



**Aileme**

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AMORF FERROMANYETİK MADDELERDE MATTEUCCI VE MANYETO-İNDÜKTİF  
ETKİLER

Hasan MALKAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI


MALATYA

1995

## "Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne"

İş bu çalışma jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan Prof. Dr. H. Hüseyin Uslu 

Üye Y. Doç. Dr. İlhan Aksoy 

Üye Y. Doç. Dr. Selvak Atalay 

ONAY

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylım.

12.12.1995

  
Prof. Dr. Esref YÜKSEL  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## ÖZET

Bu çalışmada, teknolojik açıdan önemli uygulama alanına sahip olan FeSiB ve CoSiB amorf ferromanyetik tellerin dairesel yöndeki manyetik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, tele AC bir akım uygulanarak telin iki ucu arasında oluşan  $e_L$  voltajı ölçülmüştür. Ayrıca telin uzunluğu doğrultusunda tele AC dış bir manyetik alan uygulanarak yine telin iki ucu arasında oluşan Matteucci voltajı ölçülmüştür. Bunlara ek olarak ısıtma işlemlerinin tellerin dairesel yöndeki manyetik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir.

Elde edilen bu sonuçları kullanarak ısıtma işlemine tabi tutulmamış ve tutulmuş olan tellerin manyetik yapıları tartışılmıştır ve ısıtma işlemi görmüş FeSiB alaşımlı tel için yeni bir domain yapısı sunulmuştur.



## ABSTRACT

In this study, the circumferential magnetic properties of FeSiB and CoSiB amorphous ferromagnetic wires are investigated which have a wide variety of application in technology. So, the induced  $e_L$  voltage between both ends of the wire were measured by applying an AC current through the wire. Also, induced Matteucci voltage between both ends of the wire were measured by applying an external AC magnetic field in wire axis direction. Moreover the effect of furnace annealing on the circumferential properties were studied.

Using obtained results the magnetic structure of as-cast and annealed wire were discussed and a new domain structure for annealed FeSiB wire was proposed.



## TEŐEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında bana sürekli destek olan, benimle ilgilenen yerinde ve zamanında yaptığı uyarılarla çalıőmama katkısı sebebi ile sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Selçuk ATALAY'a teőekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar bana olan maddi ve manevi hiç bir desteđini esirgemeyen aileme en içten teőekkürlerimi sunarım.

Bölümümüzün uzmanı Kadir TOY'a değerli yardımlarından dolayı çok teőekkür ederim.

Ayrıca çalıőmalarım sırasında bana manevi desteğini bir an bile eksik etmeyen arkadaşım Funda ERSOY ATALAY'a, Rıza ÖZTÜRK'e, Őeref ÜSTÜNEL'e ve diğer bütün arkadaşlarıma teőekkürler ederim.

Araőtırmalarımnda kullandığım telleri sağladığından dolayı UNİTİKA Őirketine özellikle teőekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

<u>İçindekiler</u>	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
1.2. Ferromanyetik Maddeler ve Bunlarla İlgili Temel Parametreler	2
1.2.1. Ferromanyetik maddeler	2
1.2.2. Temel parametreler	3
1.3. Anisotropi Enerjisi	5
2. AMORF TELLERİN ÜRETİMİ VE TEORİSİ	8
2.1. Amorf Tellerin Üretimi	8
2.2. Isıl İşlem Görmemiş Amorf Ferromanyetik Tellerde Stres ve Domain Yapısı	10
2.3. Amorf Ferromanyetik Tellerde Matteucci Etki	13
2.4. Amorf Ferromanyetik Tellerde Manyeto-İndüktif Etki	15
2.5. Maddelerin Manyetoelatik Özellikleri	17
2.5.1. Manyetostriksiyon	17
2.5.2. $\Delta E$ etki	17
2.6. Dış Streslerin Ferromanyetik Maddelerin M-H <sub>w</sub> Eğrisi Üzerindeki Etkisi	19
3. DENEYSEL YÖNTEM	21
3.1. Numune Hazırlanması ve Isıl İşlemler	21
3.2. Matteucci Etki Ölçümleri	22
3.3. Manyeto-İndüktif Etki Ölçümleri	24
3.4. Histerisis Eğrilerinin Elde Edilişi	27
3.5. Hata Kaynakları	27

4.	MATTEUCCI ETKİ İLE İLGİLİ DENEYSEL SONUÇLAR	29
4.1.	Giriş	29
4.2.	Isıl İşlem Görmemiş Amorf Ferromanyetik Teller	29
4.3.	Isıl İşlemin Matteucci Voltajına Etkisi	36
4.4.	Amorf Ferromanyetik Tellerde Frekansın ve AC Dış Manyetik Alanın Etkisi	38
4.5.	Amorf Ferromanyetik Tellerde Stresin Etkisi	51
5.	MANYETO-İNDÜKTİF ETKİ İLGİLİ DENEYSEL SONUÇLAR	55
5.1.	Giriş	55
5.2.	Isıl İşlem Görmemiş Amorf Ferromanyetik FeSiB ve CoSiB Teller	55
5.3.	Isıl İşlem Görmüş Amorf Ferromanyetik Teller	63
5.4.	Frekansın ve DC Dış Manyetik Alanın Etkileri	70
5.5.	Amorf Ferromanyetik Tellere Uygulanan AC Akımın $e_L$ Üzerine Etkisi	84
5.6.	Amorf Ferromanyetik FeSiB ve CoSiB Tellere Dış Stresin Etkisi	90
6.	SONUÇLAR	96
7.	KAYNAKLAR	97
8.	ÖZGEÇMİŞ	100



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Ferromanyetik maddede iki muhtemel domain yapısı	2
1.2. Ferromanyetik madde içinde domain duvarı	3
1.3. Uygulanan manyetik alan ile tipik bir ferromanyetik maddenin manyetizasyon değişimi (M-H <sub>w</sub> eğrisi)	4
1.4. Anisotropi enerjisinin tanımlanması	6
2.1. Amorf tellerin üretim sisteminin a) önden görünüş, b) yandan görünüş	9
2.2. Katılaşma süresince amorf telin enine ve yandan şematik görünüşü	11
2.3. Fe-esaslı ve Co-esaslı tellerde kolay eksenin ve iç stresin temsili gösterimi	11
2.4. Co ve Fe alaşımlı ısıtılmış işlem görmemiş tellerin M-H <sub>w</sub> eğrileri	12
2.5. Fe-esaslı tel ( $\lambda > 0$ ) ve Co-esaslı tel ( $\lambda < 0$ ) için domain yapıları	13
2.6. Co esaslı telde Matteucci etkisi	14
2.7. e <sub>L</sub> 'yi elde etmek için deneysel devre	16
2.8. Sıfır manyetostriktif ısıtılmış işlem görmemiş telin a) I <sub>w</sub> , b) e <sub>tot</sub> ve c) e <sub>L</sub> 'nin dalga biçimlerinin fotoğrafı	16
2.9. Çeşitli $\theta$ açıları için normalize olmuş H'a karşı normalize edilmiş elastik katsayılarının grafiği	18
2.10. $\lambda_s > 0$ durumunda (a) $\sigma = 0$ için ve (b) $\sigma > 0$ için Fe esaslı telde domain yapısı	19
2.11. $\lambda_s > 0$ olan bir ferromanyetik madde için M-H <sub>w</sub> eğrileri	20
3.1. Tüp fırının sıcaklık grafiği	22
3.2. Matteucci voltajı ölçüm sisteminin blok diyagramı	23
3.3. Isıtılmış işlem görmüş CoSiB telde I <sub>ex</sub> , e <sub>m</sub> fotoğrafı	24
3.4. Manyeto-İndüktif etki ölçüm sisteminin blok diyagramı	25
3.5. e <sub>L</sub> ve M-H <sub>w</sub> ölçümü için deneysel devre	25
3.6. Isıtılmış işlem görmemiş CoSiB telin I <sub>w</sub> , e <sub>tot</sub> ve e <sub>L</sub> fotoğrafı	26

3.7.	Isıl işlem görmüş CoSiB telin $I_w$ , $e_{tot}$ ve $e_L$ fotoğrafı	26
4.1.	Isıl işlem görmemiş FeSiB telde $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği ( $H_{ac}=50$ A/m)	31
4.2.	Isıl işlem görmemiş FeSiB telde 100 ve 500 Hz'de $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği	32
4.3.	Isıl işlem görmemiş CoSiB telde $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği ( $H_{ac}=50$ A/m)	33
4.4.	Isıl işlem görmemiş CoSiB telde $e_m$ 'nin manyetik alanın karşı grafiği	34
4.5.	FeSiB tel için normalize olmuş elastik katsayısının manyetik alana karşı grafiği	35
4.6.	CoSiB tel için normalize olmuş elastik katsayısının manyetik alana karşı grafiği	35
4.7.	500°C'de ısıl işlem görmüş FeSiB telde $H_{ac}=50$ A/m'de 100 ve 500 Hz için $e_m$ 'nin ısıl işlem zamanına karşı grafiği	37
4.8.	$H_{ac}=50$ A/m altında 400°C'de çeşitli zamanlar için ısıl işlem görmüş 20 cm uzunlukta ve 125 $\mu$ m çapındaki FeSiB telde $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği	39
4.9.	$H_{ac}=50$ A/m altında 420°C'de 10 ve 30 dakika için ısıl işlem görmüş 20 cm uzunlukta ve 125 $\mu$ m çapındaki FeSiB telde $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği	40
4.10.	$H_{ac}=72$ A/m altında 460°C'de çeşitli zamanlar için ısıl işlem görmüş 20 cm uzunlukta ve 125 $\mu$ m çapındaki FeSiB telde $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği	41
4.11.	$H_{ac}=50$ A/m altında 500°C'de çeşitli zamanlar için ısıl işlem görmüş 20 cm uzunlukta ve 125 $\mu$ m çapındaki FeSiB telde $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği	42
4.12.	400°C'de 5 ve 15 dakika ısıl işlem görmüş 125 $\mu$ m çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz için $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği	43
4.13.	400°C'de 40 ve 60 dakika ısıl işlem görmüş 125 $\mu$ m çapında FeSiB tel için	

- 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği 44
- 4.14. 400°C'de 120 ve 160 dakika ısıtma işlemi görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği 45
- 4.15. 420°C'de 5 ve 30 dakika ısıtma işlemi görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği 46
- 4.16. 500°C'de 2 ve 10 dakika ısıtma işlemi görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği 47
- 4.17. 500°C'de 12.5 ve 30 dakika ısıtma işlemi görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği 48
- 4.18.  $H_{ac}=50$  A/m manyetik alan altında 500°C'de eşitli süreler için ısıtma işlemi görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telde  $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği 49
- 4.19. 500°C'de 5 ve 40 dakika ısıtma işlemi görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği 50
- 4.20.  $f=100$  Hz,  $H_{ac}=50$  A/m altında 400°C'de çeşitli zamanlar için ısıtma işlemi görmüş 20 cm uzunlukta ve 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $e_m$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği 52
- 4.21.  $f=100$  Hz,  $H_{ac}=72$  A/m altında 460°C'de 1 ve 30 dakika için ısıtma işlemi görmüş 20 cm uzunlukta ve 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $e_m$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği 53
- 4.22.  $f=100$  Hz,  $H_{ac}=50$  A/m altında 500°C'de çeşitli zamanlar için ısıtma işlemi görmüş 20 cm uzunlukta ve 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $e_m$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği 54

5.1.	Isıl işlem görmemiş FeSiB telin $M-H_w$ eğrileri	57
5.2.	Isıl işlem görmemiş CoSiB telin $H=0$ iken dairesel $M-H_w$ eğrileri üzerine etkisi (a) 1 kHz, (b) 4 kHz ve (c) 7 kHz	58
5.3.	Isıl işlem görmemiş CoSiB telin 4.17 kHz'de DC manyetik alanın $M-H_w$ eğrileri üzerine etkisi (a) $H=720$ A/m, (b) $H=1080$ A/m ve (c) $H=1800$ A/m	59
5.4.	Isıl işlem görmemiş 130 $\mu\text{m}$ çapında CoSiB telin $I_w=60$ mA'de $e_L$ 'nin frekansa karşı grafiği	60
5.5.	Isıl işlem görmemiş 130 $\mu\text{m}$ çapında CoSiB telde $e_L$ 'nin DC manyetik alana karşı grafiği	61
5.6.	Isıl işlem görmemiş 130 $\mu\text{m}$ çapında CoSiB telde $e_L$ 'nin uygulanan $I_w$ akımına karşı grafiği	62
5.7.	370°C'de değişik süreler için ısıl işlem görmüş FeSiB tellerin 3 kHz'de dairesele yöndeki $M-H_w$ eğrileri (a) 5 dk., (b) 25 dk. ve (c) 150 dk.	64
5.8.	420°C'de değişik süreler için ısıl işlem görmüş FeSiB tellerin 1 kHz'de dairesele yöndeki $M-H_w$ eğrileri (a) 5 dk., (b) 25 dk. ve (c) 150 dk.	65
5.9.	500°C'de değişik süreler için ısıl işlem görmüş FeSiB tellerin 3 kHz'de dairesele yöndeki $M-H_w$ eğrileri (a) 5 dk. ve (b) 10 dk.	65
5.10.	500°C'de ısıl işlem görmüş FeSiB telin 3 ve 1 kHz'de $e_L$ 'nin ısıl işlem zamanına karşı grafiği	66
5.11.	Yüzeyi kristalleşmiş FeSiB telin şematik görünüşü	67
5.12.	Yüzeyi kristalleşmiş FeSiB tel için önerilen domain yapısı	67
5.13.	500°C'de değişik süreler için ısıl işlem görmüş FeSiB tellerin 3 kHz'de dairesele yöndeki $M-H_w$ eğrileri (a) 10 dk., (b) 30 dk. ve (c) 50 dk.	69
5.14.	500°C'de ve $H=0$ A/m'de 10 saniye için ısıl işlem görmüş CoSiB telin dairesele yöndeki $M-H_w$ eğrilerine frekansın etkisi (a) 1 kHz, (b) 6 kHz, (c) 10.1 kHz ve (d) 15 kHz	71
5.15.	500°C'de 5 dk. ısıl işlem görmüş CoSiB telin dairesel yöndeki $M-H_w$ eğrilerine (a) 2 kHz, (b) 3 kHz, (c) 75. kHz ve (d) 14.5 kHz	72

- 5.16. 500°C'de 10 saniye ısıtım işlem görmüş CoSiB telin 3 kHz'de dairesel yöndeki M-H<sub>w</sub> eğrilerine (a) H=72 A/m, (b) H=288 A/m, (c) H=1440 A/m 73
- 5.17. 370°C'de ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin I<sub>w</sub>=30 mA için e<sub>L</sub>'nin frekansa karşı grafiği 74
- 5.18. 460°C'de ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin I<sub>w</sub>=60 mA için e<sub>L</sub>'nin frekansa karşı grafiği 75
- 5.19. 500°C'de ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin I<sub>w</sub>=55 mA için e<sub>L</sub>'nin frekansa karşı grafiği 76
- 5.20. 370°C'de 5 ve 25 dakika ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin I<sub>w</sub>=55 mA, 1 ve 3 kHz için e<sub>L</sub>'nin DC manyetik alan, H'a karşı grafiği 77
- 5.21. 460°C'de 20 sn. ve 1 dakika ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin I<sub>w</sub>=60 mA, 10 kHz için e<sub>L</sub>'nin DC manyetik alana karşı grafiği 78
- 5.22. 450°C'de ısıtım işlem görmüş 130 µm çapında CoSiB telin I<sub>w</sub>=30 mA için e<sub>L</sub>'nin frekansa karşı grafiği 79
- 5.23. 500°C'de ısıtım işlem görmüş 130 µm çapında CoSiB telin I<sub>w</sub>=55 mA için e<sub>L</sub>'nin frekansa karşı grafiği 80
- 5.24. 450°C'de 30 sn. ve 40 dakika ısıtım işlem görmüş 130 µm çapında CoSiB telin I<sub>w</sub>=55 mA, 1 ve 3 kHz için e<sub>L</sub>'nin DC manyetik alana karşı grafiği 81
- 5.25. 450°C'de 60 ve 185 dakika ısıtım işlem görmüş 130 µm çapında CoSiB telin I<sub>w</sub>=55 mA, 1 ve 3 kHz için e<sub>L</sub>'nin DC manyetik alana karşı grafiği 82
- 5.26. 500°C'de 40 ve 90 dakika ısıtım işlem görmüş 130 µm çapında CoSiB telin I<sub>w</sub>=55 mA, 1 ve 3 kHz için e<sub>L</sub>'nin DC manyetik alana karşı grafiği 83
- 5.27. 370°C'de değişik zamanlar için ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin 1 kHz için e<sub>L</sub>'nin AC I<sub>w</sub> akımına karşı grafiği 85
- 5.28. 400°C'de değişik zamanlar için ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin 1 kHz için e<sub>L</sub>'nin AC I<sub>w</sub> akımına karşı grafiği 86
- 5.29. 500°C'de değişik zamanlar için ısıtım işlem görmüş 125 µm çapında FeSiB telin

