

**NANO BOYUTLU MANYETİK KOMPOZİT TOZ MALZEMELERİN  
ÜRETİMİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ**

**Musa Faruk ÇAKIR**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2012**

**ANKARA**

**NANO BOYUTLU MANYETİK KOMPOZİT TOZ MALZEMELERİN  
ÜRETİMİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ  
(Doktora Tezi)**

**Musa Faruk ÇAKIR**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kasım 2012**

**ÖZET**

Bir sabit mıknatıs için en önemli manyetik parametrelerinden biri maksimum enerji çarpımı olarak da bilinen “ $BH_{max}$ ” değeridir.  $BH_{max}$  değerinin büyük olması daha küçük hacimde mıknatıs ile istenilen manyetik akının üretilebilmesini sağlar. Bu çalışmada nano kompozit Nd-Fe-B mıknatısların üretiminde kullanılacak yeni bir model geliştirilmiştir. Bu modelin geliştirilmesinde farklı Nd-Fe-B alaşımları üzerine yapılan laboratuvar araştırmalarından sağlanan  $B_r$  (kalıcı mıknatısiyet),  $H_c$  (Manyetik koerzivite),  $BH_{max}$ , Curie sıcaklığı ve yoğunluk verilerinden yararlanılmıştır. Nd-Fe-B alaşımlarına katkı maddesi olarak Co, Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb, Cr, W, Mo, Mn, Ni, Sb, Sn, Ge, Al, Bi elementlerinin eklenmesi ile elde edilen mıknatısların  $B_r$  (Kalıcı mıknatısiyet) değişimleri incelenmiştir. Böylece geliştirilen modelin nano boyutlu manyetik kompozit toz malzemelerin üretimi alanında kullanılabilmesi sağlanmıştır. Bunlara ek olarak modelin doğruluk kontrolü yapay sinir ağı ile gerçekleştirilmiştir. Bu model, çok amaçlı olarak endüstride kullanılabileceği gibi eğitim amaçlı kullanım potansiyeline de sahiptir.

**Bilim Kodu** : 703.3.012  
**Anahtar Kelimeler** : Nanokompozit, NdFeB, Kalıcı mıknatısiyet,  $BH_{max}$ , Yapay sinir ağı  
**Sayfa Adedi** : 173  
**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Osman GÜRDAL

**DEVELOPMENT OF THE MODEL FOR PRODUCTION OF NANO SIZED  
MAGNETIC POWDER COMPOSITE MATERIALS**

**(Ph. D. Thesis)**

**Musa Faruk ÇAKIR**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**November 2012**

**ABSTRACT**

**$BH_{max}$  value, which also known as maximum energy multiplier, is one of the most important parameter for a permanent magnet. The bigger  $BH_{max}$  value provides the production of desired magnetic flux density by using small magnet volume. In this study, a new model that can be used in production of nanocomposite Nd-Fe-B, has been developed. In the model development process  $B_r$  (residual flux density),  $H_c$  (magnetic coercive),  $BH_{max}$ , Curie temperature and density of magnet data which obtained by laboratory research on different Nd-Fe-B alloys have been used. The  $B_r$  changes in the magnets which obtained by adding elements such as Co, Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb, Cr, W, Mo, Mn, Ni, Sb, Sn, Ge, Al, Bi to the Nd-Fe-B alloys have been investigated. So that, using of the improved model in production of nano sized magnetic powder composite area has been provided. In addition, the accuracy check of improved model has been realized by artificial neural networks. This study can be used in industry to design of Nd-Fe-B hard magnet also it has potential to use in educational activities.**

**Science Code : 703.3.012**  
**Key Words : Nanocomposite, NdFeB, Permanent magnet,  $BH_{max}$   
Neural network**  
**Page number : 173**  
**Adviser : Prof. Dr. Osman GÜRDAL**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve desteğini esirgemeyen ve beni yönlendiren kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Osman GÜRDAL'a, katılımı ile bana moral, çalışmalarına ivme kazandıran değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ercan Nurcan YILMAZ'a, desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Volkan KILIÇLI'ya, bilgi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağlayarak çalışmalarımı destekleyen Sayın Prof. Dr. Rıza GÜRBÜZ'e, her konuda her zaman yanımda olarak bana güç veren değerli hocalarım Sayın Öğr. Gör. Şener ESKİ ve Sayın Yard. Doç. Dr. Fatih KORKMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle doktora süresi boyunca manevi desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem, babam, eşim Zeynep ÇAKIR ve çocuklarım olmak üzere tüm aileme teşekkürü borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xix
SİMGELER ve KISALTMALAR .....	xx
1. GİRİŞ .....	1
2. NANO KOMPOZİT MALZEMELER .....	7
2.1. Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri .....	9
2.1.1. Mekanik yöntemler .....	9
2.1.2. Elektroliz yolu ile üretim .....	10
2.1.3. Kimyasal yöntemler .....	11
2.1.4. Atomizasyon yöntemleri .....	12
2.2. Metal Tozlarının Preslenmesi .....	16
2.2.1. Presleme Öncesi tozların karıştırılması.....	17
2.2.2. Yüksek enerjili atritörde karıştırma işlemi.....	18
2.2.3. Sıkıştırma yöntemleri .....	19
2.3. Metal Tozlarının Sinterlenmesi.....	21
2.3.1. Sinterleme teorisi .....	23

**Sayfa**

2.3.2. Sinterleme atmosferleri ve etkileri .....	26
2.4. Toz Metalurjisinin Avantajları .....	28
2.5. T/M Uygulama Alanları .....	29
3. MANYETİK MALZEMELER .....	31
3.1. Maddenin Manyetik Davranışları .....	31
3.2. Manyetizma Teorileri .....	32
3.2.1 Wilhelm Weber (1804-1890): moleküler teori .....	32
3.2.2. Andre Marie Ampere(1775-1836): mıknatıslanma teorisi.....	33
3.2.3. Diyamanyetik maddeler .....	33
3.2.4. Paramanyetik maddeler .....	34
3.2.5. Ferromanyetik maddeler .....	34
3.3. Manyetizma ve Histerezis Eğrisi .....	38
3.4. Manyetik Anizotropi .....	44
3.5. Magnetostatik Enerji ve Maksimum Enerji Çarpımı ( $BH$ ) $_{max}$ .....	46
3.6. Giderici Alan Mekanizmaları.....	49
3.7. Kalıcı Mıknatıslar.....	52
3.8. Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Özellikleri .....	54
3.9. Giderici Kuvvet- Mıknatısiyeti Yok Edici Kuvvet .....	55
4. MIKNATISLAYICILAR.....	60
4.1 Mıknatıslayıcı Bobini ve Kafası.....	60
4.2 Mıknatıslayıcı Enerji Besleme Devreleri .....	61
4.2.1 Doğru akımlı mıknatıslayıcılar .....	61
4.2.2 Darbe akımlı mıknatıslayıcılar .....	63

**Sayfa**

4.2.3 Ters mıknatıslandırma.....	68
4.3 Mıknatıslayıcı Çeşitleri .....	68
4.3.1 DC mıknatıslayıcılar .....	68
4.3.2 Yarı çevrimli mıknatıslayıcılar .....	69
4.3.3 Yüksek endüktanslı C tipi mıknatıslayıcılar .....	71
4.3.4 Kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcılar .....	72
5. YAPAY SİNİR AĞLARI .....	81
5.1. Yapay Zekâ Kavramı .....	81
5.2. Yapay Sinir Ağları .....	83
5.3. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı ve Temel Elemanları .....	87
5.4. Öğrenme Algoritmaları .....	96
5.4.1. Geri yayılım öğrenme algoritması .....	96
5.4.2. Levenberg- Marquardt algoritması .....	100
5.5. YSA' ların Avantaj ve Dezavantajları .....	101
6. MODELİN HAZIRLANMASI.....	104
6.1. Geliştirilen Modelin Oluturulmasında Kullanılan Veriler ve Elde Edilen Matematiksel Fonksiyonlar .....	105
6.2. Geliştirilen Modelin Algoritması .....	134
6.3. Arayüzdeki bölümler .....	140
6.4. Geliştirilen Modelin Matlab/Simulink ile Kontrolünün Yapılması .....	140
6.5. Geliştirilen Modelin Matlab/Neural Network (Yapay Sinir Ağı) ile Kontrolünün Yapılması .....	144
6.6. Geliştirilen Modelin Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	147
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	150

	<b>Sayfa</b>
7.1. Sonuçlar .....	150
7.2. neriler .....	151
KAYNAKLAR .....	152
EKLER .....	159
EK-1 Program Kodları .....	160
ÖZGEÇMİŞ .....	173



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Maddelerin bağıl geçirgenlikleri.....	34
Çizelge 3.2. Bazı kalıcı mıknatısların manyetik özellikleri[6] .....	54
Çizelge 3.3. Manyetik alanın tipi ve yararlanılan manyetik etkiye göre mıknatısların kullanım yerleri.....	58
Çizelge 3.4. Kullanım alanına göre sabit mıknatısların kullanım örnekleri .....	59
Çizelge 4.1. Hysterisis graph 8 kjoule capacitive decharger sisteminin teknik özellikleri.....	80
Çizelge 5.1. Biyolojik sinir ağı ile yapay sinir ağının karşılaştırılması .....	95
Çizelge 6.1. % B Değişimine göre 15Nd-(85-x)Fe-xB alaşım için <i>Br</i> , <i>Hc</i> ve <i>BHmax</i> değerleri [93] .....	106
Çizelge 6.2. Nd'nin % değişimine göre xNd-(92-x)Fe-8B alaşımının <i>Br</i> , <i>Hc</i> ve <i>BHmax</i> değişimi[93].....	109
Çizelge 6.3. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımında M katkı maddesi eklendiğinde alaşımda oluşan <i>Br</i> değerleri.....	112
Çizelge 6.4. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımında M katkı maddesi eklendiğinde alaşımda oluşan <i>Br</i> değerleri.....	119
Çizelge 6.5. 15Nd-77Fe-8B alaşımına ait $\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ), <i>Br</i> (KG), <i>Hc</i> (KOe), <i>BHmax</i> (MGOe) değerleri.....	125
Çizelge 6.6. 15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımına ait $\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ), <i>Br</i> (KG), <i>Hc</i> (KOe), <i>BHmax</i> (MGOe) değerleri.....	128
Çizelge 6.7. 15Nd-(77-x)Fe-8B-xCo alaşımına %Co eklendiğinde curie sıcaklığına etkisinin değerleri .....	130
Çizelge 6.8. 17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımına ait $\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ), <i>Br</i> (KG), <i>Hc</i> (KOe), <i>BHmax</i> (MGOe) değerleri .....	132
Çizelge 6.9. Model, YSA ve simulink sonuçlarının karşılaştırılması .....	147
Çizelge 6.10. Geliştirilen model sonuçları ile yapılan diğer çalışma sonuçlarının %B ve %Nd değerlerine göre karşılaştırılması .....	149

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 6.11. İlgili alaşıma katkı maddeleri eklenmesi durumunda <i>Br</i> değerlerinin karşılaştırılması.....	149

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi [49].....	11
Şekil 2.2. Atomizasyon tekniklerinin şematik gösterimi [48] .....	13
Şekil 2.3. Gaz atomizasyon ünitesi .....	14
Şekil 2.4. Su atomizasyonu ünitesi .....	15
Şekil 2.5. Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası .....	17
Şekil 2.6. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü [57].....	18
Şekil 2.7. Bilyalar arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü [58].....	19
Şekil 2.8. İzostatik sıkıştırma .....	21
Şekil 2.9. Sinterleme esnasında difüzyon oluşumu [62] .....	22
Şekil 2.10. İki küresel parçacığın sinterleme profili ( $x$ =boyun çapı, $d$ =küre/parçacık çapı, $p$ =boyun yarıçapı).....	23
Şekil 2.11. Sinterleme aşamaları [62] .....	25
Şekil 2.12. Toz metalurjisinin işlem basamakları .....	28
Şekil 3.1. Atom modeli [69].....	35
Şekil 3.2. Yörüngesel manyetik moment [69] .....	36
Şekil 3.3. Spin manyetik momenti [69] .....	36
Şekil 3.4. Dipolleri rastgele yönlendirilmiş manyetik bir malzeme [69].....	37
Şekil 3.5. Harici bir alanında kalmış manyetik malzeme (manyetik dipoller aynı doğrultuya gelmiş) [69].....	37
Şekil 3.6. Doğrultuya gelmiş küçük döngüler malzemenin yüzeyi boyunca bir akıma eş değer oluşumunun gösterimi [69].....	38
Şekil 3.7. Manyetik malzeme içerisinde ve dışında oluşan manyetik alan ve demanyetizasyon alanlarının yönlenmeleri[72] .....	41
Şekil 3.8. Kalıcı (a) ve kalıcı olmayan (b) mıknatıslara ait histerezis eğrileri[73].....	42

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.9. Kalıcı bir mıknatısa ait histerezis eğrisi [74] .....	43
Şekil 3.10. Demir kristaline ait kolay ve zor eksenin uygulanan bir H alanı ile manyetizasyonu(a), kolay ve zor yönlerin kafes eksenleri üzerinde gösterilmesi (b).[75] .....	45
Şekil 3.11. Kristalin manyetik domenlere bölünmesi[76] .....	47
Şekil 3.12. Demir kristaline ait manyetik domenlerin yönlenmeleri ve domen sınırlarındaki manyetik momentlerin yönlenmeleri[77].....	48
Şekil 3.13. Sargı sarılmış manyetik malzeme [69] .....	49
Şekil 3.14. Ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi [78] .....	50
Şekil 3.15. Mıknatıslama eğrisinin akı yoğunluğu ve manyetik akı şiddeti ile ifadesi [78].....	50
Şekil 3.16. Histerezis çevrimi [78].....	52
Şekil 3.17. Kullanılan kalıcı mıknatıs malzemelerin mıknatıslanma eğrileri [78].....	53
Şekil 3.18. Alnico-5 malzemenin histerisis eğrisinin 2. çeyreği ve enerji üretim noktaları [78].....	54
Şekil 3.19. M-5 (Yumuşak) çelik malzeme için histerisis eğrisinin 2. Çeyreği [78] .....	55
Şekil 3.20. Bir kalıcı mıknatıs malzemenin giderici kuvvet ve enerji üretim eğrileri [78] .....	56
Şekil 3.21. Sabit mıknatısların $(BH)_{Max}$ değerleri ve 20. yüzyılda yüksek enerji çarpımlı sabit mıknatısların gelişimi .....	57
Şekil 4.1. Doğru akımlı mıknatıslayıcı eş değer devresi [80] .....	62
Şekil 4.2. Mıknatıslayıcı bobininden akan akımın dalga şekli [80].....	62
Şekil 4.3. Darbe akımlı mıknatıslayıcıların prensip şeması [79] .....	63
Şekil 4.4. Kısa darbeleri mıknatıslandırma eşdeğer devresi [79].....	65

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.5. Mıknatıslandırma akımının farklı işletme biçimlerinde dalga şekli [79] .....	66
Şekil 4.6. DC mıknatıslayıcı devre [82].....	69
Şekil 4.7. Yarı çevrimli mıknatıslayıcı [81].....	70
Şekil 4.8. Yarı çevrimli mıknatıslayıcıda akım-gerilim eğrileri [81] .....	70
Şekil 4.9. C Tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcı [81].....	71
Şekil 4.10. C Tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcıda akım eğrisi [81] .....	72
Şekil 4.11. 1944 yılına ait kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi [81].....	73
Şekil 4.12. Kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcının akım-gerilim eğrileri [81].....	74
Şekil 4.13. Gelişmiş ateşlemeli mıknatıslayıcı devresi [81] .....	75
Şekil 4.14. Silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi [81].....	75
Şekil 4.15. Çıkışı transformatörü kullanılan mıknatıslayıcı devresi[81] .....	76
Şekil 4.16. Gelişmiş silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi [81].....	77
Şekil 4.17. İki kutuplu kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi [81].....	78
Şekil 5.1. Yapay sinir hücresinin yapısı.....	88
Şekil 5.2. Biyolojik bir nöron ve temsili [90] .....	90
Şekil 5.3. Doğrusal aktivasyonfonksiyonu.....	92
Şekil 5.4. Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu .....	93
Şekil 5.5. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu.....	93
Şekil 5.6. Signum aktivasyon fonksiyonu.....	94
Şekil 5.7. Eşik aktivasyon fonksiyonu .....	95

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.8. Genel bir geri yayılım ağ yapısı [82] .....	98
Şekil 5.9. İleri beslemeli bir ağ için geri yayılım akış şeması [82].....	99
Şekil 5.10. Tek katmanlı hücrenin Matlab' da kısaltılmış şekli .....	99
Şekil 5.11. Üç katmanlı YSA için kısaltılmış gösterim [91].....	100
Şekil 6.1. 15Nd-(85-x)Fe-xB alaşımında % B değişimine göre <i>Br</i> değişimi .....	107
Şekil 6.2. 15Nd-(85-x)Fe-xB alaşımında % B değişimine göre <i>Hc</i> değişimi .....	107
Şekil 6.3. 15Nd-(85-x)Fe-xB alaşımında % B değişimine göre <i>BHmax</i> değişimi .....	108
Şekil 6.4. xNd-(92-x)Fe-8B alaşımında % Nd değişimine göre <i>Br</i> değişimi .....	109
Şekil 6.5. xNd-(92-x)Fe-8B alaşımında % Nd değişimine göre <i>Hc</i> değişimi.....	110
Şekil 6.6. xNd-(92-x)Fe-8B alaşımında % Nd değişimine göre <i>BHmax</i> değişimi .....	111
Şekil 6.7. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Ti eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri .....	113
Şekil 6.8. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Zr eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri .....	113
Şekil 6.9. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Hf eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri .....	114
Şekil 6.10. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % V eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	115
Şekil 6.11. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Ta eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	115
Şekil 6.12. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Nb eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	116
Şekil 6.13. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Cr eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	117

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.14. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % W eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	118
Şekil 6.15. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Mn eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	120
Şekil 6.16. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Ni eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	120
Şekil 6.17. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Sb eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	121
Şekil 6.18. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Sn eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	122
Şekil 6.19. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Ge eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	122
Şekil 6.20. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Al eklendiğinde oluşan <i>Br</i> değeri.....	123
Şekil 6.21. 15Nd-Fe-8B-xM alaşımına % Bi eklendiğinde oluşan <i>Br</i> Değeri.....	124
Şekil 6.22. 15Nd-77Fe-8B alaşımında sıcaklığa göre <i>Br</i> değişimi.....	125
Şekil 6.23. 15Nd-77Fe-8B alaşımında sıcaklığa göre <i>Hc</i> değişimi.....	126
Şekil 6.24. 15Nd-77Fe-8B alaşımında sıcaklığa göre <i>BHmax</i> değişimi.....	127
Şekil 6.25. 15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımında sıcaklığa göre <i>Br</i> değişimi.....	127
Şekil 6.26. 15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımında sıcaklığa göre <i>Hc</i> değişimi.....	129
Şekil 6.27. 15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımında sıcaklığa göre <i>BHmax</i> değişimi.....	129
Şekil 6.28. 15Nd-(77-x)Fe-8B-xCo alaşımına %Co eklenmesi ile curie sıcaklığı değişimi.....	131
Şekil 6.29. 17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımında sıcaklığa göre <i>Br</i> değişimi.....	132
Şekil 6.30. 17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımında sıcaklığa göre <i>Hc</i> değişimi.....	133

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.31. 17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımında sıcaklığa göre $BH_{max}$ değişimi .....	133
Şekil 6.32. Modelin oluşturulmasında kullanılan algoritma .....	135
Şekil 6.33. Geliştirilen modelin arayüzü.....	137
Şekil 6.34. Ticari mıknatıs seçimi.....	139
Şekil 6.35 Elementlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	139
Şekil 6.36. Laboratuvarın Matlab/Simulink ile blok diyagramı .....	140
Şekil 6.37. Elementlerin ağırlık yüzdelerinin girilmesi .....	141
Şekil 6.38. Fonksiyon blok diyagramı .....	141
Şekil 6.39. Matlab/Simulink'te %Nd değişimine göre $Br$ , $Hc$ ve $BH_{max}$ grafikleri .....	142
Şekil 6.40. Matlab/Simulink'te %B değişimine göre $Br$ , $Hc$ ve $BH_{max}$ grafikleri .....	143
Şekil 6.41. Laboratuvarın Matlab/Neural Network (YSA) ile blok diyagramı .....	144
Şekil 6.42. 5 katmanlı YSA bloğu .....	144
Şekil 6.43. Matlab/Neural Network'te (YSA) %B değişimine göre $Br$ , $Hc$ ve $BH_{max}$ grafikleri.....	145
Şekil 6.44. Matlab/Neural Network'te (YSA) %Nd değişimine göre $Br$ , $Hc$ ve $BH_{max}$ grafikleri.....	146



**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.1. Hysterisis graph 8 kjoule capacitive decharger sisteminin genel görüntüsü .....	79
Resim 6.1. Glovebox sistemi (inert ortam) .....	104
Resim 6.2. Malzemelerin sinterlenmesinin yapıldığı fırın.....	105

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$B$	Manyetik akı yoğunluğu (Gaus, Tesla)
$(BH)_{max}$	Sabit mıknatısın enerji çarpımı (MGOe, kJ/m <sup>3</sup> )
$B_r$	Kalıcı mıknatısiyet (Gaus, Tesla)
$C$	Kondansatör (Farad)
$D_{fb}$	Flyback Diyotu
$E_{ex}$	Değiş tokuş enerjisi
$e$	Elektrondaki yükün genliği
$F_{Br}(x=\%Nd)$	%Nd Eklenen Alaşımdaki kalıcı mıknatısiyet fonksiyonu
$F_{Hc}(x=\%Nd)$	%Nd eklenen alaşımdaki koerzivite fonksiyonu
$F_{BHmax}(x=\%Nd)$	%Nd eklenen alaşımdaki BH <sub>max</sub> fonksiyonu
$F_{Br}(x=\%B)$	%B eklenen alaşımdaki kalıcı mıknatısiyet fonksiyonu
$F_{Hc}(x=\%B)$	%B eklenen alaşımdaki koerzivite fonksiyonu
$F_{BHmax}(x=\%B)$	%B eklenen alaşımdaki BH <sub>max</sub> fonksiyonu
$h$	Planck sabiti
$H$	Manyetik alan kuvveti (Oe, kA/m)
$iHc$	Giderici alan veya koerzivite
$Hc$	Manyetik akı yoğunluğu (B) 'yi sıfır yapan değer
$H_s$	Doyma manyetik alan şiddeti
$H_d$	Demanyetizasyon alanı
$J_{ex}$	Değiş tokuş integrali
$L$	İndüktans (Henri)
$m_e$	Elektronun kütlesi
$M$	Manyetik moment (A.m <sup>2</sup> )

**SİMGELER VE KISALTMALAR**

<i>Simgeler</i>	<i>Açıklama</i>
$M_s$	Doyum manyetizasyonu
$N$	Demanyetizasyon faktörü
$R$	Direnç (Ohm)
$S_i$	J kabuğundaki toplam spin manyetik momenti
$S_j$	İ kabuğundaki toplam spin manyetik momenti
$T_I$	Tristör 1
$T_C$	Curie sıcaklığı
$U_e$	Elektronun genliği
$\theta$	Manyetik Akı
$\rho$	Elektronun çapı
$\theta$	Spinler arasındaki açı

**SİMGELER VE KISALTMALAR**

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>Alnico</b>	Aliminyum Nikel Kobalt
<b>CIP</b>	Soğuk İzostatik Presleme
<b>DA</b>	Doğru Akım
<b>MGOe</b>	Mega Gaus Oersted
<b>NdFeB</b>	Neodim Demir Bor
<b>SmCo<sub>5</sub></b>	Samaryum Kobalt
<b>MA</b>	Mekanik Alaşımlama
<b>MMK</b>	Metal Matrisli Kompozitler
<b>Mmk</b>	Manyeto motor kuvvet
<b>TM</b>	Toz Metalurjisi
<b>SCR</b>	Silicon Controlled Rectifier
<b>YSA</b>	Yapay Sinir Ağları

## 1. GİRİŞ

Modern yaşamda kalıcı mıknatısların yeri giderek büyümektedir. Özellikle nadir toprak içeren kalıcı mıknatıslar sahip oldukları yüksek kalıcı manyetizasyon ve giderici alan değerlerinden dolayı çok küçük boyutlarda kullanılabilme avantajına sahiptir [1]. Nadir toprak içeren  $\text{SmCo}_5$  (Samaryum kobalt) mıknatısları ilk olarak 1960 yılında,  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  ise 1970'li yıllarda geliştirilmiştir. Bu mıknatıslar sahip oldukları yüksek Curie sıcaklıklarından dolayı uçak ve uzay teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan geliştirme çalışmaları sonucunda bu sıcaklık  $550^\circ\text{C}$ 'ye kadar yükseltilmiştir [2,3]. Daha sonra NdFeB (Neodim demir bor) mıknatısı 1983 yılında ilk olarak tanıtılmıştır. Son 20 yılda manyetik özellikleri ve termal kararlılığı ile ilgili olarak bu alanda önemli gelişmeler olmuştur. Günümüzde NdFeB esaslı kalıcı mıknatısların; motorlar, maglev, hibritle çalışan elektrikli araçlar uygulama alanlarının en başında gelmektedir. NASA tarafından uydular için enerji depolama projesinde, radyal ve aksel rulmanlarda bu mıknatıslar kullanılmaktadır [4].

Kompozisyon, mikroyapı ve üretim yöntemi, bu malzemelerin manyetik özellikleri için önemli faktörlerdir. NdFeB esaslı kalıcı mıknatıslar; manyetik malzeme tozlarının sinterleme, polimer bağlayıcı veya reçine ile karıştırılıp preslenmesi, sıcak presleme ve sıcak deformasyon metodlarına göre sınıflandırılabilir. Sinterlenmiş mıknatıslar için enerji çarpımı  $(BH)_{max}$  30-50 MGOe arasındadır, soğuk izostatik presleme (CIP) kullanılarak malzemenin kalıcı mıknatıslanma değeri arttırılmış ve yaklaşık %98 teorik yoğunluk ile enerji çarpımı 55,6 MGOe'e ulaşmıştır. Bu değer polimer bağlı olanlarda 10-18 MGOe ve sıcak deformasyon yöntemiyle üretilen malzemelerde ise (15-46) MGOe değerleri arasındadır [4.5].

Bazı kalıcı mıknatısların manyetik özellikleri incelendiğinde; Alnico 5'in (Aliminyum nikel kobalt)  $B_r=1,27$  T  $H_c=0,05$  KA/m ve  $BH_{max}=44$   $\text{kJ/m}^3$ ,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 'un ise,  $B_r=1,36$  T,  $H_c=1,03$  KA/m ve  $BH_{max}=350$   $\text{kJ/m}^3$  değerlerindedir

[6]. Bu değerlerden de görüldüğü gibi NdFeB mknatslar çok yüksek manyetik özelliklere sahiptir.

NdFeB esaslı kalıcı mknatslar çok yaygın bir kullanım alanına sahiptir. %97.5 verim sağlayarak güneş enerjisiyle çalışan yarış otomobillerinde sinterlenmiş NdFeB kalıcı mknatsları kullanılmaktadır [7]. Bunun dışında hibrit elektrikli araçlarda kalıcı mknats jeneratör kullanımı daha az yakıt maliyeti ve daha az hava kirliliğine sebep olmaktadır. Burada içten yanmalı motor yüksek enerji çarpımına sahip olan kalıcı mknats jeneratörle bağlantılıdır ve aynı zamanda alıştırıcı motor görevini yapmaktadır [8,9]. Son 20 yıl içinde nadir toprak içeren mknatslarda çok büyük gelişmeler gözlenmiştir. Yüzyılın başında  $10 \text{ kJ/m}^3$  değerinde doğal mknatslar bulunurken, günümüzde  $400 \text{ kJ/m}^3$   $BH_{max}$  değerine sahip NdFeB mknatslar bulmak mümkündür. Son zamanlarda nanokompozit NdFeB sert mknatsların laboratuvar şartlarında enerji çarpımları  $1090 \text{ kJ/m}^3$  değerlerine ulaşmıştır [10,11,12,13,14].

Kalıcı mknatsların yıllara göre küresel olarak üretim miktarları 1985 yılında 250 000 ton civarında iken, 2010 yılında 1 000 000 ton yükselmiş ve 2020’de 1 500 000 ton olacağı düşünülmektedir[15]. Kalıcı mknats olarak AlNiCo, SmCo, ferrit mknatsların üretimine başlanmış, 1990 yılında NdFeB mknatslar da bu aileye katılmıştır. 2007 yılında toplam 797.000 milyon ton kalıcı mknats üretilmiştir [15]. En yaygın olarak kullanılan manyetik malzemenin ferrit olmasının nedeni, NdFeB mknatsların kilogram başına fiyatının (US(dolar)/kg) ferritten 20 kat daha fazla olmasıdır. Kalıcı mknatsların 2007 yılında küresel olarak satış tutarı yaklaşık olarak 9 milyar dolardır. 2020 yılına kadar bu miktarın 21 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. 2007 yılı itibariyle toplam NdFeB kalıcı mknatslarının dünyada satış tutarı 5.24 milyar dolardır [15].

Sabit mknatslar sürekli bir enerji kaybı olmaksızın bir manyetik devrenin hava aralığına manyetik akı verme yeteneğine sahiptirler. Buradaki akı yoğunluğu düzgün, düzgün olmayan, kararlı veya zamanla değişken olabilir. Mknats uygulamaları mknats üzerindeki etkiler veya yararlanılan fiziksel etkiler ile sınıflandırılabilir.

Nadir toprak veya lantanit grubunun, ferromanyetik elementlerle yapmış oldukları bileşiklerde, demir grubu geçiş elementlerinin tam dolu olmayan en dış 3d kabuğundaki elektronların spin manyetik momentlerinin, lantanit grubunun tam dolu olmayan 4f iç kabuğundaki elektronların toplam açisal manyetik momentumları arasındaki kuantum-mekaniksel olarak değiş-tokuş kuvvetleri veya etkileşimleri sonucu paralel yönlendirmeleri sonrasında spontane manyetizasyon gerçekleşmektedir [16].

NdFeB mıknatısların gelişiminden beri mıknatısların manyetik ve fiziksel özelliklerini geliştirebilmek için dikkate değer bir efor harcanmıştır. Demir, kobalt gibi ferromanyetik elementler çok yaygın olarak kullanılmaktadır ve yüksek anizotropiye sahip nadir toprak elementleri ile yapmış oldukları bileşikler yüksek bir giderici alan değerine sahiptir. Sm-Co ve Nd-Fe-B nadir toprak mıknatısları yüksek  $BH_{max}$  değerini verdikleri için teknolojik olarak önemli bir yere sahiptir [16].

Fe iyonlarının anizotropisi kristal alan etkisiyle yörünge manyetik momentlerinin zayıflatılması nedeniyle Nd-Fe-B kalıcı mıknatıslarının anizotropisi tetragonal kristal yapıda bulunan nadir toprak elementinden kaynaklanmaktadır, diğer taraftan Fe elementi yüksek manyetizasyona ve Curie sıcaklığına sahiptir. Bileşikteki Fe-Fe manyetik etkileşimlerini latis içerisinde bulunan Fe atomlarının mesafesi, koordinasyon sayısı etkilemektedir [17]. Demir yerine diğer 3d geçiş elementlerinden Ti, Co, Ni, Mn, V, Sc yaklaşık %10 oranında katıldığında 3d-3d ve 4f-3d manyetik etkileşimlerde azalmaların neticesinde  $T_c$  (Curie sıcaklığı) ve anizotropi alanı değişmektedir. Co ve Ni gibi ferromanyetik elementlerle manyetik momenti yüksek olan skandiyum  $T_c$ 'ni 600 K'nin üzerine yükseltirken en düşük manyetik momente sahip mangan ilavesiyle  $T_c$  350 K 'e düşmektedir[18]. Demir ve nadir toprak elementlerinin manyetik momentleri arasındaki değiş tokuş etkileşimleri de  $T_c$ 'ni arttırmaktadır. 4f alt kabuğunda 7 elektron bulunan gadolinyum (Gd) ile elde edilen  $Nd_2Fe_{14}B$  bileşiği için  $T_c = 661$  K 'dir [19]. Aynı çalışmada anizotropi alanları yüksek olan Dy, Ho ve Tb, NdFeB alaşımının anizotropisini de

yükseltmektedir. Böylece yüksek giderici alana sahip NdFeB mıknatısları bu elementlerin ilavesiyle elde edilebilmektedir [19].

Nd-Fe-B kalıcı mıknatısların sert manyetik özelliklerini geliştirmek amacıyla alaşıma bazı elementler ilave edilmektedir. Bunların arasında sahip oldukları yüksek anizotropi alanı nedeniyle Pr, Dy, Tb gibi nadir toprak metalleri yüksek giderici alan kuvveti sağlamaktadırlar. Geçiş elementlerinden bazıları manyetizasyonu yükseltirler. Ayrıca  $T_C$  Curie sıcaklığını da yükseltirler. Manyetik olmayan metallerden yüksek ergime sıcaklığına sahip Mo, Nb, Ti, V, W ve Ga, Al, Cu, Sn gibi elementlerle düşük ergime sıcaklığına sahip elementler tane sınırlarında yer alırlar. Bu fazlarla tane büyümesini önleyip taneler arası manyetik etkileşimi azaltarak giderici alanın artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte manyetik olmayan bu fazlarla kalıcı mıknatıslanma azalmaktadır [20-25].

Mg, Al, gibi düşük ergime sıcaklığına sahip elementler sıvı faz sinterlemesine katkıda bulunmaktadır. Yüksek ergime sıcaklığındaki elementlerden Mo ve W 'in katkılarıyla tane sınırlarında oluşan T-Fe-B (T =W,Mo) fazı ile sinterleme süresince engellenmektedir. Böylece daha ince bir mikro yapı elde edilmekte ve giderici alan artmaktadır. Al ve Mg ilave edilmiş mıknatıslarda ise katkısız mikro yapıda oluşan taneler arası Fe-Nd-O fazı yerine oluşan Fe-Nd-O-M (M=Al, Mg) fazı daha az Fe ve böylece daha az manyetik geçirgenliğe (permeability) sahip olmakta, bu da Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B taneleri arasındaki etkileşmeyi azaltmaktadır. Manyetik taneler arasında daha iyi izolasyon ve manyetik etkileşim olmaması da giderici alanın artmasına neden olmaktadır. Buna ilave olarak sinterleme süresince sıvı faz sinterlemesinin ıslatma ile artırılması da diğer bir faktör olabilir [26]. Birçok araştırmalar sonucunda Nd-Fe-B kalıcı mıknatısların giderici alan değerleri Nb, Mo, W, Ti gibi yüksek ergime sıcaklıklarına sahip katkı elementleriyle yükselmiştir [27,28].

Bilindiği gibi sinterlenmiş NdFeB mıknatıslarına küçük miktarlarda dayanıklı elementler eklenerek (Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb, Cr, W, Mo, Mn, Ni, Sb, Sn, Ge, Al, Bi) koerziviteleri arttırılabilmektedir [29,30,31]. Ayrıca geliştirilen manyetik ve fiziksel



özellikler, bu mıknatısların çok iyi bir ısı kararlılık göstermesini sağlamıştır [32]. Co ve Ni gibi ferromanyetik metaller manyetizasyonu ve  $T_C$  Curie sıcaklığını yükseltirken, manyetik olmayan metallere yüksek ergime sıcaklığına sahip Mo, Nb, Ti, V, W ve Ga, Al, Cu, Sn gibi düşük ergime sıcaklığına sahip elementler tane sınırlarında oluşturdukları fazlarla tane büyümesini önlemekte ve taneler arası manyetik etkileşimi azaltarak giderici alanın yükselmesine neden olmaktadır[33-38]. Birçok araştırmalar sonucunda Nd-Fe-B kalıcı mıknatısların giderici alan değerleri Nb, Mo, W, Ti gibi yüksek ergime sıcaklıklarına sahip katkı elementleriyle yükselmiştir [39,40]. Optimum manyetik ve fiziksel özellikler elde etmek için mıknatısları 650°C ile 1160°C arasında sinterlemek ve hemen soğutmak gerekmektedir [41]. Sinterleme (pişirme), malzeme tozlarının sıcaklığın etkisiyle birbirlerine difüzyon yoluyla birleşmesini sağlayan ve kademeli bir şekilde tozlar arasındaki gözenek hacmini azaltan bir yüksek sıcaklık işlemidir [42]. Çok bileşimli sistemlerde sinterleme sıcaklığı ergime derecesi düşük olan metalin altında tespit edilir. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi kısalmaktadır [43].

Nd-Fe-B tipi kalıcı mıknatısların sahip oldukları üstün manyetik özelliklerin yanısıra karşılaşılan en büyük problem termal olarak kararlılığının zayıf olması yani, düşük  $T_C$  sıcaklığına sahip olmasıdır. Bunun dışında Nd elementi reaktif olması sebebiyle hava ortamında çok çabuk oksitlenmektedir [44].

Yapılan bu doktora tezi çalışmasında; taranan literatür özeti, bilime getirilecek yenilikler ve araştırma sırasında izlenilecek yol haritası belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde nano yapıda mıknatıslar ile ilgili bilgiler derlenmiş yapıları ve malzeme özellikleri incelenmiştir. Bu incelemelerin nano yapıda mıknatısların fabrikasyon özellikleri üretilebilirliği araştırılmış ve numune üretimi ve numune karakterizasyonu için gerekli altyapı ve donanım incelenmiştir. Bu çalışmada nanokompozit NdFeB mıknatısların oluşturulmasında Nd ve B elementlerinin etkileri araştırılmıştır. Farklı alaşımların da sabit mıknatıslar için önemli olan manyetik özelliklere ait matematiksel fonksiyonlar çıkarılmıştır. NdFeB mıknatıslara, farklı elementlerin kalıcı mıknatısiyete etkilerini incelemek amacıyla katkı maddeleri eklenmesi

sonucundaki artık mıknatıs fonksiyonları da çıkarılmıştır. Bu fonksiyonlar  $BH_{max}$ ,  $H_c$  ve  $B_r$  fonksiyonlarıdır.

Elde ettiğimiz fonksiyonlarla Action Script 3.0, Adobe Flash 8, simulink ve Matlab programlarını kullanarak bilgisayar ortamında kullanılabilen model geliştirilmiştir.

## 2. NANO KOMPOZİT MALZEMELER

Son yıllarda teknolojideki hızlı gelişmeler, geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanımı gerektirmektedir. Bu nedenle yeni malzemelerin üretilmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin daha hızlı bir şekilde yapılması gerekir. Daha önce yapılan araştırmalarda diğer malzemelerden farklı olarak, üstün niteliklerin çoğunun bir arada toplandığı yeni malzemeler üretilmiştir. Bu malzemelere Kompozit Malzeme adı verilmiştir. Kompozit malzemelerin birçok çeşidi üretilmektedir. Fakat üretilen kompozit çeşitleri ve üretme yöntemleri çok olduğundan sınıflandırma gereği duyulmuştur. Bunlar ana matris malzemesine göre isimlendirilmişlerdir. Metal esaslı, seramik esaslı ve polimer esaslı olarak genel bir sınıflandırılma yapılmaktadır.

Mühendislik malzemelerinin yeni bir sınıfı olan MMK'lerde (Metal Matrisli Kompozit), malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için metal matris içerisine güçlü seramik takviye elemanları eklenmektedir. Bu tür kompozitler gerek kullanım alanının genişlemesi ile yüksek üretim potansiyeli ve gerekse üretim ekonomisi açısından tercih edilmektedir.

Metallerin süneklik ve tokluğu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastisite modülü özellikleri ile birleştirilmeleri neticesinde son derece önemli mühendislik malzemeleri ortaya çıkmıştır [45,46]. Ancak üretimde karşılaşılan problemler nedeniyle, özellik ve yöntem geliştirme çalışmaları devam etmektedir [46].

MMK malzemelerin gelişmesinde üretim yöntemleri de büyük rol oynamaktadır. Örneğin; Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde TM (Toz Metalurjisi) yönteminin bir katı hal üretim yöntemi olmasına rağmen döküm gibi sıvı hal yöntemlerine tercih edilmemesinin en önemli sebeplerinden birisi de bu yöntemlerle daha homojen bir yapının kolaylıkla elde edilebilmesidir. Yüksek sıcaklık dayanımı, yapıdaki çökeltiler yerine ince dağılımlı parçacıklarla sağlanmaktadır. Ancak bu yapıyı geleneksel döküm yöntemiyle elde etmek mümkün olmamaktadır. Takviye

parçacığının boyu ve hacimsel oranı ile orantılı olan homojen dağılım problemi ile matris parçacık kimyasal tepkimeleri döküm yerine TM metodu ile rahatlıkla aşılabilmektedir [47].

Havacılık ve savunma sanayinde hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç, TM ile üretilen MMK malzemelere olan ilginin son on yılda katlanarak artmasına sebep olmuştur. Çalışmalar ve elde edilen deneyimler, yüksek sıcaklık dayanımının yapıdaki çökelti yerine, ince dağılımlı parçacıklarla sağlandığını göstermiştir [48].

TM, çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilmesi, toz metalurjisini cazip kılmaktadır. TM farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıl bağlanması basamaklarını içerir. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimli kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile TM verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme uygulamalarının yerini almaktadır [49]. Tozların istenilen biçime getirilmesi için presleme yapılır. Presleme aynı zamanda tozları kalıpta sıkıştırmanın yanında, ham yoğunluktaki parçanın içerisindeki gözeneklerin azaltılması ve toz temas yüzeyini arttırmak için de yapılır. Bu sinterleme işlemini kolaylaştırır.

Presleme işlemi oda sıcaklığında, bazen de daha yüksek sıcaklıklarda yapılır. Fakat oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda presleme işlemi, kalıp malzemesinin presleme sıcaklığındaki mukavemet değerleri ile sınırlanmıştır. Sinterleme ile elde edilen parçalara bazen son şekillerini vermek için ilave bir presleme işlemi uygulanabilmektedir [47].

Sinterleme işlemi, ergime olmaksızın kullanılan metal tozunun ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Kullanılan toz bir karışım ise sinterleme işlemi bu tozlardan en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan tozun ergime sıcaklığının altında yapılır [47].

## **2.1. Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri**

Metal tozlarının üretilmesinde kullanılan yöntemler, tozların birçok özelliklerini tayin eder. Bu yüzden metal tozlarının üretiminde çok çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır;

### **2.1.1. Mekanik yöntemler**

Bu yöntemlerde darbe, sıkıştırma ve burma kuvvetleri ile iri ve karmaşık şekilli tozlar üretilir. Bu yöntemlerde en az maliyetle toz üretimi için kayma sistemi az olan kimyasal bağları zayıf, karmaşık şekilli yapıya sahip malzemeler ile çok sert ve kırılabilir olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır.

#### Talaş kaldırma

Talaş kaldırma yöntemi ile genelde yüksek karbonlu çelik tozları üretilir. Bu yöntemde oksitlenme, yağlanma, kir tutma ve diğer malzeme hurdaları ile karışarak kirlenme problemi olabilir.

#### Öğütme

Öğütme işleminde; aşınmaya dayanıklı bilyeler ile birlikte iri taneli toz malzeme öğütücü değirmen içerisine konur. Değirmen döndürülerek sert bilyeler ile toz malzemenin çarpışması sağlanarak iri taneli toz malzemenin daha ince hale gelmesi sağlanır. Bu yöntem ile karmaşık şekilli ve soğuk deformasyon görmüş malzeme

tozu üretilir. Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılğan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler [49].

Öğütülen malzeme gevrek ise bilyalarla çarpışmanın etkisiyle çok küçük tozlara bölünür. Öğütülen malzeme sünek kaba tozlardan oluşuyorsa, bilyaların çarpışması sonucunda tozlar şekil değiştirerek yassılaşırlar ve ancak aşırı sertleşmesi sonucunda gevrekleşerek daha küçük toz parçalarına bölünebilirler. Öğütme işleminin su, alkol ve heptan gibi bir hidrokarbon sıvı içinde gerçekleştirilmesi öğütme süresinin kısaltmasının yanında daha ince tozlar üretilmesini de sağlar [50].

Öğütme işlemleri birçok şekilde yapılmaktadır. Szegvari tipi dikey atritör, yüksek enerjili Spex tipi atritör, Zos tipi yatay atritör, Planetary Mill tipi atritör ve yeni tasarımı atritörler bazılarıdır.

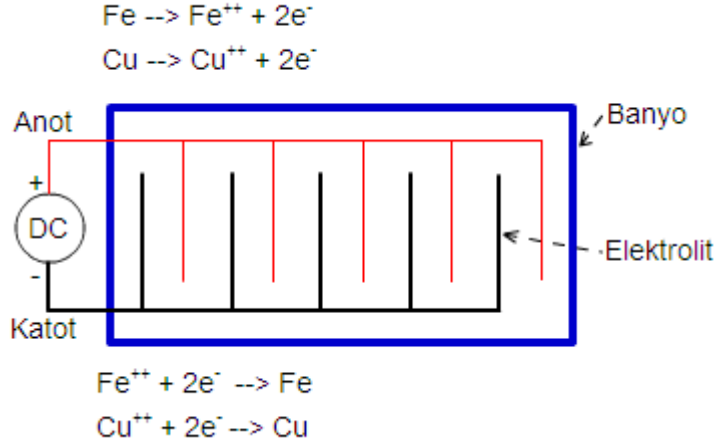
### Mekanik alaşımlama

MA (Mekanik alaşımlama) yüksek enerjili atritör kullanılarak yapılan bir düşük sıcaklık sentezleme yöntemidir. Bu yöntemde iki yada daha fazla elementel toz birbiri içerisinde belli oranda karıştırılarak atritör içerisine konur ve mekanik alaşımlama işine tabi tutulur [47]. Genellikle kompozit malzeme tozları üretilir. Bu işlemde amaç değirmen içerisinde bilyalarla metal tozlarının ezilerek, kırılarak ve tekrar kaynaklaşarak yapılan bir kompozit toz işlemidir. İşlem sonunda, metal tozlar birbirine olabildiğince yedirilerek, istenilen oranlarda kompozit toz kıvamına getirilir [48].

### **2.1.2. Elektroliz yolu ile üretim**

Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçerek, birçok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilebilir (Şekil 2.1). Daha sonraki işlemler olarak, yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme işlemleri gerekli olabilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında

bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilir. Elektrolitik tozlar çok saftırlar [49].



Şekil 2.1. Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi [49]

Bu yöntemle demir tozlarını da üretmek mümkün olmakla beraber, maliyetin yüksek olması nedeniyle demir tozu üretiminde diğer yöntemler daha avantajlıdır.

### 2.1.3. Kimyasal yöntemler

#### Gaz fazı ayrıştırma yöntemi

Bu yöntemde (demir, bakır, tungsten, molibden vb) malzeme oksitleri indirgeyici gazlar (hidrojen veya katı karbon eriyiği) ile indirgenerek metal tozu haline getirilirler. Burada saflık, malzemenin kalitesini belirler. Oksit ve karbonun maliyetinin düşük olması, gözenekli toz imal imkânı, oksit ve parçacık boyutunun kontrolü bu yöntemin avantajı olarak bilinirken, indirgeyici gazların maliyetinin yüksek olması, toz saflığının oksit saflığına bağlı olması, alaşım tozlarının üretim imkânsızlığı bu yöntemin dezavantajı olarak bilinir [51]. Burada kullanılan ham malzemeler süngerimsi yapıda meydana gelen tozların kalitesini belirler [47].

### Gaz fazından çökeltme

Bu yöntem ile genellikle reaktif metal tozları üretilir. Tozu üretilecek malzemenin oksitleri veya klorürleri alınıp gaz fazına geçirilir. Daha sonra çökeltme işlemiyle toz üretilir.

#### **2.1.4. Atomizasyon yöntemleri**

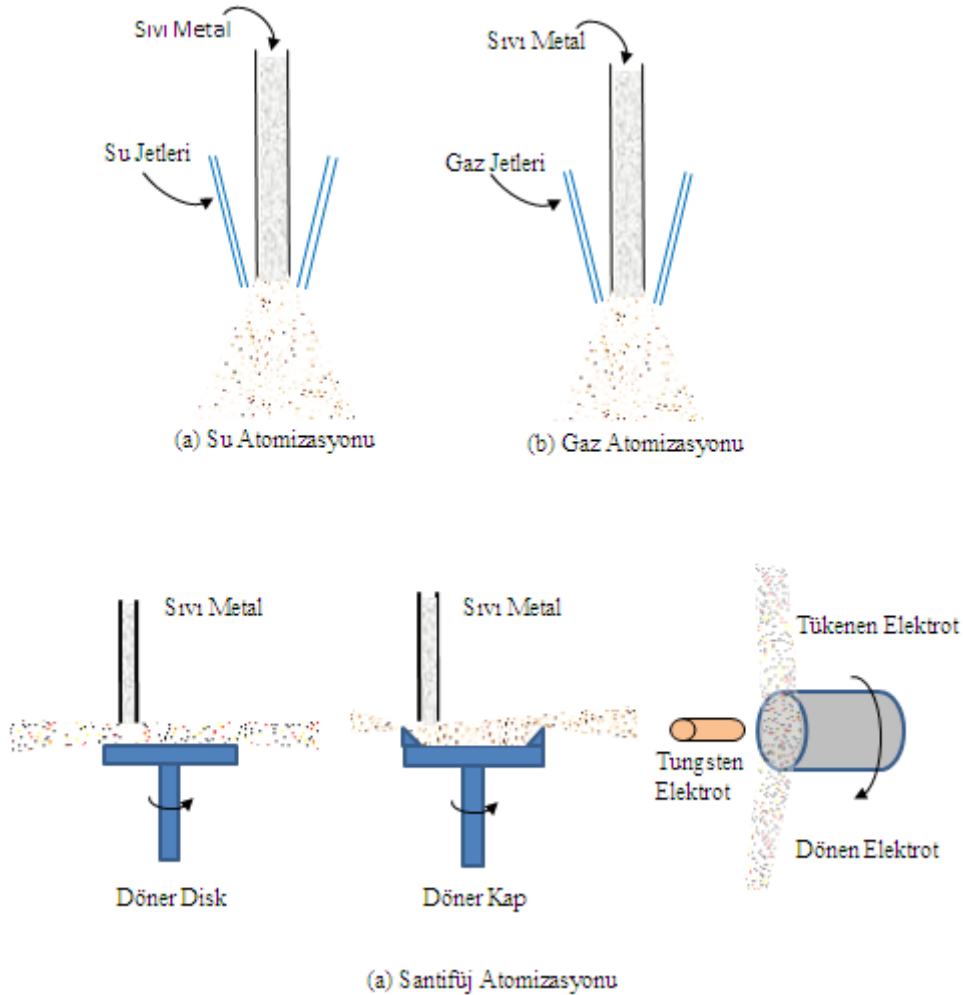
Bu işlemde ergimiş metal küçük damlacıklara parçalanır ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeyle temasa geçmeden hızlıca soğutulur. Ana fikir, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı metali daha küçük parçalara ayırmaktır. Hava, azot ve argon en çok kullanılan gazlardır. Su ise sıvılar içinde en çok kullanılanıdır. Nozulun tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi birçok parametreyi değiştirerek toz boyutu dağılımını kontrol etmek mümkündür. Tanecik şekli ise katılaşma hızı ile belirlenir, düşük soğutma kapasiteli gazlar için küresel şekilden yüksek soğutma kapasiteli su için karmaşık şekle dönüşür. Genelde bu toz üretim metodu ergitilebilen tüm malzemeler için uygulanabilir ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımli çelikler bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır. Krom içeren alaşımlar gibi kolayca oksitlenen metallerde atomizasyon argon gibi asal gazlar yardımıyla gerçekleştirilir. Atomizasyon, alaşımı oluşturan tüm metallerin ergimiş durumda tamamen alaşımlandığı için, özellikle alaşımların toz halinde üretilmesinde faydalı bir yöntemdir. Böylece her toz taneciği aynı kimyasal bileşime sahip olur [49].

