

**TC
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AMORF FERROMANYETİK ALAŞIMLARDA
STRES-EMPEDANS VE MANYETOEMPEDANS ETKİ**

NEVZAT BAYRI

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

MALATYA

Mayıs 2007

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduđum “Amorf Ferromanyetik Alařımlarda Stres-Empedans ve Manyetoempedans Etki” bařlıklı bu çalıřmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dűşecek bir yardıma bařvurmaksızın tarafımdan yazıldıđını ve yararlandıđım bűtűn kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yűntemine uygun biçimde gűsterilenlerden oluřtuđunu belirtir, bunu onurumla dođrularım.

.....
Nevzat Bayri

ÖZET

Doktora Tezi

AMORF FERROMANYETİK ALAŞIMLARDA STRES-EMPEDANS VE MANYETOEMPEDANS ETKİ

Nevzat Bayri

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

193 + xxi sayfa

2007

Danışman: Prof. Dr. Selçuk Atalay

Son zamanlarda, oldukça hassas mikro-manyetik sensörlerin önemli uygulamalarından dolayı, amorf soft manyetik malzemeler bu malzemelerin gösterdiği özellikle yüksek manyetoempedans etki ile ilgili çalışmalar yoğunlaşmıştır. GMI etki, yüksek frekanslı akım taşıyan soft manyetik elementin empedansının bir dış dc manyetik alanın fonksiyonu olarak değişimi şeklinde tanımlanabilir.

Bu çalışmada, $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ ve $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel numunelerinde GMI etki ve stres empedans etki (SI) araştırılmıştır. $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel numunelerin oldukça büyük MI etki gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca bu numunelerin manyetik ve manyetoelastik özellikleri de araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçları açıklayacak teorik bir model geliştirilip MI sonuçları bu model kullanılarak tartışılmıştır. Numunelerin MI özelliklerini kullanarak değişik manyetik alan sensörleri geliştirilmiştir. Ferromanyetik bir maddedeki çatlakların, $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin MI özelliklerinin kullanılarak bulunabileceği gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Ferromanyetik teller, manyetoempedans, stres-empedans, magnetostriction, manyetik özellikler, manyetoelastik özellikler

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

STRESS-IMPEDANCE AND MAGNETOIMPEDANCE EFFECT IN AMORPHOUS FERROMAGNETIC ALLOYS

Nevzat Bayri

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

193 + xxi pages

2007

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk Atalay

Recently, considerable interest has been focused on the giant magneto-impedance (GMI) effect and amorphous soft ferromagnetic materials. The GMI effect can be defined as the change of impedance of a soft magnetic element carrying a high frequency current with external dc magnetic field.

In this study, the GMI effect and stress-impedance effect (SI) in $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$, $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ wire samples were investigated. It was found that $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ wire shows very large MI effect. Magnetic and magneto-elastic properties of these samples were also investigated. A theoretical model to explain the obtained experimental results was developed. Results were discussed on the basis of this model. Different types of magnetic field sensors on the basis of GMI effect were presented. We have also shown that using $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ wire as a magnetic field sensor, we can detect cracks in a magnetic material.

KEYWORDS: Ferromagnetic wires, magnetoimpedance, stress-impedance, magnetostriction, magnetic properties, magnetoelastic properties

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında çok değerli yardım ve desteklerini esirgmeden beni yönlendiren tez yöneticisi hocam Sayın Prof. Dr. Selçuk ATALAY'a;

Yine çalışmalarım süresince gösterdikleri yoğun ilgi ve desteklerinden dolayı Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Ali BAYRI'ye;

Ayrıca her fırsatta yardım ve desteklerinden dolayı Bölümümüz Öğretim Üyelerinden Doç. Dr. H. İbrahim ADIGÜZEL'e , Doç. Dr. Funda ATALAY'a ve Yrd. Doç. Dr. Hüseyin GENCER'e;

Tasarlanan GMI sensör devresi kullanılarak ferromanyetik malzemelerde çatlak ölçümlerinin alınmasına yardımcı olan Balıkesir Üniversitesi Öğretim Üyelerinden Doç. Dr. Mustafa Göktepe ve Dr. Yavuz Ege'ye

Gerek tez çalışmam sırasında gerekse özel yaşantımda gösterdiği içtenlik ve samimiyetten dolayı değerli dostum sevgili kardeşim Arş. Grv. V. Serkan Kolat'a;

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarından dolayı Murat Güneş'e

Ve tüm mesai arkadaşlarıma;

Hayatımın her döneminde olduğu gibi tez çalışmam boyunca da benden desteklerini esirgemeyen, AİLEME;

Sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Özet	i
Abstract	ii
Teşekkür	iii
İçindekiler	iv
Simgeler ve Kısaltmalar	vii
Şekiller Dizini	ix
Çizelgeler Dizini	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Tezin Ana Hatları	1
1.3. Temel Manyetik Parametreler	2
2. AMORF FERROMANYETİK MALZEMELER	4
2.1. Giriş	4
2.2. Amorf Alaşımlar	4
2.2.1. Amorf Ferromanyetik Alaşımların Üretimi	5
2.2.2. Amorf Ferromanyetik Alaşımların Manyetik Özellikleri	7
3. AMORF VE ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ ALAŞIMLARDA MANYETOEMPEDANS VE STRES EMPEDANS ETKİ	12
3.1. Giriş	12
3.2. Kısa Tarihsel Gelişim	12
3.3. Manyetoempedans Etki	13
3.3.1. Yüzey Etkisi	16
3.4. Amorf ve Isıl İşlem Görmüş Alaşımlarda Manyetoempedans Etki	20
3.5. Amorf ve Isıl İşlem Görmüş Alaşımlarda Stres-empedans Etki	41
3.6. Uygulama Alanları	51
3.6.1. Akım Sensörleri	52
3.6.2. Manyetik Alan Sensörleri	55
3.6.2.1. Colpitts Osilatör Tipi Alan Sensörü	57
3.6.3. Stres Sensörleri	60
3.6.4. Sensör Uygulamaları	61

4. DENEYSEL METODLAR	66
4.1. Giriş	66
4.2. Numune Hazırlama ve Isıl İşlem	66
4.3. Manyetik Ölçümler	68
4.3.1. M-H Ölçüm Sistemi	68
4.4. Manyetoempedans Ölçüm Sistemi	71
4.5. Stres-empedans Ölçüm Sistemi	74
4.6. Boyuna Elastik Katsayısı Ölçüm Sistemi	75
4.7. Deneysel Hata Kaynakları	79
5. Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ VE Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅ ALAŞIMLARDA MANYETİK, MANYETOELASTİK, MANYETOEMPEDANS VE STRES-EMPEDANS ÖLÇÜMLER	80
5.1. Giriş	80
5.2. Isıl İşlem Görmemiş Fe-bazlı Tellerin Domain Yapısı	80
5.3. Manyetik Ölçümler	82
5.4. Manyeto-elastik Ölçümler	90
5.5. Manyetoempedans Ölçümleri	98
5.5.1. Teorik Model	98
5.5.2. Sonlu Element (FEM) Metot	100
5.5.3. Isıl İşlem Uygulanmamış Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ ve Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ Tellerde Manyetoempedans Etki	102
5.5.4. Isıl İşlem Uygulanmış Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ ve Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ Tellerde Manyetoempedans Etki	108
5.6. Stres-empedans Ölçümleri	126
5.6.1. Isıl İşlem Görmemiş ve Isıl İşlem Gören Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ Tellerde Stres-empedans Etki	126
5.6.2. Isıl İşlem Görmemiş ve Isıl İşlem Gören Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ Tellerde Stres-empedans Etki	134
6. Co_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ VE (Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ TELLERİN MANYETİK VE MANYETOEMPEDANS ÖLÇÜMLERİ	137
6.1. Giriş	137
6.2. Isıl işlem görmemiş Co-bazlı telin domain yapısı.....	137
6.3. Manyetik Ölçümler	139

6.4.	Manyetoempedans Ölçümleri	144
6.4.1.	Isıl İşlem Uygulanmamış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ Tellerde Manyetoempedans Ölçümler	144
6.4.2.	Isıl İşlem Uygulanan $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ Tellerin Manyetoempedans Ölçümleri.....	150
6.4.3.	Fırın ve Akım Altında Isıl İşlem Uygulanan $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin Manyetoempedans Ölçümleri	156
7.	SENSÖR TASARIMI VE BAZI UYGULAMA ALANLARI	170
7.1.	Giriş	170
7.2.	Manyetik Alan Sensör Devre Tasarımları	170
7.3.	Ferromanyetik Malzemelerde Çatlak (Crack) Belirleyen Sensör Devre Tasarımı	172
8.	SONUÇLAR, TARTIŞMA VE İLERİ ÇALIŞMALAR	177
8.1.	Giriş	177
8.2.	Manyetik ve Manyetoelastik Özelliklerin Sonuçları ve Tartışma	177
8.3.	Manyetoempedans Etki Sonuçları ve Tartışma	179
8.4.	Stres-empedans Etki Sonuçları ve Tartışma	182
8.5.	İleri Çalışmalar	183
9.	KAYNAKLAR	184
10.	ÖZGEÇMİŞ	193

SİMGELER VE KISALTMALAR

H_c	Coercivity
M	Manyetizasyon
M_r	Remenant manyetizasyon
M_s	Doyum manyetizasyon
H_k	Anizotropi alanı
χ	Manyetik alınganlık
μ	Manyetik geçirgenlik
λ	Magnetostriction
λ_s	Doyum magnetostriction
Z	Empedans
L	İndüktans
μ_ϕ	Dairesel geçirgenlik
χ_t	Enine alınganlık
δ	Yüzey derinliği
σ	İç stres
f	Sürücü akım frekansı
ΔZ	Yüzde manyetoempedans
H_{dc}	Dış Manyetik alan
MI	Manyetoempedans
GMI	Yüksek manyetoempedans
SI	Strempedans
TI	Torsion empedans
E	Young modülü
α_n	Titreşim mod parametresi
$f(H)$	Rezonans frekans
f_s	Doyum frekansı
K	Anizotropi enerjisi
K_σ	Manyetoelastik anizotropi enerjisi
K_D	Şekil anizotropi enerjisi
D	Şekil demanyetizasyon katsayısı

K_k	Kristal anizotropi enerjisi
H_t	Enine manyetik alan

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	M-H eğrisi.....	2
Şekil 2.1.	Melt-spining Metodu.....	6
Şekil 2.2.	Soğuk su dolu dönen disk içinde tel üretim metodu	7
Şekil 2.3.	Finemet, nanoperm ve diğer malzemelerin 1kHz değerinde doyum manyetizasyonu ve görelî geçirgenlik değerleri.....	8
Şekil 2.4.	Amorf Fe-Ni ve Fe-Co bazlı alaşımlarda doyum manyetizasyonu ve doyum magnetostriction değerleri.....	9
Şekil 2.5.	Isıl işlem görmemiş Fe-bazlı (pozitif magnetostriction) ve Co-bazlı (negatif magnetostriction) numunelerin manyetik domain yapıları...	11
Şekil 3.1.	Web of Science ISCI (International Science Citation Index) verilerine göre manyeto-empedans etki ile ilgili yayın sayısının yıllara göre dağılımı.....	13
Şekil 3.2.	Düşük ve yüksek frekanslarda uygulanan alanla empedans değişimi..	15
Şekil 3.3.	Ferromanyetik bir malzemede ortaya çıkan iki farklı manyetizasyon süreci, (a) manyetik momentlerin dönmesi (b) domain duvarının hareketiyle.....	16
Şekil 3.4.	Değişen bir manyetik alan ile ortaya çıkan indüksiyon akımı.....	17
Şekil 3.5.	Üzerinden bir I akımı geçen bir iletkende indüksiyon akımının dağılımı.....	17
Şekil 3.6.	DC akım, düşük frekanslı ac akım ve yüksek frekanslı ac akımın iletkenin kesit alanı boyunca dağılımı.....	18
Şekil 3.7.	Frekansın fonksiyonu olarak yüzey derinliğinin değişimi.	20
Şekil 3.8.	Magnetostriction değerinin manyetoempedans oranı üzerine etkisi....	22
Şekil 3.9.	Farklı frekanslarda $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ amorf tel için empedansın uygulanan alana bağıllığı.....	23
Şekil 3.10.	Farklı frekanslarda $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ amorf mikro tel için empedansın uygulanan alana bağıllığı	24
Şekil 3.11.	Farklı sıcaklık değerleri için $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ amorf tellerde $\Delta Z/Z$ nin frekans ile değişimi.....	25
Şekil 3.12.	$Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ amorf telin düşük frekanslarda dairesel geçirgenliğin sıcaklığa bağıllığı.....	25

Şekil 3.13. Amorf CoFeSiB alaşımların domain yapısının şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.14. Farklı frekanslarda $Fe_{77.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağlılığı	28
Şekil 3.15. Farklı frekanslarda $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağlılığı	28
Şekil 3.16. Farklı frekanslarda $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağlılığı.....	29
Şekil 3.17. Isıl işlem görmemiş ve ısıtılan amorf tellerin GMI değerinin frekansa bağlılığı.....	30
Şekil 3.18. Amorf tellerin GMI değerinin ısıtılma sıcaklığına bağlılığı.....	31
Şekil 3.19. Isıl işlem görmemiş amorf telin GMI değerinin uygulanan dc alana bağlılığı.....	32
Şekil 3.20. Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılan nanokristal $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ tel için 1.1MHz ölçüm frekansında yüzde MIR değerinin alana bağlılığı	33
Şekil 3.21. Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılan nanokristal $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ tel için 3.1MHz ölçüm frekansında yüzde MIR değerinin alana bağlılığı.....	33
Şekil 3.22. Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılan nanokristal $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ tel için 1.1MHz ölçüm frekansında PR değerinin dış alana bağlılığı.....	34
Şekil 3.23. Mikro tel numuneler için manyetoempedans oranının alana bağlılığı. (a) Isıl işlem görmemiş (b) 100 °C de 30 dakika ısıtılma ve (c) 300 °C de 30 dakika ısıtılma	35
Şekil 3.24. Farklı çaplardaki cam kaplı amorf teller için uygulanan dış alanla empedansın değişimi.....	37
Şekil 3.25. Farklı çaplara sahip cam kaplı Co-bazlı amorf teller için frekansın bir fonksiyonu olarak manyetoempedansın yüzde değişimi.....	37
Şekil 3.26. Farklı frekans değerleri için stres yokluğunda amorf $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi	42
Şekil 3.27. Farklı frekans değerleri için 285MPa stres altında amorf $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde	

manyetoempedans değişimi.....	43
şekil 3.28. Farklı boyuna stresler için amorf $Fe_{4.9}Co_{71.8}Nb_{0.8}Si_{7.5}B_{15}$ telin empedansının frekansla değişimi.	43
şekil 3.29. Amorf $Co_{68.1}Fe_{4.4}Si_{12.5}B_{15}$ telin farklı gerilme stres değerleri için empedansın frekans ile değişimi	44
şekil 3.30. Farklı gerilme stresleri ve a) 3.7 MHz, b) 7.3 MHz ve c) 10.9 MHz ac akım frekansları varlığında dc manyetik alan ile manyeto-empedansın yüzde değişimi	46
şekil 3.31. Farklı eksensel gerilme stresler altında frekans ile maksimum manyeto-empedans oranının yüzde değişimi.....	47
şekil 3.32. Isıl işlem görmemiş tel için farklı sürücü akım frekanslarda, uygulanan bükmenin bir fonksiyonu olarak bükme empedans değişimi	48
şekil 3.33. $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ amorf tel için GMI oranının bükme strese bağlılığı.....	49
şekil 3.34. $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ amorf tel için GMI oranının bükme strese bağlılığı....	49
şekil 3.35. $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.55}B_{15}$ amorf tel için GMI oranının bükme strese bağlılığı	49
şekil 3.36. Amorf şerit' in GMI etkiye bağlı olarak akım sensör tasarımı	52
şekil 3.37. Değişik ölçüm frekanslarında pozitif alan yönü içinde GMI sensörün akım hassasiyet karakteristiği.....	53
şekil 3.38. Çalışma frekansına karşı akım hassasiyeti.....	53
şekil 3.39. Sensör tasarımı	54
şekil 3.40. Dc akım değişimlerinin bir sonucu olarak voltaj değişimi..	55
şekil 3.41. GMI sensör	56
şekil 3.42. Her bir çıkış için manyetik indüksiyon voltaj değişimi	56
şekil 3.43. Manyetik alana karşı diferansiyel çıkış voltajı	57
şekil 3.44. (a) GMI colpitts osilatör genlik- modülasyon-demodülasyon tipi sensör modülü (b). Uygulanan dış alan için tel voltaj değişimi	58
şekil 3.45. ME colpitts osiatör tipi alan sensörü	59
şekil 3.46. Dış alan (H_{ex}) karakteristiğine karşı $\Delta E_f/E_{fo}$ değişimi	59
şekil 3.47 (a) GMI etkinin strese bağlılığına dayalı manyetik sensörün şematik gösterimi, (b) Sensörün kalibrasyon eğrisi.....	60
şekil 3.48. (a)Değişik parametrelerin veya sistemlerin oluşturduğu manyetik	

alan değerleri (b) Yaygın olarak kullanılan manyetik sensör teknolojilerin kıyaslanması	61
Şekil 3.49. Cadde üzerine kurulan bir mikro işlemci ve iki manyetoempedans sensör kullanılarak araba hassasiyet sistemi	63
Şekil 3.50. İki manyetoempedans sensör ve bir mikro işlemciden oluşan prototip disk sisteminin fotoğrafı	64
Şekil 3.51. GMI sensör kullanılarak manyetik hedef takip etme sistemi	64
Şekil 3.52. Dolma kalem tipi MI beyin tümör sensörü	65
Şekil 3.53. Parmak kontrollü puls sensörü	65
Şekil 4.1. Tüp fırın ve sistemin şematik gösterimi.....	67
Şekil 4.2. Tüp fırın sisteminde sıcaklık dağılımı.....	68
Şekil 4.3. Uygulanan alan ile tipik bir malzemenin manyetizasyon değişimi. ...	68
Şekil 4.4. (a) M-H ölçüm sistemi, (b) M-H ölçüm sisteminin fotoğrafı.....	70
Şekil 4.5. (a). ManyetoEmpedans ölçüm sistemi, (b) Manyetoempedans ölçüm sisteminin fotoğrafı.....	72
Şekil 4.6. Gerilme stres-empedans ölçüm sistemi.....	74
Şekil 4.7. Bükme stres-empedans ölçüm sistemi.....	75
Şekil 4.8. Numune titreşiminin optiksel dedektör sistemi.....	76
Şekil 4.9. Elastik katsayısı ölçüm sisteminin şeması.....	78
Şekil 5.1. Fe bazlı tel için manyetizasyonun kolay eksen ve iç stres dağılımı ...	81
Şekil 5.2. Isıl işlem görmemiş Fe-bazlı (pozitif magnetostriction) tel numunelerin manyetik domain yapıları	81
Şekil 5.3. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telinin M-H eğrisi.	82
Şekil 5.4. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin düşük alan değerlerinde M-H eğrileri	83
Şekil 5.5. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işleme tabi tutulmuş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin düşük alanda M-H eğrileri.....	84
Şekil 5.6. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin düşük alanda M-H eğrileri.....	84
Şekil 5.7. 460 °C de ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin coercivity değerlerinin ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.....	85
Şekil 5.8. 460 °C de ısıtılmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin coercivity değerlerinin ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.....	86

Şekil 5.9. 460 °C for 120 dakika ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin scanning elektron mikroskop (SEM) resmi.....	86
Şekil 5.10. Anizotropi (K) parametresinin hesaplanma metodu	87
Şekil 5.11. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin yüksek alan M-H eğrisi.....	89
Şekil 5.12. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin yüksek alanda M-H eğrileri.....	90
Şekil 5.13. Normalize edilmiş Young elastik katsayısının manyetik alanla değişimi.	93
Şekil 5.14. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de 20 saniye ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telinin elastik katsayısının manyetik alanla değişimi.....	96
Şekil 5.15. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telinin elastik katsayısının manyetik alanla değişimi....	96
Şekil 5.16. 460 °C de farklı sürelerde ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telinin elastik katsayısının manyetik alanla değişimi.....	97
Şekil 5.17. $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ teli için coercivity ve elastik katsayısının ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.....	97
Şekil 5.18. Tek bir domain' nin manyetizasyon yönelimi için koordinat sistemi.	99
Şekil 5.19. Farklı kolay eksen yönelimleri için enine alınganlığın manyetik alana bağlılığı.....	99
Şekil 5.20. Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde yarıçapa karşı toplam akım yoğunluğunun dağılımı.....	102
Şekil 5.21. Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	103
Şekil 5.22. Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alanla yüzde manyetodirenç değişimi.....	104
Şekil 5.23. Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alanla yüzde manyetoidüktans değişimi.....	104
Şekil 5.24. ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin frekansa karşı yüzde empedans, direnç ve indüktans değişimleri.....	105
Şekil 5.25. Isıl işlem görmemiş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telin farklı sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.....	106

Şekil 5.26. Isıl işlem görmemiş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telin farklı sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan alan ile yüzde manyetodirenç değişimleri....	106
Şekil 5.27. Isıl işlem görmemiş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telin farklı sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoindüktans değişimleri.....	107
Şekil 5.28. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 1 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	109
Şekil 5.29. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 5 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	110
Şekil 5.30. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 10 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	110
Şekil 5.31. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 30 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	111
Şekil 5.32. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 90 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	112
Şekil 5.33. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 195 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	112
Şekil 5.34. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 240 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	113
Şekil 5.35. 1MHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	114
Şekil 5.36. 5MHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	114
Şekil 5.37. 10MHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	115

Şekil 5.38. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ teller için 100kHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	116
Şekil 5.39. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ teller için 1MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	117
Şekil 5.40. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ teller için 5MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	117
Şekil 5.41. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ teller için 10MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyeto-empedans değişimi.....	118
Şekil 5.42. Isıl işlem zamanının bir fonksiyonu olarak Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ telin yüzde MI ve ΔE etki büyüklüklerin değişimi.....	119
Şekil 5.43. Isıl işlem zamanının bir fonksiyonu olarak Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ telin yüzde MI ve coercivity büyüklüklerin değişimi.....	119
Şekil 5.44. 5MHz sürücü akım frekans değerinde 460°C de 210 dakika ısıl işlem gören Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ telin etching'den önce ve sonra uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	120
Şekil 5.45. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ tellerin farklı sürücü akım değerleri için ısıl işlem süresi ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	121
Şekil 5.46. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ teller için ısıl işlem süresine bağlı olarak 1MHz sürücü akım frekans değerinde yüzde manyetoempedans ve coercivity değişimi.....	122
Şekil 5.47. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ tellerin frekans ile empedans değişimi.....	123
Şekil 5.48. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅ teller için frekansa karşı empedans değişimi.....	124
Şekil 5.49. 1MHz sürücü akım frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve akım altında ısıl işlem görmüş Fe ₇₁ Cr ₇ Si ₉ B ₁₃ tellerin uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	125

Şekil 5.50. 10MHz sürücü akım frekans değerinde ısıtılma işlem görmemiş ve farklı akım değerleri altında ısıtılma işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	125
Şekil 5.51. Değişik gerilme stres değerlerinde ısıtılma işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi	127
Şekil 5.52. Değişik gerilme stres değerlerinde 460 °C 10 dakika ısıtılma işlem uygulanmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	127
Şekil 5.53. Değişik gerilme stres değerlerinde 460 °C 195 dakika ısıtılma işlem uygulanmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	128
Şekil 5.54. Isıtılma işlem görmemiş ve ısıtılma işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin yüzde MI oranlarının strese bağlı olarak değişimi.....	129
Şekil 5.55. Isıtılma işlem görmemiş ve ısıtılma işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerde uygulanan strese bağlı olarak stres-empedans değişimi.....	129
Şekil 5.56. Isıtılma işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin değişik frekanslardaki bükme strese bağlı olarak $(\Delta Z/Z)_{\xi}(\%)$ değişimleri.....	130
Şekil 5.57. Isıtılma işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin değişik bükme streslerdeki 1MHz sürücü frekansındaki $(\Delta Z/Z)_{H}(\%)$ eğrileri.....	131
Şekil 5.58. 500 mA lik akımla 15 dakika ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin değişik frekanslardaki $(\Delta Z/Z)_{\xi}(\%)$ eğrileri.....	133
Şekil 5.59. Değişik K değerleri için enine alınganlık değerlerinin bükme stresle değişimi. Küçük grafik değişik kolay eksen yönelimleri için enine alınganlık değerlerinin bükme stresle değişimini göstermektedir.	133
Şekil 5.60. Değişik gerilme stres değerlerinde ısıtılma işlem görmemiş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi	135
Şekil 5.61. Değişik gerilme stres değerlerinde 460 °C 5 dakika ısıtılma işlem uygulanmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	135
Şekil 5.62. Değişik gerilme stres değerlerinde 460 °C 90 dakika ısıtılma işlem uygulanmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.....	136
Şekil 5.63. Isıtılma işlem görmemiş ve ısıtılma işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin	

	yüzde MI oranlarının strese bağlı olarak değişimi.....	136
Şekil 6.1.	Co bazlı tel için manyetizasyonun kolay eksen ve iç stres dağılımı ..	138
Şekil 6.2.	Isıl işlem görmemiş Co-bazlı (negatif magnetostriction) tel numunelerin manyetik domain yapıları	138
Şekil 6.3.	Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin düşük alan bölgesinde M-H eğrileri.....	140
Şekil 6.4.	Farklı uzunluklardaki ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin düşük alan değerlerinde M-H eğrileri.....	141
Şekil 6.5.	460 °C de ısıl işlem görmüş $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin coercivity değerlerinin ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.....	142
Şekil 6.6.	Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılmış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin M-H eğrileri.....	142
Şekil 6.7.	460 °C de ısıtılmış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel için coercivity değerlerinin ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.....	143
Şekil 6.8.	Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin yüksek alan değerlerinde M-H eğrileri.....	144
Şekil 6.9.	Farklı uzunluklardaki ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyeto-empedans değişimleri.....	145
Şekil 6.10.	100kHz sürücü akım frekans değeri için ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi.....	146
Şekil 6.11.	1MHz sürücü akım frekans değeri için ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi.	146
Şekil 6.12.	5MHz sürücü akım frekans değeri için ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi.	147
Şekil 6.13.	10MHz sürücü akım frekans değeri için ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi.	147
Şekil 6.14.	Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi.....	148

Şekil 6.15. Farklı sürücü akım frekans değerleri için ısıtıl işlem görmemiş $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	149
Şekil 6.16. Isıtıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde 1 MHz frekans değeri için uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.....	150
Şekil 6.17. Isıtıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde 1 MHz frekans değeri için düşük alan bölgesinde empedans değişimleri.	151
Şekil 6.18. Isıtıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde 10 MHz frekans değeri için uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.....	152
Şekil 6.19. Farklı sürücü akım frekans değerleri için ısıtıl işlem süresine bağlı olarak $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel için yüzde manyetoempedans değişimi.....	154
Şekil 6.20. $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel için ısıtıl işlem süresine bağlı olarak 1 MHz frekans değerinde elde edilen yüzde manyetoempedans ve coercivity değişimleri.....	155
Şekil 6.21. Isıtıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtıl işlem görmüş $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller için sürücü akım frekansının bir fonksiyonu olarak manyetoempedans değişimi.....	156
Şekil 6.22. Farklı sürücü akım frekans değerleri için 460°C de 1 dakika ısıtıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin düşük alan bölgesinde manyetoempedans değişimi.....	157
Şekil 6.23. Farklı sürücü akım frekans değerleri için 460°C de 1 dakika ısıtıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.....	157
Şekil 6.24. 100 kHz frekans değerinde ısıtıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.....	158
Şekil 6.25. 1 MHz frekans değerinde ısıtıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.....	159
Şekil 6.26. 5MHz frekans değerinde ısıtıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı	

sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değışimleri.....	160
Şekil 6.27. 10 MHz frekans değerinde ısıtım işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değışimleri.....	161
Şekil 6.28. 10MHz frekans değerinde 460 °C de 30 dakika ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin uygulanan alan ile empedans değışimi.	162
Şekil 6.29. Farklı sürücü akım frekans değerleri için $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telde ısıtım işlemin fonksiyonu olarak yüzde manyetoempedans değışimi.....	163
Şekil 6.30. Isıtım işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin frekansın bir fonksiyonu olarak ile empedans değışimleri.....	164
Şekil 6.31. Isıtım işlem görmemiş ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıtım işleme tabii tutulan $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller için 100 kHz frekans değerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değışimleri.....	165
Şekil 6.32. 1 MHz frekans değerinde ısıtım işlem görmemiş ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin düşük alan bölgesinde empedans değışimleri	166
Şekil 6.33. 10 MHz frekans değerinde ısıtım işlem görmemiş ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller için düşük alan bölgesinde empedans değışimleri.....	167
Şekil 6.34. Farklı sürücü akım frekans değerleri için 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin ısıtım işlem süresine bağılı olarak yüzde manyetoempedans değışimleri.....	168
Şekil 6.35. 1MHz frekans değerinde 460°C de farklı sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller için ısıtım işlem süresinin fonksiyonu olarak diferansiyel empedans değışimi.....	169
Şekil 6.36. 1MHz frekans değerinde 500 mA de farklı sürelerde ısıtım işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller için ısıtım işlem süresinin fonksiyonu olarak diferansiyel empedans değışimi.....	169
Şekil 7.1. $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel kullanılarak tasarlanan manyetik alan	

	sensör devresi ve alanının fonksiyonu olarak devre çıkışları.....	171
Şekil 7.2.	$(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel kullanılarak tasarlanan manyetik alan sensör devresi ve alanının fonksiyonu olarak devre çıkışı.....	172
Şekil 7.3.	GMI sensör olarak ısıtılmamış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin devre şeması.....	173
Şekil 7.4.	Çatlak olmayan malzemede ısıtılmamış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin iki ucu arasındaki voltajın taranan uzunluğa göre değişimi.....	174
Şekil 7.5.	Yarım çatlak örneğinde ısıtılmamış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin iki ucu arasındaki voltajın taranan uzunluğa göre değişimi.....	174
Şekil 7.6.	Tam çatlak örneğinde ısıtılmamış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin iki ucu arasındaki voltajın taranan uzunluğa göre değişimi.....	175
Şekil 7.7.	Sağlam ve çatlaklı malzemelerde 5 MHz sürücü akım frekans değerinde GMI sensör çıkışı.....	175

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Isıl işlem görmemiş amorf tellerin manyetik özellikleri	10
Çizelge 3.1.	Farklı bileşimlere sahip amorf alaşımların magnetostriction değerleri	22
Çizelge 3.2.	Amorf ve farklı ısıl işlem süreçlerine tabi tutulan malzemelerdeki yüzde manyetoempedans değişimleri.	38
Çizelge 3.3.	Amorf ve farklı ısıl işlem süreçlerine tabi tutulan malzemelerdeki yüzde stres-empedans değişimleri.....	50
Çizelge 3.4.	MI ve SI sensörlerin uygulama alanları.....	62
Çizelge 4.1.	Çalışmada kullanılan numunelerin kompozisyonları.....	66
Çizelge 4.2.	Numune titreşim modlarının görelî olanları.....	78

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Tel ve şerit formuna sahip amorf ferromanyetik malzemelerin manyetik ve manyetoelastik özellikleri günümüze kadar kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. 1990 yıllarının başlarında yeni bir çalışma alanı olan manyetoempedans etki ile ilgili çalışmalar başlamıştır. Manyetoempedans ve stres-empedans etki ile ilgili yapılan çalışmaların başlıca nedeni yüksek empedans değişimi gösteren malzemelerin teknolojik olarak sensör uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmasıdır. Bu amaç göz önünde tutularak amorf ve ısıtılmış işlem görmüş tellerin manyetik özellikleri, manyetoempedans ve stres-empedans etki çalışılmıştır. Melt-quenching metodu ile üretilen amorf ferromanyetik FeCrSiB, FeSiB, CoSiB ve CoFeSiB teller Untika Şirketi (Japonya) tarafından sağlanmıştır.

Numunelerin yüksek empedans değişimi gösterebilmesi için düşük coercivity ve yüksek doyum manyetizasyonu gibi bazı soft özelliklere sahip olması gerekir. Hem amorf hem de ısıtılmış işlem görmüş numunelerin M-H ölçümleri alınarak manyetik özellikleri belirlenmiştir.

Amorf ve ısıtılmış işlem görmüş FeCrSiB, FeSiB, CoSiB, CoFeSiB ferromanyetik tellerde manyetik alanın ve stresin fonksiyonu olarak empedans değişimleri belirlenerek yüksek empedans değişimi gösteren malzemelerin sensör uygulamalarında kullanılması amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada manyetoempedans ve stres-empedans etkiyi daha iyi analiz edebilmek için bir teorik model geliştirilmiştir.

1.2. Tezin Ana Hatları

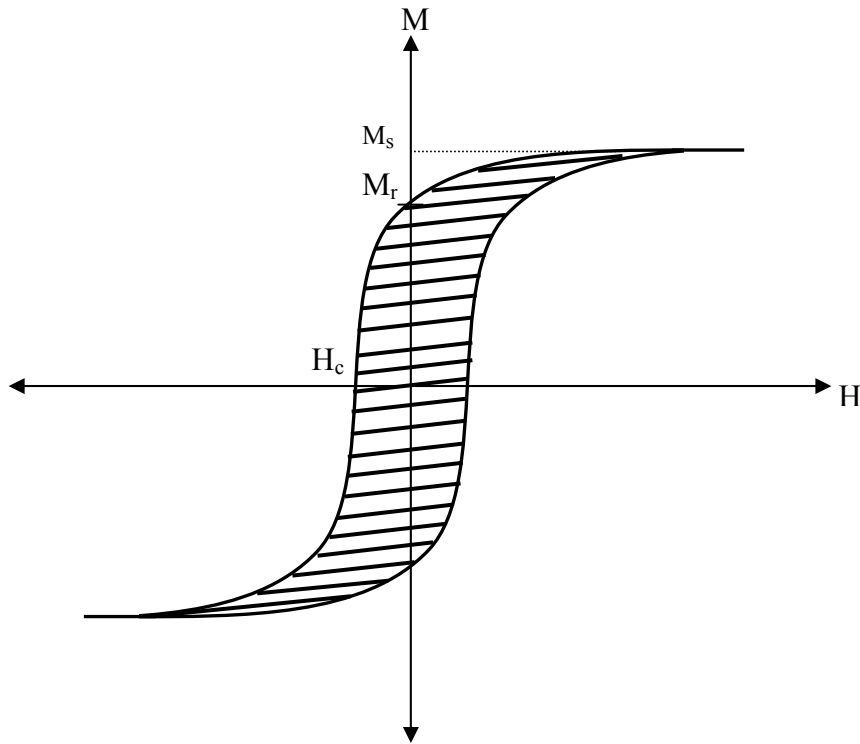
Bu çalışmada ilk olarak amorf alaşımlar, bu alaşımların üretimi ve manyetik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir (Bölüm 2). Üçüncü bölümde manyetoempedans etkinin tanımı ile birlikte amorf ve ısıtılmış işlem görmüş tel ve şeritlerde manyetoempedans, stres empedans etki ve manyetoempedans sensör olarak kullanılan numunelerin uygulama alanları ile ilgili çalışmalar hakkında geniş bir literatür bilgisi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, numunelerin hazırlanışı ve deneysel metotlar hakkında bilgi verilerek ölçümlerde kullanılan deneysel sistemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Beş ve altıncı bölümlerde sırasıyla amorf ve ısıtım işlem gören FeCrSiB, FeSiB, CoSiB ve CoFeSiB tellerin deneysel sonuçları tartışılmıştır. Ayrıca beşinci bölümde manyetoempedans sonuçlarının yorumlamasında kullanılacak teorik model verilmiştir. Bölüm 7’ de manyetik alanın ve stresin fonksiyonu olarak yüksek empedans değışimi gösteren malzemelerin sensör uygulamalarında kullanılması ile ilgili sonuçlar yer almaktadır. Son olarak 8.Bölümde, elde edilen bulguların yorumlanması ve ileride yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur.

1.3. Bazı Manyetik Parametreler

Bir manyetik malzemenin en önemli özelliği o malzemenin M-H eğrisi diye adlandırılan hysteresis eğrisidir. Tipik bir M-H eğrisi Şekil 1.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. M-H eğrisi.

Burada H_c coercive alanı, M_r remanant manyetizasyonu, M_s doyum manyetizasyonunu H_r remanant alanı göstermektedir. Doyumda tüm manyetik momentler uygulanan alan doğrultusunda yönelirler ve alandaki artış manyetizasyon değeriğini değıştirmmez. Manyetik alan malzemeyi doyumdan sıfıra doğru azalttığında geriye kalan

manyetizasyon, remanant manyetizasyon (M_r) ve bu değere karşılık gelen alan da remanant alan olarak ifade edilir.

Coercivity: Manyetizasyonu doyum değerinden sıfıra düşürmek için gerekli olan alan değeridir.

Anizotropi alanı (H_k): Malzemenin manyetizasyon değerinin doyuma ulaşması için gerekli olan alan değeridir.

Alınganlık: Bulk malzemelerde manyetik malzemelerin manyetizasyonu bu malzemelerin manyetik alana verdiği tepkiye bağlıdır. Manyetik malzemelerin çoğunda manyetizasyon uygulanan alan ile orantılıdır ve aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$M = \chi H \quad (1.1)$$

Burada χ alınganlıktır Ancak kullanımda manyetik malzemeler daima sabit bir alınganlığa sahip olmadığından M ile H' in değişim oranı (dM/dH) bazen χ olarak kullanılmıştır ve bu da diferansiyel alınganlık olarak adlandırılmıştır.

Geçirgenlik: Manyetik indüksiyon' un alana oranı olarak tarif edilir ve aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.2)$$

Verilen bir manyetik alan içinde malzemenin ne kadar manyetik indüksiyon oluşturacağını gösteren bir parametredir.

Magnetostriction (λ): Manyetik alan altında malzemelerin boyutlarındaki değişim olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.3)$$

2. AMORF FERROMANYETİK MALZEMELER

2.1. Giriş

Amorf alaşımlar uzun yıllardır cam yapı endüstrisinde kullanılmaktadır. Metalik amorf alaşımların hazırlanması ilk olarak 1946 yılında Brenner ve Riddell [1] tarafından amorf Ni-P filmler olarak rapor edilmiştir. 1960 yılında Duwez ve çalışma arkadaşları [2] sıvı alaşımların hızlı katılaştırılması ile elde edilen yarı kararlı alaşımlarda geniş araştırmalara başlamışlardır. İlk ferromanyetik amorf alaşımlar 1965 yılında Mader ve Nowik tarafından rapor edilmiş ve çekici soft manyetik özellikler 1966 yılında Tsuei ve Duwez [3] tarafından gözlenmiştir. Amorf alaşımların eşsiz özellikleri uzun erişimli atomik düzenlenişlerin eksikliğinden ileri gelmektedir. Amorf alaşımların bir kısmı manyeto-kristal anizotropi göstermediklerinden dolayı manyetik özellikler açısından oldukça soft davranış sergilemektedirler.

Bu bölümde amorf alaşımların manyetik özellikleri ve üretimi hakkında da bilgi verilmiştir.

2.2. Amorf Ferromanyetik Alaşımlar

Amorf metal alaşımlar uzun erişimli atomik düzenlenişe sahip olmayan metal alaşımlarıdır. Onlara cam ya da kristal halde olmayan alaşımlarda denir. Metalik camlar atomların uygun enerjiye sahip kristal örgülerine yerleşmelerine zaman kalmadan çok hızlı bir şekilde sıvı fazda soğutulması tekniğiyle üretilen alaşımların bir sınıfıdır. Bu amorf yapının bir sonucu olarak, bu alaşımlar benzersiz manyetik, mekanik, elektriksel ve korozyon davranışları gösterirler. Manyetik amorf alaşımlar iki veya üç teknolojik sınıfa ayrılabilir. Bular; transition metal-metalloid (TM-M) alaşımları, rare earth-transition metal (RE-TM) alaşımları ve geçiş metal-zirconium veya hafnium alaşımlarıdır [4]. TM-M alaşımları, genellikle %80 oranında 3d geçiş metalleri (Fe, Ni, Co gibi) ve %15-20 oranında metalloid (M) atomları (genellikle P, B, Si, C) içermektedir. Tipik alaşımlar amorf yapının kararlı ve cam yapının şekillenmesi için gerekli olan Si ve B metalloidleri sayesinde yüzde olarak $(Fe,Co,Ni)_{70-85}(Si,B)_{30-15}$ şeklindedir.

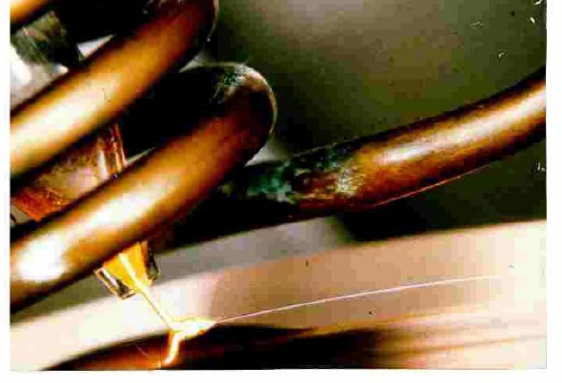
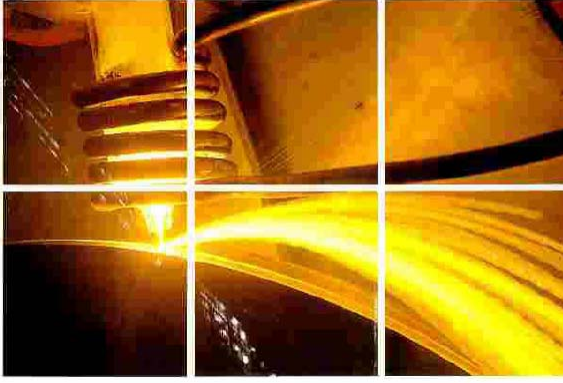
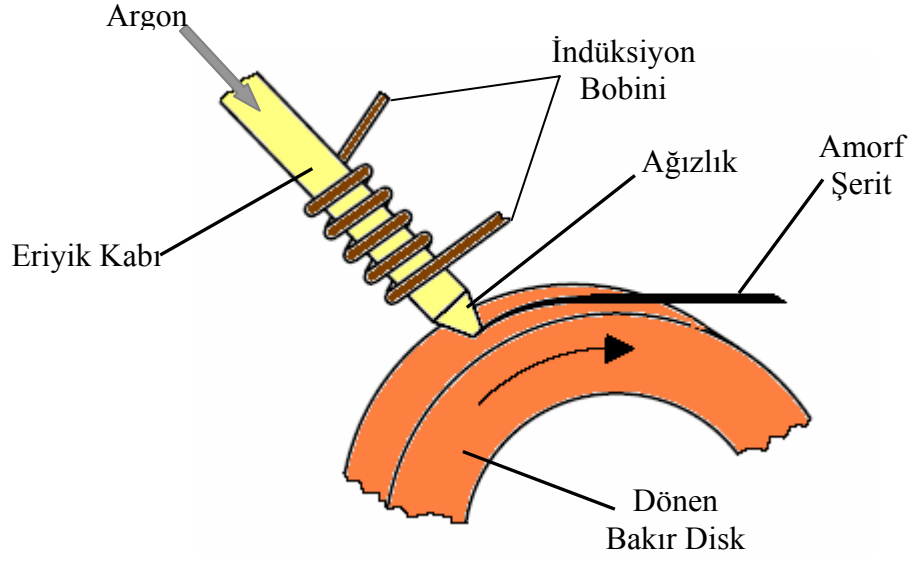
Soft manyetik uygulamalar için amorf malzemeler, tipik olarak yaklaşık 20 µm kalınlığında ve 1-100 mm genişliğinde ince şeritler şeklinde üretilmektedir.

2.2.1. Amorf Alaşımın Üretimi

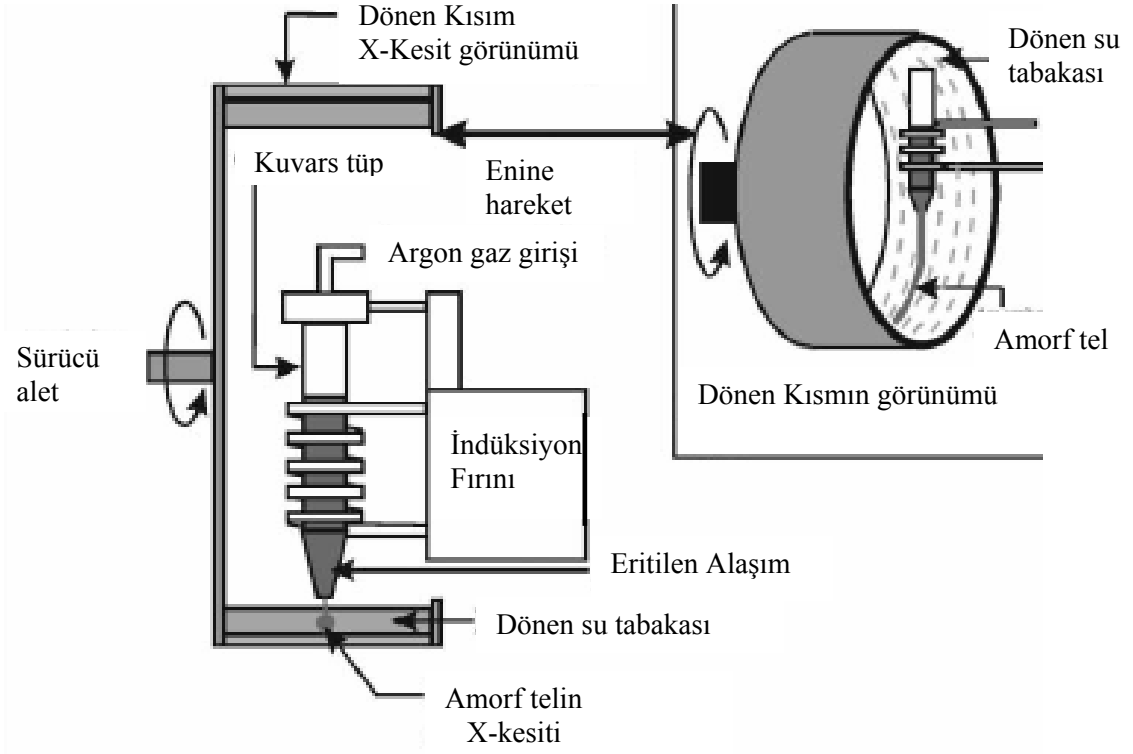
Eriyik halindeki alaşımların hızlı soğutulmasıyla üretilen amorf alaşımlar, çok ilginç ve karakteristik manyetik, mekaniksel ve elektriksel özellik göstermesinden dolayı birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Buna paralel olarak şerit, tel ve tabakalar halinde üretimi mümkün kılan çeşitli üretim teknikleri geliştirilmiştir. Amorf alaşımlar eriyik haldeki alaşımların hızlı soğutulmasıyla elde edilmektedir. Amorf malzemelerin üretiminde kristal faz oluşumundan sakınmak için soğutulma hızının yaklaşık 10^6 °C/sn oranında olması gerekmektedir. Üretimde yüksek soğutma oranına gereksinim duyulduğu için bu malzemeler yalnızca ince film, tel ve şerit şeklinde elde edilmektedir. Üretim tekniğinde daha yüksek soğutma oranları amorf malzemelerin içinde elastik gerilmeler ortaya çıkarır. Bu durum, amorf malzemelerin soft manyetik özelliklerinde belirleyici bir faktör olan manyeto-elastik anizotropiyi ortaya çıkarır. Amorf alaşımlar, ilk olarak melt-spinning metodu ile şeritler şeklinde üretilmiştir [5]. Bu teknikte belirli oranlarda malzeme istenilen alaşımı elde etmek üzere eriyik kabında bir araya getirilir (Şekil 2.1).

Daha sonra ısıtıcılar yardımı ile eriyik hale getirilen alaşım uygun bir ağızlık kullanılarak dönen bir termal kütle üzerine boşaltılır ve hızlı bir şekilde katılaştırılır. Üretim işlemi sırasında oksitlenmeyi önlemek için ısıtıcı işlem inert bir atmosfer altında veya vakum ortamında yapılmaktadır. Sonuçta şerit birkaç santimetre genişliğinde ve birkaç on mikrometre kalınlığındadır. Bugün kullanılmakta olan üretim teknikleri ile şeritler (~1 mm ile 100 mm) genişliğinde, (≤ 50 μm) kalınlığında ve sınırsız uzunlukta üretilmektedir. Amorf alaşımlar şerit şeklinde üretilebileceği gibi tel şeklinde de üretilmektedir [6]. Sistemde kullanılan ağızlığın şekli üretilmek istenen amorf malzemenin şeklini belirlemektedir.

Amorf tel üretiminde ise yaygın olarak kullanılan üretim metodu In-rotating water-queching metotudur (soğuk su dolu dönen bir disk içinde tel üretim metodu) ve bu metot Şekil 2.2 de gösterilmiştir [6]. Bu metot da istenilen alaşım altta ağızlığı bulunan bir kuvars eritme kabına konulur ve indüksiyon fırını kullanılarak eriyik hale getirilir. Hızlı soğutma için soğuk su içeren dönen silindirik bir kütle kullanılır. Silindirik çok yüksek hızla döndüğünde suyun ince dairesel bir tabakası, alaşımı iç tarafta şekillendirir. Eriyik formuna gelen alaşım argon gaz basıncının itici kuvveti yardımıyla kuvars tüpün ağızlığından dışarı doğru itilerek soğuk su içerisinde katılaştırılır.



Şekil 2.1. Melt-spining metodu [5].

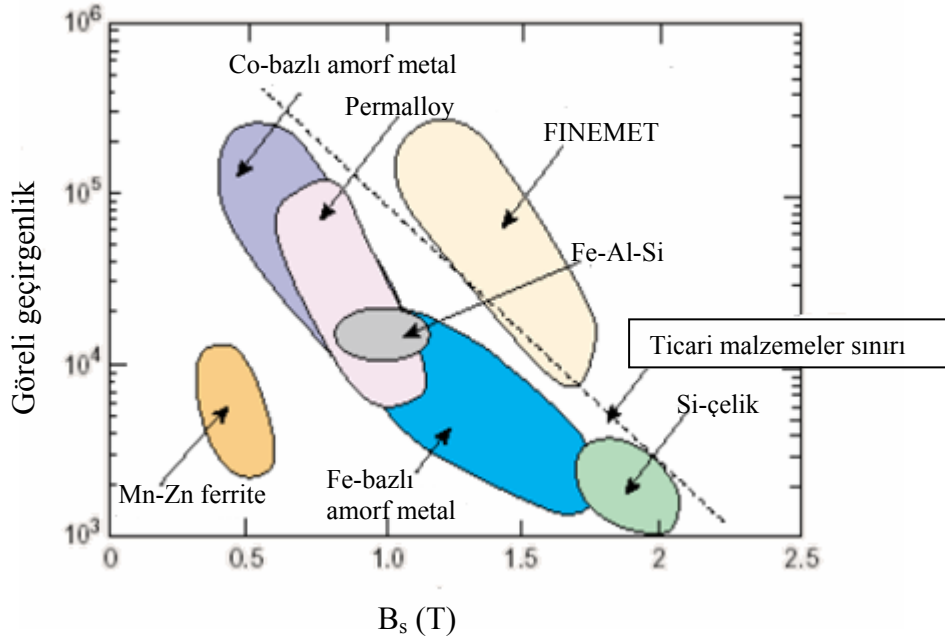


Şekil 2.2. Soğuk su dolu dönen bir disk içinde tel üretim metodu [6].

2.2.2. Amorf Alaşımların Manyetik Özellikleri

Amorf alaşımlar çok ilginç ve değişik manyetik özellikler göstermektedirler. Amorf alaşımların çoğu ferromanyektir ve bu alaşımlar benzer polikristal malzemeler ile karşılaştırıldığında mükemmel soft manyetik özellikler göstermektedirler. Amorf yapılarda uzun erişimli atomik düzenlenişin (longe range order) eksikliği soft manyetik özelliklerin temelini oluşturmaktadır. Bu alaşımların soft özellikler sergilemesinin diğer bir nedeni ise düşük coercivity ve yüksek geçirgenlik göstermesidir ve bu özelliklere bağlı olarak kolaylıkla manyetize olabilmeleridir [7]. Şekil 2.3, farklı kompozisyonlara sahip manyetik malzemelerin 1kHz değerinde göreceli geçirgenlik ve doyum manyetizasyon değerlerini göstermektedir [8]. Amorf malzemeler arasında Co-bazlı alaşımlar hemen hemen sıfır magnetostriction değerine sahip olduğundan dolayı üstün soft manyetik özellikler (düşük coercivity ve yüksek manyetik geçirgenlik) göstermektedir, ancak düşük doyum manyetizasyonuna sahiptirler. Co-bazlı alaşımlarla kıyasla düşük geçirgenliğe sahip olan Fe-bazlı amorf alaşımlar, yüksek doyum

manyetizasyonu sergilemektedir. Sıcaklık gibi uygulanan dış parametrelerle Fe-bazlı alaşımların diğer alaşımlara oranla soft özelliklerin daha da artırılması sağlanabilir. Bundan dolayı bu alaşımlar diğer alaşımlara kıyasla farklı teknolojik uygulamalar için en uygun olanıdır (Şekil 2.3).

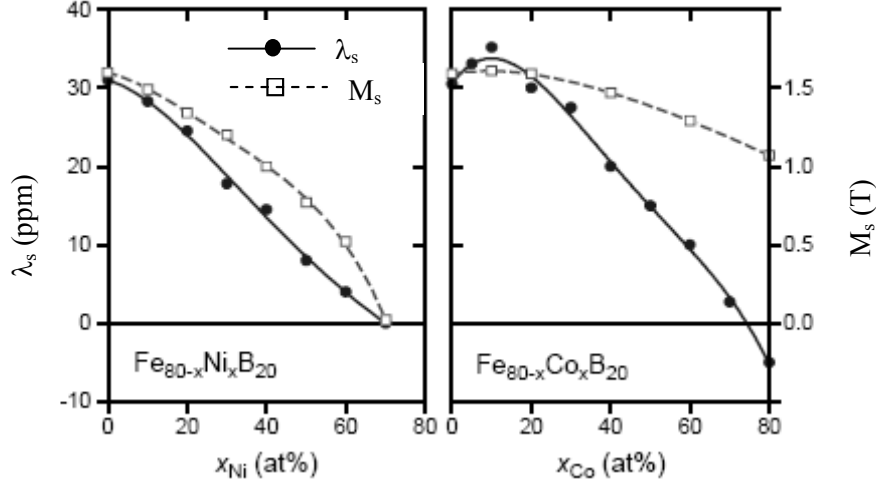


Şekil 2.3. Finemet, nanoperm ve diğer malzemelerin 1kHz değerinde doyum manyetizasyonu ve göreli geçirgenlik değerleri [8].

Amorf alaşımların temel parametreleri olarak; doyum manyetizasyonu (M_s), magnetostriction sabiti (λ_s), Curie sıcaklığı (T_c) ve kristalleşme sıcaklığı (T_x) verilebilir. Fe-Ni ve Fe-Co bazlı amorf alaşımların bazı özellikleri Şekil 2.4’de özetlenmiştir [9]. Doyum manyetizasyonu, demirce zengin alaşımlarda en yüksek değerine ulaşmaktadır ve yapıya Ni ve Co katkılanması ile bu değer azalış göstermektedir. Bu değer cam yapının oluşumu için gerekli olan Si ve B katkılanmasından dolayı genellikle kristal halindeki alaşımlarda daha düşüktür.

Demir oranının yüksek olduğu alaşımlarda doyum magnetostriction değeri (λ_s) tipik olarak yaklaşık 20-40 ppm lik pozitif bir değere sahipken, Co oranının yüksek olduğu alaşımlarda bu değer yaklaşık (-5)-(-3) ppm lik negatif değerlere sahiptir. Ni oranının artması ile doyum magnetostriction değerindeki azalış eşzamanlı olarak doyum manyetizasyonundaki azalış ile ilişkilidir (Şekil 2.4). Böylece, yüksek Ni oranına sahip alaşımların doyum magnetostriction değerinde gözle görülür azalış yalnız

yapı paramanyetik olduğu durumda ortaya çıkmaktadır. Hemen hemen sıfır magnetostriction değeri yaklaşık olarak yüzde 3-8 aralığında Fe ya da Mn içeren Co bazlı alaşımlarda görülmektedir [9].



Şekil 2.4. Amorf Fe-Ni ve Fe-Co bazlı alaşımlarda doyum manyetizasyonu ve doyum magnetostriction değerleri [9].

Böylece amorf malzemeler magnetostriction değerlerine göre Fe ve Co bazlı alaşımlar olmak üzere iki gruba ayrılabilirler. Fe bazlı amorf alaşımlar yüksek doyum manyetizasyonuna sahip işlenmemiş malzemelerdir fakat bunların doyum magnetostriction değerleri soft manyetik özellik sınırlarına göre büyüktür. Diğer yandan Co-bazlı alaşımlara düşük miktarlarda Fe ya da Mn eklenmesi ile bu malzemelerin magnetostriction değeri hemen hemen sıfır olur. Bu nedenle malzemeler, üstün soft manyetik özellikler sergilerler. Fakat bu malzemelerin doyum manyetizasyon değeri Fe-bazlı alaşımlara oranla çok düşüktür.

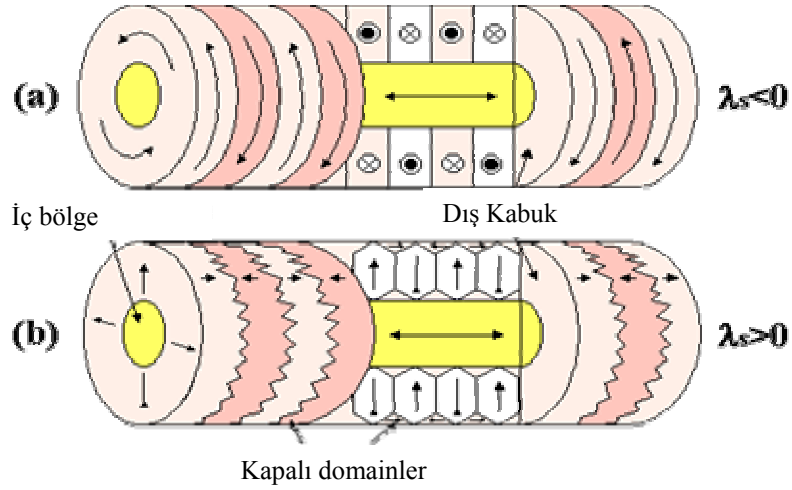
Isıl işlem görmemiş amorf tellerin manyetik özellikleri Çizelge 2.1 de özetlenmiştir [10]. Burada M_s doyum manyetizasyon, H_c , coercivity, H_s , doyum alanı, K_u , anizotropi ve λ_s , doyum magnetostriction değerlerini ifade etmektedir.

Çizelge 2.1. Isıl işlem görmemiş amorf tellerin manyetik özellikleri [10].

Alaşım	M_s (T)	H_c (A/m)	H_s (kA/m)	K_u (J/m ³)	λ_s ($\times 10^{-6}$)
$Fe_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	1.30	12.0	11.2	2200	25
$(Fe_{0.75}Co_{0.25})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	1.19	12.8	8.8	2300	20
$(Fe_{0.60}Co_{0.40})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	1.18	10.4	7.2	1700	16
$(Fe_{0.50}Co_{0.50})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	1.11	11.2	8.0	1650	15
$(Fe_{0.30}Co_{0.70})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	0.87	9.6	6.4	870	8
$(Fe_{0.20}Co_{0.80})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	0.79	8.0	3.6	580	5
$(Fe_{0.06}Co_{0.94})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	0.81		0.8	40	-0.1
$Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$	0.64	6.4	3.2	240	-3
$Fe_{78}Si_9 B_{13}$	1.45	10.4	16.8	3100	35
$Fe_{77}Cr_1 Si_9 B_{13}$	1.51	12.0	8.8	2000	32
$Fe_{75}Cr_3 Si_9 B_{13}$	1.28	10.8	5.6	1500	26
$Fe_{73}Cr_5 Si_9 B_{13}$	1.21	8.0	4.8	1200	18
$Fe_{71}Cr_7 Si_9 B_{13}$	1.03	6.4	5.2	980	12
$Fe_{69}Cr_9 Si_9 B_{13}$	0.78	5.6	4.4	720	8
$Fe_{68}Cr_{10} Si_9 B_{13}$	0.82	4.8	4.8	730	6
$Fe_{75}Si_{10}B_{15}$	1.43	9.6	17.6	3700	32
$(Fe_{0.98}Ni_{0.02})_{75}Si_{10}B_{15}$	1.42	12.0	17.6	4000	30
$(Fe_{0.96}Ni_{0.04})_{75}Si_{10}B_{15}$	1.33	11.2	17.6	2800	28
$(Fe_{0.92}Ni_{0.08})_{75}Si_{10}B_{15}$	1.16	8.8	13.6	3000	26
$(Fe_{0.88}Ni_{0.12})_{75}Si_{10}B_{15}$	1.17	9.6	14.4	2300	24

Amorf malzemelerde doğal manyetik anizotropi genellikle çok küçüktür ve manyetik anizotropi genelde dış etkenlerden dolayı ortaya çıkmaktadır. Manyetik anizotropi, malzemenin üretimi esnasında ortaya çıkan stres ya da manyetik alan altında ısıl işlem gibi yapısal kusurlardan dolayı ortaya çıkar. Farklı üretim teknikleri ile üretilmiş amorf tellerde magnetostriction' un (λ) işarete bağlılığı tel içinde ortaya çıkan iki farklı domain yapısı ile açıklanmaktadır. Pozitif ve negatif magnetostriction

değerlerine göre amorf tellerde manyetik domain yapıları Şekil 2.5 de gösterilmiştir [10,11].



Şekil 2.5. Isıl işlem görmemiş Fe-bazlı (pozitif magnetostriction) ve Co-bazlı (negatif magnetostriction) tel numunelerin manyetik domain yapıları [10,11].

Dış kabuklarda ortaya çıkan stres anizotropi, püskürtülen su içinde telin hızlı soğutulma süreci dikkate alınarak tahmin edilebilir. Üretim işlemi esnasında ilk olarak dıştaki kabuk daha sonra ise içteki kor katılaştırılır. Bu nedenle radyal yönde artakalan güçlü stresler mevcuttur ve bunlar içteki kor ve dıştaki kabuğun sınırlarına zıt yöndedirler. Kabuktaki domainlerin yönelimi malzemenin magnetostriction değerine bağlıdır. Pozitif magnetostriction' a sahip numunelerde kabuktaki domainler radyal olarak manyetize olurken, negatif magnetostriction' a sahip numunelerde domainler dairesel olarak yönelim gösterirler (Şekil 2.5).

3. AMORF VE ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ ALAŞIMLARDA MANYETOEMPEDANS VE STRES-EMPEDANS ETKİ

3.1. Giriş

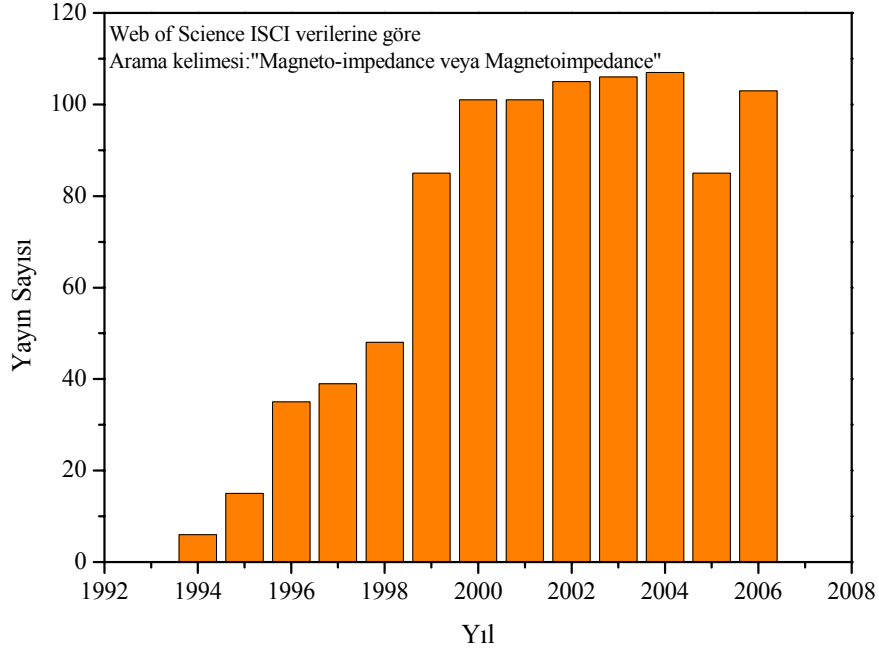
Amorf alaşımlar gösterdiği çok ilginç manyetik, mekaniksel ve elektriksel özelliklerinden dolayı birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Amorf ferromanyetik malzemelere uygulanan ısıtma işlem süreçleri bu malzemelerin manyetik özelliklerinde değişimlere yol açmaktadır. Bu bölümde ilk olarak manyetoempedans etki tanımlanmıştır. Daha sonra amorf ve ısıtma işlem gören alaşımlarda manyetoempedans (MI) ve stres-empedans (SI) etki ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında literatür bilgisi verilmiştir. Ayrıca alan ve stres gibi dış parametrelerle değişim gösteren malzemelerin uygulama alanlarında kullanımı ile ilgili çalışmalar yer almaktadır.

3.2. Kısa Tarihsel Gelişim

Manyetoempedans etki ile ilgili çalışmalar ilk olarak 90' lı yılların başlarında amorf ferromanyetik FeCoSiB tellerde büyük manyetoempedans etkiyi (GMI) rapor eden Panina ve arkadaşları ve Beach ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [12,13]. Daha sonra Machado ve arkadaşları [14] $Fe_{4.6}Co_{70.4}Si_{15}B_{15}$ ince filmlerde ve Beach ve arkadaşları [15] şeritlerde daha küçük bir etki gözlemlemişlerdir. Yapılan bu ilk çalışmalar manyetoempedans etki ile ilgili çalışmaların başlangıcını oluşturmuştur.

Özellikle manyetik alan ve stres gibi dış parametreler ile değişim gösteren malzemelerin uygulama alanlarında kullanılmasından dolayı bu konu ile ilgili çalışmalar cazip hale gelmiştir. Manyetoempedans etki ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu tel ve şerit şeklinde düzenlenen soft özelliklere sahip kobalt ve demir bazlı amorf alaşımlar üzerinde yapılmıştır.

Şekil 3.1 de, manyetoempedans etki ile ilgili 1994 yılından günümüze Web of Science 'dan alınan ISCI (International Science Citation Index) e giren uluslararası dergilerde yayınlanan yayınların sayısının yıllara göre dağılımı görülmektedir. Sonuç olarak grafikten de görüleceği üzere manyetoempedans etki gösteren malzemelerin gelişimine yönelik bilimsel çalışmalar 2004 yılına kadar artış göstererek devam etmiş ve 2005 yılında kısmen azalmıştır. 2006 yılında ise tekrar artışa geçmiştir.



Şekil 3.1. Web of Science ISCI (International Science Citation Index) verilerine göre manyetoempedans etki ile ilgili yayın sayısının yıllara göre dağılımı.

3.3. Manyetoempedans Etki

Manyetoempedans etki (MI), bir dc manyetik alan (H_{dc}) altında bir iletken (genellikle ferromanyetik) yüksek frekanslı ac akım geçirilmesi sonucu ortaya çıkan toplam empedans ($Z=R+iX$) değişimi olarak tanımlanır. Uygulanan mekanik streslerle empedans da ortaya çıkan değişimler ise stres-empedans (SI) etki olarak adlandırılır. Ayrıca uygulanan dış alana bağlı olarak malzemelerin empedansında ortaya çıkan çok yüksek değişimde büyük manyetoempedans (GMI) olarak ifade edilmiştir. Malzeme boyunca bir ac akım geçirildiğinde, manyetizasyon değişiminden dolayı şerit numuneler de enine bir manyetik alan ve tel numuneler de ise dairesel bir manyetik alan oluşur.

Manyetoempedans etki malzemenin magnetostriction değerine, domain yapısına, malzeme ortaya çıkan herhangi bir anizotropiye ve numune üzerinde geçen ac akım frekansı gibi faktörlere bağlıdır. Manyetoempedans etkiyi anlamak için manyetik malzemenin etkili geçirgenliğini ya da etkili alınganlığını göz önünde bulundurmak gereklidir. Özellikle numuneler üzerinden geçirilen ac akım frekansının düşük veya yüksek olması manyetoempedans eğrilerinde farklı özeklikler ortaya çıkarır. Bu nedenle manyetoempedans etkide frekans davranışlarını düşük ve yüksek frekanslı bölge olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

Çok düşük frekans bölgesinde sürücü akım sadece zamana bağlı dairesel bir manyetik alan oluşturur [16]. Böyle bir alan dairesel bir manyetik akıya neden olur ve numune içinde indüksiyon voltaja neden olarak boyuna bir elektrik alan ortaya çıkarır. Zamanla değişen bir akım ferromanyetik bir telden geçirildiğinde telin uçları arasında bir AC voltaj (U_{ac}) görünür. Toplam voltaj bir direnç voltajı (U_R) ve indüksiyon voltajının (U_L) kompleks toplamıdır.

$$U_{ac} = U_R + iU_L = R_{dc}I_{ac} + iwL_i I_{ac} \quad (3.1)$$

Burada R_{dc} , numunenin dc direncidir. Dış bir dc manyetik alan (H_0) uygulandığı zaman U_{ac} değerinde büyük bir değişime neden olan hem manyetizasyonun dairesel bileşeni hem de dairesel geçirgenliği değişir. Numunenin kompleks empedansı, U_{ac} ve I_{ac} sürücü akım arasındaki oran olarak tanımlanır ve eşitlik 3.2 ile verilir.

$$Z = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = R_{dc} + iwL_i \quad (3.2)$$

Çok düşük frekanslarda, empedansın alana bağıllığı sadece dairesel geçirgenlikle $\mu_0(I, H_{ext}$ ve f) orantılı olan indüksiyon kısmına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle çok düşük frekanslarda malzemenin empedansındaki değişimi yalnızca dairesel manyetizasyon süreci ile ortaya çıkan manyetik indüksiyon etkisi ile açıklanmıştır [16].

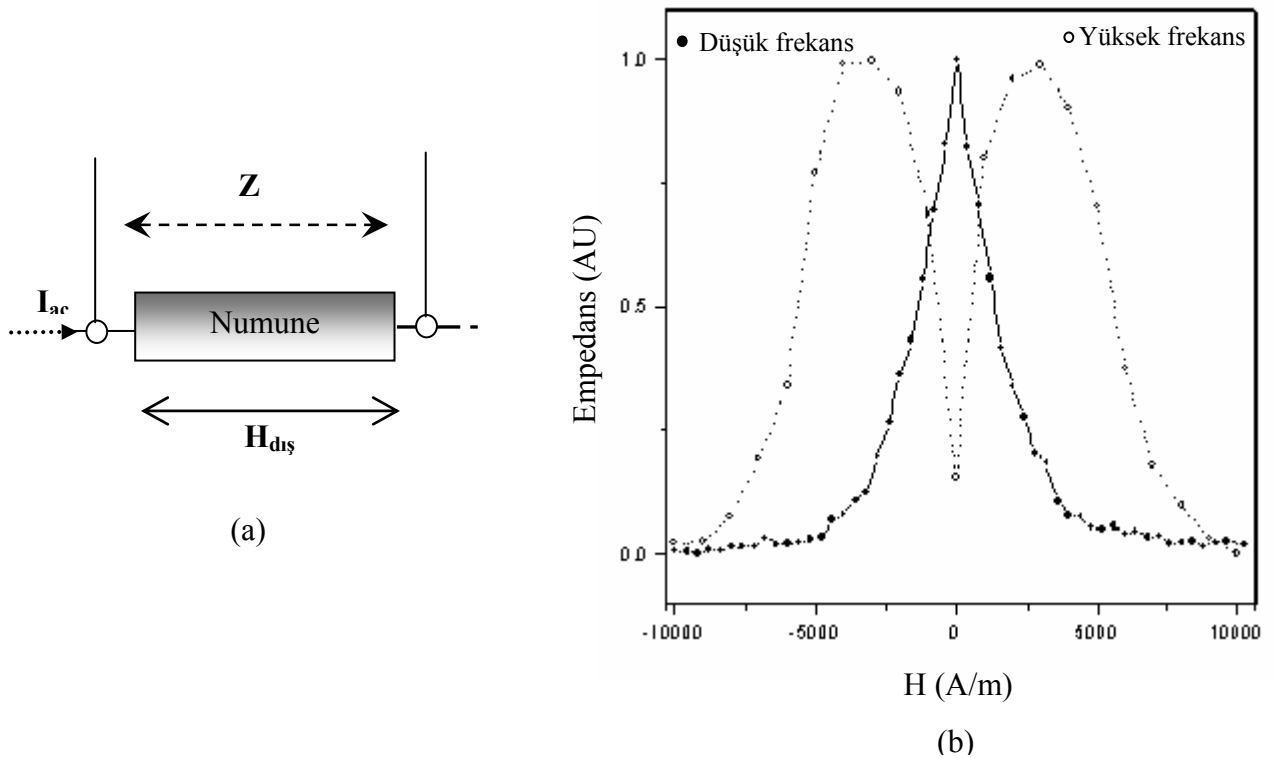
Orta seviyeli frekans aralığında (10kHz den birkaç yüz MHz frekans değerine) manyetik alan ile ortaya çıkan kompleks empedans değişimleri GMI etki olarak tanımlanmıştır. Bu etki yüksek etkin geçirgenliğe sahip manyetik iletkenlerde, klasik yüzey etkisi ve dış dc manyetik alanın büyüklüğü ile açıklanmıştır [16]. Bu nedenle, belirli bir numunenin GMI tepkisinin açıklanması onun geçirgenliğinin dış alana ve frekansa bağıllığının anlaşılmasına eşittir. Geçirgenlikte yüzey etkisinin klasikel tanımlanması skaler bir nicelik olarak düşünülebilir. Ancak gerçek ferromanyetik malzemelerde durum çok daha karışıktır. Genellikle hem domain duvar hareketi hem de manyetizasyon yönelimi, etkili enine geçirgenliğe katkı getirir [16].

$$\mu_t = \mu_{trot} + \mu_{tdw} \quad (3.3)$$

Burada, μ_{rot} ve μ_{tdw} etkili enine geçirgenliğe uygun gelen katılardır. Oldukça düşük frekanslarda (1MHz değerinden daha düşük) enine manyetizasyon sürecine her iki parametrenin de katkısı vardır. Daha yüksek frekanslarda, domain duvar hareketi eddy akımları tarafından kuvvetlice baskılanır ve bundan dolayı manyetizasyon yönelimi etkin olur.

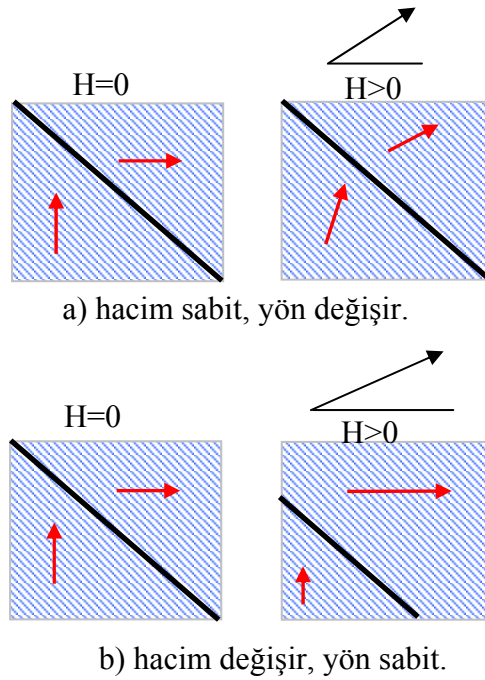
Bir manyetik malzeme, dış bir alana maruz kaldığında malzemenin empedansında keskin bir değişim meydana gelir (Şekil 3.2). Dış manyetik alan, genellikle Şekil 3.2 a' de gösterildiği gibi ac akım (I_{ac}) yönü boyunca uygulanabilir [17]. Şekil 3.2 b' da gösterilen iki manyetoempedans eğrisini, düşük ve yüksek frekans bölgesi olarak iki şekilde ele almak mümkündür [17]. Empedanstaki değişim, akım tarafından ortaya çıkan değişken manyetik alan ve malzemenin manyetizasyonu arasındaki etkileşmeden dolayı meydana gelmektedir. Bu değişimler ayrıca dışardan uygulanan manyetik alanın etkisi ile de ortaya çıkmaktadır.

Düşük frekanslarda ortaya çıkan empedans eğrisi için etkili alınganlık dış alan olmadığında bir maksimuma karşılık gelir ve alanın uygulanması ile azalır. Daha yüksek frekanslarda ortaya çıkan eğriler için bu durum geçerli değildir. Burada etkili alınganlık küçük bir alanın uygulanması ile maksimuma ulaşır.



Şekil 3.2. Düşük ve yüksek frekanslarda uygulanan alanla empedans değişimi [17].

Her bir durum için etkili alınganlık iki farklı manyetizasyon süreci ile açıklanabilir. Düşük frekans durumunda etkili alınganlık tersine çevrilebilir domain duvar hareketi ile açıklanırken, yüksek frekans bölgesinde etkili alınganlık domain yönelimi (manyetizasyon yönelimi) ile açıklanmaktadır. Dolayısıyla bir manyetik malzemenin manyetizasyon süreci, domain duvar hareketi ve manyetik momentlerin yönelimi ile belirlenir [17]. Manyetizasyon değişiminde, manyetik momentlerin dönmesi ve domain duvarların hareketi bir başka deyişle domain hacminin değişmesi olmak üzere iki süreç belirleyicidir. Her iki durum sırasıyla Şekil 3.3 (a) ve (b) de gösterilmiştir.



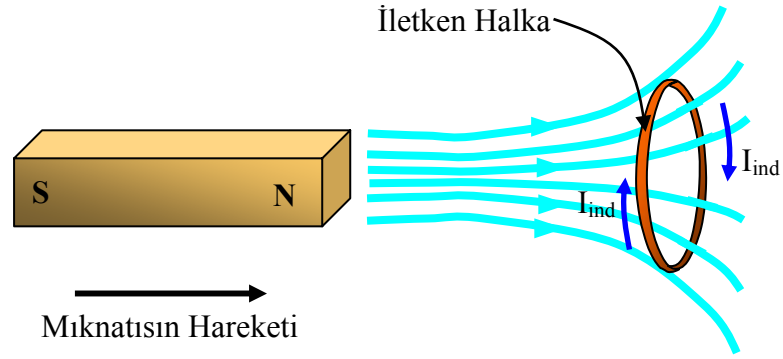
Şekil 3.3. Ferromanyetik bir malzemede ortaya çıkan iki farklı manyetizasyon süreci, (a) manyetik momentlerin dönmesi (b) domain duvarının hareketiyle.