	1 kHz için $e_L$ 'nin AC $I_w$ akımına karşı grafiği	87
5.30.	500°C'de değişik zamanlar için ısıtma işlemi görmüş 130 $\mu\text{m}$ çapında CoSiB telin 1 kHz için $e_L$ 'nin AC $I_w$ akımına karşı grafiği	88
5.31.	500°C'de değişik zamanlar için ısıtma işlemi görmüş 130 $\mu\text{m}$ çapında CoSiB telin 3 kHz için $e_L$ 'nin AC $I_w$ akımına karşı grafiği	89
5.32.	460°C'de ısıtma işlemi görmüş 125 $\mu\text{m}$ çapında FeSiB telin $I_w=60$ mA ve 10 kHz için $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği	91
5.33.	460°C'de ısıtma işlemi görmüş 125 $\mu\text{m}$ çapında FeSiB telin $I_w=72$ mA ve 500 Hz için $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği	92
5.34.	500°C'de ısıtma işlemi görmüş 125 $\mu\text{m}$ çapında FeSiB telin $I_w=60$ mA ve 3 kHz için $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği	93
5.35.	500°C'de ısıtma işlemi görmüş 130 $\mu\text{m}$ çapında CoSiB telin $I_w=60$ mA ve 1 kHz için $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği	94
5.36.	500°C'de ısıtma işlemi görmüş 130 $\mu\text{m}$ çapında CoSiB telin $I_w=55$ mA ve 3 kHz için $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği	95

## TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Bu çalışmada kullanılan tellerin veri listesi	21

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simge

a	Tel Yarıçapı
$e_L$	Manyeto-İndüktif Voltaj
$e_m$	Matteucci Voltajı
E	Young Modülü
$E_0$	Uygulanan Manyetik Alan Sıfır İken Young Modülü
$E_s$	Doyumda Young Modülü
h	Telin Uzunluğu
H	Dışarıdan Uygulanan DC Manyetik Alan
$H_{ac}$	Tele dışarıdan uygulanan AC manyetik alan
$H_c$	Coercivity
$H_d$	Demagnetize Alan
$H_w$	Telde Dairesel Yönde Oluşan AC Manyetik Alan
$I_{ex}$	AC manyetik alan oluşturmak için Helmholtz bobinlerine uygulanan akım
$I_w$	Telden Geçen AC Akım
K	Anisotropi Sabiti/ Manyetomekaniksel Histerisis Eğrisi Sabiti
L	İndüktans
M	Manyetizasyon
$M_s$	Doyum Manyetizasyonu
$M_r$	Net Manyetizasyon
n	Helmholtz Bobinindeki Sarım Sayısı
$N_d$	Demagnetize Faktörü
$T_c$	Curie Sıcaklığı
$T_x$	Kristalleşme Sıcaklığı
$U_h$	Histerisis Enerji Kaybı
$U_{kris}$	Kristal Anisotropi Enerjisi
$U_{me}$	Manyetoelastik Enerji

$U_{ex}$	Exchange Enerjisi
$U_s$	Şekil Anisotropi Enerjisi
$U_T$	Toplam Anisotropi Enerjisi
$\Delta$	Değişme Miktarı
$\lambda_s$	Doyum Manyetostriksiyonu
$\chi$	Manyetik Duygunluk
$\chi_0$	Düşük Manyetik Alan Duygunluğu
$\nu$	Manyetik Histerisis Eğrisi Sabiti
$\alpha$	Manyetizasyon Yönü ve Kristal Eksenleri Arasındaki Açının Kosinüsü
$\theta$	Kolay Eksen Yönü
$\sigma$	Gerilme Stresi
$\phi$	Telde Dairesel Yönde Oluşan Akı
$\phi_c$	Telin Boyunca Oluşan Akı

### **Kısaltmalar**

K.B.	Keyfi Birim
MI	Manyeto-İndüktif



## 1. GİRİŞ

### 1.1. Çalışmanın Amacı

FeSiB ve CoSiB tellerin boyu doğrultusundaki manyetik özellikleri daha önceden incelenmiştir [1-2]. Aynı zamanda bu tellerdeki manyetik momentlerin yönelimi ile ilgili bilgi edinmek için telin manyetoelastik özellikleri incelenmiştir [3]. Bu çalışmanın amacı yine bu tellerin manyetik yapılarını anlamaya yönelik olacaktır. Ancak bu kez tellerin dairesel yöndeki manyetik özelliklerini inceleyerek telin domain yapısını açıklanmaya çalışılacaktır.

Bu amaçla, ilk olarak tellerin dairesel yöndeki histerisis eğrisi elde edilmiştir. Daha sonra telin her iki ucuna bir akım uygulanıp, telin uçları arasından indüklenmiş olan  $e_L$  voltajı ölçülmüştür.  $e_L$  değerinin dıştan uygulanan DC manyetik alan,  $H$ , ile değişimine bakarak ve  $M-H_w$  eğrilerinin şekline bakılarak telin domain yapısı tartışılmıştır.

Buna ek olarak, ferromanyetik tel AC bir alan içine konularak telin uçları arasında oluşan Matteucci voltajı uygulanan AC alanın frekansının ve şiddetinin fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

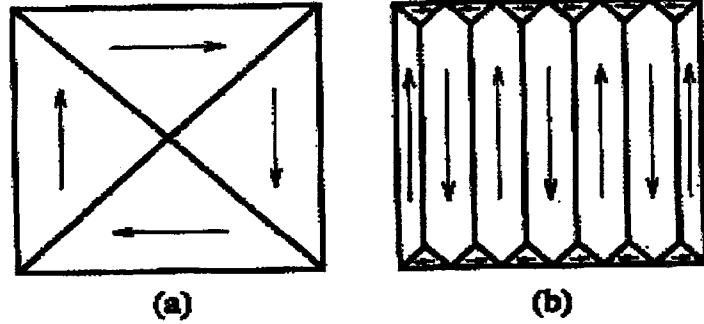
Ayrıca, ferromanyetik teller tüp fırında değişik sıcaklıklarda ve değişik zamanlarda ısıtılma tabii tutulup, bu ısıtılma işlemlerinin tellerin manyetik yapıları üzerindeki etkisi,  $M-H_w$  eğrileri ve manyeto-indüktif etkiye bakılarak anlaşılmasına çalışılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçları daha önce ölçülen sonuçlar ile karşılaştırarak ısıtılma işlem görmüş veya görmemiş olan tellerin domain yapılarını gösteren bir model tasarlanmıştır.

## 1.2. Ferromanyetik Maddeler ve Bunlarla ilgili Temel Parametreler

### 1.2.1. Ferromanyetik maddeler

Ferromanyetik kristalde atomların manyetik momentleri dış bir alan olmadığında birbiriyle paralel bir şekilde dizilmiştir. Bu nedenle ferromanyetik maddelerde manyetik duyunluk çok büyüktür. Paralel yönelme tüm yapı boyunca aynı değildir. Yapıda atom manyetik momentlerinin aynı yönde yönelmiş olduğu bölgelere domain denir. Herbir domain küçük bir mıknatıs gibi davranır [4].

Ferromanyetik madde daima aynı yönde manyetize edilmiş olmakdan ise domainlere bölünmeyi tercih eder. Çünkü madde toplam enerjisinin her zaman minimum olduğu durumda olmak ister. Şekil 1.1. ferromanyetik madde için iki muhtemel yapıyı göstermektedir. Bir domainin manyetizasyonu değişmez ve  $M_S$ 'e ( $M_S$ ; doyum manyetizasyonu) eşittir. Fakat domainler farklı yönlerde manyetize edilmişlerdir. Bu yüzden, numunenin ortalama manyetizasyonu  $M_S$  den daha az olabilir ve hatta  $H=0$ 'da sıfır olabilir.

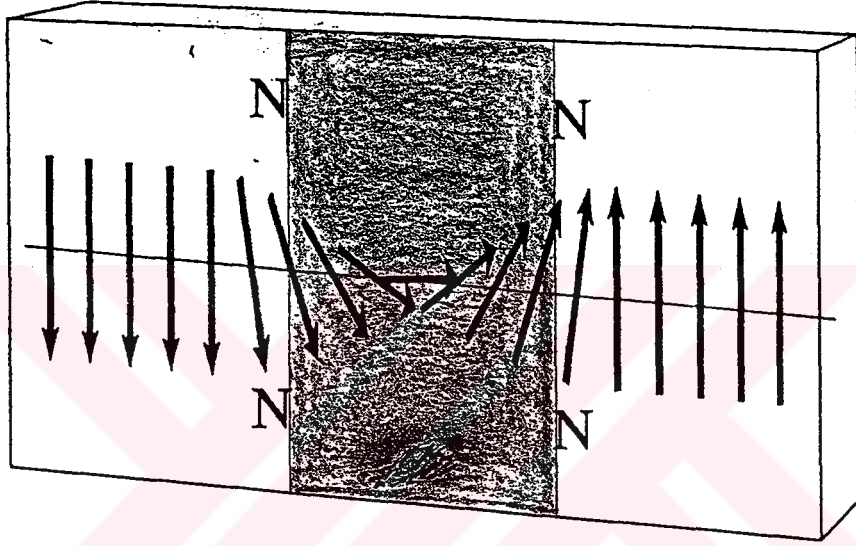


Şekil 1.1. Ferromanyetik maddede iki muhtemel domain yapısı [4].

Domainler arasındaki sınıra domain duvarı denilir. Domain duvarında manyetik momentlerin yönü bir yönden diğerine derece derece değişir. Bu nedenle, domain duvarı

belirli bir kalınlığa sahiptir [4]. Şekil 1.2. bir ferromanyetik madde içindeki domain duvarını göstermektedir.

Sıcaklığın artırılması ile domainler içinde manyetik momentlerin paraleliği gittikçe azalır. Belli bir değerde tamamen ortadan kalkar. Bunun sonucunda ferromanyetiklik azalır. Curie sıcaklığında tamamen kaybolur.



Şekil 1.2. Amorf ferromanyetik madde içinde domain duvarı yayılımı

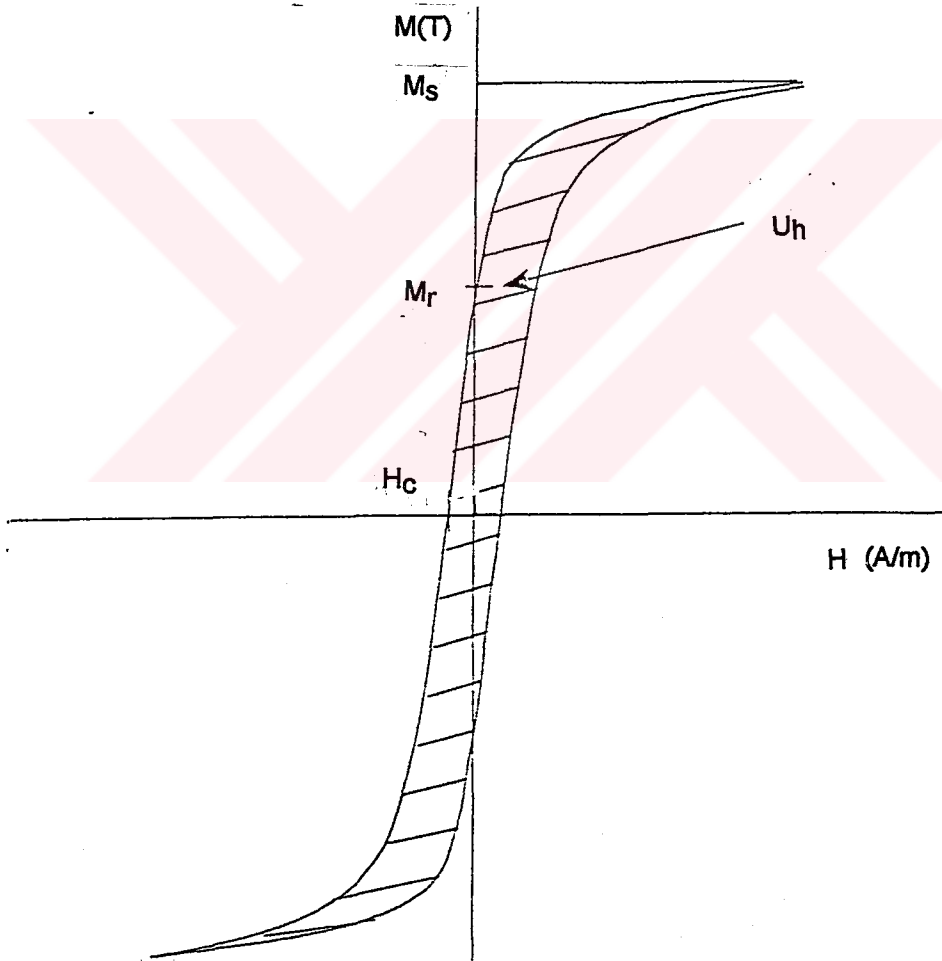
### 1.2.2. Temel parametreler

**M-H Eğrisi:** Bir manyetik maddenin en önemli niceliği onun histerisis eğrisidir, aynı zamanda bu eğriye M-H eğriside denilir. Burada M; manyetizasyon, H; dıştan uygulanan manyetik alandır. Tipik bir M-H eğrisi şekil 1.3.'de gösterilmiştir. Burada  $H_c$  coercivity,  $M_r$  net manyetizasyon,  $M_s$  doyum manyetizasyonudur. Histerisis eğrisi üç kısma ayrılmaktadır. Birinci kısım düşük manyetik alan bölgesidir. Burada eğrinin biçimi çoğu kez Rayleigh bağıntısına uyar:

$$M = \chi_0 H + 2\nu H^2 \quad (1.1)$$

Burada  $\chi_0$  düşük manyetik alan duygunluğu ve  $v$  ise bir sabittir. Düşük manyetik alan duygunluğu  $\chi_0 = (dM/dH)_{H \rightarrow 0}$  bağıntısı ile verilmektedir. Eğrinin ikinci kısmı ilk kısım ve dize benzer kısım arasındadır. Bu kısımda manyetizasyon uygulanan alan, H'in artışı ile artar. Üçüncü kısım dize benzer kısım ve doyum manyetizasyonu,  $M_s$  arasında uzanır. Doyumda bütün manyetik momentler H yönünde yönlenir. Öyleki, artık H'in artmasına rağmen manyetizasyonda bir artma olmaz.

Dıştan uygulanan alan sıfır olduğunda, numunenin manyetizasyonuna net manyetizasyon denilir.



Şekil 1.3. Uygulanan manyetik alan ile tipik bir ferromanyetik maddenin manyetizasyon değişimi (M-H eğrisi).

**Coercivity** :  $H_C$  manyetizasyonu doyumdan sıfıra indirmek için gerekli alandır.

**Alınanlık**: Çoğu manyetik maddeler için, manyetizasyon,

$$M = \chi \cdot H \quad (1.2)$$

bağıntısına göre uygulanan alan,  $H$  ile orantılıdır ve burada  $\chi$  manyetik duyunluktur.  $M$  ve  $H$  SI birim sisteminde aynı boyutlarda olduğundan  $\chi$  boyutsuzdur. Fakat pratikte, ferromanyetik maddeler her zaman sabit alınanlığa sahip değildir.

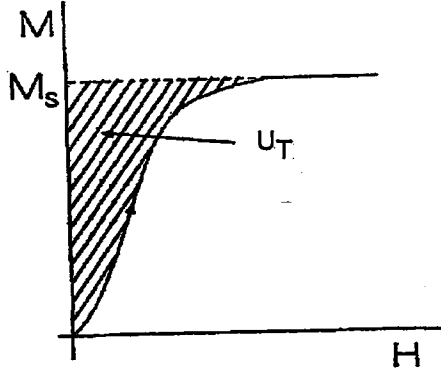
**Histerisis enerji kaybı**: Bir ferromanyetik maddenin tüm  $M-H_w$  eğrisi elde edilirken, numune üzerine yapılan toplam işe histerisis enerji kaybı,  $U_h$  denilmektedir.  $U_h$  şekil 1.2.'de gösterildiği gibi  $M-H$  eğrileri ile sınırlanan alana eşittir. Manyetik maddelerde enerji kaybına Eddy akımları ve domain duvarlarının tekrarlanamayan hareketi sebep olmaktadır. Eğer manyetizasyon sadece manyetik momentlerin dönmesi ile oluşuyorsa histerisis enerji kaybı sıfırdır.