Bu yöntemlerde, ergitilmesi mümkün olan her metalde uygulanabildiği gibi saf ve ön alaşımlanmış metal tozlarının doğrudan doğruya ergimiş metalden elde edilmesinde başarıyla kullanılmaktadır. Farklı yöntemler kullanılarak ergimiş metal alaşımlarından, ergiyiğin sıvı demetini farklı akışkanlar ile ve mekanik kuvvetler kullanılarak sıvı damlacıkları haline getirmek ve daha sonra bunları katılaştırarak toz üretme teknolojisi atomizasyon olarak bilinir Şekil 2.2'de atomizasyon tekniklerinin



şematik gösterimi verilmiştir. [52]. Mekanik kuvvetler olarak santrifuj (merkez kaç) kuvvetler kullanılır. Farklı olarak gaz ve sıvı akışkanlarda kullanılır.

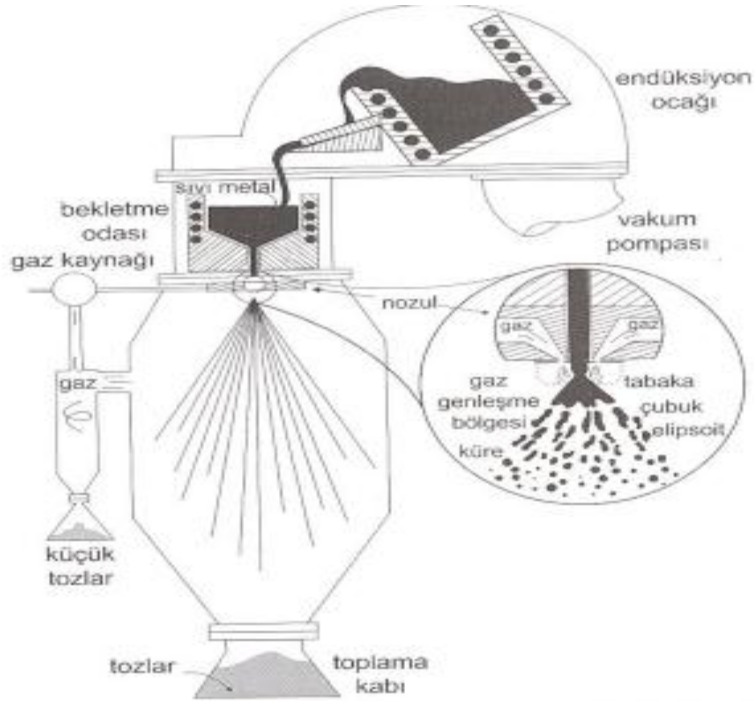
Ayrıca atomizasyon yöntemleri, alüminyum ve alüminyum alaşım tozlarının ticari miktardaki üretimlerinde en yaygın ve en ekonomik olan yöntemlerdir. Ancak Al aşırı reaktif ve yumuşak olmasından dolayı, oksitlenme ve sıvama aşılması gereken temel sorunlar olarak ortaya çıkmaktadır. Kısaca, işlem sırasında değirmeni soğutma, koruyucu atmosfer ve alüminyumun yapışmasını önleyici organik bağlayıcıların kullanılması ile beraber yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir [48].



Şekil 2.2. Atomizasyon tekniklerinin şematik gösterimi [48]

### Gaz atomizasyonu

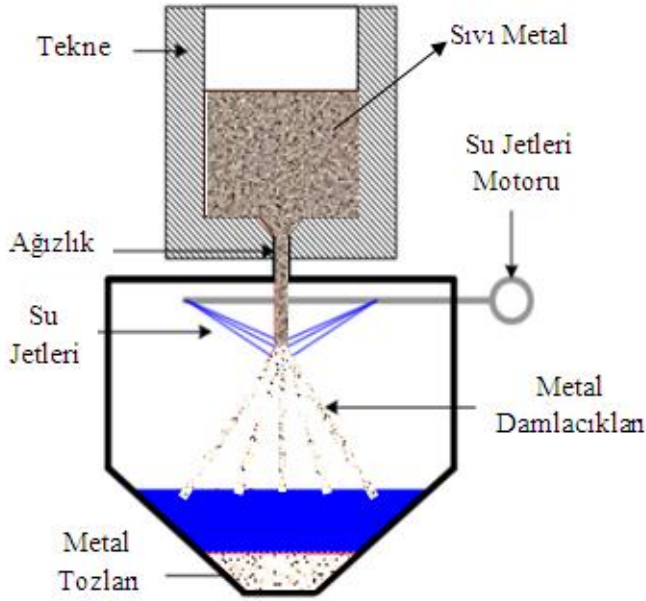
Gaz atomizasyonu ergiyik metal demetine, yüksek basınçlı gazın belli bir açı ile püskürtülerek hızının dağılımı ile sıvı metal damlacıkları elde edilmesi işlemidir. İki ya da daha fazla ağızlık, sıvı metalin akma eksenini etrafına eşit açıda yerleştirilir ve gaz hızı ile ergiyik metal demeti bir noktada keserler. Bu bölgeye atomize bölge denir (Şekil 2.3). Bu yöntemle üretilen tozlar ince küresel ve yüzeyde oksit olmayan tozlar üretilir. Kimyasal saflıkları iyidir [53].



Şekil 2.3. Gaz atomizasyon ünitesi [53]

### Sıvı atomizasyonu

Ergiyik metal akış eksenini etrafında en az iki tane olmak üzere eşit açıda yerleştirilen su jetleri ile kesilir (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Su atomizasyonu ünitesi

#### Santrifüj atomizasyonu

Santrifüj yönteminde ergimiş metalin damlacıkları yüksek hızda dönen bir diskten fırlatılırlar. İki çeşit santrifüj atomizasyonu vardır. Bunlardan birinde, bir kap içindeki ergiyik metal, ergiyik metalin damlacıklara ayrılması için, uygun bir hızda düşey eksen etrafında döndürülür veya bir metal demeti dönen bir disk veya koni üzerine akıtılır. Diğerinde ise, bir metal çubuk yüksek hızda döndürülür ve serbest uça elektron ışını veya plazma arkı vb. ile ertilir. Bu ikinci tip işlem, Döner Elektrot Atomizasyonu olarak bilinir ve çubuk düşey veya yatay ekseninde döndürülebilir. Bu uygulamanın önemli bir üstünlüğü, atmosfer kontrollü bir ortamda, hatta vakumda bile çalışabilmesi, böylece çok reaktif olan metallere ait temiz tozlar üretmesidir [49].

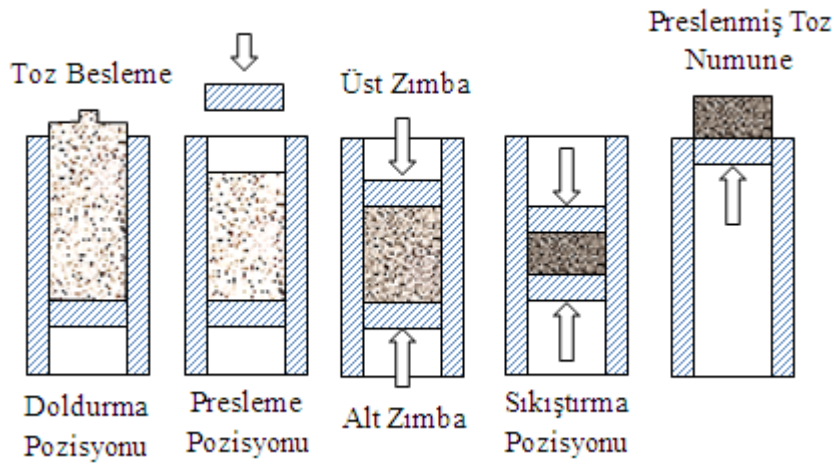
## 2.2. Metal Tozlarının Preslenmesi

Günümüzde toz metalurji teknolojisiyle metal tozlarını belirli basınçlar altında sıkıştırıp daha sonra da bu sıkıştırılmış kütleleri belirli sıcaklıklarda sinterlemek suretiyle imalatı çok güç olan makine parçalarını dahi elde etmek mümkündür. Presleme işlemi tüm presleme sistemleri için aynı mantıkla çalışır. İlk olarak metal tozu kalıp boşluğuna doldurulur. Daha sonra iki veya daha fazla aksenal hareketli alt ve üst zımba vasıtasıyla istenilen karmaşıklıkta şekle ve oldukça homojen yoğunluk dağılımına sahip olacak şekilde makine parçaları sıkıştırılır. Bu şekilde elde edilen sıkıştırılmış parça, birbirine göre izafi hareketli dişi kalıp ve alt zımbalar yardımıyla kalıptan çıkartılır [47].

Tozlar aynı şekil ve boyutta olmadığından sıkıştırma öncesi, tozların homojen dağılımlarını elde etmek amacıyla tozlar yağlayıcılarla birlikte belli bir süre karıştırılırlar. Yağlayıcı kullanmanın amacı, tozların şekillendirilmesi sırasında toz kütlelerinin kalıp duvarlarını daha az aşındırması, parçanın kalıptan daha kolay çıkarılması ve toz taneleri arasındaki sürtünmeleri azaltmak suretiyle tozların akışını kolaylaştırmak ve meydana gelecek enerji kayıplarını azaltmaktır. Yağlayıcılar düşük yoğunlukta olduklarından çok az miktarda toza ilave edildiğinde çok büyük bir hacmi işgal edebilir [47, 54].

Şekillendirme sonrası parçanın kalıptan çıkarılması için gerekli olan sıyırma basıncını düşük tutan yağlayıcı iyi bir yağlayıcıdır. Yağlayıcı ve toz optimum bir sürede karıştırılmalıdır. Fazla karıştırma, düşük ergime derecesine sahip yağlayıcının ısınarak yapışkan bir hal almasına sebep olabileceği gibi, az karıştırma ise yağlayıcıdan beklenen özelliği karışıma yansıtmaz. Bazı yağlayıcılar yapıştırıcı görevi görüp mukavemet artışına sebep olduğu gibi bazıları ise sinterleme esnasında yanarak gözenek artışına sebep olur ve buna bağlı olarak sinterleme ile artması gereken yoğunluk düşebilmektedir [55].

Kalıbın iç yüzeyinde oluşan sürtünme, diğer bütün kuvvetlerden büyüktür. Bu kuvvet kalıbın merkezine doğru azalır. Bu sırada basınçtan dolayı toz parçacıkların yer değiştirmesi esnasında her toz paçacığı, üzerindeki basıncın tesiri ile direncin en az olduğu yöne dolayısıyla daha az yoğun bölgelere kaçma eğilimi gösterir. Böylece kısmen yanlara doğru, fakat daha çok kalıp merkezine doğru bir toz akışının da olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 2.5.) [47,56].



Şekil 2.5. Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası [55]

Preslenmiş parçanın tüm yüksekliği göz önüne alınırsa daima basıncın büyüdüğu yönde akıp giden bir yoğunluk düşüşü tespit edilebilir. Tek yönlü preslemelerde parçanın zımbaya en uzak bölgesinde, çift yönlü preslemelerde parçanın orta bölgesinde kötü yoğunluk dağılımı görülür. Preslenmiş bir parçanın yoğunluğundaki istenmeyen bu farklar parça boyu ile direkt alakalıdır. Sıkıştırma mekanizmasının iyi bilinmesi kalıp tasarımındaki parametre ve kriterleri belirleyici yönde bir etkiye sahiptir [47,56].

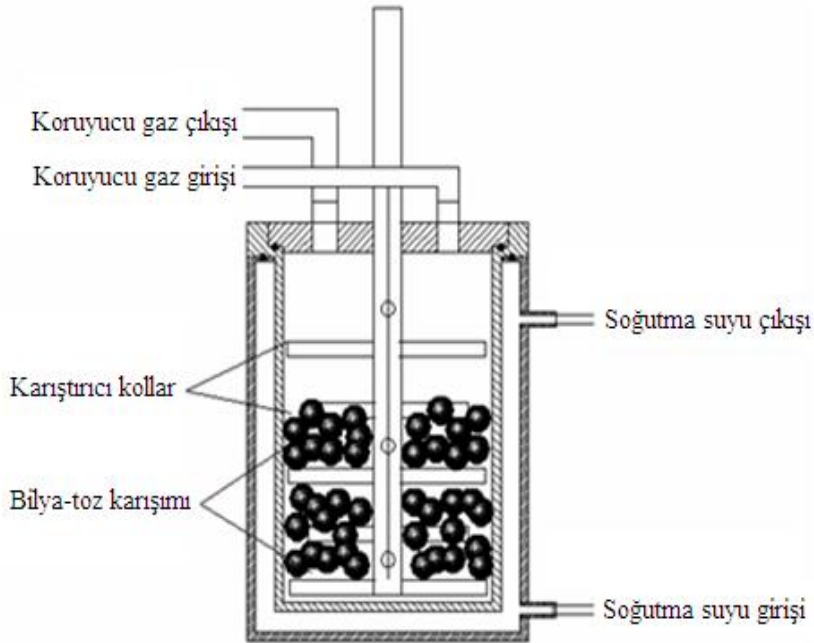
### 2.2.1. Presleme öncesi tozların karıştırılması

Seçilen metal tozları, dengeli homojen karışımı verecek şekilde karıştırılmalı ve bu karışım, kalıbın bütün bölgelerine dolacak akıcılıkta olmalıdır. Bunu başarmak için

tozlar hassas bir şekilde tartılmalı, grafit gibi metal olmayan malzeme ile birlikte karıştırıcıya konulmalı ve katı yağlayıcı %0,5 ile %1,5 arasındaki bir oranda olmalıdır. Karıştırma zamanı ve hızı, sonradan gelecek işlemlerdeki malzeme davranışlarına ve üretilen parçanın özelliklerine etki eder. Kalıp aşınmasını en aza indirmek ve sıkıştırma basıncını azaltmak için yağlayıcıların bütün tanelerle temasta olabilecek şekilde karıştırılması gerekir [49]. Karıştırmanın amacı, farklı yapıdaki malzemelerden isteğe ve ihtiyaca bağlı yeni bir karışım elde edilmesidir.

### 2.2.2. Yüksek enerjili atritörde karıştırma işlemi

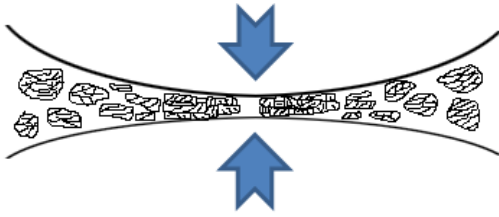
Karıştırma işlemi için yüksek enerjili atritör çalıştırıldığında, yüksek bir enerji ile bilyalar birbirine çarpar ve çarpmanın etkisiyle bilyalar arasında kalan tozlar ezilir. (Şekil 2.6) Aynı zamanda sert olan malzeme daha küçük parçalar halinde kırılarak yumuşak matris içerisine gömülür [57].



Şekil 2.6. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü [57].

Karıştırma esasında kuru ve katı haldeki tozların birbirine periyodik olarak kaynaklanması ve tekrar bu büyüyen malzemelerin kırılmasını sağlayarak daha ince ve daha homojen bir mikro yapı elde edilmesini sağlayarak, dayanımı yüksek olan kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır [57].

Şekil 2.7’de bilyaların çarpışması sonucu ezilen ve birbirine kaynayan tozlar görülmektedir. İşlem devam ettikçe tozlarda pekleşme, soğuk kaynama ve kırılma devam eder. Çok kısa bir sürede dahi karışım elde edilir. Ancak homojen değildir. Artan karıştırma zamanına bağlı olarak katmanlı yapı kaybolur ve homojen bir yapı elde edilir [58].



Şekil 2.7. Bilyalar arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü [58]

Karıştırma işleminin istenilen özelliklerde malzeme tozu üretilebilmesi için karıştırma parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu parametreler; karıştırma tipi, karıştırma kabının cinsi, karıştırma işleminin hızı, karıştırma süresi, karıştırıcı bilyaların tipi, ebatı ve ebat dağılımları, bilya toz oranı, karıştırma kabı doluluk oranı, karıştırma ortamı, işlem kontrol kimyasalları ve karıştırma sıcaklığıdır [59].

### 2.2.3. Sıkıştırma yöntemleri

TM ile üretilen makine parçalarının şekil ve boyu üzerindeki kısıtlamalar sıkıştırma işlemleri ile ilgilidir. Metal tozlarını preslemek için birçok uygun yöntem vardır. Fakat bunlardan çok azı homojen dağılım sağlayabilir. Özellikle karmaşık parçalarda bu daha da zordur [47].

### Tek yönlü sıkıştırma

Tek yönlü sıkıştırmada, dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla, tozlar arası ve toz- kalıp çeperi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına sebep olmaktadır. Bu sebepten yük, iş parçasına düzenli olarak uygulanmamaktadır. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermektedir. Yoğunluk, hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yüksek olmakta ve sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Yoğunluktaki bu azalma iş parçasının boy/ çap oranına bağlıdır [47,55,60].

Sürtünmeyi en aza indirmek, üniform bir yoğunlaşma elde etmek ve sıkıştırılabilirliği artırmak için yağlayıcılar kullanılır. En çok kullanılan yağlayıcılar çinko stearat, stearik asit ve asetondur. Kalıp duvarının tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gerekir. Bundan dolayı genellikle sert metal kalıplar kullanılmaktadır. Diğer önemli faktör ise, yükseklik ve çap arasındaki ilişkidir. Tek eksenli preslemede, başlangıçta kalıba doldurulan toz kütleindeki yüksekliğin çapa oranı (Y/Ç), presleme sonrası yoğunluk dağılımını direkt etkilediğinden önemlidir. Bundan dolayı bu limitin,  $Y/\Ç \leq 4$  olması önerilmektedir [60].

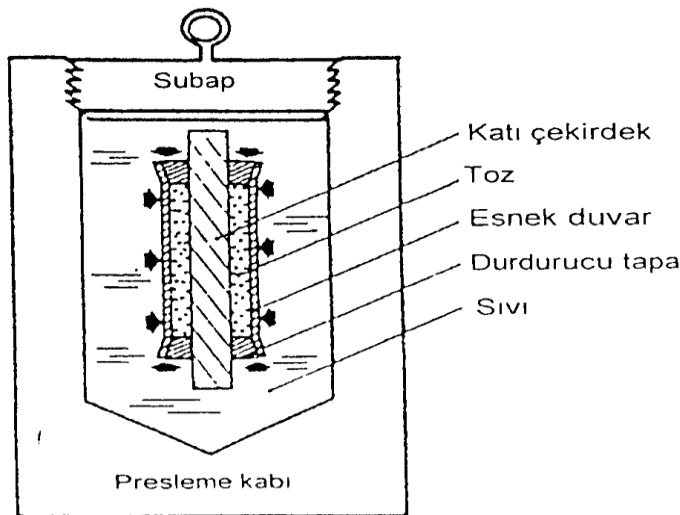
### Çift yönlü sıkıştırma

Çift yönlü preslemede toz, birbirine zıt yönlü olarak hem alt, hemde üst zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Her yönden eşit veya farklı miktarda hareket veya basınç uygulanır. Çift yönlü sıkıştırma ile kalıp içerisinde boydan boya dengeli bir sıkıştırma temin edilir [47]. Bu yöntemde sıkıştırılan parçadaki yoğunluk dağılımı, tek yönlü sıkıştırma ile elde edilen parçaların yoğunluk dağılımından daha homojendir.



### İzostatik sıkıştırma

Basınçların aynı anda her yönden eşit olarak uygulanabildiği tek yöntemdir. Toz kalıp görevi yapan elastik bir kaba konup kapatılır. Yumuşak kalıptaki hava sıkıştırma sırasında çıkacağından önceden boşaltılır. Daha sonra kalıp, akışkan banyosu içindeki bir basınç kabına daldırılır. Akışkana yüksek basınç verilerek kalıp hidrostatik basınç etkisinde bırakılır (Şekil 2.8). Basınç kabından çıkarıldıktan sonra, parçanın üzerindeki yumuşak kalıp alınır ve genellikle bir daha kullanılmaz. Bu yöntemde üretilen toz metal parçalar da daha homojen bir yoğunluk dağılımı elde edilebilir [47, 61]. Sıcak veya soğuk olarak yapılabilir. Bu sistemin dezavantajı ise parçanın verilen boyut toleransı içinde tutulmasının güç olmasıdır.



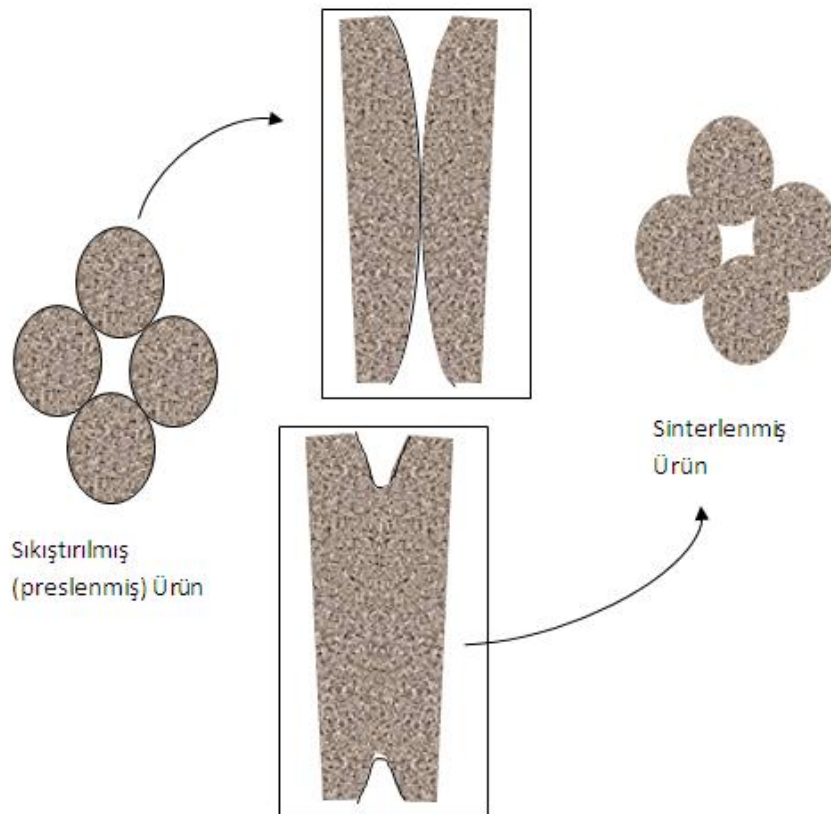
Şekil 2.8. İzostatik sıkıştırma [55]

### **2.3. Metal Tozlarının Sinterlenmesi**

Sinterleme (pişirme), malzeme tozlarının sıcaklığın etkisiyle birbirlerine difüzyon yoluyla birleşmesini sağlayan ve kademeli bir şekilde tozlar arasındaki gözenek hacmini azaltan bir yüksek sıcaklık işlemidir [62]. Sinterleme sıcaklığı, tek bileşimli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının  $2/3$ ' ü veya  $4/5$ ' i kadar alınır. Çok bileşimli

sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı ergime derecesi düşük olan metalin altında tespit edilir. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi kısalmır [63].

Sinterleme, preslenmiş parçalarda önemli etkiler meydana getirir. Bunlar; kimyasal değişme, boyutsal değişme, iç gerilmelerin giderilmesi, toz parçacıklarında değişmeler ve alaşımlamadır. Toz haline getirilmiş malzeme belli bir şekilde sıkıştırıldığında toz parçacıklar, aralarında önemli miktarda gözenekli olarak, çok yerde birbiri ile temas halindedir. Sınır enerjisini azaltmak için atomlar sınırlara difüzyon ederler. Tozların birbirine bağlanmasını sağlayarak sonunda gözeneklerin büzülmesine neden olurlar. Sinterleme süresi arttırılırsa gözenekler yok olabilir ve malzemenin yoğunluğu artar [62].

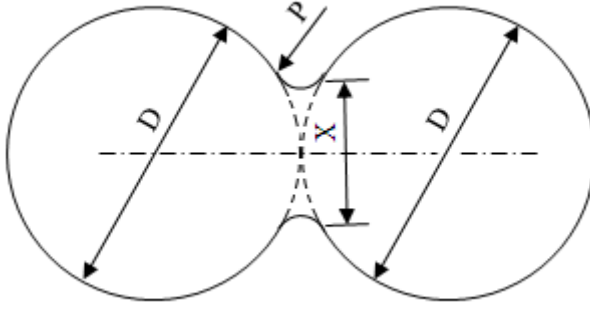


Şekil 2.9. Sinterleme esnasında difüzyon oluşumu [62]

### 2.3.1. Sinterleme teorisi

Tozların preslenmesinden sonra, küresel şekilli toz parçacıkları noktasal olarak temas halindedirler. Şekil 2.10’ de iki küresel parçacığın sinterleme profili verilmiştir.

Sinterleme işlemi sırasında, temas eden parçacıklar arasındaki bağlar kuvvetlenir ve kaynaklaşmalar oluşur. Sinterleme işleminde, parçacıklarda önce bir boyun büyümesi ve ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülme oluşur. Daha sonra, gözenek kanalları kapanarak gözenekler kapalı gözenek şekline dönüşürler. Şekil 2.10’ de sinterleme işlemi sırasında parçacıklar arasındaki bağlarda ve gözeneklerdeki değişimler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. İki küresel parçacığın sinterleme profili ( $X$ =boyun çapı,  $D$ =küre/parçacık çapı,  $P$ =boyun yarıçapı)

Sinterlemenin oluşabilmesi için atomların yeterli yayınmaya sahip olması gerekir. Atomik yayınma sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, sinterleme önemli derecede sıcaklığa bağlıdır. Sinterleme işlemi, yüzey enerjisi ile alakalı olduğundan ince ve düzensiz tozlar için kaba küresel tozlara göre daha çok enerji harcanır.

Sinterlemeden önce toz kütlelerinin özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Şekillendirme sırasında tozlar deforme olmamışsa Van der Waals bağlarının bir sonucu olarak tanecikler arasında zayıf bağlar oluşur. Preslenmiş parçalarda ise bu durum farklıdır.

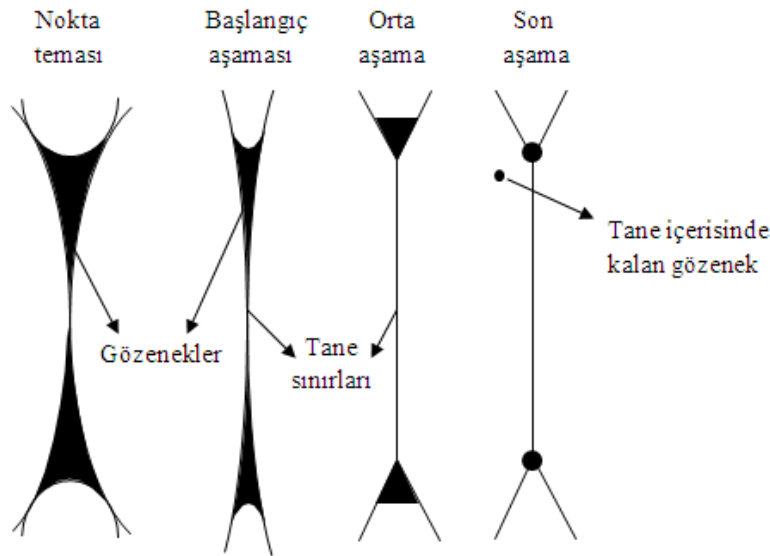
Özellikle temas bölgelerinde uygulanan basınç, yüzey filmlerinin bozulmasına sebep olur. Böylece sinterlemeden önce, uygulanan basıncın etkisiyle toz parçacıklarının temas ettiği küçük alanlarda oluşan sıkışmaların sonucunda yapışmalar meydana gelir.

Temas halindeki tozların sıcaklığın etkisiyle atomların yayınmasıyla malzeme transferi başlar. Malzeme transferinin mekanizması, harekete geçirici kuvvetlerin kütle akışı meydana getirmesi ile çalışır. Hacim ve yüzey taşınımı olmak üzere iki türlü malzeme transferi vardır. Sinterlemeyi kontrol eden yüzey taşınımı, tane yüzeyinde kütle akışı meydana getirir. Yaygın sinterleme özelliklerinin yüzey taşınımıyla geliştirilmesine rağmen boyutsal değişim olmaz ve yoğunluk sabit kalır. Yüzey taşınımı sırasıyla yüzey difüzyonu ve buharlaşma-yoğunlaşma olmak üzere iki önemli mekanizma yardımcı olur. Yüzey taşınımıyla boyutsal değişim olmaz, fakat sinterlemedeki hacim taşınımı boyutsal değişmeye sebep olmaktadır. Hacim taşınım mekanizması; hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, plastik ve viskoz akıyı kapsar. Plastik akının önemsiz olduğu düşünülür. Sinterleme sırasında karşılaşılan yüzey gerilmesi yeni dislokasyonlar üretmek için yetersiz kalır. Bununla birlikte, elektron mikroskobu ile ince tozlar ısıtılırken, boyun bölgesinde dislokasyon hareketinin meydana geldiği görülmüştür. Her iki taşınım mekanizmasında da blok parça yüzey alanı, boyun büyümesiyle azalmasına rağmen, sinterleme sırasında esas değişiklik yoğunlukta meydana gelir. Genellikle hacim taşınım mekanizması son sinterleme bölgesinde aktiftir. Bu değişik difüzyon mekanizmaları malzemeye, tane boyutuna, sinterleme devresine, sıcaklığa ve diğer bazı işlem parametrelerine bağlıdır.

Sinterleme üç devrede olabilir. Bunlar: ilk sinterleme devresi, orta sinterleme devresi ve son sinterleme devresidir [61].

İlk sinterleme devresinde; birbirine temas eden tozlar arasında önce bir boyun büyümesi ilerleyen sinterleme süresi ile gözeneklerde büzülme meydana gelir ve gözenek kanalları kapanarak, kapalı gözenek şekline dönüşürler. Boyun bölgesinin

içine doğru net bir kütle akışı vardır. Boyun yarıçapının ( $X/2$ ), parçacık çapına ( $D$ ) oranının 0,3' den az olduğu kısım sinterlemenin başlangıcının ilk aşaması olarak adlandırılır (Şekil 2.11) [61].



Şekil 2.11. Sinterleme aşamaları [61]

Orta sinterleme devresinde; hacim ve tane sınırı difüzyonu ile gerçekleşen yoğunluk artışı ve tane büyümesidir. Orta kademede gözenekler, ilk kademeye göre daha düzgün şekillidir ve birbirine bağlı silindirik yapıya sahiptir. Fakat açık gözenekler son sinterleme devresine kadar kalır. Bu durumlarda boyutsal değişim arzu edilmez. Böyle durumlarda yoğunlaşmayı en aza indirmek için kısa sinterleme zamanı, düşük sinterleme sıcaklığı ve yüksek sıkıştırma basıncı kullanılır.

Orta sinterleme devresinin başlangıcında, gözenekler tane sınırına yerleşmiş durumdadır. İlerleyen sinterleme zamanı ile gözenekler ve tane sınırları arasında bazı etkileşimler meydana gelir. Bu etkileşimler iki tür mekanizmayla oluşur: 1. Tane büyümesi sırasında gözenekler tane sınırı hareketiyle sürüklenir, 2. Tane sınırları, gözeneklerin yerlerinden ayrılması ile bozulur. Sinterleme sıcaklığı arttıkça tane sınırlarının hareket oranı artar. Gözenekler tane sınırından daha yavaş hareket

ettikleri için tane sınırlarından ayrılırlar. Tane içerisindeki gözeneklerin ayrışması sertlik artışına neden olur ve teorik yoğunluk da % 70 ile % 90 arasında değişir. Orta sinterleme devresinin sonucunda, silindirik gözenekler, tane büyümesini yavaşlatmada o kadar etkili olmayan küresel gözeneklere dönüşmeye başlar. Bu da sinterlemenin son aşamasının başlangıcının göstergesidir.

Son sinterleme devresinde; tane sınırlarından ayrılmış ve izole edilmiş kapalı küresel gözeneklerin oluşumu sinterlemenin son devresini tanımlar. Bu küresel gözenekler hacim taşınım mekanizması ile büzülür ve gözeneklilik oranı azalır. Yoğunlukta %92' yi geçen bir teorik yoğunluk görülür.

### **2.3.2. Sinterleme atmosferleri ve etkileri**

Sinterleme için gerekli bir atmosfer prensip olarak parçaların ve fırının oksitlenmesini önlemek, yüzey oksitlerini indirgemek, fırında buharlaşan yağlayıcı gazlarını dışarı atmak ve demir karbon alaşımlarında olduğu gibi blok parçaların bileşimini kontrol etmek için kullanılır.

Genellikle bu atmosferler endotermik gaz ve kırılmış amonyaktır. Bununla birlikte saf hidrojen ve ekzotermik gazlarda nadir olarak kullanılır [64]. Ne yazık ki her malzemenin sinterlemesinde kullanılacak süper bir gaz yoktur. Bu nedenle, atmosfer seçimi basit gaz sistemlerinden karmaşık gaz sistemlerine kadar çok değişiklikler gösterir. Atmosferin seçimi, sinterlenecek malzemeye göre tespit edilir. En iyi şartları sağlayacak atmosfer seçilirken ekonomiklik ve güvenilirlik gibi diğer faktörlerde hesaba katılır. Endüstride kullanılan gazlar şu şekilde sınıflandırılabilir.

#### **Yerinde üretim**

Bu yöntemde fırının yanına yerleştirilen düzenek yardımıyla atmosfer üretilir. Bu metot ekzotermik, endotermik ve kırılmış amonyak atmosferlerinin üretimi için kullanılır. Ekzotermik atmosfer bir hidrokarbon gazının hava miktarının kontrol

edildiği bir refrakter yanma hücresinde yakılmasıyla üretilir. Endotermik atmosfer ise propan ve doğal gaz gibi hidrokarbonların reaksiyonuyla bir jeneratör içinde üretilir. Endotermik atmosferler daha çok karbon çeliklerinde kullanılır.

### Sentetik atmosferler

Genellikle fırının dış kısmında depo edilmiş kütle gazlar gereken kompozisyonu gerçekleştirecek karıştırma ünitesine bağlanır. Bu metot, genellikle azot ve hidrojen gazları için kullanılır. Eğer karbon kontrolü gerekliyse bu karışıma az miktarda doğal gaz ve propan gibi hidrokarbonlar ilave edilir. Azot ve hidrojenin oranları % 100' e varan oranlarda değiştirilebilir. Elde edilen atmosfer, karıştırma ünitesinden fırına gönderilir.

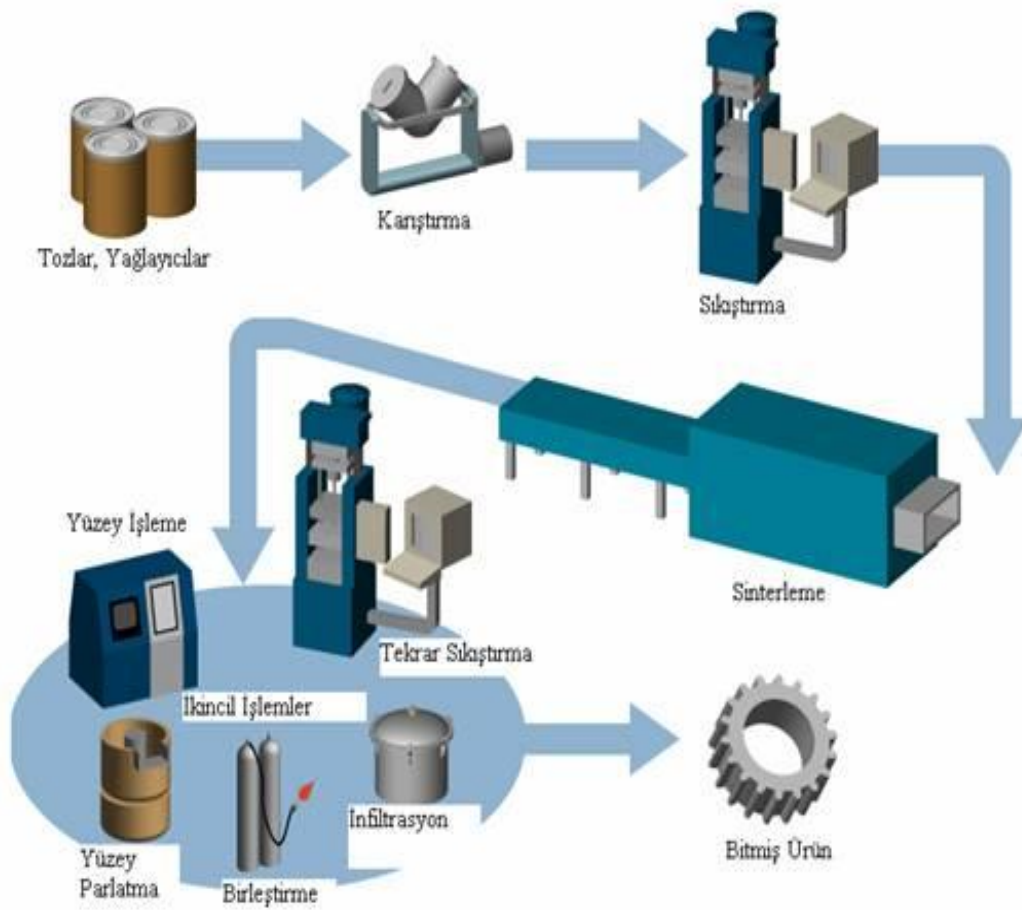
### Dubleks sistemler

Sentetik atmosfere çok benzerdir. Tüpte depo edilmiş azot gazı bir veya daha fazla gazla istenen atmosfer bileşimini verecek şekilde karıştırılır. Bu sınıftaki iki temel atmosfer kırılmış amonyakla azot ve endotermik gazla azottur [65].

Sinterlemede kullanılan atmosferler, parçaları oksitlenmekten koruduğu gibi, mevcut oksitleri de indirger ve atmosferin bileşimine göre karbürizasyon veya dekarbonizasyon meydana getirir. Sıcaklık ve son karbon konsantrasyonu karbürizasyon uygulamaları için bilinmesi gerekli parametrelerdir [66]. Eğer karbon miktarı kontrol edilmezse fazla karbon atmosferle reaksiyona girerek kaybedilir veya fazla karbürizasyon meydana gelir. Karbon miktarı, su buharı-hidrojen, karbondioksit-karbon monoksit ve metan-hidrojen oranları ile belirlenir. Uzun sinterleme zamanlarına ve yüksek sinterleme sıcaklıklarına izin verilmezse denge oranları daha iyi olan atmosferler gerekir [67].

## 2.4. Toz Metalurjisinin Avantajları

TM küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına son derece uygundur. Belirli derecede porozite (gözenek) ve geçirgenlik elde edilir. TM ile üretilen parçaların büyük bir kısmında elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi talaşlı işlem gibi ekstra operasyonlara olan gereksinimleri ortadan kaldırması ve malzeme kaybının çok az olması TM yönteminin ekonomik bir üretim yöntemi olduğunun göstergesidir.



Şekil 2.12. Toz metalurjisinin işlem basamakları

Bazı metallerin ergime sıcaklığı çok yüksek olması ve bu sıcaklıklara ulaşılamaması (tungsten, molibden gibi), bazı özelliklerin ancak TM ile sağlanabilmesi (kendi



kendine yağlanan yataklar), süper alaşım ve sert metaller gibi önemli malzemelerin bu yöntem ile üretilmesi toz metalurjisini zorunlu kılan başlıca sebeplerdir. Çok sayıda üretim söz konusu olduğunda en iyi uygulanabilen bir metot olması, boyut kontrolü ve şekil karmaşıklığı TM yönteminin en bariz avantajlarıdır. TM yönteminin genel olarak avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yüksek malzeme kullanım oranı, düşük malzeme kaybı.
- Yüksek üretim hızları.
- Düşük maliyet
- Düzgün yüzey, yakın tolerans değerlerinin elde edilmesi.
- Karmaşık şekilli parçaların imalatı.
- Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin imalatı.
- Yüksek yoğunluğa sahip parça üretimi.
- Metal matriks kompozit ve metal alaşımları üretimi.
- Üstün mikro yapısal özelliklere sahip parça üretimi.
- Belirli derecede gözeneklilik ve geçirgenlik.

## 2.5. TM Uygulama Alanları

TM uygulama alanları oldukça geniştir. Tungsten lamba teli, diş dolguları, kendinden yağlamalı yataklar, otomotiv güç aktarma dişlileri, zırh delici mermiler, elektrik kontakları ve fırçaları, mıknatıslar, nükleer güç yakıtları elemanları, ortapedik protezler, iş makinesi parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, şarj edilebilir piller ve jet motoru parçalarının üretimi TM kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir. Metal tozlar boyalar, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, mürekkepler, sert lehim bileşikleri ve katalizörlerde kullanılmaktadır. TM kullanım alanlarından bir tanesi de savunma sanayisidir. Ateş sanatı olarak bilinen piroteknik uygulamalar savunma sanayisi için oldukça önemlidir. Piroteknik reaksiyonlar çok yüksek sıcaklık oluşturduklarından aydınlatmaya yol açarlar. Piroteknikler havai fişek, işaret fişegi ve flaş tozu olarak kullanılırlar. Genellikle demir parçalarının üretiminde kullanılan TM yöntemi otomotiv endüstrisinde oldukça geniş bir kullanım alanına

sahiptir. Düşük yoğunlukta parçalara ihtiyaç duyulduğu otomotiv endüstrisi TM yöntemini daha hafif parça üretimine doğru yöneltmektedir.

### 3. MANYETİK MALZEMELER

Manyetik olaylar M.Ö 2000 yıllarında Çinliler tarafından bilinmekteydi. Doğuda, kütle çekim kuvveti ve elektriksel etkileşim dışında bir başka etkileşim türü de, M.Ö. 4. yüzyılda bugünkü Manisa o devirdeki adıyla Magnesia’ da yaşayan insanlarca bir demir filizi parçacıklarının diğer bir demiri çekme özelliği şeklinde gözlenmiştir. Tarihi inanışa göre, o zamanlarda Manisa dağlarında koyunlarını otlatan bir çoban, ucu demirli değneğin yerdeki bazı taşlar tarafından çekildiğini fark etmiştir. Bu tip etkileşmeye bu nedenle olayın geçtiği yere izafeten manyetik etkileşme ve demir filizine de mıknatıs adı verilmiştir. Bir mıknatısın çekme ve itme özelliği mıknatısın kutupları denen bazı bölgelerde daha belirgindir. M.Ö.’ki yüzyıllarda, mıknatıs yakınına getirilen bir çubuğun, doğal mıknatıstaki özelliği kazandığı ve bu çubuğun düşey bir eksen tarafında asıldığı vakit, kendiliğinden ve yaklaşık olarak kuzey ve güney doğrultusunu gösterdiği, Çinliler tarafından biliniyordu. Bu özellikten yararlanılarak mıknatısın pusula olarak kullanılması mevcut bilgilere göre 11. yüzyıldan önceye dayanmakla birlikte pusulanın gemicilikte kullanılması 12. yüzyıla doğru olmuştur.

Manyetik olaylarla elektriksel olaylar arasındaki ilişki, 1819 yılında ilk defa H.C. Oersted tarafından tespit edilmiştir. Oersted, bu ilişkinin varlığını “içinden akım geçen bir telin yanındaki pusula ibresinin sapması” ile ortaya çıkarmıştır. Manyetik etkileşimlerin, hareket halindeki elektrik yükleri arasındaki kuvvetlerden oluştuğu kabul edilmektedir. Hareket halindeki yükler birbirine, Coulomb yasasının belirttiği elektriksel kuvvetlerin yanında, manyetik kuvvetler de uygularlar. Manyetik alan incelenirken, hareketli bir yük üzerine diğerince uygulanan kuvvetle doğrudan ilgilenmek yerine, hareketli bir yükün kendi bulunduğu uzayda bir manyetik alan oluşturduğu ve bu alanın diğer bir hareketli yüke etkidiğinin kabul edilmesi daha uygun bir yaklaşımdır.

### 3.1. Maddenin Manyetik Davranışları

Bir maddenin manyetik özelliklerini bilmek için, o maddenin atomlarındaki (veya moleküllerindeki) elektron düzenine bakarız. Atomdaki bir elektron zaten çok küçük bir mıknatıs özelliği taşır. Ama ortamda birbirine zıt yönde dönen iki elektron varsa, o zaman elektronlar birbirlerinin manyetik etkisini yok ederler ve net manyetizma sıfır olur. Ancak, bir atom paylaşılmamış elektron taşıyorsa bu, bir yöne doğru dönmenin olması ve tersi yönde elektron dönmesi olmadığı için net bir manyetizma olması anlamına gelir. Bu bilgiler ışığında, paramanyetik ve diamanyetik maddeleri tanımlayabiliriz. Atomik yapısında paylaşılmamış elektronu bulunan ve bu yüzden bir manyetik alan tarafından zayıf da olsa çekilen maddelere paramanyetik madde denir. Atomik yapısında paylaşılmamış elektronu bulunmayan ve bu sebeple bir manyetik alan tarafından çekilmeyen veya hafifçe itilen maddelere diamanyetik madde denir. Örneğin, oksijenin elektron konfigürasyonu  $2p^4$  ile biter. P orbitallerinden ikisinde aynı yönlü paylaşılmamış elektron bulundurduğu için, oksijen paramagnetik özellik gösterir. Civa atomunun elektron konfigürasyonu ise  $6s^2$  ile biter. Civa atomunun 6s orbitalinde iki ters yönlü elektron vardır. Başka bir deyişle civa atomunun 6s orbitalinde paylaşılmamış elektronu yoktur. Bu yüzden civa diamagnetik özellik gösterir [68].

### 3.2. Manyetizma Teorileri

Demir, nikel ve kobalt gibi maddeleri çekme özelliği gösteren cisimlerdir.  $Fe_2O_4$  (demir oksit) bileşiği tabii bir mıknatıstır. Sayıları çok az olmakla beraber Demir, Nikel, kobalt gibi bazı maddeler kuvvetli bazı manyetik etkiler gösterirler. Mıknatıslık özelliği 2 teori ile açıklanabilir.

#### 3.2.1 Wilhelm Weber (1804-1890): Moleküler teori

Moleküler teoriye göre manyetik maddelerin molekülleri iki kutuplu birer küçük mıknatıs gibidirler. Mıknatıslanmamış bir maddede bu küçük mıknatıslar rastgele

bulduklarından birbirlerinin manyetik alanını yok ederler ve böylece maddenin çevresinde herhangi bir alan meydana gelmez. Bu manyetik madde mıknatıslanmış durumda moleküler mıknatıslar zıt kutupları uç uca gelecek şekilde sıralanırlar. Böylece madde çevresinde manyetik alanı olan mıknatıs haline gelir. Bu teori bir çubuk mıknatısın moleküllerine kadar bölündüğünde yine iki kutuplu mıknatıs elde edileceği ve mıknatısların uçlarında manyetik alanın en büyük olduğu konularına açıklama getirir.

### **3.2.2. Andre Marie Ampere(1775-1836): Mıknatıslanma teorisi**

Oersted(1770-1851) akım geçiren bir telin etrafında manyetik alan meydana geldiğini gözlemiştir. Amper mıknatıslanmış madde içinde dolaşan akımlar olduğunu ve maddenin manyetik özelliğinin bu küçük kapalı devre akımlardan ileri geldiğini söylemiştir. Bugünün atom teorisi bu görüşü desteklemektedir. Direnci olmayan ve sürekli devam eden bu akım devreleri atomlardaki elektronların dönmesinden ileri gelir. Hareket eden bir elektrik yükü çevresinde her zaman bir manyetik alan meydana getirdiğinden negatif elektrik yüklü bir elektronda yaptığı bu hareketlerinden dolayı bir manyetik alan meydana getirir. Meydana gelen alanın yönü elektronun dönme yönüne bağlıdır. Mıknatıslanmamış bir maddede bu hareketler düzensizdir. Bundan dolayı etkiler birbirini yok ettiklerinden bileşke etki sıfıra çok yakındır. Madde manyetik alanda bu etkileri bir düzene girdiğinden mıknatıslanır.

### **3.2.3. Diyamanyetik maddeler**

Bağıl manyetik geçirgenlikleri 1 den biraz küçüktür. Manyetik alan içinde alana zıt yönde zayıf mıknatıslanırlar ve alanın zayıf tarafına doğru itilirler. Serbestçe dönebilen diyamanyetik bir çubuk alan içerisine konulduğunda alana dik durum alır.

### 3.2.4. Paramanyetik maddeler

Bağıl manyetik geçirgenlikleri 1 den biraz büyüktür. Manyetik alanda zayıf mıknatıslanırlar ve alanın kuvvetli tarafına doğru çekilirler Serbestçe dönebilen paramanyetik bir çubuk magnetik alan içerisine konulduğunda alan doğrultusuna paralel bir durum alır.

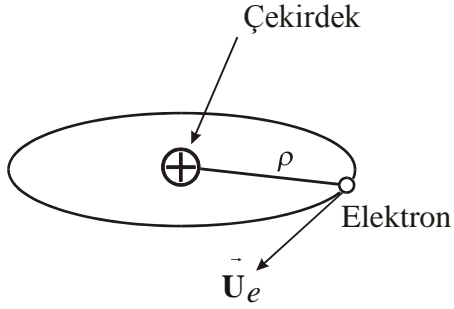
### 3.2.5. Ferromanyetik maddeler

Bağıl manyetik geçirgenlikleri 1 den çok büyüktür. Manyetik alan içinde paramagnetik maddelere benzer özellikler gösterirler ancak çok kuvvetli mıknatıslanırlar. Çizelge 3.1’de bazı maddelerin bağıl geçirgenlikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Maddelerin bağıl geçirgenlikleri [69]

Diamanyetik maddeler		Paramanyetik maddeler		Ferromanyetik maddeler	
Madde	Bağıl geçirgenliği	Madde	Bağıl geçirgenliği	Madde	Bağıl geçirgenliği
Bakır	0,999999	Aluminyum	1,00008	Kobalt	250
Gümüş	0,999998	Magnezyum	1,00015	Nikel	600
Azot	0,999996	Oksijen	1,00167	Yumuşak çelik	2000
Bizmut	0,999983	Hava	1,0000004	Demir	5000
Karbon	0,999956			Permalloy (Fe, Ni, Mn alaşımı)	100000

Kuantum fiziği olmadan, manyetik özellikler üzerinde bir açıklama getirmek mümkün değildir. Bunun yanında manyetik özellikleri atomik boyutta basit bir şekilde modelleyebiliriz.



