Ferromanyetik malzemelerde, M_s sonlu sıcaklıklarda atomların ısı titreşimleri momentlerin yanlış dizilmesine ve M_s de düşmeye sebep olduğu için bu momentlerin ne kadar düzgün sıralandığına önemli ölçüde bağlıdır. Doyum manyetizasyonu kendiliğinden mıknatıslanma olarak da ifade edilir [1]. Bazı manyetik malzemelerin doyum alanı ve Curie sıcaklıkları karşılaştırmaları Çizelge 1.3'de gösterilmektedir.

Manyeto kristalin anizotropi: Manyeto kristalin anizotropi malzemeye özgü bir özellik olup, manyetizasyonun malzeme içerisinde tercihli kristallografik yönlerde gerçekleşmesidir. Örneğin; Co'nın hegzagonal kristal yapısı [0001] yönünde kolaylıkla mıknatıslanabilirken $\langle 1010 \rangle$ yön ailesinde ise mıknatıslanma oldukça güç olmaktadır. Kolay mıknatıslanma yönünde manyeto kristalin anizotropinin ölçüsü, doymuş bir tek kristalde tüm momentlerin 90° dönmesi için gereken alan olan anizotropi manyetik alanıdır. Bu yönler tercihli yönlerdir ve spin-yörünge çiftlerine bağlı olup, daha düşük enerji seviyesinde bulunurlar. Özellikle, atomik elektronlar çiftler halinde, kristal kafeste orbital momentleri ise, kristallografik eksen boyunca sıralanacak şekilde bir araya gelirler ve spin-yörünge çifti oluşumu sebebiyle böylece spin momentleri de hizalanırlar. Manyeto kristalin anizotropinin en basit hali tek eksenli anizotropidir. Bir kristalin malzemede manyetik özellikler manyetik kutupların sıralandığı kristallografik yönlenmelere bağlıdır [1].

Çizelge 1.3 : Bazı manyetik malzemelerin doyum alanı ve Curie sıcaklığı [1]

Malzeme	Manyetik yapı	J_s 298K'de (T)	T_c ($^\circ\text{C}$)
Fe	Ferro	2.15	770
Co	Ferro	1.76	1131
Ni	Ferro	0.60	358
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	Ferro	1.59	312
SmCo_5	Ferro	1.14	720
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	Ferro	1.25	820
$\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferri	0.48	450
$\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferri	0.48	450
$\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferri	0.51	300

2. FERRİT VE NADİR TOPRAK MIKNATISLARI

2.1 Ferrit Mıknatıslar

Doğanın orijinal manyetiği mineral manyetit; Fe_3O_4 'dür. Bu malzemeye “mıknatıs taşı (load stone)” denilir. Bilinen en eski manyetik malzemelerdir. . Seramik ya da oksit mıknatıslar olarak da bilinirler. Ferritler günümüzde en yoğun kullanılan mıknatıslardır. Üretimleri için gerekli hammaddenin ucuz ve kolay bulunabilir olması, yüksek koersif kuvvet, kimyasal kararlılıkları ve indüksiyon değerleri sebebiyle birçok farklı tipteki küçük motorlarda kullanımını sağlamıştır.

M tipi ya da hegzaferritler olarak da bilinen sert ferritler, kalıcı mıknatıs uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Seramik esaslı manyetik malzemelerdir ve ağırlıklı olarak karmaşık oksitlerden meydana gelirler. Mıknatıs olarak en yaygın olarak kullanılan ferritlere örnek $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ veya $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ verilebilmektedir. Bu temel bileşimlere manyetik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla çeşitli katkılar da yapılabilir. Bu malzemelerin koersif kuvvetleri Alnico ile elde edilenden 2 – 8 kat daha yüksektir. Hem sinter hem de bağlayıcı yapıda olan mıknatıslar yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

MMPA 0100-00 Standardına göre sert ferritler veya seramik mıknatıslar $\text{MO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ genel formülüyle gösterilmektedir. M genellikle baryum veya stronsiyumu veya bu ikisinin karışımını temsil etmektedir. Bu standarda göre seramik mıknatıs malzemelerinin manyetik özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Ancak bu mıknatısların manyetik karakteristikleri üretici bazında da bu standarttan farklılıklar gösterebilmektedir.

Çizelge 2.1 : Seramik mıknatısların (sert ferrit) MMPA 0100-00 standardına göre tipik manyetik özellikleri [7]

MMPA Kısa Gösterim	Kimyasal Kompozisyon (M = Ba veya Sr)	Manyetik Özellikler							
		Maks. Enerji Üretimi $(BH)_{max}$		Artık Mıknatıslanma B_r		Koersif Kuvvet H_{cB}		İçsel Koersif Kuvvet H_{cJ}	
		MG Oe	kJ/m ³	gauss	mT	oersteds	kA/m	oersteds	kA/m
1.0/3.3	MO.6Fe ₂ O ₃	1.05	8.35	2300	230	1860	150	3250	260
3.4/2.5	MO.6Fe ₂ O ₃	3.40	27.1	3800	380	2409	190	2500	200
2.7/4.0	MO.6Fe ₂ O ₃	2.75	21.9	3400	340	3250	260	4000	320
3.5/3.1	MO.6Fe ₂ O ₃	3.50	27.8	3850	385	2950	235	3050	245
3.4/3.9	MO.6Fe ₂ O ₃	3.40	27.1	3800	380	3400	270	3900	310
4.0/2.0	MO.6Fe ₂ O ₃	4.00	31.8	4100	410	2800	225	2900	230
3.2/4.8	MO.6Fe ₂ O ₃	3.20	25.5	3700	370	3500	280	4800	380
3.8/4.0	MO.6Fe ₂ O ₃	3.80	30.2	4000	400	3050	290	4000	320

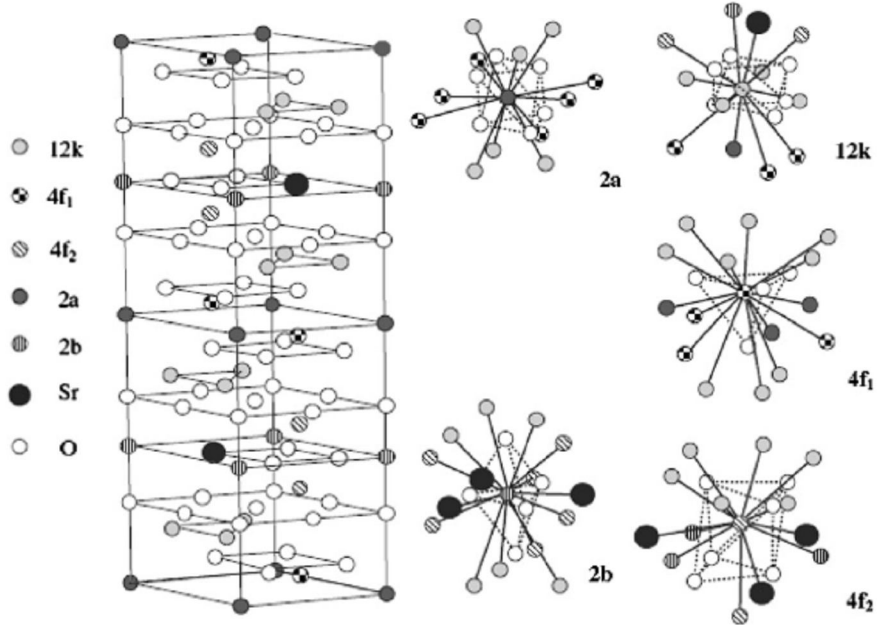
Tüm malzemeler için olduğu gibi, mıknatıslar için de yapı-özellik-işlem parametreleri bir arada malzeme özelliklerini belirlemektedir. Bu düşünceyle, mıknatısların önemli ve büyük bir bölümü olan ferritler; kristal yapıları, kimyasal özellikleri ve mikro yapıların manyetik özellikleri ve mıknatıs uygulamaları üzerindeki etkileri ele alınarak ferritler tanıtılmaya çalışılmıştır.

2.1.1 Ferritlerin kristal yapıları

Manyetik bölgeler, manyetizmayı açıklamak için çok önemlidir ve manyetik bölgelerden sonra ferrit mıknatıslar için incelenmesi gereken fiziksel büyüklük ise ferrit birim kafesidir. Ferrit birim kafesi; birbirine kilitlenmiş pozitif yüklü metal iyonları ve negatif yüklü iki değerlikli oksijen iyonlarından oluşan bir ağ yapısına sahiptir. Manyetik seramiklerde birçok kristal yapı oksijen iyonlarının düzenlenmesiyle başlamaktadır. Bazı ferritlerde hegzagonal sıkı paket ve bazılarında ise kübik sıkı paket yapı gözlenmektedir. Spinel ferritler kübik sıkı paket düzenlenmiş yapılardır. Tercih edilen kristal yapı çeşidini oksijen iyonlarını dengeleyecek metal iyonu yükü ve boyutu belirlemektedir [4].

Kristal yapı yapılacak uygulama ile çoğunlukla yakından ilgilidir. Örneğin; SrO Fe₂O₃ ile birleşerek benzersiz bir kristal eksen aracılığıyla kalıcı mıknatıs uygulamaları için uygun bir hegzagonal sıkı paket yapı oluşturur.

Stronsiyum sert ferritler literatürde M tipi hegzaferrit olarak belirtilmektedir. M tipi ferritler birim kafeste 11 farklı simetri bölgesinde 64 tane iyonda kristalize olmaktadır. M tipi hegzagonalin yapısı spinel ($S = \text{Fe}_6\text{O}_8^{2+}$) ve hegzagonal ($R = \text{MFe}_6\text{O}_{11}^{2-}$) katmanlarının karşılıklı olarak istiflenmesi ile oluşmaktadır. O^{2-} iyonları sıkı paket katmanlarında bulunurken, M^{2+} hegzagonal katmanda O^{2-} iyonunun yerini almaktadır. Fe^{3+} iyonları sıkı paket katmanlarda 5 kristallografik ara yere dağılmış durumda olmaktadır. Bunlar; üçü oktahedral (2a, 12k ve 4f2), biri tetrahedral (4f1) ve biri de trigonal bipiramit (2b) yerleri olmaktadır. 3 paralel (2a, 12k ve 2b) ve 2 anti-paralel (4f1 ve 4f2) alt kafesler O^{2-} iyonları ile eşleşerek ferrimanyetik yapıyı oluşturmaktadırlar (Şekil 2.1) [8].



Şekil 2.1 : M tipi hegzagonal ferrite ait kristal yapı ve demire ve onu çevreleyen yapılara ait 5 konum [8]

2.1.2 Ferritlerin kimyasal özellikleri

Temel elementlerin ferritlerin kimyasına olan etkileri ve diğer daha az miktarda bulunan elementlerin mikro yapıda yarattığı değişiklikler oldukça önemlidir. Ferritlerin en önemli avantajları; kimyasal kompozisyonları üzerinde birçok değişiklik yapılarak farklı özellikler elde edilebilmesidir.

Manyetik geçirgenlik, malzemenin manyetik performansının ölçüsüdür. Manyetikleştirici kuvvetin malzeme üzerinde ne kadar etkili olabildiğinin bir ölçüsüdür. Metalik manyetik malzemeler ferritlere nazaran çok daha yüksek doyum manyetizasyon değerlerine sahiptir. En yüksek geçirgenlik değerleri en yüksek doyum değerleri ile çakışmamaktadır. Bunun sebebi; manyetik alana maruz kaldıklarındaki şekil değiştirici etkinin (magnetostriction) azlığı, anizotropi, temiz tane sınırları ve az miktardaki ısıtım işlemi sonrasında kalıntı gerilmelerin kombinasyonunun etkisidir. Ferritlerde ise, doyumlar daha düşük seviyelerdedir, mikro yapı metallerdeki kadar temiz (kalın tane sınırları mevcuttur) değildir ve sinterleme işlemi sonrası oldukça fazla gerilme kalmaktadır. Geçirgenlik tane boyutu ve poroziteden etkilenir. Geçirgenlikteki düşüş empürilerin varlığında gerçekleşiyorsa, metalik iyonik boyutlarının empürite boyutlarıyla olan uyumsuzluklarından doğan distorsiyondan kaynaklanabilir [4].

Demir içeriğinin geçirgenliğe etkisine bakıldığında; en yüksek iyonik momente sahip metal iyonu molce en yüksek oranda bulunan Fe^{+3} iyonudur ve bu sebeplerle malzemenin manyetik özelliklerini kontrol ettiği söylenebilir.

Yapıda bulunan elementlerin mıknatısın ne gibi özelliklerine etki ettiği sıralanacak olursa [9];

- Al_2O_3 ve Cr_2O_3 ilavesi H_{cJ} değerini arttırmakta, tane büyümesini engellemekte ve Br değerini düşürmektedir.
- Bazı durumlarda Cr ilavesi istenmese de üretim sırasında yapıya katılarak Fe'nin yerini almaya çalışarak manyetik özelliklere kötü yönde etki edebilmektedir.
- La^{3+} ve Co^{2+} iyonlarının varlığı dizilim hatalarını azaltarak kristal yapıyı düzenlemektedir. Böylece manyetik doyum ve kristal manyetik anizotropi sabiti değerleri artmaktadır.

- Ni, Zn ilaveleri B_r ve H_{cJ} değerlerini arttırabileceği gibi ağırlıkça %3 'den fazla ilave edildiği takdirde düşüşe de neden olabilmektedir.
- Eğer Sr, Ba veya Ca miktarı yeterli seviyede değilse $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ gibi manyetik olmayan fazlar oluşabilmektedir.
- Na, K ve Rb elementleri ağırlıkça yüzde 3'ü geçerse manyetik doygunluk değerini düşürmektedir.
- SiO_2 ilavesiyle tane boyutu kontrolü sağlanmakta ve dolayısıyla manyetik özellikler iyileşmektedir.
- Tüm bu empüritelere ilaveten yapıda Si, Al, Ga, In, Li, Mg, Mn, Ni, Cr, Cu, Ti, Zr, Ge, Sn, V, Nb, Ta, Sb, As, W ve Mo elementleri oksit formda bulunabilirler.

2.1.3 Ferritlerin mikro yapı özellikleri

Kimyasal homojensizliklerden kaynaklanan mikro yapı kusurları malzemenin hasara uğramasındaki en önemli sebeplerdendir. Gerek manyetik özelliklerin iyileştirilmesinde, gerekse var olan sorunların belirlenmesinde mikro yapı incelemeleri son derece önemlidir. Malzemeler kullanım şartlarına ve onlardan beklenen özelliklere göre yapılandırılır. Mikro yapı da elde edilmesi istenilen yapının sağlanması için gerekli alt yapıyı sağlar.

Metaller, seramiklerden farklı olarak daha az inklüzyon ve porozite içerirler. Tane sınırları da oldukça temizdir. Ferritlerde tane sınırları daha kalındır ve metallerde tane sınırları boyunca görülen manyetik bölge duvar hareketi gerçekleşemez. Ayrıca, üretim prosesleri içerisinde saflaştırma işlemi olmadığından ve yüksek poroziteden dolayı yüksek geçirgenlik değerlerine ulaşamaz. Fakat geçirgenliğin tane boyutuna ek olarak birçok faktörden etkilendiği düşünülürse, tane çapının geçirgenlikle olan ilişkisinin izlendiği grafiğin eğimi ferrit kompozisyonuna bağlı olarak değişecektir. Belirli bir tane boyutunun aşılması durumunda ise artan poroziteye bağlı olarak geçirgenlikte düşüş görülür [10].

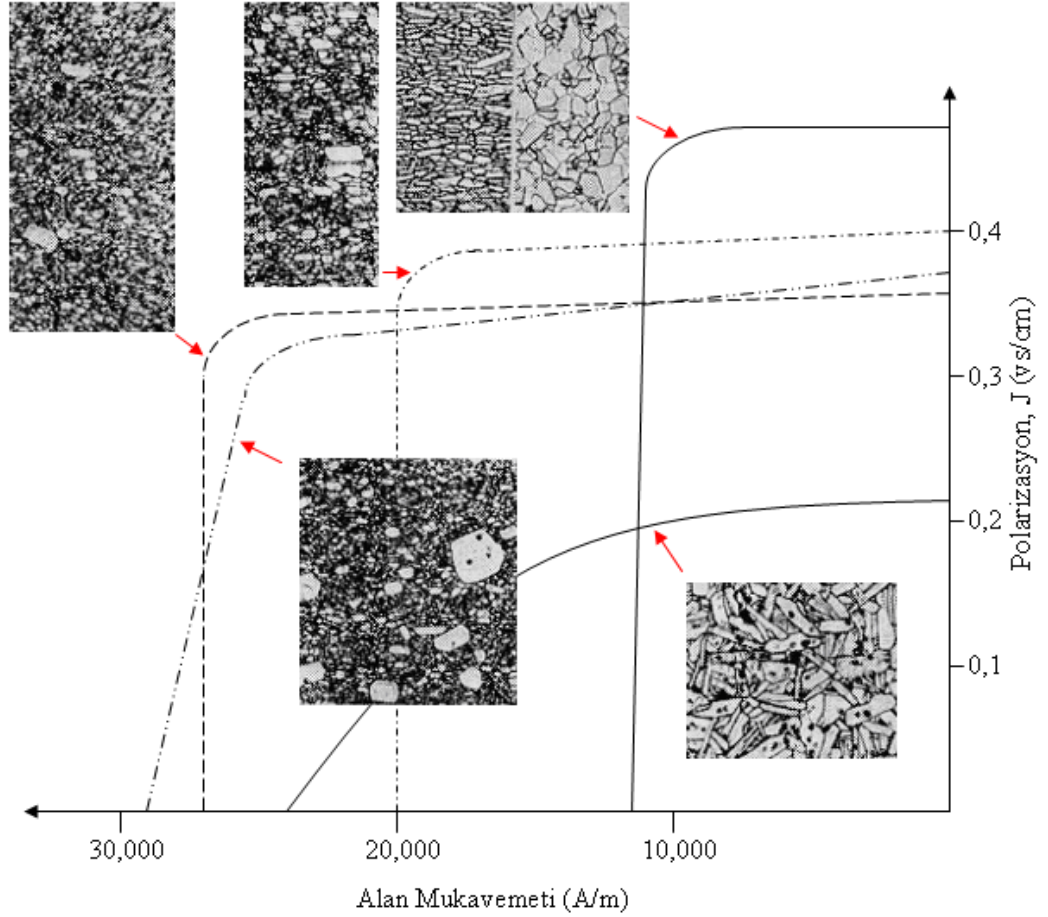
Porlar azaltılabilir ya da tane büyümesi esnasında tane sınırlarında tutulabilirse tane boyutuyla birlikte geçirgenlikte bir artış gözlenir. Diğer yandan, bu ilişki ancak ve ancak normal tane büyümesi şartlarında geçerli olmaktadır. Aşırı tane büyümesi ve tanelerin farklı zamanlarda farklı hızlarda büyümeleri porların taneler içerisine hapsolarak manyetik bölge duvarlarının “pinning” etkisine maruz kalmasına ve geçirgenliğin düşmesine neden olmaktadır. Normal tane büyümesiyle oldukça dar bir tane boyutu dağılımı elde edilir.

Öte yandan porozite, geçirgenliğe etkisi göz önüne alındığında manyetik bölge duvarlarının hareketini engelleyici bir başka mikro yapı özelliğidir. Aşırı tane büyümesi sebebiyle tane içi porların artışı, taneler arası porların artışına göre geçirgenliği daha kötü etkilemektedir. Porozite ve tane boyutunun etkilerinin ayrı ayrı ele alınması tane büyümesi ve yoğunlaşmanın eş zamanlı gerçekleşmesi sebebiyle oldukça zordur.

Geçirgenliğin yanı sıra B-H ilişkisi göz önünde bulundurulduğunda tane boyutu ve poroziteden en fazla etkilenen özellik koersif kuvvet olmaktadır. Porozite-koersif kuvvet ilişkisi düşük porozite değerleri için doğrusaldır. Bu etki yüksek poroziteli numunelerdeki küçük parçacıkların yüksek koersif kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır [10].

Mikro yapıların ve tane boyutunun mıknatıslar üzerinde manyetik açıdan etkileri bulunmaktadır.

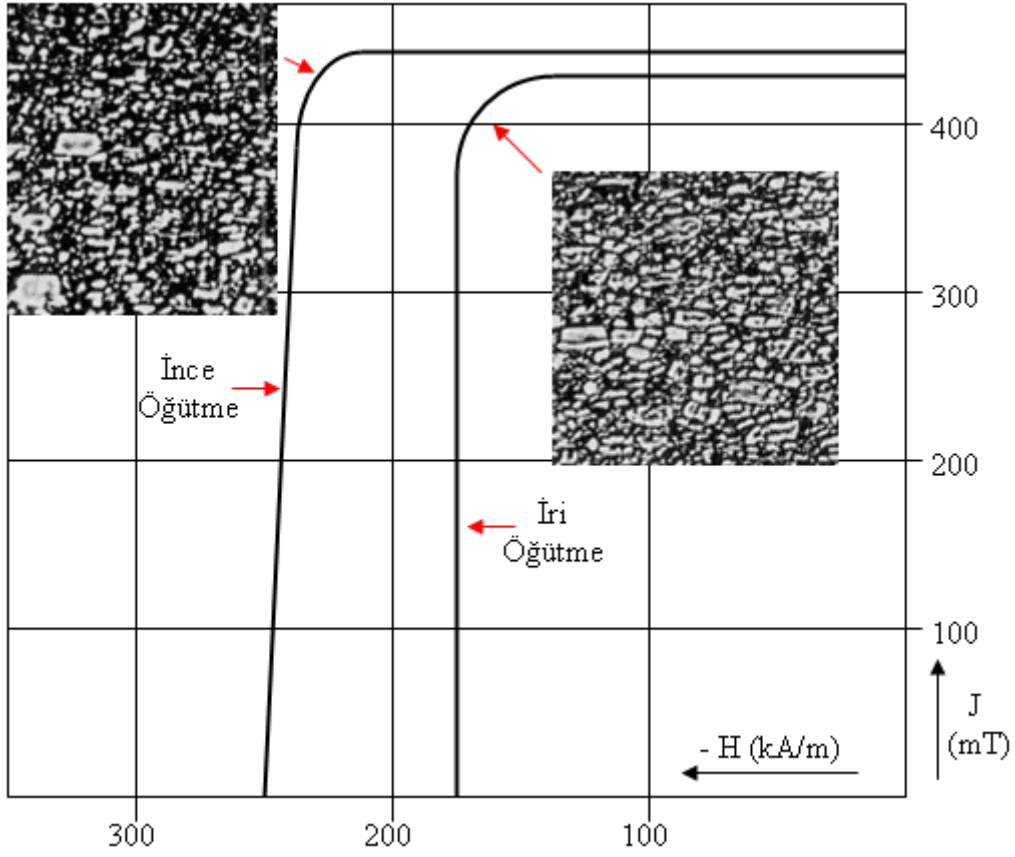
Buna göre; izotropik ve anizotropik sert ferritler içerdikleri küçük hegzagonal kristallerin dizilimlerine göre birbirlerinden ayrım göstermektedirler. İzotropik mıknatıslarda kristaller rastgele dizilim gösterirlerken anizotropik mıknatıslarda ise düzenli bir dizilim bulunmaktadır. Şekil 2.2’de alt tarafta bulunan mikro yapı görüntüsü izotropik numuneye ait iken diğer geriye kalan mikro yapı görüntüleri anizotropik özelliğe sahiptirler. Şekilden de görüldüğü üzere demanyetizasyon eğrilerinden anlaşılacağı gibi manyetik özellikleri de farklılık göstermektedir [11].



Şekil 2.2 : Sert ferritlere ait demanyetizasyon eğrileri ve mikro yapıları [11]

Büyük hegzagonal partikülleri içeren mıknatıs iyi dizilim gösterdiğinden dolayı yüksek artık mıknatıslanmaya sahip ancak kristal boyutu geniş olduğundan koersivite değerleri düşük olmaktadır. Taneler tam olarak yönlenme gösterdikleri durumda artık mıknatıslanma değeri yüksek olmakta ve sadece yoğunluk değiştirilerek Br üzerinde değişiklikler yapılabilmektedir.

Bu durumu yine Şekil 2.2'den gösterecek olursak; üstte bulunan iki mikro yapının koersiviteye olan etkileri görülmektedir. Küçük taneli yapıya sahip numunelerin koersiviteleri iri taneli yapıya sahip numunelere göre belirgin şekilde daha yüksek olmaktadır. Soldaki mikro yapı daha küçük taneli ve üniform bir dağılım gösterdiğinden dolayı yüksek koersiviteye sahip olmaktadır. Sağda bulunan numunede de üniform bir dağılım ancak daha büyük taneler bulunmaktadır [11].



Şekil 2.3 : İri öğütülmüş ve ince öğütülmüş numunelere ait mikro yapı ve demanyetizasyon eğrileri [11]

Görüldüğü üzere mikro yapı ile manyetik özellikler arasında bir bağlantı bulunmaktadır. Buna ilaveten üretim parametreleriyle mikro yapı arasında da bir bağlantı bulunmaktadır. Bunun yaratmış olduğu etkiyi Şekil 2.3'den görmek mümkündür. İnce öğütülmüş numunenin ortalama kristal boyutu iri öğütülmüş numuneye göre daha küçüktür. Yaklaşık olarak $1\mu\text{m}$ boyutundadır ve bu da koersivitenin 245 kA/m 'ye çıkmasını sağlamaktadır. İri öğütülmüş numuneye ait mikro yapı üniform boyutta kristaller içermektedir. Ortalama kristal boyutu $3 - 5\mu\text{m}$ ve en büyük kristal boyutu $10\mu\text{m}$ civarındadır. Yüksek yönlenme değerine bağlı olarak kristallerin iyi yönlendiği görülmektedir. Düşük koersivitenin nedeni göreceli olarak büyük kristal boyutlarına sahip olmalarıdır [11].