### 1.3. Anisotropi Enerjisi

Anisotropi enerjisi, manyetizasyonun uygulanan manyetik alan yönünde yönelmesi için birim hacim başına gerekli olan enerjidir. Anisotropi enerjisi şekil 1.4.'de gösterilen alan ile verilmektedir. Bu manyetik alan lokal anisotropilerin toplamını temsil eder, ve

$$U_T = \int_0^{M_s} H dM \quad (1.3)$$

bağıntısı ile verilir. Anisotropi enerjisi değişik kısımlara ayrılabilir. Bunlar manyetokristal, şekil, stres ve dıştan oluşturulan anisotropilerdir.



Şekil 1.4. Anisotropi enerjisinin tanımlanması (taranmış alan)

1) **Manyetokristal anisotropisi:** Kristal yapı içinde manyetik moment ile yörünge arasında etkileşme olmaktadır. Bir dış manyetik alan numuneye uygulandığında, manyetik alan manyetik momenti alan yönünde yönelmeye çalışacaktır. Fakat manyetik momentler kristal örgü ile güçlü şekilde etkileşmektedir. Yani kristal potansiyeli manyetik momentleri belirli bir yönde yönelmeye zorladığından dolayı manyetik momentlerin manyetik alan yönünde yönelmesine karşı koymaya çalışacaktır. Bu etkileşmeyi yenmek için gerekli enerjiye kristal anisotropi enerjisi denilmektedir. Manyetizasyon manyetik alan yönünde döndürmek için gerekli enerji:

$$U_{\text{kris}} = K_0 + K_1 \left( \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2 \right) + K_2 \left( \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 + \dots \right) \quad (1.4)$$

ile verilmektedir. Burada  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , manyetizasyon yönü ve kristal eksenleri arasındaki kosinüs açılarıdır.  $K_0$ ,  $K_1$ , ve  $K_2$  anisotropi sabittleridir,  $K_0$  çoğunlukla ihmal edilmektedir. Çünkü  $K_0$  anisotropi enerjisine açısal olarak bağlı değildir.  $K_1$  tipik bir kristal için yaklaşık  $10^4 \text{ Jm}^{-3}$  mertebesinde [5-6-7].

Amorf manyetik alaşımlarda periyodikliğin kısa aralıkta olmasından dolayı (tipik olarak 1nm) makroskopik kristal anisotropi yoktur. Çünkü orada sadece lokal kristal anisotropi bulunmaktadır. Makroskopik skalada, bu lokal anisotropilerin ortalamaları alınır, lokal kristal anisotropi sıfır olmaktadır [8].

**2) Şekil anisotropisi:** Bir manyetik alanda manyetik kutuplar maddenin serbest yüzeyinde oluşurlar. Çünkü orada numune içerisinde numunenin uçları arasında bir iç manyetik alan oluşacaktır. Oluşan bu iç alan dış alana zıt yönde yönelir ve demagnetize alan denilir. Aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$H_d = N_d M \quad (1.5)$$

Burada  $N_d$  demagnetize faktörü,  $H_d$  demanyetize olmuş alandır. Demagnetize faktörü numunenin şekline bağlıdır. Bu sebepten numunenin şekli anisotropi kaynağı olacaktır. Numunenin kısa eksen boyuca olan  $H_d$  numunenin uzun eksen boyunca olandan daha güçlüdür. Dolayısı ile numuneler genelde uzun eksen doğrultusunda daha düşük dış manyetik alan değerlerinde manyetik olarak doyuma ulaşır. Bu nedenle numunelerin şekli ve boyutları önem taşımaktadır.

**3) Stres anisotropisi:** Manyetik maddelerin ısı işlem görmemiş durumlarında iç stresleri her zaman sıfır değildir. Çünkü üretim yönteminde maddelerin soğutulması tamamen aynı şekilde olmaz. Bu iç stresler lokal anisotropiler üretir. Bu lokal anisotropiler maddenin ısı işleme tabi tutulması ile minimuma indirilebilir. Stres anisotropi enerji

$$U_{me} = K_\sigma \sin^2 \theta \quad (1.6)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $\theta$  kolay eksen yönüdür,  $K_\sigma = (3/2) \sigma_i \sigma_j$  iç strestir [5].

Amorf alaşımların iç stresi ısı işlem sonunda minimuma indirilebilir. Anisotropi enerjisi demir esaslı metalik camlarda  $38 \text{ Jm}^{-3}$ 'e alçalacak kadar azalır [9].

**4) Dıştan oluşturulan anisotropi:** Manyetik maddeler manyetik alan altında ısıtılıp soğutulduğunda, maddedeki manyetik momentler dıştan uygulanan bu alan yönünde yönelir. Bu ise madde de bir anisotropi oluşturmaktadır ve buna dıştan oluşturulan anisotropi denilmektedir.

## 2. AMORF TELLERİN ÜRETİMİ VE KISA TEORİK BİLGİLER

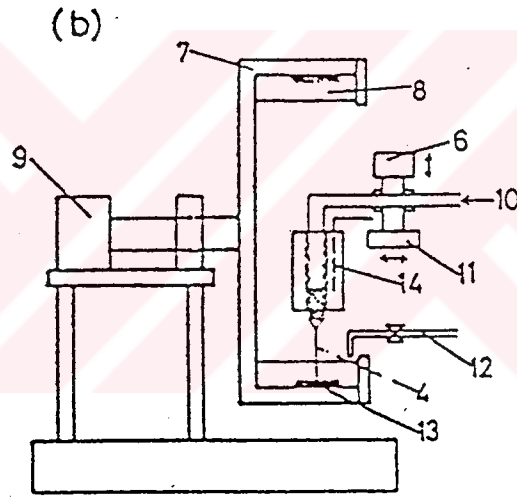
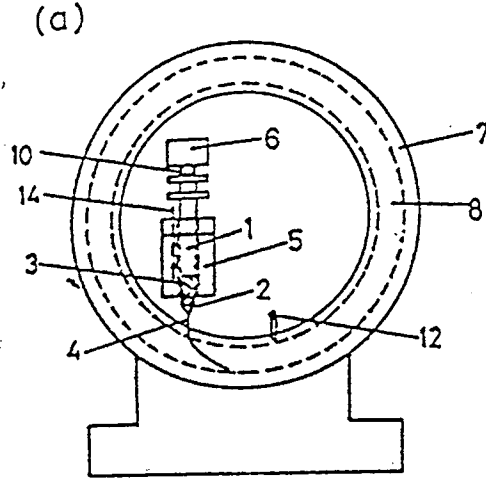
### 2.1. Amorf Tellerin Üretimi

Amorf alaşımlara, aynı zamanda metalik camlarda denilmektedir. İlk kez 1960 yılında Duwez tarafından üretilmiştir [10]. Amorf alaşımları üretmek için vacuum evaporation, ion implantation, cathode sputtering ve melt-spinning gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bugün yaygın olarak kullanılan metod melt-spinning'dir.

Amorf maddelerin üretilmesi sırasında madde erimiş halden katı hale geçerken ki soğuma hızı  $10^5 - 10^6$  K/s'dir. Böylelikle madde kristal yapıya geçmeden amorf olarak yani düzensiz bir yapıda katılaşır. Bu amorf yapı basit bir şekilde atomik periyodikliğin yokluğu ile tanımlanabilir [11]. Uzun mesafede periyodikliğin yokluğu X-ışını difraksiyonu ile tespit edilmiştir [12].

Amorf alaşımlar tel biçiminde ilk defa 1981'de üretildiler [13]. Teller ilk kez "in-rotating- water melt spinning" metodu ile Masumato ve arkadaşları tarafından üretildiler. Bu teknikte, Fe-Si-B tel için soğuma hızları  $5 \times 10^5 - 1 \times 10^6$  K/s olarak ölçülmüştür [14]. Şekil 2.1 üretim sisteminin bir şematik resmini göstermektedir. Üretim yönteminde, alaşım önce bir elektrikli fırın içinde eritilerek ve yüksek argon basıncı uygulanarak bir huninin ağzından fışkırtılır. Huni bir quartz tüpün ucuna takılıdır. Erimiş alaşım, yüksek hızla dönen soğuk su ile temas ettiğinde aniden soğuyarak katılaşır, alaşım tel şeklini almaktadır. Elde edilen bu tel çember boşluğunun iç kısmında merkez kaç kuvveti ile toplanmaktadır. Tipik olarak, bir işlem süresinde katılaşan alaşımın miktarı 1 g'dır. Bu işlem sürecinde imal edilen telin maksimum uzunluğu bir kaç kilometre kadar uzun olabilir. Huninin iç çapının değişimi ile teller 80 ile 250  $\mu\text{m}$  arasında değişik çaplarda üretilebilirler [13]. Amorf tellerin maksimum çapı telin bileşimine bağlıdır. Inoue ve arkadaşları, Fe-P-C amorf tel için maximum çapın 230  $\mu\text{m}$  civarında olduğunu göstermişlerdir [15].





- |                       |                 |                                     |
|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|
| 1. Quartz tup         | 6. Hava pistonu | 11. Engel                           |
| 2. Huninin ağızı      | 7. Döner çember | 12. Soğutma suyunu tedarik eden tüp |
| 3. Erimiş alaşım      | 8. Soğutma suyu | 13. Tel numune                      |
| 4. Fışkırtılan alaşım | 9. Motor        | 14. Thermocouple (Sıcaklık ölçücü)  |
| 5. Elektrikli fırın   | 10. Argon gazı  |                                     |

Şekil 2.1 Amorf tellerin üretimsisteminin, a) önden görünüşü, b) yandan görünüşü [13].

Amorf tellerin oluşumunda etkili parametreler aşağıda verilmiştir [15-16].

- a) Kuartz tüpün ucu ile su düzeyi mesafesi,
- b) Huni ağız çapının ölçüsü,
- c) Fıskırtma basıncı,
- d) Erimiş alaşımın sıcaklığı,
- e) Soğutma suyunun sıcaklığı,
- f) Su hızının çember hızına oranı,

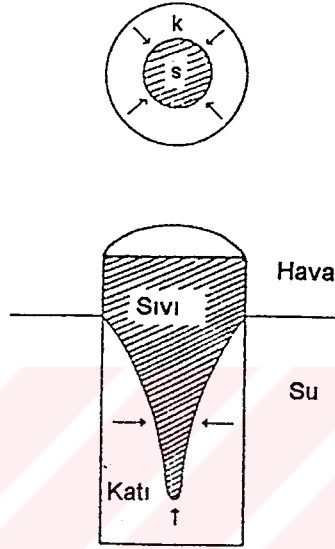
Amorf alaşımlar genellikle % 80 civarında geçiş metalleri Fe, Co veya Ni ve % 20 C, B, P ve Si gibi elementlerin karışımı ile üretilmişlerdir. Alaşımı oluşturan maddeler, alaşımın Curie ve kristalleşme sıcaklıkları, öz direnç çeşitli  $M_s$ ,  $\lambda_s$ ,  $K_U$  değerlerine tesir ettiği gözlenmiştir [17].

Amorf yapılarının bir sonucu olarak, metalik camlar düşük coercivity'e, büyük manyetik alınganlığa ve düşük anisotropi enerjisine sahiptirler. Coercivity bir kaç A/m kadar düşük olabilir. Maximum alınganlık  $10^5$  mertebesinde ve tipik indüksiyon değeri 1 Tesladır. Amorf alaşımlar oldukça elastik ve dayanıklı maddelerdir [18].

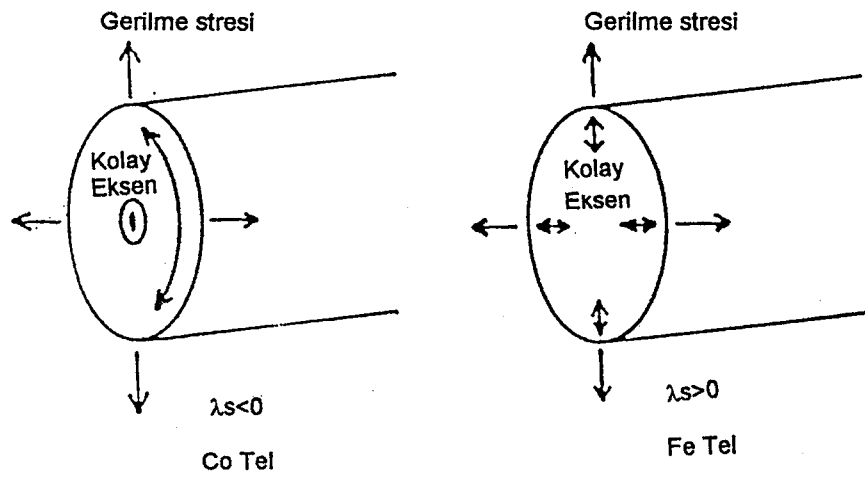
## 2.2. Isıl İşlem Görmemiş Amorf Ferromanyetik Tellerde Stres ve Domain Yapısı

Aynı bileşime sahip ısıtıl işlem görmemiş amorf şerit ve telin farklı manyetik davranışları katılaşma süresince indüklenmiş olan farklı iç stres dağılımları ile açıklanabilmektedir. Amorf teller "in-rotating-water melt spinning" tekniği ile üretilmektedir. Su erimiş alaşıma temas ettiğinde ilk önce dış kabuğu katılaştırır, sonra iç kısım katılaşır ve büzülür. Şekil 2.2. alaşımın soğuması sırasında katılaşma işleminin oluşumunu göstermektedir. Bu soğuma yönteminin bir sonucu olarak, bir radyal gerilim dış kabukta ve bir boyuna gerilim telin iç kısmında oluşur [19]. İç kısımda telin uzunluğu yönündeki iç stresin asıl sebebi telin hacminde büzülmeden dolayı olur. Fe-esaslı ve Co-esaslı teller için önerilen iç stres dağılımları şekil 2.3'de verilmiştir [19].

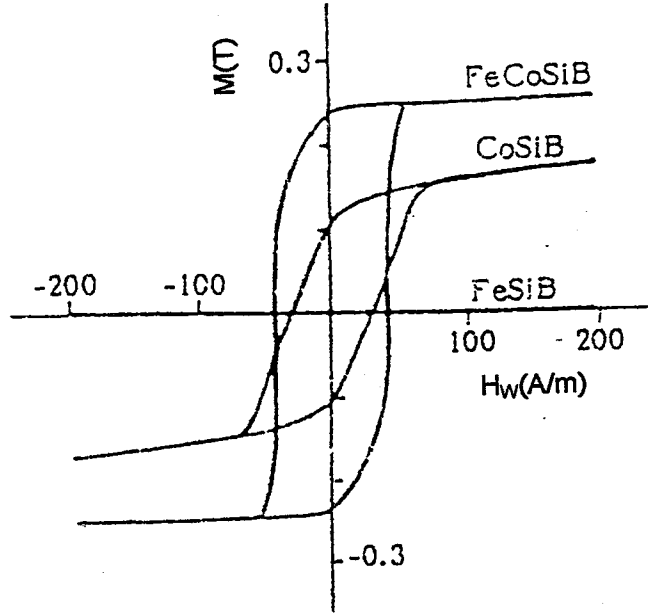
Pozitif Fe-alaşımli tellerde oluşan bu radyal yöndeki iç stres telde radial yönde bir anisotropi ve bir kolay eksen oluşturmaktadır. Co-alaşımli negatif manyetostriktif tellerde ise bu iç stres dairesel yönde bir anisotropi dolayısı ile dairesel yönde bir kolay eksen oluşturmaktadır(şekil 2.3.).



Şekil 2.2 Katılma boyunca amorf telin enine ve yandan şematik görünümü [20].



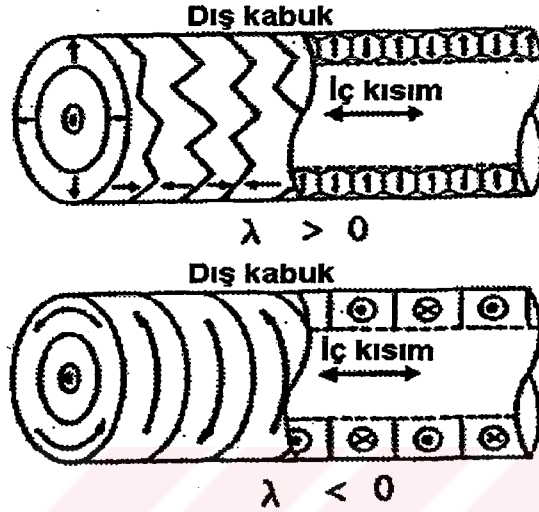
Şekil 2.3 Fe-esaslı ve Co-esaslı tellerde kolay eksen ve iç stresin temsili gösterimi [21].