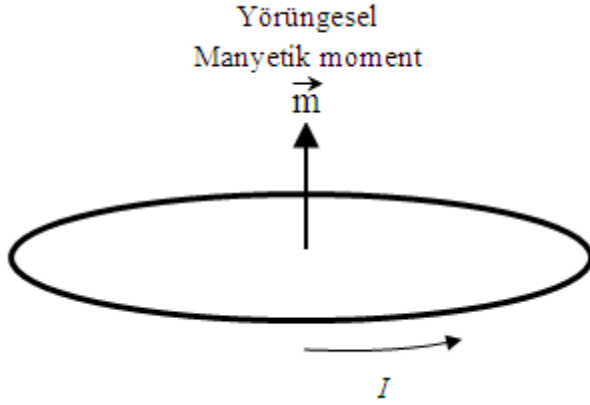
Şekil 3.1. Atom modeli [69]

Şekilde görüldüğü gibi bir çekirdeğin etrafındaki elektronlar sabit hızda yörüngelenmişlerdir. Akım saniye başına verilen bir noktayı geçen yük miktarı olduğundan yörüngedeki bir elektron;

$$I = (eU_e)/2\pi\rho \quad (3.1)$$

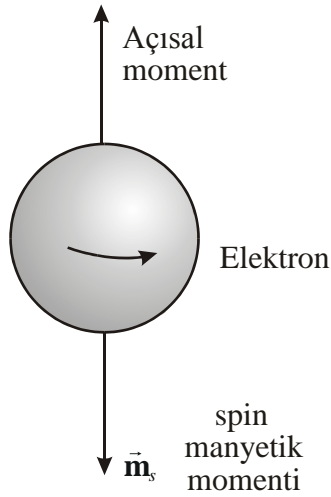
genliğinde bir halka akımı meydana getirir. Burada  $e$  elektrondaki yükün genliği,  $U_e$  hız ve  $\rho$  ise yarıçaptır. Şekil-3.2'de görüldüğü gibi yörüngedeki elektron bir yörüngesel manyetik momente neden olur [69].

Quantum mekaniğinin temel bir ilkesi olarak yörüngesel açısal momentin genliği daima  $h/2\pi$  nin bir integral çarpımıdır, burada  $h$  Planck sabitidir  $h=6.63 \times 10^{-34}$  j.s. Bir elektron aynı zamanda yörüngesel hareketi ile ilgili olmayan bir açısal momente sahiptir. Bu elektronun sabit bir oranda kendi eksenini etrafında sürekli olarak döndüğü şeklinde düşünülebilir.



Şekil 3.2. Yörüngesel manyetik moment [69]

Aşağıdaki Şekil-3.3'te ise elektronun kendi etrafında dönüşü bir dolaşım (sirkülasyon) yükü meydana getirerek elektrona bir spin manyetik momenti verir. Spin manyetik momentinin genliği sabittir.



Şekil 3.3. Spin manyetik momentini [69]

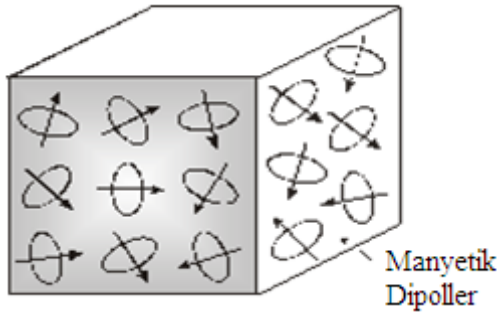
$$m_s = \frac{he}{8\pi m_e} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ A/m}^2 \quad (3.2)$$

Burada  $m_e$  elektronun kütlesidir.



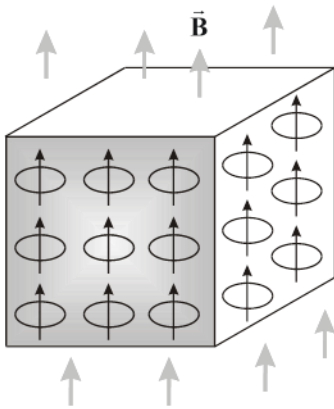
Atomun net manyetik momenti bütün elektronların yörüngesel ve spin momentlerinin yönleri ile beraber dikkate alınarak birleştirilmesi ile elde edilir. Net manyetik alan bir akım döngüsünün meydana getirdiği (manyetik dipol)'e benzer uzak bir alan meydana getirir.

Aşağıdaki Şekil-3.4'de görüldüğü gibi harici bir manyetik alanın yokluğunda bir malzeme parçası içindeki manyetik dipoller rastgele yönlendirilirler. Bundan dolayı net manyetik moment hemen hemen sıfırdır [69].



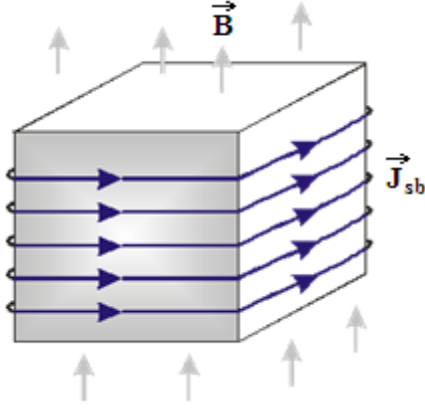
Şekil 3.4. Dipolleri rastgele yönlendirilmiş manyetik bir malzeme [69]

Harici bir manyetik alanın varlığında her manyetik dipole manyetik alanla aynı doğrultuya gelecek şekilde bir tork etkir. Aşağıdaki Şekil-3.5 ideal bir yönlenmeyi göstermektedir.



Şekil 3.5. Harici bir B alanında kalmış manyetik malzeme (manyetik dipoller aynı doğrultuya gelmiş) [69]

Paramanyetik ve Ferromanyetik malzemelerdeki manyetik dipollerin yönlenmesi orijinal manyetik alanı artırır. Malzeme içindeki manyetik dipollerin yönlenmesi aşağıdaki Şekil-3.6'da görüldüğü gibi malzemenin yüzeyi boyunca bir akıma eş değerdir.



Şekil 3.6. Doğrultuya gelmiş küçük döngüler malzemenin yüzeyi boyunca bir akıma eşdeğer oluşunun gösterimi [69]

Bu akım malzeme içinde ek bir manyetik alana neden olur. Oluşan bu manyetik alan malzemeden malzemeye farklılık gösterir. Yukarıda da belirtildiği gibi malzemeleri manyetik özellikleri açısından gruplandırmıştık. Bunlardan en iyi manyetiklik özelliği gösteren ferromanyetik malzemelerdir. Çünkü bu malzemelerin manyetik geçirgenlikleri havaya göre 2000-6000 kat daha iyidir.

### 3.3. Manyetizma ve Histerezis Eğrisi

Elektronların atom çekirdeği etrafındaki yörüngesel hareketleri ile meydana gelen elektrik akımı manyetik momenti oluşturmaktadır.

$$M = I(\text{amper}) \cdot A(\text{m}^2) \quad (3.3)$$

I elektronun çekirdek etrafındaki dolanımından kaynaklanan elektrik akımı, A ise akım çevriminin alanıdır. Atomlarının elektronlarının farklı kabuklardaki spin

manyetik momentlerinin birbirleriyle etkileşimi değiş tokuş enerjisini ( $E_{ex}$ ) oluşturmaktadır ve aşağıdaki eşitlikte verilmektedir.

$$E_{ex} = -2J_{ex}S_iS_j \cos \theta \quad (3.4)$$

Yukarıdaki formülde verilen  $J_{ex}$  değiş tokuş integrali,  $\theta$  açısı spinler arasındaki açı,  $S_i$  ve  $S_j$  sırasıyla  $i$  ve  $j$  kabuğundaki toplam spin manyetik momentleridir.

Mıknatısın manyetik dipol momentleri bütün dipol momentlerin toplamıdır, birim hacimdeki manyetik dipol momentlerin toplamı ise  $M(A/m)$  manyetizasyonu oluşturmaktadır. Manyetizasyon manyetik dipol momentlerinin toplamından oluştuğu için sadece malzemenin içinde mevcuttur.

Diğer taraftan, bir mıknatıs veya elektrik akımı tarafından üretilen serbest uzaydaki manyetik alan şiddeti  $H(Oe)$ , genellikle manyetik alan kuvveti olarak bilinir ve birimi Oersted 'dir.

Şekil 3.7'de gibi bir mıknatıs malzemesine  $H$  dış manyetik alanı uygulandığında malzemede  $N$  ve  $S$  kutupları oluşmaktadır ve  $H$  alanının oluşturduğu akı yoğunluğu sadece akımdan kaynaklandığı için malzemenin varlığında veya boşlukta aynıdır. Aynı zamanda bu akı yoğunluğu  $N$  kutbundan  $S$  kutbuna doğru yönlenmekte olup malzemeyi mıknatıslandırmaktadır, yani manyetizasyon ile aynı yöndedir. Manyetizasyon çizgileri  $N$  kutbunun yüzeyinde birim yarıçaplı küreden  $4\pi M$  manyetizasyon çizgileri yayınlanmaktadır. Böylece toplam birim yüzeyden geçen manyetik akı yoğunluğu aşağıda verilmektedir.

$$B = H + 4\pi M \text{ (cgs)} \quad (3.5)$$

Diğer taraftan dışarıdan uygulanan bu alan şiddeti, malzemenin içindeki toplam manyetik dipol momentinde değişikliğe neden olmaktadır, çünkü dipol momentler

uygulanan  $H$  ile aynı yönde yönlendiği için manyetik momentlerin vektörel toplamı değişmektedir.

$B$  manyetik akı yoğunluğu SI sistemine göre yazıldığında denklem aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.6)$$

Formülde yer alan  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$  boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Boşlukta,  $M=0$  ve manyetik indüksiyon  $B_0 = \mu_0 H$ 'dir.  $B$ 'nin birimi SI sistemine göre Tesla,  $H$  ve  $M$ 'in birimleri  $\text{kA/m}$ 'dir.

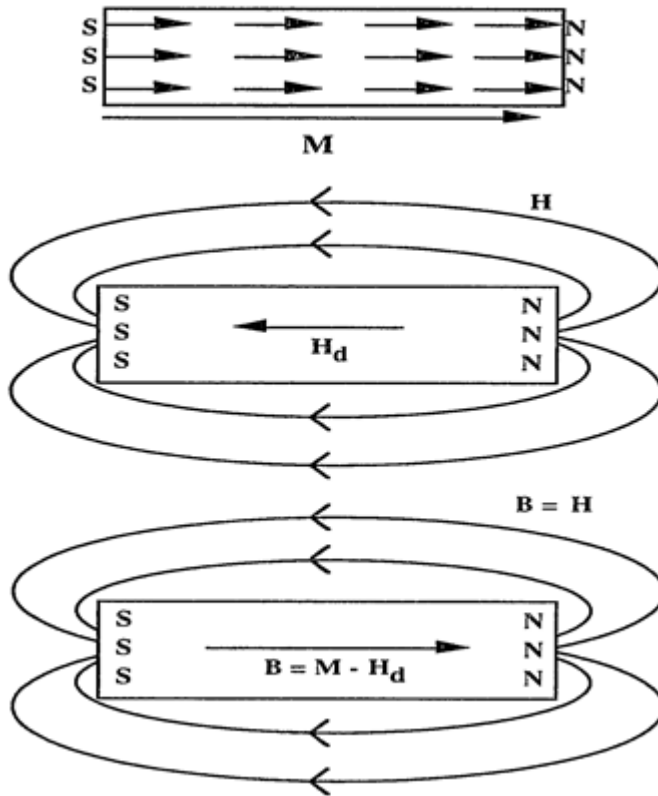
Uygulanan manyetik alan ile mıknatıslandırılan manyetik malzemede Şekil 3.7' de görüldüğü gibi S ve N kutupları oluşmaktadır.  $H$  alan çizgileri N kutbundan yayınlanarak S kutbuna ulaşmaktadır. Bu alan aynı zamanda mıknatıs içinde N S yönünde  $H_d$  demanyetizasyon alanına neden olmaktadır. Demanyetizasyon alanı mıknatısın kutuplarının yüzeyleri arasındaki manyetik dipol momentlerin etkileşimleri ile oluşmaktadır ve  $M$  ile ters yöndedir. Manyetizasyon ( $M$ ) sadece malzemenin içinde mevcuttur ve dışarıdan uygulanan manyetik alan şiddeti ile aynı yöndedir.

$$H_d = -NM \quad (3.7)$$

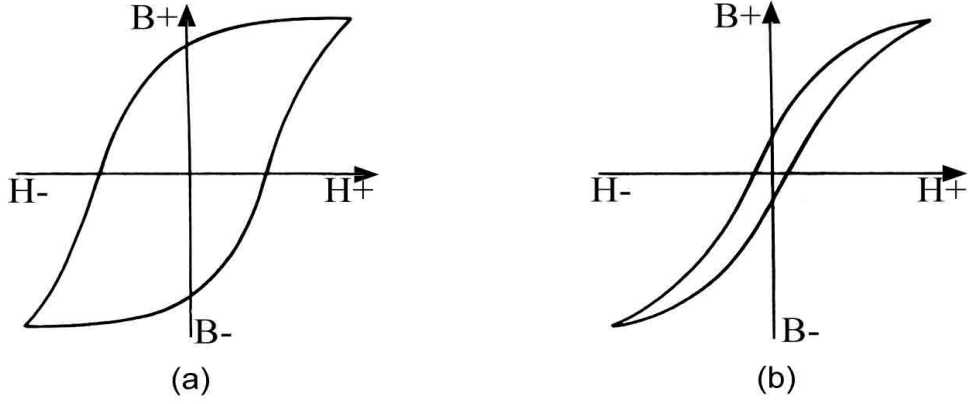
Formülde yer alan  $N$  demanyetizasyon faktörüdür ve manyetik malzemenin şekline bağlıdır. Örneğin küre şeklindeki bir malzeme için  $N=4\pi/3$ 'dür. Bu durumda malzeme içerisindeki manyetik indüksiyon veya manyetik akı yoğunluğu,  $B = -H_d + 4\pi M$  (cgs), olarak yazılabilir. Akı yoğunluğu  $B$  malzeme içinde her zaman  $4\pi M$  değerinden küçüktür ve  $M$  ile aynı yöndedir. Malzemenin dışında ise  $M=0$  ve  $B=H$  olmaktadır. Böylece şekil 2' deki dış manyetik alan  $H$  değeri ile  $B$  aynıdır. Malzeme içindeki  $B$  akı yoğunluğu çizgileri ve  $H_d$  demanyetizasyon alanı çizgileri sürekli değildir.  $B$  indüksiyon alan çizgileri merkeze doğru yaklaştıkça daha yoğun iken

uçlara doğru giderek azalmaktadır.  $H_d$  alan çizgileri ise tam tersine merkezde daha azalmaktadır [70,71].

Şekil 3.8’ de görülen histerezis eğrisi ferromanyetik malzemenin uygulanan bir manyetik alan ile mıknatıslanma özelliğini vermektedir. Başlangıç noktasında domenler izotropik olarak yönlendirilmiştir ve malzeme içerisindeki toplam manyetizasyon sıfırdır. Dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında kolay manyetik alana en yakın olan domenler alan yönünde yönlenebilir ve bunlar giderek büyümektedir. Ferromanyetik malzeme içerisinde domen duvarları uygulanan alan arttıkça giderek ortadan kalkmaktadır. Bütün domenler alana en yakın kolay manyetizasyon yönünde yönlendikten sonra alanın daha da artmasıyla rotasyonel olarak  $H$  ile paralel yönlenebilir ve atık doyum manyetizasyonuna ( $M_s$ ) ulaşmıştır.

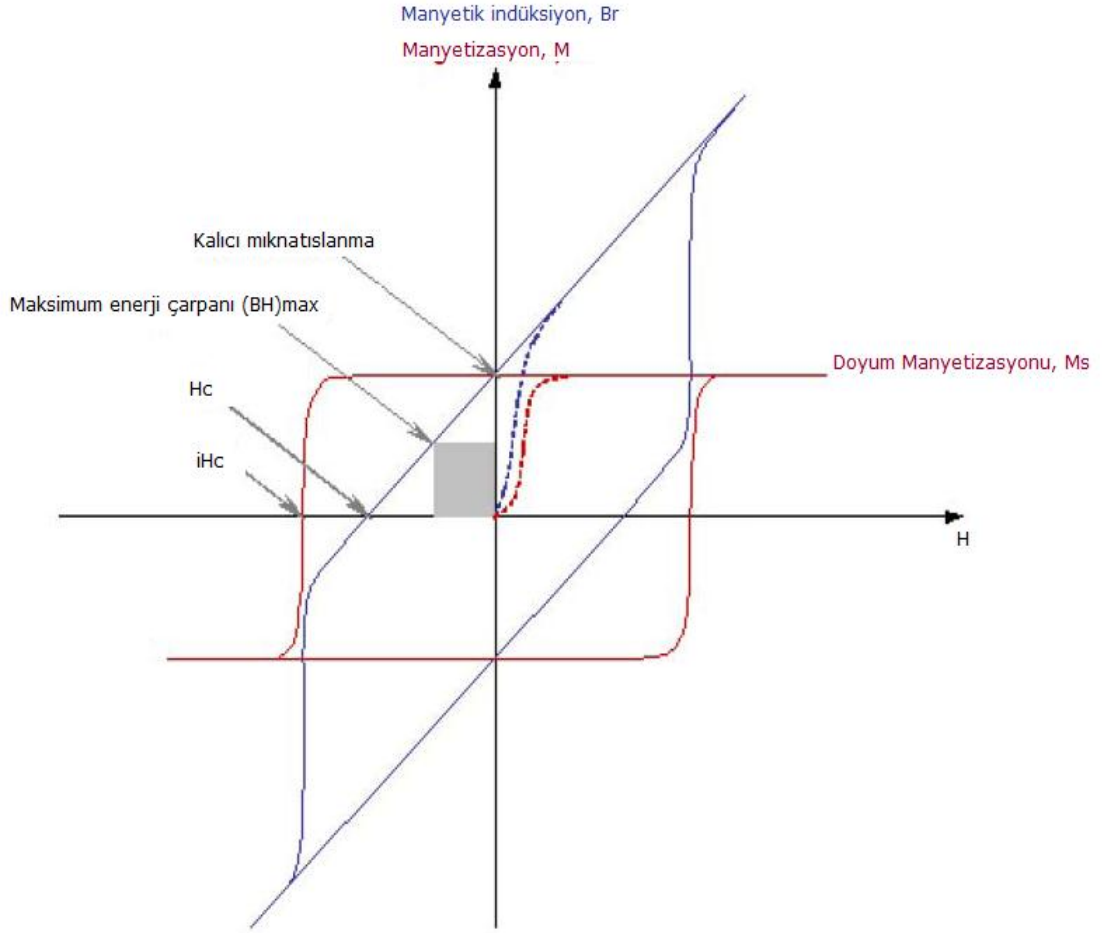


Şekil 3.7. Manyetik malzeme içerisinde ve dışında oluşan manyetik alan ve demanyetizasyon alanlarının yönlendirmeleri [72].



Şekil 3.8. Kalıcı (a) ve kalıcı olmayan (b) mıknatıslara ait histerezis eğrileri [73]

Bu alan azalarak sıfıra düşmesiyle domenler tekrar manyetik alana en yakın kolay manyetizasyon yönünde yönlenerak kalıcı mıknatıslanmayı ( $M_r$ ) oluşturmaktadırlar. Daha sonra malzemenin içerisinde yukarıda bahsedilen demanyetizasyon alanı ( $H_d$ ) den dolayı mıknatıslanma bir miktar azalmaktadır. Demanyetizasyon alanı malzemenin boyutlarına bağlı olarak mıknatıslandırılma doğrultusundaki eksenin buna dik yöndeki eksene oranına bağlıdır. Böylece uygulanan alana dik düzlem ne kadar kalın ise veya alana dik yöndeki eksenin boyutuna göre daha kısa ise demanyetizasyon alanı daha büyüktür.



Şekil 3.9. Kalıcı bir mıknatısa ait histerezis eğrisi [74]

Yukarıda  $B$  (T) ve  $M$  (kA/m) 'ye göre histerezis eğrileri verilmektedir.

Histerezis eğrisinin demanyetizasyon bölgesinde ters yönde alan uygulandığında malzemenin içerisinde toplam manyetizasyonu sıfıra götüren  $iH_c$  değeri giderici alan veya koerzivite olarak tanımlanmaktadır. Şekilde görülen  $H_c$  ise indüksiyon alanı veya manyetik akı yoğunluğu  $B$ 'yi sıfır yapan değerdir ve malzemenin boyutlarına bağlı olup değeri  $iH_c$  'den daha küçüktür. Çünkü uygulanan alan kalktığında malzeme içerisinde bulunan indüksiyon alanı aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$B = H_d + 4\pi M \quad (3.8)$$

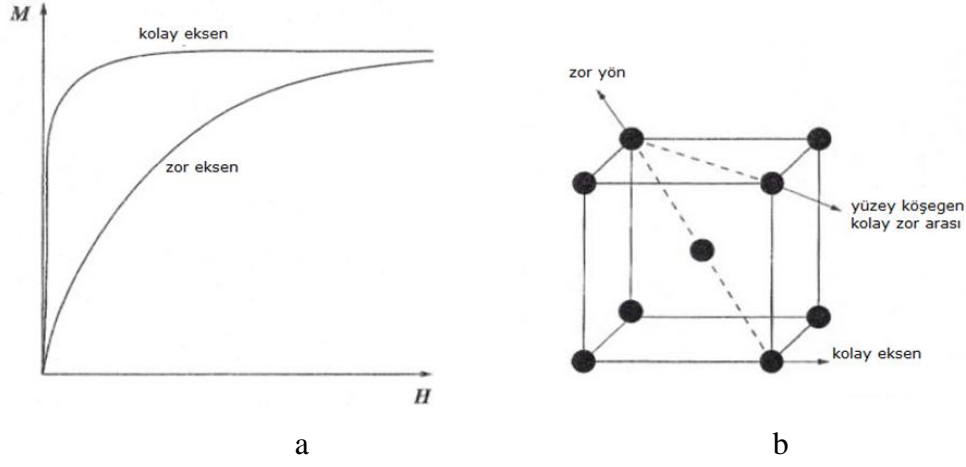
Giderici alan değeri ferromanyetik malzemenin manyetik anizotropisine bağlıdır.

### 3.4. Manyetik Anizotropi

Manyetik anizotropi malzemenin manyetik özelliklerinin belirli kristalografik yönlere bağlı olarak değişmesidir ve histerezis eğrisinin şeklini belirlemektedir. Miknatıs malzemesinin manyetizasyon yönü belirli eksenler doğrultusunda dışarıdan bir manyetik alan uygulanmaksızın yönlenmektedir, buna kolay manyetizasyon yönü denilmektedir. Bunun nedeni kristal anizotropisidir. Şekil 3.10'de demir kristali için kolay manyetizasyon yönleri verilmiştir.

Şekil 3.10 (a)'da uygulanan  $H$  manyetik alanı ile demir kristalinin kolay ve zor eksen yönündeki manyetizasyon eğrilerinde görülüyor ki malzemenin doyum manyetizasyonuna ulaşmak için kolay eksen yönünde daha az manyetik alana ihtiyaç vardır. Zor eksen yönünde ise uygulanan manyetik alan daha yüksektir. Şekil 3.10 (b) de ise  $bcc$  (hacim merkezli kübik) birim hücresi için kolay manyetizasyon yönleri gösterilmektedir.  $[100]$  yönleri kolay manyetizasyon,  $[111]$  yönleri ise zor manyetizasyon yönleridir.





Şekil 3.10 Demir kristaline ait kolay ve zor eksenin uygulanan bir H alanı ile manyetizasyonu (a) , kolay ve zor yönlerin kafes eksenleri üzerinde gösterilmesi (b).[75].

Kristal anizotropisi spin-orbit etkileşiminden oluşmaktadır. Elektronun kendi ekseninde dönmesiyle oluşan spin manyetik momenti ile atom çevresinde dolanımlarından dolayı sahip oldukları yörünge manyetik momentlerinin etkileşimleri spin-yörünge etkileşimini oluşturmaktadır. Komşu atomların spin manyetik momentlerinin etkileşimleri çok güçlüdür ve aralarındaki değiş tokuş enerjisi sadece birbirlerine göre yönlenme açısına bağlıdır, bu nedenle kristal anizotropisine katkıları yoktur.

Yörünge manyetik momentleri komşu atomların elektriksel alanından (veya kristal alan) etkilenmektedir. Bu etkileşim çok güçlüdür, hatta yörünge manyetik momentlerini yönlerinden saptırarak neredeyse yok etmeye yetecek kadar güçlüdür ve bu yüzden yörünge manyetik momentleri kafesin belirli bir yönünde yönelmektedir. Bu durum kristal anizotropisini oluşturmaktadır. Aynı zamanda elektronların spin ve yörünge manyetik momentleri arasında da etkileşim vardır. Dışarıdan uygulanan bir manyetik alan spin manyetik momentinin yönünü değiştirirken aynı zamanda yörünge manyetik momentinin de yönünü değiştirmektedir. Fakat yörünge manyetik momenti kristal alan ile çok güçlü bir şekilde spin momentlerinin yönelmesini de zorlaştırmaktadır. Manyetik

momentlerin yönünü bu kolay manyetizasyon yönünden değiştirmek için çok yüksek bir manyetik alan gerekmektedir, bu alan anizotropi alanıdır ( $H_A$ ), uygulanan enerji de anizotropi enerjisidir.

Şekil anizotropisi diğer bir manyetik anizotropi mekanizmasıdır ve manyetik özellikler malzemenin uzun ekseninin mıknatıslandırılması, kısa eksen yönündeki manyetizasyonundan daha kolay olmaktadır. Bunun nedeni malzeme içerisinde bulunan ve daha önce bahsedilen demanyetizasyon alanı ( $H_d$ ) kısa eksen boyunca daha güçlüdür. Bu eksen yönünde uygulanan manyetik alan bu yüzden daha güçlü olmalıdır. Böylece şekil bir çeşit manyetik anizotropi olarak ortaya çıkmaktadır.

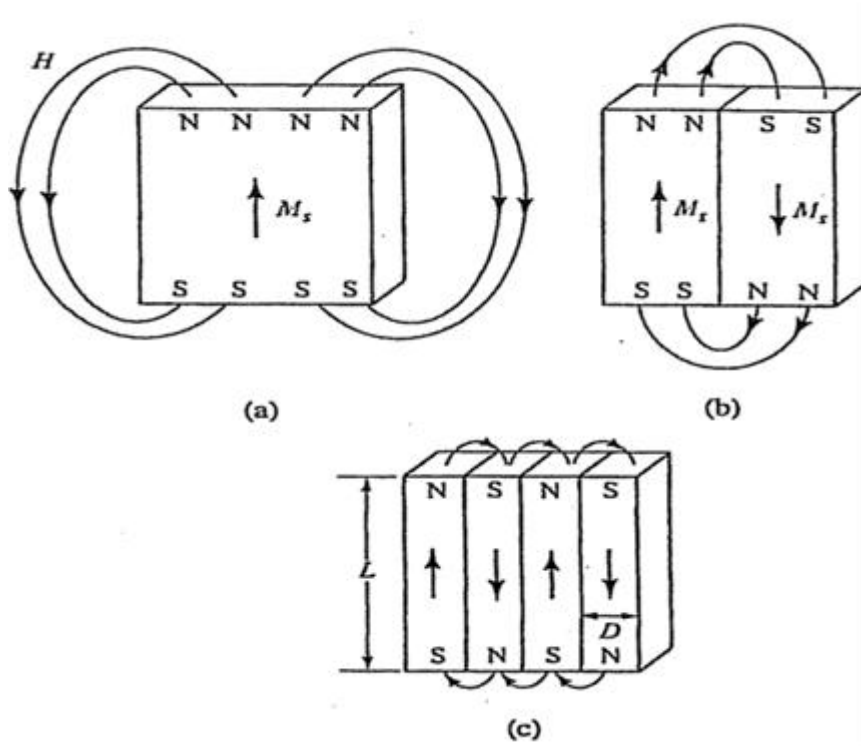
Manyetik malzeme uygulanan mekanik sıkıştırma malzeme içerisindeki domen yapısını etkileyerek manyetik anizotropiye neden olmaktadır, bu stres anizotropisidir. Mıknatıslandırılmamış bir manyetik malzemeye uygulanan stres domen duvarlarının hareketine neden olabilir. Stres aynı zamanda kolay manyetizasyon yönü yaratabilir. Bu durumda malzemeye mekanik basınç uygulandığında diğer anizotropi mekanizmalarının yanında stres anizotropisini varlığı da düşünülmelidir. Manyetik malzemeye uygulanan gerilme stresi veya sıkıştırıcı stres ile kolay manyetizasyon yönü stres eksenine paralel veya dik olabilmektedir.

Değiş tokuş anizotropisi ince taneli yani tek domenli ferromanyetik tozlarda görülmüştür. Manyetik alanda 77K gibi çok düşük sıcaklığa soğutulan Co ve oda sıcaklığında paramanyetik olan  $Ni_3Mn$  alaşımı manyetizasyon ölçümü yapıldığında bu tek domenli partiküllerden oluşan malzemelerin histerezis eğrilerinde sola doğru kayma ile değiş tokuş anizotropisinin etkisi görülmüştür [76,77].

### 3.5. Magnetostatik Enerji ve Maksimum Enerji Çarpımı $(BH)_{max}$

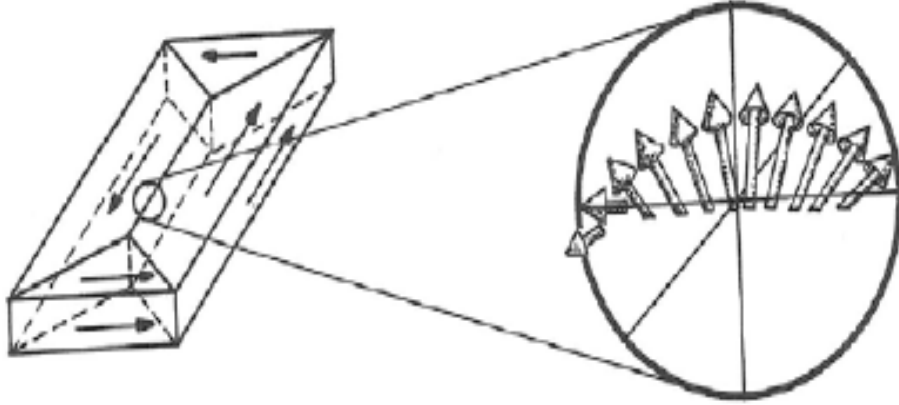
Mıknatis malzemesini doyum manyetizasyonuna ulaşıncaya kadar mıknatıslandırdıktan sonra Şekil 3.11’de görülen tek domenli kristal uygulanan alan kaldırıldığında malzemenin iki ucunda oluşan kutuplardan dolayı dipol

momentlerin etkileşimleri sonucunda manyetizasyona zıt yönde  $H_d$  demanyetizasyon alanı oluşmaktadır. Malzemenin yarı kararlı durumdan daha düşük enerji durumunda kararlı duruma gelebilmesi için  $H_d$  demanyetizasyon alanının büyüklüğüne bağlı olarak tek kristal manyetik domenlere bölünmektedir. Magnetostatik enerji manyetik malzemenin kendi sahip olduğu enerji olarak aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil 3.11. Kristalin manyetik domenlere bölünmesi [76]

Ferromanyetik malzemelerde değiş tokuş etkileşimleri daha önce bahsedildiği gibi komşu atomların manyetik momentlerinin birbirlerine paralel yönlendirmelerini sağlamaktadır. Dışarıdan bir manyetik alan uygulanmasa bile ferromanyetik malzemelerde bu mevcuttur. Fakat mıknatıslandırılma olmadan malzeme içerisinde toplam manyetizasyon sıfırdır. Her bir domen birbirine paralel manyetik momentlerden oluşmaktadır. Komşu domenler arasında sınırlar vardır ve bu bölgeler domen duvarları olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.12'de demir kristalinde bulunan domenler ve domen sınırındaki manyetik momentlerin yönlendirmeleri verilmektedir.



Şekil 3.12. Demir kristaline ait manyetik domenlerin yönlenmeleri ve domen sınırlarındaki manyetik momentlerin yönlenmeleri [77]

Domenlerin oluşması ferromanyetik malzemede toplam manyetik enerjinin azalmasını sağlamaktadır. Şekil. 3.12’de görüldüğü gibi belirli bir manyetik moment yönünde yönlenmiş olan bir domenden diğerine geçildiğinde manyetik momentler domen sınırlarında dereceli olarak yönlerini değiştirmektedir. Domen duvarlarına Bloch duvarları da denilmektedir.

Diğer taraftan, ferromanyetik bir malzeme uygulanan dış manyetik alan ile mıknatıslandırıldığında lineer olmayan bir eğri olan histerezis eğrisi oluşmaktadır. Kalıcı olmayan ve kalıcı mıknatısların histerezis eğrileri birbirlerinden farklıdır. Kalıcı mıknatısların giderici alan değeri kalıcı olmayanlara göre çok daha yüksek, kalıcı mıknatıslanma ise daha düşük olup daha geniş bir histerezis eğrisi vermektedir.

Maksimum enerji çarpımı kalıcı mıknatıs malzemesinin boyutlarına bağlı bir büyüklük olup  $B - H$  histerezis eğrisinin II. çeyreğinde elde edilen ve malzemenin demanyetize edilmesi için gerekli olan enerji değeridir. Maksimum enerji çarpımının yüksek olması için hem  $M_r$  kalıcı mıknatıslanma değeri hem de giderici alan değerinin yüksek olması gerekmektedir. Bu değer  $B - H$  histerezis eğrisinin II.

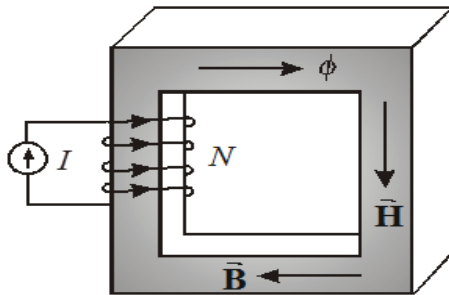
çeyreğinde en büyük alana eşit olan dörtgene karşılık gelmektedir ve teorik olarak  $\mu_0 M_r^2/4$  değerini eşittir.

### 3.6. Giderici Alan Mekanizmaları

NdFeB esaslı kalıcı mıknatıslarda giderici alan tek eksenli magnetokristal anizotropisinden kaynaklanmaktadır. Malzemenin mikroyapısı, sıcaklık, kimyasal kompozisyon bileşiğın manyetik anizotropisi giderici alan değerini etkilemektedir. Kalıcı bir mıknatıs malzemesinin manyetik domenlerinin manyetizasyon yönleri kolay bir şekilde dönmez veya domen duvarları kolay ilerleyemez, tersinir domenlerin çekirdeklenmeleri zordur. Malzemenin domenlerinin manyetizasyon yönlerini muhafaza etmesi için güçlü bir tek eksenli magnetokristal anizotropisi gerektirmektedir. Diğer taraftan şekil anizotropisi ince, uzun iğnemsı tanelerde oluşmaktadır.

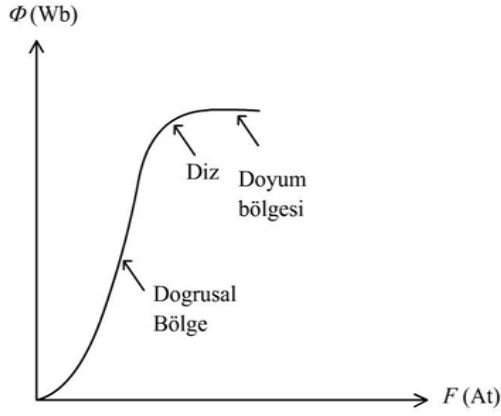
Daha önce de bahsedildiği gibi domenler mikroyapıdaki magnetostatik enerjiyi azaltmak için oluşmaktadır. Ancak diğer taraftan oluşan domen duvarı enerjisi de sistemin enerjisini arttırmaktadır. Bu nedenle manyetik malzemelerin domene bölünmesi sürekli değildir ve magnetostatik enerjideki azalma domen duvarını oluşturmak için gereken enerjiden fazla olana kadar devam etmektedir.

Manyetik tanenin boyutu azaldığı zaman kritik bir boyutta tane 2 domene bölündüğünde magnetostatik enerjideki azalma oluşacak domen duvarı enerjisindeki artıştan daha az olduğunda domen oluşumu artık devam etmez ve bu partiküller artık kritik tane boyutunun altında ise bunlara tek domenli taneler denilmektedir

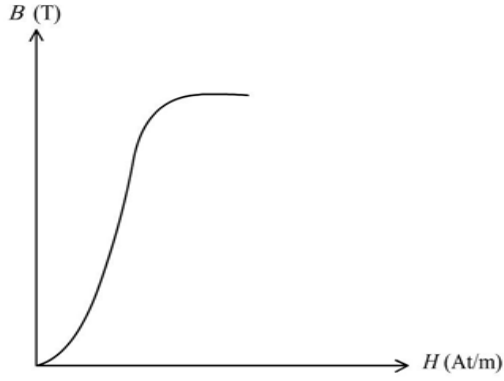


Şekil 3.13. Sargı sarılmış manyetik malzeme [69]

Ferromanyetik malzemeyi mıknatıslandırmak için şekil 3.13'deki gibi hazırlanan sistemde nüve ferromanyetik malzemedir. Nüvede üretilen akının değişimi kendisini üreten  $Mmk$  (manyetomotorkuvvet) değerine karşı çizilirse aşağıdaki şekil elde edilir. Bu tip eğriye doyum eğrisi veya mıknatıslanma eğrisi denir.



Şekil 3.14. Ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi [78]



Şekil 3.15. Mıknatıslama eğrisinin akı yoğunluğu ve manyetik akı şiddeti ile ifadesi[78]

Başlangıçtaki akıdaki değişim ve dolayısıyla  $Mmk$ 'daki az bir değişiklik akıda büyük bir değişikliğe neden olur. Belirli bir noktaya ulaştıktan sonra  $Mmk$ 'deki artışa karşılık akı aynı oranda artmaz.  $Mmk$  arttırılmaya devam ettirilirse akının artık artmadığı görülür. Eğrinin bu düzgün bölgesine doyum bölgesi adı verilirken nüveye de doymuştur denir. Akının  $Mmk$  ile orantılı olarak değiştiği bölgeye doğrusal

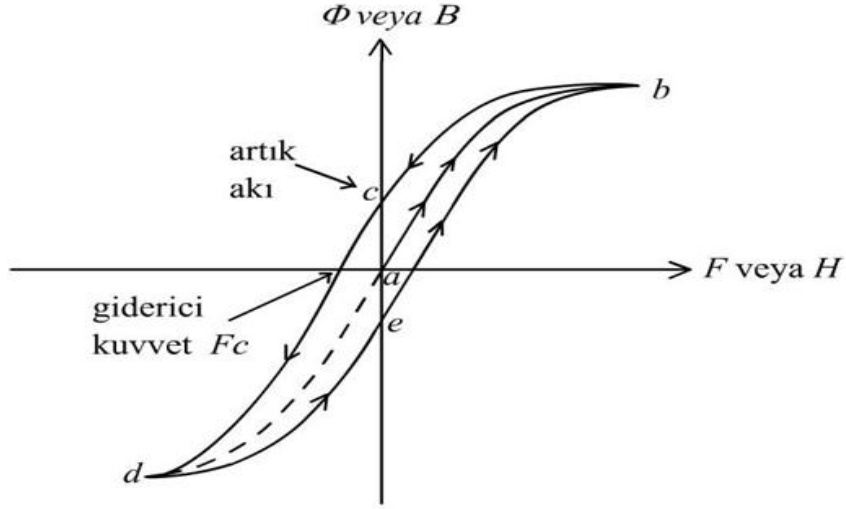
(doymamış) bölge adı verilirken nüveye de doymamış denir. Bu iki bölge arasındaki bölgede diz adını alır [78].

$$H = \frac{N.i}{l_c} \quad \Phi = B.A \quad (3.9)$$

Yukarıdaki ifadelerden de görüldüğü gibi mıknatıslanma şiddeti manyetomotor kuvveti ile doğru orantılı iken manyetik akı yoğunluğu verilen nüvenin akısı ile doğru orantılıdır.

Elektrik makinalarının nüvelerinde ferromanyetik malzeme kullanılmasının avantajı nüvede çok büyük akı üretmektir. Nüve üzerine sarılan sargılara DA yerine AA uygulanırsa; (Başlangıçta herhangi bir akının olmadığını kabul edelim.) uygulanan akım arttırılırken nüvede meydana gelen akı aşağıdaki şekilde a-b yolunu izler. Bu yol doyum (mıknatıslanma) eğrisidir. Ancak akım geriye doğru azaltıldığında akı yükselirken izlediği a-b yolunun yerine b-c-d yolunu izler. Akım tekrar arttırılırsa nüve akısı d-e-b yolunu izler. Nüvede oluşan akının değeri sadece sargılara uygulanan akıya değil aynı zamanda nüvedeki akının daha önceki durumlarına bağlıdır. Akının önceki durumlardaki değeri ve akının akı yollarını yeniden aynen izleyememesi histerisis olarak adlandırılır [78]. Aşağıdaki Şekil-3.16 da akının b-c-d-e-b yolunu izlemesi histerisis çevrimi olarak adlandırılır.

Eğer büyük bir Mmk nüveye önce uygulansaydı ve sonra Mmk kaldırılıyaydı nüvedeki akı yolunun a-b-c olacağı görülmektedir. Mmk kaldırıldığında nüvedeki akı sıfıra inmeyecektir. Bunun yerine nüvede bir akı kalacaktır. Bu akıya kalıcı akı veya artık mıknatısiyet denir. Kalıcı mıknatısların üretilme mantığı bu olaya göredir. Nüve içindeki akının sıfır yapılması için giderici Mmk (Coercive force)  $F_c$  olarak bilinen bir Mmk'nın nüve akısına zıt yönde uygulanması gerekir.



Şekil 3.16. Histerizis çevrimi [78]

### 3.7. Kalıcı Mıknatıslar

Kalıcı mıknatıs, üzerinde herhangi bir uyarım Mmk'i yok iken bir manyetik alanı muhafaza etme özelliği olan malzemedir. Kalıcı mıknatıslar normal olarak demir, nikel ve kobalt alaşımlarıdır. Bu alaşımlara örnekler şu şekildedir [78]:

**Alnico-5:** Demir+aliminyum+nikel+kobalt alaşımı olup geniş uygulama alanı bulmuştur.1931 yılında keşfedilmiştir. Nisbeten daha yüksek kalıcı mıknatısiyete sahiptir.

**Alnico-8:** Alnico-5'e göre daha düşük kalıcı akı yoğunluğuna ve daha yüksek giderici kuvvete sahiptir. Alnico-5'e göre mıknatısiyetini kaybetme riski daha azdır. Alnico malzemelerin zayıf oldukları noktalar; düşük giderici kuvvet ve mekanik kırılabilirlikleridir.

**Seramik:** Ferrit mıknatıs olarak da bilinirler. Demir oksit+baryum veya strontium karbonat tozlarından yapılır. Alnico malzemelerden daha düşük bir kalıcı mıknatısiyet vardır ancak daha yüksek bir giderici kuvvete sahiptir.

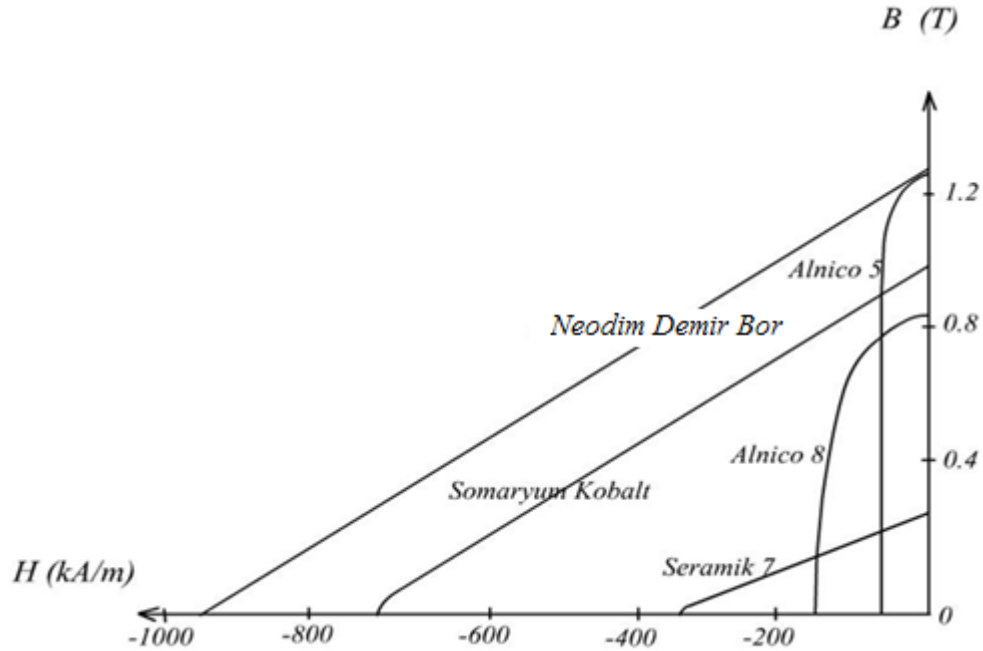


**Seramik-7:** Düz bir doğru şeklinde DA mıknatısiyet eğrisine sahiptir. Seramik malzemeler iyi bir mekanik özelliğe sahiptirler ve ucuz üretilebilirler. Bu özelliklerinden dolayı en yaygın olarak kullanılanlardır.

**Samaryum kobalt:** Kalıcı mıknatıs teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil eder. Alnico malzemelere göre hem kalıcı mıknatısiyetleri hem de giderici kuvvetleri daha yüksektir.

**Neodim-demir-bor:** En yeni alaşımlardır. Bizim de gerçekleştireceğimiz kalıcı mıknatıslardır. Diğer kalıcı mıknatıslara göre hem kalıcı mıknatısiyetleri hem de giderici kuvvetleri daha yüksektir. Bunlara ilaveten iyi mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca üretilmeleri diğerlerine göre ucuzdur.

Yukarıda adı geçen kalıcı mıknatısların mıknatıslanma eğrileri Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Kullanılan kalıcı mıknatıs malzemelerin mıknatıslanma eğrileri [78]

### 3.8. Kalıcı Mıknatıs Malzemelerin Özellikleri

Kalıcı mıknatıs malzemede iki önemli özelliğin bulunması gerekir.

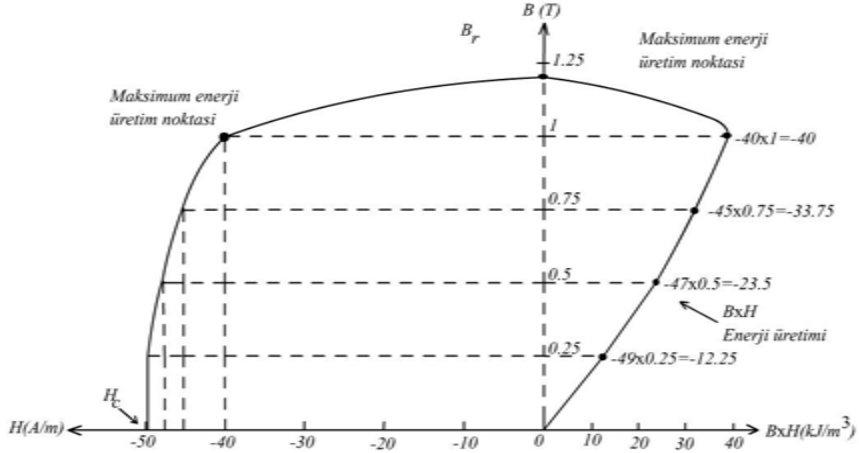
- Yüksek bir kalıcı (artık) mıknatısiyet yoğunluğuna sahip olmalıdır. Böylece mıknatıs kuvvetli olur ve istenen akıyı sağlar.
- Büyük bir giderici kuvvete (kalıcı mıknatısiyeti yok edici kuvvet) sahip olmalıdır. Böylece dış etkiler tarafından kolaylıkla mıknatısiyeti yok edilemez.

Çizelge 3.2’de bazı kalıcı mıknatısların manyetik özellikleri verilmiştir.

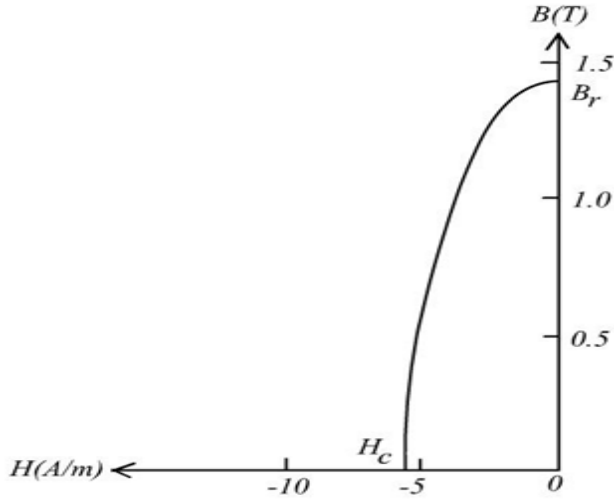
Çizelge 3.2. Bazı kalıcı mıknatısların manyetik özellikleri [6].

Malzeme	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)	$BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )
Sr Ferit	0,43	0,20	34
Alnico 5	1,27	0,05	44
Alnico 9	1,05	0,12	85
SmCo <sub>5</sub>	0,95	1,3	176
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	1,05	1,3	208
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	1,36	1,03	350

İdeal bir kalıcı mıknatıs malzemedeki dikdörtgene yakın ve şişman bir histerisis eğrisine sahip olması beklenir. Böylece uygulanan alan kaldırıldığı zaman kalıcı mıknatısiyet yüksek bir seviyede olur. Bir kalıcı mıknatıs malzemenin uygun seçimi için malzemenin histerisis eğrisinde ikinci bölge ile temsil edilen giderici kuvvet ve artık mıknatısiyet eksenleri arasında kalan bölge kullanılır. Şekil 3.18’de yumuşak (Alnico-5) ve şekil3.19’da sert (M-5) çelik malzemeler için histerisis eğrisinin ikinci çeyrekleri gösterilmiştir. Her iki malzemede Yüksek  $B_r$  (kalıcı mıknatısiyet) değerlerine sahiptir. Alnico-5 için  $B_r=1.22$  W/m<sup>2</sup>,  $H_c=-49$  kA/m ve M-5 için  $B_r=1.4$  Wb/m<sup>2</sup>,  $H_c=-6$  A/m [13].



