

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AMORF ŞERİTLERDE MANYETOEMPEDANS ETKİ

NAİM GÜZELBAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

OCAK 2014

Tezin Başlığı: Amorf Şeritlerde Manyetoempedans Etki

Tezi Hazırlayan: Naim GÜZELBAĞ

Sınav Tarihi: 02.01.2014

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Fizik Ana Bilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selçuk ATALAY
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Nevzat BAYRİ
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Tekin İZGİ
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet ALPASLAN
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Amorf Şeritlerde Manyetoempedans Etki” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Naim GÜZELBAĞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AMORF ŞERİTLERDE MANYETOEMPEDANS ETKİ

Naim GÜZELBAĞ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

60 + x sayfa

2014

Danışman: Prof. Dr. Selçuk ATALAY

Farklı üretim teknikleri ile üretilen amorf ferromanyetik şeritler, teknolojinin birçok alanında kullanılmaktadır. Uygun ısıt işlemlerle bu malzemelerin manyetik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Bu çalışmada, amorf ve farklı sıcaklıklarda bir saat ısıt işlem görmüş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (FINEMET) şeritler kullanılmıştır. Malzemelerin kristalleşme sürecini belirlemek için X-ışınları ölçümleri alınmıştır ve bu verilerden sıcaklığa bağlı olarak tanecik büyüklüğü hesaplanmıştır. Manyetik özellikleri belirlemek için manyetizasyon eğrileri ölçülmüştür. Soft özelliklerin belirlenmesinde önemli bir parametre olan coercivity değerleri bu eğrilerden hesaplanmıştır. Manyetoempedans eğrileri 0.1-50 MHz frekans aralığında elde edilmiştir. Amorf numunelerde düşük manyetoempedans etki gözlenmiştir. Isıt işlem gören numunelerde ise manyetoempedans etkideki artış nanokristalleşme ile soft özelliklerin ortaya çıktığını işaret etmektedir.

ANAHTAR KELİMELE: Amorf ferromanyetik malzemeler, Manyetoempedans, Manyetik özellikler

ABSTRACT

Master's Thesis

MAGNETOIMPEDANCE EFFECT IN AMORPHOUS RIBBONS

Naim GÜZELBAĞ

Inonu University

Institute Science Department of Physics

60+x pages

2014

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk ATALAY

Ferromagnetic amorphous ribbons produced by different production techniques have been used in many areas of technology. The magnetic properties of these materials can be improved by appropriate heat treatments. In this study, amorphous and nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (FINEMET) ribbons were investigated. X-rays were measured to determine the crystallization process of materials and the particle size was calculated based on this data depending on the temperature. Magnetization curves were measured to determine the magnetic properties. Coercivity values which are important parameters in determining the soft features were calculated from the magnetisation curves. Magnetoimpedance curves were obtained in the frequency range of 0.1-50 MHz. A small magnetoimpedance effect was observed in the as-received samples. The magnitude of the magnetoimpedance effect increases with annealing, indicating that they are magnetically softened by nanocrystallization.

KEYWORDS: Amorphous ferromagnetic materials, Magnetoimpedance, Magnetic properties

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımın her aşamasında yardım ve desteklerini esirgemeyen tez yöneticisi hocam Sayın Prof. Dr. Selçuk ATALAY'a;

Ayrıca her fırsatta yardım ve desteklerinden dolayı Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Öğretmenliği Bölümü Öğretim Üyelerinden Doç. Dr. Nevzat BAYRI'ya , Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden Doç. Dr. Tekin İZGİ'ye, Doç. Dr. V. Serkan KOLAT'a, Fizik Bölümü Teknisyeni Kadir TOY'a;

Hayatımın her döneminde olduğu gibi tez çalışmam boyunca benden desteklerini esirgemeyen, eşim Gülperi'ye, oğlum Ali Nazım'a ve Berivan'a

sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Tezin Ana Hatları	1
1.3. Temel Manyetik Parametreler	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Giriş	4
2.2. Amorf Ferromanyetik Alaşımlar	4
2.2.1. Amorf Alaşımların Üretimi	5
2.3. Amorf Malzemelerin Kristalleşme Kinetiği.....	6
2.4. Amorf Ve Isıl İşlem Görmüş Malzemelerde Manyetoempedans Etki.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM	26
3.1. Giriş.....	26
3.2. Örneklerin Hazırlanışı Ve Isıl İşlemler.....	26
3.3. X-Işınları Kırınım Ölçümleri.....	28
3.4. Manyetik Ölçümler.....	29
3.4.1. M-H Ölçüm Sistemi.....	29
3.4.2. Manyetoempedans Ölçüm Sistemi.....	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	34
4.1. Giriş	34
4.2. $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ Alaşımların Termal Özellikleri.....	34
4.2.1. $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ X-ray Analizi.....	34
4.3. Amorf $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ Şeritlerin Manyetik Özellikleri.....	36
4.4. Isıl İşlem Görmemiş $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ Şeritlerde Manyetoempedans	

Etki.....	37
4.5. Isıl İşlem Görmüş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ Şeritlerde Manyetoempedans	
Etki.....	40
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	54
5.1. Giriş.....	54
5.2. Deneysel Sonuçlar Ve Tartışma.....	54
5.3. Gelecek Çalışmalar.....	55
6. KAYNAKLAR	57
7. ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

μ	Manyetik geçirgenlik
θ	Bragg açısı
λ	Magnetostriction
χ	Manyetik alınganlık
β	Radyan olarak yarı yükseklikteki pik genişliği
δ	Yüzey derinliği
μ_{φ}	Dairesel geçirgenlik
μ_0	Boş uzayın geçirgenliği
λ_s	Doyum magnetostriction
χ_t	Enine alınganlık
ΔZ	Yüzde manyetoempedans
f	Sürücü akım frekansı
$f(H)$	Rezonans frekans
f_s	Doyum frekansı
H	Dış manyetik alan
H_c	Coercivity
H_{dc}	Dış manyetik alan
K	Anizotropi enerjisi
K_D	Şekil anizotropi enerjisi
K_k	Kristal anizotropi enerjisi
L	İndüktans
M	Manyetizasyon
M_r	Remenant manyetizasyon
M_s	Doyum manyetizasyon
Z	Empedans

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	M-H eğrisi.....	2
Şekil 1.2.	B-H eğrisi.....	3
Şekil 2.1.	Melt-spining metodu	5
Şekil 2.2.	$\text{Fe}_{73.5}\text{Ge}_{15.5}\text{Nb}_3\text{B}_7\text{Cu}_1$ alaşımının farklı sıcaklıklardaki XRD eğrileri...	7
Şekil 2.3	$\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3-x}\text{V}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x=1.5, 3$) şeritlerin DTA eğrileri.....	8
Şekil 2.4.	Şematik olarak empedans tanımı.....	9
Şekil 2.5.	(a) Uygulanan dc manyetik alana bağlı olarak yüzey derinliği ve geçirgenlik değişimi, (b) şerit numune için dc manyetik alanla yüzey derinliği değişimi.....	14
Şekil 2.6.	Farklı frekanslarda $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağlılığı.....	16
Şekil 2.7.	Farklı frekanslarda $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağlılığı.....	17
Şekil 2.8.	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.....	18
Şekil 2.9.	2MHz frekansında ısıtıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem görmüş numunelerin uygulanan dış alana göre yüzde manyetoempedans değişimi.....	19
Şekil 2.10.	Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem gören numunelerin frekansa karşı yüzde manyetoempedans değişimi.....	20
Şekil 2.11.	Enine manyetizasyon esnasında domain yapının şematik gösterimi.	21
Şekil 2.12.	540 °C de ısıtıl işlem görmüş şerit numunenin farklı frekans değerleri için uygulanan alana bağlı olarak yüzde manyeto empedans değişimi.....	22
Şekil 2.13.	Uygulanan farklı dc manyetik alan değerleri için frekansın empedansa bağlılığı.....	23
Şekil 2.14.	$\text{Co}_{71}\text{Fe}_1\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şerit için farklı frekanslarda dc manyetik alan karşı yüze manyetoempedans değişimi	23
Şekil 2.15.	$\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Mn}_4\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ amorf şeritlerde uygulanan dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değerleri.....	24
Şekil 2.16.	$\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Mn}_4\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ amorf şeritlerde farklı frekans değerleri için manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimi.....	24

Şekil 2.17.	$\text{Co}_{71}\text{Fe}_2\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şeritlerde uygulanan dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değerleri.....	25
Şekil 2.18.	$\text{Co}_{71}\text{Fe}_2\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şeritlerde farklı frekans değerleri için manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimi.....	25
Şekil 3.1.	Numune ve numunenin vakumlanarak cam içine yerleştirilmesinin fotoğrafı.....	26
Şekil 3.2.	$\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şeridin perçinlenmesi işlemi.....	27
Şekil 3.3.	$\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şeridin vakumlu camın içine konulması.....	27
Şekil 3.4.	Tüp fırın fotoğrafı.....	28
Şekil 3.5.	M-H ölçüm sistemi	31
Şekil 3.6.	M-H ölçüm sisteminin fotoğrafı	31
Şekil 3.7.	Manyetoempedans ölçüm sistemi	32
Şekil 3.8.	Manyetoempedans ölçüm sisteminin fotoğrafı	33
Sekil 4.1.	Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda bir saat ısıl işlem gören şerit numunelerin X-ışınları analizi.....	34
Şekil 4.2.	Fe-Cu-Nb-Si-B alaşımının nanokristalleşme süreci.....	35
Şekil 4.3.	Numunenin sıcaklık tanecik büyüklüğü.....	36
Şekil 4.4.	$\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit numune için sıcaklığa karşı coercivity değerleri.....	37
Şekil 4.5.	Isıl işlem görmemiş numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri.....	38
Şekil 4.6.	Isıl işlem görmemiş numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri.....	39
Şekil 4.7.	Farklı dc manyetik alan değerlerinde ısıl işlem görmemiş numunenin empedans- frekans değişim grafiği.....	40
Şekil 4.8.	450 °C de bir saat ısıtılan numunenin farklı frekans değerleri için manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri.....	41
Şekil 4.9.	Farklı dc manyetik alan değerlerinde 450 °C de bir saat ısıl işlem gören numunenin empedans-frekans değişimi.....	42
Şekil 4.10.	500 °C de bir saat ısıl işlem gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.....	43
Şekil 4.11.	Farklı dc manyetik alan değerlerinde 500 °C de bir saat ısıl işlem	

	gören numunenin empedans-frekans değişimi.....	44
Şekil 4.12.	550 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.....	45
Şekil 4.13.	Farklı dc manyetik alan değerlerinde 550 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin empedans-frekans değişimi.....	46
Şekil 4.14.	600 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.....	47
Şekil 4.15.	Farklı dc manyetik alan değerlerinde 600 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin empedans-frekans değişimi.....	48
Şekil 4.16.	650 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.....	49
Şekil 4.17.	Farklı dc manyetik alan değerlerinde 650 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin empedans-frekans değişimi.....	50
Şekil 4.18.	Farklı sıcaklık değerleri için $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ şerit numunenin maksimum yüzde manyetoempedans değerinin frekans ile değişimi..	50
Şekil 4.19.	5MHz sürücü akım frekans değerinde ısıtıl işlem sıcaklığına bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimi.....	51
Şekil 4.20.	Isıtıl işlem sıcaklığına bağlı olarak coercivity ve 5MHz sürücü akım frekansında yüzde manyetoempedans değişimi.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Isıl işlem görmemiş amorf tellerin manyetik özellikleri	6
--	---

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Şerit formuna sahip amorf ferromanyetik malzemelerin manyetik ve manyetoelastik özellikleri günümüze kadar kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. Son 30 yıl içinde yeni bir çalışma alanı olan manyetoempedans etki ile ilgili çalışmalar başlamıştır. Manyetoempedans 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 ısıtıl işlem görmüş şeritlerin yapısal, manyetik özellikleri ve manyetoempedans etki çalışılmıştır.

Numunelerin yüksek empedans değişimi gösterebilmesi için düşük coercivty ve yüksek doyum manyetizasyonu gibi bazı soft özelliklere sahip olması gerekir. Numunelerin X-ışınları ölçümleri alınarak tanecik büyüklüğü hesaplanmıştır. Ayrıca amorf ve ısıtıl işlem görmüş numunelerin M-H ve manyetoempedans ölçümleri alınarak manyetik özellikleri belirlenmiştir.

1.2. Tezin Ana Hatları

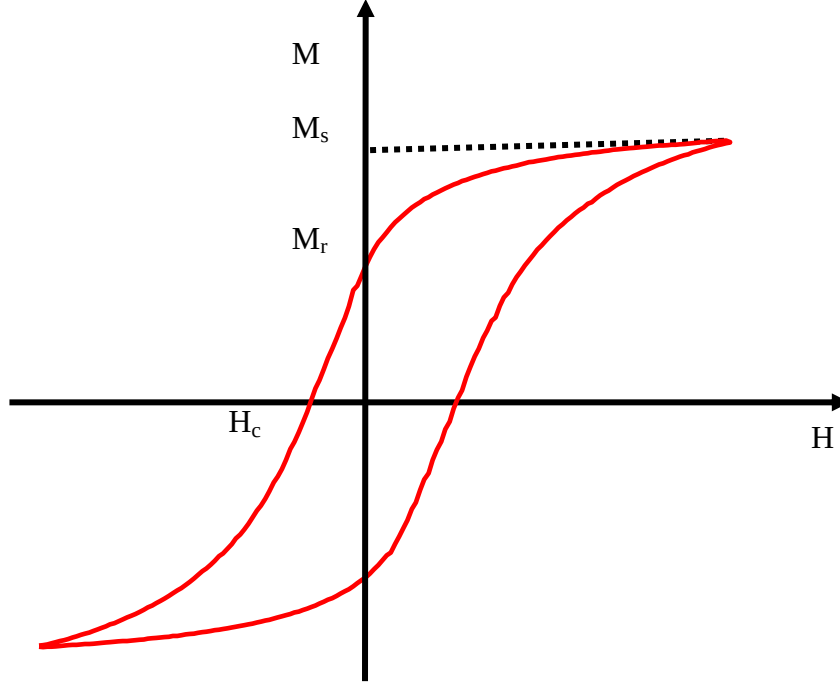
Bu çalışmada ilk olarak amorf alaşımlar, bu alaşımların üretimi, manyetik ve manyetoempedans özellikleri hakkında literatür bilgisi verilmiştir. Üçüncü bölümde, numunelerin hazırlanışı ve deneysel metotlar hakkında bilgi verilerek ölçümlerde kullanılan deneysel sistemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde amorf ve ısıtıl işlem gören $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ şeritlerin termal, manyetizasyon (M-H eğrileri), manyetoempedans deneysel ölçüm verileri verilmiştir. Son olarak beşinci bölümde, elde edilen deneysel verilerin sonuçları literatür ışığında tartışılmıştır.

1.3. Temel Manyetik Parametreler

Bir manyetik malzemenin en önemli özelliği o malzemenin M-H eğrisi diye adlandırılan hysteresis eğrisidir. Hysteresis eğrisi ölçülerek malzemenin bazı manyetik özellikleri belirlenir. Ölçümlerde uygulanan dış alana karşı manyetizasyon

ölçümleri yaparak M-H eğrileri belirlenir. Bu eğrilerden çok yüksek alanlara çıkarak doyum manyetizasyonu (M_s), Remanant manyetizasyon (M_r) ve Coercivity (H_c) gibi parametreler hesaplanabilmektedir. Tipik bir M-H eğrisi Şekil 1.1’ de gösterilmiştir.



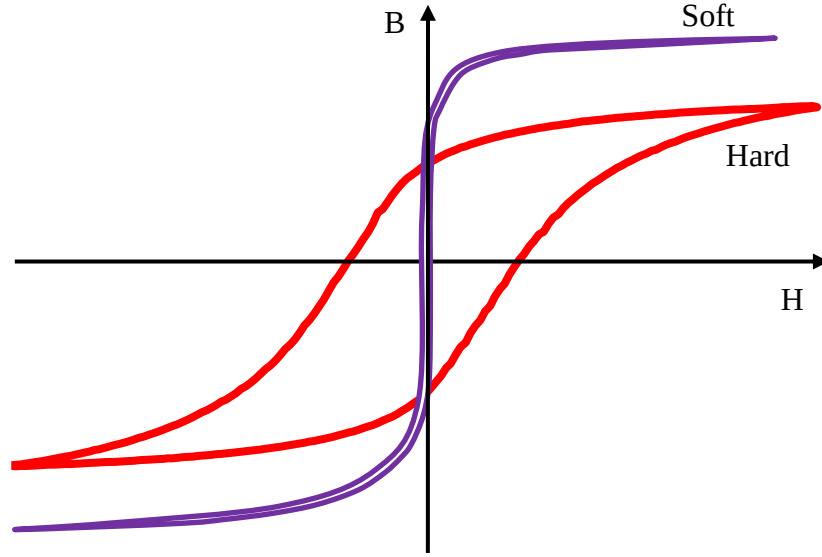
Şekil 1.1. M-H eğrisi.

Doyum manyetizasyonu (M_s): Uygulanan dış alana bağlı olarak manyetik momentler bu alan doğrultusunda yöneldiklerinde ortaya çıkan manyetizasyon değerine doyum manyetizasyonu denir.

Remanant Manyetizasyon (M_r): Manyetik alan şiddeti ters yönde sıfıra düşürüldüğünde ortaya çıkan manyetizasyondur.

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

Elde edilen histerisiz eğrisinin alanı enerji kaybını ifade eder. Alan küçükse yüksek manyetik alınganlık ve düşük coercivity kuvvete sahiptir. Bu tür malzemeler yumuşak (soft) malzeme denir. Alan büyükse düşük manyetik alınganlık ve yüksek coercivity kuvvetine sahiptir. Bu tür malzemeler sert (hard) malzeme denir.



Şekil 1.2. B-H eğrisi.

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'nin 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. KAYNAK ÖZETLERİ

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 ilk olarak amorf alaşımların üretimi; tel ve şerit formuna sahip ferromanyetik malzemelerin manyetik ve manyetoempedans özellikleri verilmiştir.

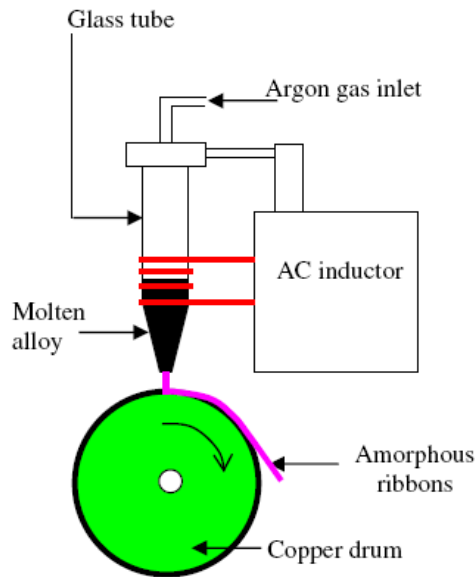
2.2. Amorf Ferromanyetik Alaşımlar

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-metaloid (TM-M) alaşımları, rareearth-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 Alaşımların 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/s 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-spining 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.



Şekil 2.1. Melt-spining metodu [5].

Üretim işlemi sırasında oksitlenmeyi önlemek için ısıtım işlemi 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 üretilebilmektedir.

2.3. Amorf Malzemelerin Kristalleşme Kinetiği

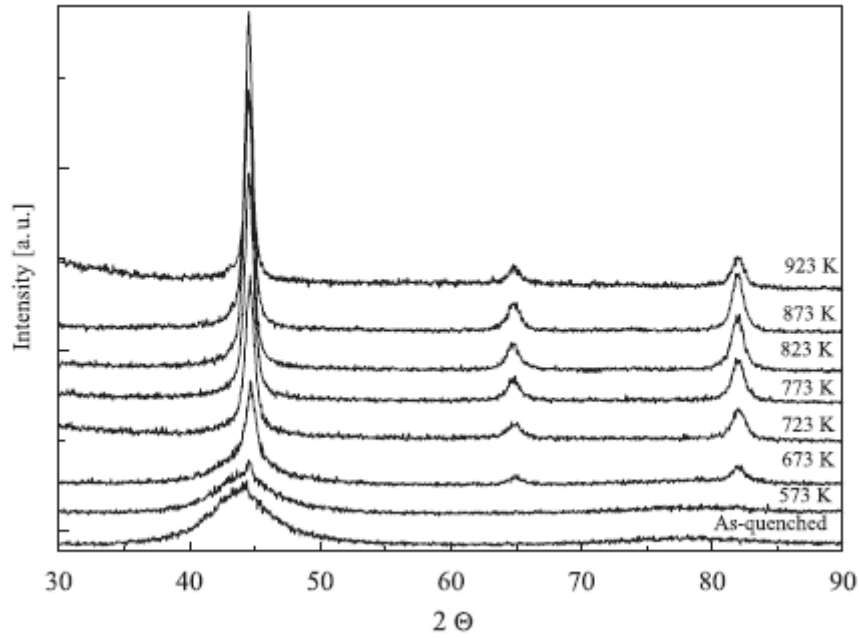
Ticari ismi FINEMET olan Fe-Cu-Nb-Si-B alaşımlar ilk olarak 1988 yılında Fe-Si-B alaşımına düşük miktarlarda Cu ve Nb eklenmesiyle elde edilmiştir [6]. Amorf malzemelerin termodinamik ve kristalleşme sürecinin belirlenmesinde DTA ve X-ışınları kırınımı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Farklı kompozisyona sahip ısıtım işlem görmüş alaşımlarda ortaya çıkan nanokristal fazlar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Nanokristal fazlar, alaşım kompozisyonuna bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Çizelge 2.1. Isıtım işlemiyle ilgili olarak alaşımlarda ortaya çıkan nanokristal fazlar [7].