Şekil 2.4. Co ve Fe alaşımli ısı işlem görmemiş tellerin M-H<sub>w</sub> eğrileri [22].

Amorf tellerin domain incelemeleri Mohri ve arkadaşları, Wun-Fogle ve arkadaşları, ve Makino ve arkadaşları tarafından Bitter metodu ile yapılmıştır [23-24]. Domain resimleri sadece tellerin yüzeyi üzerindeki domainler hakkında bilgi vermektedir. Co-esaslı teller bambu gibi düz çizgilere sahip olduğu görülmüş ve Fe-esaslı teller ise maze domainlere sahip olduğu görülmüştür. Bu yüzden Co-esaslı tellerin dış kabuğunda dairesel yönde manyetizasyon bileşenlerine sahip olduğu varsayılmıştır. Fe-esaslı tellerin üzerinde maze domain şeklinden, manyetizasyon bileşenlerinin dış kabukta telin yüzeyine dik olduğu ileri sürülmüştür. Mohri ve arkadaşları her iki telin M-H ölçümlerine baktıklarında telin manyetizasyonun düşük manyetik alanda ani bir değişme gösterdiğini gözlediler. Bu telin manyetizasyonundaki değişiminin oluşumu sırasında telin dış yüzeyindeki telin domain yapısının değişmediğini gözlediler. Bu nedenle telin manyetizasyonundaki bu ani değişimin nedeninin telin iç kısmındaki domain yapısından kaynaklandığı sonucuna

vardılar. Şekil 2.5. ile gösterilen domain yapısının Fe ve Co alaşımlı teller için önerilmiştir [23].



Şekil 2.5. Fe-esaslı tel ( $\lambda > 0$ ) ve Co-esaslı tel ( $\lambda < 0$ ) için önerilen domain yapıları [23].

Telin iç kısmının çapı, toplam kesit alanının iç kısmın kesit alanına oranı doyum manyetizasyonunun net manyetizasyon oranına eşit olduğu kabul edilerek Madurga tarafından hesaplandı [20]. Bu oran ısıtılmış görmemiş  $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$  tel için 0.5 olur. Bu oran iç kısım çapının  $\sim 0.7$  katı tel çapını verir.

### 2.3. Amorf Ferromanyetik Tellerde Matteucci Etki

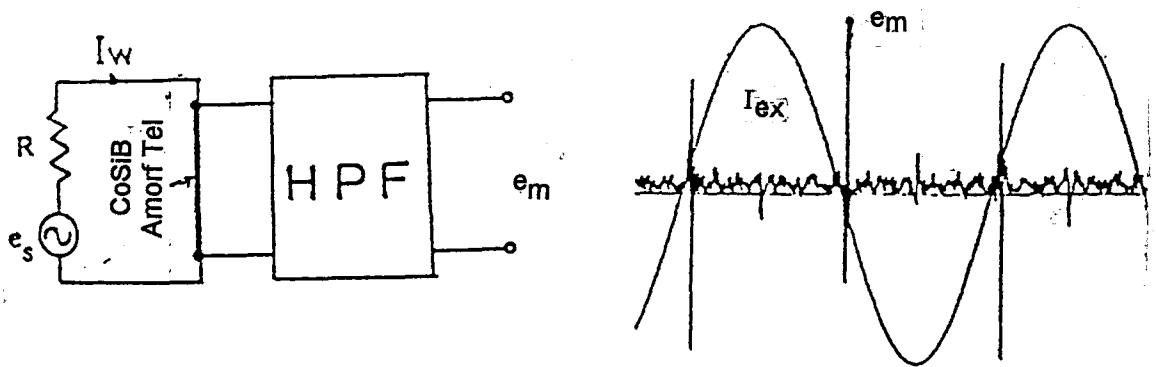
Matteucci etki 1847'den beri bilinmektedir. Bir AC manyetik alan tel eksenine paralel yönde ferromanyetik tele uygulandığında telin uçları arasında doğan voltaj palsı Matteucci voltajıdır [25]. Matteucci etkisi amorf ferromanyetik şeritler [26] ve amorf ferromanyetik tellerde gözlenmiştir [27]. Matteucci voltajı,  $e_m$

$$e_m = \frac{d\phi_c}{dt} \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada  $\phi_C$  telin boyunca oluşan içindeki dairesel akıdır. Bu sonuca göre, manyetizasyondaki değişme Matteucci voltajına etki eder [28].

Şekil 2.6. 100 Hz, 50 mA AC akım ile manyetize edilmiş 20 cm ve 125  $\mu\text{m}$  çapında ısıtım işlem görmemiş  $\text{Co}_{72}\text{Si}_{13}\text{B}_{15}$  telde Matteucci voltajının ölçüm sistemini ve sonucunu göstermektedir. Telin elektrik direnci sebebiyle 100 Hz bileşenin indüklenmiş voltajından kurtulması için high-pass filtre kullanılmıştır.

Matteucci voltajı telde helisel manyetizasyon bileşenin bir sonucudur. Kinoshita telin iç kısmında manyetik momentlerin gerçekten tel eksen yönünde dizilmediğini ortaya attı [29]. Kinoshita'ya göre, kolay eksen telin iç kısmında tel eksen yönü ile  $40^\circ$  ve  $60^\circ$  arasındadır. Mohri Matteucci voltajı  $e_m$ 'nin, AC manyetik alan frekansının ve teldeki burulma açısının fonksiyonu olduğunu göstermiştir [27]. Tel burulduğunda  $e_m$  büyük oranda değişmektedir. Örneğin 125  $\mu\text{m}$  çapında  $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$  amorf tel için,  $e_m$  telin 1 cm'nin 0.1 tur döndürülmesi ile  $e_m$  2 mV'dan 40 mV'a artmaktadır. Bu telin iç kısmındaki helisel manyetizasyon bileşenin artmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü, tel burulduğunda oluşan iç streslerden dolayı manyetizasyon helisel yönde yönelmeye çalışır.



Şekil 2.6. Co esaslı telde Matteucci etkisi [30].

#### 2.4. Amorf Ferromanyetik Tellerde Manyeto-İndüktif Etki

1992 yılında Mohri FeCoSiB amorf tellerde Manyeto-İndüktif (MI) etkiyi ilk olarak gözlemiştir. Manyeto-İndüktif etki bir AC akım,  $I_w$  ile manyetize edilmiş ferromanyetik telin L indüktansının dışarıdan uygulanan DC H manyetik alanı ile değişimidir [22].

Şekil 2.7.  $e_{tot}$ 'dan  $e_s$  voltajı çıkarılarak bir değişken direnç üzerinden ferromanyetik tele uygulanan  $I_w$  akımı ile  $e_L$ 'nin bulunması için deneysel devreyi göstermektedir [33]. Burada  $e_{tot}$  telin iki ucu arasında oluşan toplam sinyal,  $e_s$  tele uygulanan ve  $I_w$  akım değerine sahip olan AC sinyaldir. Burada  $e_{tot}$  sinyalini  $e_s$  sinyalinden çıkararak  $e_L$  telin iki ucuna indüklenmiş olan voltaj elde edilmiştir. Şekil 2.8. 10 kHz frekanslı sahip  $I_w$  akımı ile manyetize edilmiş 10 cm uzunluğunda yaklaşık sıfır manyetostriktife sahip  $(Fe_{0.06}Co_{0.94})_{72.5}Si_{17.5}B_{15}$ : ısı işlem görmemiş olan tel için (a)'da  $I_w$ 'nin, (b)'de  $e_{tot}$ 'un ve (c)'de  $e_L$ 'nin dalgabüçümlerinin fotoğrafını göstermektedir.  $e_L$  telin kesitindeki differansiyel akı değişimi  $d\phi/dt$  sebebi ile indüklenir. Yani,  $e_L$  dairesel manyetik alan,  $H_w = I_w / 2\pi a$  a: tel yarıçapı olduğundan aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$e_L = \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \chi(I_m, H, f) h \frac{dI_w}{dt} \quad (2.5)$$

Burada  $\phi$  telde dairesel yönde oluşan akıdır,  $\chi(I_m, H, f)$  manyetik duygunluk,  $I_w$  telden geçen akım  $I_w = I_m \cos \omega t$  şeklinde verilmektedir, h telin uzunluğu ve f frekans ise  $|e_L|$  aşağıdaki şekilde verilebilir.

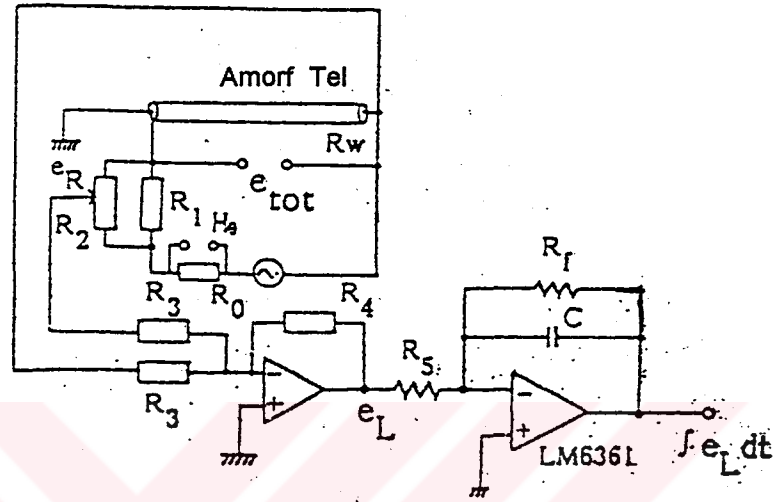
$$|e_L| = \chi(I_m, H, f) f h I_m \quad (2.6)$$

ile verilmektedir. Bunun için, indüktans,  $L(= |e_L| / 2\pi f)$ ,  $\chi$ 'nin fonksiyonu gibi ifade edilecektir.

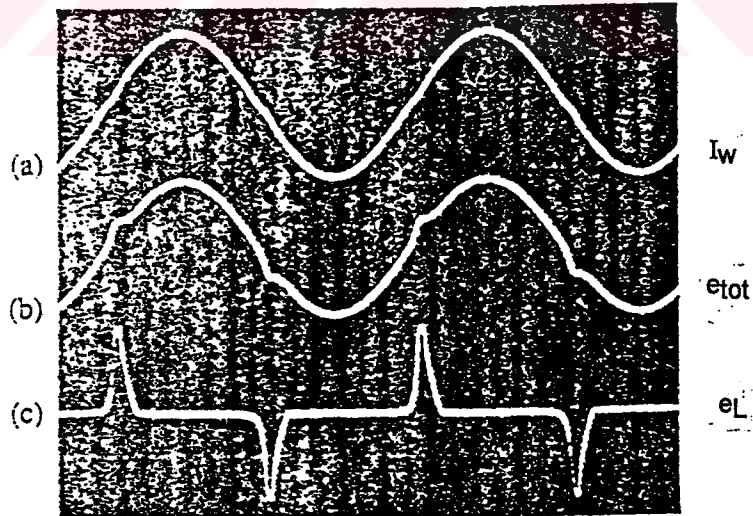
$$L(I_m, H, f) = \chi(I_m, H, f) \frac{h}{2\pi} \quad (2.7)$$

Şekil 2.4. amorf ferromanyetik tellerin üç çeşidinin dairesel akı yoğunluğu için M- $H_w$  histerisis eğrilerini göstermektedir. Burada M ve  $H_w$  belirttikleri sıra ile  $\int e_L dt / a I_w$  ve  $I_w / 2\pi a$  ile verilmektedir [22].

Telin uçları arasında indüklenmiş indüktif voltajın genliği manyeto-indüktif (MI) elemanda dairesel şekilde manyetize olan AC tel akımı ile yaklaşık 200 A/m dış DC manyetik alan uygulandığında %80 civarında azaldığı gözlenmiştir [31,32].



Şekil 2.7.  $e_L$ 'yi elde etmek için deneysel devre [33].



Şekil 2.8. Sıfır manyetostriktif ısıtılmamış telin a)  $I_w$ , b)  $e_{tot}$  ve c)  $e_L$ 'nin dalgabıçimlerinin fotoğrafı [22].



## 2.5. Amorf Maddelerin Manyetoelastik Özellikleri

### 2.5.1. Manyetostriksiyon

Manyetostriksiyon manyetik alanın fonksiyonu olarak manyetik maddenin boyutlarındaki değişim olarak tanımlanabilir. Manyetik maddelerde iki çeşit manyetostriksiyon meydana gelir; hacimsel ve doğrusal manyetostriksiyon. Doğrusal manyetostriksiyon, manyetik moment dönüşü sonucu ve 90° domain duvarı hareketleri ile meydana çıkar.

Kısaca, manyetik maddeye bir manyetik alan uygulandığı zaman, maddenin boyu ya uzar ya da kısalır. Bu olağan üstü olay manyetostriksiyon olarak bilinmektedir.

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h} \quad (2.8)$$

Burada  $\Delta h$  telin uzunluğunun değişim miktarı, ve  $h$  ise telin ilk uzunluğudur. Doyum manyetostriksiyonu,  $\lambda_s$  maddenin demagnetize olmuş ve manyetik doyum durumu arasında uzunlukta kısmi değişmedir. Amorf alaşımlar için  $\lambda_s$  in tipik değerleri  $-10 \times 10^6$  ve  $40 \times 10^6$  arasında değişmektedir [34].

### 2.5.2. $\Delta E$ etki

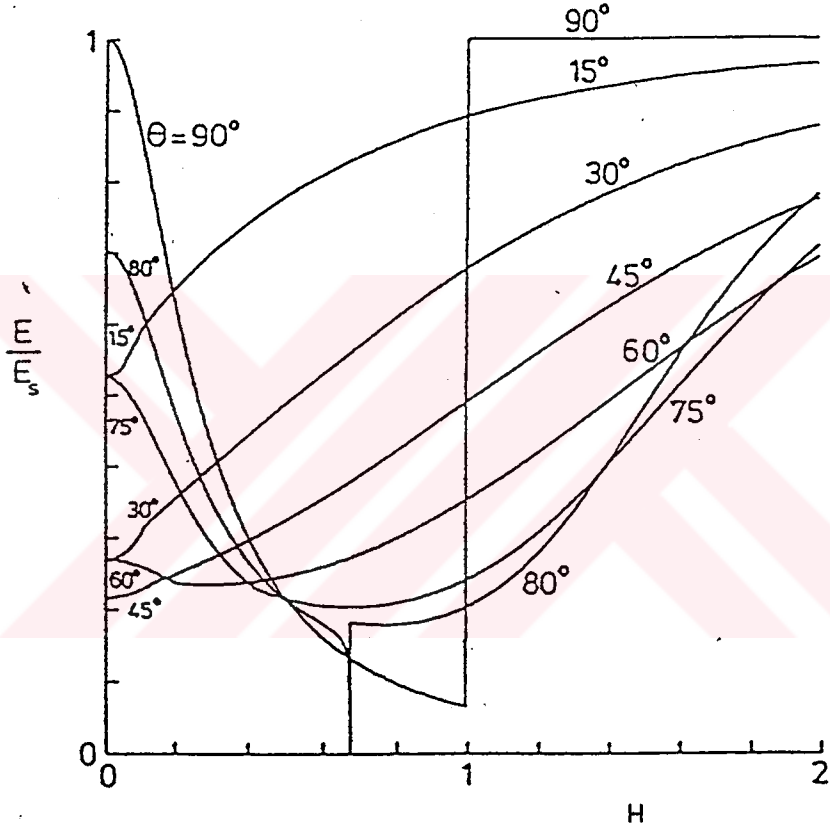
Young elastik katsayısı,  $E$ 'nin manyetik alanla değişimine  $\Delta E$  etki denilmektedir. Young elastik katsayısının ( $E/E_s$  veya  $\Delta E$  etkinin) manyetik alana bağlılığı bir model ile Squire tarafından verilmiştir [35]. Bu modele göre  $E$ ,  $H$ 'ın fonksiyonu olarak:

$$\frac{E}{E_s} = \frac{1}{1 + \beta F} \quad (2.9)$$

ile verilmektedir. Burada  $E_s$  doyum elastik katsayısı,  $\lambda_s$  doyum manyetostriksiyonu, ve  $K$  toplam anisotropi sabitidir.  $F$  kolay eksen yönelimi  $\theta$ 'nın, uygulanan manyetik alan,  $H$ 'ın ve dıştan uygulanan stres,  $\sigma$ 'nın fonksiyonudur. Böylece  $\Delta E$ 'nin büyüklüğü esasen

$$\beta = \lambda_s^2 E_s / K \quad (2.10)$$

oranı ile belirtilmektedir.  $E/E_s$  oranı normalize olmuş manyetik alanın fonksiyonu olarak şekil 2.9.'da gösterilmiştir.  $\theta$  sıfır olduğunda manyetik alanın fonksiyonu olarak elastik katsayısında değişme olmaz,  $\theta$   $90^\circ$  olduğunda  $E/E_s$  en büyük değişimi gösterir. Aynı zamanda dikkat edilmeli ki  $E_0$  ( $H=0$ 'da Young modülü)  $\theta$  değerlerinin değişimi ile değişmektedir. Bu nedenle  $\Delta E$  etki ölçümleri numunedeki ortalama olarak manyetizasyonun yönelimini belirlemede kullanılmaktadır [35].