Şekil 3.18. Alnico-5 malzemenin histerisis eğrisinin 2. çeyreği ve enerji üretim noktaları [78]

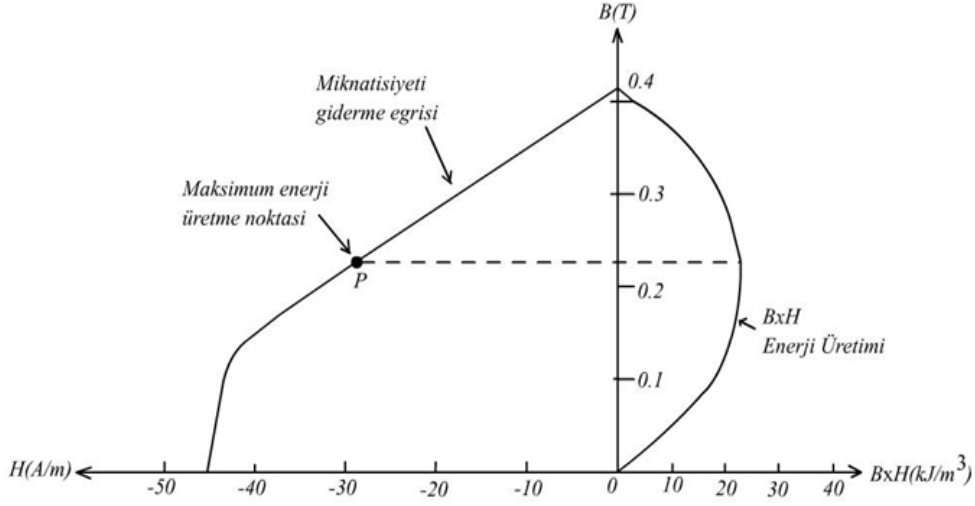


Şekil 3.19. M-5 (Yumuşak) çelik malzeme için histerisis eğrisinin 2. Çeyreği [78]

### 3.9. Giderici Kuvvet- Mıknatısiyeti Yok Edici Kuvvet

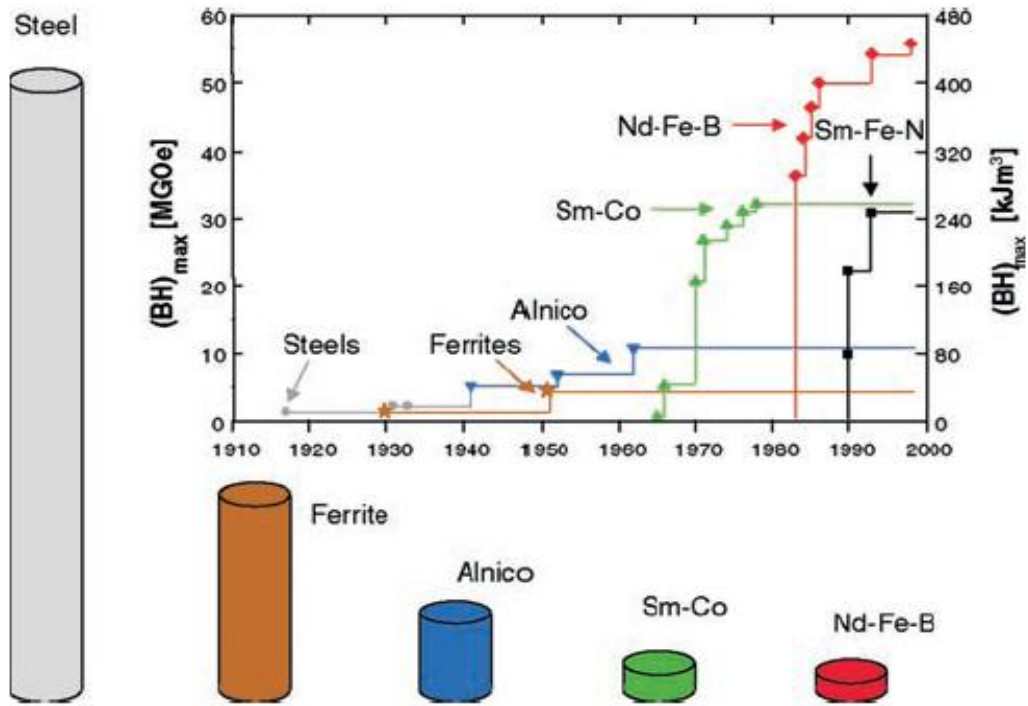
Aşağıda şekil-3.20'de bir kalıcı mıknatısın giderici kuvvet ve enerji üretim eğrileri gösterilmiştir. Giderici kuvvet; bir malzemenin hava aralığı da bulunan bir devrede akı üretebilme yeteneğinin de bir ölçüsüdür. İyi bir kalıcı mıknatıs olan malzemeler büyük giderici kuvvet  $H_c$  ile karakterize edilirler. Bir kalıcı mıknatısın akı üretme

yeteneği için kullanışlı bir ölçü; mıknatısın maksimum enerji üretim noktasıdır. Bu nokta histerisis çevriminin ikinci çeyreğinde  $BH$  çarpımının  $(BH)_{max}$  en büyük olduğu noktaya karşılık gelir.  $BH$  çarpımının birimi joule/m<sup>3</sup>'tür [78]. Ayrıca CGS birim sistemine göre MGOe birimi de kullanılmaktadır.



Şekil 3.20. Bir kalıcı mıknatıs malzemenin giderici kuvvet ve enerji üretim eğrileri [78]

Sabit mıknatısların gelişimi,  $BH_{max}$  değerlerindeki değişim ve boyutsal olarak karşılaştırılması şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Sabit mıknatısların  $BH_{max}$  değerleri ve 20. yüzyılda yüksek enerji çarpımlı sabit mıknatısların gelişimi [1].

Manyetik alan; düzgün, düzgün olmayan ve zamanla değişken olmak üzere üç grupta sınıflandırılır. Her sınıfın etkisi farklıdır. Bu etkilerden yararlanarak kullanım alanları meydana gelmiştir. Çizelge 3.3’de manyetik alan çeşitleri, etkileri ve uygulama alanları detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.3. Manyetik alanın tipi ve yararlanılan manyetik etkiye göre mıknatısların kullanım yerleri [69]

Alan	Manyetik Etki	Tipi	Uygulama Örnekleri
Düzgün	Tork	Statik	Manyetik tozun yönlendirilmesi
	Hall etkisi, manyetorezistans	Statik	Algılayıcılar, okuma başlıkları
	İletkendeki kuvvet	Dinamik	Motorlar, eyleyiciler, hoparlörler
	İndüklenen emf	Dinamik	Generatörler, mikrofonlar
Düzgün olmayan	Yüklü parçacıklar üzerindeki kuvvet	Statik	Işın kontrol, ışınım kaynakları (mikro dalga, UV, X-ışını)
	Mıknatıs üzerindeki kuvvet	Dinamik	Manyetik yataklar, kaplinler, manyetik levitasyon
	Paramanyetik mıknatıs üzerindeki kuvvet	Dinamik	Mineral ayrıştırma
Zamanla değişken	Değişken alan	Dinamik	Manyetometreler
	Demir üzerindeki kuvvet	Dinamik	Anahtarlanabilir kenetler, tutucu mıknatıslar
	Eddy (fuko) akımları	Dinamik	Metal ayrıştırma, frenler

Sabit mıknatısların endüstride birçok kullanım alanları vardır. Çizelge 3.4’de detaylı bir şekilde bu mıknatısların kullanıldığı alanlar ve uygulamalar verilmiştir. Sabit mıknatısların günümüzde ne kadar önemi bir yer tuttuğu Çizelge 3.4’de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Kullanım alanına göre sabit mıknatısların kullanım örnekleri [69]

<b>Endüstri</b>	<b>Uygulamalar</b>
Otomotiv	Yol verici motorlar, ABS fren sistemleri, cam sileceği motorları, enjeksiyon pompaları, vantilatör, pencere camı ve koltuk kontrol motorları, hoparlörler, eddy akım frenleri, alternatörler, hız ölçüm aygıtları
Telekomünikasyon	Hoparlörler, mikrofonlar, telefon zilleri, elektro-akustik pikaplar, anahtar ve röleler
Veri işleme	Disk sürücüler ve eyleyiciler, adım motorları, yazıcılar
Tüketici Elektroniği	Duş pompası için DC motorlar, çamaşır makinaları, matkaplar, meyve suyu sıkacağı, bıçak bileyiciler, yiyecek işleyiciler, konserve açacakları, saç tıraş makinaları, kablosuz matkap, zincirli testere, vb. için DC sürücüler, dolap ve manyetik kapı kilitleri, TV ve müzik seti için hoparlörler, TV ışın düzeltme ve odaklama aygıtları, CD sürücüler, video kayıt cihazları,
Endüstriyel	Manyetik alet ve takımlar için DC motorlar, robotik, metal ve cevher çıkarma için manyetik ayrıştırıcılar, manyetik (rulman) yataklar, servo-motor sürücüler, kaldırma aparatları, fren ve vitesler, sayaç ve ölçü aletleri, su yumuşatıcılar
Elektronik ve Enstrümantasyon	Algılayıcılar, temassız anahtarlar, NMR spektrometreler, enerji sayacı diskleri, elektromekanik dönüştürücüler, çapraz alan tüpleri, akı transfer güvenlik aygıtları, sönümleyiciler
Uzay bilim	Sürtünmesiz yataklama, adım motorları, kaplinler, enstrümantasyon, yürüyen dalga tüpleri
Tıp	Takma dişler, sarı tutucular, mide korseleri, itici yakalar, ferromanyetik problemler, kanser hücre ayrıştırıcıları,

#### 4. MİKNATISLAYICILAR

Mıknatıslandırma işleminde, geometrik şekillendirmesi tamamlanmış sürekli mıknatıs malzemeleri belirli bir  $H_s$  doyma magnetik alan şiddeti ile doyuma ulaştırılır.  $H_s$  doyma magnetik alan şiddeti, sürekli mıknatısı çevreleyen bobinden bir doğru veya darbe akımın akıtılmasıyla elde edilir. Bir mıknatıslayıcı, bir mıknatıslama kafası veya bobini ve bu mıknatıslama bobininden akacak olan akımı sağlayan güç elektroniği devresinden oluşmaktadır.

##### 4.1 Mıknatıslayıcı Bobini ve Kafası

Mıknatıslayıcı bobinleri demir magnetik devreli ve magnetik devresiz olmak üzere iki türlü yapılıdır. Demir magnetik devreli mıknatıslayıcı bobinlerinde, magnetik devrenin varlığı mıknatısın  $H_s$  doyma magnetik alan şiddetini sınırlamaktadır. Ancak magnetik devrenin varlığı magnetik alanın mıknatıs hacmi üzerinde yoğunlaştırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu sayede elektriksel enerji ihtiyacı azalmaktadır. Ayrıca magnetik devreli mıknatıslayıcı bobinlerinde soğuma daha etkin bir şekilde gerçekleşmektedir. Özellikle mıknatıslama akımı yüksek olan mıknatıslayıcılarda, magnetik devrenin varlığı mıknatıslayıcı bobini iletkenlerinde yalıtım sorunları ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca magnetik devreli mıknatıslayıcı bobinlerinin imalatında daha çok işçiliğe ve malzemeye gereksinim duyulmaktadır. Bu ise mıknatıslayıcı bobinin maliyetini artırmaktadır.

Sürekli mıknatıslar bazen yerlerine takılmadan önce bazen takıldıktan sonra mıknatıslandırılırlar. Bunlardan hangisinin uygulanacağını belirlemek önemli bir sorundur. Mıknatısın biçimi, malzemesi ve kullanılacağı yer, kullanılacak yöntemin belirlenmesinde etkindir. Sürekli mıknatısın yerine takılmadan ve yerine takıldıktan sonra belirlenen işletme eğrileri arasında fark varsa, yerinde mıknatıslandırmanın uygulanması gerekir. Bazı hallerde ise örneğin bir birine yakın, ters kutuplu, büyük mıknatısların yerinde mıknatıslandırılması olanaksızdır.



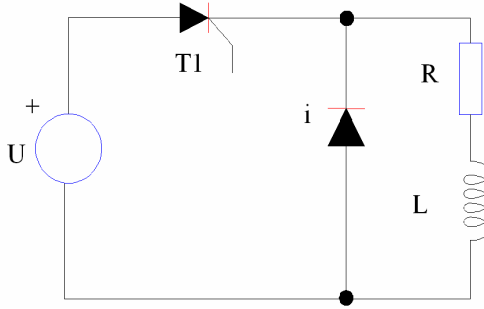
Yerine yerleştirilmiş sürekli mıknatısların mıknatıslandırılmasında kullanılan araçlara "mıknatıslayıcı kafası" denilmektedir. Çoğunlukla mıknatıslayıcı kafasında bobin sarımı için yeterli yer yoktur. Bu nedenle bobinin sarım sayısı küçük tutularak, bobinden geçen akımın değeri yükseltilir. Bu nedenle mıknatıslayıcı kafasının bobini genellikle nispeten küçük şiddetli doğru akımla değil, tepe değeri büyük darbe akımı ile beslenir [79].

Mıknatıslayıcı kafasından yüksek değerli bir darbe akım geçmesi ile bobinde mekanik ve elektriksel zorlanmalar oluşmaktadır. Bu nedenle mıknatıslayıcı kafasının bu elektriksel ve mekanik zorlanmalara karşı dayanıklı olması gerekir. Mekanik zorlanmalara karşı hem mıknatıslayıcı hem de mıknatıslanacak malzemenin iyice sabitlenmiş olması gerekir. Elektriksel zorlanmalara karşı ise bobin iletken kesitinin ve yalıtkan malzemesinin doğru seçilmiş olması gerekir. Özellikle doyma magnetik alan şiddeti 2500 kA/m ile 4000 kA/m arasında olan NdFeB ve SmCo sürekli mıknatıs malzemelerinin mıknatıslandırılmasında kullanılan mıknatıslayıcı bobinlerinde özel soğutma fanı kullanılması gerekir.

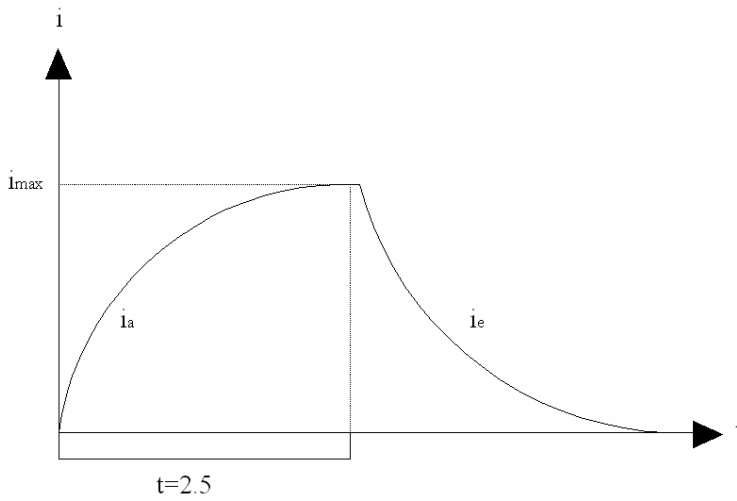
## **4.2 Mıknatıslayıcı Enerji Besleme Devreleri**

### **4.2.1 Doğru akımlı mıknatıslayıcılar**

Doğru akımlı mıknatıslayıcılarda, mıknatıslama bobininden veya kafasından belirli bir süre yüksek değerli bir doğru akım akıtılır. Genellikle sargı hacmi büyük ve mıknatıslandırma akım yoğunluğu 20A/mm<sup>2</sup>'nin üzerinde olan mıknatıslayıcılar doğru akımlı mıknatıslayıcılardır. Böyle bir mıknatıslayıcının bobinini bir güç elektroniği anahtarı üzerinden bir doğru akım kaynağından beslenir (Şekil 4.1.) [80].



Şekil 4.1. Doğru akımlı mıknatıslayıcı eş değer devresi [80]



Şekil 4.2. Mıknatıslayıcı bobininden akan akımın dalga şekli [80]

Şekil 4.1’de mıknatıslayıcı bobini ve malzemesinin ideal halde olduğu varsayılmaktadır. Buna göre  $T_1$  anahtarının kapatılmasıyla mıknatıslayıcı bobininden akacak olan akımın değeri, mıknatıslayıcı bobinine uygulanan gerilimle doğru, mıknatıslayıcı direnci ile ters orantılı olarak değişmektedir.

$$i_a(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad T = \frac{L}{R} = \text{Zaman sabiti} \quad (4.1)$$

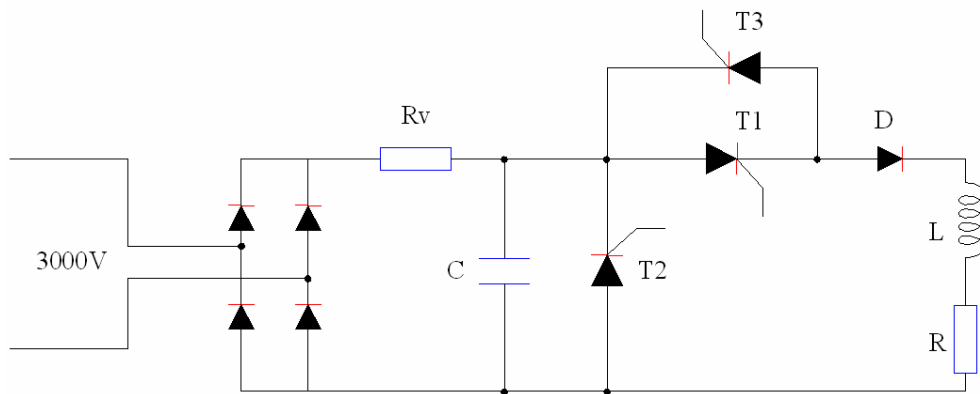
$$i_{max} = \frac{U}{R} \quad (4.2)$$

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi  $T_1$  anahtar kapatıldıktan  $2.5\tau$  süre sonra mıknatıslayıcı bobininden akan akımın değeri, ulaşabileceği en büyük değere ulaşmaktadır. Mıknatıslama akımının en büyük değere ulaşmasıyla  $T_1$  anahtarı açılır, bu durumda

endüktans üzerindeki magnetik enerji (5.2) bağıntısı ile üstel olarak azalarak sifira ulaşır. Doğru akımlı mıknatıslayıcılar genellikle  $H_s$  doyma magnetik alan şiddeti küçük, kutup sayısı az olan çubuk, silindirik ve at nalı biçimli sürekli mıknatısların mıknatıslandırılmasında kullanılmaktadır [80].

#### 4.2.2 Darbe akımlı mıknatıslayıcılar

Darbe akımlı mıknatıslayıcılar, bir kondansatörde biriktirilen elektrostatik enerjinin mıknatıslandırma bobini üzerinden boşaltılması ilkesine dayanır. Uygun değerdeki kondansatör önce bir doğrultucu üzerinden şebekeden doldurulur, kondansatördeki elektrostatik enerji istenilen bir değere ulaşınca, kondansatör bir güç elektroniği düzeneği aracılığıyla mıknatıslayıcı bobini üzerinden boşaltılır. Bu nedenle bir mıknatıslayıcıyı belirleyen büyüklük mıknatıslayıcı kondansatörü elektrostatik enerjisidir. Kondansatör elektrostatik enerjisi  $1/2C \times U^2$  gerilimin karesi ile orantılı olduğundan, genellikle mıknatıslayıcı kondansatör gerilimi, besleme devresine konulan uygun değerli bir transformator ile yükseltilir. Ayrıca öngörülen uygun değerli bir bobin aracılığı ile sabit değerli bir akım kaynağı sağlar. Bu sayede kondansatör en kısa sürede en az kayıpla doldurulur [79].



Şekil 4.3. Darbe akımlı mıknatıslayıcıların prensip şeması [79]

Farklı boşalma akımı dalgalarını elde edebilmek için uygun tristör gruplarının tetiklenmesi gerekmektedir. Tetikleme grupları, tristörlerin olabildiğince kayıpsız anahtarlama yapmasına göre tasarlanır. Boşalma devresini anahtarlama, tristörlerden tristör anahtar veya yarı iletken anahtar olarak yararlanılır. Isısal zorlanmayı azaltmak için özel soğutucu düzeneklerden yararlanılır [79].

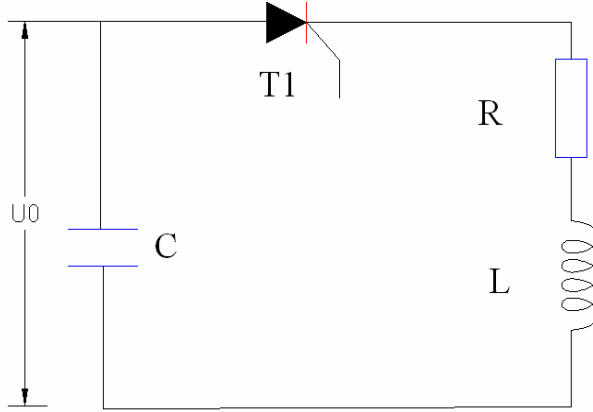
1. Kısa süreli bir mıknatıslama işlemi için yalnız  $T_1$  tristörü tetiklenir. Bu durumda akım devresi boşalma kondansatörü,  $T_1$  tristörü ve mıknatıslayıcı bobini üzerinden kapanır. Boşalma akımı bu durumda bir yarım sinüs dalgasından oluşmaktadır.

2. Uzun darbeli bir mıknatıslandırma işlemi için  $T_1$  ve  $T_2$  tristörü tetiklenir. Bu durumda akım devresi kondansatörün başlangıçta boşalmasından sonra  $T_1$  tristörü, mıknatıslama bobini ve  $T_2$  tristörü üzerinden kapanır. Boşalma dönemsizdir ve logaritmik bir mıknatıslanmadır.

3. Mıknatıslanmayı gidermek için  $T_1$  ve  $T_3$  tristörleri tetiklenir. Bu durumda akım devresi boşalma kondansatörü, karşıt koştur bağlı  $T_1$ ,  $T_3$  tristör çifti ve mıknatıslama bobini üzerinden kapanır. Boşalma akımı sinüs biçimli dalgalardan oluşmaktadır.

#### Kısa süreli mıknatıslandırma

Bu tipteki mıknatıslayıcılarda darbe akımının değişim hızı ( $di/dt$ ) çok yüksektir. Bu nedenle, bu tipteki mıknatıslandırmada mıknatıslanacak malzemedeki magnetik alan dağılımı malzemedeki oluşan girdap akımları nedeniyle düzgün değildir ve malzemenin mıknatıslanmasını engellemektedir. Pratikte bu tip mıknatıslandırma, elektriksel iletkenliği oldukça düşük olan ferrite uygulanmaktadır.



Şekil 4.4. Kısa darbeli mıknatıslandırma eşdeğer devresi [79]

$$\frac{1}{C} \int i dt - U_0 + R_i + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (4.3)$$

$$i(t) = A_1 e^{S_1 t} + A_2 e^{S_2 t} \quad (4.4)$$

$$S_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2 C - 4L}{4L^2 C}} \quad S_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2 C - 4L}{4L^2 C}} \quad (4.4)$$

$$\tau = \frac{2L}{R}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad \omega\tau = \sqrt{\frac{4L}{R^2 C} - 1} \quad (4.5)$$

$$S_1 = -\frac{1}{\tau} - \omega, \quad S_2 = -\frac{1}{\tau} + \omega \quad (4.6)$$

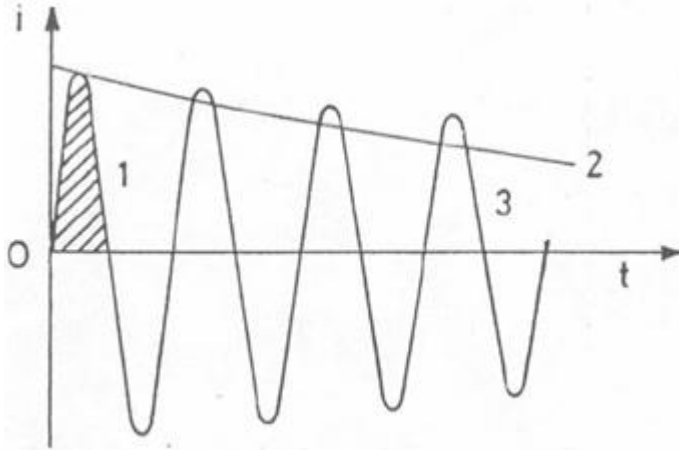
Kısa darbeli mıknatıslandırmada,  $U_0$  gerilimiyle üzerindeki elektrostatik enerji biriktirilen kondansatör,  $T_1$  tristörü tetiklenerek,  $R$  ve  $L$  elemanlarından oluşan mıknatıslandırma bobini üzerinden boşalır.

(4.4) bağıntısının kısa süreli darbeli bir akım oluşturabilmesi için  $\omega$ 'nın karmaşık bir sayı olması gerekir. Bunun için (4.5)'deki  $\omega$  denkleminde bakıldığında mıknatıslayıcı direnci, endüktansı ve kondansatörü arasındaki  $1/L \times C < R^2/4L^2$  eşitsizliğinin sağlanmış olması gerekir. Bu şart sağlanıyorsa, mıknatıslayıcı mıknatıslandırma

akımı kısa darbeli bir akımdır. Buna göre mıknatıslayıcıdan akacak olan akımın bağıntısı (4.7.)'deki gibidir.

$$i(t) = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right) e^{-t/\tau} \sin \omega t \quad (4.7)$$

Şekil 4.5.'de de görüldüğü gibi mıknatıslama akımının dalga şekli, genliği üstel olarak azalan sinüs dalgalarından oluşmaktadır. Ancak kısa darbeli mıknatıslandırmada negatif periyotdaki akım darbelerinin geçmesine izin verilmemektedir [79].



Şekil 4.5. Mıknatıslandırma akımının farklı işletme biçimlerinde dalga şekli [79]

Böylece mıknatıslandırma işlemi birinci sinüs darbesi tarafından gerçekleştirilmektedir. Kısa süreli darbe mıknatıslandırmada akımın en büyük değere yükselme süresi, (4.7) bağıntısının zamana göre türevinin sıfıra eşitlenmesi ile bulunur. Bulunan bu sürenin (4.7) bağıntısında yerine konulması ile mıknatıslandırma akımının yükselebileceği en büyük değer bulunur.

Bu bağıntılardan da anlaşılacağı gibi kısa süreli bir darbe akımının en büyük değere ulaşması için gereken süre mıknatıslayıcının kapasitesi, endüktansı ve direnci

tarafından belirlenmektedir. Mıknatıslama akımının ulaştığı en büyük değer ise mıknatıslayıcı kondansatör gerilimi ve kapasite değeri, mıknatıslayıcı direnç ve endüktansına bağlıdır [79].

$$t_{\max} = \tan^{-1} \frac{\omega\tau}{\omega} \quad (4.8)$$

$$i_{\max} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{\frac{\tan^{-1} \omega\tau}{\omega\tau}} \quad (4.9)$$

Bir darbe akımlı mıknatıslayıcıda en önemli ifade mıknatıslandırma işleminin kalitesini belirleyen, mıknatıslama magnetik alan enerjisinin kondansatör enerjisine oranıdır. Bu oran mıknatıslayıcının mıknatıslandırma verimi olarak adlandırılmaktadır. (4.10) bağıntısından da görüldüğü gibi mıknatıslandırma verimi eşdeğer devrenin  $\omega\tau$  katsayısı ile değişmektedir [79].

$$\frac{E_1}{E_C} = \frac{\frac{1}{2}Li_{\max}^2}{\frac{1}{2}CU_0^2} = e^{\frac{-2 \tan^{-1} \omega\tau}{\omega\tau}} \quad (4.10)$$

### Uzun darbeleri mıknatıslandırma

Bu tipteki mıknatıslandırmada, mıknatıslandırma akımı çok kısa bir sürede en yüksek değerine ulaşır daha sonra yavaş yavaş sıfıra üstel olarak azalır. Uzun darbeleri mıknatıslandırmada Şekil 4.3'deki eşdeğer devrenin  $T_1$  ve  $T_2$  tristörleri tetiklenir. Bu durumda akım devresi kondansatör boşalmasından sonra karşıt koştut bağlı  $T_1$ ,  $T_3$  tristör çifti, mıknatıslandırma bobini ve  $T_2$  tristörü üzerinden kapanır.

Şekil 4.3'deki eşdeğer devrenin (4.4) bağıntısının uzun süreli darbeleri bir akım oluşturabilmesi için  $\omega$  katsayısının reel bir sayı olması gerekir. Buna göre (4.5) bağıntısındaki  $\omega$ 'nın açılımına bakıldığında mıknatıslayıcı direnci, endüktansı ve kapasitesi arasındaki  $1/L \times C > R^2/4L_2$  eşitsizliğinin sağlanmış olması gerekir. Buna göre mıknatıslayıcıdan akacak akımın ifadesi şu şekildedir.

$$i(t) = -\frac{U_0}{2\omega L} e^{\left(\frac{1}{\tau} + \omega\right)t} + \frac{U_0}{2\omega L} e^{\left(\frac{1}{\tau} - \omega\right)t} \quad (4.11)$$

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere uzun darbeli mıknatıslandırmada akımın ulaşabildiği en büyük değer kısa darbeli mıknatıslandırmadaki değerle aynıdır.

### 4.2.3 Ters mıknatıslandırma

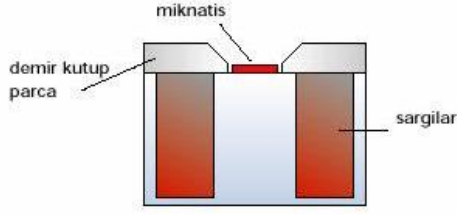
Mıknatıslığı giderme işletme biçiminde, mıknatıslandırma akımı genliği üstel olarak azalan periyodik sinüs dalgalarından oluşmaktadır. Mıknatıslığın giderilmesinde Şekil 4.5’deki devrenin  $T_1$  ve  $T_3$  tristörleri tetiklenir. Bu durumda akım devresi boşalma kondansatörü karşıt koşul bağlı  $T_1$ ,  $T_3$  tristör çifti ve mıknatıslandırma bobini üzerinden kapanır. Buna göre kısa süreli mıknatıslandırmada matematiksel olarak var olan ancak akması için gerekli akım yolu olmayan negatif periyotlu akımlar  $T_3$  tristörü üzerinden akarak doğrultusu sürekli olarak değişen bir magnetik alan oluşturur. Bu değişen magnetik alan daha önceden mıknatıslandırılmış mıknatısların mıknatıslığının giderilmesini sağlamaktadır.

## 4.3 Mıknatıslayıcı Çeşitleri

### 4.3.1 DC mıknatıslayıcılar

Yüksek magnetik alanlar elde etmek için sargılara doğru akım uygulanır. Bu yöntem kısa süreli bir alan kuvveti için büyük bir güç gereksinimi gerektirmekte ve soğutma işlemi için sıklıkla problem yaratmaktadır. Francis Bitter National Laboratuvarı’nda çok büyük DC jeneratörler, DC bobinler kullanılarak yaklaşık 2.5kA/m mıknatıslama alan kuvveti elde edilmiştir. Bu sistemin normal şartlarda kullanılması imkânsız olmakla beraber, magnetik akı yolu ve çelik halka üzerine binlerce sarımlık geniş sargılar gibi çelik boyunduruk kullanılarak 175A/m’lik alanlar ve hatta su soğutmalı düzenek yardımıyla daha yüksek değerler elde edilebilir. Mıknatıslama süresi sınırlandırılarak bu alan şiddeti basit bir aksenal silindir tipi için 1.25kA/m seviyesine getirilebilir [81].



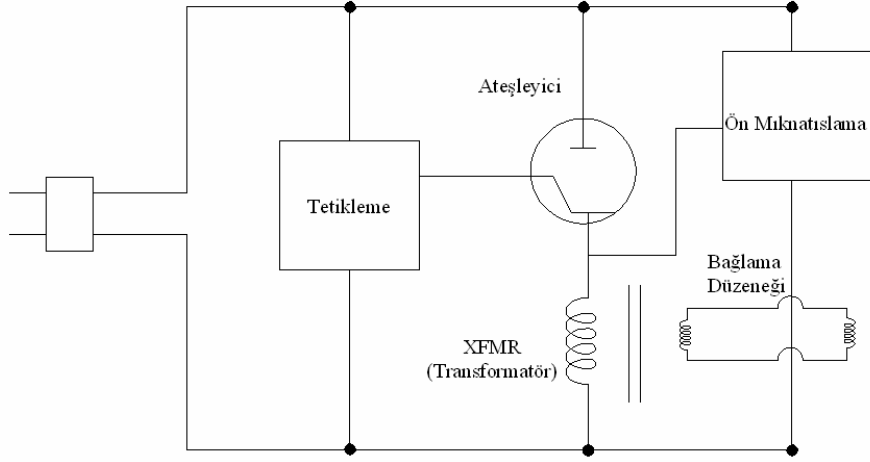


Şekil 4.6. DC Mıknatıslayıcı devre [82].

DC mıknatıslayıcıların kullanım alanı maliyetinden dolayı sınırlı kalmıştır. Düşük mıknatıslama kuvvetine sahip AlNiCo sürekli mıknatıs malzemelerinin mıknatıslandırılmasında kullanılır.

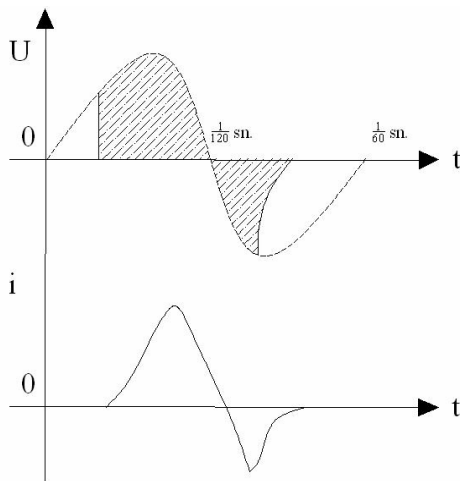
#### 4.3.2 Yarı çevrimli mıknatıslayıcılar

Şekil 4.7’de yarı çevrimli mıknatıslayıcıların prensip şeması gösterilmiştir. Bu sistemlerin tasarımı çok eski olup 2. Dünya Savaşı’ndan ve hatta yarı iletkenlerin keşfinden daha öncesine dayanmaktadır. Civalı ateşleyici tüp transformatör çıkışına seri olup, doğrudan karşı şebeke hattının tek fazına bağlıdır. Şekil 4.8’de de görüldüğü üzere kısmi zaman diliminde hattan binlerce amper mertebesinde akımlar geçmektedir. Bunun şebeke üzerinde muhtemel yıldırım atlaması benzeri etkisi olmaktadır. Diğer cihazlar, aynı şebeke hattına bağlı noktalar gerilim darbelerine ve muhtemel arızalara maruz kalmaktadır. Darbenin aşırılığı, geleneksel güç analizörlerinin elektromekanik doğaları gereği yeteri kadar hızlı ölçüm alamadıkları için kaydedilemez [81].



Şekil 4.7. Yarı çevrimli mıknatıslayıcı [81]

Ateşleyici anahtar yeteri kadar ters akımın akmasına kapalı konuma geçmeden önce imkân verir. Yeteri kadar ters akımın düzenekte akmasına izin verilirse, parça ilk olarak istenen yönde mıknatıslandırılabilir. Ancak hemen sonra ters akım vasıtasıyla demagnetize edilir. Kaliteli bir diyot ile bu durum engellenebilirdi fakat o dönem bu tür bir diyot mevcut değildi. Bu durumda çözüm çıkış transformatörü kullanmaktır. İleri yöndeki darbe oluşumundan hemen önce doğru akım çelik çekirdeğin doyma noktasında ters yönde uygulanır. Bu tür bir devreye ön mıknatıslama devresi denir.



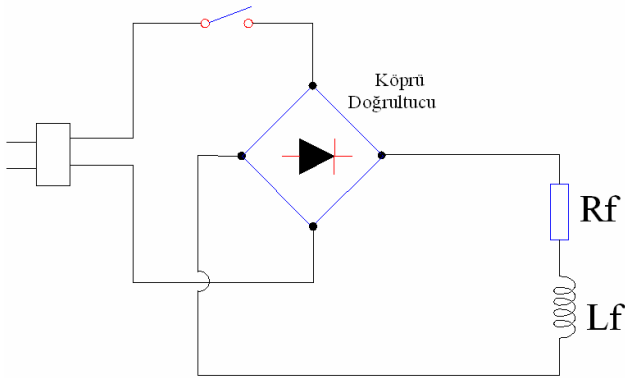
Şekil 4.8. Yarı çevrimli mıknatıslayıcıda akım-gerilim eğrileri [81]

İleri yönde uygulanan darbe, çıkış sargılarına iletilir. Ancak takip eden ters akım transformatör çekirdeğini doyurur ve önemli miktardaki kısmını çıkışa geçirmez. Bu nedenle transformatör doğrultucu görevi yapar. İlave olarak transformatörün giriş hattında çıkışa göre daha fazla sarıma sahip olabilir. Bu yüzden de çıkış akımı girişe göre daha yüksek olabilir.

Yarı periyotlu mıknatıslayıcılar diğerlerinden daha uygun maliyetli olup ve makul düzeyde performansa sahiptir [81].

### 4.3.3 Yüksek endüktanslı C tipi mıknatıslayıcılar

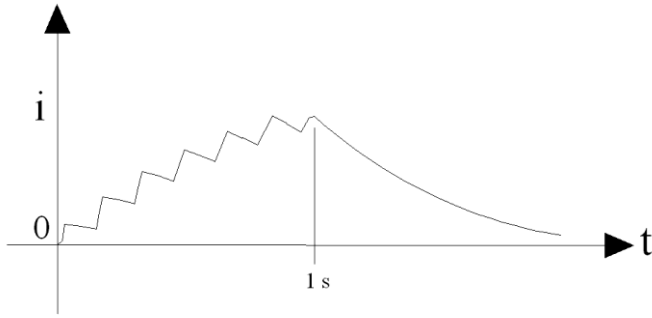
Çelik döküm çerçeven oluşturulan C biçimindeki levha bünyesinde boşluklar ve çelik arasında akı dönüş yolu barındırmaktadır.



Şekil 4.9. C tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcı [81]

Şekil 4.9’da gösterildiği üzere geniş sargılar boşlukların her iki tarafına yerleştirilir ve devreye bağlanır. Anahtar kapatıldığında akım, şebekeden köprü doğrultucu vasıtasıyla doğrultulur ve sargılara akar. Devre tek faz için düzenlenmiş olup, üç faz için farklı bir doğrultucu düzeneğiyle de çalışması mümkündür. Endüksiyon oranı 10H ve üzerinde değerlerde akım, yavaş bir biçimde çevrimlerden geçer. İstenen akım değerine ulaşmak için boşlukların oranı ayarlanabilmektedir. Zamanlayıcı tarafından

belirlenen alan genişliği istenilen düzeye ulaştığında anahtar tekrar kapanır. Magnetik alanda depolanan enerji, sargılarda yakılmadığı sürece devrenin DC darbeleri kısmındaki akımın devamını sağlar. Anahtar kapatıldığında devredeki akım zayıflaması birkaç saniye devam edebilir. Bu tip mıknatıslayıcılar önceleri hoparlör sanayisinde kullanılmakla birlikte günümüzde yerlerini kondansatör boşalmalı sistemler almıştır. C tipi mıknatıslayıcılar, hoparlörlerde kullanılan yapılarıyla içlerine gömülü AlNiCo sürekli mıknatıs malzeme ile iyi sonuçlar vermektedir [81].

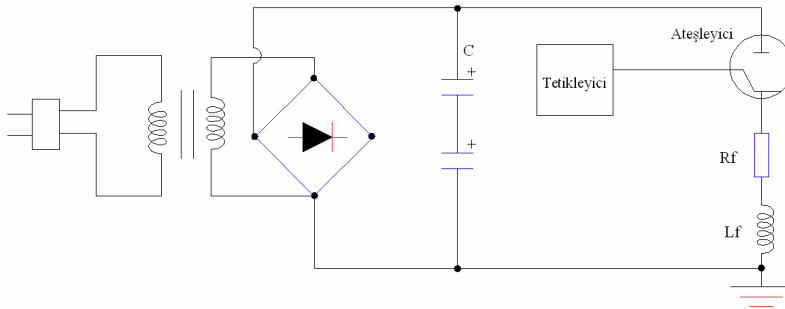


Şekil 4.10. C tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcıda akım eğrisi [81]

#### 4.3.4 Kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcılar

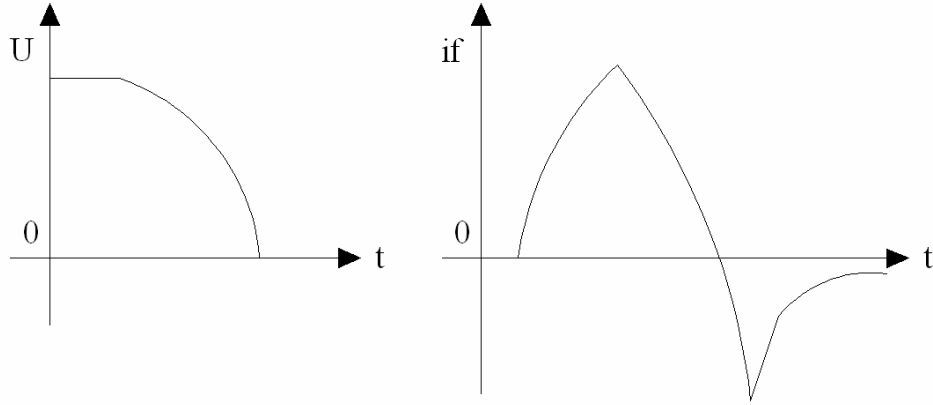
Kapasite boşalmalı mıknatıslayıcı şebekeden aldığı elektriksel gücü, genelde gerilim ile katlayarak büyük kondansatör gruplarında depolar. Yeterli enerji depolandığında ve bir kısım mıknatıslandığında anahtar kapatılır ve akım bağlama düzeneğine akar. Sistem, elektrik enerjisinin anlık magnetik darbelere birkaç milisaniyede dönüştürebileceği yapıda tasarlanmıştır. Bu tip mıknatıslayıcılar alçak, orta ve yüksek gerilimde olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılırlar. Alçak gerilim için kondansatörlerin birbirine paralel olduğu bir devrede 400-500V ile sınırlı mıknatıslayıcı olarak nitelendirilebilir. Çiftli kondansatörlerden oluşmuş 800-1000V arası kullanımda olan birçok mıknatıslayıcı orta gerilim mıknatıslayıcı olarak tanımlanır. Yüksek gerilim mıknatıslayıcı ise 1500-3000V ve üstü elektrolitiksiz kondansatörlerden oluşmaktadır. Tasarımının getirdiği ekonomik sonuç, yüksek gerilimli mıknatıslayıcıları diğer iki mıknatıslayıcı tipine göre yüksek frekanslarda

kullanım imkânı sağlar. Darbe süresinin azalması elektrik enerjisinin magnetik enerjiye daha verimli dönüşmesini sağlar [81].



Şekil 4.11. 1944 yılına ait kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi [81]

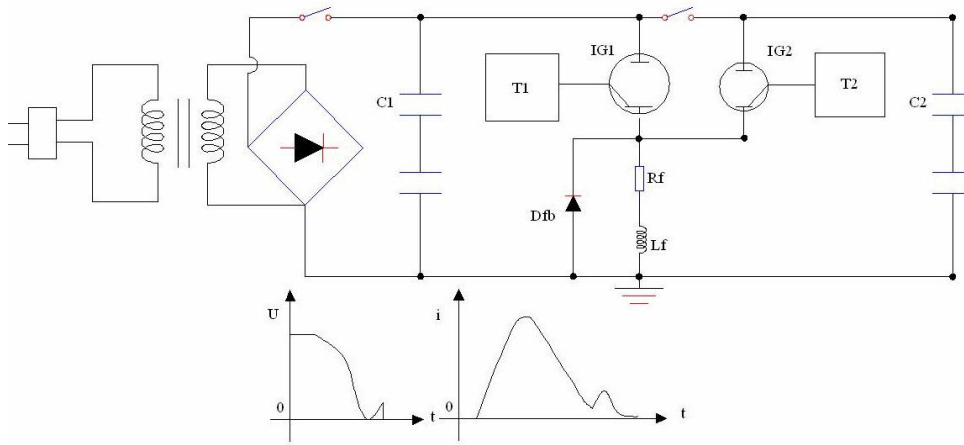
Şekil 4.11’de 1944 yıllarına ait kondansatör boşalmalı bir mıknatıslayıcıyı devresi gösterilmektedir. Bu modelin maksimum şarj gerilimi, kondansatörlerin ne zaman yapıldığına bağlı olarak 350-400V’u aşmamaktadır. Devre tasarımı, mıknatıslayıcı bağlama düzeneğinin birleşiminden ortaya çıkacak aşırı sönümü engelleyecek yapıda olmalıdır. Aksi takdirde sistem, özellikle mıknatıslanmanın gerçekleşmediği bölümlerde oksitlenmenin meydana gelebileceği yönde alarm vermeye başlamaktadır. Aynı zamanda yerle olan temasa rağmen, kablo içindeki kondansatörlerin ısınması sonucu kondansatörlerin kullanım süreleri azalabileceği gibi patlamaları da muhtemeldir. Mıknatıslama komutu verildikten sonra yeni bir şarja geçmeden önce işlemi yapan kişi ateşleme anahtarı kapanıncaya kadar bir süre beklemelidir. Aksi takdirde akım bağlama düzeneğinden geçecek ve bunun sonucu olarak ısı miktarı artacak ve kondansatörler şarj etmeyecektir. Bu durumda işlemi yapan kişi makineyi kapatarak bir süre beklemeli ve ardından tekrar denemelidir [81].



Şekil 4.12. Kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcının akım-gerilim eğrileri [81]

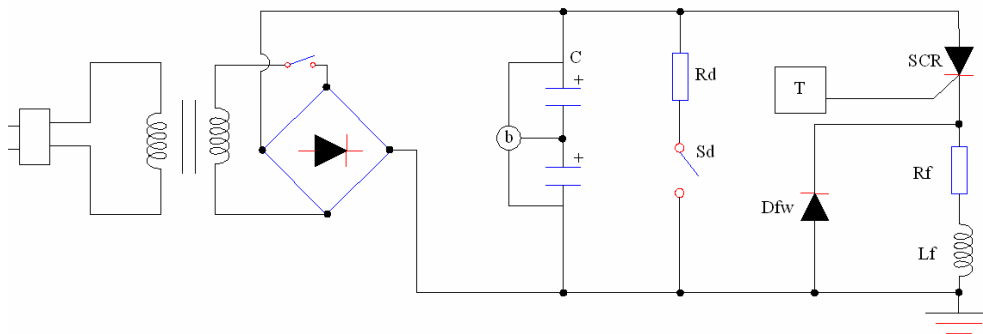
Şekil 5.13'de geliştirilmiş bir tasarım gösterilmiştir. Sistemdeki iki sıra elektrolitik kondansatör daha yüksek gerilimim kullanılmasına imkân verir.  $D_1$  diyotu ateşleyici içerisindeki akımın kondansatöre geri akmasını sağlar. Flyback diyotu olarak anılan  $D_{fb}$  diyotu oldukça önemlidir ve mıknatıslayıcı maksimum akımı taşımakla yükümlüdür. Kondansatör depolarındaki pozitif uç sıfıra yaklaştığında, geniş endüktanslı akımın akmasını aniden durdurarak flyback diyot akımını yeniden düzenler ve ateşleyicideki gerilimi düşürerek sıfır noktasına çeker [81].

Kondansatörler pozitif uç üzerindeki negatif gerilimden korunduğu için herhangi bir arızaya neden olmadan az sönmünebilirler. İkinci anahtar ikinci ve daha küçük  $C_x$  kondansatörleri şarj etmek için kapatılır ve ardından tekrar açılır. Ana devre açıldıktan ve ana kondansatör depolarının şarjının bitmesinin ardından ikinci ateşleyici tetiklenir. Ana anahtarın katodundaki gerilim ana kondansatör depolarını doldurana kadar artar [81].



Şekil 4.13. Gelişmiş ateşlemeli mıknatıslayıcı devresi [81]

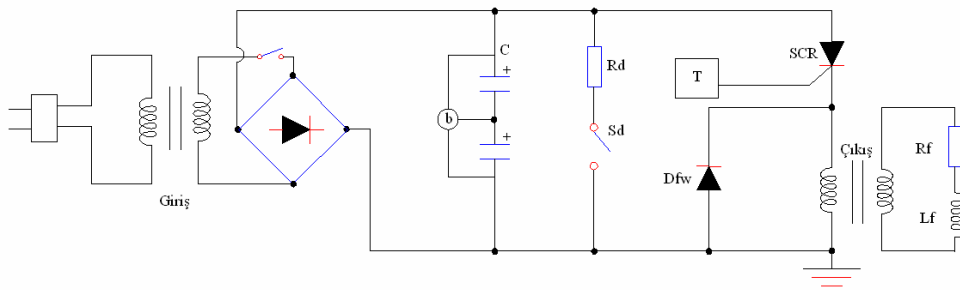
Şekil 4.14’de SCR (Silicon Controlled Rectifier) kullanılan bir devre gösterilmiştir. Flyback diyot halen devrede olmasına rağmen ancak SCR ters yönlü bir akım söz konusu olduğunda devreyi kapatmayı her ne kadar gerekli olmasa da daha hızlı gerçekleştirir. Bu durum ancak iki sıra kapasite değerlerinin birbirinden oldukça farklı olduğu durumlarda gerçekleşebilir. Aynı zamanda  $R_d$  boşalma direnci,  $S_d$  anahtarı açık konumda devreye eklenmiştir [81].



Şekil 4.14. Silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi [81]

Şekil 4.15’de görüldüğü üzere aynı devreye çıkış transformatörü eklenmiştir. Transformatör bağlama düzeneğine giden gücü etkileyememektedir. Daha az akım geçirilerek daha fazla sarım elde edilebileceğinden ilk etapta bu durum herhangi bir

avantaj sağlamasa da bağlantıda aynı sonuçlar elde edilebilir. Ancak transformatörün kullanımını bazı durumlarda yararlı olabilir. İlk olarak düzenekteki maksimum gerilim düşürülerek operatörün güvenliği sağlanır. İkincisi düşürülen gerilim ve daha az sayıda sarım sayısı düzenekteki elektriksel izolasyon için gerekli olan alanı azaltır. Sonuç olarak transformatör kullanımını sistemdeki maliyeti yükseltmekle beraber talep edilen güçte ciddi bir artış sağlamaktadır [81].



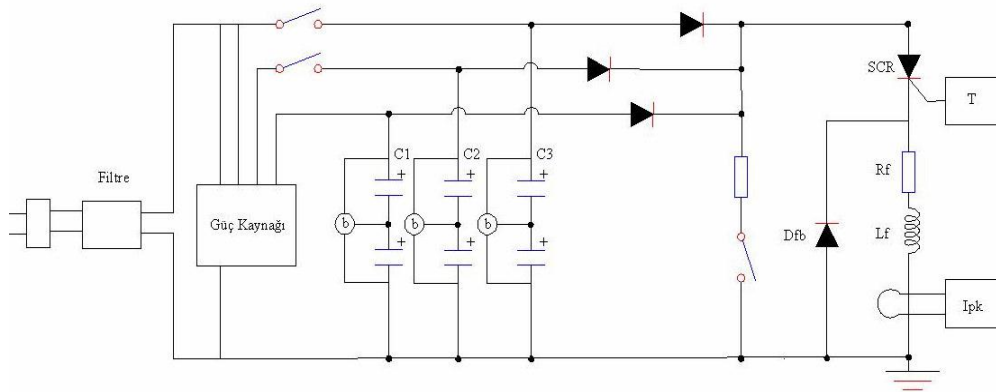
Şekil 4.15. Çıkış transformatörü kullanılan mıknatıslayıcı devresi [81]

Şekil 4.16'da yer alan devrenin iki temel yeniliği mevcuttur. Bunlardan ilki kondansatörün şarj gerilimi gibi değişiklik gösterebilmesidir. İkincisi ise elde edilen maksimum akımın otomatik olarak ön panel de gösterilmesidir. Her iki yenilik de patentli olmasına rağmen sadece Oersted Technology ürünlerinde yer almaktadır. Değişebilen kapasitelerin varlığı bir mıknatıslayıcının birçok sabit kondansatör gruplarının yerine kullanılır. Böylelikle farklı boyutlardaki değişik bağlantılarla ve farklı ürünlerle kullanımına olanak sağlar. Aynı zamanda bağlantı düzeneği-mıknatıslayıcı bağlantısını en iyi duruma getirir [81].