Manyetoempedans etki yüzey etkisinin bir sonucu olarak yüksek ve düşük frekanslarda sınıflandırılabilir.

3.3.1 Yüzey etkisi

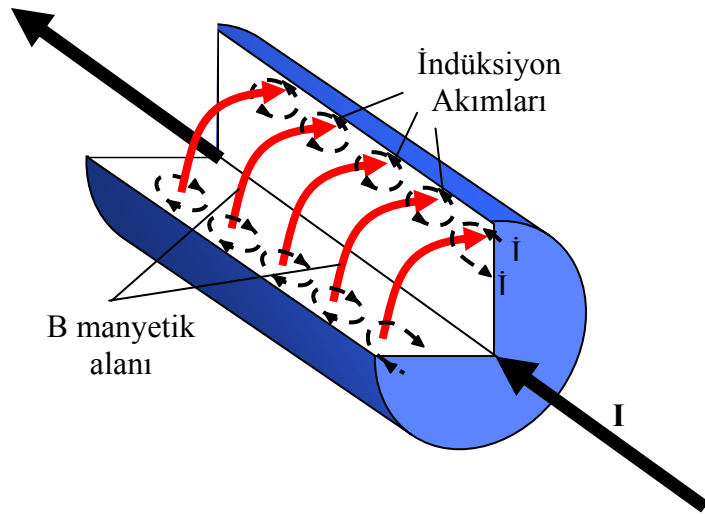
DC akım ya da düşük frekanslı ac akım taşıyan bir iletkende, iletkene radyal simetride oluşan bir dış alan meydana gelecektir. Oluşan bu simetrik alan, iletken içinde akımın iletken boyunca homojen dağılım göstermesini sağlar ve akım tüm iletken

boyunca yayılım gösterir. Akı homojen olduğu için yüzey etkisi ihmal edilir. Bu nedenle yüzey etkisi yüksek frekanslarda göz önüne alınır. Değişen manyetik alan metal halkada Faraday yasası gereğince bir indüksiyon akımı meydana getirir. Ortaya çıkan indüksiyon akımı Lenz yasasına göre kendini meydana getiren nedene karşı koyacak yöndedir. Böylece indüksiyon akımı kendini meydana getiren manyetik akıyı (ve manyetik alanı) azaltan bir manyetik alan oluşturur (Şekil 3.4).



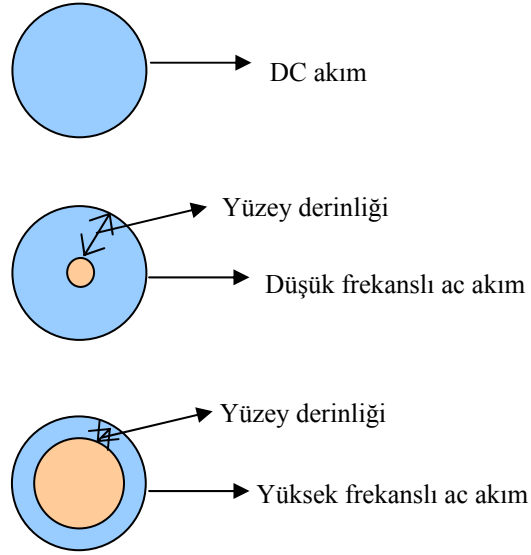
Şekil 3.4. Değişen bir manyetik alan ile ortaya çıkan indüksiyon akımı.

Yüksek frekanslarda iletken içerisinde akım hızlı bir şekilde yön değiştirir. Bu hızlı akım değişimi iletken içinde manyetik akı değişimlerine neden olur ve böylelikle iletken içinde bir indüksiyon akımı üretilir. Faraday kanuna göre meydana gelen bu indüksiyon akımı manyetik akı değişim ($d\phi/dt$) hızıdır. Ortaya çıkan indüksiyon akımı yüzeye yakın bölgelerde akıma katkı getirirken, iletken merkezindeki akıma karşı koyacak yöndedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Üzerinden bir I akımı geçen bir iletkende indüksiyon akımının dağılımı.

Sonuç olarak yüksek frekanslı ac akım iletkenin yüzeyinde geçerek iletkenin etkili kesit alanını azaltacak ve akım yoğunluğu artacaktır. Şekil 3.6, DC akım, düşük frekanslı ac akım ve yüksek frekanslı ac akım durumlarında akımın iletken boyunca yayılımını göstermektedir.



Şekil 3.6. DC akım, düşük frekanslı ac akım ve yüksek frekanslı ac akımın iletkenin kesit alanı boyunca dağılımı.

İletken içerisinde elektriksel iletkenliğin ne kadar uzaklıkta oluştuğunun bir ölçüsü yüzey derinliği olarak ifade edilir ve yüzey derinliği frekansın bir fonksiyonudur. Yüzey etki tesirinin ihmal edildiği oldukça düşük frekans değerlerinde, MI etki indüktandaki değişimden dolayı ortaya çıkar. Düşük frekans değerlerinde (<100 kHz) empedansın değişimi yalnızca manyeto-indüksiyon etkisine bağlıdır. Bu durumda değişken akım, numunenin uçları arasında bir potansiyel fark oluşturacaktır. Manyetizasyon değişimi ek bir voltaj katkısına yola açar (V_L). Ortaya çıkan bu ek voltaj manyeto-indüksiyon voltaj olarak adlandırılır. Bu durumda indüktans [18];

$$L = \frac{j(Z - R_{DC})}{w} \quad (3.4)$$

eşitliği ile verilir ve etkili dairesel geçirgenlik;

$$\mu_{\phi} = \frac{X}{\mu_0 l f} \quad (3.5)$$

eşitliği ile verilir. Burada l iletkenin uzunluğu ve f, frekans değerini göstermektedir.

Yüksek frekanslarda ise, MI etki başlıca yüzey etkisinden dolayı empedansın direnç bileşenindeki değişime bağlıdır. Bu akımın malzemenin yüzeyine yakın geçmesini sağlar ve böylece malzemenin etkili kesit alanı azalır ve bu durum iletkenin direnç bileşeninde artmaya neden olur.

Amorf tel için empedans eşitlik 3.6 ile verilmektedir [18].

$$Z = R + jX = \frac{1}{2} R_{DC} ka \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)} \approx R_{DC} \left(\frac{a}{2\delta_o} \right) \sqrt{\mu} \quad (3.6)$$

Burada, R ve X, sırasıyla empedansın gerçekte ve imajiner kısımlarını, J_1 , ilk düzenli Bessel fonksiyonlarını, R_{DC} , telin DC direncini, a, tel yarıçapını ve $k=(1+j)a/\delta$ değerini ifade etmektedir.

Sinüsel değişken akım taşıyan bir iletken için yüzey derinliğinin geçirgenliğe bağlı ifadesi (δ), Maxwell eşitliklerinden elde edilir,

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.7)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\mu_o \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H) \quad (3.9)$$

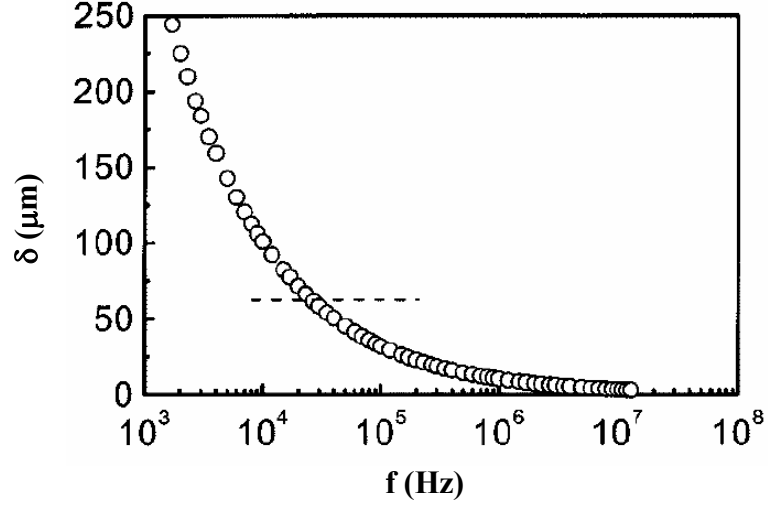
$$-\nabla^2 E = -\mu_o \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$E(t) = E_o e^{-i\omega t} \quad (3.11)$$

$$\delta = \left(\frac{1}{\mu_o \mu \sigma \pi f} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

Burada f, akımın frekansı, σ , malzemenin iletkenliği ve μ , geçirgenliktir.

Eşitlik 3.12 kullanılarak çapı 125 μm olan as-quenched amorf $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{B}_{15}\text{Si}_{12.5}$ tel için frekansın fonksiyonu olarak yüzey derinliğinin değişimi Şekil 3.7 de verilmiştir [19].



Şekil 3.7. Frekansın fonksiyonu olarak yüzey derinliğinin değişimi. Yatay çizgi tel yarıçapını göstermektedir [19].

3.4. Amorf ve Isıl İşlem Görmüş Alaşımlarda Manyetoempedans Etki

Manyetoempedans etki (MI), manyetik kaydediciler ve mikro manyetik sensör uygulamalarında kullanıldığından dolayı araştırmacıların ilgisini çeken ciddi bir araştırma konusu olmuştur. Tel, şerit ve ince film numunelerin empedansı uygulanan alan altında değişim göstermektedir. Uygulanan alan numunelerin domain yapılarında bir değişim meydana getirmektedir. Numunelerin manyetizasyon sürecinde etkili olan bu parametre numunenin başlangıçta sahip olduğu manyetik geçirgenliği değiştirmektedir.

Empedans manyetik geçirgenliğin karekökü ile orantılıdır ($Z \propto \sqrt{\mu}$). Dolayısıyla manyetik geçirgenlikte artış veya azalış empedans değerindeki artış veya azalışa karşılık gelecektir. Oldukça düşük frekanslar ve uygulanan küçük alanlar ile manyetoempedansın büyük değişimi, büyük manyetoempedans (GMI) etki gösteren malzemelerle ilgili çalışmaların başlangıcını oluşturmuştur. Çalışılan alaşımlarda büyük manyetoempedans etkiyi gözlemleyebilmek için öncelikle malzemelerin bazı genel şartları sağlaması gerekmektedir [20]. Bunlar;

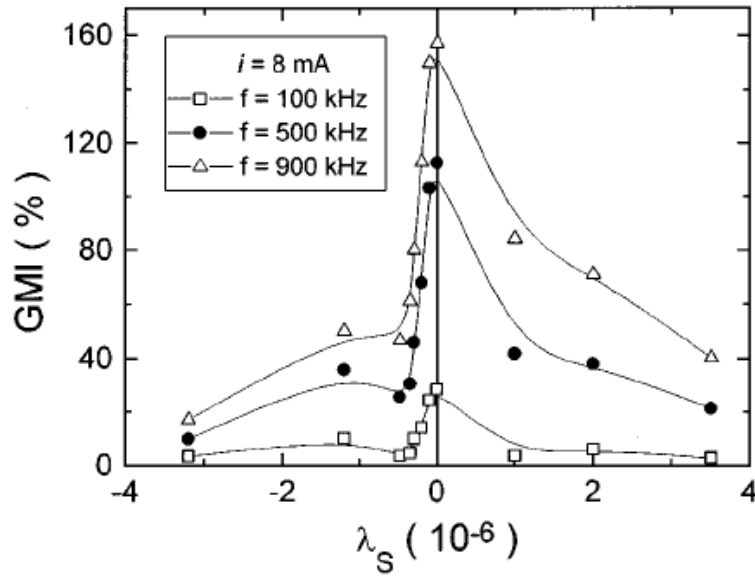
- 1- Malzeme manyetik açıdan soft özellik göstermelidir. Yani malzeme kolaylıkla manyetize olmalıdır.
- 2- Malzeme belirlenmiş bir anizotropi eksenine sahip olmalıdır. Yani numune manyetizasyonunun kolay eksen boyunca yönelmiş olması gerekmektedir. Ayrıca anizotropi alan değerinin de oldukça küçük olması gerekir.
- 3- Coercive alanın küçük ve histerisis eğrisinin ince ve dar olması gerekir.
- 4- AC akım ($I=I_0e^{j\omega t}$) kolay eksene (ya da anizotropi yönüne) dik olmalı ve ac akımdan dolayı ortaya çıkan H_{ac} alanı anizotropi alanına (H_k) oranla küçük olmalıdır.
- 5- Malzeme ac akım taşıdığı için küçük bir özdirence ($\leq 100\mu\Omega.cm$) sahip olmalıdır. Manyetik malzemelerin çoğu yüksek özdirence sahip olduğundan dolayı bu durum önemlidir.
- 6- Malzeme küçük bir doyum magnetostriction değerine sahip olmalıdır. Bunun anlamı, manyetik alanın uygulanması ile ortaya çıkabilecek mekaniksel etkilerin küçük olması gerektiğidir. Magnetostriction'dan dolayı mekaniksel stresler malzemelerin soft özelliklerini değiştirir. Anizotropi yönündeki değişimlerin manyetoempedans değerini düşürdüğü belirlenmiştir [20].

Manyetoempedans (MI) etki, doyum magnetostriction (λ_s) değerinden dolayı amorf malzemelerin bileşimine güçlü bir şekilde bağlıdır. Çok düşük ya da hemen hemen sıfır magnetostriction değerine karşılık gelen alaşımlar büyük manyetoempedans etki gösterirler. Kobalt bazlı alaşımlar negatif magnetostriction sergilerken, demir bazlı alaşımlar pozitif değerler gösterir. Demir yerine küçük miktar kobalt katkılanması ile negatif magnetostriction değeri daha düşük değere ulaşmaktadır. Çizelge 3.1, bazı kobalt bazlı alaşımların doyum magnetostriction değerlerini göstermektedir.

Bu alaşımlar için doyum magnetostriction değerlerine karşılık gelen büyük manyetoempedans (GMI) etki Şekil 3.8 de gösterilmiştir [20]. Şekil 3.8 de görüleceği gibi sıfır magnetostriction değerine sahip alaşımlar büyük MI etki göstermektedir. Manyetoempedans etki başlıca, dairesel ac alan ve enine bir dc manyetizasyon arasındaki etkileşmeye bağlıdır. Amorf tel ve şeritlere uygulanan ısıl işlemler numunelerin domain yapılarında değişimlere yol açarak MI etkide değişime neden olmaktadır. Ayrıca numune üzerinden ac ve dc akım geçirmek ya da hava veya inert gaz ortamında fırınlama işlemi uygulamak farklı MI etki ortaya çıkarmaktadır [20].

Çizelge 3.1. Farklı bileşimlere sahip amorf alaşımların magnetostriction değerleri [20].

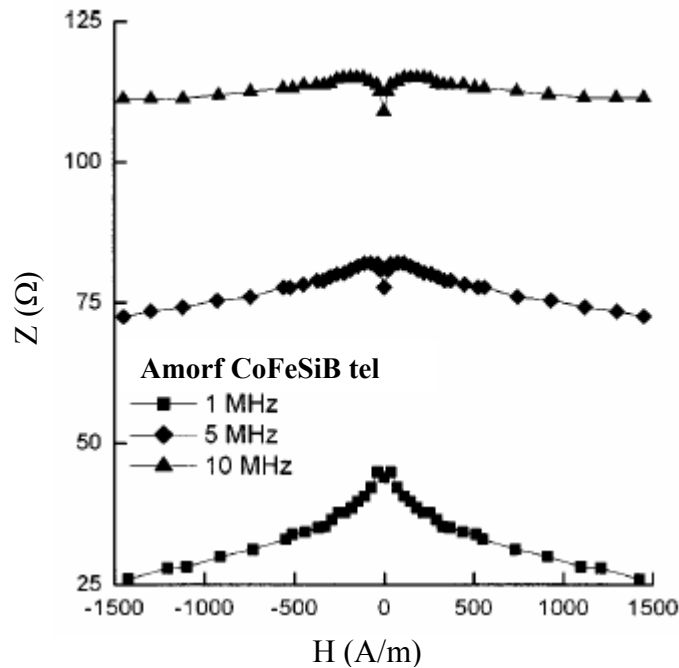
Alaşım	Magnetostriction değeri ($\lambda_s \times 10^{-6}$)
$\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	-3.2
$(\text{Co}_{0.99}\text{Fe}_{0.01})_{70}(\text{Si}_{0.45}\text{B}_{0.55})_{30}$	-1.20
$(\text{Co}_{0.960}\text{Fe}_{0.040})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	-0.48
$(\text{Co}_{0.955}\text{Fe}_{0.045})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	-0.35
$(\text{Co}_{0.953}\text{Fe}_{0.047})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	-0.30
$(\text{Co}_{0.952}\text{Fe}_{0.048})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	-0.28
$(\text{Co}_{0.951}\text{Fe}_{0.049})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	-0.20
$(\text{Co}_{0.950}\text{Fe}_{0.050})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	-0.16
$(\text{Co}_{0.947}\text{Fe}_{0.053})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	-0.10
$(\text{Co}_{0.943}\text{Fe}_{0.057})_{70}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$	~ 0
$(\text{Co}_{0.92}\text{Fe}_{0.08})_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	+1.00
$(\text{Co}_{0.92}\text{Fe}_{0.08})_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	+2.00
$(\text{Co}_{0.88}\text{Fe}_{0.12})_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	+3.50



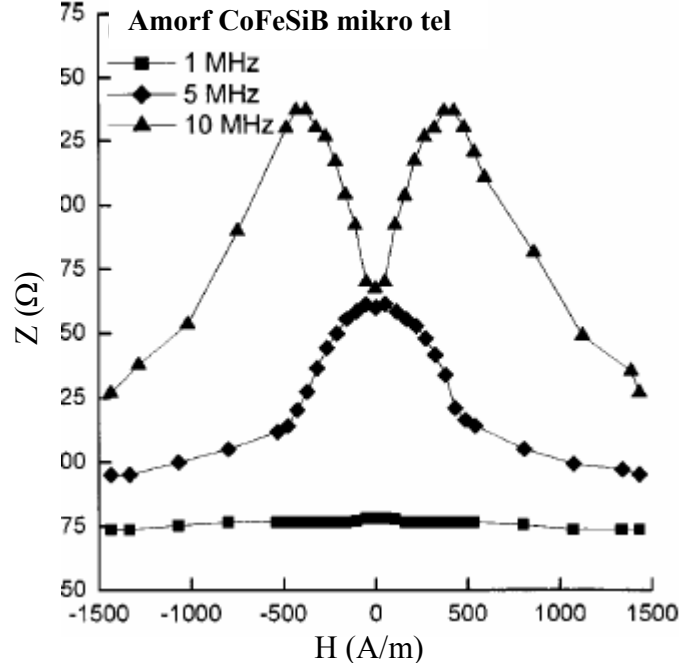
Şekil 3.8. Magnetostriction değerinin manyetoempedans oranı üzerine etkisi [20].

Amorf ve nanokristal tel ve mikro-tellerde manyetoempedans etki Chiarac ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [21]. Şekil 3.9 da $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin Şekil 3.10 ise $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf mikro telin uygulanan alanla empedans değişimini göstermektedir. Tel eksen boyunca DC bir manyetik alan uygulandığında, manyetik geçirgenliğin değişmesi sonucu yüzey derinliğinde bir değişim meydana gelmesi beklenir ve bunun bir sonucu olarak da empedans, uygulanan alan ile değişmektedir. Hemen hemen sıfır magnetostriction'a sahip olan $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf tel ve $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf mikro teller, manyetizasyonun kolay eksen olarak dairesel olduğu yüzey bölgesinde bamboo-like domain yapısına sahiptirler.

Bu malzemelerde demanyetizasyon faktörü oldukça küçük olduğu için bu domain yapısı, üretim esnasında ortaya çıkan iç stresler ve küçük negatif magnetostriction arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [21]. Böyle bir domain yapısı başlıca domain duvar hareketleri ile meydana gelen dairesel bir manyetizasyonun oluşmasını sağlar. Ancak bu manyetizasyon mekanizması yalnızca 1 MHz altındaki düşük frekans değerlerinde beklenirken, domain duvar hareketinin belirgin bir şekilde baskılandığı, yüksek frekanslarda ise dairesel manyetizasyon oluşumu çoğunlukla spin yönelimi ile ortaya çıkmaktadır [21].



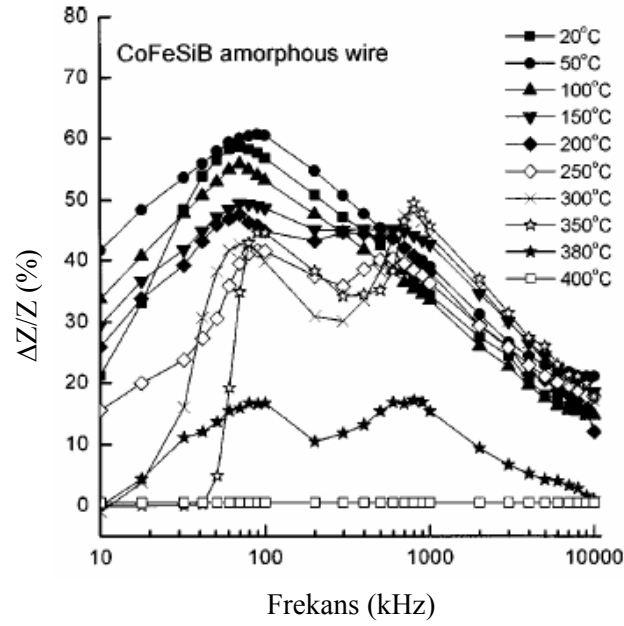
Şekil 3.9. Farklı frekanslarda $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf tel için empedansın uygulanan alana bağlılığı [21].



Şekil 3.10. Farklı frekanslarda $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf mikro tel için empedansın uygulanan alana bağlılığı [21].

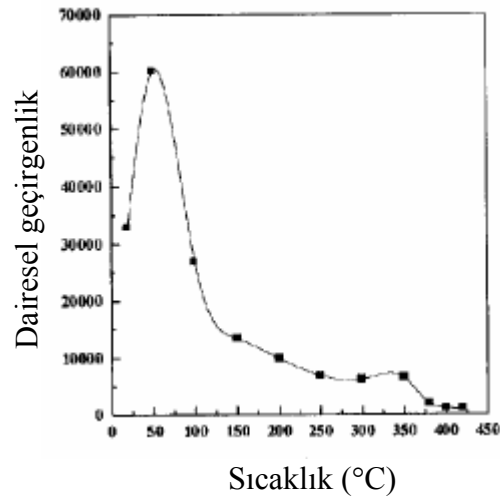
Şekil 3.11, $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin farklı ısı işleme değerlerinde frekansın fonksiyonu olarak yüzde empedans değişimini ($\Delta Z/Z$) göstermektedir [22]. 150 °C nin altındaki ısı işlemlerde $\Delta Z/Z$ nin frekansa bağlılığı yaklaşık 70 kHz civarında tek pik davranışları sergiler. $\Delta Z/Z$, ilk olarak sıcaklık ile artış göstererek 50 °C de % 61 ile maksimum bir değere ulaşır ve daha sonra azalış gösterir. Bu davranış, manyetik geçirgenliğin sıcaklığa bağlılığı ile ilgilidir. Böylece sıcaklıktaki küçük bir artış, hızlı katılaştırma sürecinde ortaya çıkan iç stresleri azaltır ve sonuç olarak numunenin özel domain yapısı bozunmaksızın soft özellikleri iyeliştirilmiş olur. 50 °C üzerindeki ısı işlemlerde ise iç stresler daha fazla azaltılır, fakat eş zamanlı olarak dairesel domain yapı bozunmaya uğrar [22]. Bu gerçek, domain duvar hareketi ile ortaya çıkan dairesel manyetizasyon sürecinin bir sonucu olarak dairesel geçirgenlik de azalışa yol açar ve buna bağlı olarak da manyetoempedansın yüzde değişimi azalır (Şekil 3.11). 150 °C üzerindeki sıcaklık değerleri için, $\Delta Z/Z'$ nin frekansa bağlılık eğrileri, ilki ~70 kHz ve ikincisi 500 kHz üzerinde olmak üzere iki pik davranışları sergiler. İlk pikin ac sürücü akım ile meydana gelen dairesel alana bağlı domain duvar

hareketi ile ortaya çıktığı ifade edilmiştir [22]. Bu durum dairesel manyetizasyon süreci ile ilişkili olarak dairesel geçirgenlikteki artışın bir sonucudur (Şekil 3.12).



Şekil 3.11. Farklı sıcaklık değerleri için $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf tellerde $\Delta Z/Z$ nin frekans ile değişimi [22].

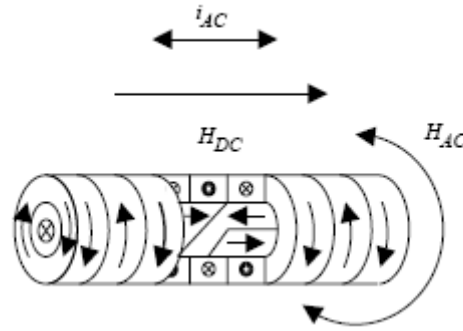
İkinci pik ise spin yönelimleri ile ortaya çıkmış dairesel manyetizasyon süreci ile ilgili olan dairesel geçirgenlikteki artışın bir sonucu olarak belirlenmiştir. Düşük frekanslarda $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin dairesel geçirgenliğinin sıcaklığa bağlılığı Şekil 3.12 de gösterilmiştir [22].



Şekil 3.12. $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin düşük frekanslarda dairesel geçirgenliğinin sıcaklığa bağlılığı [22].

Şekil 3.11 den görülebileceği gibi 50 °C ye kadar yapılan ısıl işlemlerde üretim esnasında ortaya çıkan dairesel manyetoelastik anizotropi azaldığı için ilk olarak dairesel geçirgenlik artarken bu değer üzerindeki yapılan ısıl işlemlerde iç stresler daha fazla rahatlatılır. Fakat eş zamanlı olarak numunenin domain yapısında bozulma meydana gelir. Bu nedenle dairesel geçirgenlikte bir azalış gözlenmiştir [22].

Manyetoempedans tepki; magnetostriction, iletkenin domain yapısı, iletkenin ortaya çıkan anizotropi, frekans ve iletken boyunca geçen akım büyüklüğü gibi birçok faktöre bağlıdır. Farklı frekanslarda düşük alan manyetoempedans ölçümleri amorf $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ alaşımlar için çalışılmıştır [23]. Yaklaşık sıfır magnetostriction değerine sahip amorf CoFeSiB telin domain yapısı Şekil 3.13 de verilmiştir. Bu yapı, tel eksenine boyunca manyetizasyon yöneliminin olduğu iç domainler ve dairesel yönde sıralanmış manyetizasyonlu domainlerden oluşan dış kabuktan oluşmaktadır [24].



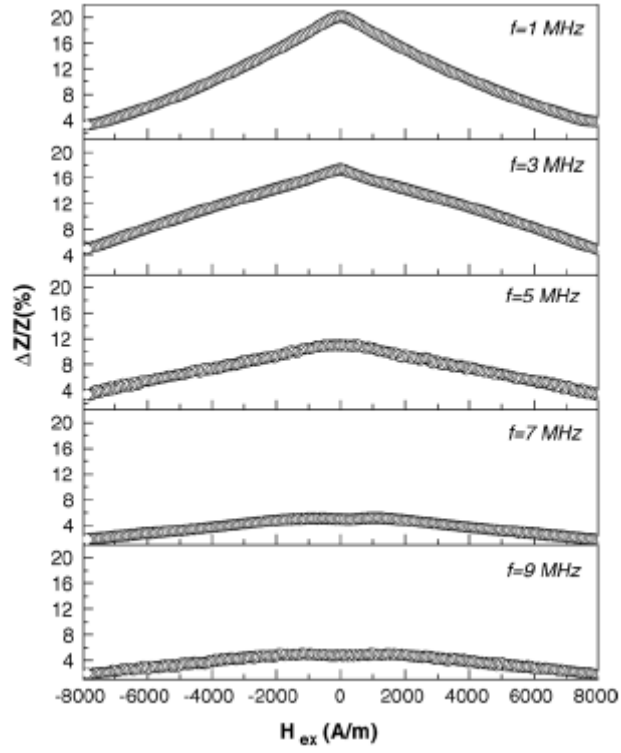
Şekil 3.13. Amorf CoFeSiB alaşımlarının domain yapısının şematik gösterimi [24].

Bu domain yapı tamamen soğutma süreci esnasında ortaya çıkan iç streslere göre dağılım gösteren manyetoelastik anizotropi ile belirlenir [25]. Tel boyunca geçen bir ac akım dairesel bir manyetik alan meydana getirir. Bu alan domain duvarlara (DW) bir basınç uygulayarak onları dairesel konumlanmış bölgelere ayırır. Empedansın sanal bileşeni (X) dairesel domain duvar geçirgenliğinin davranışlarını yansıtır. Geçirgenlik gösterimi kullanılarak, empedansın dc alana bağlılığı dairesel geçirgenliğin alana bağlılığı ile kıyaslanabilir. $H_{DC}=0$ durumunda ac dairesel alan manyetizasyon yönünün ilki sonraki ile dikey olmasından dolayı iç domain yapıya etkisi yoktur. Eksensel dc alanda bir artış iç bölgedeki domain duvarları ayırır ve böylece iç bölgenin çapı azalır. Sonuç olarak dairesel geçirgenlik artar. DC alanda daha fazla artış manyetizasyon yöneliminin eksensel yöne doğru olmasını sağlar ve böylece dairesel geçirgenliğin azaldığı belirlenmiştir [23].

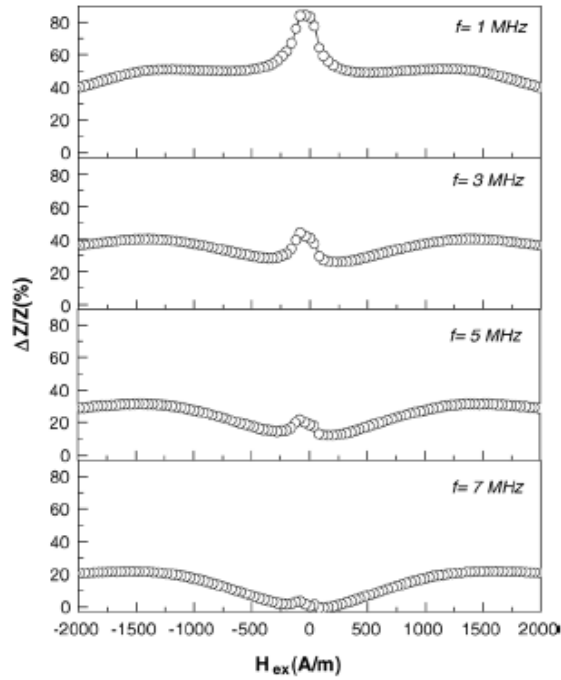
AC akım büyüklüğü artırıldığında dış kabuğun manyetize olan hacmi artar. Bu $H_{DC}=0$ da geçirgenlikteki artışa yol açar ve sonuç olarak reaktans da artar. Düşük frekanslarda, AC manyetizasyon süreçleri dış kabuktaki domain duvarının hareketi ile meydana gelir. Bu nedenle dairesel geçirgenliğin alana bağlılığında birkaç farklı özellik vardır. Bu bölgede domain duvarlar tersine çevrilebilir özellik taşır ve geçirgenlik sabittir [23].

Fe, Co ve Fe-Co-bazlı amorf alaşımlarda manyetoempedans S.K. Pal ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [26]. Bu çalışmada pozitif magnetostriction değerli $Fe_{77.5}Si_{12.5}B_{15}$, negatif magnetostrictionlu $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve yaklaşık sıfır magnetostrictionlu $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ amorf tellerin büyük manyetoempedans etki (GMI) özellikleri çalışılmıştır. Farklı frekanslarda $Fe_{77.5}Si_{12.5}B_{15}$ amorf telin GMI davranışlarının alana bağlılığı Şekil 3.14 de gösterilmiştir. As-cast numune $f=1$ MHz de %22 lik maksimum GMI oranı gösterir ve GMI oranı dc alanın artışı ile monotonic azalış göstermektedir. Maksimum GMI değeri dış alanın (H_{ex}) sıfır olduğu durumda belirlenmiştir.

Frekansın artırılması ile GMI oranı azalır ve aynı zamanda tek pik empedans değerini doyuma ulaştıran manyetik alanda görünür bir artışa yola açacak şekilde genişler. 5 MHz in üzerindeki frekans değerlerinde, dış dc manyetik alanın hem pozitif hem de negatif yarımları göz önünde bulundurulduğunda GMI grafiğinin şekli tek pik davranışlarından iki pikli yapıya değiştiğini göstermektedir. Frekans daha fazla artırıldığında pikler daha yüksek manyetik alanlara doğru kaymış ve GMI oranının azaldığı tespit edilmiştir [26]. Farklı frekanslarda $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ amorf telin GMI davranışlarının alana bağlılığı Şekil 3.15 de verilmektedir [26]. Tek pik davranışları gözlenen eğrilerde frekansın artması ile sıfır alanda gözlenen pikin küçüldüğü ve bundan dolayı da GMI oranının azaldığı belirlenmiştir. Maksimum GMI oranı $f=1$ MHz de %88 olarak bulunmuştur. Uygulanan dc alanın artması ile bu oran azalmaktadır [26].

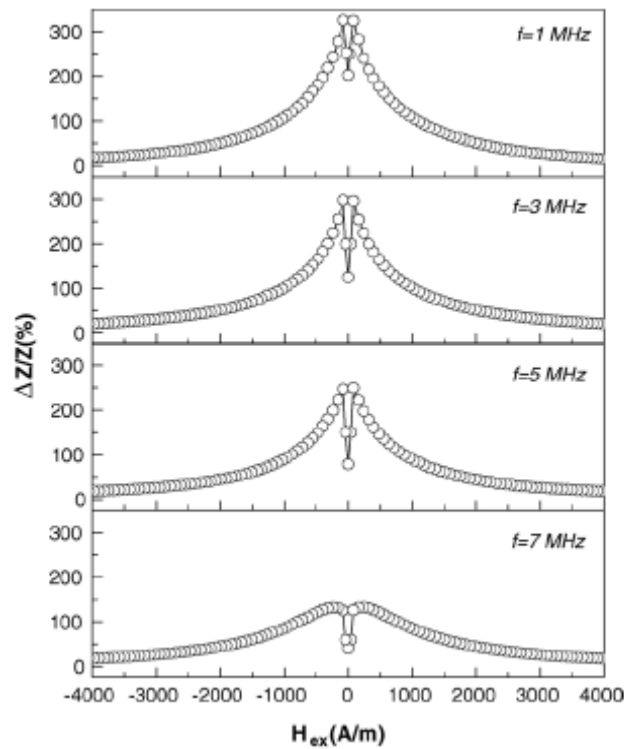


Şekil 3.14. Farklı frekanslarda $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının ($\% \Delta Z/Z$) alana bağlılığı [26].



Şekil 3.15. Farklı frekanslarda $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının ($\% \Delta Z/Z$) alana bağlılığı [26].

Farklı frekanslarda $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin GMI davranışlarının alana bağlılığı Şekil 3.16 da gösterilmiştir. GMI oran dc alanın uygulanması ile bir pik göstererek artar ve daha sonra alanın artışı ile azalır [26]. Maksimum GMI oran $f=1$ MHz de yaklaşık %330 olarak gözlenmiştir. Pikler numunenin dairesel anizotropi alanını da veren ± 16 A/m alan aralığında belirlenmiştir. GMI oran frekansın artması ile azalır ve 9 MHz de, GMI oranın $f=1$ MHz de %330 olan değerinden %35 değerine kadar azalış gösterdiği belirlenmiştir. Frekansın artırılması ile GMI pik değeri daha yüksek dış alanlara doğru kaymış ve bundan dolayı dairesel anizotropi alanının arttığı tespit edilmiştir [26].



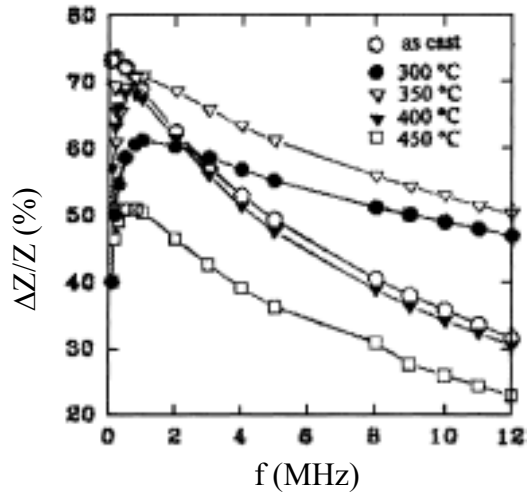
Şekil 3.16. Farklı frekanslarda $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağlılığı [26].

Negatif magnetostriction'lu $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ve $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller zor manyetik eksen olarak boyuna yönlü dairesel domain yapıya sahiptirler. Böyle tellere eksensel bir dc manyetik alan uygulandığında her bir domain içindeki manyetizasyon dairesel geçirgenliği artıracak şekilde eksene doğru yönelir ve böylece GMI oran artar. Dış alanda daha fazla artış dairesel manyetizasyon sürecinde manyetizasyon yöneliminin baskın olduğu bir duruma yol açarak dairesel geçirgenliğin azalmasına neden olur ve

bundan dolayı numunenin GMI oranı sabit ve çok düşük bir değere ulaşarak azalış gösterir.

Büyük negatif magnetostriction değerine (-2.6×10^{-6}) sahip $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel dairesel manyetizasyon gösterir ve bu alaşımın domainleri daima dairesel (bamboo domain) yapıdadır. $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ alaşımlarda Co yerine kısmen Fe katkılı olduğunda magnetostriction değeri düşer [27] ve bu değer $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ alaşımında olduğu gibi yaklaşık sıfır ($\sim 0.08 \times 10^{-6}$) değerini alır. Bu nedenle bu malzemenin manyeto-elastik enerjisinin çok küçük olduğu ve domainlerin herhangi bir tercihli yönde yönelim göstermedikleri belirlenmiştir. Böylece domain yöneliminin uygulanan düşük bir alan değerinde meydana geldiği ve bunun sonucunda büyük GMI oranının ortaya çıktığı tespit edilmiştir [26].

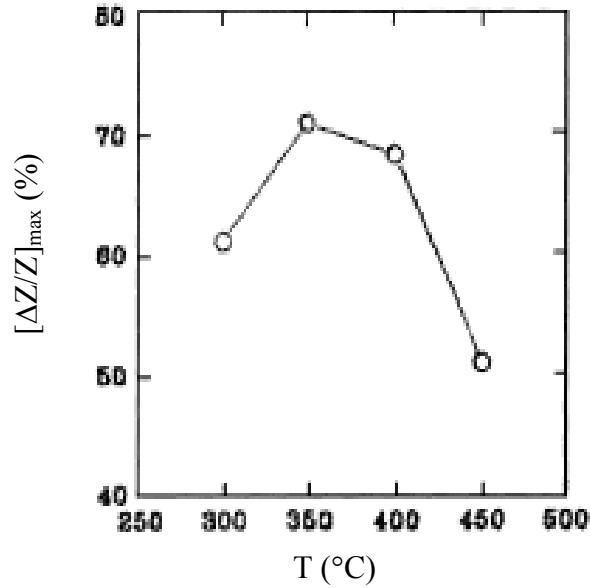
Farklı kompozisyona sahip $\text{Fe}_{4.5}\text{Co}_{67.5}\text{Nb}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{12}\text{B}_{15}$ amorf tellerde GMI etki Zhou ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [28]. Numuneler 300°C den 450°C aralığında 30 dakika ısıtılma işlemine tabii tutulmuştur. Güçlü yüzey etki durumunda toplam tel empedansı, sızma (penetration) derinliği sayesinde dairesel geçirgenlik ile yakından alakalıdır. Şekil 3.17, ısıtılma işlem görmemiş ve 300 , 350 , 400 ve 450°C sıcaklıklarda 30 dakika ısıtılan numuneler için yüzde manyetoempedans değişiminin frekansa bağlılığını göstermektedir.



Şekil 3.17. Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılan amorf tellerin GMI değerinin frekansa bağlılığı [28].

Şekil 3.20 den görüldüğü gibi ısı işlem görmemiş telin GMI değeri ısı işlem gören tellerin değerinden daha fazladır. Isıl işlem görmemiş ve ısıtılan teller için, $\Delta Z/Z'$ nin maksimum değere ulaştığı uygun frekans değerleri bulunmaktadır. Isıtılan tellerde GMI değerlerinin maksimum olduğu frekans (f_{max}), ısı işlem görmemiş telden daha yüksektir. Isıl işlem görmemiş tel için maksimum frekans, 0.3MHz ve 350 °C de ısıtılan tel için yaklaşık 1MHz' dir. Maksimum GMI değeri as-cast tel için %73 ve 350 °C de ısıtılan tel için %71 dir. 1MHz altında, ısı işlem görmemiş telin GMI değeri farklı sıcaklıklarda ısıtılan tellerdekenden daha büyük olmaktadır. 1MHz üzerinde, 350 °C de ısıtılan telin GMI değeri, incelenen tüm numuneler içinde en yüksek olanı olarak belirlenmiştir [28].

Şekil 3.18, ısıtılan tüm numuneler için ölçülen GMI değerinin ısı işlem sıcaklığına bağlılığını göstermektedir. GMI değerinin ısı işlem sıcaklığının artması ile bir maksimuma ulaştığı ve 350 °C den sonra düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum ısı işlem sıcaklığının çok yüksek olmaması gerektiğini ifade etmektedir. Yüksek ısı işlemlerin numunelerin kristalleşmesine neden olduğu ve GMI değerinin keskin bir şekilde azaldığını göstermektedir [28].

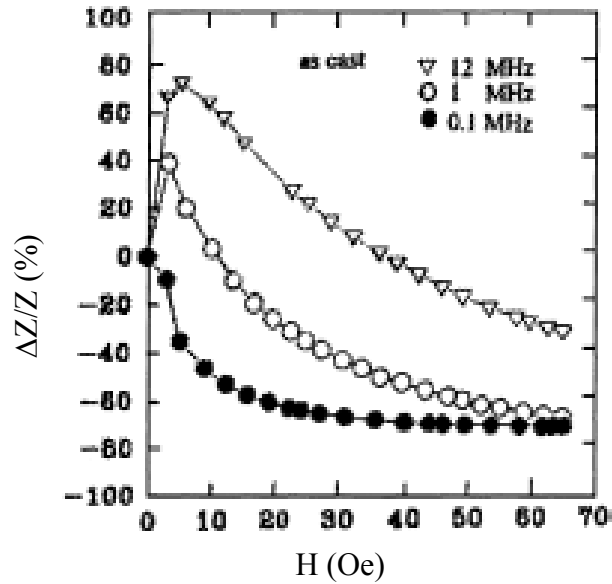


Şekil 3.18. Amorf tellerin GMI değerinin ısı işlem sıcaklığına bağlılığı [28].

Aynı numune için GMI değerinin dc alana bağlılığı Şekil 3.19 da verilmiştir. Şekil 3.19 den görülebileceği gibi 0.1MHz lik düşük frekans değerinde GMI değerinin uygulanan dc alanla azaldığı tespit edilmiştir. 1 ve 12 MHz gibi yüksek frekans bölgesinde GMI' ın dc alana bağlılığında bir pik durumu mevcuttur. Böyle bir pikin

dairesel anizotropi ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir [28]. Dairesel anizotropi alanı (H_K), pikin oluştuğu ve ac frekansla değiştiği pik alanına (H_P) karşılık gelir. Yüksek frekanslarda yüzey etkisinin olduğu ve toplam tel empedansının sızma derinliği sayesinde dairesel geçirgenliğe bağlı olduğu belirlenmiştir [28].

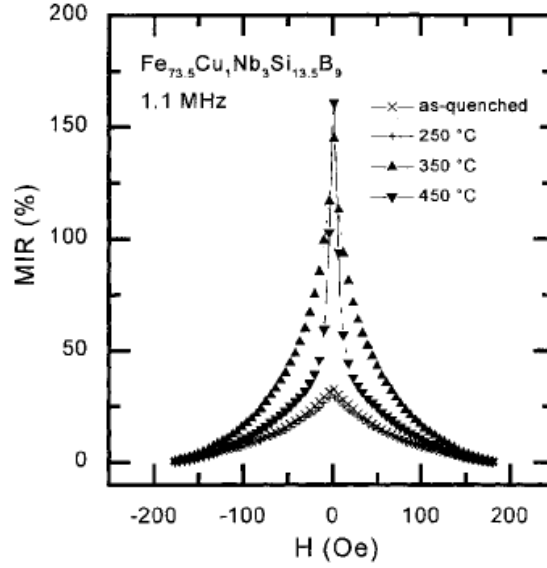
Domain duvar hareketi ve manyetizasyon yönelimi olmak üzere etkili geçirgenlik katkısının iki farklı türü vardır. Düşük frekanslarda, dış alan (H_{ex}) anizotropi alanından (H_K) daha düşük olduğunda etkili geçirgenlikte domain duvar hareket mekanizması etkin olur. Frekans artışı ile geçirgenlikte duvar hareketi giderek yavaşladığı için, $H_{ex} < H_K$ durumunda manyetizasyon yöneliminin önemli olduğu ortaya konmuştur [28].



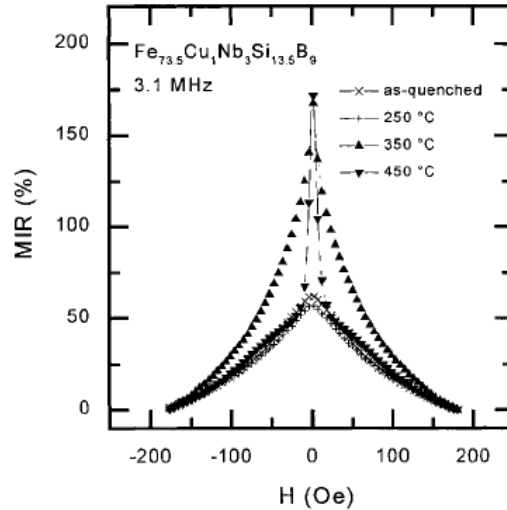
Şekil 3.19. Isıl işlem görmemiş amorf telin GMI değerinin uygulanan dc alana bağlılığı [28].

$Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ telin soft manyetik özellikleri, manyetoempedans oranı (MIR) ve dairesel geçirgenlik oranı (PR) parametreleri göz önünde tutularak Lee ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [29]. $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ tel 250, 300, 350, 450 ve 550 °C de bir saat ısıtılma maruz kalmıştır. MI ölçüm frekansı 100kHz -10MHz aralığında değişmektedir ve tüm ölçümler 10mA ac akım altında yapılmıştır. 450 °C de ısıtılan numunelerin MIR eğrilerinin, ölçülen tüm frekans aralığı içinde büyük MIR değerleri ile çok soft manyetik davranışlar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum ise Şekil 3.20 ve 3.21 de gösterildiği gibi anizotropi alanının etkin bir rol oynamadığını

işaret etmektedir. Maksimum MIR değerleri 450 °C de ısıtılan numunelerde %170 kadar kuvvetli bir şekilde artmaktadır ve bu da numunenin ısıl işleme oldukça soft hale geldiğini göstermektedir. 550 °C üzeri ısıl işlemin MIR ve PR değerlerinde ani bir azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Manyetoempdans sonuçları baz alınarak 350 °C ve 450 °C de ısıtılan numuneler kıyaslandığında nanokristalleşme gibi yapısal değişimlerin, 450 °C de ısıtılan numunelerde ortaya çıktığı gösterilmiştir [29].

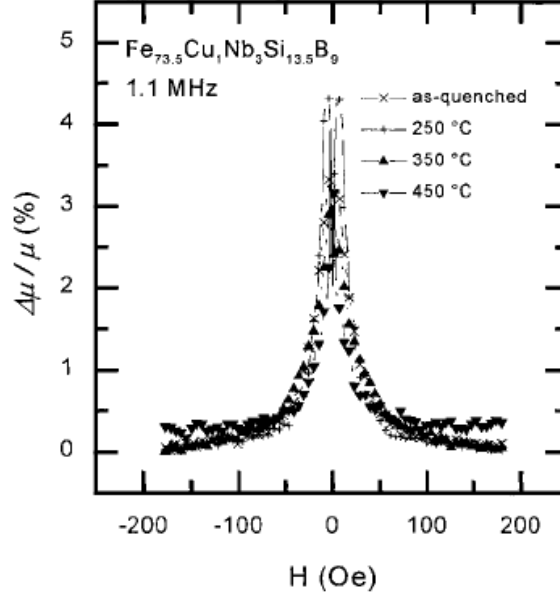


Şekil 3.20. Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılan nanokristal Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉ tel için 1.1MHz ölçüm frekansında yüzde MIR değerinin alana bağlılığı [29].



Şekil 3.21. Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılan nanokristal Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉ tel için 3.1MHz ölçüm frekansında yüzde MIR değerinin alana bağlılığı [29].

Şekil 3.22, 1.1MHz ölçüm frekans değerinde as-quenched, 250, 350 ve 450 °C de ısıtım işlem gören $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ teller için PR eğrilerinin dış alana bağıllığı göstermektedir. Manyetik softluk anizotropi ve magnetostriction değerlerinin azalması ile ilişkilidir.

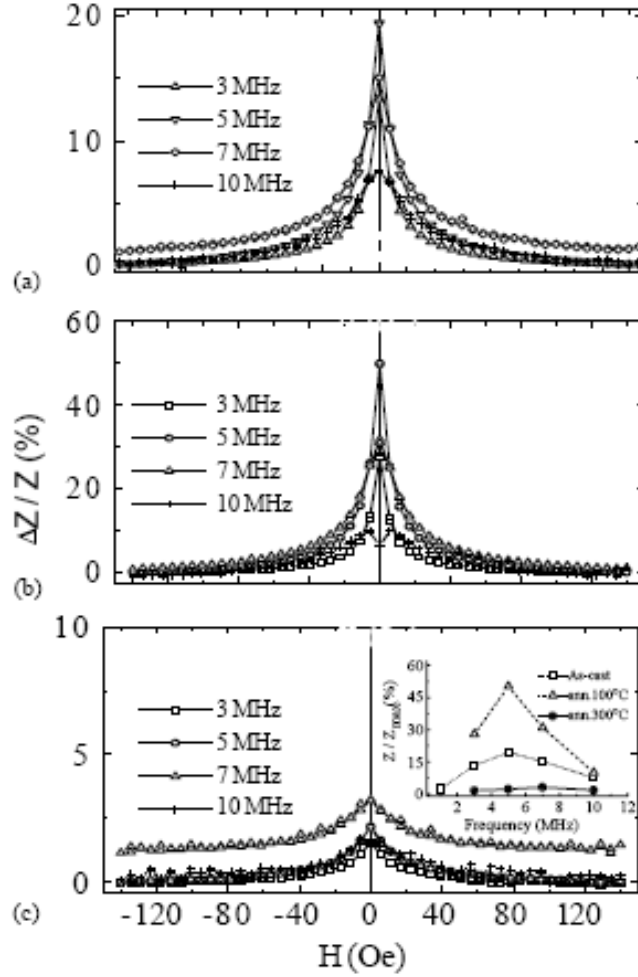


Şekil 3.22. Isıtım işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılan nanokristal $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ tel için 1.1MHz ölçüm frekansında PR değerinin dış alana bağıllığı [29].

450 °C de ısıtılan numunelerde PR eğrilerin keskinliği numunenin softluğunu göstermektedir. Büyük manyetoempedans etki yalnızca, neredeyse sıfır magnetostriction sabiti, yaklaşık sıfır coercivity ve oldukça yüksek geçirgenlikli soft manyetik malzemelerde gözlenebilir. Ayrıca PR eğrileri, yapısal değişimi işaret ettiği gibi manyetik softluğu da göstermektedir [29].

Düşük magnetostriction değerine sahip Co oranının yüksek olduğu melt-spun şeritlerde [30] ve amorf tellerde [31] yapılan çalışmalarda yüksek manyetoempedans gözlenebilmesi için, malzemelerin yüksek geçirgenliğe sahip olması ve ayrıca şeritler için enine teller için ise dairesel bir domanin yapının olması gerektiği ifade edilmiştir. Düşük magnetostriction değerine sahip bir benzer çalışma Kane ve arkadaşları [32] tarafından cam kaplanmış amorf $Co_{83.2}B_{3.3}Si_{5.9}Mn_{7.6}$ mikro tellerde yapılmıştır. Bu çalışmada manyetoempedans etki üzerine ısıtım işlem etkisi çalışılmıştır. Ölçümler ısıtım

işlem görmemiş ve 80, 100, 125, 150, 200 ve 300 °C de 30 dakikalık ısıt işlemler uygulanarak yapılmıştır. Manyetoempedans ölçümleri 1mA sabit akım ve 1-10MHz aralığındaki frekanslarda alınmıştır. Şekil 3.23 (a-c), ısıt işlem görmemiş, 100 °C ve 300 °C de 30 dakika ısıtılan numuneler için manyetoempedans oranının alana bağılılığını göstermektedir.



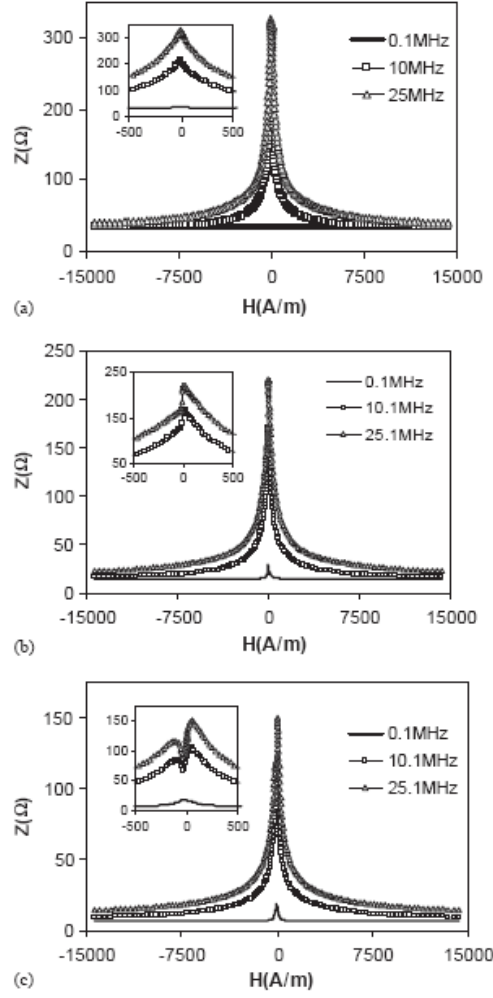
Şekil 3.23. Mikro tel numuneler için manyetoempedans oranının alana bağılılığı. (a) ısıt işlem görmemiş (b) 100 °C de 30 dakika ısıt işlem ve (c) 300 °C de 30 dakika ısıt işlem. İçte frekans ile $\Delta Z/Z$ (%) değişimi gösterilmiştir [32].

Isıt işlem görmemiş ve ısıtılan numunelerde maksimum manyetoempedans değerinin gözlemlendiği frekans değerinde eğrilerin tek pik davranışları gösterdiği tespit edilmiştir. Daha yüksek frekanslarda ise iki pik davranışları gözlemlenmiştir [32]. Mikro tellere uygulanan ısıt işlem, MI oranını büyük ölçüde etkilemiş ve maksimum MI oranı 100 °C de 30 dakika ısıtılan tel için %50 olarak bulunmuştur. Bu durum ısıt işlemden

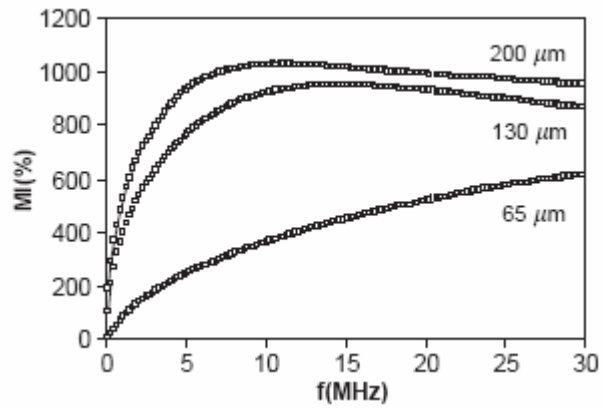
sonra dairesel domain düzenlenişi ile ortaya çıkan dairesel geçirgenliğin maksimum değeri ile ifade edilebilir. Isıl işlem görmemiş mikro tellerde ölçülen manyetoempedans oranı yaklaşık %20 daha düşüktür. Bu durum dairesel domain düzenlenişi ve dairesel geçirgenliğin düşük olması ile açıklanabilir. 125 °C ve 300 °C arasında 30 dakika ısıtılan mikro tellerde $(\Delta Z/Z)_{\max}$ değerinin %29 ve %3 aralığında azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 3.23 (c) için içindeki grafikte frekans ile $(\Delta Z/Z)_{\max}$ ' un değişimi gösterilmiştir. Frekans eğrilerinden 5MHz de bir maksimum gözlenmiş ve bu değer 300 °C de 30 dakika ısıtılan numune için 7MHz lik yüksek frekansa doğru kaydığı belirlenmiştir [32].

Manyetoempedans çalışmalarında kullanılan numunelerin (tel numuneler için) çapı da önemli rol oynamaktadır. Farklı çaplara sahip Co-bazlı amorf tellerde manyetoempedansın tel çapına bağlılığı Garcia ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [33]. Üç numune için 0.1, 10.1 ve 25.1 MHz frekans değerlerinde uygulanan dış alanla empedans değişimi Şekil 3.24 de gösterilmiştir. Toplam çapı 65 ve 130 µm olan numunelerde tüm frekans aralığı için sırasıyla tek pik ve çift pik davranışları belirlenirken, toplam çapı 200 µm olan numunede her iki pik davranışlarının olduğu gözlenmiştir. İki pikin gözlendiği manyetoempedans eğrilerinde domain duvar hareketinin büyük ölçüde zayıfladığı ve manyetizasyon yönelimlerinin etkin olduğu ortaya konmuştur [33].

Farklı çaplara sahip Co-bazlı amorf teller için frekansın fonksiyonu olarak manyetoempedansın yüzde değişimi Şekil 3.25 de verilmiştir. Manyetoempedans oranında düşük frekanslarda büyük bir artış gözlenirken, empedansın yüzde değişimi bir maksimuma ulaştıktan sonra frekansın artmasıyla azalış göstermektedir. Maksimum manyetoempedans oranı, 200 µm çapındaki numune için 11.1 MHz frekans değerinde %1028 ve 130 µm çapındaki numune için 14.7 MHz frekans değerinde ise %950 olarak belirlenmiştir [33]. Düşük frekanslar için belirlenen manyetoempedans oranındaki büyük artış iç bölgedeki yüksek geçirgenlik ve yüzey etkisi ile ilgilidir. Manyetoempedans oranındaki azalış, yüksek frekanslı akım yoğunluğunun yüzeye yakın kabukta toplanmasının bir sonucudur ve geçirgenlik değerindeki büyük azalışı göstermektedir. Yüksek frekanslarda geçirgenliğin azaldığı ve bu yüzden MI değerinin de azalış gösterdiği belirlenmiştir [33].



Şekil 3.24. Farklı çaplardaki cam kaplı amorf teller için uygulanan dış alanla empedansın değişimi [33]. (a) 65 μm , (b) 130 μm ve (c) 200 μm .



Şekil 3.25. Farklı çaplara sahip cam kaplı Co-bazlı amorf teller için frekansın bir fonksiyonu olarak manyetoempedansın yüzde değişimi [33].

Amorf ve ısıtılma işlem gören malzemelerde günümüze kadar manyetoempedans ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda uygulanan dış parametrelerin yüzde manyetoempedans değişimlerine etkisi [26, 28, 29, 33-57] Çizelge 3.2 de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Amorf ve farklı ısıtılma işlem süreçlerine tabi tutulan malzemelerdeki yüzde manyetoempedans değişimleri.

Numune	İşlem	λ (10^{-6})	Frekans (MHz)	MI (%)	I (mA)	H_{max} (kA/m)
$Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ wire [29]	450 °C		3.1	170	10	± 11.94
$(Co_{0.95}Fe_{0.05})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ wire [34]	550mA 0.5 dak.		0.5	350	25	2.4
$Co_{83.2}B_{3.3}Si_{5.9}Mn_{7.6}$ glass-coated-microwire [35]	amorf	0.1	10	45	5	
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	amorf	25.2	0.5	0		7.96
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	455°C	2.05	0.5	2.13		7.96
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	500°C1h	1.68	0.5	19.8		7.96
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	525°C1h	1.01	0.5	13.2		7.96
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	550°C1h	0.48	0.5	24.25		7.96
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	575 °C1h	-0.36	0.5	28.6		7.96
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	600 °C1h		0.5	23		7.96
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{16.5}B_6$ ribbon [36]	630 °C1h	-0.44	0.5	19.55		7.96
$Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ as cast wire [37]	Hard-drawn		12	269.9		
Cobalt-300 glass-covered amorf wire [33]	Amorf		11.1	1028		15
Glass-Coated $Co_{68.5}Mn_{6.5}Si_{10}B_{15}$ amorf microwire [38]	Amorf		10	120	1	2.4
$Co_{70.4}Fe_{4.6}Si_{15}B_{10}$ melt-spun ribbons [39]	Amorf		0.1	90	55	
$Co_{70.4}Fe_{4.6}Si_{15}B_{10}$ melt-spun ribbons [39]	340 K30d		0.1	130	12	
Electroplated NiFe/Cu composite wires [40]			2	637	20	
Electroplated NiFe/Cu composite wires [40]	AY:7.2 10^8 A/m ²		4	1110	20	
Ag/NiFe Plated wire [41]			0.05	40	20	7.165
Glass-coated $Co_{83.2}Mn_{7.6}Si_{5.8}B_{3.3}$ microwire [42]	Amorf		4.6	53	1	11.15
Glass-coated $Co_{83.2}Mn_{7.6}Si_{5.8}B_{3.3}$ microwire [42]	Amorf		4.6	24	1	11.15

Numune	İşlem	λ (10^{-6})	Frekans (MHz)	MI (%)	I (mA)	H_{max} (kA/m)
Fe _{4.5} Co _{67.5} Nb _{0.5} Mn _{0.5} Si ₁₂ B ₁₅ wire [28]	Amorf		0.3	73		5.57
Fe _{4.5} Co _{67.5} Nb _{0.5} Mn _{0.5} Si ₁₂ B ₁₅ wire [28]	350°C 30dak.		~1	71		5.57
Co _{68.15} Fe _{4.35} Si _{12.25} B ₁₅ amorf şerit [43]	550°C1h	-0.1	1	26	15	1
Fe _{73.5} Cu ₁ Nb ₃ Si _{13.5} B ₉ amorf şerit [43]	550°C1h		1	~10	15	1
Fe ₉₀ Hf ₇ B ₃ amorf şerit [43]	550°C1h		1	25	15	1
Fe ₉₀ Zr ₇ B ₃ amorf şerit [43]	550°C1h		1	30	15	1
(Co _{0.93} Fe _{0.7}) ₆₃ Ni ₁₀ Si ₁₁ B ₁₆ glass- coated microwire [44]	Amorf		5.05	3.92		9.55
(Co _{0.93} Fe _{0.7}) ₆₃ Ni ₁₀ Si ₁₁ B ₁₆ glass- coated microwire [44]	50mA 25dak.		5.05	18.74		9.55
(Co _{0.93} Fe _{0.7}) ₆₃ Ni ₁₀ Si ₁₁ B ₁₆ glass- coated microwire [44]	Amorf		11	4		9.55
(Co _{0.93} Fe _{0.7}) ₆₃ Ni ₁₀ Si ₁₁ B ₁₆ glass- coated microwire [44]	Amorf		11	2.76		9.55
(Co _{0.93} Fe _{0.7}) ₆₃ Ni ₁₀ Si ₁₁ B ₁₆ glass- coated microwire [44]	50mA 25dak.		11	5.88		9.55
Mumetal Ni ₇₇ Fe ₁₄ Cu ₅ Mo ₄ [45]	580°C 40d		0.6	310		
Amorf Co _{68.25} Fe _{4.5} Si _{12.25} B ₁₅ glass covered microwires [46]	70mA 10d		15	~600	1	
Amorf Fe _{73.5} Si _{13.5} B ₉ CuNb ₃ Al ribbon [47]	580°C1h		0.9	41	5	8
Amorf Fe _{72.5} Si _{13.5} B ₉ CuNb ₃ Al ₁ ribbon [47]	565°C1h		0.9	39.2	5	8
Amorf Fe _{71.5} Si _{13.5} B ₉ CuNb ₃ Al ₂ ribbon [47]	560°C1h		0.9	8	5	8
Amorf Fe _{73.5} Si _{12.5} B ₉ CuNb ₃ Al ₁ ribbon [36]	565°C1h		0.9	20.5	5	8
Amorf Fe _{73.5} Si _{11.5} B ₉ CuNb ₃ Al ₂ ribbon [47]	560°C1h		0.9	23.5	5	8
Amorf Fe _{73.5} Si _{13.5} B ₈ CuNb ₃ Al ₁ ribbon [47]	580°C1h		0.9	43.4	5	8
Amorf Fe _{73.5} Si _{13.5} B ₇ CuNb ₃ Al ₂ ribbon [47]	565°C1h		0.9	30.5	5	8
Amorf Fe _{76.8} B _{19.2} CuNb ₃ Al ribbon [47]	540°C1h		0.9	32	5	8
Amorf Fe _{74.8} B _{19.2} CuNb ₃ Al ₂ ribbon [47]	400°C1h		0.9	22.1	5	8
Amorf Fe _{72.8} B _{19.2} CuNb ₃ Al ₄ ribbon [47]	580°C1h		0.9	26.2	5	8

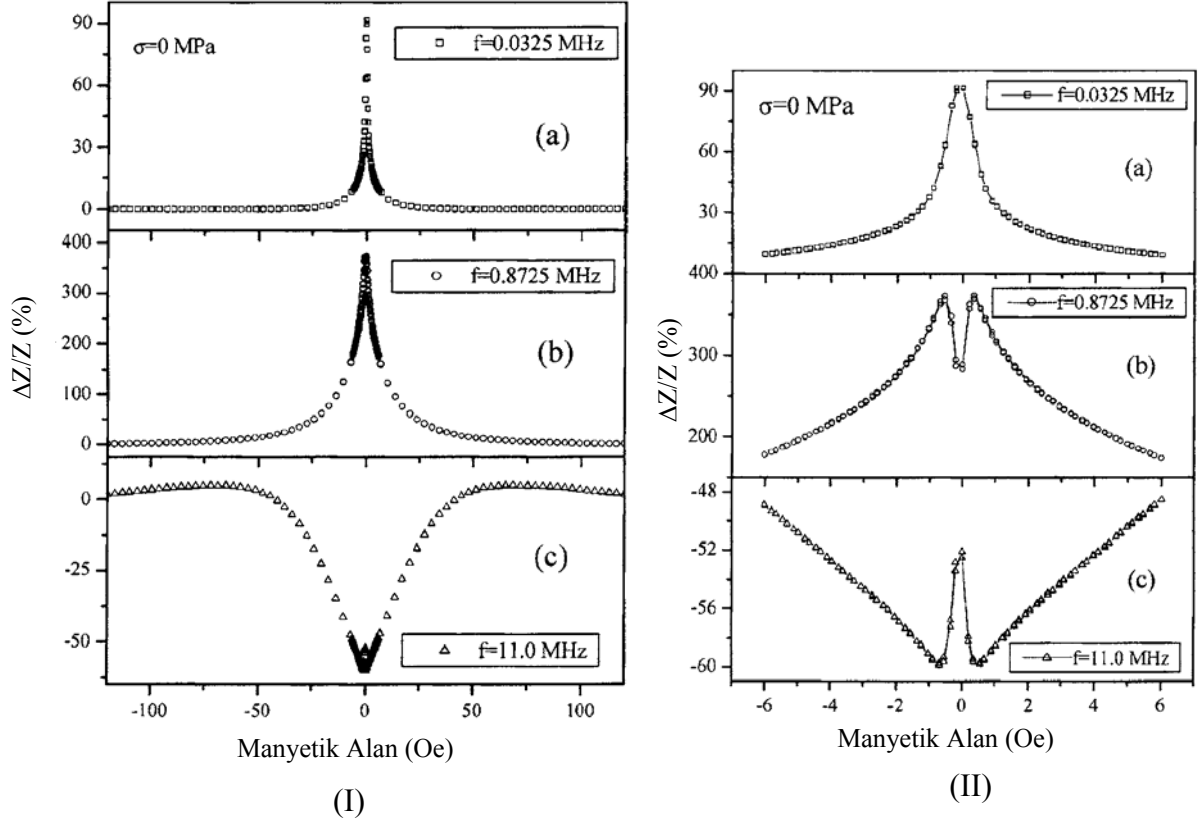
Numune	İşlem	λ (10^{-6})	Frekans (MHz)	MI (%)	I (mA)	H_{max} (kA/m)
Amorf $Co_{68.25}Fe_{4.5}Si_{12.25}B_{15}$ glass-covered microwire [48]	Amorf		15	420	1	10
Amorf $Co_{68.25}Fe_{4.5}Si_{12.25}B_{15}$ glass-covered microwire [48]	70mA 10dak		15	~600	1	10
Amorf $Co_{68.25}Fe_{4.5}Si_{12.25}B_{15}$ glass-covered microwire [48]	90mA 10dak		15	~490	1	10
Amorf $Fe_{91}Zr_7B_2$ ribbon [49]	600°C1h		0.65	2.71	8	3.18
Amorf $Fe_{88}Zr_8B_4$ ribbon [49]	600°C1h		1	1.1	8	3.18
Amorf $Fe_{87}Zr_6B_6Cu_1$ ribbon [49]	Amorf		1	4.92	8	3.18
Amorf $Fe_{87}Zr_6B_6Cu_1$ ribbon [49]	600°C1h		2	27.7	8	3.18
Amorf $Fe_{80}Zr_{10}B_{10}$ ribbon [49]	Amorf		0.65	4.55	8	3.18
$Fe_{84}Zr_7B_3Cu_1$ alloy [50]	550°C1h		4.6	1100	10	11.94
Amorf $Fe_{84}Zr_{3.5}Nb_{3.5}B_8Cu$ ribbon [51]	923K20d		2.5	383	10	2.4
Amorf $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ wires [26]	Amorf	32	1	22	5	10
Amorf $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ wires [26]	Amorf t	-2.6	1	88	5	10
Amorf $(Co_{94}Fe_6)_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ wires [26]	Amorf	~0.08	1	330	5	10
Amorf $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ wires [52]	Amorf	30	3	50	0.01	
Amorf $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ wires [52]	Amorf	-2	2	91	0.01	
Amorf $(Co_{94}Fe_6)_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ wires [52]	Amorf	0.1	4	250	0.01	
Cobalt coated silver wires [53]	AY:150mA /cm ²		2	176	10	
CoSiB/SiO ₂ /Cu/SiO ₂ /CoSiB film [54]			20	700		
Amorf $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Au_1$ ribbon [55]	550°C 30d	~0	2	190	10	23.89
Electroplated NiFe/Cu wire [56]	180dak. kaplama		0.055	750	18	7.4
Electroplated $Co_{18.97}Ni_{49.60}Fe_{31.43}$ wire [57]			0.09	257	18	7.4

3.5. Amorf ve Isıl İşlem Görmüş Alaşımlarda Stres-empedans etki

Dışardan uygulanan manyetik alan gibi, uygulanan gerilme (tensile) ve bükme (torsion) stresler de numunelerin domain yapılarında değişimlere yol açmaktadır. Tel üretimi esnasında farklı soğutma oranlarından dolayı telin yüzeyinden merkezine doğru, tel içinde farklı quenching stresler ortaya çıkar. Bu iç stresler, manyeto-elastik anizotropinin radyal dağılımına neden olur. Deneysel olarak yapılan çalışmalar, uygulanan eksensel gerilme stresin, amorf tellerin geçirgenliğini azaltan bir manyeto-elastik anizotropiye neden olduğunu ortaya koymuştur [58].

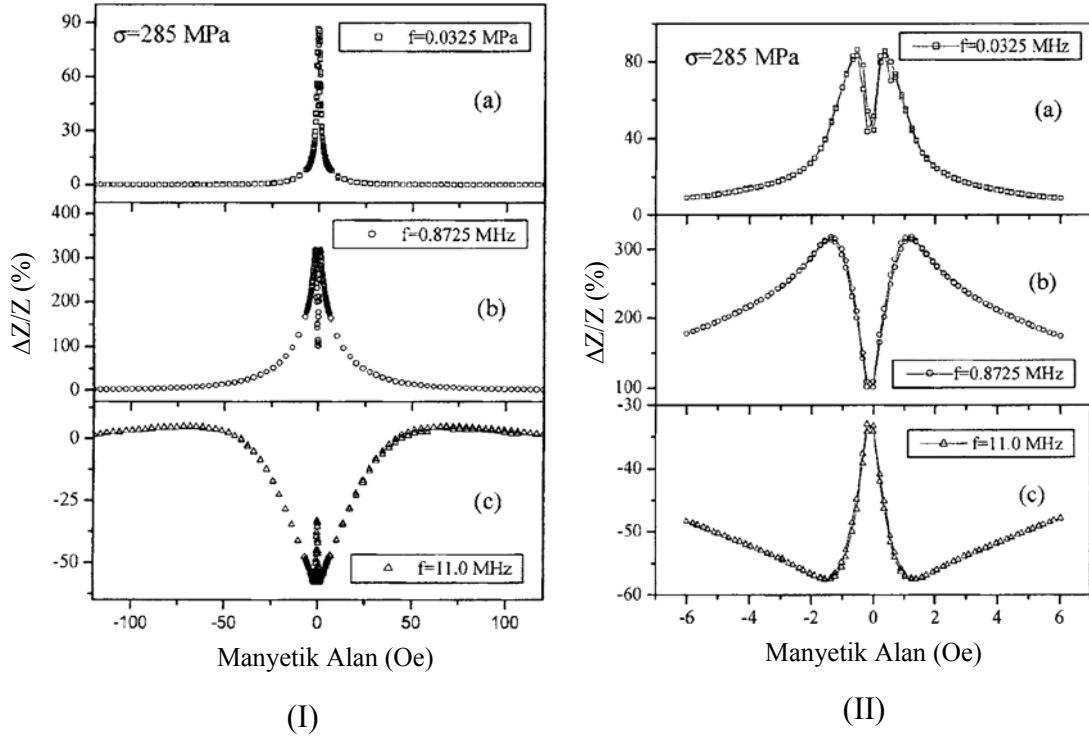
Amorf $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel için gerilme stres etkisi, Mandal ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [58]. Bu çalışmada, 12 cm uzunluğunda ve 125 μm çapında amorf teller kullanılmıştır. Farklı sürücü akım frekans değerleri için stresin uygulanmadığı durumda, yüksek ve düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimleri Şekil 3.26 da gösterilmiştir. 1MHz değerinden düşük frekans değerlerinde, $H_{dc}\sim 0$ da GMI da keskin bir artış gözlenilmiştir. Düşük alan bölgesindeki eğriler göz önüne alındığında sadece 0.0325MHz frekans değerinde $H_{dc}\sim 0$ da tek pik davranışları tespit edilmiştir.

0.8725 MHz ve 11 MHz frekansları için sırasıyla $H_{dc}=\pm 0.45$ Oe ve $H_{dc}\sim 50$ Oe alan değerlerinde iki pik gözlenilmiştir (Şekil 3.26 II). Oldukça düşük frekanslarda (Şekil 3.26 I) içteki core ve dıştaki kabuktan kaynaklanan MI pik değerlerinin $H_{dc}=0$ değerine çok yakın bölgede oluştuğu belirlenmiş ve bu nedenle düşük frekans değerlerinde tek pik davranışları gözlenilmiştir [58]. AC akımdan dolayı ortaya çıkan dairesel manyetik alan domain duvar yerdeğiştirmesi ile dış kabuktaki manyetizasyonu değiştirmektedir. Tel eksenini boyunca dış kabuğun anizotropi alanı iç cora kıyasla daha büyük olduğu için, yüksek frekanslarda pik değerlerinin daha yüksek manyetik alan değerlerinde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu nedenle yüksek frekanslarda eğrilerin çift pik davranışları gösterdiği tespit edilmiştir [58]. Sonuç olarak dış kabukta ortaya çıkan pik değerlerinin frekans ile anizotropi alanındaki artış sayesinde daha yüksek alan değerlerine doğru kaydığı ifade edilmiştir.



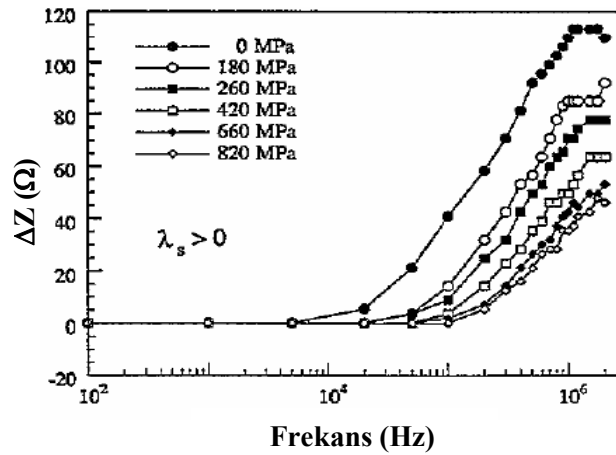
Şekil 3.26. Farklı frekans değerleri için stres yokluğunda amorf $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi. (I) yüksek alan, (II) düşük alan [58].

Manyetoempedans özelliklerinin uygulanan stres değerleriyle değişim gösterdiği belirtilmiştir. Şekil 3.27 I ve II de 285 MPa değerindeki dış stres altında düşük ve yüksek alan için manyetoempedans karakteristiği gösterilmiştir. Uygulanan dış tensile stres altında, MI pik değerlerinin azaldığı ve yüksek frekanslarda piklerin olduğu alan değerlerinin arttığı belirlenmiştir (Şekil 3.27 II). Negatif magnetostriction değerine sahip numune, uygulanan dış gerilme stresler, enine bir anizotropi ortaya çıkarmaktadır. Ortaya çıkan bu anizotropi, dairesel manyetizasyonlu domainlerin hacimsel kesrini genişletmesine rağmen; enine geçirgenlik değerini azaltmaktadır. Buna dayalı olarak uygulanan gerilme streslerin MI değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir [58].



Şekil 3.27. Farklı frekans değerleri için 285MPa stres altında amorf $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi. (I) yüksek alan, (II) düşük alan [58].

