

**NANO-KRİSTAL TOROID MANYETİK  
ÇEKİRDEKLERDE HİSTERESİS EĞRİSİNİN  
MODELLENMESİ**

**M. Cüneyt HACİSMAİLOĞLU**



T. C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANO-KRİSTAL TOROİD MANYETİK ÇEKİRDEKLERDE HİSTERESİS  
EĞRİSİNİN MODELLENMESİ**

**M. Cüneyt HACİSMAİLOĞLU**

Prof. Dr. Naim DEREBAŞI  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA - 2011  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

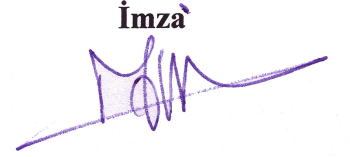
M. Cüneyt HACIİSMAİLOĞLU tarafından hazırlanan " Nano-Kristal Toroid Manyetik Çekirdeklerde Histeresis Eğrisinin Modellenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Naim DEREBAŞI

**Başkan:** Prof. Dr. Naim DEREBAŞI  
U. Ü. Fen Edebiyat Fakültesi  
Fizik Anabilim Dalı

İmza  

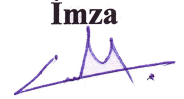

**Üye:** Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL  
U. Ü. Müh. Mim. Fakültesi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza  


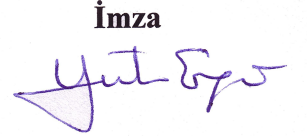
**Üye:** Doç. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU  
U. Ü. Fen Edebiyat Fakültesi  
Fizik Anabilim Dalı

İmza  


**Üye:** Prof. Dr. Cengizhan MURATHAN  
U. Ü. Fen Edebiyat Fakültesi  
Matematik Anabilim Dalı

İmza  


**Üye:** Prof. Dr. Yüksel ERGÜN  
A. Ü. Fen Fakültesi  
Fizik Anabilim Dalı

İmza  


**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Kadri ARSLAN**  
**Enstitü Müdürü**  
... / ... / .....

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**27/10/2011**

**İmza**

**M. Cüneyt HACİİSMAİLOĞLU**

## ÖZET

Doktora Tezi

### NANO-KRİSTAL TOROİD MANYETİK ÇEKİRDEKLERDE HİSTERESİS EĞRİSİNİN MODELLENMESİ

**M. Cüneyt HACİİSMAİLOĞLU**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Naim DEREBAŞI

Nanokristal yapıdaki toroid manyetik çekirdekler teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Güç transformatörleri, kesintisiz güç kaynakları, elektromanyetik uyumluluk (EMC) filtreleri, rüzgar jeneratörleri, frekans dönüştürücüler ve otomotiv uygulamaları toroid çekirdeklerinin uygulama alanları arasında sayılabilir. Toroid çekirdeği yapımında kullanılan malzemenin türü, manyetik indüksiyon ve mıknatıslama frekansı bu elektronik cihazların çalışma performansını doğrudan etkilemektedir. Toroid çekirdeğindeki güç kaybı cihaz performansını etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Bu güç kaybı, toroid çekirdeğine ait histeresis eğrisinin alanına eşittir. Bu nedenle cihaz tasarımında, kullanılacak toroid çekirdeklerinin histeresis eğrilerinin bilinmesi büyük bir öneme sahiptir. Geçmiş yıllarda, manyetik histeresis doğru bir şekilde tanımlamak için bir çok çalışma yapılmıştır. Bu modellerden bazıları (Ising, Landau-Lifshitz modeli gibi mikroskopik modeller) karmaşık hesaplamalar gerektirirken, diğerleri (Jiles-Atherton, Preisach modeli gibi makroskopik modeller) ise gerçek boyutlardaki problemlere daha kolay uygulanabilirler. Bu çalışmada, dinamik histeresis eğrilerini, sadece toroid çekirdeklerinin boyutlarına ve çalışma noktalarına göre tahmin ettirmek için bir yapay sinir ağı kullanılmıştır. Ayrıca, histeresis eğrilerini belirlemek için yeni bir matematiksel model geliştirilmiş ve deneysel eğriler Jiles-Atherton modeli ile teorik olarak elde edilmiştir. Deneysel veriler, yedi farklı mıknatıslama frekansında, çeşitli geometrik ölçülerde  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{15.5}B_7$  alaşımından üretilmiş nanokristal yapıdaki ticari VITROPERM<sup>®</sup> toroid manyetik çekirdeklerden ölçülmüş daha önceki bir çalışmadan alınmıştır. Üç model kullanılarak hesaplanan histeresis eğrileri deneysel eğriler ile karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağı ve matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile deneysel değerler, sırasıyla %99 ve %92 uyumlu olarak bulunmuştur. Jiles-Atherton modeli kullanılarak belirlenen histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum ise yaklaşık %85 değerinde elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Manyetizma, ferromanyetik malzemeler, nanokristal, histeresis modellemesi, Jiles-Atherton, yapay sinir ağları

**2011, xiv + 125 sayfa**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### MODELLING OF THE HYSTERESIS CURVE OF NANOCRYSTALLINE MAGNETIC TOROIDAL CORES

**M. Cüneyt HACİİSMAİLOĞLU**

Uludag University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics

**Supervisor:** Prof. Dr. Naim DEREBAŞI

Nano-crystalline toroidal magnetic cores have been widely used in technological applications. Application areas of them are power transformers, uninterrupted power supplies, switched-mode power supplies, solar inverters, frequency converters, electromagnetic compatibility (EMC) filters, wind generators and automotive applications. Sort of the core material, magnetic induction and magnetising frequency directly affect the operational performance of these electronic devices. Power loss in these toroidal cores is a crucial factor which affects the device performance. The power loss can be calculated from magnetic hysteresis curve area of the toroidal core. It has a great importance to know the hysteresis curve of cores as a designing parameter. There have been many attempts to describe accurately magnetic hysteresis in the past years. Some of the models require more complex calculations (microscopic models: Ising model, Landau-Lifshitz model etc.), while the others are simple to implement to the real scale problems (macroscopic models: Jiles-Atherton, Preisach models etc.). In this research, an artificial neural network model is used to predict the dynamic hysteresis curves due to only geometrical sizes of the cores and operational parameters without any measurement. A new mathematical model is also developed to describe the hysteresis curves. Furthermore, experimental dynamic hysteresis curves are theoretically obtained using the Jiles-Atherton model. The experimental data used in this research is previously measured from commercial VITROPERM™ nano-crystalline toroidal wound cores made from  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_7$  alloy with various geometrical sizes and at seven different magnetising frequencies. The results of the three models are compared with the experimental data. It is found that the correlation between the simulation results and the experimental data were 99% and 92% for the neural network and the mathematical model, respectively while the agreement of the Jiles-Atherton model the experimental data is obtained around 85%.

**Key words:** Magnetism, ferromagnetic materials, nanocrystalline, hysteresis modelling, Jiles-Atherton model, artificial neural networks

**2011, xiv + 125 pages**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında tecrübelerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Naim DEREBAŞI'na, tez izleme komitemde bulunan ve ortaya koydukları fikirler ile beni yönlendiren Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL ve Doç. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmalarımın son aşamasında gece geç saatlere kadar beni yalnız bırakmayan arkadaşlarım Arş. Gör. Özkan ŞAHİN ve Arş. Gör. Adnan KILIÇ'a, çalışmalarım sırasında, bölümdeki görevlerimi kendi istekleri ile üzerlerine alarak benim yoğunluğumu azaltan ve bana rahat bir çalışma ortamı sağlayan değerli oda arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZER ve Arş. Gör. Banu KUCUR'a, hemen her konuda destek veren sevgili ağabeylerim Doç. Dr. İlker KÜÇÜK, Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK ve Yrd. Doç. Dr. Ercan PİLİÇER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bugüne kadar hiçbir zaman, hiçbir konuda benden desteklerini esirgemeyen, başta sevgili babam İ. Hakkı HACIİSMAİLOĞLU olmak üzere tüm aileme ve özellikle çalışmalarımı tamamlamak için birçok zaman kendisini tek başına bırakmak zorunda kaldığım, bu duruma sabırla katlanan, anlayış gösteren, bana her türlü yardımı sağlayan ve hayatıma değer kazandıran sevgili eşim Mürşide'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	4
2.1. Manyetik yük .....	4
2.2. Elektronların manyetik momentleri .....	5
2.3. Atomların manyetik momentleri .....	6
2.4. Ferromanyetik maddeler .....	7
2.5. Mıknatıslanma eğrisi .....	7
2.6. Histeresis .....	10
2.6.1. Manyetik histeresis .....	10
2.7. Histeresis modelleri .....	12
2.7.1. Fröhlich-Kenelly modeli .....	13
2.7.2. Statik Jiles-Atherton modeli .....	15
2.7.3. Jiles-Atherton model parametrelerinin belirlenmesi .....	20
2.7.4. Dinamik Jiles-Atherton modeli .....	24
2.8. Yapay sinir ağları .....	27
2.8.1. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları .....	29
2.8.2. Yapay sinir ağlarının yapıları .....	30
2.8.3. İleri beslemeli yapay sinir ağları .....	32
2.8.4. Geri beslemeli (yayımlı) yapay sinir ağları .....	32
2.8.5. Basit bir yapay sinir ağının çalışma ilkesi .....	33
2.8.6. Bir yapay sinir ağının öğrenmesi .....	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	36
3.1. Deneysel ölçüm sistemi .....	36
3.2. İncelenen toroid çekirdekleri ve özellikleri .....	40
3.3. JA modelinin deneysel verilere uygulanması .....	41
3.3.1. JA model parametrelerinin optimizasyonu için Simulink modeli .....	41
3.3.2. Dinamik JA modelinin çözümü .....	44



3.4.1. İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı .....	49
3.5. Doyum durumundaki histeresis eğrileri için öngörülen matematiksel model .....	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	57
4.1. Statik histeresis eğrileri .....	57
4.2. Deneysel histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi .....	61
4.3. Dinamik histeresis eğrilerinin yapay sinir ağları ile benzetişimi .....	64
4.3.1. Test verilerine ait 0,6 T ve 1,0 T manyetik indüksiyon değerleri için benzetişim sonuçları .....	65
4.3.2. Test verilerine ait #W628 ve #W630 toroidleri için doyum durumundaki histeresis eğrilerinin YSA benzetişimi .....	82
4.4. Doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri için matematiksel modelin uygulaması .....	88
4.5. Toroid çekirdekleri için deneysel eğriler ile JA modeli, yapay sinir ağı benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen dinamik histeresis eğrilerinin karşılaştırılması .....	89
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	105
KAYNAKLAR .....	108
EKLER .....	113
EK 1. JA modelinin çözümü için hazırlanan Simulink modelinde kullanılan blokların özellikleri .....	114
EK 2. Dinamik histeresis eğrileri için MATLAB® ile oluşturulan yapay sinir ağının yapısı .....	118
EK 3. Matematiksel model için oluşturulan yapay sinir ağının yapısı .....	120
EK 4. $V_{RMS}/V_{ort}$ oranının hesaplanması .....	122
ÖZGEÇMİŞ .....	124

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$m$	Ağdaki katman sayısı
$\mathbf{W}$	Ağırlık matrisi
$I$	Akım
$f_a$	Aktivasyon fonksiyonu
$V(t)$	Algılama bobini üzerinde indüklenen gerilim
$N_2$	Algılama bobinin sarım sayısı
$V_{RMS}$	Algılama bobininde indüklenen gerilimin etkin değeri
$M_{an}$	Anhisteretik mıknatıslanma
$k_2$	Anormal kayıp parametresi
$\delta L_a$	Anormal kayıplar
$\mu_r$	Bağıl manyetik geçirgenlik
$\chi_{in}$	Başlangıç diferansiyel alınganlığı
$E[\cdot]$	Beklenen değer
$\mu_0$	Boşluğun manyetik geçirgenliği
$G$	Boyutsuz bir sabit
$e$	Çıkıştaki hata
$\chi$	Diferansiyel manyetik alınganlık
$L_{din}$	Dinamik histeresis kayıpları, dinamik güç kayıpları
$\eta$	Dolgu faktörü
$B_s$	Doyum manyetik indüksiyonu
$M_s$	Doyum mıknatıslanması
$m$	Elektron kütlesi
$e$	Elektron yükü
$N_1$	Enerjileme bobinin sarım sayısı
$H_e$	Etkin alan
$m_c$	Eş.(3.32)'de kullanılan, histeresis eğrisinin $H_c$ noktasındaki eğim ile ilgili parametre
$f$	Frekans
$\alpha_F$	Fröhlich parametresi
$\beta_F$	Fröhlich parametresi
$\beta$	Geometrik faktör
$t$	Hedef değer
$v$	Hız
$\chi_m$	Histeresis eğrisinin uç noktasındaki diferansiyel alınganlık
$H_m$	Histeresis eğrisinin uç noktasındaki manyetik alan değeri
$M_m$	Histeresis eğrisinin uç noktasındaki mıknatıslanma değeri
$W_{hyst}$	Histeresis kaybı
$v_i$	$i$ .inci nörona ait girişlerin taban değerleri ile ağırlıklı toplamı
$B_r$	Kalıcı manyetik indüksiyon
$M_r$	Kalıcı mıknatıslanma
$\chi_r$	Kalıcı mıknatıslanma noktasındaki diferansiyel alınganlık
$d$	Kalınlık
$\mathbf{a}$	Katman nöronları için giriş vektörü
$S$	Kesit alanı
$\delta L_{ec}$	Klasik girdap akımı kayıpları
$k_l$	Klasik girdap akımı kayıplarını belirleyen parametresi
$a$	Langevin parametresi (şekil parametresi)
$Y$	$m \times 1$ boyutlu çıkış vektörü

$W$	$m \times n$ boyutlu ağırlık matrisi
$\rho$	Malzemenin elektriksel öz direnci
$W_{giriş}$	Malzemenin mıknatıslanması için verilen enerji
$V_0$	Manyetik alan boyutunda bir parametre
$W_{mag}$	Manyetik durgun enerjideki değişim
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
$B$	Manyetik indüksiyon
$B_{max}$	Manyetik indüksiyon tepe değeri
$\mu_m$	Manyetik moment
$f$	Mıknatıslama frekansı, oluşturulan manyetik alanın değişim frekansı
$M$	Mıknatıslanma
$\delta$	Mıknatıslanma yönünü
$a$	Moleküler alan sabiti
$X$	$n \times 1$ boyutlu giriş vektörü
$a$	Nöron giriş değeri
$\lambda$	Öğrenme hızı
$x_j^p$	$p$ .inci öğrenme düzeyi için $i$ .inci giriş
$H$	Planck sabiti
$H_c$	Sıfırlayıcı alan
$\chi_c$	Sıfırlayıcı alan noktasındaki diferansiyel alınganlık
$\mu_{spin}$	Spin manyetik moment
$w$	Şerit şeklindeki malzemeler için genişlik
<b>B</b>	Taban matrisi
$k$	Takılma sabiti
$M_{rev}$	Tersinir mıknatıslanma
$c$	Tersinirlik sabiti
$M_{irr}$	Tersinmez mıknatıslanma
$d_1$	Toroid çekirdeğinin dış çapı
$d_2$	Toroid çekirdeğinin iç çapı
$A$	Toroid çekirdeğinin kesit alanı
$m_{toroid}$	Toroid çekirdeğinin kütlesi
$l_{ort}$	Toroid çekirdeğinin ortalama çevresi
$d_{toroid}$	Toroid çekirdeğinin yoğunluğu
$w$	Toroid çekirdeğinin yüksekliği, şerit genişliği
$H$	Uygulanan dış manyetik alan
$m$	Yapay sinir ağı çıkış sayısı
$w_1, w_2, w_3$	Yapay sinir ağı giriş ağılıkları
$n$	Yapay sinir ağı giriş sayısı
$x_1, x_2, x_3$	Yapay sinir ağı giriş verileri
$y_j^p$	Yapay sinir ağında $x_j^p$ girişi için $j$ .inci hesaplanan çıkış
$t_j^p$	Yapay sinir ağında $x_j^p$ girişi için $j$ .inci istenilen değer
$y_i$	Yapay sinir ağında $i$ .inci çıkış
$\Delta w_{ij}$	Yapay sinir ağında $i$ .inci girişten $j$ .inci çıkışa olan bağlantıda ağırlık değişimi
$net_i$	Yapay sinir ağında $i$ .inci nöron için ağ girişi
$x_j$	Yapay sinir ağında $j$ .inci giriş
$w_{ij}$	Yapay sinir ağında $j$ .inci giriş ve $i$ .inci çıkış nöronları arasındaki ağırlık
$\Delta W$	Yapay sinir ağında öğrenme sırasındaki ağırlık değişimi
$W_{eski}$	Yapay sinir ağında öğrenmeden önceki eski ağırlık değeri
$W_{yeni}$	Yapay sinir ağında öğrenmeden sonraki yeni ağırlık değeri
$r$	Yarıçap

$n$	Yörüngesel açısız kuantum sayısı
$\mu_{yörünge}$	Yörüngesel manyetik moment

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
MLP	Çok katmanlı algılayıcı ağ (multilayer perceptron)
EEG	Elektorencefalografi
ECG	Elektrokardiografi
JA	Jiles-Atherton
MSE	Ortalama karesel hata
YSA	Yapay sinir ağı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Dairesel yörünge üzerinde hareket eden elektron tarafından oluşturulan manyetik moment.....	4
Şekil 2.2.	Ferromanyetik bir malzemenin doyum mıknatıslanmasının sıcaklıkla değişimi .....	7
Şekil 2.3.	(a) Genel mıknatıslanma eğrisi ve (b) uygulanan $H$ manyetik alanı ile bağlı manyetik geçirgenlik değişimi .....	9
Şekil 2.4.	Deneysel mıknatıslanma eğrisi ve mıknatıslanma bileşenlerini gösteren bölgeler .....	9
Şekil 2.5.	Ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanarak histeresis eğrisinin oluşumu .....	11
Şekil 2.6.	Ferromanyetik malzemenin histeresis eğrisi .....	11
Şekil 2.7.	Tipik bir histeresis eğrisi ve domainlere bağlı mıknatıslanma süreci .....	12
Şekil 2.8.	Ferromanyetik bir malzeme için çeşitli şekillerdeki mıknatıslanma ve histeresis eğrileri .....	13
Şekil 2.9.	Fröhlich modelinden elde edilen anhisteretik mıknatıslanma eğrisi .....	14
Şekil 2.10.	Fröhlich modelinden elde edilen histeresis eğrisi .....	14
Şekil 2.11.	JA modeli kullanılarak elde edilmiş histeresis eğrisi ve histeresis eğrisini JA model parametrelerine bağlı olarak değişimi.....	19
Şekil 2.12.	JA model parametrelerinin belirlenmesi için histeresis eğrisinde hesaplanması gereken özel noktalar .....	20
Şekil 2.13.	Biyolojik nöron yapısı .....	29
Şekil 2.14.	Bir yapay sinir ağının genel yapısı .....	31
Şekil 2.15.	Yapay sinir ağlarında kullanılan transfer fonksiyonları .....	31
Şekil 2.16.	Yapılarına göre yapay sinir ağları .....	32
Şekil 2.17.	İleri beslemeli bir yapay sinir ağı yapısı .....	32
Şekil 2.18.	Geri beslemeli yapay sinir ağının genel yapısı.....	33
Şekil 2.19.	Tek nöronlu yapay sinir ağı.....	33
Şekil 2.20.	Basit bir algılayıcı ağın yapısı .....	34
Şekil 3.1.	Histeresis eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan deneysel düzenek .....	36
Şekil 3.2.	Toroid çekirdeğinin geometrik yapısı .....	40
Şekil 3.3.	JA model parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan Simulink modeli.....	41
Şekil 3.4.	Test verisine ait histeresis eğrisi ve optimizasyon sonucu elde edilen JA modeli .....	43
Şekil 3.5.	#W424 toroidi için elde edilen statik histeresis eğrileri .....	44
Şekil 3.6.	Dinamik JA modelinin çözümü için hazırlanan Simulink modeli .....	45
Şekil 3.7.	Deneysel ve dinamik JA modelinin çözümünden elde edilen histeresis eğrileri .....	46
Şekil 3.8.	#W424 toroidi için periyot başına güç kayıplarının frekansın karekökü ile değişimi .....	47
Şekil 3.9.	1, 2, 5 ve 10 kHz mıknatıslama frekansı değerleri için #W424 toroidine ait deneysel ve JA modelinden elde edilen histeresis eğrileri.....	48
Şekil 3.10.	(a) İki gizli katmana sahip MLP'nin şematik gösterimi (b) MLP'deki iki temel sinyalin akış yönü: fonksiyon sinyalleri ileri doğru ve hata sinyalleri geriye doğru yayılırlar .....	50
Şekil 3.11.	İki katmanlı MLP .....	51

Şekil 3.12.	Yapay sinir ağının performans grafiği .....	52
Şekil 3.13.	Yapay sinir ağının öğrenmesi sonucundaki regresyon grafiği .....	53
Şekil 3.14.	Eş.(3.32) kullanılarak elde edilmiş histeresis eğrisi ve üzerindeki noktalar .....	54
Şekil 3.15.	Eş.(3.32) kullanılarak elde edilen histeresis eğrilerinin (a) $M_m$ , (b) $H_c$ ve (c) $m_c$ parametrelerine bağlı olarak değişimi .....	55
Şekil 3.16.	YSA sonucunda elde edilen hassasiyet analizi.....	56
Şekil 3.17.	Hassasiyet analizine göre $m_c$ parametresinin frekans ve sıfırlayıcı alan noktasındaki alınganlık ile değişimi .....	56
Şekil 4.1.	#W380 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri .....	58
Şekil 4.2.	#W423 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri.....	58
Şekil 4.3.	#W424 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri.....	59
Şekil 4.4.	#W624 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri.....	59
Şekil 4.5.	Statik histeresis eğrileri için deneysel ve teorik noktalar arasındaki bağıl hatalar .....	60
Şekil 4.6.	#W380 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi .....	61
Şekil 4.7.	#W423 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi .....	61
Şekil 4.8.	#W424 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi .....	62
Şekil 4.9.	#W624 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi .....	62
Şekil 4.10.	#W628 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi .....	63
Şekil 4.11.	#W630 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi .....	63
Şekil 4.12.	#W380 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	66
Şekil 4.13.	#W380 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	66
Şekil 4.14.	#W380 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	67
Şekil 4.15.	#W380 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	67
Şekil 4.16.	#W380 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	68
Şekil 4.17.	#W380 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	68
Şekil 4.18.	#W423 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	69
Şekil 4.19.	#W423 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	69
Şekil 4.20.	#W423 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	70
Şekil 4.21.	#W423 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	70
Şekil 4.22.	#W423 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	71

Şekil 4.23.	#W423 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	71
Şekil 4.24.	#W424 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	72
Şekil 4.25.	#W424 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	72
Şekil 4.26.	#W424 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	73
Şekil 4.27.	#W424 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	73
Şekil 4.28.	#W424 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	74
Şekil 4.29.	#W424 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	74
Şekil 4.30.	#W624 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	75
Şekil 4.31.	#W624 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	75
Şekil 4.32.	#W624 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	76
Şekil 4.33.	#W624 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	76
Şekil 4.34.	#W624 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	77
Şekil 4.35.	#W624 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	77
Şekil 4.36.	#W628 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	78
Şekil 4.37.	#W628 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	78
Şekil 4.38.	#W628 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	79
Şekil 4.39.	#W628 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	79
Şekil 4.40.	#W630 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	80
Şekil 4.41.	#W630 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	80
Şekil 4.42.	#W630 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	81
Şekil 4.43.	#W630 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri.....	81
Şekil 4.44.	#W628 toroidi için 1 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri .....	82
Şekil 4.45.	#W628 toroidi için 2 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri .....	82

Şekil 4.46.	#W628 toroidi için 5 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri .....	83
Şekil 4.47.	#W628 toroidi için 10 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri .....	83
Şekil 4.48.	1, 2, 5 ve 10 kHz'de #W628 toroidi için YSA benzetişiminden elde edilen değerlerin deneysel değerlere göre bağıl hatası.....	84
Şekil 4.49.	#W630 toroidi için 1 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri .....	85
Şekil 4.50.	#W630 toroidi için 2 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri .....	85
Şekil 4.51.	#W630 toroidi için 5 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri .....	86
Şekil 4.52.	1, 2 ve 5 kHz'de #W630 toroidi için YSA benzetişiminden elde edilen değerlerin deneysel değerlere göre bağıl hatası .....	86
Şekil 4.53.	#W380 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	89
Şekil 4.54.	#W380 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	89
Şekil 4.55.	#W380 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	90
Şekil 4.56.	#W380 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	90
Şekil 4.57.	#W380 toroidine ait 20 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	91
Şekil 4.58.	#W380 toroidine ait 50 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	91
Şekil 4.59.	1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağıl hataları .....	92
Şekil 4.60.	#W423 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	93
Şekil 4.61.	#W423 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	93
Şekil 4.62.	#W423 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	94
Şekil 4.63.	#W423 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	94
Şekil 4.64.	#W423 toroidine ait 20 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	95
Şekil 4.65.	#W423 toroidine ait 50 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	95



Şekil 4.66.	1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağlı hataları.....	96
Şekil 4.67.	#W424 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	97
Şekil 4.68.	#W424 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	97
Şekil 4.69.	#W424 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	98
Şekil 4.70.	#W424 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	98
Şekil 4.71.	#W424 toroidine ait 20 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	99
Şekil 4.72.	#W424 toroidine ait 50 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	99
Şekil 4.73.	1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağlı hataları.....	100
Şekil 4.74.	#W624 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	101
Şekil 4.75.	#W624 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	101
Şekil 4.76.	#W624 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	102
Şekil 4.77.	#W624 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri.....	102
Şekil 4.78.	1, 2, 5 ve 10 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağlı hataları.....	103

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Jiles-Atherton model parametreleri ve anlamları .....	18
Çizelge 2.2.	JA model parametrelerinin belirlenmesi için gerekli olan noktalar ve bu noktalara bağlı olan değişkenler .....	20
Çizelge 3.1.	İncelenen toroid çekirdekleri ve özellikleri .....	40
Çizelge 3.2.	Test verisine ait gerçek, başlangıç ve optimizasyon sonucu elde edilen JA model parametresi değerleri .....	43
Çizelge 3.3.	#W424 toroidi için başlangıç ve elde edilen JA model parametresi değerleri .....	44
Çizelge 3.4.	Dinamik JA modeli için test verilerine ait parametre değerleri .....	45
Çizelge 4.1.	#W380, #W423, #W424 ve #W624 toroidleri için elde edilen JA model parametreleri .....	57
Çizelge 4.2.	Statik histeresis eğrilerinin Eş.(3.32) kullanılarak belirlenmesi için gerekli olan parametreler .....	57
Çizelge 4.3.	#W380, #W423, #W424 ve #W624 toroidlerine ait JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri .....	60
Çizelge 4.4.	Mıknatıslama frekansı değerlerine karşılık deneysel histeresis eğrilerinden hesaplanan sınırlayıcı alan değerleri .....	64
Çizelge 4.5.	YSA'da öğrenme verisi olarak kullanılan toroid çekirdeği boyutları ile çalışma parametreleri .....	65
Çizelge 4.6.	YSA'da test verisi olarak kullanılan toroid çekirdeği boyutları ile çalışma parametreleri .....	65
Çizelge 4.7.	#W628 toroidi için 1, 2, 5 ve 10 kHz frekanslarında YSA benzetişiminden elde edilen dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri .....	84
Çizelge 4.8.	#W630 toroidi için 1, 2ve 5 kHz frekanslarında YSA benzetişiminden elde edilen dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri .....	87
Çizelge 4.9.	Doyum durumundaki histeresis eğrilerinin elde edilmesi için Eş.(3.32)'de kullanılan parametreler .....	88
Çizelge 4.10.	#W380 toroidi için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresisi eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri .....	92
Çizelge 4.11.	#W423 toroidi için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresisi eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri .....	96
Çizelge 4.12.	#W424 toroidi için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresisi eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri .....	100
Çizelge 4.13.	#W624 toroidi için YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri .....	103

## 1. GİRİŞ

Demir tabanlı süper yumuşak manyetik özellik gösteren  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$  alaşımı ilk olarak 1988 yılında Yoshizawa, Oguma ve Yamauchi tarafından bulunmuştur. Bu alaşım düşük kayıplar, yüksek geçirgenlik, neredeyse sıfır manyetik gerilme ve 1,3 T doyum manyetik indüksiyon değeri gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca bulunan bu yeni alaşımın en önemli diğer bir özelliği de 10-15 nm grain (aynı doğrultuda yönelmiş manyetik domainlerden oluşan bölge) boyutlarında olan cisim merkezli kübik (b.c.c.) örgüye sahip mikro yapısıdır. Bundan dolayı bu tür alaşımlar daha sonra "*nanokristal malzeme*" olarak adlandırılmıştır (Herzer 1997). Hitachi tarafından FINEMET® ve Vacuumschmelze tarafından da VITROVAC® ve VITROPERM® adları ile ilk ticari nanokristal malzemeler üretilmiştir (Bossche ve Valchev 2005).

Ferromanyetik bir malzemenin histeresis eğrisi mikroyapı, özellikle de grain boyutlarına göre değişiklik göstermektedir. Amorf ve nanokristal malzemelerin bulunmasından önce küçük grain boyutlarına sahip manyetik malzemelerin daha sert özellik gösterdikleri düşünülmekteydi. Ancak nanometre boyutlarında grain yapısına sahip amorf ve nanokristal malzemelerin bulunmasından sonra bu anlayış değişmiştir (Herzer 1997).

Yumuşak manyetik malzeme olması ve oldukça düşük manyetik kayıplardan dolayı nanokristal malzemeler özellikle güç elektroniğinde hemen uygulama alanı bulmuştur (Bossche ve Valchev 2005). Güç transformatörleri, kesintisiz güç kaynakları, elektromanyetik uyumluluk (EMC) filtreleri, rüzgar jeneratörleri, frekans dönüştürücüler ve otomotiv uygulamaları (Anonim 2011) nanokristal malzemelerden üretilen toroid manyetik çekirdeklerin uygulama alanları arasında sayılabilir.

Toroid çekirdeklerinin üretildiği malzemelerin türü, yapısı, geometrik boyutları, manyetik indüksiyonun tepe değeri ve mıknatıslama frekansı toroidlerin manyetik özelliklerini dolayısı ile bu toroidlerin kullanıldığı elektrikli ve elektronik cihazların çalışma verimlerini etkilemektedir. Toroid çekirdeklerindeki güç kaybı cihaz verimini etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Ferromanyetik bir malzemedeki toplam güç kaybı, malzemenin histeresis eğrisi tarafından sınırlandırılmış alana eşittir. Bu nedenle

kullanılacak ferromanyetik malzemenin histeresis eğrisinin bilinmesi cihaz tasarımı için önemli bir noktadır.

Manyetik histeresisi teorik olarak tanımlamak için geçmişte birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu modellerden bazıları deneysel verilere eğri uydurma şeklindedir ve histeresise neden olan fiziksel değişimleri dikkate almaz (Liorzou ve ark. 2000). Histeresis modellerinden bazıları manyetik malzemenin mikroyapısındaki değişimleri dikkate alır (mikroskopik modeller). Bunlar arasında Ising ve Landau-Lifshitz modelleri sayılabilir (Kis 2006). Mikroskopik modeller, histeresis olgusunun altında yatan fiziksel süreci doğru olarak açıklamasına rağmen, hesaplamaları çok zaman alması nedeniyle teknolojik uygulamalarda kullanışsızdırlar. Literatürdeki histeresis modellerinin oluşturduğu diğer bir grup ise makroskopik modellerdir. Fröhlich, Stoner-Wohlfarth, Jiles-Atherton ve Preisach modelleri makroskopik histeresis modellerine örnek olarak verilebilirler (Liorzou ve ark. 2000). Bu modeller, malzemenin mıknatıslanması sırasındaki fiziksel süreçleri içeren matematiksel modellerdir.

Biyolojik sistemlerden esinlenerek geliştirilmiş yapay sinir ağı ağları, günümüzde askeri savunma, ekonomi, elektronik, iletişim, meteoroloji, otomotiv ve üretim süreçleri gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Hagan 1996). Bunun nedeni, hava tahmini gibi oldukça karmaşık süreçlerin yapay sinir ağları ile kolay bir şekilde tanımlanabilmesinden kaynaklanmaktadır. Herhangi bir süreç sonucunda deneysel olarak elde edilmiş veriler yapay sinir ağı modelinde kullanılarak benzer durumların sonuçları bu model sayesinde tahmin edilebilir. Son zamanlarda elektromanyetik uygulamalarda da yapay sinir ağlarının kullanılması hızla artmıştır (Miti ve ark. 2003), (Küçük ve Derebaşı 2006), (Zidaric ve ark. 2006). Toroid çekirdeklerinin manyetik özelliklerinin deneysel olarak ölçülmesi uzun bir süreçtir. Uygulamada yapay sinir ağları kullanılarak toroidlerin geometrik özellikleri, istenilen manyetik indüksiyon ve çalışma frekansı değerlerine göre manyetik özelliklerin belirlenmesi oldukça kısa sürelerde yapılabilmektedir (Miti ve ark. 2003).

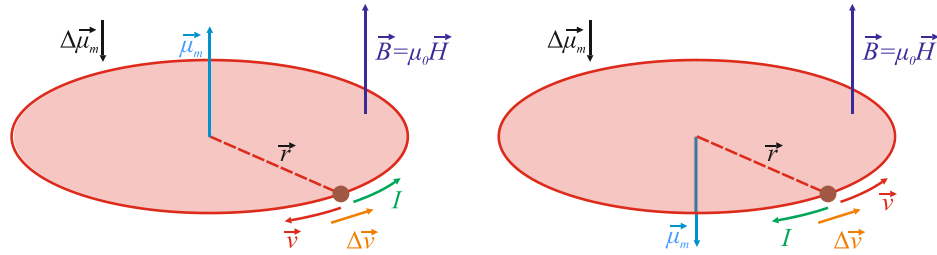
Bu çalışmada, VITROPERM<sup>®</sup> 500F toroid çekirdeklerine ait, daha önceden elde edilen (Derebaşı ve ark. 2000) dinamik histeresis eğrilerinin yapay sinir ağı modeli ile

öğrenme verileri için benzetimi yapılmıştır. Test verilerine ait toroid çekirdekleri için bu model kullanılarak, test toroidlerinin manyetik histeresis eğrileri tahmin edilmiştir. Doyum durumundaki histeresis eğrilerinin belirlenebilmesi için yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Ayrıca Jiles-Atherton modeli kullanılarak, toroid çekirdekleri için teorik histeresis eğriler elde edilmiştir. Bu üç modelden elde edilen sonuçlar deneysel histeresis eğrileri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Manyetik yük

Elektrik alan, durgun ya da hareketli elektrik yükleri tarafından oluşturulmaktadır. En küçük elektrik yük elemanı *elektrik tek kutup* olarak adlandırılmaktadır. Elektrik tek kutup, kendisi elektrik alan kaynağı olan yüklü bir parçacıktır. Bunun yanında, deneysel çalışmalar göstermektedir ki manyetik alanlar, sadece akım veya zamanla değişen elektrik alanlar tarafından oluşturulmaktadır. Buna göre manyetik alanın kaynağı hareketli yüklerdir. Manyetik alanın temel kaynağı, küçük bir akım halkası (ya da spin hareketi yapan yüklü bir parçacık) ile temsil edilen *manyetik tek kutup*'tur (Şekil 2.1). İlk olarak 1269'da Pierre De Maricourt tarafından yapılan gözlemlerde, en küçük mıknatısın bile iki kutbu olduğu görülmüştür ve bu gerçek günümüzde de hala geçerlidir (Rothwell 2001).



Şekil 2.1. Dairesel yörünge üzerinde hareket eden elektron tarafından oluşturulan manyetik moment (Lacheisserie 2005)

Dairesel bir yörünge üzerinde hareket eden bir elektronu ele alalım. Elektronun hareketi, bir akım halkası üzerinden geçen akımın oluşturduğu durum ile aynıdır. Yörünge düzlemine dik bir manyetik alan uygulandığında, uygulanan dış manyetik alandan kaynaklanan manyetik akıyı azaltacak şekilde akımda bir değişim oluşur (Lenz yasası). Bunun sonucunda, uygulanan manyetik alan ile zıt yönlü yörüngesel manyetik moment değişimi ortaya çıkar. Bu manyetik moment değişimi, elektronun yörünge üzerindeki hareketi hangi yönde olursa olsun aynıdır. Yani yörüngesel manyetik moment değişimi her zaman uygulanan alana zıt yönlüdür (Lacheisserie 2005).

## 2.2. Elektronların manyetik momentleri

Yörüngesel ve spin hareketi olmak üzere iki tür elektron hareketi vardır ve bunların her biri kendisi ile ilişkili manyetik momente sahiptir. Elektronun çekirdek etrafındaki yörüngesel hareketi direnci sıfır olan bir tel üzerinde dolanan akıma benzetilebilir. Bu harekete bağlı elektron manyetik momenti

$$\mu_m = (\text{akım halkasının alanı}) \times (\text{akım}) \quad (2.1)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Yörüngesel manyetik momentinin hesaplanabilmesi için, yörüngenin büyüklüğü ve şekli ile elektron hızının bilinmesi gerekmektedir.  $r$  yarıçaplı dairesel yörünge üzerinde  $v$  hızı ile dolanan  $e$  yüküne sahip elektron oluşturduğu akım

$$I = e \frac{v}{2\pi r} \quad (2.2)$$

şeklinde olur. Buna göre yörüngesel harekete bağlı manyetik moment için

$$\mu_{\text{yörünge}} = \pi r^2 \frac{ev}{2\pi r} = \frac{evr}{2} \quad (2.3)$$

ifadesi elde edilir. Buna ek olarak elektronun açısal momentumu

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.4)$$

olarak verilmektedir. Burada  $m$  elektron kütlesi,  $n$  yörüngesel açısal kuantum sayısı ve  $h$  ise Planck sabitidir. Bu iki eşitlik birleştirilirse yörüngesel manyetik moment

$$\mu_{\text{yörünge}} = \frac{eh}{4\pi m} \quad (2.5)$$

olarak elde edilir.

Manyetik alana maruz bırakılan sıcak gazların optik spektrumunda ortaya çıkan özellikleri (Zeeman etkisi) açıklamak için ilk defa 1925 yılında elektron spini kavramı kullanılmıştır. Daha sonra dalga mekaniği ile elektron spini kuramsal olarak

kanıtlanmıştır. Spin, tüm sıcaklıklarda maddelerin tüm durumlarında bulunan elektronların genel bir özelliğidir. Deneysel ve teorik çalışmalardan sonra elektronun spin hareketine bağlı manyetik momenti

$$\mu_{spin} = \frac{eh}{4\pi m} = \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{C})(6,62 \times 10^{-27} \text{Js})}{4\pi(9,11 \times 10^{-31} \text{kg})} = 9,27 \times 10^{-24} \text{J/T} \quad (2.6)$$

olarak bulunmuştur. Buna göre bir elektronun spin ve birinci Bohr yarıçapındaki hareketlerine bağlı manyetik momentleri birbirine eşittir (Cullity 2009).

### 2.3. Atomların manyetik momentleri

Atomlar, kendi yörüngelerinde dönen ve kendi eksenleri etrafında spin hareketi yapan çok sayıda elektrona sahiptirler. Bu nedenle bir atomun manyetik momenti, tüm elektronlarının spin eksenine paralel manyetik momentleri ile yörünge düzlemine dik manyetik momentlerinin vektörel toplamına eşittir. Atom manyetik momenti için iki olasılık ortaya çıkar:

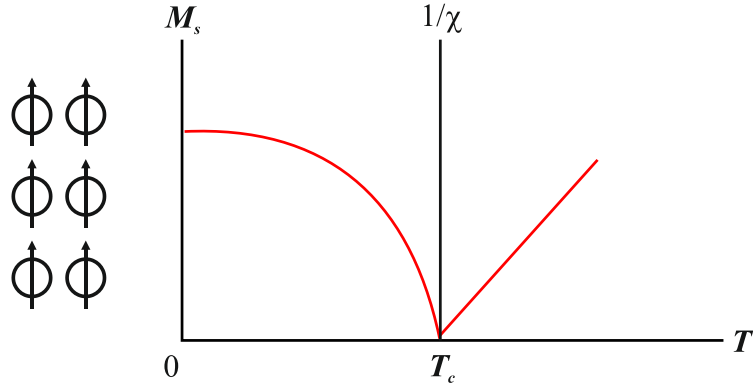
1. Tüm elektronların manyetik momentleri birbirlerini sıfırlayacak şekilde yönelirler ve atomun net manyetik momenti sıfır olur. Bu durum *diamanyetizmaya* yol açar.
2. Tüm elektronların manyetik momentlerinin yönelimi birbirlerini sıfırlamaz ve atom net bir manyetik momente sahip olur. Böyle bir atom kısaca *manyetik atom* olarak adlandırılır. Bu tür manyetik atomlardan oluşan maddeler *para-*, *ferro-*, *antiferro-* ya da *ferrimanyetik* maddeler denir (Cullity 2009).

Madde içerisinde aynı doğrultuda yönelmiş manyetik momentlerin oluşturduğu küçük bölgelere "*domain*" denir. Domainler birbirlerinden "*domain duvarı*" denilen sınırlarla ayrılmışlardır. Domain terimi ilk olarak 1906 yılında Weiss tarafından bir hipotez olarak kullanılmış ve 1949'da Williams, Borzort ve Shockley tarafından deneysel olarak kanıtlanmıştır (Bastos 2003).



## 2.4. Ferromanyetik maddeler

Ferromanyetik maddelerde manyetik momentler birbirlerine paralel olarak yönlenmişlerdir. Bundan dolayı komşu manyetik momentler arasındaki etkileşim oldukça kuvvetlidir. Bu kuvvetli etkileşim, ferromanyetik maddeyi kendiliğinden doyuma ulaştırmıştır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi mıknatıslanma sıcaklıktaki artış ile azalmakta ve belli bir sıcaklık değerinde sıfır olmaktadır. Mıknatıslanmanın sıfır olduğu bu sıcaklık değerine *Curie sıcaklığı* denir. Curie sıcaklığından sonra mıknatıslanma sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmaya devam eder ve ferromanyetik madde paramanyetik özellik göstermeye başlar.



Şekil 2.2. Ferromanyetik bir malzemenin doyum mıknatıslanmasının sıcaklıkla değişimi  
Ferromanyetik maddelerin alınganlık değeri diamanyetik ve paramanyetik maddelerin alınganlıklarından çok büyüktür (50-100.000). Bu maddelere demir, nikel ve kobalt örnek olarak verilebilir (Chikazumi 2005).

## 2.5. Mıknatıslanma eğrisi

Ferromanyetik bir malzemeye dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında, malzeme üzerinde oluşan manyetik indüksiyon ( $B$ ) ile uygulanan manyetik alan arasındaki ilişki

$$B = \mu H \quad (2.7)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada  $\mu$  malzemenin manyetik geçirgenliğidir. Malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği;

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.8)$$

olduğundan malzemede oluşan manyetik indüksiyon

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.9)$$

olur. Manyetik malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri ile manyetik alınganlıkları ( $\chi$ ) arasındaki ilişki

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (2.10)$$

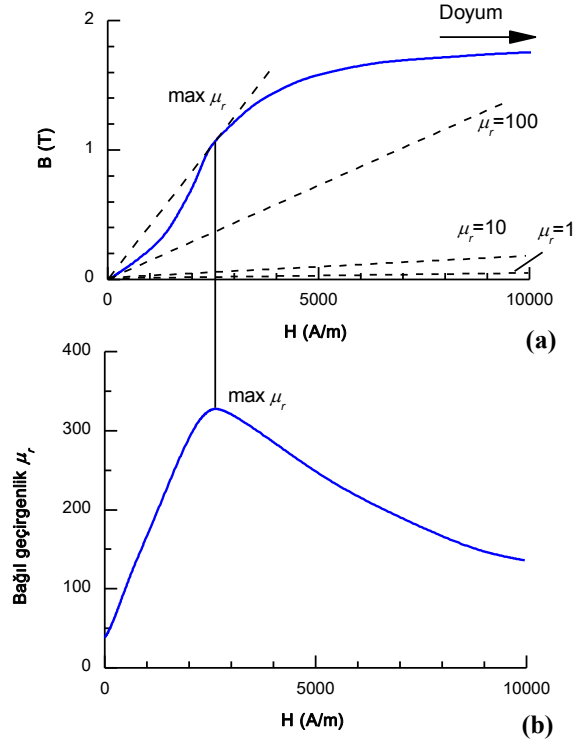
şeklindedir. Buna göre manyetik malzeme üzerinden oluşan manyetik indüksiyon

$$\begin{aligned} B &= \mu_0(1 + \chi)H = \mu_0 H + \mu_0 \chi H \\ &= \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0(H + M) \end{aligned} \quad (2.11)$$

olarak elde edilir. Burada

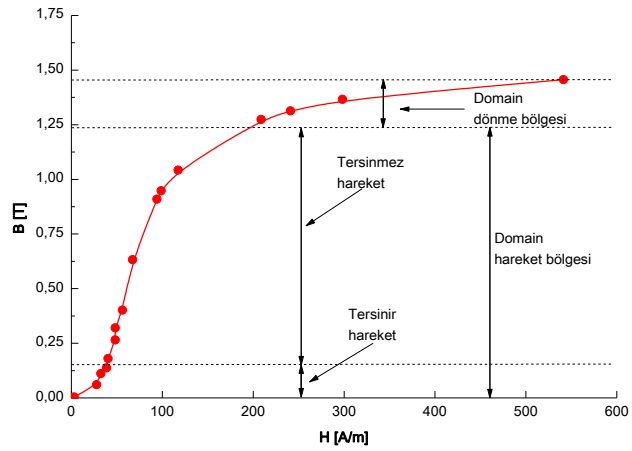
- $B$  manyetik indüksiyon (ya da manyetik akı yoğunluğu) (T)
- $H$  uygulanan dış manyetik alan (A/m)
- $M$  malzemede oluşan mıknatıslanma (A/m)
- $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliğidir ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)

Ferromanyetik malzemeler için manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) sabit değildir. Bu nedenle ferromanyetik malzemelerde uygulanan manyetik alan ile oluşan manyetik indüksiyon arasındaki ilişki doğrusal olmaz. Ferromanyetik bir malzeme için tipik  $B$ - $H$  eğrisi Şekil 2.3(a)'da gösterilmiştir. Bu eğriye *mıknatıslanma eğrisi* denir. Mıknatıslanma eğrisinde genellikle manyetik alan-manyetik indüksiyon değişimi ( $H$ - $B$ ) kullanılırken bazı durumlarda manyetik alan-mıknatıslanma ( $H$ - $M$ ) değişimi de kullanılabilir. Şekil 2.3(b)'de ise uygulanan manyetik alan ile bağıl manyetik geçirgenliğin değişimi gösterilmiştir (Kraus 1981).