2.2 Nadir Toprak Mıknatısları

Nadir toprak mıknatısları önemli temel alaşım elementleri nadir toprak elementlerinden oluşan mıknatıs malzeme sistemleridir. En yaygın alaşım sistemlerinin Neodim-Demir-Bor (NdFeB) ve Samaryum-Kobalt (SmCo) sistemleri ve son yıllarda geliştirilmekte ve ticari kullanımı sınırlı olan Neodim-Demir-Azot (NdFeN) sistemleri olduğu görülmektedir.

Nadir toprak mıknatısları Manyetik Malzeme Üreticiler Birliğinin standardı olan “MMPA-Standard No:0100-00 Standard Specifications for Permanent Magnet”e [7] göre üç ana malzeme ailesine ayrılmaktadır. Bunlar nadir-toprak kobalt 5 alaşımları, nadir-toprak 2.geçiş metalleri alaşımları, nadir-toprak demir bor alaşımları şeklindedir. Bu alaşımların manyetik özellikleri ve bileşimleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Nadir toprak mıknatısların kimyasal bileşim ve tipik manyetik özellikleri [7]

Kimyasal Kompozisyon		Manyetik Özellikler					
Alaşımlar	Olası Elementler	Maks. Enerji Üretimi (BH) _{max}		Kalıntı İndüksiyon B _r		Koersif Kuvvet H _c	
		(MGOe)	(kJ/m ³)	(gauss)	(mT)	(oersted)	(kA/m)
RECo ₅	RE = Sm	16	130	8300	830	7500	600
RECo ₅	RE = Sm	16	140	8700	870	8500	680
RECo ₅	RE = Sm, Pr	20	160	9000	900	8500	680
RECo ₅	RE = Sm, Pr	20	160	9000	900	8800	700
RECo ₅	RE = Sm, Pr	22	180	9500	950	9000	720
RE ₂ TM ₁₇	RE = Sm, TM = Fe, Cu, Co, Zr, Hf	24	190	10000	1000	6000	480
RE ₂ TM ₁₇	RE = Sm, TM = Fe, Cu, Co, Zr, Hf	24	190	10000	1000	9300	740
RE ₂ TM ₁₇	RE = Sm, TM = Fe, Cu, Co, Zr, Hf	26	210	10500	1050	9000	720
RE ₂ TM ₁₇	RE = Sm, TM = Fe, Cu, Co, Zr, Hf	26	210	10700	1070	9750	780
RE ₂ TM ₁₇	RE = Sm, TM = Fe, Cu, Co, Zr, Hf	28	220	10900	1090	6500	520
RE ₂ TM ₁₇	RE = Sm, TM = Fe, Cu, Co, Zr, Hf	28	220	11000	1100	10300	820
RE ₂ TM ₁₇	RE = Sm, TM = Fe, Cu, Co, Zr, Hf	30	240	11600	1160	10600	840
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	24	190	10000	1000	9600	760
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	26	210	10500	1050	10090	800
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	28	220	10800	1080	10300	820
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	28	220	10730	1073	10490	830
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	30	240	11300	1130	10800	860
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	30	240	11300	1130	10800	860
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	32	260	11800	1180	11200	890
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	32	260	11600	1160	11100	880
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	34	270	11950	1195	11500	920
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	36	290	12310	1231	11520	920
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	36	290	12200	1220	11700	930
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	38	300	12500	1250	12000	950
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	38	300	12400	1240	12000	950
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	40	320	12800	1280	12000	950
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	40	320	12900	1290	12400	990
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	42	340	13100	1310	12700	1010
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	44	350	13500	1350	13000	1030
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	48	380	13750	1375	10300	820
RE ₂ TM ₁₄ B	RE = Nd, Pr, Dy TM = Fe, Co	50	400	14100	1410	10300	820

Bu alaşımlar 2 nadir toprak atomuna karşılık 14 demir ve 1 bor atomu içeren alaşımlardır. Genel gösterimleri $RE_2TM_{14}B$ seklindedir. Nadir toprak elementleri birbirinin yerine kullanılabilir ve/veya az miktarlarda diğerinin yanında ilave edilebilir.

Bu alaşım grubunda nadir toprak elementlerinin miktarı ağırlıkça % 30-35 aralığındadır. Yüksek sıcaklık performansının iyileştirilmesi için Co % 3-15 oranında Fe (demir) yerine kullanılabilir. Bu grup mıknatıs alaşımlarında en yaygın olarak kullanılan nadir toprak elementi Nd olmakla birlikte praseodim (Pr) ve disprosyum (Dy) elementlerini kullanmak da mümkündür. En yüksek artık mıknatıslanma, koersif kuvvet ve enerji çarpımı bu grup mıknatıslarla elde edilmektedir [12].

Burada nadir toprak demir bor alaşımlarının kristal yapıları, kimyasal özellikleri ve mikro yapıların manyetik özellikleri ve mıknatıs uygulamaları üzerindeki etkileri ele alınarak tanıtılmaya çalışılmıştır.

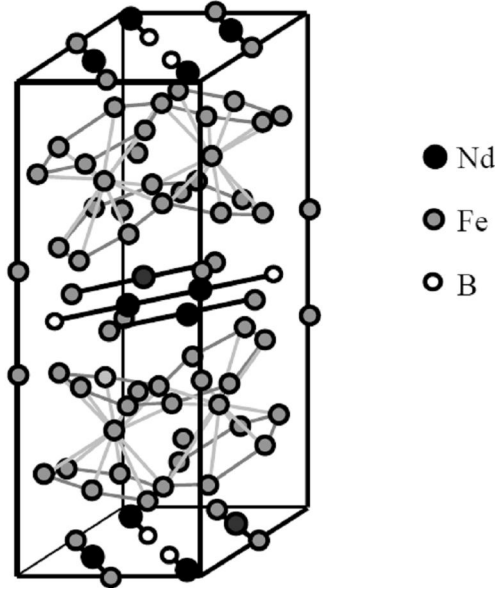
2.2.1 Nadir toprak demir bor alaşımlarının kristal yapıları

Nd-Fe-B mıknatısları tipik olarak mıknatıs özelliklerini belirleyen 3 faz içermektedir. Hacmin büyük bir kısmını rastgele borür fazında taneler içeren ferromanyetik $Nd_2Fe_{14}B$ fazı ve Nd-ce zengin tane sınırları kapsamaktadır. Bu alaşımda var olan diğer fazlar kısmi kompozisyona göre değişim göstermektedir.

$Nd_2Fe_{14}B$ fazı sert manyetik fazdır ve yüksek doygun manyetizasyon ve artık mıknatıslanma özelliğine sahiptirler. Primitif tetragonal kristal ve kompleks yapıya sahiptirler ve birim hücrede 68 atom içermektedir (Şekil 2.4). Bunlardan 56 demir atomu c, e, j1, j2, k1 ve k2 kristalografik bölgelerinde bulunurken, 8 adet neodim atomu f ve g bölgelerinde ve 4 adet bor atomu g bölgesinde bulunmaktadır [7].

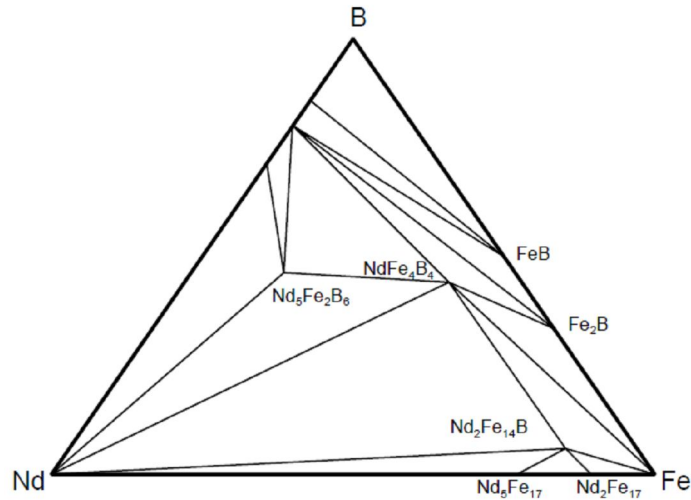
Borür fazı yaklaşık olarak $Nd_{1.1}Fe_4B_4$ kompozisyonuna sahiptir. Bu fazın varlığı manyetik özellikleri geliştirmemektedir ancak yapıda yumuşak Fe fazının oluşumunu engellemektedir.

Nd-ce zengin tane sınırları ise manyetik özellikleri geliştirmekte ve $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ tanelerini çevrelemektedir. Bu faz ayrıca sıvı faz sinterlemesi için de önemlidir. Ayrıca, ferromanyetik $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ fazından mekanik açıdan daha yumuşak ve kimyasal açıdan daha reaktif olduğu bilinmektedir. Bu fazların varlığı kompleks manyetik fazı oluşturmakta ve doğru, tutarlı yönlenme ölçümlerinin yapılmasını sağlamaktadır [13].



Şekil 2.4 : NdFeB kristal yapısı [13]

Nd – Fe – B üçlü faz diyagramları göz önüne alındığında temel faz olarak $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ fazının hangi kompozisyon oranlarında oluştuğunu ve bu tip mıknatısta bulunabilecek fazları görmemiz mümkün olmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ fazının ve diğer Nd içeren fazların oluşumunu gösteren Nd-Fe-B üçlü faz diyagramı [14]

Nd-ce zengin fazlar Nd-Fe-B alaşımlarında üretimde kullanılan kompozisyona göre hacimce yüzde 5 – 15 arası bulunmaktadır. Bu fazlar tane sınırlarında bulunmaktadır. Bu fazlar $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ fazının plastik deformasyona uğraması açısından yardımcı görevi görmektedir. Bu fazların bir diğer önemli etkisi ise koersiviteyi arttırmalarıdır. Bu fazlar temel olarak Nd, Fe ve B 'dan oluşmaktadır. Ancak yapıya ilave edilen elementler ile bunlara ilaveten Co, Si ve Al gibi elementler bulunmaktadır [15].

2.2.2 Nadir toprak demir bor alaşımlarının kimyasal özellikleri

Temel elementlerin bu miknatısların kimyasına olan etkileri ve diğer daha az miktarda bulunan elementlerin mikro yapı, manyetik özellikler ve korozyon üzerinde yarattığı değişiklikler oldukça önemlidir. Kimyasal kompozisyonları üzerinde birçok değişiklik yapılarak farklı özellikler elde edilebilmektedir.

Yapıda bulunan elementlerin miknatısının ne gibi özelliklerine etki ettiği sıralanacak olursa;

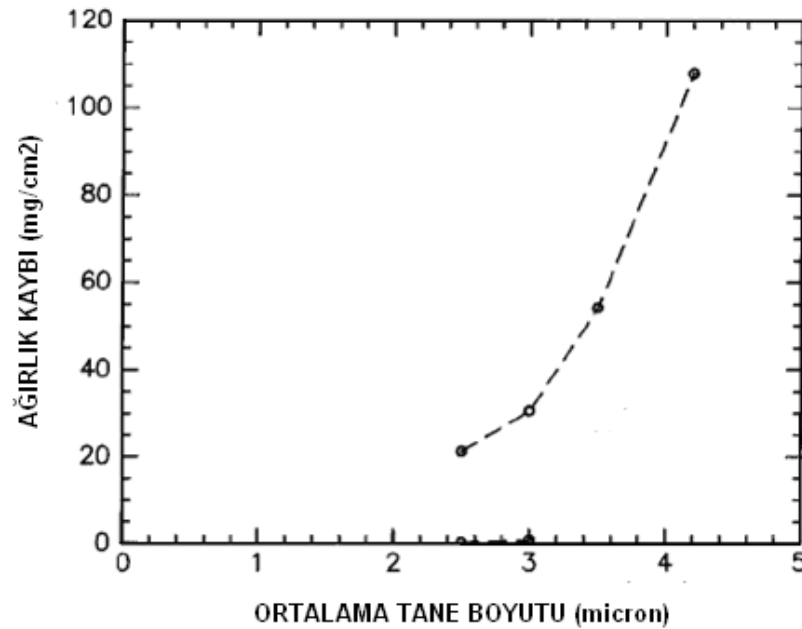
- Uygun miktarlarda Dy, Pr, Eu, Gd, Ho veya Tb ilavesiyle NdFeB miknatısının H_{cJ} değerlerinde artış sağlandığı tahmin edilmektedir. Ancak bu ilaveler fazla konulduğunda B_r değerinde düşüş meydana getirmektedirler.
- Yapıya Co ilavesi miknatısının korozyon direncinde artış sağlamaktadır.
- Ayrıca yapıya Dy, Tb, Eu, Gd, Al ve Ga ilavesi miknatısının yüksek sıcaklık tersinir olmayan demanyetizasyonu engellemekte etkin rol oynamaktadır.
- Nb, W, Mo gibi elementler manyetik özellikleri iyileştirmeye yönelik etkide bulunmaktadır [16].
- Mg ve Zr ilavesi ile H_{ci} özelliğinde artış olduğu literatürde belirtilmektedir. Al, Ga ve Nb elementlerinin koersivite ve termal kararlılık üzerine faydalı etkileri bulunmaktadır. Ayrıca Dy ve Co elementlerinin birlikte kullanılması Curie sıcaklığını ve H_{cJ} değerini arttırmakta, B_r 'nin sıcaklık katsayısını ve tersinir olmayan akı kayıplarını azaltmaktadır [17].
- Nb ve Ga ilavesi ile miknatısının H_c değerinde iyileşme olduğu, Curie sıcaklığında az derecede düşüş yaşandığı belirtilmektedir [18].
- Nb ilavesinin tane boyutunu ufaltma yönünde de katkısı bulunmaktadır. Bu her iki element de korozyon hızını azaltma açısından etkili olmaktadır [19].

- Nd, Pr, Dy, Ho ve Tb elementlerinin bir diğer özelliği de mıknatısın uzun süreli çalışma sonrası manyetik özelliklerinin bozulmasını önlemektir [16].

2.2.3 Nadir toprak demir bor alaşımlarının mikro yapı özellikleri

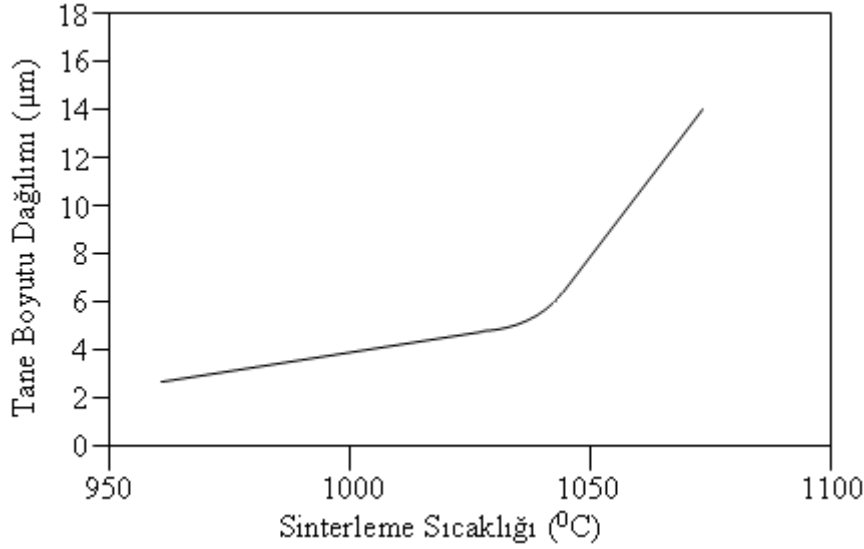
NdFeB mıknatıslara ait mikro yapı görüntülerinde tanelerin poligonal bir yapıya sahip olduğu ve tane sınırlarında Nd-ce zengin fazların varlığı görülmektedir. Tane sınırlarında var olan bu fazların manyetik özellikleri geliştirdiği bilinmektedir [20]. Ancak tane sınırlarındaki bu fazların miktarı arttıkça korozyon açısından direncin azaldığı literatürde belirtilmektedir. Bu durumu düzeltmek amacıyla tane sınırlarında intermetalik fazların varlığını arttırmak veya bu Nd-ce zengin fazların homojen olarak dağılımını sağlamak önemli olmaktadır.

Daha büyük tanelere sahip olan yapılarda koersivite daha düşük olmaktadır. Daha az homojen mikro yapıya sahip olan mıknatısların demanyetizasyon eğrileri daha kötü bir dikdörtgenliğe sahip olduklarından demanyetizasyon prosesinde daha kolay demanyetize olmaktadır [21, 22]. Bu büyük taneli yapılarda yüzey alanı da arttığından dolayı korozyona olan direnç de azalmaktadır (Şekil 2.6).

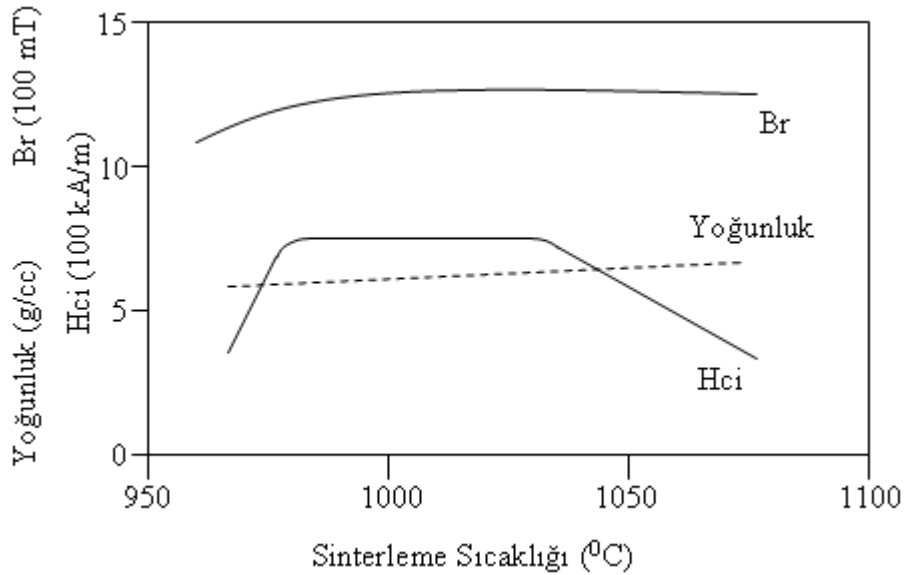


Şekil 2.6 : Ortalama tane boyutu ile korozyon kaynaklı ağırlık kaybı arasındaki ilişki [23]

Ferrit mıknatıslarda olduğu gibi NdFeB mıknatıslarda da tane boyutunu üretim faktörleri etkilemektedir. NdFeB mıknatıslarda tane boyutunu ve dolayısıyla manyetik özellikleri en fazla etkileyen faktörlerden biri sinterleme sıcaklığıdır. Hem manyetik özellikler açısından hem de tane boyutu açısından istenen değerlerin sağlanabilmesi için sinterleme sıcaklığı olabildiğince optimum şekilde ayarlanmalıdır. Sinterleme sıcaklığının yarattığı etkiler Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.7 : Sinterleme sıcaklığı ile tane boyutu dağılımı arasındaki ilişki [24]



Şekil 2.8 : Sinterleme sıcaklığının mıknatıs özellikleri üzerine etkisi [24]

3. MANYETİK ÖZELLİKLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Bir mıknatısın performansı doğrudan çalıştığı ortam şartlarıyla ilişkili olmaktadır. Bu şartlar mıknatıs malzemesini manyetik bölge (domain) seviyesinde aşağıdaki şekilde etkileyebilmektedir.

- Her bir manyetik bölgenin içerdiği atomların enerji seviyelerinin değişimi
- Manyetik bölgelerin boyutlarını, şekillerini veya dizilme yönlerinin değişimi
- Ardışık şekilde olan manyetik bölgeler arasındaki manyetik geçirgenliğinin değişimi

Yukarıda bahsedilen tüm olaylar metalürjik değişimlerdir ve malzemede kalıcı değişime neden olmaktadır. Basit bir yeniden manyetizasyon ile geri kazanılması mümkün olmamaktadır [25].

3.1 Değişim Tipleri

Manyetik alanda meydana gelebilecek olan değişimler 3 ayrı kategoride toplanabilmektedir. Bunlar; geri dönüşümlü, yeniden manyetize edilebilir ve yeniden manyetize edilemeyen veya geri dönüşümü olmayan değişimler şeklinde sıralanmaktadır.

Geri dönüşümlü değişim; ortam şartının var olduğu sürece meydana gelen değişim olmaktadır. Örneğin, bir mıknatıs belirli bir sıcaklıktaki ortama konulduğunda manyetik alan mukavemetinde düşüş meydana gelmektedir. Ancak ortam şartlarına geri dönüldüğünde mıknatıs normale geri dönüş yapmaktadır.

Yeniden manyetize edilebilir değişimler; bir öncekinde olduğu gibi ortam şartlarına geri dönüldüğünde otomatik olarak eski özelliklerini kazanmamaktadır. Ancak, mıknatısın yeniden manyetize edilmesiyle özelliklerini geri kazanmaktadır. Örneğin, bir mıknatıs kullanıldığı yerden çıkarılıp manyetik bir devreye yerleştirildiğinde manyetik mukavemette kayıplar meydana gelmektedir, yeniden manyetizasyonla geri dönüşüm gerçekleşebilmektedir.

Yeniden manyetize edilemeyen veya geri dönüşümü olmayan değişimler; özellik kaybına neden olan ortam şartları kaldırıldığında dahi kalıcı bir değişimin gerçekleştiği durumu belirtmektedir. Yeniden manyetikleştirme ve benzeri yöntemlerle özelliklerin geri kazanımı mümkün olmamaktadır. Bu değişime örnek olarak malzemenin Curie sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda tavllanması ve soğurken herhangi bir alan uygulanmaması gösterilebilir. Tavlamanın yukarıdaki son 2 maddede belirtilen, manyetik bölgeler arasındaki manyetik geçirgenliği ve bu bölgelerin yönlendirilmesini değiştirici etkisi bulunmaktadır.

Çizelge 3.1 ve 3.2’de hangi çevresel etkinin ne gibi değişimlere yol açtığı ve nasıl kararlılık sağlanabileceği gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Çevresel etkilerin neden olduğu değişimler [25]

Çevresel Faktör	Değişim Tipleri	Malzemedeki Manyetik Değişim	Stabilizasyon Metotları
Zaman	Geri Dönüşümlü	-----	-----
	Yeniden Manyetize Edilebilir	Bazı manyetik bölgelerin (domen) manyetik yeniden yönlenebilirliği NEDENİ; malzeme içerisindeki yerel enerji dalgalanmaları	Kısmi demanyetizasyon veya manyetik yaşlandırma
	Yeniden Manyetize Edilemeyen	Yapısal değişim NEDENİ: Metalurjik kararsızlık	Metalurjik yaşlandırma
Sıcaklık	Geri Dönüşümlü	Atomlar arasında enerji seviyesi değişimi	Stabilize edilemez; sıcaklık dengesi oluşturulur.
	Yeniden Manyetize Edilebilir	Bazı manyetik bölgelerin (domen) manyetik yeniden yönlenebilirliği NEDENİ; düşük sıcaklıklarda geçirgenlik artışı, yüksek sıcaklıklarda termal yaşlanma	Çalışma sıcaklığının az üstündeki bir sıcaklıkta manyetik yaşlandırma veya kısmi demanyetizasyon
	Yeniden Manyetize Edilemeyen	Yapısal değişim NEDENİ: Metalurjik kararsızlık	Özel metalurjik teknikler. NOT: eğer yapısal değişim meydana gelirse bazı malzemeler öğütülerek tekrar kullanılabilir.
Titreşim, Darbe ve Mekanik Gerilmeler	Geri Dönüşümlü	Atomlar arasında enerji seviyesi değişimi	Stabilize edilemez; yalıtım oluşturulur.
	Yeniden Manyetize Edilebilir	Bazı manyetik bölgelerin (domen) manyetik yeniden yönlenebilirliği NEDENİ; malzeme içerisindeki yerel enerji dalgalanmaları	Kısmi demanyetizasyon tam bir stabilizasyon sağlamaktadır.
	Yeniden Manyetize Edilemeyen	Yapısal değişim NEDENİ: Malzemenin soğuk işlenmesi, kırılması, vb.	Mıknatıs kırılmaya karşı korunmalıdır.

Çizelge 3.2 : Çevresel etkilerin neden olduğu değişimler -2- [25]

Çevresel Faktör	Değişim Tipleri	Malzemedeki Manyetik Değişim	Stabilizasyon Metotları
Nükleer Radyasyon	Geri Dönüşümlü	Yetersiz bilgi	Yetersiz bilgi
	Yeniden Manyetize Edilebilir		
	Yeniden Manyetize Edilemeyen		
Yapay Temaslar	Geri Dönüşümlü	Atomlar arasında enerji seviyesi değişimi	Stabilize edilemez; kapsül içine alarak yapay temasları önleyin.
	Yeniden Manyetize Edilebilir	Bazı manyetik bölgelerin (domen) manyetik yeniden yönlenebilirliği NEDENİ; temas bölgesindeki boşluktaki manyetik alan enerji yoğunlaşması	Dış alan ile kısmi demanyetizasyon veya ferromanyetik bir nesneyle kontrollü temas ettirme veya teması önlemek için kapsül içine alma
	Yeniden Manyetize Edilemeyen	-----	-----
Dış Manyetik Alanlar	Geri Dönüşümlü	Atomlar arasında enerji seviyesi değişimi	Stabilize edilemez; manyetik kalkan ile dış manyetik alanlardan koruyun.
	Yeniden Manyetize Edilebilir	Bazı manyetik bölgelerin (domen) manyetik yeniden yönlenebilirliği NEDENİ; manyetik devre enerjisinde değişim; histerezisin ısınma formunda enerji kaybı	Kısmi demanyetizasyon veya manyetik kalkan
	Yeniden Manyetize Edilemeyen	-----	-----
Çalışma Hava Boşluğu	Geri Dönüşümlü	Atomlar arasında enerji seviyesi değişimi	Stabilize edilemez; meydana gelen etki B/H geniş değişimlerini önleyecek uygun devre tasarımıyla azaltılabilir.
	Yeniden Manyetize Edilebilir	Bazı manyetik bölgelerin (domen) manyetik yeniden yönlenebilirliği NEDENİ; manyetik devre enerjisinde değişim; histerezisin ısınma formunda enerji kaybı	Kısmi demanyetizasyon veya normal çalışma hava boşluğunda mıknatısı belirli çevrim boyunca çalıştırma. Uygun devre dizaynı ile kayıp azaltılabilir.
	Yeniden Manyetize Edilemeyen	-----	-----

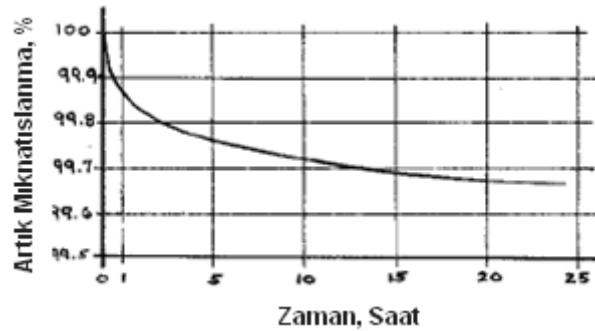
3.2 Çevresel Faktörler

Zaman, sıcaklık, titreşim, darbe, mekanik gerilmeler, yapay temaslar (spurious contacts), nükleer radyasyon, dış manyetik alan, manyetik geçirgenlik değişimleri gibi çevresel faktörler manyetik özellik performansında değişime yol açmaktadır.