Alloy name	Typical composition	Nanocrystalline phase	$B_s(T)$	$T_d(^{\circ}\text{C})$
FINEMET	$\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$	$\alpha\text{-FeSi}$, $\text{FeSi}(\text{DO}_3)$	1.0–1.2	< 770
NANOPERM	$\text{Fe}_{88}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}$	$\alpha\text{-Fe}(\text{BCC})$	1.5–1.8	770
HITPERM	$\text{Fe}_{44}\text{Co}_{44}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}$	$\alpha\text{-FeCo}$, (BCC) $\alpha'\text{-FeCo}(\text{B2})$	1.6–2.1	> 965

FINEMET alaşımlarda yüzde konsantrasyon olarak katkılanan elementlerin ortaya çıkardığı özellikler araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. Noh ve arkadaşları, $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3(\text{Si}_x\text{B}_{1-x})_{22.5}$ ($x=0.5-0.8$) alaşımlarda Si yerine B katkılanmasını çalışmıştır [8]. B katkılanmasının, nanokristal alaşımlarda iki farklı ferromanyetik fazın gelişmesine yol açtığı belirlenmiştir. Bu fazlardan birincisi yüksek Curie sıcaklığına sahip $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ ve ikincisinin daha düşük Curie sıcaklığına sahip Borca zengin arayüzlü faz olduğu gözlenmiştir [8]. Daha yüksek oranlarda Bor katkılanmasının $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{22.5-x}\text{B}_x$ ($x=5\leq x\leq 10$) alaşımlarda ilk olarak $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ ve Fe_3Si fazlarının ortaya çıktığı, daha yüksek sıcaklıklarda ise manyetik sertliğe yol açan Fe_2B fazının oluştuğu saptanmıştır [8].

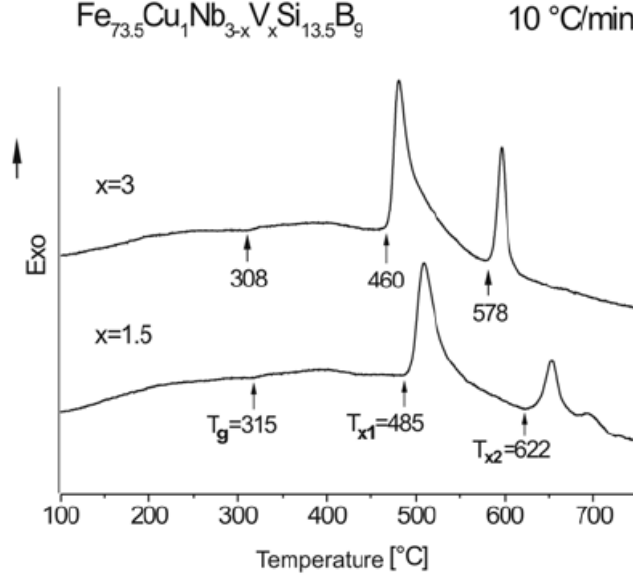
Moya ve arkadaşları $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{22.5-x}\text{B}_x$ ($x=6,8,9,10,12$) alaşımların ısıtılma işlemiyle (T=400-540°C) kristalleşme sürecini incelemişlerdir [9]. Yapısal gelişim X-ışınları kırınım (XRD) yöntemi ile incelenmiştir. Yüksek oranlarda Bor katkılanmasının soft manyetik özellikleri indirgediği belirlenmiştir [9]. FINEMET alaşımlarda Si yerine Ge eklenmesi ($\text{Fe}_{73.5}\text{Ge}_{15.5}\text{Nb}_3\text{B}_7\text{Cu}_1$) ile ortaya çıkan yapısal değişim Muraca ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [10]. Şekil 2.2. farklı ısıtılma sıcaklıklarında ısıtılan numunelerin XRD sonuçlarını göstermektedir. Finemet alaşımlarda ilk olarak gözlenen bcc $\alpha\text{-Fe(Si)}$ fazının Ge katkılanması ile bcc yapının değişmediği ve $\alpha\text{-Fe(Ge)}$ fazının ortaya çıktığı gözlenmiştir. Ayrıca ilk kristalleşme sıcaklığının daha düşük değerde (673 K) ortaya çıktığı belirlenmiştir [10].



Şekil 2.2. $\text{Fe}_{73.5}\text{Ge}_{15.5}\text{Nb}_3\text{B}_7\text{Cu}_1$ alaşımın farklı sıcaklıklardaki XRD eğrileri [10].

FINEMET alaşımlarda Fe yerine farklı elementlerin katkılanması araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Hajko ve arkadaşları Fe yerine Cr katkılanmasının etkisini çalışmışlardır [11]. $(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x=0.85-1$) amorf alaşımlarda ısıtılma işlemi etkisinin sonuçları DTA yöntemi ile incelenmiştir. Cr katkılanmasının ilk kristalleşme sıcaklığını artırdığı belirlenmiştir; ayrıca üçüncü bir faz olarak CrB gözlenmiştir [11]. Bu alaşımlara V katkısı ($\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3-x}\text{V}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x=1.5, 3$)) Kolesar ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [12]. Şerit numunelerin DTA eğrileri alınarak cam geçiş sıcaklıkları (T_g) ve kristalleşme başlangıç sıcaklıkları (T_x)

belirlenmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak ilki α -Fe(Si) fazı ve diğeri bor içeren faz olmak üzere iki ekzotermik pik gözlenmiştir (Şekil 2.3). V katkılanmasının kristalleşme başlangıç sıcaklıklarını düşürdüğü belirlenmiştir [12].

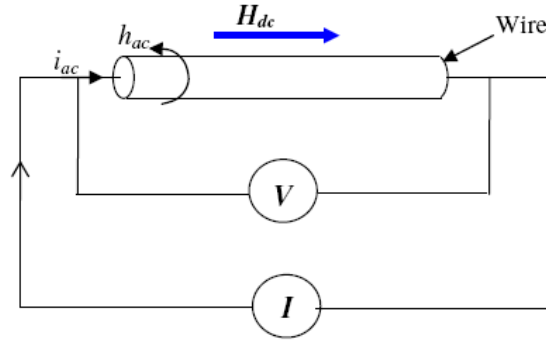


Şekil 2.3. $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{3-x}\text{V}_x\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ($x=1.5, 3$) şeritlerin DTA eğrileri [12].

2.4. Amorf Ve Isıl İşlem Görmüş Malzemelerde Manyetoempedans Etki

Manyetoempedans etki (MI), dış bir dc manyetik alan altında değişken bir akıma maruz kalan ferromanyetik malzemenin kompleks empedansındaki değişim olarak tanımlanır. Bir manyetik iletkenin kompleks empedansı, $Z=R+j\omega L$ (R ve L sırasıyla direnç ve indüktans) V_{ac}/I_{ac} oranı ile verilir. Burada I_{ac} , iletken boyunca geçen $I=I_{ac}e^{-i\omega t}$ sinüzoidal akımın büyüklüğünü ve V_{ac} iletkenin uçları arasında ölçülen voltaj değerini göstermektedir. Şekil 2.4, şematik olarak empedans tanımlanmasını göstermektedir [13]. Bu tanım yalnızca düzgün bir manyetik iletken için geçerlidir. Bununla birlikte lineer bir yaklaşım göz önüne alınarak uzunluğu L ve kesit alanı q olan metalik bir ferromanyetik için empedans aşağıdaki şekilde ifade edilir [13];

$$Z = \frac{V_{ac}}{I_{ac}} = \frac{LE_z(S)}{q\langle J_z \rangle_q} = R_{dc} \frac{J_z(S)}{\langle J_z \rangle_q} \quad (2.1)$$



Şekil 2.4. Şematik olarak empedans tanımı [13].

Burada, E_z ve j_z , sırasıyla elektrik alan ve akım yoğunluğunun boyuna bileşenleri, R_{dc} , dc elektriksel direnç, S , yüzey değeri ve $\langle J_z \rangle_q$, q kesit alanı üzerindeki ortalamayı ifade etmektedir. İletkenin akım yoğunluğu klasik elektrodinamik çerçevesinde indirgenmiş Maxwell eşitlikleri kullanılarak elde edilir. Yüzey etkiyi de göz önüne alarak Maxwell eşitliklerinin çözümünden sonlu düzlemsel bir manyetik numunenin empedansı aşağıdaki eşitlikle verilir [14-16]:

$$Z = R_{dc} \cdot jkacoth(jka) \quad (2.2)$$

Burada a , şeridin kalınlığını, R_{dc} , dc elektriksel direnci ve $k=(1+j)/\delta$ sanal birim j içeren kısmı göstermektedir [14]. δ , manyetik ortamda yüzey derinliğidir ve iletken malzemelerde yüzey derinliği Maxwell denklemleri kullanılarak elde edilmektedir.

$$\nabla \times \vec{H} = J_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \vec{D} = \rho_q \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.8)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.9)$$

(2.4) denkleminin her iki tarafının rotasyonelini alırsak,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{B} \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{H} \quad (2.11)$$

elde edilir. (2.3) denkleminin her iki tarafı $-\mu$ ile çarpılıp yeniden düzenlenirse,

$$-\mu \nabla \times \vec{H} = -\mu (J_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \quad (2.12)$$

$$-\mu \nabla \times \vec{H} = -\mu (\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (2.13)$$

(2.13) denklemin her iki tarafının zamana göre türevi alındığında,

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{H} = -\mu (\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}) \quad (2.14)$$

(2.11) denkleminin sağ tarafı ve (2.14) denkleminin sol tarafı eşittir. Bu nedenle;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu (\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}) \quad (2.15)$$

yazılabilir. (2.15) denkleminde dikkat edersek, denklemin manyetik alandan bağımsız olarak yazılabildiği görülür. Herhangi bir vektör büyüklüğü için aşağıdaki özellik geçerlidir;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.16)$$

Burada A herhangi bir vektörü göstermektedir. Bu işlemde A yerine E vektörü yazılmaktadır. Bu nedenle (2.16)'ı (2.15) te yerine yazarsak;

$$\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu (\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}) \quad (2.17)$$

(2.6) denkleminde ;

$$\epsilon \nabla \times \vec{E} = \rho_q$$

şeklinde yazılabilir. Burada yük yoğunluğu sıfırdan farklı iletkenliğe sahip ortamlarda çok kısa süre içinde dağılacığından;

$$\epsilon \nabla \times \vec{E} = 0$$

şeklinde yazılabilir. Bu son durumu da göz önüne aldığımızda denklem;

$$-\nabla^2 \vec{E} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (2.18)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (2.19)$$

Benzer biçimde manyetik alan için denklem;

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \left(\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (2.20)$$

şeklinde yazılabilir. Bu işlemleri yaparak Maxwell denklemleriyle birbirlerine bağımlı olan elektrik ve manyetik alanlar birbirlerinden bağımsız denklemler şeklinde yazılabilir.

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

z yönünde ilerleyen bir sinüsoidal dalgayı ele alalım,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

(2.21) denkleminde E'nin zamana göre türev alınarak eşitlik düzenlenirse;

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu\sigma \vec{E} - \omega^2\mu\epsilon \vec{E}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \vec{E}(i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \vec{E} k^2$$

buradan

$$k^2 = i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon$$

ile gösterilir ve dalga sayısı olarak bilinir.

$$\nabla^2 \vec{E} - \vec{E} k^2 = 0$$

Helmholtz denklemi,

$$k^2 = i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon \quad (2.22)$$

Bu bağıntıda 100 kHz e kadar $\omega^2 \mu\varepsilon$ terimi ihmal edilebilir. Bu durumda dalga sayısı,

$$k^2 = i\omega\mu\sigma$$

$$k = \sqrt{i\omega\mu\sigma} \quad (2.23)$$

$$i = \sqrt{-1}$$

olduğu hatırlanıp,

$$(1 + i)^2 = 1 + 2i + i^2$$

olduğu göz önünde bulundurulursa;

$$(1 + i)^2 = 1 + 2i - 1$$

$$(1 + i)^2 = 2i$$

$$(1 + i) = \sqrt{2i}$$

$$\frac{(1+i)}{\sqrt{2}} = \sqrt{i}$$

$$\sqrt{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}}$$

elde edilir. Bu işlemlerden sonra (2.23) bağıntısı,

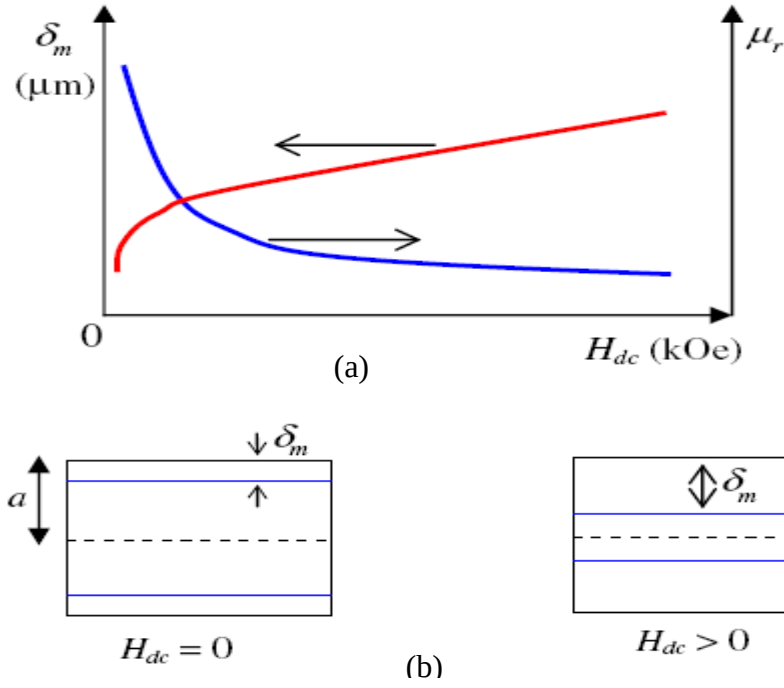
$$\mathbf{k} = \frac{\sqrt{\mu\sigma\omega}}{\sqrt{2}} + i \frac{\sqrt{\mu\sigma\omega}}{\sqrt{2}} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_+ + i\mathbf{k}_- \quad (2.25)$$

biçimine getirilir. İyi iletkenlerde (2.25) bağıntısından reel kısım yaklaşık olarak sanal kısma eşittir. Elektromanyetik dalganın iletken bir ortamda nasıl ilerlediği yüzey derinliği (δ) ile ifade edilir ve tanım olarak yüzey derinliği; iletken bir ortamda ilerleyen bir dalganın, başlangıçtaki genliğinin 1/e katına indirgendiği derinlik olarak tanımlanır. Yani elektromanyetik dalganın iletken içine ne kadar nüfuz edebildiğinin bir ölçüsüdür ve dalga sayısı ile ters orantılıdır.

$$\delta = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad \text{Yüzey derinliği}$$

Burada σ , elektriksel iletkenliği, μ , geçirgenliği ve $\omega=2\pi f$, numunede geçen I_{ac} akımının frekansını ifade eder. MI etki yüzey derinliği yada şerit numuneler için enine geçirgenliğe göre yorumlanabilir. Yüksek MI değerleri elde etmek için yüksek enine geçirgenliğe ve düşük yüzey derinliğine sahip malzemelerin seçilmesi uygundur. Uygulanan dış bir dc manyetik alanla enine geçirgenlik azalırken yüzey derinliği artmaktadır (Şekil 2.5) [13].



Şekil 2.5. (a) Uygulanan dc manyetik alana bağlı olarak yüzey derinliği ve geçirgenlik değişimi, (b) şerit numune için dc manyetik alanla yüzey derinliği değişimi [13].

Aslında dc bir manyetik alanda (H_{dc}), empedansın gerçek ve sanal bileşenleri değişir. Birinci dereceden yaklaşım olarak direnç ifadesi, aşağıdaki eşitlik ile verilir [16],

$$R = \frac{(\rho l)}{2\pi(a - \delta_m)\delta_m} \quad (2.26)$$

Bu, H_{dc} ile yüzey derinliğinin yada enine geçirgenliğin değişmesiyle direncin değişmesine ve buna bağlı olarak empedansın değişeceğini ifade eder. İndüktans ise aşağıdaki eşitlikle verilir [17],

$$L = \frac{0.175\mu_0 l f \langle \mu_r \rangle}{\omega} \quad (2.27)$$

Burada, μ_0 ve $\langle \mu_r \rangle$, sırasıyla boşluğun ve ortalama göreceli geçirgenliği ifade etmektedir. H_{dc} ile $\langle \mu_r \rangle$ deki değişim L 'yi buna bağlı olarak empedansı değiştirecektir. Sonuç olarak hem R hem de L empedans değerinde değişimlere neden olmaktadır [18]. Manyetoempedans sonuçları frekans aralıklarına göre

yorumlanabilmektedir. Genellikle frekans aralığı düşük, orta ve yüksek frekans olarak üçe ayrılmaktadır [13].

1. Düşük Frekans Bölgesi (birkaç kHz): Bu bölgede numune uçları arasındaki voltaj değişimi başlıca manyeto-indüktif olarak adlandırılan etki sayesinde [19]. Bu durumda yüzey etkisi çok zayıftır. Bir dış alanın uygulanması ile numune empedansındaki değişime katkı başlıca şerit bir numune için enine geçirgenlikle orantılı olan indüktans'tan (L) gelmektedir.

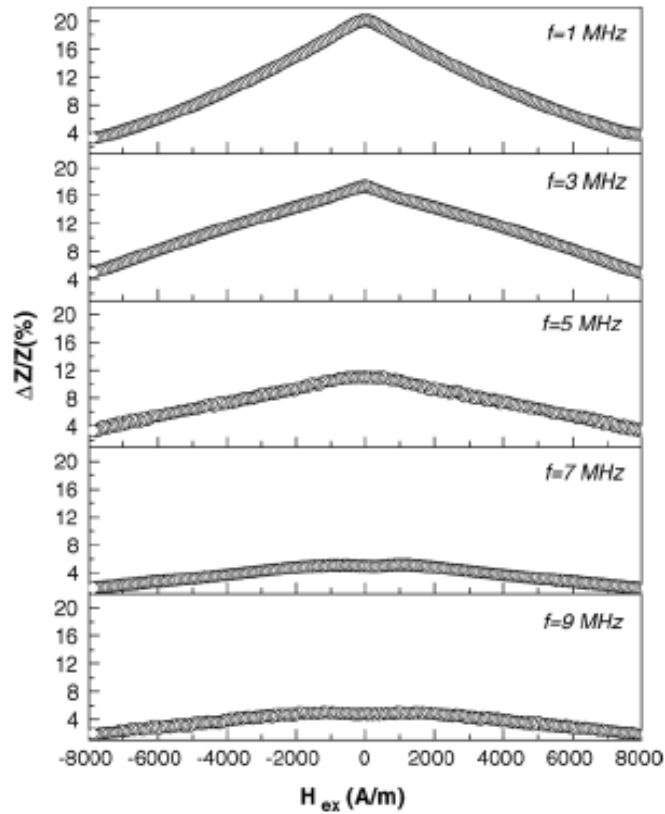
2. Orta Frekans Bölgesi (100kHz ve birkaç MHz arası): Burada MI, uygulanan dc manyetik alanın etkin manyetik geçirgenlikte ortaya çıkardığı güçlü değişimlere bağlı olarak yüzey derinliği değişiminden kaynaklanır. Örneğin sahip olduğu geometri önemlidir, MI profili bu aralıkta (100kHz-10MHz) bir pik değerine ulaşabilir ve bunun sonucunda geçirgenliğe hem domain wall hareketinden hem de manyetizasyon yöneliminden katkı gelmektedir. Daha yüksek frekanslarda MI değerinde azalma, domain wall hareketlerinin eddy akımları tarafından güçlü bir şekilde baskılanması ve bunun sonucunda yalnız manyetizasyon yönelim katkısının bir sonucudur [13].

3. Yüksek Frekans Bölgesi (birkaç MHz den GHz'e kadar): Burada ise manyetoempedansın orijininin, jromanyetik etki ve ferromanyetik rahatlama ile ilişkili olduğuna inanılmaktadır [20-21]. MI eğrilerinde maksimumlar, numunelerin halihazırda manyetiksel doyumda olduğu daha yüksek alan değerlerine doğru kayar [20-21]. Yüzey derinliğindeki kuvvetli değişimler, ferromanyetik rezonansa olduğu gibi benzer mekanizma tarafından kaynaklanır [20-21].