Şekil 2.3. (a) Genel mıknatıslanma eğrisi ve (b) uygulanan  $H$  manyetik alanı ile bağlı manyetik geçirgenlik değişimi (Kraus 1981)

Ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanması domain hareketi ve domain dönmesi ile gerçekleşmektedir (Şekil 2.4). Domain hareketi bölgesinde iki durum ortaya çıkmaktadır: 1) Tersinir domain hareketi ve 2) Tersinmez domain hareketi. Buna bağlı olarak, sırasıyla, "*tersinir mıknatıslanma*" ve "*tersinmez mıknatıslanma*" bileşenleri oluşur.



Şekil 2.4. Deneysel mıknatıslanma eğrisi ve mıknatıslanma bileşenlerini gösteren bölgeler (Bastos 2003)

## 2.6. Histeresis

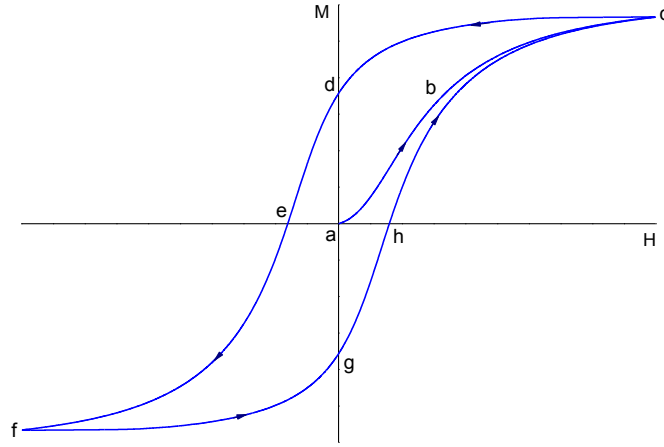
Histeresis, genel anlamı ile sistemlerin, uygulanan kuvvetleri izlemeyen fakat yavaşça tepki gösteren ya da tamamen ilk durumuna dönmeyen bir özelliğidir. Mekanik, manyetizma, hidrolik, elektronik, jeofizik ve ekonomi gibi birçok alanda histeresis olgusu gözlenmektedir.

Mekanik sistemlerdeki histeresisi tanımlayan ilk çalışma James Clerk Maxwell tarafından yapılmıştır. Daha sonra Preisach, Neel ve Everett tarafından manyetizma ve soğurma (absorbsiyon) olayı için histeresis modelleri geliştirilmiştir. Sonraki çalışmalarda belli çalışma frekansı bölgesi için kısmi modeller geliştirilmesine rağmen, manyetik histeresis için henüz tam bir matematiksel model geliştirilememiştir (Anonim 2007).

### 2.6.1. Manyetik histeresis

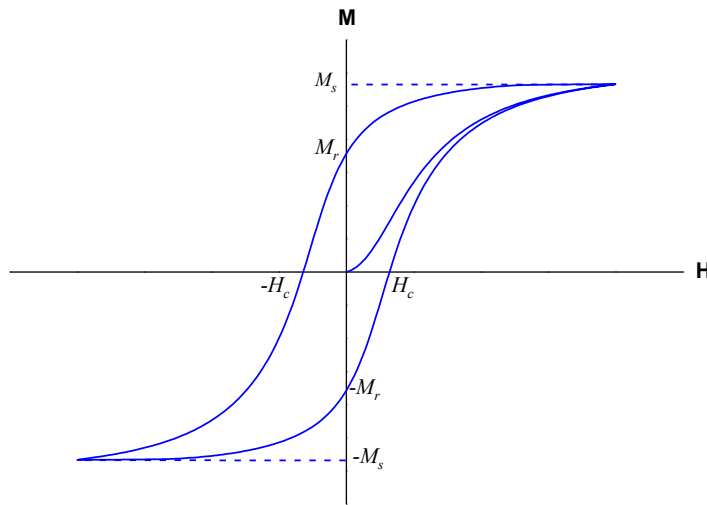
Daha önce mıknatıslanmamış ferromanyetik malzemeye dış bir manyetik alan uygulandığında,  $M$  mıknatıslanması (ya da  $B$  manyetik indüksiyonu) doğrusal olmayan bir şekilde yavaşça artmaya başlar ve Şekil 2.5'te gösterildiği **abc** yolunun takip eder. Manyetik alan ne kadar arttırılırsa arttırılsın, manyetik akı yoğunluğu ya da mıknatıslanma belli bir değerin üzerine çıkamaz. Bu değere “*doyum mıknatıslanması*” ( $M_s$ ) ya da “*doyum manyetik indüksiyonu*” ( $B_s$ ) denir.

Ferromanyetik malzeme, manyetik olarak doyuma ulaştıktan sonra manyetik alan azaltılmaya başladığında, mıknatıslanma **cdef** yolunu izler. Mıknatıslanma en küçük değerini aldıktan sonra manyetik alan tekrar arttırılırsa, bu durumda mıknatıslanma **fghe** yolunu takip ederek histeresis eğrisini oluşturur. Ferromanyetik malzemelerin histeresis eğrileri tamamıyla simetriktir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi **e-h**, **d-g** ve **c-f** noktaları birbirlerinin simetrik noktalarıdır.

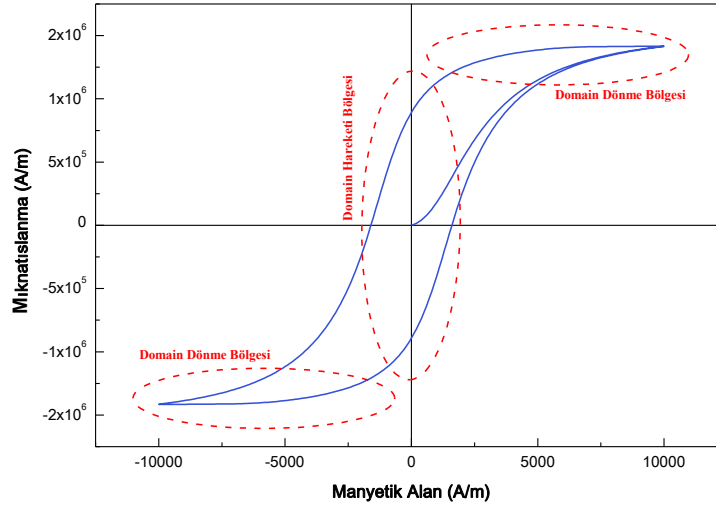


Şekil 2.5. Ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanarak histeresis eğrisinin oluşumu

Histeresis eğrilerinden, ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri hakkında bilgiler elde edilebilir. Mıknatıslanan bir ferromanyetik malzeme üzerinden manyetik alan kaldırıldığında, yani uygulanan dış manyetik alan sıfır olduğunda, ferromanyetik malzeme üzerindeki mıknatıslanma ya da manyetik indüksiyon değeri sıfır olmaz. Bu değere “kalıcı mıknatıslanma” ( $M_r$ ) ya da “kalıcı manyetik indüksiyon” ( $B_r$ ) denir. Ferromanyetik malzeme üzerindeki kalıcı mıknatıslanma değerini sıfıra düşürmek için malzemeye ters yönde uygulanması gereken manyetik alan değerine “sıfırlayıcı alan” ( $H_c$ ) denir. Tipik bir histeresis eğrisini tanımlayan noktalar ve domain hareketlerinin ortaya çıktığı bölgeler Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir



Şekil 2.6. Ferromanyetik malzemenin histeresis eğrisi



Şekil 2.7. Tipik bir histeresis eğrisi ve domainlere bağlı mıknatıslanma süreci (Bastos 2003)

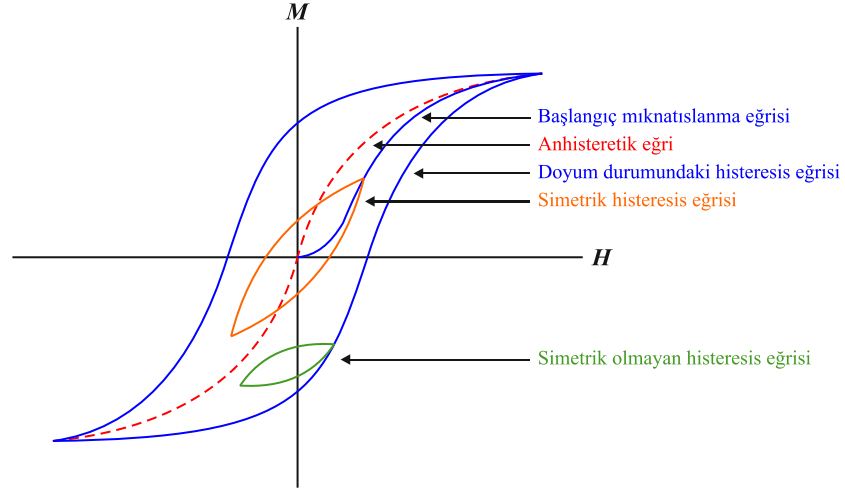
## 2.7. Histeresis modelleri

Manyetik histeresis modelleri, modelleme çözünürlüğüne göre farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Bunların en üst seviyesinde, atomik düzeyde kuantum mekaniğini kullanan modeller (mikroskopik modeller) vardır. Daha sonraki sınıfta düzgün olarak mıknatıslanmış domainleri ele alan makroskopik modeller (Stoner-Wohlfarth, Preisach, Jiles-Atherton) vardır. Alınan deneysel veriler ile matematiksel eğri uydurma ise diğer bir sınıfa dahil edilebilir (yapay sinir ağları ve yaklaşım teorisi modelleri gibi).

Histeresis modelleri ayrıca, statik ve dinamik olmak üzere iki temel sınıfa da ayrılabilir. Statik histeresis modellerinde, çıkış (manyetik indüksiyon " $B$ " ya da mıknatıslanma " $M$ ") girişin (manyetik alan, " $H$ ") bir fonksiyonudur. Ancak dinamik histeresis modellerinde uygulanan manyetik alanın değişim hızı (mıknatıslama frekansı) da çıkışı etkilemektedir. (Saghafifar 2004)

Ferromanyetik malzemelerdeki mıknatıslanma olayını tam olarak modelleyebilmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları Preisach (Preisach 1935), Stoner-Wohlfarth (Stoner ve Wohlfarth 1948), Globus (Globus 1962) ve Jiles-Atherton (Jiles ve Atherton 1986) modelleridir. Bu modellerin üzerinde oldukça çok çalışılmasına rağmen, yine de hiçbiri manyetik malzemenin mıknatıslanması sırasında gerçekleşen birçok manyetik süreci tam olarak açıklayamamaktadır (Jiles ve ark. 2006).

Manyetik histeresinin modellenmesindeki en büyük zorluk, uygulanan her manyetik alan değerinin ferromanyetik malzemenin geçmişine bağlı olan sonsuz sayıdaki olası mıknatıslanma durumu ile ilişkili olmasıdır. Bu nedenle ferromanyetik malzemenin tam olarak karakterize edilebilmesi için sadece doyum histeres eğrisinin değil, aynı zamanda diğer mıknatıslanma ve histeres eğrilerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Ferromanyetik bir malzeme için tüm bu eğriler Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Ferromanyetik bir malzeme için çeşitli şekillerdeki mıknatıslanma ve histeres eğrileri (Liorzou ve ark. 2000)

### 2.7.1. Fröhlich-Kenelly modeli

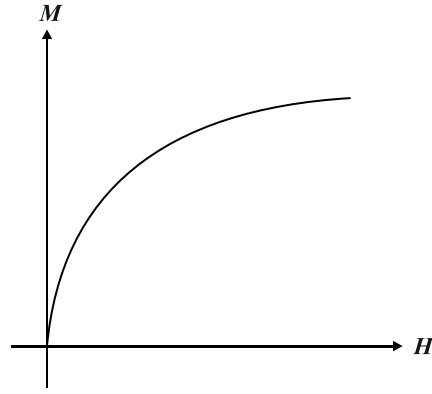
Ferromanyetik bir malzemedeki mıknatıslanmayı ifade eden ilk deneysel bağıntılardan biri olan Fröhlich modeli

$$M = \frac{\alpha_F H}{1 + \beta_F H} \quad (2.12)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada  $\alpha_F$  ve  $\beta_F$  Fröhlich parametreleridir. Bu modele göre elde edilen anhisteretik mıknatıslanma eğrisi Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Uygulanan manyetik alan için  $H \rightarrow \infty$  durumunda, mıknatıslanma doyum değerine ulaşacağı için

$$\frac{\alpha_F}{\beta_F} = M_s \quad (2.13)$$

olmalıdır.

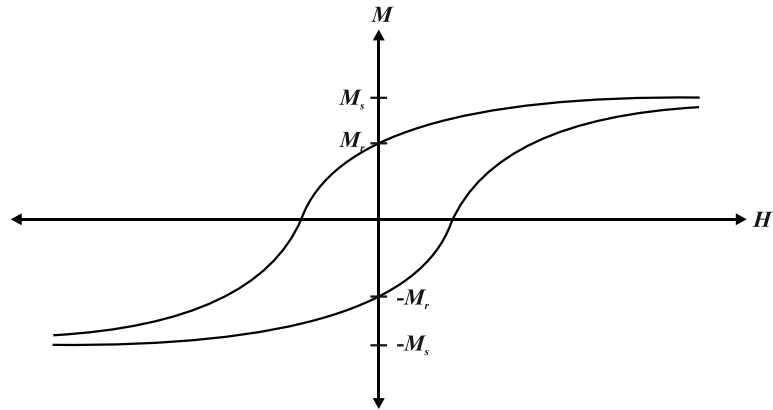


Şekil 2.9. Fröhlich modelinden elde edilen anhisteretik mıknatıslanma eğrisi

Anhisteretik eğrinin  $H$  eksenini boyunca  $-H_c$  ve  $H_c$  değerlerine kadar kaydırılması ile histeresis eğrisinin artan ve azalan dalları elde edilmiş olur. Buna göre histeresis eğrisi

$$M = \frac{\alpha_F (H \pm H_c)}{1 + \beta_F |H \pm H_c|} \quad (2.14)$$

ifadesi ile temsil edilebilir. Burada artı işareti histeresis eğrisinin azalan dalı için, eksi işareti ise histeresis eğrisinin artan dalı için kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da, Fröhlich modeli ile elde edilmiş histeresis eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.10. Fröhlich modelinden elde edilen histeresis eğrisi

Fröhlich'ten bağımsız olarak Kenelly tarafından, doyum durumundaki manyetik geçirgenlik için



$$\frac{1}{\mu - \mu_0} = a + bH \quad (2.15)$$

ifadesi önerilmiştir. Burada,

$$\mu_0 a = \frac{1}{\alpha_F} \quad (2.16)$$

ve

$$\mu_0 b = \frac{\beta_F}{\alpha_F} = \frac{1}{M_s} \quad (2.17)$$

olarak seçilmesi durumunda Kenelly bağıntısının Fröhlich ifadesine eşit olduğu görülür.

### 2.7.2. Statik Jiles-Atherton modeli

Jiles-Atherton (JA) modeli, manyetik malzemelerdeki enerji dengesine dayanan mıknatıslanma sürecini tanımlar. Ferromanyetik bir malzemenin birim hacmindeki enerji değişimi

$$W_{giriş} = W_{mag} + W_{hyst} \quad (2.18)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $W_{giriş}$  malzemenin mıknatıslanması için verilen enerji,  $W_{mag}$  manyetik durgun enerjideki değişim,  $W_{hyst}$  ise histeresis kaybıdır. Hiç histeresis kaybı olmadığı zaman, verilen enerji manyetik durgun enerjideki değişime eşit olur ve mıknatıslanma eğrisi anhisteretik olur.

Toplam mıknatıslanma tersinir ve tersinmez mıknatıslanma bileşenlerden oluşur:

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (2.19)$$

Tersinir bileşen ( $M_{rev}$ ), tersinir domain hareketi ve domain dönmesinden kaynaklanmaktadır. Histeresis gösteren ferromanyetik malzemelerdeki enerji kaybının kaynağı ise  $M_{irr}$  tersinmez mıknatıslanma bileşenidir.

Ferromanyetik malzemeye verilen manyetik enerji ve histeresis kaybı için enerji dengesi

$$\underbrace{\mu_0 \int M_{an} dH}_{\text{Verilen Eneji}} = \underbrace{\mu_0 \int M dH}_{\text{Manyetik Durgun Eneji}} + \underbrace{\mu_0 \int k \delta \frac{dM}{dH} dH}_{\text{Histeresis Kaybı}} \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $M_{an}$  anhisteretik mıknatıslanma,  $k$  takılma sabiti olarak adlandırılır ve  $\delta$  ise mıknatıslanma yönünü gösterir. Histeresis eğrisinin artan dalı için ( $dH/dt > 0$ )  $\delta = +1$ , azalan dalı için ( $dH/dt < 0$ )  $\delta = -1$  değerlerini alır. Anhisteretik mıknatıslanma, Langevin fonksiyonu ile verilmektedir:

$$M_{an} = M_s \left( \coth \frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e} \right) \quad (2.21)$$

(2.21) eşitliğinde  $M_s$  doyum mıknatıslanması,  $a$  ise Langevin parametresidir.

Eş.(2.20)'ye göre manyetik alan şiddeti ile mıknatıslanma arasındaki ilişki

$$M_{an} = M + k \delta \frac{dM}{dH} \quad (2.22)$$

şeklindedir. Weiss moleküler alan kuramına göre domainler arasındaki etkileşmeleri açıklamak için kullanılan  $H_e$  etkin alanı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$H_e = H + \alpha M \quad (2.23)$$

Burada  $\alpha$ , moleküler alan sabitidir.

Etkin alan göz önüne alındığında Eş.(2.22),

$$M_{an}(H_e) = M_{irr} + k \delta \frac{dM_{irr}}{dH_e} \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Tersinmez mıknatıslanma bileşeni (2.24) eşitliğinden integral alınarak hesaplanabilir.

Tersinmez mıknatıslanma bileşeninin uygulanan manyetik alana ( $H$ ) göre türevi

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{dM_{irr}}{dH_e} \frac{dH_e}{dH} \quad (2.25)$$

şeklinde olur. Etkin alan ifadesinde  $M=M_{irr}$  yazılarak etkin alanın manyetik alana göre türevi

$$\frac{dH_e}{dH} = 1 + \alpha \frac{dM_{irr}}{dH} \quad (2.26)$$

olur. Buna göre

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{dM_{irr}}{dH_e} \left( 1 + \alpha \frac{dM_{irr}}{dH} \right) \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir. Eş.(2.24) son ifadede yerine yazılırsa

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta} \left( 1 + \alpha \frac{dM_{irr}}{dH} \right) = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta} + \frac{\alpha(M_{an} - M_{irr})}{k\delta} \frac{dM_{irr}}{dH} \quad (2.28)$$

$$\frac{dM_{irr}}{dH} \left[ \frac{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})}{k\delta} \right] = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta} \quad (2.29)$$

sonucu çıkar. Buradan tersinmez mıknatıslanma bileşeninin manyetik alan ile değişimi için

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (2.30)$$

ifadesi elde edilir.

Tersinir ve tersinmez mıknatıslanma bileşenleri arasındaki ilişki anhisteretik mıknatıslanma cinsinden

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (2.31)$$

şeklinde verilir. Burada  $c$  tersinirlik sabiti olarak adlandırılır. Buna göre toplam mıknatıslanma

$$M = M_{irr} + M_{rev} = (1 - c)M_{irr} + cM_{an} \quad (2.32)$$

olur. Eş.(2.32)'in uygulanan  $H$  manyetik alanına göre türevi alınırsa

$$\frac{dM}{dH} = (1-c) \frac{dM_{irr}}{dH} + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (2.33)$$

elde edilir. Eş.(2.30) bu ifadede yerine yazılarak

$$\frac{dM}{dH} = (1-c) \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (2.34)$$

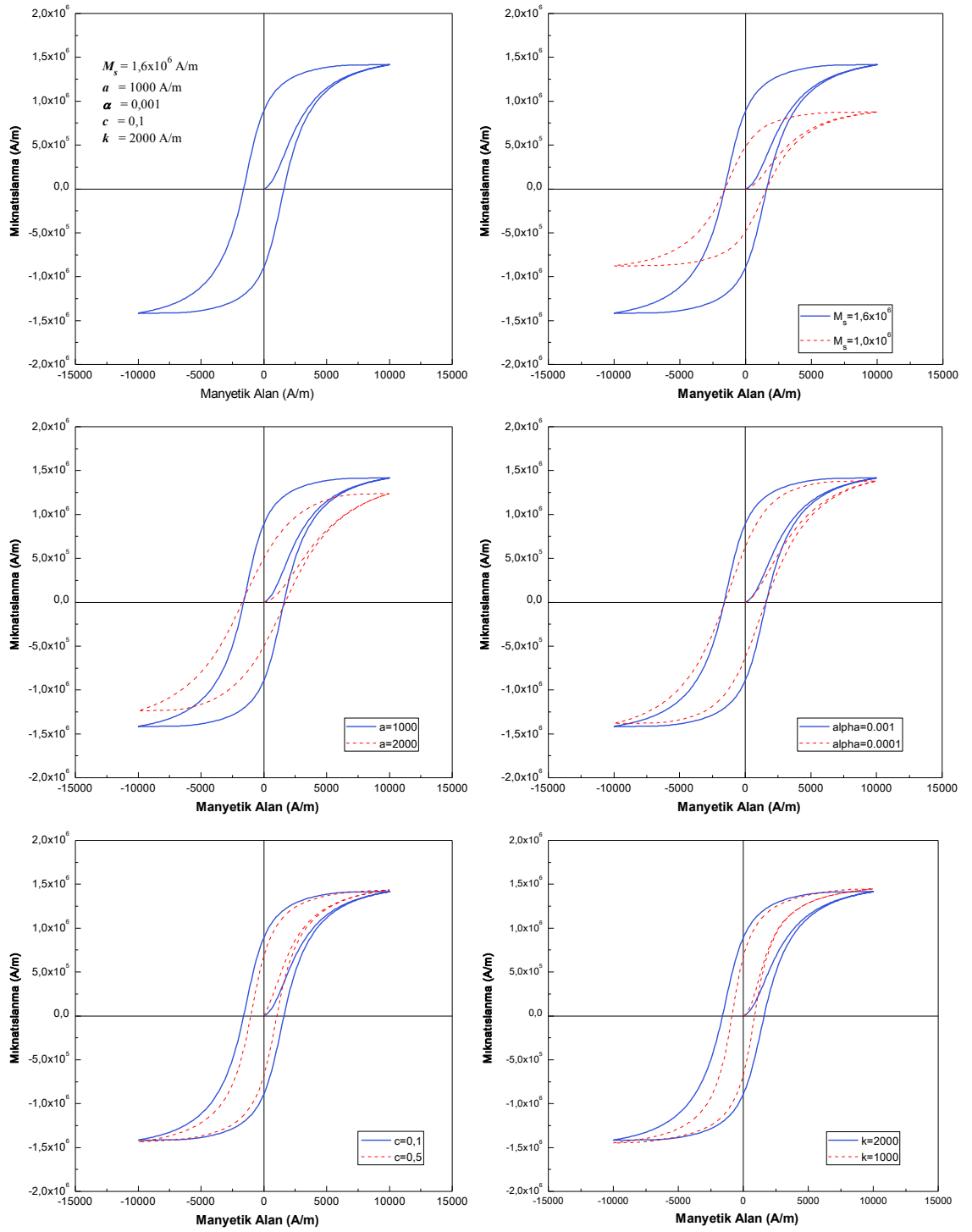
bağıntısı elde edilir.

Eş.(2.34) ferromanyetik malzemeler için Jiles-Atherton (JA) histeresis modeli olarak adlandırılmaktadır. JA modeli diferansiyel bir modeldir ve analitik bir çözümü yoktur. Bu nedenle sayısal olarak çözülmelidir. Sayısal çözümün elde edilmesi için JA model parametreleri olan  $M_s$ ,  $a$ ,  $\alpha$ ,  $c$  ve  $k$ 'nın bilinmesi gerekmektedir. JA model parametreleri, deneysel histeresis eğrilerinden elde edilebilir. Bu parametreler ve anlamları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Jiles-Atherton model parametreleri ve anlamları

Parametre	Fiziksel Anlamı	Birimi
$M_s$	Doyum mıknatıslanması	A/m
$a$	Şekil parametresi / Langevin parametresi	A/m
$\alpha$	Moleküler alan parametresi	-----
$c$	Tersinirlik sabiti / Domain esneme sabiti	-----
$k$	Takılma sabiti / Domain duvar hareketi sabiti	A/m

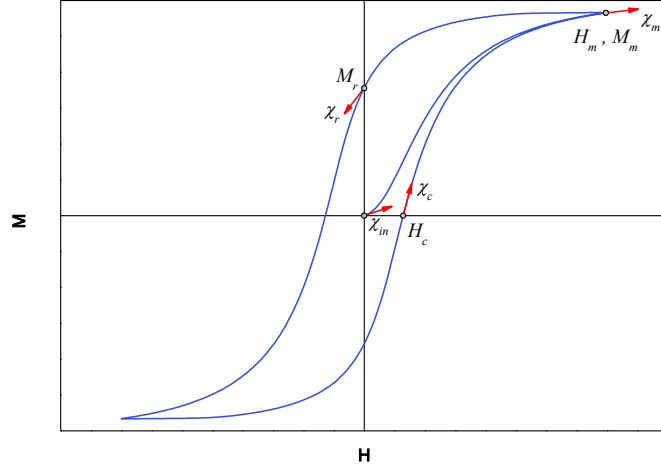
$M_s=1,6 \times 10^6$  A/m,  $a=1000$  A/m,  $\alpha=0,001$ ,  $c=0,1$ ,  $k=2000$  A/m değerleri için histeresis eğrisi ve bu histeresis eğrisinin JA model parametrelerine göre değişimleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. JA modeli kullanılarak elde edilmiş histeresis eğrisi ve histeresis eğrisini JA model parametrelerine bağlı olarak değişimi

### 2.7.3. Jiles-Atherton model parametrelerinin belirlenmesi

Deneysel histeresis eğrilerinden beş JA model parametresi ( $M_s$ ,  $a$ ,  $\alpha$ ,  $c$ ,  $k$ ) elde edilebilir. Bunun için ilk adım Şekil 2.12'de gösterildiği gibi histeresis eğrisine ait özel noktaların belirlenmesidir. Histeresis eğrisindeki bu noktaların anlamları Çizelge 2.2'de verilmiştir. Burada  $\chi$  diferansiyel alınganlıklardır ( $\chi=dM/dH$ ).



Şekil 2.12. JA model parametrelerinin bulunabilmesi için histeresis eğrisinde belirlenmesi ve hesaplanması gereken özel noktalar

Çizelge 2.2. JA model parametrelerinin belirlenmesi için gerekli olan noktalar ve bu noktaların anlamları

$\chi_{in}$	Başlangıç diferansiyel alınganlığı
$H_c$	Sıfırlayıcı alan değeri
$\chi_c$	Sıfırlayıcı alan noktasındaki diferansiyel alınganlık
$M_r$	Kalıcı mıknatıslanma değeri
$\chi_r$	Kalıcı mıknatıslanma noktasındaki diferansiyel alınganlık
$H_m$	Histeresis eğrisinin uç noktasındaki manyetik alan değeri
$M_m$	Histeresis eğrisinin uç noktasındaki mıknatıslanma değeri
$\chi_m$	Histeresis eğrisinin uç noktasındaki diferansiyel alınganlık

- **$M_s$  parametresinin belirlenmesi**

$M_s$  parametresi, malzemenin oldukça güçlü bir şekilde manyetik olarak doyuma ulaştığı durumdaki doyum mıknatıslanması değeridir. Bilinen ticari ürünler için ürün kataloglarından kolaylıkla belirlenebilir.

- **$k$  parametresinin belirlenmesi**

$k$  parametresi, sıfırlayıcı alan noktasından ( $H_c$ ) belirlenebilir. Eş.(2.34)'ün bu noktadaki değeri, ferromanyetik malzemenin sıfırlayıcı alan noktasındaki diferansiyel alınganlığına eşit olur:

$$\chi_c = \left. \frac{dM}{dH} \right|_{H=H_c, M=0} = (1-c) \frac{M_{an}(H_c) - M_{irr}}{k - \alpha [M_{an}(H_c) - M_{irr}]} + c \frac{dM_{an}(H_c)}{dH} \quad (2.35)$$

Bu nokta histeresis eğrisinin artan dalında olduğu için  $\delta=+1$  değerindedir. Sıfırlayıcı alan değerinde toplam mıknatıslanma sıfır olduğu için Eş.(2.32)'den tersinmez mıknatıslanma bileşeni

$$M_{irr} = - \frac{cM_{an}(H_c)}{1-c} \quad (2.36)$$

olur. Bu ifade Eş.(2.35)'te yerine yazılırsa  $k$  parametresi

$$k = \frac{M_{an}(H_c)}{1-c} \left( \alpha + \frac{1-c}{\chi_c - c \frac{dM_{an}(H_c)}{dH}} \right) \quad (2.37)$$

şeklinde elde edilir. buradan görüldüğü gibi  $k$  parametresinin hesaplanabilmesi için  $M_s$ ,  $a$ ,  $\alpha$  ve  $c$  değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

- **$\alpha$  parametresinin belirlenmesi**

$\alpha$  parametresi kalıcı mıknatıslanma noktasından belirlenebilir. Bu noktada  $\delta=-1$ ,  $H=0$  ve  $M=M_r$  'dir. Kalıcı mıknatıslanma değerinde, tersinmez mıknatıslanma için Eş.(2.32) kullanılarak;

$$M_{irr} = \frac{M_r - cM_{an}(M_r)}{1 - c} \quad (2.38)$$

elde edilir. JA eşitliğinin (Eş.(2.34)) bu noktadaki değeri diferansiyel alınganlığa eşit olur:

$$\chi_r = \left. \frac{dM}{dH} \right|_{H=0, M=M_r} = (1 - c) \frac{M_{an}(M_r) - M_{irr}}{-k - \alpha[M_{an}(M_r) - M_{irr}]} + c \frac{dM_{an}(M_r)}{dH} \quad (2.39)$$

Eş.(2.38)'deki tersinmez mıknatıslanma ifadesi Eş.(2.39)'de yerine yazılırsa;

$$M_r = M_{an}(M_r) + \frac{k}{\frac{\alpha}{1 - c} + \frac{1}{\chi_r - c \frac{dM_{an}(M_r)}{dH}}} \quad (2.40)$$

ifadesi elde edilir. Bilinen  $a$ ,  $k$ ,  $c$  ve  $M_s$  değerleri ile bu ifadeden  $\alpha$  hesaplanabilir.

- **$a$  parametresinin belirlenmesi**

Histeresis eğrisinin uç noktasında manyetik alan ve mıknatıslanma,  $H=H_m$  ve  $M=M_m$  değerindedir. Buna göre tersinmez mıknatıslanma bileşeni için

$$M_{irr} = \frac{M_m - cM_{an}(H_m, M_m)}{1 - c} \quad (2.41)$$

yazılabilir.  $a$  parametresi, aşırı doyuma ulaşmış ferromanyetik malzemeye ait histeresis eğrisinin uç noktasındaki histeretik ve anhisteretik diferansiyel alınganlıkların birbirine eşit olduğu varsayılarak hesaplanabilir:

$$\left. \frac{dM}{dH} \right|_{H=H_m, M=M_m} = \left. \frac{dM_{an}}{dH} \right|_{H=H_m, M=M_m} \quad (2.42)$$

$$\chi_m = \left. \frac{dM}{dH} \right|_{H=H_m, M=M_m} = (1 - c) \frac{M_{an}(H_m, M_m) - \frac{M_m - cM_{an}(H_m, M_m)}{1 - c}}{k - \alpha \left[ M_{an}(H_m, M_m) - \frac{M_m - cM_{an}(H_m, M_m)}{1 - c} \right]} + c \chi_m \quad (2.43)$$



Burada histeresis eğrisinin artan dalı üzerinde işlem yapıldığından  $\delta=+1$ 'dir. Bu eşitlikten  $M_m$  çekilirse;

$$M_m = M_{an}(H_m, M_m) - \frac{(1-c)k\chi_m}{\alpha\chi_m + 1} \quad (2.44)$$

ifadesi elde edilir. Diğer parametrelerin bilinmesi durumunda Eş.(2.44) kullanılarak  $a$  parametresi hesaplanabilir.

- **$c$  parametresinin belirlenmesi**

$c$  parametresi histeresis eğrisinin orijin noktasından belirlenebilir. Orijin noktasında  $H=0$ ,  $M=0$  ve  $M_{irr}=0$  olduğundan dolayı Eş.(2.34)'ten

$$\chi_{in} = \left. \frac{dM}{dH} \right|_{H=0, M=0} = c \left. \frac{dM_{an}}{dH} \right|_{H=0, M=0} \quad (2.45)$$

yazılabilir. Orijin noktasında anhisteretik diferansiyel alınganlığın hesaplanması için ilk olarak anhisteretik mıknatıslanma ifadesinde  $M=0$  yazılırsa Eş.(2.21),

$$M_{an}|_{M=0} = M_s \left( \coth \frac{H}{a} - \frac{a}{H} \right) \quad (2.46)$$

şeklinde olur. Bu ifadenin manyetik alana göre türevi alınırsa;

$$\frac{dM_{an}}{dH} = \frac{M_s}{a} \left( 1 - \coth^2 \frac{H}{a} + \left( \frac{a}{H} \right)^2 \right) \quad (2.47)$$

elde edilir. Başlangıç diferansiyel alınganlığının hesaplanabilmesi için  $H \rightarrow 0$  durumunda limit alınması gerekmektedir:

$$\coth^2 x = \frac{2}{3} + \frac{x^2}{15} + \frac{1}{x^2} + \dots \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned}\chi_{in} &= \lim_{H \rightarrow 0} \left[ c \left( \frac{M_s}{a} \left( 1 - \left( \frac{2}{3} + \frac{(H/a)^2}{15} + \frac{1}{(H/a)^2} + \dots \right) + \left( \frac{a}{H} \right)^2 \right) \right) \right] \\ &= c \frac{M_s}{3a}\end{aligned}\quad (2.49)$$

Buradan  $c$  parametresi

$$c = \frac{3a\chi_{in}}{M_s} \quad (2.50)$$

olarak elde edilir.

(2.37), (2.40), (2.44) ve (2.50) eşitliklerinden görüldüğü gibi JA model parametreleri birbirlerine bağlı ifadelerdir. Bu nedenle  $k$ ,  $a$ ,  $\alpha$  ve  $c$  parametreleri ancak iteratif yöntem kullanılarak hesaplanabilirler.

#### 2.7.4. Dinamik Jiles-Atherton modeli

Elektriksel olarak iletken bir ortamdaki ferromanyetik histeresinin frekansa bağımlılığını hesaba katmak için girdap akımı kayıpları kullanılır.

Girdap akımına bağlı olan ani güç kayıpları iki terimden oluşmaktadır. Bu terimler  $(dB/dt)^2$  ile orantılı olan klasik girdap akımı kayıpları ve  $(dB/dt)^{3/2}$  ile orantılı olan anormal güç kayıplarıdır (Bertotti 1998). Buna göre ferromanyetik bir malzeme mıknatıslanırken manyetik enerji dengesi (Eş.(2.18)),

$$W_{girş} = W_{mag} + W_{hyst} + L_{din} \quad (2.51)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Buradaki ilk iki terim statik histeresis eğrisinin alanına eşittir. Bu bileşen mikroskobik ölçekte mıknatıslanma işlemindeki süreksizliklerden kaynaklanırken, dinamik güç kayıpları ( $L_{din}$ ) ise manyetik domain yapısının makroskobik ölçekteki davranışları ile ilişkilidir.

Eş.(2.51)'deki dinamik kayıplar iki bileşene sahiptir. Bunlardan birincisi klasik girdap akımı kayıplarından kaynaklanır. Diğer taraftan, domain etkilerinin bir sonucu olarak dinamik güç kayıpları, klasik girdap akımı kayıplarından daha büyüktür ( $L_{din} > \delta L_{ec}$ ). Bu

aradaki fark anormal kayıplar olarak adlandırılır ve  $\delta L_a$  ile gösterilir. Buna göre enerji dengesi yeniden yazılırsa

$$W_{input} = \underbrace{W_{mag} + W_{hyst}}_{statik} + \underbrace{\delta L_{ec} + \delta L_a}_{dinamik} \quad (2.52)$$

şeklinde olur. Klasik girdap akımı kayıpları,

$$\frac{d\delta L_{ec}}{dt} = k_{ec} \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (2.53)$$

ifadesi ile, anormal kayıplar ise

$$\frac{d\delta L_a}{dt} = k_a \left( \frac{dB}{dt} \right)^{3/2} \quad (2.54)$$

ifadesi ile verilmektedir.

Eş.(2.53)'ün integrali alınarak klasik girdap akımı kayıpları hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \delta L_{ec} &= \int k_{ec} \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 dt = \int k_{ec} \mu_0^2 \left( \frac{dH}{dt} + \frac{dM}{dt} \right)^2 dt \\ &= \int k_{ec} \mu_0^2 \left( \frac{dM}{dt} \right)^2 \left( 1 + \frac{dH}{dM} \right)^2 dt = \int k_{ec} \mu_0^2 \left( \frac{dM}{dt} \right)^2 \left( 1 + \frac{1}{\chi} \right)^2 dt \end{aligned} \quad (2.55a)$$

Burada ferromanyetik malzemenin diferansiyel manyetik alınganlığı  $\chi = dM/dH$  çok büyük değerde ( $\sim 10^4 - 10^5$ ) olduğundan dolayı  $\left( 1 + \frac{1}{\chi} \right)^2$  terimi yaklaşık olarak bire eşit olur. Buna göre klasik girdap akımı kayıpları

$$\delta L_{ec} = \int k_{ec} \mu_0^2 \frac{dM}{dt} dM \quad (2.55b)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Anormal kayıplar ise Eş.(2.54)'ün integralinden hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
\delta L_a &= \int k_a \left( \frac{dB}{dt} \right)^{3/2} dt = \int k_a \left( \frac{dB}{dt} \right) \sqrt{\left| \frac{dB}{dt} \right|} dt \\
&= \int k_a \mu_0^{3/2} \left( \frac{dH}{dt} + \frac{dM}{dt} \right) \sqrt{\left| \frac{dH}{dt} + \frac{dM}{dt} \right|} dt \\
&= \int k_a \mu_0^{3/2} \left( \frac{dM}{dt} \right) \left( 1 + \frac{dH}{dM} \right) \sqrt{\left| \frac{dM}{dt} \right|} \sqrt{\left| 1 + \frac{dH}{dM} \right|} dt \\
&= \int k_a \mu_0^{3/2} \left( \frac{dM}{dt} \right) \sqrt{\left| \frac{dM}{dt} \right|} \left( 1 + \frac{1}{\chi} \right)^{3/2} dt
\end{aligned} \tag{2.56a}$$

Sonuç olarak anormal kayıplar

$$\delta L_a = \int k_a \mu_0^{3/2} \sqrt{\left| \frac{dM}{dt} \right|} dM \tag{2.56b}$$

şeklinde elde edilir.

Tersinmez mıknatıslanma bileşeni ( $M_{irr}$ ) kullanılarak (2.55b) ve (2.56b) eşitlikleri Eş.(2.52)'de yerine yazılırsa, tersinmez mıknatıslanma bileşeni için

$$\int \mu_0 M_{an} dH = \int \mu_0 M_{irr} dH + \int \mu_0 k \delta dM_{irr} + \int k_{ec} \mu_0^2 \frac{dM_{irr}}{dt} dM_{irr} + \int k_a \mu_0^{3/2} \sqrt{\left| \frac{dM_{irr}}{dt} \right|} dM_{irr} \tag{2.57a}$$

$$\mu_0 M_{an} dH = \mu_0 M_{irr} dH + \mu_0 k \delta \frac{dM_{irr}}{dH} dH + k_{ec} \mu_0^2 \frac{dM_{irr}}{dt} \frac{dM_{irr}}{dH} dH + k_a \mu_0^{3/2} \sqrt{\left| \frac{dM_{irr}}{dt} \right|} \frac{dM_{irr}}{dH} dH \tag{2.57b}$$

$$M_{an} = M_{irr} + \left( k \delta + k_{ec} \mu_0 \frac{dM_{irr}}{dt} + k_a \sqrt{\mu_0} \sqrt{\left| \frac{dM_{irr}}{dt} \right|} \right) \frac{dM_{irr}}{dH} \tag{2.57c}$$

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k \delta + k_{ec} \mu_0 \frac{dM_{irr}}{dt} + k_a \sqrt{\mu_0} \sqrt{\left| \frac{dM_{irr}}{dt} \right|}} \tag{2.57d}$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade Eş.(2.33)'de yerine yazılarak dinamik Jiles-Atherton modeli

$$\frac{dM}{dH} = (1 - c) \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta + k_{ec}\mu_0 \frac{dM_{irr}}{dt} + k_a \sqrt{\mu_0} \sqrt{\left| \frac{dM_{irr}}{dt} \right|}} + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (2.58)$$

şeklinde elde edilmiş olur.

## 2.8. Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları (YSA), hem kavramsal yenilikler hem de uygulama gelişimi ile birlikte ilerlemiştir.

Yapay sinir ağları üzerindeki çalışmalar 19. yy sonunda başlamıştır. Bu çalışmalar Hermann von Helmholtz, Ernst Mach ve Ivan Pavlov gibi bilim insanları tarafından yapılan fizik, psikoloji ve nöropsikoloji alanlarındaki disiplinler arası çalışmalardan oluşmaktaydı. Ancak bu ilk çalışmalar genellikle öğrenme, önsezi, koşullandırma vb. gibi genel teoriler üzerine yapılmıştı ve özel matematiksel modelleri içermemekteydi.

Yapay sinir ağlarını kullanan modern çalışmalar ilk olarak 1940'ların başlangıcında Warren McCulloch ve Walter Pitts tarafından yapılmıştır. McCulloch ve Pitts, ilkesel olarak, yapay nöronlardan oluşan ağların herhangi bir aritmetik ya da mantıksal fonksiyonu hesaplayabileceğini göstermişlerdir.

Yapay sinir ağlarının ilk uygulaması, 1950'lerin sonunda Frank Rosenblatt tarafından, ilk algılayıcı ağ (perceptron network) ve bu ağın öğrenme kurallarının keşfi ile olmuştur. Rosenblatt ve çalışma arkadaşları, bu algılayıcı ağ ile şekil tanıması yapılabileceğini göstermişlerdir. Bu çalışma yapay sinir ağlarına olan ilgiyi arttırmasına rağmen, temel algılayıcı ağ daha karmaşık problemlerin çözümünde yetersiz kalmıştır.

Bununla birlikte yapay sinir ağları üzerine olan çalışmalar daha sonraları da devam etmiştir. 1972'de, Teuvo Kohonen ve James Anderson, birbirlerinden bağımsız olarak, insan hafızası gibi işlev görev gören yeni yapay sinir ağları (Kohonen ağları) geliştirmişlerdir. Ancak, yeni düşüncelerin ve bilgisayarların yetersizliklerinden dolayı bu dönemde yapay sinir ağları üzerinde kısıtlı düzeyde gelişme sağlanmıştır. 1980 yılından sonra, daha hızlı kişisel bilgisayarların ve çalışma istasyonlarının geliştirilmesi

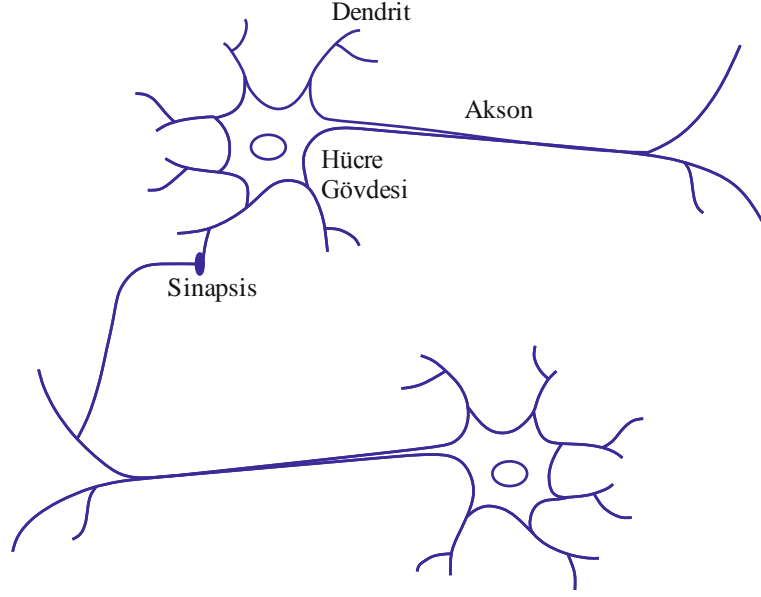
ve bunların yaygınlaşması ve ayrıca yeni kavramların ortaya atılması ile yapay sinir ağları üzerindeki araştırmalar birdenbire artış göstermiştir.

Bu dönemde göze çarpan iki kavram vardır. Bunlardan ilki, yardımcı hafıza (associative memory) olarak kullanılabilen yayılımlı ağların (recurrent network) alışma ilkesini açıklayan istatistiksel mekaniğın kullanımınıdır. Bu kavram, fizikçi John Hopfield tarafından tanımlanmıştır (Hopfield ağı). İkinci önemli kavram ise çeşitli araştırmacılar tarafından bağımsız olarak geliştirilen, çok katmanlı tanımlayıcı ağı (multilayer perceptron network) için geri yayılımlı (backpropagation) ğrenme algoritmasıdır. Geri yayılımlı öğrenme algoritması hakkındaki en önemli alışma David Rumelhart ve James McClelland tarafından 1986 yılında yayımlanmıştır.

Yapay sinir ağları biyolojik sistemlerden esinlenerek geliştirilmiş bilgisayar programlarıdır. Canlılarda değişik duyu organlarından gelen bir çok bilgi, sinir sistemi sayesinde beyne ulaşarak öğrenme, tepki verme vb. davranışlar sergilenir.

Beyin, çok sayıda ( $\sim 10^{11}$ ) ve birbirleri ile çoklu bağlantıya ( $\sim 10^4$ ) sahip nöronlardan oluşur. Nöronlar uç temel bileşene sahiptirler: Dendritler, hücre gövdesi ve aksonlar. Dendritler, duyu organlarından gelen elektriksel sinyalleri sinir hücresine ileten alıcı (reseptör) dallardır. Hücre gövdesi, gelen bu elektrik sinyallerini toplamak ile görevlidir. Aksonlar ise diğer nöronlar ile bağlantıyı sağlayan ince telsi yapılarıdır. Bir nörona ait akson ile diğer bir nörona ait dendritlerin birleşme noktasına sinapsis denir. Biyolojik iki nöronun şematik diyagramı şekil 2.13'te gösterilmiştir.