Maliyetinin yüksek olmasından dolayı her yeni uygulama için farklı bağlantılar oluşturmak, çok gerekli görülmediği takdirde yapılmamalıdır. En iyi dizayn edilmiş bağlantılar bile belirsizlikler ve yanlış bilgilerden dolayı ihtiyaçları karşılamada başarılı olamayabilirler. Ayarlanabilir kondansatörlü mıknatıslayıcılar bu çeşitliliği birbirlerine uydurmak için kullanılırlar. Kondansatörler ve gerilim değişikliğine



yönelik yapılan kişisel çalışmalar, performans ürün miktarı ve farklı materyalleri beraberinde getirmektedir [81].

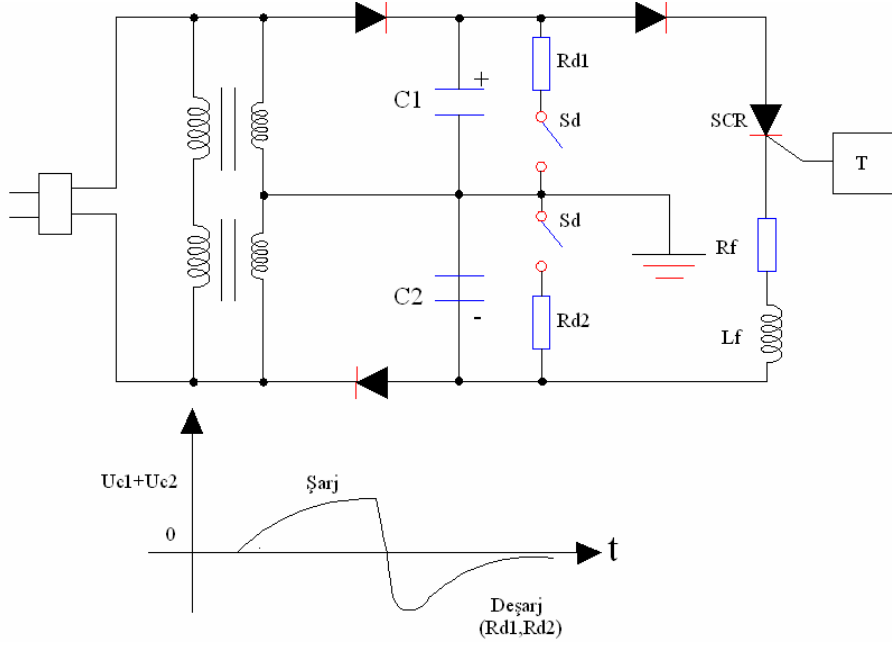


Şekil 4.16. Gelişmiş silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi [81]

Bu mıknatıslayıcıda 60Hz genişliğinde bir transformatör yerine sürekli akımlı şarj devresi kullanılır. Transformatörler öncelikle yüksek seviyede şarj edilir ancak kapasiteler yüksek şarja ulaştığından dolayı akım ters bir gerilimle düşürülür [81].

Sonuç olarak transformatör odaklı tasarımlar, şebekeden sürekli akımlı şarj devrelerine göre daha fazla akım çeker.

Şekil 4.17'de gösterilen devre çift kutuplu yüksek gerilimli mıknatıslayıcıya örnektir. Bu tasarımda kondansatör şarjlı iki ayrı devreye ihtiyaç bulunmaktadır.  $C_1$  kondansatörünün negatif ucu ile  $C_2$  kondansatörünün pozitif ucu birlikte topraklanır.  $C_1$  ve  $C_2$  kondansatörleri aynı anda şarj edilir. Anahtar kapatıldığında akım  $C_1$  ve  $C_2$  kondansatörleri üzerinden akarak her ikisinin önce boşalmasına ve ardından birbirlerine paralel yönde tekrar dolmasına imkân verir. Devrede Flyback diyota ihtiyaç duyulmamaktadır. Ters gerilim arttıkça yavaş yavaş bağlantı içindeki akımın azalmasını ve sonunda durmasını sağlar. Bir sonraki tetiklemeden önce kondansatörler  $R_{d1}$  ve  $R_{d2}$  dirençleri üzerinden boşaltılmalıdır [81].



Şekil 4.17. İki kutuplu kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi [81]

Yüksek gerilimli mıknatıslayıcılarda yüksek gerilim kondansatörlerine ve iki adet şarj devresine gereksinim olduğu için, orta gerilimlilere nazaran daha pahalıdırlar.

Günümüzde mıknatıslayıcılar daha kompleks ve fonksiyonel olarak üretilmektedir. Maizemeleri mıknatısladığı gibi ölçümlerini de yapabilmektedir. Örnek olarak bizim kullandığımız sistem Metis firmasına ait Hysterisis Graph 8 Kjoule Capacitive decharger dir. Sisteme ait ekipmanın teknik özellikleri aşağıda belirtilmiştir.



Resim 4.1. Hysterisis graph 8 kjoule capacitive decharger sisteminin genel görüntüsü

### **HymPulse Sistemini Oluşturan Ekipmanlar**

- CDM-M mıknatıslandırıcı (1)
- Deney-Ölçüm ünitesi (2)
- HMP-probe
- Isıtma ünitesi
- Sinyal işleme birimi
- HyMPulse programı PC ve veri iletişim kartları(3)

Çizelge 4.1. Hysterisis graph 8 kjoule capacitive decharger teknik özellikleri

<b>Özellikler</b>	<b>CDM-C</b>	<b>CDM-M (Deneyde Kullanılan Sistem)</b>
Minimal enerji:	500 J	4 kJ
Artırımsal Enerji:	500 J	4 kJ
Maksimum Enerji:	2,5 kJ	N/A
Maks Gerilim:	3 kV	3 kV
Akım ölçümü	Evet	
Sıcaklık sensör girişi	Evet	

## 5. YAPAY SİNİR AĞLARI

### 5.1. Yapay Zekâ Kavramı

İnsanoğlu, mağara duvarlarına hayvan figürleri çizerek başladığı veri işleme sürecine artık insan gözüyle görülemeyecek küçüklükteki "chip"lerle devam etmektedir. Bu gelişim yaklaşık 4000 yıl gibi uzun bir süreye yayılmasına karşın gerçek gelişim son 50 yıl içinde yaşanmıştır. Bu gelişim sürecinde artık kendi zekâsıyla yetinmeyen insanoğlu makinalara da zekâ verme uğraşı içindedir; artık amaç daha zeki, insan davranışlarını örnekleyebilen ve karar verebilen makinalar üretmektir [82].

İnsanı diğer canlılardan ayıran en önemli özelliği; sahip olduğu öğrenme, düşünme ve yorumlama yeteneklerinin farklılığıdır. İnsan bu yeteneklerini temel yapı elemanı olan sinir hücrelerine sahip beynine borçludur. İnsanın akıllı makina yapma isteğinin temelinde, işte bu sinir hücrelerini modelleyebilmesi ve kısmen de olsa insan beyninin bazı özelliklerini makinaya kazandırması yatmaktadır [83].

Yapay zekâ; zekâ ve düşünme gerektiren işlemlerin bilgisayarlar tarafından yapılmasını sağlayacak araştırmaların yapılması ve yeni yöntemlerin geliştirilmesi hususunda çalışılan bilim dalıdır. Yapay zekâ; "düşünme, anlama, kavrama, yorumlama ve öğrenme yapılarının programlamayla taklit edilerek problemlerin çözümüne uygulanması" olarak da ifade edilebilir [84].

İnsan beyni dünyanın en karmaşık makinası olarak kabul edilebilir. İnsan beyni sayısal bir işlemi birkaç dakikada yapabilmesine karşın; idrak etmeye yönelik olayları çok kısa bir sürede yapar. Örneğin yolda giden bir şoför, yolun kayganlık derecesini önündeki tehlikeden ne kadar uzak olduğunu, sayısal olarak değerlendiremezse dahi geçmişte kazanmış olduğu tecrübeler sayesinde aracın hızını azaltır. Çünkü o saniyelerde ölçülebilecek kadar kısa bir sürede tehlikeyi idrak etmiş ve ona karşı koyma gibi bir tepki vermiştir. Bilgisayarlar çok karmaşık sayısal işlemleri anında çözümleyebilmelerine karşın, idrak etme ve deneyimlerle kazanılmış

bilgileri kullanabilme noktasında çok yetersizdirler. Bu olayda insanı ya da insan beynini üstün kılan temel özellik, sinirsel algılayıcılar vasıtası ile kazanılmış ve görevli olarak sınıflandırılmış bilgileri kullanabilmesidir. Uzman sistemler (US), Bulanık Mantık (BM), Genetik Algoritma (GA) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi yapay zekâ alt dalları özellikle son yıllarda, geniş bir araştırma ve uygulama alanı bulmaktadır.

Uzman Sistem temelde insan düşüncelerini gerçekleştirmek amacıyla bilgisayar tarafından işlenen bir yazılımdır. Uzman sistem geliştirilirken, uzmanların belli bir konudaki bilgi ve deneyimlerini bilgisayara aktarılması amaçlanmaktadır.

Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayanan bir matematiksel disiplindir. Bulanık mantık insan mantığında olduğu gibi, Uzun - Kısa, Sıcak - Soğuk, Hızlı - Yavaş, Siyah - Beyaz, yerine Uzun - Ortadan Uzun, Orta, Ortadan Kısa vb. gibi ara değerlere göre çalışmaktadır.

Genetik algoritmalar yapay zekânın gittikçe genişleyen bir kolu olan evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçasını oluşturmaktadır. Genetik algoritma Darwin' in evrim kuramı doğada en iyinin yaşaması kuralından esinlenerek oluşturulan, bir veri öbeğinden özel bir veriyi bulmak için kullanılan bir arama yöntemidir. Genetik algoritma geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkânsız olan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Herhangi bir problemin genetik algoritma ile çözümü, problemi sanal olarak evrimden geçirerek yapılmaktadır [85].

Yapay sinir ağları bir anlamda paralel bilgi işleme sistemi olarak düşünülebilir. Yapay sinir ağlarına bu bilgiler ilgili olaya ait örnekler üzerinde eğitilerek verilir. Böylelikle, örnekler sayesinde açığa çıkarılmış özellikler üzerinde çeşitli geliştirmeler yapılarak daha sonra ortaya çıkacak ya da o ana kadar hiç rastlanmamış olaylara da çözümler üretilmektedir [85].

## 5.2. Yapay Sinir Ağları

Bilim dünyası 1940' lı yılların başında yapay sinir ağları ile tanışmıştır. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar, öncelikle beyin hücrelerinin işlevlerinin ve aralarında iletişim prensiplerinin ortaya çıkarılmasını amaçlamamıştır. O yıllardan günümüze yapay sinir ağları gerek teorik gerekse pratik anlamda dikkate değer miktarda yol kat etmiştir. Artık çok rahatlıkla, birçok yapay hücrenin belli bir düzende bir araya getirilmesi ve uygun öğrenme algoritmaları ile yapay sinir ağları kurulabilmekte ve bu ağlar çok karmaşık görevleri başarıyla yerine getirebilmektedir [86].

Yapay sinir ağları, insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri, herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirebilmek amacı ile geliştirilen bilgisayar yazılım sistemleridir. Bu yetenekleri geleneksel programlama yöntemleri ile gerçekleştirmek oldukça zor veya mümkün değildir. O nedenle, yapay sinir ağlarının programlanması çok zor veya mümkün olmayan olaylar için geliştirilmiş adaptif bilgi işleme ile ilgilenen bir bilgisayar bilim dalı olduğu söylenebilir [87].

Günümüzde bilgi işleme büyük çoğunlukla sayısal bilgisayarlar ile gerçekleştirilmektedir. Bilgi işlem makinalarının değişik türlerini ortaya çıkarmayı amaçlayan araştırmalar, sayısal bilgisayar dünyasındaki baş döndürücü gelişmelerin gölgesinde kalmasına rağmen devam etmektedir. Bu araştırmaların bir yönünü insanların ve diğer canlıların sahip olduğu yapıları, işletim ilkelerini taklit eden bir bilgi işletim sistemini geliştirmek oluşturmaktadır.

Yapay sinir ağları, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış birçok işlem elemanlarından (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir işlem elemanı, aslında sık sık transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem elemanı diğer nöronlardan sinyaller alır; bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Genelde, işlem elemanları kabaca gerçek nöronlara karşılık gelirler ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapıda sinir ağlarını oluşturmaktadır [88].

Yapay sinir ağıları bir programcının geleneksel yeteneklerini gerektirmeyen, kendi kendine öğrenme düzenekleridir. Bu ağlar öğrenmenin yanı sıra, ezberleme ve bilgiler arasında ilişkiler oluşturma yeteneklerine de sahiptir.

Yapay sinir ağıları, insanlar tarafından gerçekleştirilmiş örnekleri (gerçek beyin fonksiyonlarının ürünü olan örnekleri) kullanarak olayları öğrenebilen, çevreden gelen olaylara karşı nasıl tepkiler üretebileceğini belirleyen bilgisayar sistemleridir. İnsan beyninin fonksiyonel özelliklerine benzer şekilde;

- Öğrenme,
- İlişkilendirme,
- Sınıflandırma,
- Genelleme,
- Özellik belirleme,
- Optimizasyon

gibi konularda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Örneklerden elde ettikleri bilgiler ile kendi deneyimlerini oluşturur ve daha sonra benzer konularda benzer kararları verirler.

Sinir sisteminin modellenmesi ile elde edilen YSA' lar, biyolojik sinir sisteminin benzer üstünlüklerine de sahiptir. Bu üstünlükleri aşağıdaki gibi maddeler halinde özetlenebilir [86].

- *Doğrusal Olmama:* YSA' nın temel işlem elemanı doğrusal olmayan fonksiyonla aktive edilebildiğinden, hücrelerin birleşmesinden meydana gelen YSA da doğrusal olmaz ve böylece bu özellik bütün ağa yayılmış olur. Bu özelliği ile YSA, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin modellenmesinde önemli bir araç olagelmıştır.
- *Paralellik:* Geleneksel bilgi işleme yöntemlerinin çoğu seri işlemlerden oluşmaktadır. Bu da hız ve güvenilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir. Seri



bir işlem gerçekleşirken herhangi bir birimin yavaş oluşu tüm sistemi yavaşlatırken, paralel bir sistemde yavaş bir birimin etkisi çok azdır. Yani seri bir bilgisayarın bir işlemcisi beyine göre birim zamanda milyarlarca kez daha hızlı işlem yapmasına ve beyinin işlem hızı çok düşük olmasına rağmen, toplam işlem hızı seri çalışan bir bilgisayara göre kıyaslanamayacak kadar yüksektir [86].

- *Yerel Bilgi İşleme:* İnsan beyninde olduğu gibi, yapay sinir ağlarında her bir işlem birimi, çözülecek problemin tümü ile ilgilenmek yerine, sadece problemin gerekli parçası için özelleşmektedir ve problemin bir parçasını işlemektedir. Yapay hücreler çok basit işlem yapmalarına rağmen, sağlanan görev paylaşımı sayesinde, çok karmaşık problemler çözülebilmektedir.

- *Hata Toleransı:* Sayısal bilgi işleyen bilgisayarda, herhangi bir işlem elemanını yerinden almak, onu etkisiz bir makineye dönüştürmektedir. Ancak yapay sinir ağlarında bir elemanda meydana gelebilecek hasar çok büyük önem teşkil etmez. Seri bilgi işlem yapan bir sistemde herhangi bir birimin hatalı çalışması, hatta bozulmuş olması tüm sistemin hatalı çalışmasına veya bozulmasına sebep olacaktır. Paralel işlem yapan bir sistemde ise, sistemin ayrı ayrı işlem elemanlarında meydana gelecek olan hatalı çalışma veya hasar, sistemin performansında keskin bir düşüşe yol açmadan, performansın sadece hatalı çalışan birimlerinin oranınca azalmasına sebep olacaktır. YSA' ların hatayı tolere etme yetenekleri geleneksel yöntemlere göre son derece yüksektir.[86].

- *Öğrenebilirlik:* Geleneksel veri işleme yöntemlerinin çoğu programlama yolu ile hesaplamaya dayanmaktadır. Bu yöntemler ile tanımlı iyi yapılamamış (giriş-çıkış ilişkileri arasındaki ilişkiler belirlenememiş) problemin çözümü yapılamaz. Dolayısıyla, problemin iyi tanımlanmasının yanında, bir de problemin çözümü için probleme yönelik bir algoritmanın geliştirilmesi gerekmektedir. Yapay sinir ağları problemleri verilen örneklerle göre çözer. Çözülecek herhangi bir problem için yapı benzerlik gösterir. YSA' nın arzu edilen davranışı gösterebilmesi için amaca uygun olarak ayarlanması yeterlidir. Bu, hücreler arasında doğru bağlantıların yapılması ve

bağlantıların uygun ağırlıklara sahip olması gerektiği demektir. YSA' nın karmaşık yapısı nedeniyle bağlantılar ve ağırlıklar önceden ayarlı olarak verilemez ya da tasarlanamaz. Bu nedenle YSA, istenen davranışı gösterebilecek şekilde ilgilenilen probleme ait eğitim örneklerini kullanarak problemi öğrenmelidir [86].

- *Genelleme:* YSA, ilgilenilen problemi öğrendikten sonra eğitim sırasında karşılaşmadığı test örnekleri için de arzu edilen tepkiyi üretebilir. Örneğin, karakter tanıma amacıyla eğitilmiş bir YSA, bozuk karakter girişlerinde de doğru karakterleri verebilir ya da bir sistem için eğitilmiş YSA modeli, eğitim sürecinde hiç uygulanmamış giriş sinyalleri için de sistemle aynı davranışı gösterebilir.

- *Uyarlanabilirlik:* YSA, ilgilenilen problemdeki değişikliklere göre ağırlıklarını ayarladığı ya da optimize ettiği ifade edilmişti. Yani, belirli bir problemi çözmek amacıyla eğitilen YSA, problemdeki değişimlere göre tekrar eğitilebilir, değişimler devamlı ise gerçek zamanda da eğitime devam edilebilir. Bu özelliği ile YSA, uyarlamalı örnek tanıma, sinyal işleme, sistem modelleme ve denetim gibi alanlarda etkin olarak kullanılabilir [86].

- *Donanım ve Hız:* YSA, paralel yapısı nedeniyle büyük ölçekli bütünleşmiş devre teknolojisi ile gerçekleştirilebilir. Bu özellik, YSA' nın hızlı bilgi işleme yeteneğini artırır ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

- *Analiz ve Tasarım Kolaylığı:* YSA' nın temel işlem elemanı olan nöronun yapısı ve modeli, bütün YSA yapılarında yaklaşık aynıdır. Dolayısıyla, YSA' nın farklı uygulama alanlarındaki yapıları da standart yapıdaki bu hücrelerden oluşacaktır. Bu nedenle, farklı uygulama alanlarında kullanılan YSA' lar benzer öğrenme algoritmalarını ve teorilerini paylaşabilirler. Bu özellik, problemlerin YSA ile çözümünde önemli bir kolaylık getirmektedir [86].

Yapay sinir ağları günümüzde birçok probleme çözüm üretebilecek yeteneğe sahiptir. Değişik şekillerde tanımlanmaktadır. Tanımların ortak birkaç noktası vardır.

Bunların en başında yapay sinir ağlarının birbirine hiyerarşik olarak bağlı ve paralel olarak çalışabilen yapay hücrelerden oluşmaları gelmektedir. İşlem elemanları da denilen bu hücrelerin birbirlerine bağlandıkları ve her bağlantının bir değerinin olduğu kabul edilmektedir. Bilginin öğrenme yolu ile elde edildiği ve işlem elemanlarının bağlantı değerlerinde saklandığı dolayısıyla dağıtık bir hafızanın söz konusu olduğu da ortak noktaları oluşturmaktadır. İşlem elemanlarının bir birleri ile bağlanmaları sonucu oluşan ağa yapay sinir ağı denmektedir. Bu ağın oluşturulması biyolojik sinir sistemi hakkındaki bulgulara dayanmaktadır [86].

Teknik olarak da, bir yapay sinir ağının en temel görevi, kendisine gösterilen bir girdi setine karşılık gelebilecek bir çıktı seti belirlemektir. Bunu yapabilmesi için ağ, ilgili olayın örnekleri ile eğitilerek (öğrenme) genelleme yapabilecek yeteneğe kavuşturulur. Bu genelleme ile benzer olaylara karşılık gelen çıktı setleri belirlenir [89].

Yapay sinir ağları, bilgi sınıflama ve bilgi yorumlamanın da içinde bulunduğu çok değişik problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bir çok alanda olduğu gibi elektrik alanında, endüstrinin temel taşı olan elektrik motorlarında da yapay sinir ağları kullanılarak daha verimli, daha az kayıplı sistemlerin tasarımı hedeflenmektedir.

### **5.3. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı ve Temel Elemanları**

Bu bölümde yapay sinir ağlarının yapıları ve yapay sinir ağlarının oluşturan temel elemanlar hakkında bilgiler verilmiştir.

#### **5.3.1. Yapay sinir hücresi**

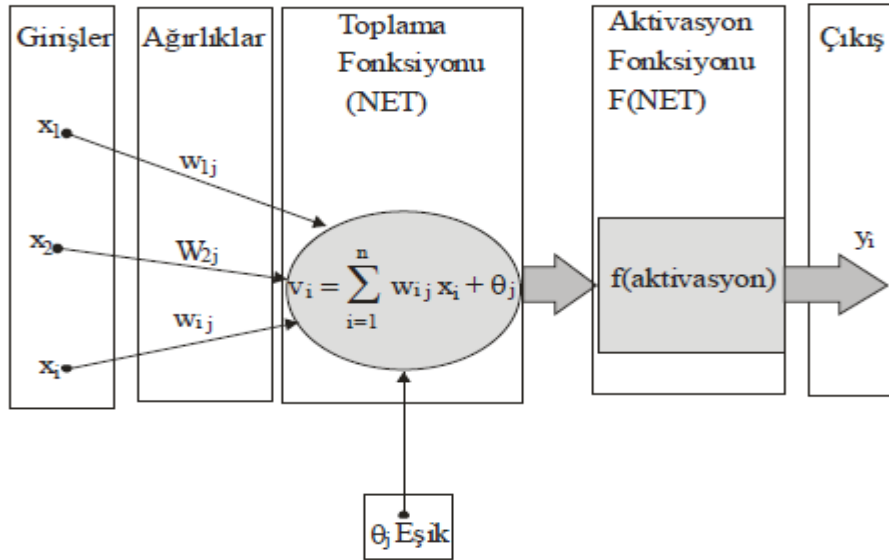
Yapay sinir ağları, birbirine bağlı çok sayıda işlem elemanlarından oluşmuş, genellikle paralel işleyen yapılar olarak adlandırılabilir. Yapay sinir ağlarındaki işlem elemanları basit sinirler olarak adlandırılabilir.

Yapay sinir ağırları, insan beyni gibi, öğrenme hatırlama ve genelleme yeteneğine sahiptirler. İnsan beyninde öğrenme üç şekilde olur;

1. Yeni aksonlar üreterek
2. Aksonların uyarılmasıyla
3. Mevcut aksonların güçlerini değiştirerek.

Her aksonun, üzerinden geçen işaretleri değerlendirebilecek yetenekte olduğu savunulmaktadır. Aksonun bu özelliği, bir işaretin belli bir sinir için ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Yapay sinir ağlarının temel birimi işlem elemanı yada düğüm olarak adlandırılan yapay bir sinirdir. Bir yapay sinir, biyolojik sinirlere göre daha basit olmasına karşın biyolojik sinirlerin 4 temel işlevini taklit ederler. Şekil 5.1' de yapay bir sinir hücresi gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Yapay sinir hücresinin yapısı

Girişler  $x_i$  sembolüyle gösterilmiştir. Bu girişlerin her biri ağırlık  $w$  ile çarpılır. Basitçe, bu ürünleri eşik değeri  $\theta_j$  ile toplanır ve sonucu oluşturmak için aktivasyon

fonksiyonu ile işlem yapılır ve  $y_i$  çıkışı alınır. Tüm yapay sinir ağıları bu temel yapıdan türetilmiştir. Bu yapıdaki farklılıklar yapay sinir ağlarının farklı sınıflandırılmalarını sağlar. Bir yapay sinirin öğrenme yeteneği, seçilen öğrenme algoritması içerisinde ağırlıkların uygun bir şekilde ayarlanmasına bağlıdır.

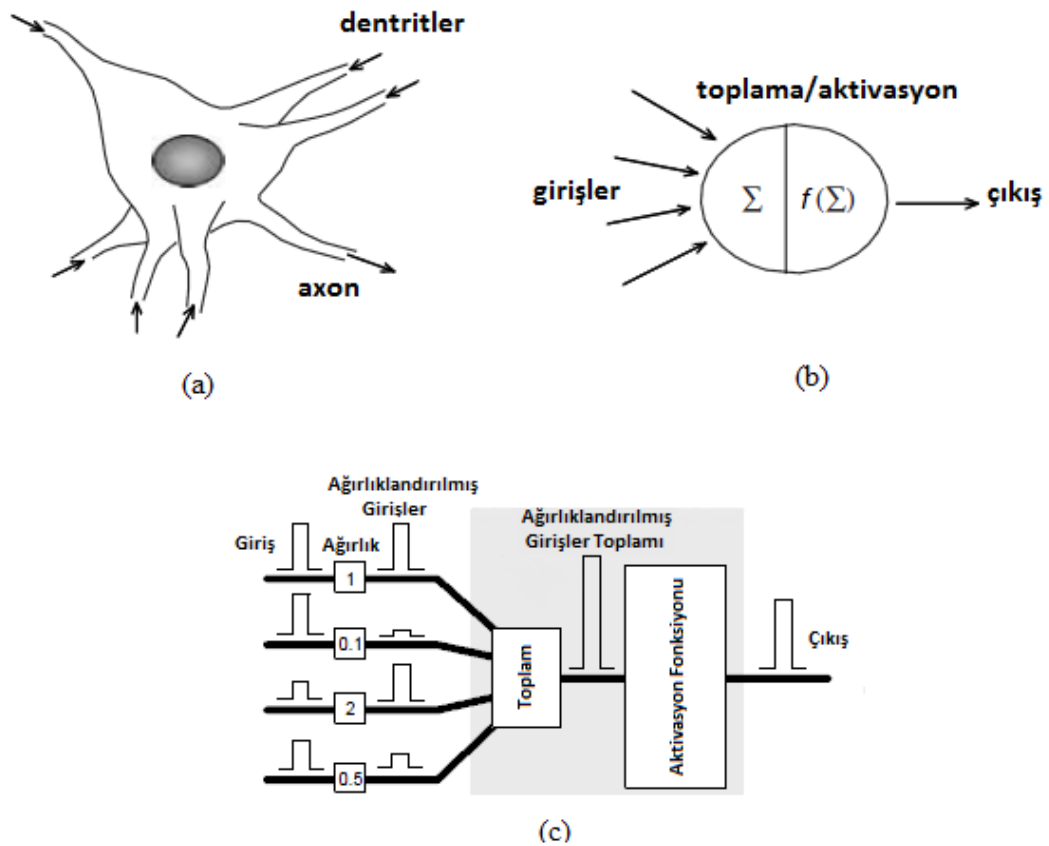
### Girişler

Girişler ( $x_1, x_2, \dots, x_3, \dots, x_n$ ) çevreden aldığı bilgiyi yapay sinir hücresine (işlem elemanına) getirir. Bunlar ağın öğrenmesi istenen örnekler tarafından belirlenir. Girişler kendinden önceki sinirlerden veya dış dünyadan sinir ağına gelebilir. Bir sinir genellikle gelişigüzel birçok girdiler alır.

### Ağırlıklar

Ağırlıklar ( $w_1, w_2, \dots, w_i$ ) bir yapay hücreye gelen bilginin önemini ve hücre üzerindeki etkisini belirleyen uygun katsayılardır. Her bir giriş kendine ait bir ağırlığa sahiptir. Ağırlıkların büyük yada küçük olması önemli yada önemsiz olduğu anlamına gelmez. Bir ağırlığın değerinin sıfır olması o ağ için en önemli olay olabilir. Eksi değerler önemsiz demek değildir. O nedenle artı veya eksi olması etkisinin pozitif veya negatif olduğunu gösterir. Sıfır olması ise herhangi bir etkisinin olmadığını gösterir. Ağırlıklar değişken veya sabit değerler olabilirler.

Şekil 5.2.' de biyolojik bir nöron ve matematiksel temsili görülmektedir [90].



Şekil 5.2. Biyolojik bir nöron ve temsili [90]

a) Biyolojik nöron b) Nöron modeli c) Bir nöronun işleyişi

### Toplama Fonksiyonu

Toplama fonksiyonu, bir hücreye gelen net girdiyi hesaplar. Bunun için değişik fonksiyonlar kullanılmaktadır. En yaygın olanı ağırlıklı toplamı bulmaktır. Burada her gelen giriş (girdi) değeri kendi ağırlığı ile çarpılarak toplanır. Böylece ağa gelen net girdi bulunmuş olur. Aşağıdaki gibi formülize edilmektedir.

$$NET = \sum_i^n G_i A_i \quad (5.1)$$

Eş. 5.1' de G girdileri, A ağırlıkları, n ise bir hücreye gelen toplam girdi (işlem elemanı) sayısını göstermektedir. Yalnız yapay sinir ağlarında daima bu formülün

kullanılması şart değildir. Uygulanan yapay sinir ağı modellerinden bazıları kullanılacak toplama fonksiyonunu belirleyebilmektedir. Literatürde yapılan araştırmalarda toplama fonksiyonu olarak değişik formüllerin kullanıldığı görülmektedir. Bazı durumlarda toplama fonksiyonu bu kadar basit bir işlem yerine, en az (min), en çok (max), çoğunlukla veya birkaç normalleştirme algoritması gibi çok daha karmaşık olabilir [82].

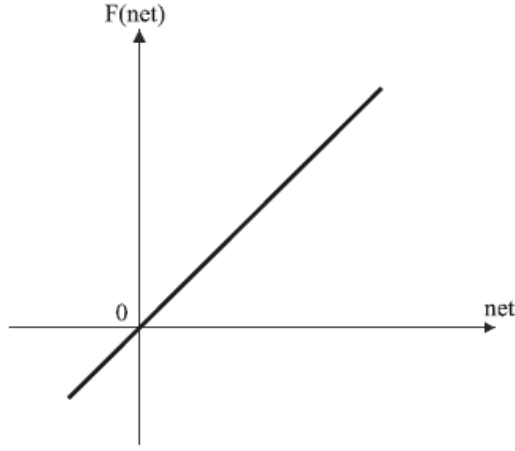
### Aktivasyon Fonksiyonu

Bu fonksiyon, hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu girdiye karşılık üreteceği çıkışı (çıkıyı) belirler. Toplama fonksiyonunda olduğu gibi aktivasyon fonksiyonu olarak çıkıyı hesaplamak için de değişik formüller kullanılmaktadır. Bazı modeller (mesela çok katmanlı algılayıcı) bu fonksiyonun türevinin alınabilir bir fonksiyon olmasını şart koşmaktadır. Toplama fonksiyonunda olduğu gibi aktivasyon fonksiyonunda da ağı işlem elemanlarının hepsinin aynı fonksiyonu kullanması gerekmez. Bazı elemanlar aynı fonksiyonu diğerleri farklı fonksiyonları kullanabilirler. Bir problem için en uygun fonksiyonu, tasarımcı deneyimlerinin sonucunda belirlemektedir. Uygun fonksiyonu gösteren bir formül bulunmuş değildir.

Aktivasyon fonksiyonları, doğrusal ve doğrusal olmayan biçimlerde [82] (doğrusal, parçalı doğrusal, katı sınırlamalı, yumuşak sınırlamalı vb.)

### *Doğrusal aktivasyon fonksiyonu*

Doğrusal bir problemi çözmek amacıyla kullanılan doğrusal hücre ve YSA' da ya da genellikle katmanlı YSA' nın çıkış katmanında kullanılan doğrusal aktivasyon fonksiyonu, hücrenin net girdisini doğrudan hücre çıkışı olarak verir. Doğrusal aktivasyon fonksiyonu Eş. 5.2 ' deki gibi ifade edilir.



Şekil 5.3. Doğrusal aktivasyon fonksiyonu

$$F(NE T) = NE T \quad (5.2)$$

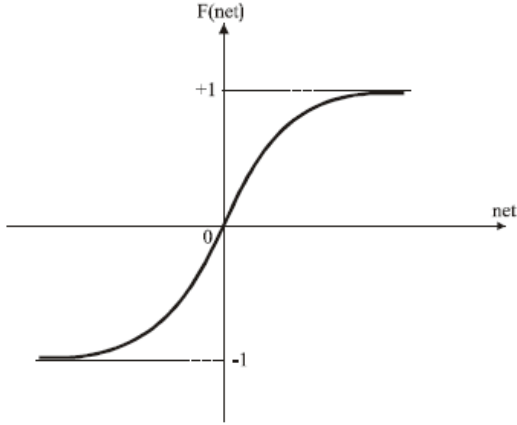
Burada NET işlem elemanına gelen NET girdi değerini göstermektedir. Bu değer toplama fonksiyonu kullanılarak belirlenmektedir. Şekil 5.3'de doğrusal aktivasyon fonksiyonu grafiği görülmektedir [82].

#### *Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu*

Gelen NET girdi değerinin tanjant fonksiyonundan geçirilmesi ile hesaplanmaktadır. Türevi alınabilir, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan YSA' larında tercih edilir. Şekil 5.4'de hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu grafiği görülmektedir. Fonksiyonu Eş. 5.3' de ki gibi ifade edilmektedir.

$$F(NE T) = \tanh(NE T) = \frac{e^{NE T} + e^{-NE T}}{e^{NE T} - e^{-NE T}} \quad (5.3)$$



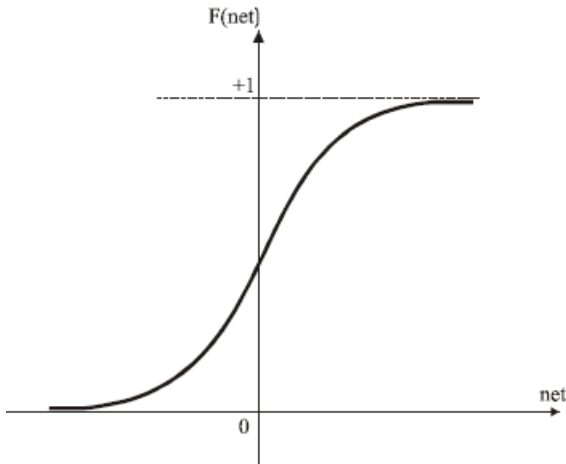


Şekil 5.4. Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu

*Logaritma sigmoid aktivasyon fonksiyonu*

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan çok katmanlı algılayıcı modelinde genel olarak aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon Eş. 5.4 ile ifade edilir. Bu fonksiyona sürekli eşikleme fonksiyonu da denmektedir. Şekil 5.5'de sigmoid aktivasyon grafiği görülmektedir.

$$F(NET) = \frac{1}{1 + e^{-NET}} \quad (5.4)$$

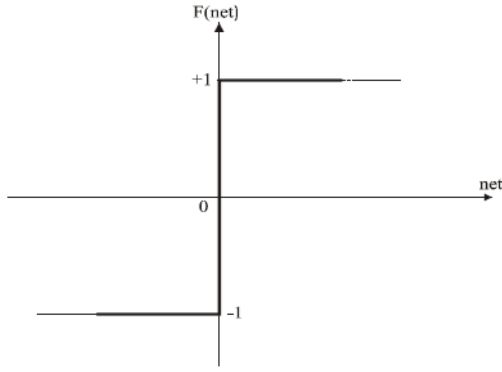


Şekil 5.5. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu

### *Signum aktivasyon fonksiyonu*

Eşik aktivasyon fonksiyonununun -1 ile +1 arasında değişeni ise signum aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır. Eşik aktivasyon fonksiyonlu hücreler, mantıksal çıkış verir ve sınıflandırıcı ağlarda tercih edilir. Şekil 5.6'da signum aktivasyon fonksiyonu grafiği görölmektedir. Signum aktivasyon fonksiyonunu matematiksel olarak Eş. 5.5' de ki gibi ifade edilir.

$$f(NE T) = \text{sgn}(net) = \begin{cases} +1 & ,net > 0 \\ -1 & ,net < 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

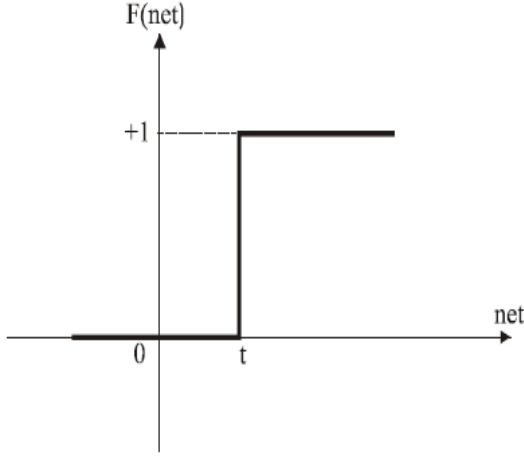


Şekil 5.6. Signum aktivasyon fonksiyonu

### *Eşik aktivasyon fonksiyonu (Step)*

Eşik aktivasyon fonksiyonu eğer net değeri eşik değeri (t)' den küçükse sıfır, eşik değerinden daha büyük veya eşit bir değer ise çıkışında +1 değeri verir. Eş. 5.6 ile ifade edilmektedir. Şekil 5.7' de eşik aktivasyon fonksiyonu grafiği görölmektedir.

$$f(NE T) = \begin{cases} 1 & ,NE T \geq t \\ 0 & ,NE T < t \end{cases} \quad (5.6)$$



Şekil 5.7. Eşik aktivasyon fonksiyonu

### Ölçkleme ve Sınırlama

Yapay hücrelerde, aktivasyon fonksiyonun sonuçları ölçek veya sınır işlemlerinden geçebilir. Bu ölçeklendirme basitçe bir ölçek etmeni ile etkinlik değerinin çarpımının sonucudur. Sınırlandırma ise, ölçeklenmiş sonuçların en az ve en çok sınırlarını aşmamasını sağlamaktadır.

### Hücrenin Çıkışı

Aktivasyon fonksiyonu tarafından belirlenen çıkış değeridir. Üretilen çıkış dış dünyaya veya başka bir hücreye gönderilir. Hücre kendi çıkışını kendisine giriş olarak da gönderebilir. Bir işlem elemanın birden fazla çıkışı olmasına rağmen sadece bir çıkışı olmaktadır. Ağ şeklinde gösterildiğinde bir işlem elemanın birden fazla çıkışı varmış gibi görülmektedir. Bu sadece gösterim amacıyla. Bir yapay sinir hücresinin tek bir çıkışı vardır. Aynı değer birden fazla işlem elemanına giriş olarak gitmektedir.

Her bir yapay sinir hücresinde (düğümde) bir çıkış işaretine izin verilir. Bu işaret diğer yüzlerce sinir hücresinin girişi olabilir. Bu durum biyolojik sinirde olduğu

gibidir. Biyolojik sinirde de birçok giriş varken sadece bir çıkış etkinliği vardır. Düğüm çıkışı aktivasyon fonksiyonunun sonucuna eşdeğerdir.

Yapay sinir ile biyolojik sinirler arasındaki benzerlik Çizelge 5.1' de gösterilmektedir [85].

Çizelge 5.1. Biyolojik sinir ağı ile yapay sinir ağının karşılaştırılması [85]

<b>Biyolojik Sinir Ağı</b>	<b>Yapay Sinir Ağı</b>
Sinir Sistemi	Sinirsel Hesaplama Sistemi
Sinir	İşlem Elemanı (Düğüm)
Sinaps	Ağırlıklar
Dentrit	Toplama İşlevi
Hücre Gövdesi	Aktivasyon Fonksiyonu
Akson	Hücrenin Çıkışı

#### **5.4. Öğrenme Algoritmaları**

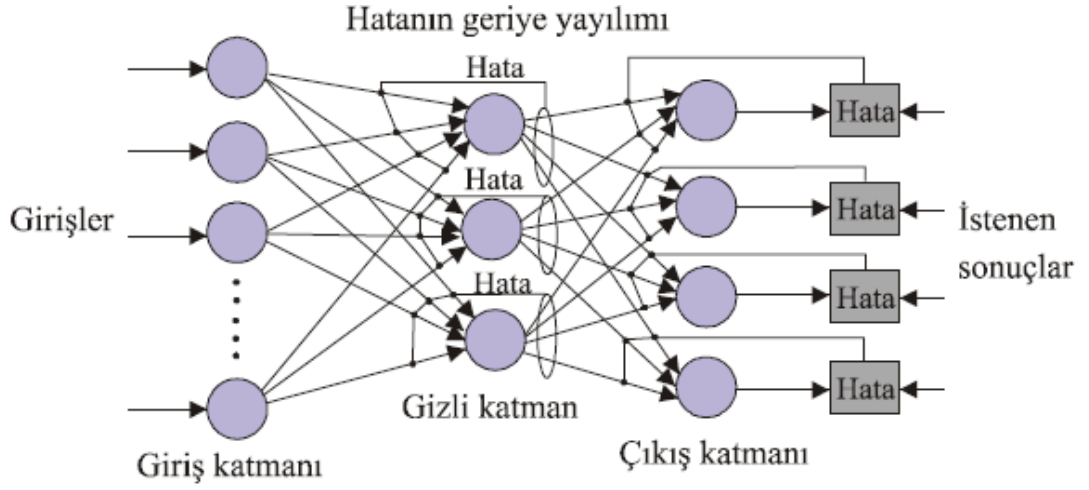
Literatürde bulunan birçok öğrenme algoritmasından en genel algoritmalarından olan geri yayımlı öğrenme algoritması ve tez çalışmasında kullanılan, Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması açıklanmıştır. Geri yayılım algoritması danışmanlı öğrenmede kullanılan en genel algoritmadır. Basit olması ve iyi bir öğrenme kapasitesine sahip olması birçok alana uygulanmasını sağlamıştır.

##### **5.4.1. Geri yayılım öğrenme algoritması**

Geri yayılım ile öğrenen ağlar hiyerarşik yapıdadır. Giriş, çıkış ve en az bir gizli katman olmak üzere üç katmandan oluşurlar. Gizli katman ve gizli katmandaki düğüm sayısı değiştirilebilir. Düğüm sayısının artması ağın hatırlama yeteneğini artırmakla birlikte öğrenme işleminin süresini uzatmaktadır. Düğüm sayısının azaltılması eğitim süresini kısaltmakta fakat hatırlama yeteneğini azaltmaktadır. Giriş katmanındaki her bir düğüm gizli katmandaki her düğüme, gizli katman birden fazla

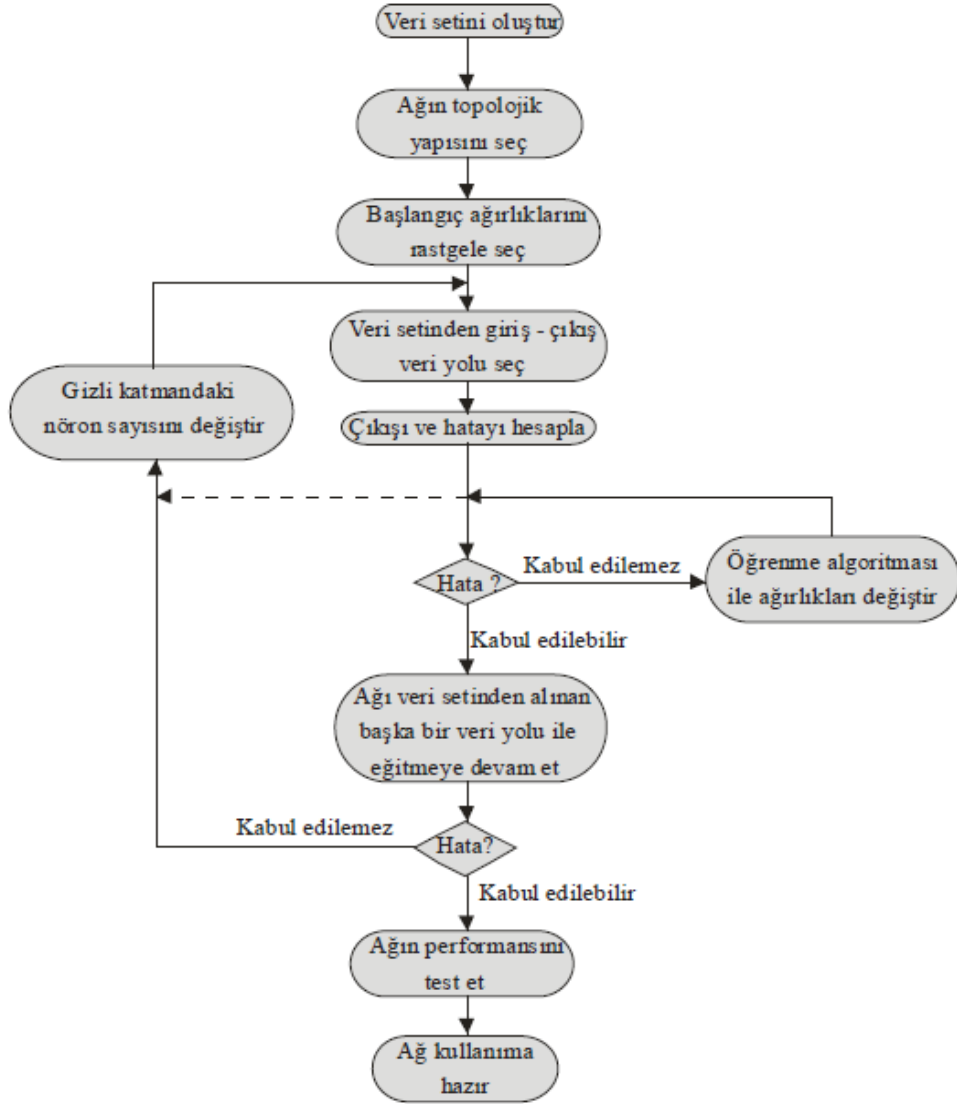
ise bu katmandaki her bir düğüm kendisinden sonra gelen katmandaki her düğüme ve gizli katman çıkışındaki her düğüm çıkış katmanındaki her düğüme bağlıdır. Bir katmandaki hiçbir düğüm kendi katmanındaki diğer bir düğüme bağlı değildir. Her katmanın çıkış değerleri bir sonraki katmanın giriş değerleridir. Bu şekilde giriş değerlerinin ağına girişinden çıkışına doğru ilerlemesine ileri besleme denir. Geri yayılım ağına hatalar, ileri besleme aktarım fonksiyonunun türevi tarafından, ileri besleme mekanizması içinde kullanılan aynı bağlantılar aracılığıyla, geriye doğru yayılmaktadır. Öğrenme işlemi, bu ağda basit çift yönlü hafıza birleştirmeye dayanmaktadır.

Geri yayılım öğrenme yöntemi, türevi alınabilir aktivasyon fonksiyonlarını çok katmanlı herhangi bir ağa uygulayabilir. Bu işlem sistem hatasını veya maliyet işlevini azaltma esasına dayanan bir eniyileme (optimizasyon) işlemidir. Bu yöntemde ağırlık ayarlamaları yapıldığı için 'geri yayılım' ismi kullanılmıştır. Öğrenme fazında, giriş örnekleri ağa belli bir sırada sunulur. Her bir çalışma örneği çıktı (çıkış) örneği hesaplanana kadar katman katman ileri yayılır. Hesaplanan çıktı daha sonra olması beklenenle karşılaştırılıp aradaki fark 'hata' olarak bulunur. Hatalar, katman katman sinaptik ayarlamaların yapıldığı geri besleme bağlantılarında 'girişler' olarak kullanılır. Şekil 5.8' de geri yayılım çalışması için değiştirilmiş bir çok katmanlı ileri beslemeli ağ göstermektedir. Geriye doğru olan bağlantılar sadece 'öğrenme fazı' için kullanılırken, ileri doğru olan bağlantılar hem öğrenme amacıyla hem de işlemsel fazlar için kullanılır.

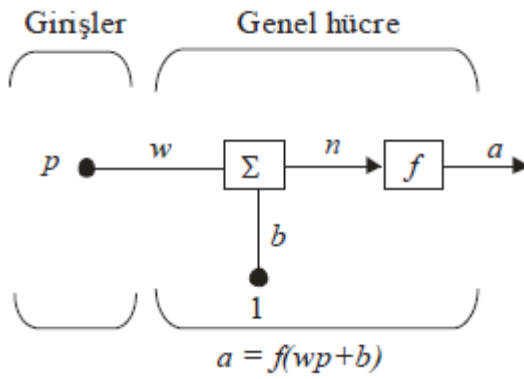


Şekil 5.8. Genel bir geri yayılım ağ yapısı [82]

Geri yayımlı öğrenme kullanıldığında, sonraki katmanların hataları kullanılarak gizli katmanın ağırlıkları ayarlanır. Böylece çıkış katmanında hesaplanan hatalar son gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlıklar ayarlanır. Aynı biçimde, bu işlemler ilk gizli katmana kadar tekrarlanır. Bu yolla hatalar katman katman ilgili katmanın ağırlık düzeltmeleri yapılarak geriye doğru yayılır. Tamamlanan çalışma süresi içinde 'toplam hata' en aza indirilinceye kadar bu işlemler tekrarlanır. Şekil 5.9' da ileri beslemeli çok katmanlı bir ağ için geri yayılım öğrenme algoritmasının akış şeması gösterilmektedir [82].



Şekil 5.9. İleri beslemeli bir ağ için geri yayılım akış şeması [82]



Şekil 5.10. Tek katmanlı hücrenin Matlab' da kısaltılmış şekli

Şekil 5.10' da tek katmanlı bir hücre girişinin Matlab' daki kısaltılmış görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 5.10' da;

$p$  : Skaler giriş

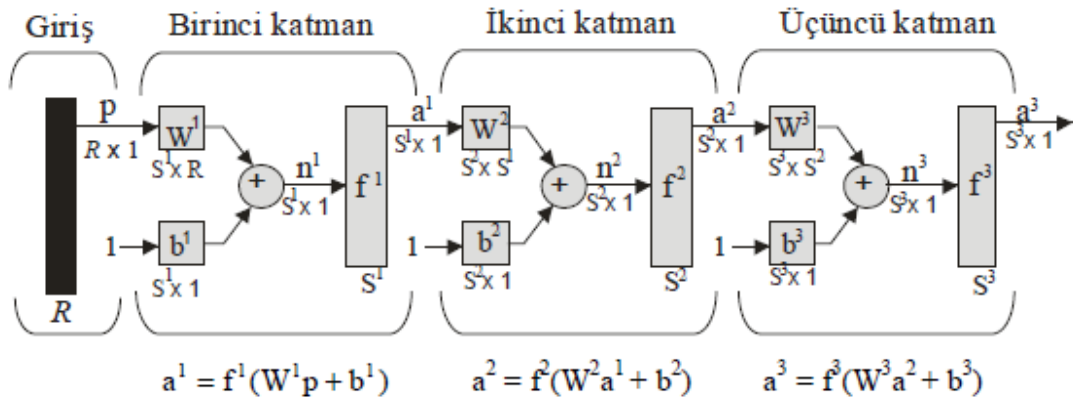
$w$  : Skaler ağırlık

$b$ : Dengeleme sabiti (ofset)

$n$ : Toplama fonksiyonunun çıkışı (net giriş)

$a$ : Skaler nöron çıkışı

olarak isimlendirilir.