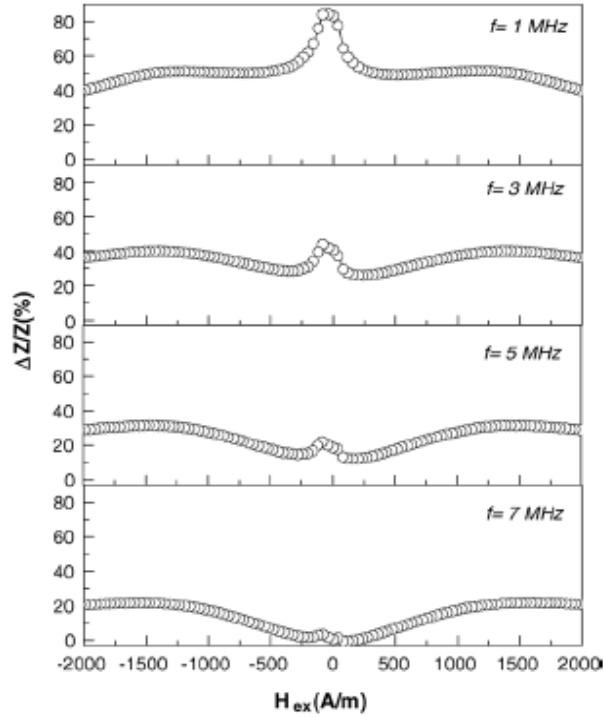
Şerit, tel, ince film ve tel üzerine elektro-kaplama yapılarak elde edilen ferromanyetik malzemelerde manyetoempedans etki birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır [22-32]. Fe, Co ve Fe-Co-bazlı amorf alaşımlarda manyetoempedans S.K. Pal ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [33]. Bu çalışmada pozitif magnetostriction değerli $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$, negatif magnetostriction'lu $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ve yaklaşık sıfır magnetostriction'lu $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf tellerin büyük manyetoempedans etki (GMI) özellikleri çalışılmıştır. Farklı frekanslarda $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin GMI davranışlarının alana bağlılığı Şekil 2.6 da gösterilmiştir. As-cast numune $f=1$ MHz de %22 lik maksimum GMI oranı gösterir ve GMI oran dc alanın artışı ile monotonik azalış göstermektedir. Maksimum GMI değer 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 [33].

Farklı frekanslarda $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin GMI davranışlarının alana bağlılığı Şekil 2.7 de verilmektedir [33]. Tek pik davranışları gözlenen eğrilerde frekansın artması ile sıfır alanda gözlenen pikin küçüldüğü ve bundan dolayı da GMI oranının azaldığı belirlenmiştir. Maksimum GMI oran $f=1$ MHz de %88 olarak bulunmuştur. Uygulanan dc alanın artması ile bu oran azalmaktadır [33].



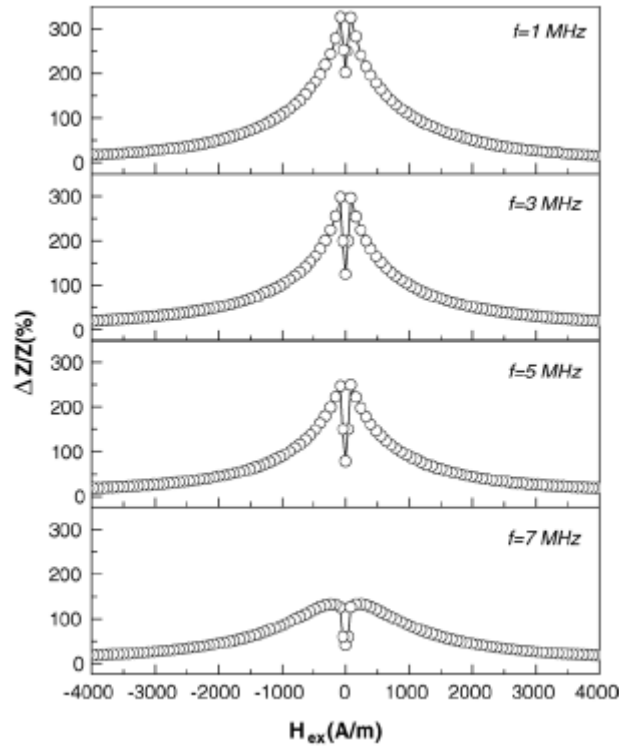
Şekil 2.6. Farklı frekanslarda $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağlılığı [33].



Şekil 2.7. Farklı frekanslarda $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağılılığı [33].

Farklı frekanslarda $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ amorf telin GMI davranışlarının alana bağılılığı Şekil 2.8 de gösterilmiştir. GMI oran dc alanın uygulanması ile bir pik göstererek artar ve daha sonra alanın artışı ile azalır [33]. 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 [33].

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 yönelimin 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.



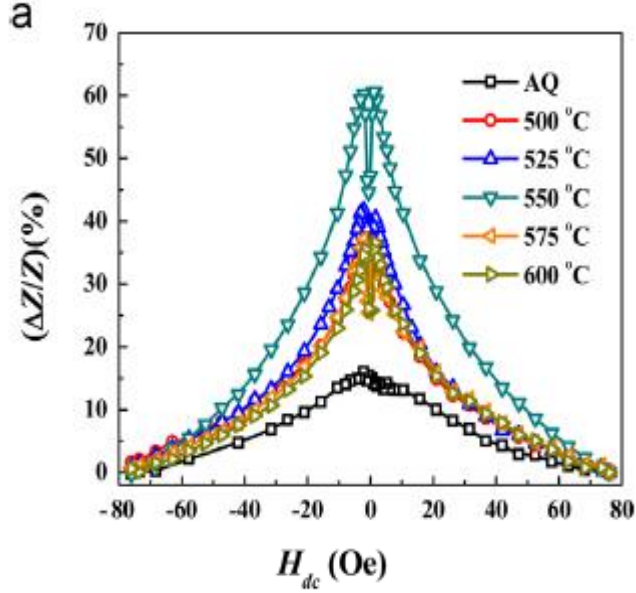
Şekil 2.8. Farklı frekanslarda $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ telin GMI oranının (% $\Delta Z/Z$) alana bağıllığı [33].

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 alaşımanın domainleri daima dairesel (bamboo domain) yapıdadır. $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ alaşımlarda Co yerine kısmen Fe katkılındığında magnetostriction değeri düşer [34] 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 [33].

Amorf $\text{Fe}_{68.5}\text{Si}_{18.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{B}_9$ şeritlerde manyetoempedans etki Sahoo ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [35].

Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıl işlem gören numunelerde yüzde manyetoempedans değişiminin alana bağıllığı Şekil 2.9 da gösterilmiştir [35]. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum yüzde manyetoempedans değişimi 550°C de ve bu sıcaklığın üzerindeki ısıl işlemlerde yüzde değişimin azaldığı gözlenmiştir.

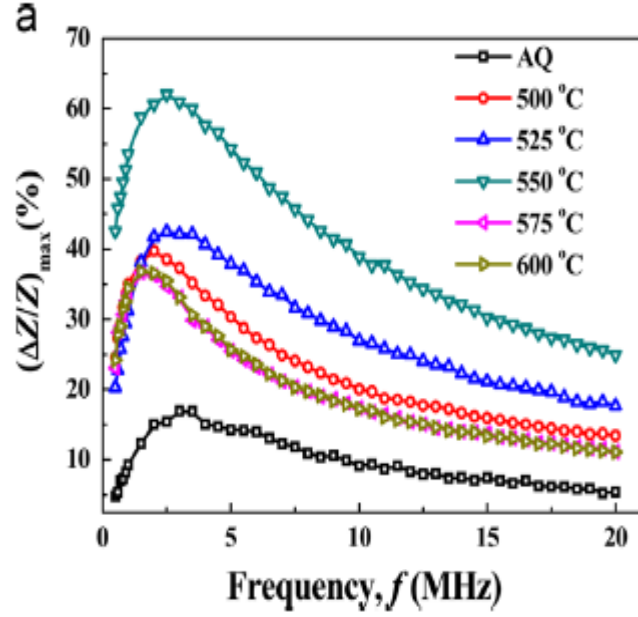
Uygulanan 2MHz ac akım frekansı için çift pikler ortaya çıkmıştır. Çift pik davranışı malzemelerde ortaya çıkan manyetizasyon yönelimin bir sonucu olarak ifade edilmiştir [35].



Şekil 2.9. 2MHz frekansında ısıtıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem görmüş numunelerin uygulanan dış alana göre yüzde manyetoempedans değişimi[35].

Bu çalışmada uygulanan ac akım frekansının etkisi Şekil 2.10 da gösterilmiştir [35]. Tüm numunelerde ilk olarak artan frekans ile yüzde değişimin arttığı daha sonra maksimum bir değere ulaştığı ve sonra ise azaldığı gözlenmiştir. Tüm numuneler için maksimum 1-3MHz aralığında gözlenmiştir [35]. Bu eğilim, enine manyetik geçirgenlik ve buna bağlı olarak MI etkiye domain wall hareketi ve manyetizasyon yöneliminin görelî katkıları alınarak tanımlanabilir [36]. Yüzey etkisinin zayıf olduğu düşük frekans değerlerinde (1MHz altında) manyetoempedans etkiye asıl katkı manyetoidüktif bileşenden gelmektedir [37].

Birkaç MHz frekans değerlerinde alternatif akım yoğunluğunun daha homojen dağılım sergilemesi ile yüzde manyetoempedans değişim maksimum değer göstermektedir. Bu durum manyetoempedans etkinin belirlenmesinde baskın bir rol oynayan yüzey etkisine neden olmaktadır.



Şekil 2.10. Isıl işlem görmemiş ve farklı sıcaklıklarda ısıl işlem gören numunelerin frekansa karşı yüzde manyetoempedans değişimi [35].

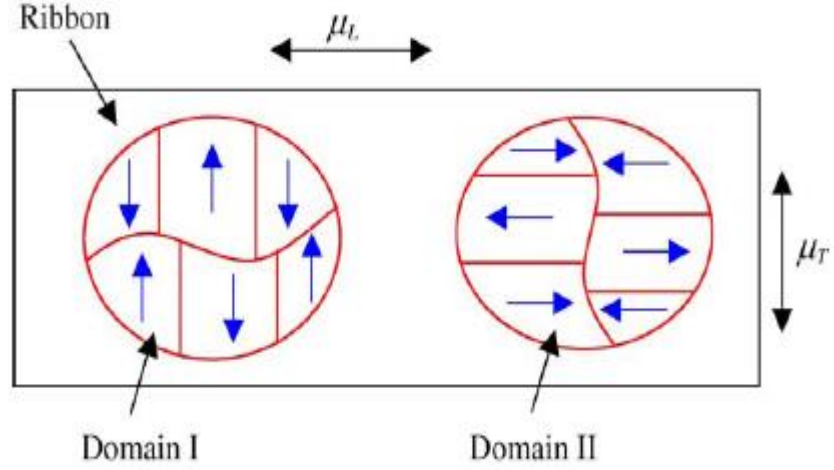
Yüksek frekans değerlerinde yüzde manyetoempedans değerindeki düşüş, eddy akımları ile domain wall hareketinin güçlü bir şekilde baskılanması ve buna bağlı olarak etkin geçirgenlikteki ani bir azalma sayesinde ortaya çıkmaktadır [38]. Fe bazlı amorf şeritlerde ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak büyük manyetoempedans etki (GMI) Phan ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [39].

Genellikle malzemelerin büyük manyetoempedans etki sergilemesinde malzemelerin soft özellikler ve uygun domain yapı (şerit numuneler için enine ve tel numuneler için dairesel) olmak üzere iki önemli parametre bulunmaktadır. Şerit formuna sahip numunelerde GMI domain wall hareketi ve manyetizasyon yönelimi ile ilişkili enine geçirgenlik üzerine manyetik alanın etkisi ile anlaşılabilir.

Şerit numuneler için enine manyetizasyon esnasında domain yapının şematik gösterimi Şekil 2.11 de verilmiştir [39]. Bir şerit numunede boyuna yön boyunca uygulanan ac akım için enine geçirgenliğe bağlı olarak manyetoempedans ifadesi aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir [39];

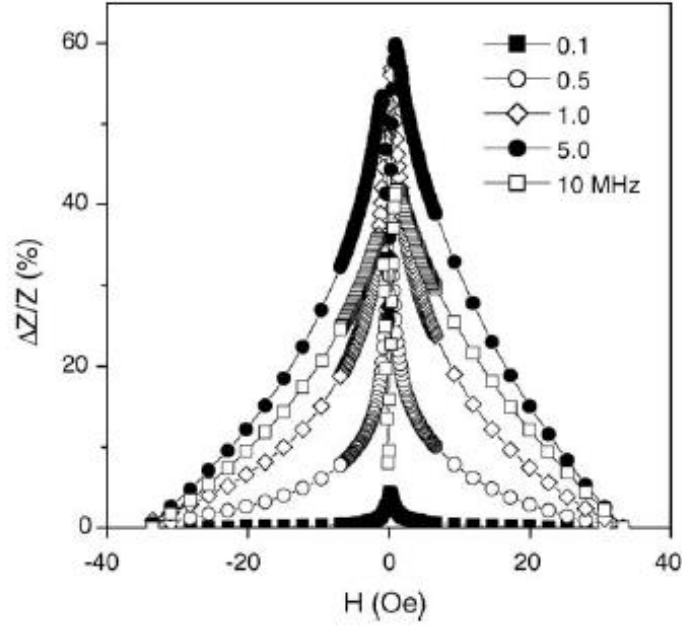
$$Z(f) \propto \sqrt{f \mu_T(f)}$$

$$\mu_T(f) = \mu_T^{dw}(f) + \mu_T^{rot}(f) \quad (2.28)$$



Şekil 2.11. Enine manyetizasyon esnasında domain yapının şematik gösterimi [39].

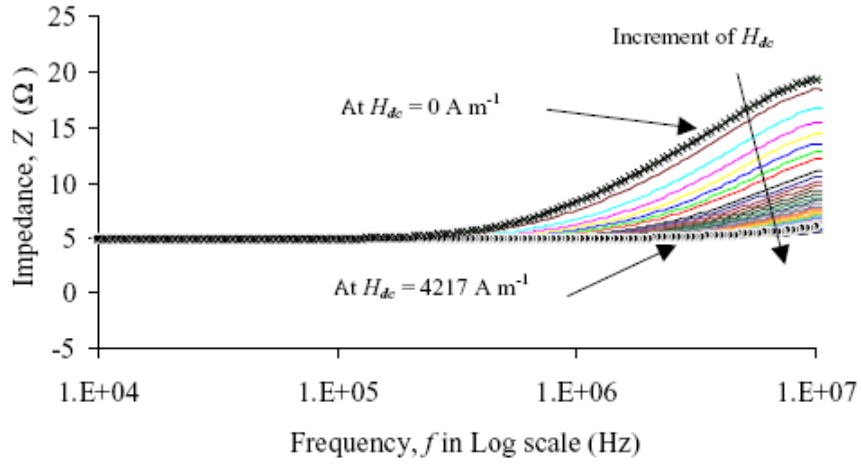
Farklı frekans değerleri için ısıtılmış şerit numunelerde uygulanan dış alana bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişim Şekil 2.12 de gösterilmiştir. Yüzde değişiminin 5MHz frekans değerine kadar arttığı ve daha sonraki frekans değerlerinde azaldığı gözlenmiştir [39]. Bu durum 1MHz altındaki frekans değerlerinde, numune kalınlığının yüzey derinliğinde daha az olduğu durumlarda, ortaya çıkan manyeto-indüktif voltajın manyetoempedans etkiye katkısı çok büyük değildir ve bu nedenle GMI düşük değerler göstermektedir. Bu frekans değerinde GMI domain wall hareketinin bir sonucu olarak tek pik davranışı sergilemektedir. $1\text{MHz} \leq f \leq 5\text{MHz}$ değerinde yüzey etkisi baskındır ve empedans eşitlik 2.28 ile ifade edilmektedir. GMI bu aralıkta hem domain wall hem de manyetizasyon yöneliminin katkısına bağlı olarak en yüksek değere sahiptir. Bu aralıkta enine yön içinde domain wall hareketi baskılanmaya başlarken manyetizasyon yöneliminin artması sonucunda GMI asimetrik çift pik sergilemektedir. 5MHz üzerindeki frekans değerlerinde, domain wall hareketinin eddy akımları sayesinde güçlü bir şekilde baskılanması sonucunda GMI etki azalır.



Şekil 2.12. 540 °C de ısıt işlem görmüş şerit numunenin farklı frekans değerleri için uygulanan alana bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimi [39].

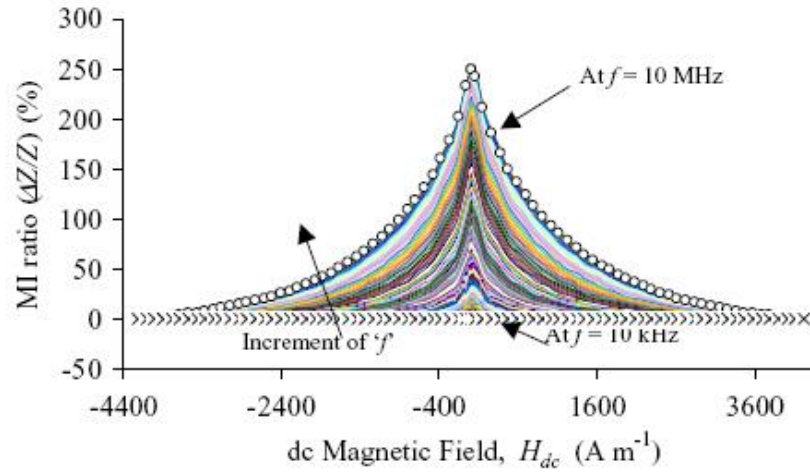
$\text{Co}_{71}\text{Fe}_1\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şerit için 10kHz-10MHz frekans aralığında uygulanan farklı eksensel dc manyetik alan değerleri için frekansın empedansa bağlılığı Rahman ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır [40].

Şekil 2.13, frekansın empedansa karşı eğrilerini göstermektedir. 100kHz frekans değerine kadar empedansın sabit ve frekansın artması ile empedans değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum temel olarak elektromanyetik yüzey etkisiyle ilişkilidir. Şerit boyunca uygulanan ac akım şerit etrafında enine bir manyetik alan ortaya çıkarır. Yüzey etkisine bağlı olarak akım iletkenin yüzeyine yakın bir dağılım gösterme eğilimindedir. Bunun bir sonucu olarak iletkenin etkin kesit alanı azalmaktadır. Bu durum yüksek frekanslarda empedansın artmasına neden olur.



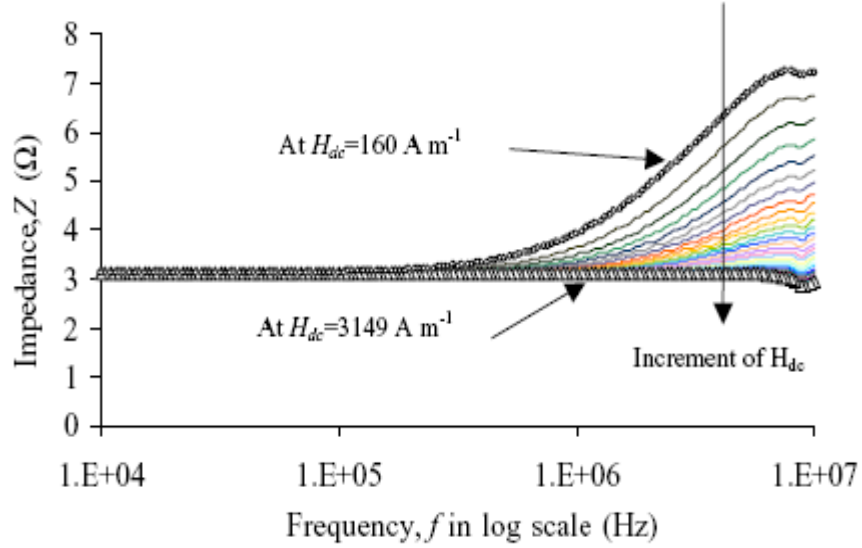
Şekil 2.13. Uygulanan farklı dc manyetik alan değerleri için frekansın empedansa bağıllığı [40].

Şerit eksenini boyunca uygulanan dc alan 200kHz üzerindeki değerlerde empedans değerinde büyük değişimler ortaya çıkarmıştır. 4217 A/m üzerindeki alan değerlerinde empedansta değişim gözlenmemiştir. Uygulanan 4217 A/m bu numune için doyum manyetik alan değeridir [40]. Şekil 2.14 farklı frekans değerleri için uygulanan dc manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir. Maksimum yüzde değişim 10MHz frekans değerinde %250 olarak belirlenmiştir [40].