Yapay sinir ağları beyin kadar karmaşık yapıda olmamasına rağmen aralarında iki önemli benzerlik vardır. Bunlardan birincisi, her iki ağı da birbirleri ile çok sayıda bağlantıya sahip hesaplama bloklarından oluşmaktadır. Diğeri ise nöronlar arasındaki bağlantıların, ağıın fonksiyonunu belirlemesidir (Hagan 1996).



Şekil 2.13. Biyolojik nöron yapısı (Hagan 1996)

### 2.8.1. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları

Yapay sinir ağlarının oldukça geniş bir uygulama alanı vardır. Bu uygulama alanlarından bazıları özetle şunlardır:

- **Askeri savunma:** Silah yönlendirme, hedef izleme, nesne belirleme, yüz tanıma, yeni sensörler, sonar, radar ve görüntü sinyal işleme, sinyal gürültü azaltma, sinyal/görüntü tanımlama
- **Bankacılık:** Çek ve diğer belge tarayıcıları, kredi başvuru değerlendirmeleri
- **Eğlence:** Animasyon, özel efektler, pazar tahmini
- **Elektronik:** Kod sıra tahmini, entegre devre çip tasarımı, süreç kontrolü, çip hata analizi, robot görüş, ses analizi, doğrusal olmayan modelleme
- **Finans:** Gayrimenkul değerlendirme, kredi danışmanlığı, mortgage izleme, şirket tahvil reytingi, kredi kullanım analizi, portföy ticaret programı, şirket finansal analizi, döviz fiyat tahmini
- **Havacılık:** Yüksek performanslı otopilot uygulaması, uçuş rota simülasyonu, uçuş kontrol sistemleri, otopilot geliştirme çalışmaları, uçak bileşenleri simülasyonu
- **İletişim:** Görüntü ve veri sıkıştırma, otomatik bilgi servisleri, konuşulan dilin gerçek zamanlı tercümesi

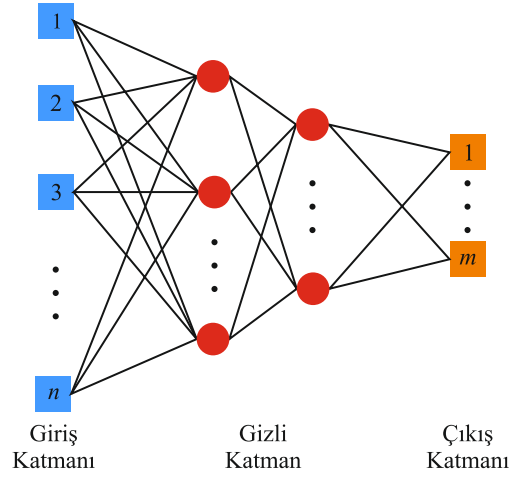
- **Meteoroloji:** Hava tahmini
- **Otomotiv:** Otomobil otomatik yardım sistemleri, garanti aktivitesi analizi
- **Petrol:** Petrol yatağı keşfi
- **Robotik:** İzdüşüm kontrolü, forklift robotları, manüplatör kontrolcüler, görüş sistemleri
- **Sağlık:** Göğüs kanseri analizi, elektroensefalografi (EEG) ve elektrokardiyografi (ECG) analizi, protez tasarımı, transplant süreleri optimizasyonu, hastane harcamaları analizi, acil servis testleri
- **Ses:** Ses tanımlama, ses sıkıştırma, ses sınıflandırma, metin-ses dönüştürücüler
- **Sigortacılık:** Poliçe başvuru değerlendirmesi, ürün optimizasyonu
- **Üretim:** Üretim süreç kontrolü, ürün tasarım ve analizi, süreç ve makine tanılaması, gerçek-zamanlı parçacık tanımlama, görsel kalite inceleme sistemleri, kağıt kalite tahmini, bilgisayar çip kalite analizi, planlama ve yönetim, kimyasal işlem sistemlerinin dinamik analizi

### 2.8.2. Yapay sinir ağlarının yapıları

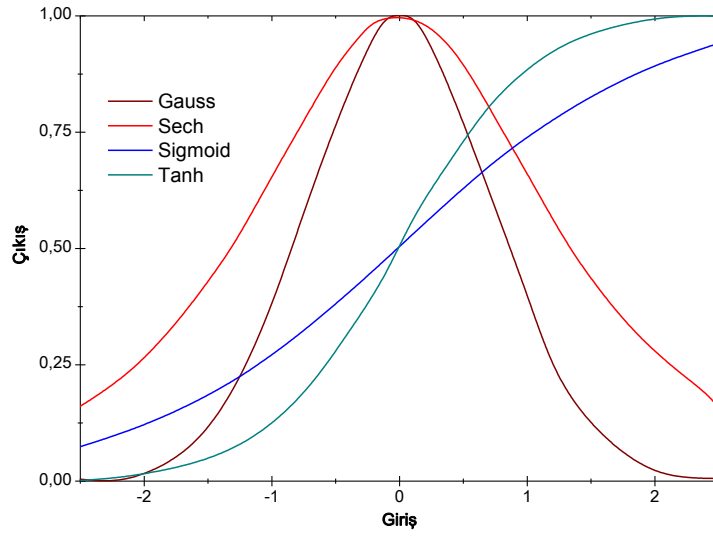
Yapay sinir ağları genellikle giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Giriş katmanı, yapay sinir ağına ait giriş değişkenlerini içerir. Gizli katman isteğe bağlı olarak bir ya da birkaç katmandan oluşabilir. Elde edilen sonuçlara göre gizli katmanın kaç katmandan oluşacağı belirlenebilir. Çıkış katmanında ise yapay sinir ağının çıkış verileri bulunmaktadır. Yapay sinir ağına ait basit bir yapı Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

Yapay sinir ağında katmanlar arasındaki öğrenme ilişkileri çeşitli transfer fonksiyonları ile sağlanmaktadır. En çok kullanılan transfer fonksiyonlar sigmoid, hiperbolik tanjant, hiperbolik sekant ve gauss fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



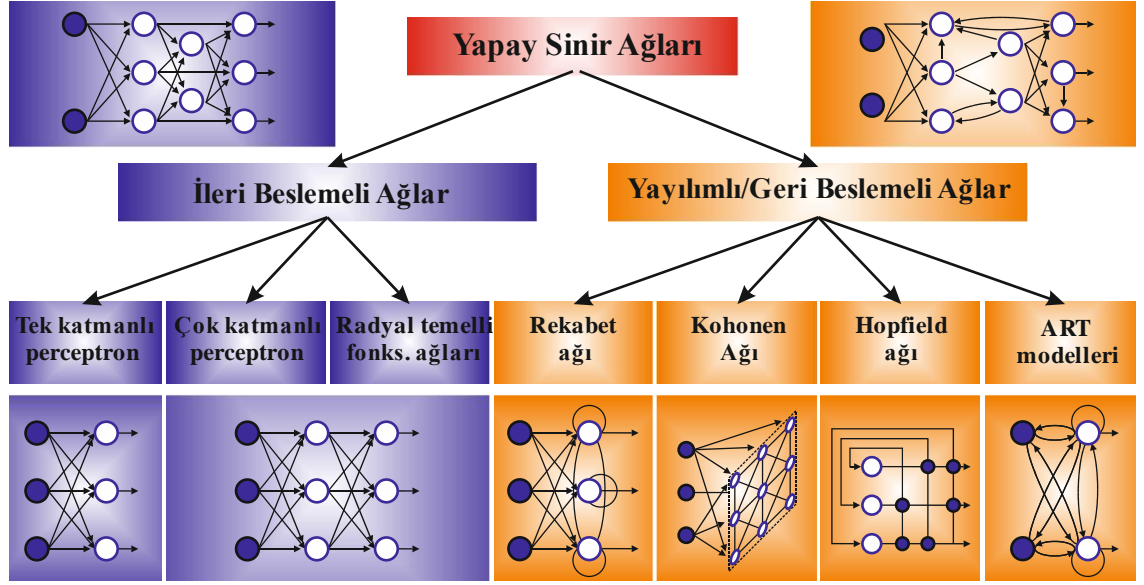


Şekil 2.14. Bir yapay sinir ağının genel yapısı



Şekil 2.15. Yapay sinir ağlarında kullanılan transfer fonksiyonları

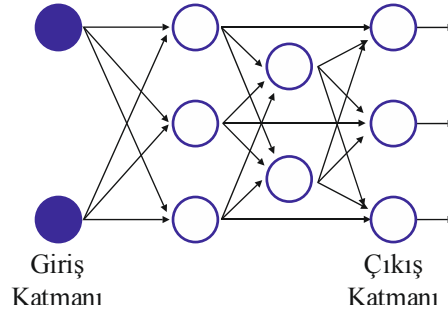
Temel olarak yapay sinir ağları, yapılarına göre iki gruba ayrılabilir. 1) İleri beslemeli ağlar ve 2) Yayımlı (ya da geri beslemeli) ağlar. Yapay sinir ağlarının yapılarına göre sınıflandırılması Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Yapılarına göre yapay sinir ağları

### 2.8.3. İleri beslemeli yapay sinir ağları

İleri beslemeli yapay sinir ağlarında geri besleme bağlantıları yoktur. Yani bilgi aktarımı yalnızca tek yönde gerçekleşmektedir. Şekil 2.17'de görüleceği gibi bilgi akışı sadece giriş nöronlarından çıkış nöronlarına doğrudur.



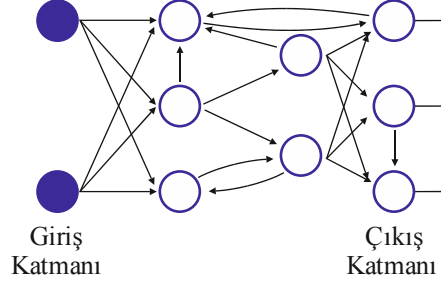
Şekil 2.17. İleri beslemeli bir yapay sinir ağı yapısı (Dreyfus 2005)

İleri beslemeli ağ çeşitleri tek katmanlı algılama ağı, çok katmanlı algılama ağı ve radyal temelli fonksiyon ağları olmak üzere üç çeşittir.

### 2.8.4. Geri beslemeli (yayımlı) yapay sinir ağları

Geri beslemeli yapay sinir ağlarında bilgi akışı çift yönlü olmaktadır. Bu tür ağlar çeşitli nöron katmanlarından oluşur. Birinci katman giriş katmanıdır ve giriş verilerini içermektedir. İkinci katman bir ya da daha fazla sayıda katmandan oluşur ve gizli

katman olarak adlandırılır. Son katman ise çıkış katmanıdır ve çıkış verilerini içerir. Geri beslemeli yapay sinir ağı Şekil 2.18'de gösterilmiştir.

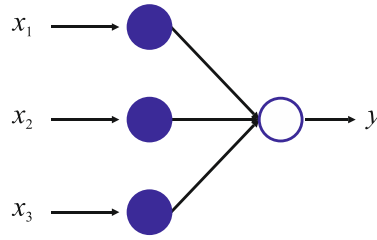


Şekil 2.18. Geri beslemeli yapay sinir ağının genel yapısı (Dreyfus 2005)

Geri beslemeli yapay sinir ağları rekabet ağı, Kohonen ağı, Hopfield ağı ve ART modelleri olmak üzere dört çeşittir.

### 2.8.5. Basit bir yapay sinir ağının çalışma ilkesi

Tipik bir yapay sinir ağı nöronu, girişlerinin ağırlıklı toplamı belli bir eşik değerini aştığında bir çıkış vermek üzere tetiklenen basit bir karşılaştırıcıdır. Şekil 2.19'da, üç giriş ve bir çıkışı bulunan tek nöronlu yapay sinir ağı gösterilmiştir.



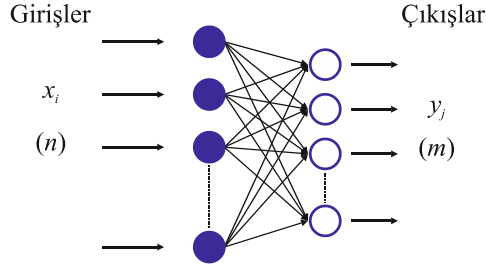
Şekil 2.19. Tek nöronlu yapay sinir ağı

Bu ağda çıkış,

$$\text{Çıkış} = y = f_a(\text{net}) \quad (2.59)$$

$$\text{net} = x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3 \quad (2.60)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada  $x_1, x_2, x_3$  giriş verileri,  $w_1, w_2, w_3$ , giriş ağırlıkları ve  $f_a$  ise aktivasyon fonksiyonudur. Şekil 2.20,  $n$  girişli ve  $m$  çıkışı bulunan ileri beslemeli algılayıcı ağı (perceptron) şematik diyagramını göstermektedir.



Şekil 2.20. Basit bir algılayıcı ağı yapısı

$n$  girişli ve  $m$  çıkışlı bir algılayıcı (perceptron) ağı için çıkış ifadesi

$$y_i = f_a(net_i) = \begin{cases} 1 & net_i > 0 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.61)$$

şeklinde olmaktadır. Burada  $y_i$ ,  $i$ .inci çıkış ve  $net_i$  ise  $i$ .inci nöron için ağı girişidir:

$$net_i = \sum_{j=1}^n x_j w_{ij} \quad (2.62)$$

$w_{ij}$ ,  $j$ .inci giriş ve  $i$ .inci çıkış nöronları arasındaki ağırlık;  $x_j$  ise  $j$ .inci giriştir. Bu durum matris şeklinde

$$Y = f_a(WX) \quad (2.63)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = f_a \left\{ \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1j} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & \cdots & w_{2j} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ w_{i1} & \cdots & w_{ij} & \cdots & w_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ w_{m1} & \cdots & w_{mj} & \cdots & w_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \right\} \quad (2.64)$$

olarak yazılabilir. Burada  $Y$ ,  $m \times 1$  boyutlu çıkış vektörü;  $X$ ,  $n \times 1$  boyutlu giriş vektörü;  $W$  ise  $m \times n$  boyutlu ağırlık matrisidir (Saghafifar 2004).

### 2.8.6. Bir yapay sinir ağının öğrenmesi

Yapay sinir ağlarının temel öğrenme kuralı, hesaplanan ağ çıkışının hedef ya da istenilen çıkışa eşit olmaması durumunda ağırlıkların değiştirilmesine bağlıdır. Bu temel kural şu şekilde açıklanabilir:

- Ağ çıkışı istenilen çıkış değerine eşit ise ağırlıklar değiştirilmez
- Ağ çıkışı istenilen çıkış değerinden küçükse ağırlıklar  $\Delta W$  kadar artırılır
- Ağ çıkışı istenilen çıkış değerinden büyükse ağırlıklar  $\Delta W$  kadar azaltılır

Ağırlık matrisi için öğrenme kuralı,

$$W_{yeni} = W_{eski} + \Delta W \quad (2.65)$$

şeklinde verilir. Bu ifadede  $\Delta W$ ,

$$\Delta w_{ij} = \lambda(t_j^p - y_j^p)x_j^p = \lambda \times \text{hata} \times \text{giriş} \quad (2.66)$$

şeklindedir. Burada  $\Delta w_{ij}$   $i$ .inci girişten  $j$ .inci çıkışa olan bağlantıda yapılacak ağırlık değişimi,  $x_j^p$   $p$ .inci öğrenme düzeyi için  $i$ .inci giriş,  $t_j^p$   $x_j^p$  girişi için  $j$ .inci istenilen değer,  $y_j^p$   $x_j^p$  girişi için  $j$ .inci hesaplanan çıkış ve  $\lambda > 0$  ise öğrenme hızıdır. Buna göre  $(k+1)$ .inci öğrenme girişi için  $w_{ij}$  ağırlığı aşağıdaki gibi değiştirilir:

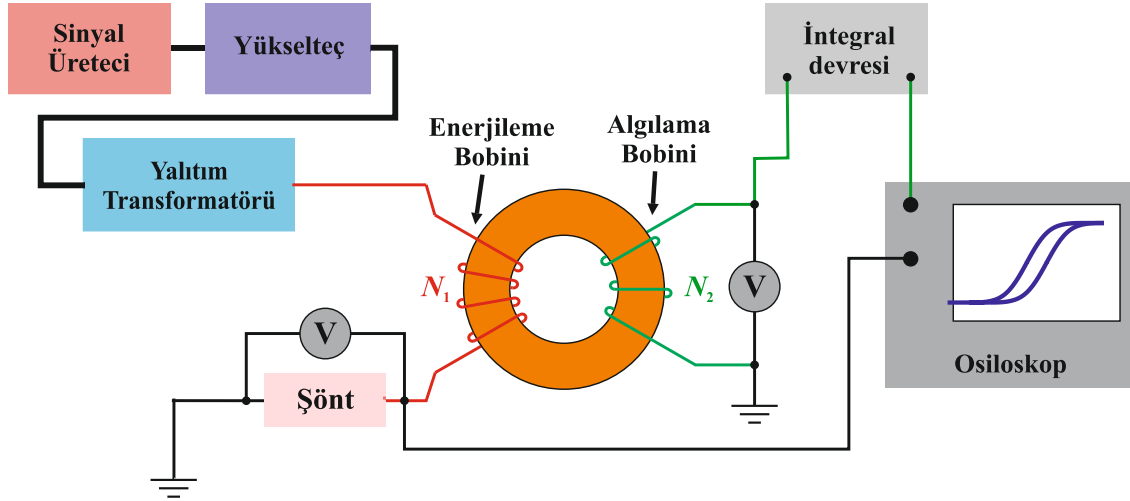
$$\begin{array}{lll} w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \lambda x & \text{eğer çıkış 1 olması gerekirken 0 ise} & : y_j = 0, t_j = 1 \\ w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) - \lambda x & \text{eğer çıkış 0 olması gerekirken 1 ise} & : y_j = 1, t_j = 0 \\ w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) & \text{eğer çıkış doğru ise} & : y_j = t_j \end{array} \quad (2.67)$$

Bu ağırlıklar, istenilen tolerans değerinde doğru ağ çıkış elde edilene kadar sürekli olarak değiştirilir.  $\lambda$  öğrenme hızı, ağırlıkların değişim hızını etkiler. Eğer  $\lambda$  değeri küçük ise öğrenme yavaş, ancak kararlı olur. Eğer  $\lambda$  değeri büyük ise öğrenme hızlı, ancak kararsız olur ve istenilen çıkış değerlerinden oldukça uzak sonuçlar elde edilebilir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deneysel ölçüm sistemi

Histeresis eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan deneysel düzenek Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Derebaşı ve ark. 2000).



Şekil 3.1. Histeresis eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan deneysel düzenek

Deneysel düzenek mıknatıslama ve ölçüm sisteminden oluşmaktadır. Mıknatıslama sistemindeki sinyal üretici kullanılarak manyetik alan oluşturmak için zamanla değişen akım sağlanır. Akım şiddeti, düşük değerlerde indüktif olmayan direnç (şönt) üzerindeki gerilim düşmesinden belirlenmektedir. Bu akım enerjileme bobini (ya da mıknatıslama bobini) üzerinden geçirilerek zamanla değişen manyetik alan oluşturulur. Algılama bobini üzerinde indüklenen gerilim ikinci bir voltmetre yardımı ile ölçülerek toroid çekirdeği üzerinde oluşan manyetik indüksiyon hesaplanır.

Toroid çekirdeği üzerinde oluşan manyetik indüksiyon zamana bağlı bir sinüs fonksiyonudur:

$$B(t) = \sum_n a_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3.1)$$

$t=t'$  zamanında manyetik indüksiyonun tepe değerini ( $B_m$ ) aldığı düşünülürse

$$B_m = B(t') = \sum_n a_n \sin(n\omega t' + \phi_n) \quad (3.2)$$

olur. Bu andan itibaren yarım periyot sonra ( $t=\pi/\omega=1/2f$ ) manyetik indüksiyon negatif tepe değerini alır:

$$B\left(t'+\frac{\pi}{\omega}\right) = \sum_n a_n \sin(n\pi + n\omega t' + \phi_n) \quad (3.3)$$

$n$ 'nin tek sayı değerleri için

$$B\left(t'+\frac{\pi}{\omega}\right) = -B(t') \quad (3.4)$$

Algılama bobini üzerinde indüklenen  $V(t)$  gerilimi, Faraday yasasına göre

$$V(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA) = -A\frac{dB}{dt} \quad (3.5)$$

olur. Eş.(3.1)'in zaman göre türevi

$$\frac{dB}{dt} = \sum_n a_n n\omega \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (3.6)$$

şeklinde olmaktadır.  $t=t'+n\pi/\omega$  zamanında yani manyetik indüksiyonun tepe değerini aldığı anda Eş.3.6 sıfır olur. Bu nedenle  $dB/dt$ 'nin yarım periyot üzerinden ortalama değeri hesaplanırsa,

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{ort} = \frac{\omega}{\pi} \int_{t'}^{t'+\pi/\omega} \sum_n a_n n\omega \cos(n\omega t + \phi_n) dt \quad (3.7)$$

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{ort} = \frac{\omega}{\pi} \sum_n a_n [\sin(n\omega t' + \phi_n) - \sin(n\pi + n\omega t' + \phi_n)] \quad (3.8)$$

elde edilir. Buradan

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{ort} = \frac{2\omega}{\pi} \sum_n a_n \sin(n\omega t' + \phi_n) \quad (3.9)$$

olur. Eşitliğin sağ tarafındaki toplam manyetik indüksiyonun tepe değerine eşit olduğundan  $B_m$ ,

$$B_m = \frac{\pi}{2\omega} \left( \frac{dB}{dt} \right)_{ort} \quad (3.10)$$

sonucuna ulaşılır.

Algılama bobininde indüklenen gerilimin büyüklüğü  $V = N_2 A \frac{dB}{dt}$  ve açısal frekans  $\omega = 2\pi f$  olduğundan dolayı Eş.(3.10),

$$B_m = \frac{V_{ort}}{4N_2 Af} = \frac{V_{RMS}}{4.44N_2 Af} \quad (3.11)$$

olarak elde edilir (Ek.4). Burada  $V_{RMS}$  algılama bobininde indüklenen gerilimin etkin değeri,  $N_2$  algılama bobinin sarım sayısı,  $A$  toroid çekirdeğinin kesit alanı ve  $f$  ise mıknatıslama frekansı yani oluşturulan manyetik alanın değişim frekansıdır.

Eş.(3.11), çıkış sinyalinin yani indüklenen manyetik indüksiyonun dalga şeklinin sinüs şeklinde olması durumunda geçerlidir. Ancak, özellikle ferromanyetik malzemeler doyuma yaklaştığında ölçüm sistemindeki çıkış sinyali bozulmaya başlamaktadır. Böyle bir durumda Eş.(3.11) kullanılamaz. Bunu düzeltmek için ölçüm sisteminde bir geri besleme devresi kullanılmalı ya da girişe uygulanan sinyal çıkış sinyalini sinüsoidal yapacak şekilde ayarlanmalıdır.

Enerjileme bobininde oluşturulan manyetik alan Ampere yasasından hesaplanır. Buna göre  $N$  sarımlı bir bobinden  $i$  akımı geçirildiğinde

$$Ni = \oint Hdl \quad (3.12)$$

olur. Zamanla değişen manyetik alan oluşturabilmek için enerjileme bobinine uygulanan akım sinüsoidaldir:

$$i = i_m \sin(\omega t + \phi) \quad (3.13)$$

Oluşan manyetik alan kapalı yol boyunca düzgün ise manyetik alanın tepe değeri için Eş.(3.12)



$$Ni_m = H \oint dl \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikteki kapalı yol integralinin sonucu, toroid çekirdeği içerisinde manyetik akının dolandığı ortalama yolu verecektir. Buna göre enerjileme bobininde oluşan manyetik alanın tepe değeri

$$H_m = \frac{N_1 i_m}{l_{ort}} \quad (3.15)$$

olarak elde edilir. Burada  $N_1$  enerjileme bobinin sarım sayısı,  $l_{ort}$  ise toroid çekirdeğinin ortalama çevresidir.

Manyetik büyüklüklerin hesaplanmasında, toroid çekirdeğinin  $A$  kesit alanı ve  $l_{ort}$  ortalama yolu

$$A = \frac{d_1 - d_2}{2} w \eta \quad (3.16)$$

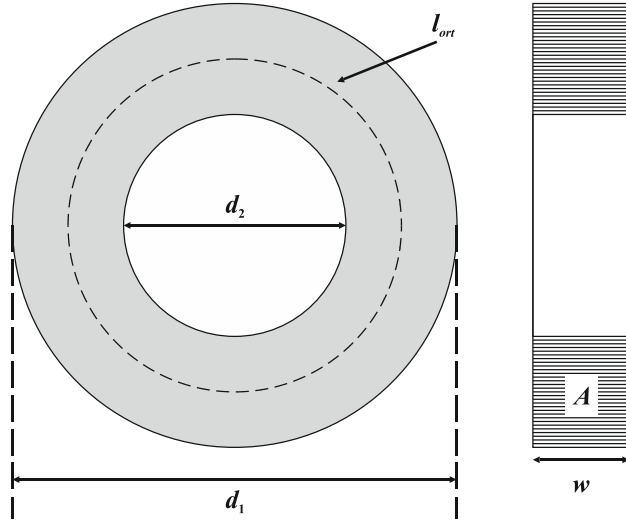
$$l_{ort} = \frac{d_1 + d_2}{2} \pi \quad (3.17)$$

ifadelerinden belirlenir. Burada  $d_1$  toroid çekirdeğinin dış çapı,  $d_2$  iç çapı ve  $w$  ise yüksekliği ya da şerit genişliğidir (Şekil 3.2).

Eş.(3.16)'da kullanılan  $\eta$  dolgu faktörü olarak adlandırılmaktadır. Toroid çekirdekleri, girdap akımı kayıplarını azaltmak için, ferromanyetik şeritlerin spiral şeklinde sarılması ile üretilmektedir. Bu nedenle toroid çekirdeğinin içerisinde çok az miktarda hava boşluğu oluşur. Oluşan bu hava boşluğunun manyetik akı üzerindeki etkisini de hesaba katmak için  $\eta$  dolgu faktörü kullanılmaktadır. Dolgu faktörü

$$\eta = \frac{m_{toroid}}{d_{toroid} \left( \frac{d_1 - d_2}{2} \right) w l_{ort}} \quad (3.18)$$

eşitliğinden hesaplanabilir (Anonim 1996). Burada  $m_{toroid}$  toroid çekirdeğinin kütlesi,  $d_{toroid}$  ise yoğunluğudur.



Şekil 3.2. Toroid çekirdeğinin geometrik yapısı

### 3.2. İncelenen toroid çekirdekleri ve özellikleri

Çalışmada kullanılan toroid çekirdekler Vacuumschmelze firmasına ait, farklı geometrilere sahip  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{15.5}B_7$  alaşımlı nanokristal yapıdaki VITROPERM™ 500F toroid çekirdekleridir. Bu toroid çekirdekleri ve geometrik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. İncelenen toroid çekirdekleri ve özellikleri

Örnek no	Ürün kodu	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Yükseklik (mm)
#W380	T60006-L2025-W380	25	16	10
#W423	T60006-L2030-W423	30	20	10
#W624	T60006-L2040-W624	40	32	15
#W424	T60006-L2040-W424	40	25	15
#W628	T60004-L2080-W628	80	63	20
#W630	T60004-L2130-W630	130	100	25

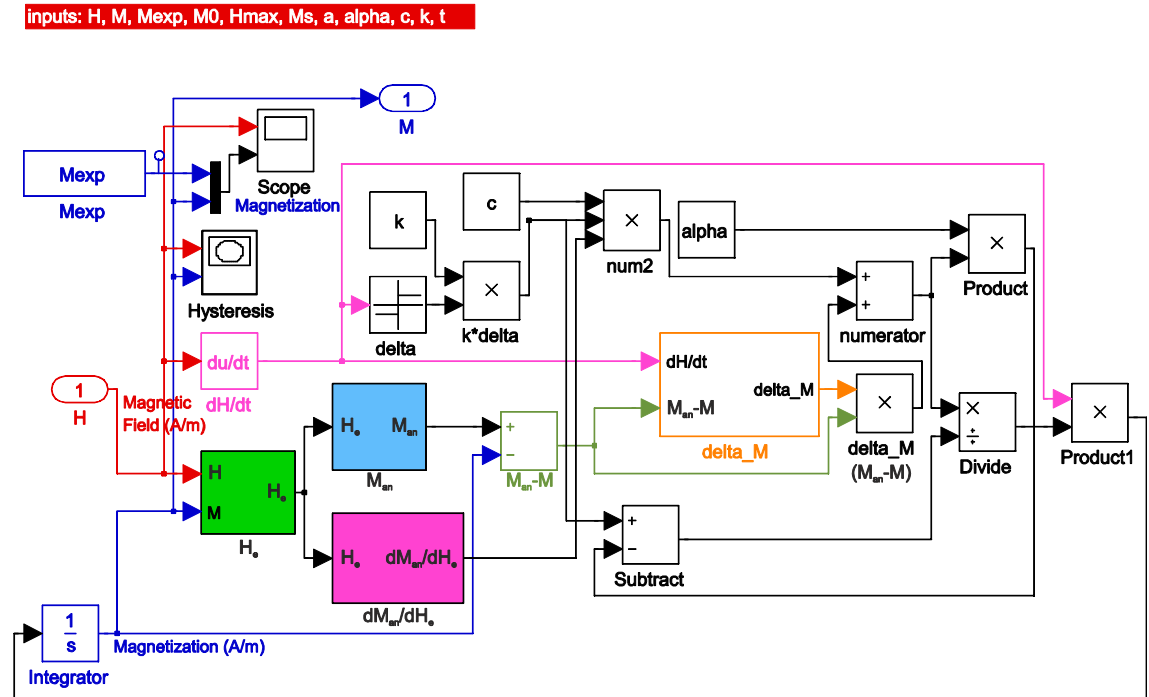
Nanokristal toroid çekirdekleri için 1, 2, 5, 10, 20, 50 ve 100 kHz çalışma frekanslarında, Cardiff Üniversitesi School of Engineering, Wolfson Centre for Magnetics Technology'de histeresis ölçümleri yapılmıştır (Derebaşı ve ark. 2000). Ayrıca JA model parametrelerinin belirlenmesi için gerekli olan statik histeresis eğrilerine ait veriler Vacuumschmelze firmasından alınmıştır (Roman 2010).

### 3.3. JA modelinin deneysel verilere uygulanması

Dinamik histeresis eğrilerinin JA histeresis modeli ile teorik olarak elde edilebilmesi için ilk olarak statik histeresis eğrileri yardımıyla, model parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. JA model parametrelerinin belirlenmesinde, parametre tahmini için MATLAB® ortamında Simulink/Control and Estimation Toolbox kullanılmıştır. Hazırlanan Simulink modeli, Vacuumschmelze firmasından sağlanan deneysel statik histeresis eğrilerine (Roman 2010) uygulanmıştır. En iyi parametre değerleri belirlendikten sonra, Eş.2.58 ile verilen dinamik JA modelinin sayısal çözümü için başka bir Simulink modeli hazırlanmış ve daha önceden elde edilen dinamik histeresis eğrilerine (Derebaşı ve ark. 2000) ait teorik çözümler yapılmıştır.

#### 3.3.1. JA model parametrelerinin optimizasyonu için Simulink modeli

Parametre optimizasyonu hazırlanan için Simulink modelinde (Şekil 3.3) kullanılan bloklar ve özellikleri Ek.1'de verilmiştir.



Şekil 3.3. JA model parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan Simulink modeli

Bu Simulink modeli, JA diferansiyel denklemini çözerken aynı zamanda parametre optimizasyonu yaparak JA model parametrelerinin tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Ancak JA diferansiyel denkleminin çözümünde bazı durumlarda fiziksel anlamı olmayan sonuçlar da elde edilebilmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak amacı ile Eş.(2.34)'e  $\delta_M$  terimi eklenmiştir. Buna göre Eş.(2.34)

$$\frac{dM}{dH} = \delta_M (1-c) \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (3.19)$$

olarak yeniden yazılabilir. Burada  $\delta_M$ ,

$$\delta_M = \begin{cases} 0 & \frac{dH}{dt} < 0 \text{ ve } M_{an} - M \geq 0 \text{ için} \\ 0 & \frac{dH}{dt} \geq 0 \text{ ve } M_{an} - M \leq 0 \text{ için} \\ 1 & \text{diğer durumlar için} \end{cases} \quad (3.20)$$

şeklinde verilmektedir (Deane 1994).

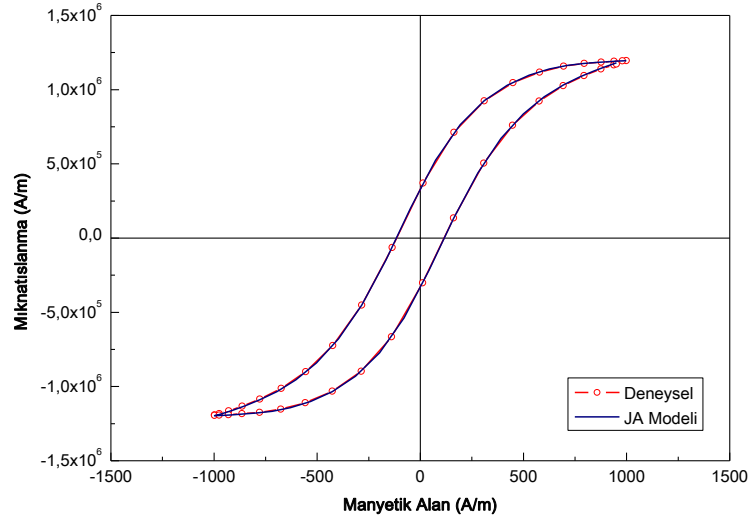
Hazırlanan Simulink modelinin doğruluğunun sınanması için, model parametreleri bilinen histeresis eğrisi test verisi olarak kullanılmıştır (Wang ve ark. 2009). Bu test verisine ait gerçek parametre değerleri:  $M_s=1,50 \times 10^6$  A/m,  $a=190$  A/m,  $\alpha=8,42 \times 10^{-6}$ ,  $c=0,36$ ,  $k=200$  A/m'dir.

Simulink modelinde parametre optimizasyonu yapabilmek için parametrelere başlangıç değerleri atanmalıdır. Ancak JA model parametreleri arasında yüksek bir korelasyon olmasından dolayı optimizasyon süreci, bu başlangıç değerlerine oldukça hassas bir şekilde bağımlıdır. Bu nedenle JA parametrelerinin başlangıç değerlerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Parametrelerinin başlangıç değerlerinin belirlenmesinde Wang ve ark. tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Wang ve ark. 2009). Bu yöntemle elde edilen başlangıç değerleri, optimizasyon sonucu bulunan parametre değerleri ve gerçek değerler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Test verisine ait gerçek, başlangıç ve optimizasyon sonucu elde edilen JA model parametresi değerleri

Parametre	Gerçek değer	Başlangıç değeri	Optimizasyon sonucu
$M_s$ (A/m)	$1,50 \times 10^6$	$1,20 \times 10^6$	$1,51 \times 10^6$
$a$ (A/m)	190	136,9	193,1
$\alpha$ (----)	$8,42 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$8,66 \times 10^{-5}$
$c$ (----)	0,36	0,52	0,34
$k$ (A/m)	200	150	194,7

Test verisine ait histeresis eğrisi ve optimizasyon sonucu JA modelinden elde edilen histeresis eğrisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Test verisine ait histeresis eğrisi ve optimizasyon sonucu elde edilen JA modeli

Parametre tahmini yapılırken, parametreler belli sınırlar içinde seçilmektedir. Bu sınırlar aşağıdaki gibidir (Chwastek ve Szczyglowski 2008):

$$M_s : M_t \leq M_s \leq 1,5M_t$$

$$a : 0,5H_c \leq a \leq 5H_c$$

$$\alpha : 0,5 \frac{H_c}{M_t} \leq \alpha \leq 0,7 \frac{H_t}{M_t}$$

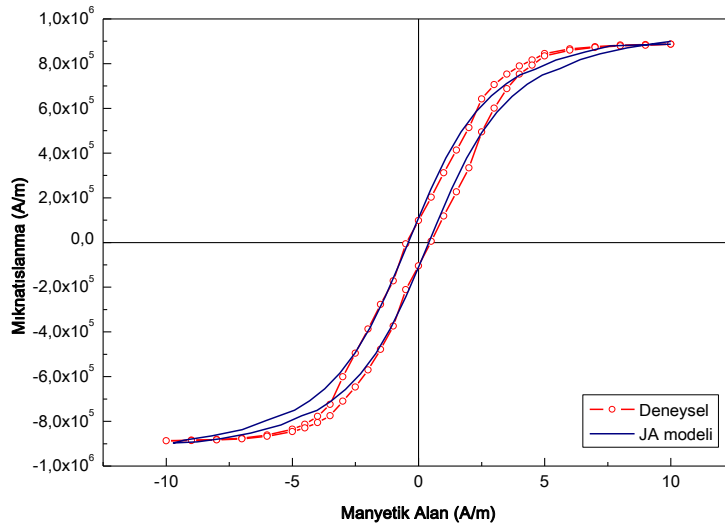
$$c : 0 < c < 1$$

$$k : 0,5H_c \leq a \leq 5H_c$$

Parametre optimizasyonu yapıldıktan sonra, #W424 toroidine ait deneysel ve JA modelinden elde edilen statik histeresis eğrileri Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu örnek için, çeşitli denemelerden sonra bulunan parametre değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. #W424 toroidi için başlangıç ve elde edilen JA model parametresi değerleri

	$M_s$ (A/m)	$a$ (A/m)	$\alpha$ (---)	$c$ (---)	$k$ (A/m)
Başlangıç değerleri	$1 \times 10^6$	1,2	$1 \times 10^{-7}$	0,5	0,4
Optimizasyon değerleri	$1,03 \times 10^6$	1,7953	$3,48 \times 10^{-9}$	0,1871	0,5103

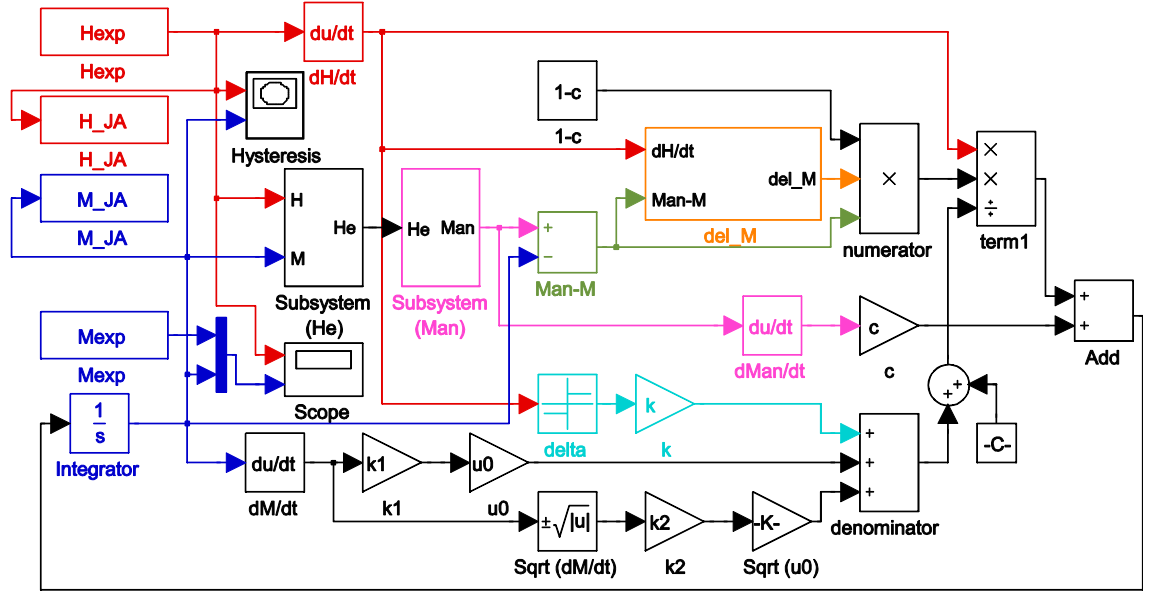


Şekil 3.5. #W424 toroidi için elde edilen statik histeresis eğrileri

### 3.3.2. Dinamik JA modelinin çözümü

Eş.2.58 ile verilen dinamik JA modelinin çözümü için MATLAB<sup>®</sup> ortamında başka bir Simulink modeli hazırlanmıştır (Şekil 3.6).

Bu modelin doğruluğunu kontrol etmek amacı ile Kis ve Ivanyi (2004) tarafından yapılan çalışmaya ait deneysel veriler test verileri olarak kullanılmıştır. Bu veriler için kullanılan parametre değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. JA modelinin çözümünden elde edilen teorik histeresis eğrisi ile deneysel histeresis eğrisi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



inputs:  
 Ms, a, alpha, c, k, k1, k2, M0, u0, Hmax, Hexp, Mexp

Şekil 3.6. Dinamik JA modelinin çözümü için hazırlanan Simulink modeli

Çizelge 3.4. Dinamik JA modeli için test verilerine ait parametre değerleri

$M_s$	$a$	$\alpha$	$c$	$k$	$k_1$	$k_2$
$1,33 \times 10^6$	326,01	$4,7 \times 10^{-4}$	0,00565	468,985	$1,8 \times 10^{-6}$	0,01

Çizelge 3.4'teki  $k_1$  ve  $k_2$  parametreleri, sırasıyla, Eş.(2.58)'deki  $k_{ec}$  ve  $k_a$  yerine kullanılmıştır. Klasik girdap akımı kayıplarını belirleyen  $k_1$  parametresi

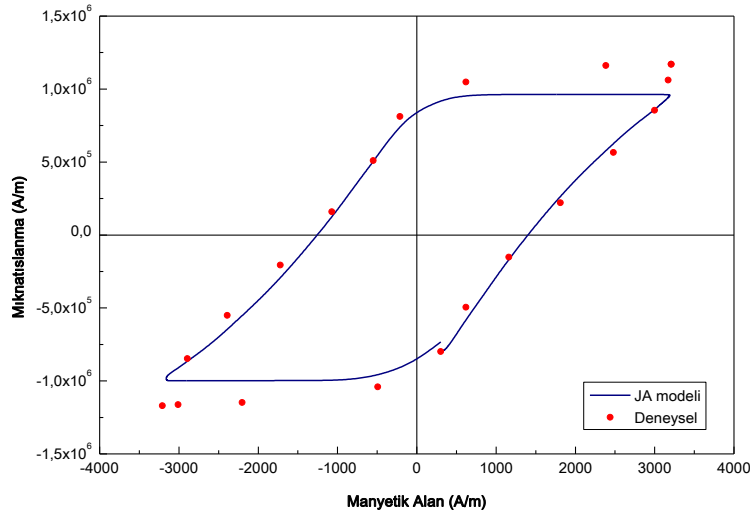
$$k_1 = \frac{d^2}{2\rho\beta} \quad (3.21)$$

şeklinde verilmektedir (Chikazumi 2005). Burada  $\rho$  malzemenin elektriksel öz direnci ( $\Omega\cdot m$ ),  $d$  kesit boyutu (m) ve  $\beta$  ise geometrik faktördür (şerit için  $\beta=6$ , silindir için  $\beta=16$ , küre için  $\beta=20$ ).

Ferromanyetik malzeme mıknatıslanırken, domain duvar hareketinden kaynaklanan anormal kayıpları belirleyen  $k_2$  parametresi ise

$$k_2 = \sqrt{\frac{GdwV_0}{\rho}} \quad (3.22)$$

olarak ifade edilir (Bertotti 1998). Burada  $G=0,1356$  değerinde boyutsuz bir sabit,  $w$  şerit şeklindeki malzemeler için genişlik (m),  $d$  kalınlık (m),  $\rho$  öz direnç ( $\Omega\cdot m$ ) ve  $V_0$  ise manyetik alan boyutunda bir parametredir.



Şekil 3.7. Deneysel ve dinamik JA modelinin çözümünden elde edilen histeresis eğrileri

Dinamik JA modelinin çözümünden elde edilen histeresis eğrisinin uç noktalarında, deneysel değerler ile uyumsuzluk gözlenmektedir. Bunun nedeni, JA diferansiyel denkleminin sonradan eklenen  $\delta_M$  terimidir. Bazı durumlarda  $\delta_M$  terimi olmadan teorik ve deneysel eğriler arasında daha iyi uyum gözlenmesine rağmen, birçok durumda  $\delta_M$  terimi kaldırıldığında fiziksel olmayan çözümler elde edilmiştir.

#W424 toroidine ait dinamik histeresis eğrilerinin JA modeli ile elde edilebilmesi için ilk olarak  $k_1$  ve  $k_2$  parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için toroid çekirdeğine ait şerit genişliği, şerit kalınlığı ve elektriksel öz direnç değerleri ürün katalogundan alınmıştır. Ayrıca  $k_2$  parametresinin hesaplanması için  $V_0$  değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değer doğrudan belirlenememektedir. Bu nedenle daha önceden elde edilen güç kayıplarının frekansa bağlı değişimi (Derebaşı ve ark. 2000) kullanılarak  $k_2$  parametresi hesaplanmıştır.