Zamanın etkileri; zamanla ilişkili yeniden manyetikleştirilebilir ve manyetikleştirilemeyen değişimler herhangi bir manyetik malzemede gerçekleşebilir. Yeniden manyetikleştirilebilir değişimler az kararlı manyetik bölgelerin termal ve/veya manyetik enerjideki dalgalanmalar ile yeniden dizilim gösterdiği durumlarda oluşmaktadır. Bu şart mıknatıs termal olarak kararlıyken dahi gerçekleşebilmektedir. Kararsız manyetik bölgeler azaldıkça demanyetize edici etki de azalmaktadır. Bu olay “after effect”, “magnetic creep”, “normal time change”, “relaxation effect” veya “magnetic viscosity” şeklinde adlandırılmaktadır.

Birçok çalışma sonrası yumuşak manyetik malzemelerin manyetik viskozitesinin kalıcı manyetik malzemelere göre daha büyük olduğu belirlenmiştir. Manyetiklikteki değişiklikler malzemeden malzemeye değişim göstermektedir.

Şekil 3.1’de Alnico 5 mıknatısına ait manyetik viskozite – zaman değişimi gösterilmektedir. Artık mıknatıslanmada meydana gelen değişimlerin çoğu ilk 5 saat içerisinde gerçekleşmekte ve 25 saat sonrası kararlılık sağlanmaktadır.



Şekil 3.1 : Alnico 5 mıknatısına ait zamana bağlı değişim [25]

Yapılan çalışmalar sonrası aşağıdaki şekilde genellemeler yapılabilir.

- (a) Daha büyük koersif kuvvete (H_c) sahip mıknatıslarda artık mıknatıslanma (B_r) daha kararlı olmaktadır.
- (b) Daha büyük boyutsal orana (L/D) sahip mıknatıslarda artık mıknatıslanma (B_r) daha kararlı olmaktadır.

(c) Artık mıknatıslanma zamanının logaritmik değişimiyle azalmaktadır.

(d) Manyetik viskozite değişimlerinden kaçınmak için mıknatıslar kararlı duruma getirilebilmektedir.

Çizelge 3.3’de ferrit ve Alnico mıknatısların yeniden mıknatıslanabilir, zamana bağlı değişimler gösterilmektedir. Ferrit mıknatısların yüksek kararlılığa sahip olması ve Alnico mıknatısların L/D oranı arttıkça daha kararlı hale gelmesi göze çarpmaktadır. Yeniden mıknatıslanabilir zaman değişimleri aşağıdaki şekilde azaltılabilir veya önüne geçilebilir.

1) L/D oranı büyük mıknatıslarla çalışma

2) Mıknatısa kısa bir süre H_c değerinin yüzde 5 – 10 ‘u derecede dışarıdan demanyetize edici AC manyetik alan uygulama

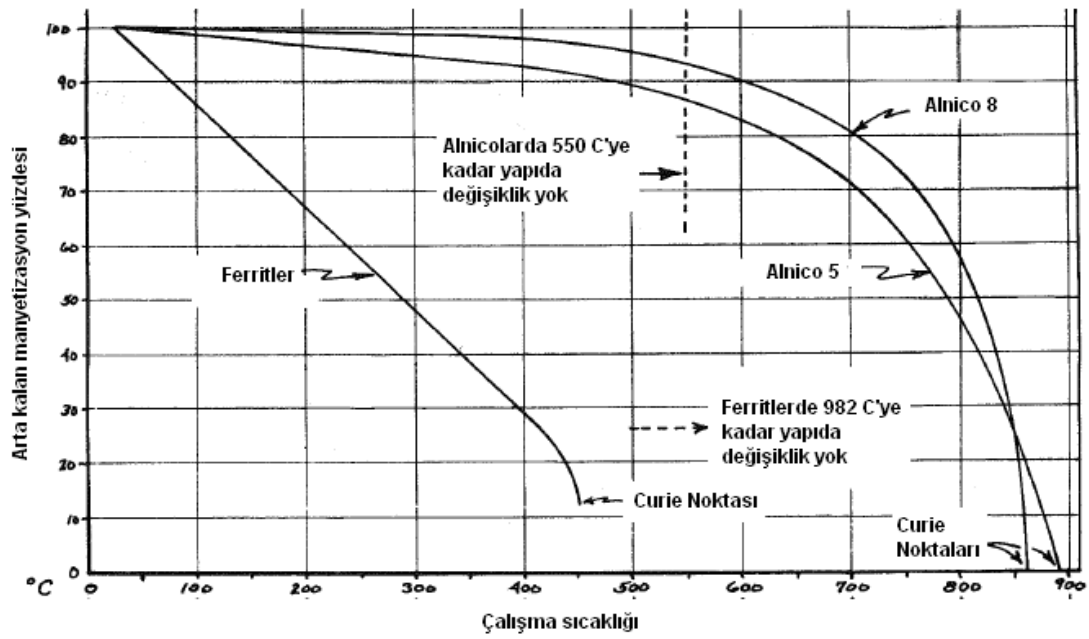
Çizelge 3.3 : Yeniden mıknatıslanabilir zaman değişimi [25]

Malzeme	L/D Oranı	Artık Mıknatıslanma (Br) (kG)	Kararlılık: 24°C , 10000 saat, manyetizasyon sonrası artık mıknatıslanma yüzdesi	Ölçüm Hassasiyeti (yüzde)
Ferrite 1	0.9	1.4	100.0	±0.1
Ferrite 5	0.8	2.5	99.6	±0.1
Alnico 3	3.5	4.5	98.10	±0.04
	2.2	3.2	97.04	±0.05
Alnico 7	3.5	4.9	99.32	±0.04
	2.2	3.9	98.96	±0.06
Alnico 5	8.0	12.3	99.95	±0.01
	6.7	12.1	99.89	±0.02

Yapısal değişimler sonucu zamana bağlı yeniden mıknatıslanamayan değişimler de gerçekleşebilmektedir.

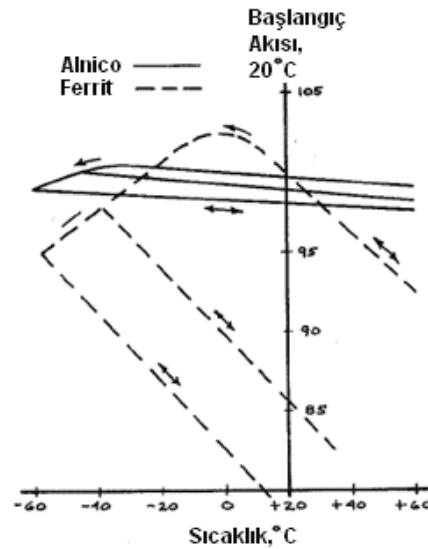
Sıcaklık etkileri; Sıcaklık etkilerine çalışma sıcaklığı ve ortam sıcaklığı olmak üzere iki yönden bakılması uygun olmaktadır. Şekil 3.2’de ferrit ve Alnico mıknatıslarda çalışma sıcaklıklarının genel etkileri gösterilmektedir. Ferrit mıknatıslarda 450⁰C’ye kadar geri dönüşümlü değişimler gerçekleşmektedir. 450⁰C ile 982⁰C aralıklarında ise yeniden manyetikleştirilebilir değişimler gerçekleşirken 982⁰C üzerinde belirgin şekilde yapısal değişiklikler meydana gelmekte ve geri dönüşümlü olmayan değişimler oluşmaktadır.

450⁰C üzerinde ferrit mıknatıslar tamamen manyetikliğini kaybettikleri için kullanımı mümkün olmamaktadır. Yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça manyetiklikte meydana gelen lineer düşüşler dizayn problemleri oluşturabilmektedir.



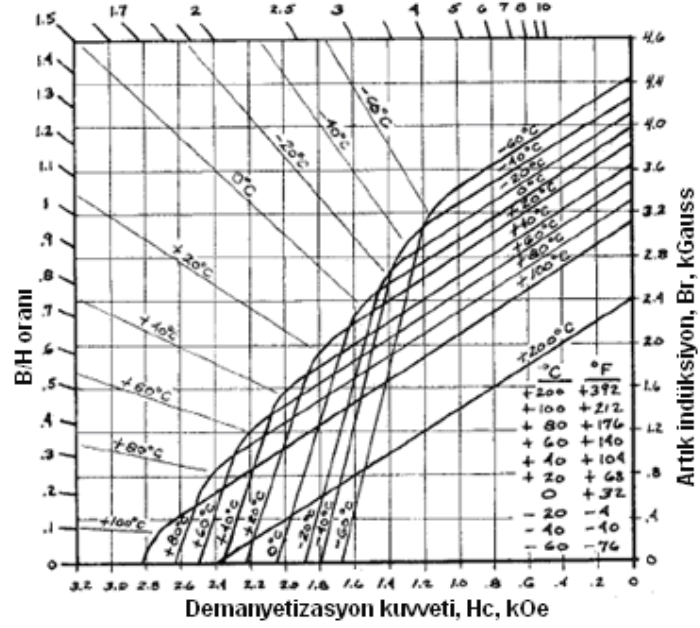
Şekil 3.2 : Ferrit ve Alnico mıknatıslarda çalışma sıcaklıklarının genel etkileri [25]

Ortam sıcaklıkları da daha önce bahsedilen 3 tip değişime yol açabilmektedir. Mıknatıslar için kritik sıcaklık şüphesiz ki yapısal değişimlerin meydana geldiği sıcaklık olmaktadır. Şekil 3.3'de ferrit ve Alnico mıknatısların yüksek ve düşük sıcaklıklardaki manyetik akı değişimleri gösterilmektedir. Buradan da görüldüğü üzere ferrit mıknatıslar Alnico mıknatıslara göre sıcaklığa daha duyarlı davranış göstermektedir.

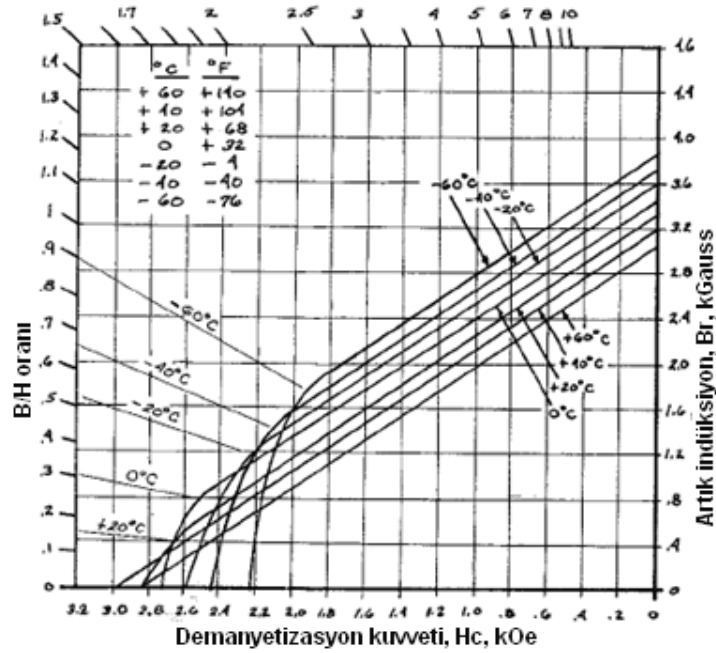


Şekil 3.3 : Ferrit ve Alnico mıknatısların sıcaklıkla gösterdikleri değişim [25]

Şekil 3.4 ve 3.5’de farklı derecelerdeki ferritlerin yüksek ve düşük sıcaklıklarda demanyetizasyon eğrisinde meydana gelen değişimleri gösterilmektedir. Şekil 3.4’de ferrit miknatıslarda $+20^{\circ}\text{C}$ ’den $+100^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar aralıkta B_r değeri azalırken H_c değeri artmaktadır. $+200^{\circ}\text{C}$ ’de B_r değeri yine azalırken H_c değeri $+20^{\circ}\text{C}$ ’deki ile aynı değerde olmaktadır. Bunun tersi olarak sıcaklık $+20^{\circ}\text{C}$ ’nin altına düştüğünde H_c değeri azalırken B_r değeri artmaktadır. Şekil 3.5’de ise benzer bir grafik bulunmakta ancak farklı sıcaklık ve B_r/H_c değerleri bulunmaktadır.



Şekil 3.4 : Farklı sıcaklıklardaki demanyetizasyon eğrileri [25]

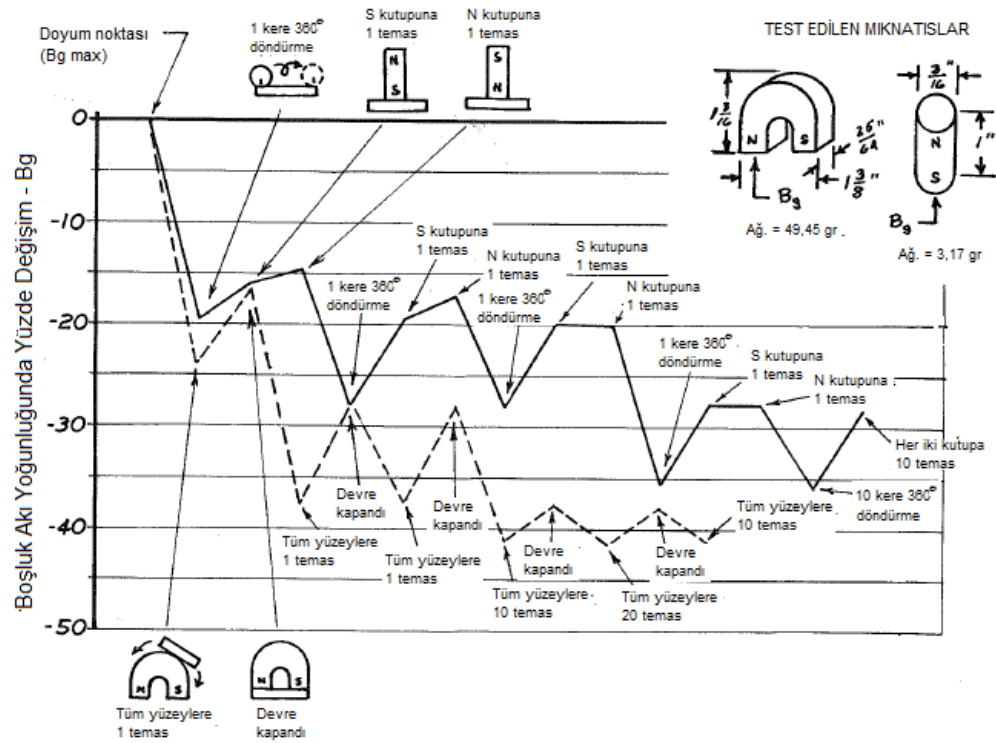


Şekil 3.5 : Farklı sıcaklıklardaki demanyetizasyon eğrileri 2 [25]

Titreşim, darbe ve mekanik gerilmeler; tekil, çevrimli veya devamlı mekanik yükler az kararlı manyetik bölgelerde dizilim kaybına neden olabilmektedir. Mekanik yüklerin neden olduğu etkiler termal dalgalanmalar ve manyetik viskozite ile benzer olmaktadır. Mekanik etkiler kaynaklı manyetik kayıpların derecesi malzemeye ve demanyetizasyon eğrisindeki çalışma noktasına (B/H oranı veya L/D oranı) göre değişim göstermektedir.

Ancak günümüzde bu etkiler oldukça minimum seviyelere düşmüş durumda olmaktadır. Ferrit mıknatıslarda ise bu etkilerin yarattığı en büyük sorun mıknatısın kırılması olmaktadır. Mekanik yükler karşısında kararlılığı sağlamak için AC manyetik alan uygulama etkili olabilmektedir. Ancak bu işlem hiçbir zaman etkileri tam olarak ortadan kaldırmamaktadır. Ferrit mıknatıslarda önlem olarak alınabilecek en uygun işlem mıknatısı mekanik zorlanmalardan uzak tutmak olmaktadır.

Yapay temaslar; bu tip değişim temas demanyetizasyon olarak da bilinmektedir ve kalıcı mıknatıs malzemelerinde oldukça sorun yaratan bir etki olmaktadır. Kalıcı mıknatıslar herhangi bir ferromanyetik cisimle temasa geçtiği durumda temas demanyetizasyonu gerçekleşmektedir. Bu ferromanyetik cisim koruyucu katman, alet, başka bir kalıcı mıknatıs gibi herhangi bir şey olabilmektedir. Temas demanyetizasyon; yapay temasın mıknatısın kutup yüzeyleri haricindeki yüzeylerde olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Bu yerel manyetik bölge yeniden dizilimleri sonucu mıknatıs performansında değişimler meydana gelmektedir ve bunun nedeni olarak temas ile mıknatısın daha kısa akı yolu oluşturması gösterilmektedir. Bu değişimler geri dönüşümlü ve yeniden manyetikleştirilebilir tiplerde olmaktadır. Şekil 3.6'da bu değişim ile ilgili yapılmış ampirik bir çalışmaya ait grafiği ifade etmektedir. Dolayısıyla başka bir mıknatısı yorumlamada kullanılması uygun olmamaktadır.



Şekil 3.6 : Yapay temas sonrası boşluk akı yoğunluğunda meydana gelen değişim [25]

Şekilde her bir temasta veya temas serisinde B_g değerinde azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca bazı mıknatıs tiplerinde örneğin at nalı şeklindeki bir mıknatısta her temas sonrası çalışma boşluğu kapandığından B_g değerinde toparlanma meydana gelmektedir. Bu olay da bu etkinin geri dönüşümlü olduğunu göstermektedir. Mıknatısın yeniden doygun hale getirilmesiyle de meydana gelen tüm kayıplar geri kazanılmaktadır. Şekil 3.6'dan da anlaşılacağı üzere belirli bir temas sayısından sonra mıknatıs tam olarak demanyetize olmakta ve burada bu değer dışarıdan uygulanan 300 Oe değerindeki bir AC manyetik alana denk gelmektedir. Buna göre mıknatısı bu etkiye karşı kararlı hale getirmek için 2 metot kullanılabilir.

- 1) Mıknatısları yabancı bir demir içerikli malzemeye temasını kesmek için uygun koruma
- 2) Mıknatısı gerekli seviyeye kadar kararlı hale getirme

Uygun bir şekilde kapatarak koruma en çok kullanılan yöntem olmaktadır. Mıknatısı çevreleyen kaplar da ferromanyetik malzemeden yapılmamalı ve mıknatısa temas etmeyecek kadar arada mesafe bırakılmasına dikkat edilmelidir. Bu koruma yöntemiyle belli bir derecede korunma sağlanmaktadır, harici bir malzeme mıknatısa temas kuracak bir nokta bulduğu durumda manyetik etki oluşumu gerçekleşmektedir.

AC manyetik alan kullanarak yapılan kararlı hale getirme işlemi de oldukça etkili olmaktadır, ancak mıknatısta belirgin bir şekilde performans kaybına neden olmaktadır.

Bu yapay temas etkisi genellikle düşük koersiviteye sahip, özellikle Alnico mıknatıslarda, olan mıknatıslarda meydana gelmektedir. Ferrit ve nadir toprak mıknatıslarında çok fazla karşılaşmamaktadır.

Nükleer radyasyon etkisi; nükleer radyasyon içeren ortamlarda çok fazla kullanım alanı olmadığı halde yapılan bazı araştırmalarda bu ortamın manyetik ve fiziksel özellikler üzerinde etkisi olduğu belirtilmektedir. Alnico, sert ferrit gibi mıknatıslarda artık mıknatıslanma ve indüksiyonda azalma gözlenmektedir.

Dış manyetik alan etkisi; bu etki kalıcı mıknatıslarda geri dönüşümlü ve yeniden manyetikleştirilebilir değişimlere neden olmaktadır. Doğrudan geri dönüşümü olmayan değişimlere yol açmamaktadır ancak yüksek frekanslı manyetik alan uygulanmasıyla malzemede yapısal değişimlere yol açacak ısınmalar meydana gelmekte ve bu da geri dönüşümü olmayan değişim oluşturmaktadır. Dış manyetik alan mıknatısın demanyetizasyon eğrisi üzerindeki çalışma noktasının yerini değiştirebilmektedir. Geri dönüşümlü ve yeniden mıknatıslanabilir değişimlerin ölçüsünü 3 faktör belirlemektedir.

- 1) Mıknatısın fiziksel parametreleri tarafından belirlenen çalışma çizgisel yükü (B/H oranı)
- 2) Uygulanan dış alanın pik şiddeti
- 3) Malzemenin içsel demanyetizasyon eğrisi

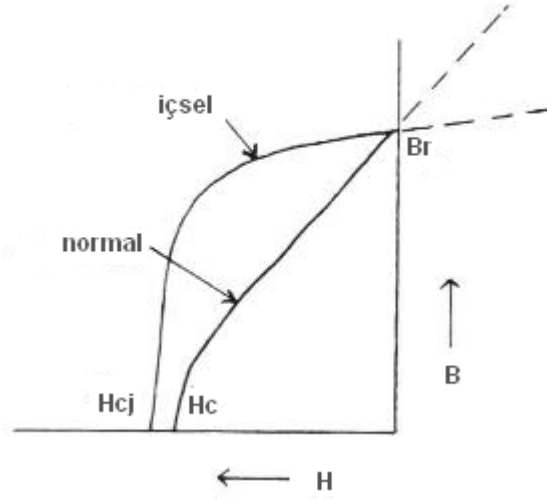
Koersif kuvveti yüksek olan mıknatıslarda normal demanyetizasyon eğrisi ile içsel olan eğri arasında fark bulunmaktadır (Şekil 3.7). Bundan dolayı dış alanın etkisi incelenirken içsel demanyetizasyon eğrisini kullanmak gerekmektedir. Ancak bu eğriler genelde yayınlanmadığından dolayı elde etmek zor olmaktadır. Bundan dolayı normal demanyetizasyon eğrilerini kullanırken aşağıdaki dönüşüm yapılmaktadır.

$$H_e = H_f \cdot \left(1 + \frac{1}{P}\right) \quad (3.1)$$

H_e ; O_e cinsinden efektif dış demanyetizasyon alanı

H_f ; O_e cinsinden aktüel demanyetizasyon alanı

P; alandan etkilenen mıknatısa ait B/H oranı



Şekil 3.7 : Ferrit mıknatıslara ait normal ve içsel demanyetizasyon eğrisi arasındaki fark

Çalışma hava boşluğu (manyetik geçirgenlik) etkisi; bu etkinin yarattığı sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- 1) Kalıcı mıknatıs içerisindeki hava boşluğu arttıkça kendiliğinden demanyetizasyon etkisi gerçekleşecek ve B_m (normal demanyetizasyon eğrisi üzerindeki herhangi bir noktadaki mıknatısa ait akı yoğunluğu) değeri B_r (artık mıknatıslanma) değerinin altına düşmektedir.
- 2) Malzemenin demanyetizasyon eğrisi üzerinde herhangi bir dirsek olmadığı durumda kendiliğinden demanyetizasyon değişimi geri dönüşümlü olmakta ve B_m ile B_r arasındaki fark kapanmaktadır.
- 3) Eğer dirsekli şekildeyse kendiliğinden demanyetizasyon etkisi yeniden mıknatıslanabilir şeklinde olmaktadır.
- 4) Eğri üzerindeki dirsek ne kadar büyük olursa çalışma hava boşluğu arttıkça daha büyük kendiliğinden demanyetizasyon etkisi oluşmaktadır.
- 5) Hava boşluğu nedenli kendiliğinden demanyetizasyon değişimleri aşağıda belirtildiği şekilde minimize edilebilmektedir.
 - a) Demanyetizasyon eğrisinde çok geniş dirsek içermeyen malzeme seçimi
 - b) Demanyetizasyon eğrisi üzerinde mıknatısı olabildiğince yüksekte çalıştırma (yüksek B/H oranı)

6) Hava boşluğu nedenli kendiliğinden demanyetizasyon değişimleri aşağıda belirtildiği şekilde yok edilebilmektedir.

a) Tamamıyla düz demanyetizasyon eğrisine sahip malzeme seçimi

b) Kendiliğinden demanyetizasyon etkisinin gerçekleştiği seviyeye kadar demanyetize etmek için kontrollü bir AC manyetik alan kullanımı

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda sıcaklığın manyetik özellikler ve yapısal özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada incelenen mıknatısların temini Sinomag, One Magnet firmalarından yapılmıştır. Temin edilen mıknatıs malzemeleri 2 temel grupta toplanabilirler. Bunlar; sert ferrit ve NdFeB esaslı mıknatıs malzemeleridir. Mıknatısların bileşimleri, içerdiği fazlar, tane boyutu ve yoğunlukları belirlenmiştir. Ayrıca mıknatısların sıcaklık etkisi altında gösterdikleri manyetik değişimler incelenmiştir. Çizelge 4.1’de sert ferrit ve NdFeB esaslı mıknatıslara ait temel fiziksel özellikler verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Sert ferrit ve NdFeB esaslı mıknatıslara ait temel fiziksel özellikler [26]

Özellik	Sert Ferrit Mıknatıs	NdFeB Mıknatıs
Curie Sıcaklığı (°C)	450-460	310-350
Yoğunluk (g/cm ³)	4,8-5,1	7,5-7,8
Elektriksel direnç(ohm-cm)	>104	160μ
Termal iletkenlik (cal/m-h-°C)	0,003	77000
Maksimum servis sıcaklığı (°C)	≈ 800	≈ 300

Malzemelerin kimyasal bileşimleri X-ışınları flüoresans (XRF) cihazı ile, fazların tespiti X-ışınları difraksiyon (XRD) cihazı ile, tane boyutunun belirlenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı ile, Curie sıcaklığı ölçümü diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) cihazı ile, yoğunlukların tespiti piknometre cihazı ile ve manyetik özelliklerin ölçümü ise permeagraf cihazı ile yapılmıştır.