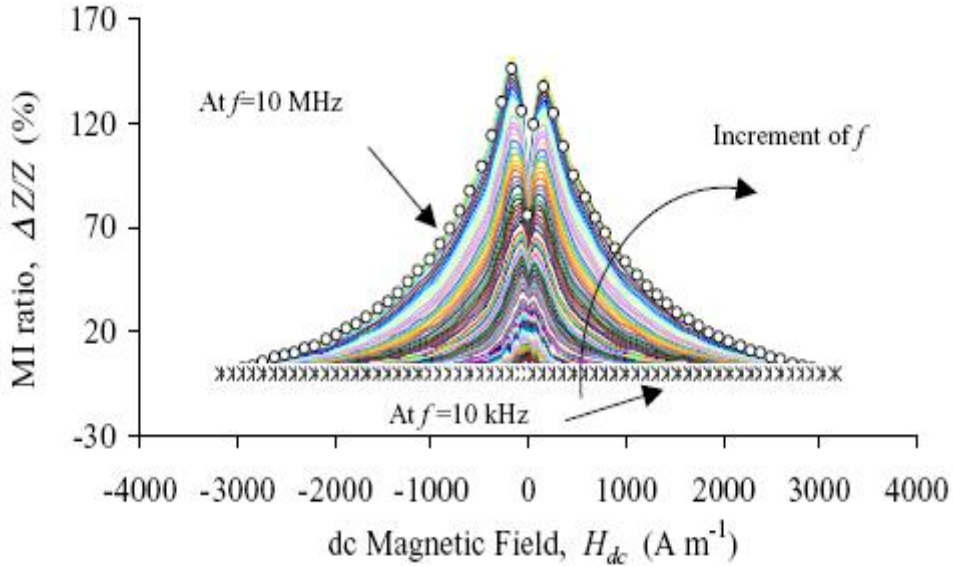


Şekil 2.14. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_1\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şerit için farklı frekanslarda dc manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimi [40].

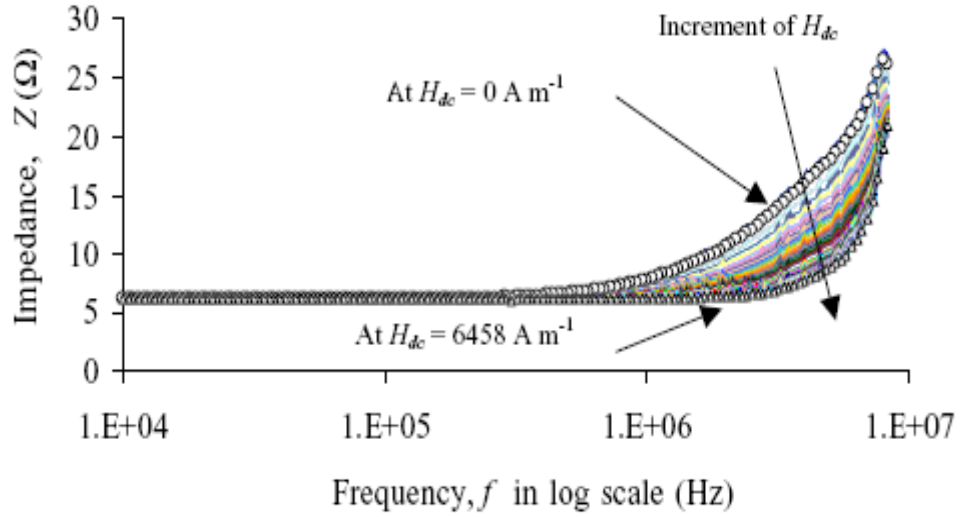
Uygulanan dc manyetik alana bağı olarak $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Mn}_4\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ ve $\text{Co}_{71}\text{Fe}_2\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şeritlerde frekans empedans ve farklı frekanslar için alana bağı olarak yüzde manyetoempedans değişimleri Şekil 2-15-2.18 da verilmiştir [40].



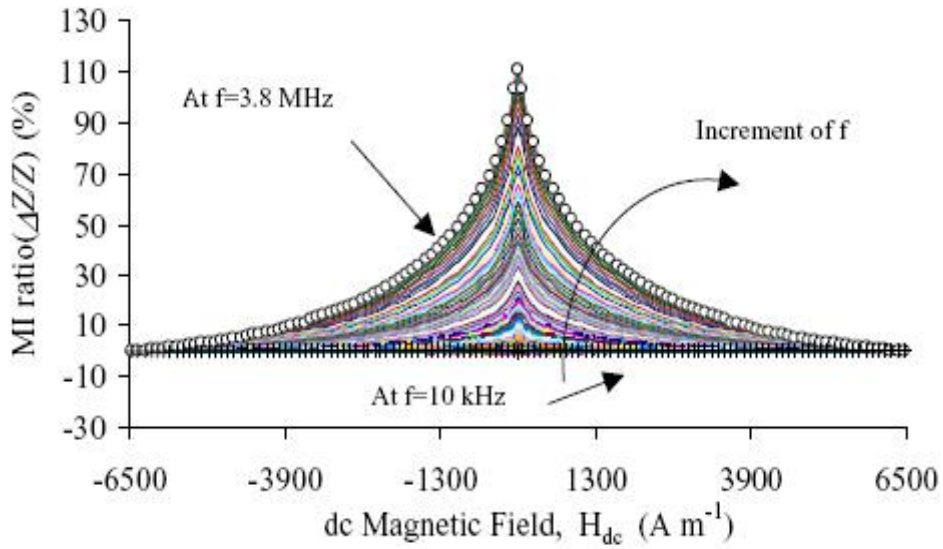
Şekil 2.15. $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Mn}_4\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ amorf şeritlerde uygulanan dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değerleri [40].



Şekil 2.16. $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Mo}_{1.5}\text{Mn}_4\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ amorf şeritlerde farklı frekans değerleri için manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimi[40].



Şekil 2.17. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_2\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şeritlerde uygulanan dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değerleri [40].



Şekil 2.18. $\text{Co}_{71}\text{Fe}_2\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şeritlerde farklı frekans değerleri için manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimi[40].

Bu üç numune arasında maksimum yüzde manyetoempedans değişim $\text{Co}_{71}\text{Fe}_1\text{Mo}_1\text{Mn}_4\text{Si}_{14}\text{B}_9$ amorf şeritlere gözlenmiştir [40].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

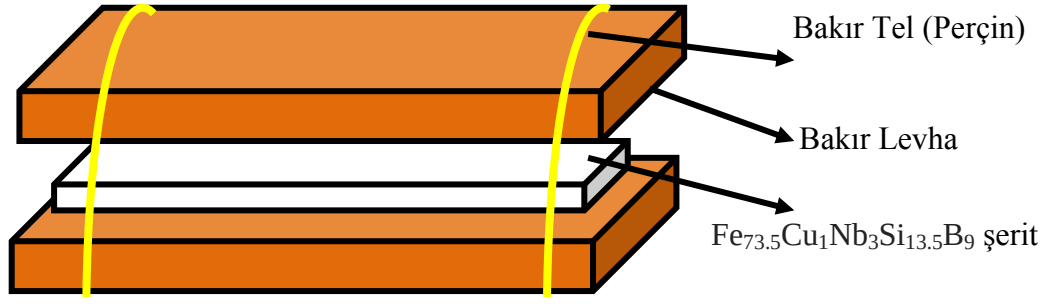
Amorf malzemelere uygulanan ısıt işlemler (fırınlama) malzemelerin başlangıçta sahip olduğu manyetik özelliklerini değiştirmektedir. Bu bölümde ilk olarak numune hazırlanması ve fırınlama işlemi verilmiştir. Daha sonra yapısal değişimleri belirlemede kullanılan X-ışınları kırınımı ölçüm sistemi açıklanmıştır. Son olarak, amorf ve ısıt işlem gören numunelerin manyetik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan M-H ve manyetoempedans ölçüm sistemi anlatılmıştır.

3.2. Örneklerin Hazırlanışı Ve Isıt İşlemler

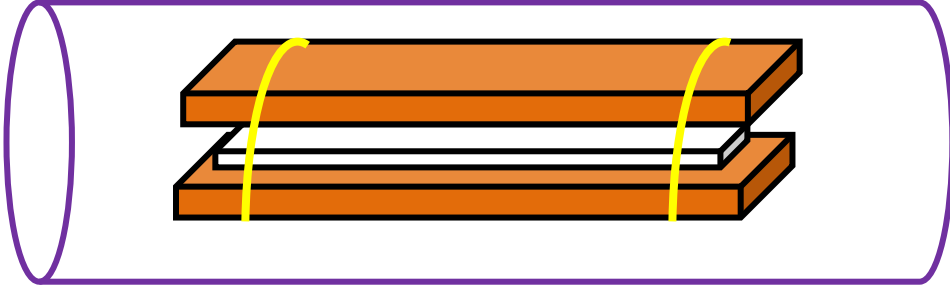
Bu çalışmada şerit formuna sahip $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (FINEMET) numuneler kullanıldı. Deneysel çalışmalarda kullanılacak şerit 6 cm uzunluğunda, 1 mm genişliğinde 0.03 mm kalınlığında ki boyutlarında kesildi. Numunelerin kesim işlemi, kenarlarının kırılması sonucu oluşabilecek güçlü streslerin önlenmesi amacıyla, keskin bir makas kullanılarak yapıldı. Isıt işleminden önce ve sonra yüzeylerde oluşan tozları ve organik safsızlıkları ortadan kaldırmak için tüm numuneler aseton kullanılarak temizlendi. Bu çalışmada kullanılan tüm amorf ferromanyetik numuneler iki bakır levha arasına yerleştirilerek levhalar bir birine perçinlendi (Şekil 3.2). Bakır levha bir cam boru içine yerleştirilerek vakum yapıldıktan sonra camın ağzı kapatıldı (Şekil 3.3).



Şekil 3.1. Numune ve numunenin vakumlanarak cam içine yerleştirilmesinin fotoğrafı.



Şekil 3.2. $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şeridin perçinlenmesi işlemi.



Şekil 3.3. $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şeridin vakumlu camın içine konulması.

Numuneler, 450-650 °C sıcaklık aralığında bir saat süre ile havası boşaltılmış cam tüp içinde ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Örneklerin ısıtılma işlemleri Şekil 3.4 de fotoğrafı gösterilen tüp fırın düzeneği kullanılarak gerçekleştirildi.

Ana kontrol birimi, zamanla meydana gelen sıcaklık dalgalanmasını $\pm 0.1^\circ\text{C}$ de tutabilme kapasitesindedir. Numuneler fırın içerisine yerleştirildi ve ısıtılma işlemi 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 ısıtılma işlemine tabi tutuldu.



Şekil 3.4. Tüp fırın fotoğrafı

3.3. X-Işınları Kırınım Ölçümleri

Kristal malzemelerdeki farklı kristal yapılar (fazlar) ve kristal yapının parametrelerinin tespiti için X-ışını kırınımı yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem temelde Bragg yansımasına dayanmaktadır. Sistemde üretilip örnek üzerine gönderilen X-ışınları, örnekte kırınıma uğrayarak saçılır. Bu saçılan veya yansıyan ışınlar bir dedektör tarafından algılanarak bilgisayara aktarılır ve bir yazılım (software) yardımıyla yansıyan ışının şiddetinin 2θ değerine karşı grafiği oluşturulur. X-ışınları kırınım ölçümleri, $\lambda=1.5405$ dalga boylu $\text{CuK}\alpha$ ışınımı kullanılarak bilgisayar kontrollü Rigaku RadB-DMAX II toz difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu sistem, $2\theta = 1-170^\circ$ lik açı değerleri arasında 0.001° adımlarla sürekli veya kesikli ölçüm yapabilme kapasitesindedir.

Tüm numunelerin X-ışınları kırınım ölçümleri, $2\theta = 20^\circ-80^\circ$ aralığında ve sabit tarama hızında (3 derece/dakika) sürekli tarama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. XRD sonuçlarına göre ısıtılmış numunelerin tanecik büyüklüğü Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [12].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

Burada K, şekil faktörü, λ , X-ışınları dalga boyunu, β radyan olarak yarı yükseklikteki pik genişliğini ve θ Bragg açısını ifade etmektedir.

3.4. Manyetik Ölçümler

3.4.1. M-H Ölçüm Sistemi

Amorf ve ısıtım işlem gören numunelerin manyetik parametreleri olan coercivity, remanent manyetizasyon, manyetik alınganlık ve anizotropi sabiti değerleri M-H (manyetik-hysteresis) eğrilerinden yararlanılarak belirlenebilir. Şekil 3.5 M-H ölçüm sistemini göstermektedir.

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

$$V_1 = n \mu_0 \frac{d}{dt} (A_C H + A_S M) \quad (3.2)$$

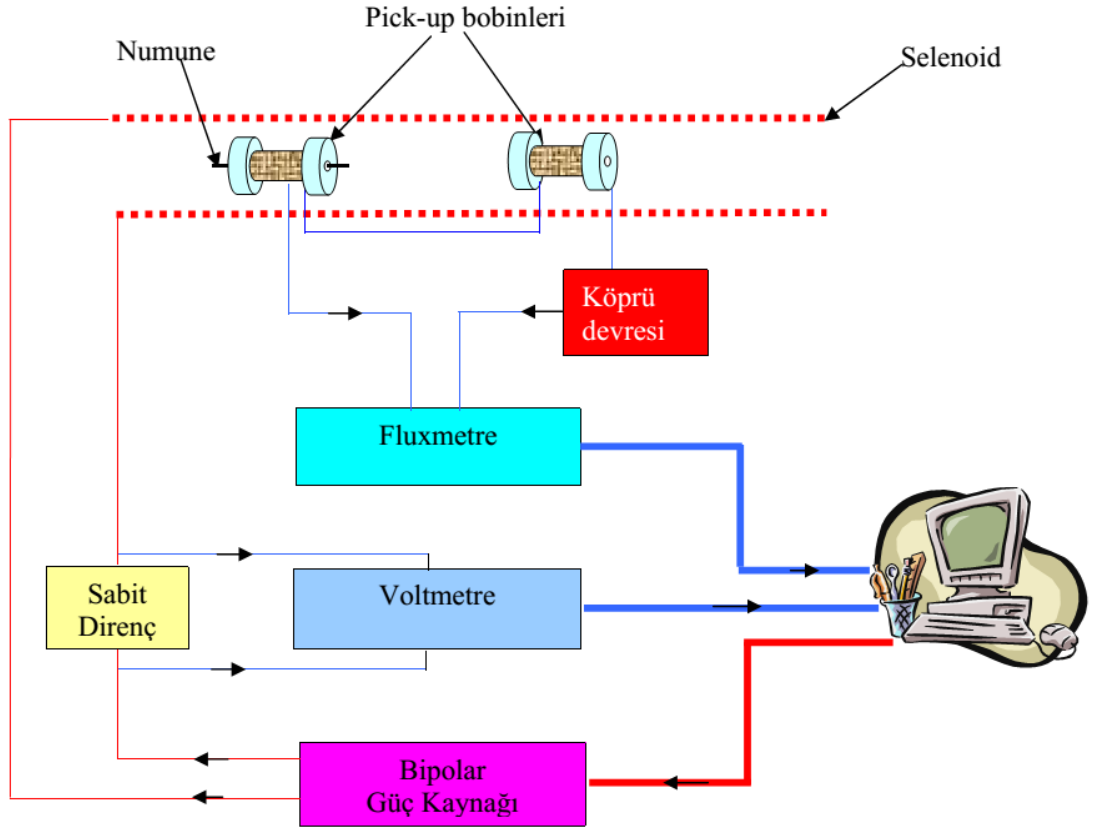
ile verilir. Burada μ_0 boş uzayın geçirgenliği, M manyetizasyon, A_C toplayıcı bobinin kesit alanı, A_S numunenin kesit alanı ve H ise dış manyetik alandır. Numune yerleştirilmeyen diğer bobinde oluşan voltaj, V_2 ;

$$V_2 = n \mu_0 \frac{d}{dt} (A_C H) \quad (3.3)$$

eşitliği ile verilir. Toplam çıkış, V_o , 3.2 ve 3.3 denklemleri arasındaki farktır, yani;

$$V_0 = n \mu_0 \frac{d}{dt} (A_C M) \quad (3.4)$$

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 3.5 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, +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 3.4'e göre elde edilen sinyalin integrasyon işlemi için Lakeshore Integrating Fluxmeter kullanılmıştır. Sistemde güç kaynağından selenoide bir akım uygulanmakta, uygulanan voltaj veya akım değeri standart direnç vasıtası ile okunup bilgisayara aktarılmaktadır. Bu voltaj değerinde 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.



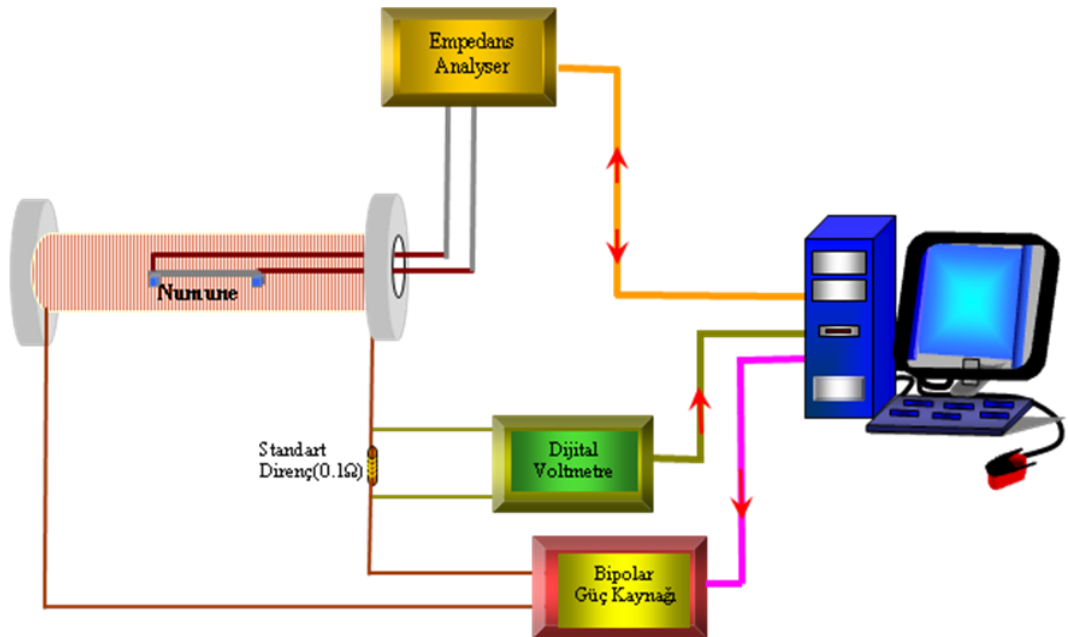
Şekil 3.5. M-H ölçüm sistemi.



Şekil 3.6. M-H ölçüm sisteminin fotoğrafı.