Anormal güç kayıpları ifadesi

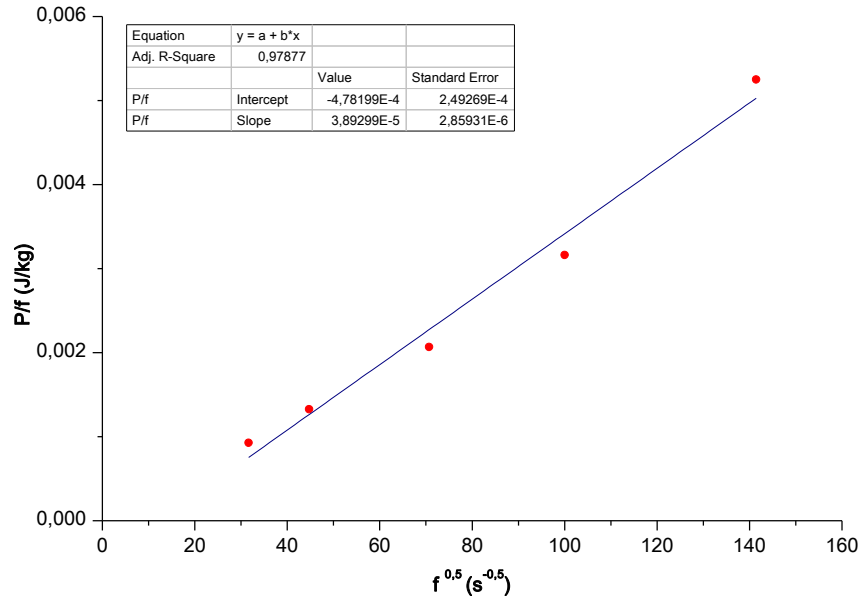


$$P_a = 8 \sqrt{\frac{GSV_0}{\rho}} B_{\max}^{3/2} f^{3/2} \quad (3.23)$$

şeklinde verilmektedir (Bertotti 1998). Burada  $S$  örneğin kesit alanıdır. Eşitliğin her iki tarafı frekansa bölünerek periyot başına düşen güç kaybı elde edilir:

$$\frac{P_a}{f} = 8 \sqrt{\frac{GSV_0}{\rho}} B_{\max}^{3/2} \sqrt{f} \quad (3.24)$$

Eş.(3.24) yardımı ile  $P/f - \sqrt{f}$  grafiğinden,  $k_2$  değeri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. #W424 örneğine ait  $P/f - \sqrt{f}$  değişimi Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



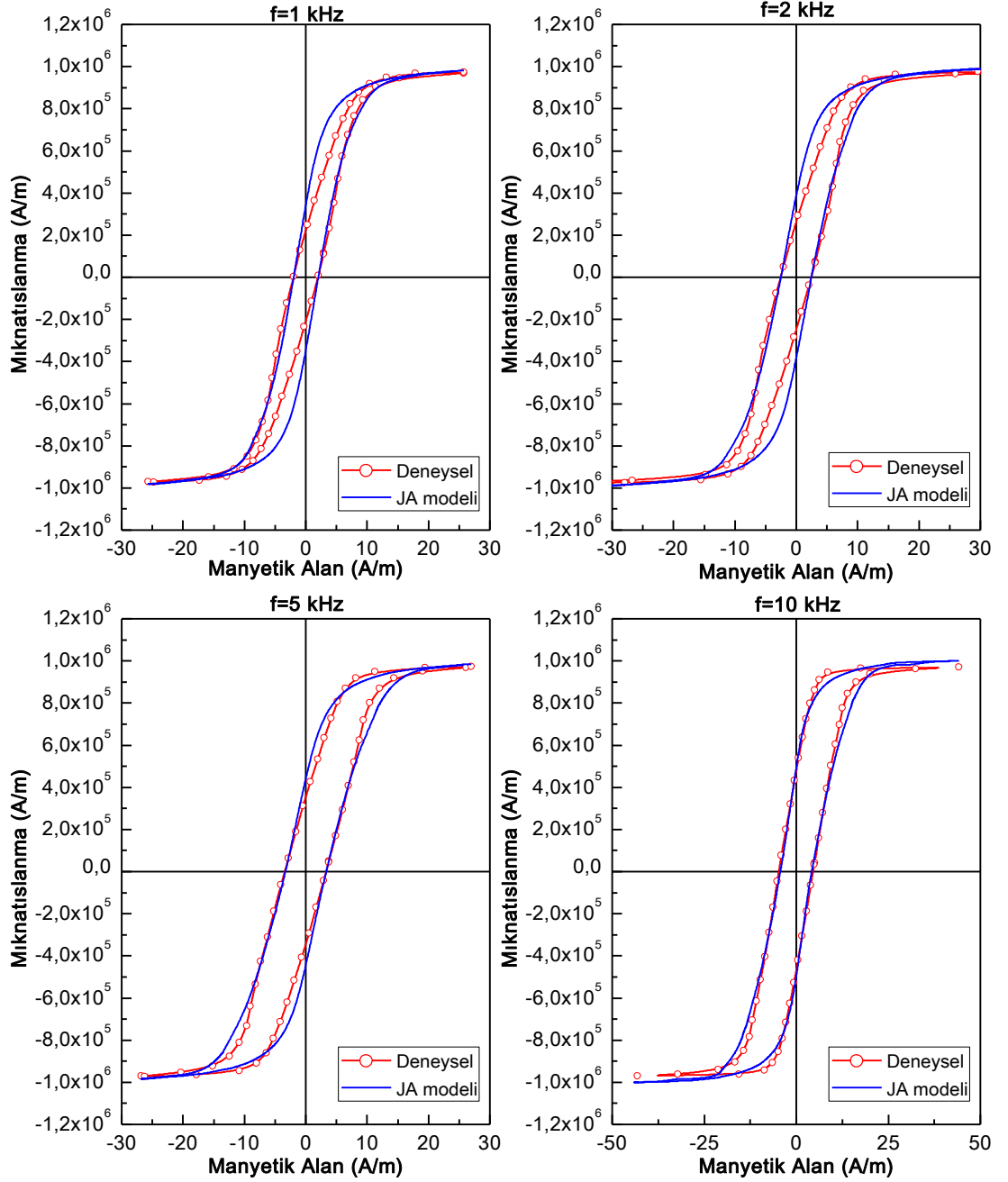
Şekil 3.8. #W424 toroidi için periyot başına güç kayıplarının frekansın karekökü ile değişimi

1, 2, 5 ve 10 kHz mıknatıslama frekansı değerleri için dinamik JA modeli ile elde edilen histeresis eğrileri ve deneysel dinamik histeresis eğrileri Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

### 3.4. Yapay sinir ağı uygulaması

Histeresis özelliğinin, nanokristal toroid çekirdeklerinin geometrik boyutlarına ve çalışma noktalarına bağlı değişimini incelemek için yapay sinir ağıları kullanılarak deneysel eğrilerin benzetişimi yapılmıştır.

Oluşturulan yapay sinir ağlarında, toroid çekirdeklerinin dış çapı ( $d_1$ ), iç çapı ( $d_2$ ), yüksekliği ( $w$ ), manyetik indüksiyon tepe değeri ( $B_{max}$ ), çalışma frekansı ( $f$ ) giriş verisi olarak, manyetik alan ( $H$ ) ve mıknatıslanma ( $M$ ) ise çıkış verisi olarak seçilmiştir.



Şekil 3.9. 1, 2, 5 ve 10 kHz mıknatıslama frekansı değerleri için #W424 toroidine ait deneysel ve JA modelinden elde edilen histeresis eğrileri

Benzetişim için farklı türde yapay sinir ağları kullanılmış ve en uygun yapı elde edilmiştir. Deneysel değerler ile en iyi uyum sağlayan yapay sinir ağı Levenberg-Marquardt ğrenme algoritmasına sahip ve iki gizli katmandan oluşan ileri beslemeli geri yayılımlı (feed-forward backpropagation) yapay sinir ağı olmuştur.

### 3.4.1. İleri beslemeli geri yayılımlı yapay sinir ağı

Çeşitli katmanlardan oluşan ileri beslemeli ağlar, yapay sinir ağlarının önemli bir bölümünü oluşurmaktadır. Bu ağlarda giriş sinyali bir katmandan diğerine ileri yönde yani giriş katmanından çıkış katmanına doğru ilerler. İleri beslemeli yapay sinir ağları *ok katmanlı algılayıcı ağ* (multilayer perceptron-MLP) olarak da adlandırılırlar.

MLP'lerin çalışma ilkesi *geri yayılım algoritması*'na dayanmaktadır. Geri yayılım algoritmasında, giriş sinyalinin farklı ağ katmanlarına geçişi için iki ayrı çalışma mekanizması vardır. Bunlar *ileri doğru* ve *geriye doğru* geçişlerdir. Eğer bir giriş sinyali için istenilen tolerans değerinde bir çıkış elde edilirse, algoritma ileri doğru çalışır ve nöronlara ait ağlıkları değeritirmez. Bunun tersine geriye doğru geçişte, ağın ıkışi kabul edilemez bir hataya sahipse, ağın oluşturduğu çıkış değerı gerçek değerden çıkartılarak bir *hata sinyali* retilir. Bu hata sinyali yapay sinir ağında geriye doğru ilerleyerek, belli bir hata düzeltme kuralı ile ağ ağlıkları değeritirilir.

MLP'ler  ayırt edici özelliğe sahiptirler:

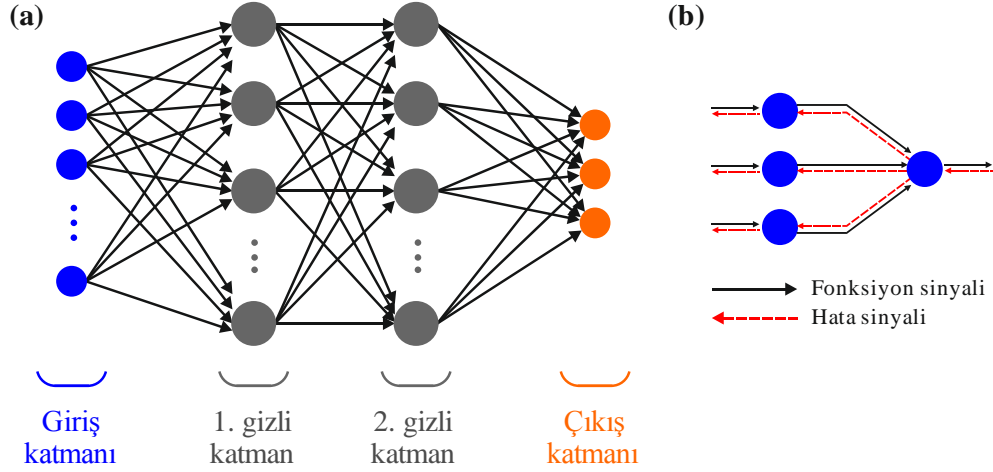
1. Ağdaki her bir nöron doğrusal olmayan transfer fonksiyonlarına sahiptir. Bu fonksiyonlardan en çok yaygın olanı lojistik fonksiyon ile tanımlanan *sigmoid foksiyonu*'dur:

$$y_i = \frac{1}{1 + \exp(-v_i)} \quad (3.25)$$

Burada  $v_i$   $i$ .inci nörona ait girişlerin taban değerleri ile ağlıklılı toplamı ve  $y_i$  ise bu nöronun çıkışıdır.

2. MLP'lerde bir ya da daha fazla sayıda gizli katman vardır. Gizli katmanlardaki nöronlar, ağın çok daha karmaşık görevleri öğrenmesini kolaylaştırmaktadır.
3. Ağdaki nöronlar yüksek derecede sinaptik bağlara sahiptirler.

Çok katmanlı algılayıcı ağıın genel yapısı Şekil 3.10(a)'da, fonksiyon sinyalleri ve hata sinyallerinin geçişleri ise Şekil 3.10(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. (a) İki gizli katmana sahip MLP'nin şematik gösterimi (b) MLP'deki iki temel sinyalin akış yönü: fonksiyon sinyalleri ileri doğru ve hata sinyalleri geriye doğru yayılırlar (Haykin 1999)

Yapay sinir ağlarında bir katmanın çıkışı, ondan sonra gelen diğer katmanın giriş olmaktadır (Şekil 3.11). Bu süreç,

$$\mathbf{a}^{m+1} = f_a^{m+1}(\mathbf{W}^{m+1} \cdot \mathbf{a}^m + \mathbf{b}^{m+1}) \quad m = 0, 1, \dots, m-1 \quad (3.26)$$

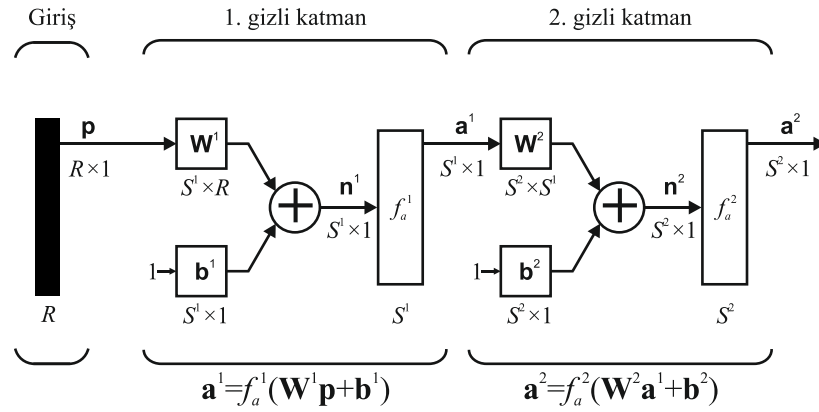
eşitliği ile tanımlanır. Burada  $m$  ağdaki katman sayısı,  $\mathbf{a}$  katman nöronları için giriş vektörü,  $\mathbf{W}$  ağırlık matrisi,  $\mathbf{b}$  taban matrisi ve  $f_a$  ise transfer fonksiyonudur. Ağdaki ilk katman için giriş vektörü

$$\mathbf{a}^0 = \mathbf{p} \quad (3.27)$$

olur. Aynı şekilde ağın çıkış vektörü ise

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}^m \quad (3.28)$$

olmaktadır.



Şekil 3.11. İki katmanlı MLP (Hagan 1996)

Geri yayılım algoritmasının performansı *ortalama karesel hata* (MSE) ile belirlenir. Ağa herhangi bir giriş uygulandığında, ağ çıkışı hedef değer (gerçek çıkış değeri) ile karşılaştırılır. Geri yayılım algoritması, MSE değerini minimize etmek için ağ parametrelerini ayarlar:

$$F(\mathbf{x}) = E[e^2] = E[(t - a)^2] \quad (3.29)$$

Burada  $E[\cdot]$  beklenen değer,  $a$  nöron giriş değeri,  $t$  hedef değer,  $e$  çıkıştaki hatadır.  $\mathbf{x}$  ağırlık ve taban değerlerinden oluşan vektördür:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Eğer yapay sinir ağı çoklu çıkışa sahipse Eş.3.29,

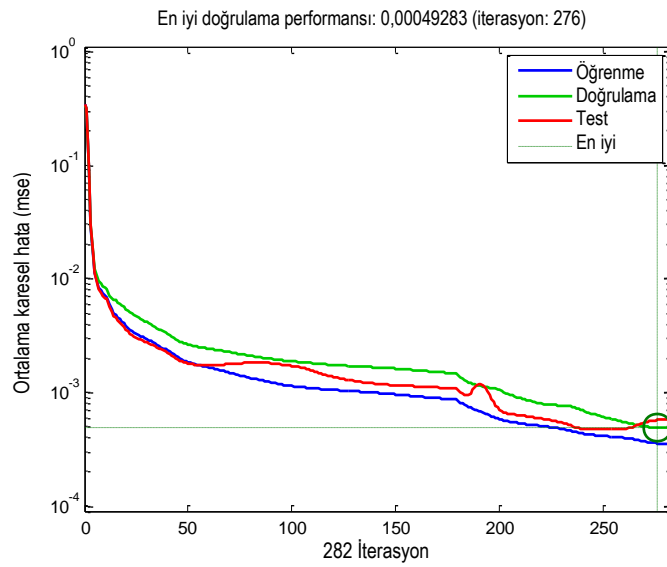
$$F(\mathbf{x}) = E[\mathbf{e}^T \mathbf{e}] = E[(\mathbf{t} - \mathbf{a})^T (\mathbf{t} - \mathbf{a})] \quad (3.31)$$

şeklinde genelleştirilebilir.

Tez çalışmasında dinamik histeresis eğrilerinin benzetişimini yapmak amacıyla oluşturulan yapay sinir ağına iki gizli katman bulunmaktadır. İlk gizli katmanda 14, ikinci gizli katmanda ise 3 nöron kullanılmıştır. Yapay sinir ağının giriş vektörü toplam 10601 satır ve 5 sütundan oluşmaktadır. #W424 ve #W630 toroidlerine ait değerler öğrenme verileri dışında tutularak daha sonra test verileri olarak kullanılmıştır.

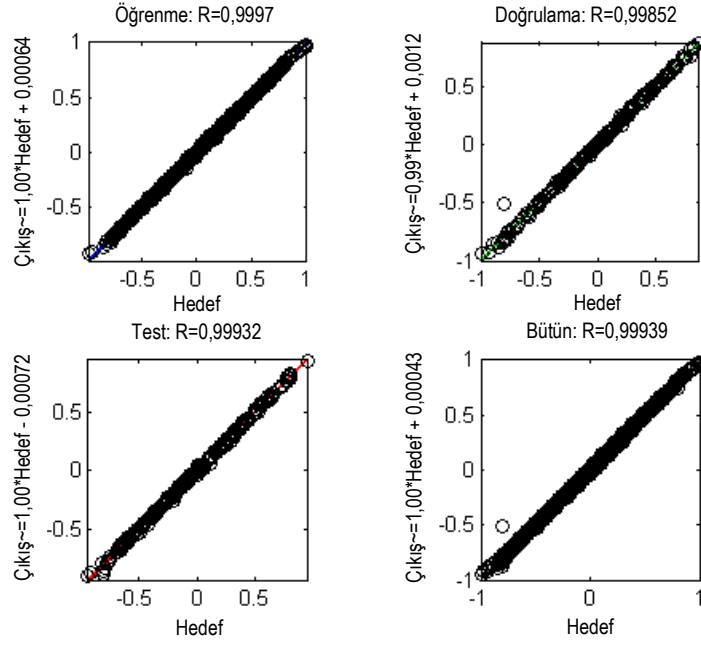
Ağın daha sağlıklı ve daha hızlı öğrenmesi için giriş ve çıkış vektörleri normalize edilmiştir. Yapay sinir ağının eğitilmesi sırasında, ağın performansının daha iyi kontrol edilebilmesi için, verilerin %70'i öğrenme verisi, %15'i test verisi ve %15'i de doğrulama denetim verisi olarak rastgele şekilde seçilmiştir. Bu seçim ağ tarafından otomatik olarak yapılmıştır. Yapay sinir ağının öğrenmesine ait performans grafiği ve öğrenme sonucundaki regresyon grafiği Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

MATLAB® kullanılarak oluşturulan yapay sinir ağının yapısı ve özellikleri Ek.2'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Yapay sinir ağının performans grafiği

Öğrenme sonucunda yapay sinir ağından elde edilen çıkış değerleri ile gerçek değerler arasında %99,94 oranında uyum sağlanmıştır.



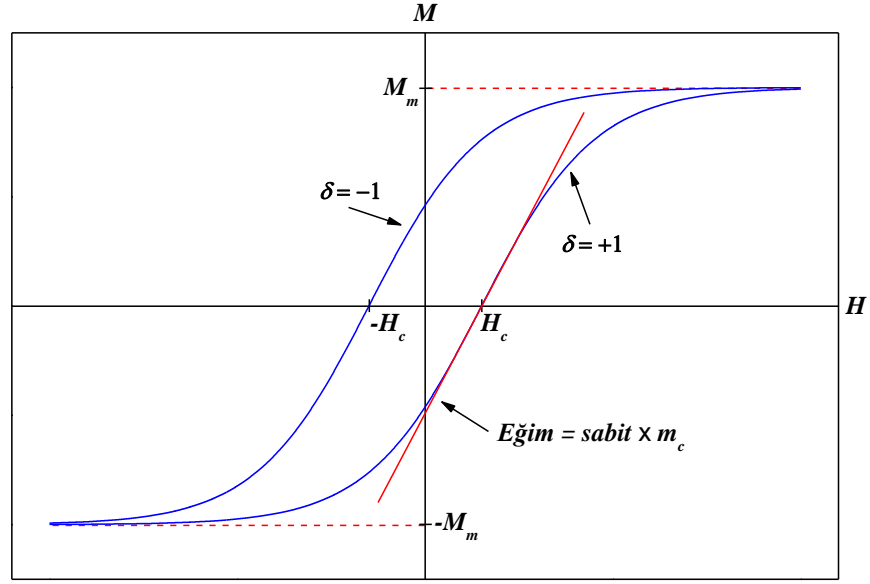
Şekil 3.13. Yapay sinir ağının öğrenmesi sonucundaki regresyon grafiği

### 3.5. Doyum durumundaki histeresis eğrileri için öngörülen matematiksel model

Histeresis eğrileri simetrik özelliklerinden dolayı, koordinat eksenlerinin merkezinden  $\pm H_c$  kadar kaymış iki sigmoidal fonksiyonun birleşimi gibi düşünülebilirler. Bu nedenle toroid çekirdeklerinin doyum durumundaki histeresis eğrilerini belirlemek için sigmoidal değişime sahip bir fonksiyon kullanılarak, ferromanyetik malzemelere ait fiziksel parametreleri içeren

$$M = \frac{2M_m}{1 + \exp\left(\frac{H - \delta H_c}{m_c}\right)} - M_m \quad (3.32)$$

ifadesi geliştirilmiştir. Burada  $M_m$  mıknatıslanmanın tepe değeri,  $H_c$  sıfırlayıcı alan,  $\delta$  manyetik alanın yönünü gösteren işaret fonksiyonu (histeresis eğrisinin artan dalı için  $\delta=+1$ , azalan dalı için  $\delta=-1$ ) ve  $m_c$  ise histeresis eğrisinin sıfırlayıcı alan noktasındaki eğimi ile ilgili bir parametredir. Eş.(3.32) kullanılarak elde edilmiş histeresis eğrisi ve üzerindeki noktalar Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



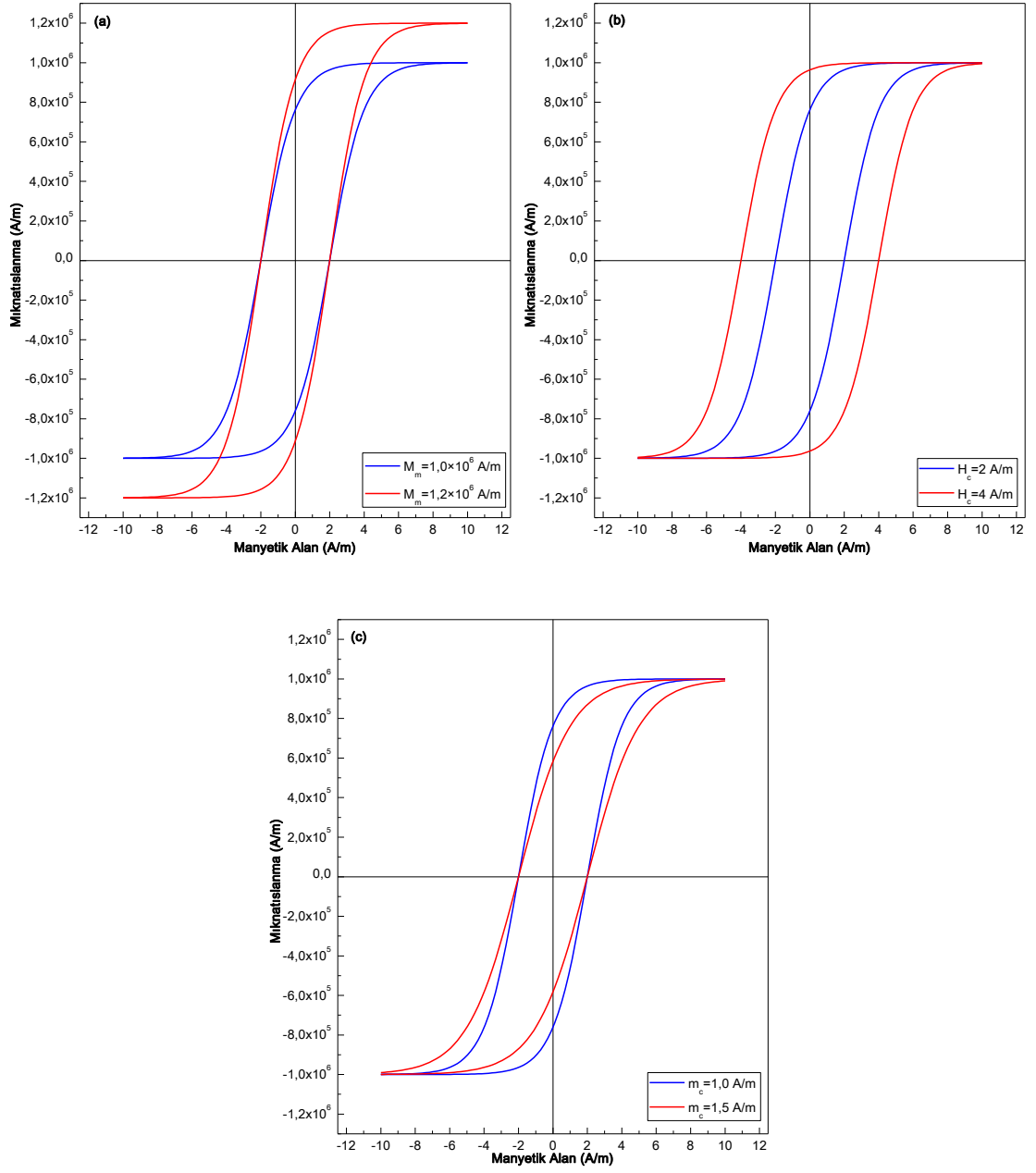
Şekil 3.14. Eş.(3.32) kullanılarak elde edilmiş histeresis eğrisi ve üzerindeki noktalar

Eş.(3.32)'deki en önemli nokta  $m_c$  parametresinin belirlenmesidir. Çünkü diğer parametreler deneysel histeresis eğrisinden elde edilirken  $m_c$  parametresi ancak eğri uydurma ile belirlenebilmektedir.

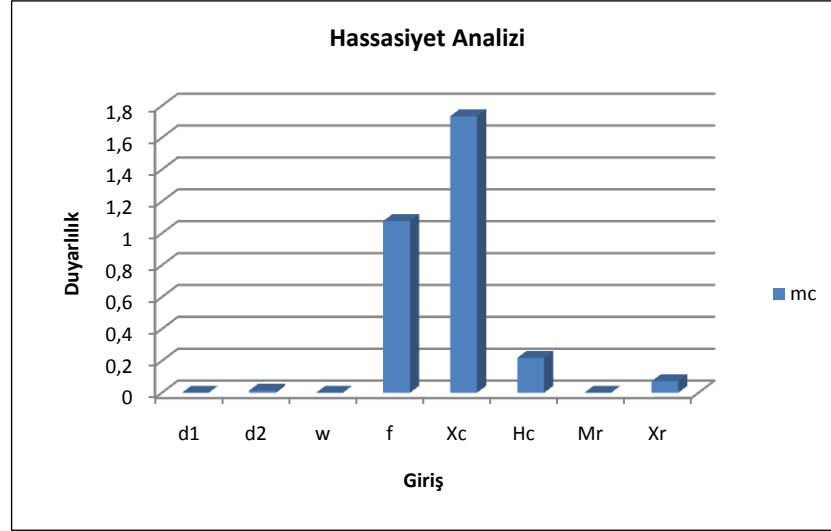
$M_m=1,0 \times 10^6$  A/m,  $H_c=2$  A/m ve  $m_c=1$  A/m değerleri ile elde edilen histeresis eğrisinin (şekilde mavi düz çizgi ile gösterilen) model parametrelerine bağlı olarak değişimi Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

$m_c$  parametresinin hassas bir şekilde tahmin edilebilmesi için çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağı kullanılmıştır (Ek.3). Toroid çekirdeklerinin boyutları, çalışma frekansı ve deneysel histeresis eğrilerine ait belirleyici noktalar bu ağın giriş vektörü olarak seçilmiştir. YSA'nın yüksek düzeyde öğrenmesi (%99.999) sağlandıktan sonra hassasiyet analizi yapılmıştır. Hassasiyet analizi ve YSA giriş parametreleri ile  $m_c$  değişimi Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

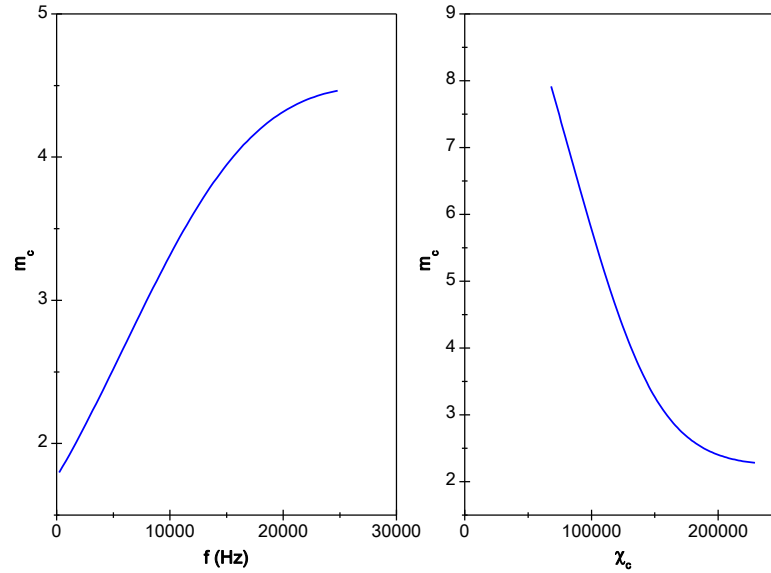




Şekil 3.15. Eş.(3.32) kullanılarak elde edilen histeresis eğrilerinin (a)  $M_m$ , (b)  $H_c$  ve (c)  $m_c$  parametrelerine bağlı olarak değişimi



Şekil 3.16. YSA sonucunda elde edilen hassasiyet analizi



Şekil 3.17. Hassasiyet analizine göre  $m_c$  parametresinin frekans ve sıfırlayıcı alan noktasındaki alınganlık ile değişimi

Şekil 3.16'dan görüldüğü gibi  $m_c$  parametresi en çok mıknatıslama frekansı ve sıfırlayıcı alan noktasındaki alınganlık değerlerine bağlıdır. YSA uygulaması sonucunda elde edilen  $m_c-f$  ve  $m_c-\chi_c$  değişimleri için eğri uydurma yöntemi ile

$$\begin{aligned}
 m_c(f) &= -3,65 \times 10^{-9} f^2 + 2,07 \times 10^{-4} f \\
 m_c(\chi_c) &= 1,54 + 19,52 \exp(-1,57 \times 10^{-5} \chi_c)
 \end{aligned}
 \tag{3.33}$$

ifadeleri elde edilmiştir. Bu analitik ifadeler yardımı ile Eş.(3.32) kullanılarak, istenilen statik ve dinamik histeresis eğrilerinin elde edilmesi mümkündür.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Statik histeresis eğrileri

#W380, #W423, #W424 ve #W624 toroidleri için Simulink modeli (Şekil 3.3) ile belirlenen JA model parametreleri ve deneysel statik histeresis eğrilerinden hesaplanmış Eş.(3.32)'de kullanılan parametreler, sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

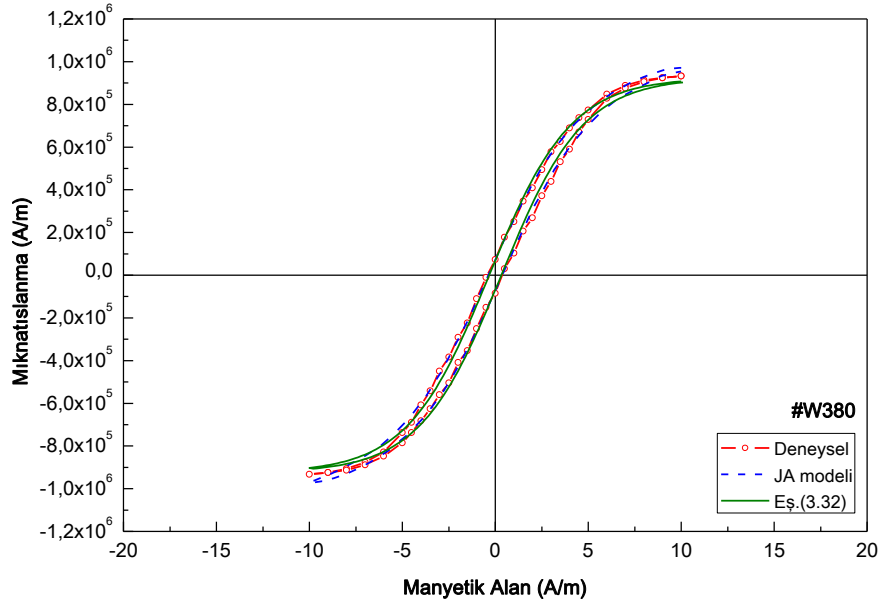
Çizelge 4.1. #W380, #W423, #W424 ve #W624 toroidleri için elde edilen JA model parametreleri

Parametre	#W380	#W423	#W424	#W624
$M_s$ [A/m]	$1,248 \times 10^6$	$1,220 \times 10^6$	$1,030 \times 10^6$	$1,250 \times 10^6$
$a$ [A/m]	2,195	1,836	1,212	6,060
$\alpha$ [----]	$2,360 \times 10^{-7}$	$2,233 \times 10^{-7}$	$3,839 \times 10^{-9}$	$1,486 \times 10^{-9}$
$c$ [----]	0,3338	0,3613	0,1871	0,6817
$k$ [A/m]	0,5662	0,6512	0,5103	0,2922

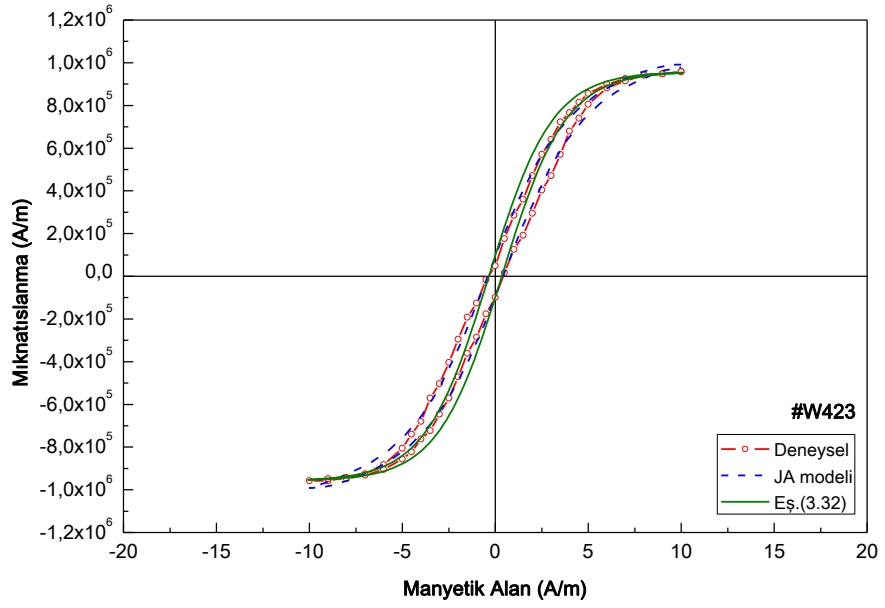
Çizelge 4.2. Statik histeresis eğrilerinin Eş.(3.32) kullanılarak belirlenmesi için gerekli olan parametreler

Parametre	#W380	#W423	#W424	#W624
$M_s$ [A/m]	$9,25 \times 10^5$	$9,65 \times 10^5$	$8,98 \times 10^5$	$9,56 \times 10^5$
$H_c$ [A/m]	0,33	0,35	0,48	0,27
$m_c$ [A/m]	2,20	1,71	1,70	5,40
$\chi_c$ [---]	$7,76 \times 10^5$	$2,79 \times 10^5$	$2,83 \times 10^5$	$5,99 \times 10^4$

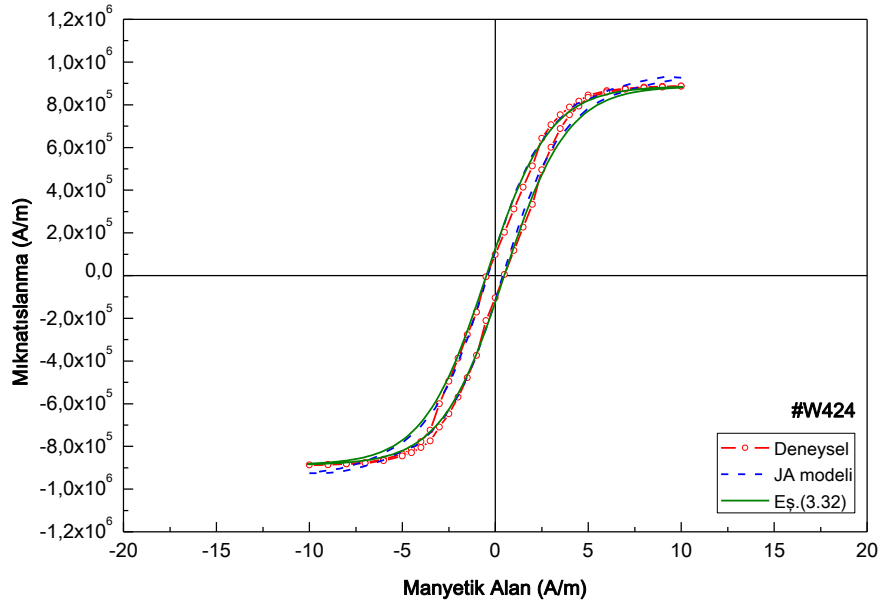
Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilen parametreler kullanılarak JA modelinin (Şekil 3.6) çözümünden ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir.



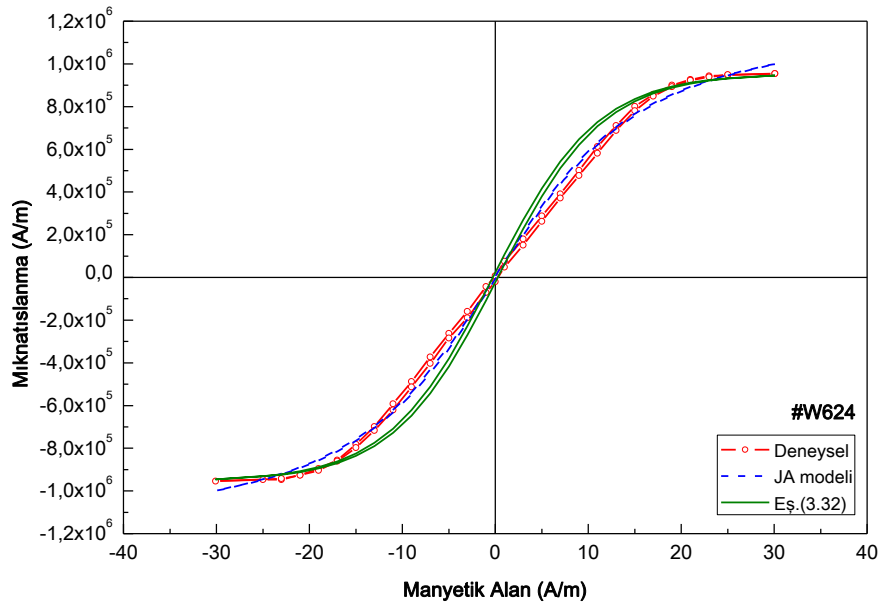
Şekil 4.1. #W380 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri



Şekil 4.2. #W423 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri

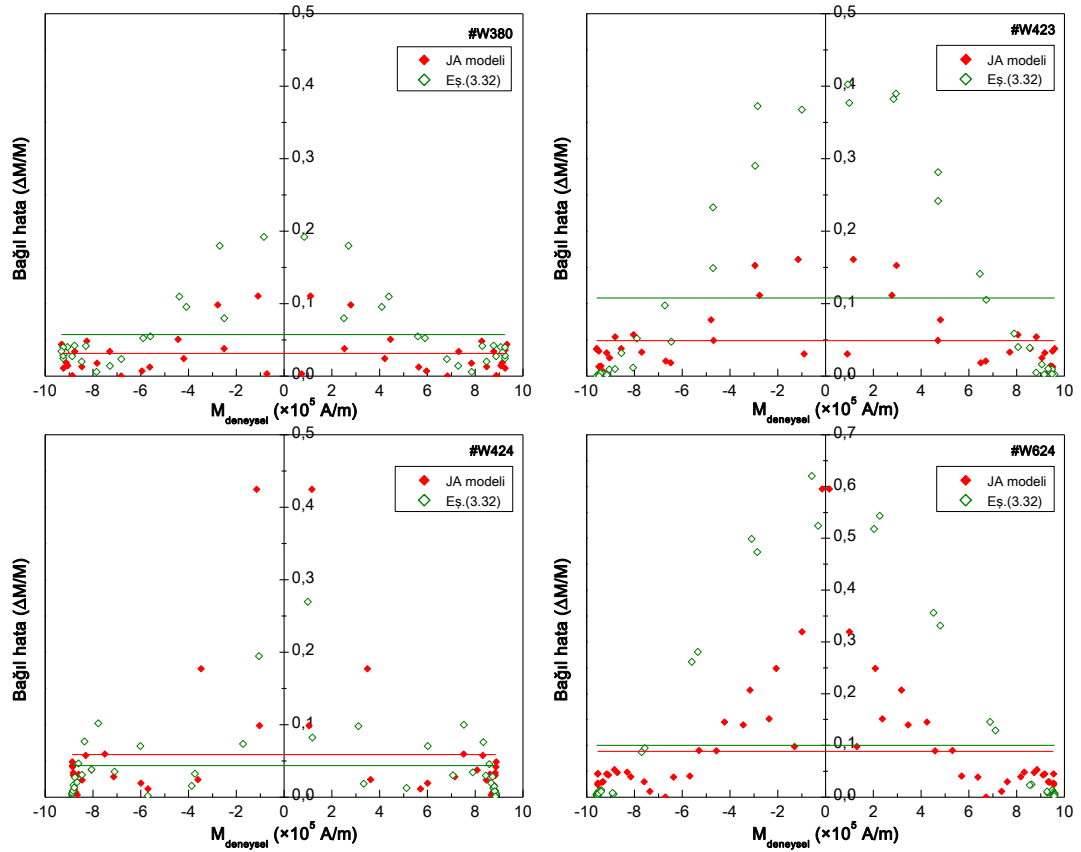


Şekil 4.3. #W424 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri



Şekil 4.4. #W624 toroidi için deneysel, JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri

JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri ile deneysel eğrilere ait noktalar için bağıl hata değerleri Şekil 4.5'te ve hesaplanan uyum değerleri ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Statik histeresis eğrileri için deneysel ve teorik noktalar arasındaki bağılı hatalar

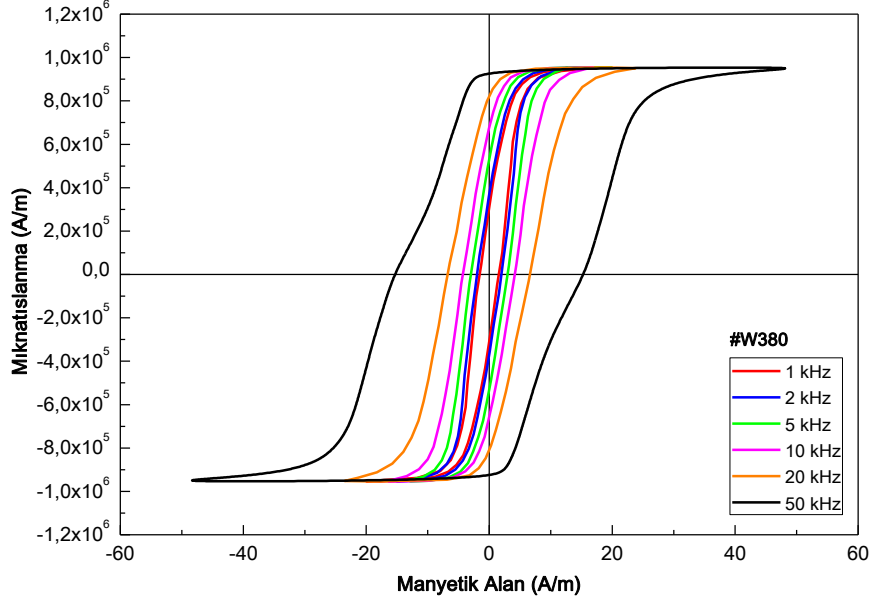
Çizelge 4.3. #W380, #W423, #W424 ve #W624 toroidlerine ait JA modeli ve Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri

Toroid çekirdeği	Uyum (%)	
	JA modeli	Eş.(3.32)
#W380	96,86	94,24
#W423	95,10	88,49
#W424	94,09	95,62
#W624	91,12	89,97

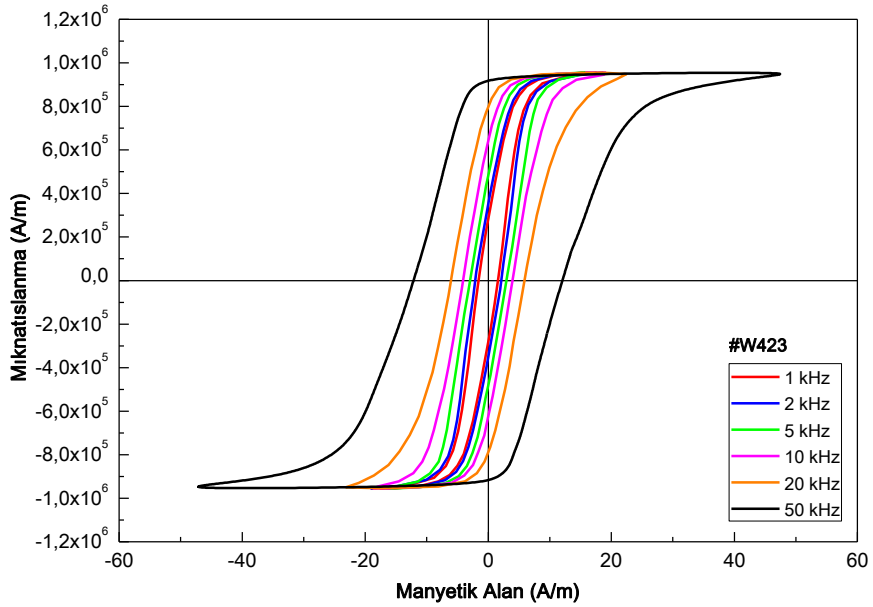
Eş.(3.33)'ün elde edilmesinde kullanılan yapay sinir ağı çıkışı  $m_c$  için 1,5-7,8 A/m aralığındadır. #W624 toroidi için yapılan hesaplamalara göre,  $m_c$  parametresinin yaklaşık olarak 8,5 A/m olması gerekmektedir. Bu nedenle, #W624 toroidi için Eş.(3.32)'den elde edilen statik histeresis eğrisi ile deneysel eğri arasındaki uyum, JA modeline göre yaklaşık %2 daha küçük bulunmuştur.

## 4.2. Deneysel histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi

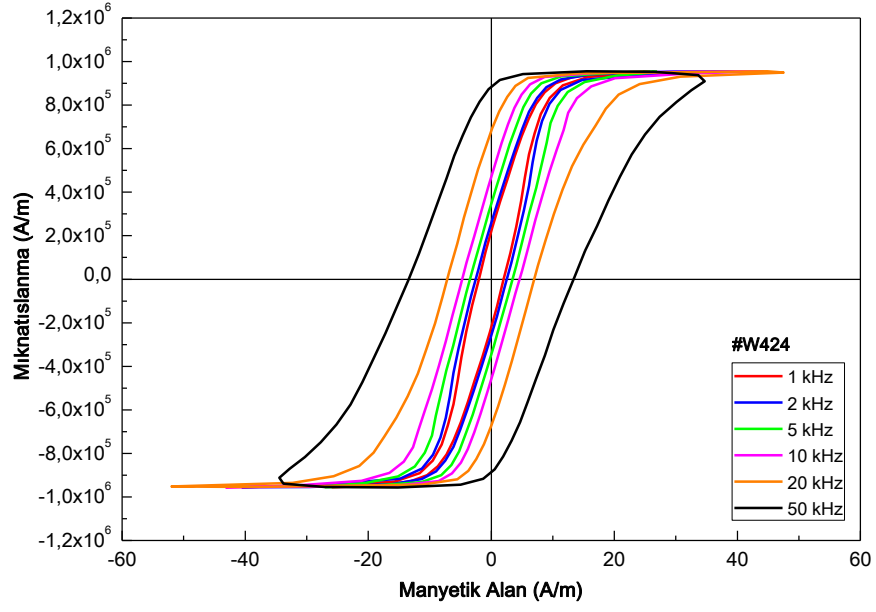
#W380, #W423, #W424, #W624, #W628 ve #W630 toroidleri için 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekanslarında daha önceden elde edilen (Derebaşı ve ark. 200) dinamik histeresis eğrileri Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir.