4.1 Numune Hazırlama

4.1.1 Metalografik işlemler

Numunelere metalografik işlemler için öncelikle epoksi reçine kalıba ve/veya bakalite alma işlemleri yapılmıştır. Numuneler kalıba alındıktan sonra Şekil 4.1’de görülen Struers TegraPol-11 otomatik zımpara ve parlatma cihazı ile hazırlanmıştır. Zımpara işlemi sırasıyla 320, 500, 800 ve 1000’lik zımparalarla yapılmıştır. Parlatma işlemi ise Struers Allegro ve Piano tipi parlatıcı sıvılar ile yapılmıştır.



Şekil 4.1 : Struers TegraPol-11 otomatik zımpara ve parlatma cihazı

Metalografik işlemlerle hazırlanan numuneler SEM cihazında tane boyutu tayini için kullanılır hale getirilmiştir.

4.1.2 Öğütme işlemi

Mıknatıs malzemelerin faz dağılımı ve bileşimlerinin tespiti amacıyla numuneleri toz haline getirme işlemi Şekil 4.2'deki CMT TI-100 titreşimli değirmen öğütme cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2 : CMT TI-100 titreşimli değirmen öğütme cihazı

4.1.3 Presleme işlemi

Kimyasal bileşim analizinin yapılacağı X-ışınları flüoresans cihazına numune hazırlama için yapılan işlemdir. Şekil 4.3'de görülen hidrolik pres cihazı ile numuneler preslenmiştir.



Şekil 4.3 : Hidrolik pres cihazı

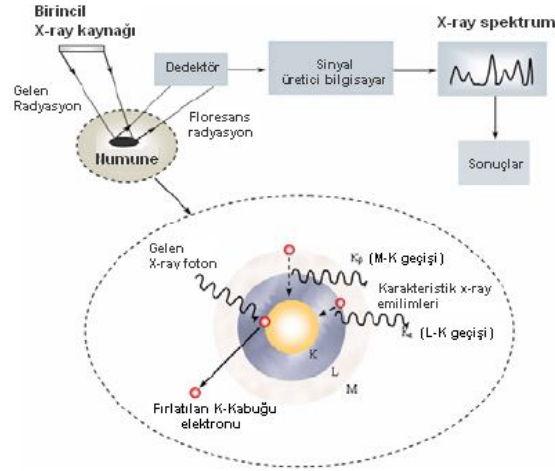
4.2 Yapılan Deneyler

Mıknatıs malzemelerinin bileşimlerinin, içerdiği fazların, tane boyutunun ve yoğunluklarının tespiti amacıyla metalografik ve toz haline getirme işlemlerinden sonra sırasıyla X-ışınları flüoresans, X-ışınları difraksiyon, taramalı elektron mikroskobu, diferansiyel taramalı kalorimetri ile Curie sıcaklığı ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır.

4.2.1 X-ışınları flüoresans ile kimyasal bileşim analizi

X-ışınları flüoresans (XRF) cihazı numunelere kalitatif ve kantitatif elementel analizler yapma imkanı sağlamaktadır. Atomik absorpsiyon veya buna benzer diğer cihazlara göre avantajı tahribatsız muayene olması, birçok element analiz edebilmesi ve diğerlerine göre daha ekonomik olmasıdır.

Bu cihazın çalışma metodu, X-ışını kaynağından çıkan X-ışınlarının numune üzerine gelmesi ile numunedeki atomdan yayınan ışınların (flüoresans fotonlar) bir dedektör yardımıyla toplanması şeklindedir. Numuneye ait X-ışınları flüoresans spektrumları birçok sayıda karakteristik pikler meydana getirmektedir. Piklerin enerji pozisyonları numune içindeki atomların tanımlanmasını (kalitatif analiz) sağlamaktadır. Piklerin şiddetleri ise numunenin sahip olduğu elementel bileşimin tanımlanmasını (kantitatif analiz) sağlamaktadır [27]. Şekil 4.4'te bu sistemin çalışma metodu şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : XRF cihazının ölçüm metodu ve prensibi [27]

X-ışınları flüoresans tekniği, genel olarak foton madde etkileşmesi sonucu meydana gelen karakteristik X-ışınları ve saçılma fotonlarının nicel ve nitel değerlendirilmesine bağlı olarak uygulanan bir tekniktir. Bu analiz için Rigaku ZSX Primus II XRF cihazı (Şekil 4.5) kullanılmıştır.



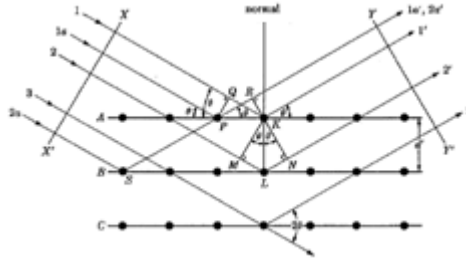
Şekil 4.5 : Rigaku ZSX Primus II XRF cihazı

4.2.2 X-ışınları difraksiyon ile faz analizi

X-ışınları difraksiyon (XRD) cihazı katı veya toz halindeki bir numunenin içerdiği fazların kantitatif tayini ve tanımlanması açısından önemli bir tahribatsız muayene analiz tekniğidir. Bu fazların tayini analizi yapılan numunelerin daha önceden veri tabanında bulunan tanımlı fazlarla karşılaştırma yapılarak gerçekleştirilmektedir. X-ışınları kırınımının çalışma prensibi Bragg bağıntısıyla ifade edilmektedir [28].

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (4.1)$$

Burada n harfi katsayıyı, λ dalga boyu şiddetini, d kafes parametresini ve θ ise yansıma açısını temsil etmektedir.



Şekil 4.6 : X-ışınlarının kristal içinde yansıması [28]

Bu analiz için PANalytical PW3040/60 X'Pert Pro XRD cihazı (Şekil 4.7) kullanılmıştır. XRD analizi $3,35^{\circ}/\text{dk}$ tarama hızı ile $2\theta = 5-90^{\circ}$ arasında $\text{CuK}\alpha(1,54\text{\AA})$ radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. Cihaz 40 kV potansiyelde, 40 mA akımda çalıştırılmıştır.

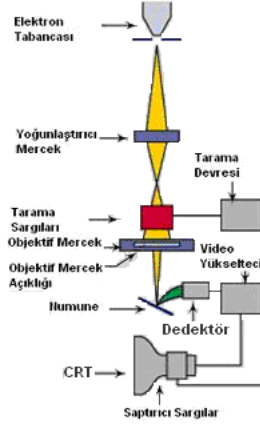


Şekil 4.7 : PANalytical PW3040/60 X'Pert Pro XRD cihazı

4.2.3 Taramalı elektron mikroskobu ile mikro yapı karakterizasyonu ve tane boyutu analizi

Taramalı elektron mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ısımları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir [29].

Şekil 4.8’de taramalı elektron mikroskopunun optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşan şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 4.8 : Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) şematik görünüşü [29]

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektronları kullanarak örnek yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntü alınmasını sağlayan sistemlerdir. Analiz Şekil 4.9’da görülen JEOL JSM 7000F Field Emission-Scanning Electron Microscope cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9 : JEOL JSM 7000F Field Emission-Scanning Electron Microscope cihazı

Burada kullanılan tane boyutu analiz yöntemi ASTM E 112 standardı göz önüne alınarak yürütülmüştür. Bu yöntem kısaca anlatılacak olursa;

- Boyutları ve alanı bilinen bir daire büyütme oranı bilinen görüntü üzerine çizilir.
- Tamamı daire içinde kalan taneler sayılır.
- Bir kısmı daire içinde kalan taneler sayılır. Burada elde edilen sayı 2’ye bölünür.

- d) c şıkkında elde edilen sayı ile b şıkkında elde edilen sayı toplanır.
- e) Elde edilen sayı dairenin alanına bölünür.
- f) Buradan elde edilen sayı 100x büyütmedeki tane/inç² değerine dönüştürülür.
- g) ASTM tane boyutu tablosunu kullanarak tane boyutu tespiti yapılır.

4.2.4 Diferansiyel taramalı kalorimetri ile Curie sıcaklığı ölçümü

Mıknatısların Curie sıcaklıklarını belirlemek amacıyla ortam sıcaklığından 500°C sıcaklığa 20 °C/dk ısıtma hızında ve 50 ml/dk saf azot gazı geçirilmesi şartlarıyla ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler için Şekil 4.10'da görülen TA Q200 DSC (Differential Scanning Calorimeter) kullanılmıştır.



Şekil 4.10 : TA Q200 DSC cihazı

4.2.5 Yoğunluk tayini

Numuneler belirli boyutlarda tek tek tartıldıktan sonra cihaza konulup, ağırlık verileri girilip deney başlatılmıştır. Bu analizde kullanılan piknometre Şekil 4.11'de görülen Micromeritics AccuPyc 1330 gaz piknometresi cihazı olmaktadır.



Şekil 4.11 : Micromeritics AccuPyc 1330 gaz piknometresi cihazı

4.2.6 Porozite tayini

Numunelerin ilk önce hassas terazide tartımları (kuru ağırlık) yapılmıştır. Tartım işleminden sonra 100°C sıcaklıktaki kaynar suyun içinde bulunacak şekilde 2 saat süreyle bekletilmiştir. Daha sonra soğumaya bırakılan su içerisinde 12 saat süreyle bekletilmiştir. Su içerisinden çıkarılan numunelerin sırasıyla önce sudaki ağırlıkları (asılı ağırlık) ve daha sonra son ağırlıkları (doymuş ağırlık) ölçülmüştür. Gözeneklilik hesabı aşağıdaki formülle yapılmıştır.

$$\text{Görünengözeneklilik(\%)} = \frac{W - D}{W - S} \times 100 \quad (4.2)$$

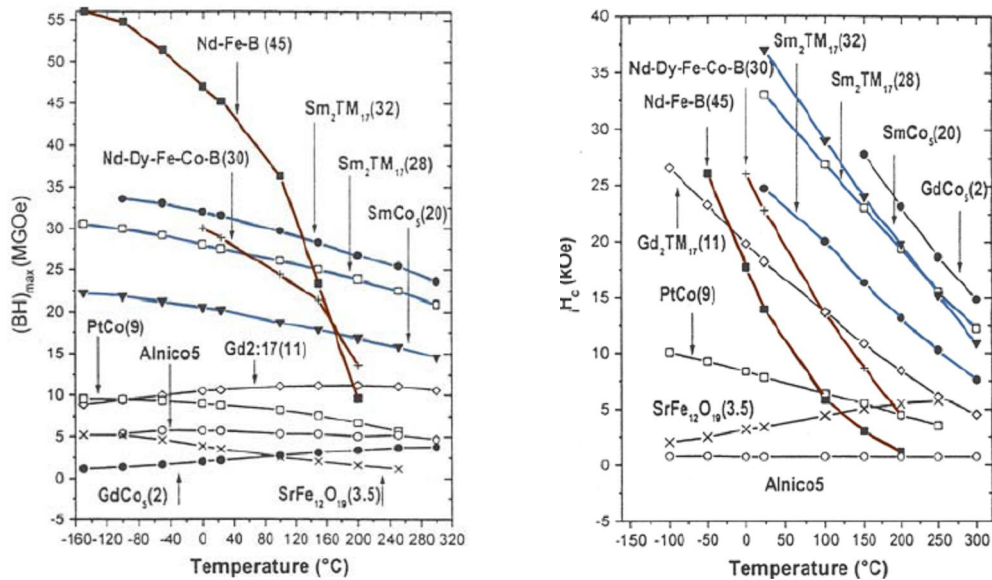
Kuru ağırlık: D

Doymuş ağırlık: W

Asılı ağırlık: S

4.2.7 Sıcaklık etkisi ile tersinir olmayan kayıp tayini

Sıcaklık etkisiyle meydana gelen manyetik kayıpların belirlenmesi için test uygulanmıştır. Burada manyetik özelliklerinin göstermiş olduğu düşüş yüzdesine göre mıknatıs seçimi yapılabilir. Şekil 4.12’de genel mıknatıs tiplerinin manyetik özelliklerinin sıcaklık etkisiyle gösterdikleri değişim görülmektedir.



Şekil 4.12 : Farklı mıknatısların manyetik özelliklerinin sıcaklık ile değişimi [30]

Şekillerde görüldüğü üzere NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri sıcaklık etkisi ile oldukça farklılaşma göstermektedir. Ferrit mıknatıslar ise daha dayanıklı bir davranış sergilemektedir.

Deney prosedürü;

- 1) Numunelerin oda sıcaklığında manyetik özelliklerinin ölçümü yapılır.
- 2) Numunelerin 50⁰C sıcaklıkta 1 saat süreyle tutulup, oda sıcaklığına soğuması beklenir ve tekrar manyetik özelliklerin ölçümü yapılır.
- 3) Numuneler bu sefer 75⁰C sıcaklıkta 1 saat süreyle tutulup, oda sıcaklığına soğuması beklendikten sonra manyetik özellikleri ölçülür.
- 4) Bu şekilde çıkılmak istenilen sıcaklığa kadar deney tekrarlanır ve manyetik özelliklerde meydana gelen kayıplar hesaplanır [30].

Buradaki ısıtma soğutma işlemleri Milestone PYRO High Temperature Microwave Muffle fırın (Şekil 4.13(a)) ile yapılmıştır. Manyetik ölçümler MagnetPhysik marka permeagraf (Şekil 4.13(b)) ile yapılmıştır.



Şekil 4.13 : (a) MagnetPhysik permeagraf cihazı; (b) Milestone fırın

4.2.8 Sıcaklık katsayılarının tayini

Termal kararlılık, B_r ($\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$ olarak bilinir) ve H_{cJ} ($\beta/^\circ\text{C}^{-1}$ olarak bilinir) sıcaklık katsayıları ile ifade edilebilmektedir. Mıknatıslar Magnet Physik Permeagraf ölçüm sistemi kullanılarak belirli sıcaklık aralıklarında B_r ve H_{cJ} ölçümleri yapılır. Ölçümlerde elde edilen her sıcaklıktaki değerler kayıt altına alınır ve aşağıdaki formüller aracılığıyla katsayılar belirlenmektedir [31].

$$\alpha = \left[\frac{B_{r(T)} - B_{r(RT)}}{B_{r(RT)}} \right] / (T - RT) \times 100\% \quad (4.3)$$

$$\beta = \left[\left(H_{cJ(T)} - H_{cJ(RT)} \right) / \left(H_{cJ(RT)} x \{ T - RT \} \right) \right] \times 100\% \quad (4.4)$$

$B_{r(T)}$ ve $H_{cJ(T)}$ gösterimleri T sıcaklığındaki B_r ve H_{cJ} değerlerini ifade etmektedir. $B_{r(RT)}$ ve $H_{cJ(RT)}$ gösterimleri ise oda sıcaklığındaki B_r ve H_{cJ} değerlerini ifade etmektedir.

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışma sonucunda, farklı manyetik özelliklere sahip iki tip ferrit mıknatısta manyetik özellik farkını yaratan etkinin ne olduğu hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca iki aynı tip NdFeB mıknatısların aynı sınıfa (N40) ait olmasına karşın bu mıknatısların özelliklerinde fark yaratan etkilerin ne olduğu hakkında da bilgi edinilmiştir. Mıknatısların motorlar içerisinde kullanıldıkları göz önüne alınarak motorların ortalama çalışma sıcaklığı (80°C) ve civarında manyetik ve yapısal açıdan gösterdiği davranışlar ve değişiklikler hakkında bilgi edinilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar ferrit mıknatıslar ve NdFeB mıknatıslar olmak üzere iki ana başlık altında aşağıda verilmektedir.

5.1 Ferrit Mıknatıslar

Deneye tabi tutulan ferrit mıknatıslar Sinomag firmasına ait iki farklı manyetik özellikteki mıknatıslar olmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 5.1’de analizleri yapılan ferrit mıknatıslara ait bilgiler verilmektedir.

Çizelge 5.1 : Analizleri yapılan ferrit mıknatıslar

Mıknatıs adı	Talimatlardaki manyetik özellikler					Foto	Boyutlar (EnxBoyxCalınlık)	Firma
Sinomag Br = 382	Numune	Br(mT)	Hcb(kA/m)	Hcj(kA/m)	(BH)max (kJ/m ³)		22x24x7 (mm)	Sinomag
	Sinomag Br = 382	382	250,2	268,6	29			
Sinomag Br = 393	Numune	Br(mT)	Hcb(kA/m)	Hcj(kA/m)	(BH)max (kJ/m ³)		22x24x7 (mm)	Sinomag
	Sinomag Br = 393	393	273,2	290,6	30,52			

5.1.1 X-ışınları flüoresans analizi sonuçları

Ferrit mıknatısların sahip olduğu kimyasal bileşimleri elde etmek amacıyla yürütülen X-ışınları flüoresans (XRF) analizi sonuçları Çizelge 5.2’de belirtildiği gibi olmaktadır. XRF analizlerinde ferrit mıknatısların önemli bir bileşeni olan oksijen (O) saptanamamakta, bunun dışındaki elementler belirlenebilmektedir.

Çizelge 5.2 : Ferrit mıknatıslara ait kimyasal bileşim değerleri

Element	Numune ve % ağırlık	
	Sinomag (Br=382)	Sinomag (Br=393)
Fe	84,69	84,92
Sr	12,16	12,07
Na	0,02	0,03
Mg	0,03	0,02
Al	0,5	0,54
Si	0,48	0,4
Ca	1,05	0,98
Cr	0,17	0,15
Mn	0,51	0,49
Ni	0,03	0,02
Ba	0,29	0,26
W	-	0,06
Zn	0,01	-

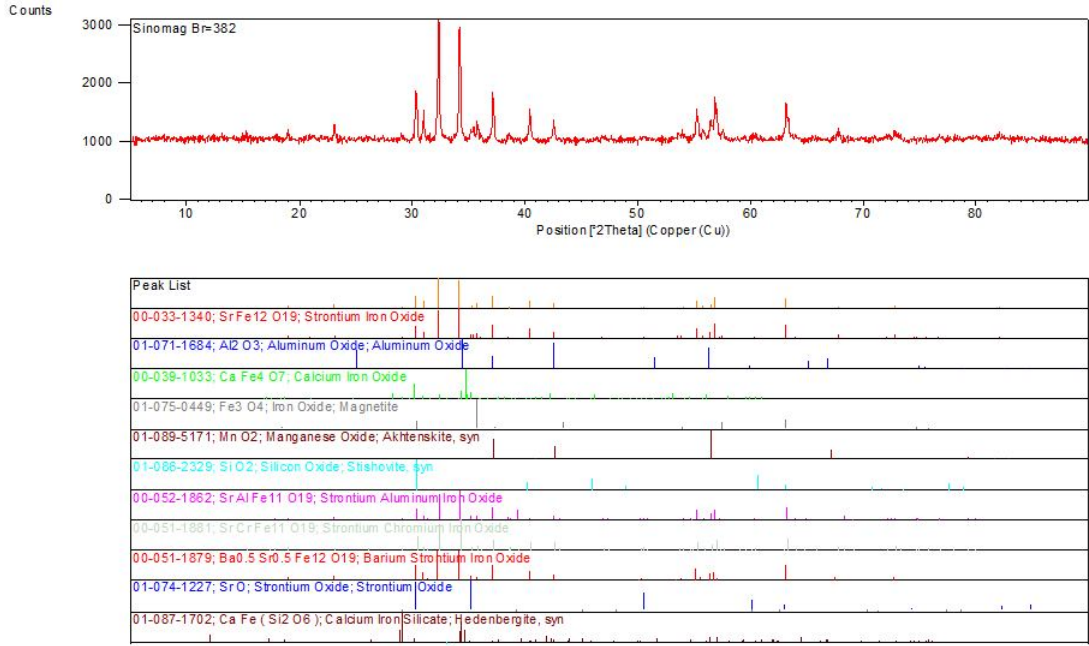
Analiz sonuçlarına göre;

- 2 farklı mıknatıs kalitesini oluşturan temel elementlerinin demir (Fe) ve stronsiyum (Sr) olduğu görülmüştür. Bu elementlere ilave olarak Ca, Ba, Cr, Si, Al ve Mn elementlerinin de dikkate alınabilecek miktarlarda olduğu belirlenmiştir. Buna göre kullanılan tüm ferrit mıknatıslar $MO.6Fe_2O_3$ formunda yer alan M elementi Sr'dir. Diğer elementler ise mıknatısların çeşitli özelliklerini etkileyebilecek bileşikler oluşturan azınlık miktardaki elementlerdir.
- Mıknatısın temel elementleri olan Sr ve Fe'nin % ağırlık miktarlarının her iki mıknatısta da birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir.
- Mıknatısa ilave edilen elementlerin de birbirleriyle W ve Zn elementleri hariç aynı olduğu ve ayrıca sahip oldukları % ağırlık bileşimlerinin de çok yakın değerler olduğu görülmektedir.

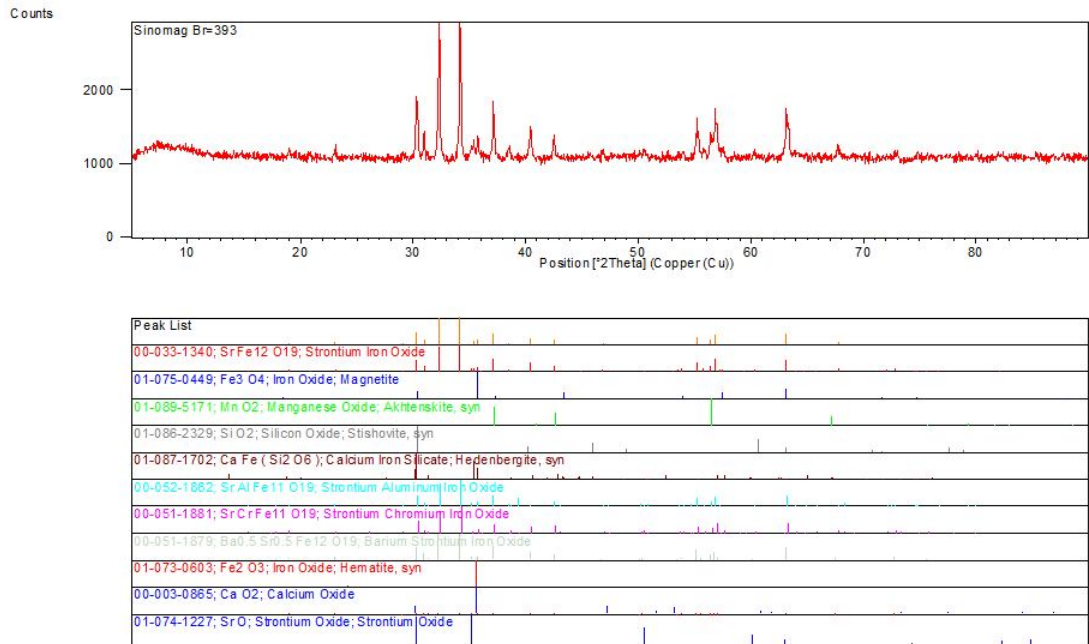
Buna göre bu mıknatısların manyetik özelliklerinde farklılık yaratan etkinin kimyasal bileşimler olduğunu söylemek mümkün olmamaktadır. Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin davranışlarının önemli bir bölümü mikro yapıya, faz yapısına ve mevcut yapısal kusurlara bağlı olmaktadır [6].

5.1.2 X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları

X-ışınları difraksiyon (XRD) analizi sonucunda pikler şeklinde sonuç elde edilmektedir ve daha önce de bahsedildiği üzere bu pikler veri tabanında bulunan standart piklerle karşılaştırılarak sonuçlar hakkında bilgi edinilmektedir. Bu miknatısların analizi sonucunda elde edilen pikler ve sonuçları aşağıda Şekil 5.1 ve 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Sinomag Br = 382 miknatısına ait XRD sonuçları



Şekil 5.2 : Sinomag Br = 393 miknatısına ait XRD sonuçları

Analiz sonuçlarına göre;

- Her iki mıknatısın da ana fazlarının $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ olduğu görülmektedir.
- Her iki mıknatısta da bulunan fazlar ise $\text{SrCrFe}_{11}\text{O}_{19}$, $\text{SrAlFe}_{11}\text{O}_{19}$, $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Fe}_{11}\text{O}_{19}$, Fe_3O_4 , MnO_2 , SiO_2 , $\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$, SrO şeklinde sıralanmaktadır.
- Sinomag Br = 382 mıknatısında diğer mıknatıstan farklı olarak Al_2O_3 ve CaFe_4O_7 fazları bulunurken, Sinomag Br = 393 mıknatısında ise Fe_2O_3 ve CaO_2 fazları farklılık göstermektedir.