Şekil 5.11. Üç katmanlı YSA için kısaltılmış gösterim [91]

Üç tabakalı bir ağı kısaltılmış görüntüsü ise Şekil 5.11' de gösterilmektedir[91].

#### 5.4.2. Levenberg- Marquardt algoritması

Geri yayılım algoritması (GYA) çok kullanılmasına rağmen bazı dezavantajları bulunmaktadır. GYA sonuca çok yavaş olarak yaklaşmaktadır. Ayrıca lokal minimuma yakalanma riski de vardır. Geri yayılım, bir adım düşme algoritmasıyken, Levenberg - Marquardt (LM) algoritması Newton metoduna bir yaklaşımdır. LM algoritması, Newton metodunun hızıyla, adım düşme metodunun sağlamlığının bileşkesidir.



LM öğrenme algoritması minimumu araştırma metotlarının ikincisidir. Her bir iterasyon adımında hata yüzeyine parabolik yaklaşımla yaklaşılr ve parabolün minimumu o adım için çözümü oluşturur.

Sonuç olarak Levenberg-Marquardt algoritması çok hızlı olarak çözüme ulaşmasına rağmen çok fazla bellek gerektirmektedir. Geri yayılım algoritması ise sonuca yavaş ulaşmakta ve daha az bellek gerektirmektedir [92].

### 5.5. YSA' ların Avantaj ve Dezavantajları

Burada çok temel bazı avantajlardan bahsedilmekle beraber, YSA' ların daha pek çok avantajı vardır. Yapay sinir ağlarının klasik sistemlere göre sağladıkları avantajlar; doğrusal olmama, öğrenme, genelleme yapma, adaptasyon, veri isleme, hataya ve gürültüye karşı duyarlılık ve tolerans olarak belirtilebilir [92].

- *YSA' lar makina öğrenmesi gerçekleştirebilirler.* Yapay sinir ağlarının temel işlevi zaten bilgisayarın öğrenmesini sağlamaktır. Olayları öğrenerek benzer olaylar karşısında mantıklı kararlar verebilirler.
- *Bilgi işleme yöntemleri geleneksel programlamadan farklıdır.* Bu nedenle geleneksel programlamanın getirdiği bir çok olumsuzluk ortadan kaldırılabilir
- *Bilgiler ağın tamamında saklanır.* Geleneksel programlamada olduğu gibi bilgiler veri tabanları yada dosyalarda belli bir düzende tutulmaz, ağın tamamına yayılarak değerler ile ölçülen ağ bağlantılarında saklanmaktadır. Nöronlardan bazılarının işlevini yitirmesi, anlamlı bilginin kaybolmasına neden olmaz.
- *Örnekleri kullanarak öğrenirler.* YSA' nın öğrenebilmesi için örneklerin belirlenmesi, bu örneklerin ağa gösterilerek istenen çıktılara göre ağın eğitilmesi gerekmektedir. Ağın başarısı, seçilen örnekler ile doğru orantılıdır, ağa olay bütün yönleri ile gösterilemezse ağ yanlış çıktılar üretebilir.
- *Daha önce görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretebilirler.* YSA' lar eğitimleri sırasında kendilerine verilen örneklerden genellemeler çıkarırlar ve bu genellemeler ile yeni örnekler hakkında bilgi üretebilirler.

- *Algılamaya yönelik olaylarda kullanılabilirler.* YSA' ların en başarılı oldukları alanlar, algılamaya yönelik uygulama alanlarıdır. Bu alanlarda başarıları kanıtlanmıştır.
- *Örüntü ilişkilendirme ve sınıflandırma yapabilirler.* YSA' lar kendilerine örnekler halinde verilen örüntüleri kendisi veya diğerleri ile ilişkilendirebilir. Ayrıca kendisine verilen örneklerin kümelenmesi ile, bir sonraki verinin hangi kümeye dahil olacağına karar verilmesi konusunda kullanılabilirler.
- *Örüntü tamamlama yapabilirler.* Ağa eksik bilgileri içeren örüntüler verildiğinde eksik bilgilerin tamamlanması konusunda başarılıdırlar.
- *Kendi kendine öğrenebilme ve organize etme yetenekleri vardır.* YSA' lar online olarak öğrenebilirler ve kendi kendilerini eğitebilirler.
- *Eksik bilgi ile çalışabilmektedirler.* Geleneksel sistemlerin aksine YSA' lar eğitildikten sonra veriler eksik bilgi içerse dahi, çıktı üretebilirler. Bu durum bir performans kaybı yaratmaz, performans kaybı eksik bilginin önemine bağlıdır. Burada bilgilerin önem dereceleri eğitim sırasında öğrenilir.
- *Hata toleransına sahiptirler.* YSA' ların eksik bilgilerle çalışabilmeleri ve bazı hücreleri bozulsa dahi çalışabilmeleri, onları hatalara karşı toleranslı yapar.
- *Dereceli bozulma gösterirler.* Bir ağ, zaman içerisinde yavaş ve göreceli bir bozulmaya uğrar. Ağlar problemin ortaya çıktığı anda hemen bozulmazlar.
- *Dağıtık belleğe sahiptirler.* YSA' larda bilgi ağa dağılmış bir şekilde tutulur. Hücrelerin bağlantı ve ağırlık dereceleri, ağın bilgisini gösterir. Bu nedenle tek bir bağlantının kendi başına anlamı yoktur.

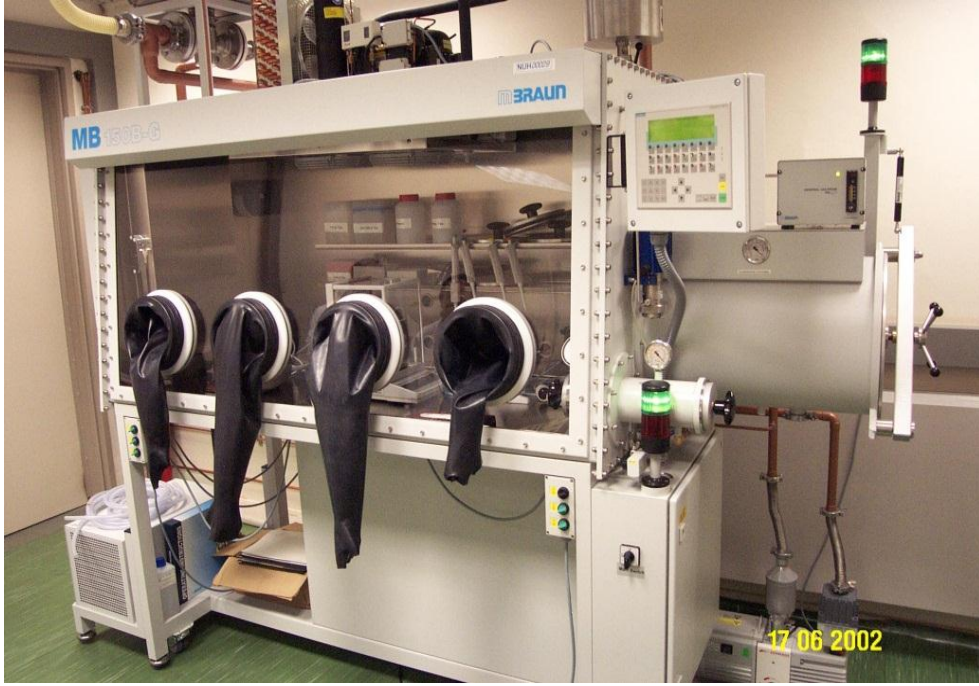
YSA'ların, pek çok avantajın yanında bazı dezavantajları da vardır. Belli başlı dezavantajları;

- *Donanım bağımlıdır.* YSA' ların en önemli sorunu donanım bağımlı olmalarıdır. YSA' ların en önemli özellikleri ve var oluş nedenlerinden birisi olan paralel işlem yapabilme yeteneği, paralel çalışan işlemciler ile performans gösterir.

- *Uygun ağ yapısının belirlenmesinde belli bir kural yoktur.* YSA'larda probleme uygun ağ yapısının belirlenmesi için geliştirilmiş bir kural yoktur. Uygun ağ yapısı deneyim ve deneme yanılma yolu ile belirlenmektedir.
- *Ağın parametre değerlerinin belirlenmesinde belli bir kural yoktur.* YSA'larda öğrenme katsayısı, hücre sayısı, katman sayısı gibi parametrelerin belirlenmesinde belirli bir kural yoktur. Bu değerlerin belirlenmesi için belirli bir standart olmamakla birlikte her problem için farklı bir yaklaşım söz konusu olabilmektedir.
- *Öğrenilecek problemin ağa gösterimi önemli bir problemdir.* YSA'lar nümerik bilgiler ile çalışabilmektedirler. Problemler YSA'lara tanıtılmadan önce nümerik değerlere çevrilmek zorundadırlar. Burada belirlenecek gösterim mekanizması ağın performansını doğrudan etkileyecektir. Bu da kullanıcının yeteneğine bağlıdır.
- *Ağın eğitiminin ne zaman bitirilmesi gerektiğine ilişkin belli bir yöntem yoktur.* Ağın örnekler üzerindeki hatasının belirli bir değerin altına indirilmesi eğitimin tamamlandığı anlamına gelmektedir. Burada optimum neticeler veren bir mekanizma henüz yoktur ve YSA ile ilgili araştırmaların önemli bir kolunu oluşturmaktadır.

## 6. MODELİN HAZIRLANMASI

Tasarımını gerçekleştirdiğimiz modelin hazırlanmasında 5 183 516 United States patent numaralı çalışma referans alınarak gerekli veriler elde edilmiştir. Referans aldığımız patentte NdFeB mıknatısların üretiminde kullanılan maddelerin toz boyutları 0,3-80  $\mu\text{m}$  arasındadır [93]. Bu maddelerle çalışırken ortamın inert (oksijensiz) olması gerekir. Kullanılan maddeler aktif elementler olduğu için çok çabuk oksitlenmeleri sebebiyle havasız ortamda çalışılması gerekmektedir. Bu tür sistemler genelde glovebox adını verdiğimiz sistemlerdir. Resim 6.1 'de bir glovebox sistemi görülmektedir.



Resim 6.1. Glovebox Sistemi (İnert Ortam)

Hazırlanan numunelerin sinterlenmesi için sıcaklığı 700 °C-ile 1500 °C arasında değişen fırınlar kullanılmaktadır. Resim 6.2'de fırın gösterilmiştir.



Resim6.2. Malzemelerin sinterlenmesinin yapıldığı fırın

NdFeB mıknatısların üretilmesinde Nd (Neodim) atomik yüzde olarak % 8-30 ,B(Bor) % 2-28 B ve diğer kalan atomik yüzde bölümü de Fe (demir)'den oluşmaktadır. Referans aldığımız patent çalışmasında yukarıdaki atomik yüzde değerleri kullanılmıştır. Katkı maddeleri (M) olarak da M=Ti (Titanyum), Zr (Zirkonyum), Hf (Hafniyum), V (Vanadyum), Ta (Tantal), Nb (Niobyum), Cr (Krom), W (Tungsten), Mn (Manganez), Ni (Nikel), Sb (Antimon), Sn (Kalay), Ge (Germanyum), Al (Aliminyum), Bi (Bizmut) eklenmiştir.

Modelin hazırlanmasında matematiksel fonksiyonlara ihtiyaç vardır. Bu fonksiyonların elde edilmesinde laboratuvar ortamlarının aynı ve kullanılan parametrelerin de aynı olması gerekmektedir. Bu konulara dikkat ederek fonksiyonları elde edebilmek için veriler gerekmektedir. Bu veriler ilgili referans kaynaktan alınmıştır.

### **6.1 Modelin oluşturulmasında kullanılan veriler ve elde edilen matematiksel fonksiyonlar**

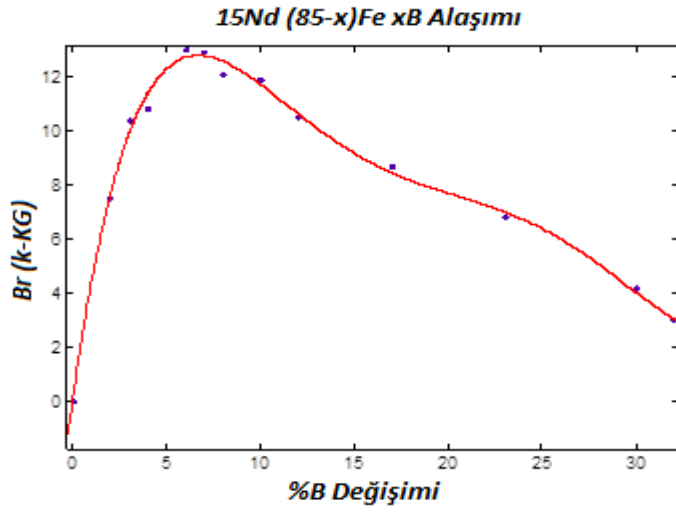
Aşağıda  $15Nd-(85-x)Fe-xB$  alaşımına ait veri tablosu verilmiştir. Burada B elementinin ilgili alaşımda manyetik özelliklere ( $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$ ) etkisi

incelenmiştir. B elementi %6 kullanıldığında  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  değerleri en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 6.1. % B değişimine göre  $15Nd-(85-x)Fe-xB$  alaşımı için  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  değerleri [93].

<b>Alaşım Adı : 15Nd-(85-x)Fe-xB</b>			
<b>%B</b>	<b>Br (KG)</b>	<b>Hc (KOe)</b>	<b>BHmax (MGOe)</b>
0	0,0	0,0	0
2	7,5	1,3	4,1
3	10,4	1,8	7,0
4	10,8	2,8	13,4
6	13,0	8,0	36,5
7	12,9	8,2	36,0
8	12,1	7,3	32,1
10	11,9	8,0	31,9
12	10,5	8,2	25,2
17	8,7	7,6	17,6
23	6,8	11,3	10,9
30	4,2	10,7	4,0
32	3,0	10,2	1,8

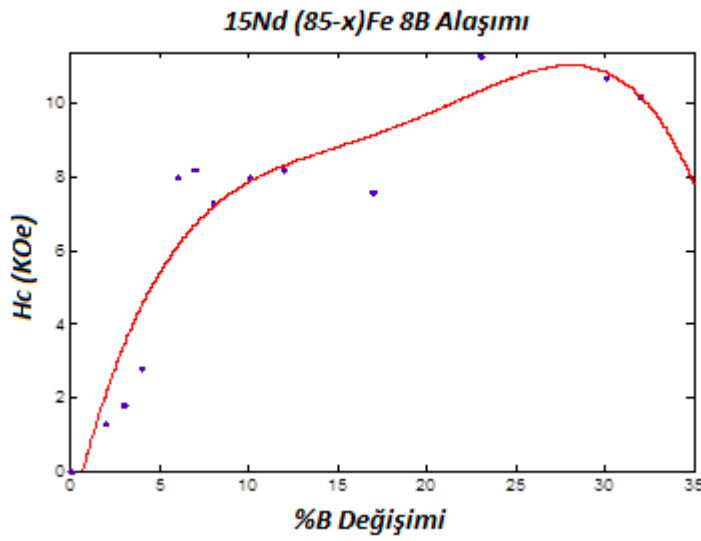
Çizelge 6.1. kullanılarak  $F_{Br}(x=\%Nd)$ ,  $F_{Hc}(x=\%Nd)$  ve  $F_{BHmax}(x=\%Nd)$  grafikleri ve fonksiyonları elde edilmiştir.



şekil 6.1.  $15Nd-(85-x)Fe-xB$  alaşımında % B değişimine göre  $B_r$  değişimi

$$F_{B_r}(x = \%B) = 9,754 \cdot 10^{-6} \cdot x^5 - 0,0009972 \cdot x^4 + 0,03813 \cdot x^3 - 0,6705 \cdot x^2 + 4,959 \cdot x + 0,05367 \quad (6.1)$$

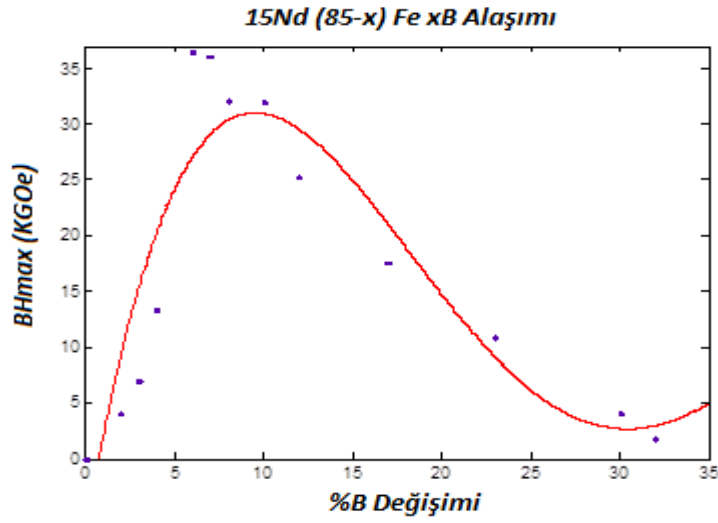
$15Nd-(85-x)Fe-xB$  alaşımında B oranı % 5 ile % 10 arasında değiştiğinde  $B_r$  en yüksek değerleri almaktadır. % 6 B değerinde  $B_r$  en yüksek değere ulaşmıştır.



şekil 6.2.  $15Nd-(85-x)Fe-xB$  alaşımında % B değişimine göre  $H_c$  değişimi

$$F_{H_c}(x = \%B) = -8,322 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 0,006099 \cdot x^3 - 0,1613 \cdot x^2 + 2,004 \cdot x - 1,316 \quad (6.2)$$

Şekil 6.2 incelendiğinde B'un % 10-% 25 aralığında değişimi  $H_c$ 'yi 8-10 KOe aralığında değiştirmektedir. Ancak  $B_r$ 'nin de değeri düşünüldüğünde (% 6 B için)  $H_c$ 'nin değeri en uygun 8 KOe görülmüştür.



Şekil 6.3.  $15Nd-(85-x)Fe-xB$  alaşımında % B değişimine göre  $BH_{max}$  değişimi

$$F_{BH_{max}}(x = \%B) = -0,0001754 \cdot x^4 + 0,02022 \cdot x^3 - 0,7541 \cdot x^2 + 9,474 \cdot x - 6,858 \quad (6.3)$$

Şekil 6.3. incelendiğinde B'un %6 - %13 değerleri arasında  $BH_{max}$  en yüksek değerlerini almıştır.

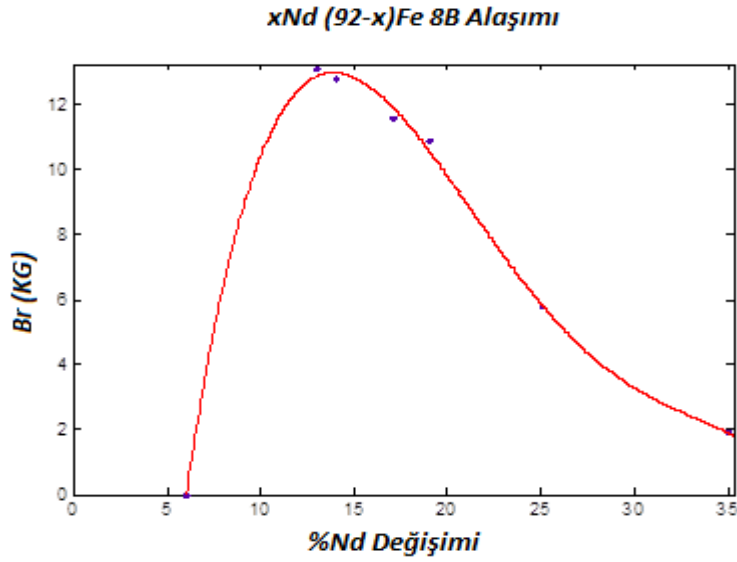
Nd elementinin NdFeB mıknatıslar üzerine etkisini incelemek ve matematiksel fonksiyonları elde etmek için Çizelge 6.2 'deki veriler kullanılmıştır.



Çizelge 6.2. Nd'nin % değişimine göre  $xNd-(92-x)Fe-8B$  alaşımının  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  değişimi [93].

Alaşım Adı : $xNd-(92-x)Fe-8B$			
%Nd	$B_r$ (KG)	$H_c$ (KOe)	$BH_{max}$ (MGOe)
6	0	0	0
13	13,1	4,8	29,3
14	12,8	7,8	36,5
17	11,6	9,2	31,1
19	10,9	11,4	28,0
25	5,8	12,6	8,8
35	1,9	14,6	$\leq 1$

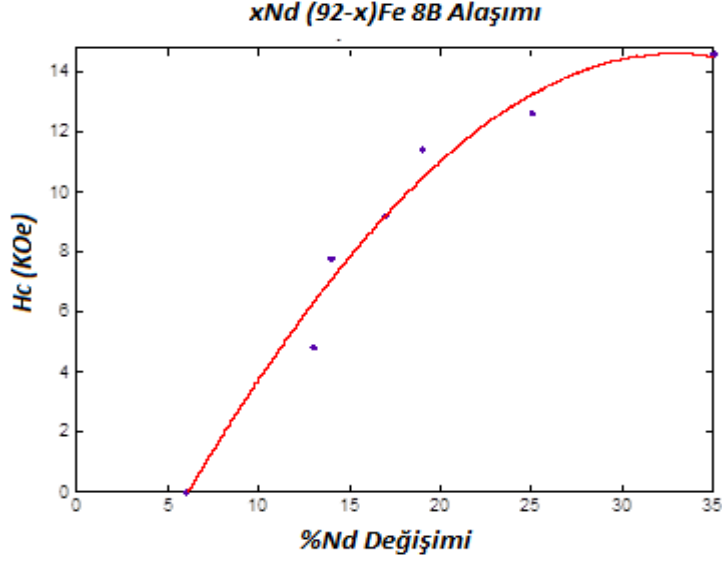
Çizelge 6.2. kullanılarak  $F_{B_r}(x=\%Nd)$ ,  $F_{H_c}(x=\%Nd)$  ve  $F_{BH_{max}}(x=\%Nd)$  grafikleri ve fonksiyonları elde edilmiştir.



Şekil 6.4.  $xNd-(92-x)Fe-8B$  alaşımında % Nd değişimine göre  $B_r$  değişimi

$$F_{B_r}(x = \%Nd) = -0,0001578 \cdot x^4 + 0,01715 \cdot x^3 - 0,6637 \cdot x^2 + 10,21 \cdot x - 40,84 \quad (6.4)$$

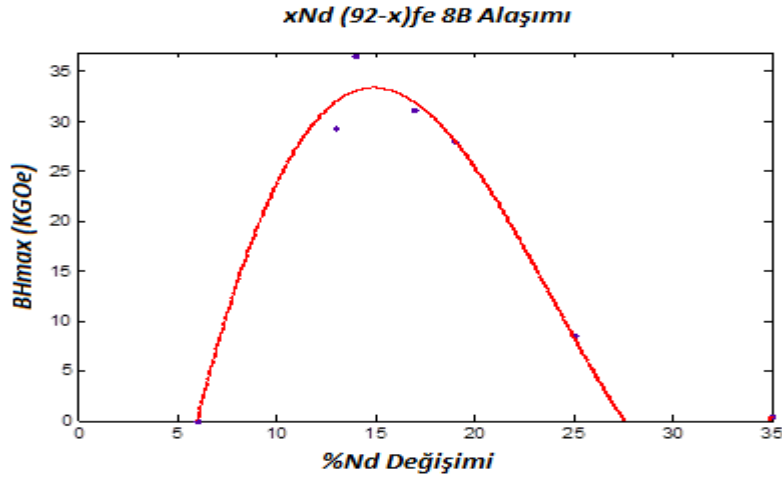
Şekil 6.4 incelendiğinde Nd'nin %8-15 aralığında değişiminde  $B_r$  değeri en yüksek değerlerini almıştır. Nd %13 alındığında  $B_r$  değeri 13 KG olarak görülmüştür.



Şekil 6.5.  $xNd-(92-x)Fe-8B$  alaşımında % Nd değişimine göre  $H_c$  değişimi

$$F_{H_c}(x = \%Nd) = -8,242.10^{-5}.x^3 - 0,01436.x^2 + 1,217.x - 6,966 \quad (6.5)$$

Şekil 6.5 incelendiğinde Nd'nin % olarak değişimi  $H_c$ 'yi arttırmaktadır. Ancak burada  $H_c$  artarken  $B_r$ 'nin ve  $BH_{max}$ 'in artış oranları da önemlidir. Bizim için en önemli manyetik özellik  $BH_{max}$  olduğundan,  $BH_{max}$ 'in en yüksek olduğu değeri bizim için referans değerdir. Nd'nin %14 olduğu değer uygun bir değerdir.



Şekil 6.6.  $xNd-(92-x)Fe-8B$  alaşımında % Nd değişimine göre  $BH_{max}$  değişimi

$$F_{BH_{max}}(x = \%Nd) = 0,00026 \cdot x^4 - 0,006882 \cdot x^3 - 0,4002 \cdot x^2 + 13,11 \cdot x - 63,16 \quad (6.6)$$

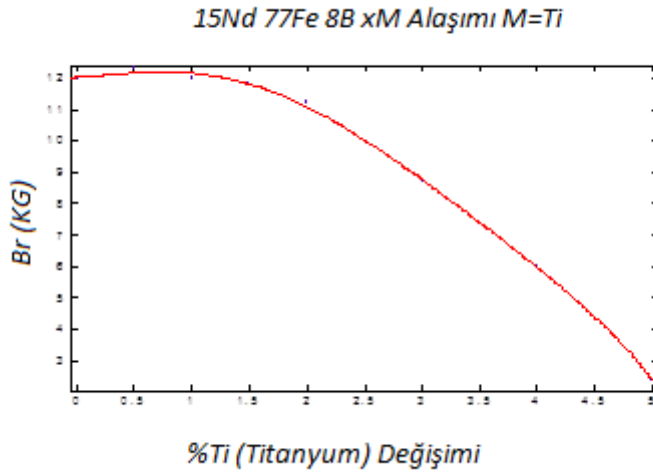
Şekil 6.6 incelendiğinde Nd'nin % olarak değişiminde %13-18 aralığında  $BH_{max}$  yüksek değerler almıştır. Nd %14 alındığında  $BH_{max}$  değeri 33 MGOe olarak görülmüştür.

$15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımında M katkı maddesi eklendiğinde, oluşan yeni alaşımdaki kalıcı mıknatıslığı incelemek için aşağıdaki Çizelge 6.3. verilmiştir. M katkı maddeleri şunlardır: M=Ti ,Zr, Hf, V, Ta, Nb,Cr, W, Mo, Mn, Ni,Sb, Sn, Ge,Al ve Bi)

Çizelge 6.3.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımında M katkı maddesi eklendiğinde alaşımda oluşan  $B_r$  değerleri[93].

Alaşım Adı : $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$								
Katkı Maddeleri için $B_r$ Değerleri								
%M	Ti	Zr	Hf	V	Ta	Nb	Cr	W
0,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
0,5	12,3	11,9	11,9		11,6		11,6	11,6
1,0	12,0	11,7	11,7	11,5	11,6	11,9	11,4	11,4
1,5	11,8	11,4	11,4					
2,0	11,2	10,7	10,7	11,0	11,4	11,7	10,9	11,0
3,0	8,7	9,2	9,2	10,3				
4,0	6,0	7,5	7,5	9,8	10,5	11,0	9,5	9,8
5,0	2,4	5,3	5,3					
6,0		2,2	2,2	8,5	9,5	10,2	7,6	8,0
7,0								
8,0				7,0	8,4	9,4	5,2	5,9
9,0				5,7	7,5	9,0		
10,0				3,5	6,0	8,2	2,3	3,5
11,0					3,7			
12,0						5,4		

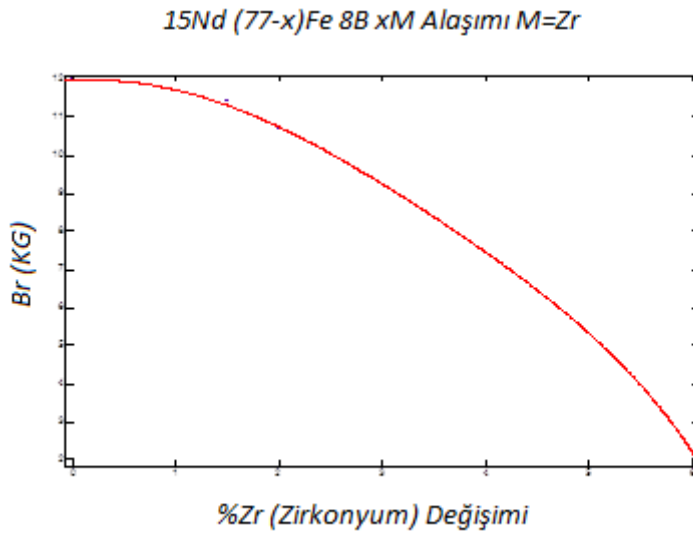
Çizelge 6.3'te katkı maddelerine göre  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımda meydana gelen artık mıknatısiyete ait  $B_r$  grafikleri ve matematiksel fonksiyonları aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.7.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Ti eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{B_r}(x = \%Ti) = -0,02969 \cdot x^6 + 0,4061 \cdot x^5 - 2,03 \cdot x^4 + 4,555 \cdot x^3 - 5,048 \cdot x^2 + 2,181 \cdot x + 12 \quad (6.7)$$

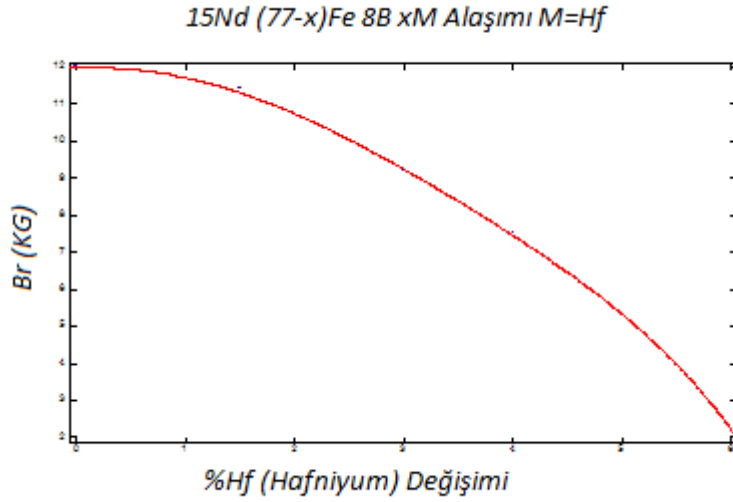
Şekil 6.7 incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,5 ile %1,5 arasında M=Ti eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır.



Şekil 6.8.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Zr eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br} (x = \%Zr) = 0,002656.x^6 - 0,04875.x^5 + 0,3254.x^4 - 0,9443.x^3 + 0,8405.x^2 - 0,4438.x + 12 \quad (6.8)$$

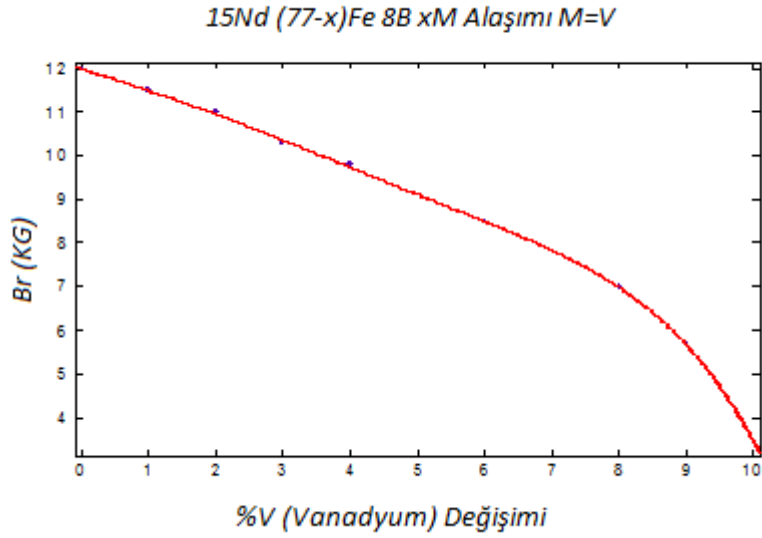
Şekil 6.8 incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,5 ile %1 arasında  $M=Zr$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır.



Şekil 6.9.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Hf eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%Hf) = 0,002656.x^6 - 0,04875.x^5 + 0,3254.x^4 - 0,9443.x^3 + 0,8405.x^2 - 0,4438.x + 12 \quad (6.9)$$

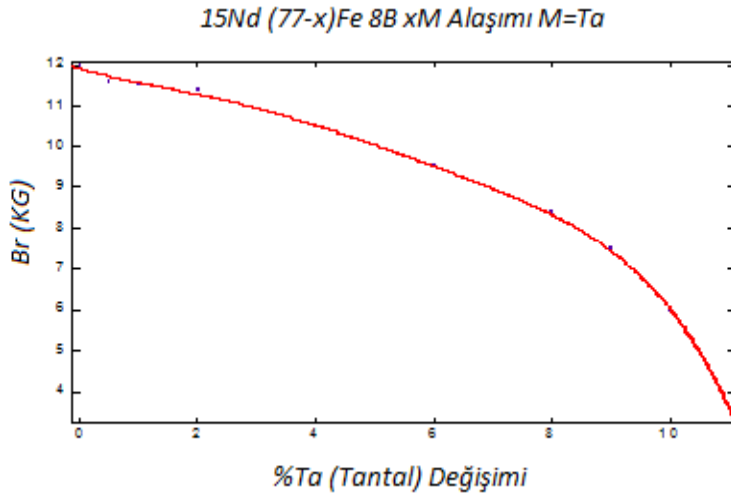
Şekil 6.19 incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,5 ile %1 arasında  $M=Hf$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır.



şekil 6.10.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % V eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%V) = 2,769 \cdot 10^{-5} \cdot x^6 + 0,0005505 \cdot x^5 - 0,004751 \cdot x^4 + 0,02434 \cdot x^3 - 0,8509 \cdot x^2 - 0,4179 \cdot x + 12 \quad (6.10)$$

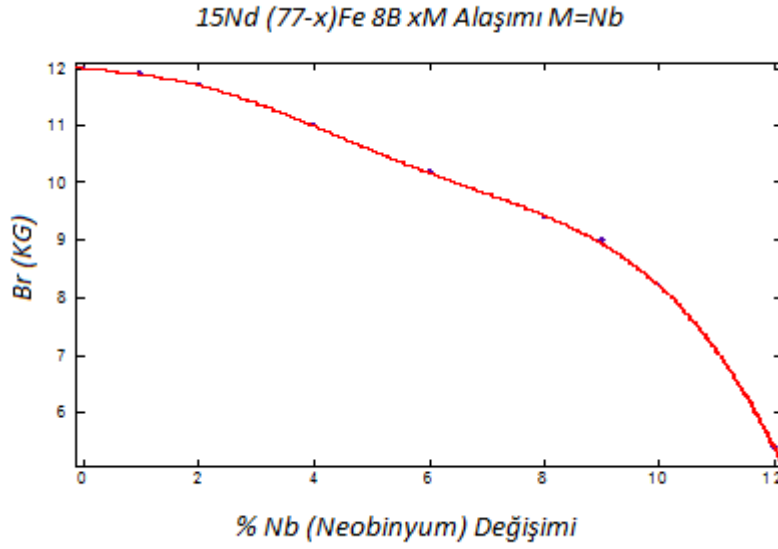
şekil 6.10 incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,5 civarında arasında  $M=V$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yksek değeri aldığı gcrmlmektedir.



şekil 6.11.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Ta eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%Ta) = 9,06.10^{-5}.x^6 - 0,003284.x^5 + 0,04315.x^4 - 0,02561.x^3 + 0,6518.x^2 - 0,8792.x + 12 \quad (6.11)$$

Şekil 6.11 incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,5 civarında  $M=Ta$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır

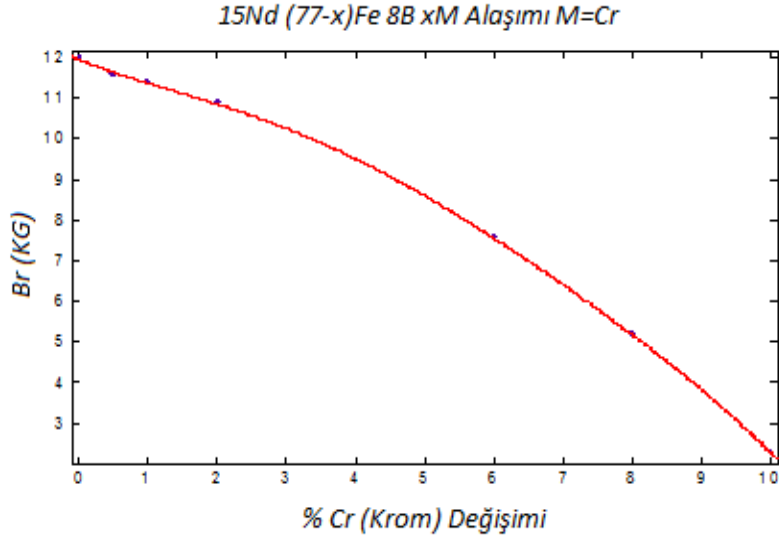


Şekil 6.12.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Nb eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%Nb) = 1,694.10^{-5}.x^6 - 0,0006699 .x^5 + 0,04315 .x^4 - 0,04354 .x^3 + 0,03859 .x^2 - 0,1106 .x + 12 \quad (6.12)$$

Şekil 6.12 incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,5 ile %1,5 arasında  $M=Nb$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır.

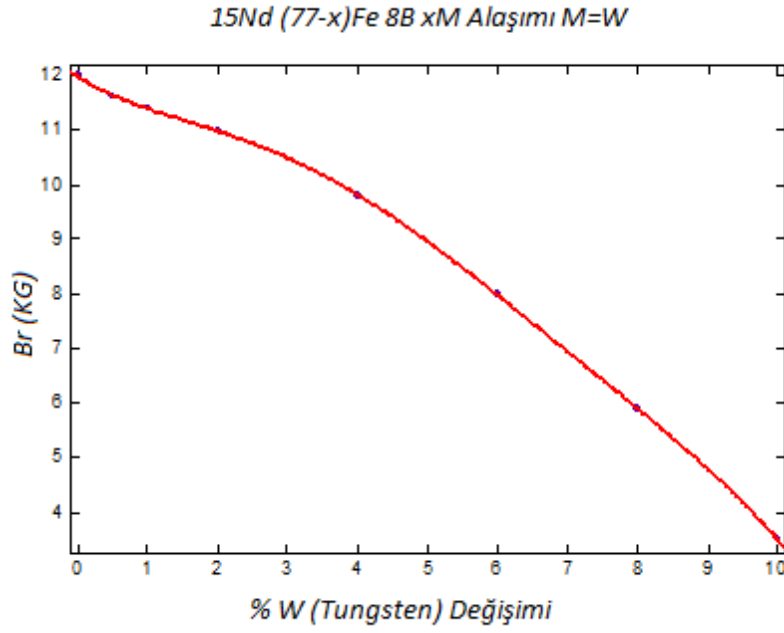




Şekil 6.13. *15Nd-(77-x)Fe-8B-xM* alaşımına % Cr eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{B_r}(x = \% Cr) = 0,0001103 \cdot x^6 - 0,003334 \cdot x^5 + 0,03832 \cdot x^4 - 0,209 \cdot x^3 + 0,4847 \cdot x^2 - 0,9313 \cdot x + 11,99 \quad (6.13)$$

Şekil 6.13 incelendiğinde *15Nd-(77-x)Fe-8B-xM* alaşımına %0,5 civarında  $M=Cr$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır.



Şekil 6.14. *15Nd-(77-x)Fe-8B-xM* alaşımına % W eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

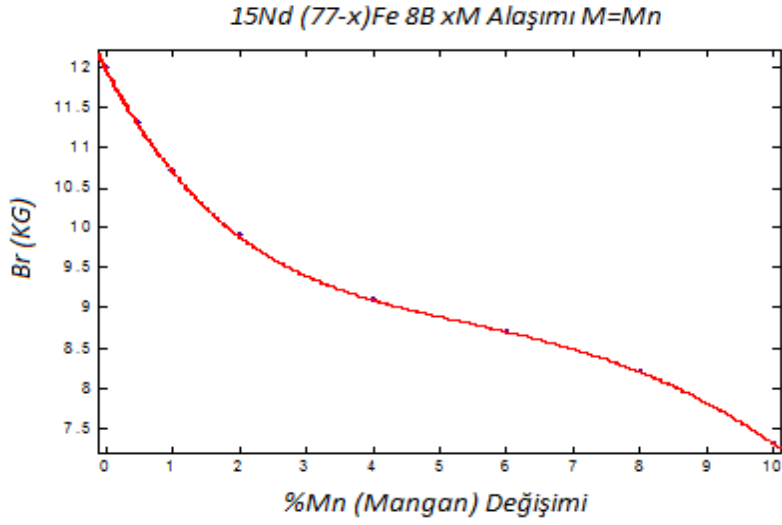
$$F_{B_r}(x = \%W) = 7,928 \cdot 10^{-5} \cdot x^6 - 0,002619 \cdot x^5 + 0,03346 \cdot x^4 - 0,2043 \cdot x^3 + 0,5359 \cdot x^2 - 0,9768 \cdot x + 11,99 \quad (6.14)$$

Şekil 6.14. incelendiğinde *15Nd-(77-x)Fe-8B-xM* alaşımına %0,5 civarında M=W eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır.

Çizelge 6.4.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımında M katkı maddesi eklendiğinde alaşımda oluşan  $B_r$  değerleri [93].

Alaşım Adı : $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$							
Katkı Maddeleri için $B_r$ Değerleri							
%M	Mn	Ni	Sb	Sn	Ge	Al	Bi
0,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
0,5	11,3	11,8			11,4	12,1	
1,0	10,7	11,9	9,2	10,0	11,0	11,4	11,7
1,5							
2,0	9,9	11,6	6,1	7,8	10,3	10,9	11,4
3,0				5,5			
4,0	9,1	11,1	2,9	3,5	8,4	9,6	10,4
5,0							10,0
6,0	8,7	10,2			6,5	8,4	
7,0							
8,0	8,2	9,2			3,5	6,4	
9,0							
10,0	7,3	8,0				3,4	

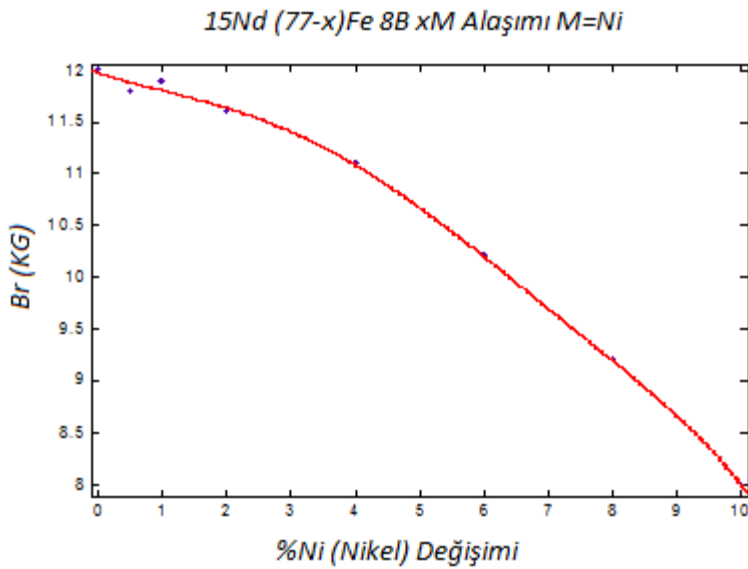
Yukarıda verilen Çizelge 6.4. katkı maddelerine göre  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımında meydana gelen artık miktansıyet ( $B_r$ ) değerleridir. Çizelge 6.4 kullanılarak ilgili katkı maddelerinin yüzde değişimine bağlı olarak  $B_r$  değerlerinin fonksiyonları çıkarılmış ve aşağıda sırasıyla verilmiştir.



şekil 6.15.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Mn eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{B_r}(x = \%Mn) = 9,515 \cdot 10^{-6} \cdot x^6 + 0,0002207 \cdot x^5 - 0,0008097 \cdot x^4 - 0,02473 \cdot x^3 + 0,3136 \cdot x^2 - 1,579 \cdot x + 12 \quad (6.15)$$

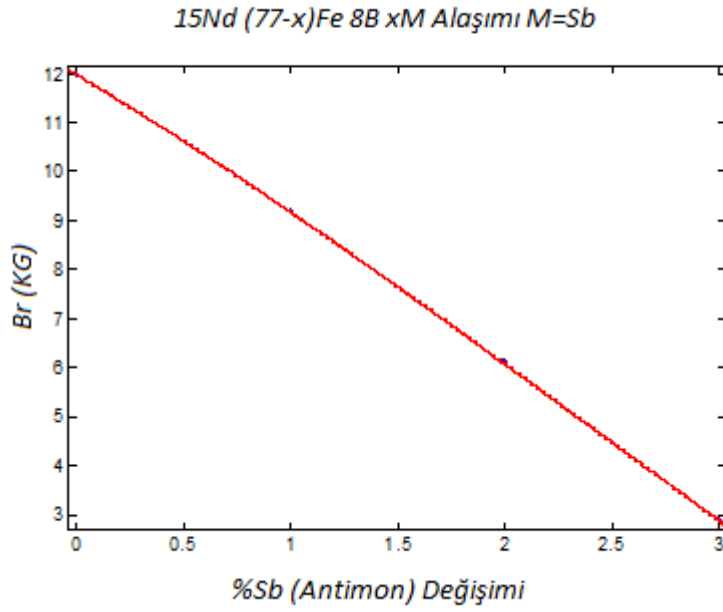
şekil 6.15. incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,1 civarında  $M=Mn$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yksek değerleri almaktadır.



şekil 6.16.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Ni eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%Ni) = -1,097.10^{-5}.x^6 + 0,0001658.x^5 + 0,0004199.x^4 - 0,01631.x^3 + 0,0453.x^2 - 0,2002.x + 11,98 \quad (6.16)$$

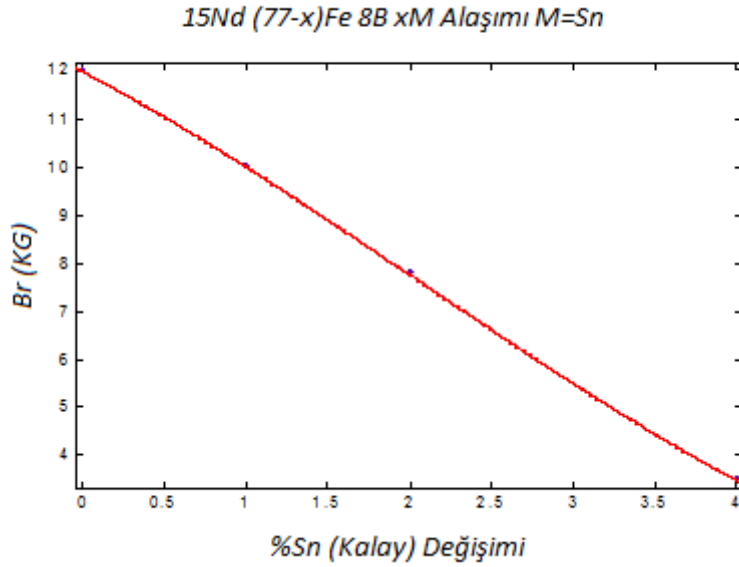
Şekil 6.16. incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,1 civarında  $M=Ni$  eklendiğinde  $B_r$  değeri en yüksek değerleri almaktadır.



Şekil 6.17.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Sb eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%Sb) = 0,1.x^2 - 2,74.x + 12,01 \quad (6.17)$$

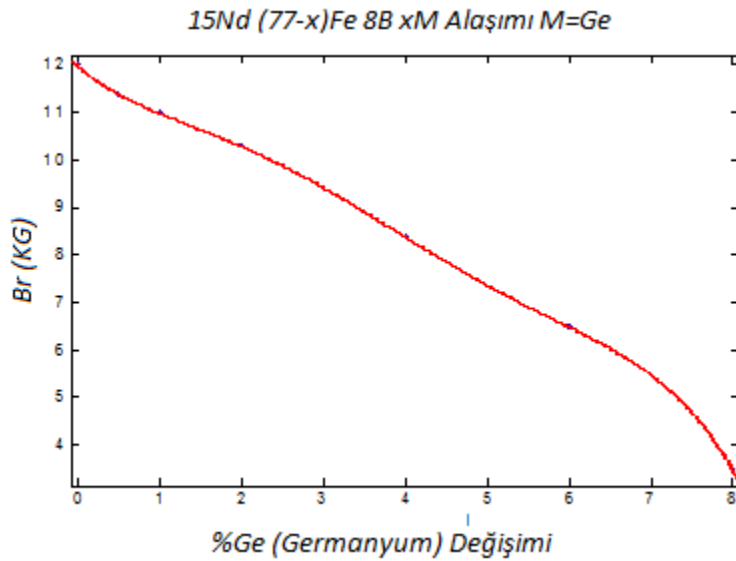
Şekil 6.17. incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %Sb eklendiğinde  $B_r$  değeri doğrusala yakın bir şekilde düşük değerler almaktadır.



şekil 6.18.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Sn eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{B_r}(x = \%Sn) = 0,1 \cdot x^2 - 2,72 \cdot x + 12 \quad (6.18)$$

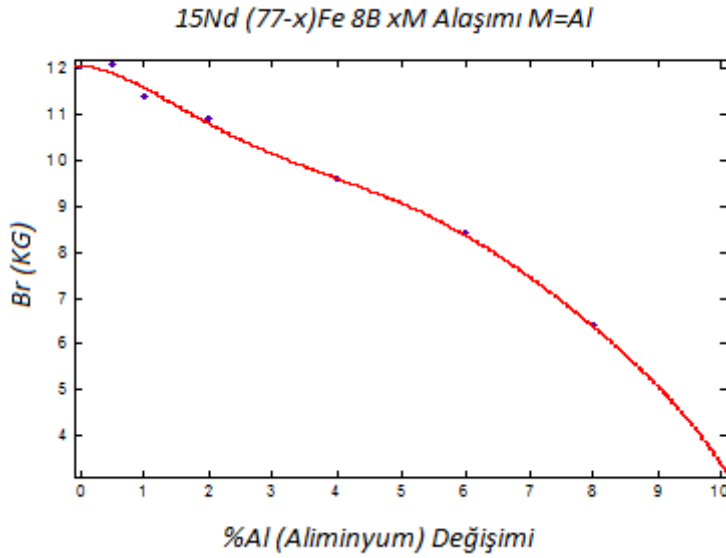
şekil 6.18. incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %1 Sn eklendiğinde  $B_r$  en yuğsek değerini almaktadır.% Sn değeri arttıķa  $B_r$  değeri doğrusala yakın olarak azalmaktadır.