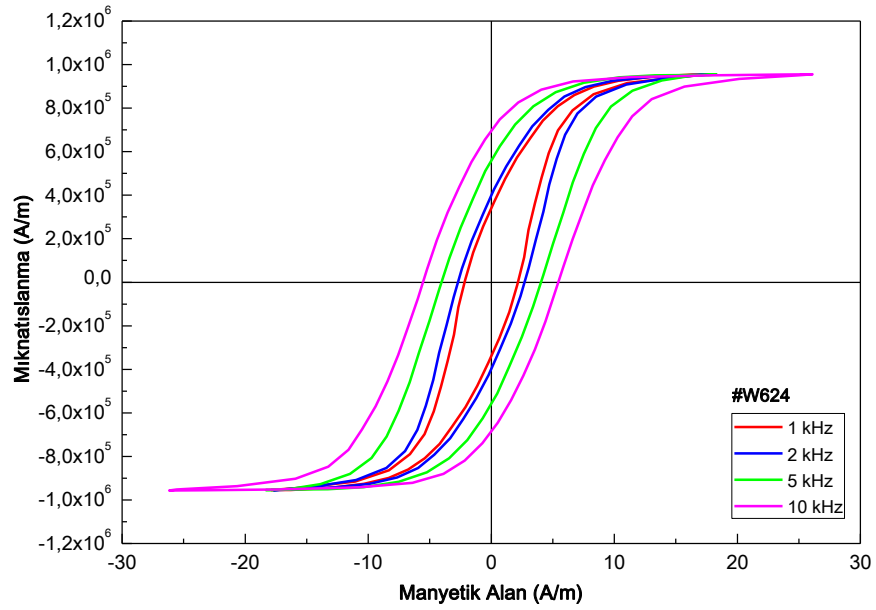
Şekil 4.6. #W380 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi



Şekil 4.7. #W423 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi

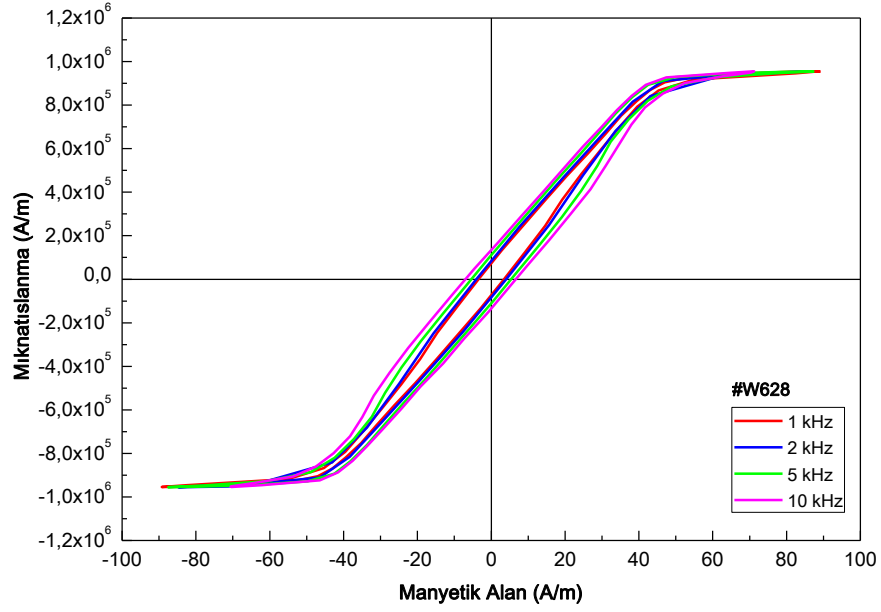


Şekil 4.8. #W424 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi

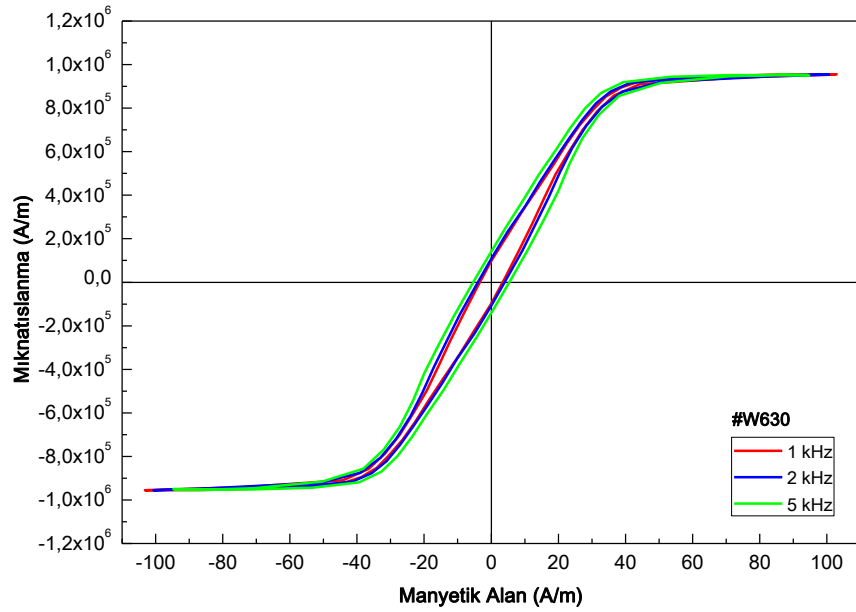


Şekil 4.9. #W624 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi





Şekil 4.10. #W628 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi



Şekil 4.11. #W630 toroidi için histeresis eğrilerinin frekans ile değişimi

Mıknatıslama frekansının artması ile toroid çekirdeklerinin histeresis eğrileri genişlemiştir. Çalışma frekansına bağlı olarak, histeresis eğrisinin genişliğini belirleyen sıfırlayıcı alan ( $H_c$ ) değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Frekanstaki artış ile birlikte histeresis eğrileri genişlerken, aynı zamanda toroid çekirdeklerinde ortaya çıkan güç kayıpları artmıştır. Güç kayıplarının artmasından dolayı, toroid çekirdeklerini doyuma ulaştırmak için verilmesi gereken manyetik enerjide de artış gerçekleşmiştir. Buna bağlı

olarak manyetik doyum için uygulanan manyetik alan değerinin frekansla birlikte arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. Mıknatıslama frekansı değerlerine karşılık deneysel histeresis eğrilerinden hesaplanan sıfırlayıcı alan değerleri

Toroid çekirdeği	Frekans [Hz]	Sıfırlayıcı alan [A/m]
#W380-25×16×10	DC	0,33
	1000	1,56
	2000	1,99
	5000	3,03
	10000	4,22
	20000	6,63
	50000	15,57
#W423-30×20×10	DC	0,35
	1000	1,59
	2000	2,08
	5000	2,94
	10000	3,93
	20000	5,88
	50000	12,05
#W424-40×25×15	DC	0,48
	1000	2,02
	2000	2,51
	5000	3,44
	10000	4,62
	20000	6,90
	50000	13,40
#W624-40×32×15	DC	0,27
	1000	2,16
	2000	2,70
	5000	4,03
	10000	5,45
#W628-80×63×20	1000	3,43
	2000	4,01
	5000	5,40
	10000	6,66
#W630-130×100×25	1000	3,40
	2000	3,96
	5000	5,39

### 4.3. Dinamik histeresis eğrilerinin yapay sinir ağları ile benzetişimi

Oluşturulan yapay sinir ağında öğrenme verileri için giriş vektörü olarak kullanılan nanokristal yapıdaki toroid çekirdeklerinin geometrik parametreleri ile çalışma parametreleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. YSA'da öğrenme verisi olarak kullanılan toroid çekirdeği boyutları ile çalışma parametreleri

Geometrik parametreler			Çalışma parametreleri	
Dış çap [mm] ( $d_1$ )	İç çap [mm] ( $d_2$ )	Şerit genişliği [mm] ( $w$ )	Frekans [kHz] ( $f$ )	Man. ind. tepe değeri [T] ( $B_{max}$ )
25	16	10	1	0,05
30	20	10	2	0,1
40	25	15	5	0,2
40	32	15	20	0,4
			50	0,8
			100	1,1
				1,2

YSA'da test verisi için giriş vektörü olarak kullanılan toroidlere ait geometrik parametreler ile çalışma parametreleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

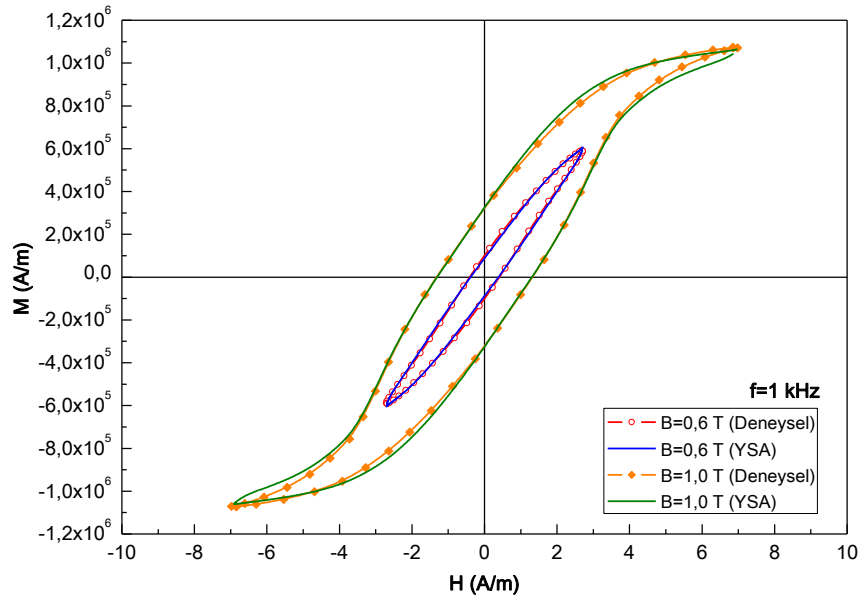
Çizelge 4.6. YSA'da test verisi olarak kullanılan toroid çekirdeği boyutları ile çalışma parametreleri

Geometrik parametreler			Çalışma parametreleri	
Dış çap (mm) [ $d_1$ ]	İç çap (mm) [ $d_2$ ]	Şerit genişliği (mm) [ $w$ ]	Frekans (kHz) [ $f$ ]	Man. ind. tepe değeri (T) [ $B_{max}$ ]
80	63	20	10	0,6
130	100	25		1,0

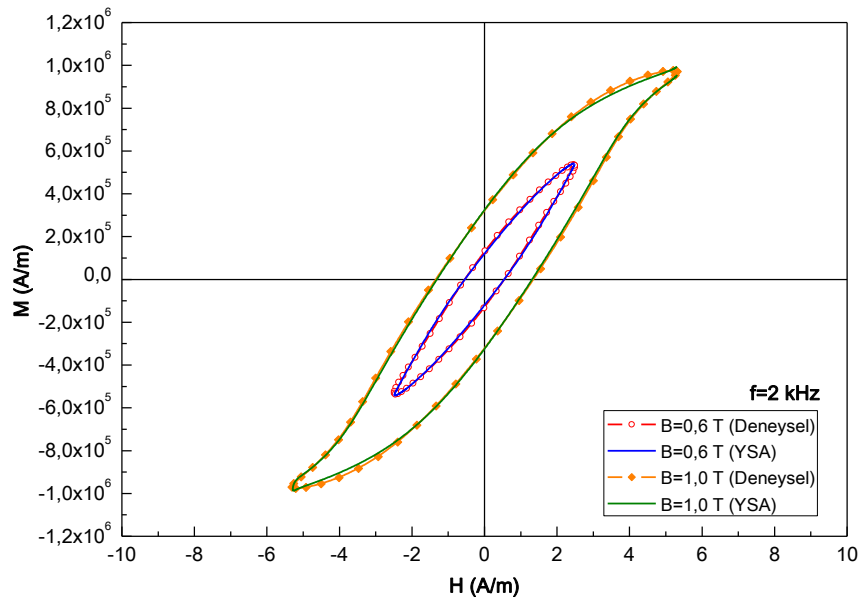
YSA yardımı ile sadece geometrik parametreler ve çalışma noktalarına bağlı olarak, dinamik histeresis eğrilerini oluşturan manyetik alan ( $H$ ) ve mıknatıslanma ( $M$ ) değerleri elde edilmiştir. YSA test verisi olarak kullanılan, tüm toroid çekirdeklerine ait 0,6 T ve 1,0 T manyetik indüksiyon değerlerindeki histeresis eğrileri ile #W628 ve #W630 toroidlerine ait doyum durumundaki histeresis eğrileri için elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.1 ve 4.3.2'de verilmiştir.

#### 4.3.1. Test verilerine ait 0,6 T ve 1,0 T manyetik indüksiyon değerleri için benzetişim sonuçları

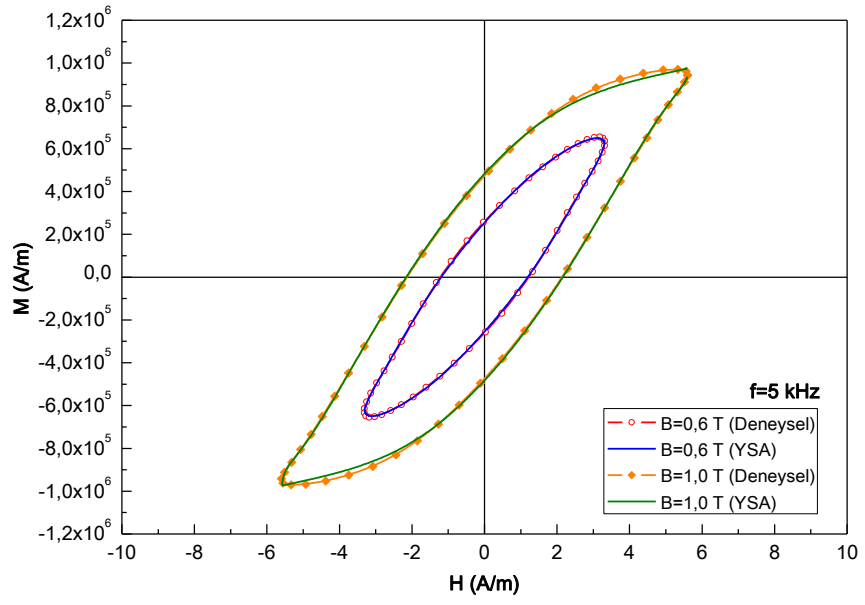
#W380 toroidine ait 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekanslarında 0,6 T ve 1,0 T değerleri için deneysel ve benzetişim sonucunda elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17'de gösterilmiştir.



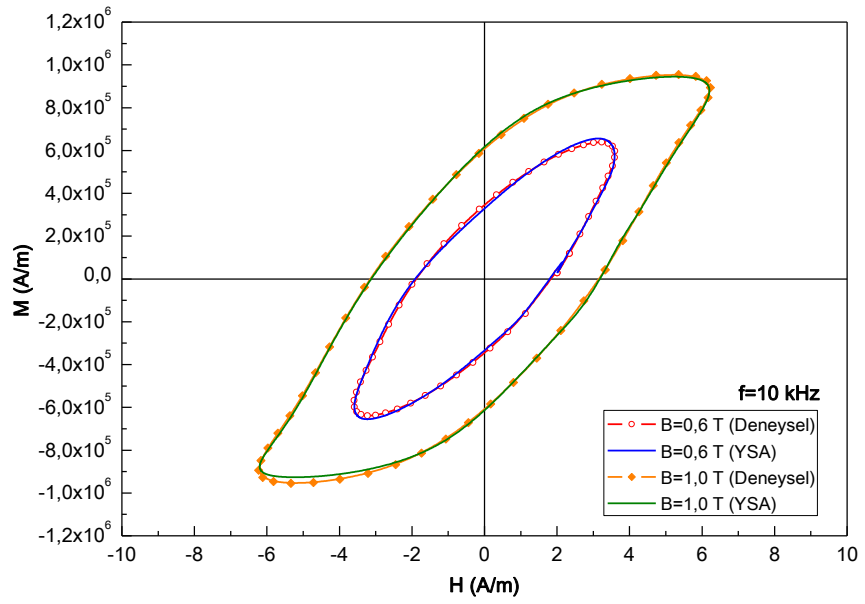
Şekil 4.12. #W380 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



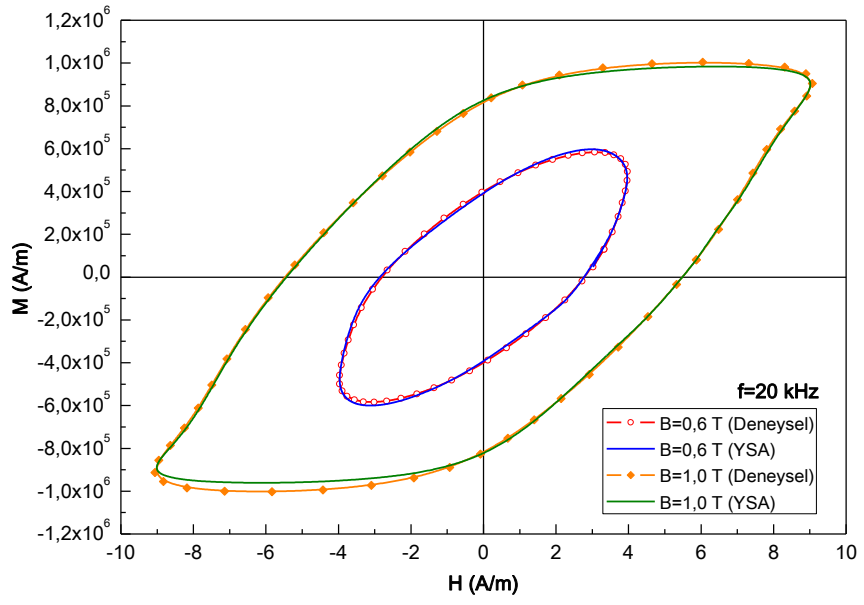
Şekil 4.13. #W380 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



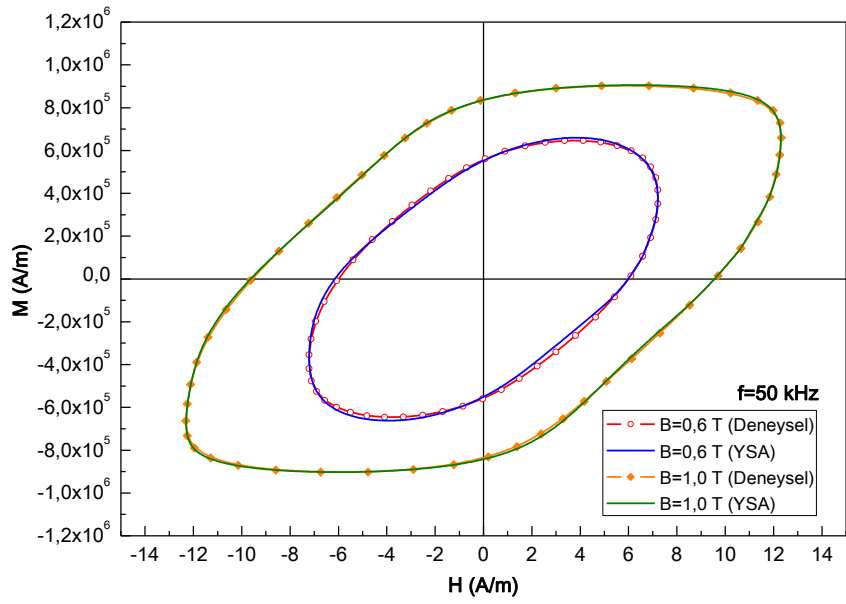
Şekil 4.14. #W380 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.15. #W380 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

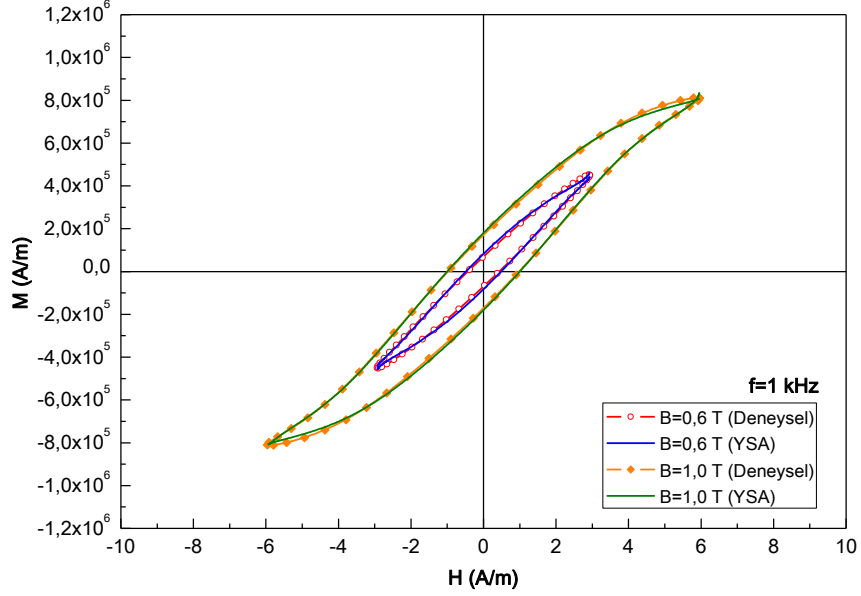


Şekil 4.16. #W380 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

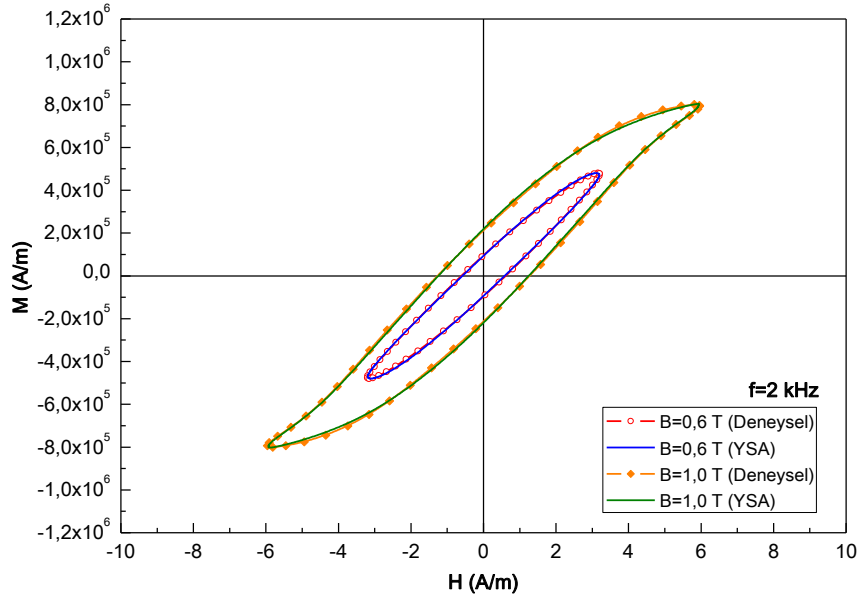


Şekil 4.17. #W380 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

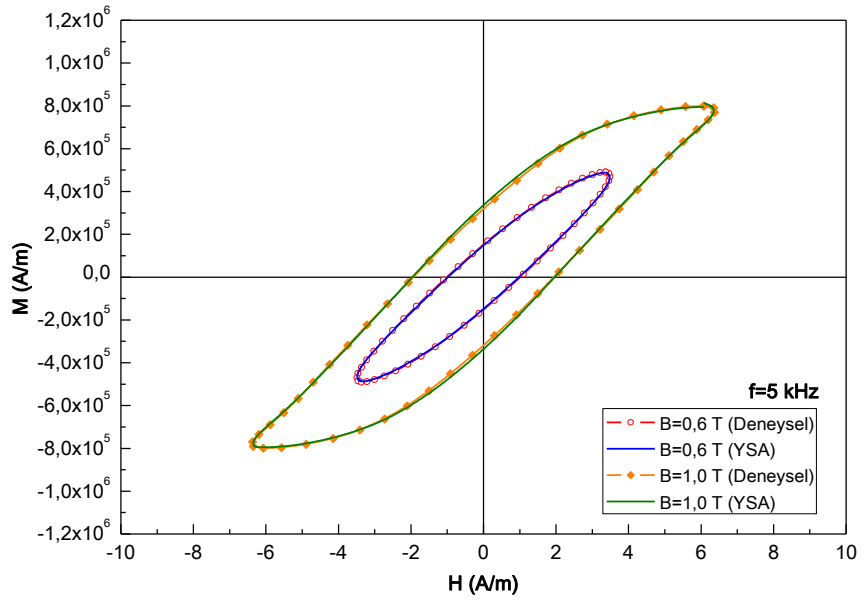
#W423 toroidine ait 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekanslarında 0,6 T ve 1,0 T değerleri için deneysel ve benzetişim sonucunda elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23'te gösterilmiştir.



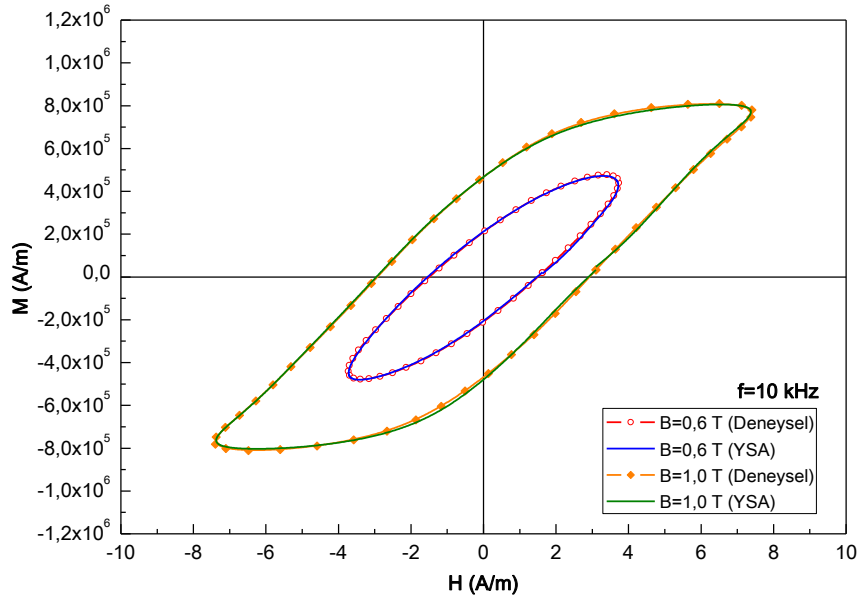
Şekil 4.18. #W423 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.19. #W423 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

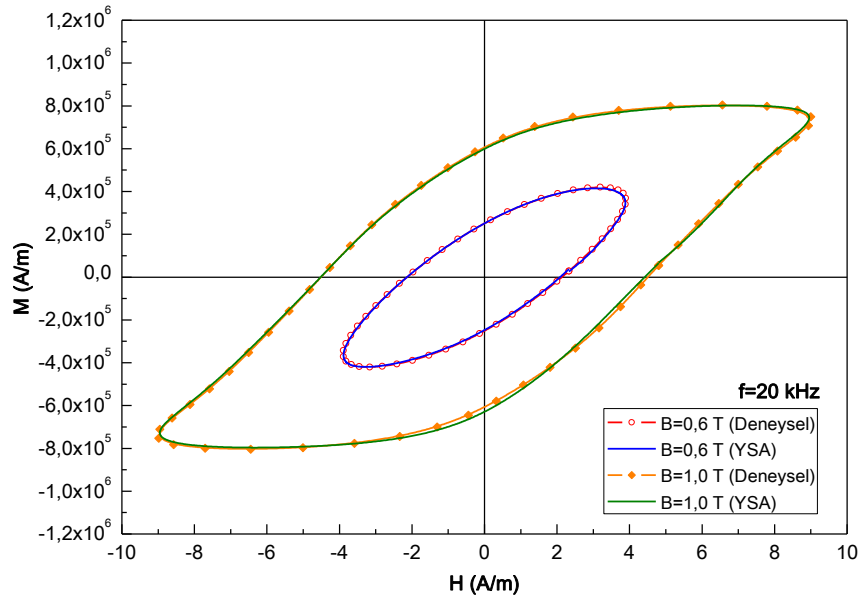


Şekil 4.20. #W423 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

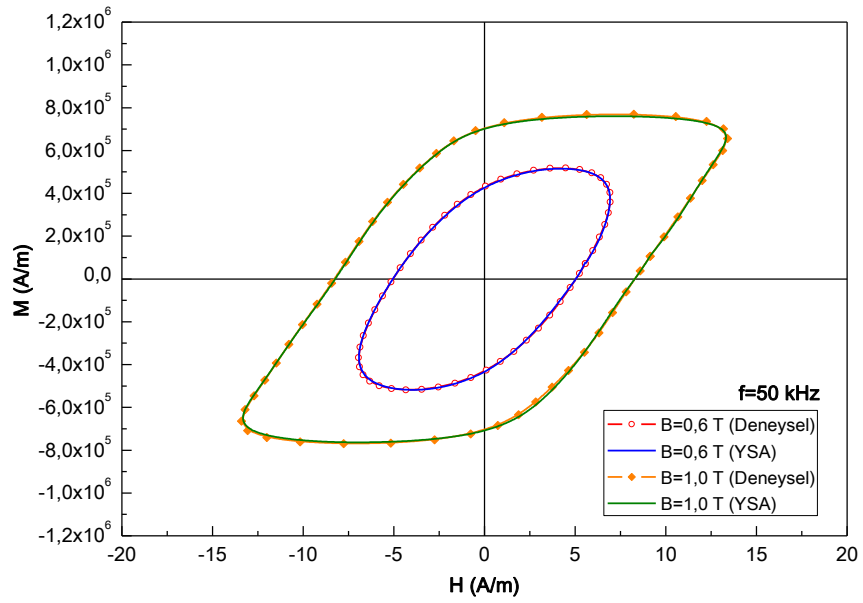


Şekil 4.21. #W423 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



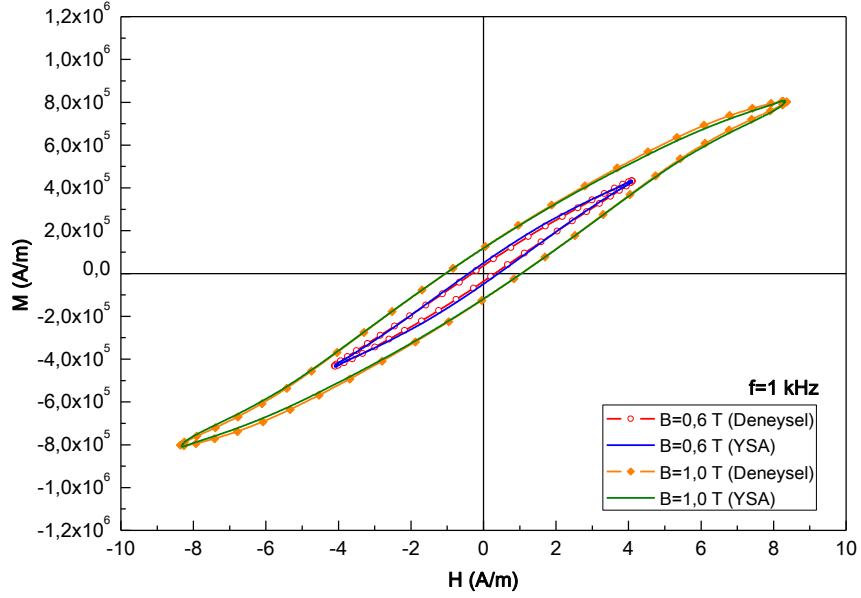


Şekil 4.22. #W423 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

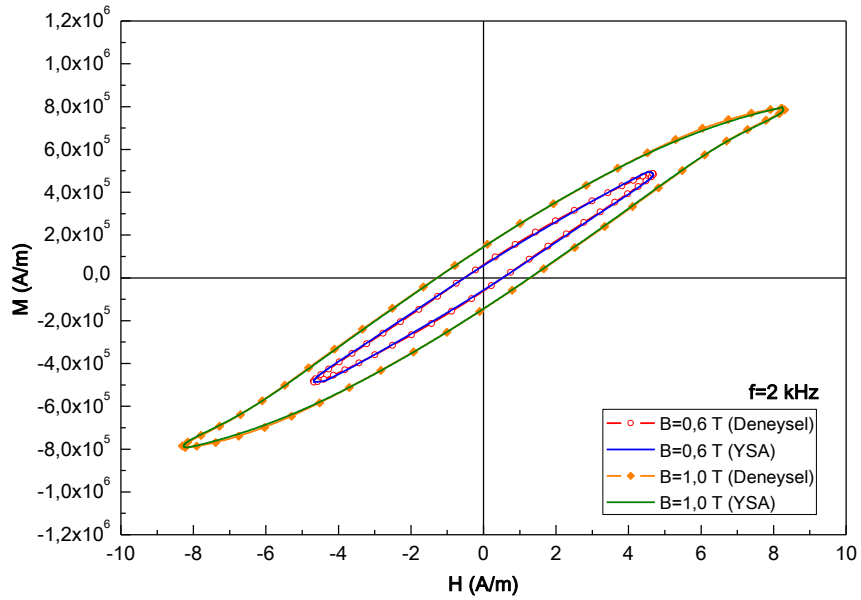


Şekil 4.23 #W423 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

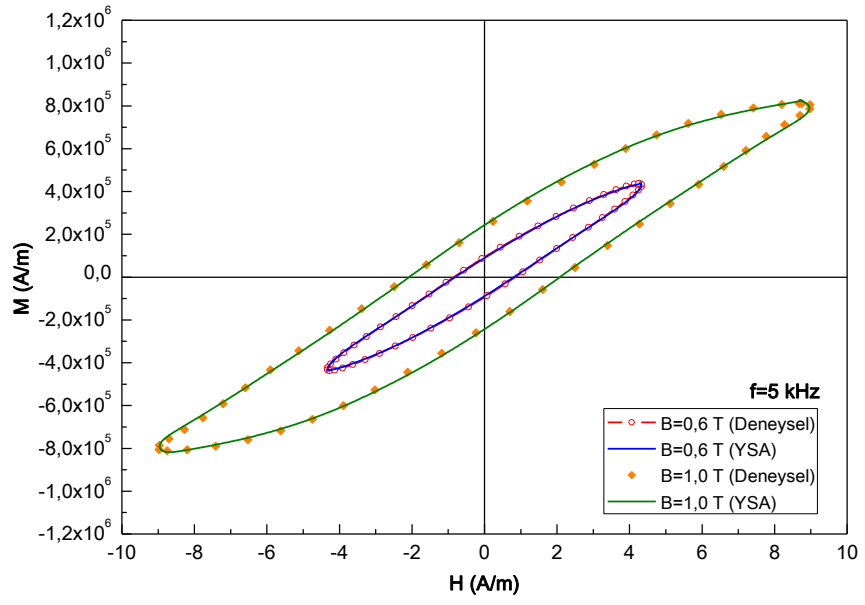
#W424 toroidine ait 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekanslarında 0,6 T ve 1,0 T değerleri için deneysel ve benzetim sonucunda elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da gösterilmiştir.



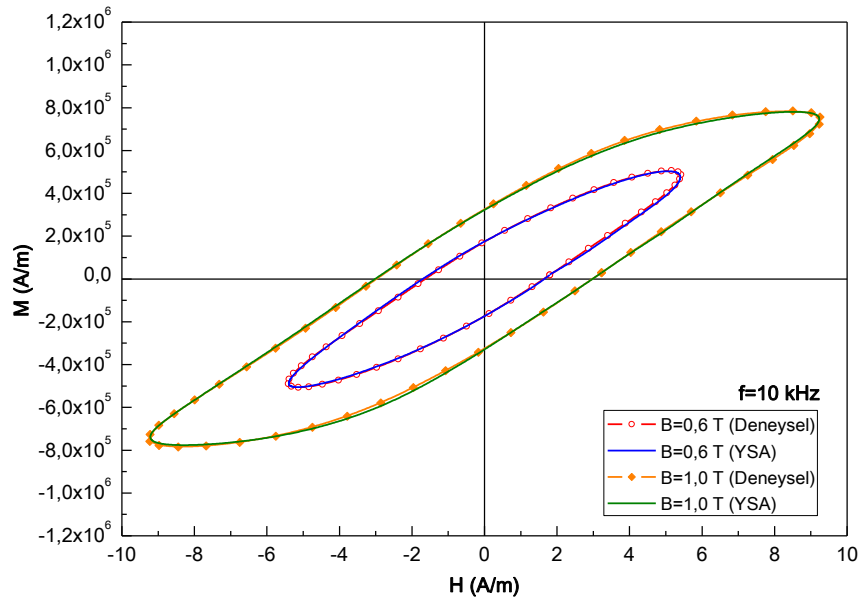
Şekil 4.24. #W424 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



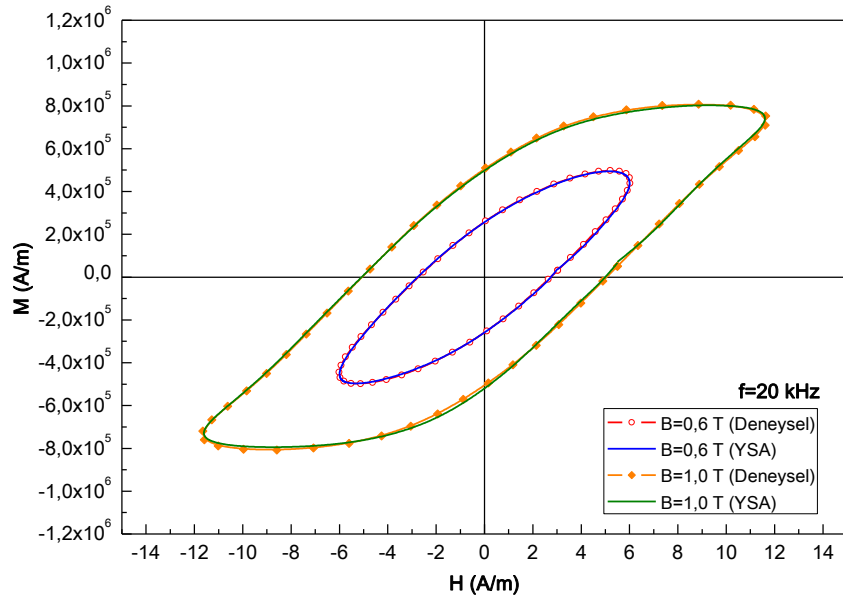
Şekil 4.25. #W424 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



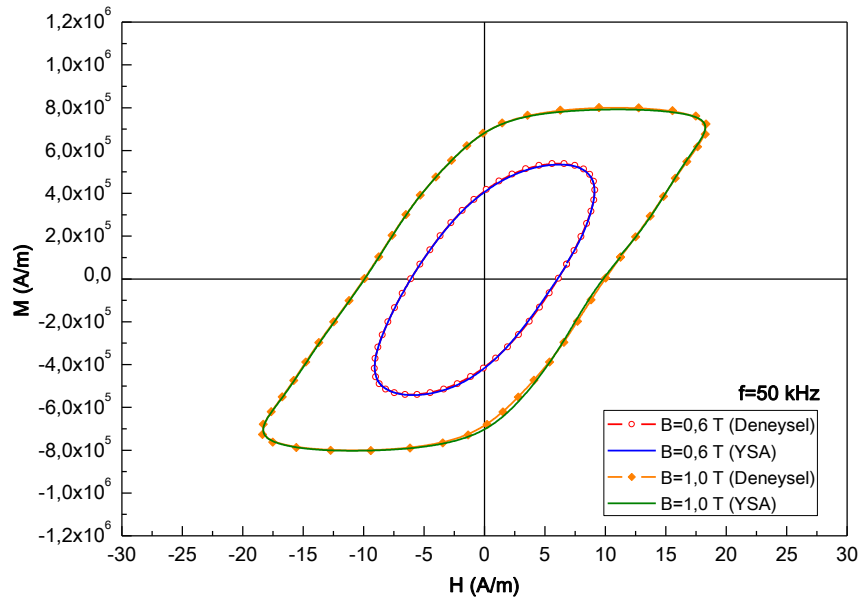
Şekil 4.26. #W424 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.27. #W424 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

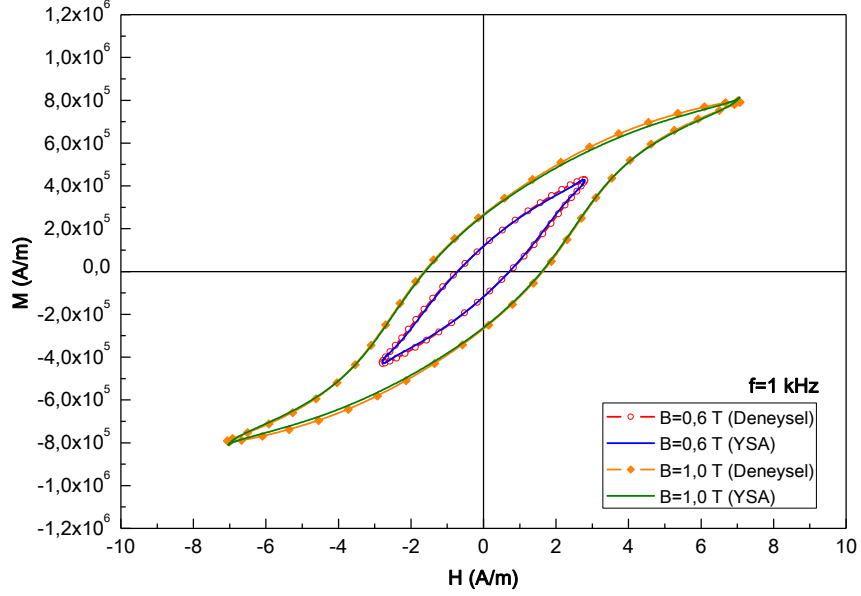


Şekil 4.28. #W424 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

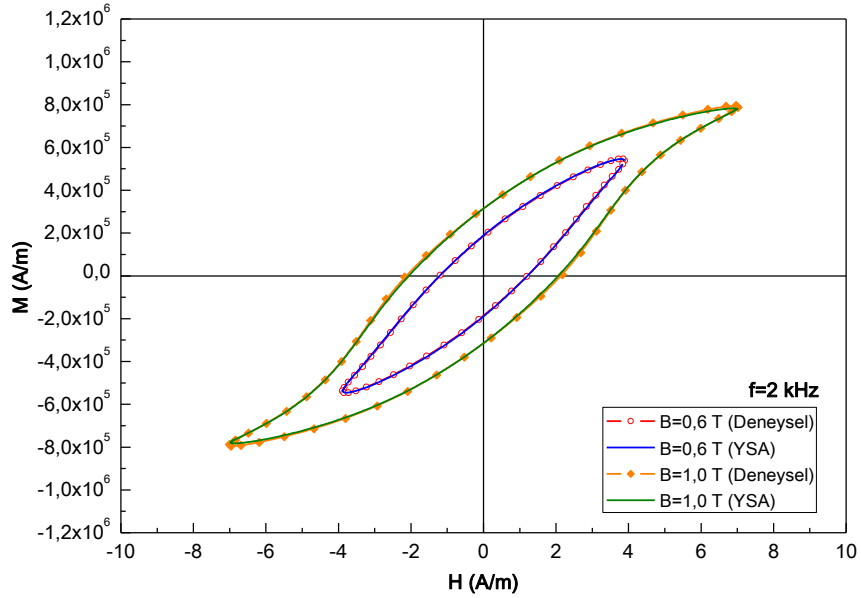


Şekil 4.29. #W424 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

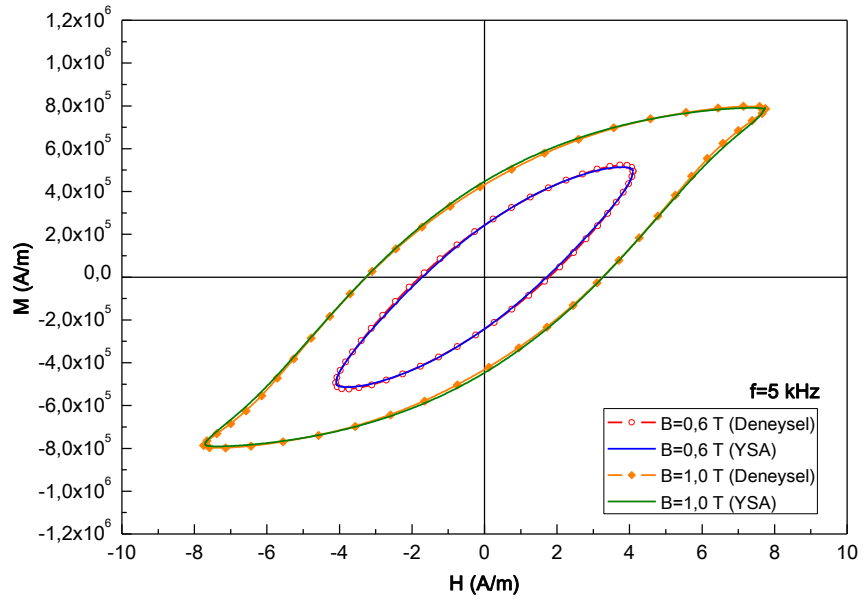
#W624 toroidine ait 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekanslarında 0,6 T ve 1,0 T değerleri için deneysel ve benzetişim sonucunda elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 ve 4.35'te gösterilmiştir.