Negatif ve pozitif magnetostriction değerine sahip amorf tellerdeki büyük manyetoempedans etkinin (GMI) strese ve frekansa bağlılığı çalışılmıştır [59]. Bu amaçla Şekil 3.28 de pozitif magnetostriction değerine sahip tel için farklı gerilme stresleri altında empedansın frekansa bağlılığı verilmiştir.



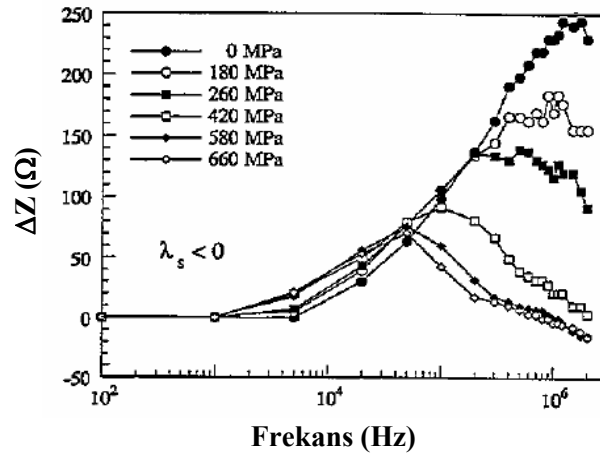
Şekil 3.28. Farklı boyuna stresler için amorf $\text{Fe}_{4.9}\text{Co}_{71.8}\text{Nb}_{0.8}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ telin empedansının frekansla değişimi. Uygulanan DC alan 100Oe [59].

Düşük frekanslarda manyetik sızma derinliği (δ), tel yarıçapından daha büyük olduğundan empedansın dış alan uygulanmasıyla bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Dönüm noktasına ait frekansta (f^*), eksensel yön boyunca alanın uygulanması, empedans değişiminin ortaya çıktığını göstermektedir. Dönüm noktasına ait frekans değeri $R/\delta=1$ şartından bulunabilir ve Eşitlik 3.13 ile verilir.

$$f^* \propto \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{\rho}{R^2 \mu_\phi} \quad (3.13)$$

Burada ρ dc özdirenç ve μ_ϕ dairesel geçirgenliktir. Pozitif magnetostriction değerine sahip telde gerilme stresin uygulanması, dairesel geçirgenliği azaltarak dönüm noktasına ait frekans değerini artıracaktır. Bu durumda hem stres hem de manyetik alan eksensel yönelimdeki domainlerin hacminin genişlemesine neden olmaktadır. Stresin artması ile empedans' daki göreceli değişimler sürekli bir şekilde azalış göstermektedir (Şekil 3.28).

Stressiz durum için belirlenen maksimum manyetoempedans oranı ($\Delta Z/Z$), 500kHz için %180 değerindedir. Manyeto-kristal anizotropinin eksikliğinden dolayı amorf tellerin manyetik softluğu başlıca manyeto-elastik katkılar ile belirlenir. Yüksek alınganlık değerleri, dış manyetik alanın uygulanması ile daha kolay bir şekilde azaltılır [59]. Şekil 3.29, negatif magnetostriction değerine sahip tel için $\Delta Z'$ nin frekansa ve strese bağlılığını göstermektedir.



Şekil 3.29. Amorf $\text{Co}_{68.1}\text{Fe}_{4.4}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin farklı gerilme stres değerleri için empedansın frekans ile değişimi [59].

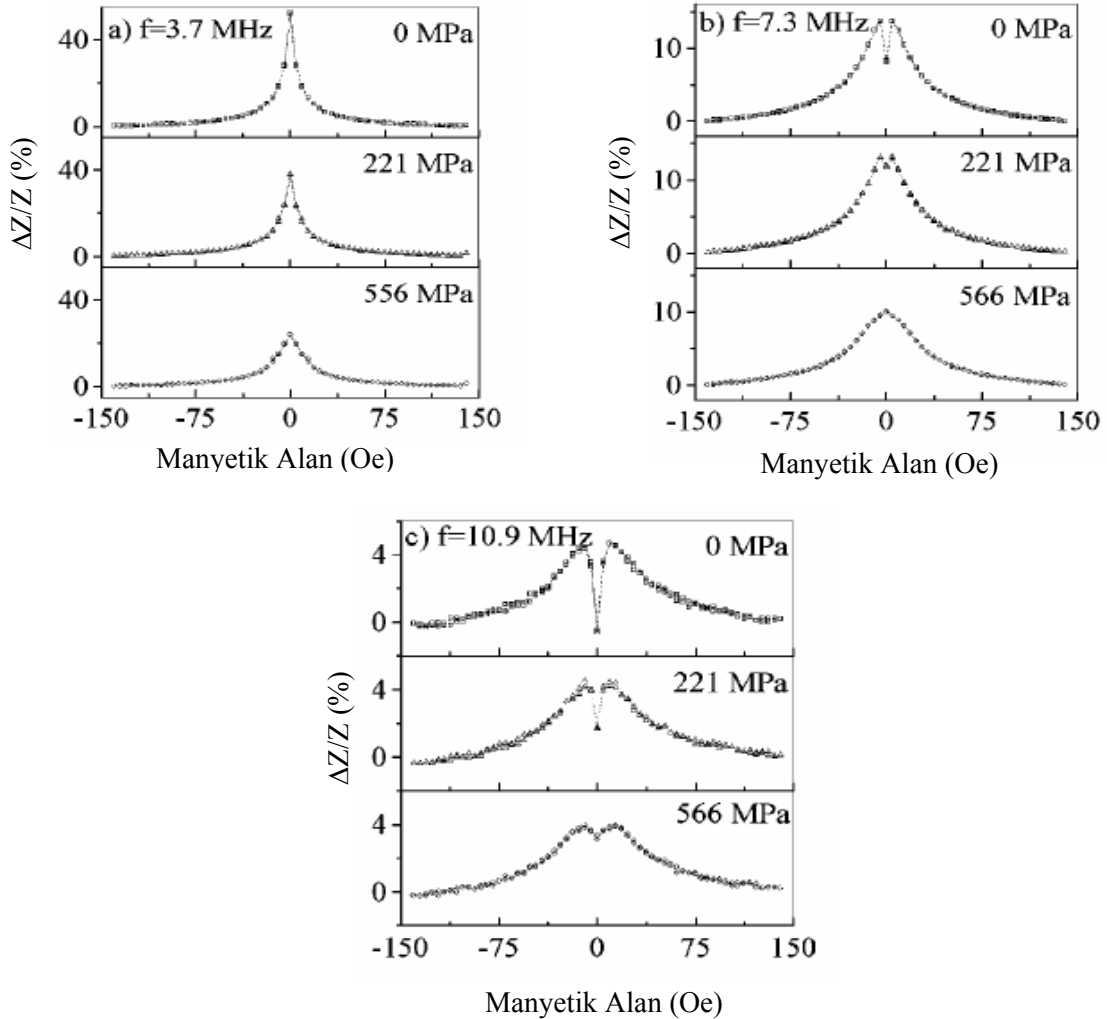
Yüksek frekanslar için stressiz durumda ΔZ de bir maksimum vardır, stresin artması ile bu maksimum değer azalır ve daha düşük frekanslara doğru yer değiştirir. Telin empedansı sadece malzemedeki mevcut anizotropilere değil aynı zamanda, sürücü frekansına da bağlıdır. GMI etkiyi düşük ve yüksek frekans bölgelerinde ayrı ayrı ele almak önemlidir. Toplam manyetik geçirgenlik domain duvar hareketi ve manyetik moment yönelimindeki dağılımlara göre ayrılabilir. Yüksek frekanslarda domain duvar hareketi eddy akımlarından dolayı güçlü bir şekilde yavaşlatılır ve geçirgenlikte manyetik moment katkısı baskın olur.

Düşük frekans aralığında ($R \ll \delta$), manyetoempedans etkide tamamen reaktansdaki değişimler baskındır. Yüksek frekans durumunda, empedansın hem direnç hem de indüktive bileşeni uygulanan alan ve stresin fonksiyonu olarak GMI davranışlarına katkıda bulunur. Pozitif magnetostriction değerine ($\lambda_s > 0$) sahip tel için uygulanan stres, tek eksenli manyetik anizotropi artışında rol oynar ve genelde boyuna domain yapısı oluşur. Sonuç olarak dairesel manyetik geçirgenlik başlıca manyetizasyon yöneliminden meydana gelmektedir [59]. Negatif magnetostriction değerine ($\lambda_s < 0$) sahip tel için, tel eksenine boyunca uygulanan DC alan, alana paralel sıralanmış düzlemsel domain duvarların sayısında bir artışa yol açarken, boyuna stresler enine domainlerin genişlemesini sağlamaktadır [59].

$\text{Co}_{83.2}\text{Mn}_{7.6}\text{Si}_{5.8}\text{B}_{3.4}$ amorf mikro tellerde büyük manyetoempedans (GMI) etkinin strese bağlılığı Mandal ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [60]. Şekil 3.30, farklı gerilme streslerinin etkisi altında 3.7, 7.3 ve 10.9 MHz'lik frekanslar için uygulanan dc manyetik alan ile manyetoempedansın yüzde değişimini [$\Delta Z/Z$ (%)] göstermektedir. 3.7 MHz de [Şekil 3.30 (a)] manyetoempedansın maksimum değeri $H_{dc}=0$ da gözlenmiş ve H_{dc} 'nin artması ile $\Delta Z/Z$ 'nin azaldığı gözlenmiştir. Yüzde empedans değişiminin pik değeri stressiz durumda ($\sigma=0$) %53 değerinden 566MPa stres değerinde ($\sigma=564\text{MPa}$) %24'e düşmüştür. GMI etkinin tek pik davranışları 6 MHz'lik frekans değerleri altında gözlenmektedir [60].

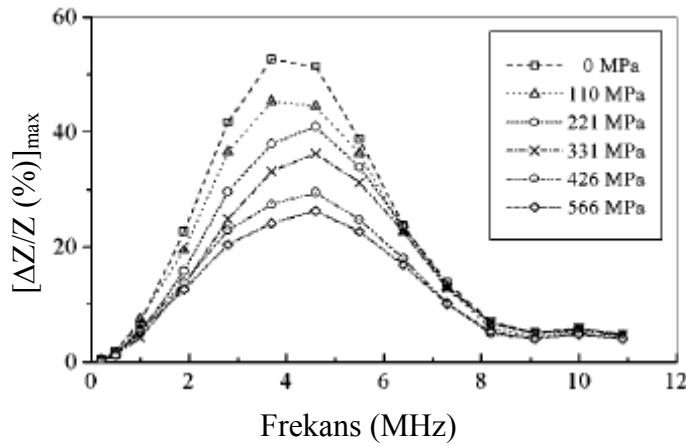
Ancak daha yüksek frekanslarda (6 MHz üzeri) iki pik davranışları tespit edilmiştir. 7.3 MHz de (Şekil 3.30 b) herhangi bir stresin yokluğunda pik değerleri $H_{dc}=\pm 5.37$ Oe değerinde gözlenilmiş ve $H_{dc}=0$ da gözlenen çukur, gerilme stresin artması ile azalmıştır. 566 MPa değerinde stres uygulandığında tek pik davranışların tekrar ortaya çıktığı görülmüştür. 10.9 MHz de (Şekil 3.30 c) $H_{dc}=0$ da bulunan çukur, gerilme stresin artması ile azalış göstermektedir. Farklı gerilme stresleri altında $\Delta Z/Z$

yüzde değişiminin frekansa bağıllığı Şekil 3.31 de gösterilmiştir [60]. 1 MHz dan düşük frekans değerlerinde $\Delta Z/Z$ nin yüzde değişimi küçüktür. 4MHz civarında GMI değerinin alana duyarlılığı maksimumdur. Ayrıca bu frekans bölgesinde stresin etkisi çok büyüktür. Stresin artması ile $[\Delta Z/Z (\%)]_{\max}$ ' un konumu daha yüksek frekans bölgesine doğru kaymaktadır. Mikro-telin domain yapısı, tel eksenine yakın manyetizasyon yönelimine sahip tek domain'li iç bölge ve enine şekilde manyetizasyon yönelimine sahip çok domainli bir dış kabuktan meydana gelmektedir. Bir dc manyetik alan altında, dc alanın neden olduğu (H_{dc}) tek yönlü manyeto-statik anizotropiye bağlı olarak manyetik geçirgenlik azalış göstermektedir. Bu nedenle dc manyetik alanın artışı ile yüzey derinliğinin (δ) arttığı ve sonuçta Şekil 3.30 da gözlenildiği gibi manyetoempedans değerinin düşüş gösterdiği tespit edilmiştir [60].



Şekil 3.30. Farklı gerilme stresleri ve a) 3.7 MHz, b) 7.3 MHz ve c) 10.9 MHz ac akım frekansları varlığında dc manyetik alan ile manyetoempedansın yüzde değişimi [60].

Dairesel manyetik alanın varlığında, GMI etkiye dış kabuk katkıları iç bölge domainlerine kıyasla daha fazladır. Gerilme streslerinin uygulanması ile dış kabuğun hacmi azalır ve manyetik geçirgenliği azaltan tel eksenli boyunca tek eksenli bir manyetik anizotropi meydana gelir. 1MHz in altındaki frekans değerlerinde, tel yarıçapı yüzey derinliğinden daha küçüktür ve MI etkiye katkı başlıca manyeto-indüksiyon voltajdan geldiği için MI'ın pik değeri çok yüksek değildir. Frekans 1MHz den daha yüksek ve $r \gg \delta$ olduğunda MI etkinin daha yüksek değerleri yüzey etkinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. $[\Delta Z/Z]_{\max}$, 5MHz' in üstündeki frekanslarda azalmaktadır. Bu frekans bölgesinde, domain duvar hareketinin eddy akımları sayesinde kuvvetlice sönmüldüğü ve sonuçta frekansın artması ile GMI etkide bir azalma olduğu belirlenmiştir [60].

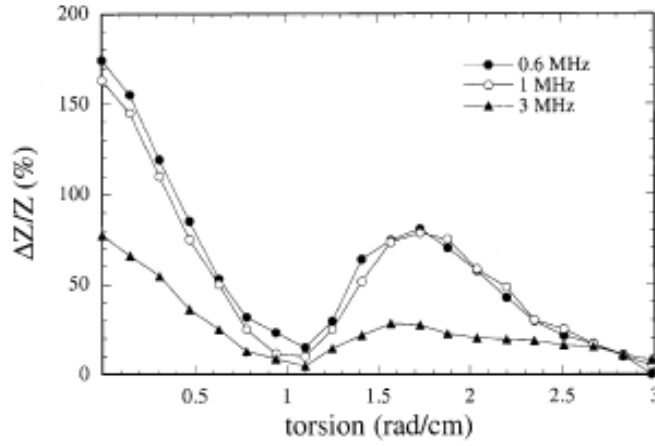


Şekil 3.31. Farklı eksensel gerilme stresler altında frekans ile maksimum manyetoempedans oranının yüzde değişimi [60].

DC manyetik alan, numune boyunca geçirilen AC akım ve gerilme stresleri gibi dış parametreler [58-60] numunelerin başlangıçta sahip olduğu manyetizasyonu değiştirdiği gibi ayrıca uygulanan bükme streslerin de domain yapısını değiştirdiği yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [54]. CoFeSiB amorf tellerde torsional empedans (TI) Sanchez ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [61].

Farklı sürücü akım frekans değerlerinde ısı işlem görmemiş numune için, tele uygulanan bükme stresin bir fonksiyonu olarak bükme empedans (TI) eğrileri Şekil 3.32 de verilmiştir. Ölçümler 10mA lik sürücü akım altında yapılmıştır. Eğrilerden küçük bükme değerlerinde ani bir azalış görülmektedir. Fakat daha sonra TI bir maksimum gösterir ve tekrar sıfıra doğru azalır. Tüm frekanslar için elde edilecek maksimum değerlerin yaklaşık aynı bükme streslerinde meydana geldiği tespit edilmiştir. En

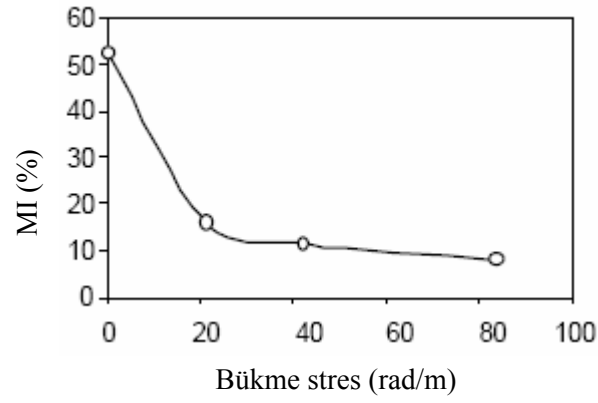
yüksek TI tepki Şekil 3.32 de görüldüğü gibi düşük frekanslar da gözlenmiştir. Bükme stres uygulanmasının telin manyetik özelliklerini etkileyen bir manyeto-elastik sarmal anizotropi ortaya çıkararak domain yapının değişmesine neden olduğu düşünülmektedir.



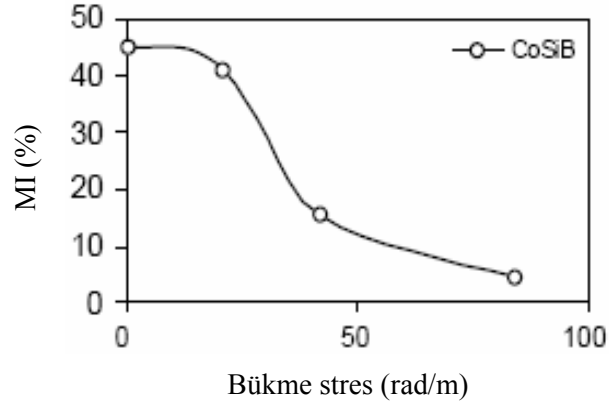
Şekil 3.32. Isıl işlem görmemiş tel için farklı sürücü akım frekanslarda, uygulanan torsion' un bir fonksiyonu olarak torsion empedans değişimi [61].

$Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.55}B_{15}$ amorf tellerde GMI etkinin bükme gerilmesine bağlılığı, Raposa ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [62]. Şekil 3.33 $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ amorf tel için GMI oranının bükme strese bağlılığını göstermektedir. Bükme stres yokluğunda 3MHz sürücü akım frekans değerinde GMI %50 civarında bir maksimuma sahiptir. Bükme stres uygulandığında şekilden'de görülebileceği gibi manyetoempedans azalış göstermektedir. Şekil 3.34 ve 3.35 sırasıyla $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.55}B_{15}$ amorf teller için GMI oranının bükme strese bağlılıklarını göstermektedirler. Şekil 3.34 de görüldüğü gibi uygulanan bükme stresi ile GMI azalmaktadır.

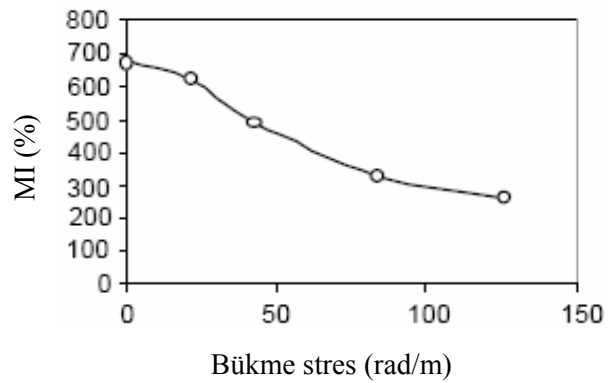
Bükme stresi ile GMI değerinin azalışı manyetoelastik anizotropinin artması ve sonuç olarak enine alınganlığın azalmasıyla yorumlanabilir. Stres yokluğunda 4MHz frekanslı sürücü akımda $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.55}B_{15}$ amorf tel için GMI oranı %650 değeriyle diğer numunelerden oldukça büyüktür (Şekil 3.35). Benzer şekilde uygulanan bükme stres değerinin artması ile GMI oranı azalış göstermektedir [62].



Şekil 3.33. $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ amorf tel için GMI oranının bükme strese bağlılığı [62].



Şekil 3.34. $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ amorf tel için GMI oranının bükme strese bağlılığı [62].



Şekil 3.35. $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.55}B_{15}$ amorf tel için GMI oranının bükme strese bağlılığı [62].

Amorf ve ısıl işlem gören malzemelerde günümüze kadar stres-empedans ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda numunelere uygulanan dış parametrelerin (stres) yüzde stres-empedans değişimleri üzerine etkisi Çizelge 3.3 de özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Amorf ve farklı ısıl işlem süreçlerine tabi tutulan malzemelerdeki yüzde stres-empedans değişimleri.

Alaşım	İşlem	Frekans (MHz)	SI (%)	TI (%)	Uygulanan stres
$(\text{Co}_{0.95}\text{Fe}_{0.05})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel [34]	450mA 15 d	0.5		270	
Cam kaplı $\text{Co}_{68.5}\text{Mn}_{6.5}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ amorf mikro tel [38]	Amorf	10	130		60 MPa
Conventional $(\text{Co}_{0.95}\text{Fe}_{0.05})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel [38]	Amorf	0.5		150	
Conventional $(\text{Co}_{0.95}\text{Fe}_{0.05})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel [38]	450 mA 10d	0.5		330	
$(\text{Fe}_{0.94}\text{Co}_{0.06})_{72.5}\text{B}_{15}\text{Si}_{12.5}$ amorf tel [63]	450mA 1d			350	
$\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit [64]	550°C30d	0.3	-40		
$\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit [64]	600°C 30d	0.3	25		
$\text{Fe}_{86}\text{Zr}_7\text{B}_6\text{Cu}_1$ şerit [65]	550°C 1h	0.3	12.5		
$\text{Fe}_{86}\text{Zr}_7\text{B}_6\text{Cu}_1$ şerit [65]	600°C 1h	0.2	17.5		
Cam kaplı $\text{Co}_{83.2}\text{Mn}_{7.6}\text{Si}_{5.8}\text{B}_{3.3}$ mikro tel [42]		4.6			566MPa
$(\text{Co}_{0.93}\text{Fe}_{0.7})_{63}\text{Ni}_{10}\text{Si}_{11}\text{B}_{16}$ cam kaplı mikro tel [45]	Amorf	5.05			603MPa
$(\text{Co}_{0.93}\text{Fe}_{0.7})_{63}\text{Ni}_{10}\text{Si}_{11}\text{B}_{16}$ cam kaplı mikro tel [45]	Amorf	11			603MPa
Amorf $\text{Co}_{68.25}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15}$ cam kaplı teller [66]	Amorf	50			55MPa
Amorf $(\text{Co}_{94}\text{Fe}_6)_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller [52]	Amorf	4			125rad/m
$(\text{Co}_{0.95}\text{Fe}_{0.05})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf tel [67]	Amorf	0.5		120	$7\pi\text{rad/m}$
$(\text{Co}_{0.95}\text{Fe}_{0.05})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf tel [67]	Amorf	0.5		170	$7\pi\text{rad/m}$

Alaşım	İşlem	Frekans (MHz)	SI (%)	TI (%)	Uygulanan stres
$(Co_{0.95}Fe_{0.05})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ amorf tel [67]	TA: 25π rad/m	0.5		200	20π rad/m
$(Co_{0.95}Fe_{0.05})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ amorf tel [67]	TA: 25π rad/m	0.5		225	20π rad/m
Amorf $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ teller [68]	750mA 15s	1		320	$\xi_{max}:75$ rad/m
Amorf $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ teller [68]	750mA 15s ve TA:135MPa	1		235	$\xi_{max}:75$ rad/m
Amorf $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ tel [69]	PA:486 A/mm ² 0.5MPa	5.5	80		
Amorf $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ şerit [70]	Amorf	0.1	-9.9		24.6MPa
Amorf $Fe_{73.5}Cu_1Nb_2VSi_{13.5}B_9$ şerit [70]	Amorf	0.1	-22.4		84.8MPa
Amorf $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ şerit [71]	33A/mm ² 20s-100MPa	5.5	350		

3.6. Uygulama Alanları

Bölüm 3.4 ve 3.5 de verilen bilgilerden amorf ve ısıł işlem gören malzemelere uygulanan dış parametrelerle (alan ve stres) bu malzemelerin empedans değerlerinin değişim gösterdiği belirlenmiştir. Buna paralel olarak dış parametreler ile yüksek empedans değişimi gösteren malzemelerin değişik sensör uygulamalarında kullanılması ile ilgili günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Son yıllarda makine ve bilgisayarların otomatik olarak kontrolü, hassas ölçüm sistemleri, güvenlik ve biyo mühendislik teknolojisi gibi birçok uygulama alanında hassas mikro manyetik sensörlere güçlü bir şekilde ihtiyaç duyulmuştur.

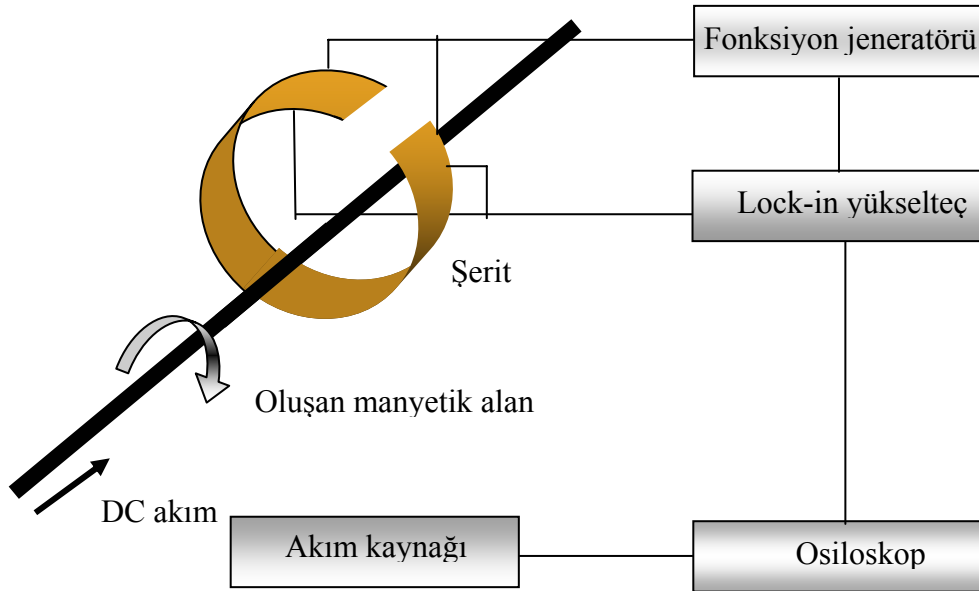
Günümüzde bu uygulama alanlarına cevap verebilecek yeni hassas bir mikro manyetik alan sensörleri gerçeleştirilmiştir ve manyetoempedans sensörü olarak adlandırılmıştır. Büyük manyetoempedans (GMI) gösteren malzemeler kullanılarak ortaya çıkarılan sensörler, akım sensörleri, manyetik alan sensörleri ve stres sensörleri olarak birçok uygulama alanında kullanılmaktadır.

3.6.1. Akım Sensörleri

Kobalt bazlı amorf şerit ve teller oldukça yüksek bir manyetoempedans etki sergilediğinden dolayı son zamanlarda bu malzemelerle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. GMI gösteren bu numuneler birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. GMI'nın pratik uygulamalarında manyetik alan ile lineerlik ve hassasiyet en önemli parametredir. GMI sensör uygulamalarında biri akım sensörleridir.

Amorf şeritler içinde büyük manyetoempedans etkiye bağlı akım sensörlerinin performansı incelenmiştir [72]. Bu çalışmada tek şerit, iki şerit ve toroidal türünde farklı şekillenime sahip kobalt bazlı şeritlerin GMI profillerine bakılmıştır. Tek ve iki şeritli numunelerde yüzde değişim daha yüksek iken, toroidal şekli için değişim daha küçüktür. Fakat toroidal şekilde bükülen numunenin GMI değişimi daha keskindir. Bu nedenle sensör tasarımında bu şekilde biçimlendirilmiş numuneler kullanılmıştır [72].

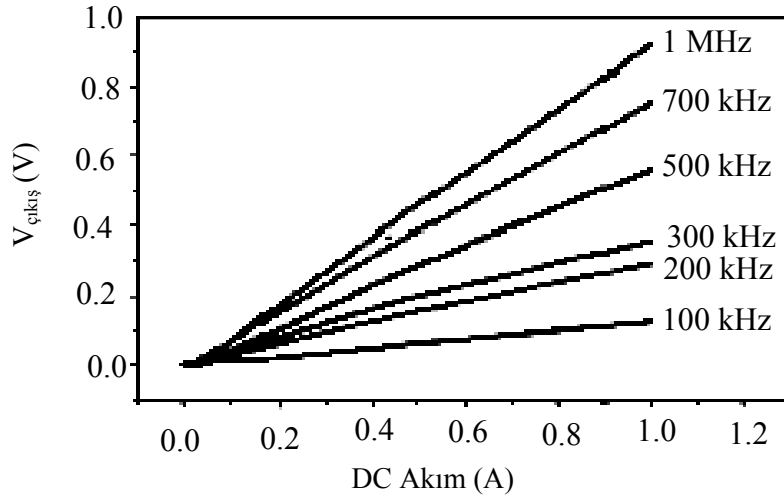
Şekil 3.36, toroidal şekle sahip akım sensörünün tasarımını göstermektedir. Isıl işleme tabi tutulan 70mm uzunluğundaki numune 10mm yarıçaplı bir silindir piston üzerine sarılmıştır. Akım numuneye eksensel yönde uygulanmıştır ve çıkış voltajı lock-in yükselteç ve osiloskop ile ölçülmüştür.



Şekil 3.36. Amorf şerit' in GMI etkiye bağlı olarak akım sensör tasarımı [72].

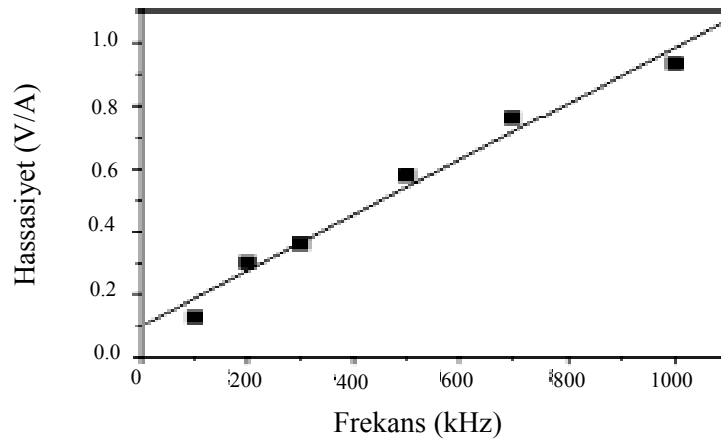
Düz bir tel içinden geçen akım, tel eksenini etrafında dairesel bir manyetik alan ortaya çıkarır. Akım ekseninden r (cm) kadar uzaktaki manyetik alanın büyüklüğü H

(O_e)= $2i/10r$ eşitliği ile verilir. Şekil 3.37 de uygulanan akımdan dolayı ortaya çıkan pozitif alan için GMI sensörün performansı gösterilmiştir. Sensör çıkış voltajı, lineer bir şekilde uygulanan 1A değerine kadar artış gösterir. Ancak akım yönü ters çevrildiğinde sensör numune üzerinde negatif manyetik alan ortaya çıkaracağından dolayı voltaj değerinde bir değişim olmaz. Bu göstermektedir ki, asimetrik GMI karakteristikli numune sensör elementi olarak kullanıldığı zaman akım yönü tayin edilebilir.



Şekil 3.37. Değişik ölçüm frekanslarında pozitif alan yönü içinde GMI sensörün akım hassasiyet karakteristiği [72].

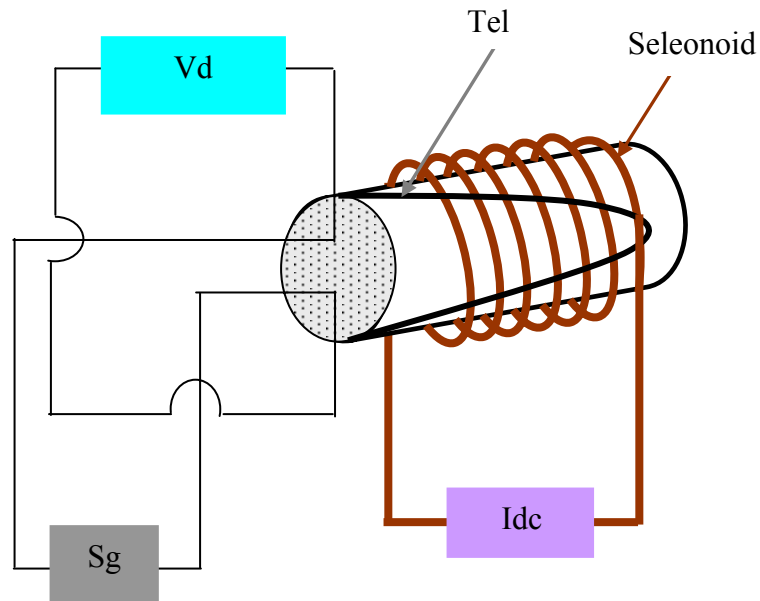
Şekil 3.38, çalışma frekansına karşı akım hassasiyetini göstermektedir. Hassasiyet frekans değişimi ile hemen hemen lineerlik göstermektedir. Akım için hassasiyet 100 kHz' lik çalışma frekansında 0.13 V/A dir. 1 MHz' lik çalışma frekansında ise 0.94 V/A' e kadar artış gösterir.



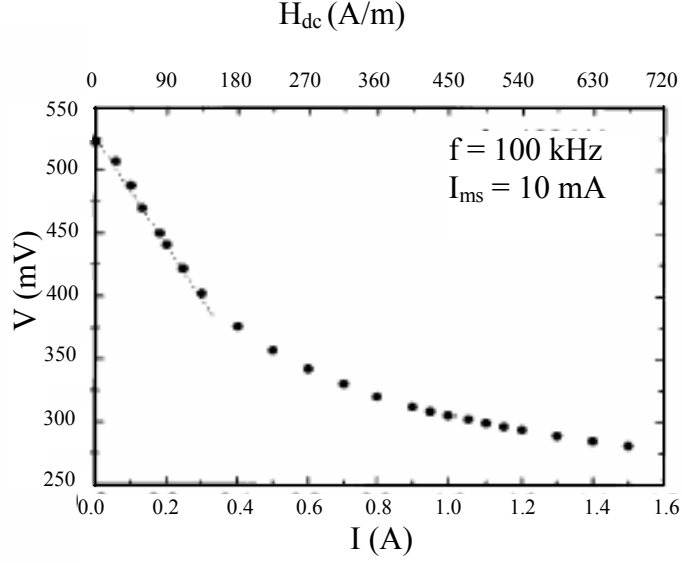
Şekil 3.38. Çalışma frekansına karşı akım hassasiyeti [72].

Manyetoempedans olayına bağı olarak bir diğ er dc akım sensörü Valenzuela ve arkadaşları tarafından tasarlanmıştır [73]. Bu çalışmada 11cm uzunluğ unda ve 125µm yarıçapında $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}B_{15}Si_{12.5}$ amorf ferromanyetik tel kullanılmıştır. Sensör boyutlarını minimum yapmak için tel 4mm yarıçapında ve 2cm uzunluğ undaki bir plastik silindir içinde bükülmüştür. Sensör basit olarak, hem akım hem de voltaj duyarlılığı için kullanılmaktadır. Tel 100 kHz lik bir frekansta bir dc akım ile uyarılmıştır. Bu sensör, 27 sarımlı bakır telden oluş an bir selonid vasıtasıyla 0.3A akım değerine kadar ölçüm yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.39, sensör tasarımını göstermektedir.

Test ölçümü için amorf tel bir sinyal jeneratörü (Hameg HM 8030) ile uyarılmıştır ve bir multimetre vasıtasıyla voltaj düşü şü ölçülmüştür. Tel empedansı, ac akıma bağı oldu ğ u için ac akım büyüklüğü önemlidir. Güçlü bir akım seviyesi ($i > 25$ mA) eksensel alana telin hassasiyetini azalttığ ından dolayı akım seviyesi (10 mA) daha düşük olarak alınmıştır. Selonoid boyunca geçiren dc akım seviyesi 0 ile 1.5A aralığ ında de ğ iş tirilerek ortaya çıkan voltaj de ğ iş imi Şekil 3.40 da gösterilmiştir. Şekil 3.40 da görüldü ğ u gibi voltaj de ğ iş imi 0 ile 0.3A aralığ ında keskindir. Bu voltaj aralığ ında elde edilen lineer duyarlılık pek çok uygulama alanı için uygundur. Diğ er yandan dc akım ölçüm aralığ ı, selenoidin sarım sayısı de ğ iş tirilerek kolay bir şekilde modifiye edilebilir. Şekil 3.40 dan lineer aralık içinde maksimum alan yaklaşık 135 A/m'dir. Bu sensör 8 sarımdan oluş an selonoid için 1A de ğ erine kadar ölçüm yapabilir [73].



Şekil 3.39. Sensör tasarımı [73].



Şekil 3.40. Dc akım değişimlerinin bir sonucu olarak voltaj değişimi. Akım tarafından ortaya çıkan manyetik alan x ekseninin üzerine çizilmiştir [73].

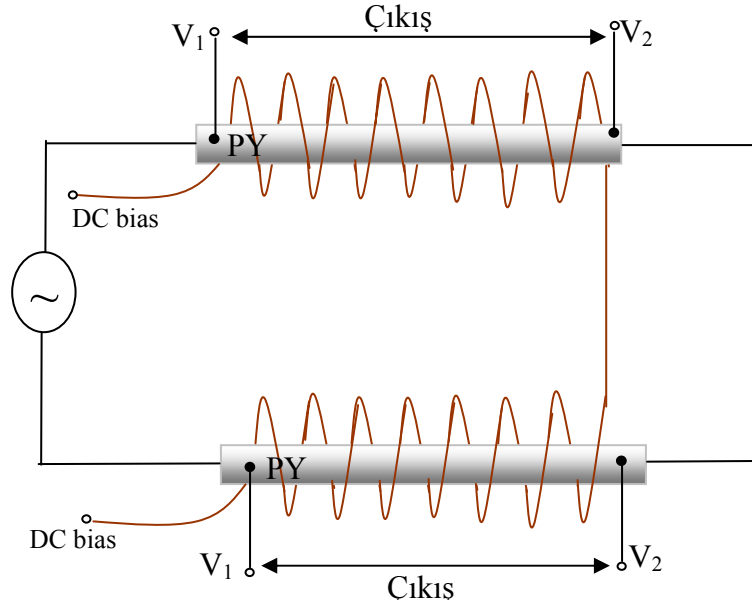
Farklı bir dc akım sensörü bakır bir levha etrafına amorf CoFeSiB teli sarılarak tasarlanmıştır [74]. Tasarlanan sensör tasarımında 0-13A aralığında lineer bir karakteristik belirlenmiştir. Ölçülen dc akım aralığının aletin tekniksel parametreleri ve geometrisinin uygun modifikasyonu ile yeniden biçimlendirilebileceği ortaya konmuştur [74].

3.6.2 Manyetik Alan Sensörleri

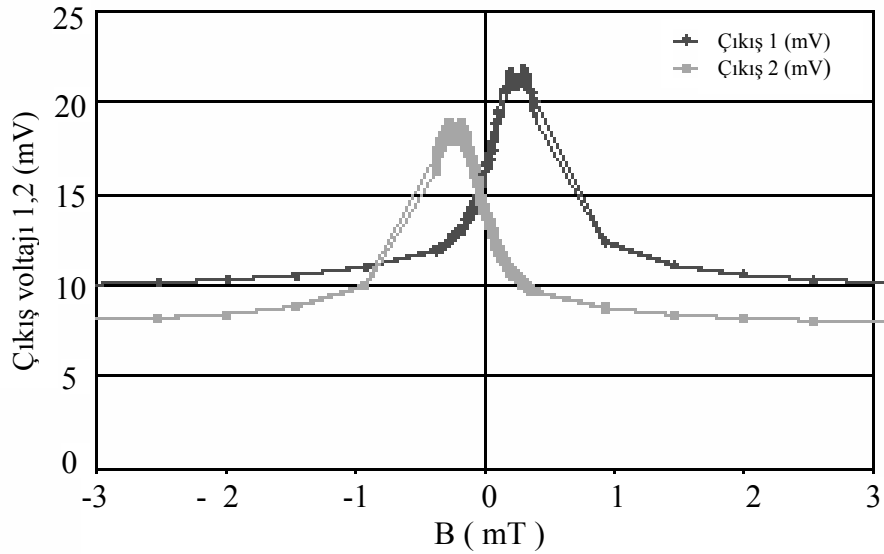
Dış bir dc ya da düşük frekanslı ac alanlara maruz kalan numunelerde manyetoempedansdaki büyük değişim ve düşük manyetik alanlarda numunelerin manyetik özelliklerinin yüksek hassasiyeti, manyetik alan sensörleri için bu malzemeleri çok kullanışlı hale getirir. Manyetik malzemeler içinde büyük manyetoempedans etki yeni manyetik alan sensörlerinin tasarımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Permalloylar da gözlenen GMI etki dc manyetik alan ölçümlerinde kullanılmaktadır [75].

Bir GMI sensör 10cm uzunluğunda iki tane PY79M şerit kullanılarak tasarlanmıştır. İki şerit mekaniksel olarak paralel yerleştirilmiştir. Fakat şeritlerin elektriksel bağlantısı seri olmayacak şekilde yapılmıştır (Şekil 3.41).

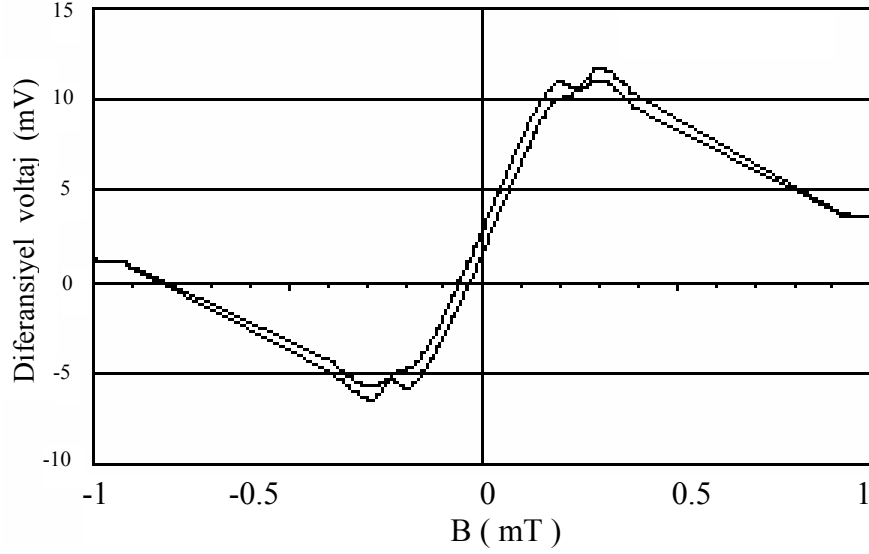
Şeritlere 100 kHz/30 mA akım uygulanmış ve her iki element için manyetik alana karşı çıkış voltajı Şekil 3.42 de gösterilmiştir. Şeritlerin empedansı ile orantılı ac voltajlar SR 830 lock-in yükselteç kullanarak ölçülmüştür. Diferansiyel voltaj Şekil 3.43 de gösterilmiştir. Manyetik alana karşı diferansiyel voltajın duyarlılığı $\pm 200 \mu T$ alan aralığı içinde lineerdir ve ortaya çıkan hassasiyet yaklaşık olarak 37 mV/mT olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.41. GMI sensör [75].



Şekil 3.42. Her bir çıkış için manyetik indüksiyon voltaj değişimi [75].



Şekil 3.43. Manyetik alana karşı diferansiyel çıkış voltajı [75].

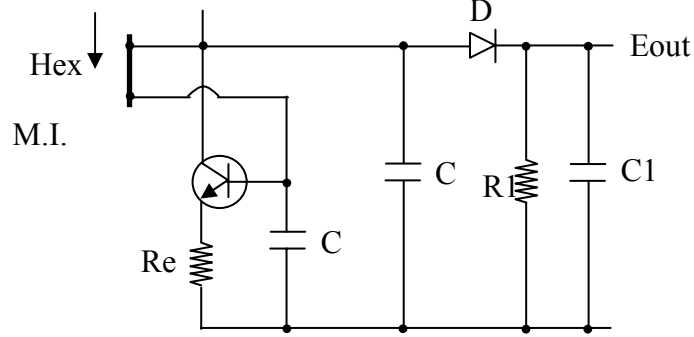
Manyetik alan tespiti ve mekaniksel yer değiştirme için bir sensör Chirac ve arkadaşları tarafından tasarlanmıştır [76]. Farklı uygulamalar için manyetik sensörlerin tasarımında manyetik amorf teller kullanılmaktadır. Bu çalışmada manyetik alanın ölçümü ve mekaniksel yer değiştirmeler için $125\mu\text{m}$ yarıçapında CoFeSiB amorf tel kullanılmıştır. Bu çalışmada 1, 2, 4.5 ve 8 cm uzunluğunda farklı amorf teller kullanılarak devre çıkışları yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde kısa telin alana bağlılığının lineer olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, sensörün büyüklüğü çok daha küçüktür ve bu da uygulama alanlarında kolaylık sağlamaktadır [76].

3.6.2.1 Colpitts Osilatör Tipi Alan Sensörü

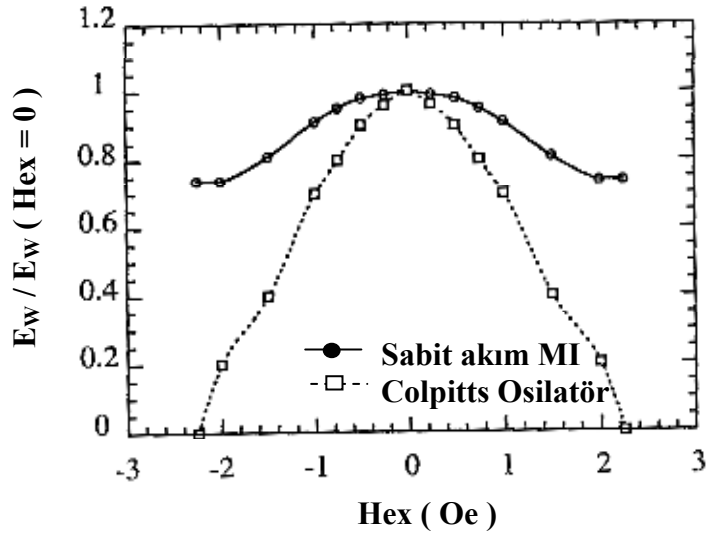
Manyetik alan sensörleri, dış dc alana ya da sürücü frekansın en az 10 kat daha düşük olduğu düşük frekanslı ac alanlar için manyetoempedansın yüksek hassasiyetine dayanarak kullanılmaktadır. Yüksek sürücü frekansı, parazit yer değiştirme akımları ve birbirine uymayan empedans gibi birçok probleme sahiptir. Bu sorunlardan sakınmak için MI element, colpitts osilatör ve multivibratör gibi osilasyon devreleri içinde devre indüktansı gibi kullanılmaktadır.

Şekil 3.44 (a), bir GMI elementin indüksiyon rezonansı ve C_1 ve C_2 sığaları kullanılarak bir colpitts osilatör türü GMI modül devresini göstermektedir [77]. 100 MHz civarında yüksek bir titreşim frekansı $30\mu\text{m}$ yarıçapında ve 1mm uzunluğunda FeCoSiB amorf GMI element ve $C_1=C_2=10\text{ pF}$ lık sığa değerleri kullanılarak devre

tasarlanmıştır. İndüktans (L) $0.56\mu\text{H}$ olarak tahmin edilmiştir. Osilatör devresi içinde, tel voltaj büyüklüğü (E_w), Şekil 3.44 (b) de gösterildiği gibi 2 Oe değerindeki dış alan için %100 azalış göstermektedir.



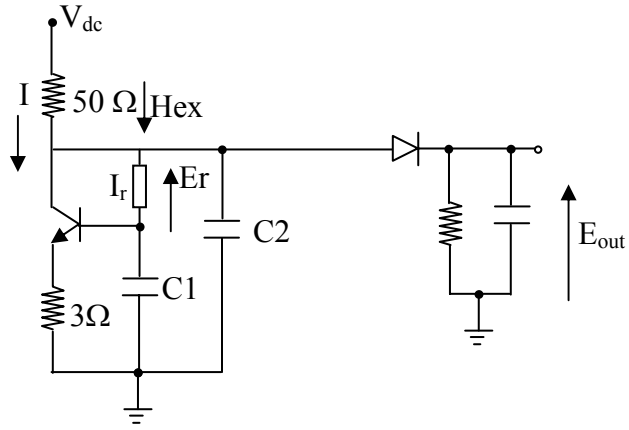
Şekil 3.44. (a). GMI colpitts osilatör genlik- modülasyon-demodülasyon tipi sensör modülü [77].



Şekil 3.44 (b). Uygulanan dış alan için tel voltaj değişimi [77].

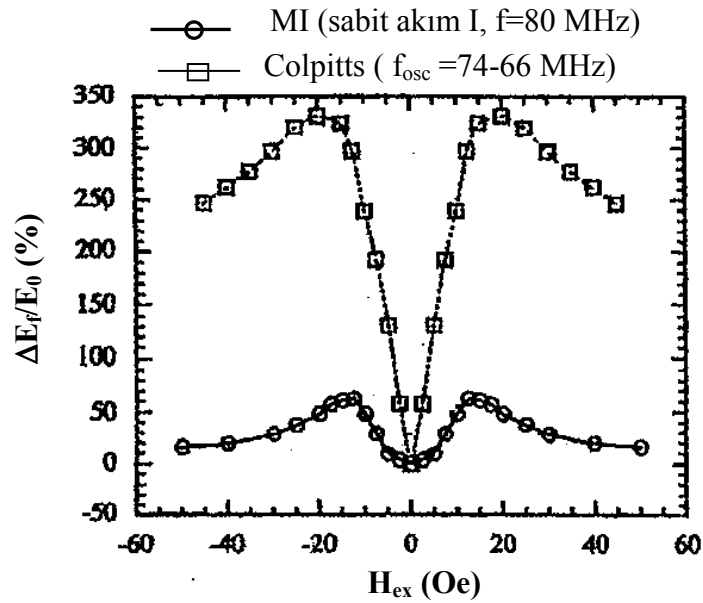
Hem empedans hem de tel akımı osilatör devresi içinde eş zamanlı olarak azaldığı için tel voltaj büyüklüğünün azalma oranı manyetoempedansın başlangıç değerinden yaklaşık beş kat daha büyüktür. Yani flux (akı) deteksiyon hassasiyeti yaklaşık 1 Oe değerinde %50 dir. Colpitts devre yaklaşık 8mW ($V_{CC}=1\text{V}$, $I=8\text{ mA}$) ile çalışır.

Şekil 3.45, tek bir MI element kullanılarak colpitts osilatör tipi alan sensörü için bir elektronik devre tasarımını göstermektedir [78]. Sensör yaklaşık 20 mW' lık ($V_{CC}=1.5\text{ V}$, $I=13\text{ mA}$) düşük güç tüketimi ile çalışır.



Şekil 3.45. ME colpitts osiyatör tipi alan sensörü [78].

Şekil 3.46, dış alan (H_{ex}) karakteristiğine karşı $\Delta E_f/E_{f0}$ değişimi görülmektedir. Osilasyon voltajının genliği (E_w), $H_{ex}=0$ da 0.13 voltur ve $H_{ex}=10$ Oe değerinde 0.44 volt değerine artış göstermektedir. Rezonans devre içinde akım genliği dış alan ile arttığı için değişim oranı 10 Oe'lik alan değerinde %240 dır.

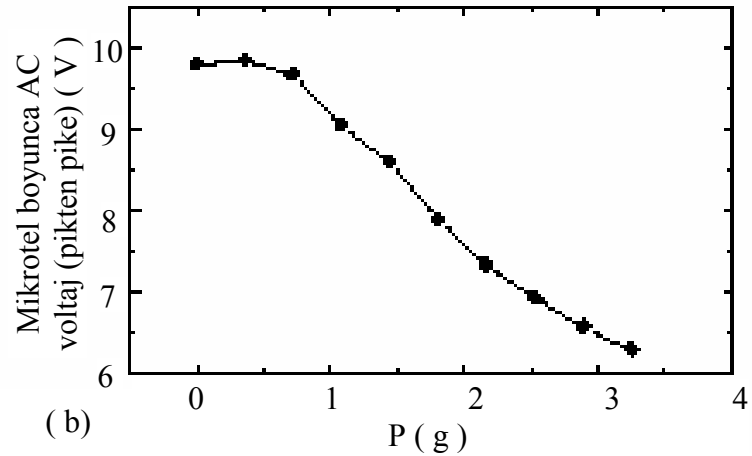
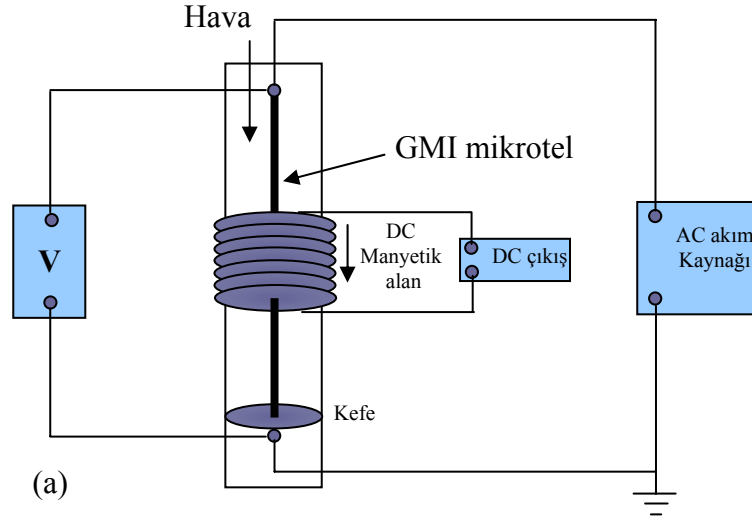


Şekil 3.46. Dış alan (H_{ex}) karakteristiğine karşı $\Delta E_f/E_{f0}$ değişimi [78].

3.6.3 Stres Sensörleri

Yüksek frekans akımı ile manyetize edilen numunelerin empedansı, uygulanan gerilme ya da bükme stres ile değişim göstermektedir. Uygulanan stres ile büyük değişim gösteren numuneler stres sensörü uygulamalarında kullanılmaktadır.

Kobalt oranının yüksek olduğu mikro tellerde yüksek GMI gözlenmiştir [79]. 373 K' de bir saat ısıl işlem gören $\text{Co}_{68.5}\text{Mn}_{6.5}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ mikro tel için GMI etki dış gerilme strese oldukça duyarlıdır. Şekil 3.47 de bu mikro tel tarafından ortaya çıkan GMI' a dayalı bir manyetoelastik sensörünün tasarımı görülmektedir. Mekaniksel ağırlıklar altında manyetoempedansdaki büyük değişimler ac voltaj değerinde büyük değişimlere neden olmaktadır.

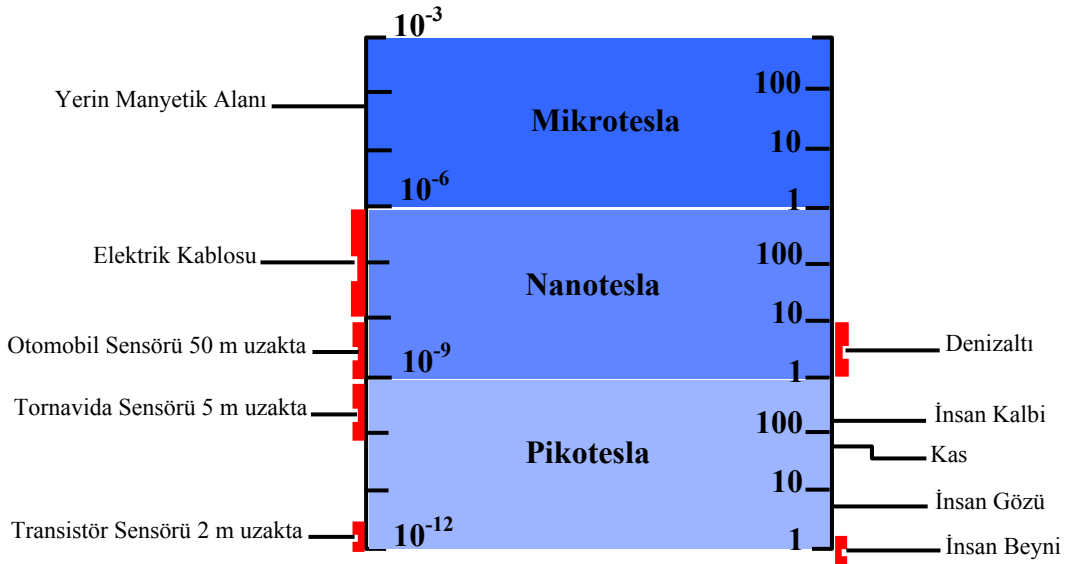


Şekil 3.47 (a). GMI etkinin strese bağlılığına dayalı manyetik sensörün şematik gösterimi, (b) Sensörün kalibrasyon eğrisi [79].

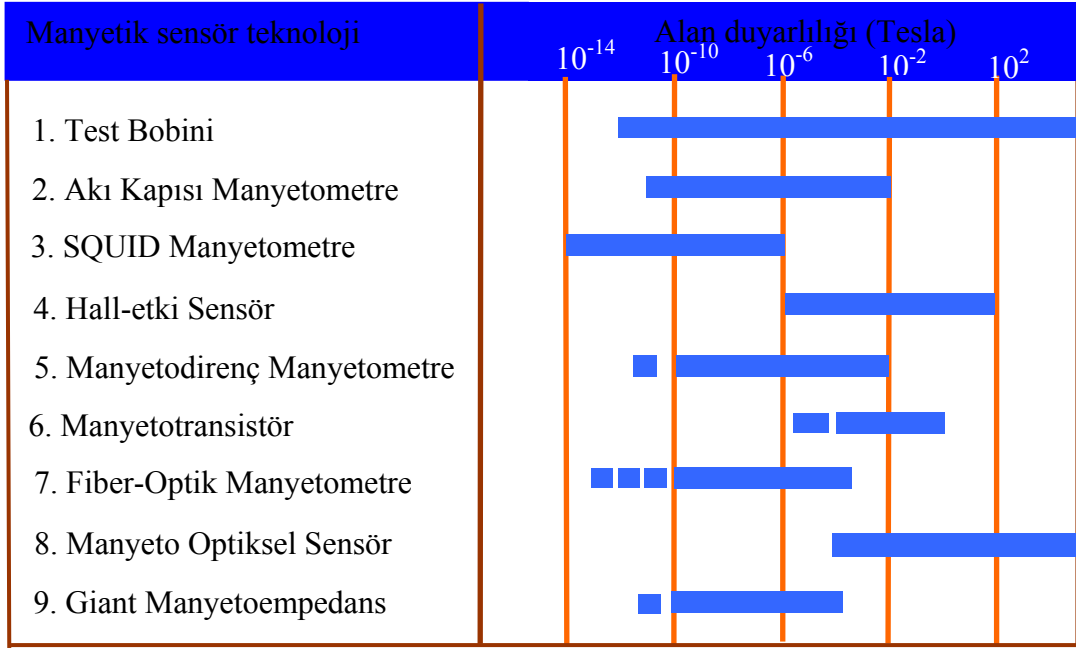
Çıkış voltajında görülen büyük değişim sensörün bu türünü küçük mekaniksel stresin tespiti ile alakalı farklı teknolojik uygulama alanlarında kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

3.6.4 Sensör Uygulamaları

GMI malzemenin empedansı, uygun şartlar altında (soft manyetik karakter, uygun manyetik anizotropi ve uygun geometri) statik manyetik alan ve mekaniksel stresler gibi dış etkenlerin varlığında değişime uğrar. GMI etkiye dayanan sensör uygulama alanları otomobil sanayi, endüstriyel ölçümler ve otomasyon, bilgisayarlar ve bilgi teknolojisi, bimanyetik ve sağlık, çevresel sensörler, güç elektroniği ve enerji, güvenlik, bilimsel ve akademik ölçümler olmak üzere geniş bir alana sahiptir. Küçük boyutlu manyetoempedans sensörler gelişmiş akıllı ölçümler ve kontrol sistemlerinin kurulması alanlarında geniş bir ölçekte talep görmektedir. GMI etkiye dayalı mikrosensörlerin elde edilmesi küçük boyutlu tellerin (yaklaşık 1-2mm uzunluğunda) kullanılması ile elde edilmiştir. Düşük alan duyarlılığı (voltaj ya da empedans değişimleri ile) birkaç MHz frekans değerlerinde ve 1 Oe değerinden daha düşük alanlarda $1.25\%/Am^{-1}$ ($100\%/Oe$) değerine ulaşabilir [80]. Yaygın olarak kullanılan manyetik sensörlerin algılama alan aralığı ile kıyaslanması Şekil 3.48 (a) ve (b) de verilmiştir.



(a)



Şekil 3.48. (b) Yaygın olarak kullanılan manyetik sensör teknolojilerin kıyaslanması [80].

Bu aletlerin çoğu yapı ve maliyet ile birbirlerinden oldukça farklılık göstermektedir.

Çizelge 3.4 Manyetoempedans ve stres empedans sensörlerin uygulama alanlarını göstermektedir.

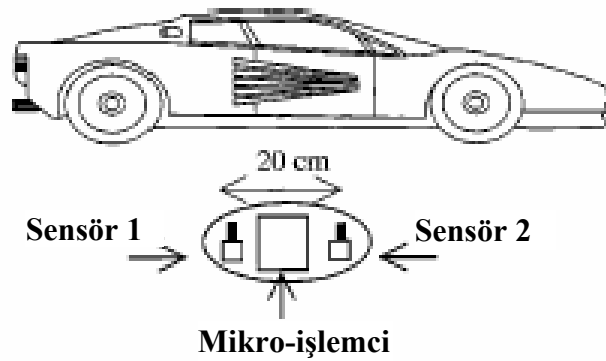
Çizelge 3.4. MI ve SI sensörlerin uygulama alanları.

Otomobil ve ulaşım	Elektronik pusula, hız sensörleri, tork sensörleri, yükseklik sensörleri, akım sensörleri, araba titreşim sensörleri, yağmur sensörü.
Bilgisayar ve bilgi sistemleri	Aktif koruyucular için terrestrial alan sensörü, mobil telefon için elektronik pusula, akım sensörleri.
Endüstriyel ölçümler ve otomasyon	Akım sensörleri (indüksiyon motorların ikincil akımı), NDT sensörler (çelik çubuklarda kusurlar), yer değiştirme sensörleri, tork sensörleri, hız sensörleri, basınç sensörleri.
Bio tıp, mühendislik ve sağlık kontrolü	Beyin tümör sensörü, parmak ucu kan damar titreşim sensörü, sürücüler için uykusuzluk sensörü, mechanocardiogram sensörler.
Bilimsel ve laboratuvar ölçümleri	Mili-gauss sensörler, koruyucu seviye.

Çizelge 3.4 den de verildiği gibi alan ve sterese duyarlı olan malzemeler sensör uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Manyetoempedans sensörlerinin uygulama alanlarından bazıları bu kısımda açıklanmıştır.

Trafik kazaları ve trafik ışıkları şehir içi trafiğinde büyük sorunlara neden olmaktadır. Bu tür sorunlardan sakınmak için şehir içindeki birçok yere trafik durumunu kontrol eden monitörlerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde ultra sonik sensörler ve video kameralar trafik durumunun kontrolü için kullanılmaktadır. Ancak bu kontrol sistemlerinin sayısı yüksek maliyetten dolayı yeterli değildir. Amorf teller içinde manyetoempedans etkiyi kullanarak yeni mikro manyetik sensörler geliştirilmiştir. Bu mikro manyetik sensörler yüksek hassasiyet (dc alan için 10^{-5} Oe ve ac alan için 10^{-6} Oe kararlılık) düşük güç tüketimi ve düşük maliyet (basit devre) ve yüksek performansa gibi özelliklere sahiptirler.

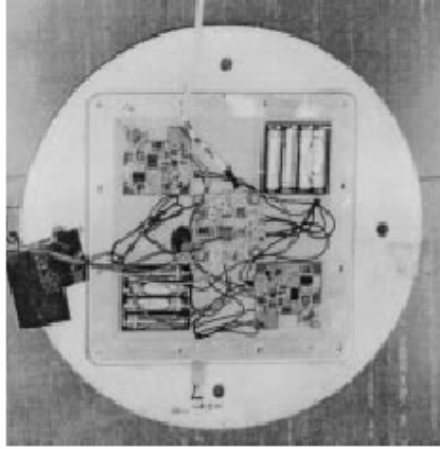
Bu amaçla aynı disk içerisine iki MI sensör, bir mikro bilgisayar ve bir yarıiletken IC bellek kullanılarak trafik arabası için yeni bir kontrol sistemi gerçekleştirilmiştir [81]. Oluşturulan alüminyum diskler Şekil 3.49 da gösterildiği gibi cadde üzerinde belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. Disklerin üzerinden bir araba geçtiği zaman MI sensörler araba kütlesinden kaynaklanan manyetik alanları dedekte edebilir. Elde edilen verilerin analizi mikro bilgisayar sistemi tarafından yapılır.



Şekil 3.49. Cadde üzerine kurulan bir mikro işlemci ve iki manyetoempedans sensör kullanılarak araba hassasiyet sistemi [81].

Şekil 3.50, bir prototip diskin fotoğrafını göstermektedir. Diskin yarıçapı 30cm ve yüksekliği 23mm' dir. MI sensörler arasındaki mesafe 20cm' dir. Sistem diski geçen 2000 araba için uzunluk, hız ve zamanı kaydedebilir. Sistemin, ME sensör ve mikro

bilgisayarın düşük güç tüketiminden dolayı 8 tane küçük batarya kullanılarak, 3 gün süreyle çalışabildiği rapor edilmiştir [81].



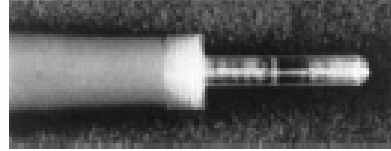
Şekil 3.50. İki manyetoempedans sensör ve bir mikro işlemciden oluşan proto-tip disk sisteminin fotoğrafı [81].

Şekil 3.51 de sürücüsüz araba teknolojisi için Japonya'da henüz geliştirilme aşamasında olan bir sistemin fotoğrafı görülmektedir [82]. Bu sisteme göre otoyolun üzerinde belirli aralıklarla yola gömülmüş manyetik işaretçiler bulunmaktadır. Ayrıca aracın ön kısmında bu işaretçilerden gelen manyetik sinyalleri algılayabilen alıcılar bulunmaktadır. Bu alıcılar tarafından bir mikro işlemciye aktarılan bilgiler aracın yol üzerindeki pozisyonunu koruması için kullanılmakta ve böylelikle araç sürücüye ihtiyaç duymadan hareket edebilmektedir [82].



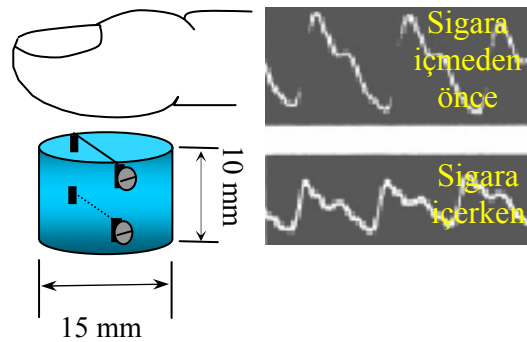
Şekil 3.51. GMI sensör kullanılarak manyetik hedef takip etme sistemi [82].

Cerrahi müdahalelerde beyin tümörünün yerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulur. Umut verici yöntemlerden biri, beyin tümörüne seçici olarak yapışan tek kolonlu antikorlarla kaplanmış manyetik parçacıklar tarafından üretilen manyetik alanın belirlenmesidir. Taşınabilir bir diferansiyel MI sensör tipi [83] 0.1 mOe değerine kadar küçük lokalize alanları hassas bir şekilde detekte edebilme kapasitesine sahiptir (Şekil 3.52).



Şekil 3.52. Dolma kalem tipi MI beyin tümör sensörü [83].

SI sensör çok küçük mekaniksel hareket ve insan bedeninin, bitki ve yapay yapıların titreşimlerini algılayabilir. Şekil 3.53, parmak ucu kan damar titreşim sensörünü göstermektedir. 20 μ m yarıçapında iki tane CoSiB amorf tel kullanılmıştır. En içe referans tel ve yüzeyde ise parmak ucunun temas ederek basınç uyguladığı tel bulunmaktadır [83]. Şekilde sigara içmeden önce ve içme esnasında parmak kontrollü pulse sensörünün dalga şekillenimi verilmektedir. Parmak kontrollü pulse sensörü sağlık durumu hakkında bilgi verir ve kan dolaşım sisteminin teşhisinde kullanılır [83].



Şekil 3.53. Parmak kontrollü puls sensörü [83].

4. DENEYSEL METODLAR

4.1. Giriş

Amorf malzemelere uygulanan ısıl işlemler (fırlama, akım altında ve alan altında) malzemelerin başlangıçta sahip olduğu manyetik özellikleri değiştirmektedir. Bu bölümde ilk olarak numune hazırlanması ve fırlama işlemi verilmiştir. Daha sonra amorf ve ısıl işlem gören numunelerin manyetik ve manyeto-elastik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan M-H ölçüm sistemi, manyetoempedans ve stres-empedans ölçüm sistemi ve son olarak da vibrating-reed metodu ölçüm sistemi anlatılmıştır.

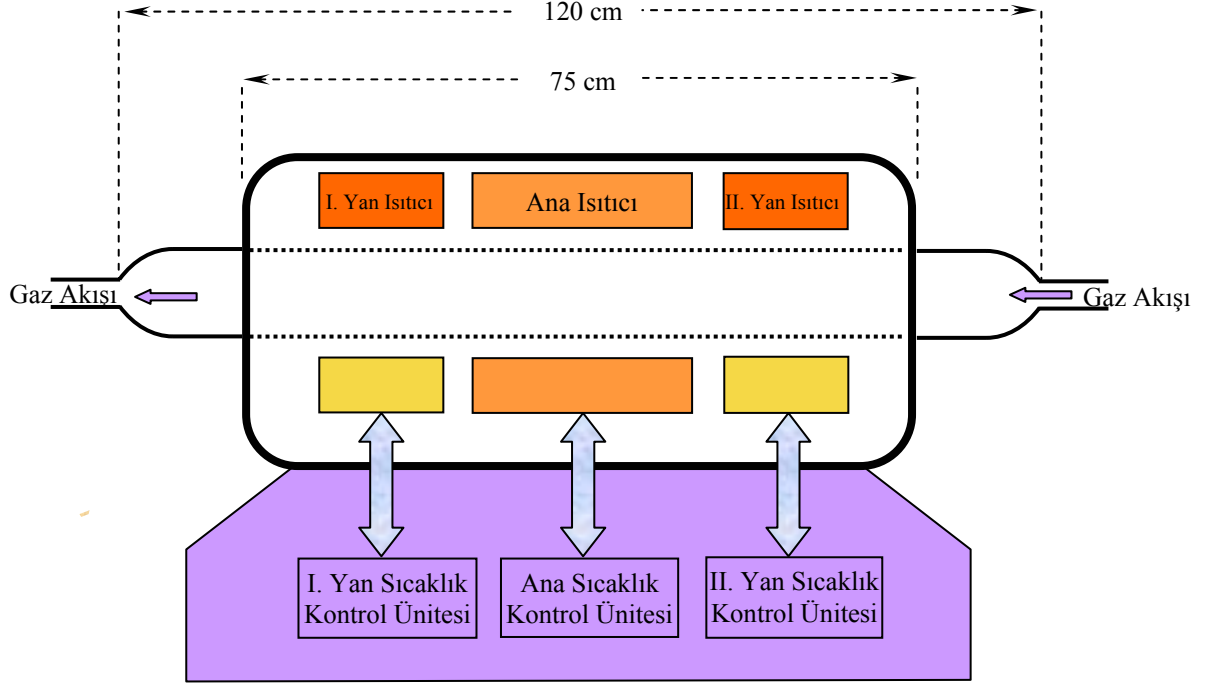
4.2. Örneklerin Hazırlanışı ve Isıl İşlemler

Bu çalışmada tel formunda olan Fe ve Co bazlı numuneler kullanıldı. Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan teller 10 cm uzunluğunda kesildi. Numunelerin kesim işlemi, kenarlarının çatlaması sonucu oluşabilecek güçlü streslerin önlenmesi amacıyla, keskin bir makas kullanılarak yapıldı. Isıl işlemden önce ve sonra yüzeylerinde oluşan tozları ve organik safsızlıkları ortadan kaldırmak için tüm numuneler aseton kullanılarak temizlendi. Çizelge 4.1 de bu çalışmada kullanılan tüm numunelerin kompozisyonları verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan bu numuneler Çizelge 4.1 den de görüleceği üzere pozitif, negatif ve yaklaşık sıfır magnetostriction değerlerine sahiptir.

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan numunelerin kompozisyonları.

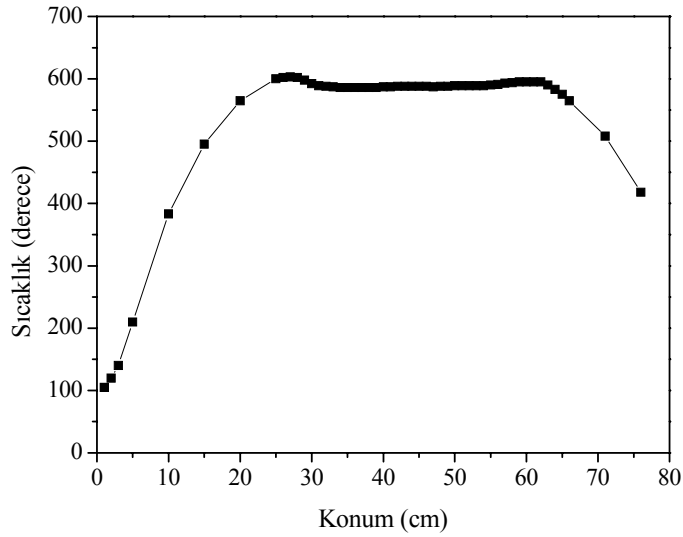
Numune	Doyum manyetizasyon değeri M_s (T)	Magnetostriction değeri ($\lambda_s \times 10^{-6}$)
$\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ (tel)	0.64	-3.2
$\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ (tel)	1.6	+32.00
$\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ (tel)	1.03	+12.00
$(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ (tel)	0.8	~ 0

Bu çalışmada kullanılan tüm amorf ferromanyetik numuneler 460°C de farklı sürelerde ve hava ortamında ısıl işleme tabi tutuldu. Örneklerin ısıl işlemleri Şekil 4.1 de şematik olarak gösterilen tüp fırın düzeneği kullanılarak gerçekleştirildi. Kullanılan tüp fırın iki yan ısıtıcıyla birlikte üç ısıtma bölgesine sahiptir.



Şekil 4.1. Tüp fırın ve sistemin şematik gösterimi.

Ana kontrol birimi, zamanla meydana gelen sıcaklık dalgalanmasını $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ den tutabilme kapasitesindedir. Numuneler 460°C lik sıcaklığa ulaşan fırın içerisine yerleştirildi ve ısıl işlem süresi bittiğinde doğrudan çıkarılarak hızlı bir şekilde soğutuldu. Numuneler üzerinde sıcaklık gradyenti oluşturmamak için fırının sıcaklık profili çıkarılarak numunelerin fırın içindeki konumu belirlendi ve numuneler o konumda ısıl işleme tabii tutuldu. Elde edilen fırın sıcaklık profili Şekil 4.2 de verilmiştir. Şekil 4.2 den de görüleceği üzere sıcaklık yaklaşık 30-60cm aralığında homojen olmaktadır bu nedenle ısıl işlem görecektür numuneler, fırının bu aralık içinde kalan kısmına yerleştirildi.

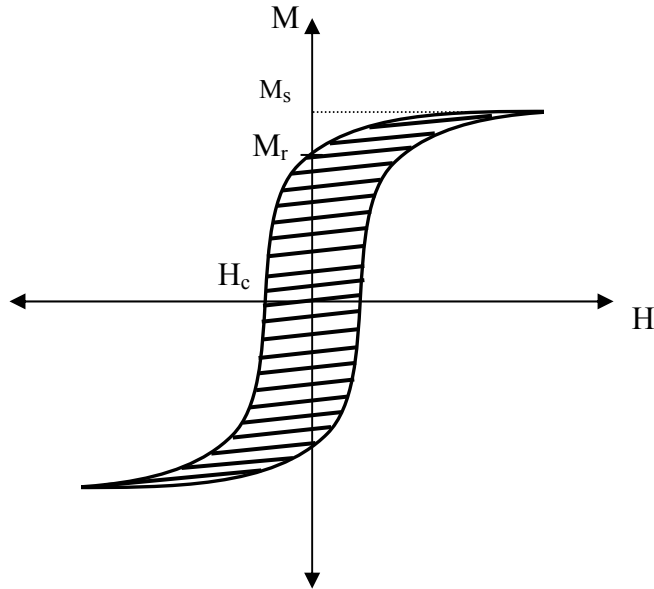


Şekil 4.2. Tüp fırın sisteminde sıcaklık dağılımı.

4.3. Manyetik Ölçümler

4.3.1. M-H Ölçüm Sistemi

Amorf numunelerin manyetik parametreleri olan coercivity, remanent manyetizasyon, manyetik alınganlık ve anizotropi sabiti değerleri M-H (manyetik hysteresis) eğrilerinden yararlanılarak belirlenebilir (Şekil4.3).



Şekil 4.3. Uygulanan alan ile tipik bir malzemenin manyetizasyon değişimi. Burada H_c coercivityi, M_r remanent manyetizasyonu, M_s doyum manyetizasyonu değerlerini göstermektedir.