3.4.2. Manyetoempedans Ölçüm Sistemi

Numune empedansının manyetik alanla değişimini ölçmek için Şekil 3.7 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 üretebilme kapasitesindedir. Numune empedansı HP4294 empedans analyzer ve HP4294A probu kullanılarak ölçüldü. Kontaklar iletken gümüş boya kullanılarak yapıldı. Numunenin uç noktalarına ac I akımı empedans analyzer 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 3.7.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 3.5 de verilen kompleks empedansın bu alana bağlılığını hesaplar.

$$Z = R(\omega, \mu(\omega, H_{DC})) + jX(\omega, \mu(\omega, H_{DC})) \quad (3.5)$$

Manyetoempedans oranı;

$$\Delta Z/Z (\%) \text{ veya } MI (\%) = \frac{(Z)_{H_{DC}=0} - (Z)_{H_{DC}}}{(Z)_{H_{DC}}} * 100(\%) \quad (3.6.)$$

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



Şekil 3.8.Manyetoempedans ölçüm sisteminin fotoğrafı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

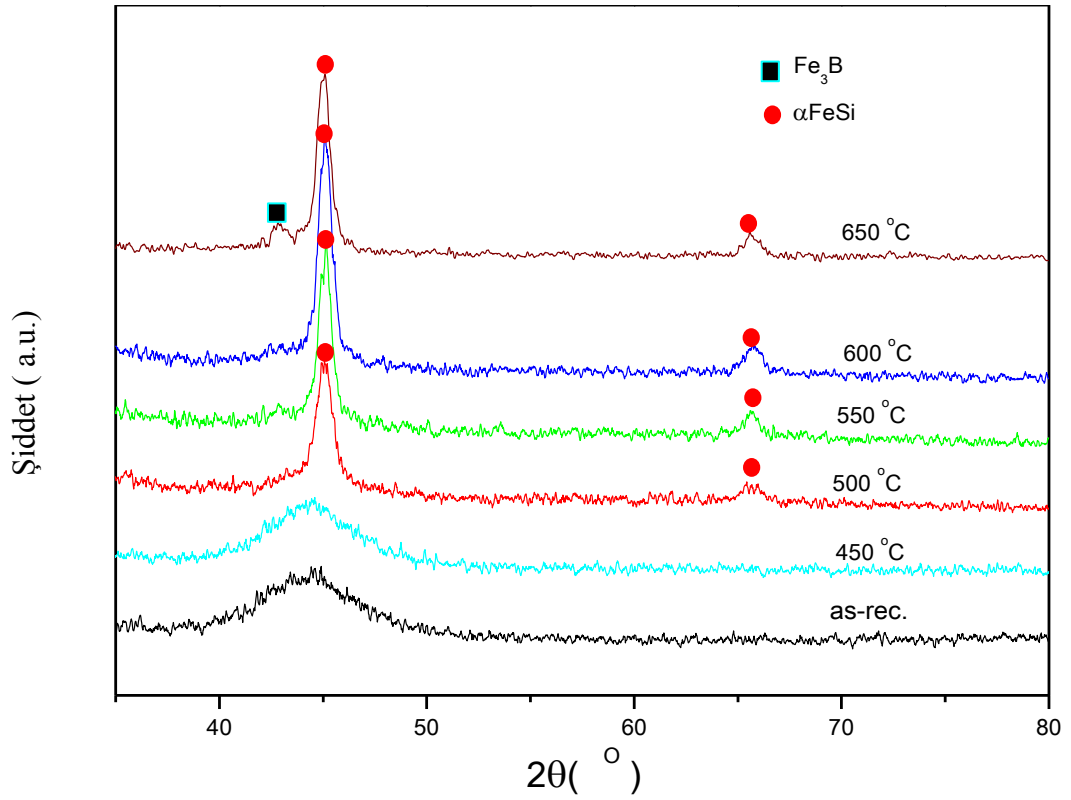
4.1. Giriş

Bu bölümde, amorf ve farklı sıcaklıklarda bir saat ısıtım işlemi görmüş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şeritlerin X-ışınları analizi, manyetik özellikleri ve manyetoempedans sonuçları verilmiştir.

4.2. $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ Alaşımların Termal Özellikleri

4.2.1. $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ X-ray Analizi

Ferromanyetik malzemelere uygulanan ısıtım işlemi sonucunda yapı içerisinde ortaya çıkan fazları belirlemede X-ışınları ölçümü kullanılmaktadır. Şekil 4.1, ısıtım işlemi görmemiş ve farklı sıcaklıklarda bir saat ısıtım işlemi gören şerit numunelerin X-ışınları sonuçlarını göstermektedir.

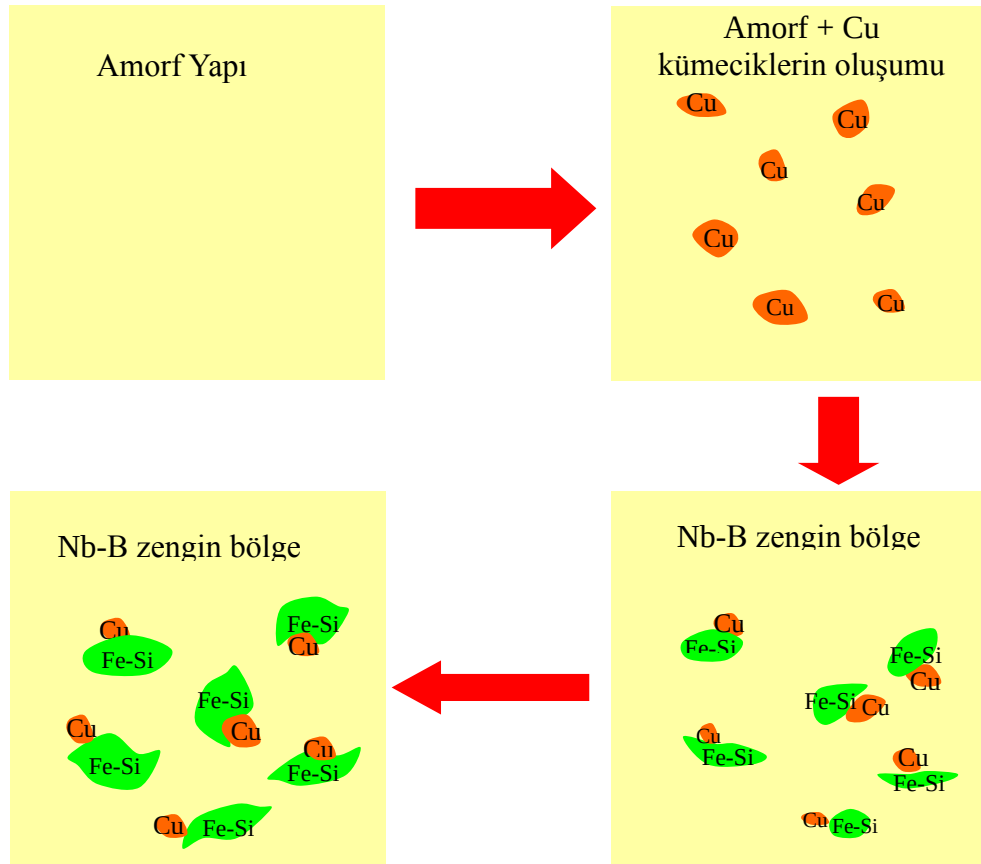


Şekil 4.1. Isıtım işlemi görmemiş ve farklı sıcaklıklarda bir saat ısıtım işlemi gören şerit numunelerin X-ışınları analizi.

450 °C ye kadar olan ısıt işlemlerde yapıda önemli bir değişimin olmadığı ve bu sıcaklığın üzerindeki ısıt işlemlerde (600 °C ye kadar) yapı içerisinde ilk olarak Fe₃Si fazının oluştuğu gözlenmiştir. 650 °C de bir saat ısıt işlem gören numunede ise Borlu fazların ortaya çıktığı belirlenmiştir [8,10].

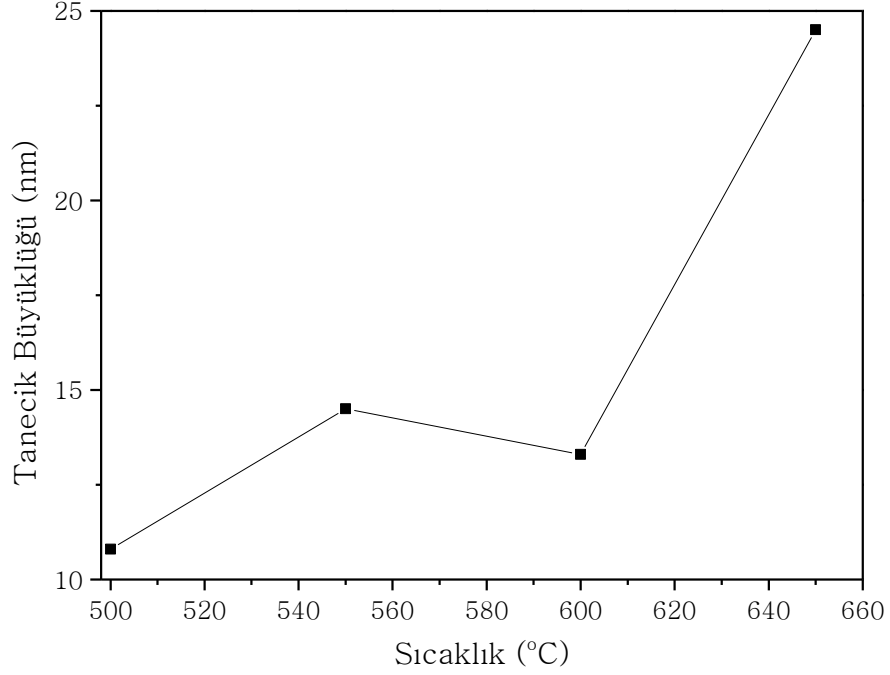
Amorf şeritlerde ısıt işleme bağlı olarak nanaokristalleşme süreci Şekil 4.2. de verilmiştir. Isıt işlem uygulamakla öncelikle amorf faz içinde çok küçük grain boyutlarına sahip Cu kristalcikleri oluşmakta, ardından daha yüksek sıcaklıklarda ise α -FeSi fazının oluştuğu belirlenmiştir [8,10]. Oluşan Cu fazı, α -FeSi fazının oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Cu içermeyen FeSiB veya FeCrNbSiB alaşımlar için yapılan çalışmalarda hangi sıcaklıklarda ısıt işlem uygulanırsa uygulansın yapı içerisinde α -FeSi fazının elde edilmesinin çok zor olduğunu göstermiştir [8,10]. Ancak FeCrNbSiB yapısına çok az miktarda Cu eklenmesiyle α -FeSi fazının oluştuğu gözlenmiştir [8,10]. Ayrıca yapıya Nb katkılanması oluşan α -FeSi fazının kristal boyutları sınırlandırılarak fazla büyümesi engellenmektedir [8,10].



Şekil 4.2. Fe-Cu-Nb-Si-B alaşımının nanokristalleşme süreci.

Şekil 4.3, ısıtma işlem sıcaklığına bağlı olarak tanecik büyüklüğünü göstermektedir. Tanecik büyüklüğü sıcaklığa bağlı olarak 550°C ye kadar artmış, 600°C de azalmış ve daha sonraki sıcaklıkta artış göstermiştir. Sıcaklığa bağlı olarak 550°C, 600°C, 650°C tanecik boyutu sırasıyla 14.5, 13.3, 24.5 nm olarak hesaplanmıştır.

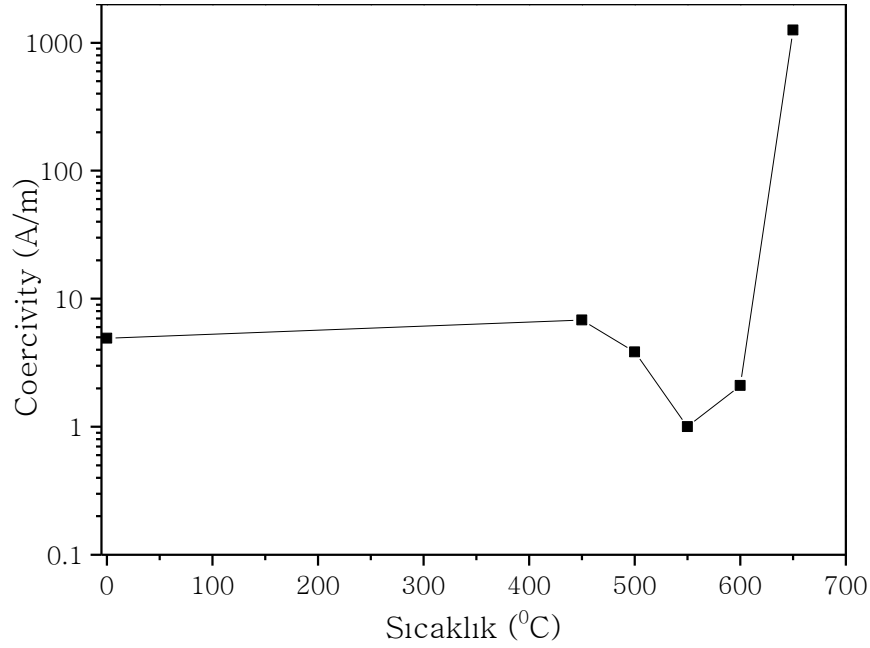


Şekil 4.3. Numunenin sıcaklık tanecik büyüklüğü.

4.3. Amorf $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ Şeritlerin Manyetik Özellikleri

Manyetik malzemelerin soft özelliklerin belirlenmesinde M-H ölçümleri önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle ilk olarak asreceived ve farklı sıcaklıklarda ısıtma işlem gören malzemelerin manyetizasyon eğrileri alınarak malzemelerin coercivity değeri hesaplanmıştır. Bu eğrilerden faydalanarak sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan coercivity (H_c) değerleri Şekil 4.4’de verilmiştir. M-H eğrilerinden asreceived numune için coercivity değeri yaklaşık 5 A/m olarak hesaplanmıştır. Isıtma işlem sıcaklığına bağlı olarak düşük dereceli sıcaklıklarda coercivity değerinin fazla değişmediği (450°C için yaklaşık 6.8 A/m), orta dereceli sıcaklıklarda bu değer azaldığı (550°C için yaklaşık 1 A/m) ve yüksek sıcaklık değerlerinde coercivity değerinin arttığı tespit edilmiştir (650°C için yaklaşık 1250 A/m).

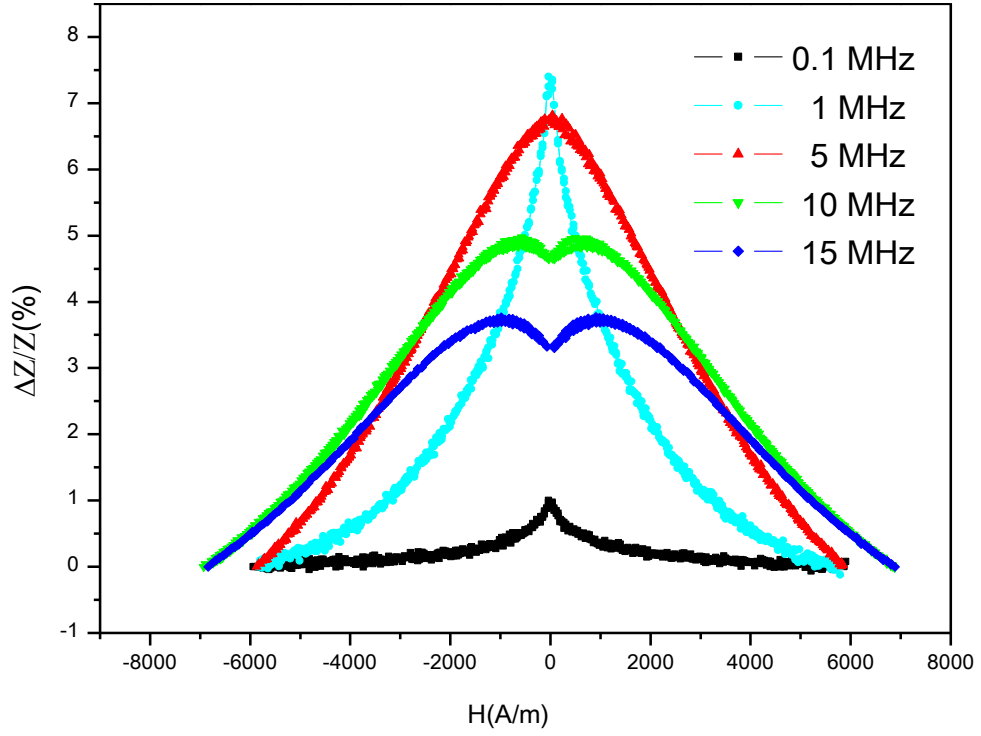
Yüksek sıcaklıklarda coercivity değerindeki büyük artış X- ışınları ölçümlerinden de görüldüğü gibi Fe(Si) fazlarına ek olarak Bor' lu fazların ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Herzer tarafından yapılan teorik modellemede coercivity değeri nanometre mertebesine sahip tanecik büyüklüğü ile doğru orantılı bir şekilde değişmektedir ($H_c \propto D^6$) [41]. Bu bağıntıya göre yüksek sıcaklıkta tanecik büyüklüğündeki artış coercivity değerinde artmaya neden olmaktadır.



Şekil 4.4. $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit numune için sıcaklığa karşı coercivity değerleri.

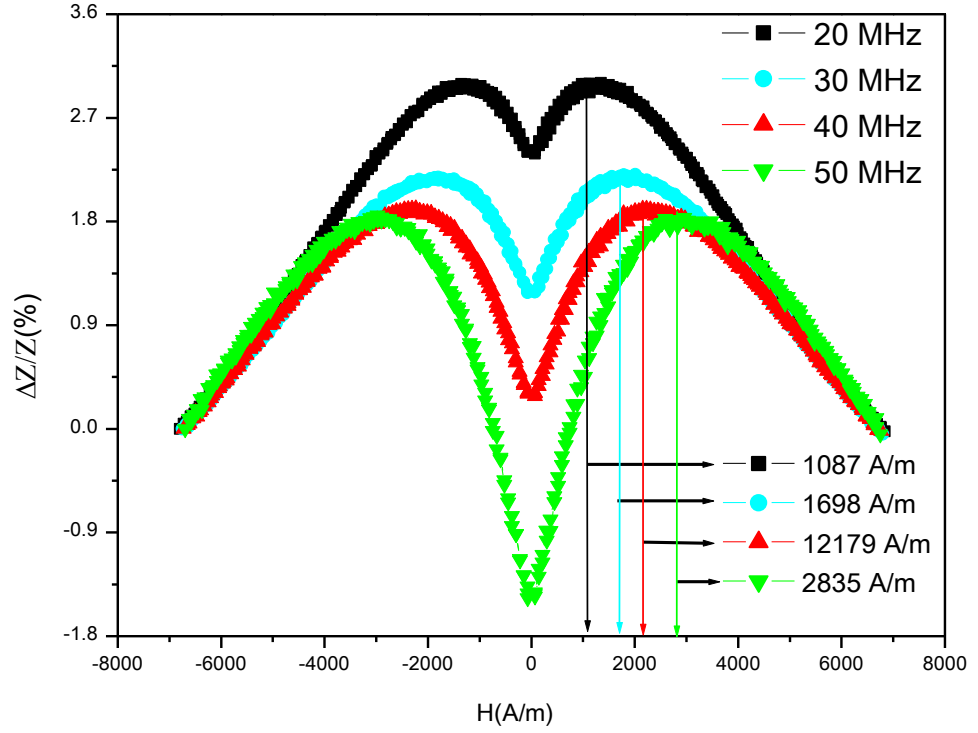
4.4. Isıl İşlem Görmemiş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ Şeritlerde Manyetoempedans Etki

Numune empedansı gerçek ve imajiner olmak üzere iki terimden oluşur ve empedans $Z=R+iX$ şeklinde tanımlanabilir. İlk olarak ısıtıl işlem görmemiş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit için yapılan manyetoempedans ölçümleri verilmiştir. Farklı frekans değerlerinde ısıtıl işlem görmemiş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit için uygulanan alana karşı yüzde empedans, değişimleri Şekil 4.5 ve 4.6 de verilmiştir.



Şekil 4.5. Isıl işlem görmemiş numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri.

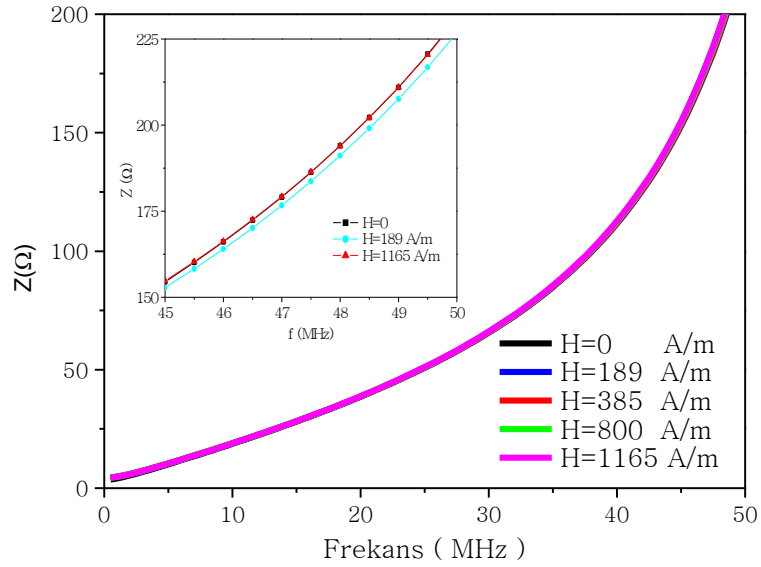
Isıl işlem görmemiş numuneye uygulanan dış manyetik alanın frekans değeri artırıldığında yüzde manyetoempedans değişiminin maksimum değerinin önce arttığı ve sonra azaldığı belirlenmiştir. Şekil 4.5. ve Şekil 4.6. dan görüldüğü gibi en yüksek empedans değişimi 1 MHz frekans değerinde % 7.4 olarak hesaplanmıştır. Frekans değerinin artması ile empedans değişiminin azaldığı ve 50 MHz'lık frekans değerinde değişimin % 1.85 olduğu bulunmuştur. Isıl işlem görmemiş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit numunelerde 5 MHz frekans değerine kadar eğriler tek pik davranışları, bu frekans değerinin üzerinde ise çift pik davranışları sergilediği gözlenmiştir. Çift pik davranışı sergileyen grafiklerde doyum alan değerleri frekansa bağlı olarak artış göstermektedir. Anizotropi alan değeri 10 MHz frekansı için 500 A/m iken bu değerin artan frekans değeri ile artış gösterdiği ve 50 MHz için bu değer 2835 A/m olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.6. Isıl işlem görmemiş numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri.