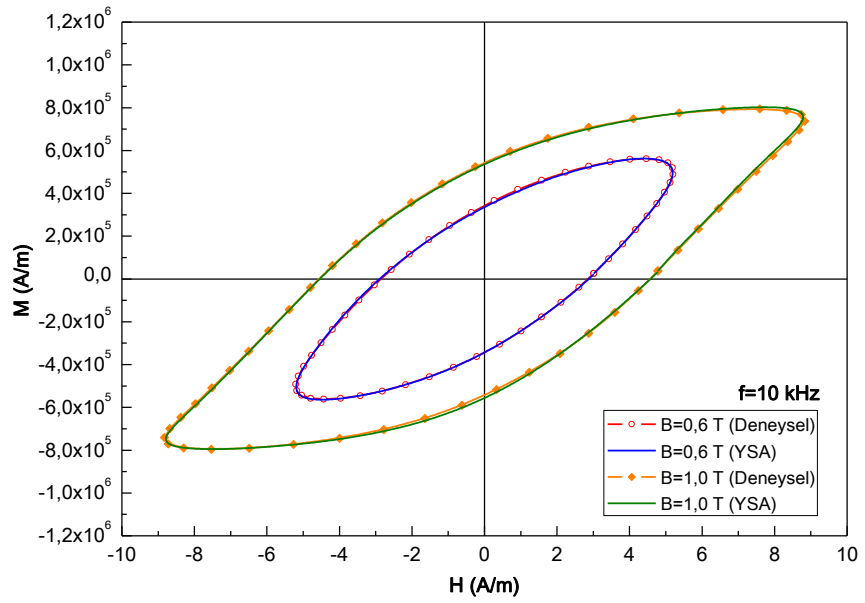
Şekil 4.30. #W624 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



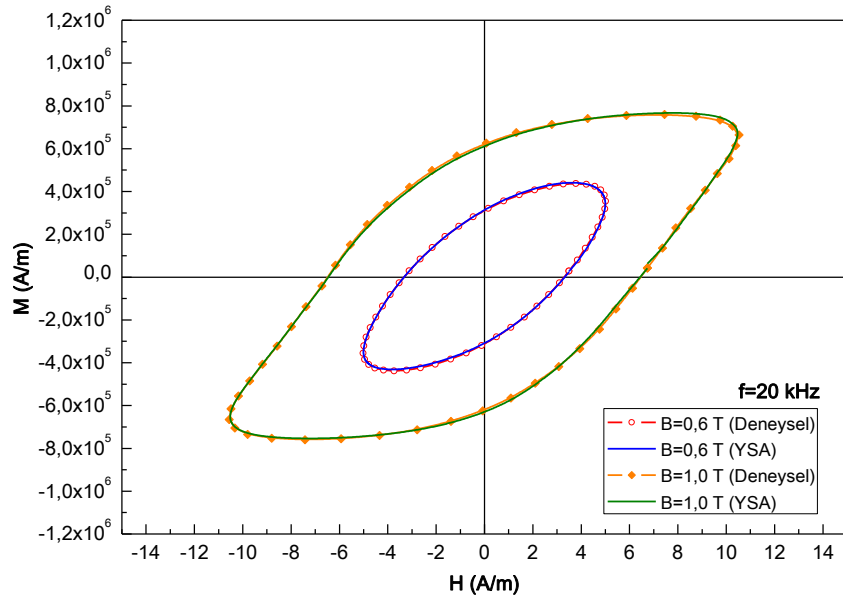
Şekil 4.31. #W624 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



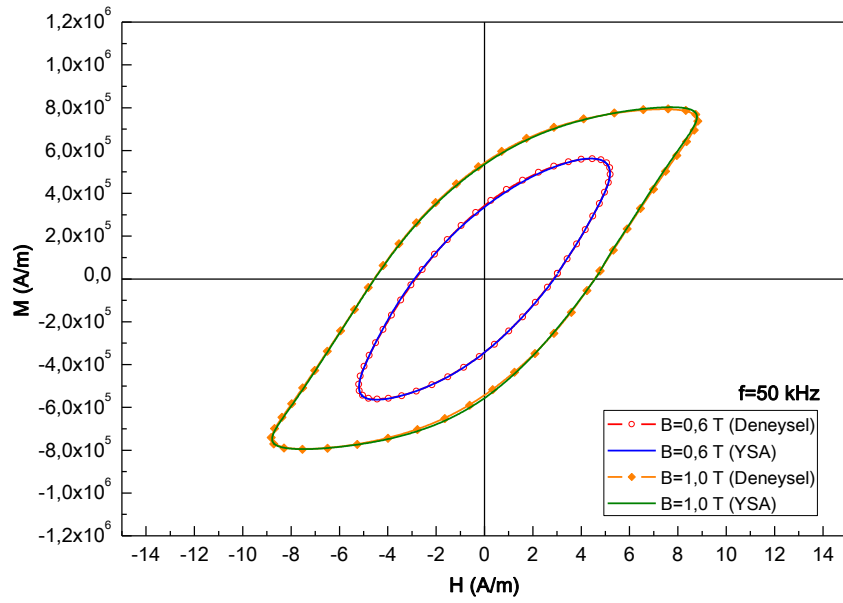
Şekil 4.32. #W624 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.33. #W624 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

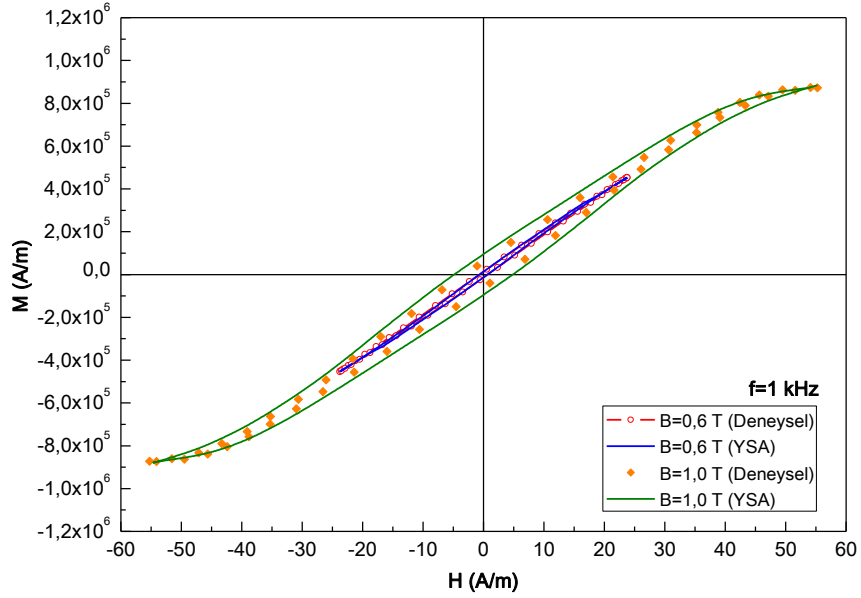


Şekil 4.34. #W624 toroidine ait 20 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

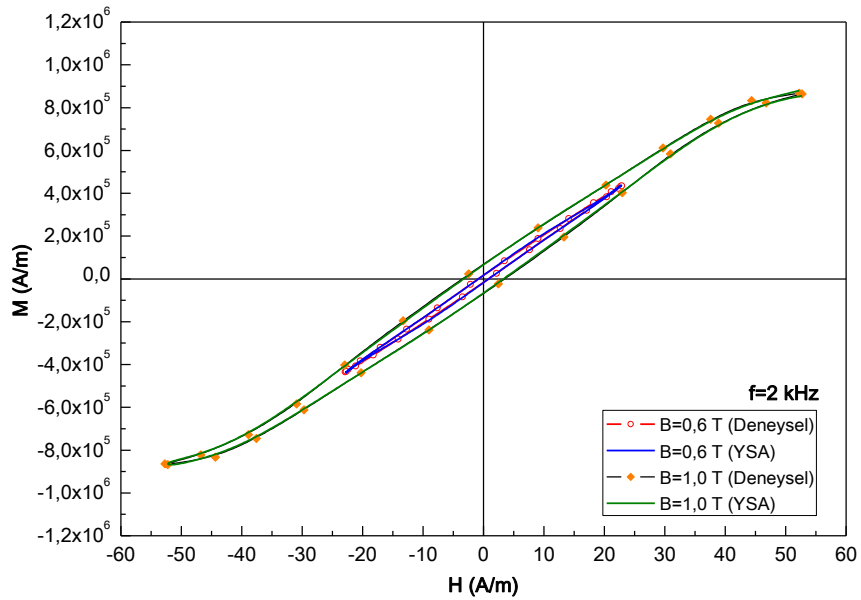


Şekil 4.35. #W624 toroidine ait 50 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

#W628 toroidine ait 1, 2, 5 ve 10 kHz frekanslarında 0,6 T ve 1,0 T değerleri için deneysel ve benzetişim sonucunda elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4.36, 4.37, 4.38 ve 4.39'da gösterilmiştir.

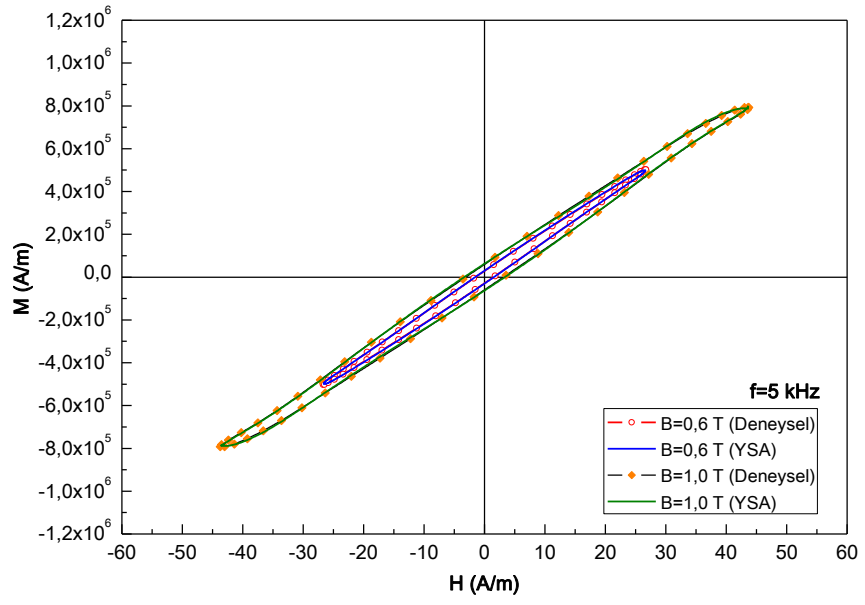


Şekil 4.36. #W628 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

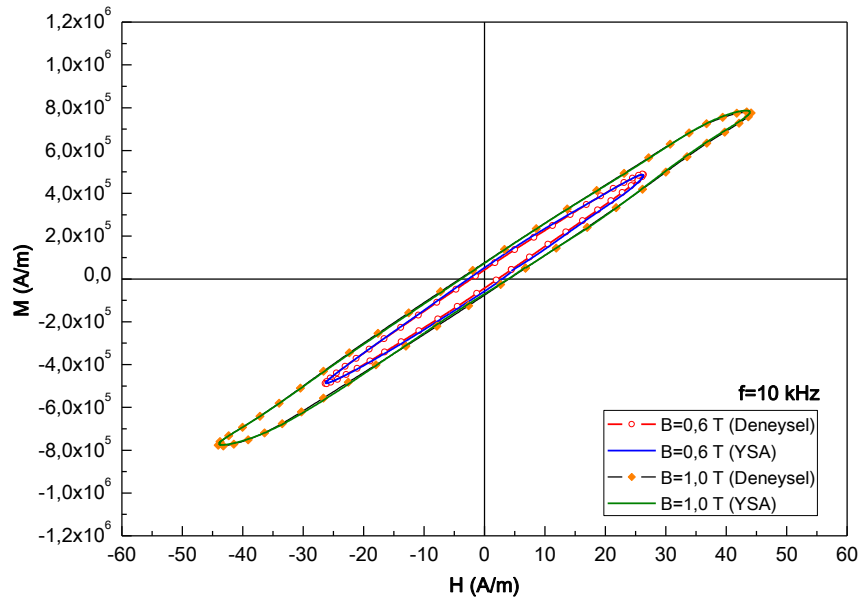


Şekil 4.37. #W628 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



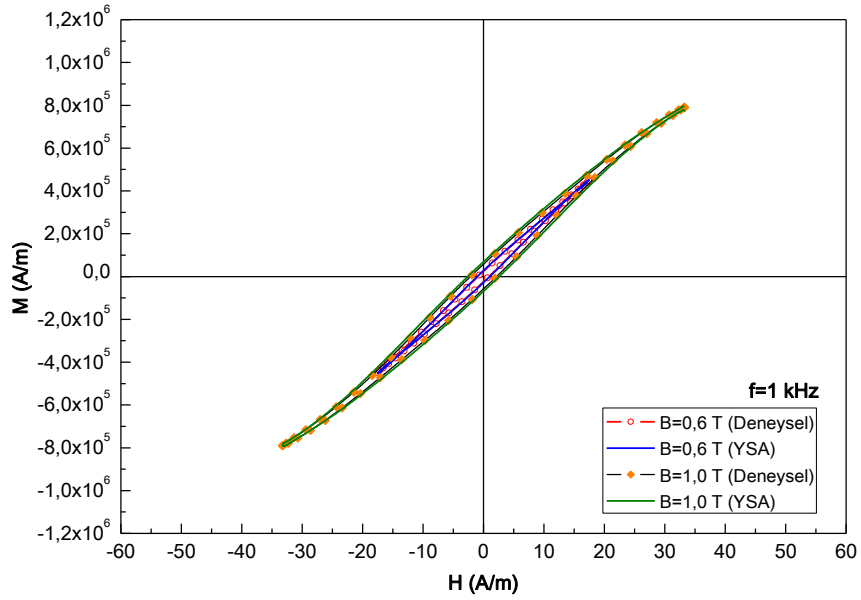


Şekil 4.38. #W628 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

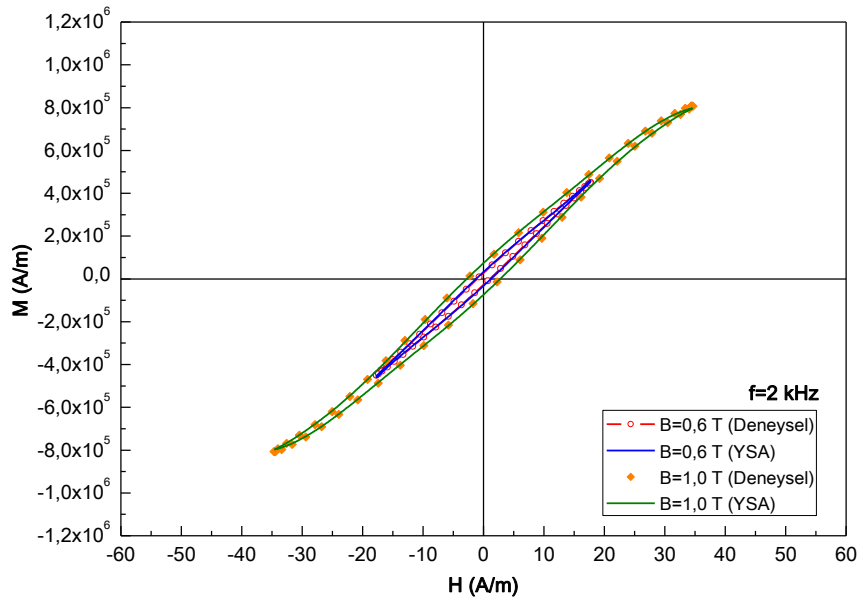


Şekil 4.39. #W628 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

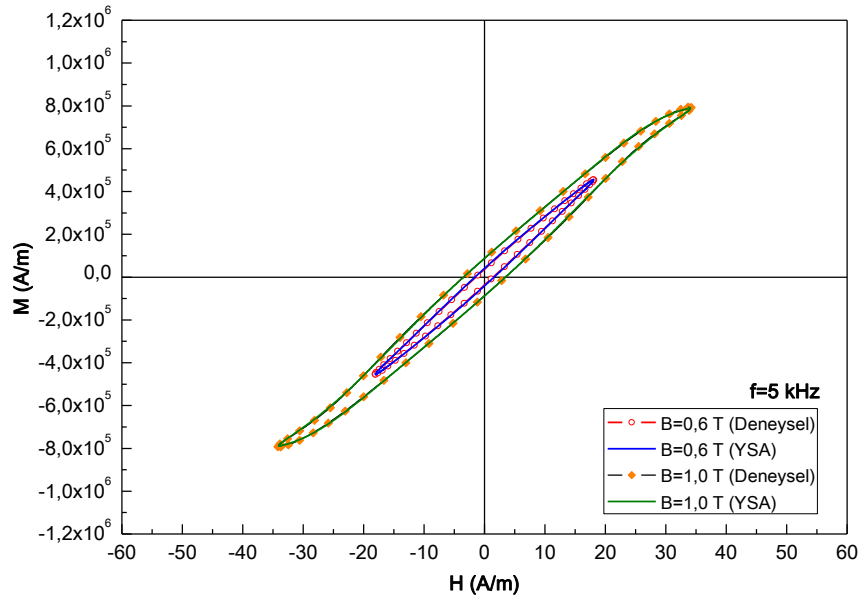
#W630 toroidine ait 1, 2, 5 ve 10 kHz frekanslarında 0,6 T ve 1,0 T değerleri için deneysel ve benzetişim sonucunda elde edilen histeresis eğrileri Şekil 4.40, 4.41, 4.42 ve 4.43'te gösterilmiştir.



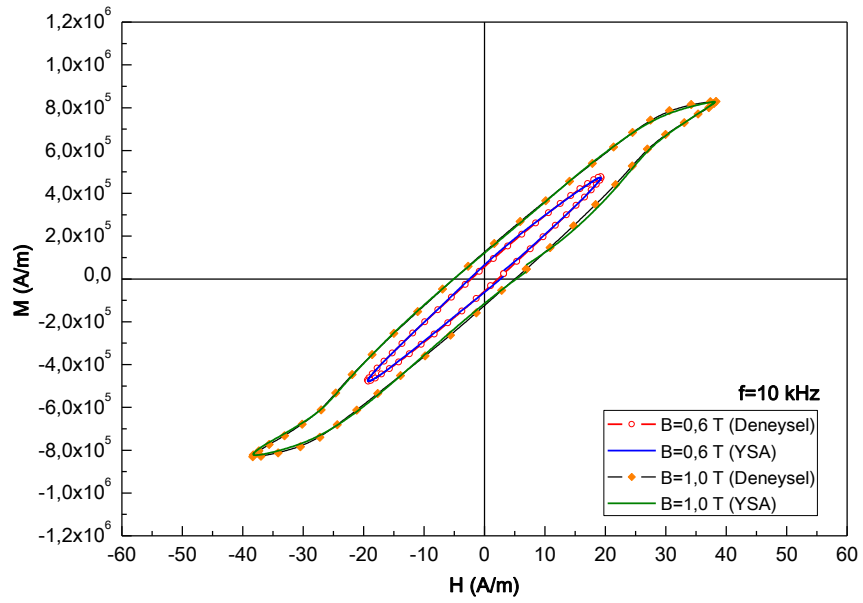
Şekil 4.40. #W630 toroidine ait 1 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.41. #W630 toroidine ait 2 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.42. #W630 toroidine ait 5 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

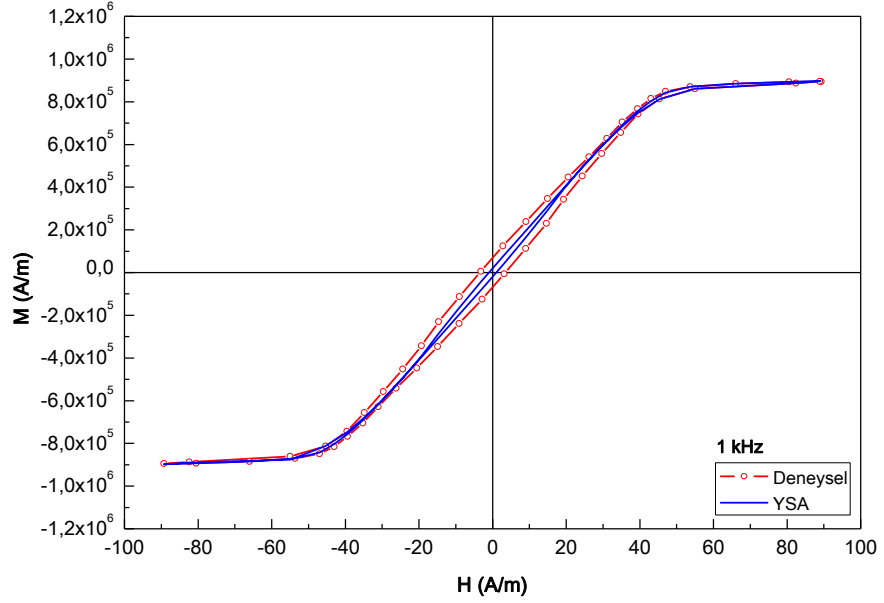


Şekil 4.43. #W630 toroidine ait 10 kHz'de 0,6 T ve 1,0 T için deneysel ve YSA'dan elde edilen histeresis eğrileri

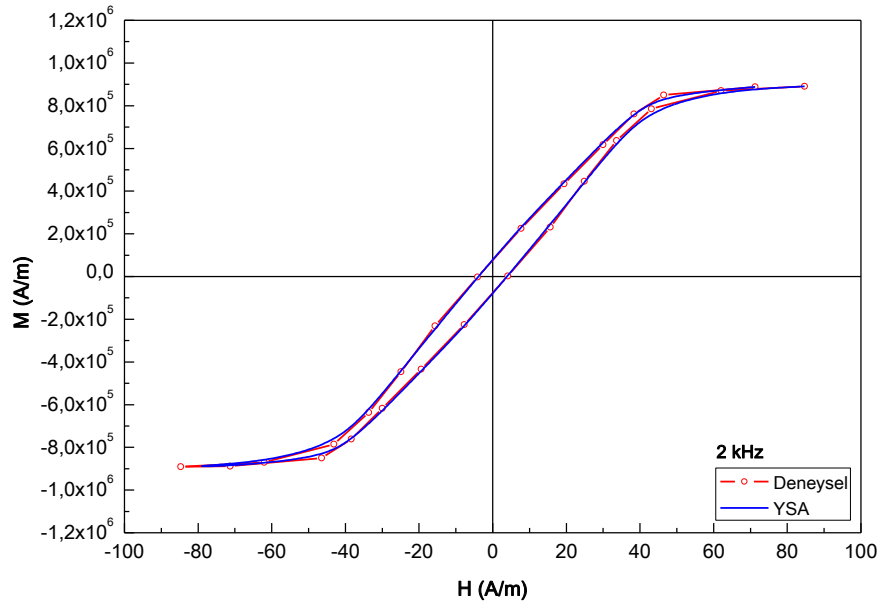
Yapay sinir ağı kullanılarak elde edilen sonuçlar ile deneysel eğriler arasındaki uyum, ortalama olarak %99.94 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, YSA'nın öğrenme düzeyine eşittir (Şekil 3.13).

#### 4.3.2. Test verilerine ait #W628 ve #W630 toroidleri için doyum durumundaki histeresis eğrilerinin YSA benzetimi

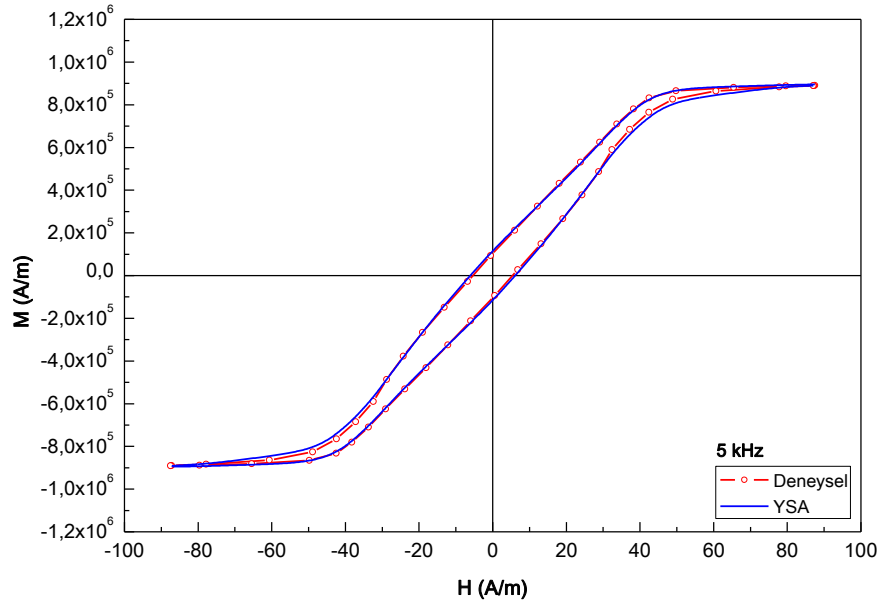
#W628 toroidine ait doyum durumundaki ( $B=1,2$  T) dinamik histeresis eğrileri için 1, 2, 5 ve 10 kHz frekanslarında yapay sinir ağı benzetiminden elde edilen dinamik histeresis eğriler, Şekil 4.44, 4.45, 4.46 ve 4.47'de gösterilmiştir.



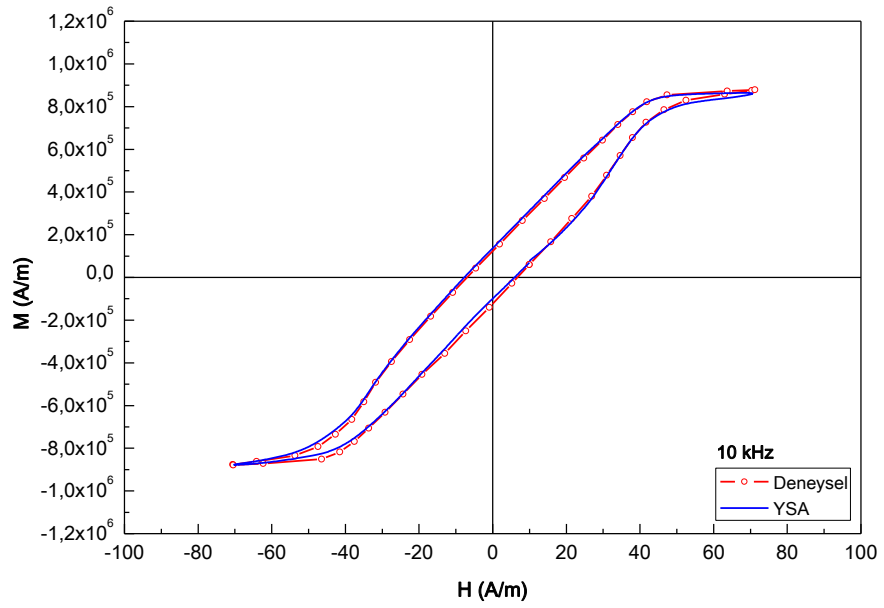
Şekil 4.44. #W628 toroidi için 1 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri



Şekil 4.45. #W628 toroidi için 2 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri

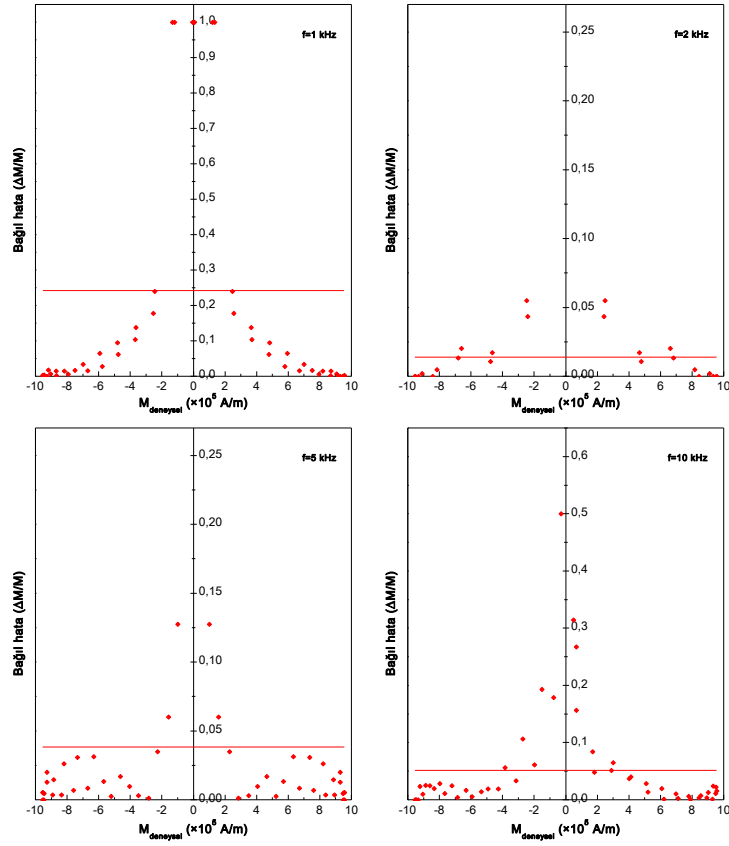


Şekil 4.46. #W628 toroidi için 5 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri



Şekil 4.47. #W628 toroidi için 10 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri

#W628 toroidi için benzetişimden elde edilen değerlerin deneysel değerlere göre bağlı hataları Şekil 4.48'de gösterilmiştir. Elde edilen ortalama bağlı hata kullanılarak hesaplanan uyum değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

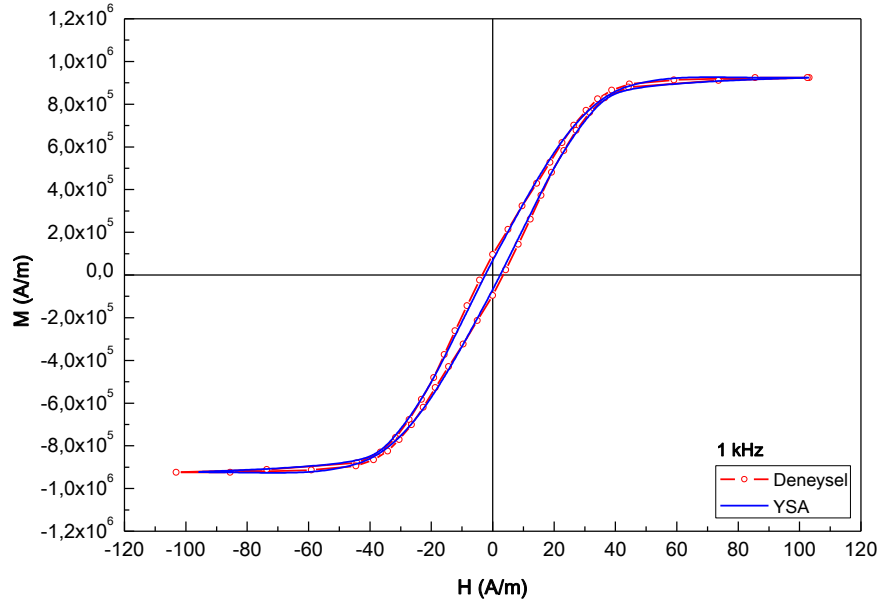


Şekil 4.48. 1, 2, 5 ve 10 kHz'de #W628 toroidi için YSA benzetişiminden elde edilen değerlerin deneysel değerlere göre bağılı hatası

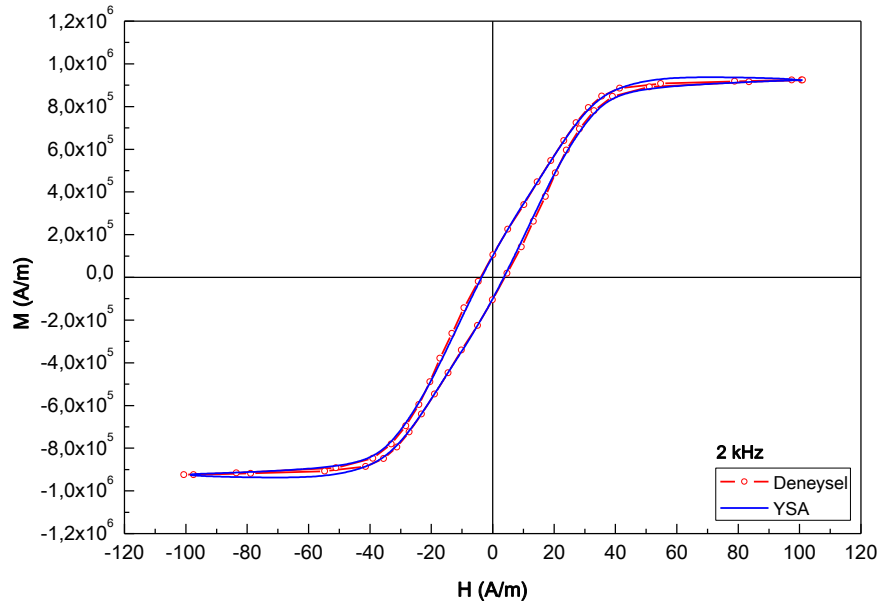
Çizelge 4.7. #W628 toroidi için 1, 2, 5 ve 10 kHz frekanslarında YSA benzetişiminden elde edilen dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri

Frekans	Uyum (%)
1 kHz	76,12
2 kHz	98,61
5 kHz	96,16
10 kHz	94,85

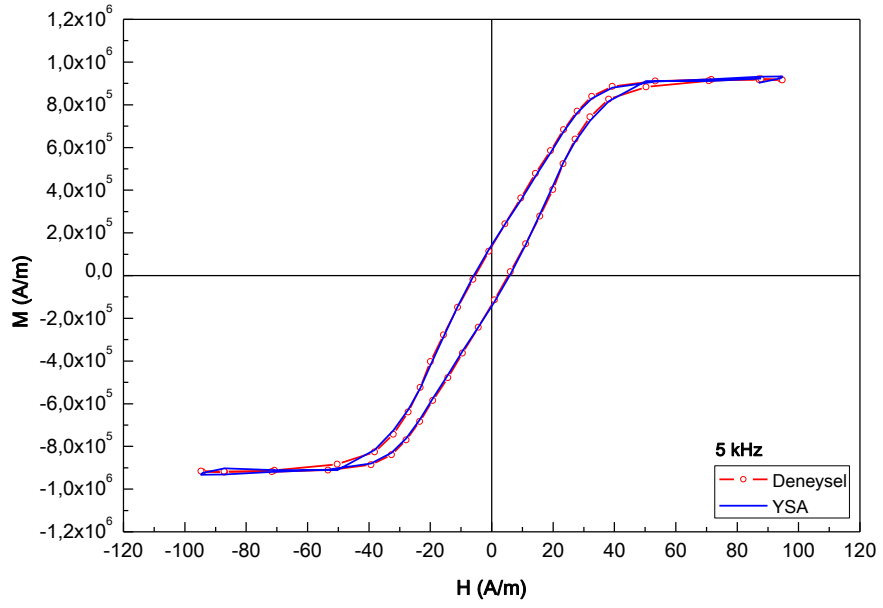
#W630 toroidi için 1,2 T manyetik indüksiyon değerinde 1, 2 ve 5 kHz frekanslarında YSA benzetişiminden elde edilen dinamik histeresis eğrileri Şekil 4.49, 4.50 ve 4.51'de gösterilmiştir.



Şekil 4.49. #W630 toroidi için 1 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri

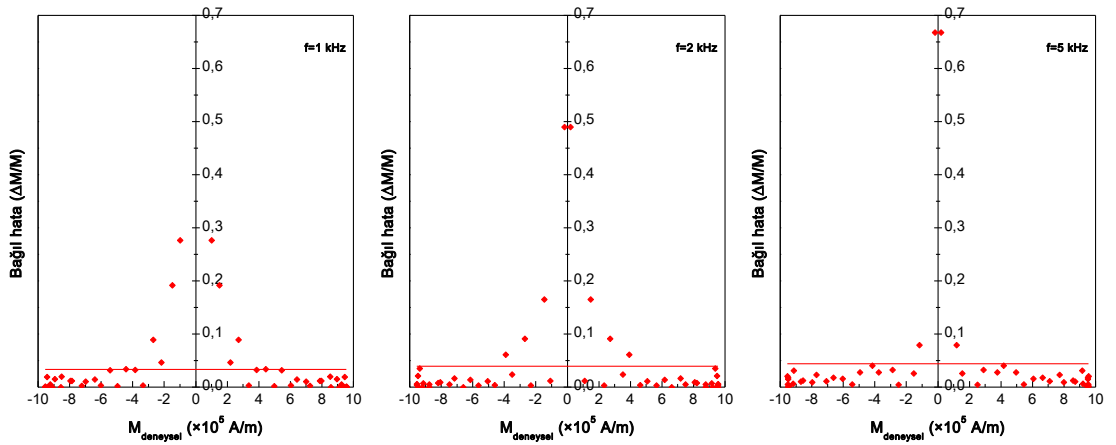


Şekil 4.50. #W630 toroidi için 2 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri



Şekil 4.51. #W630 toroidi için 5 kHz değerinde deneysel ve YSA benzetişiminden elde edilen doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri

#W630 toroidine ait YSA sonuçlarının deneysel değerlere göre bağıl hataları Şekil 4.52'de gösterilmiştir. Elde edilen ortalama bağıl hata kullanılarak hesaplanan uyum değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.52. 1, 2 ve 5 kHz'de #W630 toroidi için YSA benzetişiminden elde edilen değerlerin deneysel değerlere göre bağıl hatası



Çizelge 4.8. #W630 toroidi için 1, 2 ve 5 kHz frekanslarında YSA benzetişiminden elde edilen dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri

<b>Frekans</b>	<b>Uyum (%)</b>
<b>1 kHz</b>	96,64
<b>2 kHz</b>	96,08
<b>5 kHz</b>	95,62

#W628 ve #W630 toroidlerine ait doyum durumundaki deneysel histeresis eğrilerin, YSA test verileri için üst sınır değerlerini oluşturması nedeniyle, YSA sonuçları ile deneysel histeresis eğrileri arasındaki uyum, öğrenme düzeyi olan %99,94'lük uyum değerinden daha küçük olarak elde edilmiştir.

#### 4.4. Doyum durumundaki dinamik histeresis eğrileri için matematiksel modelin uygulaması

Eş.(3.32) kullanılarak #W380, #W423, #W424 ve #W624 toroidlerine ait doyum durumundaki dinamik histeresis eğrilerini elde etmek için gerekli olan parametreler Çizelge 4.9'da verilmiştir. Buradaki  $m_c$  değerleri Eş.(3.33) ve hassasiyet analizi sonucu elde edilen katsayılar kullanılarak hesaplanmıştır.

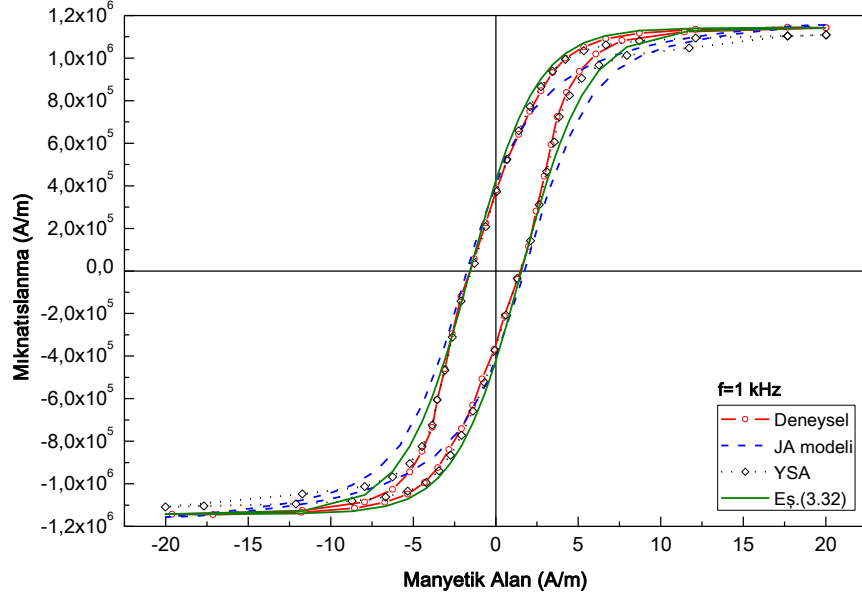
Çizelge 4.9. Doyum durumundaki histeresis eğrilerinin elde edilmesi için Eş.(3.32)'de kullanılan parametreler

Toroid Çekirdeği	Frekans [Hz]	$M_m$ [A/m]	$H_c$ [A/m]	$\chi_c$ [---]	$m_c$ [A/m]
#W380	1000	$1,14 \times 10^6$	1,56	$2,18 \times 10^5$	2,00
	2000	$1,14 \times 10^6$	1,99	$2,53 \times 10^5$	1,97
	5000	$1,13 \times 10^6$	3,03	$2,81 \times 10^5$	2,17
	10000	$1,12 \times 10^6$	4,22	$2,53 \times 10^5$	2,62
	20000	$1,11 \times 10^6$	6,63	$1,81 \times 10^5$	3,49
	50000	$1,11 \times 10^6$	15,57	$1,14 \times 10^5$	3,83
#W432	1000	$9,35 \times 10^5$	1,59	$2,12 \times 10^5$	2,04
	2000	$9,35 \times 10^5$	2,08	$1,94 \times 10^5$	2,25
	5000	$9,30 \times 10^5$	2,94	$1,71 \times 10^5$	2,72
	10000	$9,30 \times 10^5$	3,93	$1,64 \times 10^5$	3,18
	20000	$9,18 \times 10^5$	5,88	$1,60 \times 10^5$	3,71
	50000	$9,16 \times 10^5$	12,05	$8,78 \times 10^4$	4,66
#W424	1000	$9,74 \times 10^5$	2,02	$1,13 \times 10^5$	3,33
	2000	$9,77 \times 10^5$	2,51	$1,06 \times 10^5$	3,65
	5000	$9,73 \times 10^5$	3,44	$1,05 \times 10^5$	3,94
	10000	$9,70 \times 10^5$	4,62	$1,06 \times 10^5$	4,29
	20000	$9,58 \times 10^5$	6,90	$9,35 \times 10^4$	5,17
	50000	$8,71 \times 10^5$	13,40	$6,49 \times 10^4$	5,72
#W624	1000	$9,09 \times 10^5$	2,16	$1,90 \times 10^5$	2,18
	2000	$9,11 \times 10^5$	2,70	$1,84 \times 10^5$	2,32
	5000	$9,07 \times 10^5$	4,03	$1,65 \times 10^5$	2,79
	10000	$9,11 \times 10^5$	5,45	$1,65 \times 10^5$	3,17

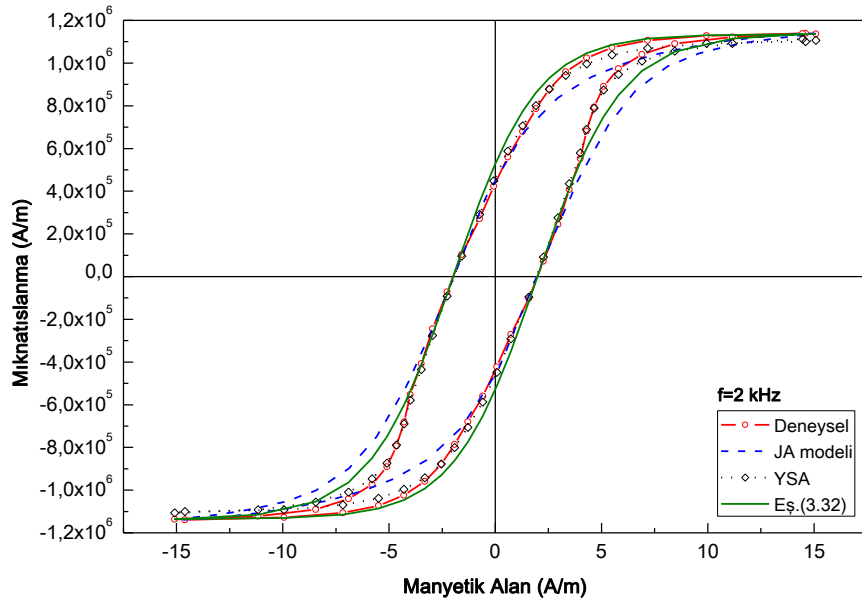
Bu parametreler kullanılarak Eş.(3.32) sonuçları, JA modeli ve YSA sonuçları ile deneysel histeresis eğrileri karşılaştırmalı olarak Bölüm 4.5'te verilmiştir.

#### 4.5. Toroid çekirdekleri için deneysel eğriler ile JA modeli, yapay sinir ağı benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen dinamik histeresis eğrilerinin karşılaştırılması

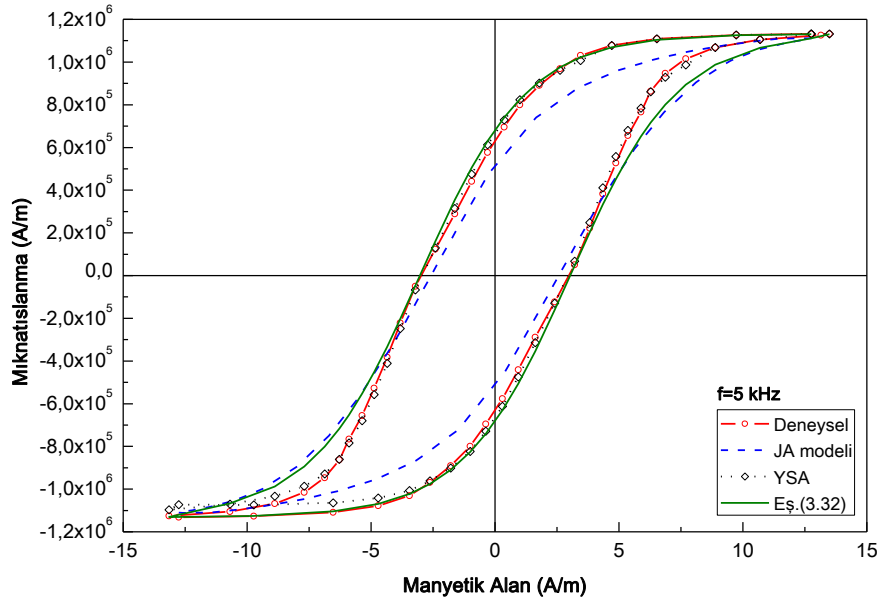
#W380 toroidi için 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekanslarında JA modeli, YSA uygulaması ve Eş.(3.32)'den elde edilen dinamik histeresis eğrilerinin deneysel eğriler ile karşılaştırması Şekil 4.53, 4.54, 4.55, 4.56, 4.57 ve 4.58'de verilmiştir.