Bu fazların mıknatısların yapılarındaki sahip oldukları yüzde miktarları Çizelge 5.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 : Ferrit mıknatısların sahip olduğu faz yüzdeleri

	Fazlar	%Faz		Fazlar	%Faz
Sinomag Br = 382	$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	83,38	Sinomag Br = 393	$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	76,25
	$\text{SrAlFe}_{11}\text{O}_{19}$	0,81		$\text{SrAlFe}_{11}\text{O}_{19}$	14,84
	$\text{SrCrFe}_{11}\text{O}_{19}$	2,49		$\text{SrCrFe}_{11}\text{O}_{19}$	2,13
	$\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$	3,41		$\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$	3,12
	MnO_2	0,58		MnO_2	0,56
	Fe_3O_4	0,18		Fe_3O_4	0,17
	SrO	1,55		SrO	0,86
	$\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	0,58		$\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	0,62
	SiO_2	0,47		SiO_2	0,3
	CaFe_4O_7	5,9		Fe_2O_3	0,11
	Al_2O_3	0,64		CaO_2	1,04
	Toplam	100		Toplam	100

Mıknatısların sahip oldukları faz yüzdelerine bakıldığında her iki mıknatısta da $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ fazının en yüksek yüzdeye sahip olduğunu söylemek mümkün olmaktadır. Ayrıca her iki mıknatısta da $\text{SrCrFe}_{11}\text{O}_{19}$, $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Fe}_{11}\text{O}_{19}$, Fe_3O_4 , MnO_2 , SiO_2 , $\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ fazlarının sahip oldukları yüzde değerlerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Sinomag Br = 382 mıknatısında ana fazın haricindeki fazlardan en fazla yüzdeye sahip olan fazın %5,90 ile CaFe_4O_7 fazı olduğu görülmektedir. Bu fazın literatürde antiferromanyetik faz olduğu belirtilmektedir [32]. Buna göre bu fazın mıknatısın

manyetik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebileceğini söylemek mümkün olmaktadır.

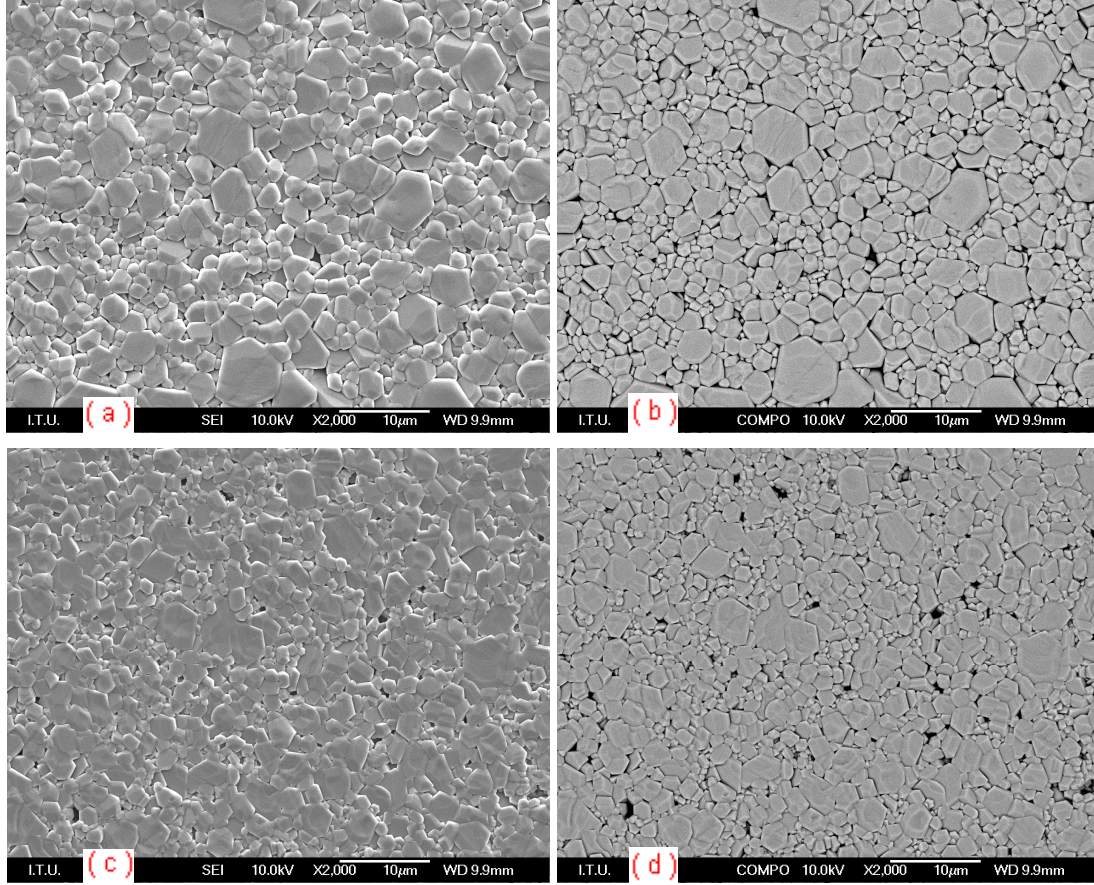
Sinomag Br = 393 mıknatısında ise ana faza katkıda bulunan en etkili faz $\text{SrAlFe}_{11}\text{O}_{19}$ olmaktadır. Literatürde bu faz oluşumu ile koersivitede artış sağlandığı belirtilmektedir [33].

Böylece, bu iki mıknatısın birbirine yaklaşık bileşimlere sahip olmasına rağmen manyetik özelliklerinde farklılık olmasının nedenlerinden bir tanesinin sahip oldukları fazlar olduğunu söylemek mümkün olmaktadır.

Bu faz farklılığının oluşmasında üretim aşamasının yeterli derecede kontrollü yapılmamasının etkisi olabileceği ya da farklı özelliklere sahip iki tür mıknatıs üretmek amacıyla bilinçli olarak da yapılabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

5.1.3 Taramalı elektron mikroskopu ile mikro yapı karakterizasyonu ve tane boyutu analiz sonuçları

Mikro yapıların ve tane boyutunun mıknatıslar üzerinde manyetik açıdan etkileri bulunduğu bahsedilmişti. Buna göre mıknatısların SEM görüntüleri çekilerek tane boyutu analizleri yapılmıştır. Mıknatıslara ait mikro yapı görüntüleri Şekil 5.3'te gösterilmektedir.

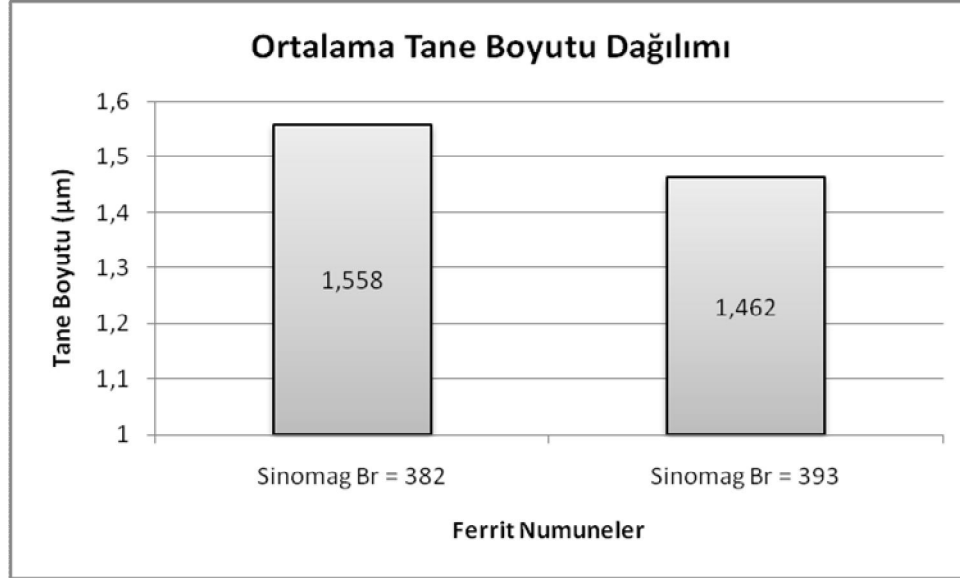


Şekil 5.3 : Sinomag Br = 382 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (a) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO) - Sinomag Br = 393 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (c) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (d) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO)

Sinomag Br = 382 mıknatısına ait mikro yapıda en büyük partikül boyutu olarak 7,45 μm ve en küçük tane boyutu olarak 1,30 μm ölçülmüştür. Tane boyutu hesaplamalarında ise bu mıknatısın sahip olduğu ortalama tane boyutunun 1,558 μm olduğu belirlenmiştir. Tanelerin homojen dağılım gösterdiği ancak büyük tanelerin varlığının fazla olduğu bir mıknatıstır (Şekil 5.3(a, b)). Tanelerde herhangi bir yönelme olmaması olumlu bir özelliktir ki büyük taneler içermesine rağmen manyetik özellikler açısından kötü bir özellik göstermemektedir.

Sinomag Br = 393 mıknatısına ait mikro yapıda en büyük partikül boyutu olarak 7,73 μm ve en küçük tane boyutu olarak 1,28 μm ölçülmüştür. Tane boyutu hesaplamalarında ise bu mıknatısın sahip olduğu ortalama tane boyutunun 1,462 μm olduğu belirlenmiştir. Sinomag Br = 382 mıknatısından farklı olarak büyük tanelerin azlığı göze çarpmaktadır (Şekil 5.3(c, d)). Dolayısıyla Br = 393 kodlu mıknatısın ortalama tane boyutu değeri daha düşüktür.

Düşük ortalama tane boyutuna sahip olan mıknatısın daha yüksek manyetik özelliklere sahip olması beklenmektedir [11].



Şekil 5.4 : Ferrit mıknatıslara ait ortalama tane boyutu dağılım grafiği

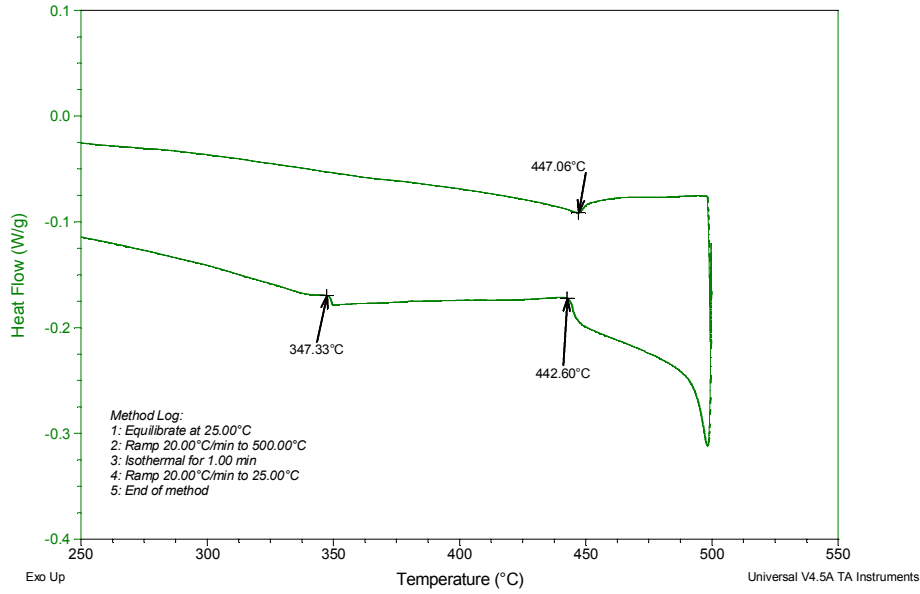
Tane boyutu analizlerini yaptığımız mıknatısların sahip oldukları ortalama tane boyutlarına ait karşılaştırma yukarıdaki Şekil 5.4’de gösterilmektedir. Literatürde mıknatısların iyi manyetik özelliklere sahip olması için 1 µm’ye olabildiğince yakın tane boyutuna ve homojen bir tane dağılımına sahip olmaları gerektiğinden söz edilmektedir [10]. Bu açıdan mıknatıslar incelendiğinde ortalama tane boyutu daha küçük olan mıknatısın manyetik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmektedir.

5.1.4 Curie sıcaklık ölçüm sonuçları

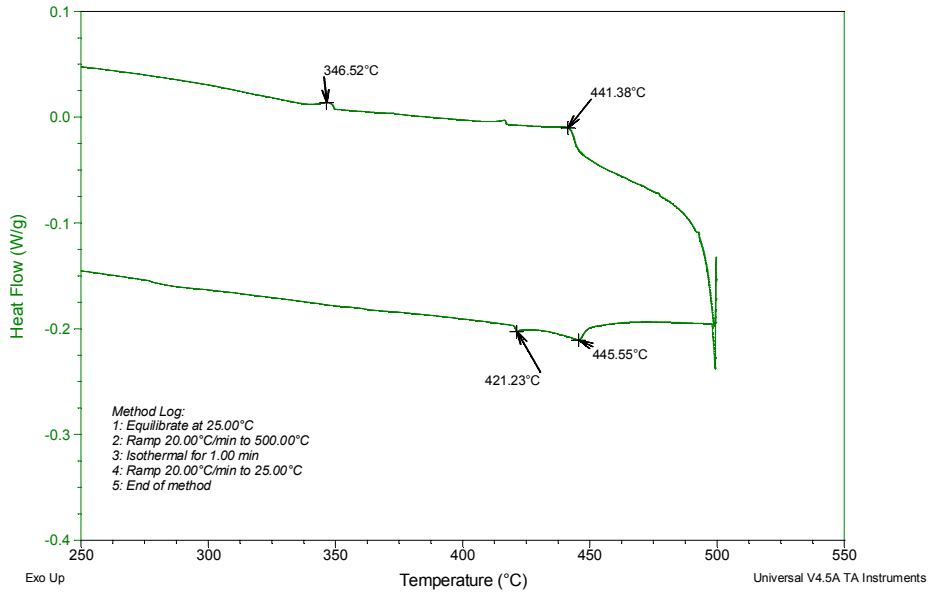
Sıcaklık malzemelerin diğer özelliklerini de etkilediği gibi manyetik özellikleri üzerinde de etkilidir. Isı etkisiyle enerjileri ve dolayısıyla titreşim hareketleri artan atomlarda hizalanan manyetik momentlerin bu harekete bağlı olarak rasgele yönelme göstermeye başlamaları sebebiyle manyetik özelliklerde azalma görülmektedir.

Curie sıcaklığı (T_c) ve üzerinde tüm ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler paramanyetik davranış gösterirler. Bu sebeple Curie sıcaklığı kalıcı mıknatıslarda özellikle çalışma koşulları konusunda son derece belirleyici rol oynar. T_c sıcaklığı malzemeden malzemeye değişiklik göstermektedir [3]. Literatürde ferrit mıknatısların Curie sıcaklıklarının 450°C olduğundan bahsedilmektedir [12].

Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) cihazı ile yapılan analizlere ait sonuçlar Şekil 5.5 ve 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.5 : Sinomag Br = 382 mıknatısına ait DSC eğrisi



Şekil 5.6 : Sinomag Br = 393 mıknatısına ait DSC eğrisi

Buna göre; Sinomag Br = 382 mıknatısının Curie sıcaklığı 443⁰C ve Sinomag Br = 393 mıknatısının Curie sıcaklığı 446⁰C olarak ölçülmüştür. Mıknatısların literatürde belirtilen sıcaklık değerinden daha düşük sonuçlara sahip oldukları görülmüştür. Birbirleri arasında kıyaslama yapıldığında ise mıknatısların sahip oldukları Curie sıcaklıkları birbirlerine oldukça yakındır. Bundan dolayı yüksek sıcaklık

davranışlarında aralarında belirgin farkların olmaması beklenmektedir. Ancak Curie sıcaklığı daha yüksek olan malzemenin çalışma sıcaklığının daha yüksek olduğu da bilinmektedir. Bu sıcaklıkların üstüne çıkıldığı durumlarda yapısal bozulmalar meydana gelmektedir [25].

5.1.5 Yoğunluk ve porozite ölçüm sonuçları

Sinterlenmiş sert ferritlerin Çizelge 5.4'te belirtilen yoğunluk değerlerine sahip olmaları beklenilmektedir.

Çizelge 5.4 : Standartlarda belirtilen yoğunluk değerleri

Standart Adı	İstenen Yoğunluk Değerleri (g/cm ³)	
	Min.	Max.
TS 4546	4,6	5,0
IEC 60404-8-1	4,6	5,0
ASTM A1054	4,9	5,1
DIN 17410	4,6	5,0

Buna göre ölçümleri yapılan tüm mıknatıslar standartlarda belirtilen yoğunluk aralıkları dâhilinde değerlere sahiptirler ve iki farklı zamanda ölçülen yoğunluk değerleri de değişiklik göstermemiştir (Çizelge 5.5). Yoğunluğu daha yüksek olan mıknatısların manyetik özelliklerinin daha iyi olduğu bilinmektedir [10]. Bu açıdan elde edilen sonuçlar bu durumu doğrulamaktadır.

Çizelge 5.5 : İki farklı zamanda analizi yapılan mıknatıslara ait yoğunluk değerleri

Numune Adı	Ölçülen Yoğunluk Değerleri (g/cm ³)	
	1.analiz	2.analiz
Sinomag Br = 382	4,891	4,903
Sinomag Br = 393	4,946	4,921

Literatürde belirtildiği üzere manyetik özelliklerin yüksek olması için gözeneklilik miktarının olabildiğince düşük olması gerekmektedir. Porlarda azalma oldukça geçirgenlikte artış olmaktadır. Ayrıca gözeneklilik azaldıkça üretimde yapılan son işlemler sonrasında boyutsal kararlılıkta da artış sağlanmaktadır [10].

Çizelge 5.6 : İki farklı zamanda analizi yapılan mıknatıslara ait porozite değerleri

Numune Adı	Görünen gözeneklilik, %	
	1.analiz	2.analiz
Sinomag Br = 382	0,0901	0,0913
Sinomag Br = 393	0,0990	0,0946

ASTM A1054 standardında kabul edilebilir maksimum porozite %5 olarak belirtilmiştir. Analizi yapılan mıknatıslarda aşağıdaki sonuçlardan da görüleceği üzere porozite miktarı ortalama %0,095'in üstüne çıkmamaktadır (Çizelge 5.6). Bu mıknatıslardan Sinomag Br = 393'ün porozite değeri diğerine göre daha büyüktür. Ancak değerler oldukça küçük olduklarından mıknatıslar arasında fark yaratması açısından bu porozite değerlerinin etkisinin bulunmadığı söylenebilir.

5.1.6 Tersinir olmayan kayıp analiz sonuçları ve sıcaklık katsayısı değerleri

Öncelikle numunelerin oda sıcaklığında manyetik özelliklerinin ölçümü yapılmıştır. Daha sonra belirli sıcaklık aralıklarında numuneler 1 saat süreyle tutulup, oda sıcaklığına soğuması beklenmiş ve tekrar manyetik özelliklerin ölçümü yapılmıştır. Bu şekilde mıknatısların motor içerisinde çalıştığı ortam sıcaklığı ve üzerindeki değerlere kadar deney tekrarlanmış ve maksimum enerji üretimi (BH(max)) değerinde meydana gelen kayıplar hesaplanmıştır. Ölçüm şartları Çizelge 5.7'de verilmektedir.

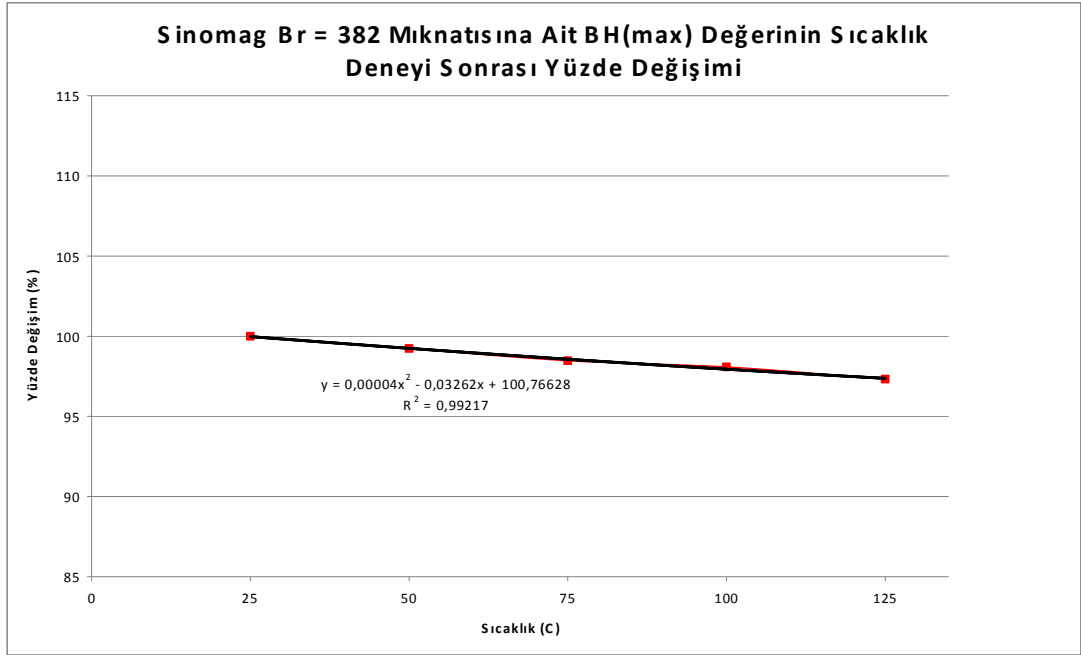
Çizelge 5.7 : Ferrit mıknatıslar için ölçüm şartları

Ölçüm	Şartlar	
	Sıcaklık (C)	Süre (saat)
1	25	
2	50	1
3	75	1
4	100	1
5	125	1

Deney sonrası elde edilen ölçüm sonuçları ve grafikleri aşağıda verilmektedir. Çizelge 5.8 ve Şekil 5.7 Sinomag Br = 382 mıknatısına, Çizelge 5.9 ve Şekil 5.8 ise Sinomag Br = 393 mıknatısına ait sonuçları göstermektedir. Grafik üzerinde bulunan denklemde x yerine istenilen sıcaklık değeri yerleştirilerek mıknatısın manyetik özelliğinin o sıcaklık değerinde yüzde ne kadar değişime maruz kalacağı hesaplanabilmektedir.

Çizelge 5.8 : Sinomag Br = 382 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları

Sinomag Br = 382								
Ölçüm Sonuçları					% Değişim			
	Br (mT)	Hcb (kA/m)	Hcj (kA/m)	(BH)max (kJ/m3)	Br	Hcb	Hcj	(BH)max
1	369	262,8	269,5	26,1	100	100	100	100
2	368	262,3	269,8	25,9	99,73	99,81	100,11	99,23
3	366	261,9	270,6	25,7	99,19	99,66	100,41	98,47
4	365	261,5	271,8	25,6	98,92	99,51	100,85	98,08
5	361	261,1	272,6	25,4	97,83	99,35	101,15	97,32

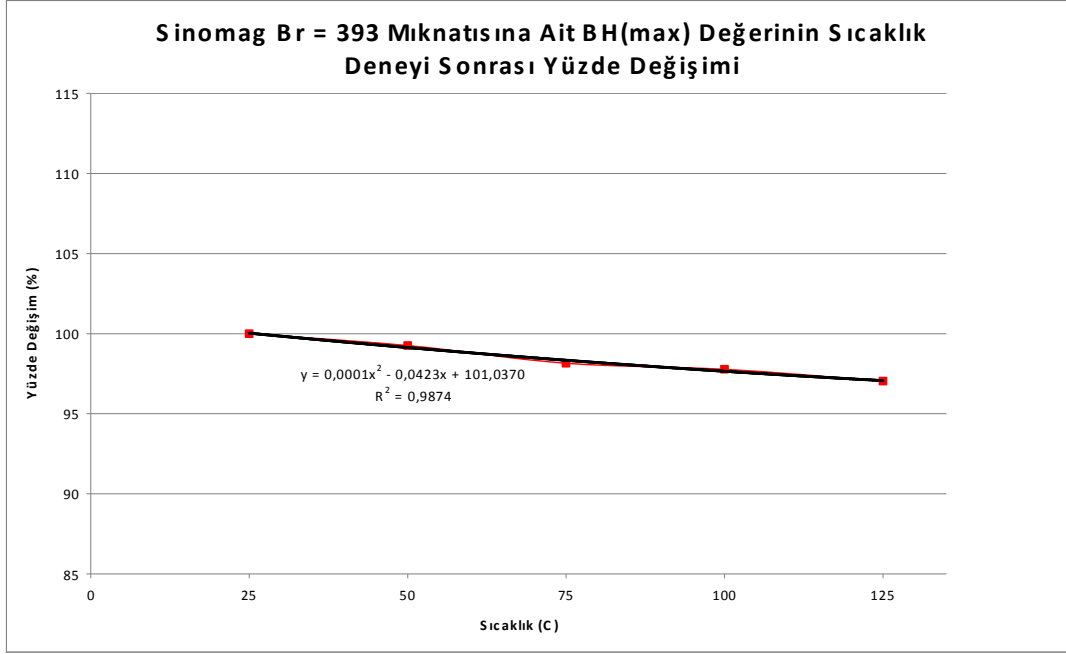


Şekil 5.7 : Sinomag Br = 382 mıknatısına ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği

Literatürde ferritlerde sıcaklık artışı oldukça B_r değerinin azalacağı ve H_{cJ} değerinin artacağından söz edilmektedir [25]. Sonuçlardan görüldüğü üzere sıcaklık etkisiyle ferrit mıknatısların artık mıknatıslanma değerinde kayıpların olduğu ve koersivite değerinde de artışlar yaşandığı görülmektedir. Genel olarak sıcaklık etkisiyle manyetik özelliklerde çok fazla bir kaybın yaşanmadığı görülmektedir.