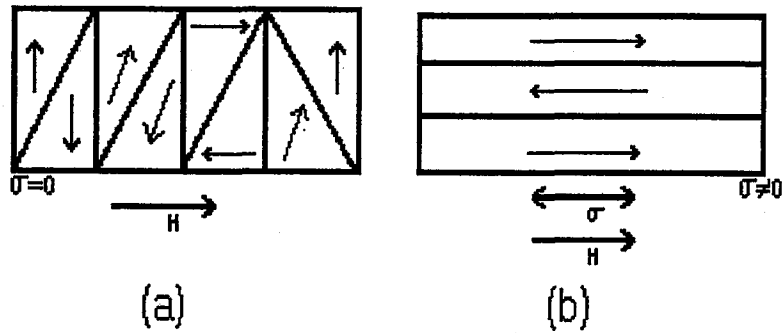
Şekil 2.9. Çeşitli  $\theta$  açıları için normalize olmuş  $H$ 'a karşı, normalize edilmiş elastik katsayıların grafiği [35].

## 2.6. Dış Streslerin Ferromanyetik maddelerin M-H<sub>w</sub> Eğrisi Üzerindeki Etkisi

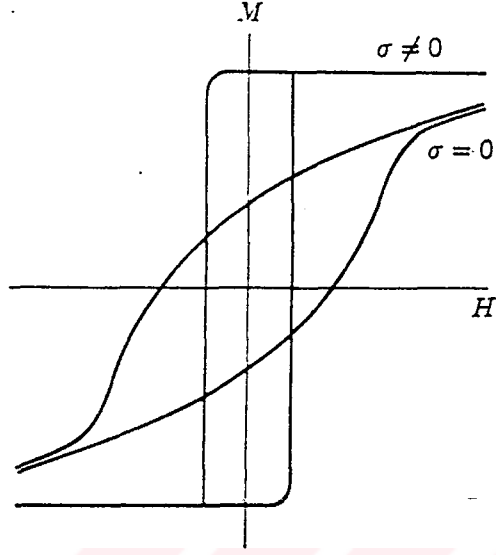
Bir dış stres uygulandığında çoğu ferromanyetik maddenin M-H<sub>w</sub> eğrileri değişmektedir. Çünkü dış stresler amorf ferromanyetik maddedeki manyetik momentleri kendi doğrultusunda veya kendine dik yöneltmeye çalışacaklardır. Bu durumda sistemin toplam enerjisindeki diğer bütün anisotropi enerjileri ihmal edilebilmektedir. Bunun sebebi ise manyetoelastik anisotropi enerjisininin çok büyük olmasıdır.

Örneğin Fe-esaslı tel için genellikle  $\lambda_s > 0$  dir. uygulanan boyuna dış stres  $\sigma = 0$  iken Fe-esaslı telde domainler şekil 2.12'de görüldüğü gibi rastgele yönelidiğini varsayalım. Uygulanan boyuna dış stres,  $\sigma > 0$  olduğunda domainler şekil 2.12.b'de görüldüğü gibi yöneltmektedir.

Manyetik moment ile stres arasındaki açı,  $\theta$  bu durumda ya  $0^\circ$  veya  $180^\circ$  olacaktır. Bu sistemin minimum enerjide olmak istemesinden kaynaklanmaktadır. Her iki durumda numuneyi şekilde görüldüğü gibi H alanı uygulandığında şekil 2.13. ile verilen histerisis eğrileri elde edilebilir.



Şekil 2.10.  $\lambda_s > 0$  iken (a)  $\sigma = 0$  için ve (b)  $\sigma > 0$  için Fe-esaslı telde domain yapı.



Şekil 2.11.  $\lambda_S > 0$  olan bir tel için  $M$ - $H_w$  eğrileri.

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1. Numune Hazırlanması ve Isıl İşlemler

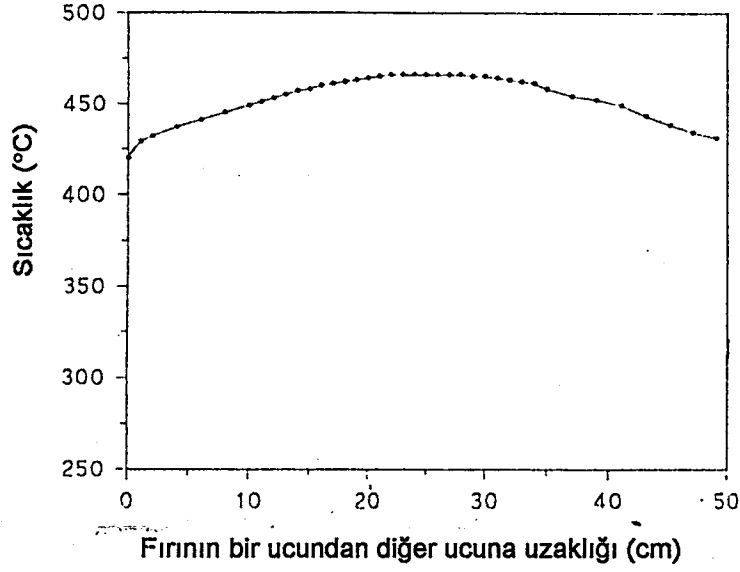
Bu çalışmada, 125  $\mu\text{m}$  ve 130  $\mu\text{m}$  çaplarındaki  $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$  ve  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  amorf teller kullanılmıştır. Teller Japonya'daki Unitika firması tarafından üretilmiştir. Teller ile ilgili parametreler tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 Bu çalışmada kullanılan tellerin veri listesi.

Alaşımın Tipi	Bileşimi	Çapı ( $\mu\text{m}$ )	Doyum Manyetizasyonu $M_s$ (T)	Curie Sıcaklığı $T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Kristalleşme Sıcaklığı $T_x$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Elastik Katsayısı E (Mpa)	Üreten Firma
Isıl İşlem Görmemiş	$\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$	125	1.6	422	553	16.2	Unitika
Isıl İşlem Görmemiş	$\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$	130	0.64	368	528	16.1	Unitika

Isıl işlem görmemiş tellerin üretim metodu sırasında indüklenmiş olan büyük iç streslerden kurtarmak [22] ve bazı manyetik özelliklerini değiştirmek için farklı ısıl işlemlere tabi tutulmaktadır. Bu büyük iç streslerden kurtulmak için en kolay ve en çok kullanılan metod Curie sıcaklığı ile kristalizasyon sıcaklığı arasında telleri ısıl işleme tabi tutmaktır.

Bu çalışmada, fırındaki ısıl işlemler için numuneler seramik makasla çeşitli uzunluklarda kesilmiştir. Ayrıca bütün numuneleri yağ ve kirden arındırmak için ısıl işlem öncesi asetonla temizlenmiştir.



Şekil 3.1 Tüp fırının sıcaklık grafiği.

Daha sonra, tel her ısıl işlemde önce 200  $\mu\text{m}$  çapındaki bir kuartz cam borunun içine yerleştirilip sıcaklığı daha önceden ayarlanmış olan bir tüp fırın içine yerleştirilmiştir. Isıl işlem bitince içinde tel bulunan kuartz cam boru dışarı çıkarılarak soğumaya bırakılmış ve daha sonra tel cam borudan çıkarılarak deneysel ölçümler yapılmıştır.

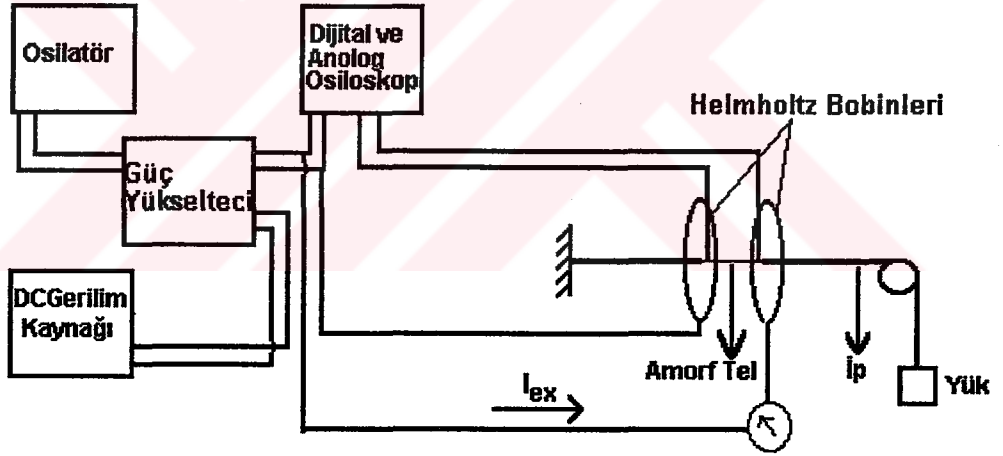
### 3.2. Matteucci Etki Ölçümleri

Şekil 3.2'de blok diyagramı görülen sistem ile Matteucci etki ölçümleri yapılmıştır. 20 cm uzunluğunda 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB ve 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB amorf tellerin eksenine paralel AC dış manyetik alan uygulanarak teller manyetize edilmiştir. Şekil 3.3. 420°C'de ısıl işlem görmüş FeSiB telin  $I_{ex}$ ,  $e_m$  fotoğrafını göstermektedir. Uygulanan bu dış AC manyetik alan dolayısı ile Matteucci voltajı tellerin uçları arasında oluşturulmuştur. Böylece  $e_m$  ile gösterilen Matteucci voltajı numune içindeki manyetik alana dik yöndeki akının sonucu olarak doğmaktadır. Bu yüzden manyetizasyondaki değişim Matteucci voltajına etki etmektedir. Frekans değerleri 100 Hz ve 500 Hz'de sabit tutularak çeşitli

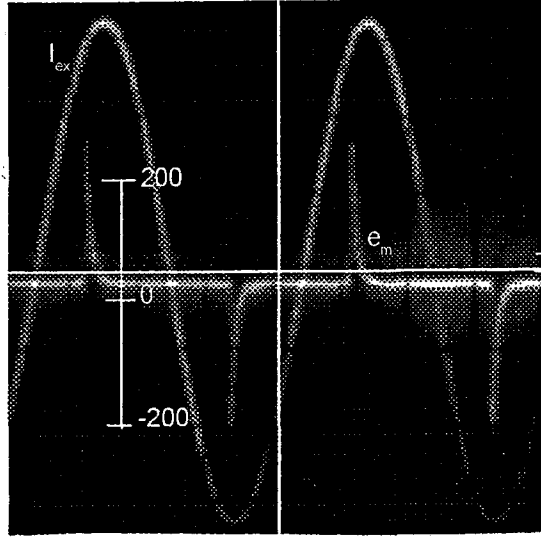
sıcaklıkta ısı işlemler görmüş teller için  $e_m$ 'ye karşı  $H_{ac}$  ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler ile ısı işlemler sıcaklıklarına göre  $e_m$  ve  $H_{ac}$ 'deki değişimler incelenmiştir.  $e_m$  değerleri osiloskop kullanılarak ölçülmüştür.

AC dış manyetik alanı oluşturmak için Helmholtz bobinlerine uygulanan  $I_{ex}$  akımı dijital bir ampermetreden okunmuş ve bu akım değerlerinden  $H_{ac}=n.I_{ex}$  ( $n$ : bobindeki sarım sayısı) formülüne göre AC manyetik alanın şiddeti hesaplanmıştır.

$H_{ac}=50.4$  A/m ( $I_{ex}=70$  mA) değerinde sabit tutularak frekans,  $f_e$  karşı  $e_m$ 'deki değişimler gözlenmiştir. Tele bir osilatör ile uygulanan sinyalin frekansı değiştirilerek  $e_m$  değerleri ölçülmüştür. Ayrıca strese karşı  $e_m$ 'deki değişimler incelenerek stresin  $e_m$  voltajına etkisi incelenmiştir. Böylece, tellerin domain yapısı ve manyetik özellikleri hakkında bilgi elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.2 Matteucci voltajının ölçüm sisteminin blok diyagramı.



Şekil 3.3. Isıl işlem görmüş CoSiB telde  $I_{ex}$ ,  $e_m$  fotoğrafı.

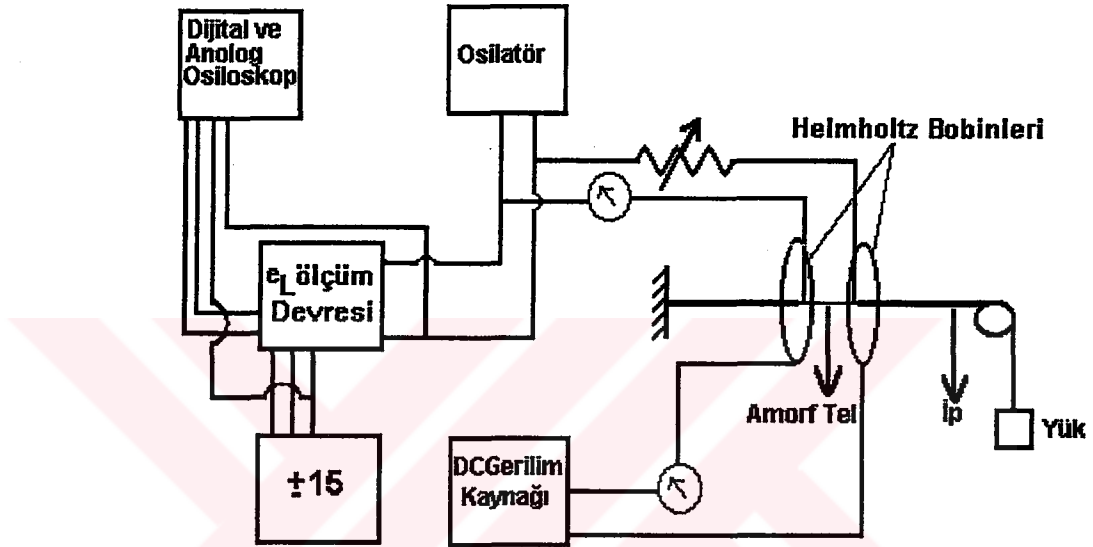
### 3.3. Manyeto-İndüktif Etki Ölçümleri

Manyeto-indüktif etki ölçümlerinde, amorf ferromanyetik telden bir AC akım,  $I_w$  geçirilerek tel dairesel yönde manyetize edilmiştir. Bu manyetizasyonun sonucunda telin her iki ucu arasında bir  $e_L$  voltajı oluşmuştur. Oluşan bu  $e_L$  voltajı kesim 2.4'de anlatılan bezer metodu kullanarak şekil 3.4. ve şekil 3.5. gösterilen devreler vasıtasıyla ölçülmüştür. Ayrıca AC bir akımla manyetize edilmiş olan bu tele dışarıdan DC manyetik alan,  $H$  uygulanmış bu alanın  $e_L$  üzerindeki etkisi, yani manyeto-indüktif etki ölçülmüştür.

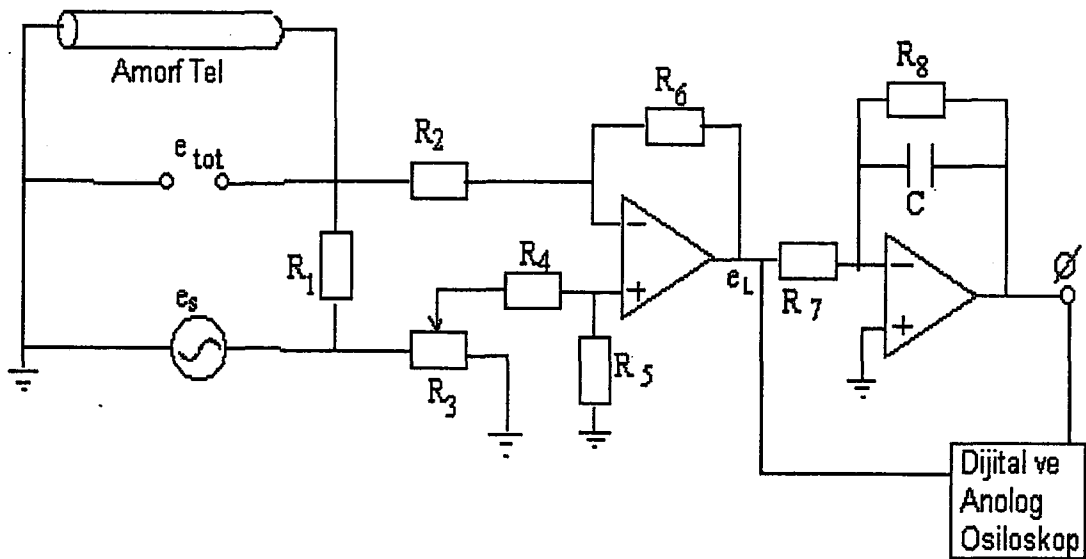
Uygulanan AC akım 30 mA ve 55 mA değerlerinde sabit tutularak frekans  $f$ 'e karşı  $e_L$  genlikleri ölçülmüş ve bir osilatör yardımı ile frekans değerleri değiştirilerek  $e_L$ 'deki değişimler incelenmiştir. Şekil 3.6. Isıl işlem görmemiş CoSiB telin  $I_w$ ,  $e_{tot}$  ve  $e_L$  fotoğrafını göstermektedir. Şekil 3.7.de de Isıl işlem görmüş CoSiB telin  $I_w$ ,  $e_{tot}$  ve  $e_L$  fotoğrafını göstermektedir.