M-H ölçüm sisteminde Şekil 4.4 'de gösterildiği gibi çıkarma (substruction) metodu kullanılmıştır. Bu metot da search bobinleri bir köprü devresi içine yerleştirilmiştir. Yani numune yok iken alan uygulandığında toplam çıkış sıfırdır. Search (pick-up) bobinlerinden birine yerleştirilen ferromanyetik malzeme, manyetik alana maruz kaldığında search bobininde oluşan voltaj, V_1 , Faraday yasasına göre,

$$V_1 = n\mu_o \frac{d}{dt}(A_c H + A_s M) \quad (4.1)$$

ile verilir. Burada μ_o boş uzayın geçirgenliği, M manyetizasyon, A_c search bobinin kesit alanı, A_s numunenin kesit alanı ve H ise dış manyetik alandır. Numune yerleştirilmeyen diğer bobinde oluşan voltaj, V_2 ;

$$V_2 = n\mu_o \frac{d}{dt}(A_c H) \quad (4.2)$$

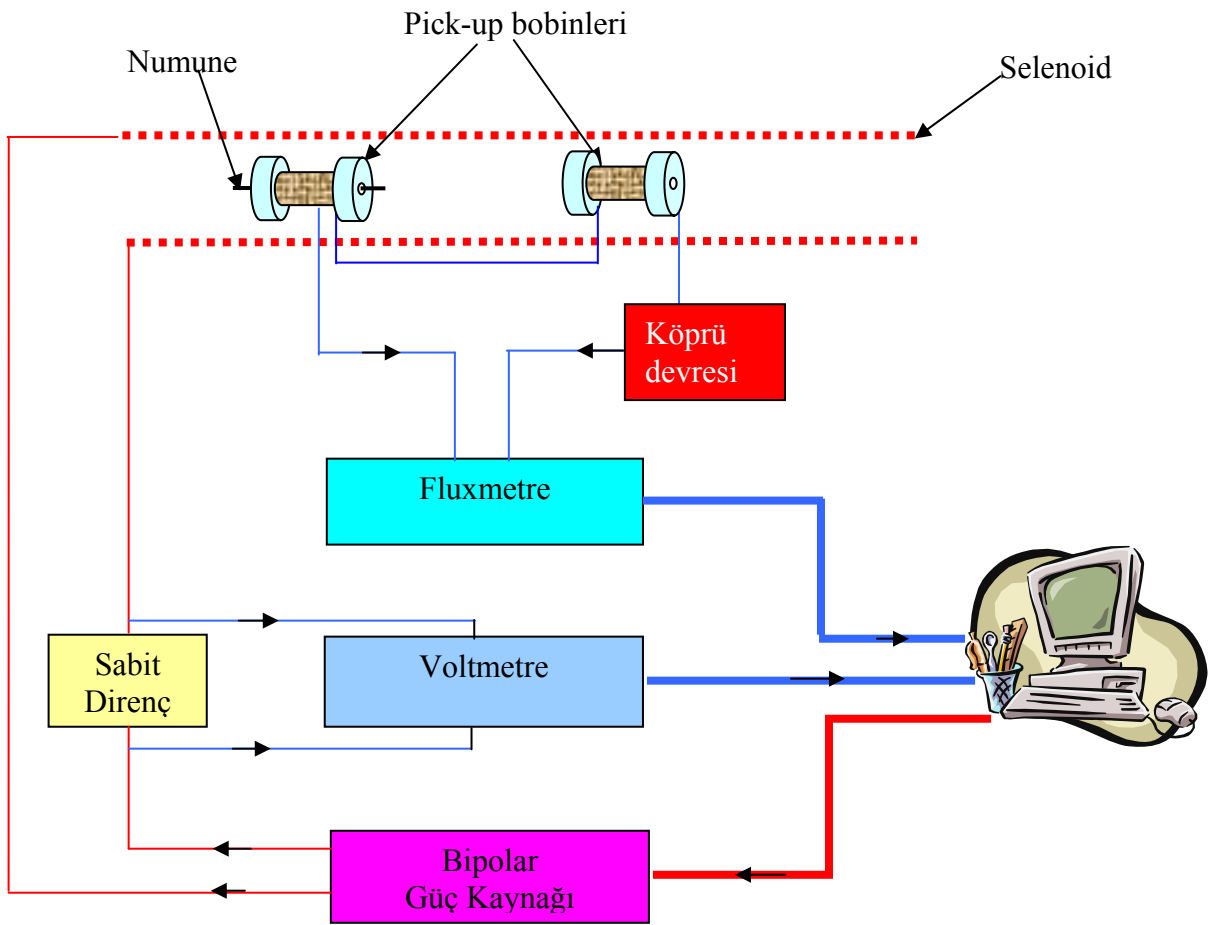
eşitliği ile verilir. Toplam çıkış, V_o , 4.1 ve 4.2 denklemleri arasındaki farktır, yani;

$$V_o = n\mu_o \frac{d}{dt}(A_s M) \quad (4.3)$$

eşitliği ile verilir. Malzemenin manyetizasyonundaki değişim toplam çıkışın zaman integrali ile orantılıdır. Böylelikle elde edilen voltaj integre edilerek M değeri uygulanan manyetik alanın fonksiyonu olarak bu metotla ölçülebilir.

Bu amaçla laboratuvarımızda bulunan cihazlar kullanarak Şekil 4.4 de şematik gösterimi verilen M-H ölçüm sistemi kurulmuştur. Sistem tamamen bilgisayar kontrollü olup veriyi toplama ve işleme tarafımızdan yazılan bir program yardımıyla yapılmıştır. Kepco marka bipolar güç kaynağı tarafından uygulanan akımla selenoid içinde dc bir manyetik alan oluşturulmaktadır. Uygulanan akım -10 ile 10 A (± 40 V) arasında değişebilmektedir bu da maksimum ± 10000 A/m lik bir manyetik alan üretmektedir. Düşük alan ölçümlerinde daha hassas ölçüm için selenoide bir ara direnç bağlanmış ve akım ± 1 A (veya voltaj ± 20 V) değerleri arasında taranarak ölçümler yapılmıştır. Denklem 4.3'e göre elde edile sinyalin integrasyon işlemi için Lakeshore Integrating Fluxmeter kullanılmıştır. Sistemde güç kaynağından selenoide bir akım uygulanmakta,

uygulanan voltaj veya akım değeri standard direnç vasıtası ile okunup bilgisayara aktarılmaktadır. Bu voltaj değeri pick-up çıkışı fluxmetre tarafından okunup integre edilerek bilgisayara aktarılmıştır. Bu işlem ile negatif maksimum alan değerinden başlayıp pozitif maksimum alana kadar devam edip tekrar negatif maksimum alana geri dönülerek full manyetik histeresis eğrisi elde edilmiştir. Eğriyi elde etme süresi 20-60 saniye civarındadır ve her egride 300-700 arasında veri toplanabilmektedir. Ayrıca çok hassas ölçümler için, özellikle ultra soft manyetik maddeler için, program düşük alan bölgesinde daha çok veri alabilecek şekilde ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.4 (a). M-H ölçüm sistemi.

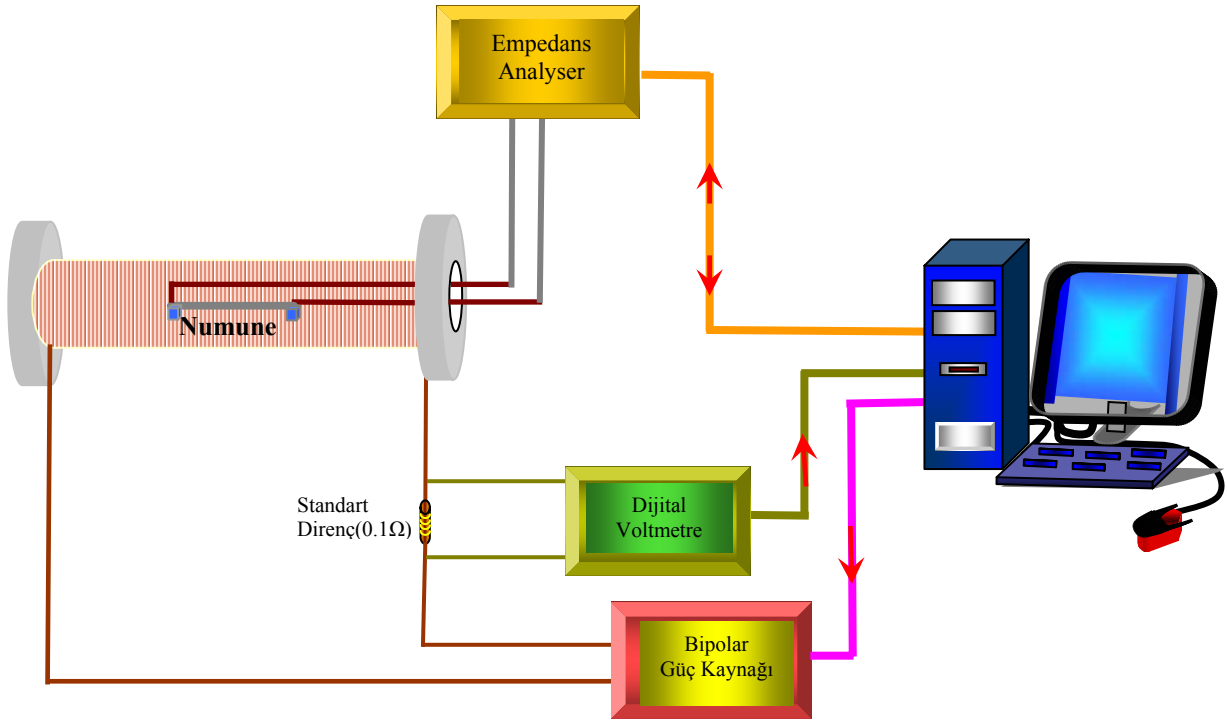


Şekil 4.4 (b). M-H ölçüm sisteminin fotoğrafı.

4.4. Manytoempedans ölçüm sistemi

Numune empedansının manyetik alanla değişimini ölçmek için Şekil 4.5 de verilen sistem kurulmuştur. Sistem tamamen bilgisayar kontrollü olup veriyi toplama ve işleme kendimiz tarafından Testpoint yazılım dili kullanılarak yazılan bir program tarafından yapılmıştır. Sistemde Kepco bipolar güç kaynağı tarafından uygulanan akımla Helmholtz bobinleri (veya selonoid) içinde dc manyetik alan (H) oluşturulmuştur. Kepco güç kaynağının uygulayacağı voltaj (veya akım) ayarlanarak numuneye istenen manyetik alan uygulanabilmektedir. Uygulanan akım -10 ile 10 A (± 40 V) arasında değişebilmektedir bu da Helmholtz bobinleri arasında (veya selonoid içinde) maksimum ± 7800 A/m lik bir manyetik alan üretibilme kapasitesindedir. Numune empedansı HP4294 empedans analizör ve HP4294A probu kullanılarak ölçüldü. Kontaklar iletken gümüş boya kullanılarak yapıldı. Numunenin uç noktalarına ac I akımı empedans analizör kullanılarak uygulandı aynı zamanda bu kontaklar

vasıtası ile numunenin empedans değeri okundu. Her manyetik alan değerinde empedansın 5 ile 10 arasında değişen ortalaması alındı ve set edilen manyetik alan değerindeki empedans değeri bulundu. Manyetik alan + maksimum alan değerinden – maksimum alan değerine kadar istenen manyetik alan basamakları ile değiştirildi ve her alan değerinde empedans (Z) bulunarak Z-H eğrisi elde edildi.



Şekil 4.5 (a). Manyetoempedans ölçüm sistemi.

Tel ya da şerit şeklindeki soft bir amorf manyetik malzeme üzerinde, bir AC akım geçirildiğinde iletken içinde ek bir indüksiyon voltaja neden olan enine bir manyetik alan ortaya çıkar. Dış bir dc alan (H_{dc}) tel ya da şerit şeklinde düzenlenen malzeme eksenine paralel uygulandığında, ortaya çıkan bu voltajın büyüklüğü (V) empedans içindeki azalmadan dolayı değişecektir. Empedans analyzer, eşitlik 4.4 de verilen kompleks empedansın bu alana bağlılığını hesaplar.

$$Z = R(\omega, \mu(\omega, H_{DC})) + jX(\omega, \mu(\omega, H_{DC})) \quad (4.4)$$

Manyetoempedans oranı;

$$\Delta Z/Z (\%) \text{ veya } MI(\%) = \frac{(Z)_{HDC=0} - (Z)_{HDC}}{(Z)_{HDC}} * 100(\%) \quad (4.5)$$

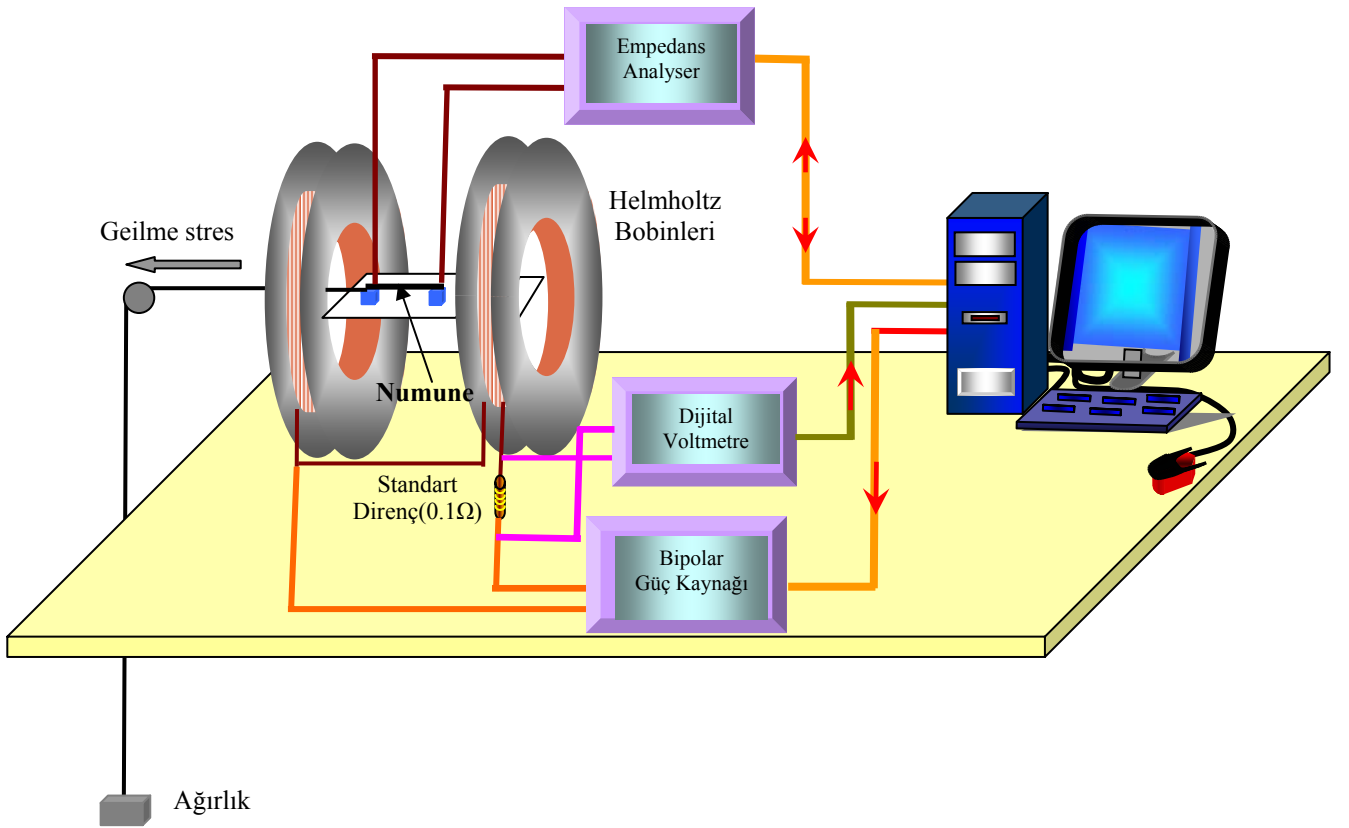
eşitliği ile verilir, burada $(Z)_{HDC=0}$ sıfır dc manyetik alanda amorf malzemenin empedans değerini ve $(Z)_{HDC}$ uygulanan maksimum dc manyetik alandaki empedans değerini ifade etmektedir. Dış dc manyetik alan, selenoid veya Helmholtz bobin sistemi kullanılarak uygulanır.



Şekil 4.5 (b). Manyetoempedans ölçüm sisteminin fotoğrafı.

4.5. Stres-Empedans Ölçüm sistemi

Stres-empedans ölçümlerinde, numunelere, oluşturulan bir mekanik sistem vasıtasıyla tensile (gerilme) ve torsion (bükme) stres-empedans (SI) ölçümleri alınmıştır. Bükme stresleri için manyetik alan altında numunelere saat yönü ve tersinde bükme stresler uygulanarak yüzde bükme-empedans (TI) değişimleri belirlenmiştir. Gerilme stresi ve bükme stresi altında alınan stres empedans ölçüm sistemleri sırasıyla Şekil 4.6 ve 4.7 de verilmiştir.

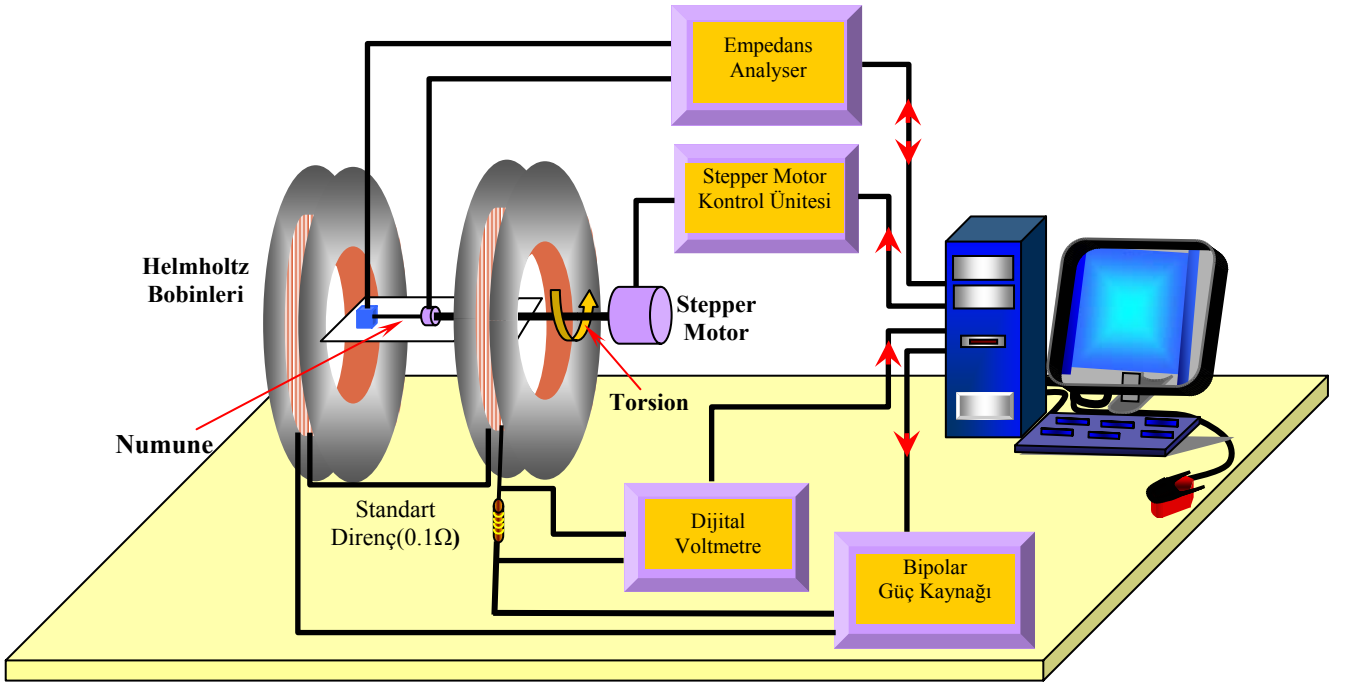


Şekil 4.6. Gerilme stres-empedans ölçüm sistemi.

Uygulanan gerilme stresi altında yüzde stres-empedans oranı (SI) aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$\Delta Z / Z_{\sigma} (\%) = \left[\frac{Z_{(\sigma)} - Z_{(\sigma_{\max})}}{Z_{(\sigma_{\max})}} \right] \times 100 \quad (4.6)$$

Burada $Z_{(\sigma_{\max})}$, uygulanan dış gerilme stresiindeki empedans değeridir.



Şekil 4.7. Bükme stres-empedans ölçüm sistemi.

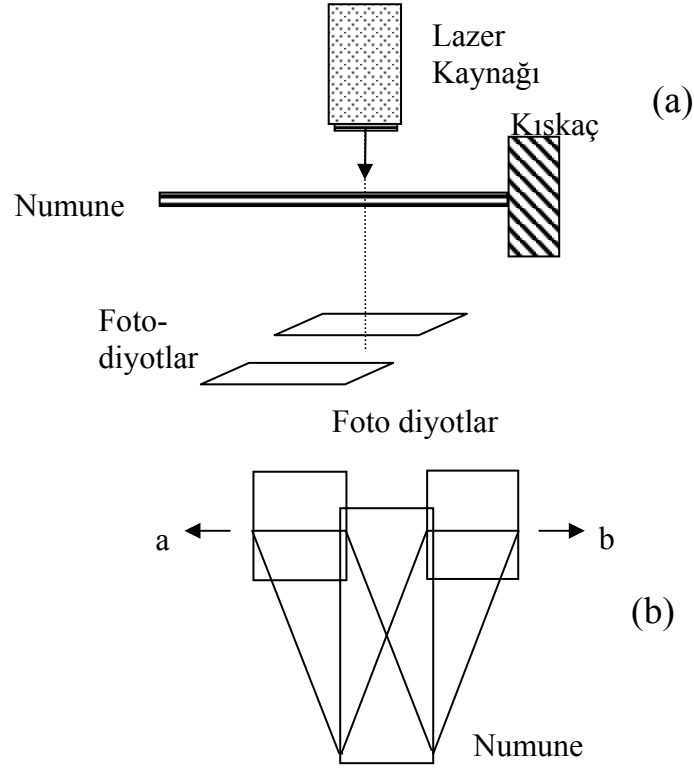
Buna paralel olarak uygulanan bükme stresi altında yüzde stres-empedans oranı (TI) aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$(\Delta Z / Z)_{\xi} (\%) = \left[\frac{Z_{\xi} - Z_{(\xi \max)}}{Z_{(\xi \max)}} \right] \times 100 \quad (4.7)$$

Burada $Z_{(\xi \max)}$, uygulanan maksimum dış bükülme stresidir.

4.6. Boyuna Elastik Katsayısının Ölçümü

Boyuna elastik katsayısı, Young Modülü, birçok metolla ölçülebilmektedir. Bunlardan bazıları; vibrating reed metodu, rezonans-antirezonans metodu ve dalga yayılması metodudur [6,84,85]. Bunlardan en sık kullanılanı vibrating reed metodudur. Uygulanan alanın bir fonksiyonu olarak Young modülü(E) ölçümlerimizde, Berry ve Pritchett [84,85] tarafından geliştirilmiş olan vibrating reed metodu kullanılmıştır. Kullandığımız sistemde orjinal elektrostatik metot yerine optik dedektör sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.8.a).



Şekil 4.8. Numune titreşiminin optiksel dedektör sistemi.

Amorf numune, bir ucu 2.5cm serbest uzunlukta olacak şekilde bir kıskaç yardımıyla sıkıştırılmıştır. Kıskaç, sinüsoidal çıkışlı ve titreşim frekansı ayarlanabilir bir sinyal üretici ile mekaniksel bir titreştiriciye bağlanmıştır. Kıskaçın titreşimi numunenin salınımına yol açar. Numune titreşim modlarından biri rezonans frekansa ulaştığında, salınımın genliği maksimum bir değere ulaşır.

Titreşim genliği ölçüm sisteminin kaynağı a ve b iki foto-diyot olmak üzere Şekil 4.8 b de gösterilmiştir. Numune lazer kaynağı ve foto-diyotlar arasındadır. Foto-diyotların çıkışı bir fark yükselteciye bağlanmıştır. Titreşim olmadığı zaman fark yükseltecinin çıkışı sıfırdır.

Çünkü a ve b foto-diyotları aynı miktarda ışık alır. Numune titreşmeye başladığı zaman örnek bir foto-diyottan bir diğerine doğru (örneğin a diyotu) hareket eder. Bu durumda b foto-diyotu daha fazla ışık alır, bu nedenle $V_b > V_a$ olur. Çıkış fark yükseltecinden alınır. Çünkü $V_0 = V_b - V_a$ 'dır. Rezonans frekansında bu titreşim, fark yükseltecinden yüksek genlikte sinüsoidal bir çıkış alınmasına sebep olur. Bu çıkış lock-in yükselteceye bağlanmıştır. Aynı zamanda sinyal üreticinin çıkış referans sinyali olarak lock-in yükselteceye bağlanmıştır ve lock-in yükseltecin çıkışı direkt olarak titreşim genliği ile

orantılıdır. Rezonans frekansı bir frekans sayıcı tarafından okunmaktadır. Frekansın fonksiyonu olarak (E) Young modülü aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$E = \frac{\pi MI^4}{4\alpha_n^4 r^4} f^2 \quad (4.8)$$

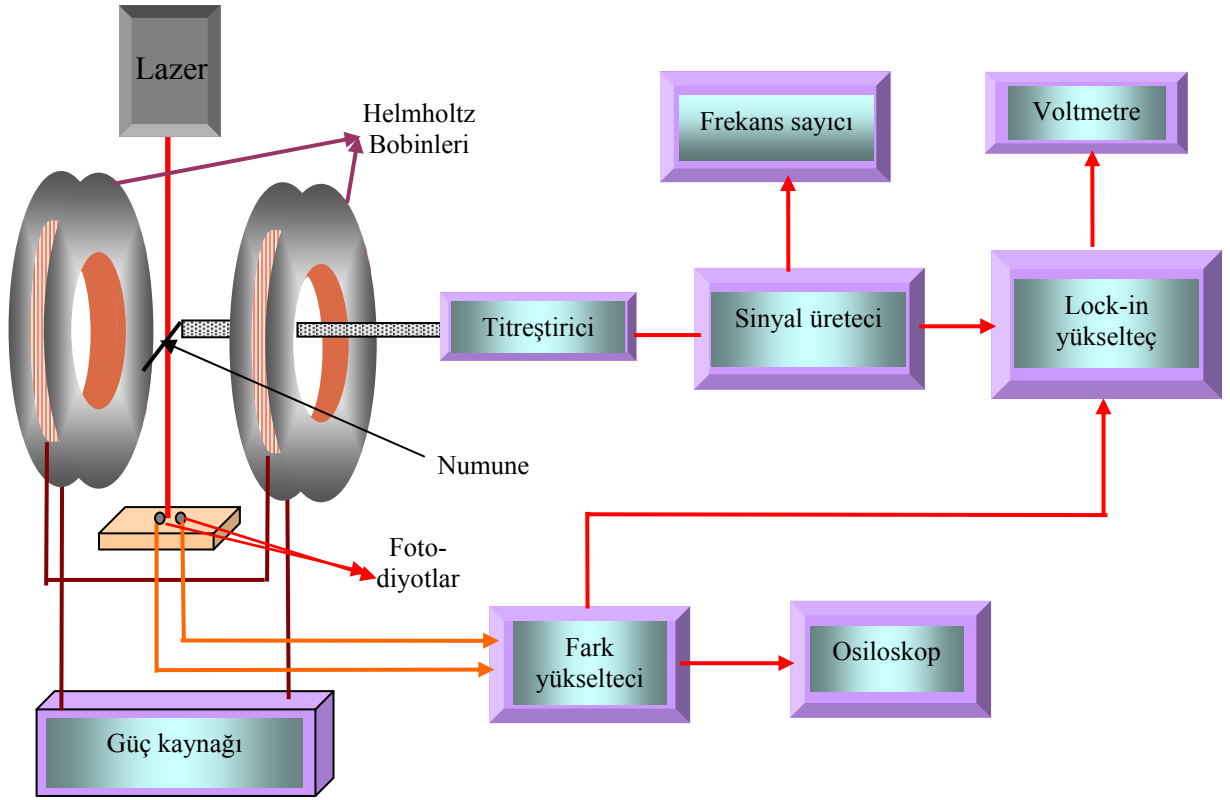
Denklemdaki M indirgenmiş kütlelerdir, α_n titreşim mod parametresidir. Mod parametreleri (α_n), $\alpha_1=0.29843\pi$, $\alpha_3=1.25013\pi$ değerlerine sahiptir, I numune uzunluğu, r yarıçap veya kalınlıktır. Young modülü 4.8 denklemi ile hesaplanmaktadır. Fakat young modülü I^4/r^4 ile orantılıdır ve r telin uzunluğu boyunca değişebilmektedir. Sonuç olarak I nin veya r nin ölçümünde küçük bir hata E 'nin değerinde büyük bir hataya neden olur. E 'nin tam değerini almak yerine $\frac{E(H)}{E_s}$ H 'ın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Denklem 4.8 kullanılarak titreşim frekansı ve boyuna elastiki katsayısı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi alınabilir.

$$\frac{E(H)}{E_s} \left[\frac{f(H)}{f_s} \right]^2 \quad (4.9)$$

denklemindeki f(H) rezonans ve f_s doyumdaki frekans değeridir.

Titreşim frekansını yani elastik katsayısını manyetik alanın bir fonksiyonu olarak incelemek için yarıçapı 15 cm olan bir çift Helmholtz bobini DC bir güç kaynağına bağlanmıştır ve DC güç kaynağından uygulanan akım değiştirilerek numuneye uygulanan manyetik alan şiddeti değiştirilir (Şekil 4.9).

Her bir ölçümden önce örneğin temel bir modunun frekansı ölçülerek, daha sonra ikinci ve üçüncü modların frekansı ölçülmüştür. Uygun şartlar altında mod frekansları Çizelge 4.2 de gösterildiği gibi değişmektedir. Genelde ölçümlerde 2. veya 3. titreşim modu kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Elastik katsayısı ölçüm sisteminin şeması.

Çizelge 4.2. Numune titreşim modlarının görelî olanları.

Titreşim Modu	Frekans Oranları				
	1	2	3	4	5
1	1				
2	6.27	1			
3	17.55	2.80	1		
4	34.40	5.49	1.96	1	
5	56.80	9.07	3.24	1.65	1

4.7. Deneysel Hata Kaynakları

Deneysel çalışmalarda ortaya çıkabilecek hata kaynakları ısıtma işlem ve ölçümler esnasında kaynaklanan hatalar olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Yapılan ısıtma işlemlerinde set edilen sıcaklık değerleri için fırın profili çıkarılarak numunelerin ısı dağılımının homojen olduğu bölgeye konulmuştur. Ancak bu çalışmada çok yüksek sıcaklıklara çıkılmadığı için profilde görüleceği üzere set edilen sıcaklığın sabit olduğu bölgede az da olsa dalgalanmalar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla çok azda olsa ısıtma işlem esnasında ısı gradyenti oluşabilmektedir. Ayrıca akım altında yapılan ısıtma işlemleri hava ortamında yapıldığı için tel yüzeyinde oksitlenme olabilmekte ve bu da homojenliği etkilemektedir.

Bu çalışmada malzemelerin strese çok duyarlı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle manyetoempedans ve stres empedans ölçümlerinde numuneler klepslere tutturulurken çok dikkat edilmesine rağmen sabitleme yapılırken azda olsa numunelere bir compressive stres etki edebilmektedir.

5. $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ VE $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ TELLERDE MANYETİK, MANYETOELASTİK, MANYETOEMPEDANS VE STRES-EMPEDANS ÖLÇÜMLER

5.1 Giriş

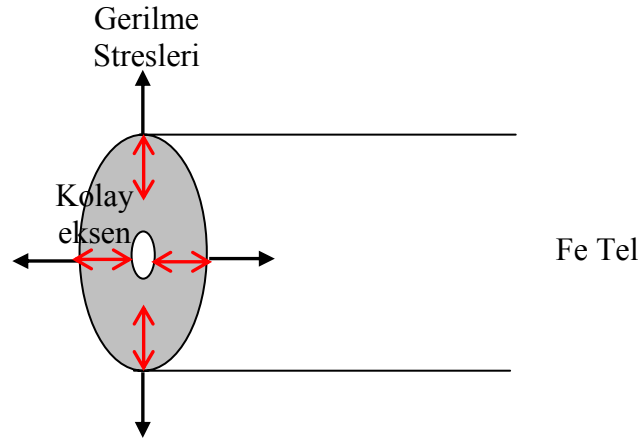
Pozitif magnetostriction değerlerine sahip olan ısıtılma işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin magnetostriction değerleri (λ_s) sırasıyla ~ 12 ppm ve ~ 33 ppm' dir.

Bu bölümde ilk olarak pozitif magnetostriction değerine sahip ısıtılma işlem görmemiş Fe-bazlı tellerin domain yapısı verilmiştir. Daha sonra ısıtılma işlem görmemiş ve ısıtılma işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin manyetik özelliklerinin belirlenmesi için M-H ve manyeto-elastik ölçümleri alınmış ve son olarak da manyetik alan ve stres gibi uygulanan dış parametreler ile manyetoempedans ve stres-empedans ölçümleri verilmiştir.

5.2. Isıtılma İşlem Görmemiş Fe-bazlı Tellerin Domain Yapısı

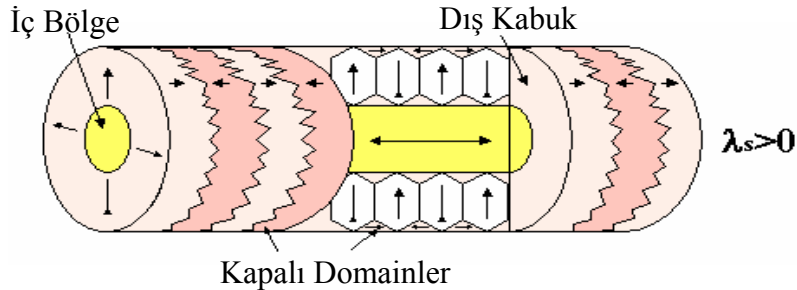
Amorf teller, in-rotating-water melt spinning tekniği ile üretilmektedir. Eritilen alaşım su ile temas ettiği zaman ilk olarak telin dıştaki yüzeyi katılaştır daha sonra içteki core katılaştır ve büzülür. Soğutma sürecinin bir sonucu olarak, dıştaki kabukta radyal bir gerilim ve içteki core' da ise eksensel bir gerilme stresi meydana gelmektedir. Mitra ve Vazquez sıcaklık gradyenti ile ortaya çıkan iç eksensel streslerin çok küçük olduğunu önermişlerdir [86]. İçteki core içinde eksensel yönde iç streslerin temel nedeni telin bu hacmindeki büzülme sayesinde. Fe-bazlı amorf teller için önerilen iç stres dağılımları Şekil 5.1 de verilmiştir.

Stres dağılımların bir sonucu olarak, pozitif magnetostriction değerine sahip telde (Fe-bazlı) içteki core' da bir eksensel anizotropi meydana gelmektedir ve telin dıştaki kabuk bölgesinde radyal gerilme stresleri güçlü bir radyal anizotropi ortaya çıkarmaktadır [86].



Şekil 5.1. Fe bazlı tel için manyetizasyonun kolay eksenini ve iç stres dağılımını [87].

Domain gözlemleri yalnızca tellerin yüzeyi üzerindeki domain'ler hakkında bilgi vermektedir [88]. Fe-bazlı teller maze domain düzenlenişine sahiptirler. Fe bazlı tellerin yüzeyi üzerinde maze domain düzenlenişinden dolayı manyetizasyon bileşenlerinin dıştaki kabuktan tel yüzeyine doğru dikey olduğu önerilmiştir [88]. Mohri ve çalışma arkadaşları [88] tüm zikzak maze domainlerin tel eksenine enine olacak şekilde sıralanmadığını gerçekten onlardan bazılarının tel eksenine göre $\pm 40^\circ$ - 70° aralığında sıralandığını gözlemlemişlerdir. Bu durum as-cast telin uzunluk boyunca homojen olmadığını ve katılma süreci esnasında rasgele bükülme streslerin mevcut olduğunu göstermektedir. Şekil 5.2, Fe-bazlı tel numuneler için önerilen manyetik domain yapıyı göstermektedir. Görüldüğü gibi pozitif magnetostrictona sahip tel iç kısmında numune eksenine boyunca yönlendirilmiş olan bir domaine sahiptir.

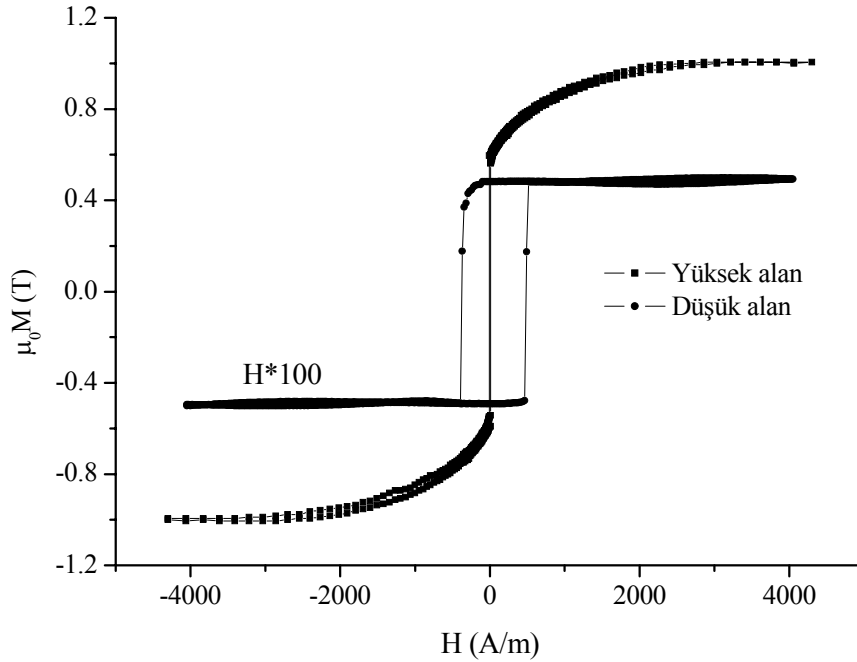


Şekil 5.2. Isıl işlem görmemiş Fe-bazlı (pozitif magnetostricton) tel numunelerinin manyetik domain yapıları [88,89].

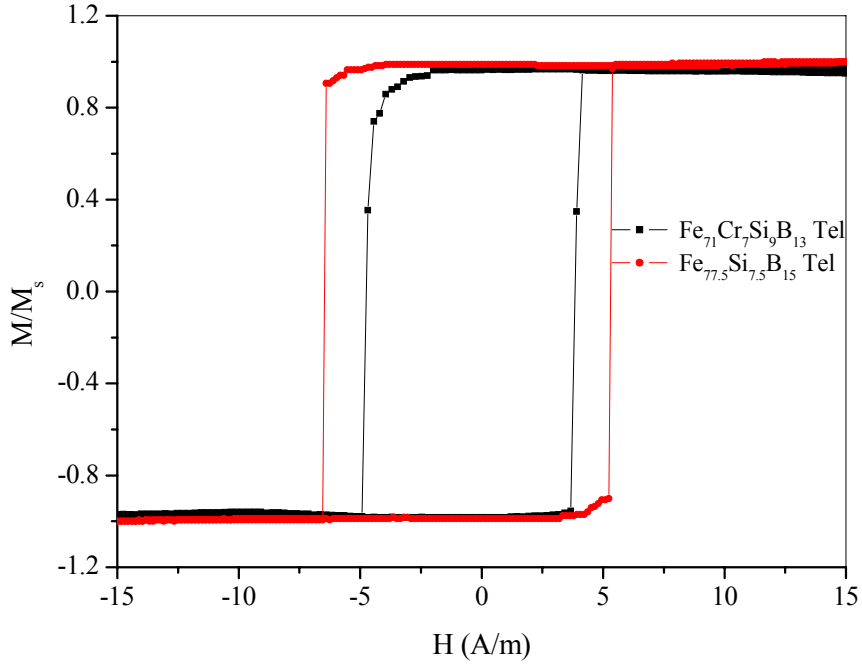
5.3. Manyetik Ölçümler

Amorf ferromanyetik malzemelerin soft özelliklerinin belirlenmesinde coercivity ve doyum manyetizasyon değerinin önemli bir rolü vardır. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için malzemelerin manyetik hysteresis eğrileri olarak adlandırılan M-H ölçümlerinin alınması gerekmektedir. Bölüm 4.3 de verilen M-H ölçüm sistemi kullanılarak ısıtılmış ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılma tabii tutulan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin M-H ölçümleri alınarak bu parametreler belirlenmiştir.

Şekil 5.3, ısıtılmış ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılma tabii tutulan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin düşük ve yüksek alan değerlerinde M-H eğrisini gösterirken Şekil 5.4, ısıtılmış ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılma tabii tutulan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin düşük alan değerlerinde M-H eğrisini göstermektedir. Şekil 5.3 ve 5.4 den de görüleceği üzere düşük alan değerlerinde büyük Barkhausen (LBJ) karakteristiği gözlenmiştir, bu bölgede manyetizasyon iç bölgedeki bir domain duvarının aniden hareket etmesiyle ortaya çıkmaktadır. Yani manyetizasyon, uygulanan alan yönünde aniden değişmektedir. Uygulanan alan daha fazla artırıldığında, dış kabukta manyetizasyon hem duvar hareketi hem de moment yönelimi ile meydana gelmektedir.



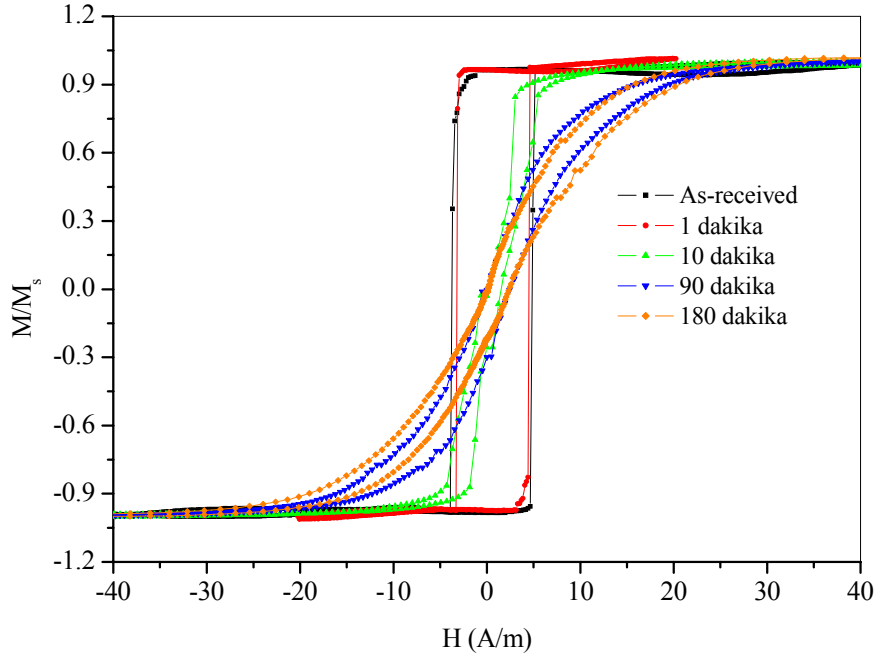
Şekil 5.3. Isıtılmış ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılma tabii tutulan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin M-H eğrisi. Düşük alan ölçümleri 100 defa büyütülmüştür.



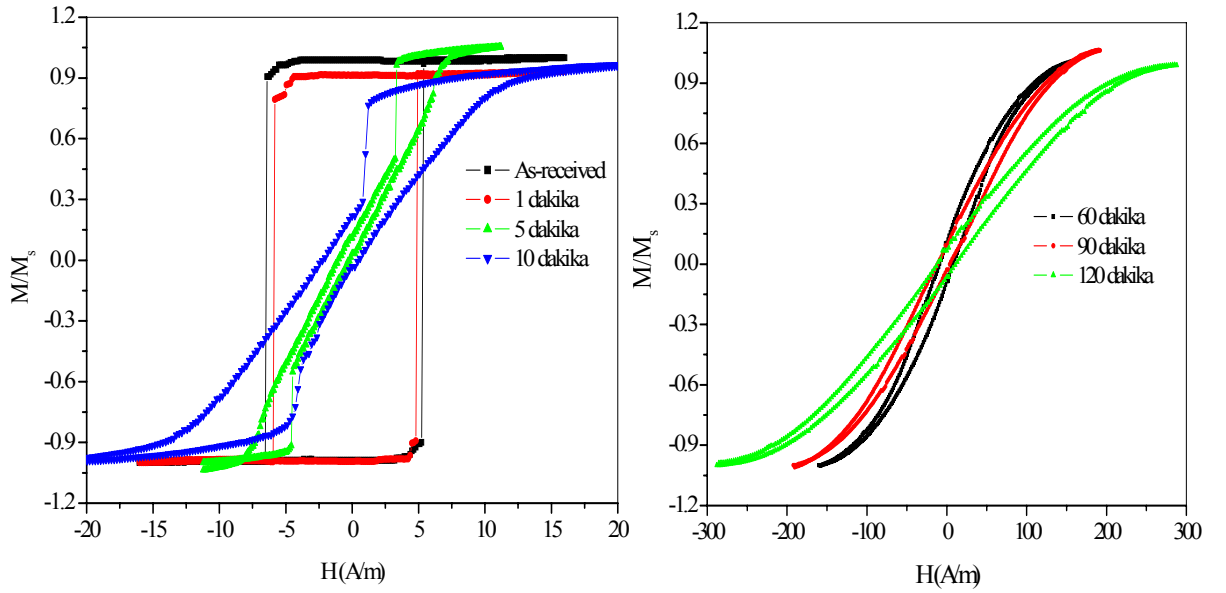
Şekil 5.4. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin düşük alan değerlerinde M-H eğrileri.

Şekil 5.3, ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tel numunenin doyum manyetizasyonu (M_s) değerinin 1.03T civarında olduğunu göstermektedir. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tel numunenin M-H eğrilerinden de görüleceği üzere, ısıl işlem görmemiş teller düşük bir alan altında (~ 4.3 A/m) amorf FeSiB tellerdekine benzer büyük bir Barkhausen sıçraması gösterirler [6].

Bu nedenle $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin domain yapısının, FeSiB teller ile benzer olduğu düşünülebilir. Böylece bu tellerin domain yapısının iç bölgede eksensel, dış kabuğun ise radyal yönde manyetize olduğu sonucuna varılabilir. Şekil 5.5 ve 5.6 de sırasıyla kısa, orta ve uzun süreli ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel numunelerin M-H eğrileri verilmiştir. Bu eğriler iç streslerin rahatlatılmasının çok hızlı bir şekilde olduğunu göstermektedir. 5 dakika süre ile 460 °C de ısıl işlem görmüş tellerde Barkhausen sıçraması ortadan kalkmakta ve tellerin M-H eğrileri kolayca manyetik doyuma gitmektedir. Bu sonuçta göstermektedir ki, üretim işleminin bir sonucu olarak ortaya çıkan stresin eksensel, radyal ve azimuthal olan üç bileşeni ısıl işleme kısmen kaldırılmakta ve geriye etkin olarak sadece şekil anizotropi kalır.

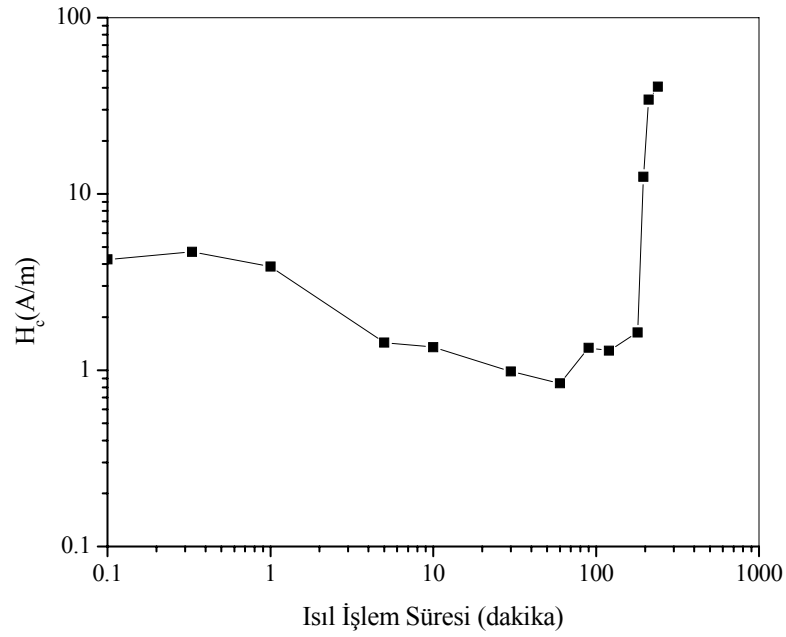


Şekil 5.5. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işleme tabi tutulmuş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin düşük alanda M-H eğrileri.



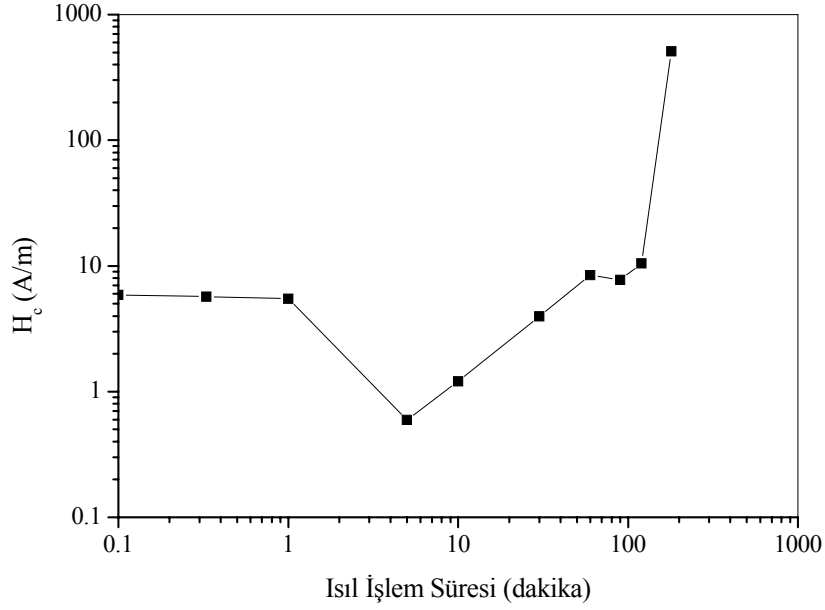
Şekil 5.6. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin düşük alanda M-H eğrileri.

Manyetik sertliğin başlangıçta azaldığını ve daha sonra arttığını göstermenin diğer bir yolu, ısıl işlem süresine karşı coercivity değişimini incelemekle mümkündür. Şekil 5.7, $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tel için $460\text{ }^{\circ}C$ lik ısıl işlem sıcaklığı altında coercivity' nin ısıl işlem süresine bağlılığını göstermektedir. Tellerin $460\text{ }^{\circ}C$ de bir saat ısıl işleme tabi tutulması coercivity değerini minimum ($\sim 0.84\text{ A/m}$) bir değere düşürmektedir. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tele $460\text{ }^{\circ}C$ de 90, 210 ve 240 dakika ısıl işlem uygulanması ile coercivity değerlerinin sırasıyla 1.34, 34 ve 40.5 A/m değerlerine arttığı görülmektedir (Şekil 5.7).



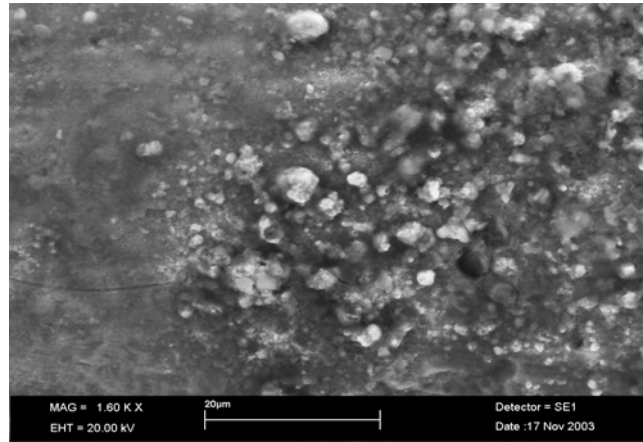
Şekil 5.7. $460\text{ }^{\circ}C$ de ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin coercivity değerlerinin ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.

$460\text{ }^{\circ}C$ de ısıtılmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telinin coercivity değerlerinin ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.8 de gösterilmiştir. Isıl işlem görmemiş numune için coercivity değeri $\sim 6\text{ A/m}$ olarak hesaplanmıştır. Coercivity değerinin $460\text{ }^{\circ}C$ de 1 dakikaya kadar olan ısıl işlem sürelerinde fazla bir değişim göstermediği belirlenmiştir. $460\text{ }^{\circ}C$ de 5 dakika ısıl işlem gören $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel için en düşük coercivity değeri, yaklaşık 0.6 A/m olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu sürede Barkhausen sıçramasının kaybolduğu görülmüştür. Isıl işlem süresinin artması ile coercivity değerinin arttığı belirlenmiştir. 120 dakikalık ısıl işlem sonunda coercivity değerinin $\sim 10.5\text{ A/m}$ iken 180 dakikalık ısıl işlem sonunda $\sim 508\text{ A/m}$ olacak şekilde keskin bir artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 5.8).



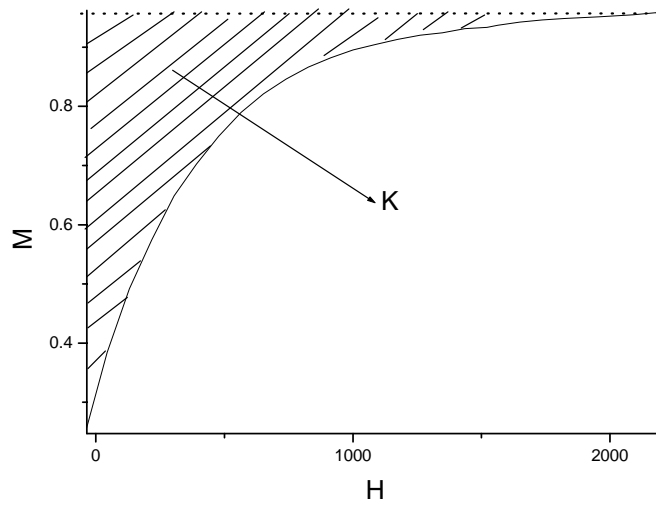
Şekil 5.8. 460 °C de ısıtılmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin coercivity değerlerinin ısıtılma süresine bağlı olarak değişimi.

Şekil 5.7 ve 5.8 de görüleceği üzere, coercivity değerinde keskin bir artış olmadan önce 120 dakikalık ısıtılma sonunda yüzey kristalleşmesine bağlı olarak coercivity değerinde küçük bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, Şekil 5.9 da $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tele 460 °C de 120 dakika ısıtılma gören telin SEM fotoğrafından görülebilmektedir. 180 dakika üzeri ısıtılma sürelerinde Fe_2B veya borlu diğer fazların oluşması nedeni ile numunenin soft manyetik özelliği değişmekte ve yapı yavaş yavaş hard manyetik özellikler kazanmaktadır.



Şekil 5.9. 460 °C for 120 dakika ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin scanning elektron mikroskop (SEM) resmi.

Soft manyetik özelliklerin belirlenmesinde diğer bir parametre manyetik alınganlıktır (χ). Manyetik alınganlık (χ), anizotropi enerjisi (K) ile amorf ferromanyetik maddelerde ters orantılı olarak verilebilir ($\chi \propto 1/K$). K ile gösterdiğimiz anizotropi enerji ifadesi basit bir şekilde manyetizasyonun uygulanan manyetik alan yönünde dönmesi için birim hacim başına gerekli olan enerji olarak tanımlanabilir. Şekil 5.10' da gösterildiği gibi K parametresi deneysel olarak numunenin manyetik hysteresis eğrisinden bulunabilir. Ferromanyetik maddeler için, K basit bir şekilde aşağıda verilen anizotropi çeşitlerinin toplam katkısından oluştuğu söylenebilir [4];



Şekil 5.10. Anizotropi (K) parametresinin hesaplanma metodu [4].

1) Manyetoelastik anizotropi enerjisi: Numunede mevcut olan iç stresler , σ , ve doyum magnetostriction , λ_s , değerine $K_\sigma = 3/2\lambda_s\sigma$ ifadesi ile bağlıdır. Numune içindeki iç stresler manyetik momentleri kendi doğrultularında yönlendirirler ve bu manyetik momentleri uygulanan alan yönünde yönlendirmek için alan şiddetini arttırmak gerekir bu da amorf ferromanyetik maddelerde en etkin olan manyetoelastik anizotropi çeşidini oluşturur.

2) Şekil anizotropi enerjisi: $K_D = (1/2)D\mu_0Ms^2$ olarak verilebilir, burada D şekil demanyetizasyon katsayısıdır. Genelde ölçümlerimiz de tel çapı 120 μ ve uzunluğu 10 cm civarında olduğundan ve alan numune boyu doğrultusunda uygulandığından, şekil anizotropisinin etkisi manyetoelastik veya diğer anizotropilerin yanında ihmal edilebilmektedir.

3) Kristal anizotropi enerjisi (K_k): Bilindiği üzere ferromanyetik yapılarda, spin-orbit

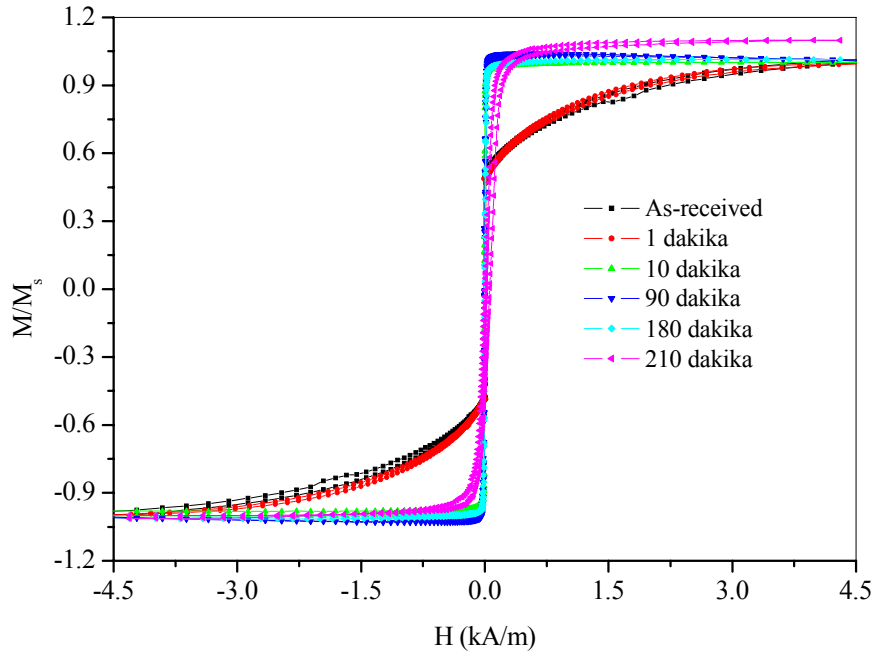
etkileşmesi ve kristal yapıda ise orbit-örgü etkileşmesi vardır. Bu etkileşmeler nedeniyle, kristalde yer alan atomların manyetik momentleri kristal alanı yönünde yönelir ve numuneye dış bir manyetik alan uygulandığında, dış alan atomun manyetik momentini alan yönünde yönlendirmeye çalışır. Bu manyetik momentler yukarıda açıklandığı gibi örgüyle güçlü bir şekilde etkileştiğinden dolayı alan yönünde yönelmeye karşı koyarlar. Bu etkileşmeyi yenmek için gerekli olan enerji, kristal anizotropi enerjisini oluşturur.

Amorf alaşımlar sadece kısa erişimli düzenlemeye sahip olduğu için ,(tipik 1nm), amorf manyetik alaşımlarda makroskopik kristal anizotropi yoktur [4]. Yani, manyetik ölçümler (hysteresis eğrisi v.s. ölçümleri) bütün numuneler için (makro boyutta) yapıldığından mikro boyuttaki lokal kristal anizotropilerin ortalaması yaklaşık olarak sıfıra eşittir ve bu da amorf yapılarda etkin olan toplam kristal anizotropisini sıfır yapmaktadır.

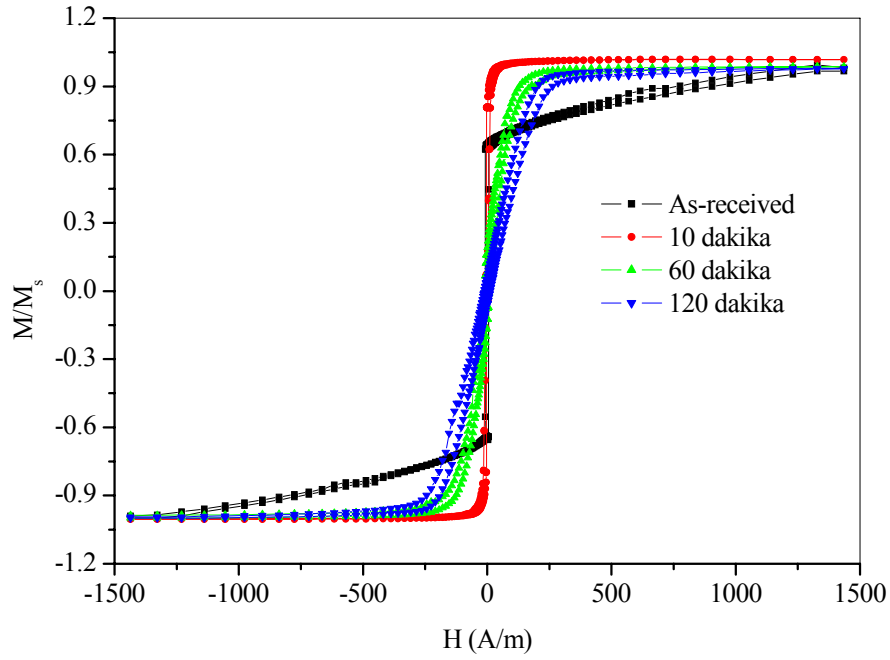
Bu açıklamaların ışığında $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel numunelerinin H_c ve K değerlerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği tartışılacak olursa; Numunenin boyutları bütün ölçümler için aynı olduğundan şekil anizotropisinin katkısı (ihmal edilecek kadar küçük olsa bile) her numune için aynıdır, dolayısı ile ısıtılardan dolayı değişmemektedir. Şekil 5.7 ve 5.8 de gösterildiği gibi düşük ısıtılarda (1 dakikaya kadar) H_c değerinde çok fazla bir değişim olmamaktadır. Bu süre üzerindeki ısıtılarda H_c değerlerinde bir azalma olmaktadır. Bu bölgede yapı tamamen amorf özelliğini koruduğundan kristal anizotropinin toplam anizotropiye katkısı sıfırdır. Ancak bu bölgede uygulanan ısıtılarda, iç stres değerini azalttığından $K_{\sigma}=3/2\lambda_s\sigma$ ile verilen manyeto-elastik anizotropi değerini dolayısı ile toplam anizotropi enerjisi K değerini azaltmaktadır.

Bu nedenle $\chi \propto 1/K$ bağıntısı gereğince manyetik alınganlık bu bölgede artmaktadır. 460 °C de daha uzun süreli ısıtılarda H_c değerinin artmaya başladığı görülmüştür. Bu durum Şekil 5.9 da verilen SEM fotoğrafından, yüzey kristalleşmesinin başlaması ile açıklanır. Uzun süreli ısıtılarda yapıda Fe_2B fazı oluşmakta ve manyetik olarak numunenin softluğunu bozan bu faz, kristal anizotropi değerini, yani toplam anizotropi enerji değerini artırarak χ değerini azaltmaktadır. Yani yapıda oluşan Fe_2B fazı, pinning noktalarının artmasına neden olmakta ve buda coercivity değerinin keskin bir şekilde artmasına neden olmaktadır (Şekil 5.7, 5.8).

Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel numunelerinin yüksek manyetik alan altında alınan manyetik hysteresis eğrileri sırasıyla, Şekil 5.11 ve 5.12 de verilmiştir. Şekil 5.11 de 210 dakikalık ısıl işlemlerden sonra manyetizasyon ile uygulanan manyetik alan arasında kalan bölgenin genişlediği görülürken, Şekil 5.22 de ise 10 dakikalık ısıl işlemlerden sonra manyetizasyon ile alan arasında kalan bölgelerin genişlediği görülmektedir. Bu durum, Şekil 5.10 göz önünde bulundurulduğunda, $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tel için 460 °C de 210 dakikalık ısıl işlemlerden sonra ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel için ise 460 °C de 60 dakikalık ısıl işlemler sonrasında anizotropinin etkin bir şekilde artmasına karşılık gelmektedir.



Şekil 5.11. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin yüksek alan M-H eğrisi.



Şekil 5.12. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin yüksek alanda M-H eğrileri.

5.4. Manyeto-elastik Ölçümler

Boyuna elastik katsayısının (Young elastik katsayısının, E) manyetik alanın fonksiyonu olarak ölçülmesi, numunenin manyetik momentlerinin ortalama yönelimi ve anizotropi enerjisi hakkında bilgi verebilmektedir. Livingston E' nin manyetik alanla değişimini açıklamak için geliştirdiği modelde sistemin toplam enerjisini [90];

$$E_T = E_{kristal} + E_{manyetoelastik} + E_{induce} + E_{domainwall} + E_{manyetostatik} \quad (5.1)$$

olarak almıştır. Amorf yapılar için kristal enerji sıfırdır. Domain duvar enerjisi diğer enerjiler yanında çok küçüktür. Bunlar göz önüne alınarak toplam enerji yeniden yazılırsa;

$$E_T = E_{manyetoelastik} + E_{induce} + E_{manyetostatik} \quad (5.2)$$

$$E_T = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta + K \cos^2 \theta - \mu_0 M_s H \cos \theta \quad (5.3)$$

Minimum enerji şartından;

$$\frac{\partial E_T}{\partial \theta} = 0 \quad (5.4)$$

$$-2K \sin \theta \cos \theta + \frac{3}{2} \lambda_s \sigma 2 \sin \theta \cos \theta + \mu_0 M_s H \sin \theta = 0 \quad (5.5)$$

$$\cos \theta = \frac{\mu_0 M_s H}{2K - 3\lambda_s \sigma} \quad (5.6)$$

$$H_{k\sigma} = \frac{2K - 3\lambda_s \sigma}{\mu_0 M_s} \quad (5.7)$$

olacaktır. Burada $H_{k\sigma}$ anizotropi alanıdır.

$$\cos \theta = \frac{H}{H_{k\sigma}} \quad (5.8)$$

θ 'nın fonksiyonu olarak uzamadaki değişim;

$$\varepsilon = \frac{3\lambda_s}{2} \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) \quad (5.9)$$

$$\varepsilon = \frac{3\lambda_s}{2} \left(\frac{H^2}{H_{K\sigma}^2} - \frac{1}{3} \right) \quad (5.10)$$

ve toplam uzama;

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_s} + \frac{3\lambda_s}{2} \left(\frac{H^2}{H_{K\sigma}^2} - \frac{1}{3} \right) \quad (5.11)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_s} + \frac{3\lambda_s}{2} \left[\frac{H^2 (\mu_0 M_s)^2}{(2K - 3\lambda_s \sigma)^2} - \frac{1}{3} \right] \quad (5.12)$$

olacaktır. Young modülü aynı zamanda aşağıdaki şekilde de izah edilebilir.

$$\frac{1}{E} = \frac{\partial E}{\partial \sigma} \quad (5.13)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_s} + \left[\frac{-H^2 (\mu_0 M_s)^2 2(2K - 3\lambda_s \sigma)(-3\lambda_s)}{(2K - 3\lambda_s \sigma)^4} \right] \quad (5.14)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_s} + \frac{9\lambda_s^2 H^2}{\mu_0 M_s H_{k\sigma}^3} \quad (5.15)$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{9\lambda_s^2 E_s H^2}{\mu_0 M_s H_{k\sigma}^3}$$

$$\frac{\Delta E}{E} \prec \frac{\lambda_s^2 M_s}{K} \quad (5.16)$$

5.16 eşitliği büyük ΔE etki gözlemek için, büyük λ_s ve M_s ile küçük K değerinin gerekli olduğunu söyler. Tüm bu nicelikler alaşımın kompozisyonuna bağlıdır. Özellikle K değeri ısı işlem sıcaklığı ve zamana çok duyarlıdır. Livingston modeli ancak ΔE etkinin büyüklüğünü verebilir. Fakat bu model E-H eğrisinin şeklini açıklayamamaktadır. Örneğin değişik açılarda ısıtılan numunenin $H=0$ 'daki elastik katsayısının farklı değerler alması gibi. Livingston modelinde eksik kalan bu yönler daha sonra Squire tarafından geliştirmiştir [91]. Squire,

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\lambda_s^2 E_s}{8K} f(h, \theta) \quad (5.17)$$

$$f(h, \theta) = \frac{\sin^2 2(\theta - \phi_1)}{2 \cos 2\phi_1 + h \cos(\theta - \phi_1) + 3 \left(\frac{3\lambda_s \sigma}{K} \right) \cos 2(\theta - \phi_1)} + \frac{\sin^2 2(\theta + \phi_2)}{2 \cos 2\phi_2 - h \cos(\theta + \phi_2) + 3 \left(\frac{\lambda_s \sigma}{K} \right) \cos 2(\theta + \phi_2)}$$

eşitliğini elde etmiştir. Burada E_s , doyumdaki Young elastik katsayısı, h değişkeni ise

bir normalize manyetik alan ile $h = \frac{H}{H_a}$ olarak tanımlanır. E/E_s 'nin büyüklüğü E_{\min}/E_s

ile belirlenir (burada E_{\min} , E 'nin minimum değerini göstermektedir) E_{\min}/E_s 'nin

büyükliğini ise birimsiz parametre olan $\beta = \lambda_s^2 E_s / K$ ifadesi belirlemektedir, burada

$\beta = (E_s/E - 1)/f$ dir. Şekil 5.13 ve eşitlik 5.17' yi kullanarak E/E_s 'yi manyetik alanın

fonsiyonu olarak vermektedir. Şekil 5.13 den görülebileceği gibi farklı θ yönelimlerine

sahip numunelerin E/E_s eğrileri farklılık göstermektedir. Örneğin $\theta = 15^\circ$ için E/E_s eğrisi

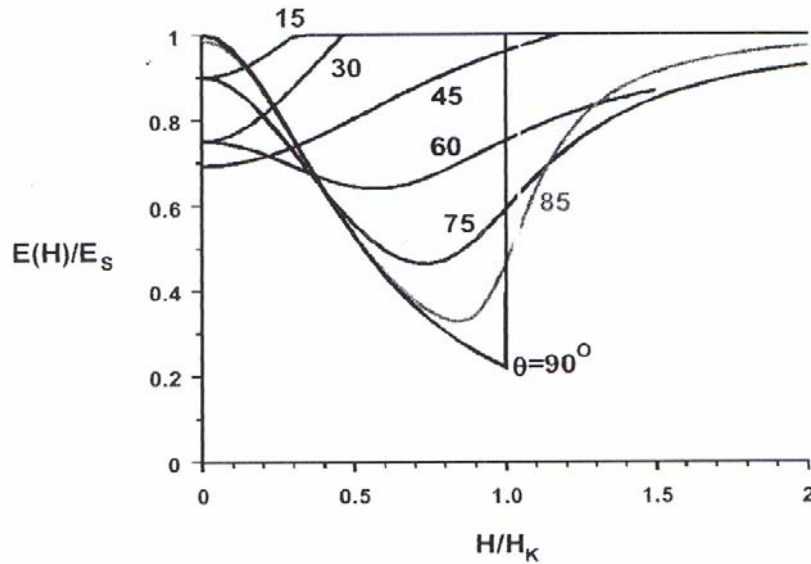
H 'in fonsiyonu olarak doğrudan artmaktadır. Fakat $\theta > 45^\circ$ için E/E_s H 'in fonsiyonu

olarak ilk etapta azalmakta, sonrada artarak E_s değerine ulaşmaktadır. Eğrilerin bu

şekilleri deneysel olarak elde edilen E/E_s eğrilerinin de genel davranışları ile aynıdır. Bu

nedenle Squire modeli E/E_s nin büyüklüğünü vermekle birlikte, farklı θ yönelimlerine

sahip yapılar için E/E_s eğrilerinin şekillerini de açıklayabilmektedir.



Şekil 5.13. Normalize edilmiş Young elastik katsayısının manyetik alanla değişimi. Eğriler eşitlik 5.17 kullanılarak türetilmiştir [91].

Şekil 5.14, ısıl işlem görmemiş ve 460°C de 20 saniye ısıl işlem gören $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telinin elastik katsayısının manyetik alanla değişimini göstermektedir.

Isıl işlem görmemiş numuneye bakıldığında eğrinin W' a benzer bir şekle sahip olduğu görülmektedir. Buradan Squire modelini göz önüne aldığımızda ısıl işlem görmemiş numunelerin manyetik momentlerinin ortalama olarak numune boyu doğrultusunda uygulanan manyetik alanla yaklaşık 80° lik açı yaptığını göstermektedir. Bu da Young elastik katsayısının değişimine katkıda bulunan numunedeki ortalama manyetik momentlerin yöneliminin 80°, civarında olduğunu göstermektedir. Yani E/E_s-H eğrileri, telin dış korundaki manyetik momentlerin yöneliminin ortalama değerinin, 80° olduğunu göstermektedir. Yüzeyi kristalleşen teller büyük bir ΔE etki göstermektedir. Bundan dolayı yüzeyi kristalleşmiş FeCrSiB tellerde manyetik momentlerin H=0 alan altında dairesel yönde yönelim gösterdiği sonucuna varılmaktadır [92]. Şekil 5.15 ve 5.16, ısıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı ısıl işlem sürelerinde ısıtılan tellerin Young modülünün, manyetik alana bağlılığını göstermektedir.

Modül değerleri doyum değerleri olan (E_s) değerine normalize edilmiş ve anizotropi ile domain yapısının değişimine göre açıklanmıştır. Özellikle sıfır alanda (E₀/E_s) ve minimum (E_{min}/E_s) olduğu durumdaki modül değerleri anizotropinin büyüklüğü ve kolay eksenin ortalama yöneliminin belirlenmesinde kullanılır [4]. Isıl işlem görmemiş durumdaki E/E_s eğrilerinde açık bir W şekli görülmektedir. Bu durumda önceden M-H eğrilerinden yorumlanan core-shell domain yapıyla uyumlu olan, enine bir anizotropinin oluştuğunu ifade eder. Maksimum modül değişiminin büyüklüğü λ_s²E_s/K niceliğiyle orantılıdır (Eşitlik 5.15 ve 5.17). Burada K anizotropi sabitidir [4].

Bu telin doyum magnetostriction (λ_s) değeri yaklaşık olarak 12×10⁻⁶ olarak ölçülmüştür. Isıl işlem görmemiş tel için E_s değeri 180 GPa, alınarak K değeri 800 J/m³ olarak belirlenmiştir. Bu değer de amorf FeSiB tellerde rapor edilen değerlerin yaklaşık üçte biri kadardır [8]. K değeri Young modülünün minimum değerindeki alandan hesaplanabilir. Enine anizotropi için anizotropi alanı, H_k= 2K/μ₀M_S olarak ifade edilir. Minimum modül için daha düşük alanlarda enine anizotropide küçük sapmalar gözlenir. Eğer μ₀M_S=1.03T olarak alınırsa, K değeri yaklaşık olarak 800-900 J/m³ olarak bulunur. Bu değer ise, ısıl işlem görmemiş telin M-H eğrilerinden hesaplanmış olan K değeri ile hemen hemen aynıdır.

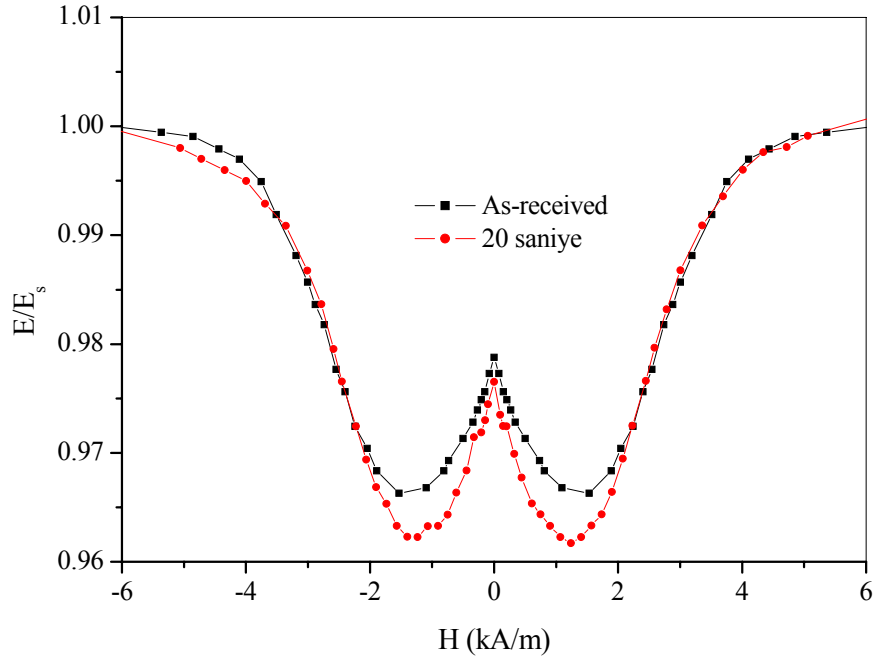
Isıtılan tellerde anizotropi ile ilişkili olan iç streslerin azaltılmasından dolayı, ΔE etkide bir artış gözlenmiştir. Bu çalışmada gözlenen en düşük E/E_s yaklaşık 0.26 dır (460 °C de 180 dakika). Bu düşük değer göstermektedir ki, yüzey kristalleşmesinin

başlamadan önce stresler bir minimum değere düşürülebilmektedir. Bu sonuç ise coercivity nin minimum değeriyle uyum içerisindedir. En iyi ΔE etki, küçük bir yüzey kristalleşmesiyle belirlenmektedir. Bu durumda 460 °C de 180 dakika ısıtılan tellerin $E(H)$ eğrilerinin coercivity verileri ile kıyaslanmasıyla görülebilir (Şekil 5.17). Bu gözlemler daha önceden yapılan amorf FeSiB tellerde de gözlenmiştir [6,89].