Şekil 4.7, uygulanan sabit dc manyetik alan değerlerinde frekansa karşı empedans değişimi göstermektedir. Şekil 4.7 deki içteki grafik, değişimin daha iyi görülebilmesi için 40-50 MHz aralığında elde edilmiştir. Şerit numunelerde empedans değeri, numunenin enine geçirgenliğiyle orantılıdır. Bu nedenle numune eksenini boyunca uygulanan dış alan enine geçirgenlik değerini değiştirecektir. Buna bağlı olarak empedans değeri de değişim göstermektedir. Numunelere uygulanan dış alan numune eksenini boyunca (uzunlamasına) uygulanmıştır.

Orta dereceli dc manyetik alan değerlerinde içteki grafikte de görüldüğü gibi empedans değerinde azalış ortaya çıkmaktadır. Daha yüksek alan değerinde ise ($H_{dc}=1165$ A/m) empedans değerinin tekrar arttığı belirlenmiştir.

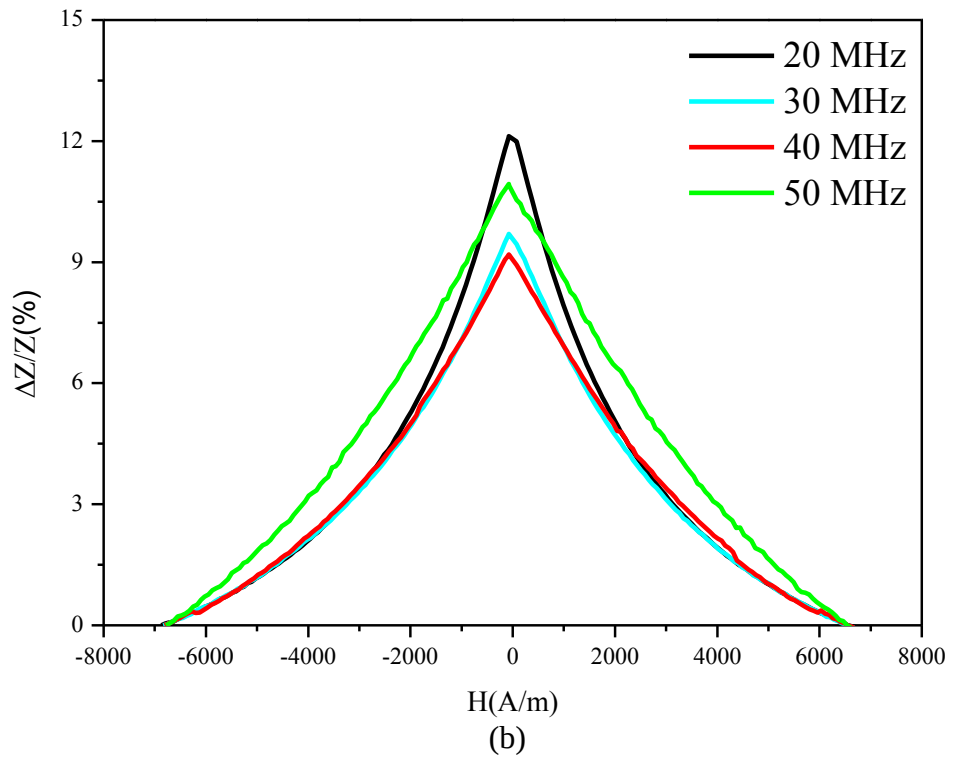
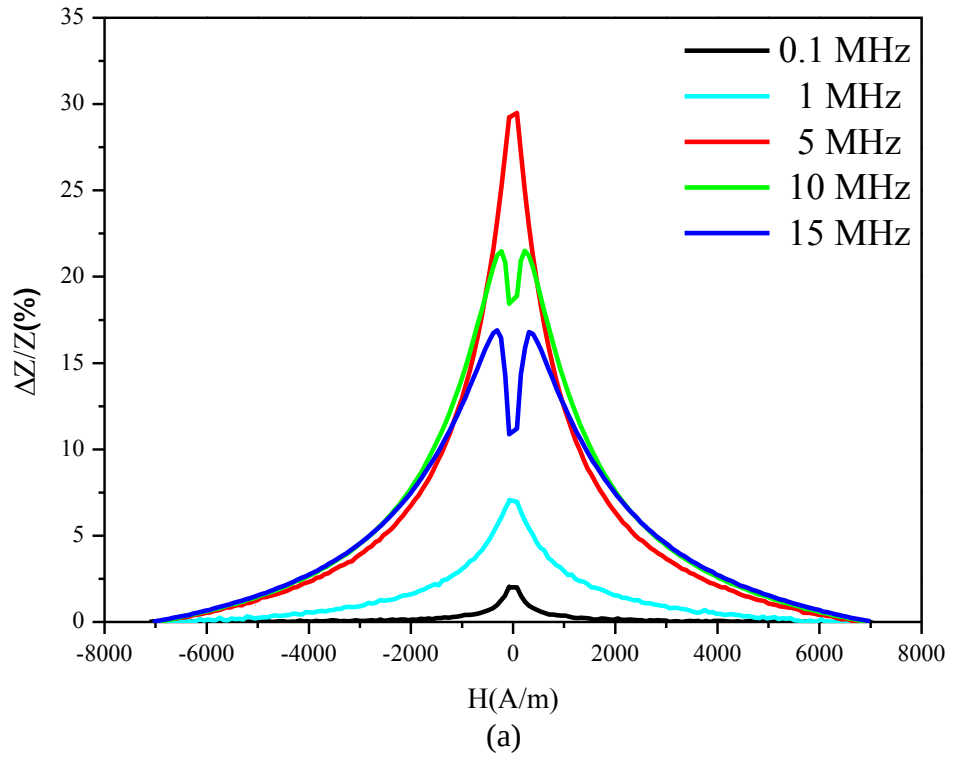


Şekil 4.7. Farklı dc manyetik alan değerlerinde ısıtılmış numunenin empedans-frekans değişim grafiği.

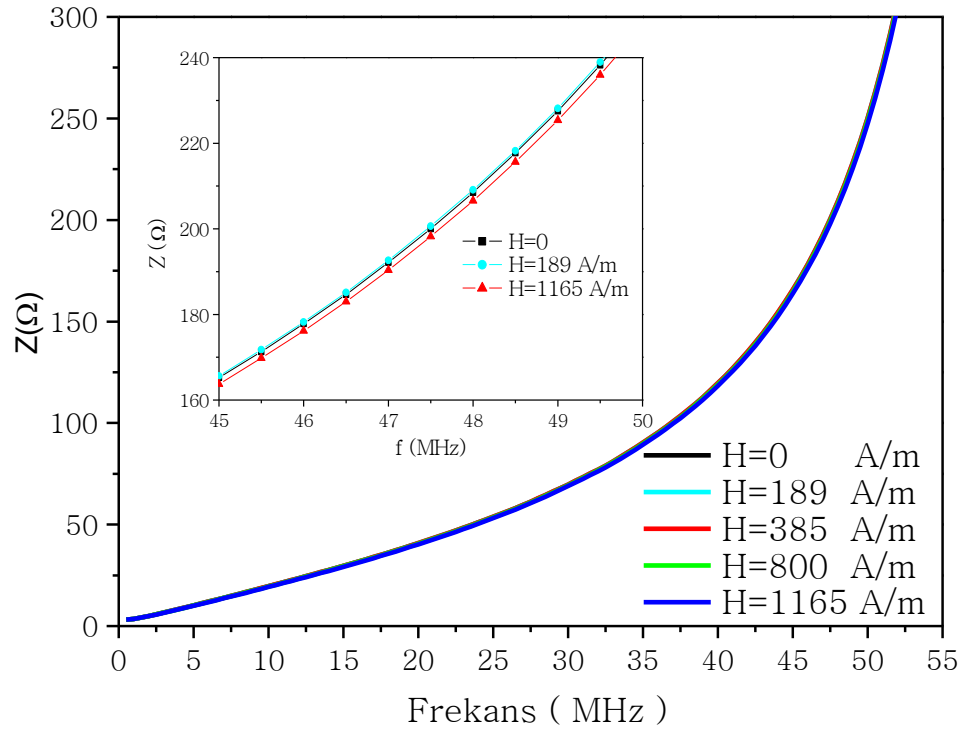
4.5. Isıl İşlem Görmüş $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ Şeritlerde Manyetoempedans Etki

Amorf şeritlere uygulanan ısıtılmış işlemler malzemelerin manyetik ve manyetoempedans özelliklerinde büyük değişim ortaya çıkarmaktadır. Isıl işlemin manyetoempedans etkide ortaya çıkaracağı değişimleri belirlemek için numuneler farklı sıcaklıklarda bir saat ısıtılma tabi tutulmuştur.

Şekil 4.8 a ve b, farklı frekans değerlerinde 450°C de bir saat ısıtılan $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şeritler için uygulanan alana karşı yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir. Maksimum yüzde manyetoempedans değişimi 5 MHz frekans değerinde yaklaşık %30 ve 50 MHz değerinde yaklaşık %11 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.9 uygulanan farklı dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değişimini göstermektedir. Uygulanan 385 A/m dc manyetik alan değerine kadar empedans değerinin azaldığı daha yüksek alanlarda ise bu değerin arttığı gözlenmiştir.

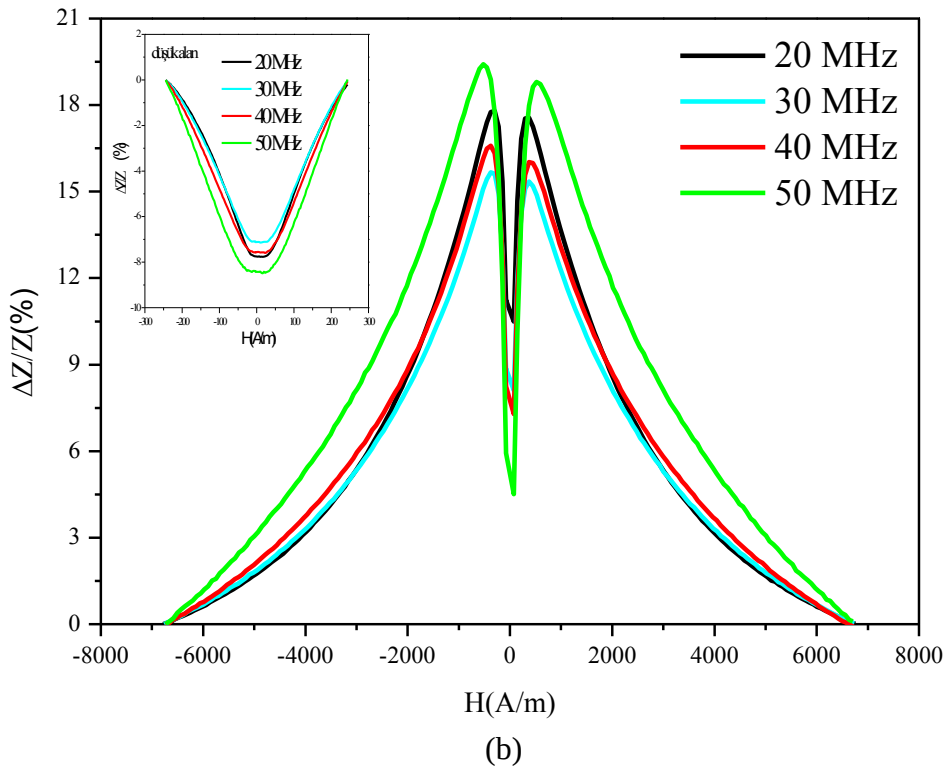
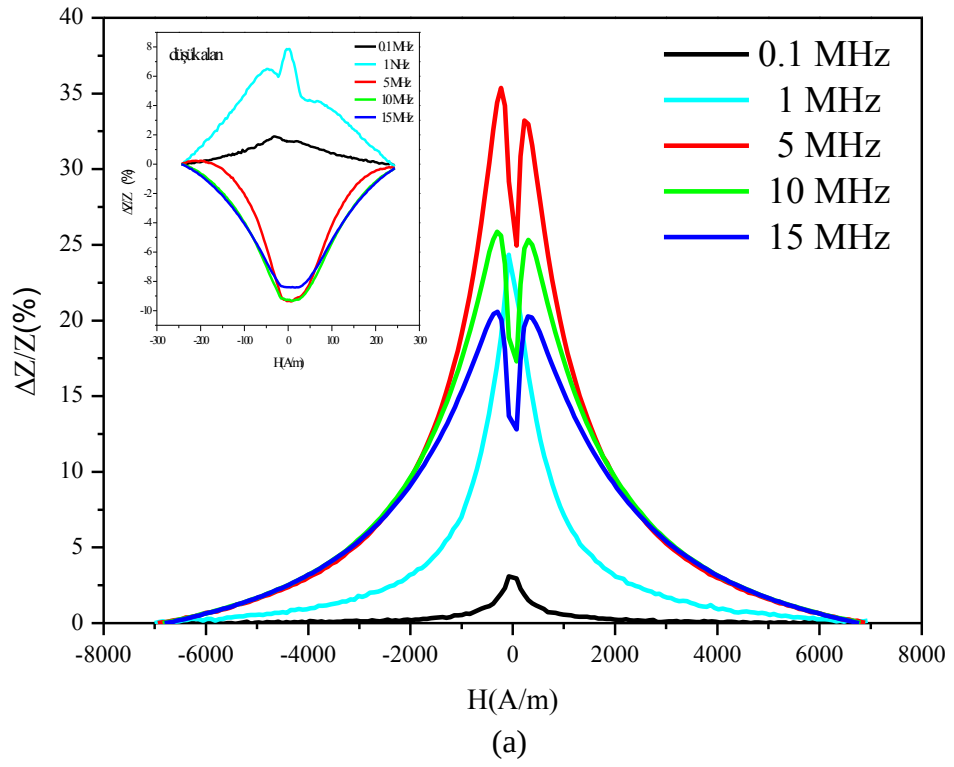


Şekil 4.8. 450 °C de bir saat ısıtılan numunenin farklı frekans değerleri için manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri.

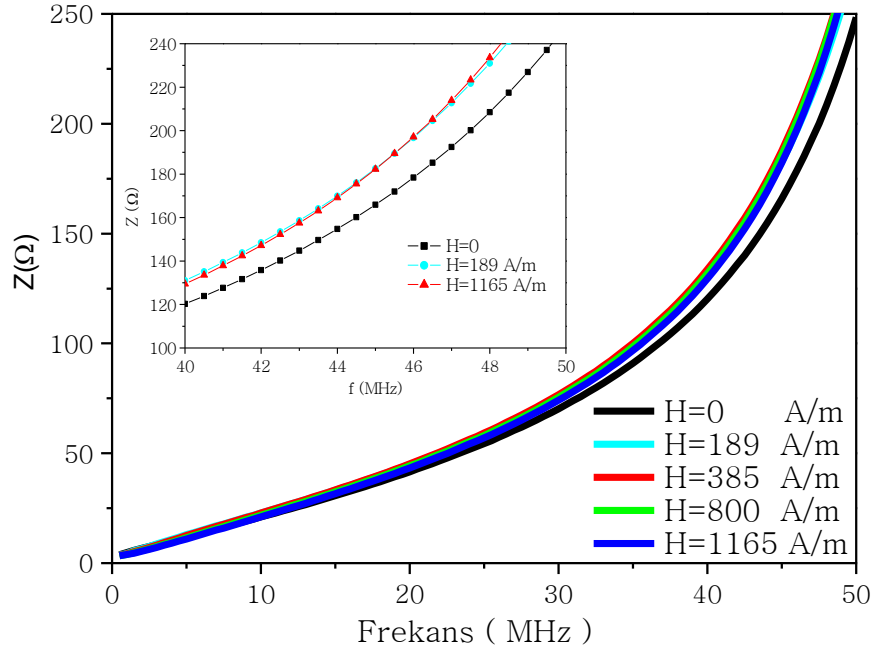


Şekil 4.9. Farklı dc manyetik alan değerlerinde 450 °C de bir saat ısıtım gören numunenin empedans-frekans değişimi.

Şekil 4.10, farklı frekans değerleri için 500 °C de ısıtım gören numunenin uygulanan alana bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimini, Şekil 4.11 ise uygulanan farklı dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değişimini göstermektedir. Bu sıcaklık değeri için maksimum yüzde manyetoempedans değişimi 5 MHz frekans değerine yaklaşık %35 olarak belirlenmiştir. 1 MHz frekans değerine kadar eğrilerin tek pik daha yüksek frekanslarda ise çift davranışı gösterdiği gözlenmiştir. Uygulanan dc manyetik alana bağlı olarak 450 °C de ısıtım gören numunedeki gibi pik değerin önce azaldığı daha sonra ise arttığı gözlenmiştir. Ayrıca 500 °C de ısıtım gören numunede uygulanan sabit manyetik alana bağlı olarak empedans değerinin arttığı Şekil 4.11 deki içteki grafikte açık bir şekilde görülmektedir.

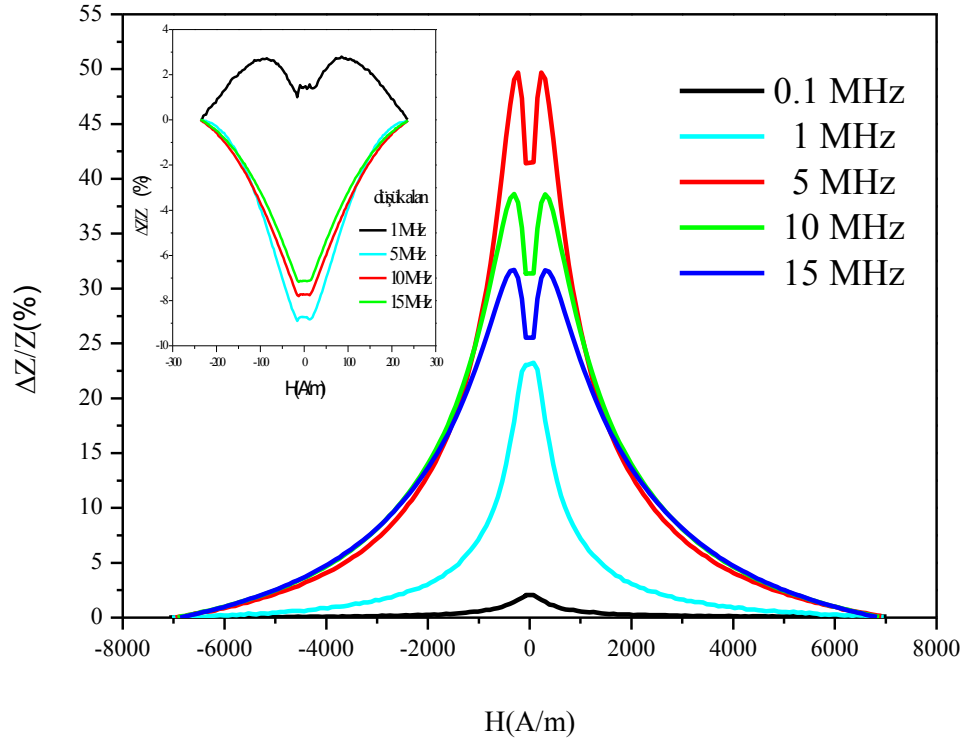


Şekil 4.10. 500 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.

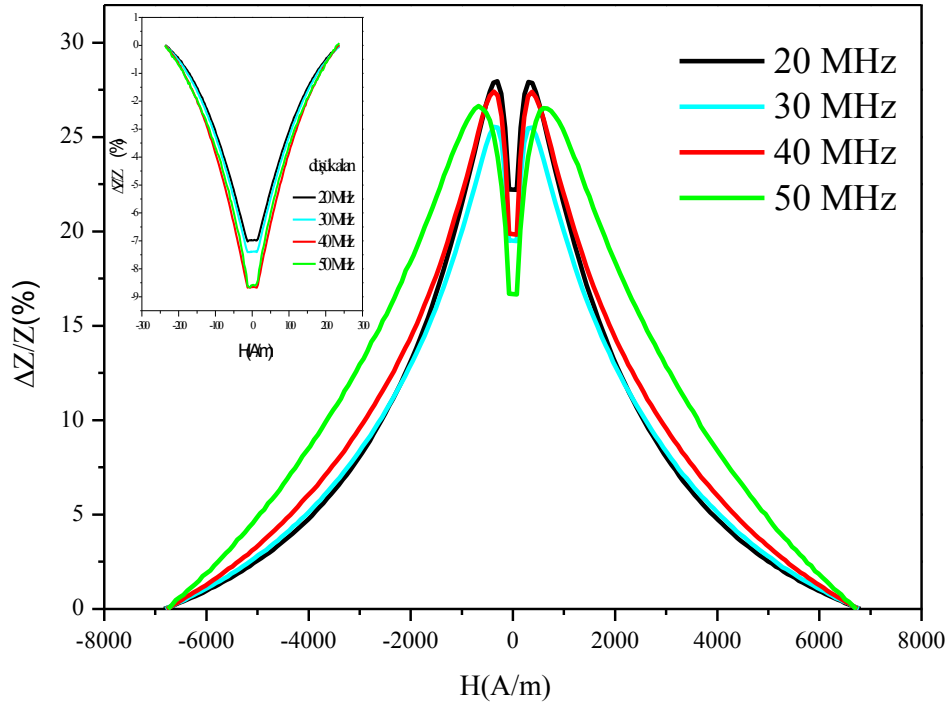


Şekil 4.11. Farklı dc manyetik alan değerlerinde 500 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin empedans- frekans değişimi.