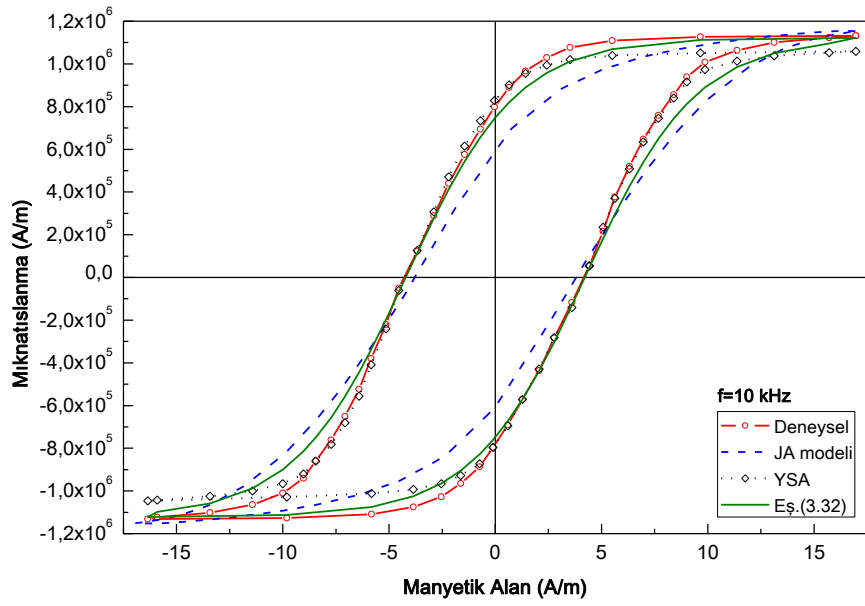
Şekil 4.53. #W380 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



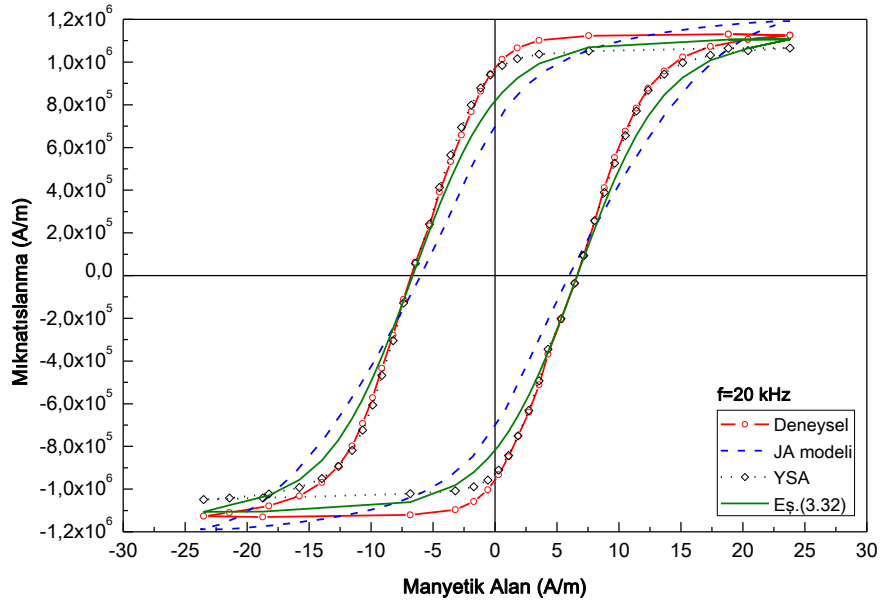
Şekil 4.54. #W380 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



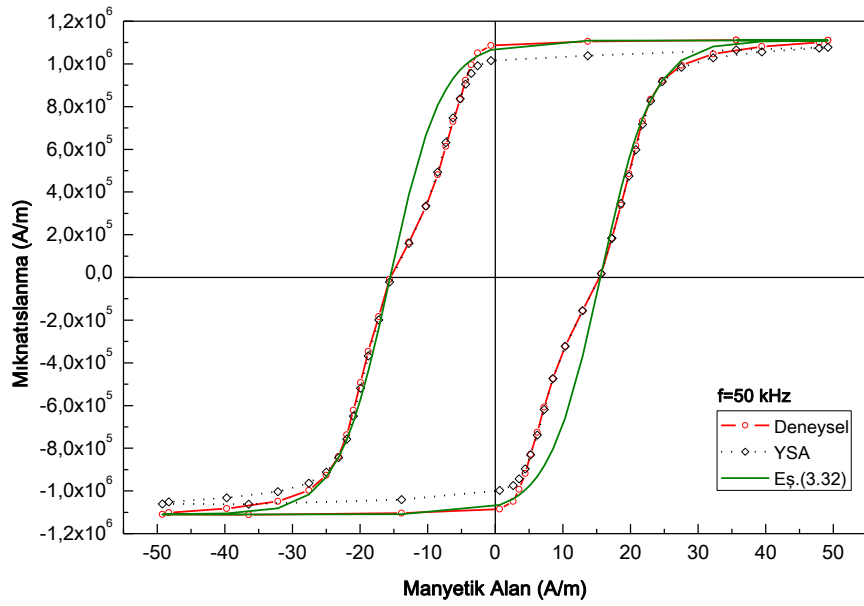
Şekil 4.55. #W380 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.56. #W380 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

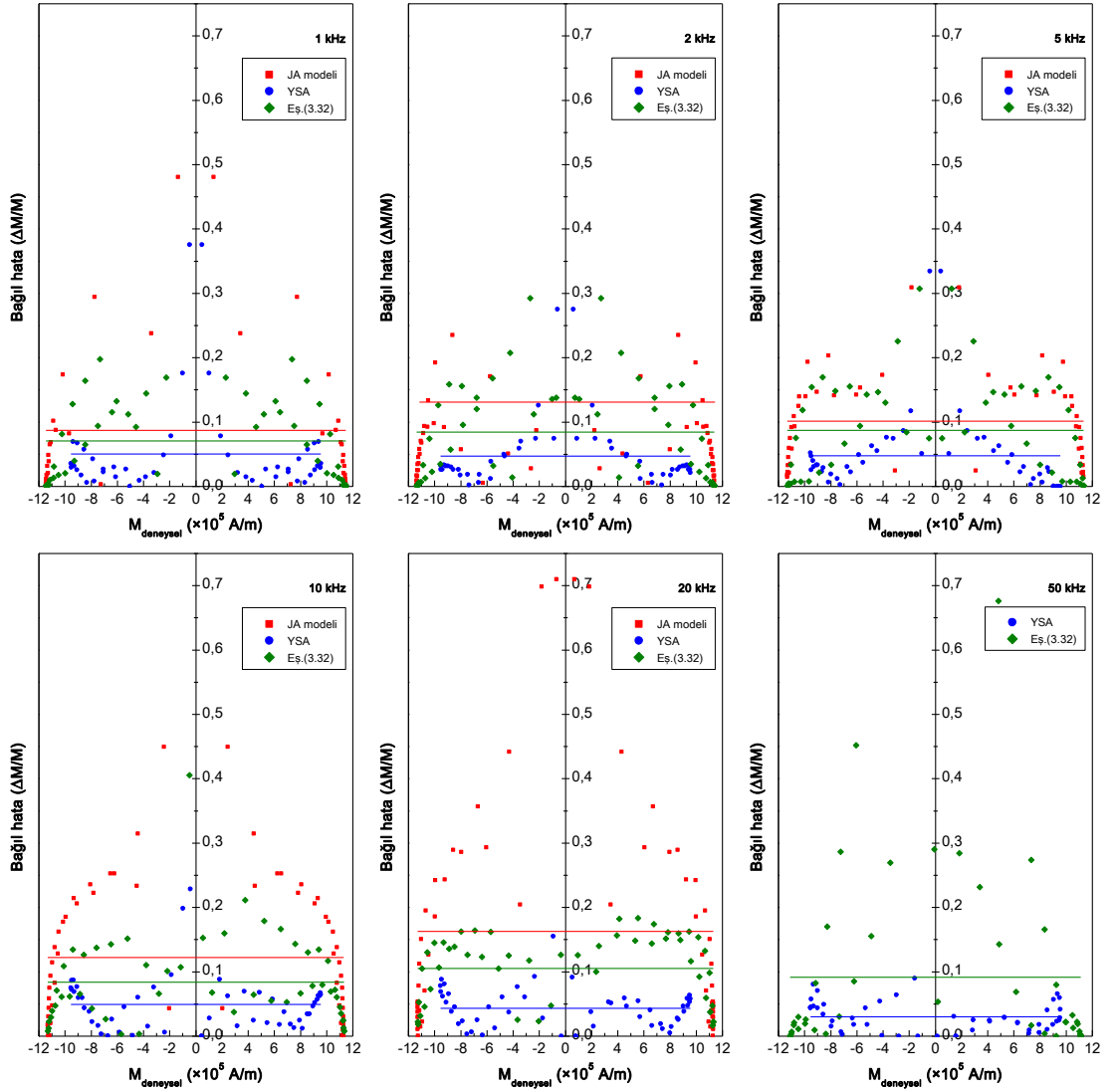


Şekil 4.57. #W380 toroidine ait 20 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.58. #W380 toroidine ait 50 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

Şekil 4.59'daki bağıl hata değerlerine göre #W380 toroidi için elde edilen histeresis eğrilerinin deneysel eğriler ile uyumu hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

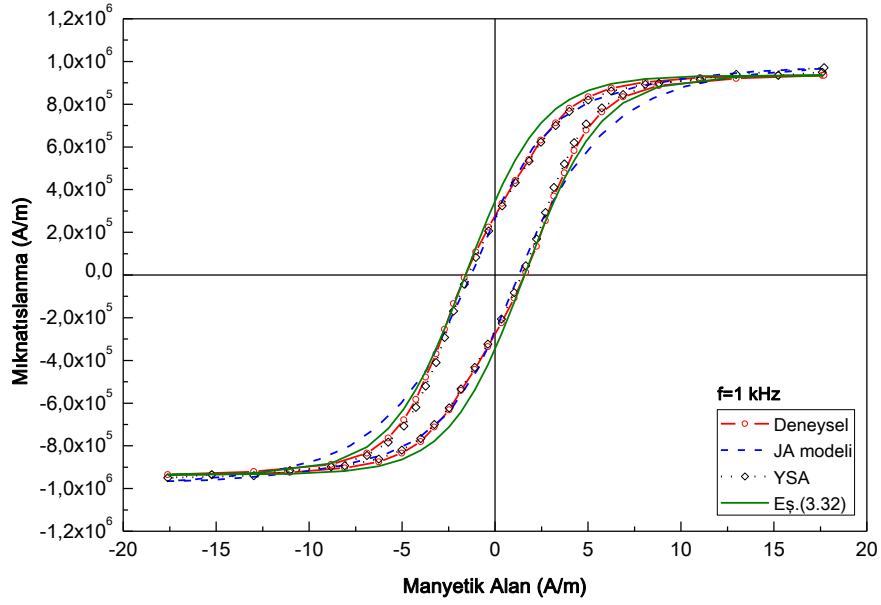


Şekil 4.59. 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağıl hataları

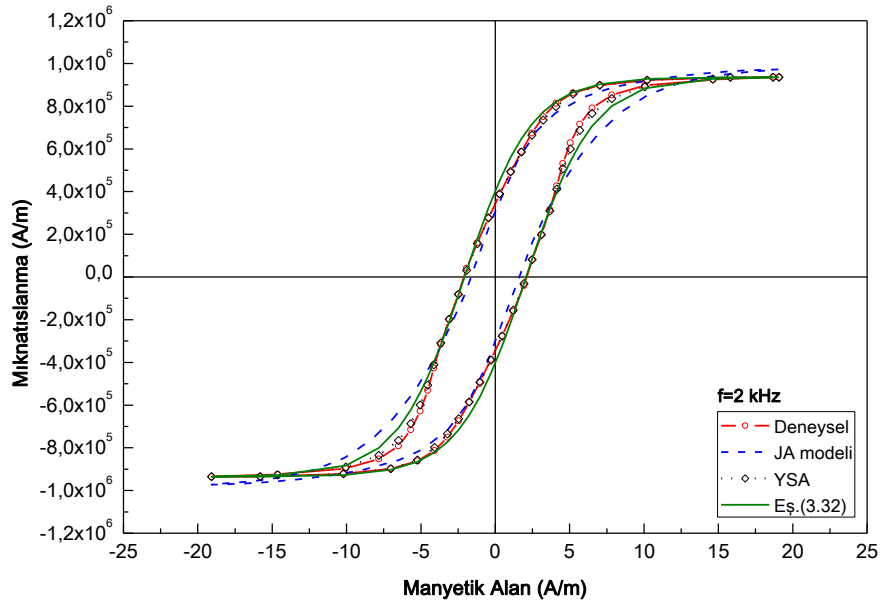
Çizelge 4.10. #W380 toroidi için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri

Frekans	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz
Model	Uyum (%)					
JA	91,26	86,04	89,88	87,76	83,70	---
YSA	94,97	95,29	95,21	95,07	95,69	94,72
Eş.(3.32)	93,20	91,55	91,26	91,62	89,49	90,83

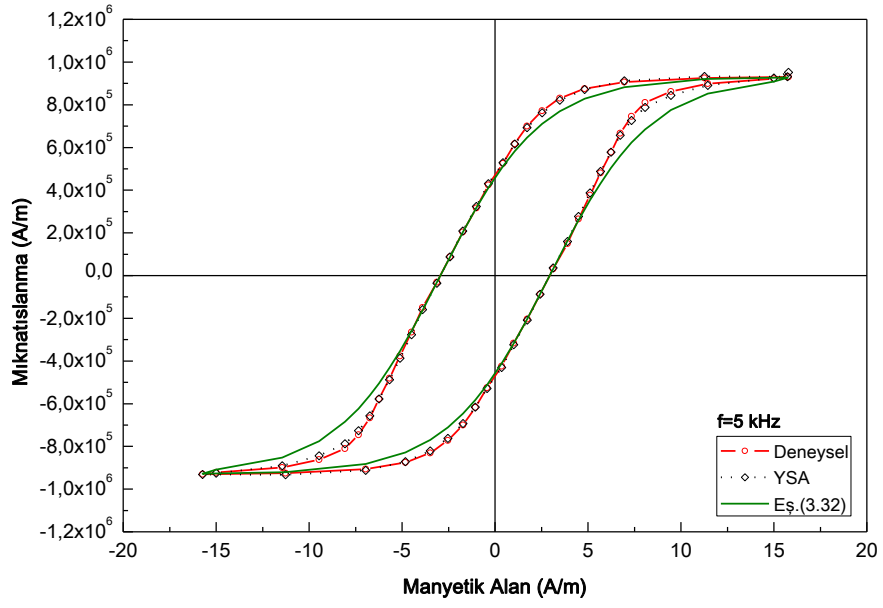
#W423 toroidi için 1 ve 2 kHz frekanslarında JA modeli, YSA uygulaması ve Eş.(3.32)'den elde edilen dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler Şekil 4.60 ve 4.61'de; 5, 10, 20 ve 50 kHz'de YSA uygulaması ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğriler ise Şekil 4.62, 4.63, 4.64 ve 4.65'te gösterilmiştir.



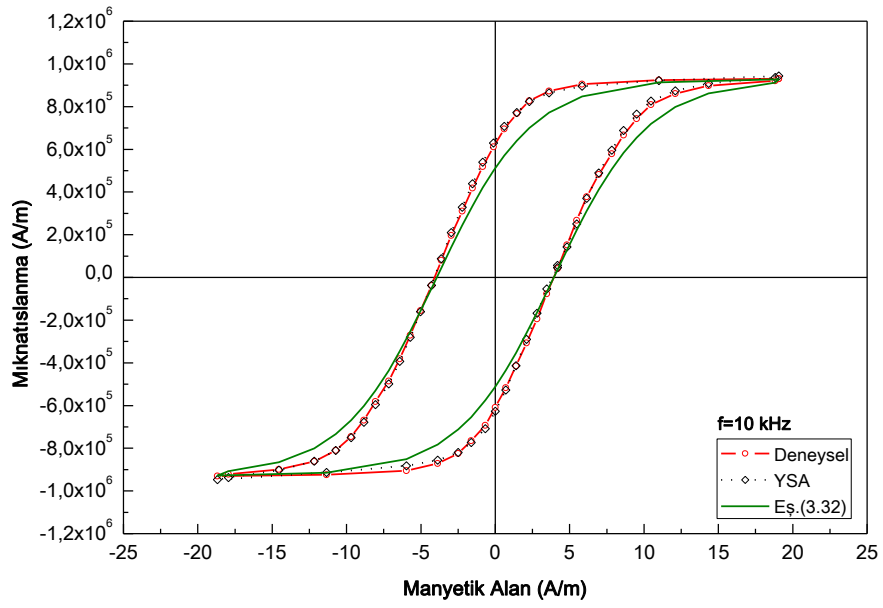
Şekil 4.60. #W423 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.61. #W423 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

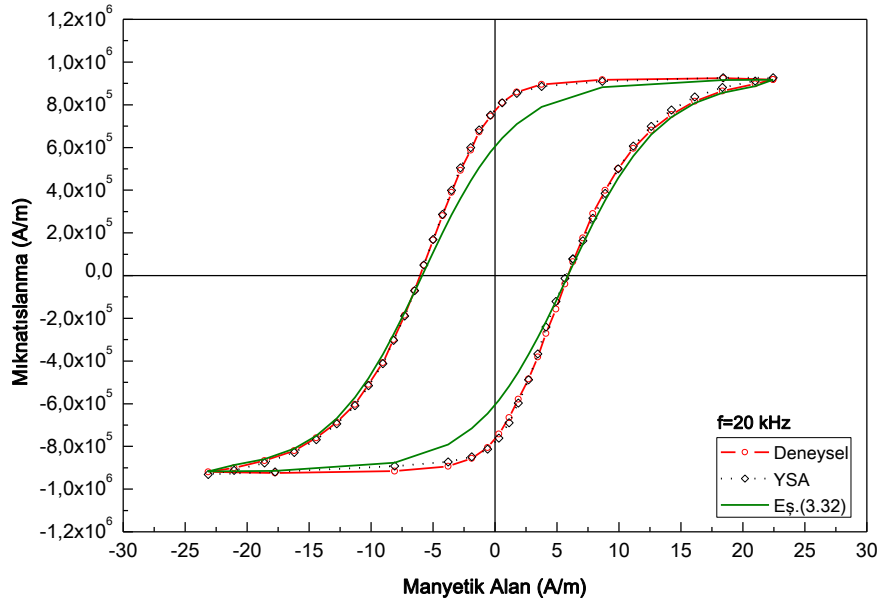


Şekil 4.62. #W423 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

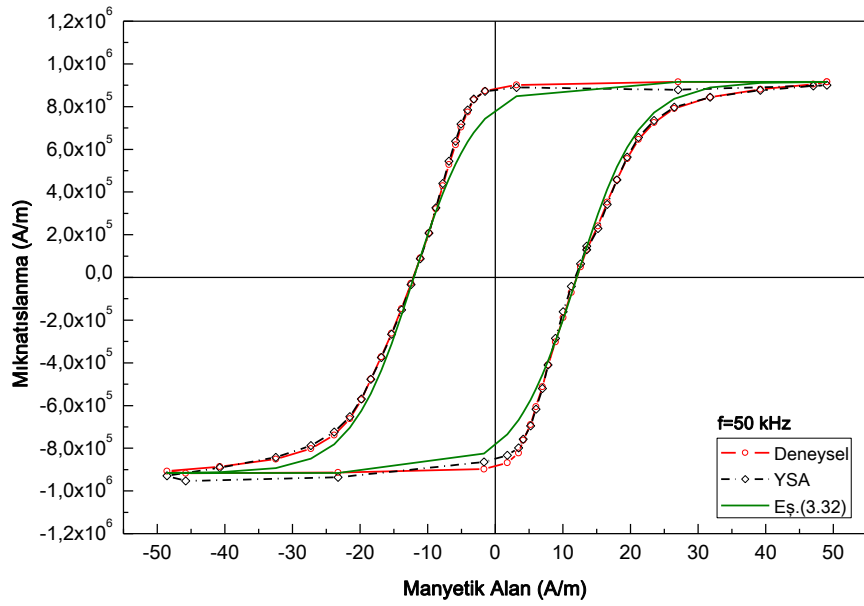


Şekil 4.63. #W423 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



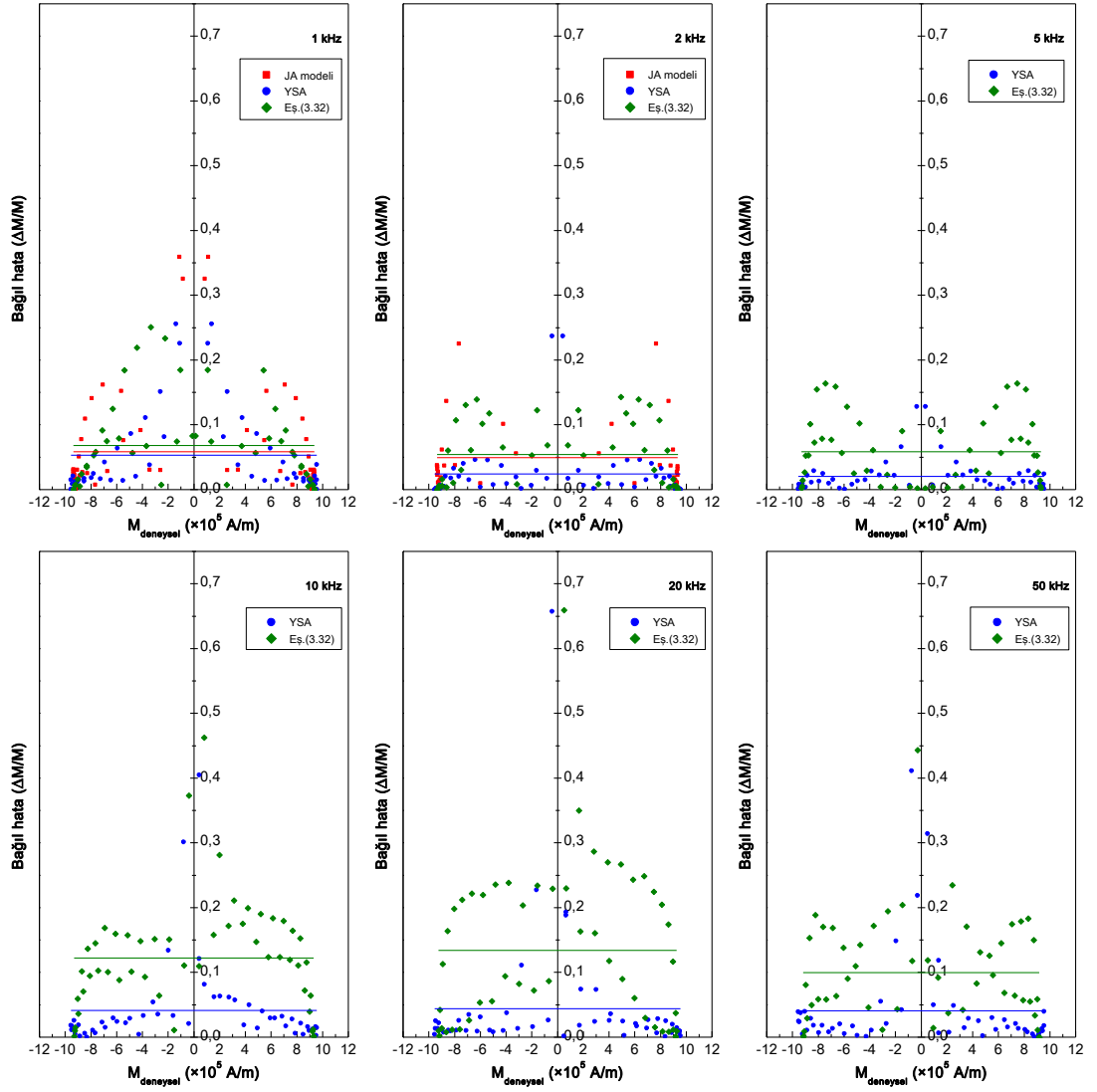


Şekil 4.64. #W423 toroidine ait 20 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.65. #W423 toroidine ait 50 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

Elde edilen histeresis eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri, Şekil 4.66'da elde edilen bağıl hatalardan hesaplanarak Çizelge 4.11'de verilmiştir.

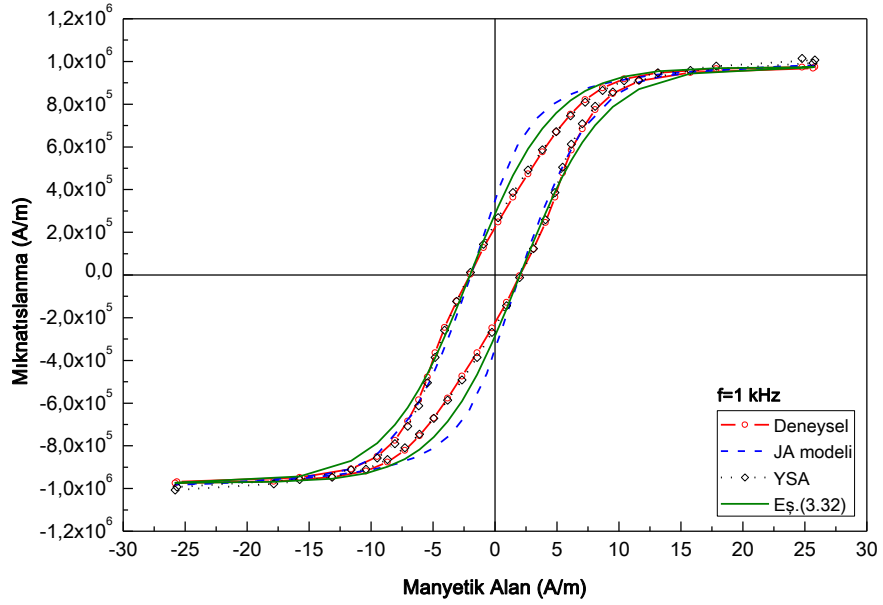


Şekil 4.66. 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağıl hataları

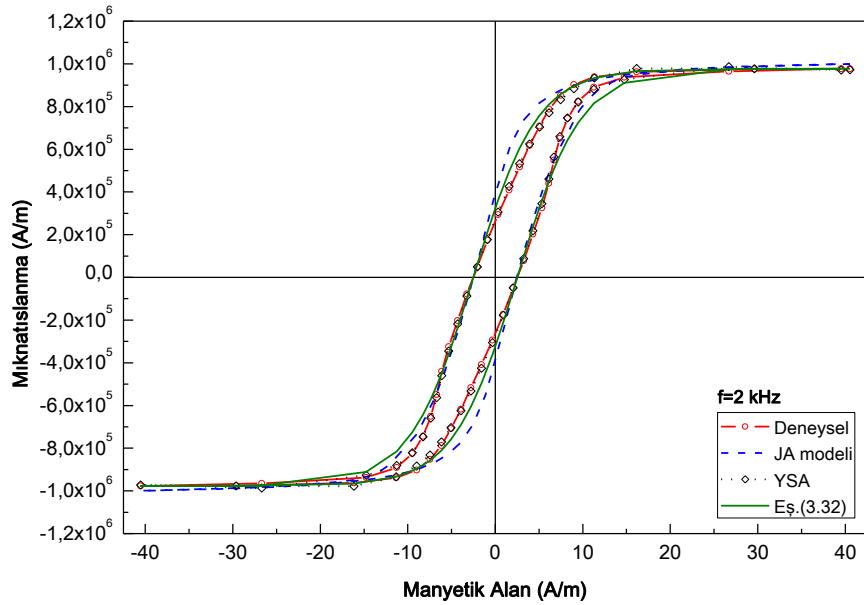
Çizelge 4.11. #W423 toroidi için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresisi eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri

Frekans	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz
Model	Uyum (%)					
JA	94,17	95,08	---	---	---	---
YSA	94,70	97,56	97,95	95,87	95,62	95,93
Eş.(3.32)	93,22	94,61	94,41	87,76	86,59	90,03

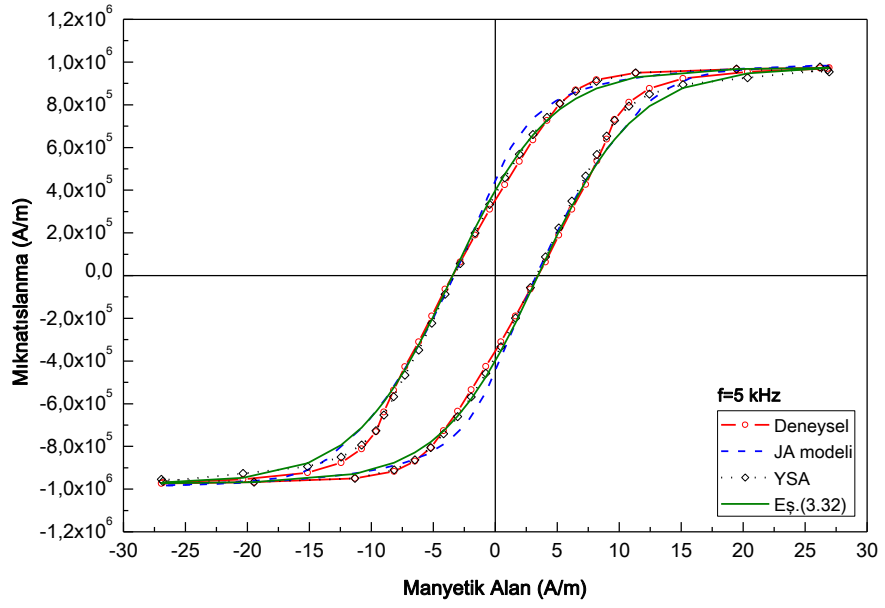
#W424 toroidi için 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekanslarında JA modeli, YSA uygulaması ve Eş.(3.32)'den elde edilen dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler Şekil 4.67, 4.68, 4.69, 4.70, 4.71 ve 4.72'de gösterilmiştir.



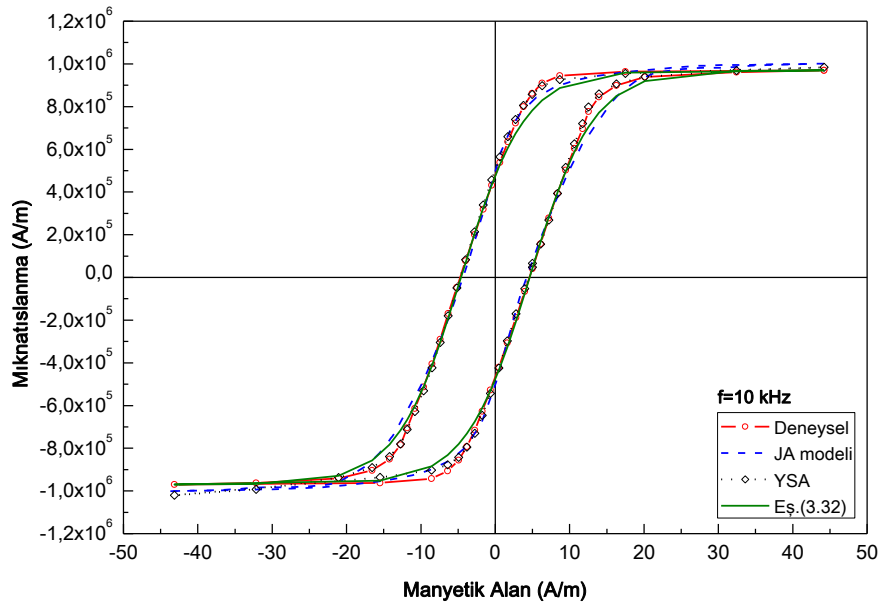
Şekil 4.67. #W424 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



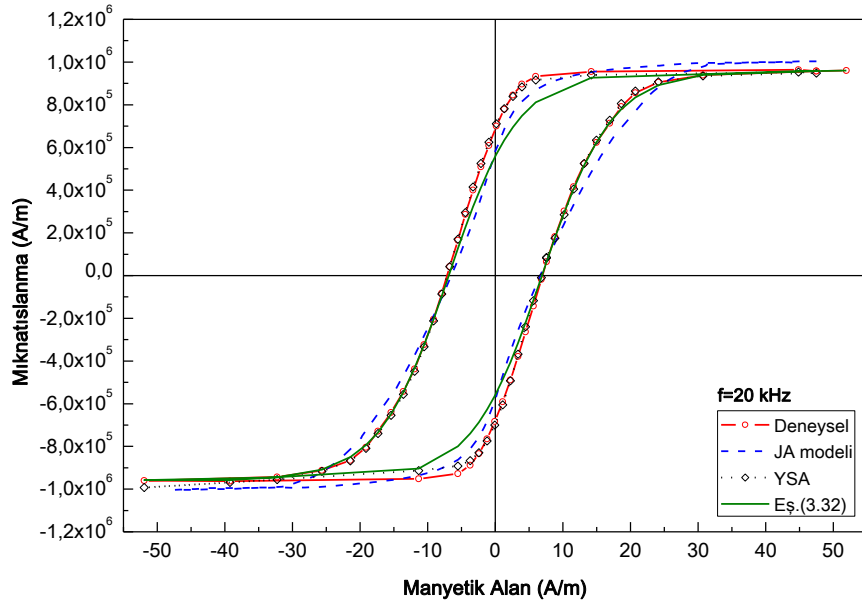
Şekil 4.68. #W424 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



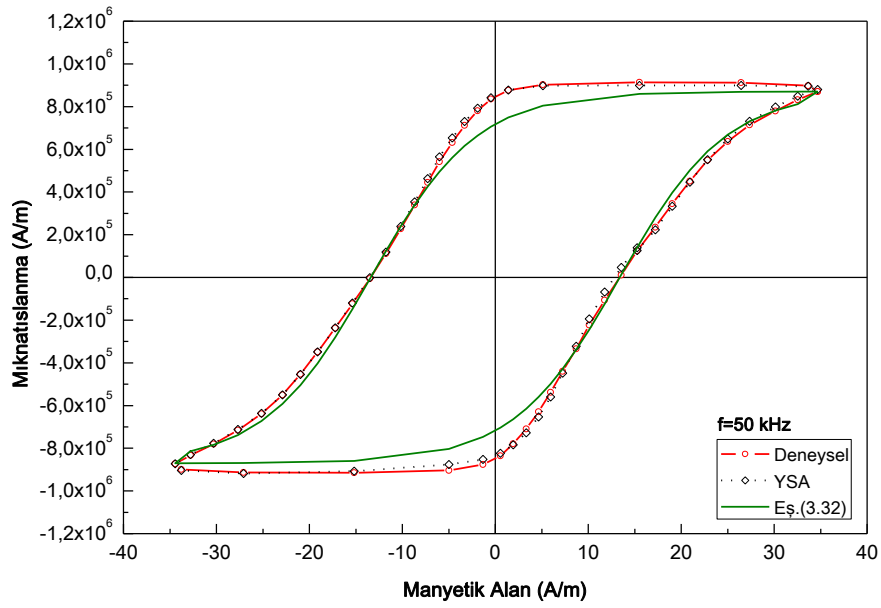
Şekil 4.69. #W424 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.70. #W424 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

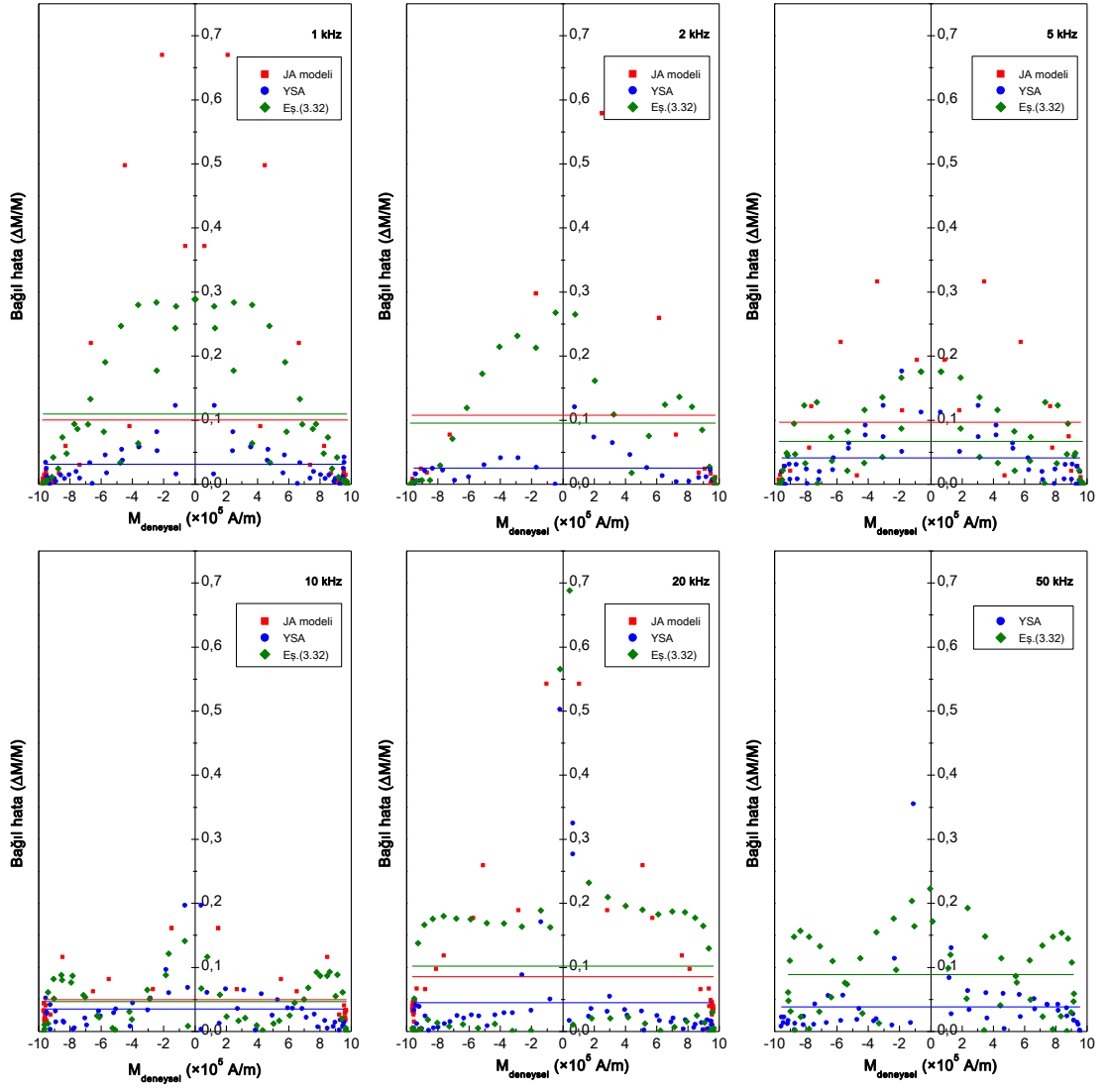


Şekil 4.71. #W424 toroidine ait 20 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.72. #W424 toroidine ait 50 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

#W424 toroidi için elde edilen dinamik histeresis eğrilerine ait noktalar için bağıl hata değerleri Şekil 4.73'te, bu eğriler ile deneysel eğriler arasındaki uyum değerleri ise Çizelge 4.12'de verilmiştir.

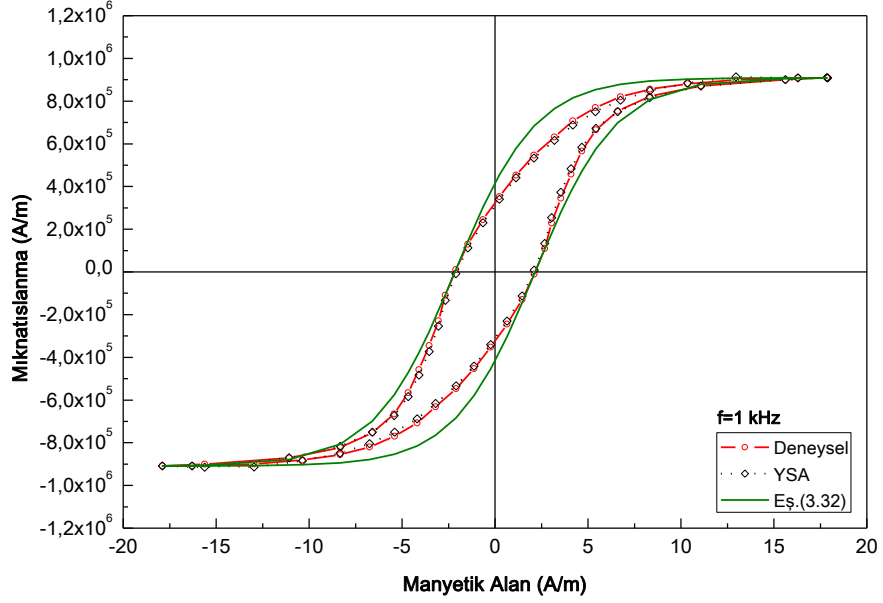


Şekil 4.73. 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağıl hataları

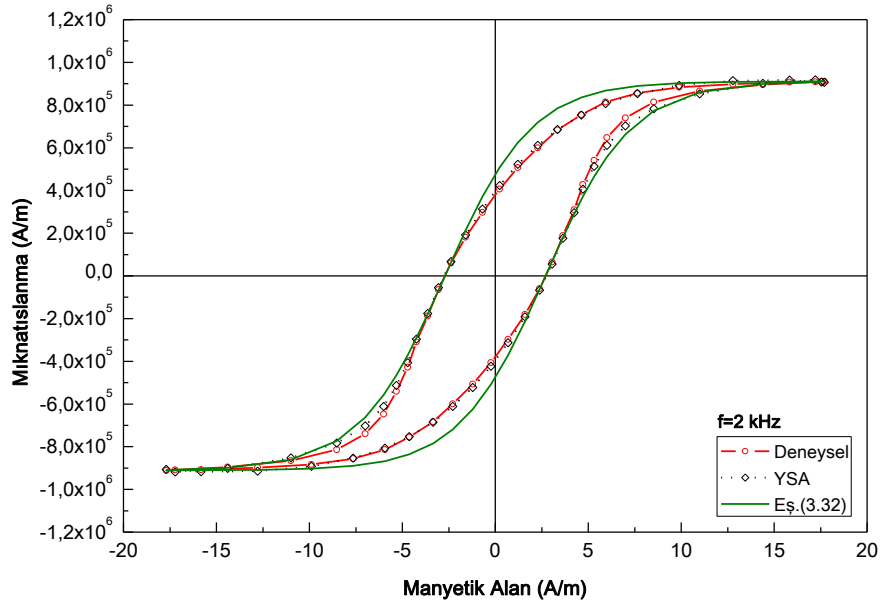
Çizelge 4.12. #W424 toroidi için JA modeli, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresisi eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri

Frekans	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz
Model	Uyum (%)					
JA	89,98	89,17	91,77	95,03	91,45	---
YSA	96,90	97,49	95,89	96,49	95,52	96,90
Eş.(3.32)	89,02	90,47	93,32	95,33	89,79	91,11

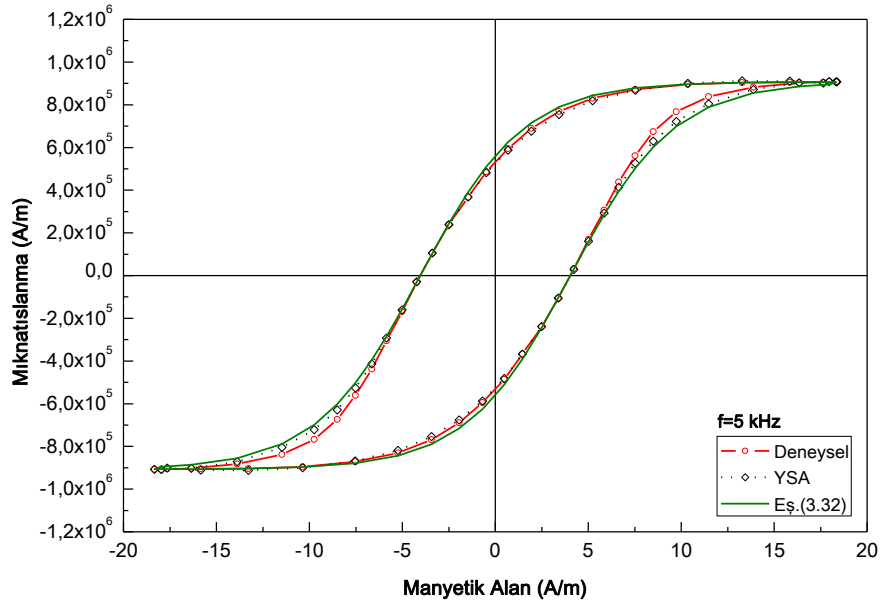
#W624 toroidine ait, 1, 2, 5 ve 10 kHz frekansları için 1,2 T manyetik indüksiyon değerinde deneysel, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen dinamik histeresis eğrileri Şekil 4.74, 4.75, 4.76 ve 4.77'de gösterilmiştir.



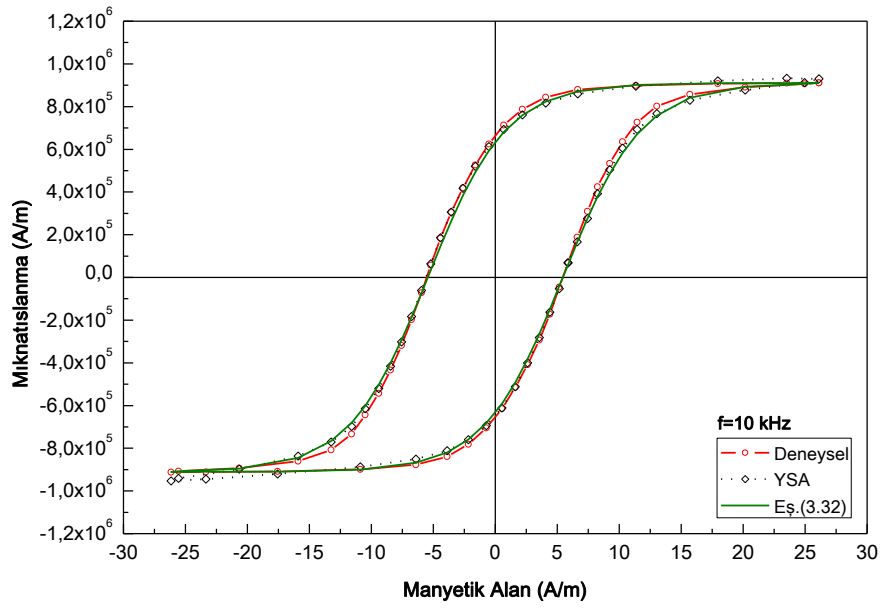
Şekil 4.74. #W624 toroidine ait 1 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.75. #W624 toroidine ait 2 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



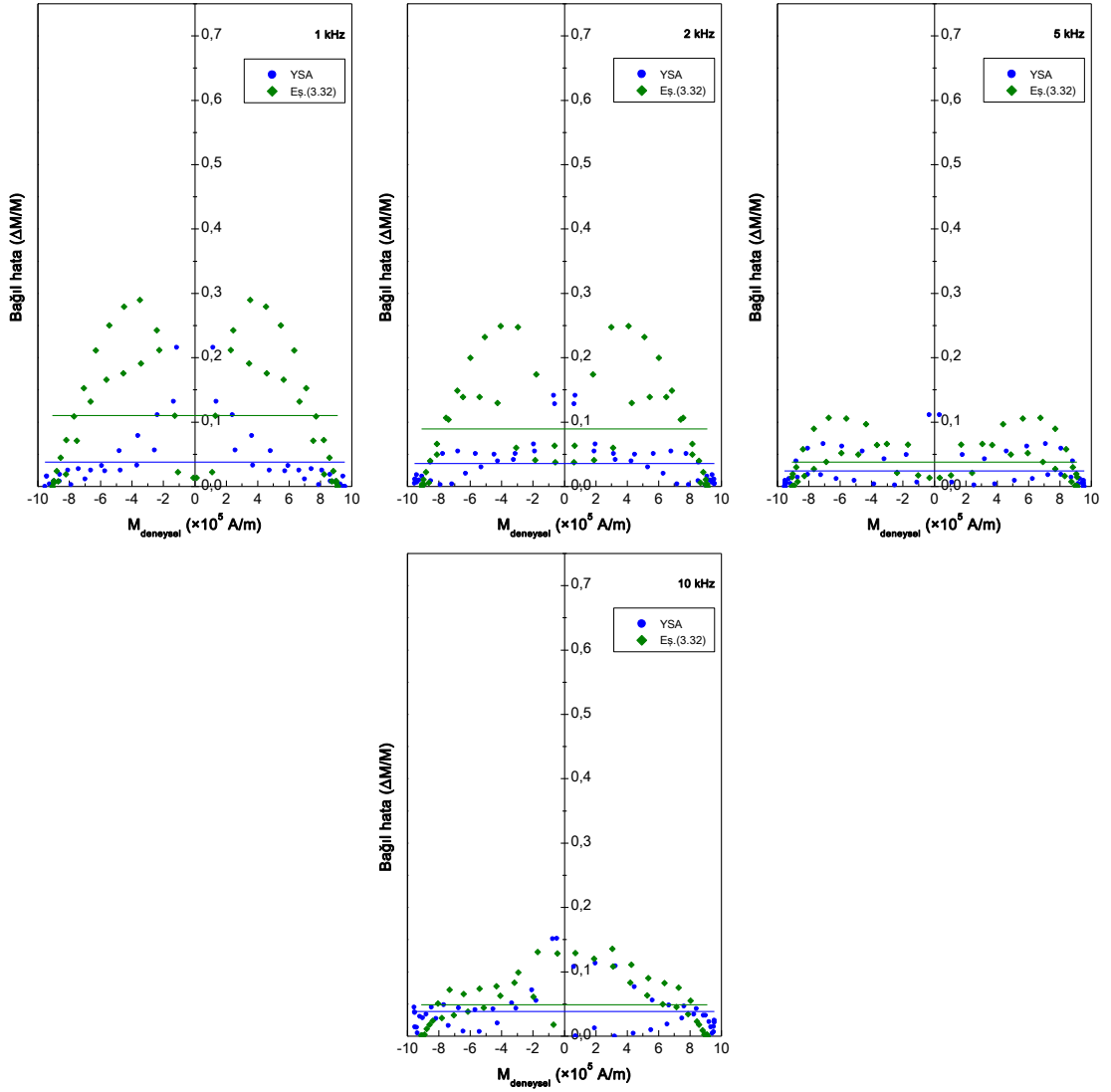
Şekil 4.76. #W624 toroidine ait 5 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri



Şekil 4.77. #W624 toroidine ait 10 kHz'de 1,2 T değeri için deneysel, YSA benzetişimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrileri

YSA uygulaması ve Eş.(3.32)'den elde edilen dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum, Şekil 4.78'deki bağıl hata değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.13'te verilmiştir.