Çizelge 5.9 : Sinomag Br = 393 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları

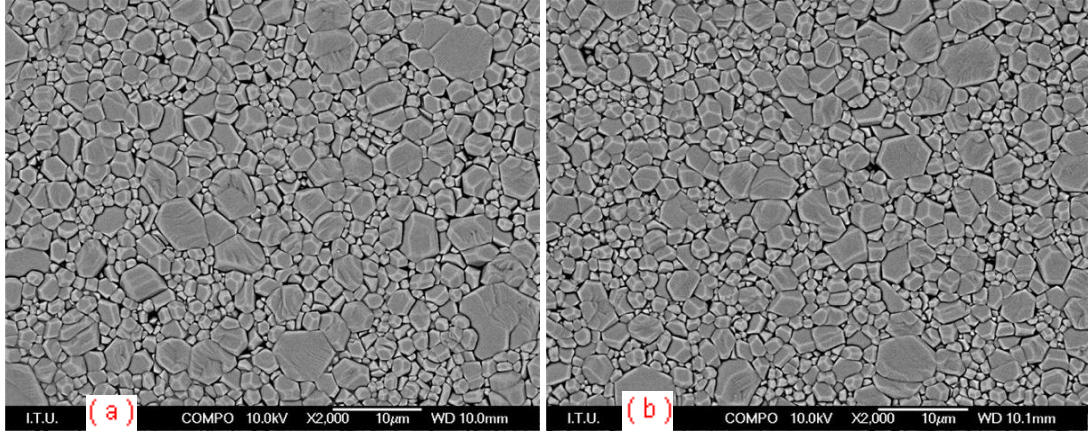
Sinomag Br = 393								
Ölçüm Sonuçları					% Değişim			
	Br (mT)	Hcb (kA/m)	Hcj (kA/m)	(BH)max (kJ/m3)	Br	Hcb	Hcj	(BH)max
1	376	274,2	284	27	100	100	100	100
2	375	273,8	286,1	26,8	99,73	99,85	100,74	99,26
3	372	273,2	286,8	26,5	98,94	99,64	100,99	98,15
4	369	272,9	287,3	26,4	98,14	99,53	101,16	97,78
5	365	272,1	288,1	26,2	97,07	99,23	101,44	97,04



Şekil 5.8 : Sinomag Br = 393 mıknatısına ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği

Sinomag Br = 393 mıknatısında da diğerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Koersivite değerinde artış olurken artık mıknatıslanma değerinde düşüş meydana gelmiştir. Daha önce yapılan Curie sıcaklık analizi sonuçlarında bu iki mıknatısın sahip oldukları sıcaklık değerlerinin birbirlerine çok yakın oldukları belirlenmişti. Bunun sonucu olarak her iki mıknatısın da sıcaklık artışıyla gösterdikleri manyetik kayıplar birbirlerine oldukça yakın olmaktadır.

Bu işlemin mıknatısın mikro yapısında ne gibi etkiler yarattığını gözlemlemek amacıyla deneye tabi tutulan mıknatısların mikro yapı analizleri yapılmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 : (a) Sinomag Br = 382 mıknatısı ait ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) Sinomag Br = 393 mıknatısı ait ikincil elektron görüntüsü (SEI)

Mikro yapılar üzerinden yapılan tane boyutu analiz sonuçlarında, Sinomag Br = 382 mıknatısının ortalama tane boyutu 1,383 μm olarak ölçülmüştür. Buna göre işlem öncesi sahip olduğu ortalama tane boyutuna göre %13 azalma olduğu söylenebilir. Sinomag Br = 393 mıknatısının ortalama tane boyutu ise 1,287 μm olarak ölçülmüştür. Bu mıknatıda ise ortalama tane boyutunda %14 azalma meydana gelmiştir. Normalde malzemelerde sıcaklığın etkisiyle tane boyutlarında büyümelerin gerçekleşmesi beklenmektedir. Ancak burada elde edilen sonuçlarda bunun aksine küçülmelerin olduğu gözlenmiştir. Bunda etkin faktörün daha önce yapıda bulunan kararsız yapılar olduğu düşünülmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bu yapıların kararlı hale gelip tane oluşturmalarıyla ortalama tane boyutunda azalma olabileceği düşünülmektedir. Bu durumun manyetik özelliklerde yüksek oranda kayıpların yaşanmamasında etkili olması beklenmektedir. Ayrıca literatürde ferrit mıknatıslarda tane boyutunda ufalma oldukça koersivite (H_{cJ}) değerinde artış olacağından söz edilmektedir [33]. Buna göre mıknatıslarda meydana gelen bu artışta tane ufalmaları etkili olmakta şeklinde yorumlanabilmektedir.

Yapılan faz analizleri sonucunda ana fazların oranlarında az miktarda azalma olduğu görülmüştür. Bu durumun mıknatısların koersiviteleri artarken diğer manyetik özelliklerinde meydana gelen düşüşlerin nedeni olabileceği beklenmektedir.

Mıknatısların sıcaklık etkisiyle manyetik özelliklerinde meydana gelen değişimin o mıknatısın B_r ve H_{cJ} sıcaklık katsayılarıyla da ilişkili olduğu bilinmektedir. Bu katsayıları belirlemek için oda sıcaklığından mıknatısın çalışma ortamının çıkabileceği maksimum sıcaklık değeri aralığında manyetik özelliklerinin ölçülmesi sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10'da verilmektedir.

Çizelge 5.10 : Ferrit mıknatıslara ait sıcaklık – manyetik özellik değişim sonuçları

Sıcaklık (°C)	Sinomag Br = 382		Sinomag Br = 393	
	B _r (mT)	H _{cJ} (kA/m)	B _r (mT)	H _{cJ} (kA/m)
20	406	286,5	507	272
40	389	302,5	491	285,8
60	389	320,9	466	307,5
80	374	343,1	465	321,9
100	358	364,5	445	339,5
120	343	384,5	419	354,8

Yapılan ölçümler sonucunda 20⁰C ile 120⁰C sıcaklıkları sınır değerler kabul ederek (4.3) ve (4.4) formüllerinde istenen değerler yerine konulduğunda ferrit mıknatısların sahip oldukları katsayı değerleri Çizelge 5.11’deki gibi olmaktadır.

Çizelge 5.11 : Ferrit mıknatısların sahip oldukları sıcaklık katsayıları

	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	$\beta/^\circ\text{C}^{-1}$
Sinomag Br = 382	-0,16	0,34
Sinomag Br = 393	-0,17	0,30

Hesaplanan bu değerler literatürde verilen aralıklar dahilinde bulunmaktadır [26]. Her iki mıknatısın sıcaklık etkisiyle gösterecekleri manyetik değişimlerin birbirlerine benzer olacağı bu sonuçlar ile de desteklenmektedir.

5.1.7 Ferrit mıknatıslar genel değerlendirme

Her iki mıknatısın da sahip olduğu kimyasal bileşim değerleri birbirlerinden farklılık göstermemektedir. Bundan dolayı üretici firmanın bu mıknatısları üretirken manyetik özellikte farklılık ortaya çıkarmak için kimyasal bileşimi kullanmadığını söylemek mümkün olmaktadır.

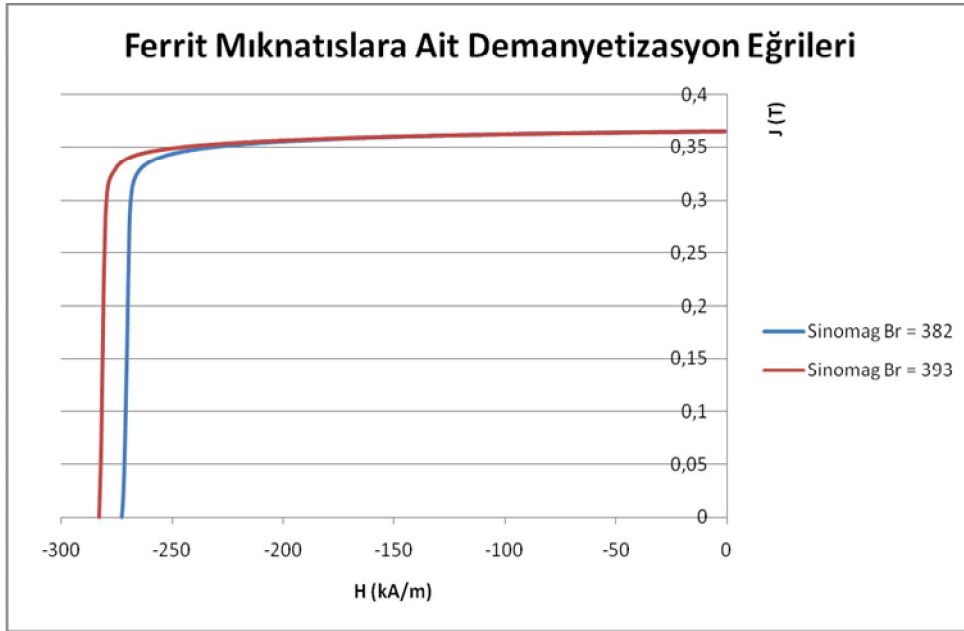
Faz analizleri göz önüne alındığı takdirde ise Sinomag Br = 382 mıknatısında ana fazın haricindeki fazlardan en fazla yüzdeye sahip olan fazın %5,90 ile CaFe₄O₇ fazı olduğu görülmektedir. Bu fazın literatürde antiferromanyetik faz olduğu belirtilmektedir. Sinomag Br = 393 mıknatısında ise ana faza katkıda bulunan en etkili faz SrAlFe₁₁O₁₉ olmaktadır. Literatürde bu faz oluşumu ile koersivitede artış sağlandığı belirtilmektedir. Bu faz farklılığının oluşmasında üretim aşamasının yeterli derecede kontrollü yapılmamasının etkisi olabileceği ya da farklı özelliklere sahip iki tür mıknatıs üretmek amacıyla bilinçli olarak da yapılabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Mikro yapı incelemeleri göz önüne alındığında da manyetik özelliği yüksek olan mıknatısın sahip olduğu ortalama tane boyutunun daha küçük olduğunu söylemek mümkün olmaktadır. Literatürde mıknatısların iyi birer manyetik özelliklere sahip olması için 1 μm 'ye olabildiğince yakın tane boyutuna ve homojen bir tane dağılımına sahip olmaları gerektiğinden söz edilmektedir. Bu sayede de daha iyi manyetik özellik elde edilmiş olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Mıknatısların sıcaklık ile gösterdikleri davranışları göz önüne aldığımızda etkili olarak sayılan bazı faktörler bulunmaktadır. Bunları içsel manyetik iletkenlik katsayısı (P_{ci}), mıknatısın koersivitesi, uygulanan sıcaklık, koersivite sıcaklık katsayısı, hızlı yapısal bozunmalar ve demanyetizasyon eğrileri şeklinde sıralamak mümkün olmaktadır [30].

Bu mıknatıslar bu faktörler açısından değerlendirildiğinde;

- Mıknatısların boyutları aynı olduğundan dolayı içsel manyetik iletkenlik katsayısının etkisi ortadan kalkmaktadır.
- Koersivite değerlerine baktığımızda ise Sinomag Br = 393 mıknatısının sahip olduğu koersivite değerinin (H_{cj}) daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna göre daha yüksek sıcaklıklarda bu mıknatısın göstereceği dayanımın daha iyi olması beklenmektedir.
- Mıknatısların maruz kaldığı sıcaklık değerleri birbirlerine eşit olmaktadır.
- Koersivite sıcaklık katsayıları açısından her iki mıknatısın da sahip olduğu değerler literatürde belirtilen sınırlar dahilinde olmaktadır.
- Yapısal bozunmalar açısından her iki mıknatısın tane boyutlarında küçülme olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu değişimin koersivite artışına neden olduğu düşünülmektedir. Faz yapıları açısından ana faz oranlarında az miktarda azalma görülmektedir.
- Demanyetizasyon eğrileri (Şekil 5.10) göz önüne alındığında iki mıknatısın da dikedörtgenliklerinin benzer olduğu görülmüştür. Ancak Sinomag Br = 393 mıknatısının manyetik özellikleri daha yüksek olduğu için daha geniş bir eğrisi bulunmaktadır [1].



Şekil 5.10 : Ferrit mıknatıslara ait demanyetizasyon eğrileri

Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında ferrit mıknatısların belirli seviyelerde yüksek sıcaklıklarda kullanılması durumunda manyetik özelliklerinde kritik sayılabilecek düşüşlerin gerçekleşmeyeceğini söylemek mümkün olmaktadır.

5.2 NdFeB Mıknatıslar

Karakterize edilen NdFeB mıknatıslar Sinomag ve One Magnet firmasına ait aynı sınıflandırmaya sahip (N40) mıknatıslar olmaktadır. Çizelge 5.12’de analizleri yapılan NdFeB mıknatıslara ait bilgiler verilmektedir.

Çizelge 5.12 : Analizleri yapılan NdFeB mıknatıslar

Mıknatıs adı	Talimatlardaki manyetik özellikler					Foto	Boyutlar (EnxBoyxKalınlık)	Firma
Sinomag N40	Numune	Br(mT)	Hcb(kA/m)	Hcj(kA/m)	(BH)max (kJ/m ³)		20 x 40 x 4 (mm)	Sinomag
	Sinomag N40	1250-1280	923	955	318-342			
One Magnet N40	Numune	Br(mT)	Hcb(kA/m)	Hcj(kA/m)	(BH)max (kJ/m ³)		20 x 40 x 4 (mm)	One Magnet
	One Magnet N40	1250-1280	>907	>955	302-326			

5.2.1 X-ışınları flüoresans analizi sonuçları

REFeB mıknatıs alaşımlarında temel bileşim $RE_2Fe_{14}B$ olmaktadır. RE elementi esas olarak neodmiyum (Nd) olmaktadır, ancak buna prasedmiyum (Pr) veya disporsiyum (Dy) veya başka nadir toprak elementleri ilave olabilmekte ya da yer değiştirebilmektedir. Demirin yerini bazı durumlarda kobalt (Co) alabilmektedir. $Nd_2Fe_{14}B$ alaşımı tetragonal kristal yapı oluşturmakta ve yüksek manyetizasyon doygunluğa ve yüksek tek eksenli manyetik kristal anizotropiye sahiptir [13].

NdFeB mıknatısların sahip olduğu kimyasal bileşimleri elde etmek amacıyla yürütülen XRF analizi sonuçları Çizelge 5.13’de belirtildiği gibi olmaktadır.

Çizelge 5.13 : NdFeB mıknatıslara ait kimyasal bileşim değerleri

Element	Numune ve % ağırlık	
	Sinomag N40	One Magnet N40
Fe	64,56	64,53
Nd	24,28	22,73
B	2,6	2,59
Pr	6,05	7,1
Dy	0,95	1,25
Al	0,36	0,38
Si	0,09	0,1
Co	-	0,15
Nb	0,26	0,26
Ho	0,85	0,91

Analiz sonuçlarına göre;

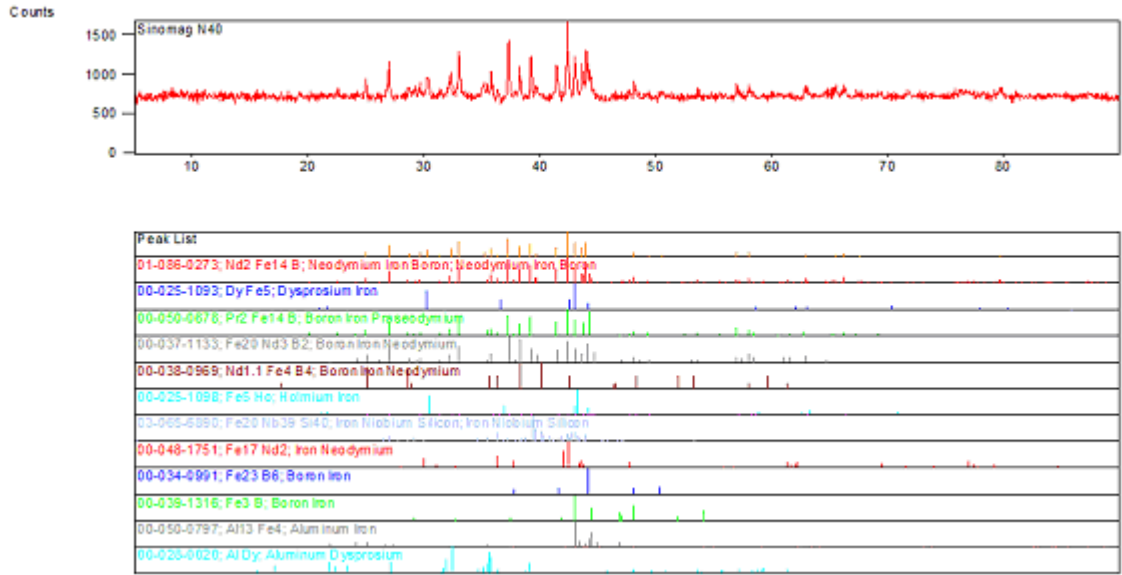
- N40 sınıfına ait NdFeB mıknatısının temel elementleri olan demir (Fe), bor (B) ve neodmiyum (Nd)’un varlıkları tespit edilmiştir. Bu temel elementlere ilave olarak Pr, Dy, Ho, Al ve Nb elementlerinin de dikkate alınabilecek miktarlarda olduğu belirlenmiştir. Bu elementler mıknatısların çeşitli özelliklerini etkileyebilecek bileşikler oluşturan elementler olmaktadır.
- Mıknatısın temel elementleri olan B ve Fe’in % ağırlık miktarlarının her iki mıknatısta da birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Sinomag firmasına ait mıknatısta Nd elementi açısından % ağırlık miktarında yaklaşık % 1,5 gibi bir fazlalık olduğu görülmektedir.

- Her iki mıknatısta ilave edilen elementler açısından Al, Si, Nb ve Ho'un sahip oldukları % ağırlık bileşimlerinin birbirlerine çok yakın değerler olduğu görülmektedir. One Magnet firmasına ait mıknatısta Pr ilave elementinin sahip olduğu % ağırlık miktarı yaklaşık % 1 gibi bir fazlalık göstermektedir. Dy elementi de ağırlıkça % 0,3 fazlalık göstermektedir. Ayrıca bu firmanın sahip olduğu bileşimde bulunan Co elementi Sinomag firmasında bulunmamaktadır.
- Literatürde bu mıknatıs alaşımında nadir toprak elementlerinin ağırlıkça %30 – 35 olduğundan söz edilmektedir [12]. Ayrıca literatürde bu nadir toprak elementlerinin uygun seviyelerde ilave edildiğinde H_{cJ} değerinde artış sağlayacağı ancak aşırı ilave edilmesi durumunda ise B_r değerinde düşüşe neden olacağından söz edilmektedir [16]. Buna göre Sinomag mıknatısında bu değer %32,13 iken One Magnet mıknatısında %31,99 olarak bu sınırlar dahilinde bulunmaktadır.

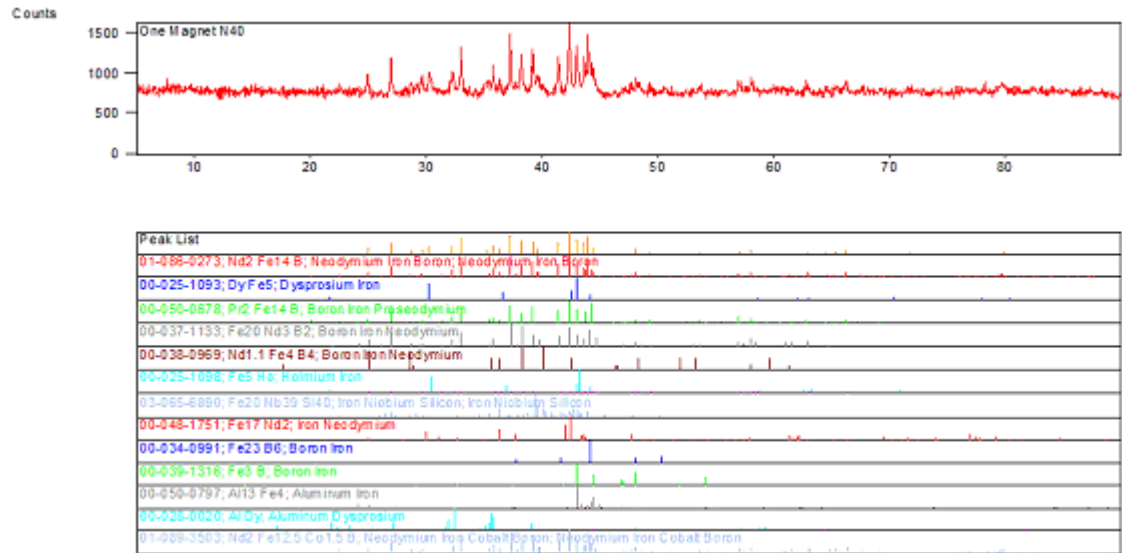
Buna göre aynı sınıflandırmaya sahip mıknatısı üretmek amacıyla her iki firmanın da genel olarak benzer alaşım elementleri kullandığını söylemek mümkün olmaktadır. Bu elementlerden bazılarının sahip olduğu % ağırlık değerleri üretici bazında farklılıklar göstermektedir. Bu kullanım oranlarının yarattığı farklılıkları incelemek amacıyla faz analizleri yapmak gerekmektedir.

5.2.2 X-ışınları difraksiyon analizi sonuçları

Karakterize edilen mıknatısların analizi sonucunda elde edilen pikler ve sonuçları aşağıda Şekil 5.11 ve 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : Sinomag N40 mıknatısına ait XRD sonuçları



Şekil 5.12 : One Magnet N40 mıknatısına ait XRD sonuçları

Elde edilen analiz sonuçlarına göre;

- Her iki mıknatısın da ana fazlarının Nd₂Fe₁₄B olduğu görülmektedir.
- Her iki mıknatısta da bulunan fazlar ise PrFe₁₄B, Nd_{1.1}Fe₄B₄, Nd₃Fe₂₀B₂, Nd₂Fe₁₇, DyFe₅, Fe₃B, Fe₂₃B₆, Fe₂₀Nb₃₉Si₄₀, FeHo₅, AlDy, Al₁₃Fe₄ şeklinde sıralanmaktadır.
- One Magnet mıknatısında farklı olarak Nd₂Fe_{12.5}Co_{1.5}B fazı bulunmaktadır.

Çizelge 5.14 : NdFeB mıknatısların sahip olduğu faz yüzdeleri

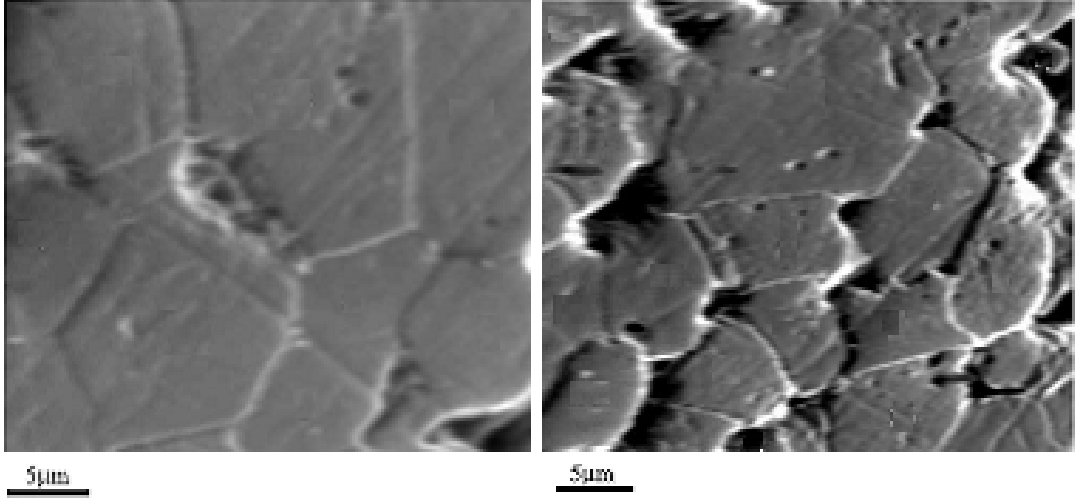
	Fazlar	%Faz		Fazlar	%Faz
Sinomag N40	Nd ₂ Fe ₁₄ B	49,06	One Magnet N40	Nd ₂ Fe ₁₄ B	45,85
	DyFe ₅	1,2		DyFe ₅	1,12
	Pr ₂ Fe ₁₄ B	22,92		Pr ₂ Fe ₁₄ B	25,06
	Fe ₃ B	4,05		Fe ₃ B	3,78
	Fe ₂₀ Nb ₃₉ Si ₄₀	0,4		Fe ₂₀ Nb ₃₉ Si ₄₀	0,42
	Fe ₅ Ho	2,22		Fe ₅ Ho	2,45
	Nd _{1,1} Fe ₄ B ₄	3,86		Nd _{1,1} Fe ₄ B ₄	3,62
	Nd ₃ Fe ₂₀ B ₂	3,57		Nd ₃ Fe ₂₀ B ₂	3,34
	Nd ₂ Fe ₁₇	5,62		Nd ₂ Fe ₁₇	5,26
	Fe ₂₃ B ₆	6,12		Fe ₂₃ B ₆	5,74
	Al ₁₃ Fe ₄	0,39		Al ₁₃ Fe ₄	0,37
	AlDy	0,6		AlDy	0,97
				Nd ₂ Fe _{12,5} Co _{1,5} B	1,85
	Toplam	100		Toplam	100

Bu sınıflandırmaya sahip olan mıknatısların faz yüzdeleri Çizelge 5.14’de gösterilmektedir. Genel olarak benzer oranlarda sonuçlar elde edilirken One Magnet firmasında Co elementi varlığından kaynaklanan faz farklılığı oluşmuştur. Yapıya Co ilavesi yapıldığında bu elementin Fe elementinin yerini almaya çalışarak ayrı bir faz oluşturduğunu söylemek mümkün olmaktadır. Yapıya birlikte ilave edilen Dy ve Co elementinin mıknatısın Curie sıcaklığını ve H_{cj} değerini arttırdığı, ayrıca tersinir olmayan kayıpları azalttığı literatürde belirtilmektedir [17]. One Magnet firmasına ait mıknatısta bu elementlerin varlığı diğer firmaya göre daha fazladır, dolayısıyla bunun yaratacağı etkiler ileriki deneylerin sonuçlarında ele alınacaktır.