Şekil 4.12 ve 4.13, 550 °C de ısıtıl işlem gören $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit numune için sırasıyla farklı frekanslar için uygulanan alana bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimini ve uygulanan sabit dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değişimi göstermektedir. Şekil 4.12 de içteki grafikten düşük alan bölgesi için yapılan ölçümlerde 1 MHz ve üzeri frekans değerlerinde eğrilerin çift pik davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Bu sıcaklık değeri için maksimum yüzde manyetoempedans değişimi 5 MHz frekans değerinde yaklaşık %50 olarak hesaplanmıştır. Uygulanan dc manyetik alana bağlı olarak empedans değerinin önce arttığı daha sonra ise azaldığı gözlenmiştir. Uygulanan 800 A/m dc manyetik alan değerine kadar pik değerinin daha düşük frekans değerlerinde ortaya çıktığı ve 1165 A/m değerinde ise daha yüksek frekans değerine kaydığı tespit edilmiştir.

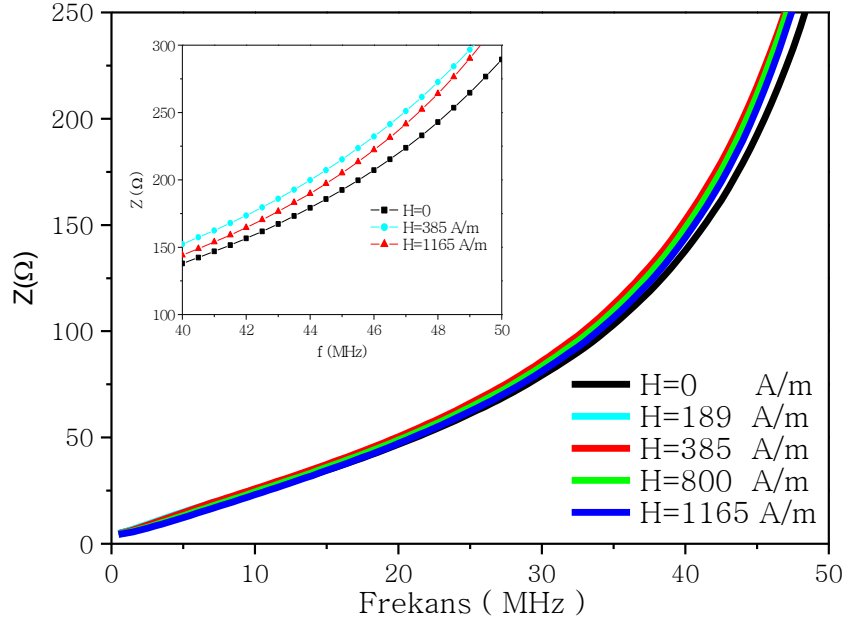


(a)



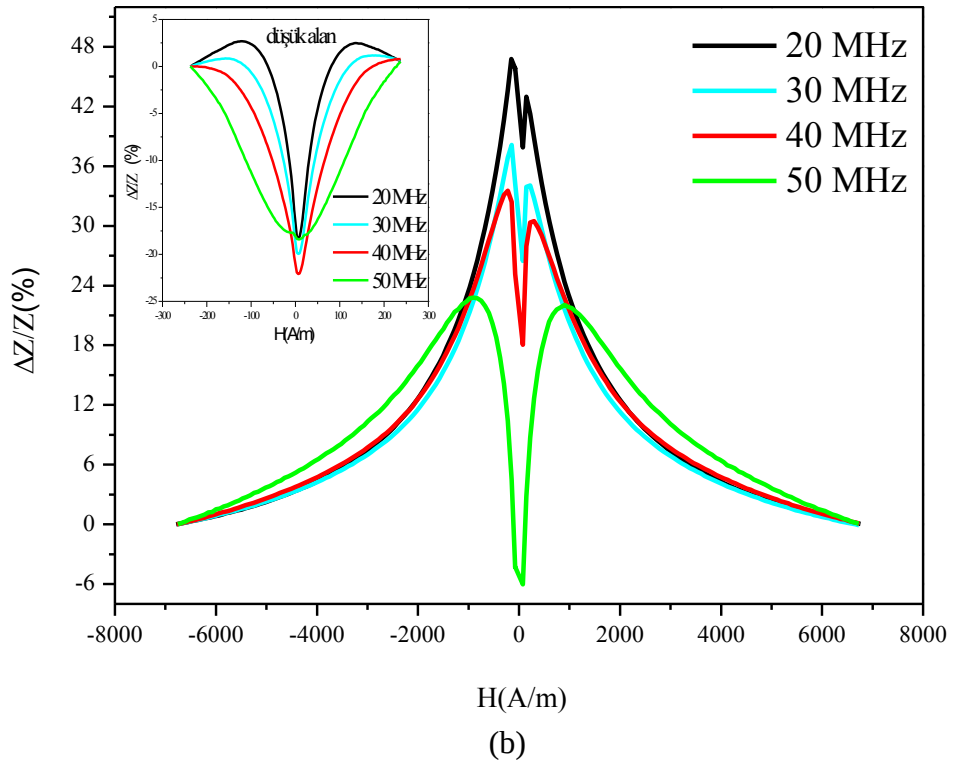
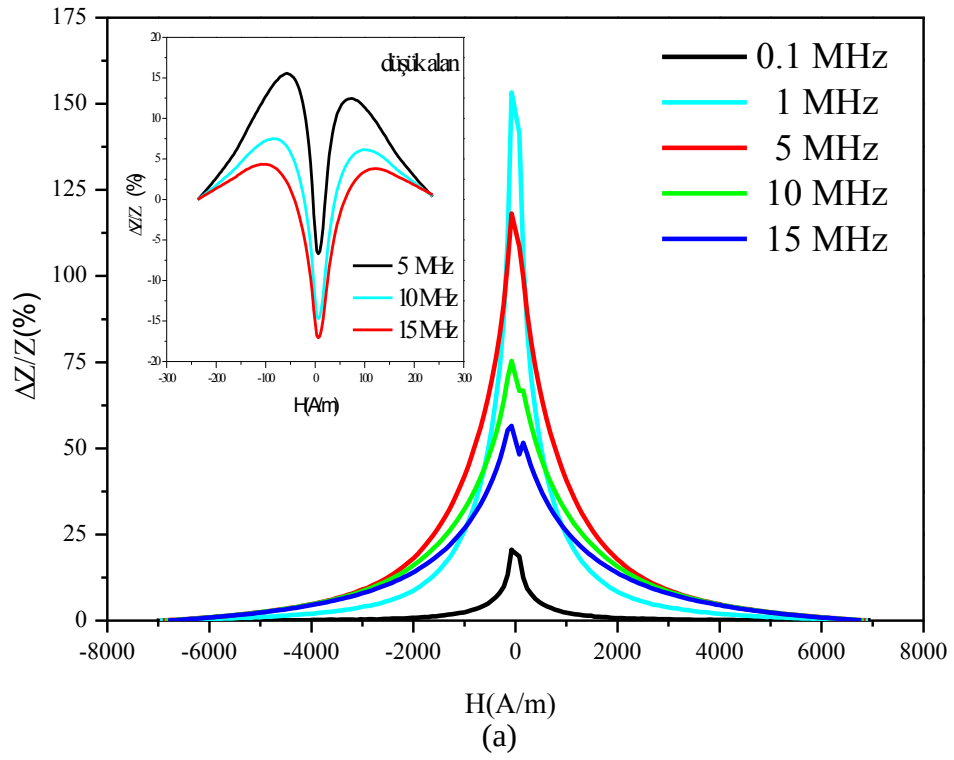
(b)

Şekil 4.12. 550 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.

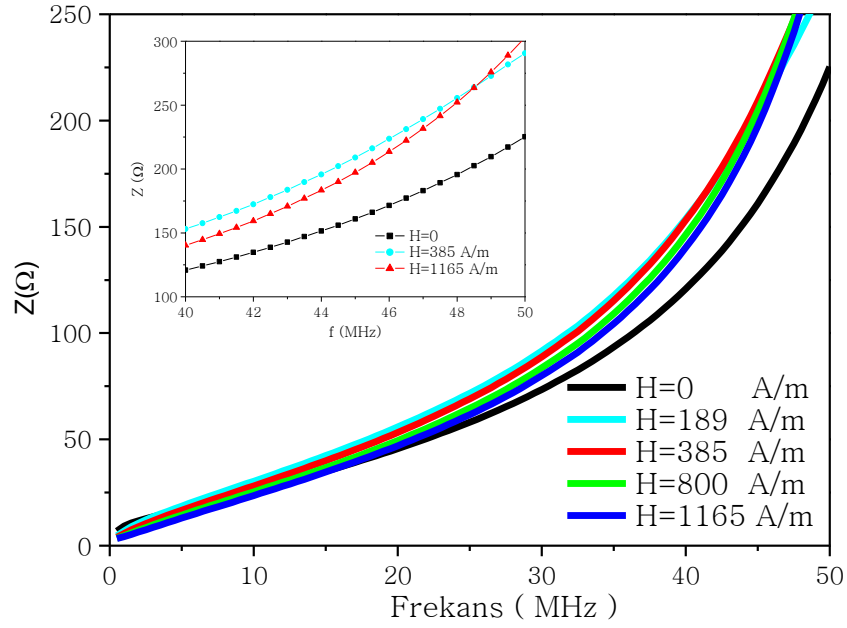


Şekil 4.13. Farklı dc manyetik alan değerlerinde 550 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin empedans-frekans değişimi.

600 °C de ısıtıl işlem gören numunenin farklı frekans değerleri için uygulanan alana bağlı olarak yüzde manyetoempedans değişimi Şekil 4.14’de verilmiştir. Bu numune için maksimum yüzde manyetoempedans değişimi 1 MHz frekans değerinde yaklaşık %150 olarak belirlenmiştir. Bu numune için çift pik gözlenen eğrilerde asimetrik davranışlar gözlenmiştir. Şekil 4.15 ise uygulanan farklı dc manyetik alan değerleri için frekansa karşı empedans değişimi göstermektedir. Bu eğrilerin gösterdiği davranış 550 °C de gözlenen eğrilere benzemektedir.

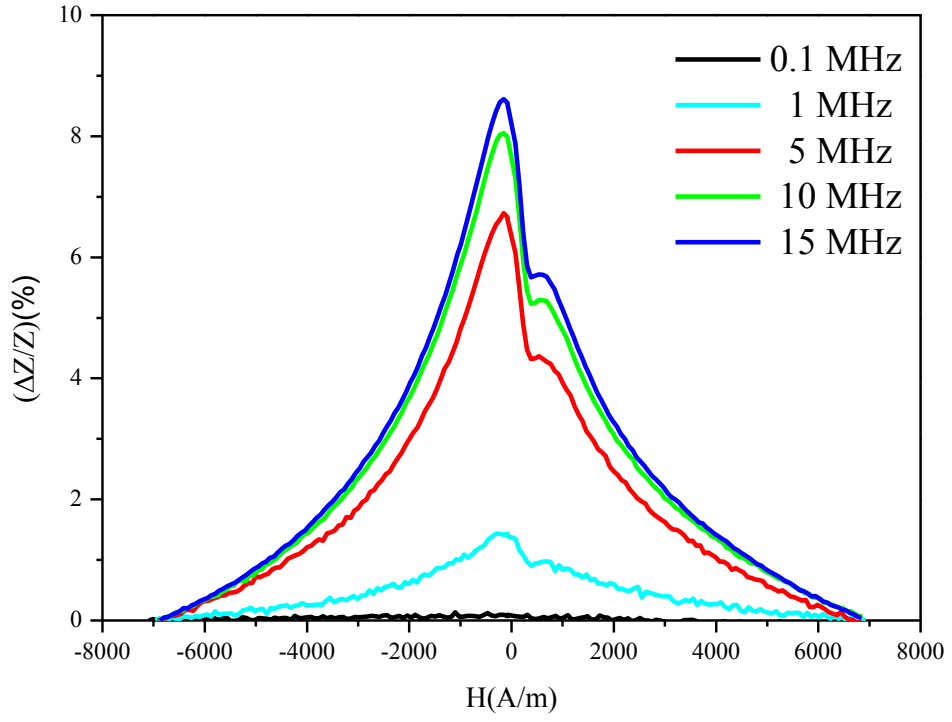


Şekil 4.14. 600 °C de bir saat ısıtıl işlemleri gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.

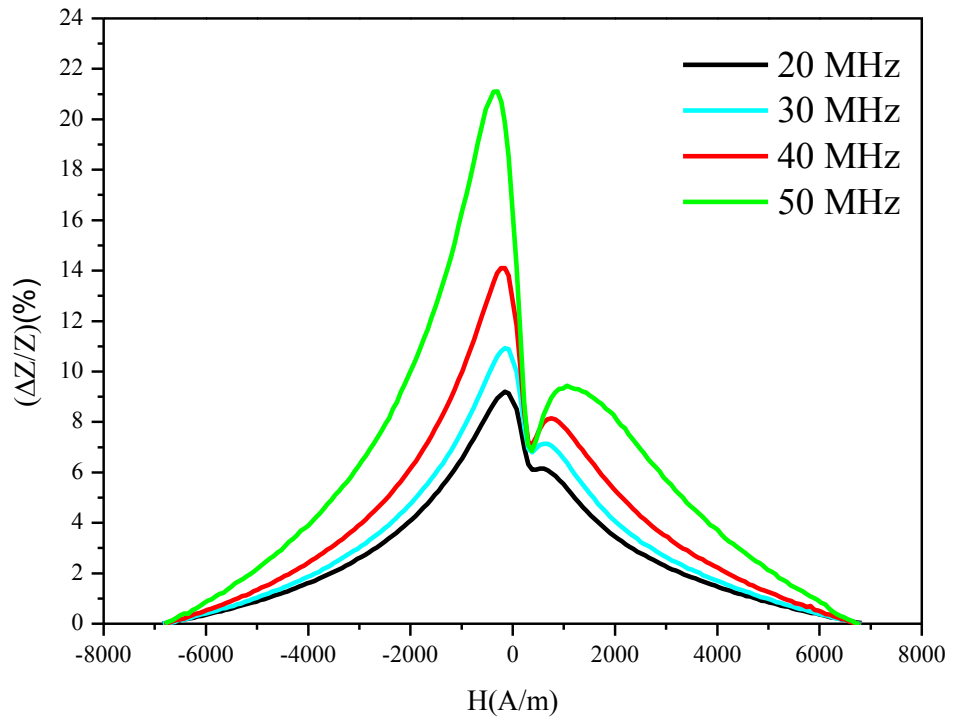


Şekil 4.15. Farklı dc manyetik alan değerlerinde 600 °C de bir saat ısıtılma gören numunenin empedans-frekans değişimi.

Şekil 4.16, farklı frekanslarda 650 °C de ısıtılma gören numunenin uygulanan dc manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimini gösterirken Şekil 4.17, uygulanan sabit dc manyetik alan değerlerinde frekansa karşı empedans değişimini göstermektedir. Bu sıcaklık değerinde diğer numunelerde maksimum değişimlerin gözlemlendiği 1 yada 5 MHz frekans değerlerinde değişimi daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca asimetric piklerin daha belirgin olarak ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Uygulanan sabit dc manyetik alan değerinin artması ile empedans değerinin ilk olarak arttığı, yüksek alan değerlerinde ise azaldığı Şekil 4.17 deki içteki grafikte açık bir şekilde görülmektedir.

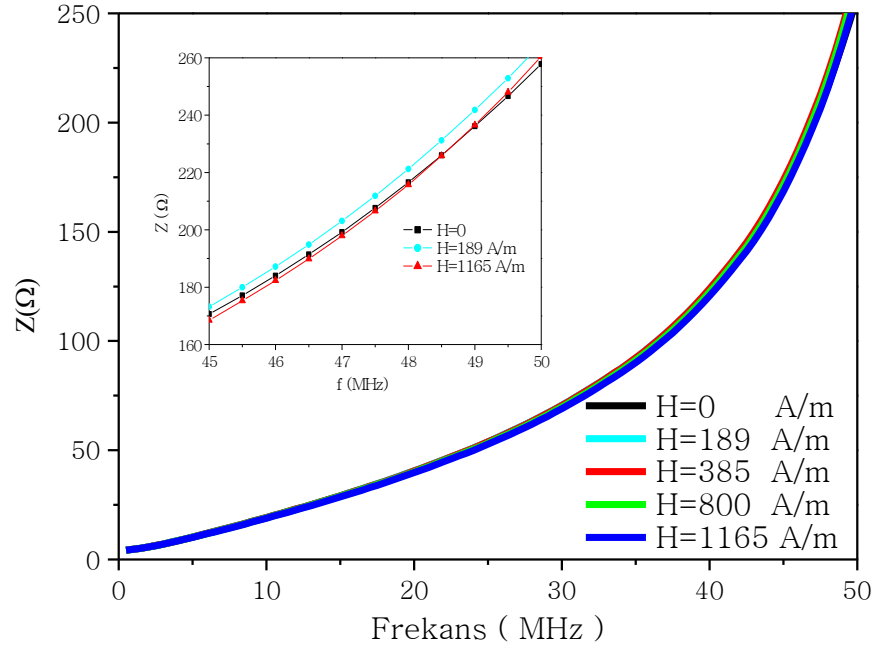


(a)



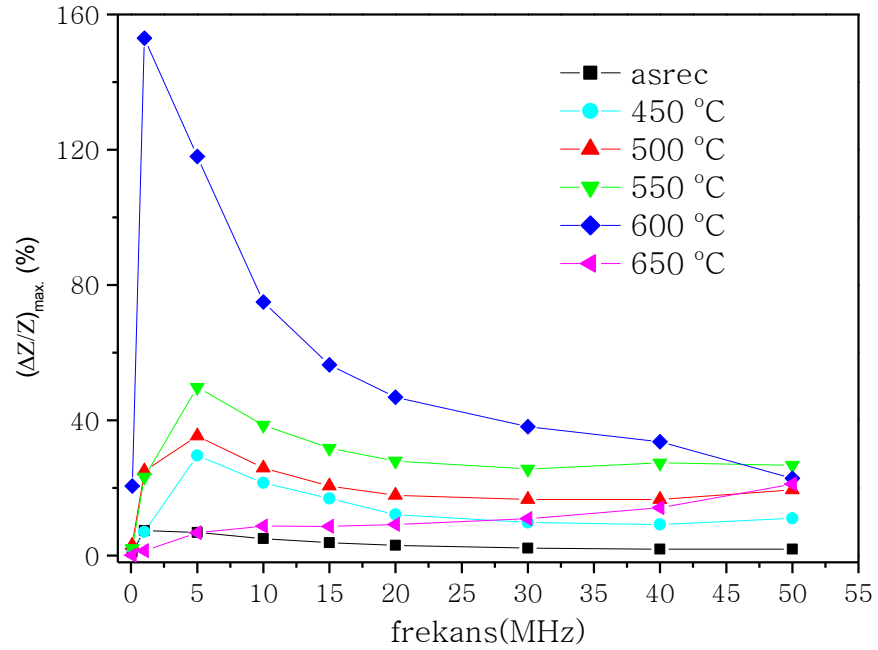
(b)

Şekil 4.16. 650 °C de bir saat ısıtıl işlem gören numunenin farklı frekanslardaki manyetik alana karşı yüzde manyetoempedans değişimleri, içteki grafikler düşük alan bölgesini göstermektedir.



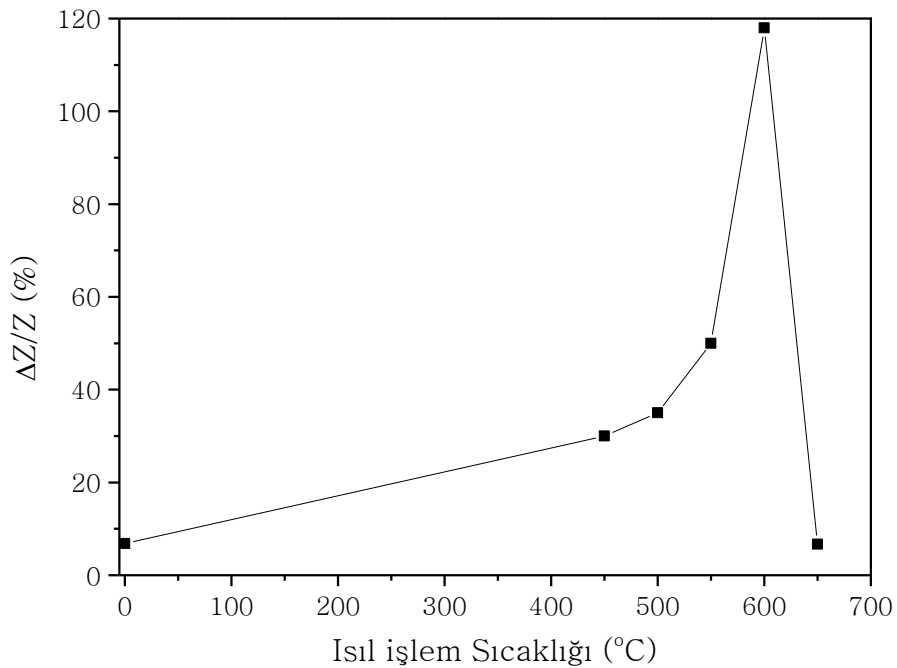
Şekil 4.17. Farklı dc manyetik alan değerlerinde 650 °C de bir saat ısıt işlem gören numunenin empedans-frekans değişimi.