şekil 6.19.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Ge eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%Ge) = 0,002315 \cdot x^5 + 0,0429 \cdot x^4 - 0,279 \cdot x^3 + 0,7251 \cdot x^2 - 1,489 \cdot x + 12 \quad (6.19)$$

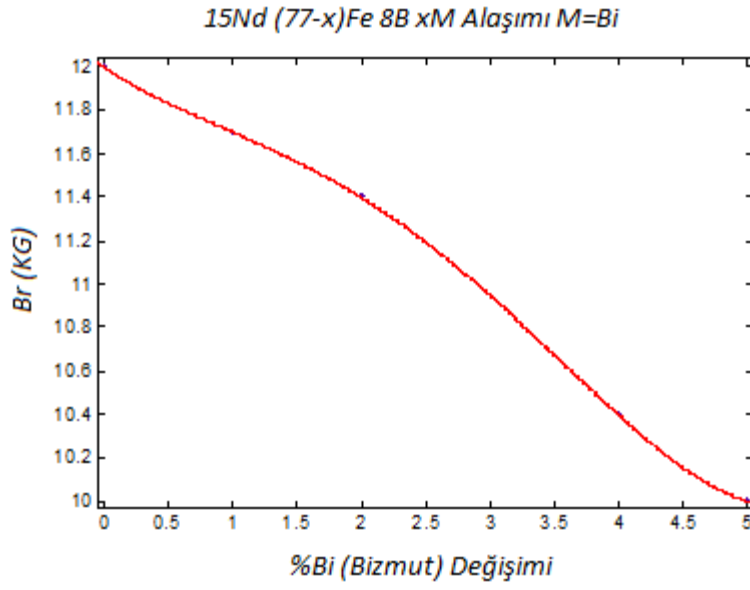
Şekil 6.19. incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %1 civarında  $M=Ge$  eklendiğinde  $B_r$ 'nin yüksek değer aldığı görülmektedir.



Şekil 6.20.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına % Al eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{Br}(x = \%Al) = -0,0001244 \cdot x^6 + 0,004023 \cdot x^5 - 0,04979 \cdot x^4 + 0,2833 \cdot x^3 - 0,7224 \cdot x^2 + 0,03448 \cdot x + 12,05 \quad (6.20)$$

Şekil 6.20. incelendiğinde  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xM$  alaşımına %0,5 civarında  $M=Al$  eklendiğinde  $B_r$  değeri yüksek değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 6.21. *15Nd-(77-x)Fe-8B-xM* alaşımına % Bi eklendiğinde oluşan  $B_r$  değeri

$$F_{B_r}(x = \% Bi) = 0,008333.x^4 + 0,075.x^3 + 0,1667.x^2 - 0,4.x + 12 \quad (6.21)$$

Şekil 6.21. incelendiğinde *15Nd-(77-x)Fe-8B-xM* alaşımına %0,5 civarında M=Bi eklendiğinde  $B_r$  'nin yüksek değer aldığı görülmektedir.

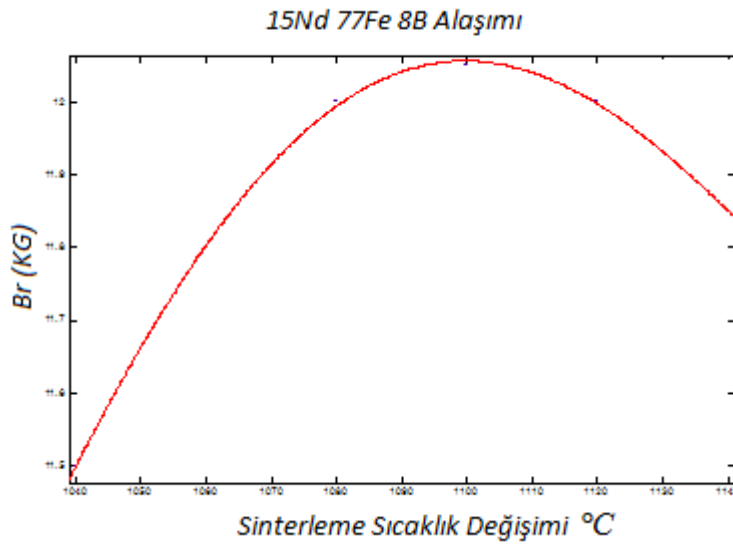


Çizelge 6.5.  $15Nd-77Fe-8B$  alaşımına Ait  $\rho$  ( $gr/cm^3$ ),  $B_r$  (KG),  $H_c$  (KOe),  $BH_{max}$  (MGOe) değerleri [93].

Alaşım Adı : $15Nd-77Fe-8B$				
$^{\circ}C$	$\rho$ ( $gr/cm^3$ )	$B_r$ (KG)	$H_c$ (KOe)	$BH_{max}$ (MGOe)
1040	7,09	11,50	6,90	29,00
1060	7,22	11,80	7,90	32,40
1080	7,31	12,00	8,30	33,10
1100	7,32	12,05	8,30	33,30
1120	7,35	12,00	7,90	32,90
1140	7,34	11,85	7,50	32,40

Herhangi bir alaşımda sinterleme sıcaklığının etkisini incelemek için yukarıdaki Çizelge 6.5.deki veriler kullanılmıştır.

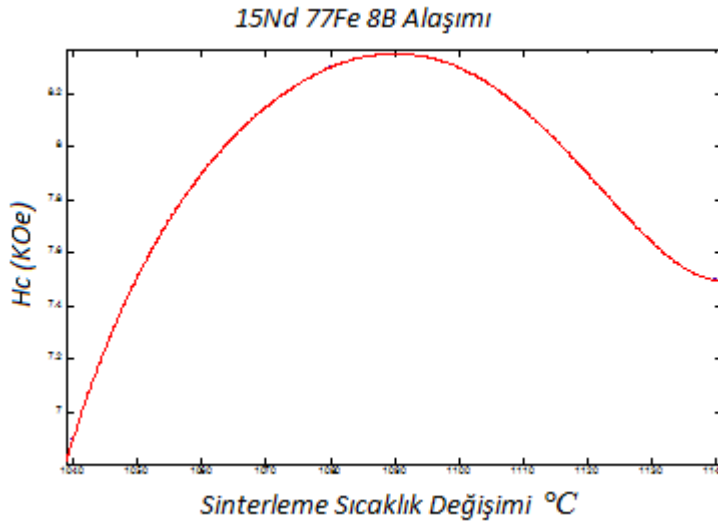
$15Nd-77Fe-8B$  alaşımında yoğunluk sinterleme sıcaklığı ile bir noktaya kadar artar ve sonra düşmeye başlar. Yoğunluk  $1040^{\circ}C$  de  $7,09 gr/cm^3$  iken artarak  $1120^{\circ}C$  de  $7,35 gr/cm^3$  olur. Sonra  $1140^{\circ}C$  de düşmeye başlar.



Şekil 6.22.  $15Nd-77Fe-8B$  alaşımında sıcaklığa göre  $B_r$  değişimi

$$F_{Br}(x = ^\circ C) = -3,906.10^{-10}.x^5 + 2,135.10^{-6}.x^4 - 0,004668.x^3 + 5,1.x^2 - 2785.x + 6,082.10^5 \quad (6.22)$$

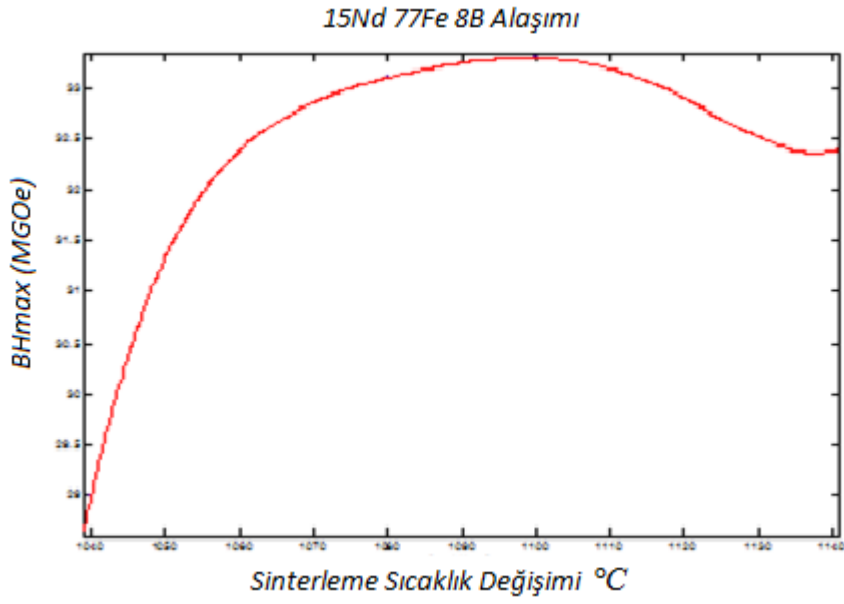
*15Nd-77Fe-8B* alaşımında sinterleme sıcaklığı 1100  $^\circ C$ 'de  $B_r$  en yüksek değerine ulaştığı şekil 6.22'de grlmektedir.



şekil 6.23. *15Nd-77Fe-8B* alaşımında sıcaklığa gre  $H_c$  değerini

$$F_{Hc}(x = ^\circ C) = 1,563.10^{-9}.x^5 - 8,49.10^{-6}.x^4 + 0,01845.x^3 - 20,04.x^2 + 1,089.10^4.x - 2,366.10^6 \quad (6.23)$$

*15Nd-77Fe-8B* alaşımında sinterleme sıcaklığı 1100  $^\circ C$ 'de  $H_c$  en yüksek değerini aldığı şekil 6.23'de grlmektedir.



Şekil 6.24. *15Nd-77Fe-8B* alaşımında sıcaklığa göre  $BH_{max}$  değişimi

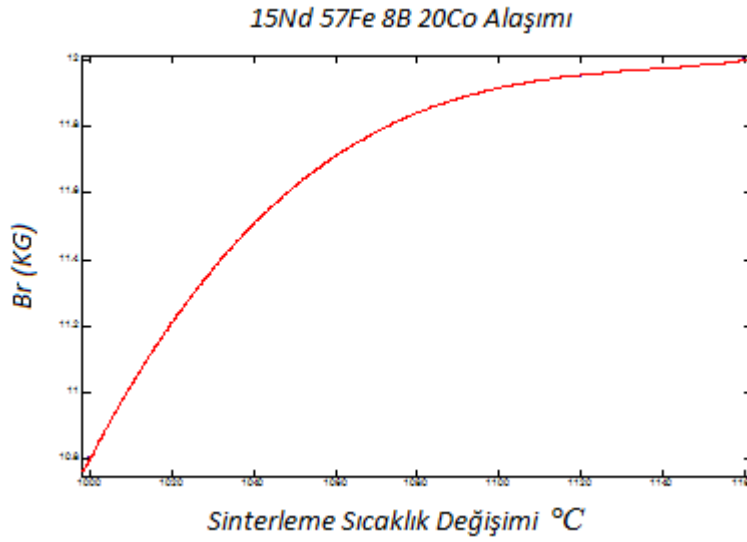
$$F_{BH_{max}}(x = ^\circ C) = 7,552 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 4,138 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 0,09068 \cdot x^3 - 99,35 \cdot x^2 + 5,442 \cdot 10^4 \cdot x - 1,192 \cdot 10^7 \quad (6.24)$$

*15Nd-77Fe-8B* alaşımında sinterleme sıcaklığı 1100 °C civarında iken  $BH_{max}$  en yüksek değere ulaştığı şekil 6.24’de görülmektedir.

Çizelge 6.6.  $15Nd-57Fe-8B-20Co$  alaşımına ait  $\rho$  ( $gr/cm^3$ ),  $B_r$  (KG),  $H_c$  (KOe),  $BH_{max}$  (MGOe) değerleri [93].

Alaşım Adı : $15Nd-57Fe-8B-20Co$				
$^{\circ}C$	$\rho$ ( $gr/cm^3$ )	$B_r$ (KG)	$H_c$ (KOe)	$BH_{max}$ (MGOe)
1000	7	10,8	7	25
1040	7,4	11,5	8,3	29,4
1080	7,5	11,85	9	31,2
1120	7,5	11,95	9	31,3
1160	7,5	12	7,6	29,8

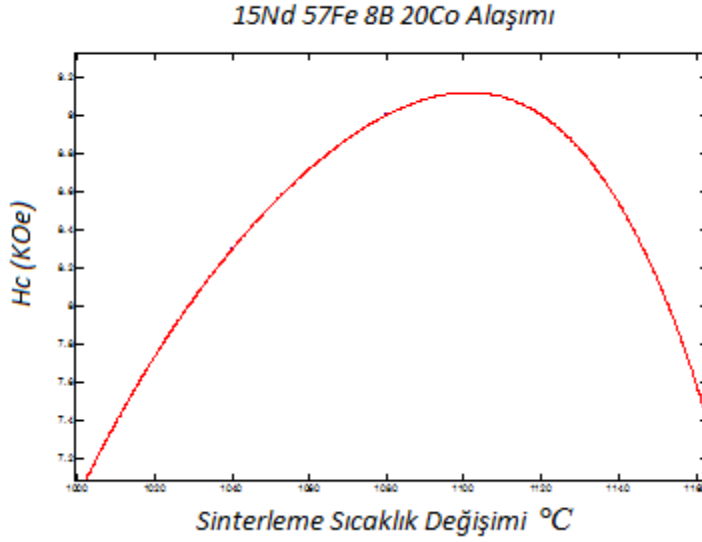
$15Nd-77Fe-8B$  alaşımına Co eklediğimizde oluşan yeni  $15Nd-57Fe-8B-20Co$  alaşımının sinterleme sıcaklığına göre  $\rho$ ,  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  değişimleri Çizelge 6.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.25.  $15Nd-57Fe-8B-20Co$  alaşımında sıcaklığa göre  $B_r$  değişimi

$$F_{B_r}(x = ^{\circ}C) = 1,628 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 6,641 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,01004 \cdot x^2 - 6,655 \cdot x + 1635 \quad (6.25)$$

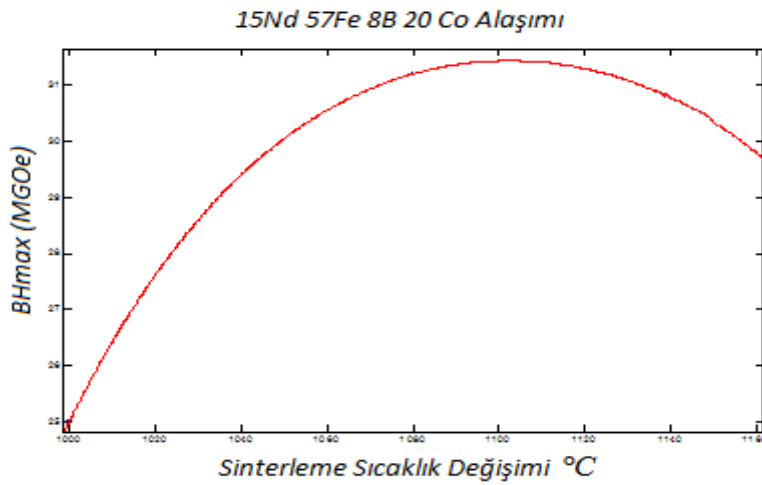
15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımında sinterleme sıcaklığı 1150 °C civarında  $B_r$  en yüksek değere ulaştığı Şekil 6.25’de grlmektedir.



Şekil 6.26. 15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımında sıcaklığa göre  $H_c$  değişimi

$$F_{H_c}(x = ^\circ C) = -9,766.10^{-9}.x^4 + 4,115.10^{-5}.x^3 - 0,06517.x^2 + 46,01.x - 1,221.10^4 \quad (6.26)$$

15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımında sinterleme sıcaklığı 1050-1150 °C arasında  $H_c$  en yüksek değerlere ulaştığı Şekil 6.26’da grlmektedir.



Şekil 6.27. 15Nd-57Fe-8B-20Co alaşımında sıcaklığa gre  $BH_{max}$  değişimi

$$F_{BH_{max}}(x = ^\circ C) = -1,302 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 5,755 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,09585 \cdot x^2 + 71,29 \cdot x - 1,994 \cdot 10^4 \quad (6.27)$$

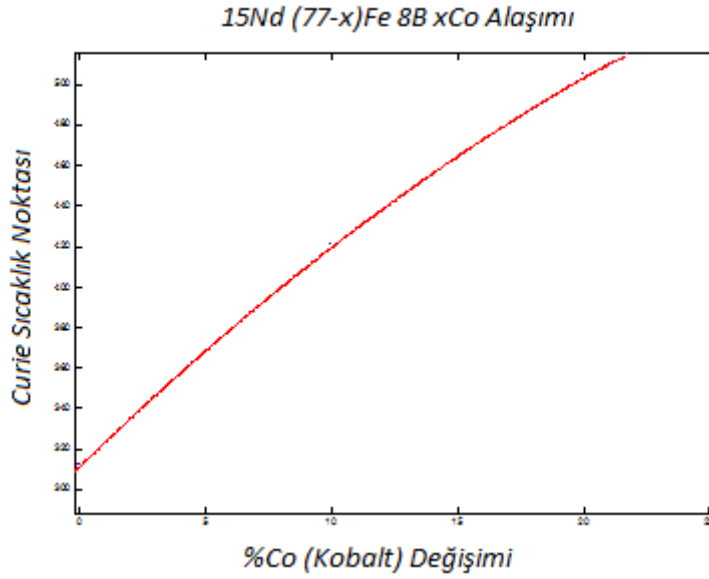
*15Nd-57Fe-8B-20Co* alaşımında sinterleme sıcaklığı 1100 °C arasında  $BH_{max}$  en yüksek değere ulaştığı Şekil 6.27’de grlmektedir.

*15Nd-57Fe-8B* alaşımında Co elementi eklediğimizde Curie sıcaklığına etkisini incelemek için Çizelge 6.7 verilmiştir.

izelge 6.7. *15Nd-(77-x)Fe-8B-xCo* alaşımına %Co eklendiğinde curie sıcaklığına etkisinin değerleri [93].

<b>Alaşım Adı : 15Nd-(77-x)Fe-8B-xCo</b>	
<b>%Co</b>	<b>Curie Noktası (°C)</b>
<b>0</b>	312
<b>5</b>	366
<b>10</b>	421
<b>15</b>	463
<b>20</b>	505
<b>25</b>	535

Co etkisinin grafiği Şekil 6.28’de verilmiştir.



Şekil 6.28.  $15Nd-(77-x)Fe-8B-xCo$  alaşımına %Co eklenmesi ile curie sıcaklığı değişimi

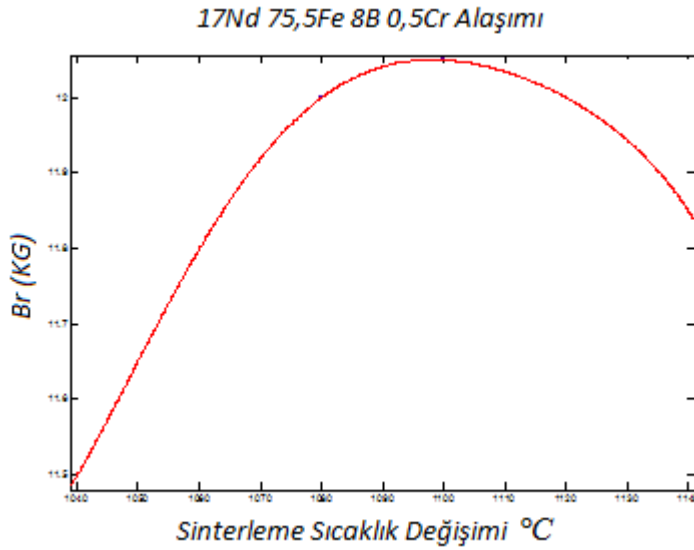
$$F_{curie}(x = \%Co) = 8,994 \cdot x + 321,2 \quad (6.28)$$

$15Nd-(77-x)Fe-8B-xCo$  alaşımında %Co değişimine göre Curie sıcaklığının değişimi doğrusal olarak artış göstermektedir.

0.5 Cr eklenerek oluşturulan  $17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr$  alaşımında sinterleme sıcaklığının değişiminin  $\rho$ ,  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  değerlerine etkisini incelemek için izelge 6.8'deki veriler kullanılmıştır.

Çizelge 6.8.  $17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr$  alaşımına ait  $\rho$  ( $gr/cm^3$ ),  $B_r$  (KG),  $H_c$  (KOe),  $BH_{max}$  (MGOe) değerleri [93].

Alaşım Adı : 17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr				
°C	$\rho$ ( $gr/cm^3$ )	Br (KG)	Hc (KOe)	BHmax (MGOe)
1040	7,09	11,50	6,80	29,00
1060	7,21	11,80	7,90	32,40
1080	7,32	12,00	8,10	33,00
1100	7,32	12,05	8,10	33,30
1120	7,35	12,00	7,90	32,80
1140	7,34	11,85	7,50	31,80

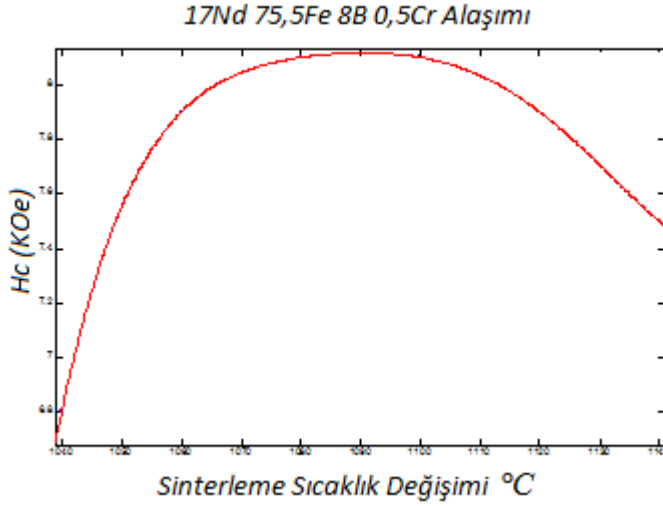


Şekil 6.29.  $17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr$  alaşımında sıcaklığa göre  $B_r$  değişimi

$$F_{Br}(x = °C) = -3,906.10^{-10}.x^5 + 2,135.10^{-6}.x^4 - 0,004668.x^3 + 5,1.x^2 - 2785.x + 6,082.10^5 \quad (6.29)$$



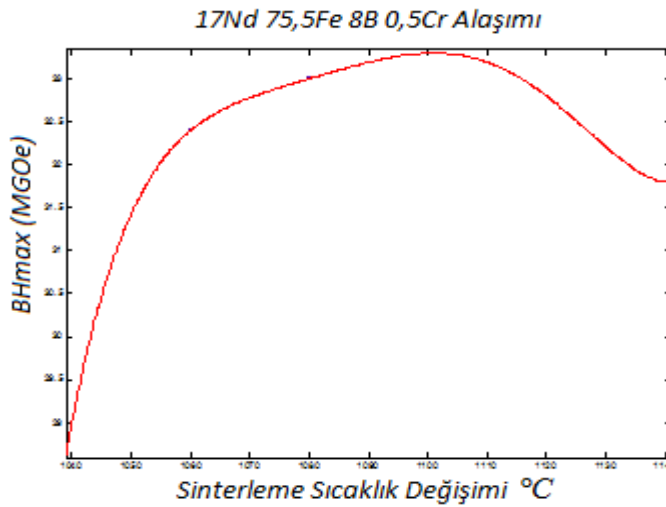
17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımında sinterleme sıcaklığı 1100 °C civarında  $B_r$ 'nin en yüksek değerine ulaştığı Şekil 6.29'da görülmektedir.



Şekil 6.30. 17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımında sıcaklığa göre  $H_c$  değişimi

$$F_{H_c}(x = \text{°C}) = 1,823 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 1,003 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 0,02205 \cdot x^3 - 24,25 \cdot x^2 + 1,333 \cdot 10^4 \cdot x - 2,931 \cdot 10^6 \quad (6.30)$$

17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımında sinterleme sıcaklığı 1100 °C'de  $H_c$ 'nin en yüksek değerini aldığı Şekil 6.30'da görülmektedir.



Şekil 6.31. 17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr alaşımında sıcaklığa göre  $BH_{max}$  değişimi

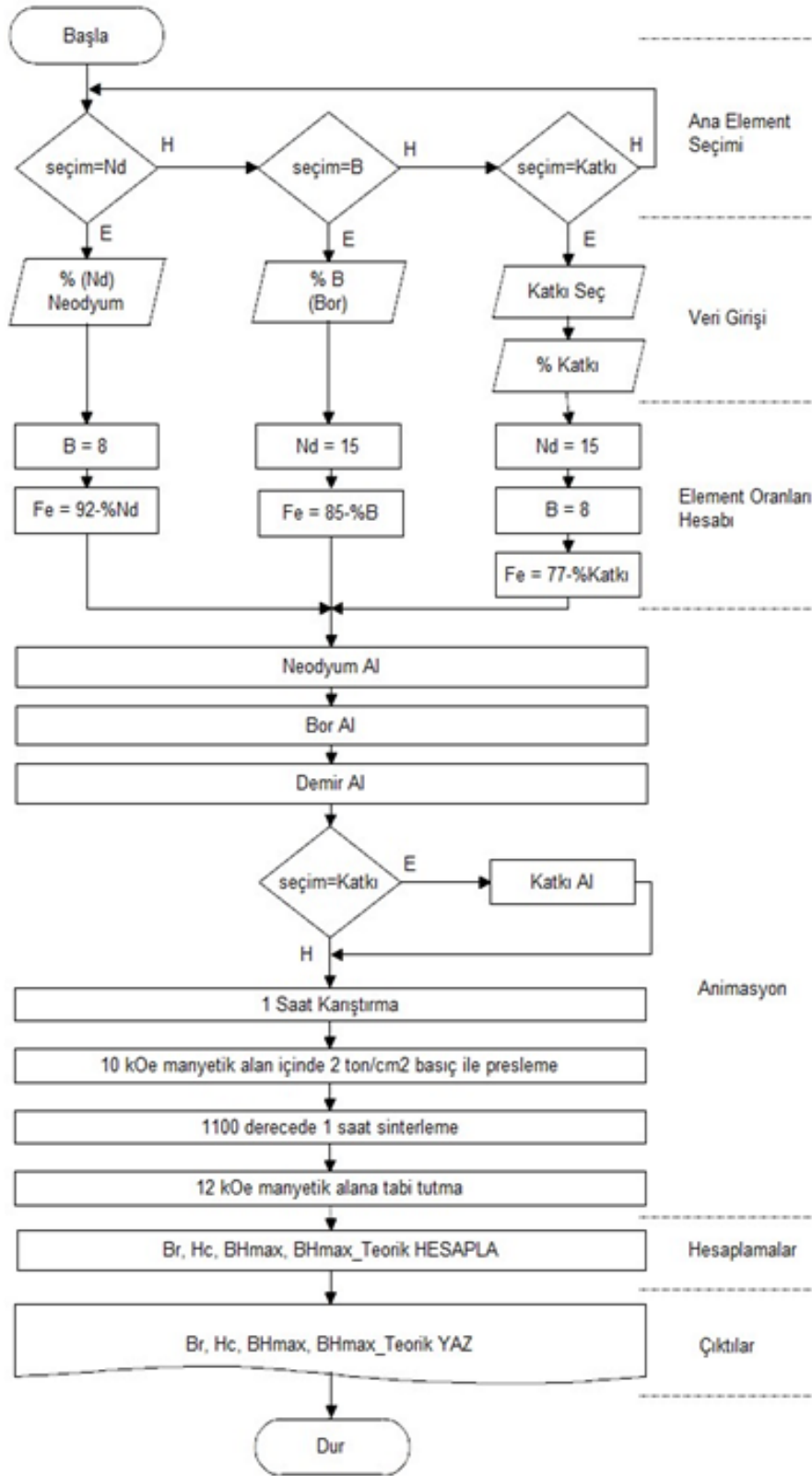
$$F_{BH_{max}}(x = ^\circ C) = 9,896.10^{-9}.x^5 - 5,422.10^{-5}.x^4 + 0,1188.x^3 - 130,1.x^2 + 7,126.10^4.x - 1,56.10^7 \quad (6.31)$$

*17Nd-75,5Fe-8B-0,5Cr* alaşımında sinterleme sıcaklığı 1100 °C'de  $BH_{max}$  'ın en yüksek değerini Şekil 6.31'de görülmektedir.

## 6.2. Modelin bilgisayar algoritması

Oluşturduğumuz model için kullanacağımız matematiksel fonksiyonları elde ettikten sonra bilgisayar programı için algoritma oluşturduk. Şekil 6.32 'de bilgisayar programının yazılmasında kullanılan temel algoritma görülmektedir.

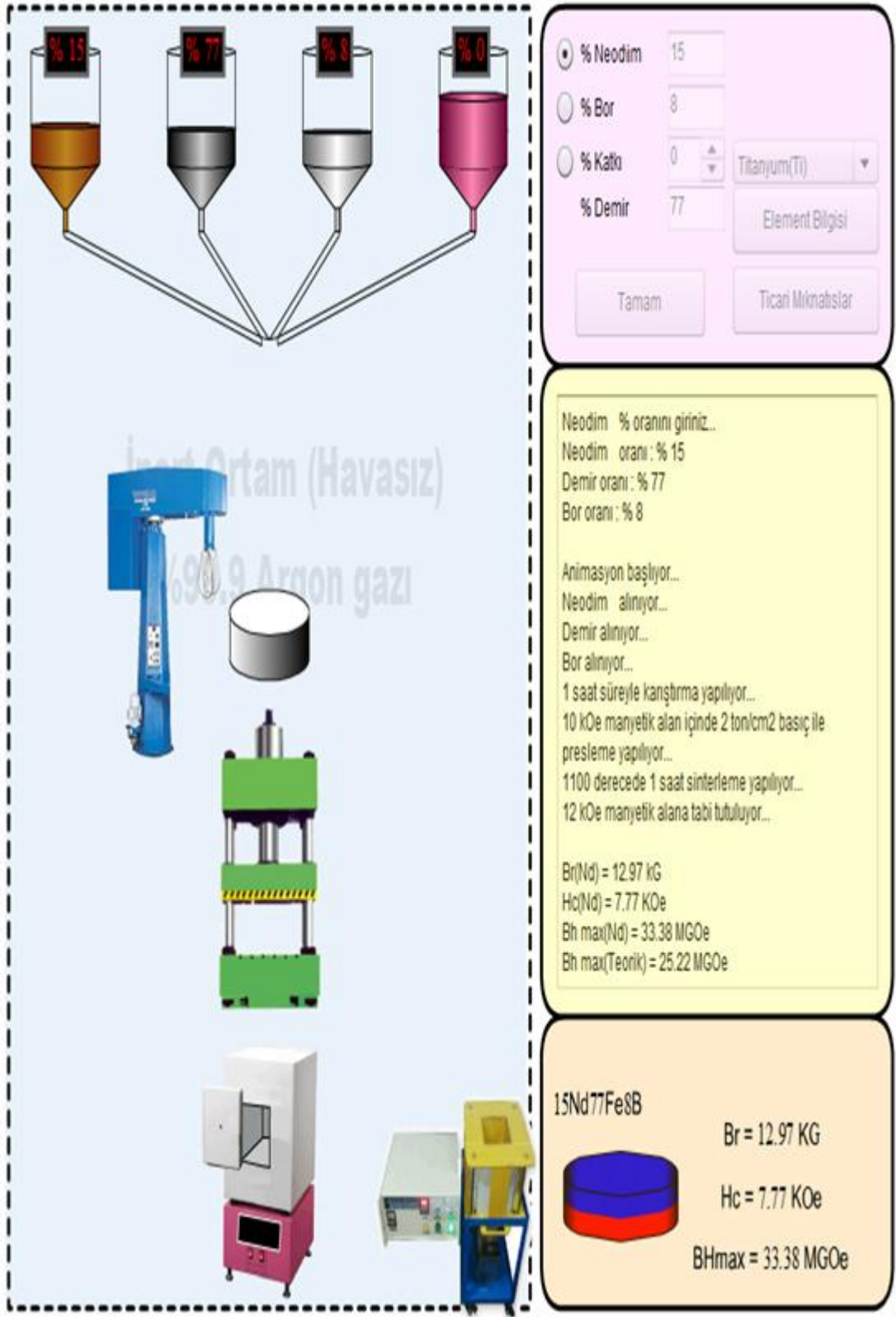
Algoritmada ana elementlerin seçimi, veri girişi, element oranlarının hesabı, animasyon, manyetik özelliklerin değeri ve çıktılar bölümleri bulunmaktadır.



Şekil 6.32. Modelin oluşturulmasında kullanılan algoritma

Algoritma göz önüne alınarak modelin ara yüz ve animasyonları Adobe Flash 8 programı ile hazırlanmıştır. Program kodları ise Action Script 3.0 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Program kodları EKLER bölümünde verilmiştir.

Hazırlanan modelin arayüz tasarımı Şekil 6.33'de görülmektedir.



Şekil 6.33. Geliştirilen modelin arayüzü

### 6.3. Geliştirilen modeldeki bölümler

- 1- Nd elementinin bulunduğu kap,
- 2- Fe elementinin bulunduğu kap,
- 3- B elementinin bulunduğu kap,
- 4- Katkı maddelerinin (M=Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb, Cr, W, Mo, Mn, Ni, Sb, Sn, Ge, Al, Bi) bulunduğu kap,
- 5- Numunenin karışımının yapıldığı bölüm,
- 6- Numunenin preslendiği bölüm
- 7- Numunenin sinterlendiği (1100 °C de fırımlandığı) bölüm
- 8- Elde edilen numunenin 12 KOe'lik manyetik alana tabii tutulduğu mıknatıslayıcı.
- 9- Hazırlayacağımız nano mıknatıs için karıştırılacak elementlerin % olarak ağırlıklarının değerlerinin girilmesi,
- 10- Modelin çalışması durumundaki işlem basamaklarının gösterilmesi,
- 11- Elde edilen nano mıknatıs

Nd elementini baz alarak mıknatıs üretmek istediğimizde modelimizdeki 9. bölümde % olarak Nd değerini girip tamam denildiğinde, sistem çalışıp sonuçta numunenin alaşım formülü,  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  değerleri elde edilmektedir.

B elementi içinde aynı çalışmalar yapıp istenilen NdFeB alaşımları oluşturabiliriz.

Bir NdFeB mıknatısa katkı maddelerinin artık mıknatısiyetine ( $B_r$ ) etkisi incelemek için modelimizdeki 9. bölümde katkı maddesini seçip % oranını girdiğimizde sonuçta  $15Nd-Fe-8B-xM$  alaşımındaki artık mıknatısiyet değerini elde ederiz. (M=katkı maddeleri)

Gerçekleştirdiğimiz modelde ticari mıknatıslara da yer verilmiştir.  $B_r$ ,  $H_c$ ,  $BH_{max}$  ve çalışma sıcaklıklarına göre ticari mıknatıs seçimleri yapılabilmektedir. Şekil 6.34'de ticari mıknatıs seçimi bölümü gösterilmiştir.

### Ticari Mıknatıs Seçimi

Br (KG)  
 Hc (KOe)  
 BH max (MGOe)  
 Çalışma Sıcaklığı (C)

Değer:

Bul

Urun	Br	Hc	BHmax	Tw
N-30	10.8-11.3	>=10	28-31	<=80
30M	10.8-11.3	>=10	28-31	<=100
30H	10.8-11.3	>=10	28-31	<=120
30SH	10.8-11.3	>=10.1	28-31	<=150
30UH	10.8-11.3	>=10.2	28-31	<=180
30EH	10.8-11.3	>=10.2	28-31	<=200
30AH	10.8-11.3	>=10.2	28-31	<=240

Geri

Şekil 6.34. Ticari mıknatıs seçimi

Kullandığımız katkı maddelerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için element bilgisi adı altında bir bölüm oluşturulmuştur. Bu bölümün içeri Şekil 6.35.' de verilmiştir.

22  
**Ti**  
Titanyum  
47,867

[Ar]4s<sup>2</sup> 3d<sup>2</sup>

- Durumu 293 K.....Kati
- Ergime noktası.....1941 K
- Kaynama noktası: 3560 K
- Elektronegatiflik... 1.54
- Elektron afinitesi... 7.6 kJ/mol
- Değerlik.....4
- İyonizasyon.....658.8 kJ/mol
- Yarıçapı... 176 pm
- Sertlik...716 MPa
- Modulus...110 GPa
- Yoğunluk...4507 kg/m<sup>3</sup>
- İletkenlik...22 W/mK
- Sıcaklık...520 J/kgK
- Yoğunluk...0.00030%
- Bulunuşu...1791

s 7s 6s 5s 4s 3s 2s 1s


p 7p 6p 5p 4p 3p 2p 1p

d 7d 6d 5d 4d 3d 2d 1d

f 7f 6f 5f 4f 3f 2f 1f

1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup> 3d<sup>2</sup>

ℓ=2  
m=-1  
n=3

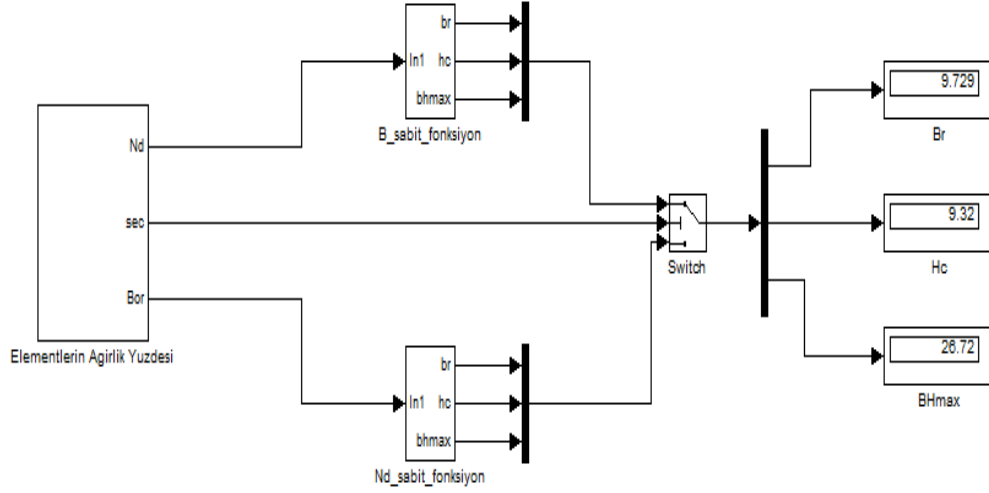


Tamam

Şekil 6.35. Elementlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

#### 6.4. Geliştirilen Modelin Matlab/Simulink ile kontrolünün yapılması

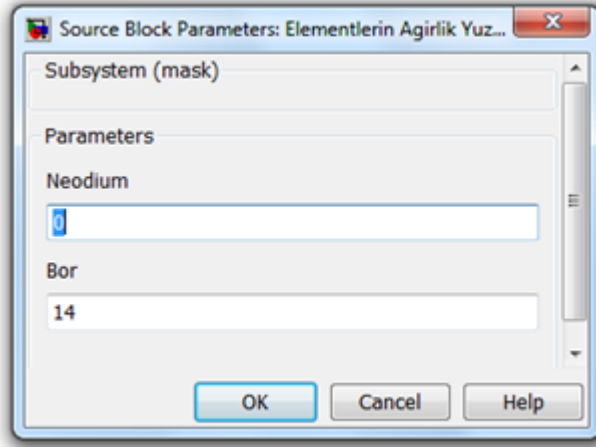
Geliştirilen modelin kontrolünün yapılması için Şekil 6.36'daki blok diyagram oluşturulmuştur.



Şekil 6.36. Geliştirilen modelin Matlab/Simulink ile blok diyagramı

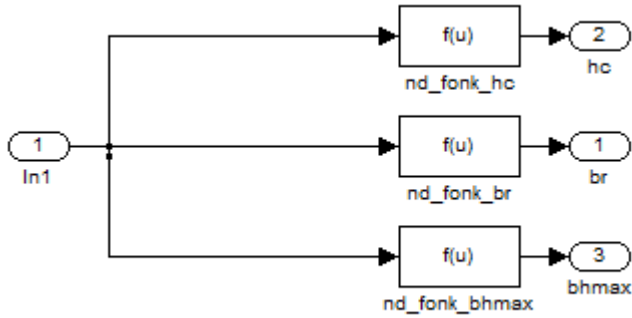
Blok diyaramda elementlerin ağırlık yüzdeleri girilerek fonksiyon bloklarında işlenir. Sonuçlar  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  olarak alınmaktadır. Fonksiyon bloklarında 6.1-6.5 numaralı fonksiyonlar kullanılmıştır. Elementlerin ağırlık yüzde değerleri ise çizelge 6.1 ve çizelge 6.2'den 0,05 artırım yaparak kullanılmıştır. Şekil 6.37'de elemenlerin ağırlık yüzde giriş ekranı görülmektedir.





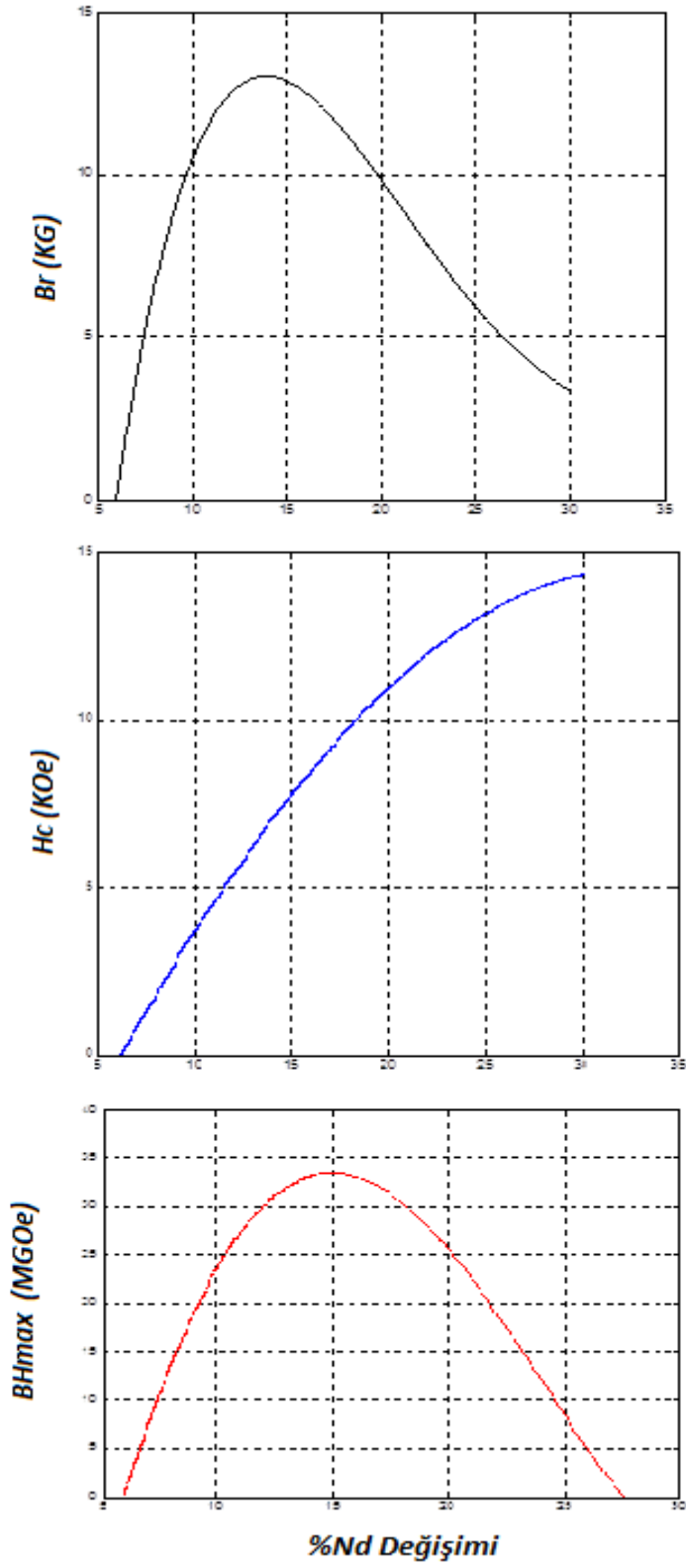
Şekil 6.37. Elementlerin ağırlık yüzdelerinin girilmesi

Fonksiyon bloklarının iç yapısı ise Şekil 6.38’de verilmiştir.

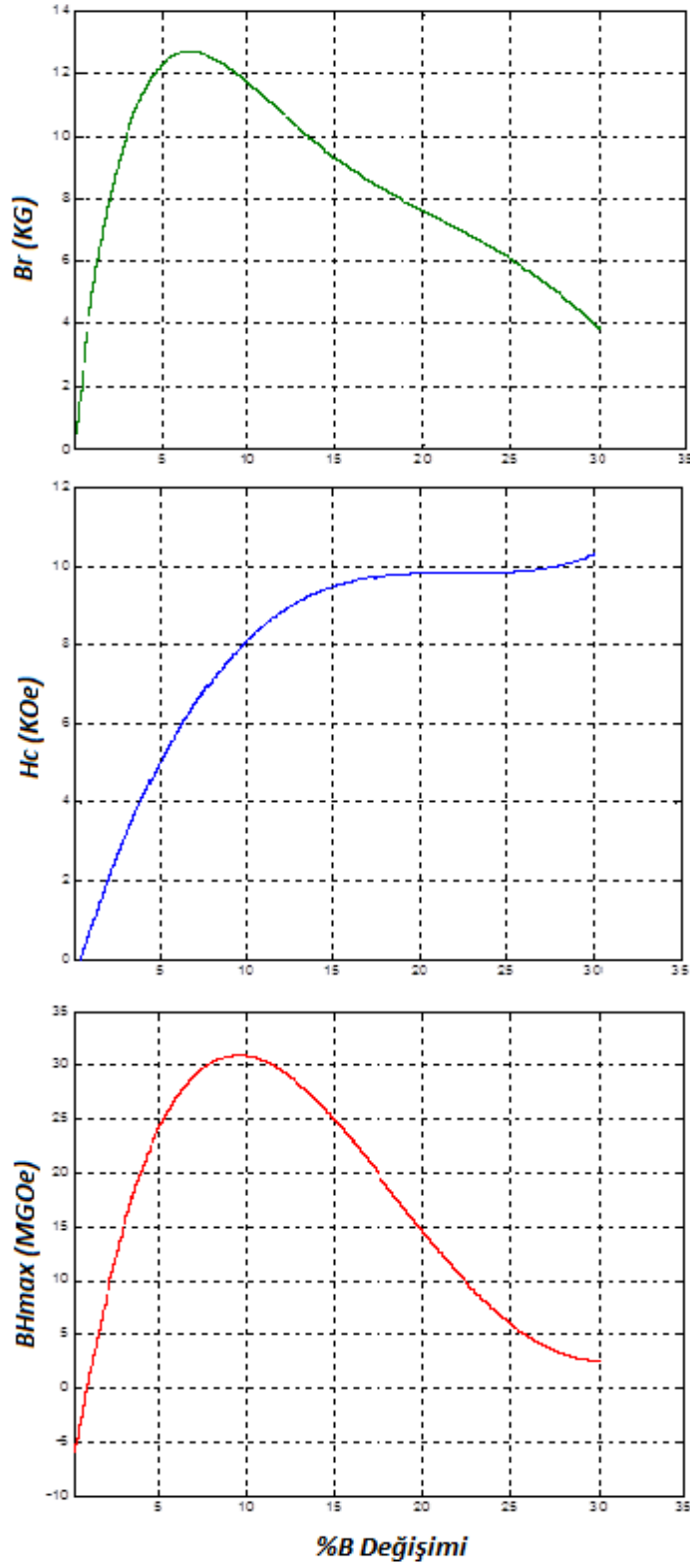


Şekil 6.38. Fonksiyon blok diyagramı

Şekil 6.36’deki simulink blok diyagramı bütün giriş değerleri için çalıştırıldığında Nd ve B değişimleri için  $B_r, H_c$  ve  $BH_{max}$  grafikleri Şekil 6.39 ve Şekil 6.40’da gösterilmiştir.



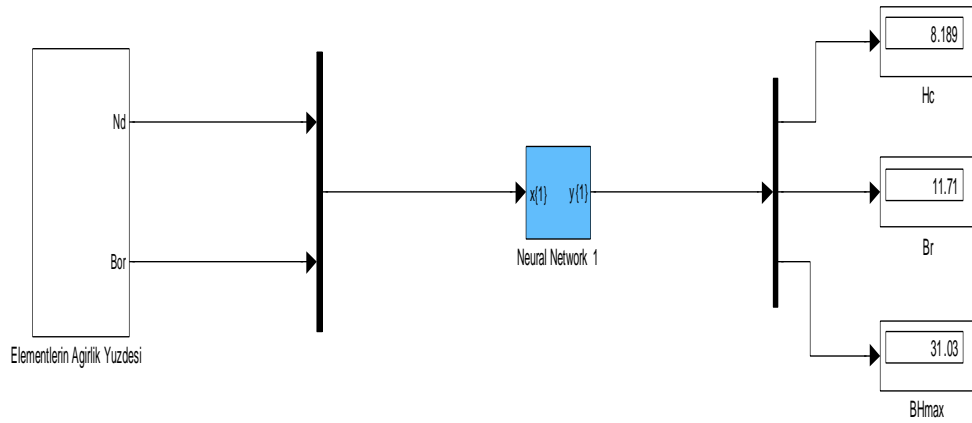
Şekil 6.39. Matlab/Simulink'te %Nd değişimine göre  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  grafikleri



Şekil 6.40. Matlab/Simulink'te %B değişimine göre  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  grafikleri

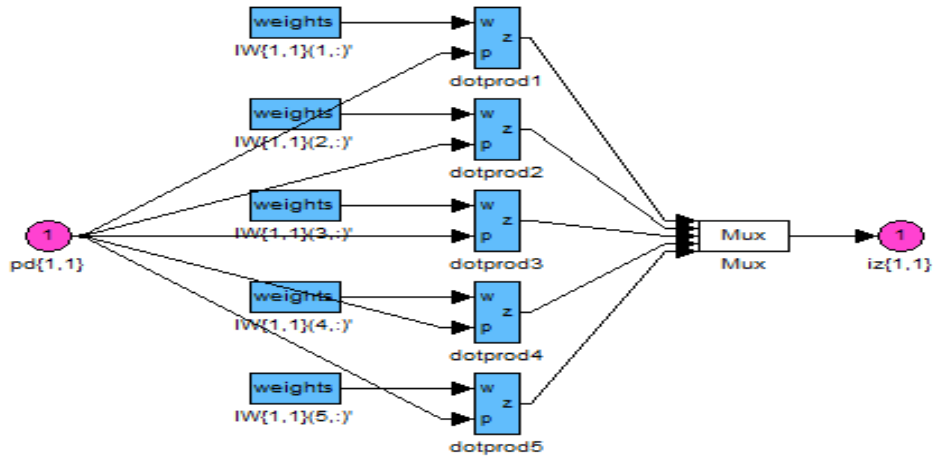
## 6.5. Geliştirilen Modelin Matlab/Neural Network (Yapay Sinir Ağı) ile kontrolünün yapılması

Hazırlanan modelin YSA ile kontrolünün yapılması için Şekil 6.41'deki blok diyagram oluşturulmuştur.