Şekil 4.78. 1, 2, 5 ve 10 kHz frekansları için JA modeli, YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen eğrilere ait noktaların bağıl hataları

Çizelge 4.13. #W624 toroidi için YSA benzetimi ve Eş.(3.32)'den elde edilen histeresis eğrilerinin deneysel eğriler ile uyum değerleri

Frekans	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz
Model	Uyum (%)			
YSA	96,24	96,41	97,60	96,17
Eş.(3.32)	88,96	91,06	96,20	95,14

Genel olarak elde edilen sonuçlara bakıldığında, JA modeli kullanılarak hesaplanan dinamik histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum, diğer modellere göre daha az olarak elde edilmiştir. Yapılan literatür araştırmasına göre, JA modeli ile

elektriksel iletkenliğe sahip ferromanyetik malzemeler için dinamik histeresis eğrileri en fazla 6 kHz'lik frekans değerlerine kadar çalışılmıştır (Jiles, 1994), (Kis ve Ivanyi, 2004), (Chwastek, 2009), (Boughtche ve ark., 2010), (Hamimid ve ark., 2011). Bu nedenle, çalışmada kullanılan toroid çekirdekleri için JA modeliyle 10, 20 ve 50 kHz frekanslarındaki histeresis eğrilerini hassas bir şekilde elde etmek mümkün değildir. Şekil 4.53, 4.54, 4.55, 4.58, 4.60, 4.61, 4.67, 4.68, 4.74, 4.75 ve 4.76'da, Eş.(3.32)'den hesaplanan histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasında sapmalar görülmektedir. Bunun nedeni, deneysel eğrilerin, özellikle üst ve alt kısımlarda (yüksek manyetik alan değerlerinde) bozulmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü ferromanyetik malzeme doyuma gittiğinde, algılama bobininde (Şekil 3.1) indüklenen sinyalin sinüsoidal şekli değişmektedir. Eş.(3.11)'e göre, mıknatıslanma değerlerinin doğru olarak hesaplanabilmesi için algılama bobininde indüklenen gerilimin tam bir sinüs dalgası şeklinde olması gerekmektedir. Bu nedenle, sıfırlayıcı alan ve doyum mıknatıslanması değerlerine göre düzgün bir teorik eğri elde edilmesine rağmen, Eş.(3.32) ile hesaplanan histeresis eğrileri ile deneysel eğriler arasındaki uyum YSA değerlerine göre daha küçük olarak bulunmuştur. Ayrıca Şekil 4.56, 4.57, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65, 4.69, 4.70, 4.71 ve 4.72'de, Eş.(3.32) kullanılarak elde edilen eğriler ile deneysel eğriler arasındaki uyumun diğerlerine göre az olmasının nedeni,  $m_c$  parametresinin daha hassas bir şekilde belirlenememesinden kaynaklanmaktadır.

Yapay sinir ağında öğrenme verileri yardımıyla girişlere bağlı olarak çıkış değerleri elde edilir. YSA sonuçları ile deneysel değerler arasındaki uyum, sadece YSA'nın öğrenme düzeyine bağlıdır ve toroid çekirdeklerinin mıknatıslanması sırasında malzeme içerisinde gerçekleşen fiziksel süreçler göz önünde bulundurulmaz. Öğrenme sonucunda, %99,94 değerinde öğrenme düzeyi elde edilmiştir. Bu nedenle YSA sonuçları ile deneysel değerler arasındaki uyum, tüm öğrenme ve test verileri için ortalama %99,94'tür.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında Vacuumschmelze firması tarafından ticari olarak üretilen, farklı geometrilerdeki,  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{15.5}B_7$  alaşımlı nanokristal VITOPERM<sup>®</sup> 500F toroid çekirdeklerinden elde edilmiş ferromanyetik histeresis eğrileri kullanılmıştır. 1, 2, 5,10, 20, 50 ve 100 kHz mıknatıslama frekansı için dinamik histeresis eğrileri ölçülmüştür. Jiles-Atherton modeli kullanılarak, nanokristal yapıdaki toroid çekirdekleri için deneysel histeresis eğrilerinin teori ile karşılaştırması yapılmıştır. Toroid çekirdeklerinin dinamik histeresis eğrilerinin sadece geometrik yapıya ve çalışma parametrelerine bağlı olarak elde edilebilmesi için bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Ayrıca doyum durumundaki histeresis eğrilerini mıknatıslanma tepe değeri, sıfırlayıcı alan, sıfırlayıcı alan noktasındaki manyetik alınganlık ve mıknatıslama frekansına bağlı olarak veren analitik bir ifade geliştirilmiştir.

Toroid çekirdeklerine ait histeresis eğrilerinin mıknatıslama frekansı ile orantılı olarak genişlediği, dolayısıyla güç kayıplarının arttığı görülmüştür. Özellikle 100 kHz'deki güç kayıpları oldukça fazladır. Bu frekans değerinde toroid çekirdeklerindeki aşırı kayıplar ve ısınmadan dolayı manyetik doyuma ulaşamamıştır. Bu nedenle, 100 kHz'e ait sonuçlar bu çalışma kapsamı içerisine alınmamıştır. Frekanstaki artış ile toroidlerin manyetik doyuma ulaşması için uygulanması gereken manyetik alan değerlerinde de artış gözlenmiştir. Bu durum, frekans ile birlikte güç kayıplarının artması sonucu ile tutarlıdır. Çünkü güç kayıpları arttıkça ferromanyetik malzemeyi doyuma ulaştırmak için daha fazla manyetik enerji verilmesi nedeniyle uygulanan manyetik alan şiddetinin de artırılması gerekmektedir.

Jiles-Atherton modeli genellikle yumuşak ferromanyetik malzemeler için geçerli olmasına karşın, bu model kullanılarak histeresis eğrileri için çok uyumlu sonuçlar elde edilememiştir. Literatür araştırmasından edinilen bilgiye göre, statik Jiles-Atherton modelinin uygulandığı birçok yumuşak ferromanyetik malzeme için sıfırlayıcı alan değerinin en küçük 5-10 A/m görülmüştür. Ancak, çalışmada kullanılan toroid çekirdeklerinin sıfırlayıcı alan değerleri 0,27-0,48 A/m olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle Jiles-Atherton modelinden elde edilen histeresis eğrileri ile deneysel histeresis eğrileri arasındaki uyumsuzluğun, nanokristal toroid çekirdeklerinin süper yumuşak

manyetik malzeme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca dinamik histeresis eğrilerinin özellikle manyetik doyum bölgelerinde, deneysel ve teorik eğriler arasında farklılıklar vardır. Doyum bölgesinde, manyetik indüksiyonun hesaplanabilmesi için algılama bobininde indüklenen sinyalin sinüsoidal olması gerekmektedir. Ancak ferromanyetik malzeme doyuma gittikçe bu sinyalde ek harmonikler oluşmaya başlar ve sinüs sinyali bozulur. Bu nedenle deneysel manyetik indüksiyon değerleri ile teorik değerler arasında farklılıklar oluşmaktadır.

Teorik histeresis eğrileri düzgün bir değişime sahipken deneysel eğrilerde bozulma olmasının diğer bir sebebi ise ferromanyetik malzeme içerisindeki kusurlardır. Bu kusurlar, mıknatıslanma süreci sırasında domain duvarlarının düzensiz bir şekilde hareket etmesine neden olurlar. Ancak Jiles-Atherton modeli gibi birçok makroskopik histeresis modeli buna benzer mikromanyetik özellikleri hesaba katmadığından deneysel ve teorik histeresis eğrilerinde uyumsuzluklar gözlenebilmektedir.

Yapay sinir ağı uygulamasında, öğrenme verilerine ait sonuçlar arasında #W380 toroidi için elde edilen histeresis eğrileri, deneysel eğriler ile daha az uyumlu olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, #W380 toroidine ait verilerin, yapay sinir ağı giriş vektörünün başlangıç değerleri arasında olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, tüm öğrenme ve test verileri için 0,05 T manyetik indüksiyon değerinde elde edilmiş deneysel histeresis eğrileri, ağ giriş vektörünün başlangıç sınırında yer aldığından dolayı bu değer için yapay sinir ağı sonuçları ile deneysel histeresis eğrileri arasındaki uyum çok düşük olarak elde edilmiştir. Ancak yapay sinir ağından elde edilen diğer sonuçlar, deneysel değerler ile yaklaşık %99,9 uyumludur. Teknolojik uygulamalar için gerekli olan manyetik indüksiyon 1 T ve üzerindeki değerlerdir. Bu durum dikkate alındığında, yapay sinir ağı sonuçları uygulama alanları için kabul edilebilir düzeydedir.

Geliştirilen matematiksel model sadece üç parametreye sahip ve toroid çekirdeklerinin doyum durumundaki histeresis eğrilerini veren analitik bir ifadedir. Bu parametreler deneysel eğrilerden kolayca belirlenebilmektedir. Ancak, histeresis eğrisinin sıfırlayıcı alan noktasındaki eğimi ile ilgili olan  $m_c$  parametresi, toroid çekirdeklerine ait diğer özelliklere de bağlıdır.  $m_c$  parametresinin bu özellikler ile değişimi elde etmek için, giriş vektörü toroid çekirdeklerinin boyutları, doyum mıknatıslanması, sıfırlayıcı alan,

sıfırlayıcı alan noktasındaki manyetik alınganlık, kalıcı mıknatıslanma, kalıcı mıknatıslanma değeriindeki manyetik alınganlık ve mıknatıslama frekansından oluşan başka bir yapay sinir ağı kullanılmıştır. Hassasiyet analizi sonuçlara göre  $m_c$  parametresinin en çok sıfırlayıcı alan noktasındaki alınganlık ve mıknatıslama frekansına bağlı olduğu bulunmuştur. Buna göre,  $m_c$  parametresinin belirlenebilmesi için frekans ve alınganlık değerine bağlı bir ifade elde edilmiştir. Doyum durumundaki histeresis eğrileri için geliştirilen bu model kullanılarak #W380, #W423, #W424 ve #W624 toroidleri için deneysel değerler ile oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Literatürdeki birçok manyetik histeresis modelinin diferansiyel ifade olduğu göz önüne alındığında, geliştirilen matematiksel modelin analitik bir ifade olması uygulamada kolaylık sağlamaktadır. Ancak, bu ifadenin daha geniş bir alanda kullanılabilmesi için  $m_c$  parametresinin sadece frekans ve sıfırlayıcı alan noktasındaki alınganlık değerine değil, aynı zamanda sıfırlayıcı alan, kalıcı mıknatıslanma ve kalıcı mıknatıslanma noktasındaki alınganlık değerleri gibi diğer manyetik özelliklere bağlı olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, deneysel verilerin sınırlı olması nedeni ile  $m_c$  parametresi için yalnızca çalışma frekansı ve sıfırlayıcı alan noktasındaki alınganlık değerlerine göre değişen bir bağıntı bulunmuştur. Farklı türlerdeki toroid çekirdeklerinden alınacak çok daha fazla deneysel veri yardımı ile geliştirilen matematiksel model için geometriye, tüm manyetik özelliklere ve çalışma noktalarına bağlı daha genel bir ifade elde etmek mümkün olacaktır.

Günümüz teknolojisinde enerji, zaman ve iş gücü bakımından tasarrufa gidildiği düşünüldüğünde, geliştirilen bu matematiksel model ve yapay sinir ağları kullanılarak, manyetik histeresis eğrilerinin elde edilmesi için harcanan uzun süreler kısalacak ve daha az zaman ve iş gücüyle elektromanyetik cihazların manyetik özellikleri ve güç kayıpları hakkında ön bilgi sahibi olunacaktır. Bu sayede tasarım ve deney aşamasındaki zaman ve iş gücü kayıpları en aza indirilerek daha hızlı bir şekilde üretime geçilebilecektir.

## KAYNAKLAR

- Andrei, P., Stancu, A. 1999.** Hysteresis in particulate recording media. Experiment and simulation with Preisach and Jiles-Atherton models. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 206: 160-164.
- Anonim. 1996.** British Standart. part 13: p.1-12.
- Anonim. 2003.** Vacuumschmelze ürün kataloğu.
- Anonim. 2007.** Hysteresis. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis> (Erişim tarihi: 14.12.2007).
- Bastos, J., P., A., Sadowski, N. 2003.** Electromagnetic modeling by finite element methods. Marcel Dekker, New York, 421-422, 436-440 pp.
- Beale, M., H., Hagan, M., T., Demuth, H., B. 2011.** MATLAB® Neural Network Toolbox™ 7 user's guide. The Mathworks, Inc., Massachusetts, USA.
- Benabou, A., Clenet, S., Piriou, F. 2003.** Comparison of Preisach and Jiles-Atherton models to take into account hysteresis phenomenon for finite element analysis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 260: 139-160.
- Bertotti, G. 1985.** Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations. *J. Appl. Phys.*, 57(6): 2110-2117.
- Bertotti, G. 1985.** Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. II. Analysis of experimental results. *J. Appl. Phys.*, 57(6): 2118-2126.
- Bertotti, G. 1998.** Hysteresis in magnetism. Academic Press, New York, 426-429 pp.
- Bertotti, G., Mayergoyz, I., D. 2006.** The science of hysteresis. Elsevier, Amsterdam.
- Bossche, A., V., Valchev, V., C. 2005.** Inductors and transformers for power electronics. Taylor & Francis Group, LLC, New York, 152-153 pp.
- Boukhtache, S., Yakhlef, M., Chabane, M. 2010.** Magnetic field computation in a non-oriented sheet cross-section considering the hysteresis phenomenon. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322: 505-509.
- Broddefalk, A., Lindenmo, B. 2006.** Dependence of the power losses of a non-oriented 3% Si-steel on frequency and gauge. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304: e586-e588.
- Chikazumi, S. 2005.** Physics of ferromagnetism. Oxford University Press Inc., New York, 118-133, 552 pp.
- Chwastek, K. 2009.** Modelling of dynamic hysteresis loops using the Jiles-Atherton approach. *Mathematical and Computer Modelling Dynamical Systems*. 15(1): 95-105.

- Chwastek, K., Szczyglowski, J. 2007.** An alternative method to estimate the parameters of Jiles-Atherton model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 314: 47-51.
- Chwastek, K., Szczyglowski, J. 2008.** Estimation methods for the Jiles-Atherton model parameters. Proceeding of the 2nd Symposium on Applied Electromagnetics SAEM'08, Warszawa, 33-39 pp.
- Chwastek, K., Szczyglowski, J., Najgebauer, M. 2006.** A direct search algorithm for estimation of Jiles-Atherton hysteresis model parameters. *Materials Science and Engineering B*, 131: 22-26.
- Cullity, B., D., 2009.** Introduction to magnetic materials. Wiley & Sons, New Jersey, 87-89 pp.
- Deane, J., H. 1994.** Modeling the dynamic of nonlinear inductor circuits. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30 (5): 2795-2801.
- Della Torre, E. 1999.** Magnetic hysteresis. IEEE Press, New York, 5-6 pp.
- Derebasi, N. 1994.** Effect of tension and surface properties on magnetic domains and power loss in amorphous ribbons. *PhD Thesis*, Wolfson Centre for Magnetic Technology, School of Electrical, Electronic and System Engineering, University of Wales College of Cardiff.
- Derebasi, N., Rygal, R., Moses, A. J., Fox, D. 2000.** A novel system for rapid measurement of high frequency magnetic cores of different sizes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 684 (SI), 215-216.
- Dreyfus, G. 2005.** Neural networks methodology and applications. Springer-Verlag, Berlin, 3-4, 8 pp.
- Dutta, S., M. 2004.** Dynamic hysteresis modeling and applications. *MSc Thesis*, Rice University, Engineering and Materials Science, Huston, Texas.
- Getzlaff, M. 2008.** Fundamental of magnetism. Springer, Berlin.
- Haciismailoglu, M., C., Kucuk, I., Derebasi, N. 2009.** Prediction of dynamic hysteresis loops of nano-crystalline cores. *Expert Systems with Applications*, 36(2): 2225-2227.
- Hagan, M., T. 1996.** Neural network design. PWS Publishing Company, USA, 1.2-1.8, 11.7-11.10 pp.
- Hamimid, M., Mimoune, S., M., Feliachi, M. 2011.** Hybrid magnetic field formulation based on the losses separation method for modified dynamic inverse Jiles-Atherton model. *Physica B*, 406: 2755-2757.
- Haykin, S. 1999.** Neural networks, a comprehensive foundation. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 156-163 pp.

- Herzer, G. 1997.** Nanocrystalline soft magnetic alloys: Handbook of magnetic materials, Ed.: K. H. Buschow, Elsevier Science B. V., Netherlands, pp:417-418.
- Hodgdon, M., L. 1988.** Mathematical theory and calculations of magnetic hysteresis curves. *IEEE Trans. Mag.*, 24(6): 3120-3122.
- Hubert, A., Schafer, R. 2009.** Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures. Springer, Heidelberg.
- Izydorczyk, J. 2006.** Extraction of Jiles-Atherton parameters of ferrite from initial magnetization curves. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 302: 517-528.
- Jiles, D., C. 1991.** Introduction to magnetism and magnetic materials. Chapman and Hall, London, 165-172 pp.
- Jiles, D., C. 1993.** Frequency dependence of hysteresis curves in non-conducting magnetic materials. *IEEE Trans. Mag.*, 29(6): 3490-3492.
- Jiles, D., C. 1994.** Modelling the effects of eddy current losses on frequency dependent hysteresis in electrically conducting media. *IEEE Trans. Mag.*, 30(6): 4326-4328.
- Jiles, D., C., Fang, X., Zhang, W. 2006.** Modeling of hysteresis in magnetic materials: Handbook of advanced magnetic materials, Ed.: Liu, Y., Sellmyer, D. J., Shindo, D., Springer, New York, USA, pp:372-406.
- Jiles, D., C. 1992.** A self consistent generalized model for the calculation of minor loop excursions in the theory of hysteresis. *IEEE Trans. Mag.*, 28(5): 2602-2604.
- Jiles, D., C. 2000.** Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. *Czechoslovak Journal of Physics*, 50(8): 893-988.
- Jiles, D., C., Atherton, D., L. 1983.** Ferromagnetic hysteresis. *IEEE Trans. Mag.*, 19(5): 2183-2185.
- Jiles, D., C., Thielke, J., B. 1989.** Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops. *IEEE Trans. Mag.*, 25(5): 3928-3930.
- Jiles, D., C., Thielke, J., B., Devine, M., K. 1992.** Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis. *IEEE Trans. Mag.*, 28(1): 27-35.
- Kis, P. 2006.** Jiles-Atherton model implementation to edge finite element method. *PhD Thesis*, Department of Broadband Infocommunications and Electromagnetic Theory. Budapest, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary.
- Kis, P., Ivanyi, A. 2004.** Parameter identification of Jiles-Atherton model with nonlinear least-square method. *Physica B*, 343: 59-64.
- Kraus, J., D. 1981.** Electromagnetics. Kosaido Printing Co. Ltd., Tokyo, Japan, 225 pp.



- Küçük, İ. 2003.** Çalışma frekansına ve geometrik yapıya bağlı olarak toroid çekirdeklerin manyetik özelliklerinin deneysel ve kuramsal incelenmesi. *Doktora Tezi*, UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Kucuk, I., Derebasi, N. 2006.** Prediction of power losses in transformer cores using feed forward neural network and genetic algorithm. *Measurement*, 39 (7): 605-611.
- Kucuk, I., Hacıismailoglu, M., C., Derebasi, N. 2009.** Dynamic hysteresis modelling for nano-crystalline cores. *Expert Systems with Applications*, 36(2): 3188-3190.
- Lacheisserie, E., T., Gignoux, D., Schlenker, M. 2005.** Magnetism: Fundamentals. Springer, Boston, 106 pp.
- Lacheisserie, E., T., Gignoux, D., Schlenker, M. 2005.** Magnetism: Materials and applications. Springer, Boston.
- Leite, J., V., Avila, S., L., Batistela, N., J., Carpes, Jr, W., P., Sadowski, N., Kuo-Peng, P., Bastos, J., P., A. 2004.** Real coded genetic algorithm for Jiles-Atherton model parameters identification. *IEEE Trans. Mag.*, 40(2): 888-891.
- Leite, J., V., Sadowski, N., Kuo-Peng, P., Benabou, A. 2009.** Minor loops calculation with a modified Jiles-Atherton hysteresis model. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 8(1):49s-55s.
- Liorzou, F., Phelps, B., Atherton, L. 2000.** Macroscopic models of magnetization. *IEEE Trans. Mag.*, 36 (2): 418-428.
- Luborsky, F., E. 1961.** High coercive materials: development of elongated particle magnets. *Journal of Applied Physics*, 32(3): 171S-183S.
- Mayergoyz, I. 2003.** Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications. Elsevier, Amsterdam.
- Meunier, G. 2008.** The finite element method for electromagnetic modeling. Wiley, New Jersey, 179-182 pp.
- Miljavec, D., Zidaric, B. 2008.** Introducing a domain flexing function in the Jiles-Atherton hysteresis model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320: 763-768.
- Miti, G., K., Moses, A., J., Derebasi, N., Fox, D. 2003.** A neural network-based tool for magnetic performance prediction of toroidal cores. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254 (SI): 262-264.
- Mordjaoui, M., Chabane, M., Boudjema, B., Daira, R. 2007.** Adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling magnetic hysteresis. *Asian Journal of Information Technology*, 6(1):95-101.
- Mordjaoui, M., Chabane, M., Boudjema, B., Daira, R. 2008.** Hysteresis modeling with adaptive neuro-fuzzy inference system. *Ferroelectrics*, 372: 54-65.

**Roman, K. Dec 1<sup>st</sup> 2010.** Private Communication. Product Marketing Manager, Vauumschmeltze, Germany.

**Rothwell, E., J. 2001.** Electromagnetics. CRC Press LLC, New York.

**Sablik, M., J., Jiles, D., C. 1999.** A modified Stoner-Wohlfarth computational model for hysteretic magnetic properties in a ferromagnetic composite rod under torsion. *J. Phys. D: Apply. Phys.*, 32:1971-1983.

**Saghafifar, M. 2004.** Magnetic hysteresis modeling usin knowledge based engineering techniques. *MSc Thesis*, Schooll of Electrical and Information Engineering, University of South Australia, Mawson Lakes, Australia.

**Yüksel, İ. 2000.** MATLAB ile mühendislik sistemlerinin analizi ve çözümü. VİPAŞ, Bursa.

**Wang, X., Thomas, D., W., Summer, M., Paul, J. 2009.** Numerical determination of Jiles-Atherton model parameters. *COMPEL*, 28 (2): 493-503.

**Wilson, P., R., Ross, J., N., Brown, A., D. 2004.** Modeling frequency-dependent losses in ferrite cores. *IEEE Trans. Mag.*, 40(3): 1537-1541.

**Zidaric, B., Zagirnyak, M., Lenasi, K., Miljavec, D. 2006.** Histeresis losses in soft magnetic composite materials. *COMPEL*, 25 (1): 157-168.

**Zirca, S., E., Moroz, Y., I., Marketos, P., Moses, A., J., Jiles, D., C. 2006.** Measurement and modeling of B-H loops and losses of high silicon nonoriented steels. *IEEE Trans. Mag.*, 42(10): 3177-3179.

## EKLER

- EK 1 JA modelinin çözümü için hazırlanan Simulink modelinde kullanılan blokların özellikleri
- EK 2 Dinamik histeresis eğrileri için MATLAB® ile oluşturulan yapay sinir ağının yapısı
- EK 3 Matematiksel model için oluşturulan yapay sinir ağının yapısı
- EK 4  $V_{RMS}/V_{ort}$  oranının hesaplanması

## EK 1. JA modelinin çözümü için hazırlanan Simulink modelinde kullanılan blokların özellikleri

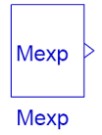
JA model parametrelerinin tahmin edilmesi ve dinamik JA modelin çözümü için MATLAB® 2008a programı kullanılarak Simulink modeli oluşturulmuştur. Simulink modelinde kullanılan bloklar ve özellikleri aşağıda verilmiştir.



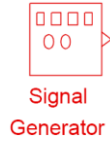
JA denkleminin çözümü sonucunda elde edilen manyetik alan değerlerinin MATLAB® çalışma alanına aktarılması için kullanılan Simulink kütüphanesindeki "To workspace" bloğu



JA denkleminin çözümü sonucunda elde edilen mıknatıslanma değerlerinin MATLAB® çalışma alanına aktarılması için kullanılan Simulink kütüphanesindeki "To workspace" bloğu



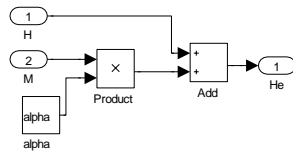
Deneysel mıknatıslanma değerlerinin MATLAB® çalışma alanından çağrılmasını sağlayan Simulink kütüphanesindeki "From workspace" bloğu



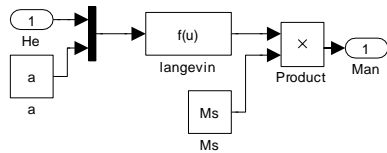
JA denkleminin sayısal çözümü sırasında gerekli olan manyetik alan ( $H$ ) değerlerini üreten "Signal generator" bloğu



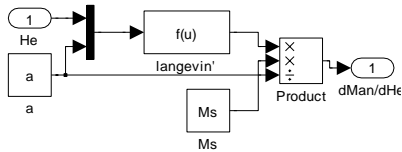
Manyetik alanın zamana göre türevini almak için kullanılan "Derivative" bloğu



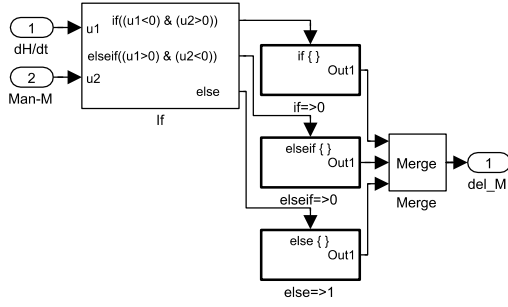
Etkin alan değerlerini hesaplayan alt sistem bloğu



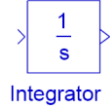
Anhisteretik mıknatıslanmayı hesaplayan alt sistem bloğu



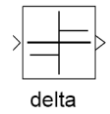
Anhisteretik mıknatıslanmanın etkin alana göre türevini hesaplayan alt sistem bloğu



$\delta_M$  için alt sistem bloğu

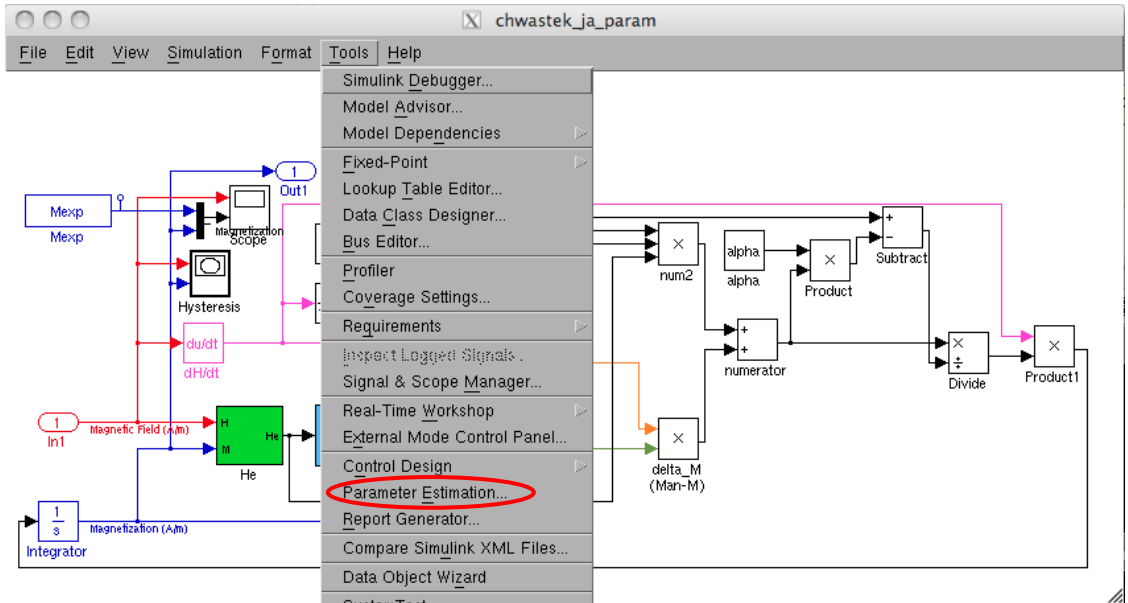


JA denkleminin sayısal çözümü sırasında integral işlemi yapmak için kullanılan "Integrator" bloğu

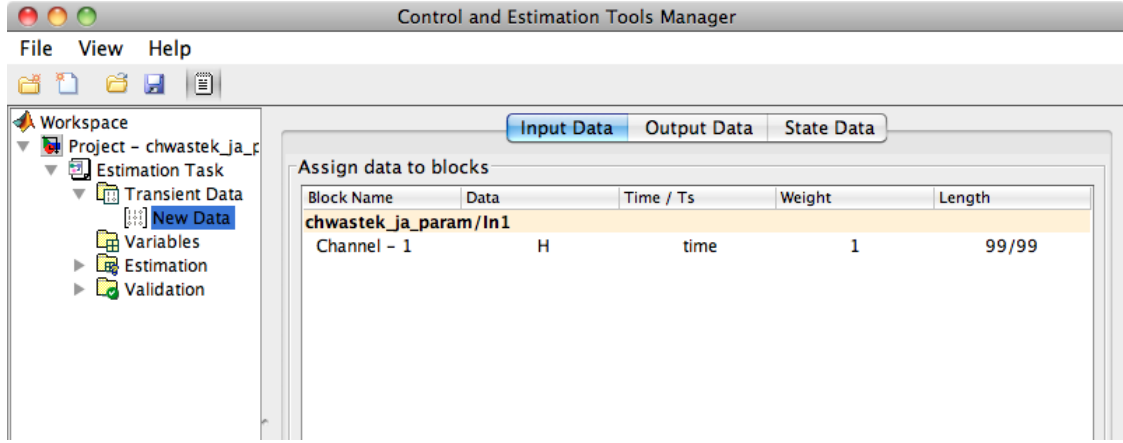


JA denkleminde manyetik alanın yönünü belirleyen  $\delta$  için kullanılan "Sign" bloğu

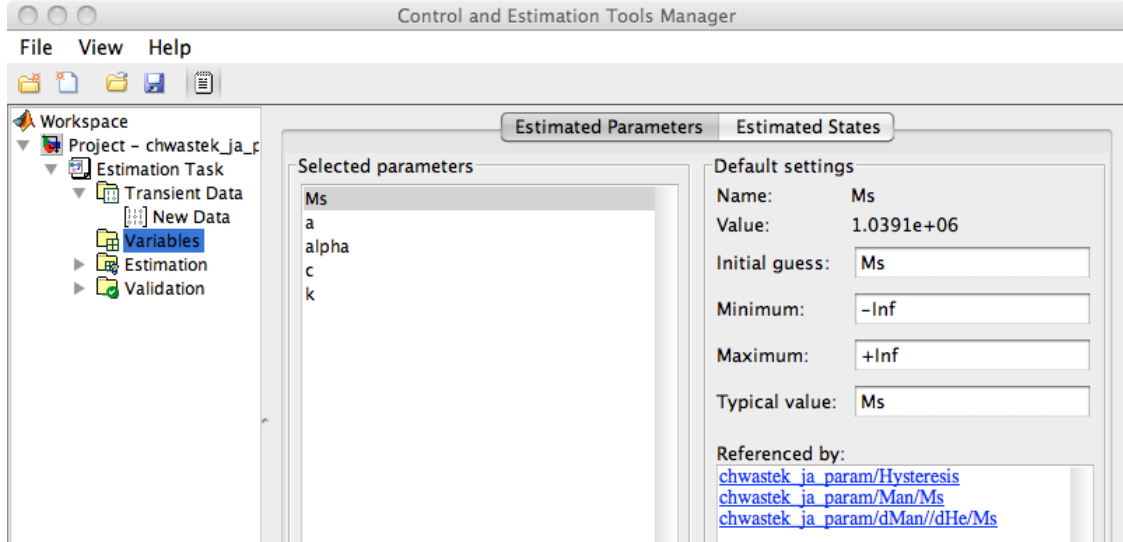
Oluşturulan Simulink modeli ile JA model parametrelerinin optimizasyonu için Simulink/Control and Estimation Toolbox kullanılmıştır.



Control and Estimation Tools penceresinde deneysel  $H$  ve deneysel  $M$  değerlerinin çalışmasında ortamından çağırılması için bu verilerin Transient Data kısmında girişi yapılmıştır.



Variables seçeneğinde optimizasyon yapılacak parametreler ve bu parametreler için sınır değerlerinin girişi yapılmıştır.



Estimation kısmında, optimizasyon yöntemi, optimizasyon için kullanılacak algoritma, parametre ve fonksiyon tolerans değerleri iterasyon sayı belirlenmiştir.

Options - New Estimation

Simulation Options Optimization Options Parallel Options

Optimization method

Method: Nonlinear least squares Algorithm: Trust-Region-Reflective

Optimization options

Diff max change: 0.1 Maximum fun evals: 1000

Diff min change: 1e-08 Maximum iterations: 4000

Parameter tolerance: 1e-6 Function tolerance: 1e-6

Display level: Off Gradient type: Basic

Cost function: SSE  Use robust cost

OK Cancel Help Apply

## EK 2. Dinamik histeresis eğrileri için MATLAB® ile oluşturulan yapay sinir ağının yapısı

Giriş vektörü	Çıkış vektörü
$d_1$	
$d_2$	$H$
$w$	$M$
$f$	
$B_{max}$	

Neural Network object:

architecture:

numInputs : 1  
numLayers : 3  
biasConnect : [1; 1; 1]  
inputConnect : [1; 0; 0]  
layerConnect : [0 0 0; 1 0 0; 0 1 0]  
outputConnect : [0 0 1]  
numOutputs : 1  
numInputDelays : 0  
numLayerDelays : 0

subobject structures:

inputs : {1x1 cell} of inputs  
layers : {3x1 cell} of layers  
outputs : {1x3 cell} containing 1 output  
biases : {3x1 cell} containing 3 biases  
inputWeights : {3x1 cell} containing 1 input weight  
layerWeights : {3x3 cell} containing 2 layer weights



functions:

adaptFcn : 'trains'  
divideFcn : 'dividerand'  
gradientFcn : 'gdefaults'  
initFcn : 'initlay'  
performFcn : 'mse'  
plotFcns : {'plotperform','plottrainstate','plotregression'}  
trainFcn : 'trainlm'

parameters:

adaptParam : .passes  
divideParam : .trainRatio, .valRatio, .testRatio  
gradientParam : (none)  
initParam : (none)  
performParam : (mse)  
trainParam : .show, .showWindow, .showCommandLine, .epochs,  
.time, .goal, .max\_fail, .mem\_reduc,  
.min\_grad, .mu, .mu\_dec, .mu\_inc, .mu\_max

weight and bias values:

IW : {3x1 cell} containing 1 input weight matrix  
LW : {3x3 cell} containing 2 layer weight matrices  
B : {3x1 cell} containing 3 bias vectors

---

	<code>net=newff(p,t,[14 3],{'tansig', 'tansig'}, 'trainlm')</code>
Ağın oluşturulması	<code>net.trainParam.epochs=300; net.trainParam.goal=1e-5; net.trainParam.show=25; net.divideFcn=''; net.divideParam.trainRatio=0.7; net.divideParam.valRatio=0.15; net.divideParam.testRatio=0.15; net.performParam='mse';</code>
Ağın eğitilmesi	<code>net=train(net,p,t)</code>
Benzetişim	<code>[trained_p trained_t ]=sim(net, p_test, t_test)</code>

---

### EK 3. Matematiksel model için oluşturulan yapay sinir ağının yapısı

Giriş vektörü	Çıkış vektörü
$d_1$	$m_c$
$d_2$	
$w$	
$f$	
$B_{max}$	
$H_c$	
$\chi_c$	
$M_r$	
$\chi_r$	

Neural Network object:

architecture:

numInputs : 1  
 numLayers : 3  
 biasConnect : [1; 1; 1]  
 inputConnect : [1; 0; 0]  
 layerConnect : [0 0 0; 1 0 0; 0 1 0]  
 outputConnect : [0 0 1]  
 numOutputs : 1  
 numInputDelays : 0  
 numLayerDelays : 0

subobject structures:

inputs : {1x1 cell} of inputs  
 layers : {3x1 cell} of layers  
 outputs : {1x3 cell} containing 1 output  
 biases : {3x1 cell} containing 3 biases  
 inputWeights : {3x1 cell} containing 1 input weight  
 layerWeights : {3x3 cell} containing 2 layer weights

functions:

adaptFcn : 'trains'  
 divideFcn : 'dividerand'  
 gradientFcn : 'gdefaults'  
 initFcn : 'initlay'

```

performFcn      : 'mse'
plotFcns       : {'plotperform','plottrainstate','plotregression'}
trainFcn       : 'trainlm'

```

parameters:

```

adaptParam     : .passes
divideParam    : .trainRatio, .valRatio, .testRatio
gradientParam  : (none)
initParam     : (none)
performParam   : (none)
trainParam     : .show, .showWindow, .showCommandLine, .epochs,
                .time, .goal, .max_fail, .mem_reduc,
                .min_grad, .mu, .mu_dec, .mu_inc,
                .mu_max

```

weight and bias values:

```

IW             : {3x1 cell} containing 1 input weight matrix
LW             : {3x3 cell} containing 2 layer weight matrices
B              : {3x1 cell} containing 3 bias vectors

```

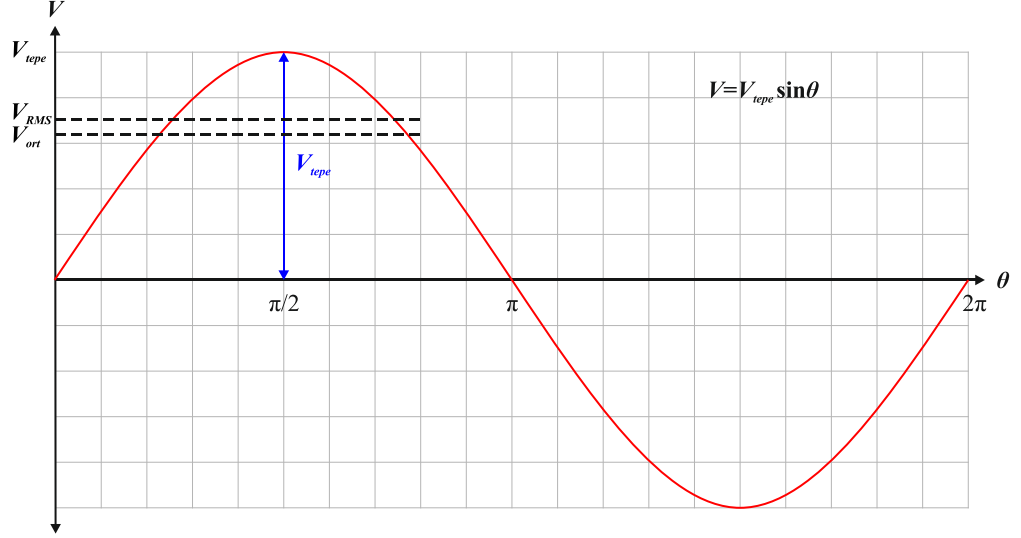
---

	<code>net=newff(p,t,[10 2],{'tansig', 'tansig'}, 'trainlm')</code>
Ağın oluşturulması	<pre> net.trainParam.epochs=1000; net.trainParam.goal=1e-5; net.trainParam.show=25; net.divideFcn=''; net.divideParam.trainRatio=0.7; net.divideParam.valRatio=0.15; net.divideParam.testRatio=0.15; net.performParam='mse'; </pre>
Ağın eğitilmesi	<code>net=train(net,p,t)</code>
Benzetişim	<code>[trained_p trained_t ]=sim(net, p_test, t_test)</code>

---

#### EK 4. $V_{RMS}/V_{ort}$ oranının hesaplanması

Şekildeki alternatif gerilim için etkin değer ( $V_{RMS}$ ), sinyalin çeyrek periyottaki karesel ortalama değerinin kareköküne eşittir:



$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (V_{tepe} \sin \theta)^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_{tepe}^2 \sin^2 \theta d\theta} \quad (E4.1)$$

Burada  $V_{tepe}$  gerilimin tepe değeridir. Yarım açı dönüşümünden

$$\sin^2 \theta = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta) \quad (E4.2)$$

ifadesi Eş.(E4.1)'de yerine yazılırsa

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{\pi} V_{tepe}^2 \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta) d\theta} \quad (E4.3)$$

olur. Buradan,

$$\begin{aligned}
V_{RMS} &= \frac{\sqrt{2}V_{tepe}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{4}\sin 2\theta\right)\Big|_0^{\pi/2}} \\
&= \frac{\sqrt{2}V_{tepe}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(\frac{\pi/2}{2} - \frac{1}{4}\sin \pi\right) - \left(\frac{0}{2} - \frac{1}{4}\sin 0\right)} \\
&= \frac{\sqrt{2}V_{tepe}}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\pi}}{2}
\end{aligned} \tag{E4.4}$$

ve sonuç olarak etkin değer

$$V_{RMS} = \frac{V_{tepe}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot V_{tepe} \tag{E4.5}$$

şeklinde elde edilir.

Alternatif gerilim için ortalama değer ise sinüs şeklindeki dalga için ortalama değer hesabı ile elde edilebilir:

$$\begin{aligned}
V_{ort} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_{tepe} \sin \theta d\theta = \frac{2V_{tepe}}{\pi} \left| -\cos \theta \right|_0^{\pi/2} \\
&= \frac{2V_{tepe}}{\pi} \left( \cos \frac{\pi}{2} - \cos 0 \right)
\end{aligned} \tag{E4.6}$$

Buradan gerilimin ortalama değeri

$$V_{ort} = \frac{2}{\pi} V_{tepe} = 0,637 \cdot V_{tepe} \tag{E4.7}$$

olarak elde edilir.

Buna göre  $V_{RMS}/V_{ort}$  oranı için

$$\frac{V_{RMS}}{V_{ort}} = \frac{0,707V_{tepe}}{0,637V_{tepe}} = 1,11 \tag{E4.8}$$

sonucuna ulaşılır.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : M. Cüneyt HACİİSMAİLOĞLU  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Çorum - 24.04.1980  
**Yabancı Dili** : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

**Lise** : Çorum Anadolu Öğretmen Lisesi - 1998  
**Lisans** : U. Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü - 2002  
**Yüksek Lisans** : U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik ABD - 2005

**Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl** : U. Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü - 2002-....  
**İletişim (e-posta)** : mcuneyt@uludag.edu.tr  
**Yayımları** :

#### • Yüksek Lisans aşamasında yapılan yayınlar

**Bektore, Y., Yucel, E., Erturk, K., Hacıismailoglu, M., C. 2004.** Investigation of electrical and optical properties of n-Type Si/Au Schottky barrier diode, *Romanian Journal of Physics*, 49(1-2):2004

**Erturk, K., Bektore, Y., Hacıismailoglu M. C. 2005.** Electrical and Schottky Contact Properties of Pt/n-Si<sub>1-x</sub>Gex/n-Si(100) Heterostructure. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2(4): 1428-1432

#### • Doktora aşamasında yapılan yayınlar

**Ahmetoglu (Afrailov), M., Alper, M., Safak, M., Erturk, K., Gurpinar, B., Kocak, F., Hacıismailoglu, C. 2007.** Electrical Properties of n-Si/Cu Schottky Diodes Formed by Electrodeposition. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 9(4): 818-821

**Erturk, K., Hacıismailoglu, M., C., Bekore, Y., Ahmetoglu, M. 2008.** Temperature Dependence of Electrical Characteristics of Cr/p-Si(100) Schottky Barrier Diodes. *International Journal of Modern Physics B*, 22(14): 2309-2319

**Erturk, K., Kose, S., Atay, F., Bilgin, V., Akyuz, I., Hacıismailoglu M., C., Kucuk, I., Derebasi, N. 2008.** Prediction of optical parameters of Sn doped CdO films using neural network, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10(2): 335-338

**Hacıismailoglu, M., C., Kucuk, I., Derebasi, N. 2009.** Prediction of dynamic hysteresis loops of nano-crystalline cores. *Expert Systems with Applications*, 36(2): 2225-2227

**Kucuk, I., Erturk, K., Hacıismailoglu, M., C., Derebasi N. 2008.** Modelling of power loss in electrical steels. *Acta Physica Polonica A*, 113(1): 147-150

**Kucuk, I., Hacıismailoglu, M., C., Derebasi, N. 2009.** Dynamic hysteresis modelling for nano-crystalline cores. *Expert Systems with Applications*, 36(2): 3188-3190