Şekil 4.18, asreceived ve farklı sıcaklıklarda ısıt işlem gören numunenin frekansa karşı yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir.



Şekil 4.18. Farklı sıcaklık değerleri için $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ şerit numunenin maksimum yüzde manyetoempedans değerinin frekans ile değişimi.

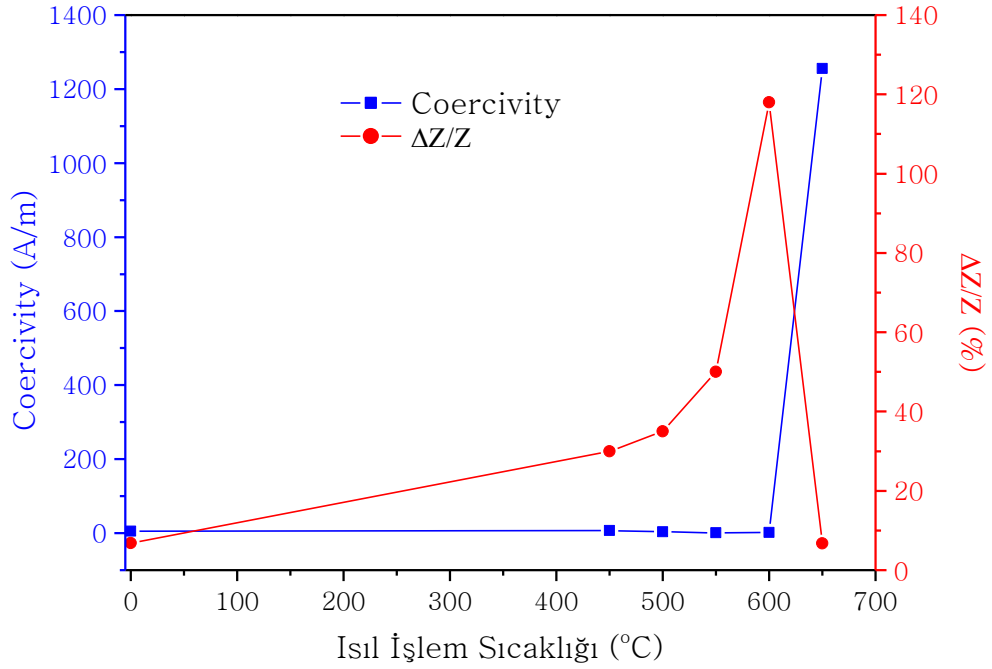
Frekansa bağılı olarak 600 °C ye kadar olan ısıt işlemlerde yüzde değişimin arttığı gözlenirken daha yüksek sıcaklıklarda bu değerin azaldığı gözlenmiştir. Maksimum yüzde manyetoempedans değişimi genellikle 5 MHz lik sürücü akım frekansında gözlenmiştir. Sürücü akım frekansının 1 MHz değerinin altındaki değerlerde MI değişimine katkı sadece domain wall hareketinden gelmektedir. $1 \leq f \leq 5$ MHz frekans aralığında yüzey etkisi önemli bir hale gelir ve bu durumda manyetizasyona hem domain wall hareketinden hem de manyetizasyon yöneliminden katkı gelir. Bu nedenle maksimum MI değişimi bu aralıkta gözlenmiştir. 5 MHz üzerindeki frekans değerlerinde ise ortaya çıkan eddy akımlarından dolayı domain wall hareketi baskılanır ve bu nedenle sadece manyetizasyon yönelimi etkin olur. Buna bağılı olarak da MI değeri azalış gösterir [39]. Şekil 4.19, 5 MHz sürücü akım frekans değeri için ısıt işlem sıcaklığına bağılı olarak yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir. Bu frekans değeri için yüzde manyetoempedans değişimi asreceived numune için % 6.7 ve 600°C de ısıt işlem gören numunede ise % 118 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.19. 5MHz sürücü akım frekans değerinde ısıt işlem sıcaklığına bağılı olarak yüzde manyetoempedans değişimi.

Ferromanyetik malzemelerin manyetoempedans ve manyetik özellikleri arasında önemli bir bağlantı vardır. Özellikle coercivity değeri yüzde manyetoempedans

değişimini önemli bir derecede etkilemektedir. Şekil 4.20, ısıtım sıcaklığına bağlı olarak coercivity ve yüzde manyetoempedans değişimini göstermektedir. Şekil 4.20 göz önünde bulundurularak şerit numunelerde hesaplanan coercivity ve yüzde manyetoempedans değerlerinin ısıtım ile değişimi düşük, orta ve uzun süreli olarak ayrılabilir. Düşük ısıtım sıcaklıklarında, 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 ısıtım işlemler numunenin iç streslerini azalttığından $K_\sigma = 3/2\lambda_s\sigma$ ile verilen manyeto-elastik anizotropiyi dolayısı ile toplam anizotropi enerjisini K azaltmaktadır.



Şekil 4.20. Isıtım sıcaklığına bağlı olarak coercivity ve 5MHz sürücü akım frekansında yüzde manyetoempedans değişimi.

Ayrıca 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 $I = I_0 e^{j\omega t}$ akım altında manyetik malzemenin manyetoempedansı (MI), aşağıdaki eşitlik ile verilir [42-44];

$$Z\alpha\sqrt{1+4\pi\chi_t}, \quad Z\alpha\sqrt{\mu_t} \quad (4.1)$$

Yapılan teorik modellerde alınganlık yada geçirgenlik anizotropi parametresiyle ters orantılı bir şekilde ($\chi \propto 1/K$) değişmektedir [32].

Buna bağlı olarak anizotropinin azalmasından dolayı manyetik alınganlık ve dolayısıyla empedans bu bölgede artmaktadır. Orta dereceli ısıtım sıcaklıklarında coercivity ve yüzde empedans değerlerinde fazla bir değişim gözlenmemiştir. Yüksek ısıtım sıcaklıklarında ise 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. Ayrıca 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.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Giriş

Bu bölümde elde edilen sonuçlar, tartışma ve gelecek çalışmalar verilmiştir.

5.2. Deneysel Sonuçlar Ve Tartışma

Amorf ferromanyetik malzemelere uygulanan ısıt işlemler malzemelerin yapısal ve manyetik özelliklerinde önemli değişimler ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada ısıt işlem fırın altında yapılmıştır. Uygulanan ısıt işlemlerin numunelerde ortaya çıkardığı yapısal değişimler X-ışınları ile incelenmiştir. Bu sonuçlardan ısıt işlem görmeyen numunenin amorf yapıda olduğu belirlenmiştir. Isıt işlem gören numunelerde ise ısıt işlem sıcaklığına bağlı olarak ilk önce α -Fe(Si) fazlarının olduğu daha yüksek sıcaklıklarda ise bu fazlara ek olarak Fe₂B fazının ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Ferromanyetik malzemelerin soft özelliklerinin belirlenmesinde coercivity değeri önemli bir parametredir. Bu amaçla ilk olarak ısıt işlem görmemiş ve 450-650 °C arasında bir saat ısıt işlem görmüş şerit numunelerin manyetizasyon ölçümleri alınarak bu eğrilerden coercivity değerleri belirlenmiştir. Isıt işlem sıcaklığına bağlı olarak düşük sıcaklıklarda coercivity değerinin fazla değişmediği orta dereceli sıcaklıklarda bu değerin azaldığı ve yüksek sıcaklık değerlerinde ise coercivity değerinin arttığı tespit edilmiştir.

Manyetoempedans ölçümleri, uygulanan dış bir dc alan altında 0.1 MHz - 50 MHz aralığında alınmıştır. Bu ölçümlerde ortaya çıkan eğrilerde sürücü akım frekansının önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Düşük frekanslarda genellikle eğriler tek pik davranışları, yüksek frekanslarda ise çift pik davranışları sergilemektedir. Eğrilerde ortaya çıkan tek pik davranışları domain wall hareketi, çift pik davranışları ise manyetik moment yönelimi ile izah edilmektedir [34]. Şerit numuneler için empedans malzemenin enine geçirgenliğiyle doğru orantılıdır. Ferromanyetik malzemelerde geçirgenliğe katkı hem domain wall hareketinden hem de moment yöneliminden gelmektedir. Düşük frekanslarda (0.1 MHz) geçirgenliğe katkı sadece domain wall hareketinden gelmektedir. Orta dereceli frekanslarda

($1 \leq f \leq 5 \text{ MHz}$) ise yüzey etkisine bağlı olarak her iki süreçten katkı gelir ve bu nedenle en büyük değişimler bu frekans aralığında gözlenmiştir. Yüksek frekanslarda ise eddy akımlarından dolayı domain wall hareketi baskılandığından katkı sadece moment yöneliminden kaynaklıdır. Şerit numunelerin manyetoempedans değerlerinde ısıtılmanın önemli bir etkiye neden olduğu belirlenmiştir. Geçirgenlik dolayısıyla empedans anizotropi ile ters orantılıdır ($\mu \propto 1/K$).

Düşük ısıtılma sıcaklıklarında, yüzde manyetoempedans değişiminde artma olmaktadır. Bu bölgede yapı tamamen amorf özelliğini koruduğundan, kristal anizotropinin toplam anizotropiye katkısı sıfırdır. Ancak bu bölgede uygulanan ısıtılma işlemleri numunenin iç stresleri azalttığından $K_{\sigma} = 3/2 \lambda_s \sigma$ ile verilen manyeto-elastik anizotropiyi dolayısıyla ile toplam anizotropi enerjisini K azaltmaktadır. Orta dereceli ısıtılma işlemlerinde yüzde empedans değerlerinde fazla bir değişim gözlenmemiştir. Yüksek ısıtılma sıcaklıklarında ise yapıda Fe_2B fazı oluşmaktadır. Manyetik olarak numunenin softluğunu bozan bu faz, toplam anizotropi enerji değerinde artışa neden olur. Buna bağlı olarak geçirgenlik (μ) ve dolayısıyla empedans değeri azalmaktadır.

Şerit numunelerde empedans değeri, numunenin enine geçirgenliğiyle orantılıdır. Bu nedenle numune eksenine boyunca uygulanan dış alan enine geçirgenlik değerini dolayısıyla empedans değerini değiştirecektir. Isıtılma işlemi görmeyen numuneler için, orta dereceli dc manyetik alan değerlerinde empedans değeri azalış ortaya çıkmaktadır. Daha yüksek alan değerinde ise ($H_{dc} = 1165 \text{ A/m}$) empedans değerinin tekrar arttığı belirlenmiştir. Isıtılma işlemi gören numunelerde ise genellikle düşük alan değerlerinde empedans değerinin arttığı, yüksek alanlarda ise azaldığı gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklıklarda ısıtılma işlemi gören numunelerde asimetric davranışların yani negatif ve pozitif alan değerlerinde ortaya çıkan piklerin aynı değerlere karşılık gelmediği belirlenmiştir. Bu durum ısıtılma sıcaklığına bağlı olarak numunede ortaya çıkan anizotropi dağılımının homojen olmadığını göstermektedir [45].

5.3. Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada ısıtıl işlem görmemiş ve fırın altında ısıtıl işlem gören şerit numunelerin özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin fırın altında ısıtıl işleminden farklı olarak akım ve alan altında ısıtıl işlem uygulayarak malzemelerin özellikleri incelenebilir. Ayrıca alan yerine stres uygulayarak bu tür malzemelerin stres empedans çalışmaları araştırılabilir.

6. 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]- M.E. McHenry, M.A. Willard, D.E. Laughlin, *Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets*, **Prog Mater Sci**, 44 (1999) 291–433.
- [6]- Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Ymauchi, *New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure*, **J Appl Phys**, 64 (1988) 6044.
- [7]- M. E. McHenry, M.A. Willard, D. E. Laughlin, *Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets*, **Progress in Materials Science**, 44 (1999) 291-433.
- [8]- T.H. Noh, W.K. Pi, H.J. Kim, I.K.J. Kang, *Magnetic properties of $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3(Si_xB_{1-x})_{22.5}$ ($x=0.5-0.8$) alloys with ultrafine grain structures*, **Appl Phys**, 69 (1991) 5921.
- [9]- J. Moya, M. Vazquez, V. Cremaschi, B. Arcondo, H. Sirkin, *Structural, mechanical and magnetic properties in heat-treated $Fe_{73.5}Si_{22.5-x}B_xNb_3Cu_1$ ($6 \leq x \leq 12$) alloy ribbons*, **Nanostructure**, 8 (1997) 611-621.
- [10]- D. Muraca, V. Cremaschi, J. Moya, H. Sirkin, *FINEMET type alloy without Si: Structural and magnetic properties*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 320 (2008) 1639–1644.
- [11]- V. Hajko, K. Csach, S. Pan, N. Danilenko, *Chromium effect on some properties of melt-spun amorphous and nanostructured alloys*, **Nanostructured**, 8 (1997) 961-967.
- [12]- V. Kolesár, V. Gırman, P. Sovák, K. Saksl, *Study Of Crystallization Process In V-Substituted Finemet Alloys*, **Acta Electrotechnica et Informatica**, 10 (2010) 66–70.
- [13]- Manh-Huong Phan , Hua-Xin Peng, *Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications*, **Progress in Materials Science.**, 53 (2008) 323–420.
- [14]- L.V. Panina, K. Mohri, *Magneto-impedance effect in amorphous wires*, **Appl Phys Lett**, 65 (1994) 1189–91.
- [15]- Panina LV, Mohri K, Uchiyama T, Noda M, *Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films*, **IEEE Trans Magn**, 31 (1995) 1249–60.
- [16]- L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Electrodynamics of continuous media*, **Oxford: Pergamon Press**, 1975.
- [17]- M. Knobel, M.L. Sanchez, Gomez-Polo C, Marin P, Vazquez M, Hernando A. Giant, *Magneto-impedance effect in nanostructured magnetic wires*, **J. Appl Phys**, 79 (1996) 1646.
- [18]- R.S. Beach, A.E. Berkowitz, **Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire**, **Appl Phys Lett.**, 64 (1994) 3652–4.
- [19]- K. Mohri, T. Kohsawa, K. Kawashima, H. Yoshida, L.V. Panina, *Magneto-inductive effect (MI effect) in amorphous wires*, **IEEE Trans Magn**, 28 (1992) 3150.

- [20]- D. Menard, M. Britel, P. Ciureanu, A. Yelon., *Giant magnetoimpedance in a cylindrical magnetic conductor*, **J. Appl Phys**, 84 (1998) 2805–14.
- [21]- A. Yelon, D. Menard, M. Brittel, P. Ciureanu., *Calculations of giant magnetoimpedance and of ferromagnetic resonance response are rigorously equivalent*, **Appl. Phys Lett**, 69 (1996) 3084.
- [22]- C. Garcia, J. Gonzalez, A. Chizhik, A. Zhukov, J. M. Blanco, *Asymmetrical magneto-impedance effect in Fe-rich amorphous wires*, **J. Appl. Phys**, 95 (2004) 6756-6758.
- [23]- S. Atalay, *Comparative study of magnetoimpedance effect in current and field annealed $(\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.05}\text{Ni}_{0.05})_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ amorphous ribbons*, **Physica B**, 368 (2005) 273–278.
- [24]- N. Bayri, V.S. Kolat, F.E. Atalay, S. Atalay, *The effect of furnace annealing and surface crystallization on the anisotropy, ΔE and magnetoimpedance effects in $\text{Fe}_{71}\text{Cr}_7\text{Si}_9\text{B}_{13}$ amorphous wires*, **J. Phys. D: Appl. Phys**, 37 (2004) 3067–3072.
- [25]- Wei-Ping, ChenShu-Qin Xiao, Wen-Jing Wang, Hui-Min Yuan, Yi-Hua Liu, *Giant magnetoimpedance in multilayered $\text{Fe}_{71.5}\text{Cu}_1\text{Cr}_{2.5}\text{V}_4\text{Si}_{12}\text{B}_9$ films*, **J. Phys. D: Appl. Phys**, 37 (2004) 2780–2784.
- [26]- F.E. Atalay, H. Kaya, S. Atalay, *Giant magnetoimpedance effect in electroplated CoNiFe/Cu wires with varying Ni, Fe and Co content*, **Journal of Alloys and Compounds**, 420 (2006) 9–14.
- [27]- S. Atalay, N. Bayri, *Low field magnetoimpedance in FeSiB and CoSiB amorphous wires*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 272–276 (2004) 1365–1367.
- [28]- C. Gomez-Polo, M. Vazquez, *Thermal dependence of magneto-impedance in FeCrSiBCuNb nanocrystalline alloy*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 272–276 (2004) 1853–1854.
- [29]- Pablo Álvarez-Alonso, J.D. Santos, María J. Pérez, C.F. Sánchez-Valdes, J.L. Sánchez Llamazares, Pedro Gorria, *The substitution effect of chromium on the magnetic properties of $(\text{Fe}_{1-x}\text{Cr}_x)_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$ metallic glasses ($0.02 \leq x \leq 0.14$)*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 347 (2013) 75–78.
- [30]- M.A. Correa, F. Bohn, A.D.C. Viegas, A.M.H.deAndrade, L.F. Schelp, R.L. Sommer, *Magnetoimpedance effect in structured multilayered amorphous thin films*, **J. Phys. D: Appl. Phys**, 41 (2008) 175003 (6pp).
- [31]- F.E. Atalay, H. Kaya, S. Atalay, *Magnetoimpedance effect in electroplated NiFeRu/Cu wire*, **J. Phys. D: Appl. Phys**, 39 (2006) 431–436.
- [32]- V.S. Kolat, N. Bayri, S. Michalik, T. Izgi, P. Sovak, F.E. Atalay, H. Gencer, S. Atalay, *Magnetic and magnetoimpedance properties of Mn-doped FINEMET*, **Journal of Non-Crystalline Solids**, 355 (2009) 2562–2566.
- [33]- 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. Technol**, 172 (2006) 182-187.
- [34]- M.L. Sartorelli, M. Knobel, J. Schoenmaker, *Giant magnetoimpedance and its relaxation in Co-Fe-Si-B amorphous ribbons*, **Appl. Phys. Lett**, 71 (1997) 2208–2210.
- [35]- T. Sahoo, B. Majumdar, V.Srinivas, M.Srinivas, T.K.Nath, G.Agarwal, *Improved magneto impedance and mechanical properties on nano crystallization of amorphous $\text{Fe}_{68.5}\text{Si}_{18.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{B}_9$ ribbons*, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 343 (2013) 13–20.

- [36]- M.H. Phan, H.X. Peng, *Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications*, **Prog. Mater. Sci**, 53 (2008) 323-420.
- [37]- 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.
- [38]- M.H. Phan, H.X. Peng, S.C. Yu, M. Vazquez, *Optimized giant magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline materials*, **J. Appl. Phys**, 99 (2006) 08C505.
- [39]- M.H. Phan H.X. Peng , M.R. Wisnom, S.C. Yu, C.G. Kim, N.H. Nghi, *Effect of annealing temperature on permeability and giant magneto-impedance of Fe-based amorphous ribbon*, **Sensors and Actuators A.**, 129 (2006) 62–65.
- [40]- I.Z. Rahman, Md. Kamruzzaman, M.A. Rahman, *Magneto-impedance effect in Co-based metallic glass ribbons*, **Journal of Materials Processing Technology**, 153–154 (2004) 791–796.
- [41]- G. Herzer, *Grain Size Dependence Of Coercivity And Permeability In Nanocrystalline Ferromagnets*, **IEEE Transactions On Magnetism**, 26 (1990) 1397-1402.
- [42]- 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.
- [43]- 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.
- [44]- 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.
- [45]- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Naim GÜZELBAĞ

Doğum Yeri ve Tarihi: Varto, 01.02.1962

Adres: Aşağı Bağlar Mah. Aşağı Bağlar 1.Cad. Konakpark Ap. No:9/11 Malatya

E-Posta: naimguzelbag@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Malatya

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 1988 tarihiden bu yana Milli Eğitim Bakanlığında

Fizik Öğretmeni olarak görev yapmaktayım.