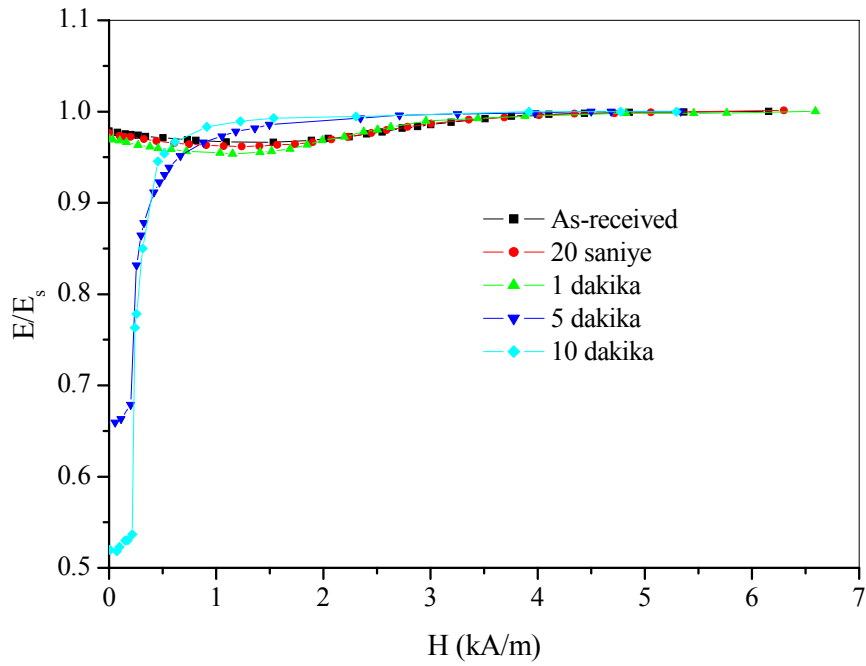
İç streslerin rahatlatılması ile enine anizotropinin açık bir şekilde olduğu ve Şekil 5.16 da görüldüğü gibi 460 °C de 30 dakika ısıtılan telde rastgele bir anizotropi dağılımının meydana geldiği belirlenmiştir. 460 °C de 30 dakika ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde artık E/E_s -H eğrisinin V şeklini almakta olduğunu görmekteyiz (Şekil 5.16). Bu da bu numunelerin manyetik momentlerinin ortalama olarak numune boyu doğrultusunda uygulanan manyetik alanla 45° veya daha düşük açı yaptığını göstermektedir. Benzer sonuçlar 480 °C 20 saniye ısıtılmış $Fe_{77.5}Si_{15}B_{15}$ tel ile 450 °C 10 dakika ısıtılmış $Co_{75}Si_{15}B_{10}$ telde artık E/E_s -H eğrisinin V şeklini almakta olduğu görülmüştür [6]. Sonuç olarak ısıtılmış numunelerde üretim sırasında oluşan stresler manyetik momentlerin yöneliminde etkin rol oynamakta ve numune boyuna ~80° lik açı yaparak yönelmelerini sağlamaktadır.

Ancak ısıtılmış tabii tutulmuş numunelerde özellikle düşük sürelerde ısıtılan numunelerde iç stresler, yani K azaldığından ve kristal anizotropisinde ortalama olarak sıfır katkı getirdiğinden, artık numunede merteye olarak çok küçük olmasına rağmen etkin olan şekil anizotropi nedeni ile manyetik momentler numunenin boyu doğrultusunda yönelmektedirler. Ancak iç stresler tamamen sıfır olmadığından çok az da olsa, manyetoelastik (stres) anizotropiden dolayı bazı manyetik momentlerin tamamen numune boyu doğrultusunda yönelmesini engellemektedir. Bu nedenle ısıtılmış numunelerde manyetik momentler, ortama olarak numune boyu doğrultusunda değil de bu doğrultu ile 45° veya daha düşük açı yapacak şekilde yönelmektedirler.

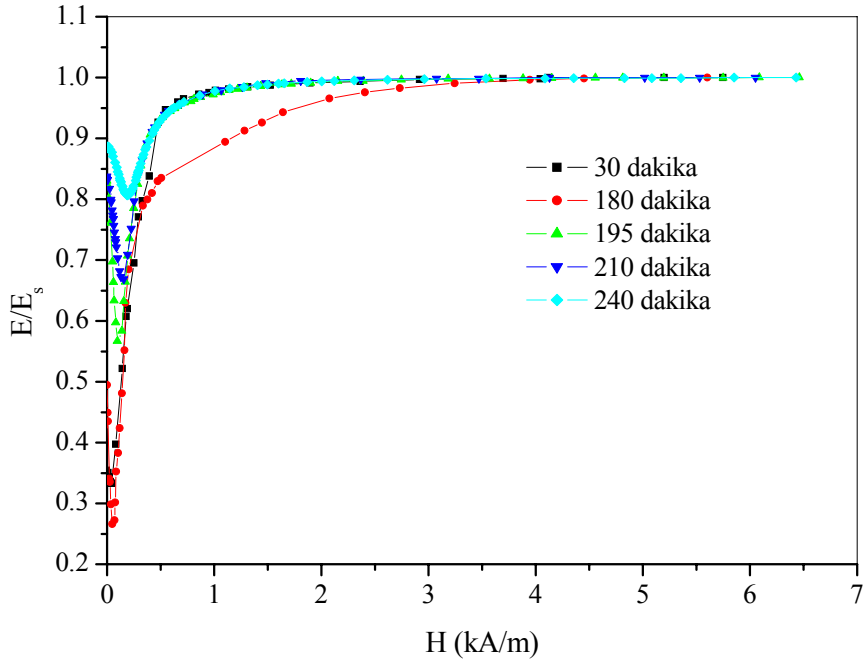
E_0/E_s ve E_{min}/E_s modülleri arasındaki yakınlık düşük açılı anizotropiden dolayı tam olarak belirlenemez [89]. Bunun aksine yüzeyi kristalleşmiş tellerin eğrileri (180 dakika üzerinde) dairesel anizotropiye göre 90° lik moment yöneliminin bir karakteristiği olan W şeklini almaktadır. Şekil 5.17, $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ teli için coercivity ve elastik katsayısının ısıtılmış süresine bağlılığını göstermektedir. Coercivity ve elastik katsayısı değerleri karşılaştırıldığında coercivity değerlerinin artmaya başladığı değerde, elastik katsayısının minimum değere ulaşmaktadır.



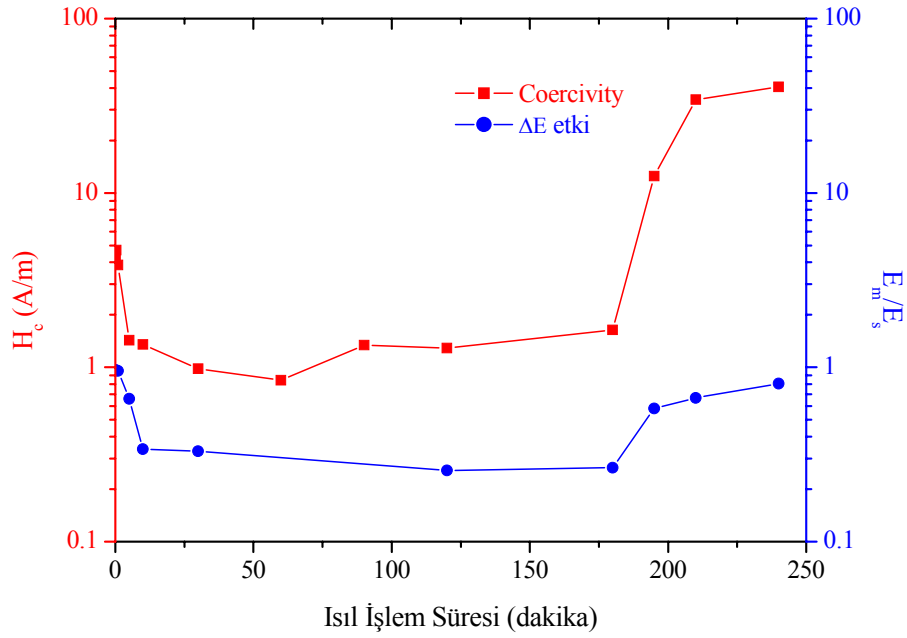
Şekil 5.14. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de 20 saniye ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telinin elastik katsayısının manyetik alanla değişimi.



Şekil 5.15. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telinin elastik katsayısının manyetik alanla değişimi.



Şekil 5.16. 460 °C de farklı sürelerde ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telinin elastik katsayısının manyetik alanla değişimi.



Şekil 5.17. $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ teli için coercivity ve elastik katsayısının ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.

5.5 Manyetoempedans Ölçümleri

5.5.1 Teorik Model

Manyetoempedans etkiyi anlayabilmek için numunenin enine alınganlığını (χ_t) ya da enine manyetik geçirgenliğini (μ_t) göz önünde bulundurmak gereklidir. Yüksek frekans aralığında numunenin boyu doğrultusunda geçirilen bir ac $I=I_0e^{j\omega t}$ akım altında manyetik malzemenin manyetoempedansı (MI), aşağıdaki eşitlik ile verilir [93];

$$Z \propto \sqrt{1 + 4\pi\chi_t}, \quad Z \propto \sqrt{\mu_t} \quad (5.18)$$

Alınganlığın χ_t , veya geçirgenliğin, μ_t , alana bağlı olmasından dolayı empedans, Z , için yapılan modellemeler yüksek frekanslarda gerçekleştirilmiştir. Model tek-eksenli tek bir domain göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir [93-95]. Bu modelde, alınganlığın manyetik alana bağlılığı, tek-eksenli anizotropi sabiti (K) ile tek bir domain'in manyetizasyon yönelimi göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Anizotropi sabiti (K), anizotropi alanına (H_k), $H_k=2K/M_s$ ifadesi ile bağlıdır.

Şekil 5.18, enine alınganlığın hesaplanmasında kullanılan koordinat sistemini göstermektedir. Numuneye şerit eksenini boyunca, dışardan dc H alanı uygulanmıştır. Ayrıca, ac I akımı uygulanması sonucu numunenin eni doğrultusunda H_t manyetik alanı oluşmuştur. Burada θ_e kolay eksen yönelimini göstermektedir. Manyetik alan altında enerji yoğunluğu aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$E = K \sin^2 \theta - M_s H_t \cos(\theta + \theta_e) - M_s H \sin(\theta + \theta_e) \quad (5.19)$$

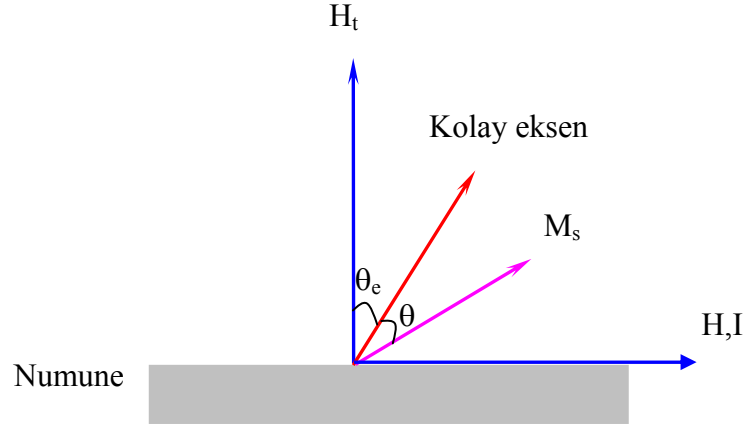
Bu eşitlikten θ , $\partial E/\partial \theta=0$ şartı ile belirlenmiştir.

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = K \sin 2\theta - M_s H \cos(\theta + \theta_e) + M_s H_t \sin(\theta + \theta_e) = 0 \quad (5.20)$$

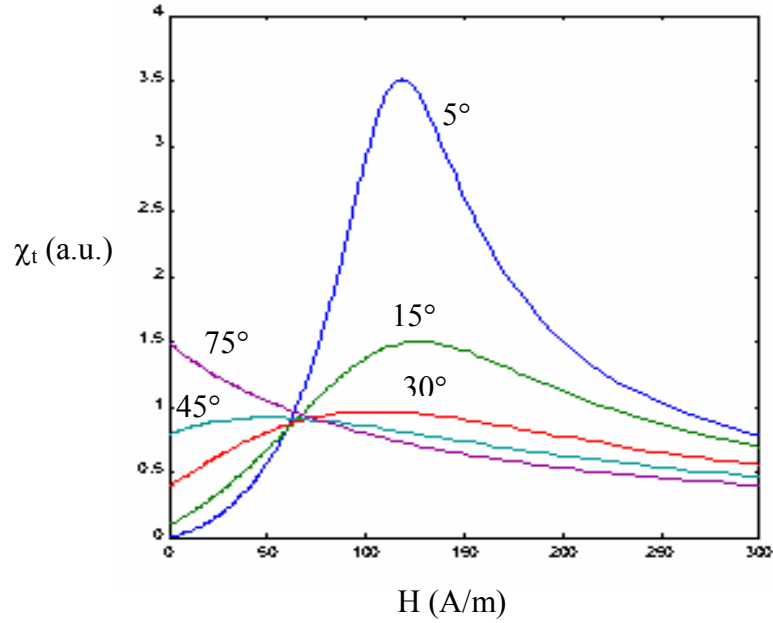
Küçük H_t yaklaşımı altında enine alınganlık aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$\chi_t = \frac{M_s^2 \sin^2 \theta}{\partial^2 E / \partial^2 \theta} = \frac{M_s^2 \sin^2 (\theta + \theta_e)}{2K \cos 2\theta + M_s H \sin(\theta + \theta_e)} \quad (5.21)$$

θ_e ve $\pi/2$ arasındaki farklı θ değerleri ve uygun H değerleri, eşitlik 5.20 kullanılarak hesaplanmış ve hesaplanan hem θ hem de H değerleri eşitlik 5.21 de yerine konularak uygulanan alanın fonksiyonu olarak enine alınganlık eğrileri, $M_s=1.6T$ ve $H_k=100$ A/m değerlerin de farklı kolay eksen yönelimleri için belirlenmiştir (Şekil 5.19). Böylelikle bu model ve manyetoempedans verileri karşılaştırılarak numunedeki manyetik momentlerin ortalama yönelimlerini tahmin etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 5.18. Tek bir domain' nin manyetizasyon yönelimi için koordinat sistemi.



Şekil 5.19. Farklı kolay eksen yönelimleri için enine alınganlığın manyetik alana bağılılığı.

Benzer bir model Ryu ve arkadaşları [94] tarafından FeNbB şeritleri için geliştirilmiştir. Küçük açı değerleri için geçirgenlik $h=\pm 1$ ya da $H=\pm H_k$ yakında pikler

gösterdiği ve açı değeri arttıkça piklerin, h' in daha küçük değerlerinde gözlemlendiği belirlenmiştir. Amorf malzemelerde, anizotropi yönünde lokal değişimlere yol açan iç stresler bulunmaktadır. Lokal anizotropiler enine yöne yakın olduğu için piklerin $H=\pm H_k$ yakınında gözlemlendiği rapor edilmiştir [94].

5.5.2 Sonlu Element (FEM) Tekniği

Çoğu problemler için analitik problemlerin zorluğundan dolayı kompleks sınır-değer problemlerini yaklaşık olarak çözümlenmede nümerik çözümler yapan finite element method (FEM) tekniği kullanılır [96]. Sınır-değer problemlerini çözmeye iki klasik model kullanılır. Bunlardan biri Rayleigh-Ritz metodu diğeri ise Galerkin metodudur [97]. FEM tekniğinde temel adımlar kesiklilik, ara değer fonksiyonun seçimi, sistem eşitliklerinin formülasyonu ve sistem eşitliklerin çözümünü içermektedir. Elektromanyetik alan analizleri için ticari olarak uygun birçok FEM software paketi bulunmaktadır [96]. Bu programların tümü Maxwell' in diferansiyel eşitliklerinin çözümü olarak tasarlanmıştır. Bu teknikte problem çözümleri, katı bileşenlerde DC ve potansiyel dağılımı, kapasitans ve alan şiddetinin hesabı ve akım dağılımı gibi hesapları içermektedir.

AC akım akışı esnasında elektronlar iletkenin yüzeyi boyunca akma eğilimindedir. Akımın büyüklüğü ve yönündeki değişimler elektronları telin dış yüzeyine doğru iten bir manyetik alan oluşturur. Bu etki frekans ve iletken büyüklüğü ile artar. AC güç elektromanyetik mod kullanılarak telde akım yoğunluğunun hesabı için COMSOL multi-fizik eşitliği manyetik potansiyelin büyüklüğü için kompleks bir helmholtz eşitliğini çözümler.

Kompleks bir Helmholtz eşitliği;

$$-\nabla\left(\frac{1}{\mu}\nabla A_z\right)+k^2 A_z=0 \quad (5.21)$$

Şeklinde verilir ve burada k ,

$$k=\sqrt{j\omega\sigma-w^2\varepsilon} \quad (5.22)$$

şeklinde olur. İyi iletkenler için $\sigma \ll \omega \epsilon$ dur. Bu nedenle uygulamalar için;

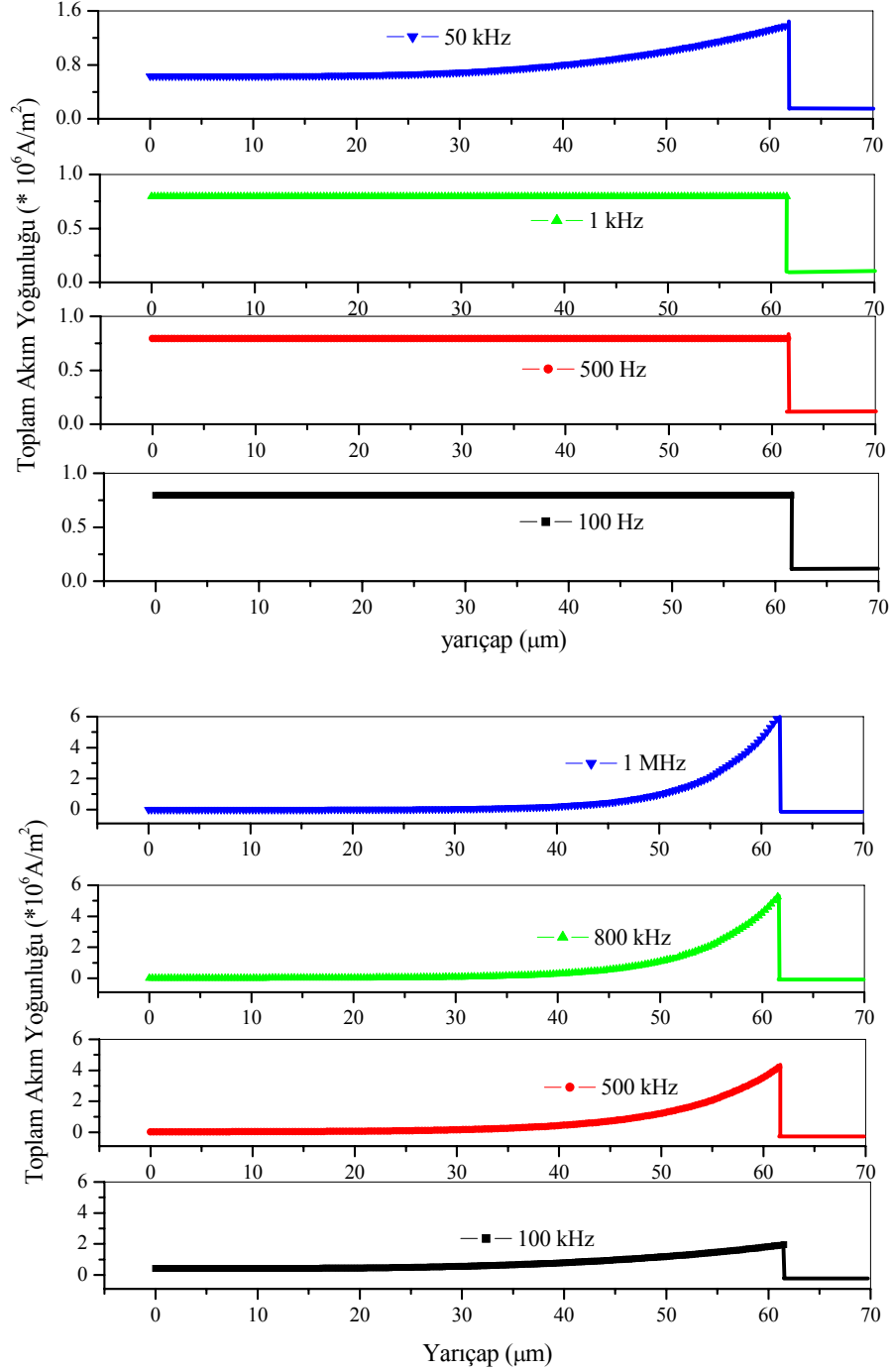
$$k = \sqrt{j\omega\sigma} \quad (5.23)$$

şeklinde [96]. Çözümlerde uygun sınır şartları seçilir. Matematiksel açıdan en dış yüzeyde ya manyetik potansiyeli A_z (Diriclet tipi şartı) ya da aynı alanın normal türevini (Neumann şartını) belirtmek gerekir. Uygun parametreler belirlendikten sonra COMSOL multi-fizik programı, frekans değerine göre toplam akım yoğunluğunu hesaplar [96].

$$J = \frac{I_{tot}}{2\pi R} \quad (5.24)$$

AC akım yoğunluğunun radyal dağılımı silindirik geometriye sahip heterojen bileşikli alaşımlarda Sinnecker ve arkadaşları tarafından hesaplanmıştır [98]. Düşük frekanslarda akım yoğunluğunun tüm bölgede yayılım gösterdiği belirlenirken artan frekans değeri ile akım yoğunluğunun sadece manyetik kabuk üzerinde olur [98].

Şekil 5.20, farklı frekans değerlerinde ısıtma işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tel için yarıçapa karşı toplam akım yoğunluğunun dağılımını göstermektedir. Düşük frekans değerlerinde (1kHz) akım yoğunluğunun numunenin tümünde yayıldığı gözlenirken frekans değerlerinin artırılması ile akım yoğunluğunun numunenin yüzeyine doğru kaydığı gözlenmektedir. AC akım yeteri kadar yüksek frekanslara ulaştığında akım malzemenin en dıştaki kabuk üzerinde akma eğilimindedir ve bu durum Bölüm 3.3.1 de verildiği gibi yüzey etkisi olarak ifade edilmektedir. Düşük frekanslarda yüzey etkisi ihmal edilmektedir bu durumda empedansa asıl katkı numunenin kendi indüktansında kaynaklanmaktadır. Frekansın artması ile akım dağılımı numunenin yüzeyinde akma eğiliminden olduğu için numunenin etkin kesit alanı azalır ve bu durumda direnç bileşeninde artma olmaktadır. Bu nedenle yüksek frekanslarda empedansa asıl katkı direnç bileşeninden gelmektedir.



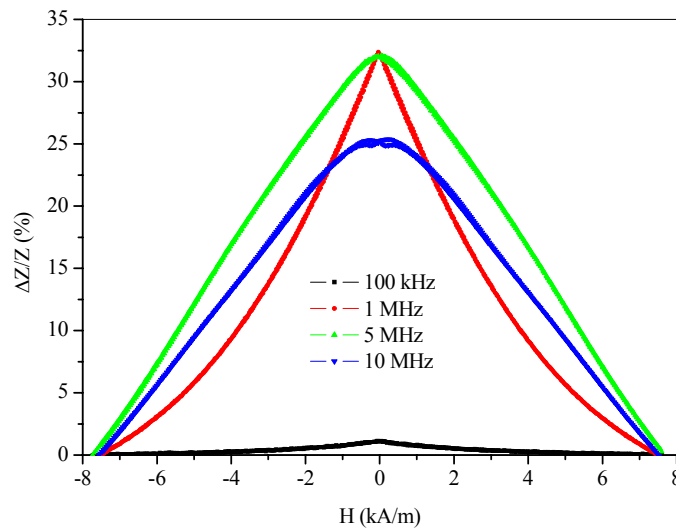
Şekil 5.20. Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telde yarıçapa karşı toplam akım yoğunluğunun dağılımı.

5.5.3 Isıl İşlem Uygulanmamış $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ ve $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ Tellerde Manyetoempedans Etki

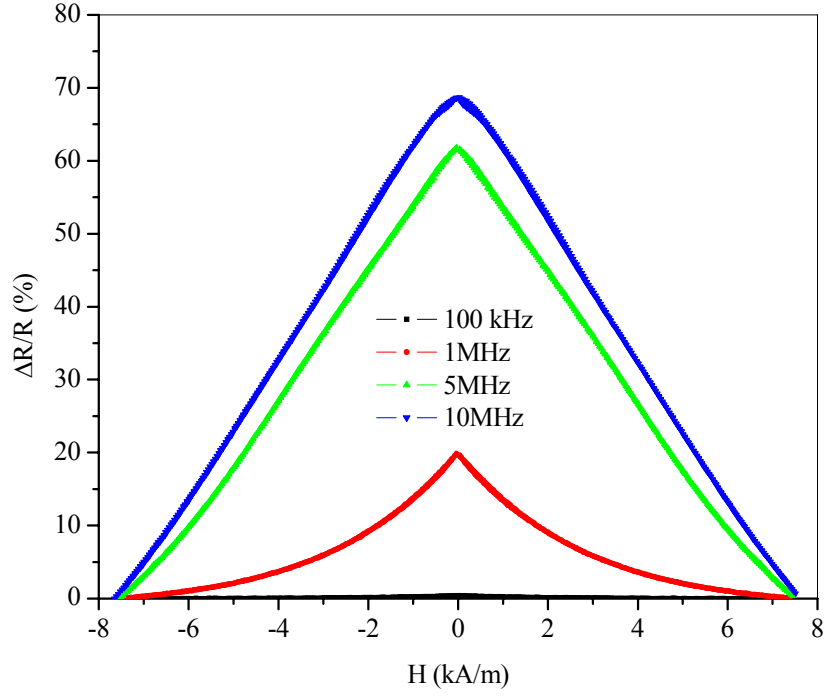
Bilindiği gibi numune empedansı gerçek ve imajiner olmak üzere iki terimden oluşur ve empedans $Z=R+iX$ şeklinde tanımlanabilir. İlk olarak ısıl işlem görmemiş

$Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için yapılan manyetoempedans ölçümleri verilmiştir. Farklı frekans değerlerinde ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ teller için uygulanan alan altında sırasıyla yüzde empedans, direnç ve indüktans değişimlerini Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23 verilmiştir. Şekil 5.24 de ise bu üç değer için frekansın fonksiyonu olarak yüzde değişimleri gösterilmiştir. Şekil 5.21 den ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin 1MHz frekans değerinde ~%32' lik manyetoempedans oranı (GMI) gösterdiği ve dc alan artışı ile bu değişimin tekdüze olarak azaldığı gözlenmiştir. Uygulanan dış manyetik alan sıfır iken numunede maksimum manyetoempedans değişiminin olduğu tespit edilmiştir.

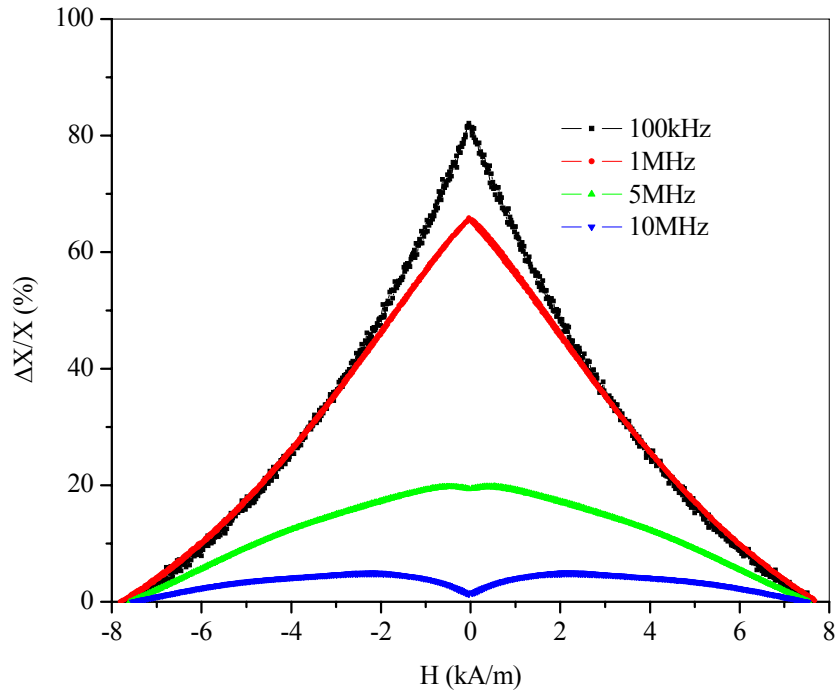
Frekans değeri artırıldığında maksimum değer azaldığı ve ortaya çıkan manyetoempedans eğrilerinin genişlediği belirlenmiştir. Şekil 5.24 den görüldüğü gibi en yüksek empedans değişimi 1MHz frekans değerinde ~%32 olarak hesaplanmıştır. Frekans değerinin artması ile empedans değişiminin azaldığı ve 10 MHz' lık frekans değerinde değişimin ~%25 olduğu bulunmuştur. Empedans ifadesine ($Z=R+iX$) hem gerçek bileşen olan direnç (R) değerinden, hem de sanal bileşen olan indüktans (X) değerinden katkı gelmektedir. 100kHz frekans değerinde dirençteki değişimin ~%0.45 değerinde olduğu belirlenirken, frekansın artmasıyla bu değer arttığı gözlenmiştir. 10MHz frekans değerinde dirençteki değişim ~%69 değerine artmıştır. Diğer yandan indüktans değişiminde ise dirençteki durumun tersi bir durum söz konusudur. Buna göre, 100kHz frekans değerinde indüktans değişiminin ~%82 olan değerinden 10MHz frekans değerinde ~%2 değerine düştüğü belirlenmiştir (Şekil 5.24).



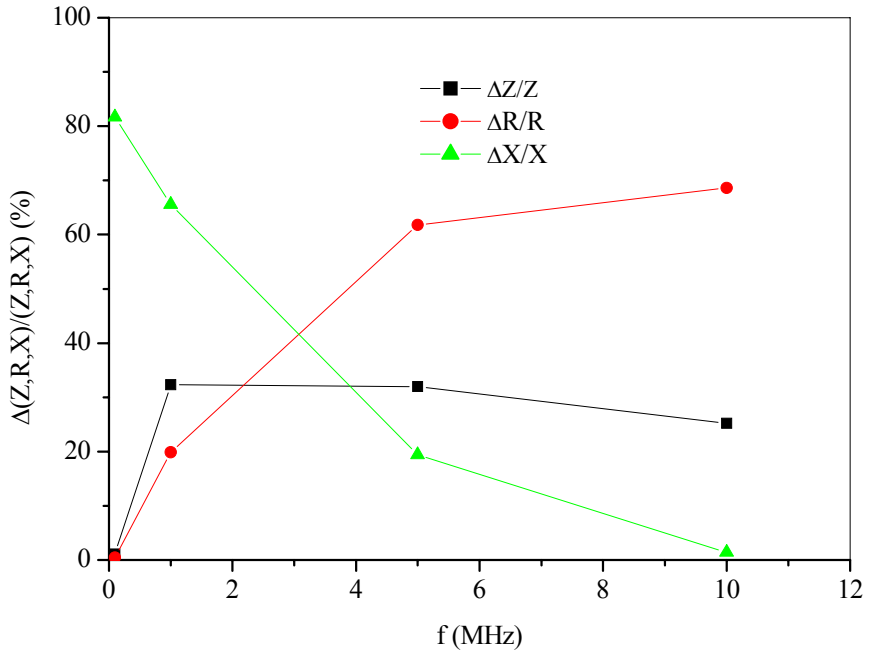
Şekil 5.21. Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.22. Farklı frekans değerleri için ısıtılmış $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telin uygulanan alanla yüzde manyetodirenç değişimi.

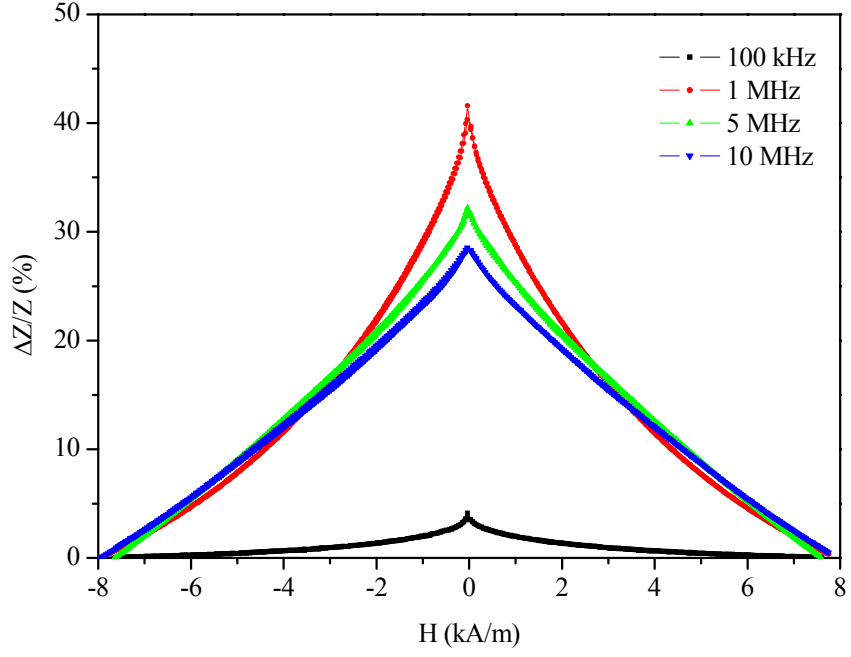


Şekil 5.23. Farklı frekans değerleri için ısıtılmış $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telin uygulanan alanla yüzde manyetoindüktans değişimi.

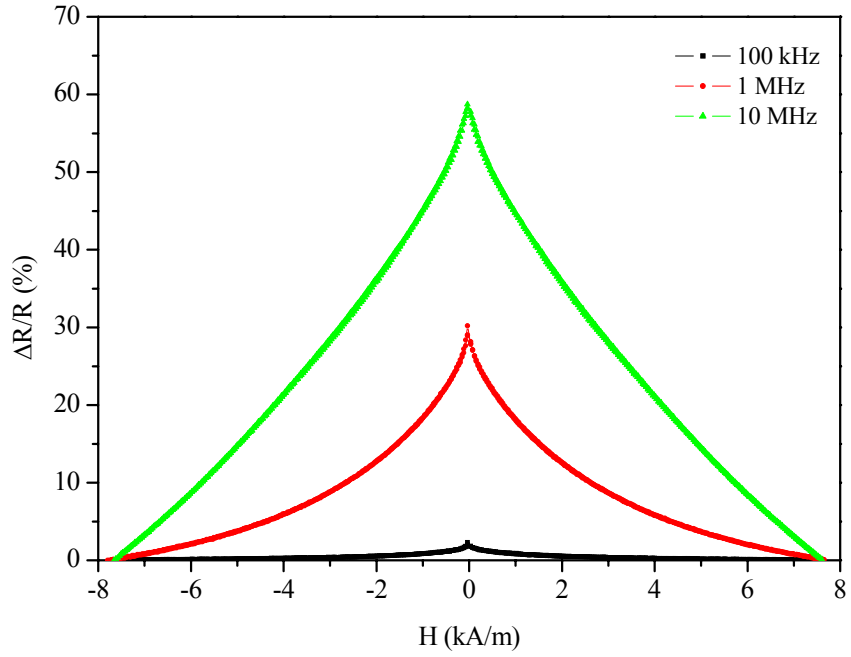


Şekil 5.24. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin frekansa karşı yüzde empedans, direnç ve indüktans değişimleri.

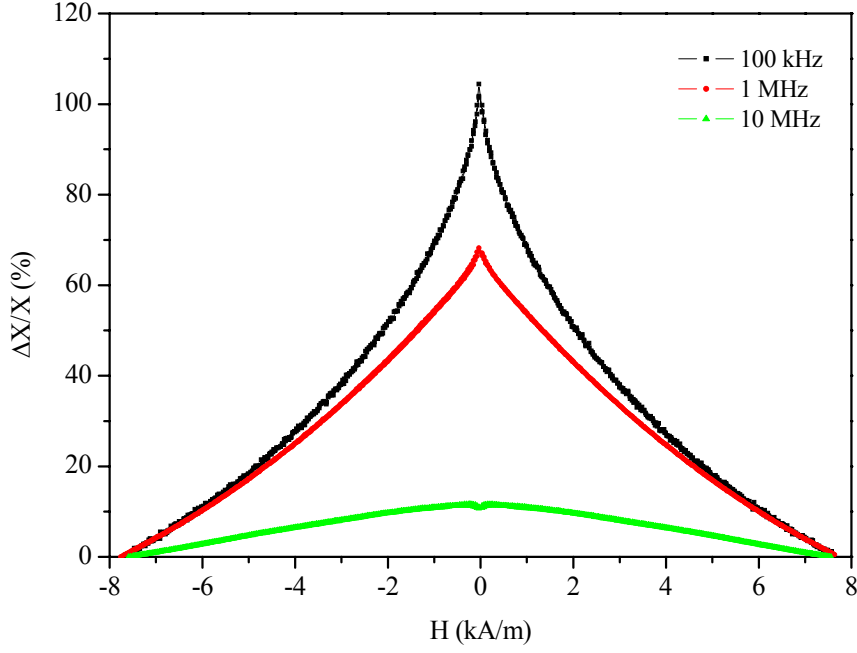
Farklı frekans değerlerinde ısıl işlem görmemiş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel için uygulanan alan altında sırasıyla yüzde empedans, direnç ve indüktans değişimlerini Şekil 5.25, 5.26 ve 5.27 de verilmiştir. Isıl işlem görmemiş telde maksimum değişim 1MHz frekans değerinde yaklaşık %40 olarak bulunmuş ve yüzde değişimin uygulanan dc alan ile azaldığı belirlenmiştir. Frekans değerinin artması ile yüzde değişimin azaldığı belirlenmiş ve 10MHz frekans değerinde yaklaşık %28 olarak hesaplanmıştır. Isıl işlem görmemiş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel için farklı sürücü akım frekans değerlerinde (100kHz, 1MHz, 5MHz ve 10MHz), manyetoempedans eğrilerinde tek pik davranışları gözlenmiştir. Şekil 5.26 ve 5.27 de verilen manyeto-direnç ve manyeto-indüktans eğrilerinden görüleceği üzere frekans değeri arttıkça yüzde manyeto-direnç artarken (Şekil 5.26) manyeto-indüktans değeri azalmaktadır (Şekil 5.27).



Şekil 5.25. Isıl işlem görmemiş $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{17.5}\text{B}_{15}$ telin farklı sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.



Şekil 5.26. Isıl işlem görmemiş $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{17.5}\text{B}_{15}$ telin farklı sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan alan ile yüzde manyetodirenç değişimleri.



Şekil 5.27. Isıl işlem görmemiş $Fe_{77.5}Si_{17.5}B_{15}$ telin farklı sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoindüktans değişimleri.

Tel boyunca I_{ac} büyüklüğünde bir ac akım geçirildiğinde, dairesel bir manyetik alan oluşur. Bu zamanla değişen manyetik alan, manyetizasyonun dairesel bileşenlerini değiştirir ve numunenin dairesel geçirgenliği ile orantılı ve malzemelerin dairesel anizotropilerine güçlü bir şekilde bağlı olan bir voltaj değeri ortaya çıkarır. Tel ekseninde dc manyetik alan uygulandığında tel üzerinde oluşan etkili manyetik alan değişir [26]. Böyle bir değişim malzemenin dairesel geçirgenliğini daha büyük ölçüde etkiler ve bunun sonucunda manyeto-indüksiyon değerinde de büyük değişim meydana gelir.

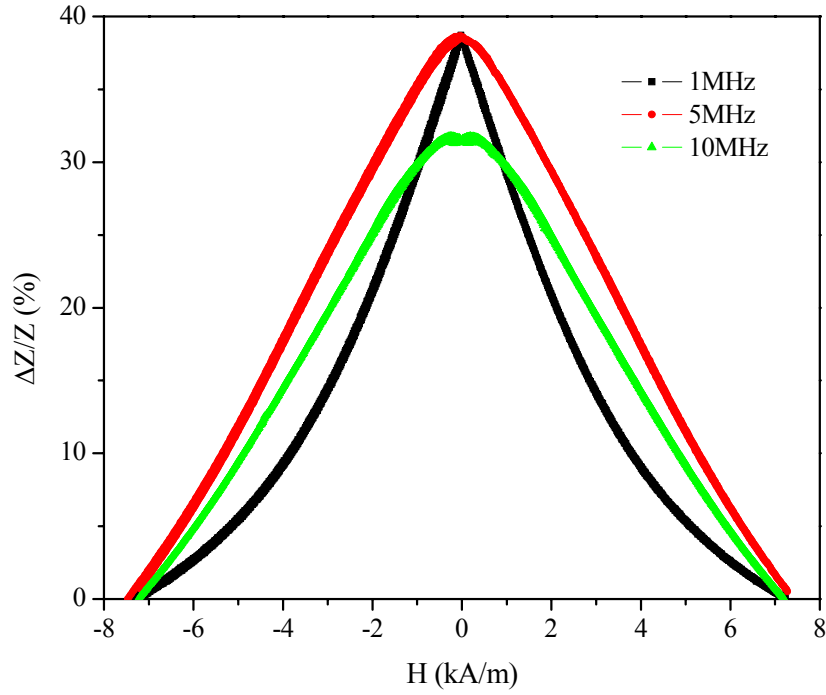
Düşük frekans bölgesinde ($\leq 100\text{kHz}$), empedansın alana bağıllığı sadece dairesel geçirgenlikle orantılı olan indüksiyon kısmına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle düşük frekanslarda malzeme empedansının değişimi, yalnızca dairesel manyetizasyon süreci ile ortaya çıkan manyetik indüksiyon etkiye bağlanabilir [26]. Şekil 5.20 den de görüleceği üzere yüksek frekanslarda telin kesit alanında akım akışı eddy akımlarının oluşumu sayesinde azalır ve sonuç olarak akım numunenin

yüzeyine yakın ince kabuk boyunca akar. Yüksek frekans bölgesinde uygulanan dc manyetik alan, numunenin dairesel geçirgenliği (μ_ϕ) üzerinde belirleyici bir etki meydana getirmektedir. Bundan dolayı yüzey derinliği (δ) tel yarıçapına ulaşıncaya kadar manyetoempedans değerini değiştirir. Malzemelerin empedansı teorik modelde de verildiği gibi yüksek frekans bölgesinde dairesel geçirgenliğin karekökü ile orantılıdır. Yüksek frekanslarda (>1MHz) anizotropinin artmasından dolayı manyetik geçirgenlik azalır ve buna bağlı olarak maksimum manyetoempedans değerinin azalış gösterdiği belirlenmiştir.

5.5.4 Isıl İşlem Uygulanmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ Tellerde Manyetoempedans Etki

Deneyssel ölçümlerde kullanılan amorf $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller Unitika şirketi tarafından sağlanmıştır. Tellerin kristalleşme sıcaklığı, diferansiyel termal analiz (DTA) sistemi ile 565 °C olarak belirlenmiştir. Isıl işlem sıcaklığı kristalleşme sıcaklığının altında tutulmuştur. Bu nedenle ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellere ısıl işlem sıcaklığı olarak 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Şekil 5.28, farklı frekans değerleri için 460 °C de 1 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir. Tüm frekans (1, 5 ve 10MHz) değerleri için eğrilerde hemen hemen tek pik (SP) davranışlarının sergilendiği gözlenmiştir.

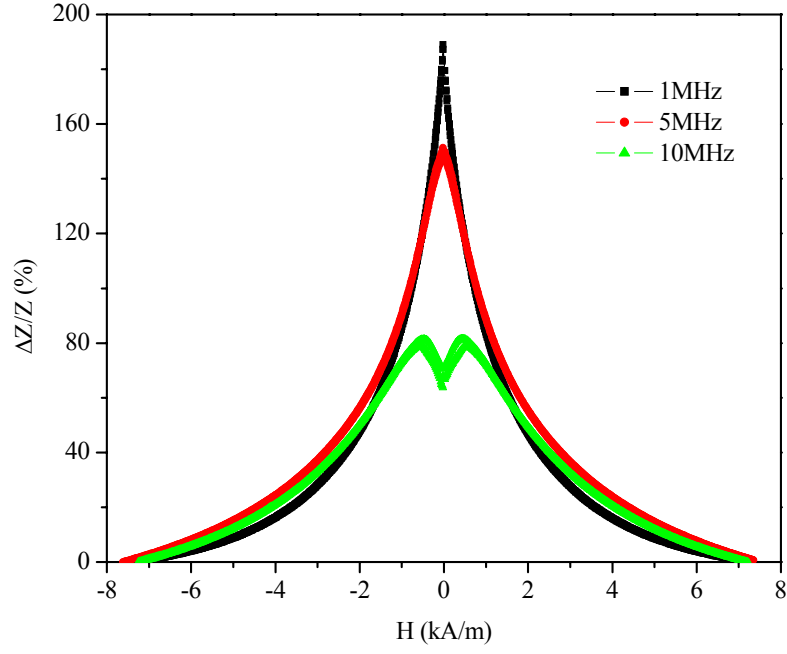
Maksimum yüzde manyetoempedans değişimi 1MHz frekans civarında belirlenmiştir. 1MHz sürücü akım frekans değeri için, ısıl işlem görmemiş durumda ~%32 lik değişimin 1 dakika ısıl işlemde sonra ~%40 değerine arttığı tespit edilmiştir. (Şekil 5.28). Şekil 5.28 den görülebileceği gibi sürücü akım frekans değeri arttığında eğrilerin genişlediği gözlenmiştir.



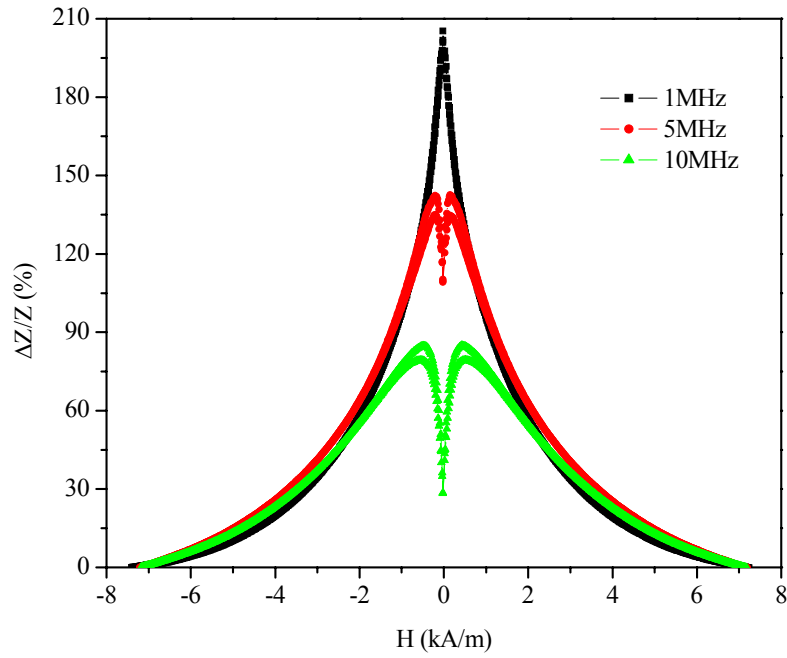
Şekil 5.28. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 1 dakika ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

Şekil 5.29 ve 5.30 sırasıyla 460 °C de 5 dakika ve 10 dakika ısıl işlem gören Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir. Şekil 5.29 da numuneye uygulanan 5 dakika ısıl işlem sonunda yüzde değişimin, 1MHz sürücü akım frekans değerinde ~%187 olduğu görülmektedir. Ayrıca 1MHz ve 5MHz sürücü akım frekanslarında eğrilerin tek pik davranışları sergilediği görülürken 10MHz frekans değerinde artık, eğrinin tamamen çift pik davranışları sergilediği görülmektedir (Şekil 5.29).

Numuneye 10 dakikalık ısıl işlem uygulandıktan sonra maksimum yüzde manyetoempedans değişimin ~%202 olduğu belirlenmiştir. Tek pik davranışları 1MHz frekans değerinde gözlenirken, diğer frekans değerlerinde (5 ve 10MHz) eğrilerin çift pik davranışları sergilediği gözlenmiştir (Şekil 5.30).



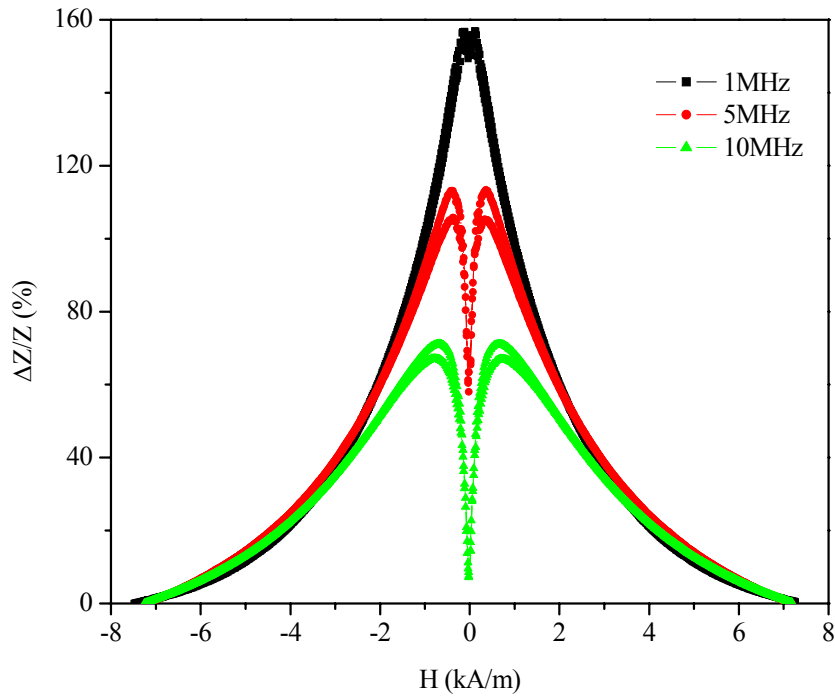
Şekil 5.29. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 5 dakika ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.



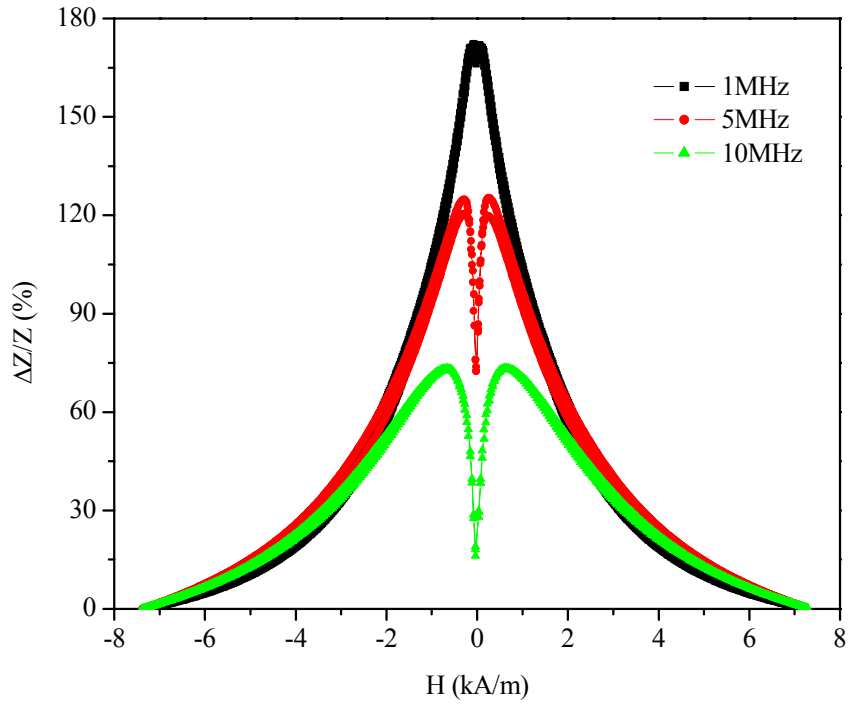
Şekil 5.30. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 10 dakika ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

Şekil 5.31-5.34, sırasıyla 460 °C de 30, 90, 195 ve 240 dakika ısıtım işlemi gören Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ tellerin farklı frekans değerleri (1, 5 ve 10MHz) için uygulanan alan ile

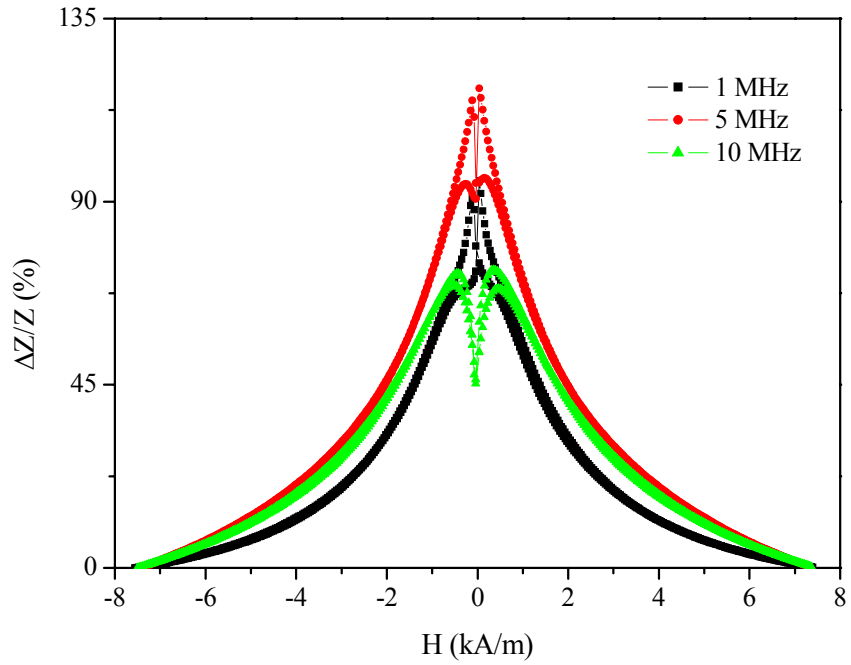
yüzde manyetoempedans değişimlerini göstermektedir. Uygulanan 1MHz sürücü akım frekans değeri için 10 dakikaya kadar olan ısıtılmalarda tek pik davranışları gözlenmiştir. Fakat bu süre üzerindeki ısıtılmalarda artık eğrilerin çift pik davranışları sergilediği belirlenmiştir. 10 dakikalık ısıtılma sonunda gözlenen maksimum değişimin artık ısıtılma süresi ile azaldığı gözlenirken, 10 dakikadan fazla ısıtılma gören numunelerde pik değerlerinin daha yüksek alan değerlerine kaydığı belirlenmiştir. Isıtılma işlem görmemiş numunede, 1MHz'lık sürücü akım frekansı için maksimum pik değeri yaklaşık $H=35$ A/m'lik alan değerinde gözlenirken, 10 dakikalık ısıtılma süresinde bu değerin yaklaşık $H=17$ A/m olduğu görülmektedir. Daha yüksek ısıtılma sürelerinde (240 dakika) pik değeri yaklaşık 188 A/m değerinde ortaya çıkmaktadır.



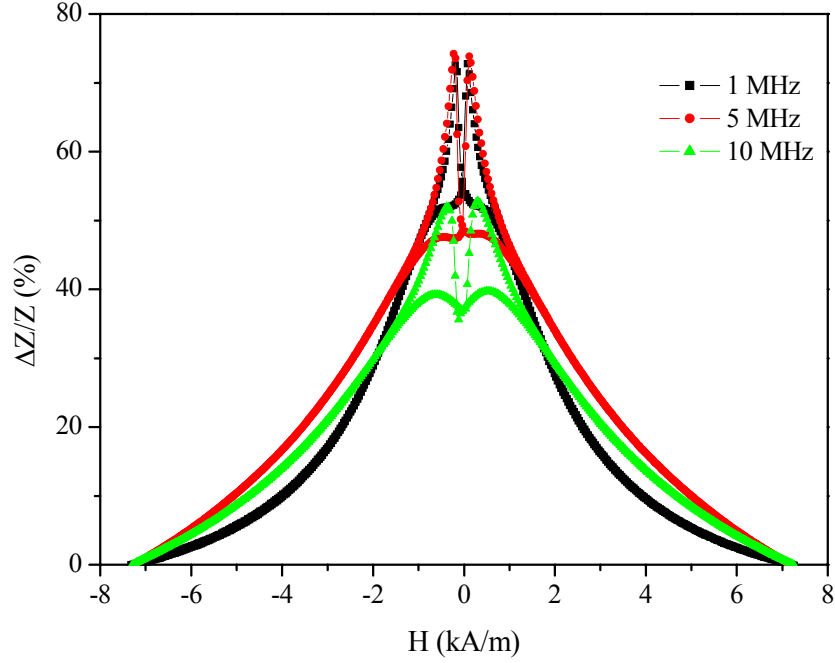
Şekil 5.31. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 30 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.32. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 90 dakika ısıtılan $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.33. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 195 dakika ısıtılan $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

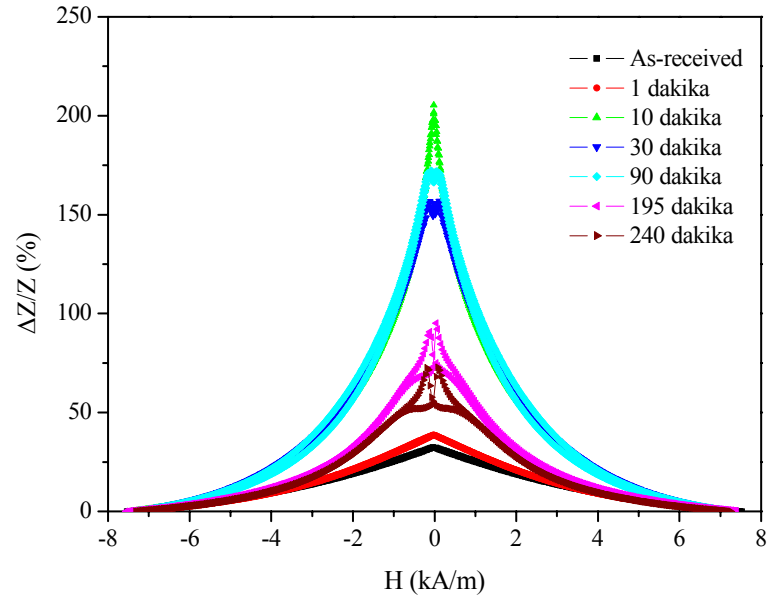


Şekil 5.34. Farklı frekans değerleri için 460 °C de 240 dakika ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

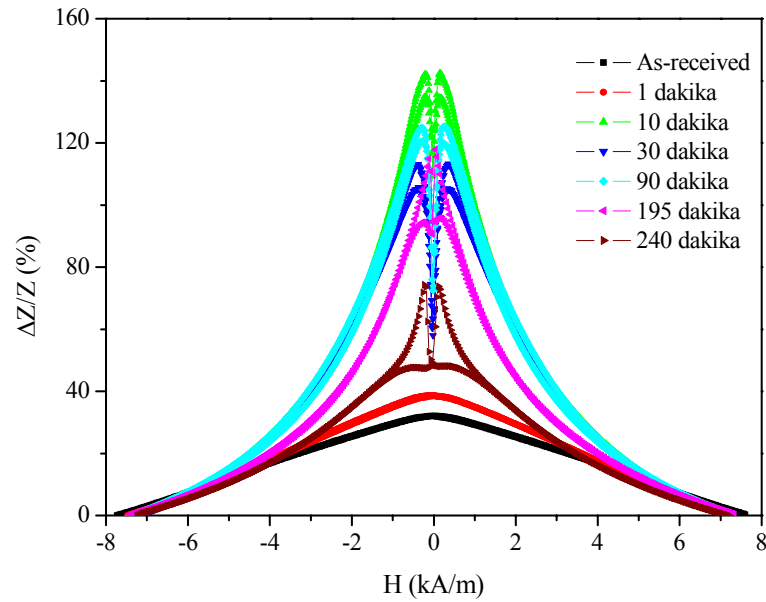
Tek eksenli anizotropi sabiti (K) H_k ile orantılıdır ve $K=M_s H_k/2$ ifadesi ile verilmektedir. M - H ölçümlerinden, ısıl işlem görmemiş Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ tel numunenin doyum manyetizasyon (M_s) değeri 1.03T civarındadır ve bu değer farklı ısıl işlem sürelerinde fazla bir değişim göstermemektedir. Dolayısıyla anizotropi değeri, anizotropi alanı ile orantılıdır. Düşük süreli ısıl işlemlerde (10 dakika) üretim esnasında oluşan iç stresler kısmen rahatlatılır ve anizotropi değeri azalır. Daha uzun süreli ısıl işlemlerde yüzey kristalleşmesinden dolayı anizotropi artar. Sonuçlar dairesel anizotropinin artması ile MI etkinin büyüklüğünün, eşitlik 5.21 de açık şekliyle verilen $\chi_1 \propto 1/K$ ifadesine göre, daha küçük hale geldiğini göstermektedir.

Şekil 5.35, 5.36 ve 5.37, ısıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ tellerin sırasıyla 1MHz, 5MHz ve 10MHz sürücü akım frekans değerleri için uygulanan alanın bir fonksiyonu olarak, yüzde manyetoempedans değişimlerini göstermektedir. 1MHz sürücü akım frekansında ısıl işlem süresi ile ilk olarak, 10 dakikaya kadar yüzde değişim artarken, daha uzun süreli ısıl işlem zamanları ile değişimin azaldığı gözlenmiştir (Şekil 5.35). Sürücü akım frekans değerleri artırıldığında yüzde değişimlerin azaldığı gözlenmiştir (Şekil 5.36 ve 5.37). 10MHz

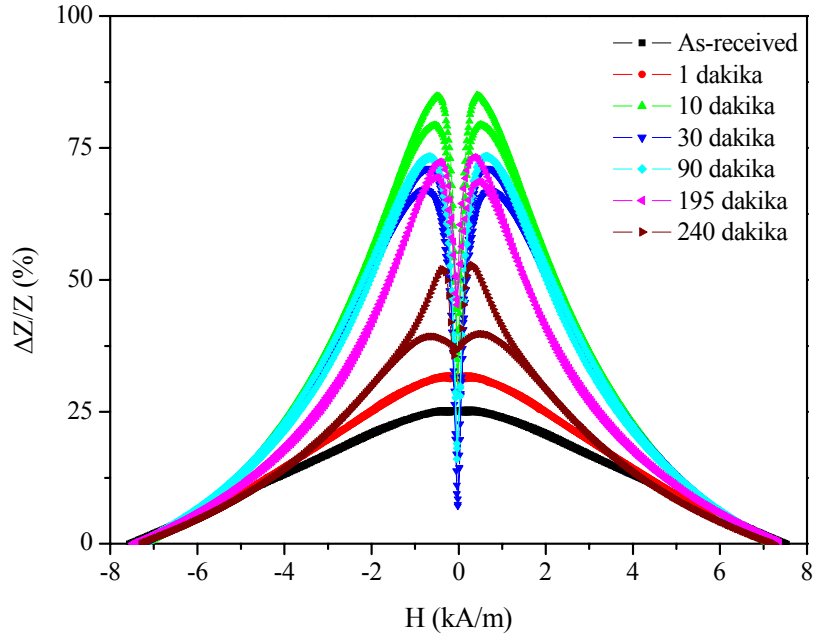
sürücü akım frekans değerlerinde diğer frekans değerlerine oranla daha düşük değişimler olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.35. 1MHz frekans değerinde ısıtılmamış ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.36. 5MHz frekans değerinde ısıtılmamış ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

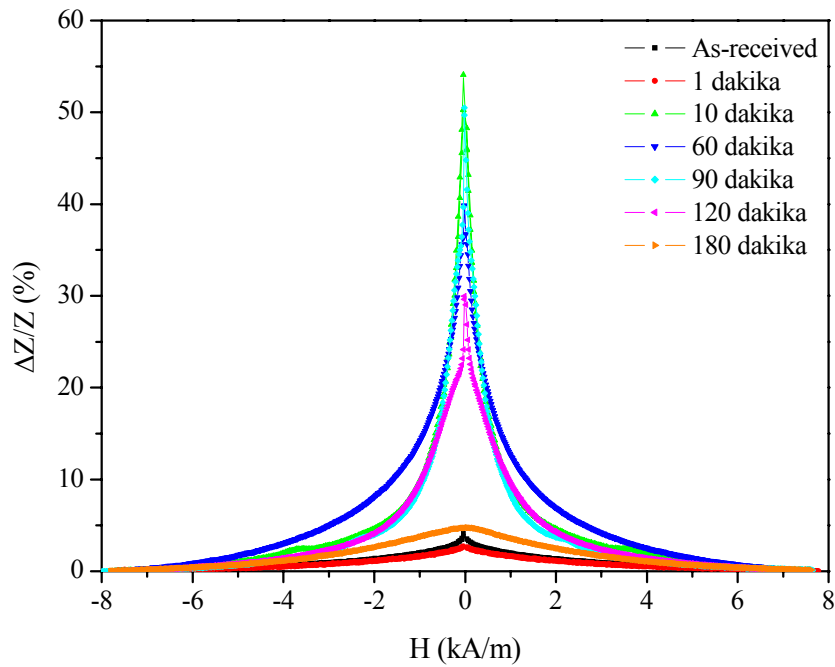


Şekil 5.37. 10MHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

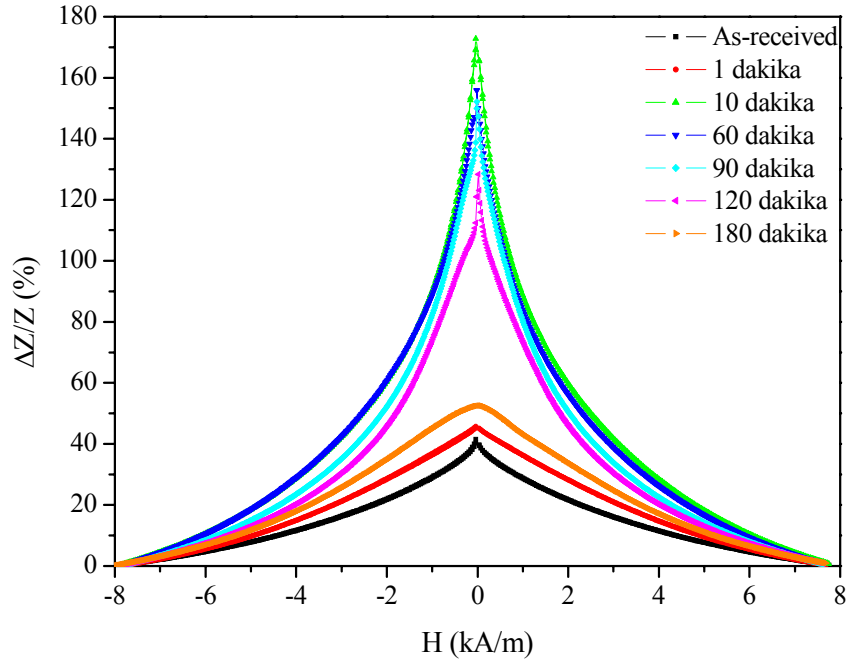
Üretim esnasında ortaya çıkan iç stresleri ortadan kaldırılan ve yüzeyi kristalleşen numunelerde MI değerindeki artış özellikle dikkat çekicidir. 1MHz sürücü akım frekans değerinde, 460°C de 10 dakika ısıl işlem gören $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin gösterdiği MI etkinin, manyetik softluğun artmasından dolayı keskin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Isıl işlem görmemiş numune ile kıyaslandığında değişimin birkaç kat daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.38-5.41, ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için sırasıyla 100kHz, 1MHz, 5MHz ve 10MHz sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan dc manyetik alanla yüzde manyetoempedans değişimlerini göstermektedir. 100kHz ve 1MHz sürücü akım frekans değerleri için, ısıl işlem görmemiş ve farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerde gözlenen maksimum empedans değişimlerinin $H_{dış} \sim 0$ değerlerinde ortaya çıktığı ve manyetoempedans eğrilerin tek pik davranışları sergilediği belirlenmiştir (Şekil 5.38 ve 5.39). Düşük frekans değerlerinde ısıl işlem süresinin artması ile tek pik davranışların değişmediği gözlenirken, 10 dakikalık ısıl işlem sonunda ~%54 olan yüzde değişimin bu süreden sonraki zamanlarda azaldığı ve 180 dakika sonunda değişimin ~%5 değerine düştüğü gözlenmiştir (Şekil 5.38). Düşük frekans değerlerinde büyük manyetoempedans

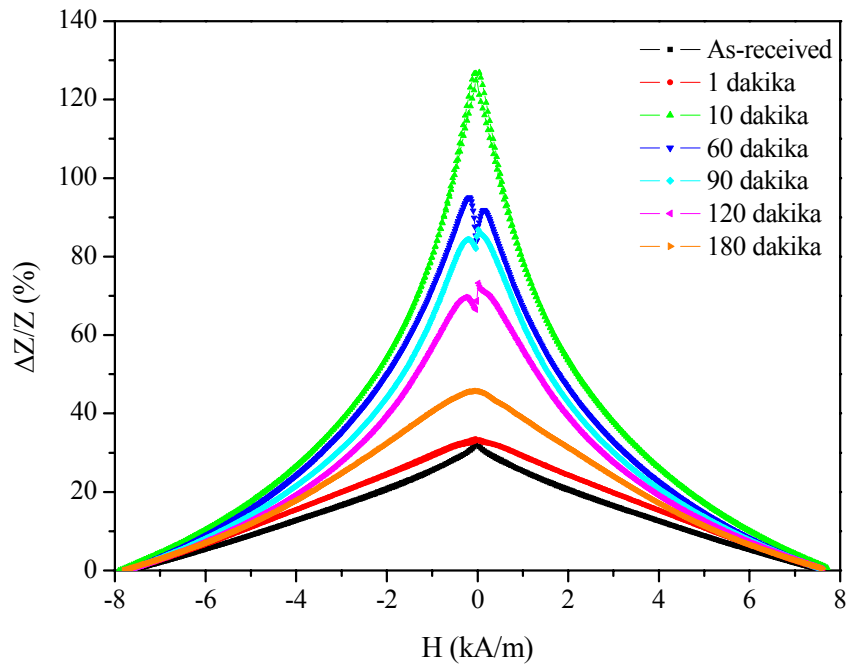
etki (GMI) baskın olan domain duvarının hareketi ile ortaya çıkmaktadır. Artan ısı işlem süresi ile GMI değerindeki gözlenen azalma, sıcaklık artışı ile domain duvar hareketlerinin baskılanmasıyla ilişkilendirilebilir. Benzer sonuçlar ısı işlem gören Co-bazlı şeritler için rapor edilmiştir [99]. Yüksek sürücü akım frekans değerlerinde (5MHz ve 10MHz) ısı işlem görmemiş ve düşük süreli ısı görmüş numunelerin sergiledikleri tek pik davranışları ısı işlem süresinin artması ile çift pik davranışlarına dönüştüğü tespit edilmiştir (Şekil 5.40 ve 5.41). Ayrıca bu sürücü akım frekansı değerleri için, gözlenen çift pik davranışların asimetrik davranışlar sergilediği, yani negatif ve pozitif alan değerlerinde ortaya çıkan piklerin aynı değerlere karşılık gelmediği belirlenmiştir.



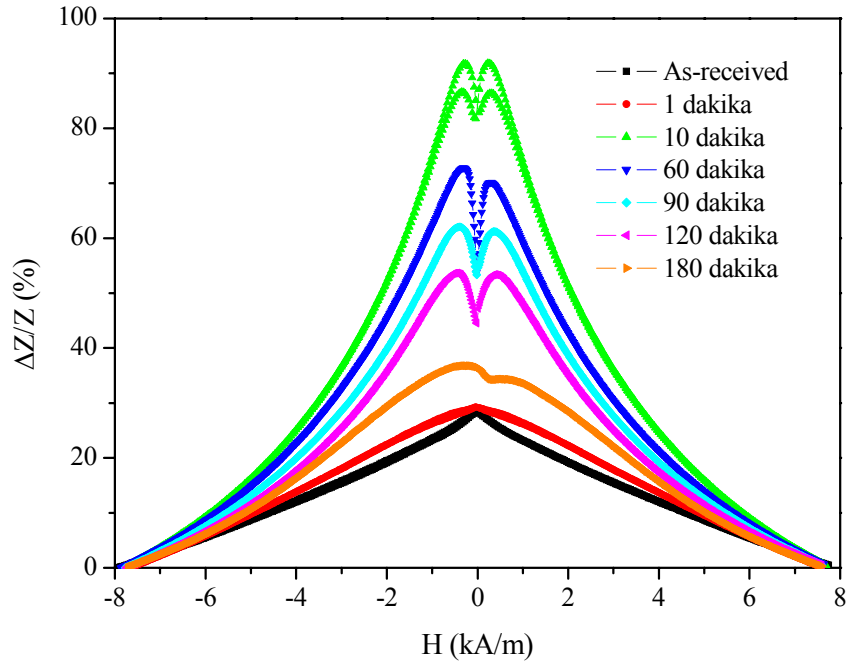
Şekil 5.38. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısı işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için 100kHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.39. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için 1MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.40. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için 5MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.

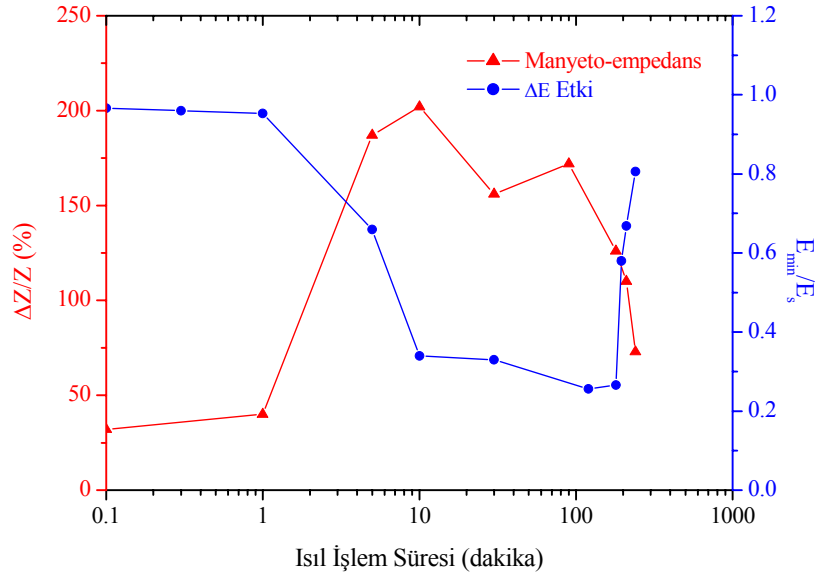


Şekil 5.41. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için 10MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.

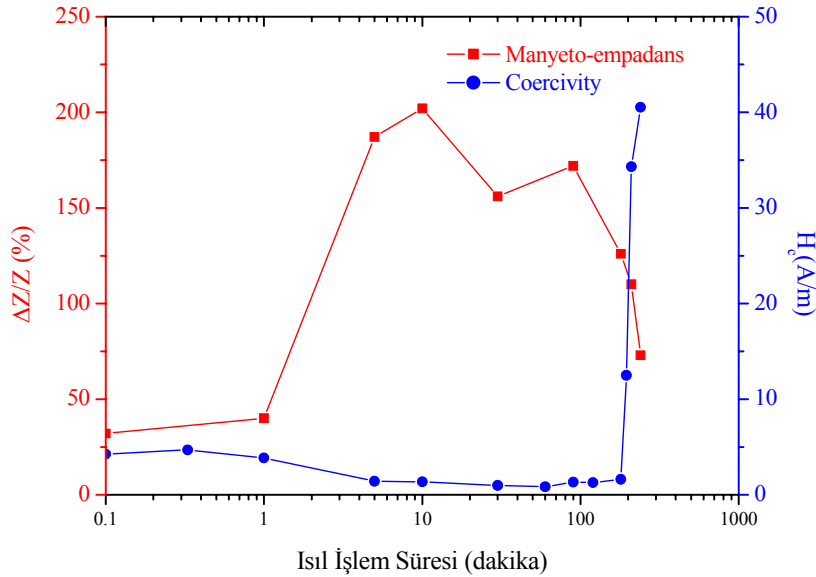
Yüksek frekans değerlerinde domain duvar hareketleri baskılandığından manyetoempedans değişimine gelen katkının büyük bir kısmı manyetizasyon yöneliminden kaynaklanmaktadır [100]. Bu sebeple $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerde çift pik davranışları gözlenmiştir.

Şekil 5.42 de, 460 °C de ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin ısıl işlem zamanının bir fonksiyonu olarak normalize empedans ve Young modülündeki değişimi görülmektedir. Şekil 5.43’de aynı şartlar altında $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin yüzde manyetoempedans ve coercivity değişimleri görülmektedir. MI etkideki artışın, tellerin iç streslerinin azalması ve yüzeylerinde kısmi kristalleşmeler ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Telin 10 dakika boyunca 460 °C de ısıl işleme tabi tutulması ile MI etki belirgin bir şekilde artar. Bu durum iç streslerin azaltılarak manyetik softluğun güçlenmesiyle açıklanmıştır. Şekil 5.43 de ise görüleceği üzere bu ısıl işlem süresi ile manyetik softluğun belirlenmesinde önemli bir parametre olan coercivity değerinin, yaklaşık 0.84 A/m’ lik minimum bir değere düştüğü görülmektedir. Daha uzun süreli ısıl işlem kristal kesrini arttırdığı için anizotropi değeri artış gösterir. Bu nedenle MI ve ΔE etkinin değerlerinin büyüklüğünde büyük bir düşüş gözlenirken, coercivity değerinde bir artış gözlenmiştir (Şekil 5.42,

5.43). MI etkinin şekli yüksek frekans aralığında Bölüm 5.5.1 de yapılan teorik modellerde uyum içerisinde olan çift pik şeklindedir. Birbirleriyle uyum içerisinde olan MI ve ΔE etki verileri yüzeyi kristalleşen telde dairesel anizotropinin mevcut olduğunu doğrulamaktadır.

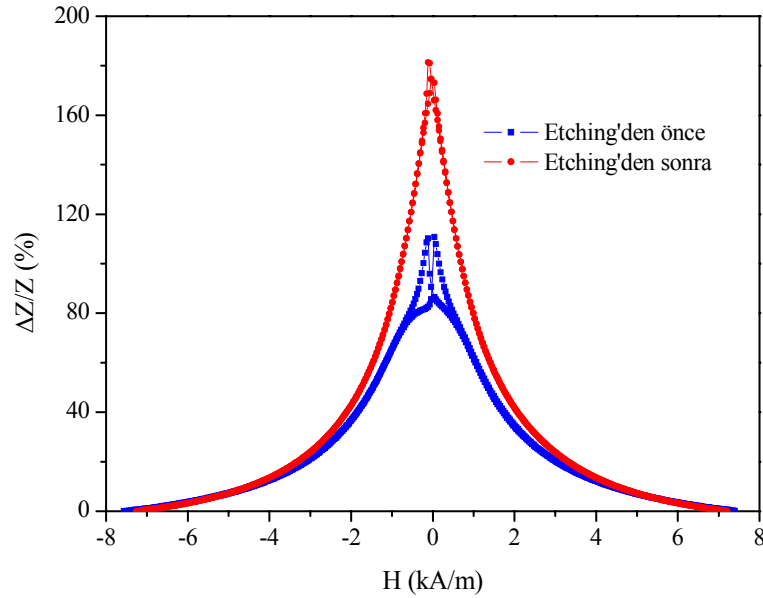


Şekil 5.42. Isıl işlem zamanının bir fonksiyonu olarak $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin yüzde MI ve ΔE etki büyüklüklerinin değişimi.