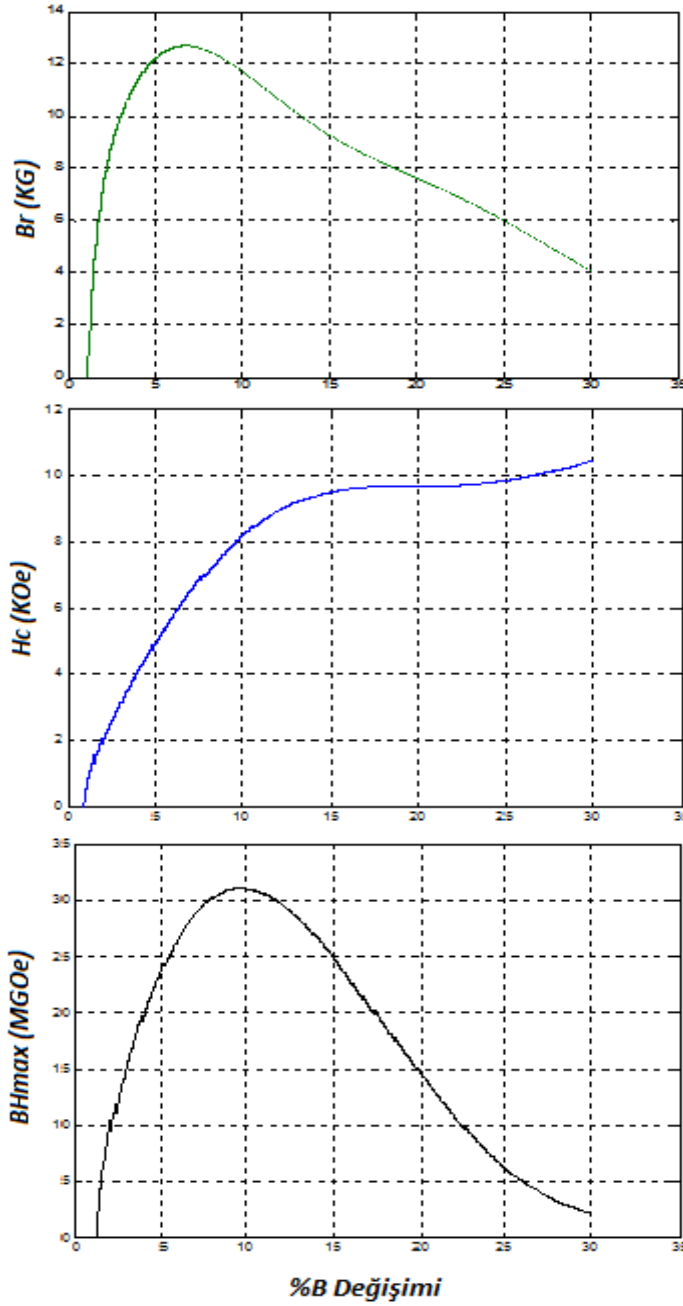
Şekil 6.41. Geliştirilen modelin Matlab/Neural Network (YSA) ile blok diyagramı

YSA bloğu 5 katmanlı bir bloktur ve iç yapısı Şekil 6.42'de gösterilmiştir.

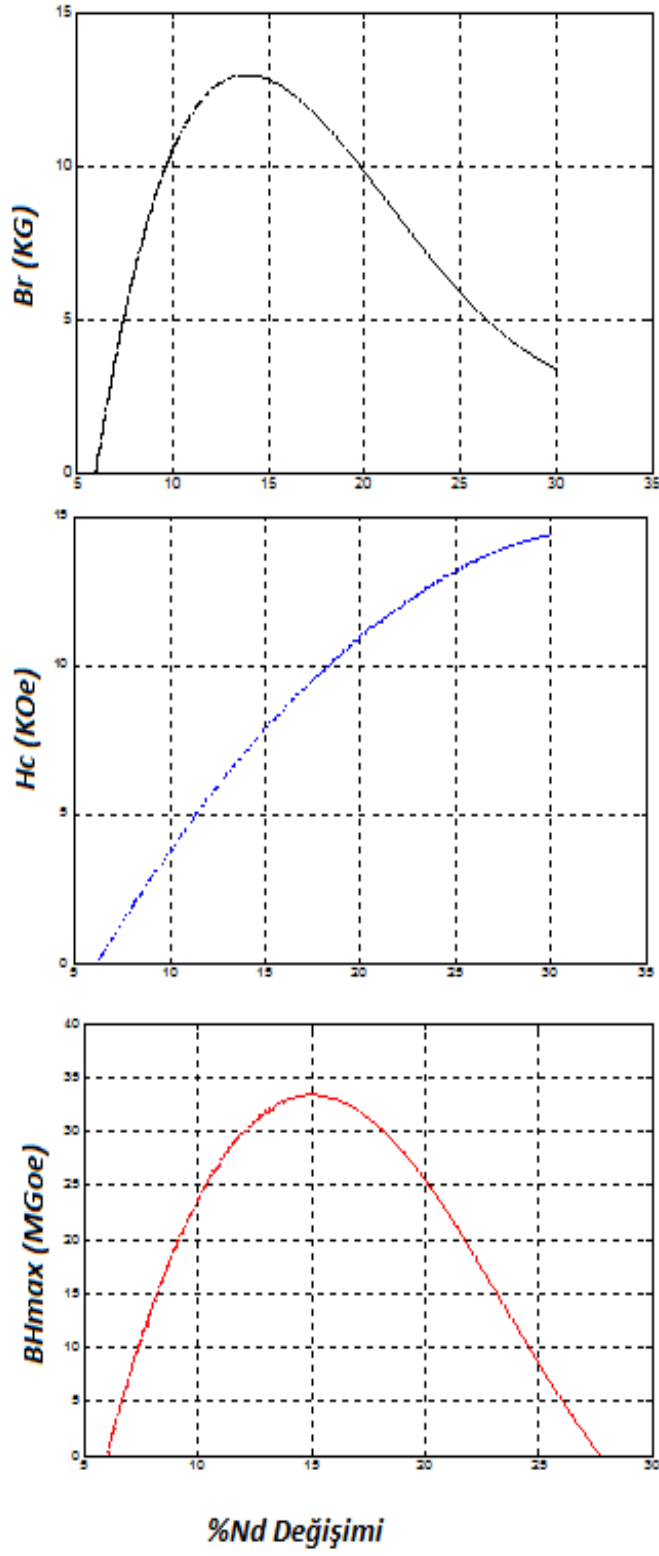


Şekil 6.42. 5 katmanlı YSA bloğu

Şekil 6.41'deki YSA blok diyagramı bütün giriş değerleri için çalıştırıldığında  $N_d$  ve  $B$  değişimleri için  $B_r, H_c$  ve  $BH_{max}$  grafikleri elde edilmiş ve grafikler. Şekil 6.43. ve Şekil 6.44'de gösterilmiştir.



Şekil 6.43. Matlab/Neural Network'te (YSA) %B değişimine göre  $B_r, H_c$  ve  $BH_{max}$  grafikleri



Şekil 6.44. Matlab/Neural Network'te (YSA) %Nd değişimine göre  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  grafikleri

## 6.6. Geliştirilen Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Hazırlanan modelin sonuç karşılaştırılması çizelge 6.9.verilmiştir.

Çizelge 6.9. Model,YSA ve Simulink sonuçlarının karşılaştırılması

<b>Geliştirilen Model,YSA ve Simulink Sonuçlarının Karşılaştırılması</b>		
<b>Model</b>	<b>Yapay Sinir Ağları</b>	<b>Simulink</b>
Nd = 20, B=8 için 20Nd72Fe8B Alaşımı		
Br=10,15 KG Hc=10,97 KOe BHmax=25,5 MGOe	Br=9,843 KG Hc=10,9 KOe BHmax=25,58 MGOe	Br=9,832 Hc=10,96 KOe BHmax=25,55 MGOe
Nd = 10, B=8 için 10Nd82Fe8 Alaşımı		
Br=10,48 KG Hc=3,68 KOe BHmax=23,63 MGOe	Br=10,51 KG Hc=3,717 KOe BHmax=23,61 MGOe	Br=10,46 KG Hc=3,684 KOe BHmax=23,67 MGOe
Nd = 15, B=10 için 15Nd75Fe10B Alaşımı		
Br=11,72 KG Hc=7,86 KOe BHmax=30,93 MGOe	Br=11,71 KG Hc=8,189 KOe BHmax=31,03 MGOe	Br=11,7 KG Hc=8,118 KOe BHmax=30,94 MGOe
Nd = 17, B=8 için 17Nd75Fe8B Alaşımı		
Br=12,16 KG Hc=9,16 KOe BHmax=31,95 MGOe	Br=11,99 KG Hc=9,156 KOe BHmax=32,09 MGOe	Br=12 KG Hc=9,159 KOe BHmax=31,99 MGOe
Nd = 7, B=8 için 7Nd85Fe8B Alaşımı		
Br=3,61 KG Hc=0,82 KOe BHmax=7,26 MGOe	Br=3,604 KG Hc=0,7575 KOe BHmax=7,359 MGOe	Br=3,612 KG Hc=0,8205 KOe BHmax=7,287 MGOe
Nd = 27, B=8 için 27Nd65Fe8B Alaşımı		
Br=5,75 KG Hc=13,8 KOe BHmax=1,78 MGOe	Br=4,685 KG Hc=13,78 KOe BHmax=2,012 MGOe	Br=4,695 KG Hc=13,77 KOe BHmax=1,812 MGOe

Çizelge 6.9 (Devamı). Model, YSA ve Simulink sonuçlarının karşılaştırılması

Nd =15, B=15 için 15Nd70Fe15B Alaşımı		
Br=9,18 KG Hc=8,82 KOe BHmax=24,94 MGOe	Br=9,273 KG Hc=9,491 KOe BHmax=24,94 MGOe	Br=9,294 KG Hc=9,487 KOe BHmax=24,94 MGOe
Nd = 15, B=20 için 15Nd65Fe20B Alaşımı		
Br=7,73 KG Hc=9,72 KOe BHmax=14,67 MGOe	Br=7,635 KG Hc=9,673 KOe BHmax=14,59 MGOe	Br=7,602 KG Hc=9,82 KOe BHmax=14,68 MGOe
Nd = 15, B=25 için 15Nd60Fe25B Alaşımı		
Br=6,47 KG Hc=10,76 KOe BHmax=6,1 MGOe	Br=6,006 KG Hc=9,847 KOe BHmax=6,235 MGOe	Br=6,074 KG Hc=9,848 KOe BHmax=6,101 MGOe
Nd=25 B=8 için 25Nd67Fe8B Alaşımı		
Br=6,7 KG Hc=13,19 KOe BHmax=8,49 MGOe	Br=5,91 KG Hc=13,17 KOe BHmax=8,503 MGOe	Br=5,926 KG Hc=13,17 KOe BHmax=8,544 MGOe

Çizelge 6.9. incelendiğinde sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmektedir.

Yapmış olduğumuz çalışmada hazırlanan modeli test etmek amacıyla, kullandığımız verilerin hazırlanmasındaki ortam değerleriyle aynı değerlere sahip (karıştırma süresi, presleme basıncı, uygulanan manyetik alan, sinterleme sıcaklığı ve süresi) çalışmaların değerlerini kullanarak sonuç karşılaştırması yaptığımızda çizelge 6.10'daki değerler elde edilmiştir.



Çizelge 6.10. Geliştirilen model sonuçları ile yapılan diğer çalışma sonuçlarının %B ve %Nd değerlerine göre karşılaştırılması.

Alaşım Adı	Elementlerin Atomik Yüzdesi	Geliştirilen Model. Sonucu			Yapılan Diğer Çalışmalar [94]		
		$B_r$ (KG)	$H_c$ (KOe)	$BH_{max}$ (KGOe)	$B_r$ (KG)	$H_c$ (KOe)	$BH_{max}$ (KGOe)
$15Nd-Fe-xB$	%B = 5	12,25	4,98	26,08	12	7,8	-
	%B = 15	12,91	9,48	22,58	9,8	7,7	-
$xNd-Fe-8B$	%Nd =10	12,23	3,68	25,31	10,8	7	-
	%Nd =15	12,46	7,77	33,37	12,3	8,1	-

İlgili alaşımda  $B_r$  ve  $H_c$  değerlerinin karşılaştırılmasında %B veya %Nd değerleri arttıkça sonuçlar birbirine daha yaklaşmaktadır.

$15Nd-Fe-8B-xM$  alaşımına katkı maddesi eklenmesi durumunda  $B_r$  değerlerini karşılaştırdığımızda çizelge 6.11 elde edilmiştir. Geliştirilen model ile diğer çalışmaların sonuçları birbirine çok yakındır. Bazı değerlerde %5'den daha az farklılıklar vardır.

Çizelge 6.11. İlgili alaşıma katkı maddeleri eklenmesi durumunda  $B_r$  değerlerinin karşılaştırılması

Alaşım Adı	Katkı Maddeleri	Model Sonucu	Yapılan Diğer Çalışmalar[94].
		$B_r$ (KG)	$B_r$ (KG)
$15Nd-Fe-8B-xM$	M= Zr =%4	7,49	7,9
	M= Ni =%6	10,24	10,8
	M= Mo =%6	8,1	8,3
	M= Cr =%6	8,39	7,8

## 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Nd-Fe-B kalıcı mıknatısların üretim aşamasında kullanılabilir bir model geliştirdik. Modelimizde Nd ve B elementleri esas alınarak  $15\text{Nd} (85-x)\text{Fe} x\text{B}$  alaşımı ve  $x\text{Nd} (92-x)\text{Fe} 8\text{B}$  alaşımları kullanılmıştır. Her iki alaşım için manyetik özellik verileri olan  $B_r$ ,  $H_c$  ve  $BH_{max}$  değerleri ilgili patentten alınmıştır. Bu verilerin matematiksel analizleri yapılarak, geliştirdiğimiz model için matematiksel fonksiyonlar oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlarla manyetik malzemelerin üretiminde kullanılacak bir model geliştirme çalışması yapılmıştır.

Nd oranı %15, B oranı %8 ve demir oranı %77 olduğunda oluşan  $15\text{Nd}77\text{Fe}8\text{B}$  alaşımı, kullanmış olduğumuz verilere göre en iyi manyetik özelliklere sahip olduğu kalıcı mıknatıs olduğu görülmüştür.

İlgili alaşıma katkı maddesi olarak eklenen elementlerin  $B_r$  etkileri incelenmiş ve %0,5-1,5 civarında Ti eklendiğinde,  $B_r$  değerinin diğerlerine göre daha fazla olduğu anlaşılmıştır.

Geliştirdiğimiz modelin doğruluk kontrolü Matlab/Simulink ve Matlab/Neural Network ile yapılmıştır. Karşılaştırmalar Çizelge 6.9'da ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Sonuçların birbirine çok yakın olduğu ancak %0,5-1 kadar hatalar olduğu görülmektedir. Bu hataların matematiksel fonksiyonları oluştururken kullandığımız curve fitting (eğri uydurma) durumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen modelin doğruluk kontrolünü yapılan diğer çalışmalarla da test ettik. Sonuçlar çizelge 6.10 ve çizelge 6.11'de gösterilmiştir. Sonuçların çok yakın olduğu görülmüştür.

Hazırlanılan yazılım sayesinde istenilen oranda önceden belirlenen malzemeler karıştırılarak sanal olarak mıknatıs deneyleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede deneyler için gerekecek numune üretiminde harcanan zaman ve maddi harcamalar ortadan kalkmaktadır. Yazılım şu anda deneyleri bitmiş mıknatıs alaşımları için ara değerleri simüle edebilmektedir. Ancak hazırlanan yazılım laboratuvarında farklı alaşım mıknatıslar için yapılacak gerçek deneyler sonucunda elde edilecek verilere göre geliştirilmeye açıktır.

## 7.2. Öneriler

Bir model gerçekleştirmeden önce, sistemin çalışma koşulları altında davranışının incelenmesi ve uygun verilerin belirli bir kurala uyması gerekmektedir. Yapılan gerçek laboratuvar çalışmalarının bir algoritmaya göre yapılması, sonraki çalışmalarda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilecek sistemi en doğru temsil eden matematiksel fonksiyonları elde etmek sistemin temelini oluşturur. Yapılan bütün laboratuvar çalışmaları matematiksel fonksiyonlarla simüle edilebilir.

Gerçek laboratuvar ortamında deneyler yapılırken izlenen algoritma aynı şekilde geliştirilen model ortamı hazırlanırken de kullanılmıştır. Bu şekilde hem gerçek deney sonuçları ile yazılım sonuçları karşılaştırma olanağı ortaya çıkmış ve sonuçlar net bir şekilde değerlendirilebilmiştir.

Laboratuvarlarda deneysel çalışmalar yapılırken belirli bir algoritmaya uygun yapılması, daha sonraki çalışmalara büyük kolaylıklar sağlayacaktır. Bundan sonraki bu alanda yapılacak çalışmalar kolaylıkla modele eklenip, sistemin daha geniş manyetik malzeme üretim alanlarına hizmet vermesi sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- 1 Gutfleisch, O., J.Physc. D: *Appl. Phys.*, 33, R157-R172, (2000).
- 2 Liu, J. F., and Walmer M. H., *IEEE Transactions on Electron Devices*, 52, no. 5, 899-902, (2005).
- 3 J. Liu, P. Vora, P. Dent, M. Walmer, C. Chen, J. Talnagi, S. Wu and M. Harmer, *Proceedings of Space Nuclear Conference*, Boston, Massachusetts, June 24-28 2007 Paper 2036,( 2007).
- 4 Marc, T. T., *Proceedings of the IEEE*, 97 ,No. 11, (2009).
- 5 Brown, D., Bao-Min, Ma, Chen Z., J. *Magn. Magn. Mater.* 248, 432, (2002).
- 6 Coey, J.M.D., *Physica Scripta* T66, 60, (1996).
- 7 Lovatt, H.C., Ramsden, V. S. and Mecrow, B.C., *Proc. Inst. Of Elec. Eng.*, Pt. B 145, 402. (1998).
- 8 Chan, C. C., and Chahu, K. T., *Modern Electric Vehicle Technology*, OUP, Oxford, (2001).
- 9 Lovatt, H. C. and Dunlop, J. B., *Proceedings of FISITA World Automotive Congress*, Seul, Korea, (2000).
- 10 Gürdal, O., Elektromanyetik Alan Teorisi, *Nobel Yayinevi*, Ankara, (2000).
- 11 Gürdal, O., Elektrik Makinalarının Tasarımı, *Nobel+Atlas Yayinevi*, Ankara, (2001).
- 12 Crangle, J., *The Magnetic Properties of Solids*, Edward Arnold, London, June, (1977).
- 13 Yalçın, H., Gürü, M., Malzeme Bilgisi, *Palme Yayinevi*, (2002).
- 14 Li Shandong , Dai Yaodong, B.X. Gu, Tian Zongjun, Du Youwei, “Effect of amorphous grain boundaries on the magnetic properties of B-rich nanocomposite permanent magnets”, *Journal of Alloys and Compounds*, 339, 202–206, Elsevier Science B.V., (2002).
- 15 Clagett, T.K., *Proceedings of Magnetic Conference*, Hyatt Regency, Denver Technology Center (2008).
- 16 Corner,W. D. *Phys. Technology*, 19, Printed in U.K.,(1988).

- 17 Xiao, Y., Strnat, K.J., Mildrum, H.F., Ray, A.E., in Proc. 9th Int. **Workshop on Rare-Earth permanent Magnets and their Application**, Eds. C. Herget and R. Poerschke, Bad Soden. FRG., 467.,(1987).
- 18 J. Leonnowice, *J. Magn. Magn. Mater.* 83, 211.,(1990).
- 19 Chin T.S., Lin C.H., Huang Y.H., Yau J.M., Heh S.J., King F.D., *IEEE Trans. Magn.* 29, 2788.,(1993).
- 20 Vial, F., Joly, F, Nevalainen, E., Sagawa, M., Hiraga, K., Park, K.T., *J. Magn. Magn. Mater.* 242-245, 1329-1334.,(2002).
- 21 Croat, J.J., Herbst, J.F., Lee, R.W., and Pinkerton, F.E., *J. Appl. Physics*, 55 (6), (1984).
- 22 Yang, S., Song, X, Li S., Liu, X., Tian, Z., Gu, B., Du, Y., *J. Magn. Magn. Mat.*, 263, 134-140.,(2003).
- 23 Yan, A., Song, X., W. Xiaotian, *J. Magn. Magn. Mater.* 169, 193-198.,(1997)
- 24 W. Rodewald, W. Fernengel, , *IEEE, Trans. Magn.*, 24 (2), (1988).
- 25 Gholamipour, R.R., Beitollahi, A., Marghusan, V., Ohkubo, V., Hono, K., *Proc. of 19th International Workshop on Rare Earth Permanent Magnets and Their Applications.* 215-220.
- 26 Liu, Jinfangt, Luo, Helie and Wan, Jiangs, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 25, 1238-1242.,(1992).
- 27 Ishikawa, T., Hamada, Y., Ohmait, K., *IEEE Trans. Magn.* 25, 3434.,(1989)
- 28 Otani, Y., Miyagima, H. ve Chikazumi, S., *IEEE Trans. Magn.* 25, 3431.,(1989).
- 29 Sagawa, M., Fujimura, S., Togawa, N., Yamamoto, H., and Matsuura, Y., "New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe," *J. Appl. Phys.*, 55, 2083-2087, Mar. (1984).
- 30 J.F. Herbst, "R<sub>2</sub> Fe<sub>14</sub>B materials: Intrinsic properties and technological aspects, " *Rev. Mod. Phys.*, 63, 819-898, Oct. (1991).
- 31 K. H. J. Buschow, Handbook of Magnetic Materials, K. H. J. Buschow, Ed. Amsterdam: *Elsevier*, 10, ch. 4, 463-593.,(1997).
- 32 Sagawa, M., Tenaud, P., Vial, F., Hiraga, K., "High coercivity Nd-Fe-B sintered magnet containing Vanadium with new microstructure", *IEEE Transaction on Magnetism*, 26, No. 5, september, (1990).

- 33 Vial, F., Joly, F, Nevalainen, E., Sagawa, M., Hiraga, K., Park, K.T., *J. Magn. Magn. Mater.* 242-245, 1329-1334, (2002).
- 34 Croat, J.J., Herbst, J.F., Lee, R.W., and Pinkerton, F.E., *J. Appl. Physics*, 55, (1984).
- 35 Yang, S., Song, X, Li S., Liu, X. , Tian, Z., Gu, B., Du, Y., *J.Magn.Magn.Mat.*, 263, 134-140, (2003).
- 36 Yan, A., Song, X., Xiaotian, W., *J. Magn. Magn. Mater.* 169, 193-198, (1997).
- 37 W. Rodewald, W. Fernengel, *IEEE,Trans. Magn.*, 24, (1988).
- 38 Gholamipour, R.R., Beitollahi, A., Marghusan, V., Ohkubo, V., Hono, K., *Proc. of 19th International Workshop on Rare Earth Permanent Magnets and Their Applications.* 215-220.
- 39 Ishikawa, T., Hamada, Y., Ohmait, K., *IEEE Trans. Magn.* 25, 3434, (1989).
- 40 Otani, Y., Miyagima, H. ve Chikazumi, S., *IEEE Trans. Magn.* 25, 3431, (1989).
- 41 Ragg, O. M., Haris, I.R., “A study of effects of the addition of various amounts of Cu to sintered Nd-Fe-B magnets”, *Journal of Alloys and Compounds* 256, 252-257, (1997).
- 42 Askeland, D.R., (Çev:Erdoğan, M.) “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, cilt-1, Ankara, 47-54, (1998).
- 43 Sümer, M., “Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Fe- Fe<sub>3</sub>C kompozit malzemede mekanik özelliklerin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 50-59, (2004).
- 44 Li Y., Evans, H.E., Harris, I.R., and Jones, I.P., *Oxidation of Metals*, 59, Nos. 1/2, (2003).
- 45 Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A., Lavernia, E.J., “Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-a review”, *Journal of Materials Science*, 26.1137- 1156 (1991).
- 46 İnem, B., Gül, F., “Döküm yoluyla SiC takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi”, Uluslararası Katılımlı *2.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, ODTÜ, Ankara, 999-1005 (1999).
- 47 Akoral, E., “Toz metalurjisi yöntemi ile AlSiC kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 1-155 (2003).

- 48 Türker, M., Özdemir, T. A., Ögel, B. ve Yavuz, A., “Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması” *Uluslararası Katımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, ODTÜ, Ankara, 425-431 (1999).
- 49 Türk Toz Metalurjisi Derneği, <http://www.turktoz.gazi.edu.tr/ttmd.tr>. (2004).
- 50 Sarıtaş, S., “Toz Metalurjisi-Bileşik Gereçler-Seramikler”, Makina Mühendisliği El Kitabı, *Makina Mühendisler Odası Yayınları*, 1: 64-115 (1994).
- 51 Arık, H., Sarıtaş, S. ve Gündüz, M., “Production of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by carbothermal reduction and nitridation of sepiolite”, *Journal of Materials Science*, 34:835-842 (1999).
- 52 Uslan, İ., “Gaz Atomize Alüminyum Tozlarının Özelliklerine Üretim Değişkenlerinin Etkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-73 (1999).
- 53 Arık, H., “Sepiolitten Karbo-Termal İndirgeme ve Nitrüleme Yoluyla Silisyum Nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Seramik Tozu Üretimi ve Parametrelerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-35 (1999).
- 54 Kurnaz, S. C., Akbulut, H., Durman, M., “Saffil (δ- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) fiber takviyeli çinko- alüminyum alaşımlı metal matrisli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi”, *7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, Ankara, 1155- 1163 (1993).
- 55 Özkök, Ö., “α- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-65 (2004).
- 56 Gökmusaoğlu, M., “Toz Metalurjisinde Presleme Tekniği –I-“, *Mühendis ve makine*, 12: 139, 284- 289 (1969).
- 57 Çiftçi, İ., “Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı ve Boyutunun Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-64 (2003).
- 58 Davidson, J., “Compressibility of Metal Powders”, *Quebec Metal Powders Ltd*, London, 286- 287 (1996).
- 59 Bostan, B., “Alüminyum- Karbon Tozlarından Mekanik Alaşımlama ve Sonrası İşlemlerle Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> Sentezlemesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-85 (2003).

- 60 Ekşi, A. ve Kurt, A. O., “Metal ve Seramik Tozlarının Bilgisayar Kontrollu Tek Eksenli Kalıpta Preslenmesi”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, ODTÜ, Ankara, 557- 563 (1999).
- 61 German, R. M., “Powder Metallurgy Science”, *Metal Powder Industries Federation, 2<sup>nd</sup> edition*, USA (1994).
- 62 Erdoğan, M., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, cilt-1, Ankara, 47-54 (1998).
- 63 Sümer, M., “Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Fe- Fe<sub>3</sub>C kompozit malzemede mekanik özelliklerin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 50-59 (2004).
- 64 Wilyman, P. P., “Sintering With Nitrojen Based Atmospheres”, *Powder Metallurgy*, 28, 85- 87 (1995).
- 65 Brazenha, M V. J., “Furnace Atmospheres For Sintering”, MPR, 600- 604 (1990).
- 66 Kaufman, S. M., “Carbon Control During The Sintering Of Iron”, *International 5. Powder Metallurgy*, 11- 16 (1973).
- 67 Metals handbook”, 7. *Powder Metallurgy*, A.S.M, 9. Baskı, USA, 1120 (1984).
- 68 R.C.O’Handley, *Modern Magnetic Materials*, Wiley, New York (1999).
- 69 Gürdal, O., Elektromanyetik Alan Teorisi, *Seçkin Yayınevi*, Ankara, 2007.
- 70 Cullity, B.D., Graham, C.D., *Intraduction to Magnetic Materials*, Second Edit. 87-87,
- 71 Jiles, D., Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, *Chapman and Hill*, 2, 27-44.,(1991).
- 72 Chandramouli, M, Ph Thesis, “Investigations of Novel Neodymium-Iron-Boron Type Magnets and Effects of Crystallografic Texture”, *University of California.*,(1995).
- 73 İnternet: Temel Elektrik Mühendisliği “Manyetik Malzemeler”, [www.itacanet.org/eng/elec/edu/pt5.pdf](http://www.itacanet.org/eng/elec/edu/pt5.pdf)
- 74 İnternet: Uni. of Birmingham, Manyetik Malz. Grubu, “Manyetik Histerezis”, [http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic\\_materials/hysteresis.htm](http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic_materials/hysteresis.htm).
- 75 Nicola, A. Spaldin, “Magnetic materials: fundamentals and device applications”, *Cambridge University Press*, Cambridge, U.K., (2003).



- 76 B.D. Cullity, C.D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials, Second Edit.* 1,7 ve 4. 293.
- 77 Dangxin, Wo. ,”First-Principles Study on Hard/Soft SmCo<sub>5</sub>/Fe(f) Nanocomposite Magnetic Materials”, *Ph.Thesis.*, (2008).
- 78 Bal, Güngör, Doğru Akım Makinaları ve Sürücüler, *Seçkin Yayınevi*, Ankara. (2006).
- 79 Çetin, İ., 1993. “Darbe Akımlı Mıknatıslayıcılar,” *Kaynak*, 93/6, s.101-107
- 80 Nasar, S.A., Boldea, I. and Unnewehr, L.E., “Permanent Magnet Reluctance And Self-Synchronous Motor”, *CRC Press*, London Tokyo.(1993).
- 81 Joseph, J., Stupak, Jr., “Methods of Magnetizing Permanent Magnets”, *EMCW Coil Winding Show*, Cincinnati, Ohio.,(2000).
- 82 Noğay, H.S.,”Üç Fazlı Kafesli Asenkron Motorlarda Toplam Harmonik Distorsiyonunun Yapay Sinir Ağları Yöntemi Kullanılarak Saptanması” Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul ,1-33 (2008).
- 83 NahiyeV., V.V., “Yapay Zeka Problemler-Yöntemler-Algoritma”, *Seçkin Yayınevi*, Ankara,600-610 (2005)
- 84 Sağıroğlu, Ş., Besdok, E., Erler, M., “Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-1.,Yapay Sinir Ağları”, *Ufuk Yayıncılık*, Kayseri, (2003).
- 85 Elmas, Ç.,”Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Uygulama)”, *Seçkin Yayınevi*, Ankara, 25-35, (2003).
- 86 Çağlar, M.F., “Yapay Sinir Ağı İle Smith Ağı Modeli”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 43-60, (2007).
- 87 Öztemel, E., "Yapay Sinir Ağları", *Papatya Yayıncılık*, İstanbul, 30-40, (2003).
- 88 Yurtoğlu, H. "Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi : Bazı Makro Ekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği", Uzmanlık Tezi, *Devlet Planlama Teşkilatı*, Ankara, (2005).
- 89 Fausett, L.,"Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications", *Pearson Education*, USA, 3-5, (2006).
- 90 Samarasinghe, S.," Neural Networks for Applied Sciences and Engineering" *Auerbach Publications*, Florida, 17, (2006).
- 91 Hagan, T. M., Demuth, B., Beale, H., " Neural Network Design" *University of Colorado Bookstore*, USA, 52, (1996).

- 92 Lüy, M., "Yapay Sinir Ağlarının Modellemesi Yapılan Termik Santralde Uygulanması", Doktora Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 66-89, (2009).
- 93 Sagawa, M., Furimuro, S., Matsuura, Y., Magnetic Materials and Permanent Magnets, *United States Patent*, Patent. No: 5,183,516., feb.2, (1993).
- 94 Sagawa, M., Furimuro, S., Matsuura, Y., Magnetic Materials and Permanent Magnets, *United States Patent*, Patent. No:4,597,938., jul.1, (1986).

**EKLER**

**EK-1. Program Kodları**

```
/*  
    Adobe Flash Professional CS5 - Action Script 3.0  
*/  
  
Frame 1 Kodları :  
stop();  
giris.addEventListener(MouseEvent.CLICK,function()  
{  
    gotoAndPlay(currentFrame+1);  
});
```

Frame 7 Kodları :

```
/*  
    Adobe Flash Professional CS5 - Action Script 3.0  
*/  
  
stop();  
  
var yuzde_nd,br_nd,hc_nd,bhmax_nd:Number;  
var yuzde_b,br_b,hc_b,bhmax_b:Number;  
var yuzde_katki,br_katki,hc_katki,bhmax_katki:Number;  
var adim:Number;  
var katkinosu:Number;  
var fe_kalan:Number;  
  
silo4.value=0;  
silo4.stepSize = 0.1;  
  
ti_.visible=false;  
zr_.visible=false;  
v_.visible=false;  
ta_.visible=false;
```

```

nb_.visible=false;
cr_.visible=false;
w_.visible=false;
mn_.visible=false;
mo_.visible=false;
ni_.visible=false;
sb_.visible=false;
ge_.visible=false;
al_.visible=false;
bi_.visible=false;

devam.visible=false;
dikkat.text="";

addEventListener(Event.ENTER_FRAME,myFunction);
function myFunction(event:Event) {
    switch(currentFrame) {
        case 22 : aciklama.text=aciklama.text+"Neodim alınıyor... \n";
        break;
        case 99 : aciklama.text=aciklama.text+"Demir alınıyor... \n";
        break;
        case 173 : aciklama.text=aciklama.text+"Bor alınıyor... \n";
        break;
        case 254 : if(secim3.selected==true)
aciklama.text=aciklama.text+"Katkı maddesi alınıyor... \n"; else {
katki_tam.visible=true; gotoAndPlay(357); }        break;
        case 439 : aciklama.text=aciklama.text+"1 saat süreyle karıştırma
yapılıyor... \n";        break;
        case 527 : aciklama.text=aciklama.text+"10 kOe manyetik alan içinde
2 ton/cm2 basınç ile presleme yapılıyor... \n";        break;

```

```

        case 616 : aciklama.text=aciklama.text+"1100 derecede 1 saat
sinterleme yapılıyor... \n";    break;
        case 675 : aciklama.text=aciklama.text+"12 kOe manyetik alana tabi
tutuluyor... \n";    break;
    }
}

```

```

katkilar.addItem( {label: "Titanyum(Ti)", data:"Ti" } );
katkilar.addItem( {label: "Zirkonyum(Zr)", data:"Zr" } );
katkilar.addItem( {label: "Vanadyum(V)", data:"V" } );
katkilar.addItem( {label: "Tantal(Ta)", data:"Ta" } );
katkilar.addItem( {label: "Niyobyum(Nb)", data:"Nb" } );
katkilar.addItem( {label: "Krom(Cr)", data:"Cr" } );
katkilar.addItem( {label: "Wolfram(W)-Tunsten", data:"W" } );
katkilar.addItem( {label: "Manganez(Mn)", data:"Mn" } );
katkilar.addItem( {label: "Molibden(Mo)", data:"Mo" } );
katkilar.addItem( {label: "Nikel(Ni)", data:"Ni" } );
katkilar.addItem( {label: "Stibium(Sb)-Antimon", data:"Sb" } );
katkilar.addItem( {label: "Germanyum(Ge)", data:"Ge" } );
katkilar.addItem( {label: "Alüminyum(Al)", data:"Al" } );
katkilar.addItem( {label: "Bizmut(Bi)", data:"Bi" } );

```

```

katkilar.addEventListener(Event.CHANGE, katkilarSelect);
function katkilarSelect(event:Event) {
    switch(katkilar.selectedIndex) {
        case 0,13 : { silo4.minimum=0; silo4.maximum=5; } break;
        case 1 : { silo4.minimum=0; silo4.maximum=6; } break;
        case 2,3,4,5,6,7,8,9,12 : { silo4.minimum=0; silo4.maximum=10; }
break;
        case 10 : { silo4.minimum=0; silo4.maximum=4; } break;

```

```
                case 11 : { silo4.minimum=0; silo4.maximum=8; } break;
            }
    }
```

```
silol.addEventListner(Event.CHANGE, silolSelect);
function silolSelect(event:Event) {
    dikkat.text="";
    silo3.text="8";
}
```

```
silol3.addEventListner(Event.CHANGE, silol3Select);
function silol3Select(event:Event) {
    dikkat.text="";
    silol1.text="15";
}
```

```
silol4.addEventListner(Event.CHANGE, silol4Select);
function silol4Select(event:Event) {
    dikkat.text="";
    silol1.text="15";
    silo3.text="8";
}
```

```
bilgi.addEventListner(MouseEvent.CLICK,bilgiclick);
function bilgiclick(event:Event):void
{
    adim=currentFrame;
    katkinosu=katkilar.selectedIndex;
    switch(katkinosu) {
        case 0 : { ti_.visible=true; } break;
        case 1 : { zr_.visible=true; } break;
```

```

        case 2 : { v_.visible=true; } break;
        case 3 : { ta_.visible=true; } break;
        case 4 : { nb_.visible=true; } break;
        case 5 : { cr_.visible=true; } break;
        case 6 : { w_.visible=true; } break;
        case 7 : { mn_.visible=true; } break;
        case 8 : { mo_.visible=true; } break;
        case 9 : { ni_.visible=true; } break;
        case 10 : { sb_.visible=true; } break;
        case 11 : { ge_.visible=true; } break;
        case 12 : { al_.visible=true; } break;
        case 13 : { bi_.visible=true; } break;
    }
    devam.visible=true;
}

devam.addEventListener(MouseEvent.CLICK,devamclick);
function devamclick(event:Event):void
{
    switch(katkinosu) {
        case 0 : { ti_.visible=false; } break;
        case 1 : { zr_.visible=false; } break;
        case 2 : { v_.visible=false; } break;
        case 3 : { ta_.visible=false; } break;
        case 4 : { nb_.visible=false; } break;
        case 5 : { cr_.visible=false; } break;
        case 6 : { w_.visible=false; } break;
        case 7 : { mn_.visible=false; } break;
        case 8 : { mo_.visible=false; } break;
        case 9 : { ni_.visible=false; } break;
        case 10 : { sb_.visible=false; } break;
    }
}

```



```

        case 11 : { ge_.visible=false; } break;
        case 12 : { al_.visible=false; } break;
        case 13 : { bi_.visible=false; } break;
    }
    devam.visible=false;
    gotoAndStop(7);
}

ticari.addEventListener(MouseEvent.CLICK,ticariclick);
function ticariclick(event:Event):void
{
    gotoAndStop(1, "Scene 4");
}

tamam.addEventListener(MouseEvent.CLICK,tamamclick);
function tamamclick(event:Event):void
{
    if(secim1.selected==true && (Number(silo1.text)<6 ||
Number(silo1.text)>28)) {
        dikkat.text="Nd 6-28 arasında olmalı";
        return;
    }
    else if(secim2.selected==true && (Number(silo3.text)<2 ||
Number(silo3.text)>32)) {
        dikkat.text="B 2-32 arasında olmalı";
        return;
    }

    ticari.enabled=false;

    if(secim1.selected==true) { silo3.text="8"; silo4.value=0; }

```

```

        else if(secim2.selected==true) { silo1.text="15"; silo4.value=0; }
        else if(secim3.selected==true) {silo3.text="8"; silo1.text="15";}
silo2.text=String(100-(Number(silo1.text)+Number(silo3.text)+silo4.value));
silo1label.text="% "+silo1.text;
silo2label.text="% "+silo2.text;
silo3label.text="% "+silo3.text;
silo4label.text="% "+String(silo4.value);
aciklama.text=aciklama.text+"Neodim oranı : % "+silo1.text+"\n";
aciklama.text=aciklama.text+"Demir oranı : % "+silo2.text+"\n";
aciklama.text=aciklama.text+"Bor oranı : % "+silo3.text+"\n";
if(secim3.selected==true) aciklama.text=aciklama.text+katkilar.text+" katkı
oranını : % "+String(silo4.value)+"\n";
aciklama.text=aciklama.text+"\nAnimasyon başlıyor..."+"\n";
secim1.enabled = false;
secim2.enabled = false;
secim3.enabled = false;
silo1.enabled = false;
silo3.enabled = false;
silo4.enabled = false;
tamam.enabled = false;
katkilar.enabled = false;
bilgi.enabled = false;
numune1_yuzde.text="";
numune1_br.text="";
numune1_hc.text="";
numune1_bh.text="";
num1.visible=false;

katki_tam.visible=false;
gotoAndPlay(19);
}

```

```
num1.visible=false;
numune1_yuzde.text="";
numune1_br.text="";
numune1_hc.text="";
numune1_bh.text="";
secim1.addEventListener(Event.CHANGE, secim1Select);
function secim1Select(event:Event) {
    if(secim1.selected==true) {
        aciklama.text="Neodim % oranını giriniz...\n";
        silo1.enabled = true;
        tamam.enabled = true;
        silo2.enabled = false;
        silo3.enabled = false;
        silo4.enabled = false;
        katkilar.enabled = false;
        bilgi.enabled = false;
        silo1.setFocus();
        silo1.setSelection(0, 2);
    }
}
secim2.addEventListener(Event.CHANGE, secim2Select);
function secim2Select(event:Event) {
    if(secim2.selected==true) {
        aciklama.text="Bor % oranını giriniz...\n";
        silo1.enabled = false;
        silo2.enabled = false;
        silo3.enabled = true;
        tamam.enabled = true;
        silo4.enabled = false;
        katkilar.enabled = false;
        bilgi.enabled = false;
    }
}
```

```

        silo3.setFocus();
        silo3.setSelection(0, 2);
    }
}
secim3.addEventListener(Event.CHANGE, secim3Select);
function secim3Select(event:Event) {
    if(secim3.selected===true) {
        aciklama.text="Katkı % oranını ve katkı maddesini seçiniz...\n";
        silo1.enabled = false;
        silo2.enabled = false;
        silo3.enabled = false;
        tamam.enabled = true;
        silo4.enabled = true;
        katkilar.enabled = true;
        bilgi.enabled = true;
        silo4.setFocus();
    }
}

```

Frame 718 Kodları :

```

    if(secim1.selected===true) { // Nd değişken
        yuzde_nd=Number(silo1.text);
        br_nd = -
0.0001558*Math.pow(yuzde_nd,4)+0.01715*Math.pow(yuzde_nd,3)-
0.6637*Math.pow(yuzde_nd,2)+10.21*yuzde_nd-40.84;
        hc_nd = -0.00008242*Math.pow(yuzde_nd,3)-
0.01436*Math.pow(yuzde_nd,2)+1.217*yuzde_nd-6.966;
        bhmax_nd = 0.00026*Math.pow(yuzde_nd,4)-
0.006882*Math.pow(yuzde_nd,3)-0.4002*Math.pow(yuzde_nd,2)+13.11*yuzde_nd-
63.16;
        aciklama.text=aciklama.text+"\nBr(Nd) =
"+String(int((br_nd)*100)/100) +" kG\n";
    }
}

```

```

        aciklama.text=aciklama.text+"Hc(Nd) =
"+String(int((hc_nd)*100)/100) +" KOe\n";
        aciklama.text=aciklama.text+"Bh max(Nd) =
"+String(int((bhmax_nd)*100)/100) +" MGOe\n";
        aciklama.text=aciklama.text+"Bh max(Teorik) =
"+String(int((br_nd*hc_nd/4)*100)/100) +" MGOe\n";

        numune1_yuzde.text=silo1.text+"Nd"+silo2.text+"Fe"+silo3.text+"B";
        numune1_br.text="Br = "+String(int((br_nd)*100)/100)+" KG";
        numune1_hc.text="Hc = "+String(int((hc_nd)*100)/100)+" KOe";

        numune1_bh.text="BHmax = "+String(int((bhmax_nd)*100)/100)+"
MGOe";

        num1.visible=true;
    }
    else if (secim2.selected==true) { // Bor değişken
        yuzde_b=Number(silo3.text);
        br_b = 0.000009754*Math.pow(yuzde_b,5)-
0.0009972*Math.pow(yuzde_b,4)+0.03813*Math.pow(yuzde_b,3)-
0.6705*Math.pow(yuzde_b,2)+4.959*yuzde_b+0.05367;
        hc_b = -
0.00008322*Math.pow(yuzde_b,4)+0.006099*Math.pow(yuzde_b,3)-
0.1613*Math.pow(yuzde_b,2)+2.004*yuzde_b-1.316;
        bhmax_b = -
0.0001754*Math.pow(yuzde_b,4)+0.02022*Math.pow(yuzde_b,3)-
0.7541*Math.pow(yuzde_b,2)+9.474*yuzde_b-6.858;
        aciklama.text=aciklama.text+"\nBr(B) =
"+String(int((br_b)*100)/100) +" kG\n";
        aciklama.text=aciklama.text+"Hc(B) = "+String(int((hc_b)*100)/100)
+" KOe\n";
    }
}

```

```

        aciklama.text=aciklama.text+"Bh max(B) =
"+String(int((bhmax_b)*100)/100) +" MGOe\n";
        aciklama.text=aciklama.text+"Bh max(Teorik) =
"+String(int((br_b*hc_b/4)*100)/100) +" MGOe\n";
        num1.visible=true;

        numune1_yuzde.text=silo1.text+"Nd"+silo2.text+"Fe"+silo3.text+"B";
        numune1_br.text="Br = "+String(int((br_b)*100)/100)+" KG";
        numune1_hc.text="Hc = "+String(int((hc_b)*100)/100)+" KOe";

        numune1_bh.text="BHmax = "+String(int((bhmax_b)*100)/100)+"
MGOe";
    }
    else if (secim3.selected==true) { // Katkılı
        yuzde_katki=silo4.value;
        switch(katkilar.selectedIndex) {
            case 0 : br_katki = -
0.02969*Math.pow(yuzde_katki,6)+0.4061*Math.pow(yuzde_katki,5)-
2.03*Math.pow(yuzde_katki,4)+4.555*Math.pow(yuzde_katki,3)-
5.048*Math.pow(yuzde_katki,2)+2.181*yuzde_katki+12; break;
            case 1 : br_katki = 0.002656*Math.pow(yuzde_katki,6)-
0.04875*Math.pow(yuzde_katki,5)+0.3254*Math.pow(yuzde_katki,4)-
0.9443*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.8405*Math.pow(yuzde_katki,2)-
0.4438*yuzde_katki+12; break;
            case 2 : br_katki = 2.769*Math.pow(10,-
5)*Math.pow(yuzde_katki,6)+0.0005505*Math.pow(yuzde_katki,5)-
0.004751*Math.pow(yuzde_katki,4)+0.02434*Math.pow(yuzde_katki,3)-
0.8509*Math.pow(yuzde_katki,2)-0.4179*yuzde_katki+12; break;
            case 3 : br_katki = 9.06*Math.pow(10,-
5)*Math.pow(yuzde_katki,6)-
0.003284*Math.pow(yuzde_katki,5)+0.04315*Math.pow(yuzde_katki,4)-

```

```

0.02561*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.6518*Math.pow(yuzde_katki,2)-
0.8792*yuzde_katki+12; break;
        case 4 : br_katki = 1.694*Math.pow(10,-
5)*Math.pow(yuzde_katki,6)-
0.0006699*Math.pow(yuzde_katki,5)+0.04315*Math.pow(yuzde_katki,4)-
0.04354*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.03859*Math.pow(yuzde_katki,2)-
0.1106*yuzde_katki+12; break;
        case 5 : br_katki = 0.001103*Math.pow(yuzde_katki,6)-
0.003334*Math.pow(yuzde_katki,5)+0.03832*Math.pow(yuzde_katki,4)-
0.209*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.4847*Math.pow(yuzde_katki,2)-
0.9313*yuzde_katki+11.99; break;
        case 6 : br_katki = 7.928*Math.pow(10,-
5)*Math.pow(yuzde_katki,6)-
0.002619*Math.pow(yuzde_katki,5)+0.03346*Math.pow(yuzde_katki,4)-
0.2043*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.5359*Math.pow(yuzde_katki,2)-
0.9768*yuzde_katki+11.99; break;
        case 7 : br_katki = 9.515*Math.pow(10,-
6)*Math.pow(yuzde_katki,6)+0.0002207*Math.pow(yuzde_katki,5)-
0.0008097*Math.pow(yuzde_katki,4)-
0.02473*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.3136*Math.pow(yuzde_katki,2)-
1.579*yuzde_katki+12; break;
        case 8 : br_katki = -5.397*Math.pow(10,-
5)*Math.pow(yuzde_katki,6)+0.001243*Math.pow(yuzde_katki,5)-
0.00874*Math.pow(yuzde_katki,4)+0.01178*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.01955*Ma
ath.pow(yuzde_katki,2)-0.4964*yuzde_katki+12.01; break;
        case 9 : br_katki = -1.097*Math.pow(10,-
5)*Math.pow(yuzde_katki,6)+0.0001658*Math.pow(yuzde_katki,5)+0.0004199*Ma
th.pow(yuzde_katki,4)-
0.01631*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.0463*Math.pow(yuzde_katki,2)-
0.2002*yuzde_katki+11.98; break;

```

```

        case 10 : br_katki = 0.1*Math.pow(yuzde_katki,2)-
2.74*yuzde_katki+12.01; break;
        case 11 : br_katki =
0.002315*Math.pow(yuzde_katki,5)+0.0429*Math.pow(yuzde_katki,4)-
0.279*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.7251*Math.pow(yuzde_katki,2)-
1.489*yuzde_katki+12; break;
        case 12 : br_katki = -
0.0001244*Math.pow(yuzde_katki,6)+0.004023*Math.pow(yuzde_katki,5)-
0.04979*Math.pow(yuzde_katki,4)+0.2833*Math.pow(yuzde_katki,3)-
0.7224*Math.pow(yuzde_katki,2)+0.03448*yuzde_katki+12.05; break;
        case 13 : br_katki =
0.008333*Math.pow(yuzde_katki,4)+0.075*Math.pow(yuzde_katki,3)+0.1667*Mat
h.pow(yuzde_katki,2)-0.4*yuzde_katki+12; break;
    }
    aciklama.text=aciklama.text+"Br("+katkilar.selectedItem.data+")==
"+String(int((br_katki)*100)/100)+"\n";

    numune1_yuzde.text=silo1.text+"Nd"+silo2.text+"Fe"+silo3.text+"B"+String
(silo4.value)+katkilar.selectedItem.data;
    numune1_bh.text="Br("+katkilar.selectedItem.data+")==
"+String(int((br_katki)*100)/100);
    num1.visible=true; // numune 1 resmini aç
    ticari.enabled=true;
}

```

Frame 731 Kodları :

```

stop();
    secim1.enabled = true;
    secim2.enabled = true;
    secim3.enabled = true;

```



## ÖZGEÇMİŞ

### ***Kişisel Bilgiler***

Soyadı, Adı : ÇAKIR, Musa Faruk  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 12.04.1972, Ankara  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (376) 213 11 95  
Faks : 0 (376) 213 36 01  
E-Posta : [mfarukcakir@gmail.com](mailto:mfarukcakir@gmail.com).

### ***Eğitim***

<i><b>Derece</b></i>	<i><b>Eğitim Birimi</b></i>	<i><b>Mezuniyet tarihi</b></i>
Yüksek lisans	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü	1999
Lisans	Selçuk Üniversitesi/ Elekt. Elektr. Müh.	1994
Lise	Yenimahalle Teknik Lisesi (Elektronik)	1990

### ***İş Deneyimi***

<i><b>Yıl</b></i>	<i><b>Yer</b></i>	<i><b>Görev</b></i>
1994-1995	Burç Şirketler Grubu	Bakım ve Servis Mühendisi
1995-2007	Ankara Üniv. Çankırı M.Y.O.	Öğretim Görevlisi
2007-	Çankırı Karatekin Üniv. M.Y.O	Öğretim Görevlisi

### ***Yabancı Dil***

İngilizce

### ***Hobiler***

Manyetizma, Elektronik Sistem Tasarımı, Bilgisayar Teknolojileri