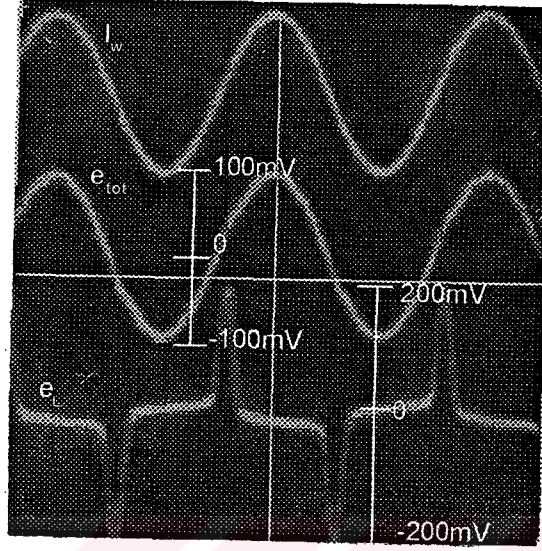
Sonra frekans değerleri 1 kHz ve 3 kHz'de sabit tutularak AC  $I_w$  akımına karşı  $e_L$  genlikleri ölçülerek  $I_w$  akımının  $e_L$ 'yi nasıl değiştirdiğine bakılmıştır. Ayrıca  $I_w$  akımının genliği 55 mA'de, frekans değerleri 1 kHz veya 3 kHz'de sabit tutulup DC manyetik alanın  $e_L$  üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak telin dairesel yöndeki manyetik özellikleri incelenmiştir.



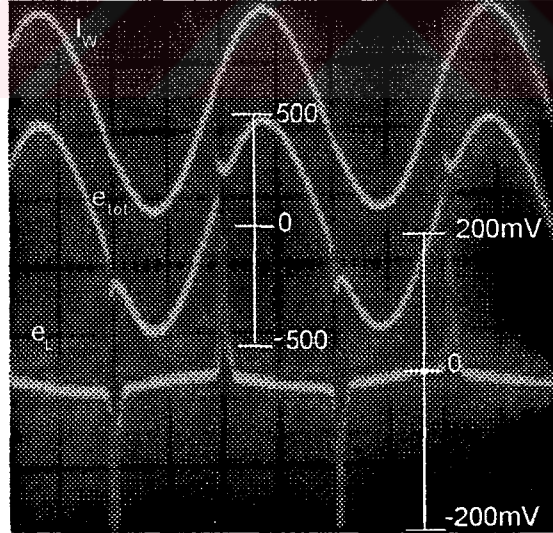
Şekil 3.4. Manyeto-İndüktif etki ölçüm sisteminin blok diyagramı.



Şekil 3.5.  $e_L$  ve M-H<sub>w</sub> ölçümü için deneysel devre.



Şekil 3.6. Isıl işlem görmemiş CoSiB telin  $I_w$ ,  $e_{tot}$  ve  $e_L$  fotoğrafı.



Şekil 3.7. Isıl işlem görmüş CoSiB telin  $I_w$ ,  $e_{tot}$  ve  $e_L$  fotoğrafı.

### 3.4. Histerisis Eğrilerinin Elde Edilişi

Şekil 3.5.  $e_L$  ve  $M-H_w$  ölçümü için deneysel devreyi göstermektedir. Burada  $M$  ve  $H_w$  verildileri sıra ile  $\int e_L dt / I_w$  a ve  $I_w / 2\pi a$  ile bulunmaktadır,  $a$  tel yarıçapıdır.  $M-H_w$  elde etmek için amorf tellerin içinden geçen bir AC akım  $I_w$  uygulanmaktadır. Böylece  $M-H_w$  manyetizasyon eğrileri elde edilmektedir. Bir AC akım,  $I_w$  tele uygulanarak tel dairesel yönde manyetize edilip  $e_L$  elde edilmekte ve  $e_L$  bir integral alıcı işlem yükseltecinin girişine verilerek  $M-H_w$  eğrileri elde edilmektedir.

Bu elde edilen  $M-H_w$  eğrileri sayesinde coercivity alan,  $H_c$ , doyum manyetizasyonu,  $M_s$  ve net manyetizasyon  $M_r$  değerleri bulunabilmektedir. Bu değerlerle ve  $M-H_w$  eğrilerinin şekli ile tellerin domain yapısı hakkında bilgi verilecektir.

### 3.5. Hata Kaynakları

Kullandığımız sistemi etkileyen bazı hata kaynakları vardır. Amorf tellerin çok hassas olması sebebiyle ortam sıcaklığının değişimi ve en ufak titreşim ölçümlerin değişmesine sebep olmaktadır.  $e_L$  veya  $e_m$  ölçümlerinde bu etkilerden dolayı genliğin değiştiği gözlenmiştir. Örneğin, oda sıcaklığının bir kaç derece bile artması  $e_L$  veya  $e_m$  genliğinde değişime sebep olmaktadır. Aynı zamanda tele bir dokunuş veya insan nefesi ile küçük titreşimin  $e_L$  veya  $e_m$  genliğinde değişime sebep olduğu görülmüştür.

Diğer bir hata kaynağı ise fark yükselteci tarafından  $e_L$  ve  $e_s$  farkı alınarak  $e_{tot}$ 'un eldesi sırasında oluşmaktadır. Bu iki sinyalin tam üst üste binmemesi de bir hata kaynağı olmaktadır. Çünkü, sinyallerin tam üst üste binmemeleri sebebiyle  $e_{tot}$  genliğini hatalı okunmamıza sebep olmaktadır.

Tellere gümüş boya ile yapılan kontaklarda bu konuda önemli bir yer teşkil etmektedir. Gümüş kontaklar iyi yapılmadığında,  $e_L$  veya  $e_m$  genliği sürekli değiştiği için genlik değerleri sağlıklı okunamamaktadır. Sistemde iletimi gümüş kontaklarla değilde

klamplar ile yaptığımızda tellerde sıkışma sebebiyle stres oluşur. Bu oluşan stres  $e_L$  veya  $e_m$  genliğinin değişmesine sebep olmaktadır. Klamlamadaki açığa çıkan sorun ise telin her iki ucunun eşit miktarda sıkıştırılıp sıkıştırılmadığıdır. Böyle bir durumda telin her iki ucuna farklı stresler uygulanır. Bu sebepten telin uçlarındaki streslerin farklı olmasından dolayı  $e_L$  veya  $e_m$  genliği net okunamamaktadır.

Kısaca tellerin hem ısıya hem de dış streslere çok hassas olması hata kaynaklarını oluşturmaktadır. Zaten tellerin bu dış parametreler ile çok hassas bir şekilde özelliklerini değiştirmesi onlara bir çok uygulama alanı açmaktadır.



## 4. MATTEUCCI ETKİ İLE İLGİLİ DENEYSEL SONUÇLAR

### 4.1 Giriş

Matteucci voltajı bölüm 3 kesim 3.2.'de anlatılan deney düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Bu bölümde, uygulanan AC alanın frekansının, genliğinin ve dıştan uygulanan stresin Matteucci voltajı üzerine etkisi incelenmiştir.

### 4.2. Isıl İşlem görmemiş Amorf Ferromanyetik Teller

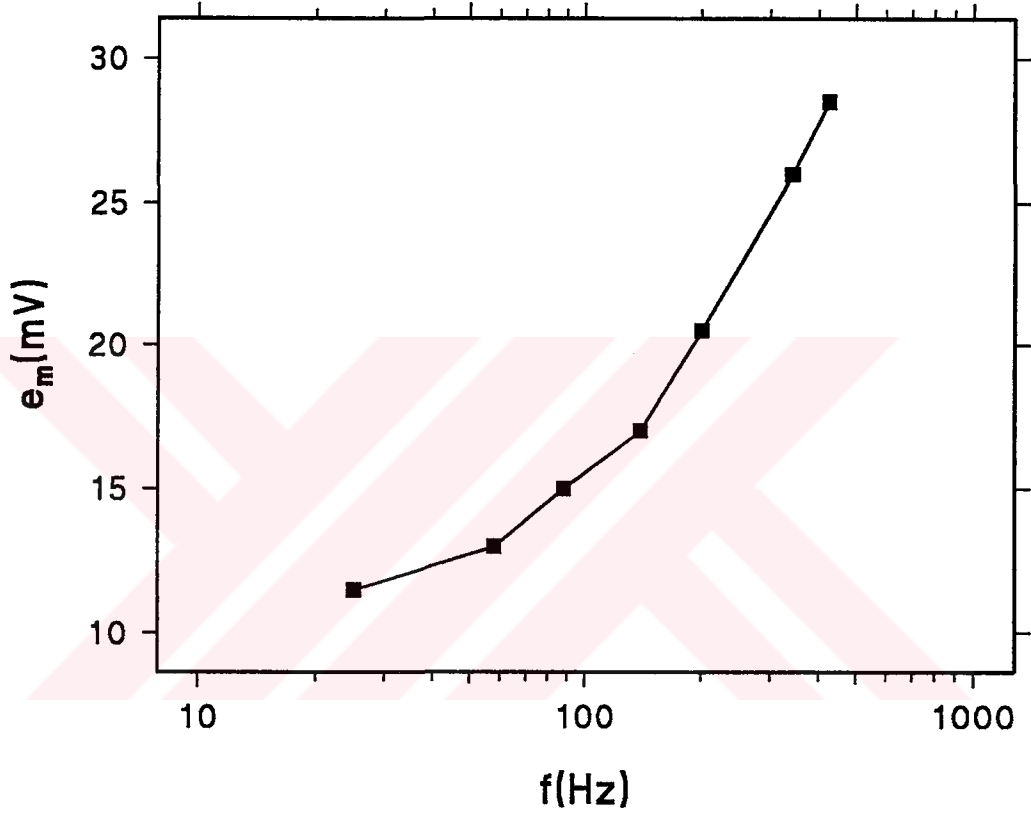
Şekil 4.1. ısıtılma işlemi görmemiş FeSiB telde Matteucci voltajı,  $e_m$ 'nin frekansla değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi frekans değeri ile  $e_m$ 'nin genliği artmaktadır. Şekil 4.2. ise yine bu telde  $e_m$ 'nin dışarıdan uygulanan AC manyetik alanın genliği ile değişimini göstermektedir. Buradan da görüldüğü gibi yine  $e_m$  değeri uygulanan AC alanın genliği ile artmaktadır.

Benzerince, CoSiB bileşimli tellerde, dışarıdan uygulanan AC alanın genliğinin ve frekansın  $e_m$  voltajına etkisi şekil 4.3. ve şekil 4.4.'de verilmiştir. Aynı FeSiB telde olduğu gibi CoSiB tellerde de frekans ve AC alanın genliği arttıkça  $e_m$  değerinin arttığı gözlenmiştir. Frekans 100 Hz'den 500 Hz'e çıkarıldığında FeSiB tellerde yaklaşık %50 CoSiB tellerde yaklaşık %65 oranlarında  $e_m$  değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir.

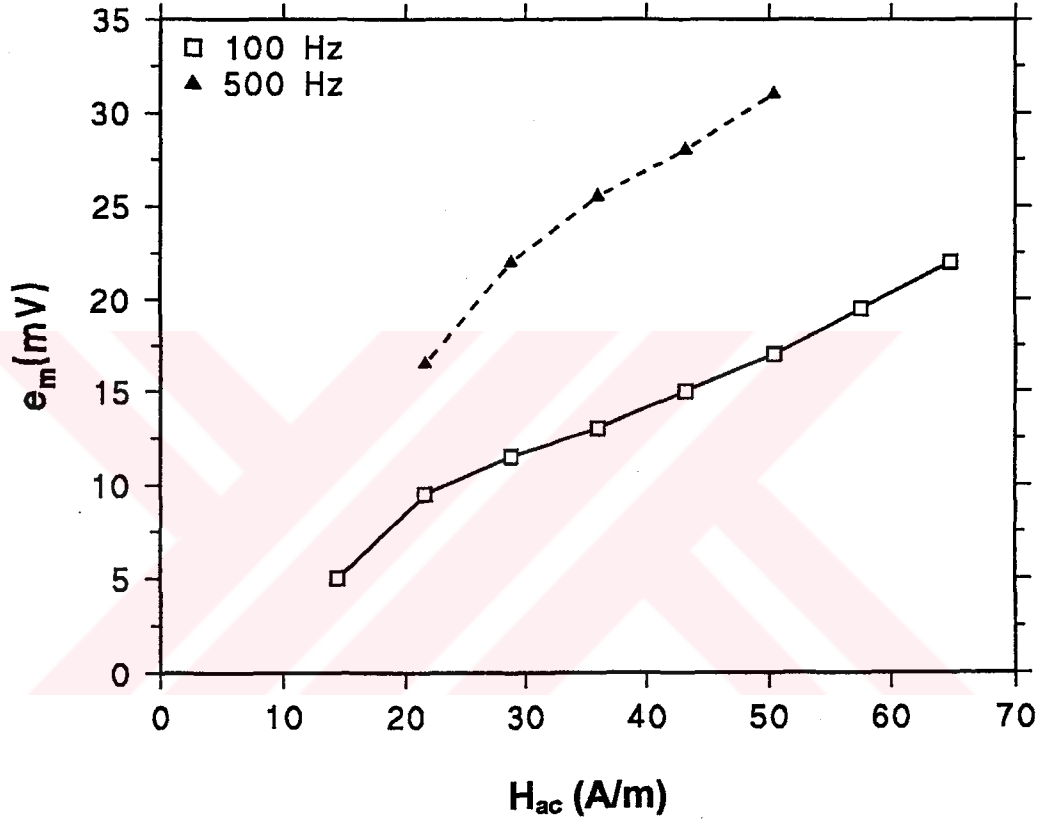
Bilindiği üzere Matteucci voltajı helisel yöndeki manyetizasyonun bir sonucudur. Şekil 2.5'de FeSiB ve CoSiB teller için önerilen domain modellerini incelediğimizde, bu tellerde helisel yönde bir manyetizasyon olmadığını görmekteyiz. Bu nedenle daha önce ısıtılma işlemi görmemiş teller için önerilen domain modellerinin tam doğru olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu önerilen domain yapılarının tam olarak doğru olmadığını  $\Delta E$  sonuçlarında desteklemektedir [36]. Önerilen modele göre dış kabuktaki manyetik momentlerin telin eksenine göre yönelim açısı  $90^\circ$  derece olmalıdır.

Şekil 4.5. ve 4.6. ısıtılma işlem görmemiş FeSiB ve CoSiB tellerin normalize olmuş elastik katsayılarının manyetik alana karşı grafiğini göstermektedir [3,36,38]. Şekle baktığımızda  $E_0/E_s$  ( $E_0$ ;  $H=0$ 'daki elastik katsayısı,  $E_s$ ; numune manyetik doyuma ulaştığı andaki elastik katsayısı) oranının FeSiB tel için 0.94, CoSiB tel için 0.98 olduğunu görmekteyiz. Bu da teldeki manyetik momentlerin ortalama olarak yönelim açısının  $75^\circ$ - $85^\circ$  arasında olduğu söylemektedir (şekil 2.10). Dolayısı ile bu sonuçlarda önerilen domain modeli ile çelişmektedir. Bu nedenle biz bu iki deneysel sonuca dayanarak önerilen domain modellerinin tam olarak doğru olmadığını ve telin büyük ihtimalle helisel yönde bir manyetizasyon bileşeni olduğunu düşünmekteyiz.