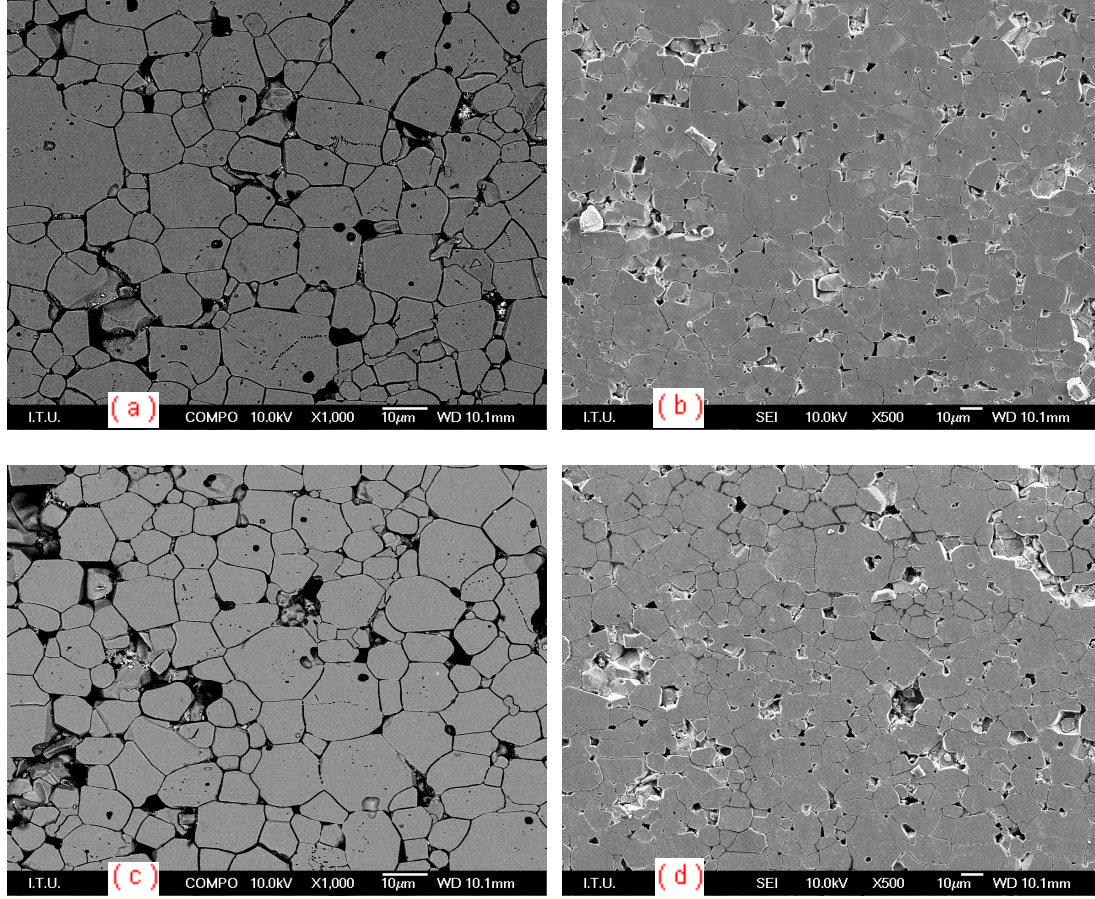
5.2.3 Taramalı elektron mikroskopu ile mikro yapı karakterizasyonu ve tane boyutu analiz sonuçları

Analiz sonucunda elde ettiğimiz mikro yapı görüntülerinde tane sınırlarının net bir şekilde belli olduğu ve tanelerin poligonal bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Tane sınırlarında Nd-ce zengin fazların varlığı gözlenmektedir. Tane sınırlarında var olan bu fazların manyetik özellikleri geliştirdiği bilinmektedir [20]. Ancak tane sınırlarındaki bu fazların miktarı arttıkça korozyon açısından direncin azaldığı literatürde belirtilmektedir. Bu durumu düzeltmek amacıyla tane sınırlarında intermetalik fazların varlığını arttırmak veya bu Nd-ce zengin fazların homojen olarak dağılımını sağlamak önemli olmaktadır.

Mekanik parlatma işlemi boyunca yumuşak tane sınırlarına sahip Nd-ce zengin fazlar mikro yapının bazı bölgelerinden uzaklaştırılmıştır ve bu da numune yüzeyinde çukurcuk oluşumuna sebep olmuştur. Mekanik parlatmayı takiben dağlama uygulanan yapıda Nd-ce zengin fazların bulunduğu tane sınırlarını yok etmektedir (Şekil 5.13). Koyu bölgeler açık bölgelere göre daha çok bor ve daha az demir içermektedir, bu da o bölgelerde borür fazının varlığını göstermektedir [13].



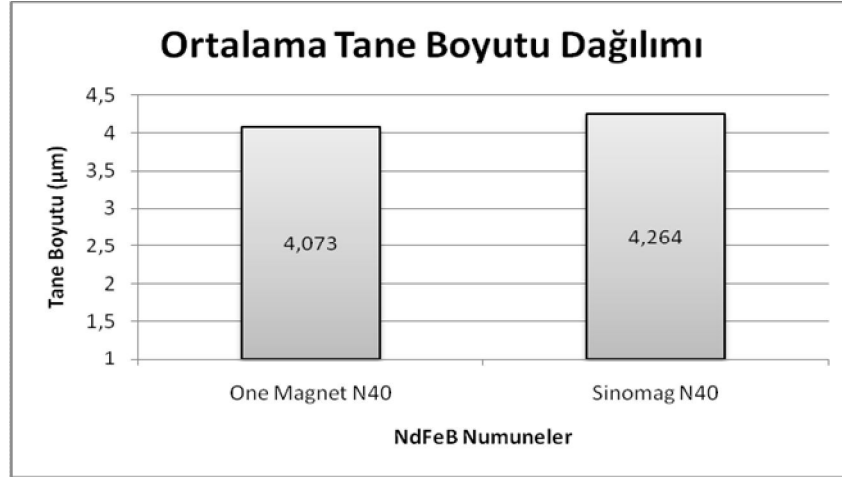
Şekil 5.13 : Mekanik parlatma ve dağlama sonrası kaybolan tane sınırlarına örnek bir mikro yapı [13]



Şekil 5.14 : Sinomag N40 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (a) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO) – One Magnet N40 mıknatısına ait SEM görüntüleri; (c) ikincil elektron görüntüsü (SEI), (d) geri saçılmış elektron görüntüsü (COMPO)

Sinomag N40 mıknatısına ait mikro yapıda tane boyutu hesaplamalarında sahip olduğu ortalama tane boyutu $4,264 \mu\text{m}$ olduğu belirlenmiştir. Tanelerin homojen dağılım göstermekle birlikte büyük tanelerin varlığının olduğu bir mıknatıstır (Şekil 5.14 (a, b)).

One Magnet N40 mıknatısına ait mikro yapıda tane boyutu hesaplamalarında ise bu mıknatısın sahip olduğu ortalama tane boyutunun $4,073 \mu\text{m}$ olduğu belirlenmiştir. Mikro yapı fotoğraflarından da bu mıknatısın tanelerinin daha ufak olduğu görülmektedir (Şekil 5.14 (c, d)).

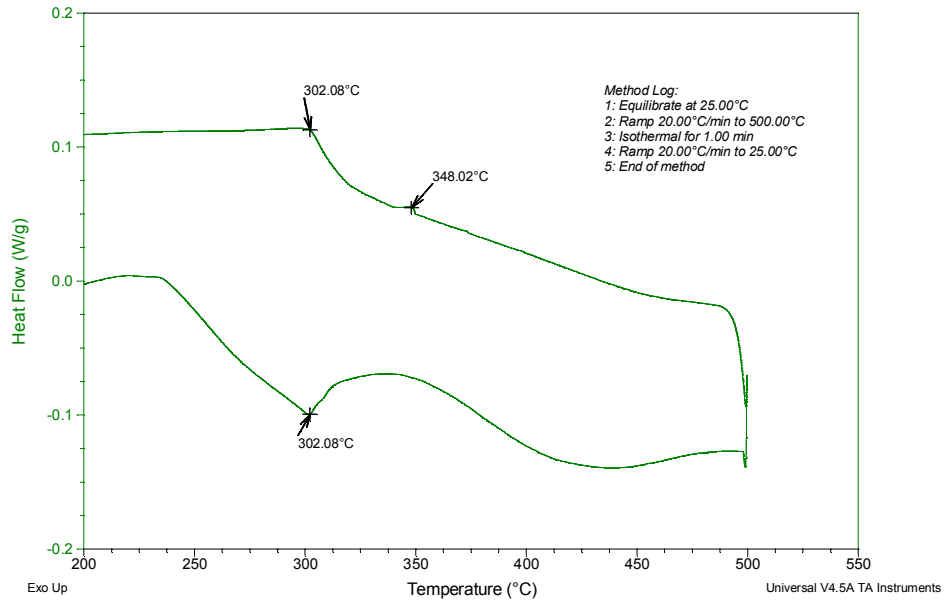


Şekil 5.15 : NdFeB mıknatıslara ait ortalama tane boyutu dağılım grafiği

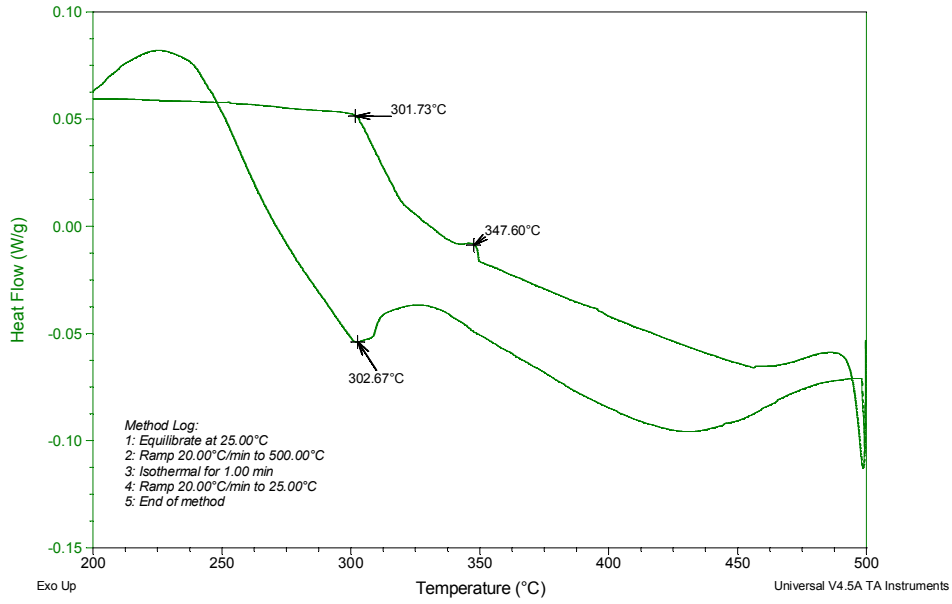
Şekil 5.15’de görüldüğü üzere düşük ortalama tane boyutuna sahip olduğu için One Magnet firmasına ait mıknatısın daha yüksek manyetik özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bu doğrultuda bu mıknatısın manyetik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmektedir.

5.2.4 Curie sıcaklık ölçüm sonuçları

Curie sıcaklıkları malzemenin mikro yapısından etkilenmeyen ve malzemeye özgü olan içsel bir özelliktir [3]. Literatürde NdFeB mıknatısların Curie sıcaklıklarının 310°C olduğundan bahsedilmektedir [12]. Şekil 5.16 ve 5.17’de yapılan analiz sonrası elde edilen sonuçlara ait veriler bulunmaktadır.



Şekil 5.16 : Sinomag N40 mıknatısına ait DSC eğrisi



Şekil 5.17 : One Magnet N40 mıknatısına ait DSC eğrisi

DSC cihazı ile yapılan analizler sonucunda Sinomag N40 mıknatısının Curie sıcaklığı 302⁰C ve One Magnet N40 mıknatısının Curie sıcaklığı 303⁰C olarak ölçülmüştür. Her iki mıknatısın da sahip oldukları Curie sıcaklıklarının birbirlerine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Literatürde belirtilen sıcaklık değerinden daha düşük değerlere sahiptirler. Sahip oldukları değerlerin benzer olması nedeniyle iki mıknatıs arasında Curie sıcaklığı etkisiyle meydana gelebilecek farklılıklardan söz etmek mümkün olmamaktadır.

5.2.5 Yoğunluk ölçüm sonuçları

Bu mıknatıslar için de standartlarda belirtilen değerlere bakılacak olursa;

IEC 60404 – 8 – 1 standardına göre NdFeB mıknatısların yoğunluk değerleri 7,5 g/cm³ ile 7,7 g/cm³ arası değişim göstermektedir.

MMPA 0100 – 00 nolu standarda göre NdFeB mıknatısların yoğunluk değerleri 7,4 g/cm³ civarı olması gerektiği belirtilmektedir.

Analizleri yapılan NdFeB mıknatıslara ait yoğunluk değeri Çizelge 5.15'deki gibidir.

Çizelge 5.15 : NdFeB mıknatıslara ait yoğunluk değerleri

Numune Adı	Ölçülen Yoğunluk Değerleri (g/cm ³)	
	1.analiz	2.analiz
One Magnet N40	7,519	7,524
Sinomag N40	7,514	7,523

Buna göre elde edilen yoğunluk değerleri standartlarda belirtilen aralıklar dâhilindedir. Yoğunluk artışı sağlandıkça korozyona olan dirençte de artış beklenmektedir [34].

5.2.6 Tersinir olmayan kayıp analiz sonuçları ve sıcaklık katsayısı değerleri

Burada da ferrit mıknatıslardaki gibi mıknatısların motor içerisinde çalıştığı ortalama sıcaklık ve üzeri değerlere kadar deney tekrarlanmış ve toplam enerji çarpımında ($BH_{(max)}$) meydana gelen kayıplar hesaplanmıştır. Deneyler için seçilen ölçüm şartları Çizelge 5.16’da gösterilmektedir.

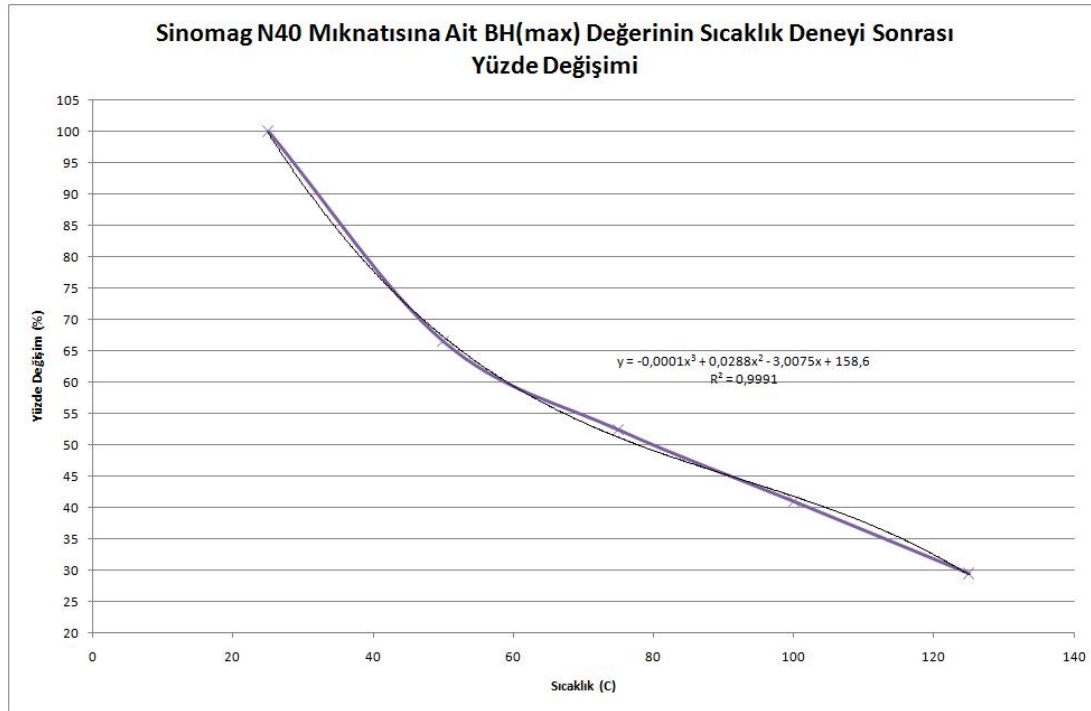
Çizelge 5.16 : NdFeB mıknatıs ölçüm şartları

Ölçüm	Şartlar	
	Sıcaklık (C)	Süre (saat)
1	25	
2	50	1
3	75	1
4	100	1
5	125	1

Deney sonrası elde edilen Sinomag N40 mıknatısına ait ölçüm sonuçları ve grafiği Çizelge 5.17 ve Şekil 5.18’de ve One Magnet N40 mıknatısının ise Çizelge 5.18 ve Şekil 5.19’da verilmektedir. Grafik üzerinde bulunan denklemde x yerine istenilen sıcaklık değeri yerleştirilerek mıknatısın manyetik özelliğinin o sıcaklık değerinde yüzde ne kadar değişime maruz kalacağı hesaplanabilmektedir.

Çizelge 5.17 : Sinomag N40 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları

Sinomag N40								
Ölçüm Sonuçları					% Değişim			
	Br (mT)	Hcb (kA/m)	Hcj (kA/m)	(BH)max (kJ/m3)	Br	Hcb	Hcj	(BH)max
1	1263	920,9	1037	298	100	100	100	100
2	1166	719,7	1028	198	92,32	78,15	99,13	66,44
3	1083	631,9	1024	156,0	85,75	68,62	98,75	52,35
4	1013	539,8	1016	122	80,21	58,62	97,97	40,94
5	919	437,6	1007	87,7	72,76	47,52	97,11	29,43

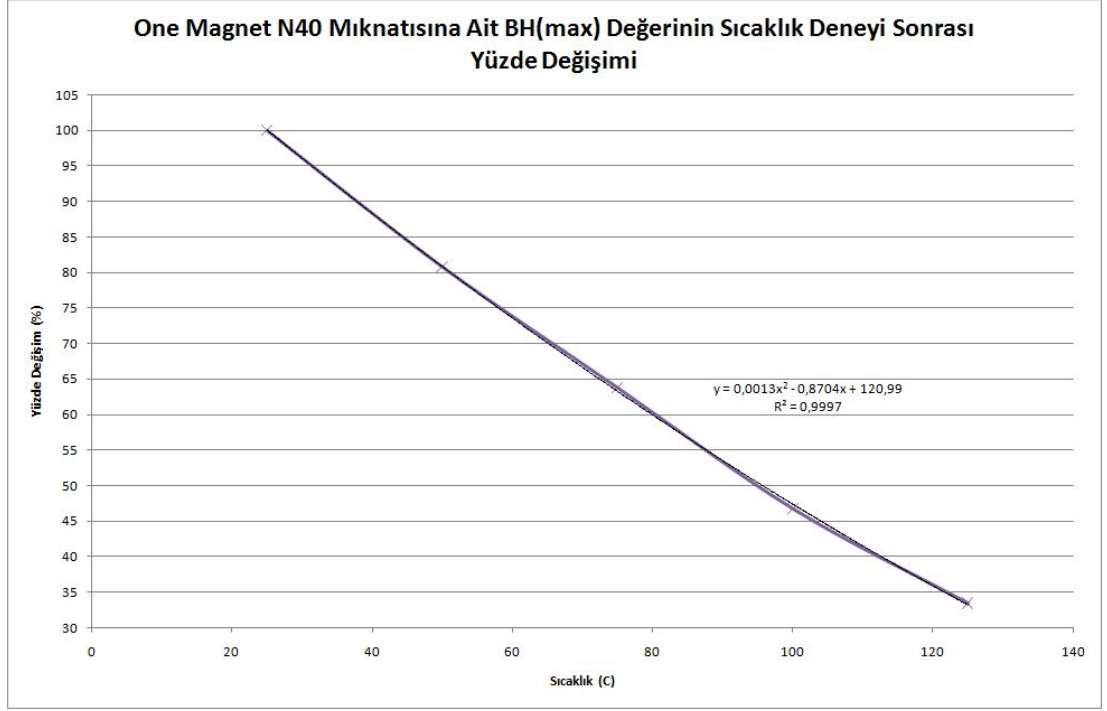


Şekil 5.18 : Sinomag N40 mıknatısına Ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği

NdFeB mıknatısların sıcaklığa karşı dayanımları Curie sıcaklıklarının düşük olması nedeniyle ferrit mıknatıslara göre çok daha düşük olmaktadır. Mıknatısa sıcaklık uygulanmasıyla birlikte B_r değerinde büyük oranlarda kayıplar meydana gelmektedir. H_{cJ} değerindeki kayıplar ise göreceli olarak daha az olmaktadır. Bunun sonucunda mıknatısın sahip olduğu toplam manyetik enerji üretimi kaybı da oldukça fazla olmaktadır [30]. Yapmış olduğumuz çalışmalar sonucunda NdFeB mıknatıslarda literatür bilgileriyle uyuşan sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.18 : One Magnet N40 mıknatısı tersinir olmayan kayıp ölçüm sonuçları

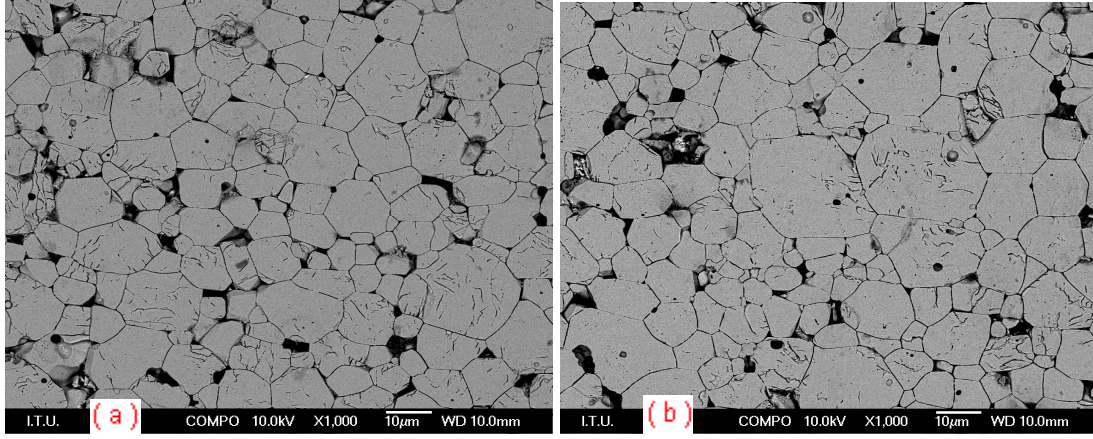
One Magnet N40								
Ölçüm Sonuçları					% Değişim			
	Br (mT)	Hcb (kA/m)	Hcj (kA/m)	(BH)max (kJ/m3)	Br	Hcb	Hcj	(BH)max
1	1290	967	1034	323	100	100	100	100
2	1234	858,8	1027	261	95,66	88,81	99,32	80,80
3	1166	746,2	1020	206,0	90,39	77,17	98,65	63,78
4	1085	611,9	1005	151	84,11	63,28	97,20	46,75
5	984	495,3	995,4	108	76,28	51,22	96,27	33,44



Şekil 5.19 : One Magnet N40 mıknatısına ait BH(max) değerinin sıcaklık deneyi sonrası yüzde değişim grafiği

Sonuçlardan görüldüğü üzere One Magnet N40 mıknatısının manyetik özelliklerinde de sıcaklık etkisiyle oldukça fazla kayıp yaşanmaktadır. Ancak faz analizleri sonucunda da elde edildiği gibi Dy ve Co ilavesinin One Magnet firmasında daha fazla olmasının, bu mıknatısta meydana gelen manyetik kayıpların Sinomag firmasına göre daha az olmasını sağladığı düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen bu deneyin mıknatısın mikro yapısında ne gibi etkiler yarattığını gözlemlemek amacıyla deneye tabi tutulan mıknatısların taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı aracılığıyla tane boyutu analizleri yapılmıştır. Şekil 5.20’de bu iki mıknatısa ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.20 : (a) Sinomag N40 mıknatısı ait ikincil elektron görüntüsü (SEI), (b) One Magnet N40 mıknatısı ait ikincil elektron görüntüsü (SEI)

Mikro yapılar üzerinden yapılan tane boyutu analiz sonuçlarında Sinomag N40 mıknatısının ortalama tane boyutu $4,442 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Buna göre işlem öncesi sahip olduğu ortalama tane boyutuna göre %4,2 büyüme olduğu söylenebilir. One Magnet N40 mıknatısının ortalama tane boyutu ise $4,986 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Bu mıknatısın uygulanan işlem öncesi sahip olduğu ortalama tane boyutuna göre %22 büyüme meydana gelmiştir. NdFeB mıknatıslarda sıcaklık arttıkça ortalama tane boyutunda artış meydana gelmektedir [35]. Manyetik özelliklerde kayıpların oldukça fazla olmasında bunun da bir etkisi olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca literatürde tane boyutu daha küçük olan mıknatısların daha az kayıplar ile karşılaştığı belirtilmektedir [36]. Buna göre One Magnet firmasına ait mıknatısta meydana gelen tane büyümesinin daha fazla olmasına rağmen toplam manyetik özellik kaybının daha az olması, başlangıçta daha ufak ortalama tane boyutuna sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Aynı şekilde mıknatısların faz yapılarında herhangi bir değişiklik olup olmadığını kontrol etmek amacıyla faz analizleri de yapılmıştır. Bu analizler sonucunda her iki mıknatısta da önceki fazlardan farklı olarak Fe_2O_3 fazı tespit edilmiştir. Dolayısıyla mıknatısların sahip oldukları faz oranlarında değişimler meydana gelmiştir. Burada dikkati çeken bir diğer unsur ise borlu fazların (Fe_{23}B_6 , Fe_3B) oranlarında artış olmasıdır. Bu fazların manyetizasyonu yüksek yumuşak manyetik fazlar olduğu bilinmektedir [37].