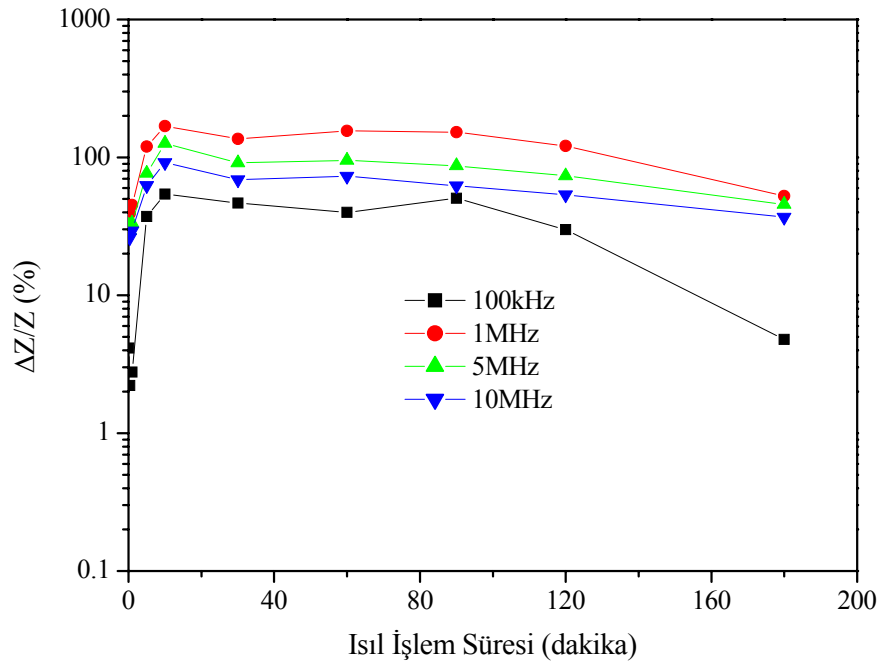
Şekil 5.43. Isıl işlem zamanının bir fonksiyonu olarak $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin yüzde MI ve coercivity büyüklüklerinin değişimi.

Yüzeyi kristalleşen teller büyük bir ΔE ve MI etki göstermektedir. Bundan dolayı yüzeyi kristalleşmiş FeCrSiB tellerde manyetik momentlerin $H=0$ alan altında dairesel yönde yönelim gösterdiği sonucuna varılmaktadır [92]. Yüksek frekans aralığında MI eğrilerinin şekli, çift pik formundadır. Birbirleriyle uyum içerisinde olan MI ve ΔE etki verileri yüzeyi kristalleşen tellerde dairesel anizotropinin mevcut olduğunu kanıtlar (Şekil 5.42). Bu hipotezi doğrulamak için dairesel anizotropinin oluştuğu 460°C de 210 dakika ısıtma işlemiyle yüzeyi kristalleşen numune 20 dakika süre ile HCl içinde etching edilmiştir. Şekil 5.44, 5MHz sürücü akım frekans değerinde 460°C de 210 dakika ısıtma işlemi gören $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telin etching'den önce ve sonra uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir. MI sonuçları yüzey tabakası kaldırıldıktan sonra (etching'den sonra) çift piklerin ve dairesel anizotropinin kaybolduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca etching işleminden sonra MI eğrilerinin artık tek pik davranışları sergilediği belirlenmiştir (Şekil 5.44). Benzer asimetric manyetoempedans eğrileri, yüzeyi kristalleşmiş Co-bazlı numunelerde Kim ve arkadaşları tarafından rapor edilmiştir [101]. Diğer yandan etching'den sonra MI etkinin büyüklüğü kristal yüzeyin kaldırılması sonucunda anizotropideki azalma ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.



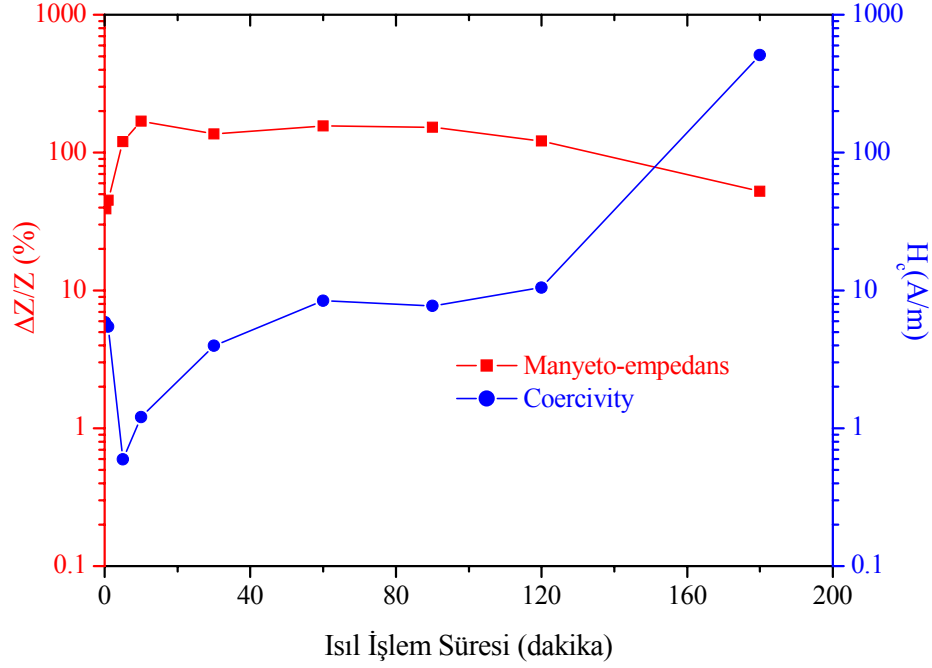
Şekil 5.44. 5MHz sürücü akım frekans değerinde 460°C de 210 dakika ısıtma işlemi gören $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ telin etching'den önce ve sonra uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

Şekil 5.45, uygulanan sürücü akım frekans değerleri için 460°C de farklı ısıl işlem sürelerine bağlı olarak $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin yüzde manyetoempedans değişimlerini göstermektedir. 10 dakika ısıl işlem görmüş numuneler için 100kHz, 1MHz, 5MHz ve 10MHz sürücü akım frekans değerlerinde gözlenen maksimum değişimler sırasıyla, %54, %169, %127 ve %92 olarak belirlenmiştir. Tüm sürücü akım frekans değerleri için gözlenen maksimum değişim 10 dakikalık ısıl işlem sonunda ortaya çıkmış ve ısıl işlem süresinin artması ile yüzde değişimlerin azaldığı gözlenmiştir. Verilen frekans aralıkları için en büyük değişimin 1MHz frekans civarında ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 5.45).



Şekil 5.45. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin farklı sürücü akım değerleri için ısıl işlem süresi ile yüzde manyetoempedans değişimi.

Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için ısıl işlem süresine bağlı olarak yüzde manyetoempedans ve coercivity değişimleri Şekil 5.46 da verilmiştir. Isıl işlem görmemiş numune için yüzde manyetoempedans değişimi yaklaşık %40 ve coercivity değeri ~6A/m olarak belirlenmiştir.

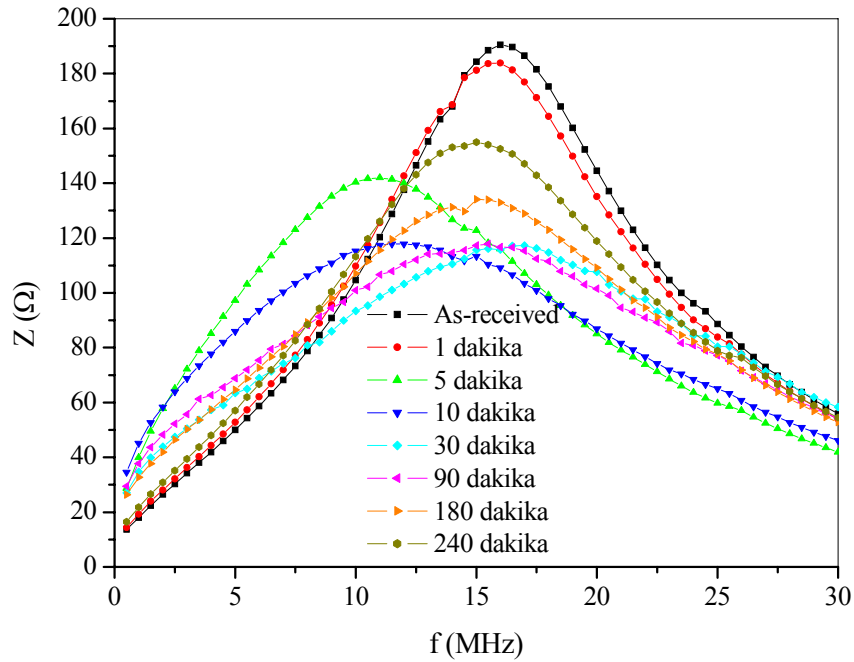


Şekil 5.46. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için ısıl işlem süresine bağlı olarak 1MHz sürücü akım frekans değerinde yüzde manyetoempedans ve coercivity değişimi.

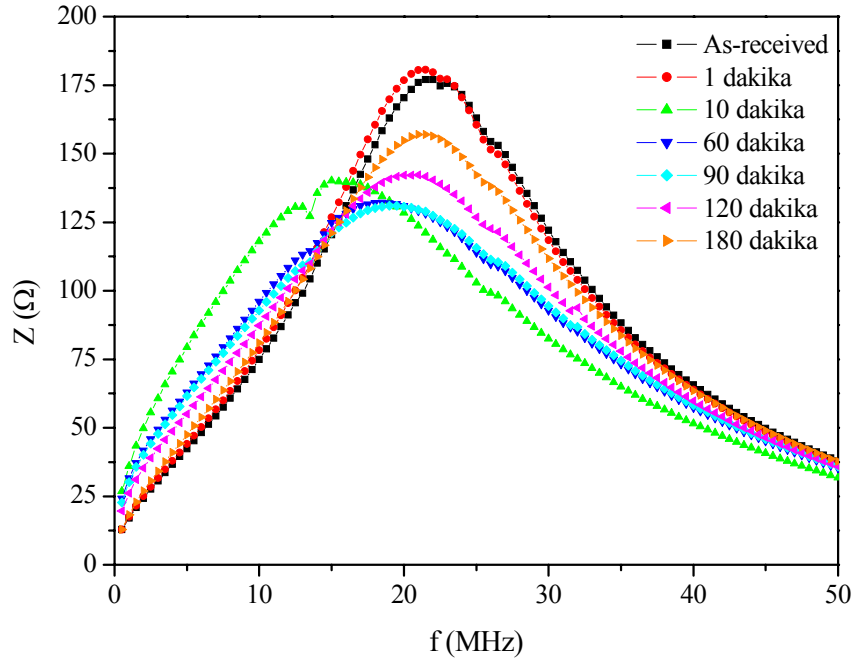
Şekil 5.43 ve 5.46 göz önünde bulundurularak $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerde hesaplanan coercivity ve yüzde manyetoempedans değerlerinin ısıl işlemle değişimi düşük, orta ve uzun süreli olarak ayrılabilir. Düşük ısıl işlem sürelerinde, coercivity (H_c) değerinde bir azalma ve empedans değişiminde artma olmaktadır. Bu bölgede yapı tamamen amorf özelliğini koruduğundan, kristal anizotropinin toplam anizotropiye katkısı sıfırdır. Ancak bu bölgede uygulanan ısıl işlemler numunenin iç stresleri azalttığından $K_\sigma = 3/2\lambda_s\sigma$ ile verilen manyeto-elastik anizotropiyi dolayısı ile toplam anizotropi enerjisini K azaltmaktadır. Bölüm 5.5.1 de teorik modelde verildiği gibi alınganlık anizotropi ile ters orantılıdır ($\chi \propto 1/K$). Anizotropinin azalmasından dolayı manyetik alınganlık ve dolayısıyla empedans bu bölgede artmaktadır. Orta süreli ısıl işlemlerde coercivity ve yüzde empedans değerlerinde fazla bir değişim gözlenmemiştir. Uzun süreli ısıl işlemlerde yapıda Fe_2B fazı oluşmakta ve manyetik olarak numunenin softluğunu bozan bu faz kristal anizotropi değerini yani, toplam anizotropi enerji değerini artırarak χ değerini ve dolayısıyla empedans değerini azaltmaktadır. Fe_2B fazı yapıdaki pinning noktalarının artmasına neden olmaktadır. Bu

durum coercivity değerlerinin keskin bir şekilde artmasına ve yüzde manyetoempedans değişimlerinin ise azalmasına neden olmaktadır.

Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için empedansın frekansa bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 5.47 ve 5.48 de verilmiştir. Isıl işlem görmemiş durumda Fe bazlı malzemelerin dairesel geçirgenliği büyük değildir. Isıl işlemle iç streslerin kısmen kaldırılması sonucu anizotropinin azalması geçirgenliğin tüm bileşenlerini arttırarak, MI etkinin büyüklüğünde bir artışa neden olur. Yüzeyi kristalleşen telin dairesel geçirgenliği çok yüksek olduğu için bu telde büyük bir MI etki gözlenmiştir. Bu durum, yüzey kristalleşmesi ve yüzey streslerine bağlı olan numunenin dairesel domain yapısına dayanarak açıklanır [6, 89].



Şekil 5.47. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin frekans ile empedans değişimi.

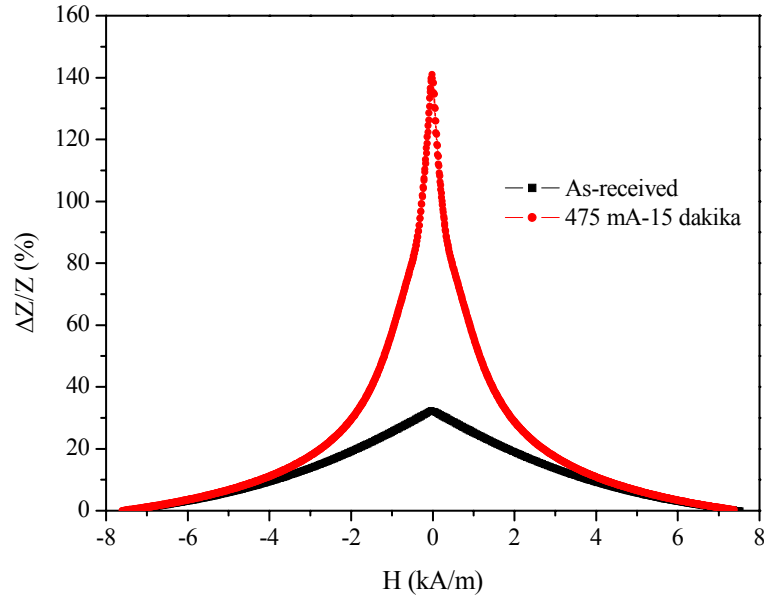


Şekil 5.48. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ teller için frekansa karşı empedans değişimi.

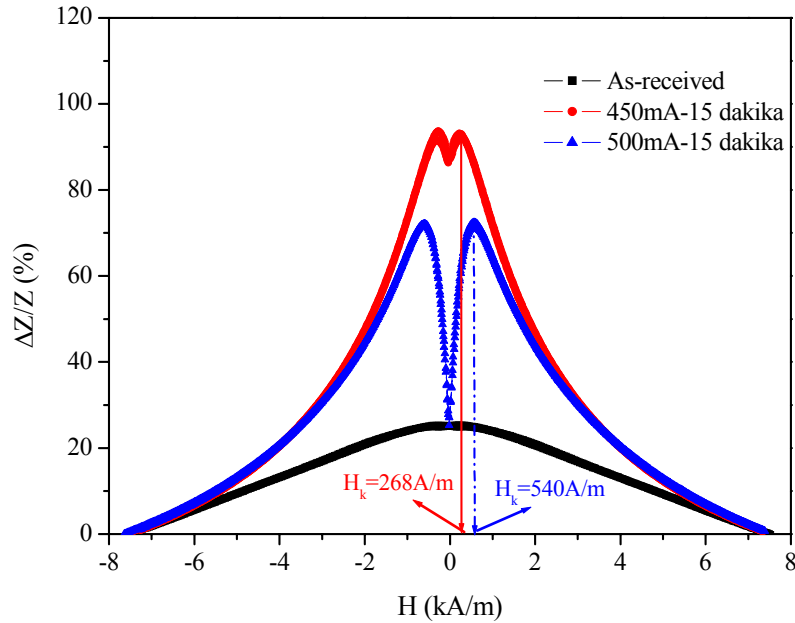
Isıl işlem görmemiş ve akım altında ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin 1MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi Şekil 5.49 da verilmiştir. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tel, 1MHz frekans değerinde ~%32' lik yüzde değişim gösterirken, 475mA'lık akım altında 15 dakika ısıl işlem gören numunede yaklaşık olarak ~%145 değerinde keskin bir değişim tespit edilmiştir. Bu keskin artış numune üretimi esnasında ortaya çıkan iç streslerin azaltılması ile anizotropi değerindeki azalmanın bir sonucudur. Isıl işlem görmemiş ve farklı akım değerleri altında ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin 10MHz sürücü akım frekans değerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi, Şekil 5.50'de gösterilmiştir.

En büyük değişim yaklaşık ~%95'lik değer ile 450mA akım değeri altında ısıl işlem gören numunede gözlenmiştir. Isıl işlem akımının artması ile (500mA) yüzde değişimin yaklaşık ~%72'lik bir değere düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca anizotropi alanın 450mA akım değerinde yaklaşık 268 A/m iken, 500mA değerinde yaklaşık 540 A/m değerine yükselmektedir. Teorik modelde, Eşitlik 5.21'den alınanlık anizotropi alanı ile ters orantılı olduğundan, alanın artması ile alınanlık değeri azalmaktadır. Empedans eşitlik 5.18'den görüleceği gibi alınanlık ya da geçirgenlik değerinin karekökü ile

doğru orantılıdır. Dolayısıyla alınganlık değerindeki azalma, aynı zamanda empedans değerindeki azalmaya karşılık gelmektedir.



şekil 5.49. 1MHz sürücü akım frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve akım altında ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.



şekil 5.50. 10MHz sürücü akım frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve farklı akım değerleri altında ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.

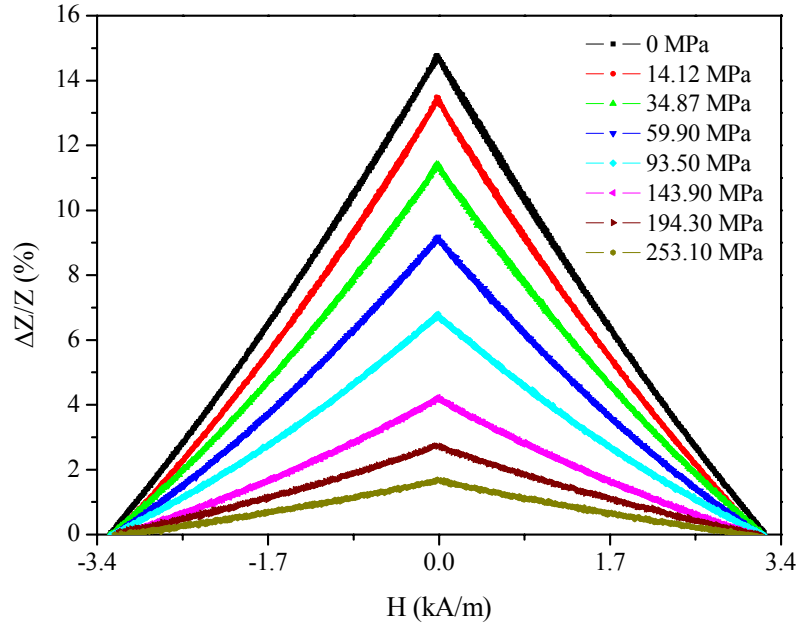
5.6. Stres-empedans Ölçümleri

5. 6.1. Isıl İşlem Görmemiş ve Isıl İşlem Gören Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ Tellerde Stres-empedans Etki

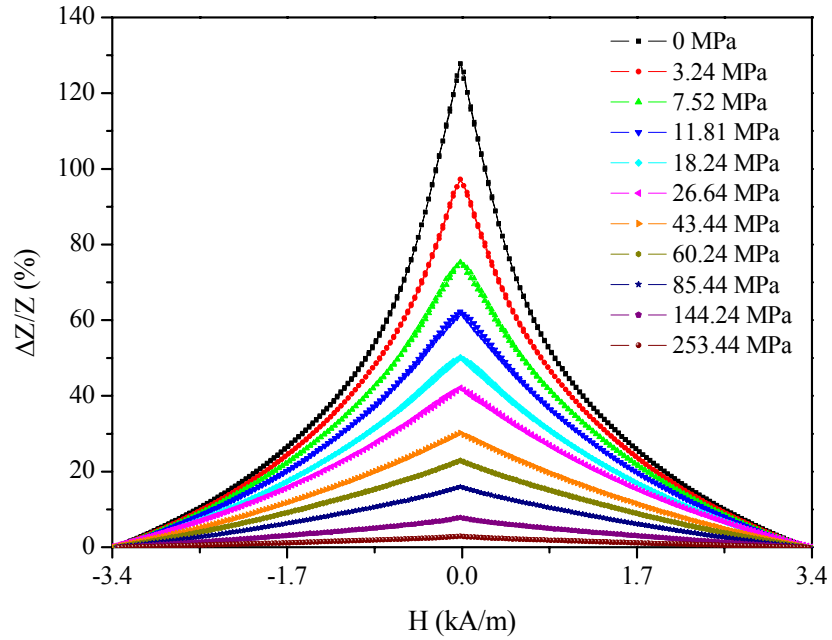
Manyetoempedansın yüzde değişimi, uygulanan farklı gerilme stresler (0 dan 250 MPa' a) ve uygulanan alan ile ısıl işlem görmemiş ve ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ tellerde ölçülmüştür. Bölüm 5.4.4 de (Şekil 5.42 ve 5.43) 460 °C de ısıtılan tellerde, düşük ısıl işlem sürelerinde MI etkinin keskin bir şekilde arttığı ve uzun işlem sürelerinde ise manyetoempedans'ın büyüklüğünde büyük azalmaların olduğu belirlenmişti. Isıl işlem görmemiş, 460 °C de 10 dakika ve 195 dakika ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ teller için, 1MHz sürücü akım frekans değerinde, manyetoempedansın yüzde değişimi, sıfır ve uygulanan farklı gerilme stresler için Şekil 5.51-5.53 de gösterilmiştir.

Gerilme stresin olmadığı durumdaki sonuçlar, ısıl işlem görmemiş telin dairesel geçirgenliğinin yüksek olmadığını ifade etmektedir. Bu ise üretim sürecinde ortaya çıkan streslerden dolayı anizotropinin yüksek ve domain yapının genelde radyal olması ile ilişkilidir. Isıl işlem uygulanarak üretim sonucu ortaya çıkan iç streslerin kısmen kaldırılması ile anizotropideki azalma geçirgenliğin tüm bileşenlerinin artmasına sebep olur. 460 °C de 10 dakika ısıtılan tellerde MI etki keskin bir şekilde artar. Şekil 5.52 ve 5.53, 10 ve 195 dakikalık ısıl işleminden sonra manyetoempedansın yüzde değişiminin, sıfır gerilme stres için sırası ile %130 ve %80 değerlerine arttığını gösterir. Daha yüksek ısıl işlem süreleri, kristal kesir yüzdesinin artmasına ve buna bağlı olarak da anizotropinin artmasına neden olmaktadır.

Bu nedenle manyetoempedans etkinin büyüklüğünde büyük bir azalma gözlenilmiştir. Yüzeyi kristalleşen telde MI etkinin büyüklüğü, dairesel geçirgenliğin çok yüksek olmasından dolayı ısıl işlem görmemiş numuneden çok daha yüksektir. Bu yüzey kristalleşmesi ve yüzey streslerine dayanarak Fe bazlı amorf tel için önerilen dairesel domain yapıya dayanarak açıklanabilir [92]. MI etkinin tek pik davranışları ısıl işlem görmemiş ve 10 dakika ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telde gözlenmiştir. MI etkinin maksimum değeri, tensile stresin olmadığı durumda ($\sigma=0$) gözlenmiş ve daha sonra gerilme stresin artması ile MI etkinin büyüklüğünde azalma olduğu belirlenmiştir. Isıl işlem görmemiş Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telde gerilme stresin artması ile MI etkideki tek pik davranışların değişmediği görülmüştür



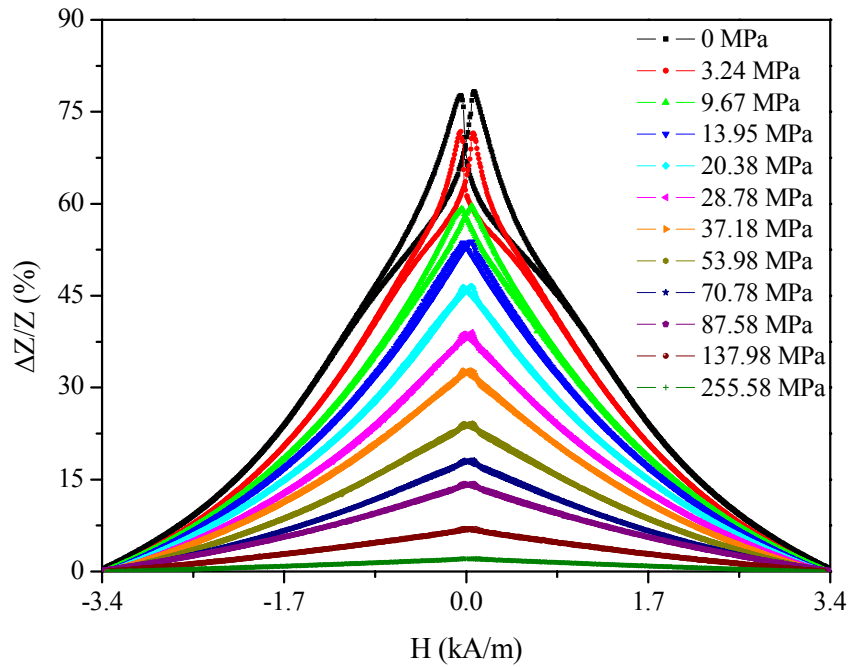
Şekil 5.51. Değişik gerilme stres değerlerinde ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi (Sürücü akım frekansı=1MHz).



Şekil 5.52. Değişik gerilme stres değerlerinde 460 °C 10 dakika ısıl işlem uygulanmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi(Sürücü akım frekansı=1MHz) .

Isıl işlem görmemiş ve 10 dakika ısıtılan teller için $\Delta Z/Z$ (%) nin pik değerlerinin sırası ile $\sigma=0$ MPa da %14.7 den $\sigma=250$ MPa için %1.6 ya ve $\sigma=0$ MPa da %127.7 den $\sigma=250$ MPa için %2.9 değerlerine düştüğü belirlenmiştir (Şekil

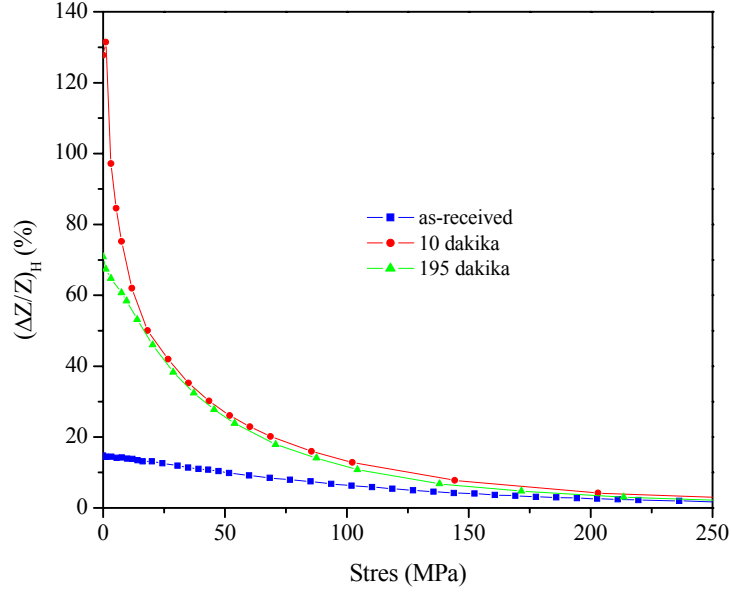
5.54). 195 dakika ısıtılan tellerde bir asimetrik MI eğrisi görülmektedir. MI eğrinin asimetrikliği gerilme stresin artması ile giderek azalır ve 138 MPa lık stres değerinde asimetrik MI eğrileri kaybolarak, tekrar tek pik davranışları gözlenir. 195 dakikada ısıtılan teller için $\Delta Z/Z$ (%) nin pik değerleri, $\sigma=0$ MPa da %80 den $\sigma=250$ MPa için %2 değerine düştüğü belirlenmiştir (Şekil 5.54). Yapılan tüm ölçümlerde, MI etki büyüklüğünün uygulanan gerilme stresin artması ile azaldığı görülmüştür. Çünkü pozitif magnetostriction a sahip numunede stres manyetik momentleri telin boyu doğrultusunda yönlendirmeye çalışacaktır buda numune kolay ekseninin telin uzunluğu doğrultusunda oluşmasını sağlayacağından teorik model sonucu olarak verilen Şekil 5.19'dan de görüleceği gibi MI etkinin büyüklüğünün azalmasına neden olacaktır.



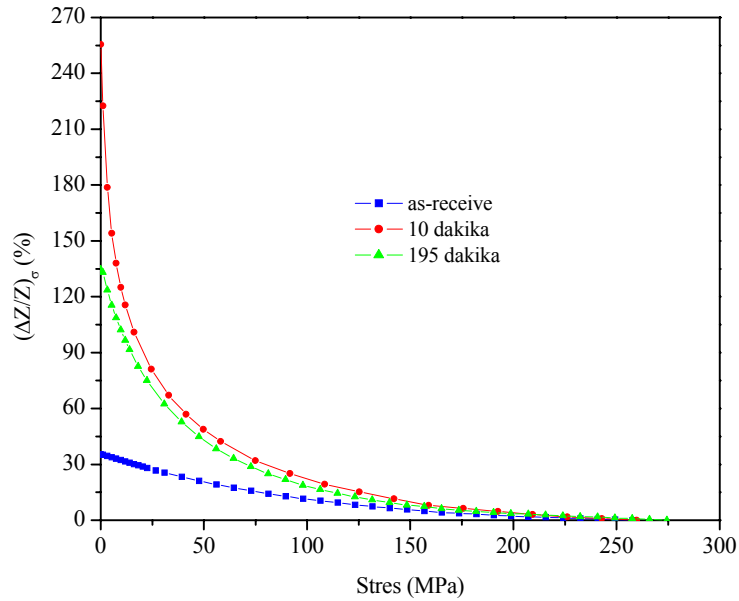
Şekil 5.53. Değişik tensile stres değerlerinde 460 °C 195 dakika ısıtılmış Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi(Sürücü akım frekansı=1MHz).

Şekil 5.55, ısıtılmış ve ısıtılmamış teller için stres-empedans oranının gerilme stresiyle ilişkisini göstermektedir. Stres-empedans (SI) oranı, $\Delta Z/Z_{\sigma}(\%) = 100 [(Z(\sigma)-Z(\sigma_{max}))/ Z(\sigma_{max})]$ olarak tanımlanır, burada $Z(\sigma_{max})$, $\sigma=250$ MPa lık dış gerilme stresindeki empedans ve $Z(\sigma)$ gerilme stresin sıfır olduğu durumdaki empedans değeridir.

460 °C de 10 dakika ısıtıl işlem uygulanmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde SI etkinin ~%255 değişimle en büyük değere ulaştığı belirlenmiştir. Uygulanan gerilme streslerinin bir fonksiyonu olarak, $\Delta Z/Z$ (%) ve $\Delta Z/Z_{\sigma}$ (%) değerlerindeki azalmanın telin domain yapısında değişimlere yol açan manyeto-elastik anizotropileri artırdığı sonucuna varılabilir.

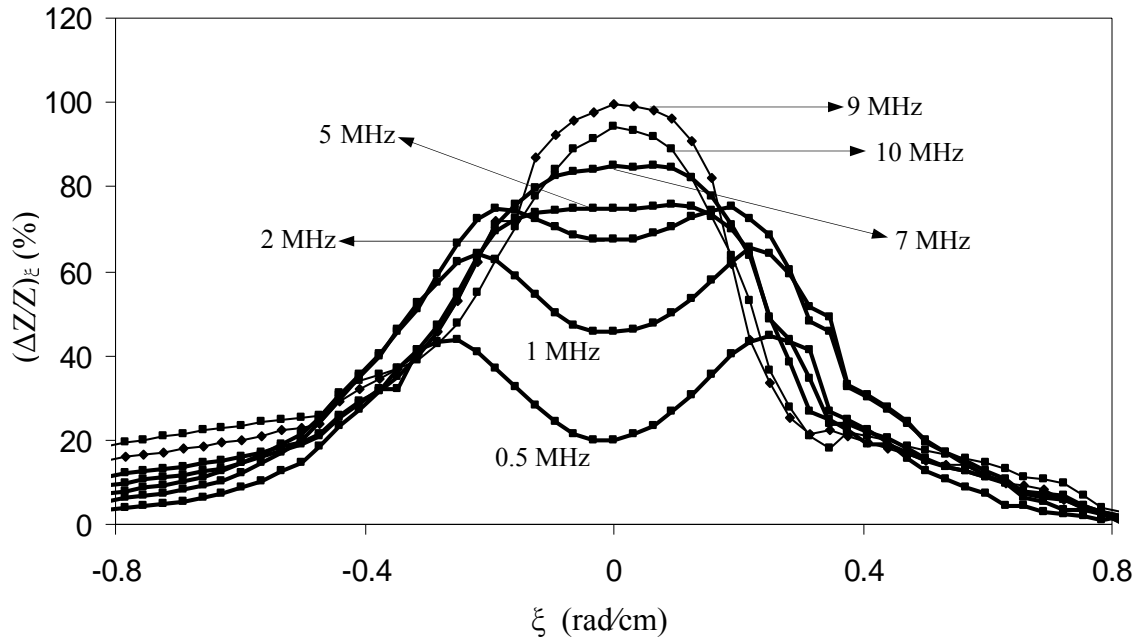


Şekil 5.54. Isıl işlem görmemiş ve ısıtıl işlem yapılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin yüzde MI oranlarının strese bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.55. Isıl işlem görmemiş ve ısıtıl işlem yapılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerde uygulanan strese bağlı olarak strempedans değişimi.

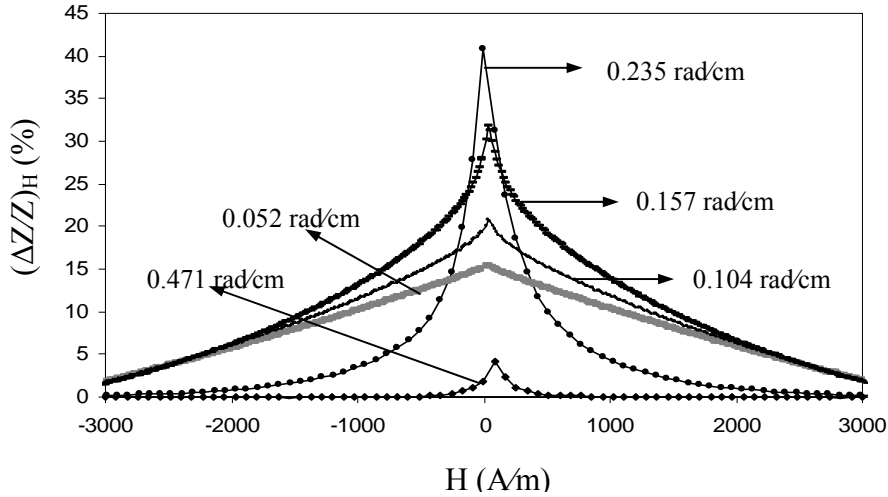
Bükmel stres-empedans ölçümünde $(\Delta Z/Z)_H(\%)=100[Z(H)-Z(H_{\max})]/Z(H_{\max})$, $H_{\max}=3400$ A/m ve empedansın bükme strese bağlı ölçümünde $(\Delta Z/Z)_\xi(\%)=100[Z(\xi)-Z(\xi_{\max})]/Z(\xi_{\max})$, $\xi_{\max}=1.2$ rad/cm olarak tanımlanmıştır. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin 0.5 ve 10 MHz aralığındaki farklı çalışma frekansları için empedansın torsional strese bağlılığı Şekil 5.56 da gösterilmiştir. Bükme stresin pozitif ve negatif değerleri için oldukça simetrik sonuçlar elde edilmiştir. Bükme-empedans (TI) oranı, $(\Delta Z/Z)_\xi$ (%), sürücü akım frekansının artması ile ilk olarak artış göstererek, 9 MHz lık frekans değerinde maksimuma ulaştıktan sonra, bu frekans üzerindeki değerlerde bükme empedans oranı azalış göstermiştir. Yüksek frekansta ortaya çıkan empedans eğrisi, bükme stresin olmadığı durumda maksimum bir değer gösterirken, torsional stresin uygulanmasıyla yavaş bir şekilde azalır. Düşük frekans aralığında (0.2-2 MHz) ortaya çıkan eğriler için bu durum geçerli değildir. Burada uygulanan düşük bükme streslerde empedans bir maksimuma ulaşır ve bükme stresin daha fazla artmasıyla empedansta bir azalış görülür.



Şekil 5.56. Isıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin değişik frekanslardaki bükme strese bağlı olarak $(\Delta Z/Z)_\xi(\%)$ değişimleri.

Bükme stres etkisini incelemek için, farklı bükme stresler altında $(\Delta Z/Z)_H$ (%) ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5.57). Empedansın, bükme stres altında 0.235 rad/cm değer

için %15 den % 45 e artış gösterdiği gözlenmiştir. Isıl işlem görmemiş telin karakteristik manyetoempedans eğrisindeki bu artış, telin iç bölgesi ve dış kabuğu arasındaki dairesel domainlerin şekillenmeleriyle ilişkilidir. Diğer taraftan, bükme stresin daha fazla artması ile manyetoempedans etkinin büyüklüğünün azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5.57. Isıl işlem görmemiş Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telin değişik bükme streslerdeki 1MHz sürücü frekansındaki $(\Delta Z/Z)_H(\%)$ eğrileri.

500 mA lik akım altında 15 dakika süreyle numuneye uygulanan akım altında ısıl işlem ile $(\Delta Z/Z)_\xi(\%)$ değişimi Şekil 5.58’de gösterilmiştir. 15 dakika süreyle akım altında ısıl işleme tabi tutulan tellerin $(\Delta Z/Z)_\xi(\%)$ büyüklüğü %150 artmış ve ısıl işlem süresinin daha fazla artması $(\Delta Z/Z)_\xi(\%)$ büyüklüğünün azalmasına neden olmuştur. Bununla beraber akım altında ısıl işlem gören tellere bükme stres uygulamakla, empedansta herhangi bir artış gözlenememiş ve torsional stresin uygulanmasıyla empedansta doğrudan bir azalmanın olduğu belirlenmiştir.

Manyetik moment yönelimine bağlı olarak geliştirilen ve önceki çalışmalarda rapor edilen [102], bükme stresin alınganlığa bağlılığını açıklayan benzer basit bir model geliştirilmiştir. Numunenin empedansı (Z), enine alınganlık ile (χ_t) orantılıdır ve $Z\alpha\sqrt{1+4\pi\chi_t}$ ifadesi ile verilir. Bu model Bölüm 5.5.1 de eşitlik 5.21 ile verilen modelin bükme stres için geliştirilmiş halidir. Modelde tek eksenli anizotropi sabitli (K) tek bir domain içindeki manyetizasyon yönelimi göz önünde bulundurularak, enine alınganlığın empedans yerine bükme strese bağlılığı hesaplanmıştır. Anizotropi alanı

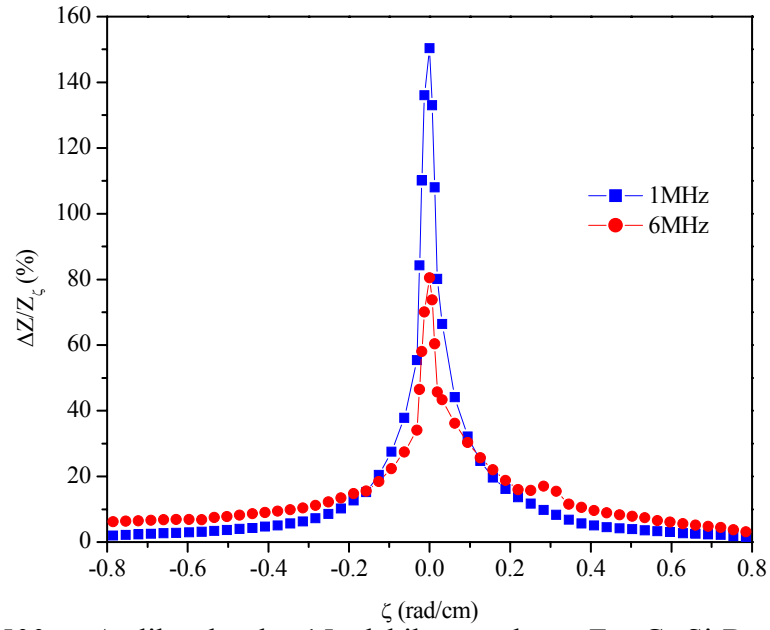
(H_k), anizotropi sabitine (K) $H_k=2K/M_s$ şeklinde bağlıdır. Sıfır manyetik alanda bükme stres manyetizasyon ile kolay eksen arasında $\theta=\pi/4$ lük bir açı meydana gelir. Numune eksenini boyunca uygulanan ac akım (I), enine bir manyetik alan (H_t) meydana getirir ve θ_k kolay eksen açısidir. bükme stres (ξ) altında enerji yoğunluğu eşitlik 5.25 ile verilir.

$$E = K \sin^2(\theta - \theta_k) + \frac{1}{2} \mu_0 M_s H_\xi \sin^2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) - \mu_0 M_s H_t \cos \theta \quad (5.25)$$

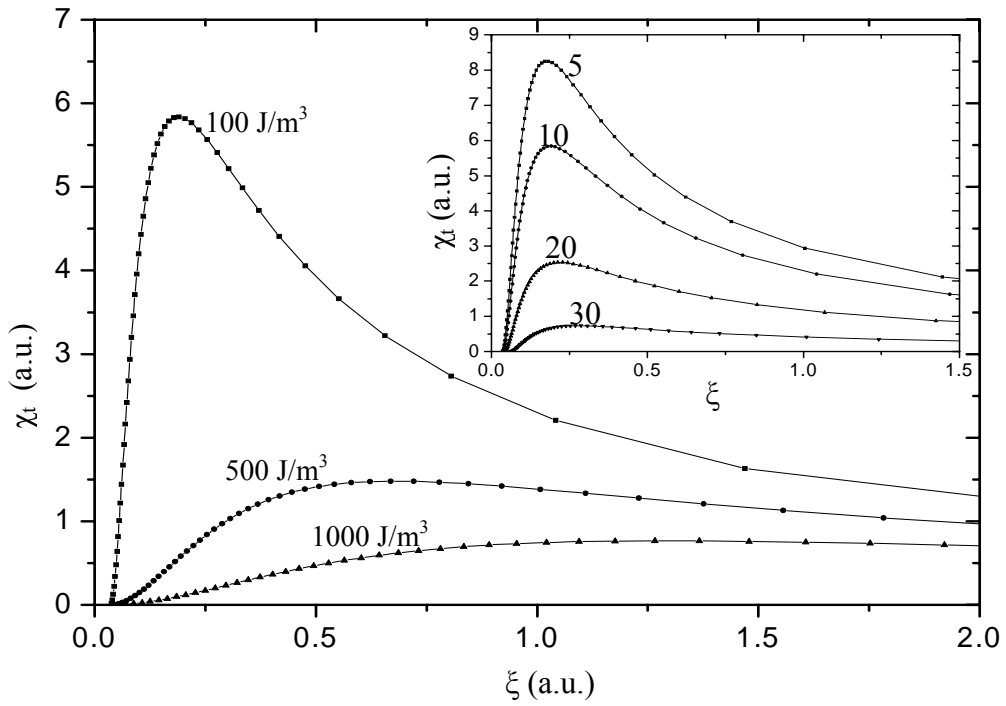
Eşitlik 5.25 den θ , $\partial E / \partial \theta = 0$ şartı ile ve enine alınganlık, küçük H_t yaklaşımı altında belirlenir ve enine alınganlık eşitlik 5.26 ile verildiği gibidir.

$$\chi_t = \frac{M_s \sin^2(\theta - \theta_k)}{(2K / M_s) \cos 2(\theta - \theta_k) + H_\xi \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) - H_t \sin \theta} \quad (5.26)$$

Burada $H_\xi=2K_\xi/\mu_0M_s$ ve $K_\xi=3/2\lambda_s\xi Gr$ şeklindedir. G, shear modülü ve r, eksenden uzaklığı temsil eder. Uygulanan bükme stresin bir fonksiyonu olarak enine alınganlık eğrileri, farklı K değerleri için Şekil 5.59 da gösterilmiştir. Farklı kolay eksen yönelimleri için ise, uygulanan bükme stresin bir fonksiyonu olarak enine alınganlık eğrileri Şekil 5.59 içerisindeki küçük egride verilmiştir. Modelden de görüldüğü gibi $(\Delta Z/Z)_\xi$ (%) nin büyüklüğü anizotropinin artması ile azalır. 500 mA akım altında yapılan düşük süreli ısıt işlemler numune üretimi esnasında ortaya çıkan iç stersleri kısmen kaldırmaktadır. Bundan dolayı akım altında ısıt işlem gören teller ısıt işlem görmemiş tellerden daha küçük anizotropiye sahiptir. Eşitlik 5.26 dan da görüleceği üzere alınganlık ve buna bağlı olarak stres empedans değişimi numunedeki anizotropinin büyüklüğü ile ters orantılıdır. Bu nedenle düşük süreli ısıt işlem uygulanan numunelerde daha büyük bükme stres empedans etki gözlenmiştir.



Şekil 5.58. 500 mA lik akımla 15 dakika ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telin değişik frekanslardaki $(\Delta Z/Z)_{\xi}(\%)$ eğrileri.



Şekil 5.59. Değişik K değerleri için enine alınganlık değerlerinin bükme stresle değişimi. Küçük grafik değişik kolay eksen yönelimleri için enine alınganlık değerlerinin bükme stresle değişimini göstermektedir. Eğriler eşitlik 5.26 kullanılarak hesaplanmıştır.

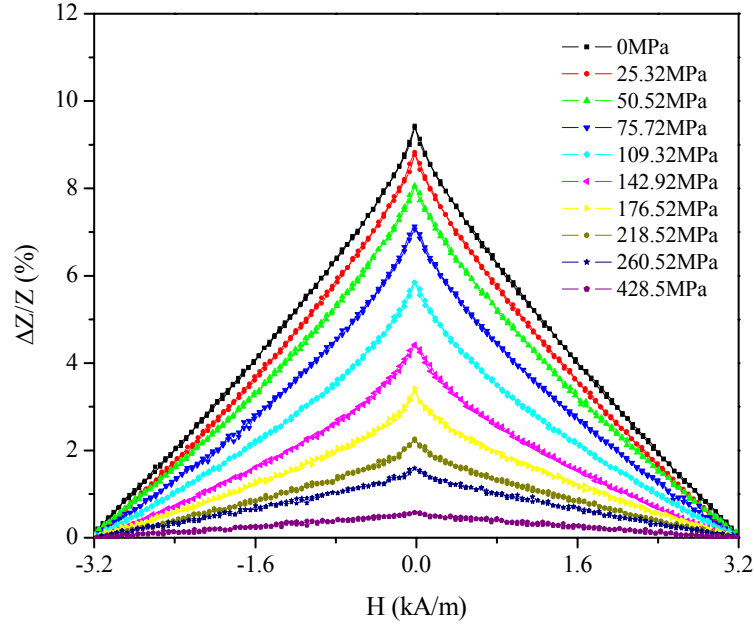
5.6.2. Isıl İşlem Görmemiş ve Isıl İşlem Gören Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅ Tellerde Stres-empedans Etki

Manyetoempedansın yüzde değişimi, uygulanan farklı gerilme stresler (0-428.5MPa) ve uygulanan alan ile ısıl işlem görmemiş ve ısıtılan Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅ tellerde ölçülmüştür. Isıl işlem görmemiş, 460 °C de 5 dakika ve 90 dakika ısıtılan Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅ teller için 1MHz sürücü akım frekans değerinde, manyetoempedansın yüzde değişimi, sıfır ve uygulanan farklı gerilme stresler için Şekil 5.60-5.62 de gösterilmiştir. Gerilme stresin olmadığı durumdaki sonuçlar, Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ olduğu gibi ısıl işlem görmemiş telin dairesel geçirgenliğinin yüksek olmadığını ifade eder. Bu ise üretim sürecinde ortaya çıkan streslerden dolayı anizotropinin yüksek ve domain yapının genelde radyal olması ile ilişkilidir. Isıl işlem uygulanarak üretim sonucu ortaya çıkan iç streslerin kısmen kaldırılması ile anizotropideki azalma geçirgenliğin tüm bileşenlerinin artmasına sebep olur. 460 °C de 5 dakika ısıtılan tellerde MI etki keskin bir şekilde artmaktadır. Şekil 5.61 ve 5.62, 5 ve 90 dakikalık ısıl işlemde sonra manyetoempedansın yüzde değişiminin, sıfır gerilme stres için sırası ile %45.3 ve %31.2 değerlerine yükseldiğini gösterir.

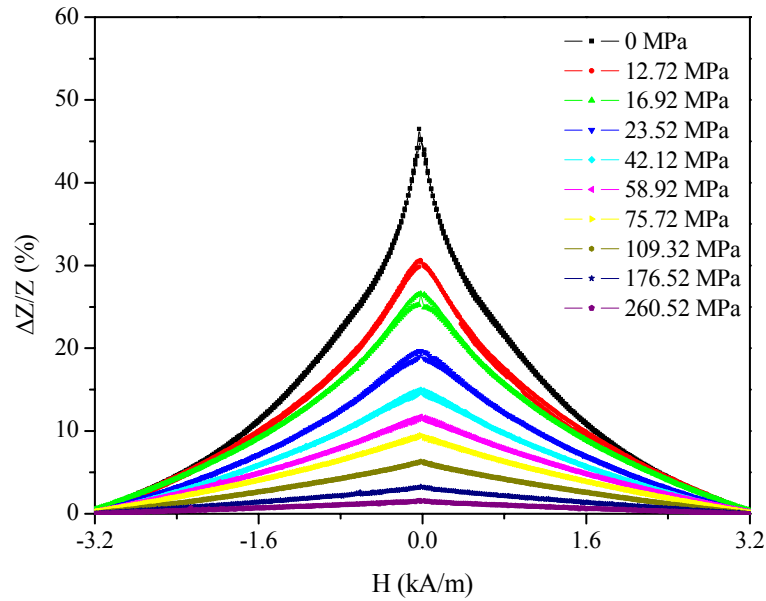
Daha yüksek ısıl işlem süreleri kristal kesir yüzdesinin artmasına ve buna bağlı olarak da anizotropinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle manyetoempedans etkinin büyüklüğünde büyük bir azalma gözlenmiştir. MI etkinin tek pik davranışları, ısıl işlem görmemiş ve 5 dakika ısıtılan Fe₇₁Cr₇Si₉B₁₃ telde gözlenmiştir. MI etkinin maksimum değeri gerilme stresin olmadığı durumda ($\sigma=0$) gözlenmiş ve daha sonra gerilme stresin artması ile MI etkinin büyüklüğünde azalma olduğu belirlenmiştir. Isıl işlem görmemiş Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅ telde gerilme stresin artması ile MI etkideki tek pik davranışların değişmediği görülmüştür.

Isıl işlem görmemiş ve 5 dakikada ısıtılan teller için $\Delta Z/Z$ (%) nin pik değerlerinin sırası ile $\sigma=0$ MPa'da %10 dan $\sigma=428.5$ MPa için %0.6' ya ve $\sigma=0$ MPa'da %45.3 den $\sigma=428.5$ MPa için %1 değerlerine düştüğü belirlenmiştir (Şekil 6.19). 90 dakika ısıtılan tellerde bir asimetrik MI eğrisi görülmektedir. MI eğrinin asimetrikliği gerilme stresin artması ile giderek azalır ve 109MPa lık stres değerinde asimetrik MI eğrileri kaybolarak, tekrar tek pik davranışları gözlenir. 90 dakikada ısıtılan teller için $\Delta Z/Z$ (%) nin pik değerleri, $\sigma=0$ MPa'da %31.2 den $\sigma=428.5$ MPa için %0.7 değerine düştüğü belirlenmiştir (Şekil 5.63). MI etkinin

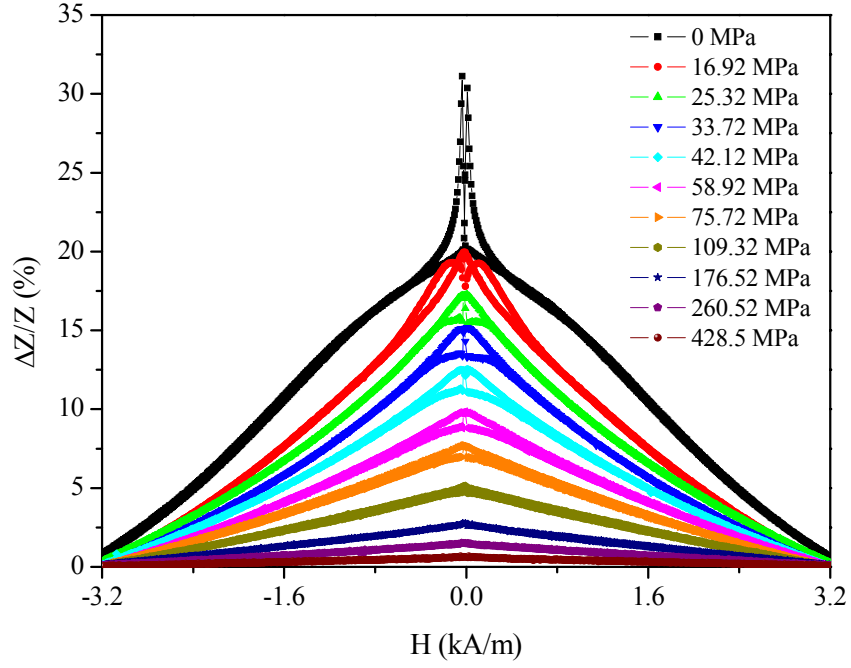
büyüklüğü yapılan tüm ölçümlerde uygulanan gerilme stresin artması ile azalmaktadır. Çünkü $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerde olduğu gibi pozitif magnetostriction'a sahip numunede stres manyetik momentleri telin boyu doğrultusunda yönlendirmeye çalışacaktır buda MI etkinin büyüklüğünün azalmasına neden olacaktır.



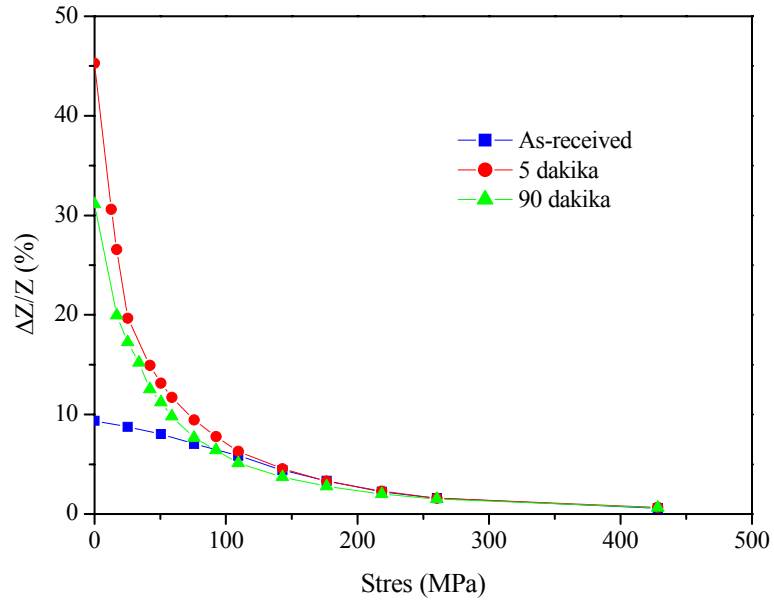
Şekil 5.60. Değişik gerilme stres değerlerinde ısıtılmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi (Sürücü akım frekansı=1MHz).



Şekil 5.61. Değişik gerilme stres değerlerinde 460 °C 5 dakika ısıtılmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.62. Değişik gerilme stres değerlerinde 460 °C 90 dakika ısıl işlem uygulanmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ telde uygulanan alanla yüzde manyetoempedans değişimi.



Şekil 5.63. Isıl işlem görmemiş ve ısıl işlem yapılmış $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerin yüzde MI oranlarının strese bağlı olarak değişimi.

6. $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ VE $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ TELLERİN MANYETİK VE MANYETOEMPEDANS ÖLÇÜMLERİ

6.1. Giriş

Amorf ferromanyetik malzemeler kompozisyonlarına göre (Fe, Co ve CoFe bazlı) sırasıyla pozitif, negatif ve yaklaşık olarak sıfır magnetostriction değerlerine sahiptirler. Önceki bölümlerde pozitif magnetostriction değerlerine sahip teller incelenirken, bu kısımda ise negatif ve yaklaşık sıfır magnetostriction değerine sahip $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ve $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin manyetik ve manyetoempedans özellikleri incelenmiştir. $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ve $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin magnetostriction değerleri (λ_s) sırasıyla ~ -3.2 ve ~ 0 ppm dir.

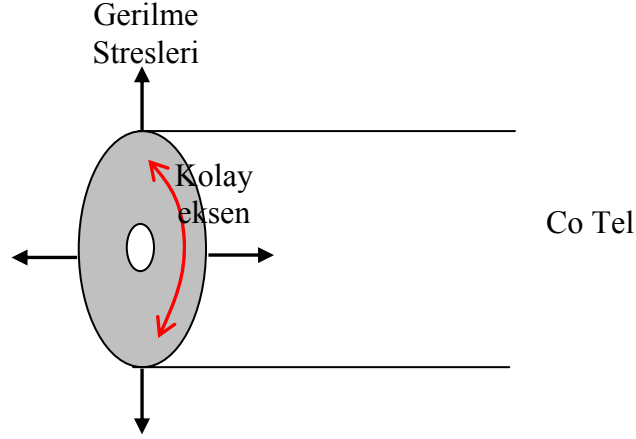
Bu bölümde ilk olarak Co-bazlı ısıtma işlem görmemiş tellerin domain yapısı verilmiştir. Daha sonra ısıtma işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtma işlem görmüş $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ve $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin manyetik özelliklerinin belirlenmesi için M-H ölçümleri alınarak, coercivity değerleri hesaplanmış ve son olarak manyetoempedans ölçümleri verilmiştir.

6.2. Isıtma İşlem Görmemiş Co-bazlı telin domain yapısı

Amorf teller in-rotating-water melt spinning tekniği ile üretilmektedir. Eritilen alaşım su ile temas ettiği zaman ilk olarak telin dıştaki yüzeyi daha sonra içteki core katılaşır ve büzülür. Soğutma sürecinin bir sonucu olarak, dıştaki kabukta radyal bir gerilim ve içteki core' da ise eksensel bir gerilme stresi meydana gelmektedir. Mitra ve Vazquez sıcaklık gradyenti ile ortaya çıkan iç eksensel streslerin çok küçük olduğunu önermişlerdir [86]. İçteki core içinde, eksensel yönde iç streslerin temel nedeni, telin bu hacmindeki büzülmeden kaynaklanmaktadır. Co-bazlı amorf telleri için önerilen iç stres dağılımları Şekil 6.1 de verilmiştir.

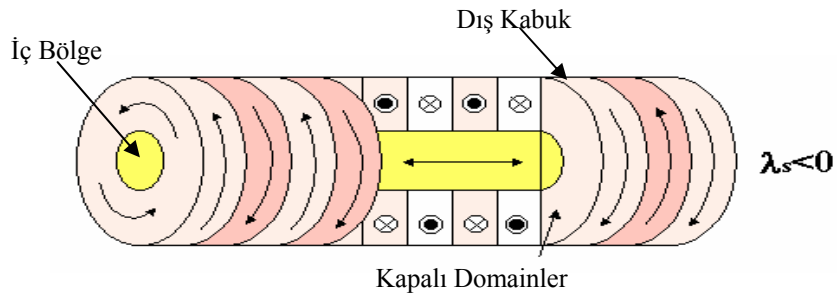
Stres dağılımların bir sonucu olarak, negatif magnetostriction değerine sahip telde (Co-bazlı) içteki bölgede azimuthal anizotropi oluşurken, dıştaki kabukta ise dairesel anizotropi dağılımı meydana gelmektedir [86]. Domain gözlemleri yalnızca tellerin yüzeyi üzerindeki domain'ler hakkında bilgi vermektedir [88]. Mohri ve çalışma arkadaşları [88] tüm zikzak maze domainlerin tel eksenine enine olacak şekilde

sıralanmadığını, gerçekten onlardan bazılarının tel eksenine göre $\pm 40^\circ$ - 70° aralığında sıralandığını gözlemlemişlerdir. Bu durum, as-cast telin uzunluk boyunca uniform olmadığını ve katılma süreci esnasında rasgele bükülme streslerin mevcut olduğunu gösterir.



Şekil 6.1. Co bazlı tel için manyetizasyonun kolay eksen ve iç stres dağılımı [87].

Şekil 6.2, Co-bazlı tel numuneler için önerilen manyetik domain yapısını göstermektedir. Görüldüğü gibi negatif magnetostrictona sahip tel iç kısmında numune eksenine boyunca yönlendirilmiş olan bir domaine sahipken en dıştaki kabukta ise dairesel manyetizasyonlu multidomain olmak üzere iki tür domainden oluşmaktadır.



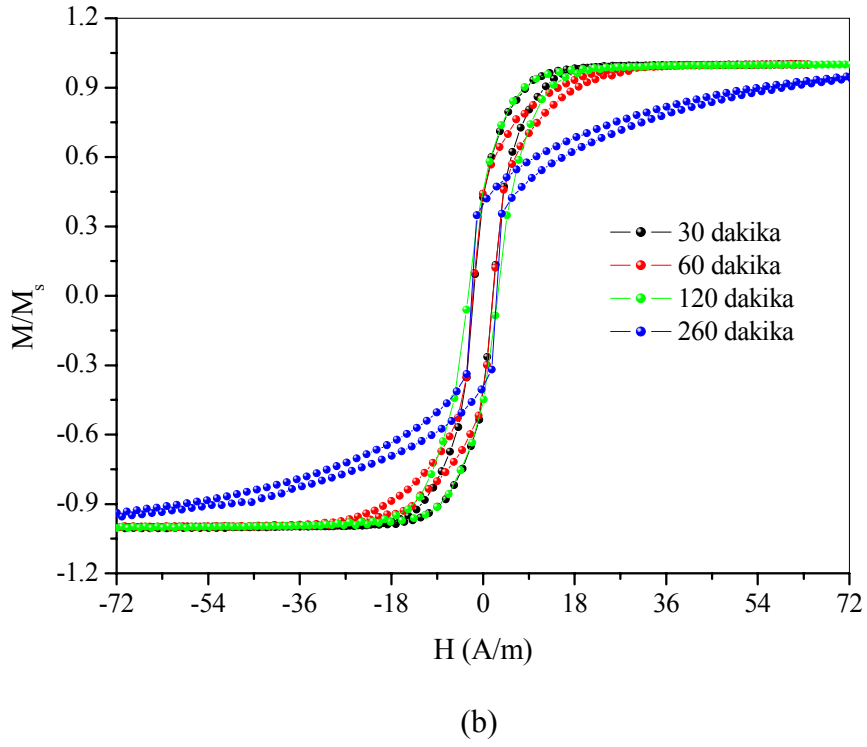
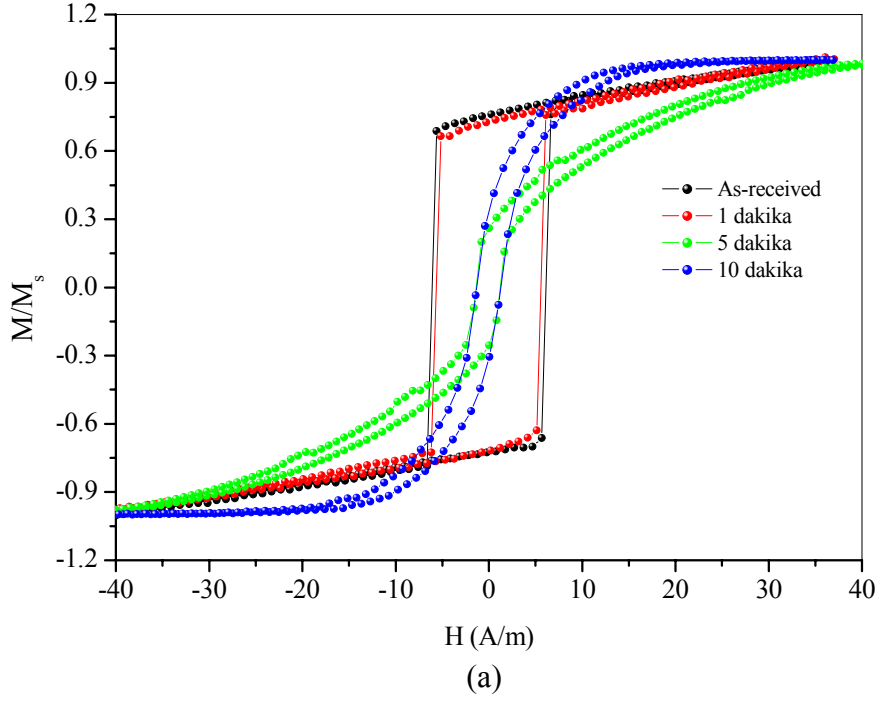
Şekil 6.2. Isıl işlem görmemiş Co-bazlı (negatif magnetostricton) tel numunelerin manyetik domain yapıları [88,89].

6.3. Manyetik Ölçümler

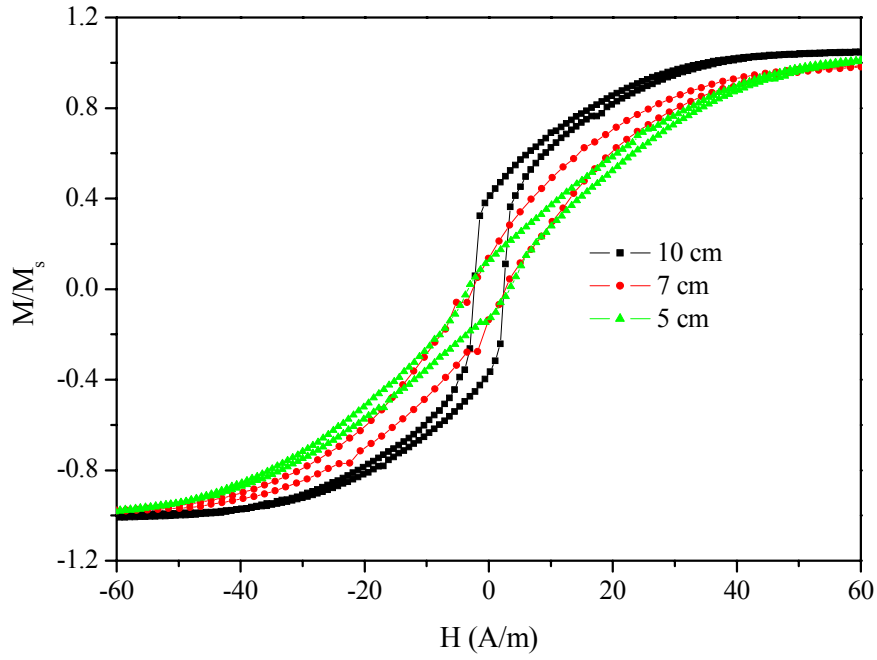
Numunelerin coercivity parametrelerini hesaplayabilmek için hysteresis eğrileri olarak bilinen M-H ölçümleri, deneysel metotlarda ayrıntılı bir şekilde verilen ölçüm sistemi kullanılarak alınmıştır. Coercivity değerlerini hesaplayabilmek için düşük alan ölçümleri alınmıştır. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin düşük alan bölgesindeki M-H eğrileri, Şekil 6.3 (a) ve (b) de verilmiştir. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de 1 dakika ısıl işlem gören tellerde büyük Barkhausen etki (LBE) gözlenilmiştir. 10 dakikalık ısıl işlem sonunda Barkhausen etkinin ortadan kaybolduğu gözlenilmiştir. Bu durum üretim esnasında ortaya çıkan iç streslerin çok hızlı bir şekilde azaltıldığını ifade etmektedir. 120 dakikaya kadar olan ısıl işlem sürelerinde elde edilen eğrilerde fazla bir değişimin olmadığı gözlenirken, 260 dakikalık süreden sonra eğrilerin daha yüksek alan değerinde doyuma gittiği belirlenmiştir [103].

Ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerinin belirlenmesinde numune uzunluğu önemli rol oynamaktadır. Bu amaçla, farklı uzunluklara sahip ısıl işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin M-H ölçümleri alınarak coercivity değerleri belirlenmiştir. Farklı uzunluklara sahip ısıl işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin düşük alan değerinde M-H eğrileri Şekil 6.4 de gösterilmiştir. 10cm, 7cm ve 5cm uzunluğa sahip ısıl işlem görmemiş teller için coercivity değerlerinin sırasıyla 2.45, 2.55 ve 3.36 A/m değerlerinde olduğu hesaplanmıştır. Ortaya çıkan bu değerler soft özelliklerin belirlenmesinde numune uzunluğunun etkisi olduğunu ifade etmektedir. Hesaplanan coercivity değerlerinden 10 cm uzunluğa sahip ısıl işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel, en düşük coercivity değerine sahiptir.

Bu durum 10cm uzunluğa sahip numunelerde şekil anizotropi katkısının çok düşük olduğunu ifade etmektedir. Benzer sonuçlar yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [6]. Bu nedenle çalışmada diğer uzunluklara kıyasla düşük coercivity değeri gösteren 10 cm uzunluğundaki numuneler kullanılmıştır. Şekil 6.4 den de görüleceği üzere pozitif ve negatif magnetostriction değerine sahip olan tellerde düşük alanda gözlenen LBJ karakteristiğinin $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde gözlenmediği belirlenmiştir.



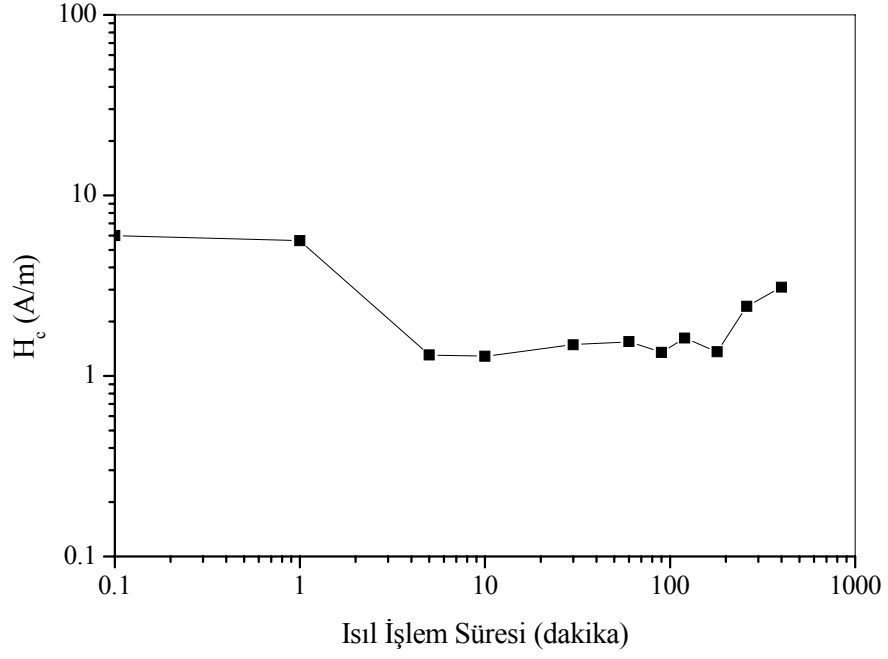
Şekil 6.3. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören Co_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ tellerin düşük alan bölgesinde M-H eğrileri.



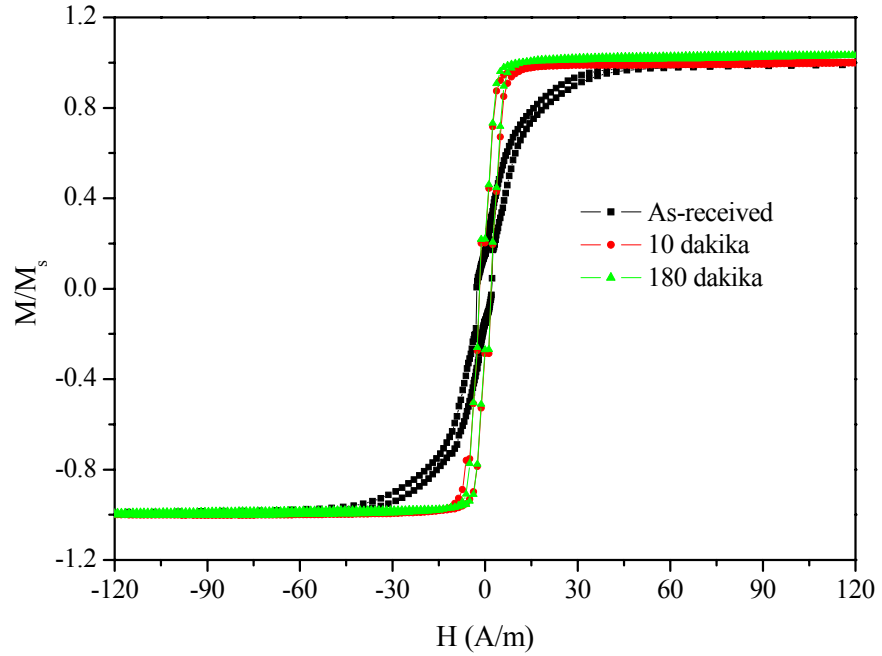
Şekil 6.4. Farklı uzunluklardaki ısıt işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin düşük alan değerlerinde M-H eğrileri.

460°C de farklı sürelerde ısıt işlem görmüş $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin ısıt işlem süresinin fonksiyonu olarak coercivity değişimleri Şekil 6.5 de verilmiştir. Isıt işlem görmemiş tel için coercivity değeri yaklaşık 6 A/m olarak hesaplanmıştır. Isıt işlem süresine bağlı olarak en düşük coercivity değeri 10 dakikalık ısıt işlem sonunda yaklaşık 1.28 A/m olarak belirlenmiştir. Bu değerin ısıt işlem süresine bağlı olarak 180 dakikalık ısıt işleme kadar fazla değişmediği tespit edilmiştir. Şekil 6.5 den görülebileceği gibi, bu süre üzerindeki ısıt işlem sürelerinde ise coercivity değerlerinin arttığı görülmektedir.

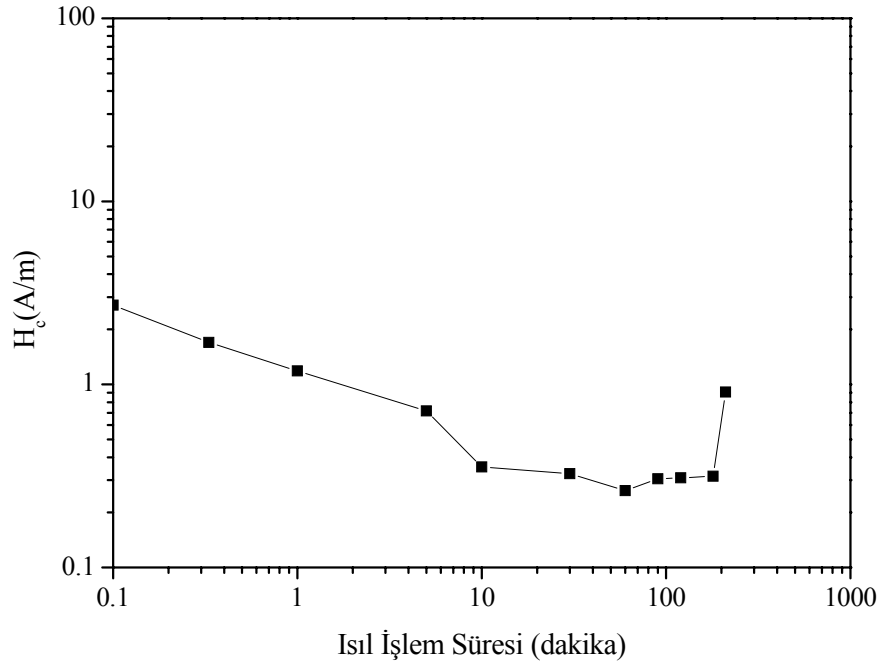
Şekil 6.6 ve 6.7 de ısıt işlem görmemiş ve 460°C de ısıt işlem görmüş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin sırasıyla M-H eğrileri ve ısıt işlem süresine bağlı olarak coercivity değişimleri verilmiştir. Isıt işlem görmemiş tel için coercivity değeri 2.45 A/m olarak hesaplanmıştır. Isıt işlem süresine bağlı olarak coercivity değerinin 90 dakikalık ısıt işlem süresine kadar azaldığı ve bu süre sonunda yaklaşık 0.31 A/m değerine düştüğü belirlenmiştir ve bu düşük değerini 180 dakikalık ısıt işleme kadar koruduğu gözlenmiştir. 180 dakikalık ısıt işlemlerden sonra coercivity değerinin arttığı ve 210 dakikalık ısıt işlem sonunda yaklaşık 1 A/m lik bir değere ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6.5. 460 °C de ısıl işlem görmüş $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin coercivity değerlerinin ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi.