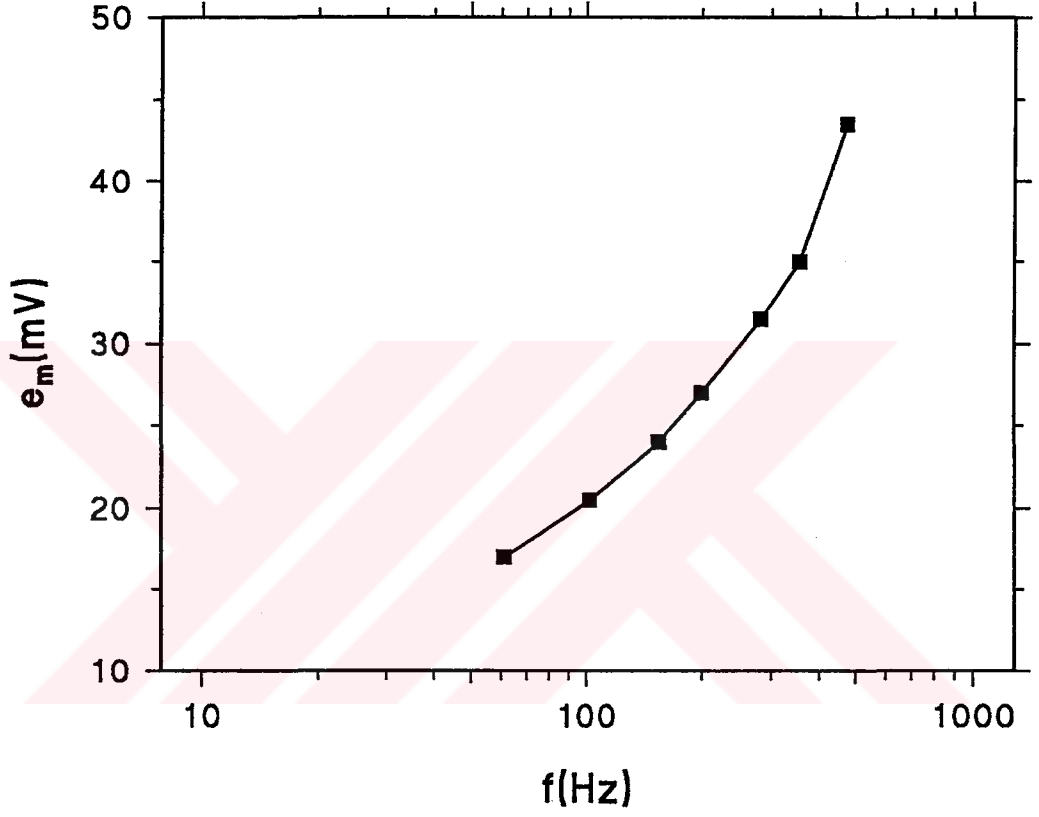


Şekil 4.1. Isıl işlem görmemiş FeSiB telde  $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği ( $H_{ac}=50$  A/m).

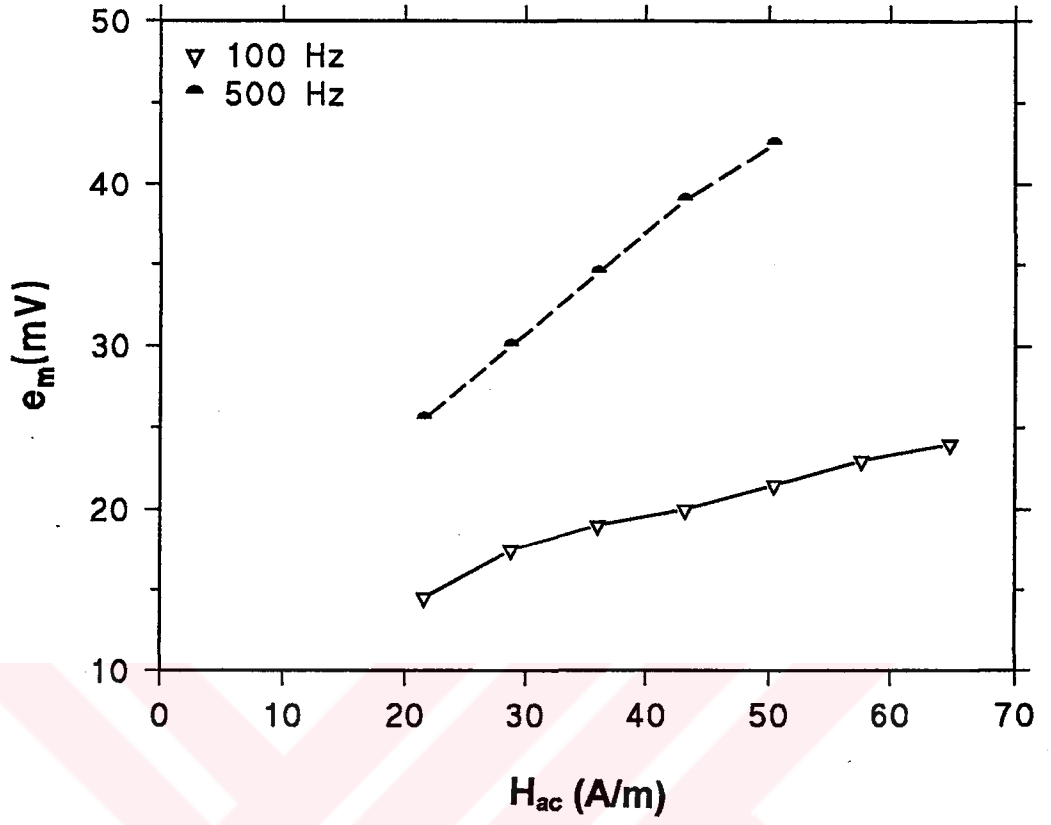


Şekil 4.2. Isıl işlem görmemiş FeSiB telde 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.

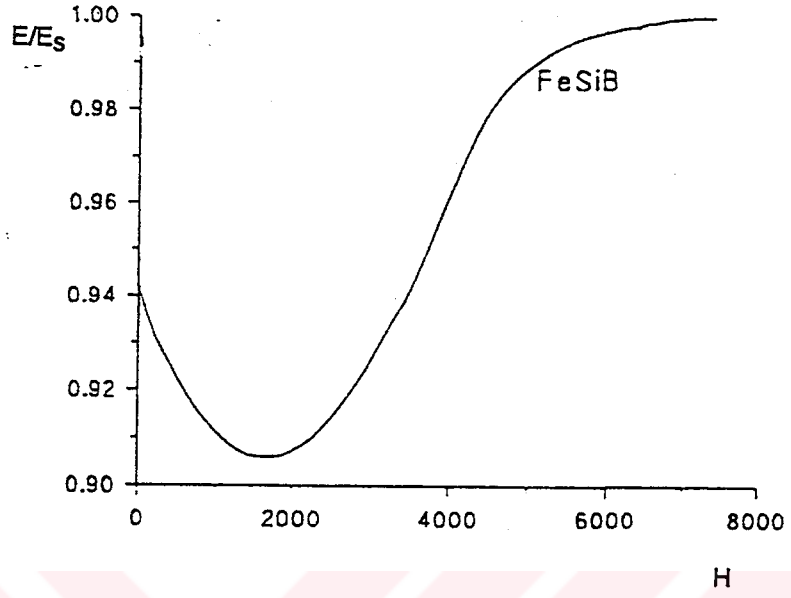




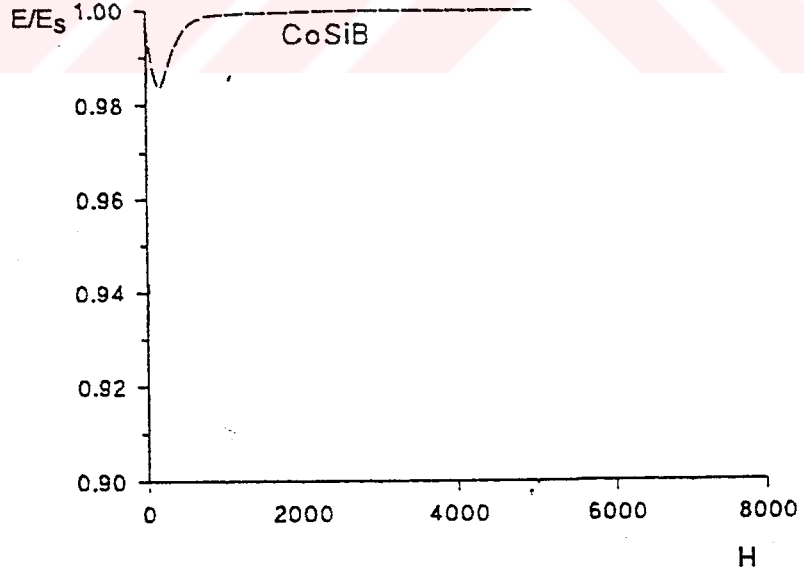
Şekil 4.3. Isıl işlem görmemiş CoSiB telde  $e_m$ 'nin frekansa karşı olan grafiği ( $H_{ac}=50$  A/m).



Şekil 4.4. Isıl işlem görmemiş CoSiB telde uygulanan AC manyetik alanın  $e_m$ 'ye karşı grafiği.



Şekil 4.5. FeSiB tel için normalize olmuş elastik katsayısının uygulanan manyetik alana karşı grafiği [36].



Şekil 4.6. CoSiB tel için normalize edilmiş elastik katsayısının manyetik alana karşı grafiği [36].

### 4.3. Isıl İşlemin Matteucci Voltajına Etkisi

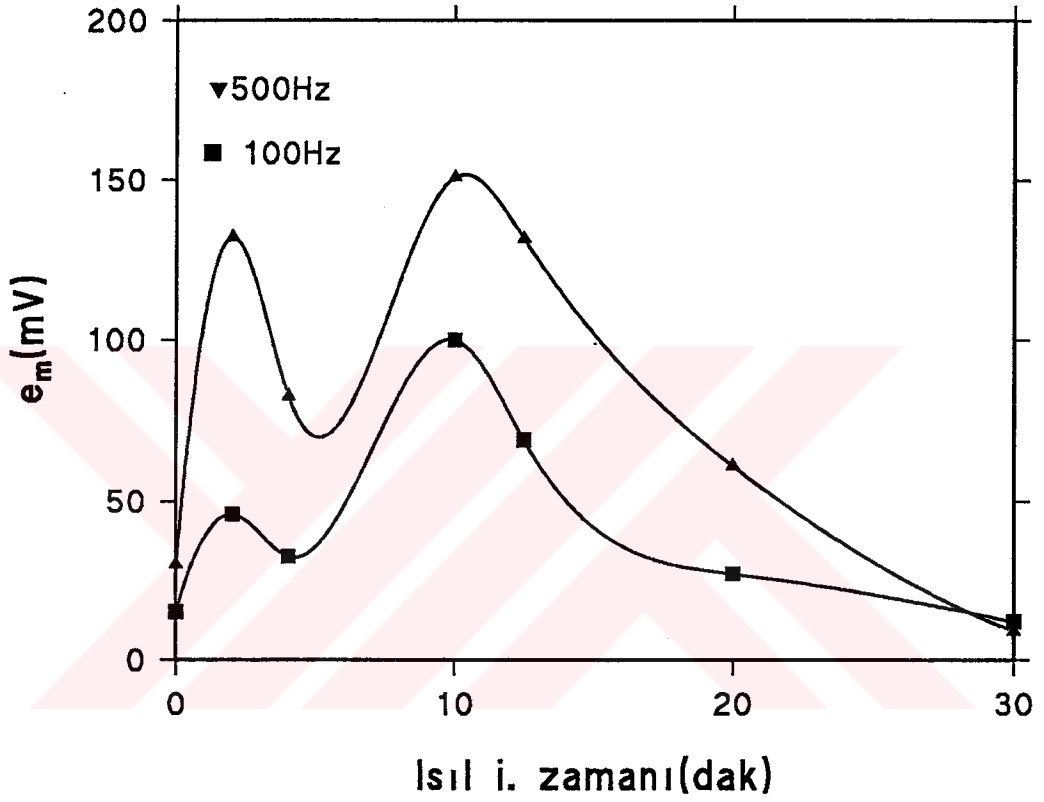
Şekil 4.7. 500°C tüp fırında ısıl işleme tabi tutulan telin  $e_m$  değerlerinin ısıl işlem zamanı ile değişimini vermektedir. Görüldüğü gibi  $e_m$  değeri ilk anda artmakta ve daha sonra azalmakta sonra tekrar artarak azalmaya başlamaktadır.  $e_m$ 'nin bu ilginç davranışını, ferromanyetik maddeler ile ilgili manyetik yapıyı belirleyen sistemin toplam anisotropi enerjisi ile açıklayabiliriz.

$$U_T = U_{ex} + U_{kris} + U_s + U_{me} \quad (4.1)$$

Burada  $U_T$  toplam anisotropi enerjisi;  $U_{kris}$  kristal anisotropi enerjisi (amorf alaşımlar için sıfır);  $U_s$  şekil anisotropi enerjisi;  $U_{ex}$  exchange enerjisi;  $U_{me}$  manyetoelastik enerjidir. Numune ısıl işleme tabi tutulduğunda ve ilk anda amorf yapı korunduğunda sadece  $U_{me}$  değişir. Çünkü  $U_{me} = 3/2 \lambda_s \sigma_i$  ile verilmektedir ve ısıl işlem iç stresleri ( $\sigma_i$ ) azalttığından  $U_{me}$  azalacak numune yeni bir domain yapısına kavuşacaktır. 500°C'de 5 dakikalık ısıl işlem sonucu iç stresin minimuma indiği gözlenmiştir [21]. Bu nedenle bu durumda  $e_m$ 'de bir artış olur. Daha sonra ısıl işleme devam edildiğinde telde küçük adacıklar halinde kristalleşmeler olmaktadır [21]. Bu küçük kristal adacıkları yapıda düzensiz bir stres oluşturduğundan  $e_m$  değeri azalmaktadır.

Isıl işlem süresi 10 dakikaya vardığında artık telin tüm yüzeyinin kristalleştiği iç kısmının amorf olduğu gözlenmiştir. Bu da FeSiB telde telin çapı doğrultusunda bir iç stres oluşturarak telde değişik bir domain yapısı oluşturur. Bu nedenle  $e_m$ 'de tekrar bir artış olduğu gözlenmiştir. 20 dakikadan sonra numunenin hemen hemen tamamen kristalleştiği gözlenmiştir. Bu nedenle de  $e_m$  değeri azalmıştır.

Isıl işlemlerin telin manyetik yapısı üzerindeki etkisi ayrıca bölüm 5'te tartışılacaktır.



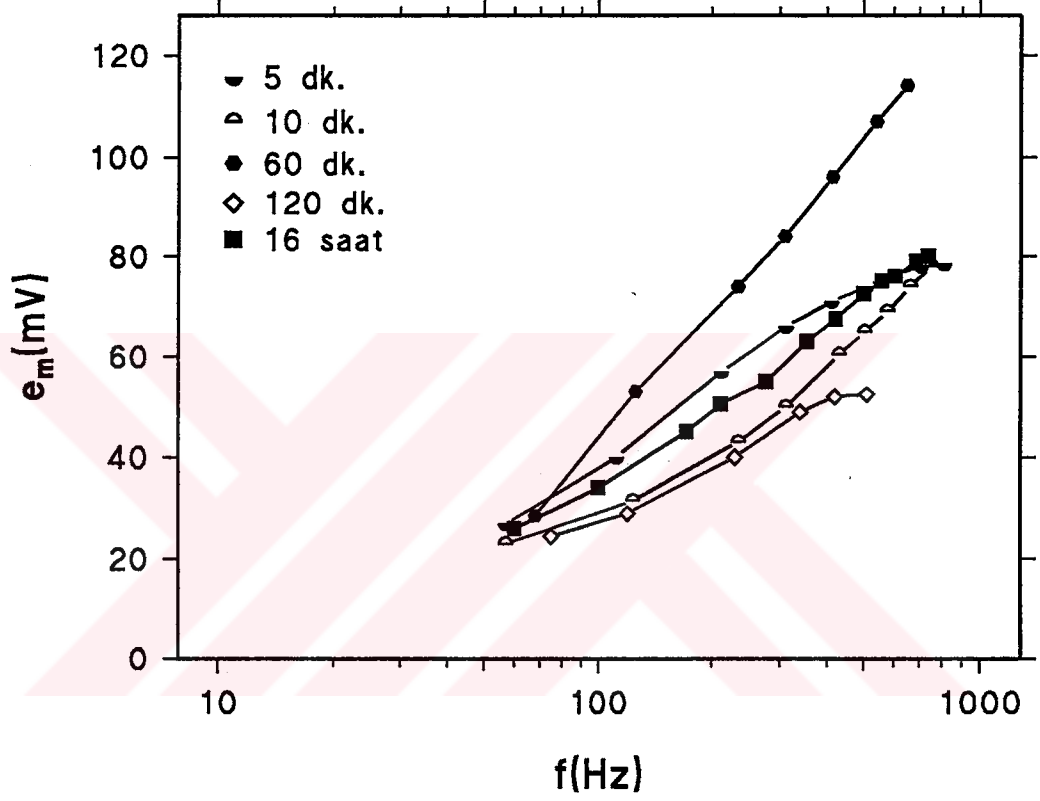
Şekil 4.7. 500°C'de ısıl işlem görmüş FeSiB telde  $H_{ac}=50$  A/m'de 100 ve 500 Hz için  $e_m$ 'nin ısıl işlem zamanına karşı grafiği.