NdFeB mıknatıslarına ait B_r ve H_{cJ} sıcaklık katsayılarıyla ilgili deney sonuçları Çizelge 5.19’da gösterilmektedir.

Çizelge 5.19 : NdFeB mıknatıslara ait sıcaklık – manyetik özellik değişim sonuçları

Sıcaklık (°C)	Sinomag N40		One magnet N40	
	Br (mT)	Hcj (kA/m)	Br (mT)	Hcj (kA/m)
20	1206	511	1259	517,5
40	1185	511,5	1254	519,1
60	1161	510,3	1254	519,1
80	1123	430,2	1198	462,9
100	1048	311,7	1103	333,7
120	976	216,6	1044	224,1

Yapılan ölçümler sonucunda 20⁰C ile 120⁰C sıcaklıkları sınır değerler kabul ederek (4.3) ve (4.4) formüllerinde istenen değerler yerine konulduğunda mıknatısların sahip oldukları katsayı değerleri Çizelge 5.20'deki gibi olmaktadır.

Çizelge 5.20 : NdFeB mıknatısların sıcaklık katsayıları

	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	$\beta/^\circ\text{C}^{-1}$
Sinomag N40	-0,19	-0,57
One Magnet N40	-0,17	-0,57

Elde edilen değerler literatürde belirtilen aralıklarda bulunmaktadır [26]. One Magnet firmasına ait mıknatısın B_r ve H_{cj} değerindeki kayıpların daha önce yapılan deney sonuçlarında daha az olduğu belirlenmişti. Yukarıda elde edilen katsayı sonuçlarına göre de özellikle B_r için bu durum doğrulanmaktadır.

5.2.7 NdFeB mıknatıslar genel değerlendirme

Her iki mıknatısın da sahip olduğu kimyasal bileşim değerleri birbirlerinden bazı elementlerde farklılık göstermektedir. One Magnet firmasına ait mıknatısta Co, Dy ve Pr elementleri ağırlıkça daha fazla miktarlarda olmaktadır. Bundan dolayı üretici firmaların bu mıknatısları üretirken kullandıkları bileşimlerin manyetik özellikler üzerinde etkilerinin olduğunu söylemek mümkün olmaktadır.

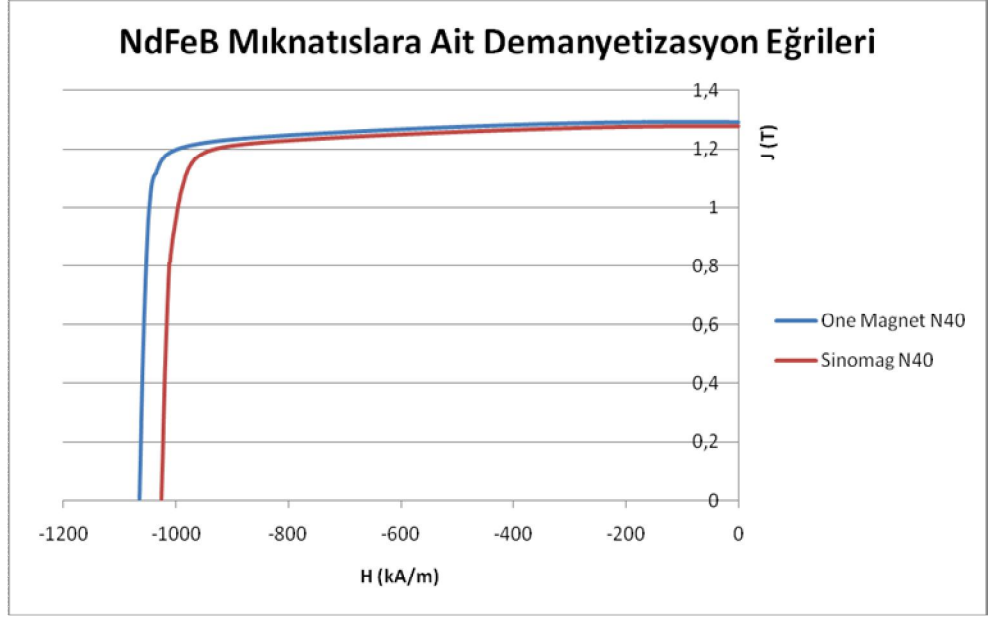
Faz analizleri göz önüne alındığında ise genel olarak aynı fazların bulunduğu görülmektedir. Ancak One Magnet mıknatısında diğer mıknatıstan farklı olarak $\text{Nd}_2\text{Fe}_{12,5}\text{Co}_{1,5}\text{B}$ fazı bulunmaktadır. Bu fazın da manyetik özellikler üzerinde olumlu etkilerinin bulunduğu bilinmektedir.

Mikro yapı incelemeleri göz önüne alındığında da manyetik özelliği kısmen daha yüksek olan One Magnet N40 mıknatısının sahip olduğu ortalama tane boyutunun daha küçük olduğunu söylemek mümkün olmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe manyetik özelliklerin iyileştiği daha önce de belirtilmiştir.

Mıknatısların sıcaklık ile gösterdikleri davranışları göz önüne aldığımızda etkili olarak sayılan bazı faktörler bulunduğundan ferrit mıknatıslarda belirmiştik.

Bu mıknatısları bu faktörler açısından karşılaştıracak olursak;

- Mıknatısların boyutları aynı olduklarından dolayı içsel manyetik iletkenlik katsayısının etkisi ortadan kalkmaktadır.
- Koersivite değerleri de birbirlerine eş olmaktadır.
- Mıknatısların maruz kaldığı sıcaklık değerleri birbirlerine eşit olmaktadır.
- Koersivite sıcaklık katsayıları açısından da tüm değerler eşit olmaktadır. Literatürde [26] belirtilen değerler aralığında bulunmaktadır.
- Yapısal bozunmalar açısından her iki mıknatısın tane boyutlarında büyüme olduğu görülmektedir. Faz yapıları açısından da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ferromanyetikliği zayıf olan Fe_2O_3 fazının oluşmasının özelliklerin kayba uğramasında etkilerinin olduğu düşünülmektedir.
- Demanyetizasyon eğrilerine (Şekil 5.21) bakıldığında normal şartlarda aynı sınıflandırmaya sahip olmalarına karşın manyetik özelliklerinde farklılık olduğu buradan da görülmektedir. One Magnet N40 mıknatısının daha geniş demanyetizasyon eğrisinin bulunduğu belirlenmiştir. Bunun etkisiyle de bu mıknatısın yüksek sıcaklığa karşı dayanımının Sinomag N40 mıknatısına göre daha iyi olacağını söylemek mümkün olmaktadır [30].



Şekil 5.21 : NdFeB mıknatıslara ait demanyetizasyon eğrisi

Buna göre bu mıknatıslarda sıcaklık etkisiyle meydana gelen kayıplarda etkin faktörlerin ilave elementlerin etkisiyle oluşan fazlar ve tane boyutları olduğunu söylemek mümkün olmaktadır. Yüksek sıcaklık davranışını iyileştirici yönde etkisi olan elementlerin (Co gibi) oluşturdukları fazların özelliklerde meydana gelen düşüşlerin daha az olmasını sağladığını söylemek mümkün olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça tane boyutunun da artmasıyla manyetik özelliklerin düştüğünü söylemek mümkün olmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar sert ferrit mıknatıslar ve NdFeB mıknatıslar olmak üzere sırasıyla aşağıda verilmektedir.

✓ Sert ferrit mıknatıs yapılarında bulunan elementlerin mıknatısın ne gibi özelliklerine etki ettiğini maddeler halinde sıralanacak olursa;

- 2 farklı mıknatıs kalitesini oluşturan temel elementlerinin demir (Fe) ve stronsiyum (Sr) olduğu görülmüştür. Bu elementlere ilave olarak Ca, Ba, Cr, Si, Al ve Mn elementlerinin de dikkate alınabilecek miktarlarda olduğu belirlenmiştir. Buna göre kullanılan tüm ferrit mıknatıslar $MO.6Fe_2O_3$ formunda yer alan M elementi Sr'dir. Diğer elementler ise mıknatısların çeşitli özelliklerini etkileyebilecek bileşikleri oluşturan azınlık miktardaki elementlerdir.

- Mıknatısın temel elementleri olan Sr ve Fe'nin % ağırlık miktarlarının her iki mıknatısta da birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

✓ Yapılan faz analizlerinde tüm sert ferrit mıknatıslarda ana fazın $SrFe_{12}O_{19}$ olduğu görülmektedir. Stronsiyum sert ferritlerin tümünde bu faz temel faz olmaktadır.

- Her iki mıknatısta da bulunan fazlar ise $SrCrFe_{11}O_{19}$, $SrAlFe_{11}O_{19}$, $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{11}O_{19}$, Fe_3O_4 , MnO_2 , SiO_2 , $CaFe(Si_2O_6)$, SrO şeklinde sıralanmaktadır.

- Sinomag Br = 382 mıknatısında diğer mıknatıstan farklı olarak Al_2O_3 ve $CaFe_4O_7$ fazları bulunurken, Sinomag Br = 393 mıknatısında ise Fe_2O_3 ve CaO_2 fazları farklılık göstermektedir.

- Sinomag Br = 382 mıknaatısında ana fazın haricindeki fazlardan en fazla yüzdeye sahip olan fazın %5,90 ile CaFe_4O_7 fazı olduğu görölmektedir. Bu fazın literatürde antiferromanyetik faz olduğu belirtilmektedir. Buna göre bu fazın mıknaatısın manyetik özelliklerini kötü yönde etkileyebileceğini söylemek mümkün olmaktadır.

- Sinomag Br = 393 mıknaatısında ise ana faza katkıda bulunan en etkili faz $\text{SrAlFe}_{11}\text{O}_{19}$ olmaktadır. Literatürde bu faz oluşumu ile koersivitede artış sağlandığı belirtilmektedir.

✓ Mikro yapıların ve tane boyutunun mıknaatıslar üzerinde manyetik açıdan etkileri bulunmaktadır.

- Br = 393 kodlu mıknaatısın ortalama tane boyutu değeri Br = 382 kodlu mıknaatıstan daha düşüktür. Dolayısıyla düşük ortalama tane boyutuna sahip olduğu için bu mıknaatısın daha yüksek manyetik özelliklere sahip olması beklenmelidir ki bu doğru bir yaklaşımdır ve bu mıknaatısın manyetik özelliklerinin daha iyi olduğu görölmektedir. Küçük taneli yapıya sahip numunelerin koersiviteleri iri taneli yapıya sahip numunelere göre belirgin şekilde daha yüksek olmaktadır. Bu yüzden ideal tane boyutu olarak $1\mu\text{m}$ 'ye olabildiğince yakın boyutlar elde etmek önemli olmaktadır.

✓ DSC cihazı ile yapılan analizler sonucunda Sinomag Br = 382 mıknaatısının Curie sıcaklığı 443°C ve Sinomag Br = 393 mıknaatısının Curie sıcaklığı 446°C olarak ölçölmüştür.

✓ Tüm ferrit mıknaatıslar standartlarda belirtilen yoğunluk aralıkları dâhilinde değerlere sahiptirler. ASTM A1054 standardında kabul edilebilir maksimum porozite %5 olarak belirtilmiştir. Mıknaatıslarda porozite miktarı %0,095'in üstüne çıkmamaktadır.

✓ Sıcaklık etkisiyle ferrit mıknaatısların manyetik özelliklerinde çok fazla kayıp yaşanmamaktadır. Hatta sıcaklık artışı oldukça koersivite kuvveti değeri de artışlar yaşandığı görölmektedir.

✓ NdFeB mıknaatıs yapılarında bulunan elementlerin mıknaatısın ne gibi özelliklerine etki ettiğini maddeler halinde sıralanacak olursa;

- N40 sınıfına ait NdFeB mıknatısının temel elementleri olan demir (Fe), bor (B) ve neodmiyum (Nd)'un varlıkları tespit edilmiştir. Bu temel elementlere ilave olarak Pr, Dy, Ho, Al ve Nb elementlerinin de dikkate alınabilecek miktarlarda olduğu belirlenmiştir. Bu elementler mıknatısların çeşitli özelliklerini etkileyebilecek bileşikleri oluşturan elementler olmaktadır.
 - Mıknatısın temel elementleri olan B ve Fe'in % ağırlık miktarlarının her iki mıknatısta da birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Sinomag firmasına ait mıknatısta Nd elementi açısından % ağırlık miktarında yaklaşık % 1,5 gibi bir fazlalık olduğu görülmektedir.
 - Her iki mıknatısta ilave edilen elementler açısından Al, Si, Nb ve Ho'nun sahip oldukları % ağırlık bileşimlerinin birbirlerine çok yakın değerler olduğu görülmektedir. One Magnet firmasına ait mıknatısta Pr ilave elementinin sahip olduğu % ağırlık miktarı yaklaşık % 1 gibi bir fazlalık göstermektedir. Dy elementi de ağırlıkça % 0,3 fazlalık göstermektedir. Ayrıca bu firmanın sahip olduğu bileşimde bulunan Co elementi Sinomag firmasında bulunmamaktadır. Yapıya birlikte ilave edilen Dy ve Co elementinin mıknatısın Curie sıcaklığını ve H_{cj} değerini arttırdığı, ayrıca tersinir olmayan kayıpları azalttığı literatürde belirtilmektedir
- ✓ Nd-Fe-B mıknatısları tipik olarak mıknatıs özelliklerini belirleyen 3 faz içermektedir. Hacmin büyük bir kısmını rasgele borür fazında taneler içeren ferromanyetik Nd₂Fe₁₄B fazı ve Nd-ce zengin tane sınırları kapsamaktadır. Bu alaşımda var olan diğer fazlar kısmi kompozisyona göre değişim göstermektedir.
- Her iki mıknatısın da ana fazlarının Nd₂Fe₁₄B olduğu görülmektedir.
 - Her iki mıknatısta da bulunan fazlar ise Pr₂Fe₁₄B, Nd_{1,1}Fe₄B₄, Nd₃Fe₂₀B₂, Nd₂Fe₁₇, DyFe₅, Fe₃B, Fe₂₃B₆, Fe₂₀Nb₃₉Si₄₀, FeHo₅, AlDy, Al₁₃Fe₄ şeklinde sıralanmaktadır.
 - One Magnet mıknatısında diğer mıknatıstan farklı olarak Nd₂Fe_{12,5}Co_{1,5}B fazı bulunmaktadır. Sinomag N40 mıknatısında ise farklı bir faz tespit edilmemiştir.

✓ Analiz sonucunda elde ettiğimiz mikro yapı görüntülerinde tane sınırlarının net bir şekilde belli olduğu ve tanelerin poligonal bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Tane sınırlarında Nd-ce zengin fazların varlığı görülmektedir. Tane sınırlarında var olan bu fazların manyetik özellikleri geliştirdiği bilinmektedir. Ancak tane sınırlarındaki bu fazların miktarı arttıkça korozyon açısından direncin azaldığı literatürde belirtilmektedir. Bu durumu düzeltmek amacıyla tane sınırlarında intermetalik fazların varlığını arttırmak veya bu Nd-ce zengin fazların homojen olarak dağılımını sağlamak önemli olmaktadır. Bazı durumlarda ise taneler üzerinde var olan farklı fazların renk değişimi yarattığı görülmektedir.

✓ Daha büyük tanelere sahip olan yapılarda koersivite daha düşük olmaktadır. Daha az homojen mikro yapıya sahip olan mıknatısların demanyetizasyon eğrileri daha kötü bir dikdörtgenliğe sahip olduklarından demanyetizasyon prosesinde daha kolay demanyetize olmaktadır. Bu büyük taneli yapılarda yüzey alanı da arttığından dolayı korozyona olan direnç de azalmaktadır

- Sinomag N40 mıknatısına ait mikro yapıda tane boyutu hesaplamalarında sahip olduğu ortalama tane boyutu 4,264 μm olduğu belirlenmiştir. Tanelerin homojen dağılım gösterdiği ancak büyük tanelerin varlığının olduğu bir mıknatıstır.

- One Magnet N40 mıknatısına ait mikro yapıda tane boyutu hesaplamalarında ise bu mıknatısın sahip olduğu ortalama tane boyutunun 4,073 μm olduğu belirlenmiştir.

✓ DSC cihazı ile yapılan analizler sonucunda Sinomag N40 mıknatısının Curie sıcaklığı 302°C ve One Magnet N40 mıknatısının Curie sıcaklığı 303°C olarak ölçülmüştür.

✓ Tüm NdFeB mıknatıslar standartlarda belirtilen yoğunluk aralıkları dâhilinde değerlere sahiptirler.

✓ NdFeB mıknatısların manyetik özelliklerinde sıcaklık etkisiyle oldukça fazla kayıp yaşanmaktadır. Ancak faz analizleri sonucunda da söylediğimiz gibi Co ilavesi bulunan One Magnet firmasına ait mıknatısta meydana gelen kayıpların Sinomag firmasına göre daha az olduğu görülmektedir. NdFeB mıknatıslarda sıcaklık arttıkça ortalama tane boyutunda büyümelerin meydana geldiği söylenebilmektedir. Bunun etkisiyle de manyetik özelliklerde kayıpların oldukça fazla olduğunu söylemek mümkün olabilmektedir. Ayrıca yapıda ferromanyetikliği zayıf olan Fe_2O_3 fazının da oluştuğu görülmektedir.

6.2 Öneriler

Genel olarak motorlarda kullanılan sert ferrit ve NdFeB mıknatıslar ile ilgili bu çalışmanın ardından aşağıda sıralanan çalışmaların yapılması önerilmektedir.

- ✓ Motorlarda kullanmak üzere seçilecek olan mıknatısın kabul edilmesinden önce, çalışmada bahsedilen karakterizasyon analizlerinin yapılarak tanımlanması ve yüksek sıcaklıklardaki davranışlarının incelenmesi ileride yaşanabilecek sorunların önüne geçilmesinde etkili olacaktır.
- ✓ NdFeB esaslı mıknatısların kullanımında karşılaşılan en büyük sorunlardan olan düşük korozyon direncinin nedenlerinin araştırılması ve geliştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmesi performans artışı açısından faydalı olacaktır.
- ✓ Yapılan araştırmalar sırasında karşılaşılan motor tasarımlarında boyutsal, termal kararlılık gibi avantajlar sağlaması açısından kullanımı giderek artmakta olan plastik bağlayıcı mıknatıslar üzerine araştırmaların yapılması da mıknatıslar üzerine yapılan çalışmalarda faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **University of Birmingham web sitesi**, Magnetic Materials Background, <<http://www.magnets.bham.ac.uk/magneticmaterials/index.shtml>>, alındığı tarih 10.07.2009
- [2] **Erol, M.**, 2007-2008, Elektronik ve Manyetik Malzemeler, *Ders Notları*, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
- [3] **Jiles, D.**, 1991, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman and Hall, New York
- [4] **Goldman, A.**, 2006, Modern Ferrite Technology, 2nd Edition, Springer, New York
- [5] **Prof.Dr.Kaşif Onaran ve Doç.Dr.Sabri Altıntaş**, 1986, Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, Cilt 4, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul
- [6] **Buschow K.H.J. and F.R.de Boer**, 2003, Physics of Magnetism and Magnetic Materials, Kluwer Academic Publishers, New York
- [7] **MMPA STANDARD No. 0100-00**, 1964, Standard Specifications For Permanent Magnet Materials, *Magnetic Materials Producers Association*, Chicago
- [8] **Sung Yong An et al.**, 2002, Magnetic Properties of $Ba_{1-x}Sr_xFe_{12}O_{19}$ Grown By a Sol-gel Method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242–245, 413–415
- [9] **Taguchi Hitoshi and Msuzawa Kiyoyuki**, 2000, Hexagonal ferrite magnet, *European Patent*, No: 1011114 A1 dated 21.06.2000
- [10] **H. Stablein**, 1982, Hard Ferrites and Plastroferrites, Ferromagnetic Materials, Vol.3 Chpt.7, North-Holland Publishing Company, Amsterdam
- [11] **F.J. Esper**, 1977, Microstructure of Hard Ferrites and Their Magnetic Properties, *Journal de Physique*, Supplement au no 4, page C1-69
- [12] **IEC 60404 – 8 – 1**, 2004, Magnetic Materials; Specifications for individual materials – Magnetically hard materials, *International Electrotechnical Corporation*, Geneva
- [13] **S.J. Lillywhite et al.**, 2002, A preliminary electron backscattered diffraction study of sintered NdFeB-type magnets, *Journal of Microscopy*, Vol. 205, 270–277
- [14] **Ames Laboratory web sitesi**, Ternary solidification, <www.cmpgroupameslab.gov/personnel/canfield>, alındığı tarih 15.01.2010
- [15] **Steven Attanasio**, 1996, Corrosion and Environmentally-Assisted Cracking of Rapidly Solidified Neodymium-Iron-Boron Permanent Magnets, *PhD Thesis*, Material Science And Engineering, MIT, Cambridge, MA.

- [16] **Sagawa Masato**, 2009, Method For Producing Sintered NdFeB Magnet, *European Patent*, No: 2071597 A1 dated 17.06.2009
- [17] **C.K.Gupta and N.Krishnamurthy**, 2004, Extractive Metallurgy of Rare Earths, Rare Earth Materials, Chapter 6, CRC Press, Florida
- [18] **S. Pandian et al.**, 2002, Effect of Al, Cu, Ga, and Nb additions on the magnetic properties and microstructural features of sintered NdFeB, *Journal of App. Phys.*, Volume 92, No:10
- [19] **S.R. Trout**, 2004, Optimum Corrosion Protection of Nd-Fe-B Magnets, *Magnetics 2004, Advancements in Magnetic Applications, Technology and Materials*, Denver Marlott Tech. Center, Denver, June 9-10
- [20] **Raja K. Mishra**, 1987, Microstructure of Hot-pressed and die-upset NdFeB Magnets, *Journal of Appl.Phys.*, 62, 3
- [21] **Aru Yan et al.**, 1998, Characterization of microstructure and coercivity of NdFeB magnets with Ti and Al or Cu addition, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 185, 369 - 374
- [22] **R. Ramesh et al.**, 1988, Magnetization Reversal in Nucleation Controlled Magnets. II.Effects of Grain Size and Size Distribution on Intrinsic Coercivity of Fe-Nd-B Magnets, *Journal of Appl.Phys.*, 64, 11
- [23] **D.W. Scott et al.**, 1996, The effects of average grain size on the magnetic properties and corrosion resistance of NdFeB sintered magnets, *Journal of Appl. Phys.*, 79, 8
- [24] **P.J. McGuinness et al.**, 1988, The use of hydrogen in the production and characterization of NdFeB magnets, *Journal of Appl.Phys.*, 64, 10
- [25] **L.R. Moskowitz**, 1995, Enviromental Effects, Permanent Magnet Design and Application Handbook, Chapter 11, Krieger Publishing Company, Florida
- [26] **EMAJ**, 1998, Magnet Story, *Electronic Materials Manufacturers Association of Japans*
- [27] **Network of Laboratory Units and Centers web sitesi**, The University of Ioannina,
<http://omega.physics.uoi.gr/xrf/english/the_xrf_technique.htm>, alındığı tarih 01.02.2010
- [28] **Prof.Dr.Servet Turan**, 2008, Materials Characterization Techniques: X-Ray Diffraction, *Ders Notu*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
- [29] **HYTEM web sitesi**, Hidrojen Teknolojileri ve İleri İmalat Yöntemleri Araştırma Merkezi, Niğde Üniversitesi,
<<http://host.nigde.edu.tr/hytem>>, alındığı tarih 01.02.2010
- [30] **Steve Constantinides**, 2006, A Manufacturing and Performance Comparison Between Bonded and Sintered Permanent Magnets, Arnold Magnetic Technologies Corp., *APEEM*, April 4
- [31] **D.N. Brown and P. Campbell**, 2002, The Comparison of Anisotropic and Isotropic Powders For Polymer Bonded Rare Earth Permanent Magnets, Magnequench Technology Center, NC

- [32] **R. Gerardin, E. Millon, et al.**, 1988, Structures et propriétés magnétiques des ferrites de calcium pseudo hexagonaux $\text{Ca}_4\text{Fe}_9\text{O}_{17}$, CaFe_4O_7 et $\text{Ca}_3\text{Fe}_{15}\text{O}_{25}$, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 49, Issue 4, Pages 343-348
- [33] **P.E. Kazin et al.**, 2008, Formation of submicron-sized $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ with very high coercivity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 1068–1072
- [34] **Gaolin Yan et al.**, 1999, The effect of density on the corrosion of NdFeB magnets, *Journal of Alloys and Compounds*, 292, 266 – 274
- [35] **Tan Ping et al.**, 2006, Homogeneity of H_{cj} in sintered bulk Nd-Fe-B magnets, *Journal of Rare Earths*, 24, 314
- [36] **Ran Zhang et al.**, 2007, Effect of Nb substitution on the temperature characteristics and microstructures of rapid-quenched NdFeB alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 427, 78 – 81
- [37] **Z.Q. Jin and J.P. Liu**, 2006, Rapid thermal processing of magnetic materials, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 227 – 244

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Levent VURAL

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir – 02.11.1985

Lisans Üniversitesi: Dokuz Eylül Üniversitesi – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

İletişim: levent.vural@hotmail.com