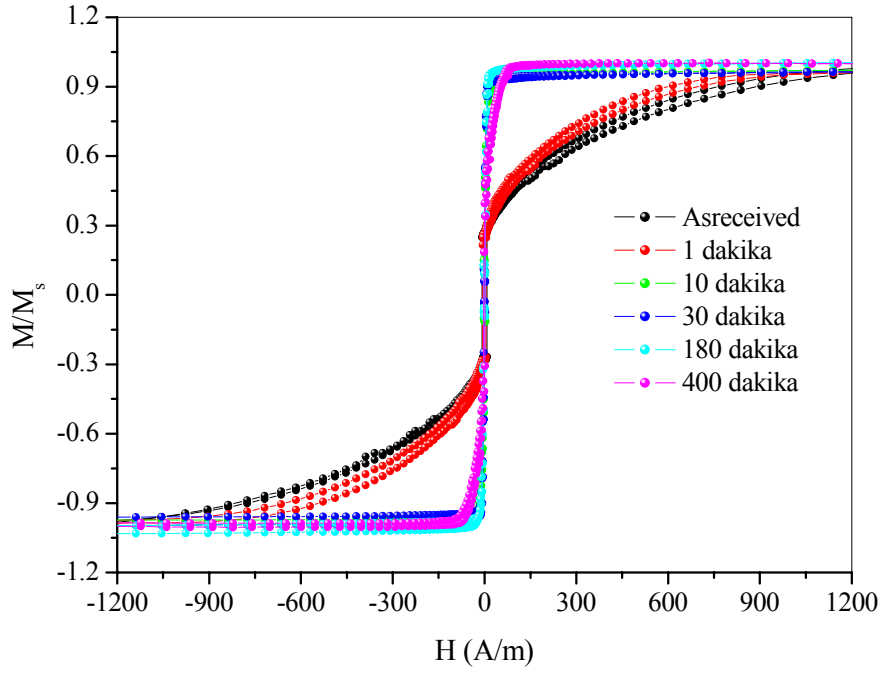
Şekil 6.6. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılmış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin M-H eğrileri.



Şekil 6.7. 460 °C de ısıtılmış $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel için coercivity değerlerinin ısıtım süresine bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.5 ve 6.7 de görüleceği üzere her iki tel numune için, coercivity değerleri ısıtım süresine bağlı olarak ilk olarak azalıp minimum bir değere düşmektedir. Orta süreli ısıtım işlemlerde fazla bir değişim gözlenmezken uzun süreli ısıtım işlemlerde ise coercivity değerlerinde artış gözlenmiştir. Coercivity değerinde ortaya çıkan minimum değere kadar yapılan ısıtım sürelerinde, iç stres değerini kısmen azaldığından dolayı $K_{\sigma} = 3/2\lambda_s\sigma$ ile verilen manyeto-elastik anizotropi değeri, dolayısı ile toplam anizotropi enerjisi K değeri azalmaktadır. Uzun süreli ısıtım işlemlerde ise kristalleşmeden dolayı manyeto-kristal anizotropi ortaya çıkmakta ve anizotropi artmaktadır.

Isıtım işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtım işlem gören $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin yüksek alan bölgesindeki M-H eğrileri Şekil 6.8 de verilmiştir. Şekil 6.8 den de görülebileceği gibi 10 dakikalık ısıtım işlem sonunda eğriler daha düşük alan değerinde doyuma gitmektedir. Uzun süreli ısıtım işlemlerden sonra ise ortaya çıkan eğrilerin daha yüksek alan değerlerinde doyuma ulaştığı belirlenmiştir.

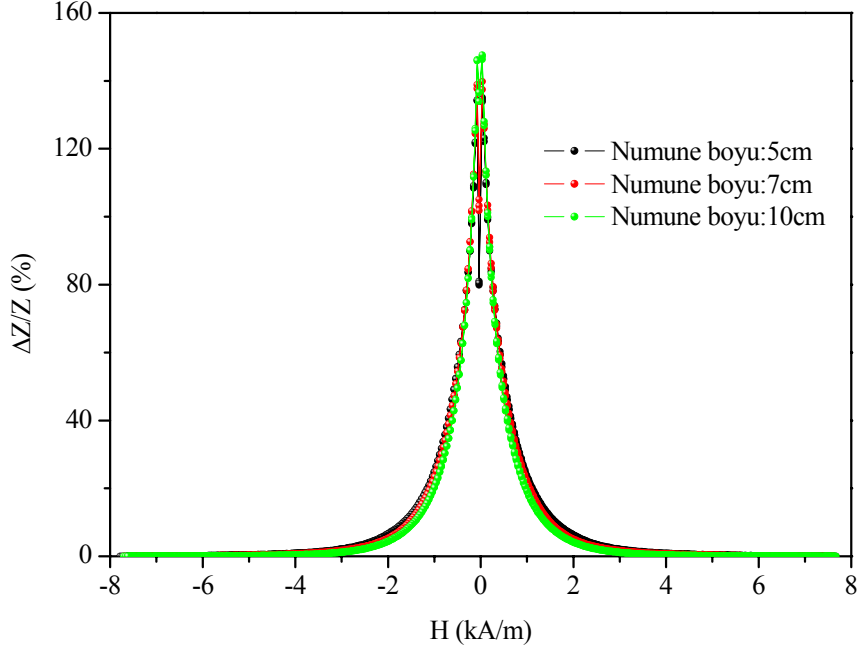


Şekil 6.8. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin yüksek alan değerlerinde M-H eğrileri.

6.4. Manyetoempedans Ölçümleri

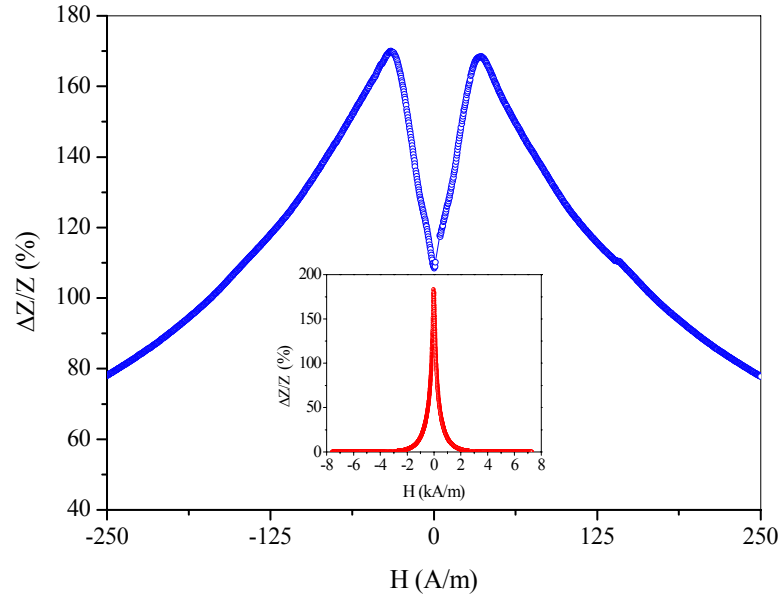
6.4.1. Isıl İşlem Uygulanmamış $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ve $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ Tellerde Manyetoempedans Ölçümler

Farklı uzunluklara sahip (5cm, 7cm ve 10cm) ısıl işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde en düşük coercivity değeri 10 cm uzunluğundaki telde belirlenmişti. 100 kHz sürücü akım frekans değerlerinde 5, 7 ve 10cm uzunluklarına sahip teller için uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri Şekil 6.9 da verilmektedir. Yapılan ölçümlerde en büyük değişim (yaklaşık %150) 10 cm uzunluğa sahip telde gözlenmiştir. Bölüm 3 de verildiği gibi yüksek manyetoempedans değişimi gösteren numunelerin soft özelliklere sahip olması gerekmektedir. Buna bağlı olarak düşük coercivity değerinin (2.45 A/m) gözlendiği 10 cm uzunluğundaki telde yüzde manyetoempedans değişimi daha büyük olduğu belirlenmiştir.

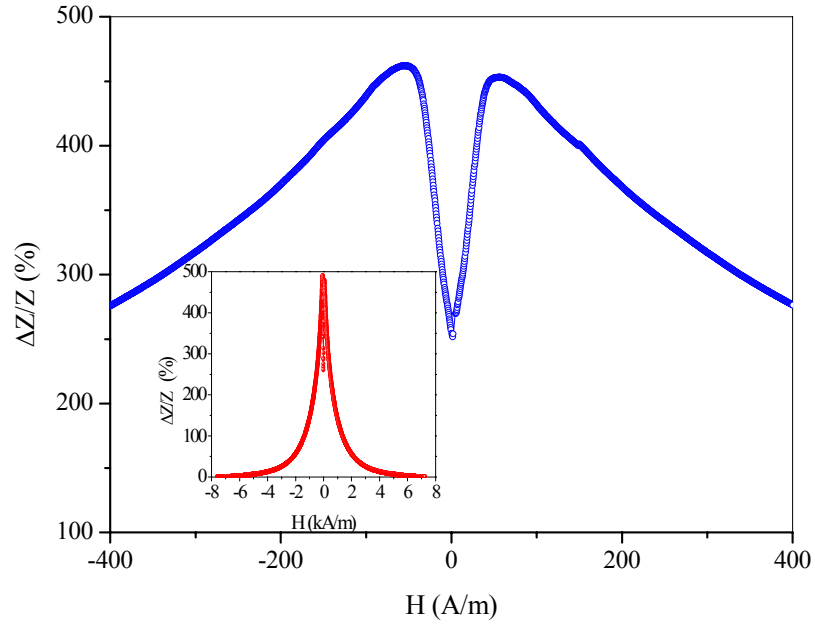


Şekil 6.9. Farklı uzunluklardaki ısıtılmış işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.

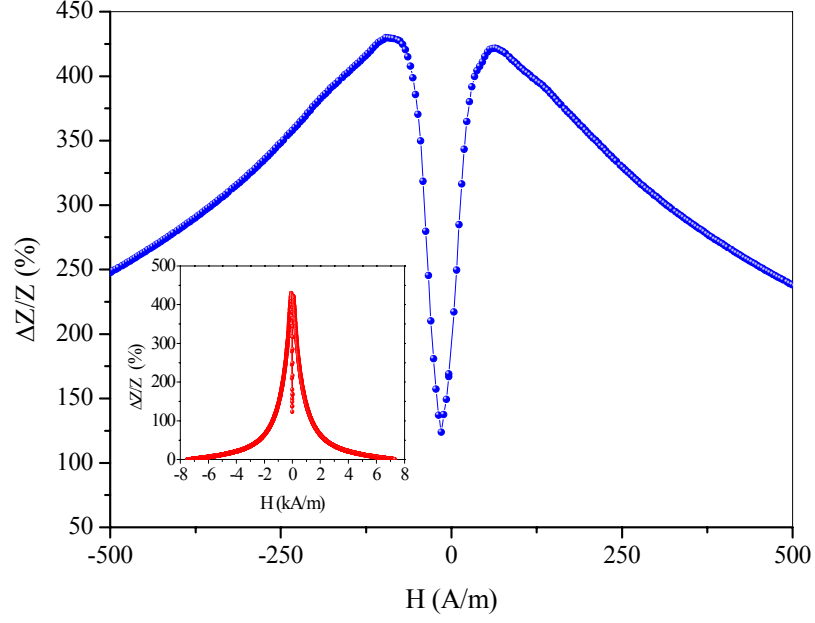
Şekil 6.10-6.13 de, 10 cm uzunluğa sahip ısıtılmış işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller için sırasıyla, 100kHz, 1MHz, 5MHz ve 10MHz sürücü akım frekans değerleri için düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimleri gösterilirken, içteki grafiklerde ise bu frekans değerleri için yüksek alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimleri verilmiştir. Bu frekanslar için en büyük yüzde değişim, 1MHz sürücü akım frekans değerinde yaklaşık %490 olarak belirlenmiştir. Diğer ölçüm frekanslarında (100kHz, 5MHz ve 10MHz) hesaplanan yüzde manyetoempedans değişimleri sırasıyla, yaklaşık olarak %183, %430 ve %268 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca ısıtılmış işlem görmemiş numune için tüm ölçüm frekanslarında elde edilen eğrilerde çift pik davranışları gözlemlenmiştir. Manyetoempedans eğrilerinde ortaya çıkan çukur görünümü, manyetizasyon sürecinde manyetik moment yöneliminin baskın olduğunu ifade etmektedir [104].



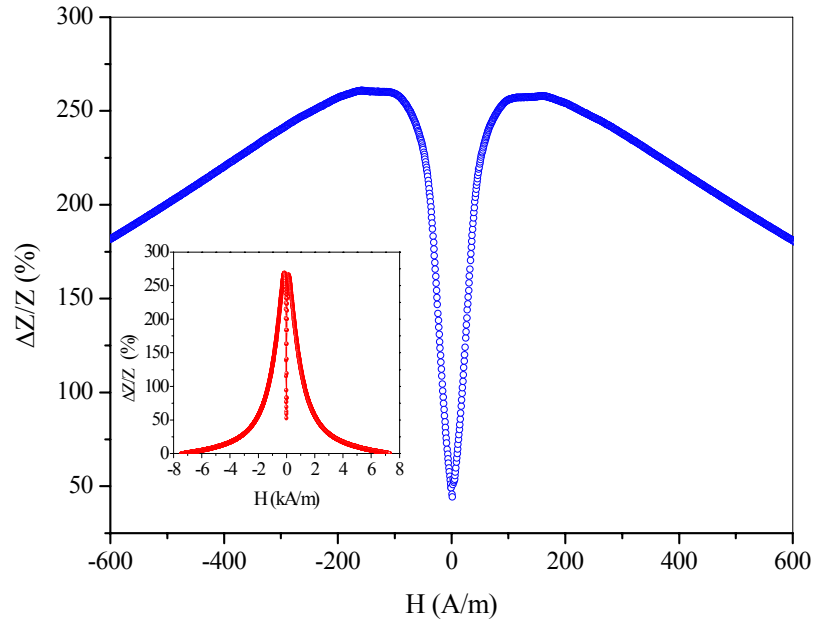
Şekil 6.10. 100kHz sürücü akım frekans değeri için $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi. İçteki grafikte ise bu frekans değeri için yüksek alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi verilmiştir.



Şekil 6.11. 1MHz sürücü akım frekans değeri için $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi. İçteki grafikte ise bu frekans değeri için yüksek alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi verilmiştir.

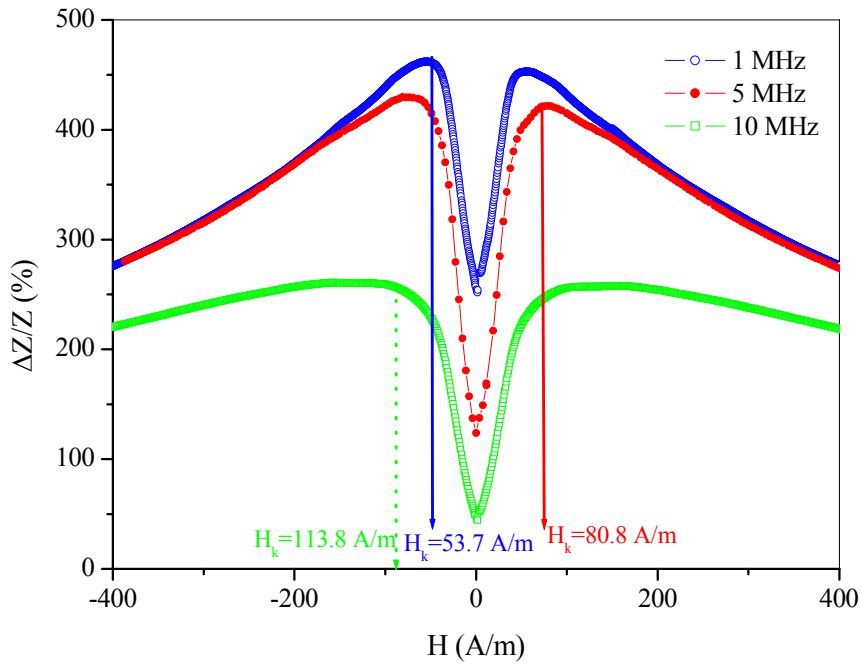


Şekil 6.12. 5MHz sürücü akım frekans değeri için $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi. İçteki grafikte ise bu frekans değeri için yüksek alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi verilmiştir.



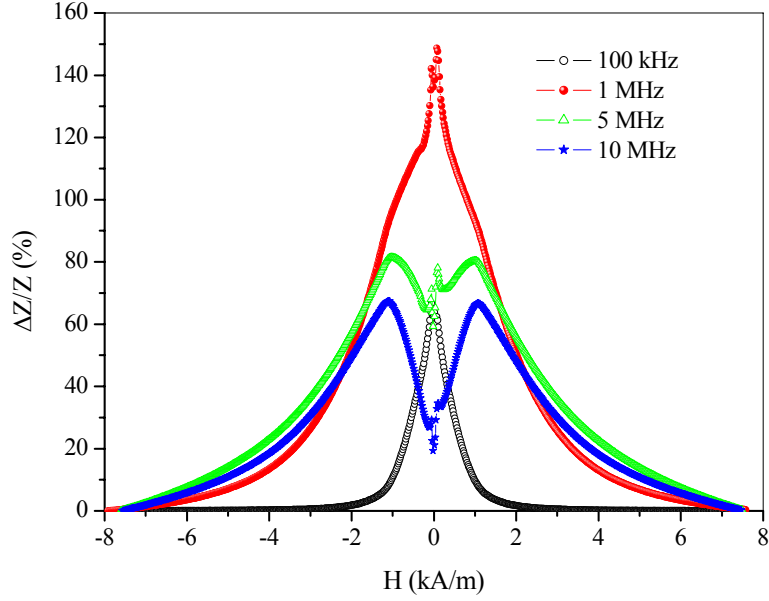
Şekil 6.13. 10MHz sürücü akım frekans değeri için $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi. İçteki grafikte ise bu frekans değeri için yüksek alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi verilmiştir.

Şekil 6.14 de, ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin farklı sürücü akım frekans değerleri için, düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimleri görülmektedir. 1, 5 ve 10 MHz frekanslar altında ölçülen maksimum manyetoempedans değerlerinin gözlendiği alan büyüklüklerinin sırasıyla, 53.7, 80.8 ve 113.8 A/m olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.14 de görüleceği üzere frekansın artmasıyla maksimum manyetoempedans değerlerinin yüksek alan bölgesine doğru kaydığı görülmektedir. Sonuç olarak anizotropi alanı artmakta ve buna bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimi azalmaktadır.



Şekil 6.14. Farklı frekans değerleri için ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin düşük alan bölgesinde yüzde manyetoempedans değişimi.

Farklı sürücü akım frekans değerlerinde $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel için uygulanan alanın fonksiyonu olarak yüzde manyetoempedans değişimleri Şekil 6.15 de verilmiştir. Yukarıda $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerinin manyetoempedans değişimleriyle ilgili yapılan tartışmalara paralel olarak ısıl işlem görmemiş $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre 100 kHz, 1MHz, 5 MHz ve 10 MHz frekans değerleri için hesaplanan yüzde manyetoempedans değişimleri sırasıyla, %67, %149, %81 ve %68 olarak belirlenmiştir.



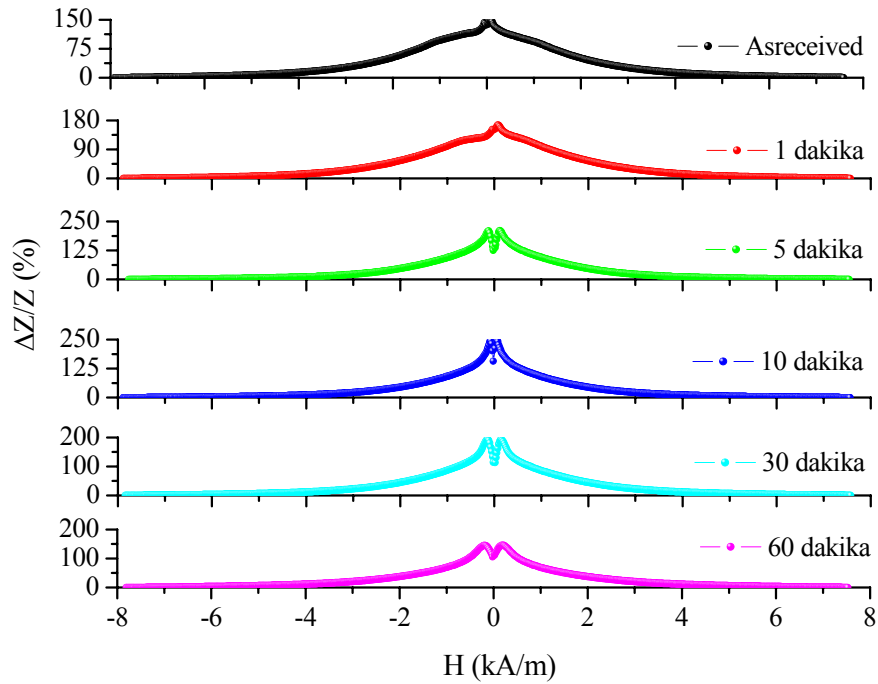
Şekil 6.15. Farklı sürücü akım frekans değerleri için ısıtılmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

Ferromanyetik bir telde, iç bölge ve dış kabuk farklı domain yapıya sahip olduğundan dolayı bu bölgelerde manyetizasyon süreçleri ve anizotropi alanları farklıdır. Bu nedenle iç bölge ve dış kabuk için manyetoempedansın alana bağlılığı benzer karakteristikler sergilemez. İç bölgede dairesel geçirgenlik, numuneye uygulanan ac akımdan dolayı ortaya çıkan dairesel manyetik alan ile domain yönelimi sayesinde ortaya çıkmaktadır. Dairesel geçirgenlik, uygulanan dc manyetik alanın iç bölgedeki eksensel manyetik anizotropi ile dengelendiği durumda maksimum bir değere ulaşır. Diğer taraftan dairesel manyetik alan, domain duvar yer değiştirmesi ile dış kabuktaki manyetizasyonu değiştirir. Tel eksenine boyunca dış kabuğun anizotropi alanı iç bölgeye kıyasla daha büyük olduğu için dış kabuktan dolayı ortaya çıkan pik değeri daha yüksek alan değerlerinde gözlenir. Düşük frekans değerlerinde, iç bölge ve dış kabuktan kaynaklanan manyetoempedans pik değerleri, yaklaşık sıfır alan değerinde ortaya çıkmakta ve bu nedenle eğriler tek pik davranışları sergilemektedir. İç bölgenin dairesel manyetik geçirgenliği, sadece manyetizasyon yöneliminden kaynaklandığı için frekansın artması ile fazla etkilenmez. Ancak dış kabukta manyetoempedans artan frekans değeri ile daha hızlı değişim gösterir. Dış kabukta manyetoempedansın pik değeri, frekans ile anizotropi alanındaki artmadan dolayı daha yüksek alan değerlerine doğru kayar. Bu nedenle iç bölgeden gelen katkı dış kabuğa oranla çok az olduğundan dolayı manyetoempedans eğrilerinde çift pik davranışları gözlenir [58].

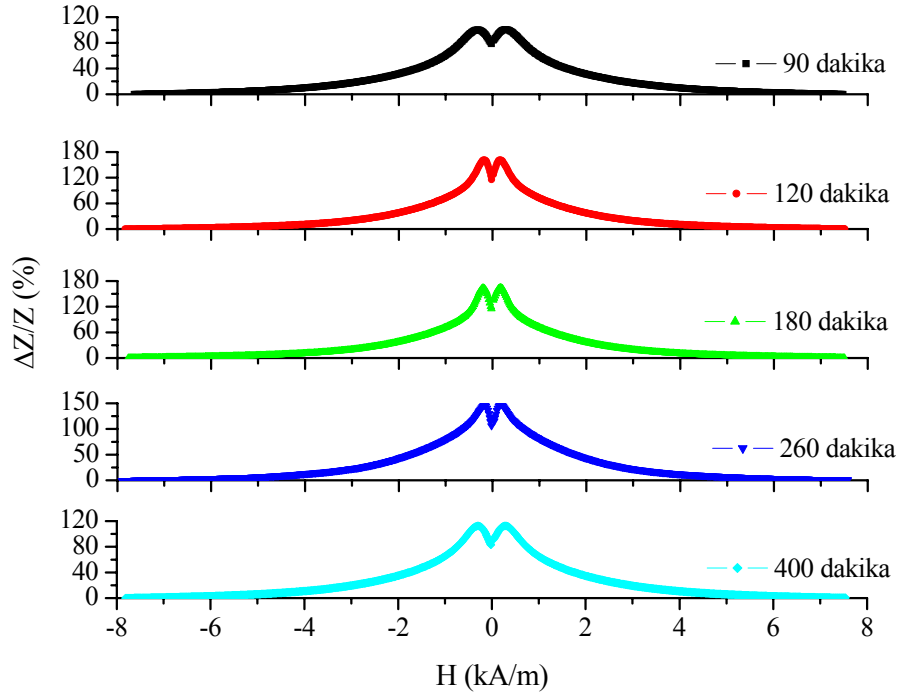
Artan frekans değeri ile ortaya çıkan anizotropi alanları daha büyük olmaktadır. Bölüm 5.5.1 de verilen teorik modelde alınganlık, anizotropi ile ters orantılıdır. Artan frekans değeri ile anizotropinin artmasından dolayı alınganlık azalmakta ve bunun sonucunda empedans değeri azalış göstermektedir.

6.4.2. Isıl İşlem Uygulanan $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ Tellerin Manyetoempedans Ölçümleri

Isıl işlem etkisinin numunelerde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellere 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Farklı sürücü akım frekans değerleri için manyetoempedans ölçümleri alınarak yüzde manyetoempedans değişimleri belirlenmiştir. Şekil 6.16-6.18 ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde sırasıyla, 1 MHz, 5 MHz ve 10 MHz frekans değerlerinde elde edilen manyetoempedans grafiklerini göstermektedir. Yüksek frekanslarda, ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören tüm numuneler için elde edilen manyetoempedans eğrilerinde ikili pik davranışlarının ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 6.17 ve Şekil 6.18). Uygulanan dış alana bağlı olarak tüm frekans değerlerinde elde edilen manyetoempedans eğrilerinde yüzde değişimin bir maksimum değere ulaşıncaya kadar artış gösterdiği belirlenmiştir.

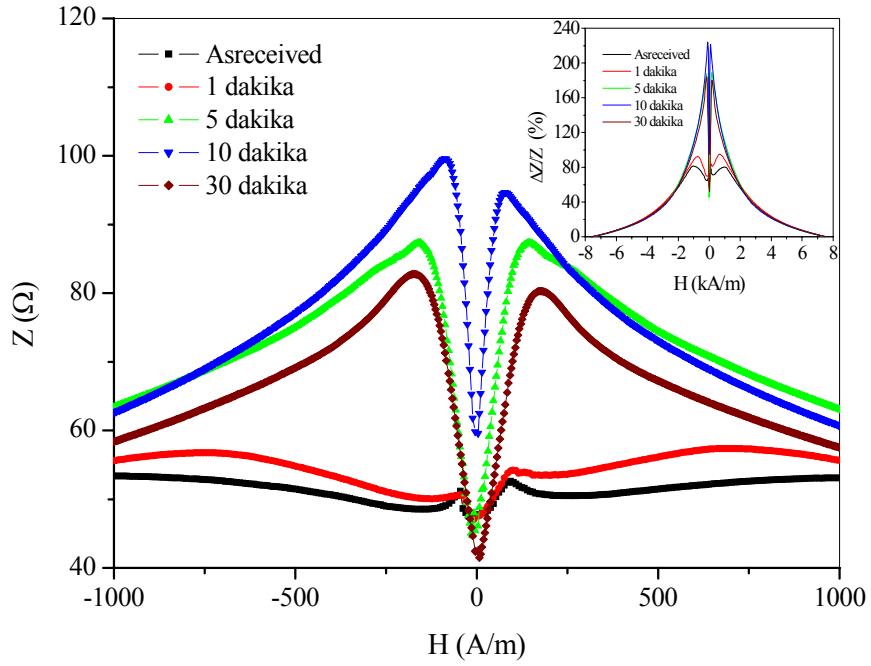


(a)

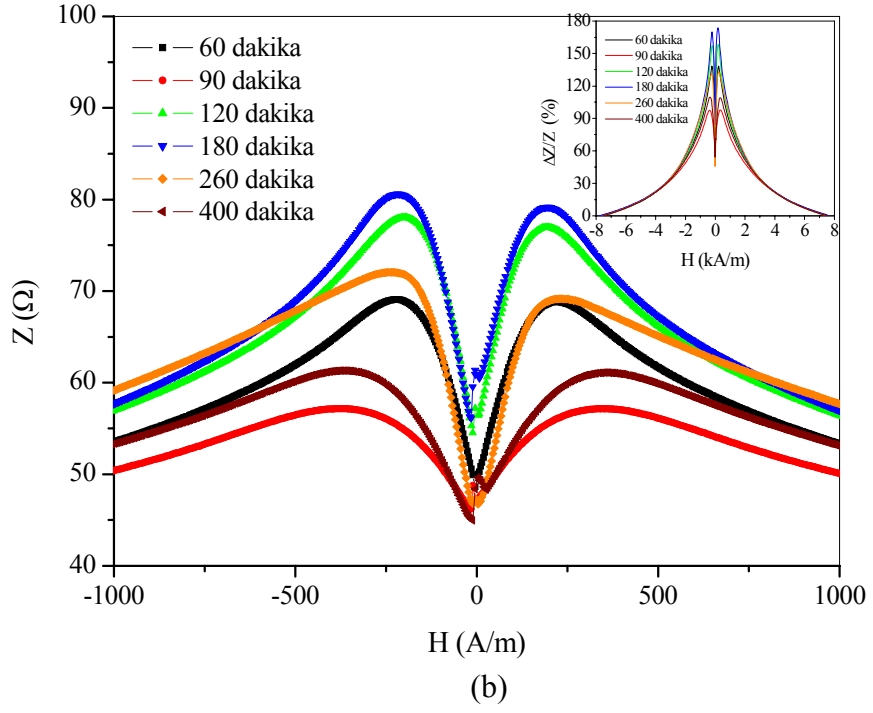


(b)

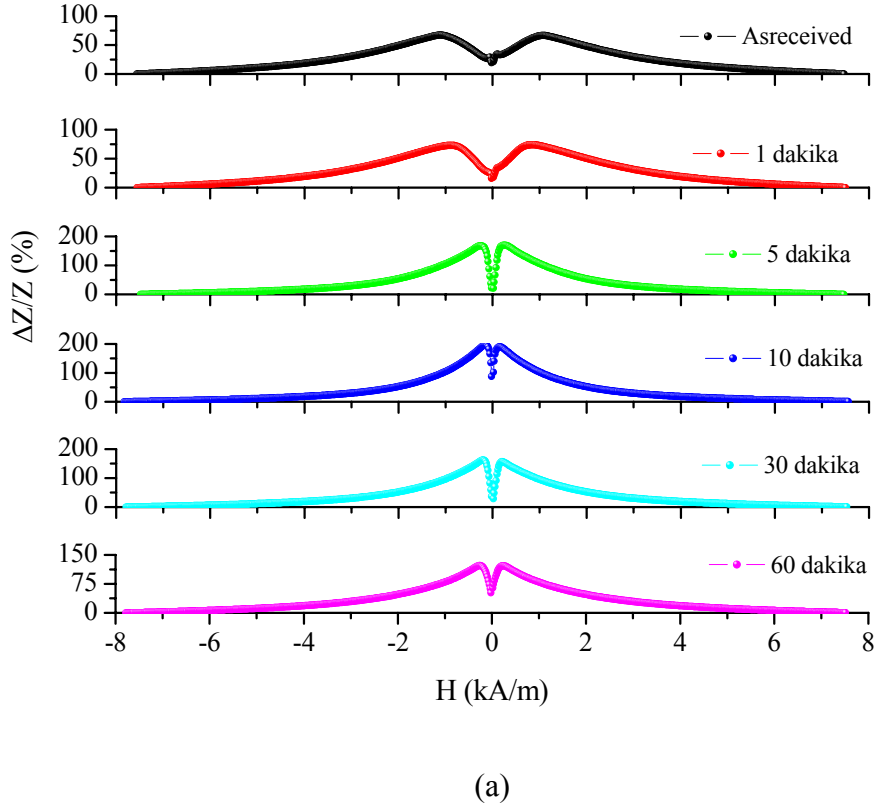
Şekil 6.16. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde 1 MHz frekans değeri için uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.

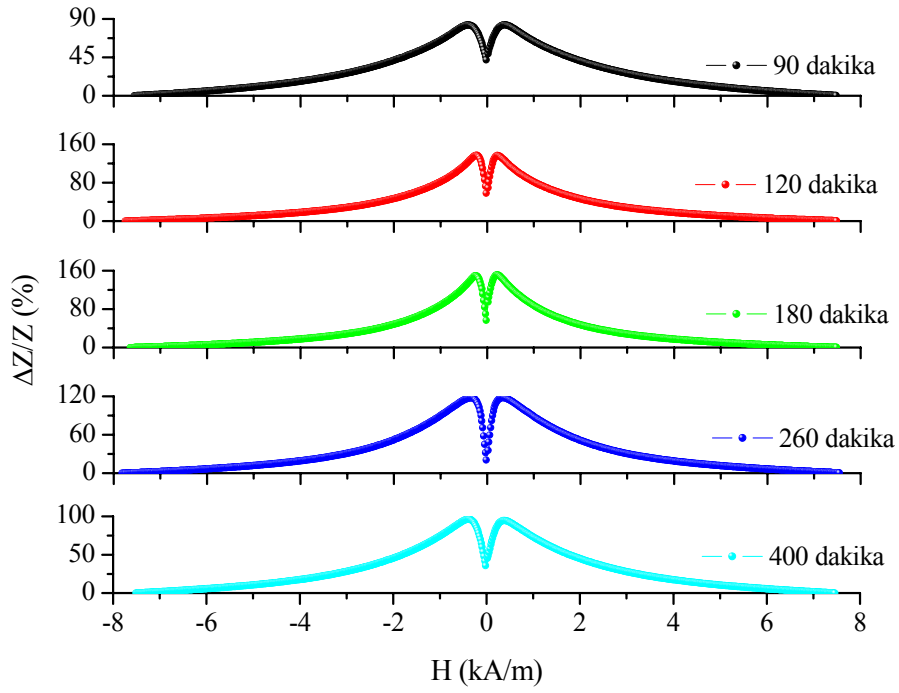


(a)



Şekil 6.17. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde 1 MHz frekans değeri için düşük alan bölgesinde empedans değişimleri. İçteki grafiklerde ise yüzde manyetoempedans değişimleri verilmiştir.



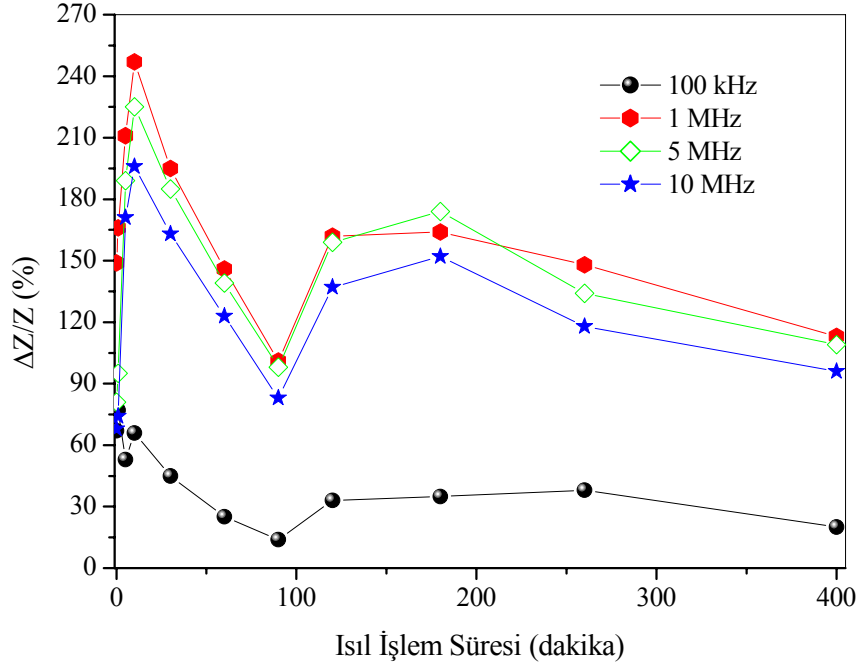


(b)

Şekil 6.18. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde 10 MHz frekans değeri için uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.

Farklı sürücü akım frekans değerleri için 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmış $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller için ısıl işlem süresine bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimleri Şekil 6.19 da gösterilmiştir. Tüm frekans değerleri için elde edilen manyetoempedans ölçümlerinde en büyük değişim, 460°C de 10 dakika ısıl işlem gören telde gözlenilmiştir. Bu sürede yapılan ısıl işlem sonunda 100 kHz, 1 MHz, 5 MHz ve 10 MHz frekans değerleri için hesaplanan yüzde değişimleri sırasıyla %66, %247, %225 ve %196 olarak belirlenmiştir. Şekil 6.19 dan da görüleceği üzere 10 dakika üzerindeki ısıl işlemlerde 90 dakikaya kadar tüm frekans değerleri için yüzde değişimin keskin bir şekilde azaldığı görülmektedir. 90 dakika ısıl işlem sonunda 100 kHz, 1 MHz, 5 MHz ve 10 MHz frekans değerleri için hesaplanan yüzde manyetoempedans değişimleri sırasıyla, %14, %101, %98 ve %83 olarak belirlenmiştir. 90 dakika üzerindeki ısıl işlemlerde 180 dakikaya kadar yüzde değişimlerin tekrar arttığı ve bu süre üzerindeki ısıl işlemlerde ise yüzde değişimin tekrar azaldığı tespit edilmiştir. 460°C de 400 dakika ısıl işlem sonunda $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin yüzde

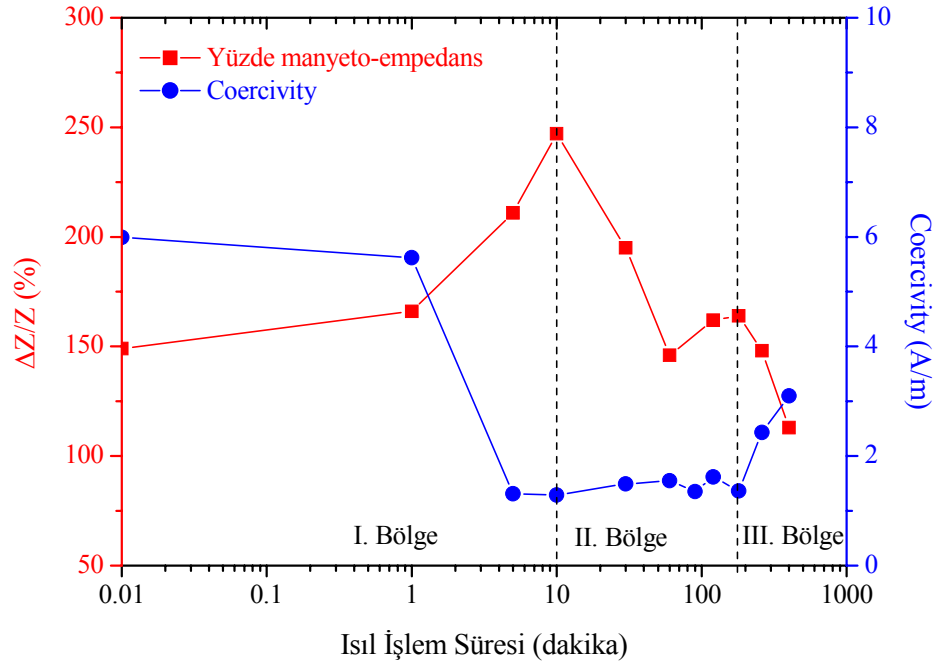
manyetoempedans değişimleri sırasıyla %20, %113, %109 ve %96 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.19. Farklı sürücü akım frekans değerleri için ısıl işlem süresine bağlı olarak $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel için yüzde manyetoempedans değişimi.

Isıl işlem etkisinin $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde ortaya çıkardığı manyetik özellikleri karşılaştırmak amacıyla en büyük değişimin gözlemlendiği 1 MHz frekans değerinde elde edilen yüzde manyetoempedans ve coercivity verileri Şekil 6.20 de verilmiştir. Isıl işlem süresine bağlı olarak hesaplanan coercivity ve yüzde manyetoempedans değişimlerinin uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.20 de ısıl işlem etkisi üç bölgeye ayrılıp sonuçlar tartışılmıştır. I. Bölge düşük süreli (10 dakikaya kadar), II. Bölge orta süreli (30-180 dakika) ve III. Bölge 180 dakika üzerindeki ısıl işlem bölgesini göstermektedir. Düşük ısıl işlem süresi bölgesinde, 10 dakikalık ısıl işlem sonunda hem coercivity değerinin minimuma (1.28 A/m), hem de yüzde manyetoempedans değerinin maksimum bir değere (%247) ulaştığı Şekil 6.20 de açıkça görülmektedir. Bu durum daha öncede farklı numuneler için açıklandığı üzere, düşük süreli ısıl işlemlerde (10 dakikaya kadar) üretim esnasında ortaya çıkan iç streslerin azaltılması ile ilişkilidir. İç streslerin azaltılmasından dolayı anizotropi azalmaktadır. Bu durumda coercivity değeri azalırken, yüzde manyetoempedans değişimi artmaktadır. II. Bölgede 120 dakikaya

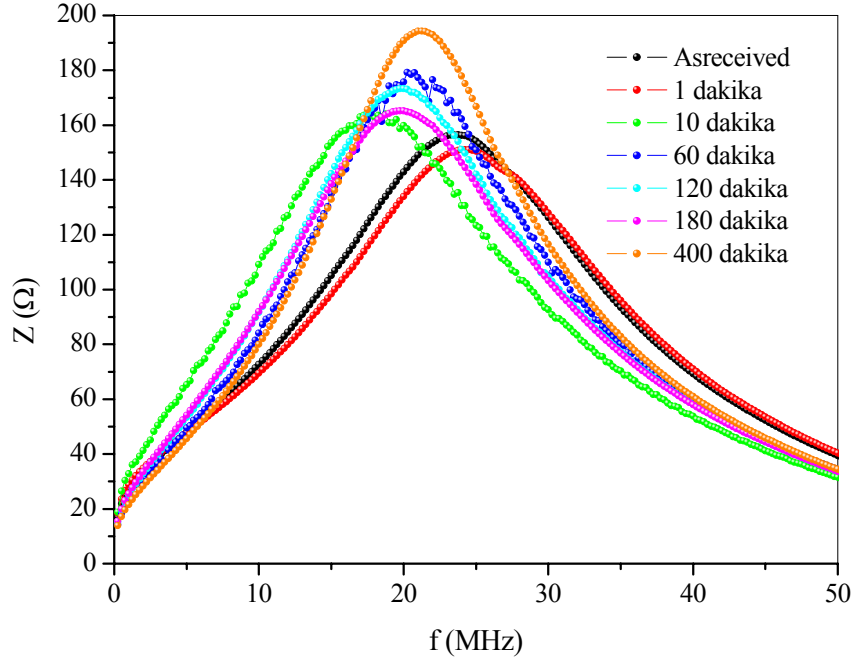
kadar olan ısıt işlemlerde coercivity değerlerinde çok küçük bir artış ve yüzde manyetoempedans değişiminde ise keskin bir azalış gözlenmiştir. Ayrıca 120 dakikadan 180 dakikaya kadar olan ısıt işlem sürelerinde ise yüzde manyetoempedans değişiminde kısmen bir artış ve coercivity değerlerinde küçük değişimler belirlenmiştir. Bu durum numunede ortaya çıkan yüzey kristalleşmesi ile ilişkilidir. Bölüm 5.3 de 460°C de 120 dakika ısıt işlem gören $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tel numunelerde alınan SEM fotoğraflarında bu durum belirlenmiştir. Daha uzun süreli ısıt işlemlerde (180 dakika üzerinde) ise yapıda borlu fazlar oluşmaktadır [6]. Bu fazların oluşmasından dolayı yapıda kristal anizotropi ortaya çıkmakta ve buda numunedeki toplam anizotropide bir artışa yol açmaktadır. Anizotropinin artmasından dolayı coercivity değerlerinin arttığı ve yüzde manyetoempedans değişimlerinin azaldığı III. Bölgede açıkça görülmektedir.



Şekil 6.20. $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel için ısıt işlem süresine bağlı olarak 1 MHz frekans değerinde elde edilen yüzde manyetoempedans ve coercivity değişimleri.

Frekansın fonksiyonu olarak ısıt işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıt işlem görmüş $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin empedans değişimleri Şekil 6.21 de verilmiştir. Isıt işlem görmemiş ve ısıt işlem gören tüm numunelerde frekansa bağlı olarak empedans değerleri maksimum değere ulaşır, daha sonra azalış göstermektedir. Isıt işlem sürelerine bağlı olarak gözlenen maksimum empedans değerlerinin farklı frekans değerlerinde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Maksimum yüzde manyetoempedans

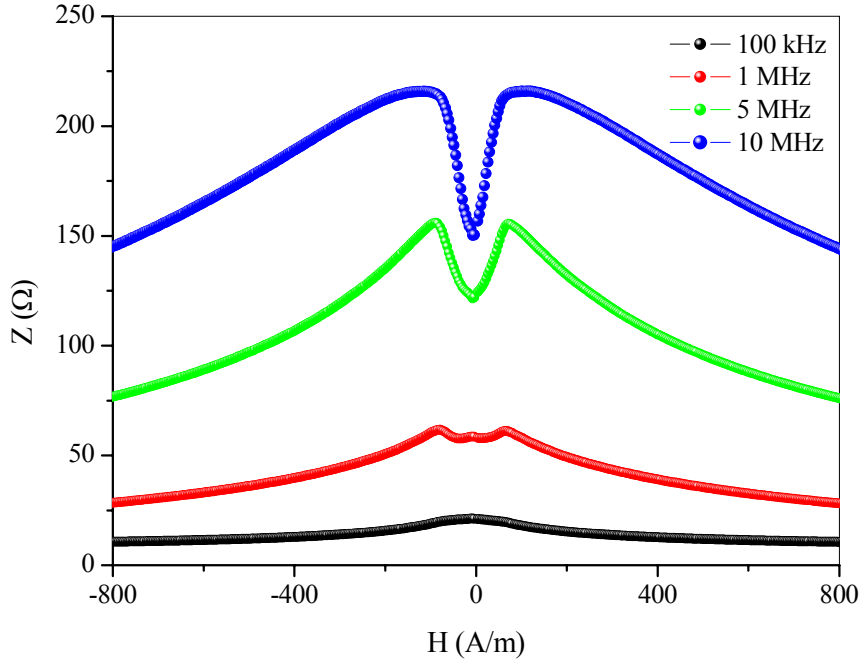
değişiminin gözlemlendiği 10 dakikalık ısıtma işlem süresinde elde edilen eğrinin, diğer numunelere oranla daha düşük frekans değerinde maksimuma ulaştığı tespit edilmiştir.



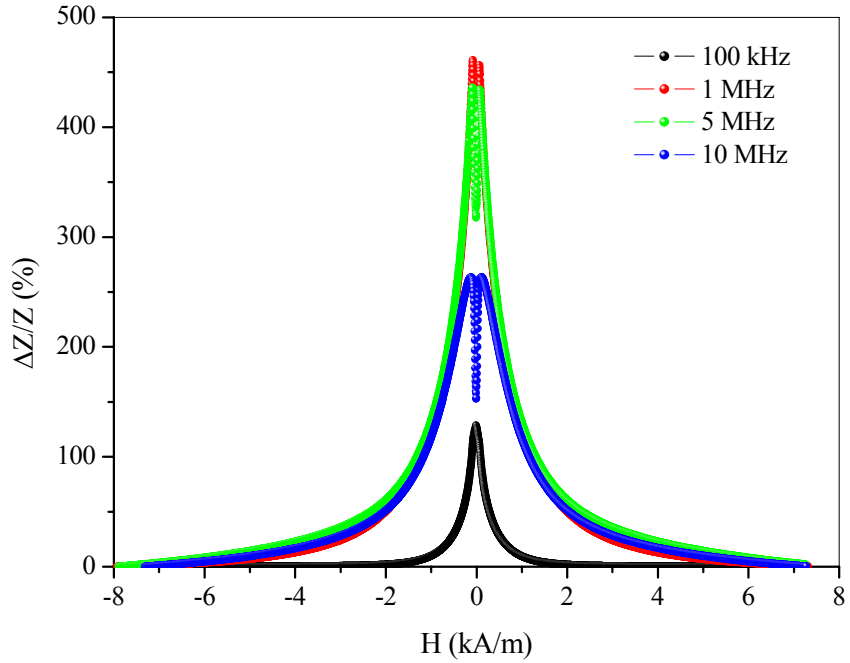
Şekil 6.21. Isıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtma işlem görmüş $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller için sürücü akım frekansının bir fonksiyonu olarak empedans değişimi.

6.4.3 Fırın ve Akım Altında Isıl İşlem Uygulanan $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin Manyetoempedans Ölçümleri

Bu kısımda 460°C ve 500mA de farklı sürelerde ısıtma işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin manyetoempedans ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 6.22, farklı sürücü akım frekans değerlerinde 460°C de 1 dakika ısıtma işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin düşük alan bölgesi için empedans değişimini gösterirken, Şekil 6.23 ise uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir.

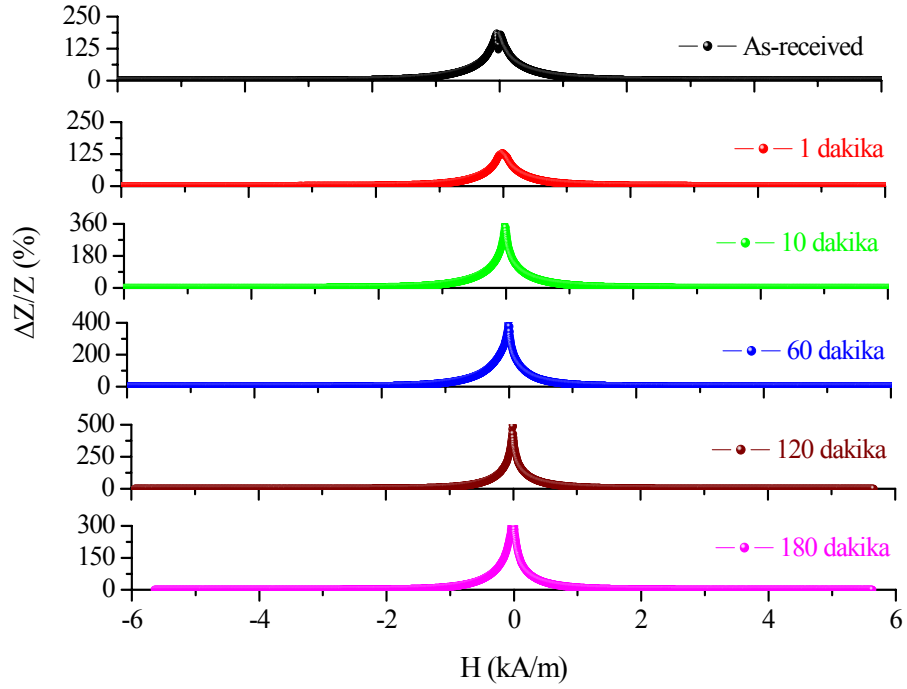


Şekil 6.22. Farklı sürücü akım frekans değerleri için 460°C de 1 dakika ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin düşük alan bölgesinde empedans değişimi.

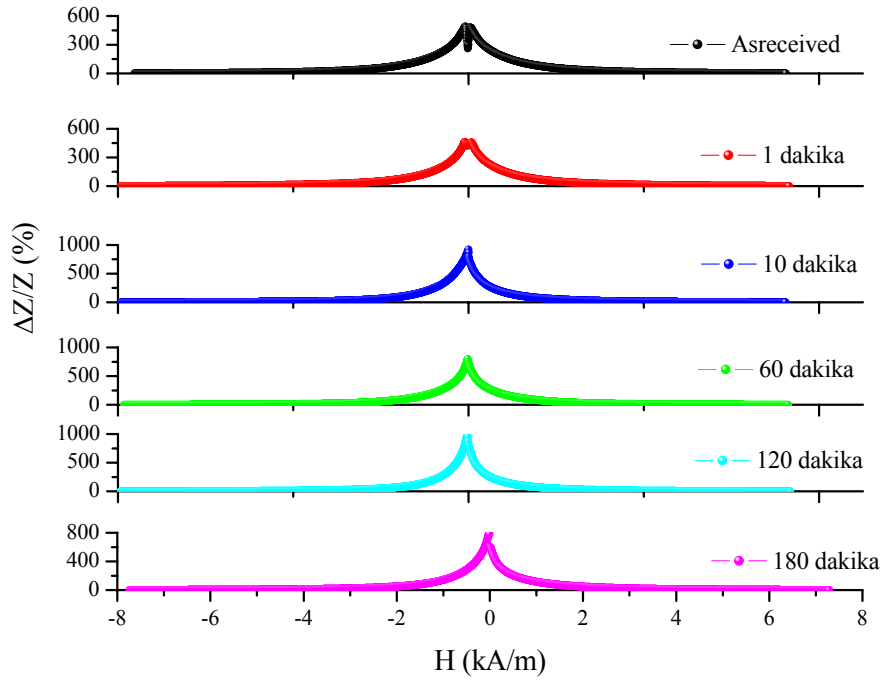


Şekil 6.23. Farklı sürücü akım frekans değerleri için 460°C de 1 dakika ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi.

100 kHz frekans değerinde maksimum MI etki $H \approx 0$ yakınında gözlenirken, diğer frekans değerlerinde $H \approx 0$ civarında çukur değerler gözlenilmiştir. Manyetoempedans eğrilerinde gözlenen bu davranışlar manyetizasyon sürecinde etkin olan domain duvar ve manyetik moment yöneliminin etkisi ile ortaya çıktığı belirlenmiştir [104]. Şekil 6.24 ve 6.25, ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin sırasıyla 100 kHz ve 1 MHz sürücü akım frekans değerlerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimlerini göstermektedir. Bu frekans değerleri için, ısıl işlem görmemiş telde ortaya çıkan ikili pik davranışların ısıl işlem süresi ile daha önceden de bahsedildiği gibi tek pik davranışlarına dönüştüğü belirlenmiştir.



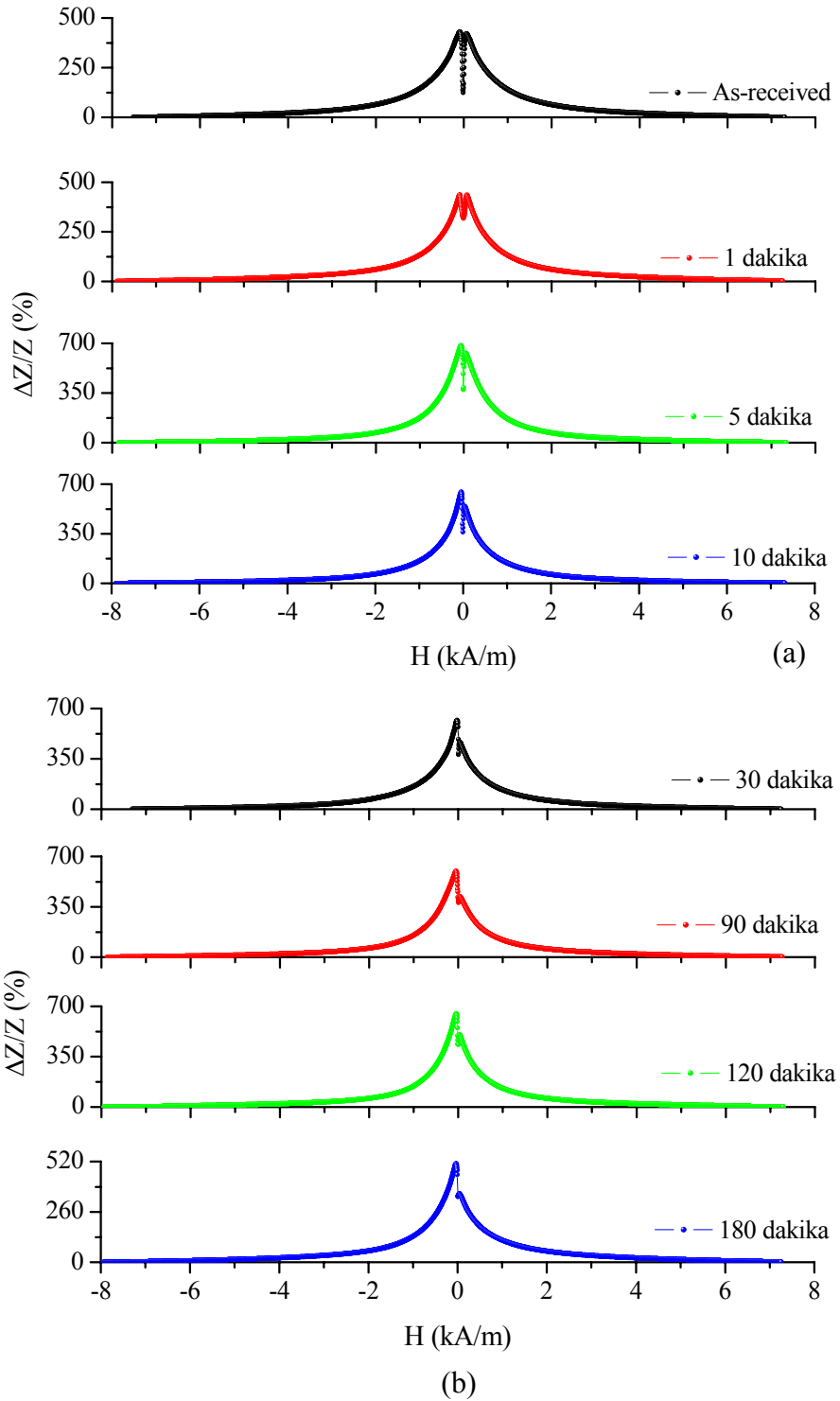
Şekil 6.24. 100 kHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.



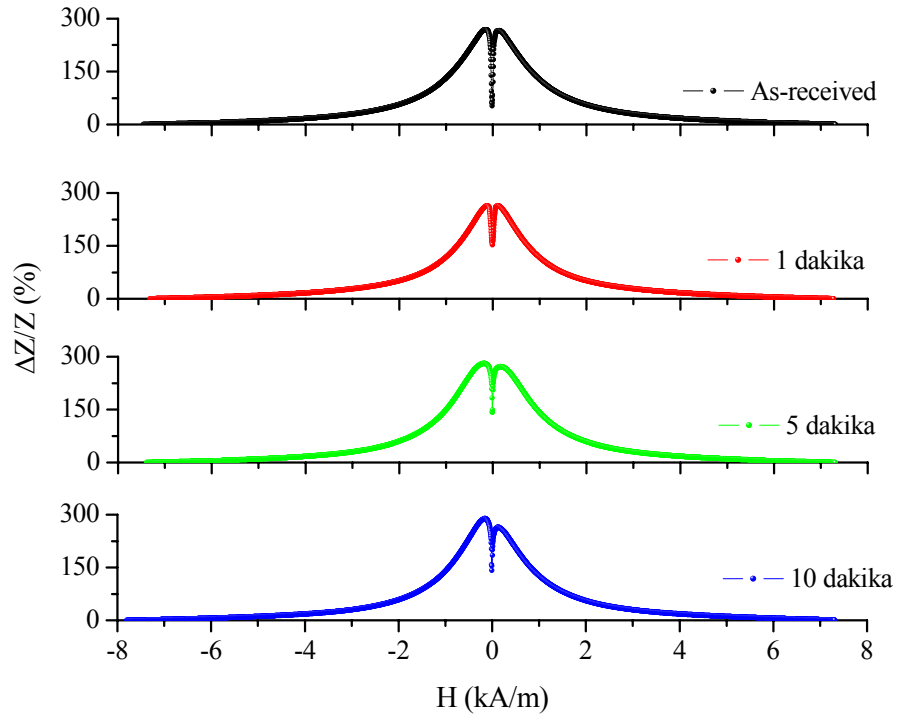
Şekil 6.25. 1 MHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.

Şekil 6.26 (a) ve (b), 5MHz sürücü akım frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimlerini göstermektedir. Uygulanan düşük süreli ısıl işlemler için (5 dakikaya kadar) eğrilerde gözlenen çift pik davranışlarının değişmediği ve pozitif ve negatif alan bölgesinde pik değerlerinin, simetrik olduğu tespit edilmiştir. Bu süre üzerindeki ısıl işlem sürelerinde artık eğrilerde asimetrik davranışların ortaya çıktığı belirlenmiştir. Aynı zamanda ısıl işlem süresiyle pozitif bölgede oluşan pik değerlerinin ısıl işlem süresinin artması ile azaldığı ve 180 dakikalık ısıl işlem süresi sonunda bu bölgedeki pik değerinin kaybolduğu gözlenmiştir. 10 MHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri Şekil 6.27 (a) ve (b) de gösterilmiştir. Şekil 6.27 den de görüldüğü gibi ortaya çıkan eğriler, 5MHz frekans değerinde ortaya çıkan eğriler ile benzerlik göstermektedir. Isıl işlem görmemiş durumda gözlenen çukur değerlerin, ısıl işlem süresiyle azaldığı tespit

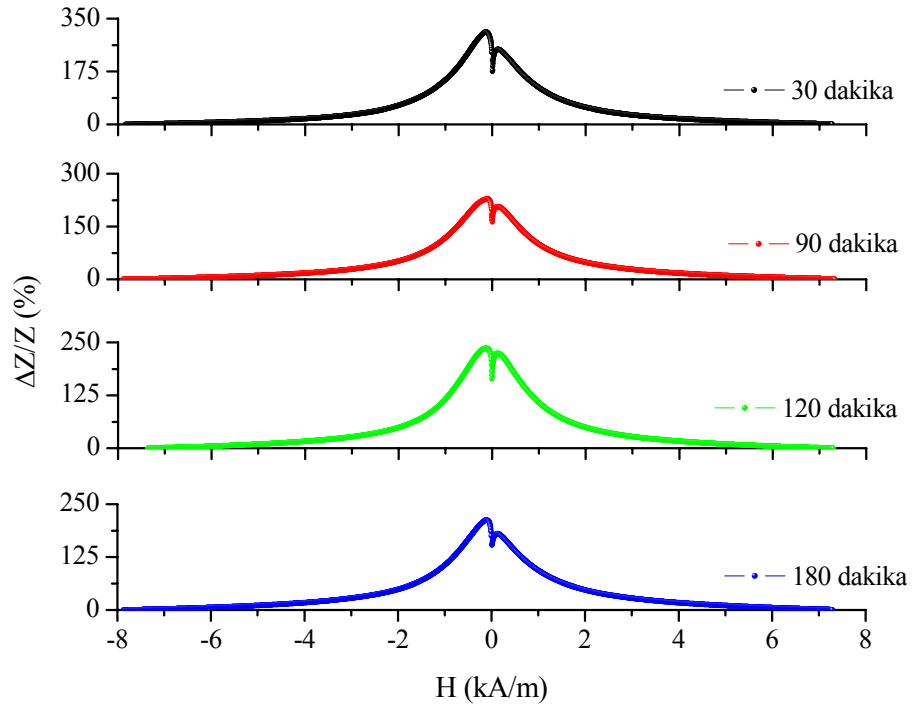
edilmiştir. Ayrıca 5 dakika ısıtılma süresi sonunda eğrilerde asimmetrik davranışların olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.26. 5MHz frekans değerinde ısıtılma görmemiş ve 460°C de farklı sürelerde ısıtılma gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.



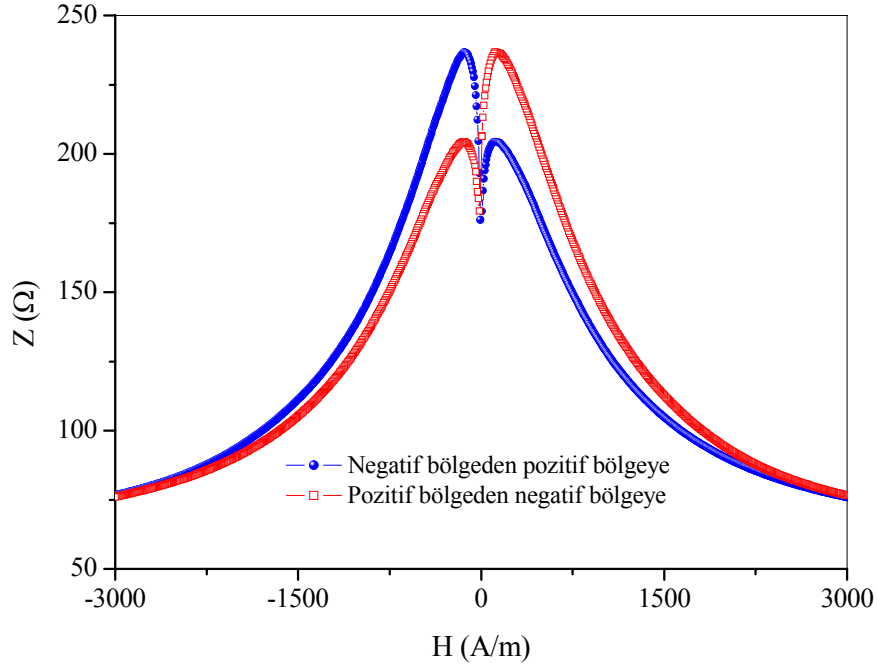
(a)



(b)

Şekil 6.27. 10 MHz frekans değerinde ısıtılmamış ve 460°C de farklı sürelerde ısıtıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.

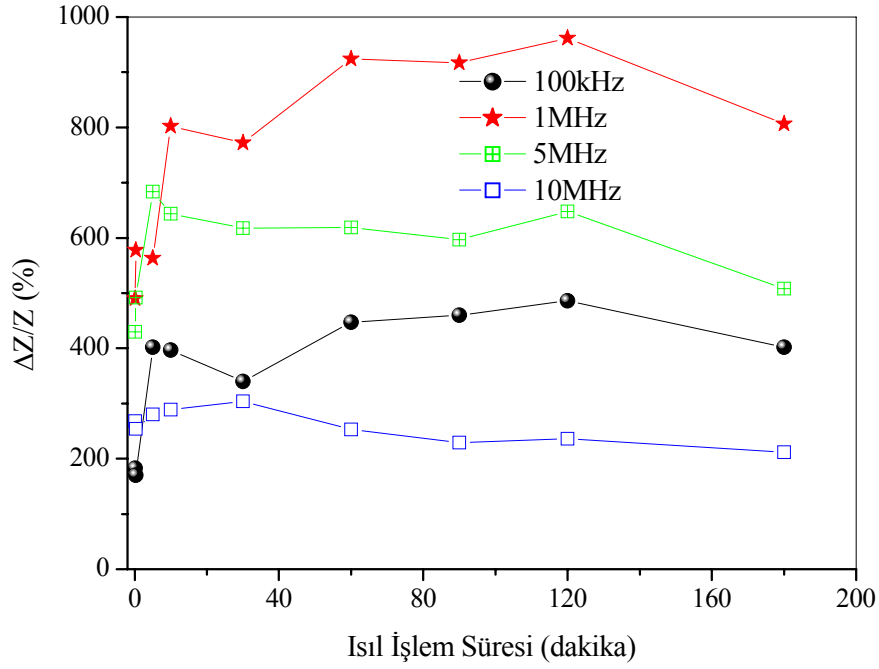
Şekil 6.28 de, 460 °C de 30 dakika ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin negatif bölgeden pozitif bölgeye ve pozitif bölgeden negatif bölgeye olmak üzere (gidiş-dönüş) uygulanan alan ile empedans değişimi verilmiştir. Isıl işlem görmemiş durumda gözlenen simetrik piklerin ısıl işlemle asimetrik piklere dönüştüğü belirlenmiştir. Bu durum literatürde de yer alan kısmi kristalleşme ile ilişkilidir. Isıl işlem gören numunelerde anizotropi homojen olmadığı için asimetrik pikler ortaya çıkmaktadır [95].



Şekil 6.28. 10MHz frekans değerinde 460 °C de 30 dakika ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin uygulanan alan ile empedans değişimi.

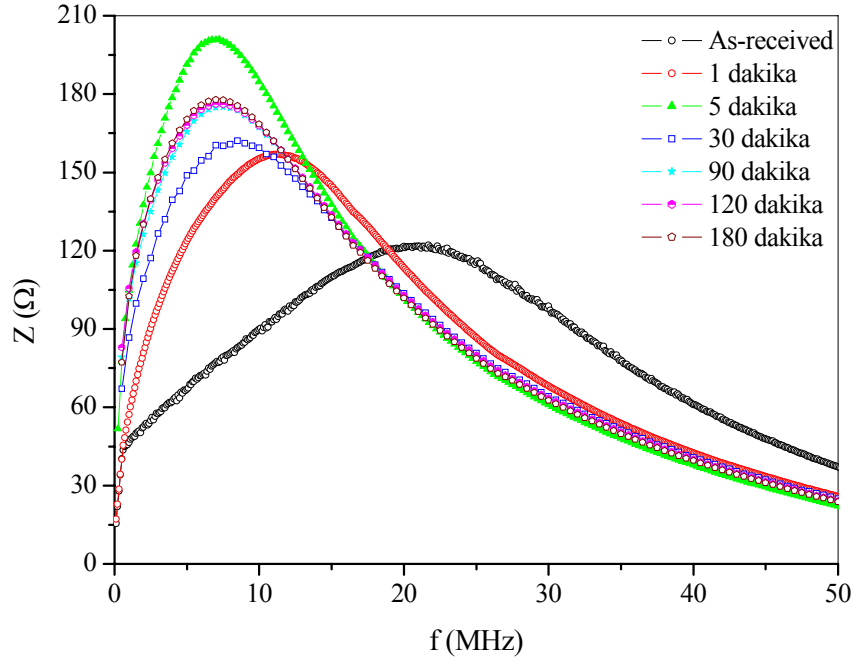
Şekil 6.29 da farklı sürücü akım frekans değerleri için ısıl işlem süresinin fonksiyonu olarak $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin yüzde manyetoempedans değişimi verilmiştir. Uygulanan tüm sürücü akım frekans değerleri için en büyük yüzde değişimin, diğer tel numunelerde olduğu gibi 1MHz frekans değerinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Isıl işlem görmemiş durumda yaklaşık % 490 olan yüzde değişimin 120 dakikalık ısıl işlem süresi sonunda % 962 lik maksimum bir değere ulaştığı belirlenmiştir. Bu süre üzerindeki ısıl işlem sürelerinde yüzde değişimin azaldığı ve 180 dakika sonunda yüzde değişimin yaklaşık %800 olduğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar diğer sürücü akım frekans değerlerinde de gözlenmiştir. Tüm frekanslarda yapılan ısıl işlemlerde yüzde değişimin bir maksimum değere ulaştıktan sonra 120

dakika sonunda azaldığı görülmektedir (Şekil 6.29). Bu durum ısıtma işlemiyle kristal anizotropinin ortaya çıkması ile ilişkilidir. Kristal anizotropinin ortaya çıkmasından dolayı anizotropi artmakta ve buna bağlı olarak alınganlık değeri azalmaktadır. Teorik modelde verildiği gibi alınganlık empedans ile doğru orantılıdır ve anizotropideki azalma eş zamanlı olarak empedansdaki azalmaya karşılık gelmektedir.



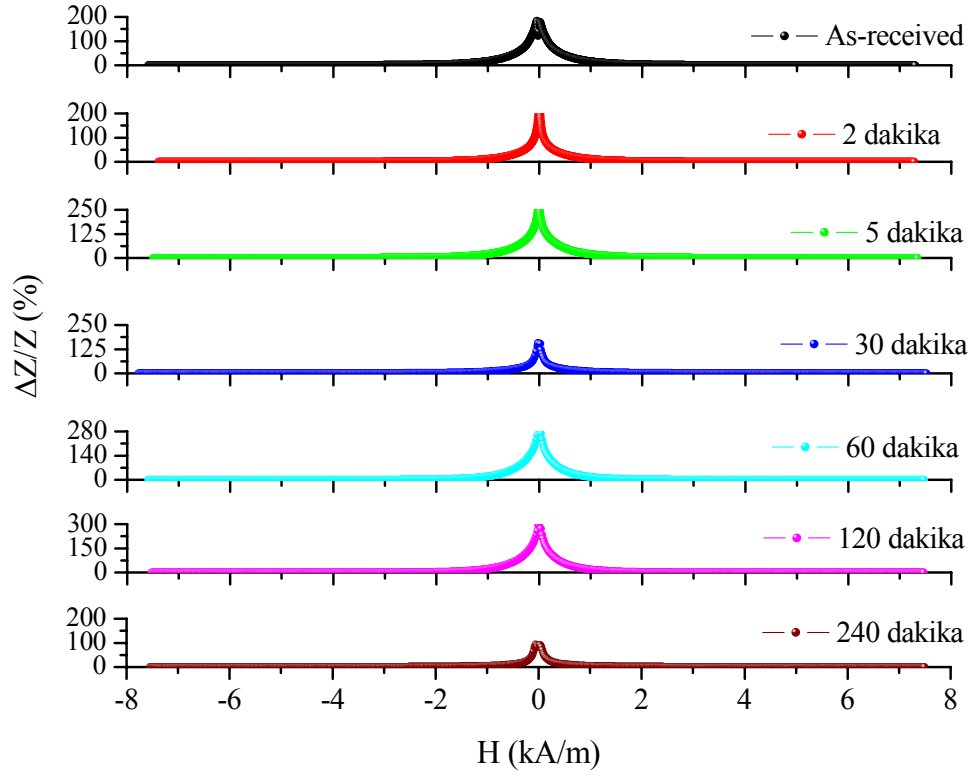
Şekil 6.29. Farklı sürücü akım frekans değerleri için $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telde ısıtma işleminin fonksiyonu olarak yüzde manyetoempedans değişimi.

Isıl işlem görmemiş ve $460^{\circ}C$ de farklı sürelerde ısıtma işlemi gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerde uygulanan sürücü akım frekansının bir fonksiyonu olarak empedans değişimi Şekil 6.30 da verilmiştir. Gözlenen maksimum değişimlerin ısıtma işlem süresi ile daha düşük frekanslara doğru kaydığı belirlenmiştir.



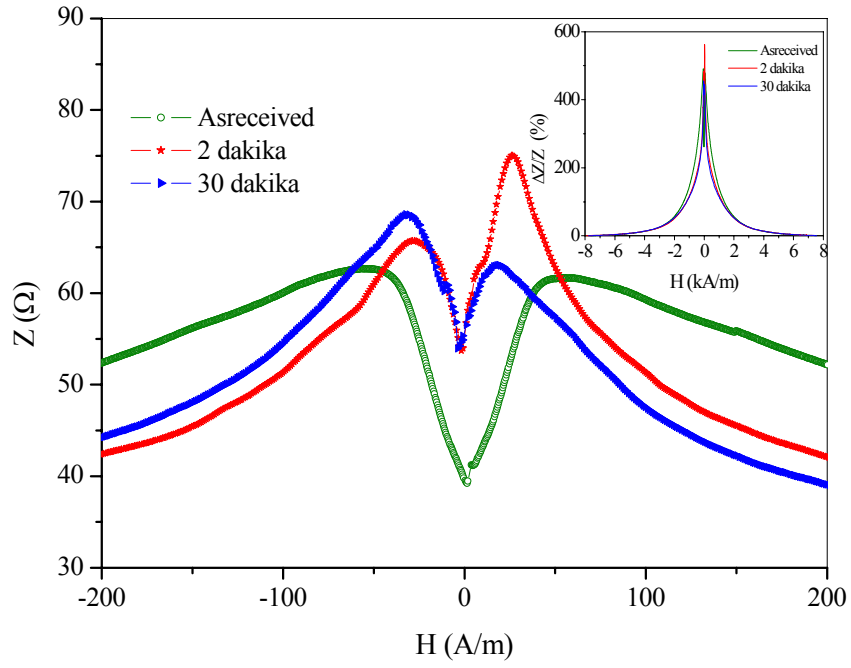
Şekil 6.30. Isıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin frekansın bir fonksiyonu olarak ile empedans değişimleri.

Yapılan farklı ısıl işlem süreçlerin numunelerin manyetik özelliklerinde değişimlere yol açtığı günümüze kadar yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Bu ısıl işlem süreçlerinde yaygın olarak fırınlama, akım altında ve alan altında ısıl işlemler kullanılmaktadır. Bu kısımda akım altında ısıl işlem gören numunelerin manyetoempedans sonuçları verilmiştir. Numuneler 500 mA altında farklı sürelerde ısıl işleme tabii tutulmuştur. Şekil 6.31 de ısıl işlem görmemiş ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıl işleme tabii tutulan $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller için 100 kHz frekans değerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimi verilmiştir. Bu frekans değeri için elde edilen eğriler üst kısımda verilen ısıl işlem fırınında elde edilen eğriler ile benzerlik göstermektedir. Isıl işlem görmemiş durumda gözlenen çift piklerin akım altında yapılan ısıl işlem süreleri ile kaybolduğu belirlenmiştir.

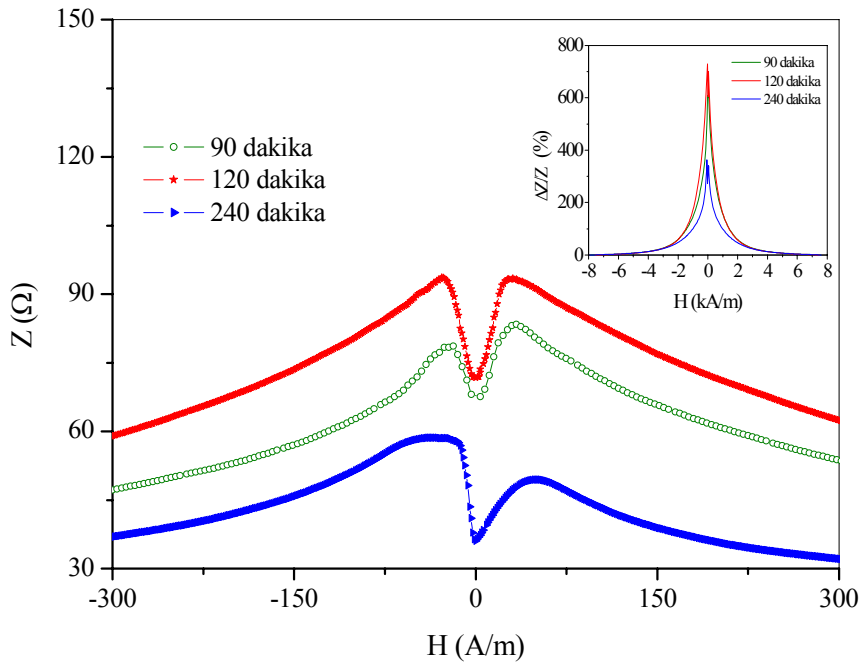


Şekil 6.31. Isıl işlem görmemiş ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıl işleme tabii tutulan $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller için 100 kHz frekans değerinde uygulanan alan ile yüzde manyetoempedans değişimleri.

Uygulanan 1 ve 10 MHz'lık frekanslarda ısıl işlem görmemiş ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller için düşük alan bölgesinde empedans değişimleri sırasıyla, Şekil 6.32 ve Şekil 6.33 (a) ve (b) de verilmiştir. İçteki grafiklerde ise uygulanan alanın bir fonksiyonu olarak yüzde manyetoempedans değişimleri gösterilmiştir. Her iki frekans değeri için akım altında ısıl işlen gören tüm tel numunelerde ortaya çıkan ikili piklerde asimetric bir durum olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yapılan ısıl işlem ile numunede ortaya çıkan anizotropinin homojen olmaması ile alakalıdır [95].

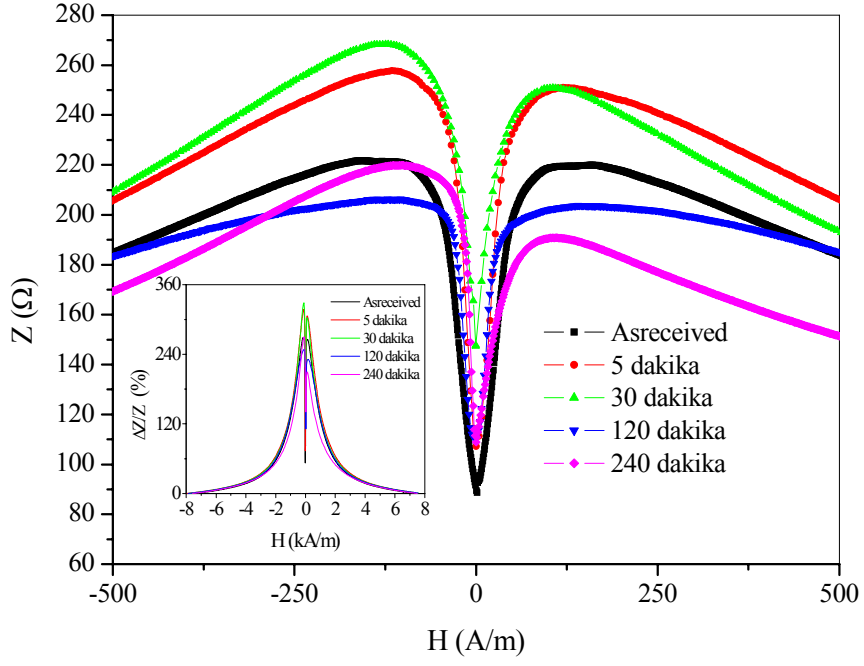


(a)



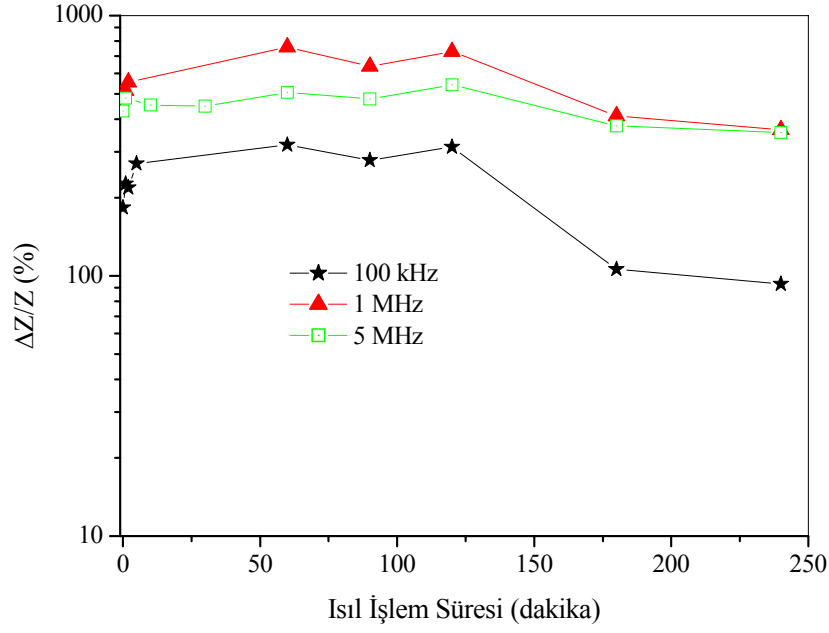
(b)

Şekil 6.32. 1 MHz frekans değerinde ısıtılmamış ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıtılma gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerin düşük alan bölgesinde empedans değişimleri, içteki grafiklerde ise yüzde manyetempedans değişimleri verilmiştir.



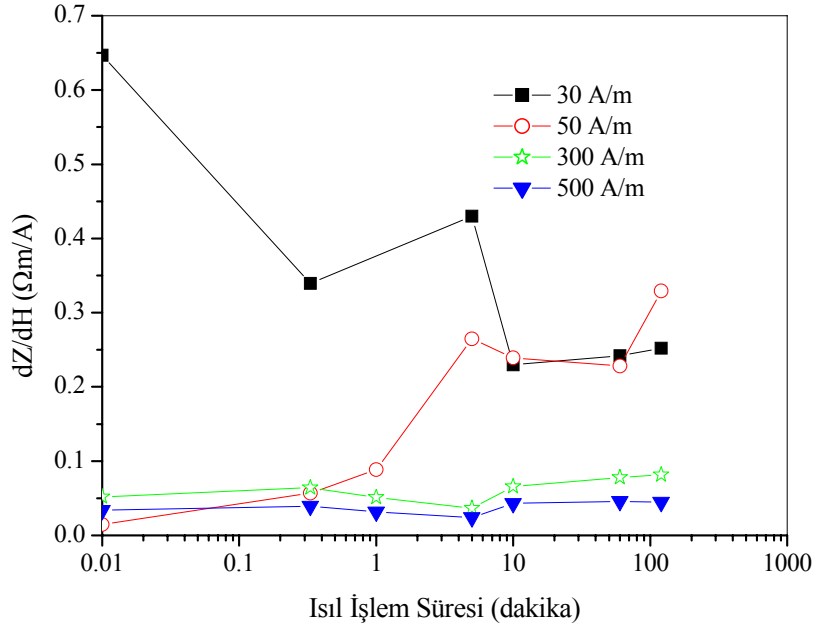
Şekil 6.33. 10 MHz frekans değerinde ısıl işlem görmemiş ve 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ teller için düşük alan bölgesinde empedans değişimleri, içteki grafikte ise yüzde manyetoempedans değişimleri verilmiştir.

Farklı sürücü akım frekans değerleri için (100 kHz, 1MHz ve 5MHz) 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıl işlem gören $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tellerde ısıl işlem süresine bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimleri Şekil 6.34 de verilmiştir. Bu frekans değerlerinde ısıl işlem görmemiş tel için yüzde manyetoempedans değişimleri sırasıyla yaklaşık olarak %183, %490 ve %430 olarak hesaplanmıştır. Isıl işlem süresine bağlı olarak maksimum yüzde manyetoempedans değişimleri 100 kHz, 1MHz ve 5MHz frekans değerleri için sırasıyla yaklaşık olarak %320, %757 ve %543 olarak hesaplanmıştır.

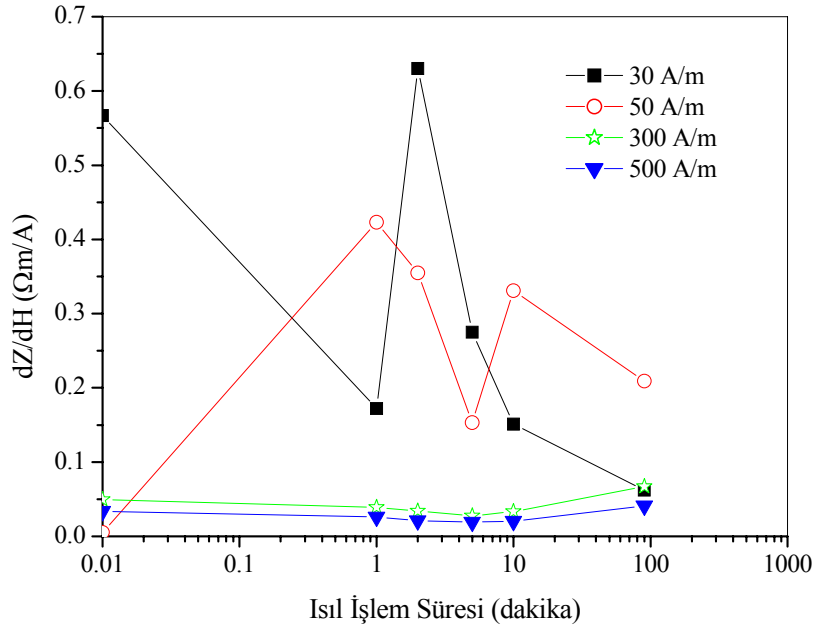


Şekil 6.34. Farklı sürücü akım frekans değerleri için 500 mA akım altında farklı sürelerde ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin ısıl işlem süresine bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimleri.

Isıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerde fırında ve akım altında yapılan ısıl işlemler ile ortaya çıkan manyetoempedans eğrilerinin birbirlerine çok benzer olduğu belirlenmiştir. Ancak gözlenen en büyük yüzde manyetoempedans değerinin fırında yapılan ısıl işlemle ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Akım altında yapılan ısıl işlemde tel çapının değişimine bağlı olarak akım yoğunluğu tel boyunca farklıdır. Buna bağlı olarak tel uzunluğu boyunca, sıcaklık gradyenti ve homojen olmayan manyetik alan ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle akım altında yapılan ısıl işlemlerde numunelerde ortaya çıkan anizotropi dağılımı daha düzensizdir. Fırın altında ve akım altında yapılan ısıl işlem sonucunda hesaplanan diferansiyel empedansın ısıl işlem süresine bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 6.35 ve 6.36 da verilmiştir.



Şekil 6.35. 1MHz frekans değerinde 460°C de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller için ısıl işlem süresinin fonksiyonu olarak diferansiyel empedans değişimi.



Şekil 6.36. 1MHz frekans değerinde 500 mA de farklı sürelerde ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller için ısıl işlem süresinin fonksiyonu olarak diferansiyel empedans değişimi.

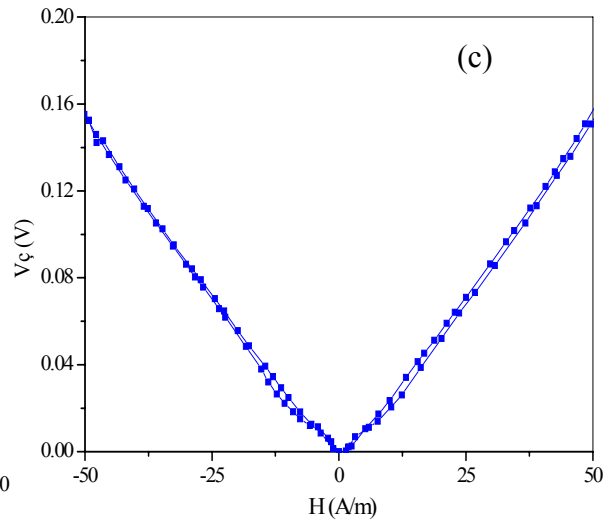
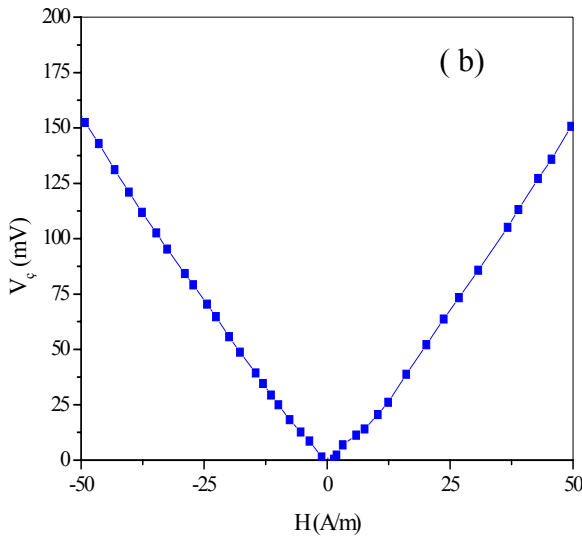
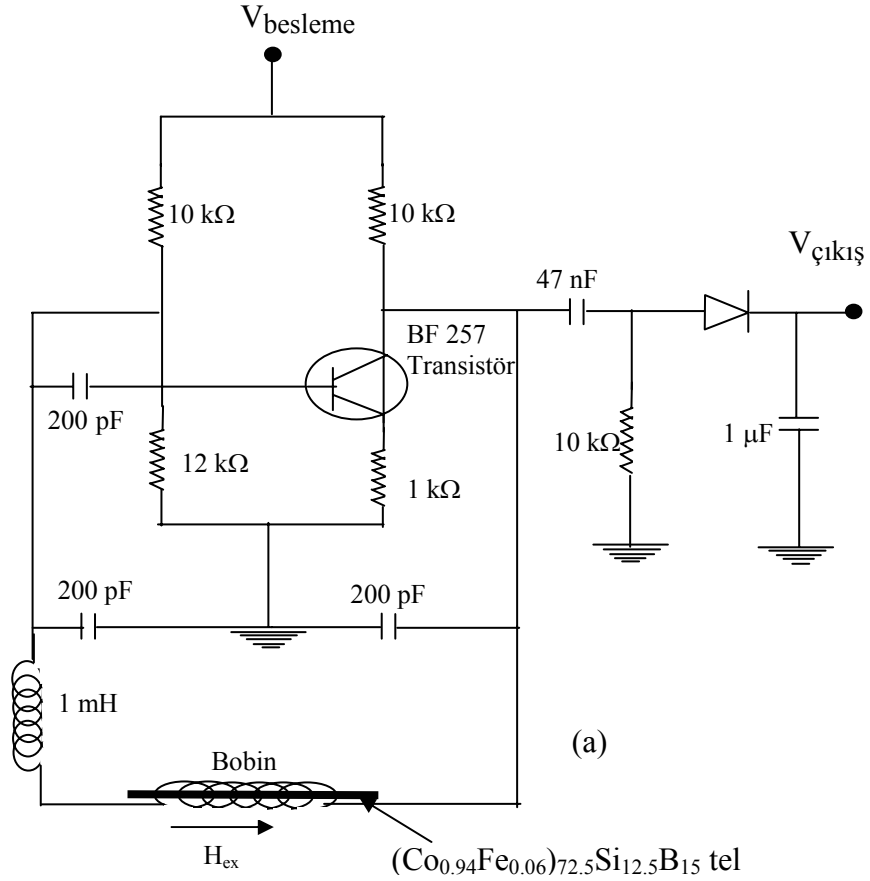
7. SENSÖR TASARIMI VE BAZI UYGULAMA ALANLARI

7.1. Giriş

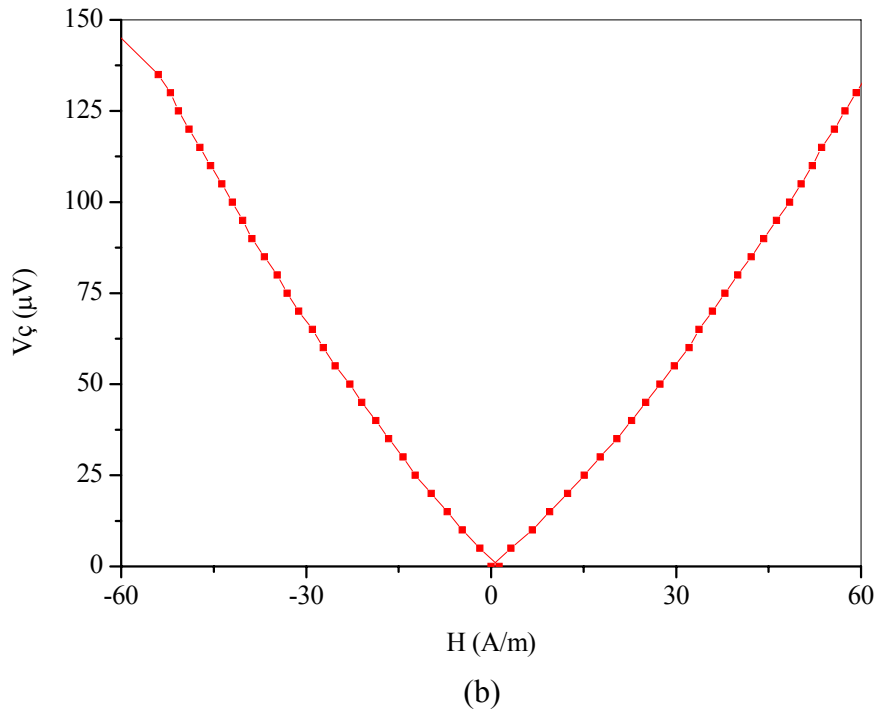
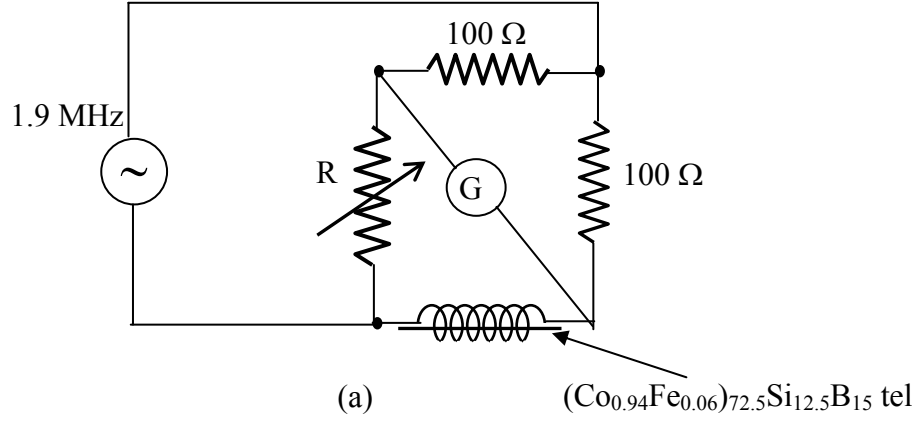
Bölüm 5 ve 6 da $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ teller üzerine yapılan manyetik, manyetoempedans ve stres empedans çalışmaları verilmiştir. Bu tel numuneler içinde uygulanan alan ile en büyük yüzde manyetoempedans yaklaşık sıfır magnetostriction değerine sahip olan $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ numunelerde gözlenilmiştir. Bu amaçla bu bölümde manyetik alan ve çatlak ölçümlerinde tasarlanan devrelerde bu tel kullanılmıştır. Bu kısımda ilk olarak manyetik alan sensörü devre tasarımları verilmiştir. Daha sonra ise çatlak ölçümleri için tasarlanan sensör tasarımı verilmiştir.

7.2. Manyetik Alan Sensör Devre Tasarımları

Ferromanyetik malzemeler uygulanan dış parametrelere oldukça duyarlı olduğu için Bölüm 3.6 da ayrıntılı bir şekilde verildiği gibi bir çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Fe, Co ve Fe-Co bazlı ferromanyetik tellerde yapılan çalışmalarda uygulan alanla en yüksek yüzde manyetoempedans değişimi $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde gözlenilmiştir. Bu nedenle uygulanan alana en duyarlı malzemenin, bu tel olduğu söylenebilir. Bu amaçla geliştirilen colpitts türü manyetik alan sensör devre tasarımlarında devre indüktansı olarak bu teller kullanılmıştır. Şekil 7.1 de tasarlanmış olan manyetik alan ölçüm sensör devresi ve devre çıkışı verilmiştir. Şekil 7.1 (b) den de görüldüğü gibi ± 50 A/m lik manyetik alan bölgesinde devre çıkışı lineer olarak değişmektedir ve bu bölgede eğim $4.2mV/(A/m)$ dir. Devrenin ölçüm hassasiyeti 0.1 mV olduğundan devre yaklaşık $100nT$ mertebesinde bir manyetik alanı ölçme hassasiyetine sahiptir. Şekil 7.1 (c) den ölçüm hem gidiş hem de geliş yönünde yapılmış olup, şekilden de görüldüğü gibi oluşan hysteresis çok küçüktür. Bir başka manyetik alan sensör devre tasarımı aynı tel kullanılarak Şekil 7.2 (a) da gösterilirken, alanın fonksiyonu olarak devre çıkışı ise Şekil 7.2 (b) de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel kullanılarak tasarlanan manyetik alan sensör devresi ve alanının fonksiyonu olarak devre çıkışları.



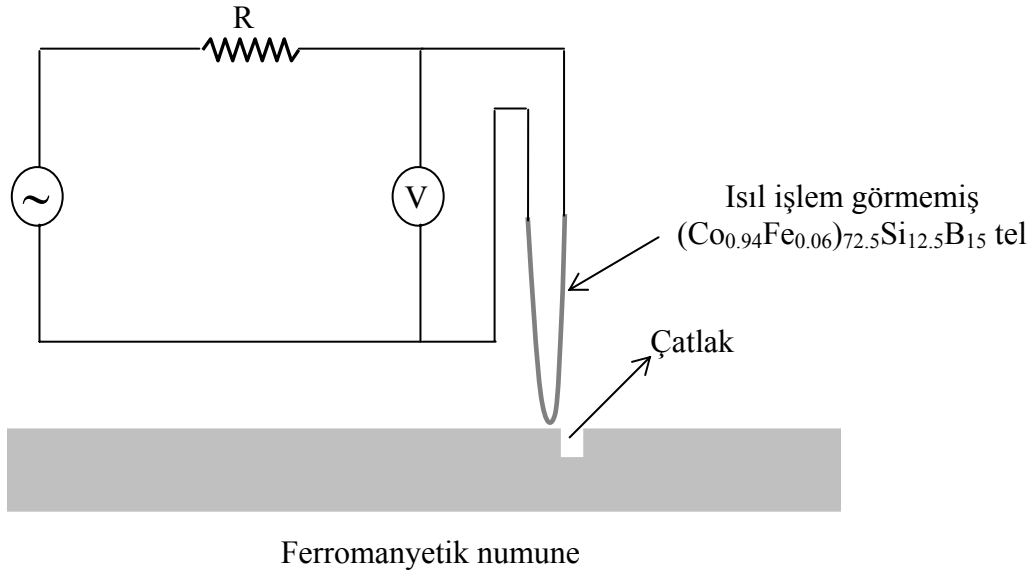
Şekil 7.2. $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel kullanılarak tasarlanan manyetik alan sensör devresi ve alanının fonksiyonu olarak devre çıkışı.

7.3. Ferromanyetik Malzemelerde Çatlak (Crack) Belirleyen Sensör Devre Tasarımı

Tahribatsız test teknikleri (NDT), güvenlik kriteri uygulamaları için birçok malzemenin denetiminde kapsamlı bir şekilde kullanılmaktadır. Manyetik tahribatsız test metotları makinalarda, mekaniksel kısımların bozulmasına bağlı olarak kazaları önlemekte ve makinanın servis bakım süresini uzatmada kullanılan faydalı bir metottur [105,106]. Büyük manyetoempedans sensörler (GMI), ya iletken boyunca geçen akım

ile ortaya çıkan manyetik alanların belirlenmesinde ya da manyetik tahribatsız test uygulamalarında lokalize manyetik alanların belirlenmesinde kullanılabilmektedir [107]. Çatlaktan dolayı ortaya çıkan süreksizlik malzemedeki manyetik alan dağılımında düzensizlik ortaya çıkarmakta ve süreksizliğin büyüklüğü çatlakın şekli ve büyüklüğü ile belirlenmektedir.

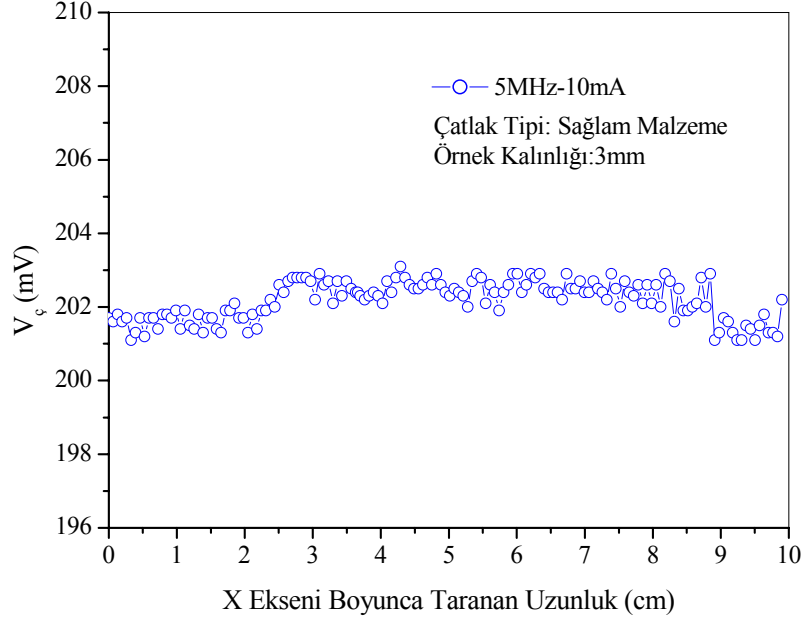
Amorf telin GMI özelliği malzemelerdeki çatlak bölgelerini algılayabilmektedir [108]. Yapılan manyetoempedans ölçümlerinde ısı işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin uygulanan alanla büyük empedans değişimi gösterdiği belirlenmiştir. Bu tel numune kullanılarak numunelerde çatlak belirleyen bir GMI sensör devresi tasarlanmıştır. Devre tasarımında GMI sensör olarak $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ tel kullanılmıştır ve bu GMI sensöre ac akım büyüklüğü 5 mA olan 1 MHz değerinde frekans uygulanmıştır. Sensör olarak kullanılan tel numune uzunluğu 10 cm olarak alınmış ve tel U şeklinde bükülmüştür. Ferromanyetik malzemelerde çatlakları belirlemek amacıyla tasarlanan GMI sensör devresi Şekil 7.3 de verilmiştir.



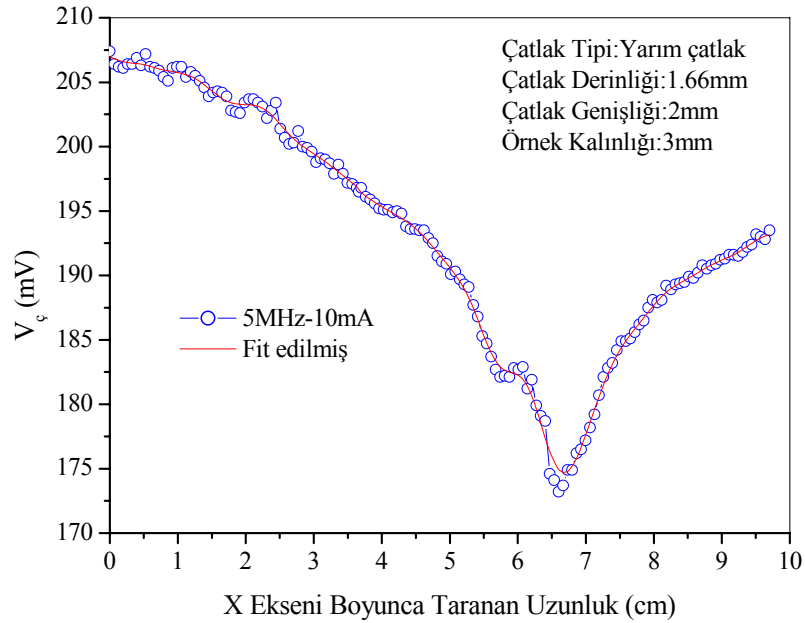
Şekil 7.3. GMI sensör olarak ısı işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin devre şeması.

SiFe ferromanyetik levhalarda oluşturulan farklı yapay çatlaklar Şekil 7.3 deki GMI sensör devresi ile test edilmiştir. Isıl işlem görmemiş $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin algılayıcı olarak kullanılabilmesi için, tele $1\text{ k}\Omega$ 'luk direç üzerinden 6 MHz frekanslı,

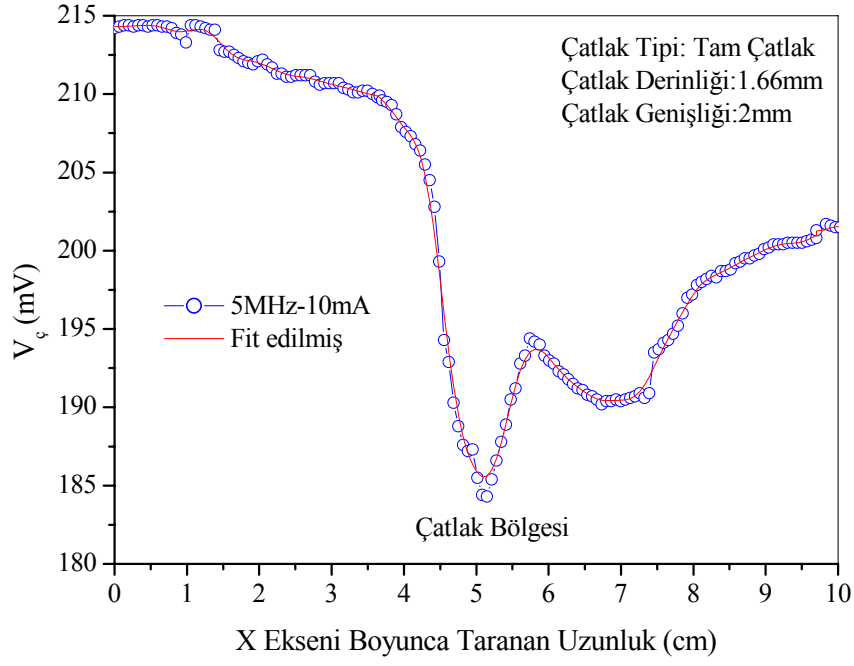
10 V genlikli gerilime sahip AC akım uygulanmıştır. Ölçümler esnasında taranan uzunluk boyunca telin iki ucu arasındaki voltaj değeri okunmuştur. Oluşturulan farklı yapay çatlak modellerine göre sensör konumunun çıkış voltajına karşı grafikleri Şekil 7.4-7.7 de verilmiştir.



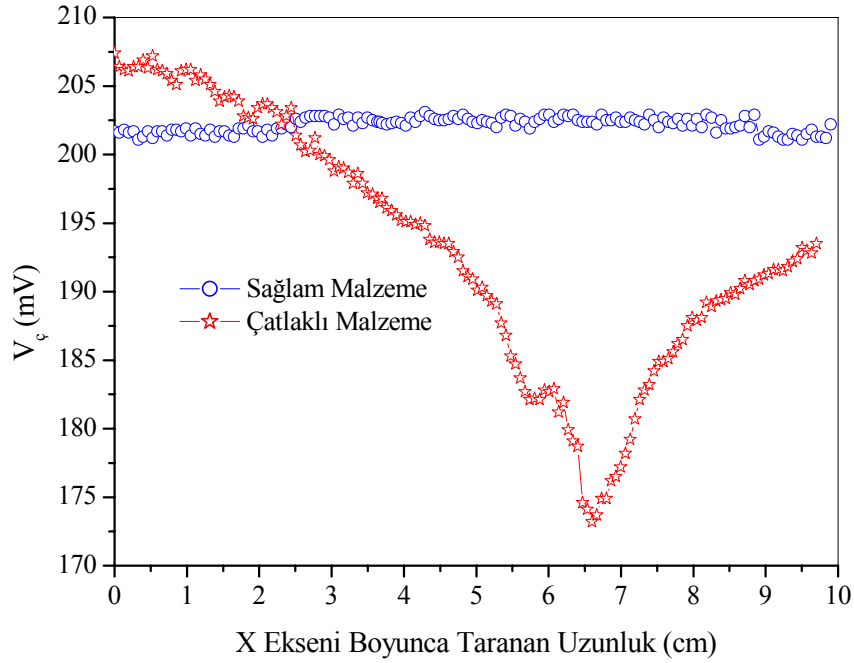
Şekil 7.4. Çatlak olmayan malzemede ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin iki ucu arasındaki voltajın taranan uzunluğa göre değişimi.



Şekil 7.5. Yarım çatlak örneğinde ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin iki ucu arasındaki voltajın taranan uzunluğa göre değişimi.



Şekil 7.6. Tam çatlak örneğinde ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin iki ucu arasındaki voltajın taranan uzunluğa göre değişimi.



Şekil 7.7. Sağlam ve çatlaklı malzemelerde 5 MHz sürücü akım frekans değerinde GMI sensör çıkışı.

Şekil 7.4 de görüldüğü gibi ferromanyetik malzemede herhangi bir çatlak ya da süreksizlik olmadığı için ısıtılma işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telin iki ucu arasındaki voltaj değişmemiştir. Fakat, Şekil 7.5 ve 7.6 ya bakıldığında, ısıtılma işlem görmemiş telin çıkış voltajının her model için, çatlak merkezine yaklaşırken azaldığı, çatlağın merkezinde minimuma indiği ve sonrasında, çatlak merkezinden uzaklaştıkça tekrar arttığı belirlenmiştir. Sağlam ve çatlak bulunan ferromanyetik malzemeler için x ekseni boyunca taranan uzunluğun fonksiyonu olarak çıkış voltaj değişimi Şekil 7.7 de verilmiştir. Manyetize edilmiş sağlam malzeme için sensör çıkışında önemli bir değişimin olmadığı ölçülmüştür. Bu durum, tüm manyetik akı çizgilerinin yüksek geçirgenlik sayesinde malzeme boyunca geçmesinden kaynaklanmaktadır.

8. SONUÇ, TARTIŞMA VE İLERİ ÇALIŞMALAR

8.1. Giriş

Bu bölümde bu çalışmada elde edilen sonuçlar, tartışma ve gelecek çalışmalar verilmiştir. Çalışmada elde edilen manyetik, manyetoelastik, manyetoempedans etki (MI) ve stres empedans (SI) etki sonuçları alt başlıklar halinde tartışılmıştır.

8.2. Manyetik ve Manyetoelastik Özelliklerin Sonuçları ve Tartışma

Ferromanyetik malzemelerin soft özelliklerinin belirlenmesinde coercivity değeri önemli bir parametredir. Bu amaçla ilk olarak ısıl işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıl işlem görmüş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerin M-H ölçümleri alınarak coercivity değerleri hesaplanmıştır. Isıl işlem görmemiş tellerin düşük alanda yapılan M-H ölçümlerinde Fe ve Co bazlı olan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerde büyük Barkhausen sıçraması (LBJ) gözlenirken $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telde ise bu davranış gözlenmemiştir.

Farklı kompozisyonlara sahip ısıl işlem görmemiş tellerde M-H eğrilerinden gözlenen bu davranışlar numunelerin üretimi esnasında ortaya çıkan özel domain yapıyla ilişkilidir. Bu çalışmada kullanılan ısıl işlem görmemiş telleri, magnetostriction değerine göre üç gruba ayırmak mümkündür. Pozitif magnetostriction değerine sahip ısıl işlem görmemiş Fe bazlı tellerin domain yapısı iç bölgede eksensel manyetize olurken dış kabuk ise radyal yönde manyetize olmaktadır [6]. Negatif magnetostriction değerine sahip ısıl işlem görmemiş Co bazlı tellerin domain yapısı ise iç bölgede eksensel ve dış kabukta dairesel yönde manyetize olmaktadır.

Düşük alan değerlerinde ısıl işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerde LBJ karakteristiği gözlenmiştir, bu bölgede manyetizasyon iç bölgedeki bir domain duvarının aniden hareket etmesiyle ortaya çıkmaktadır. Yani manyetizasyon uygulanan alan yönünde aniden değişmektedir. Bununla birlikte yaklaşık sıfır magnetostrictiona sahip ısıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telinin M-H eğrisinde LBJ davranışların olmadığı belirlenmiştir. Isıl işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ telde ise manyeto-elastik enerji çok küçük ve negatif olduğu için iç (core) yapısı olmayıp genelde dairesel yöneline sahiptir. Tüm numuneler için

düşük ısı işlem sürelerinde H_c değerinde bir azalma olmaktadır. Isıl işlem görmemiş durumda LBJ karakteristiği sergileyen $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerin $460^\circ C$ de düşük süreli ısı işlemlerde (5 dakika) bu özelliğinin ortadan kalktığı belirlenmiştir. Bu bölgede yapı tamamen amorf özelliğini koruduğundan kristal anizotropinin toplam anizotropiye katkısı sıfırdır ancak bu bölgede uygulanan ısı işlemler iç stres değerini azalttığından $K_\sigma = 3/2\lambda_s\sigma$ ile verilen manyeto-elastik anizotropi değerini dolayısı ile toplam anizotropi enerjisi K değerini azaltmaktadır. Bu nedenle $\chi \propto 1/K$ bağıntısı gereğince manyetik alınganlık bu bölgede artmaktadır. Orta süreli ısı işlemlerde H_c düşük değerini korumakta olup manyetik özelliklerinde fazla bir değişim gözlenmemektedir. Daha uzun süreli ısı işlemlerde yapıda Borlu fazlar oluşmakta ve manyetik olarak numunenin softluğunu bozan bu fazlar kristal anizotropi değerini yani toplam anizotropi enerji değerini artırarak χ değerini azaltmaktadır [6]. Yani yapıda borlu fazların ortaya çıkması pinning noktalarının artmasına neden olmakta ve buda H_c değerinin keskin bir şekilde artmasına neden olmaktadır. $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerde yapılan manyetoelastik ölçümlerde ısı işlem görmemiş numunede eğrinin W şekline sahip olduğu belirlenmiştir. Yani E/E_s -H eğrileri telin dış korundaki manyetik momentlerin yöneliminin ortalama değerinin 80° olduğunu göstermektedir. Yüzeyi kristalleşen teller büyük bir ΔE etki göstermektedir. Bundan dolayı yüzeyi kristalleşmiş FeCrSiB tellerde manyetik momentlerin $H=0$ alan altında dairesel yönde yönelim gösterdiği sonucuna varılmaktadır [92].

Isıtılan tellerde anizotropi ile ilişkili olan iç streslerin azaltılmasından dolayı ΔE etkide bir artış gözlenmiştir. Bu çalışmada gözlenen en düşük E/E_s yaklaşık 0.26 dır ($460^\circ C$ de 180 dakika). Bu düşük değer göstermektedir ki, yüzey kristalleşmesinin başlamasından önce stresler bir minimum değere düşürülebilmektedir. En iyi ΔE etki küçük bir yüzey kristalleşmesiyle belirlenmektedir. İç streslerin rahatlatılması ile enine anizotropi ortaya çıkmaktadır. $460^\circ C$ de 30 dakika ısıtılan telde rasgele bir anizotropi dağılımının meydana geldiği belirlenmiştir. $460^\circ C$ de 30 dakika ısıtılmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde artık E/E_s -H eğrisinin V şekline sahip olduğu belirlenmiş bu da bu numunelerin manyetik momentlerinin ortalama olarak numune boyu doğrultusunda uygulanan manyetik alanla 45° veya daha düşük açı yaptığını göstermektedir. Benzer sonuçlar ısı işlem görmüş $480^\circ C$ 20 saniye ısı işlem gören $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel ve $450^\circ C$ 10 dakika ısı işlem gören $Co_{75}Si_{15}B_{10}$ telde E/E_s -H eğrilerinin V şeklini aldığı rapor edilmiştir [103,109]. Sonuç olarak ısı işlem görmemiş numunelerde üretim sırasında oluşan

stresler manyetik momentlerin yöneliminde etkin rol oynamakta ve numune boyuna $\sim 80^\circ$ lik açı yaparak yönelmelerini sağlamaktadır.

Ancak ısıtılma işlemine tabi tutulmuş numunelerde özellikle düşük sürelerde ısıtılan numunelerde iç stresler yani anizotropi azaldığından ve kristal anizotropisinde ortalama olarak sıfır katkı getirdiğinden artık numunede merteye olarak çok küçük olmasına rağmen etkin olan şekil anizotropi nedeni ile manyetik momentler numunenin boyu doğrultusunda yönelmektedirler. Ancak iç stresler tamamen sıfır olmadığından çok azda olsa manyetoelastik (stres) anizotropiden dolayı bazı manyetik momentlerin tamamen numune boyu doğrultusunda yönelmesini engellemektedir. Bu nedenle ısıtılma işlemi gören numunelerde manyetik momentler ortama olarak tam olarak numune boyu doğrultusunda değil de bu doğrultu ile 45° veya daha düşük açı yapacak şekilde yönelmektedirler [103,109]. Yüzeyi kristalleşmiş tellerin eğrileri (180 dakika üzerinde) dairesel anizotropiye göre 90° lik moment yöneliminin bir karakteristiği olan W şeklini almaktadır.

8.3. Manyetoempedans Etki Sonuçları ve Tartışma

Ferromanyetik malzemelerin gösterdiği manyeto-direnç etki müzik kasetlerindeki manyetik şeritler başta olmak üzere birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Yapılan manyetoempedans etki çalışmalarında uygulama alanı olarak manyeto direnç etkinin kullanıldığı alanlarda kullanılabileceği belirlenmiştir. Bununla birlikte düşük alan değerlerinde, manyetoempedans etki çok yüksek değişim gösterdiğinden uygulama açısından daha cazip hale gelmektedir. Bu amaçla tezinde başlığını oluşturan ısıtılma işlemi görmemiş ve ısıtılma işlemi gören ferromanyetik $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde manyetoempedans etki kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

Yapılan manyetoempedans etki çalışmalarında magnetostriction değerinin önemli bir role sahip olduğu belirlenmiştir. Farklı sürücü akım frekans değerleri (100 kHz, 1 MHz, 5 MHz ve 10 MHz) için ısıtılma işlemi görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde yüzde manyetoempedans değişimleri hesaplanmıştır. Tüm ısıtılma işlemi görmemiş tel numuneler için hesaplanan yüzde manyetoempedans değişimlerinde en büyük değişimin 1 MHz sürücü akım frekans civarında ortaya çıktığı belirlenmiştir. 1 MHz sürücü akım frekans değerinde

ısıtım işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde yüzde manyetoempedans değişimleri sırasıyla %32, %40, %490 ve %149 olarak hesaplanmıştır. Farklı kompozisyonlara sahip bu dört tel içinde en büyük değişimin ticari ismi AC-20 olan ısıtım işlem görmemiş $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunesinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu durumun, telin içyapısının olmadığı ve dış kabukta ise domainlerin dairesel yönelime sahip olmasıyla alakalı olduğu belirlenmiştir. Yapılan manyetoempedans ölçümlerinde sürücü akım frekans değerlerine bağlı olarak yüzey etkisinin önemli bir role sahip olduğu belirlenmiştir.

Düşük frekans değerlerinde (≤ 100 kHz) yüzey etki çok zayıftır ve empedans değişimine başlıca katkı reaktans değerinden kaynaklanmaktadır. Orta dereceli (1 MHz) ve yüksek frekans değerlerinde (5 ve 10 MHz) yüzey etkisine bağlı olarak empedans değişimine büyük katkı direnç bileşeninden kaynaklanmaktadır. Bu frekans değerlerinde güçlü yüzey etkiden dolayı akım dağılımı ferromanyetik malzemenin yüzeyine yakın kabuk boyunca akma eğilimindedir. Bu durumda ferromanyetik malzemenin kesit alanı azalır ve buna bağlı olarak direnç bileşeni artar. En büyük değişimin gözlemlendiği 1 MHz sürücü akım frekans değerinde manyetoempedans etkiye hem domain duvarlar hem de manyetizasyon yönelimleri katkı getirmektedir. Yüksek frekanslarda ise malzemede oluşan eddy akımlar sayesinde domain duvarlar baskılanır ve manyetoempedans etkiye yalnızca manyetizasyon yönelimi katkı getirir.

460 °C de farklı sürelerde yapılan ısıtım işlemler sonucunda tellerin yüzde manyetoempedans değişimlerinin de farklı değerler ortaya çıktığı belirlenmiştir. 460 °C de farklı sürelerde ısıtım işlem gören $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde gözlenen en büyük değişimlerin ısıtım işlem görmemiş numunelerde olduğu gibi 1MHz sürücü akım frekans civarında ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Düşük ısıtım sürelerinde yüzde manyetoempedans değişimlerinde artışın olduğu belirlenmiştir. Bu düşük süreli ısıtım işlemlerde malzemelerin üretimi esnasında ortaya çıkan iş stresler azaltıldığından dolayı manyetoelastik anizotropi dolayısıyla malzemenin toplam anizotropi değeri azalmaktadır. Teorik modelde görüleceği üzere anizotropi manyetik alınganlık ile ters orantılıdır bu nedenle manyetik alınganlık dolayısıyla empedans artmaktadır. Daha uzun süreli ısıtım işlemlerde yapıda borlu fazlar oluşmakta ve manyetik olarak numunenin softluğunu bozan bu fazlar kristal anizotropi değerini yani toplam anizotropi enerji değerini artırarak χ değerini azaltmaktadır. Yani

yapıda borlu fazların ortaya çıkması pinning noktalarının artmasına neden olmakta ve buda manyetoempedans değerinin azalmasına neden olmaktadır. Hesaplanan coercivity ve yüzde manyetoempedans değerlerinin birbirleri ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

$Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$, $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$, $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ ve $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde yapılan manyetoempedans ölçümlerinde en büyük yüzde değişimin yaklaşık sıfır magnetostriction değerine sahip olan $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tellerde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada gözlenen en büyük manyetoempedans değeri $460\text{ }^{\circ}C$ de 120 dakika ısıl işlem gören $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunede yaklaşık olarak %962 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ısıl işlem süresine bağlı olarak manyetoempedans eğrilerinden gözlenen asimetrik davranışların malzemelerde ortaya çıkan anizotropi dağılımının homojen olmaması ile alakalı olduğu belirlenmiştir [99].

$(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel numunelerde fırın altında ve akım altında yapılan ısıl işlemlerde farklı sürücü akım frekans değerleri için ortaya çıkan manyetoempedans eğrilerinde benzer davranışlar gözlenmiştir. Fakat hesaplanan yüzde manyetoempedans değerlerinde fırın altında yapılan ısıl işlemlerde daha yüksek değerlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum akım altında yapılan ısıl işlemde anizotropi dağılımının daha düzensiz olması ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır [99]. Akım altında yapılan ısıl işlemler için düşük alan değerlerinde ortaya çıkan manyetoempedans eğrilerinde görülen dalgalanmalar bu durumu doğrulamaktadır.

Deneysel sonuçlar ve teorik modele göre yüksek manyetoempedans etki elde edebilmek için;

- 1- Numune magnetostriction değeri: Sonuçlara göre yüksek magnetostriction değerine sahip numuneler daha düşük manyetoempedans etki göstermektedirler.
- 2- Domain yapısı: Dairesel yönde kolay eksene sahip olan numune daha büyük bir manyetoempedans etki göstermektedir.
- 3- Anizotropi : Düşük anizotropi değerine sahip olan numuneler yüksek MI etki göstermektedirler, bu sonuç teorik modelle de uyum içindedir.
- 4- Malzemenin yüksek bir doyum manyetizasyon değerine sahip olması gerekmekte olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak uygulanan alanla diğer tel numunelere oranla yüksek manyetoempedans etki gösteren $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ tel malzemeler sensör uygulamalarında daha caziptir. Bu nedenle tasarlanan manyetik alan ve çatlak belirleyen devrelerde devre indüktansı olarak bu tel numuneler kullanılmıştır.

8.4. Stres-empedans Etki Sonuçları ve Tartışma

Pozitif magnetostriction değerine sahip ısıtılma işlem görmemiş ve 460 °C de farklı sürelerde ısıtılma işlem gören $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel numunelerin empedans değerlerinin uygulanan stres altında büyük oranda değiştiği belirlenmiştir. Manyetoempedansın yüzde değişimi uygulanan farklı gerilme stresler ile ısıtılma işlem görmemiş ve ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tellerde ölçülmüştür.

MI etkinin tek pik davranışları ısıtılma işlem görmemiş ve 10 dakika ısıtılan $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde gözlenmiştir. MI etkinin maksimum değeri gerilme stresin olmadığı durumda ($\sigma=0$) gözlenmiş ve daha sonra gerilme stresin artması ile MI etkinin büyüklüğünde azalma olduğu belirlenmiş ve ayrıca ısıtılma işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde gerilme stresin artması ile MI etkideki tek pik davranışların değişmediği görülmüştür. Isıtılma işlem görmemiş ve 10 dakikada ısıtılan teller için $\Delta Z/Z$ (%) nin pik değerlerinin sırası ile $\sigma=0$ MPa da %14.7 den $\sigma=250$ MPa için %1.6 ya ve $\sigma=0$ MPa da %127.7 den $\sigma=250$ MPa için %2.9 değerlerine düştüğü belirlenmiştir 195 dakika ısıtılan tellerde bir asimetric MI eğrisi görülmektedir. MI eğrinin asimetricliği, gerilme stresin artması ile giderek azalış gösterdiği ve 138 MPa lık stres değerinde asimetric MI eğrileri kaybolarak tekrar tek pik davranışları ortaya çıktığı tespit edilmiştir. 195 dakikada ısıtılan teller için $\Delta Z/Z$ (%) nin pik değerleri, $\sigma=0$ MPa da %80 den $\sigma=250$ MPa için %2 değerine düştüğü belirlenmiştir. Yapılan tüm ölçümlerde, MI etki büyüklüğünün uygulanan gerilme stresin artması ile azaldığı görülmüştür.

Çünkü pozitif magnetostriction a sahip numunede stres manyetik momentleri telin boyu doğrultusunda yönlendirmeye çalışacaktır buda numune kolay ekseninin telin uzunluğu doğrultusunda oluşmasını sağlayacağından MI etkinin büyüklüğünün azalmasına neden olacaktır. Benzer olarak ve ısıtılma işlem görmemiş ve ısıtılma işlem gören $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel numunelerinde uygulanan strese bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimlerinin azaldığı belirlenmiştir. 460 °C 10 dakika ısıtılma işlem uygulanmış $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ telde SI etkinin ~%255 değişimle en büyük değere ulaştığı belirlenmiştir. Uygulanan gerilme streslerinin bir fonksiyonu olarak, $\Delta Z/Z$ (%) ve $\Delta Z/Z_{\sigma}$ (%) değerlerindeki azalma telin domain yapısında değişimlere yol açan manyeto-elastik anizotropileri artırdığı sonucuna varılabilir.

Isıtılma işlem görmemiş $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ tellerin 0.5 ve 10 MHz aralığındaki farklı çalışma frekansları için empedansın bükme strese bağlılığında bükme stresin pozitif ve

negatif değerleri için oldukça simetrik sonuçlar elde edilmiştir. Bükme-empedans (TI) oranı, $(\Delta Z/Z)_\xi$ (%), sürücü akım frekansının artması ile ilk olarak artış göstererek 9 MHz lık frekans değerinde maksimuma ulaştıktan sonra, bu frekans üzerindeki değerlerde bükme empedans oranının, azalış gösterdiği görülmüştür. Yüksek frekansta ortaya çıkan empedans eğrisi, bükme stresin olmadığı durumda maksimum bir değer gösterirken bükme stresin uygulanmasıyla yavaş bir şekilde azalmaktadır.

Düşük frekans aralığında (0.2-2 MHz) ortaya çıkan eğriler için bu durum geçerli değildir. Burada uygulan düşük bükme streslerde empedansın bir maksimuma değere ulaştığı ve bükme stresin daha fazla artmasıyla empedansta bir azalışın olduğu belirlenmiştir. Bükme stres etkisini incelemek için, farklı bükme stresler altında $(\Delta Z/Z)_H$ (%) ölçümleri yapılmıştır. Bükme stres altında 0.235 rad/cm değer için empedans değerinin %15 den % 45 e artış gösterdiği gözlenmiştir. Isıl işlem görmemiş telin karakteristik manyetoempedans eğrisindeki bu artış, telin i bölgesi ve dış kabuğu arasındaki dairesel domainlerin şekillenilişleriyle ilişkilidir. Diğer taraftan, bükme stresin daha fazla artması ile manyetoempedans etkinin büyüklüğünün azalmakta olduğu bulunmuştur. 500 mA lik akım altında 15 dakika süreyle akım altında ısıl işleme tabi tutulan tellerin $(\Delta Z/Z)_\xi$ (%) büyüklüğü %150 artmış ve ısıl işlem süresinin daha fazla artması $(\Delta Z/Z)_\xi$ (%) büyüklüğünün azalmasına sebep olmuştur.

Sonuç olarak $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ ve $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ tel numunelerin empedans değerlerinin uygulanan streslerle büyük oranda değiştiği ve bu nedenle bu numunelerin stres sensörü olarak kullanılabilereği sonucuna varılmıştır.

8.5. İleri alışmalar

Bu çalışmada ısıl işlem görmemiş ve farklı ısıl işlem süreçleri (fırın ve akım altında) altında ısıl işlem gören tellerin özellikleri incelenmiştir. Bir başka ısıl işlem süreci olan alan altında ısıl işlem gören malzemelerin özelliklerini incelenebilir. Ayrıca uygulanan dış parametrelerle (alan ve stres gibi) empedans değişimi gösteren başka numuneler için benzer çalışmalar yapılip yeni sensör tasarımları geliştirmek amaçlanmaktadır. Empedans ölçümleri 10 MHz sürücü akım frekans değerine kadar yapılmıştır. Oldukça yüksek frekans değerlerinde (GHz) empedans değişimi incelenerek bu numunelerin anten (örneğin cep telefonlarında) veya kablosuz iletişim sensörü olarak geliştirilebilir.

9. KAYNAKLAR

- [1]- A. Brenner and G. Riddell, "Nickel plating on steel by chemical reduction", J. Res. Natl. Bur. Stand. 37 (1946) 31-...
- [2]- W. Klement, R.H. Willens and P. Duwez, "Non-crystalline Structure in solidified gold-silicon Alloys", Nature 187 (1960) 869-...
- [3]- C.C. Tsuei and P. Duwez, "Metastable amorphous ferromagnetic phases in palladium-base alloys", J. Appl. Phys. 37 (1966) 435.
- [4]- F.E. Luborsky, "Amorphous Metallic Alloys", Butterworths, London 1983.
- [5]- T. Maumoto, I. Ohnaka and M. Hagiwara, "Production of Pd-Cu-Si amorphous wires by melt spinning method using rotating water", Scripta Metall., 15 (1981) 293.
- [6]- S. Atalay, "Magnetoelastic properties of Iron-based amorphous wires", PhD Thesis, University of Bath (1992).
- [7]- T. Egami, "Low-Field Magnetic Properties of Amorphous Alloys", Journal of the American Ceramic Society 60 (1977) 128-133.
- [8]- A. Makino, A. Inoue, T. Masumoto, Materials Transactions, 12 (1999) 825.
- [9]- G. Herzer, "Amorphous and nanocrystalline soft magnets", Kluwer Academic Publishers (Dordrecht/Boston/London) (1997) 711.
- [10]- K. Mohri, F.B. Humphrey, K. Kawashima, K. Kimura, M. Mizutani, "Large Barkhausen and matteucci effect in FeCoSiB, FeCrSiB and FeNiSiB amorphous wires", IEEE Trans. Magn. 26(5) 1990 1789-1791.
- [11]- V. Madurga and A. Hernando, "Radial stress distribution generated during rapid solidification of amorphous wires" J. Phys. Condensed Matter 2 (1990a) 2127.
- [12]- L. V. Panina and K. Mohri, "Magneto-impedance effect in amorphous wires" Appl. Phys. Lett., 65 (1994) 1189-1191.
- [13]- R. S. Beach and A. E. Berkowitz, "Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire", Appl. Phys. Lett., 64 (1994) 3652-3654.
- [14]- F. L. Machado, B. L. da Silva, S. M. Rezende and C. S. Martins, "Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet $\text{Co}_{70.4}\text{Fe}_{4.6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ ", J. Appl. Phys., 75 (1994) 6563-6565.
- [15]- R. S. Beach and A. E. Berkowitz, "Sensitive field- and frequency-dependent impedance spectra of amorphous FeCoSiB wire and ribbon" J. Appl. Phys., 76 (1994) 6209-6213.

- [16]- M. Knobel, M. Vazquez, L. Kraus, "Handbook of Magnetic Materials", Elsevier Science B.V. (2003) 497-563.
- [17]- Manan A. "Growth and Study of Magnetostrictive FeSiBC Thin Films for Device Applications", PhD Thesis, The University of Sheffield (1999).
- [18]- D. Atkinson, P.T. Squire, "Phenomenological model for magnetoimpedance in soft ferromagnets" J. Appl. Phys. 83 (1998) 6569-6571.
- [19]- Valenzuela R., Betancourt I., "Giant Magnetoimpedance, Skin Depth and Domain Duvar Dynamics", . IEEE, Trans. Mag. 38 (2002) 3081-3083.
- [20]- M. L. Sartorelli, M. Knobel, J. Schoemaker, "Giant magneto-impedance and its relaxation in Co-Fe-Si-B amorphous ribbons", Appl. Phys. Lett., 71 (1997) 2208-2210.
- [21]- H. Chiriac and T.A. Ovari, "Giant Magnetoimpedance Effect in Soft Magnetic Wire Families", IEEE Trans. on Magn., 38 (2002) 3057-3062.
- [22]- H. Chiriac, C.S. Marinescu, T.-A. Ovari, "Temperature dependence of the magneto-impedance effect" J. Magn. Magn. Mater., 196-197 (1999) 162-163.
- [23]- R. Varga, P. Vojtanik, H.A. Davies, "Low-field magnetoimpedance of amorphous CoFeSiB alloy wire", J. of Magn. Magn. Mater. 261 (2003) 360-368.
- [24]- L.V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, M. Noda, "Giant Magneto-Impedance in Co-Rich Amorphous Wires and Films", IEEE Trans. Magn. 31 (1995) 1249-1260.
- [25]- M. Knobel, M. Vazquez, M.L. Sanchez, A. Hernando, "Effect of tensile stress on the field response of impedance in low magnetostriction amorphous wires", J. Magn. Magn. Mater. 169 (1997) 89-97.
- [26]- S.K. Pal, A.K. Panda, M. Vazquez, A. Mitra, "The effect of magnetoelastic interaction on the GMI behaviour of Fe-, Co- and Co-Fe-based amorphous wires", J. Mater. Process. Techn. , 172 (2006) 182-187.
- [27]- M.L. Sartorelli, M. Knobel, J. Schoemaker, et al., "Giant magnetoimpedance and its relaxation in Co-Fe-Si-B amorphous ribbons", Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 2208-2210.
- [28]- S.X. Zhou, Jifan Hu, B.Y. Quan, "Giant magneto-impedance effect in Fe_{4.5}Co_{67.5}Mn_{0.5}Si₁₂B₁₅ amorphous wires", Mater. Sci. Eng. A 304-306 (2001)954-956.
- [29]- H. Lee, Y.K. Kim and S.C. You, "Anisotropi in Nanocrystalline Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉ Wire", Phys. Stat. Sol. (a) 189 No:3 (2002) 649-651.

- [30]- M. Tejedor, B. Hernando, M.L. Sanchez, M. Vazquez, M. Knobel,” Field and frequency dependence of the magneto-impedance in Co-rich amorphous ribbon ”, *J. Magn. Magn. Mater.* 152 (1996) 191-195.
- [31]- M. Vazquez, “Giant magneto-impedance in soft magnetic Wires”, *J. Magn. Magn. Mater.* 226-230 (2001) 693-699.
- [32]- S.N. Kane, M. Vazquez, S. Puerta, A. Hernando, “Influence of thermal annealing on in magnetoimpedance glass-covered Co–B–Si–Mn microwires”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 249 (2002) 333-336.
- [33]- D. Garcia, V. Raposo, J. I. Iniguez, O. Montero. M. Zazo, “Diameter influence on magnetoimpedance of Co-based glass-covered amorphous wires”, *J. Magn. Magn. Mater.* 290-291 (2005) 1078-1080.
- [34]- J.M. Blanco, A. Zhukov and J. Gonzalez, “Asymmetric torsion stress giant magnetoimpedance in nearly zero magnetostrictive amorphous wires”, *J. Appl. Phys.*, 87 (2000) 4813-4815.
- [35]- K.S. Byon, S.C. Yu, C.G. Kim, M. Vazquez,” Bias-current effect on giant magnetoimpedance in Co-based amorphous wires” *J. Non-Cryst. Sol.*, 287 (2001) 339-343.
- [36]- P. Gorria, V.M. Prida, M. Tejedor, B. Hernando, M.L. Sanchez,” Correlation between structure, magnetic properties and MI effect during the nanocrystallisation process of FINEMET type alloys”, *Physica B* 299 (2001) 215-224.
- [37]- J. Hu, H. Qin, F. Zhang, R.K. Zheng, “Diameter dependence of the giant magnetoimpedance in hard-drawn CoFeSiB amorphous wires” *J. Appl. Phys.*, 91 No:10 (2002) 7418-7420.
- [38]- J. Gonzalez, A. P. Chen , J. M. Blanco , and A. Zhukov, “Effect of Applied Mechanical Stresses on the Impedance Response in Amorphous Microwires with Vanishing Magnetostriction”, *Phys. Stat. Sol. (a)* 189 No:2 (2002) 599-608.
- [39]- K.C. Mendes, F.L.A. Machado, “Enhanced GMI in ribbons $\text{Co}_{70.4}\text{Fe}_{4.6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ alloy”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 177-181 (1998) 111-112
- [40]- X. P. Li, . Z.J. Zhao, C. Chua, H. L. Seet, and L. Lu,” Enhancement of giant magnetoimpedance effect of electroplated NiFe/Cu composite wires by dc Joule annealing”, *J. Appl. Phys.*,94 (2003) 7626-7630.
- [41]- Jifan Hu, Hongwei Qin, Ling Zhang, Juan Chen, “Giant magnetoimpedance effect in Ag/NiFe plated wire”, *Mater. Sci. Eng. B* 106 (2004) 202-206.

- [42]- K. Mandal, S. Pan Mandal, S. Puerta, M. Vazquez, A. Hernando, “Giant magnetoimpedance effect in amorphous Co–Mn–Si–B microwire”, *J. Alloys Comp.* 326 (2001) 201-204.
- [43]- H. Chiriac, T.-A. Ovari, and C.S. Marinescu, “Giant magneto-impedance effect in nanocrystalline ribbons”, *Nanostruc. Mater.* 12 (1999) 775-778.
- [44]- S. Sinha, K. Mandal, M. Vazquez, “Giant magnetoimpedance in amorphous $(\text{Co}_{0.93}\text{Fe}_{0.7})_{63}\text{Ni}_{10}\text{Si}_{11}\text{B}_{16}$ glass-coated microwire”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 302 (2006) 223-227.
- [45]- H.B. Nie, A.B. Pakhomova, X. Yan, X.X. Zhang, M. Knobel, “Giant magnetoimpedance in crystalline Mumetal”, *Solid State Comm.* 112 (1999) 285-289.
- [46]- L. Kraus, Z. Frait, K.R. Pirota, H. Chiriac, “Giant magnetoimpedance in glass-covered amorphous microwires”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 254-255 (2003) 399-403.
- [47]- J.A. Moya, B. Arcondo, H. Sirkin, M.L. Sartorelli,, M. Knobel, M. Vazquez, “GMI of Al-substituted Fe-Si-BCu-Nb nanocrystalline ribbons”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 23 (1999) 117-119.
- [48]- K.R. Pirota, L. Kraus, H. Chiriac, M. Knobel, “Magnetic properties and giant magnetoimpedance in a CoFeSiB glass-covered microwire”, *J. Magn. Magn. Mater.* 221(2000) L243-L247.
- [49]- B. Hernando, P. Alvarez, J.D. Santos, P. Gorria, M.L. Sanchez, J. Olivera, M.J. Perez, V.M. Prida, “Magnetoimpedance effect in Nanoperm alloys”, *J. Magn. Magn. Mater.* 300 (2006) e59-e62.
- [50]- Heebok Lee, Kyeong-Jae Lee, Yong-Kook Kim, Taik-Kee Kim, Chong-Oh Kim, Seong-Cho Yu, “Magnetoimpedance effect in the nanocrystalline Fe–Zr–Cu–B–Al alloy system”, *J. Appl. Phys.* 87 (2000) 5269-5271.
- [51]- J He, H Q Guo, B G Shen, K Y He and J F Hu, “Soft magnetic properties and giant magneto-impedance effect of Fe–Zr–Nb–B–Cu ribbons”, *J. Phys.: Condens. Matter* 11 (1999) 4251-4259.
- [52]- V. Raposo, M. Vazquez, A. Mitra, “Torsion dependence of giant magnetoimpedance in amorphous wires”, *J. Magn. Magn. Mater.* 254-255 (2003) 179-181.

- [53]- P. Jantaratana and C. Sirisathitkul, “Effects of Thickness and Heat Treatments on Giant Magnetoimpedance of Electrodeposited Cobalt on Silver Wires”, IEEE Transc. Magn. 42 (2006) 358-362.
- [54]- T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonumara, M. Takeuchi, J. Sakata, Y. Taga, “Enhancement of Giant Magneto-impedance in Layered Film by Insulator Separation”, IEEE Transc. Magn. 32 (1996) 4965-4967.
- [55]- N.D. Tho, N. Chau, S.C. Yu, H.B. Lee, N.D. The, N.Q. Hoa,” A systematic study of giant magnetoimpedance of Cr-substituted $Fe_{73.5-x}Cr_xSi_{13.5}B_9Nb_3Au_1$ ($x = 1, 2, 3, 4, 5$) alloys”, J. Magn. Magn. Mater. 304 (2006) e871–e873
- [56]- F.E. Atalay, S. Atalay, “Giant magnetoimpedance effect in NiFe/Cu plated wire with various plating thicknesses”, J. Alloys and Comp. 392 (2005) 322-328.
- [57]- F. E. Atalay, H. Kaya , S. Atalay, “Giant magnetoimpedance effect in electroplated CoNiFe/Cu wires with varying Ni, Fe and Co content”, J. Alloys and Comp. 420 (2006) 9-14.
- [58]- K. Mandal, S. Sinha, P.A. Kumar,”Contributions to giant magnetoimpedance from different domain regions of $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ amorphous wire”, J. Appl. Phys. 99 033901 (2006) 03390 1-4.
- [59]- M. Knobel, M. L. Sanchez, J. Velazquez and M. Vazquez, “ Stress dependence of the giant magneto-impedance effect in amorphous wires”, J. Phys.: Condens. Matter 7 (1995) L115-L120.
- [60]- K. Mandal, S. Puerta, M. Vazquez and A. Hernando,”The Frequency and Stress Dependence of Giant Magnetoimpedance in Amorphous Microwires” IEEE Trans. on Magn., 36 (5), (2000) 3257-3259.
- [61]- M.L. Sanchez, V.M. Prida, B. Hernado, M. Tejedor, M. Vazquez, “Torsion impedance of CoFeSiB amorphous wires” J. Magn. Magn. Mater., 249 (2002) 269-273.
- [62]- V. Raposo, M. Vazquez, A. Mitra, “Torsion dependence of giant magnetoimpedance in amorphous wires”, J. Magn. Magn. Mater. 254-255 (2003) 179-181.
- [63]- J.M. Blanco, A. Zhukov, J. Gonzalez, “Effect of tensile and torsion on GMI in amorphous wires”, J. Magn. Magn. Mater. 196-197 (1999) 377-379.
- [64]- Deren Li, Zhichao Lu, Shaoxiong Zhou,” Giant stress-impedance effect in amorphous and thermally annealed $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ ribbon” Sensors and Act. A 109 (2003) 68-71.

- [65]- P. Aragonese, D. Holzer, H. Sassik, A. Zhukov, R. GroK ssinger, J. Gonzalez, “Frequency dependence of GMI effect in nanocrystalline $\text{Fe}_{86}\text{Zr}_7\text{B}_6\text{Cu}_1$ ribbons”, *J. Magn. Magn. Mater.* 203 (1999) 292-294.
- [66]- A. Radkovskaya, A.A. Rakhmanov, N. Perov, P. Sheverdyeva, A.S. Antonov, “The thermal and stress effect on GMI in amorphous wires”, *J. Magn. Magn. Mater.* 249 (2002) 113-116.
- [67]- J M Blanco, A P Zhukov and J Gonzalez, “Torsional stress impedance and magneto-impedance in $(\text{Co}_{0.95}\text{Fe}_{0.05})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorphous wire with helical induced anisotropi”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32 (1999) 3140-3145.
- [68]- Y. F. Li, M. Vazquez, D. X. Chen, “Torsion-dependent magnetoimpedance in FeCuNbSiB nanocrystalline wires with vanishing or transverse anisotropi”, *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 9839-9844.
- [69]- Wei Han, Deren Li, Zhichao Lu, Shaoxiong Zhou, Honghao Zhang, “Giant stress-impedance effect in amorphous and current annealed $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ wires”, *J. Magn. Magn. Mater.* 239 (2002) 567-569.
- [70]- Jifan Hua, Hongwei Qin, Juan Chen, Yanzhong Zhang, “Giant stress-impedance effect in $\text{Fe}_{73.5}\text{CuNb}_{3-x}\text{V}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ amorphous ribbons”, *J. Magn. Magn. Mater.* 266 (2003) 290-295.
- [71]- D. R. Li, Z. C. Lu, and S. X. Zhou, “Magnetic anisotropi and stress-impedance effect in Joule heated $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ribbons”, *J. Appl. Phys.* 95 (2004) 204-207.
- [72]- Y.W. Rheem, C.G. Kim, C.O. Kim, S.S. Yoon, “Current sensor application of asymmetric giant magnetoimpedance in amorphous materials” *Sensors and Act. A* 106 (2003) 19-21.
- [73]- R.Valenzuela, J.J. Freijo, A. Salcedo, M. Vazquez, and A. Hernando, “ A miniature dc current sensor based on magnetoimpedance” *J .Appl. Phys.* 81 (8) (1997) 4301-4303.
- [74]- M. Vazquez, “Soft magnetic wires” *Physica B* 299 (2001) 302-313.
- [75]- P. Ripka, A. Platil , P. Kaspar, A. Tipek, M. Malatek, L. Kraus,” Permalloy GMI sensor” *J. Magn. Mangn. Mater.* 254-255 (2003) 633-635.
- [76]- C. Chirac, H. Chirac, “Magnetic field and displacement sensor based on linear transformer with amorphous wire core”, *Sensors and Actuators A* 106 (2003) 172-173.

- [77]- K. Mohri, Senior member, L. V. Panina, T. Uchiyama, K. Bushida, M. Noda, “Sensitive and Quick Response Micro Magnetic Sensor Utilizing Magneto-Impedance in Co-rich Amorphous Wires”, IEEE Trans. Magn., 31 (1995) 1266-1275.
- [78]- T. Uchiyama, K. Mohri, L.V. Panina, K. Furuno, “Magneto-impedance in sputtered amorphous films for micro magnetic sensor”, IEEE Trans. Magn., 31 (6) (1995) 3182-3184.
- [79]- A. Zhukov, “Glass-coated magnetic microwires for technical applications”, J. Magn.Magn. Mater. 242-245 (2002) 216-223.
- [80]- A.E. Mahdi, L. Panina, D. Mapps, “Some new horizons in magnetic sensing: high- T_c SQUIDs, GMR and GMI materials”, Sensors and Act. A 105 (2003) 271-285.
- [81]- T. Uchiyama, K. Mohri, H. Itho, K. Nakashima, J. Ohuchi and Y. Sudo, “Car Traffic Monitoring System Using MI Sensor Built-In Disk Set on the Road”, IEEE Trans. Magn. 36 (5) (2000) 3670-3672.
- [82]- M. Han, D.F. Liang, L.J. Deng, “Sensors development using its unusual properties of Fe/Co-based amorphous soft magnetic wire”, J. Mater. Sci. 40 (2005) 5573–5580.
- [83]- K. Mohri, T. Uchiyama, L.P. Shen, C.M. Cai, L.V. Panina, “Sensitive micro magnetic sensor family utilizing magneto-impedance (MI) and stress-impedance (SI) effects for intelligent measurements and controls” Sensors and Act. A 91 (2001) 85-90.
- [84]- B.S. Berry and W.C. Pritchett. IBM J. Res. Devel. 19 (1975) 334.
- [85]- B.S. Berry and W.C. Pritchett, J. Appl. Phys. 47 (1976) 3295.
- [86]- A. Mitra, A. Hernando, G. Rivero and M. Vazquez, “Susceptibility and Coercivity of amorphous wires” J. Magn. Magn. Mater. 83 (1990) 228.
- [87]- J. Yamasaki, Y. Ohkubo and F.B. Humphrey, “Magnetostriction measurement of amorphous wires by means of small-angle magnetisation rotation” J. App. Phys., 67 (9) (1990) 5472-5474.
- [88]- K. Mohri, F.B. Humphrey, J. Yamasaki and F. Kinoshita, “Large barkhausen effect in amorphous magnetostrictive wires for pulse generator elements”, IEEE Trans. Mag. MAG-21 (5) (1985) 2017-2019.
- [89]- P.T. Squire, D. Atkinson, MRJ Gibbs and S. Atalay, “Amorphous wires and their applications”, J. Magn. Magn Mater. 132 (1994) 10-21.

- [90]- J.D. Livingston, Phys. Stat. Sol. A, 70 (1982) 591.
- [91]- P.T. Squire, “Phenomenological model for magnetization, magnetostriction and ΔE effect in field-annealed amorphous ribbons”, J. Magn. Magn. Mater., 87 (1990) 299-310.
- [92]- S. Atalay, P.T. Squire, “Magnetoelastic Properties of Cold-Drawn FeSiB Amorphous wires”, IEEE Trans. Mag. 28 (1992) 3144-3146.
- [93]- D. X. Chen, L. Pascual, A. Hernando, “Comment on “Analysis of asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon”, Applied Physics Letters, 77 (2000) 1727-1729.
- [94]- G. H. Ryu, S. C. Yu, C. G. Kim, S. S. Yoon, “Evaluation of anisotropy field in amorphous $Fe_{71+x}Nb_7B_{22-x}$ alloys by GMI measurement”, J. Magn. Magn. Mater., 215-216 (2000) 359-361..
- [95]- C. G. Kim, K. J. Jang, D. Y. Kim, S. S. Yoon, “Analysis of asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed Co-based amorphous ribbon’ Applied Physics Letters, 77 (2000) 1730-1731.
- [96]- http://dattaraj_rao.tripod.com/FEM3D/
- [97]- A. Logg, “Automating the finite element method”, Lecture notes for the Sixth Winter School in Computational Mathematics, Toyota Technological Institute at Chicago, March 5-10 2006.
- [98]- J.P. Sinnecker, K.R. Pirota, M. Knobel, L. Kraus, “AC magnetic transport on heterogeneous ferromagnetic wires and tubes”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 249 (2002) 16–21.
- [99]- C.G. Kim, J.B. Kim, S.S. Yoon, K.J. Jang, C.O. Kim, “Temperature dependence of asymmetric GMI Profile”, J. Magn. Magn Mater. 226-230 (2001) 700-703.
- [100]- M. Knobel, M.L. Sanchez, C. Gomez-Polo, P. Marin, M. Vazquez, A. Hernando,” Giant magneto-impedance effect in nanostructured magnetic wires” J. Appl. Phys. 79 (1996) 1646-1654.
- [101]- C.G. Kim, C.O. Kim, S.S. Yoon, T. Stobiecki, W. Powroznik, “Role of surface crystalline phases in magnetoimpedance in Co-based amorphous ribbons” J. Magn. Magn Mater. 242-245 (2002) 467-469.
- [102]- J.G.S. Duque, C. Gomez-Polo, A. Yelonc, P. Ciureanuc, A.E.P. de Araujo, M. Knobel, “The effect of helical magnetoelastic anisotropy on magnetoimpedance and its second harmonic component in amorphous wires”, J. Magn. Magn Mater. 271 (2004) 390-395.

- [103]- D. Atkinson, P.T. Squire, S. Atalay, "The effect of annealing and crystallization on the magnetoelastic properties of Co-Si-B amorphous wires", J. Appl. Phys. 79 (1996) 1664-1669.
- [104]- G. H. Ryu, S. C. Yu, C. G. Kim, H.K. Lachowicz, "Change of Permeability and GMI in Amorphous $\text{Co}_{71}\text{Fe}_1\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ Alloy Before and after Treatment", IEEE Trans. Mag. 35 (1999) 3391- 3393.
- [105]- M. Oka, M. Enokizono, "Evaluation of a reverse-side defect on stainless steel plates by the residual magnetic field method" IEEE Trans. Mag. 37 (2001) 3073-3076.
- [106]- M. Oka, M. Enokizono, "A detection of backside crack using rotational magnetic flux sensor with search coils", IEEE Trans. Mag. 32 (1996) 4968-4970.
- [107]- D.J. Kim, D.A. Park, J.H. Hong, J. Appl. Phys. 91 (2002) 7421.
- [108]- M. Göktepe, "Non-destructive crack detection by capturing local flux leakage field" Sensors and Act. A 91 (2001) 70-72.
- [109]- D. Atkinson, P.T. Squire, M.R.J. Gibbs, S. Atalay, "The effect of annealing and crystallization on the magnetoelastic properties of Fe-Si-B amorphous wire", J. Appl. Phys. 73 (1993) 3411-3417.

10. ÖZGEÇMİŞ

Nevzat Bayri,

1974 yılında Malatya’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya’da tamamladı. 1994 yılında İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde lisans eğitimine başlayarak, 1998 yılında mezun oldu. 1998 yılında İnönü Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Öğretmenliği Programında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1999 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2002 yılında mezun oldu. 2002 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı.

Tez Kapsamında SCI indeksine giren dergilerde yayınlanmış makaleleri:

- 1- N Bayri, V S Kolat, F E Atalay and S Atalay, The effect of furnace annealing and surface crystallization on the anizotropi, ΔE and magnetoimpedance effects in $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ amorphous wires, J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004) 3067–3072.
- 2- S. Atalay, N. Bayri, Low field magnetoimpedance in FeSiB and CoSiB amorphous wires, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 272–276 (2004) 1365–1367.
- 3- N. Bayri, S. Atalay, Giant stress-impedance effect in $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ amorphous wires, Journal of Alloys and Compounds 381 (2004) 245–249.

Tez Kapsamında Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleleri:

- 1- F. E. Atalay, N. Bayri, A. R. Bahadir, and S. Atalay, Torsional stress impedance effect in $Fe_{71}Cr_7Si_9B_{13}$ amorphous wire, phys. stat. sol. (c) 1, No. 12, 3328–3331 (2004).
- 2- M. Goktepe, Y. Ege, N. Bayri, and S. Atalay, Non-destructive Crack detection using GMI sensor, phys. stat. sol. (c) 1, No. 12, 3436–3439 (2004).