#### 4.4. Amorf Ferromanyetik Tellerde Frekansın ve AC Dış Manyetik Alanın Etkisi

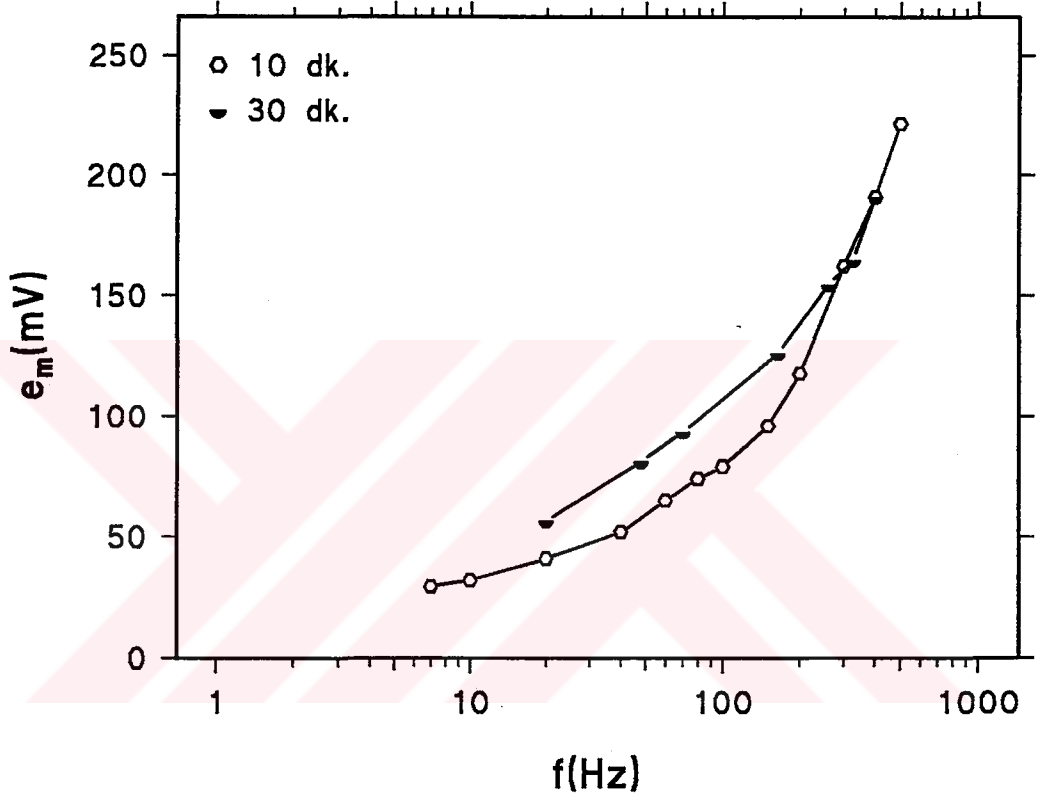
Şekil 4.8., 9., 10.ve 11. değişik ısıtım sıcaklıkları, değişik ısıtım süreleri ve 50 veya 72 A/m'lik manyetik alan için FeSiB tellerde Matteucci voltajına frekansın etkisini göstermektedir. Bulunan bu sonuçlar  $e_m$  genliğinin frekans arttıkça arttığını göstermiştir. Ayrıca AC dış manyetik alan Matteucci voltajını değiştirmektedir.

Şekil 4.12., 13., 14., 15., 16. ve 17.'de değişik ısıtım sıcaklıkları ve süreleri için 100 ve 500 Hz'de FeSiB tellerin  $e_m$ 'ye karşı AC manyetik alan ölçümleri görülmektedir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi uygulanan AC alanın şiddeti arttıkça  $e_m$  değeri de artmaktadır.

Şekil 4.18. 50 A/m manyetik alan altında 500°C'de çeşitli süreler için ısıtım görmüş 130  $\mu$ m çapında CoSiB telin Matteucci voltajının frekansa bağıllığını göstermektedir. Şekil 4.19. ise 500°C'de 5 ve 40 dakika ısıtım görmüş 130  $\mu$ m çapında CoSiB tel için 100 ve 500 Hz'de Matteucci voltajının manyetik alana bağıllığını göstermektedir. Aynı sıcaklıkta ve aynı ısıtım süresine maruz bırakılan tellerin manyetik alan arttıkça  $e_m$  genliğinde arttığı görülmüştür. Fakat, bu artış 500 Hz'de 100 Hz'dekine nispeten yaklaşık %80 daha fazla olmaktadır.

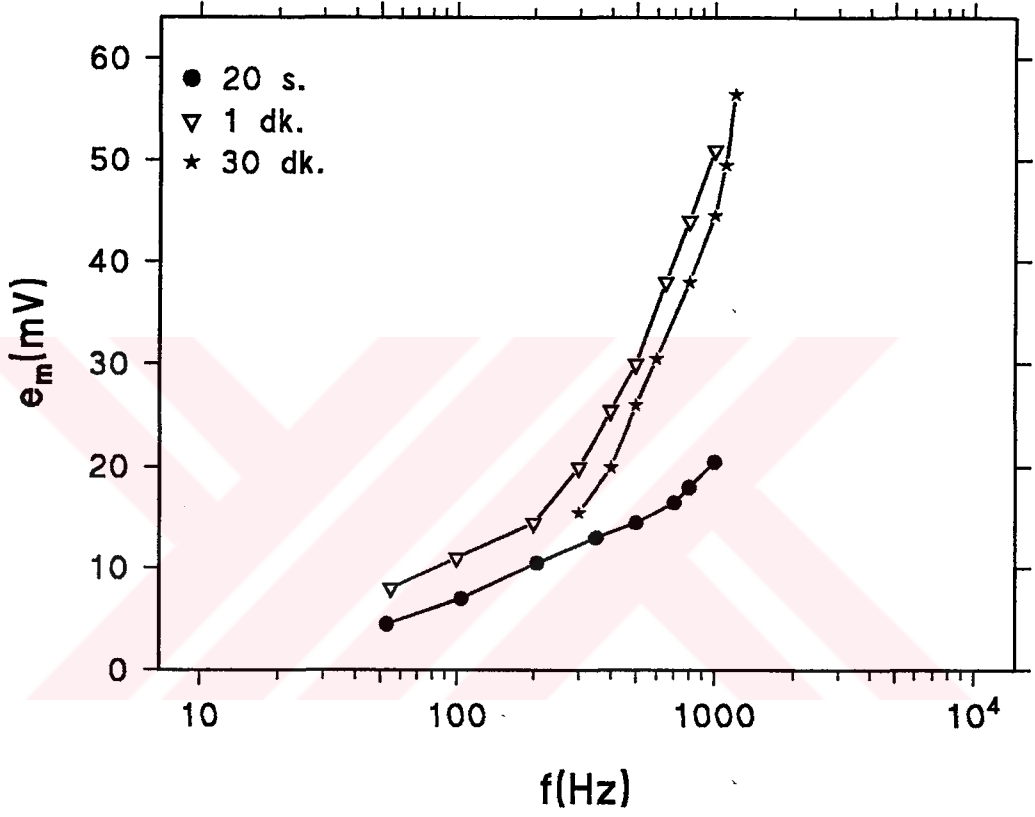


Şekil 4.8.  $H_{ac}=50$  A/m altında  $400^{\circ}\text{C}$ 'de çeşitli zamanlar için ısıtılmış 20 cm uzunlukta ve  $125\ \mu\text{m}$  çapındaki FeSiB telde  $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği.

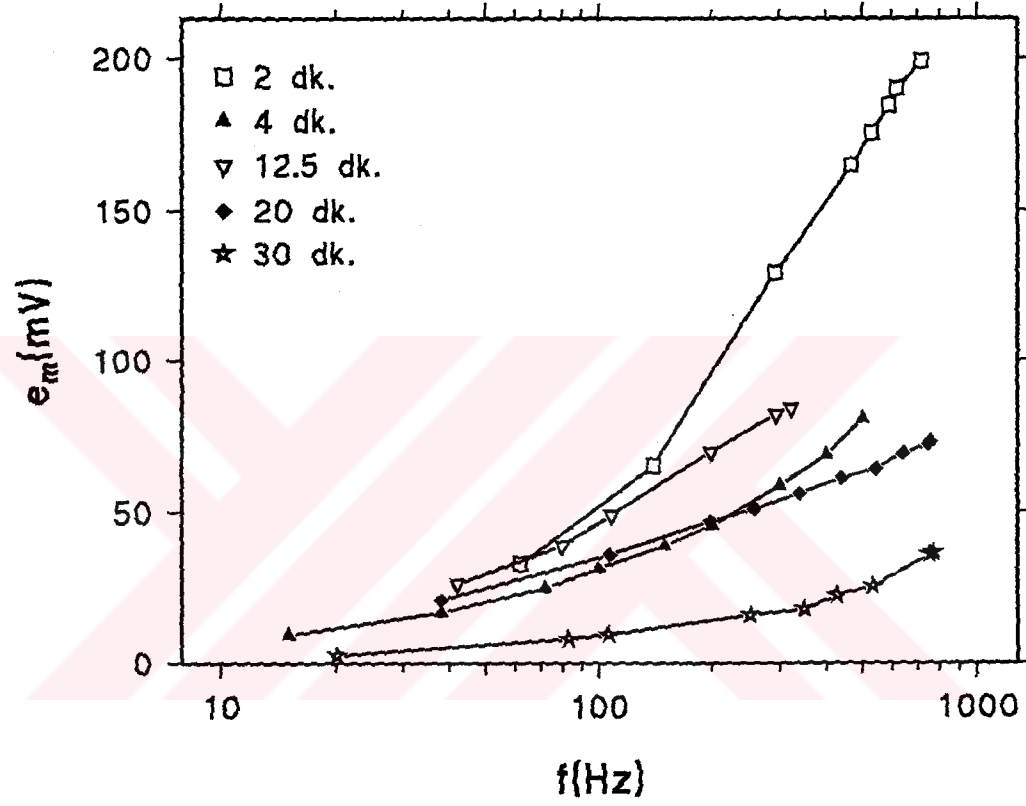


Şekil 4.9.  $H_{ac}=50$  A/m altında  $420^{\circ}\text{C}$ 'de 10 ve 30 dakika için ısıtılmış 20 cm uzunlukta ve  $125\ \mu\text{m}$  çapındaki FeSiB telde  $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği.

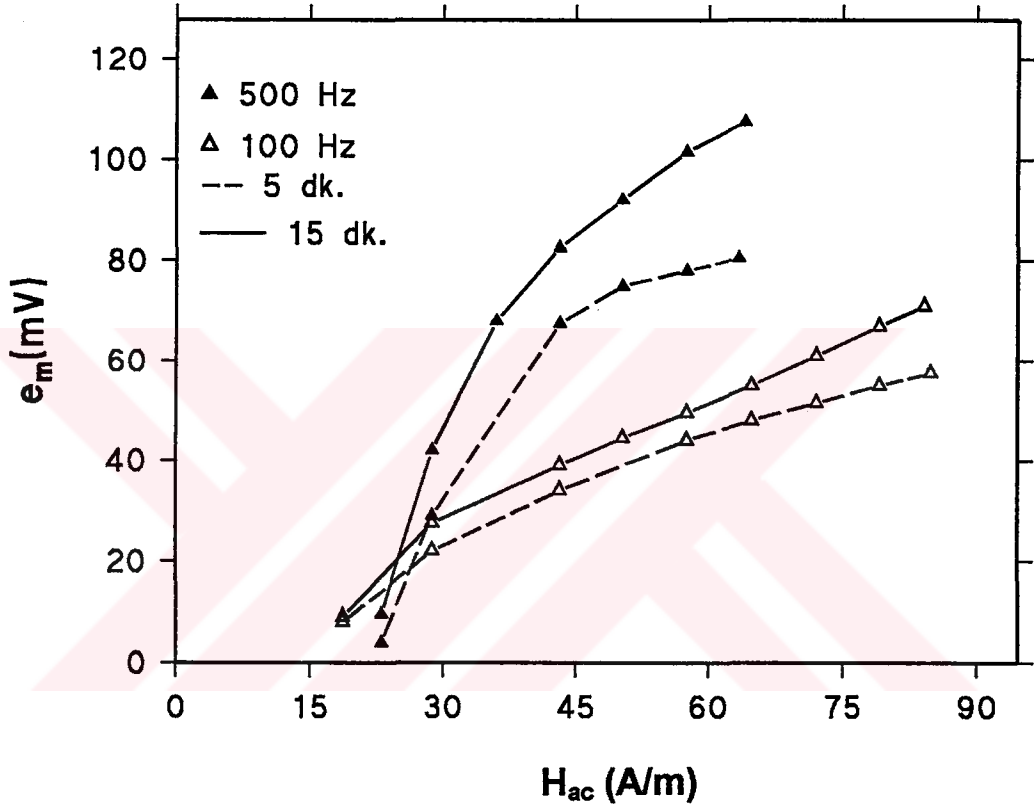




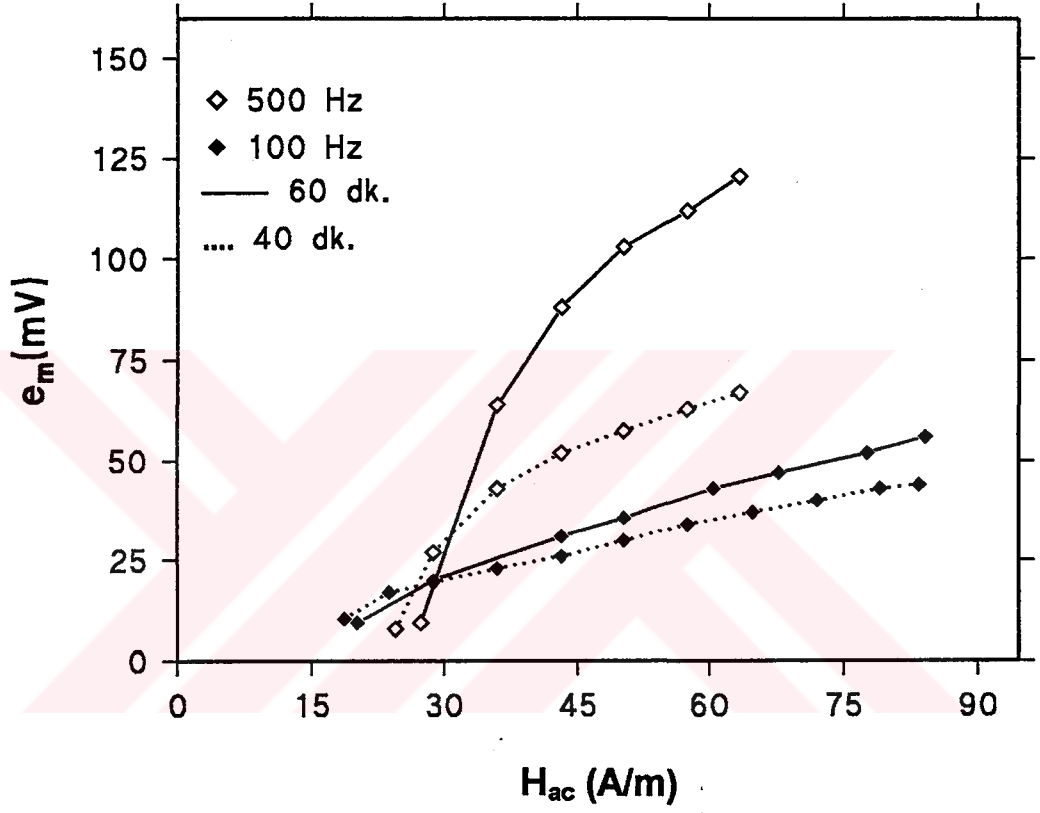
Şekil 4.10.  $H_{ac}=72$  A/m altında  $460^{\circ}\text{C}$ 'de çeşitli zamanlar için ısıtılmış 20 cm uzunlukta ve  $125\ \mu\text{m}$  çapındaki FeSiB telde  $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği.



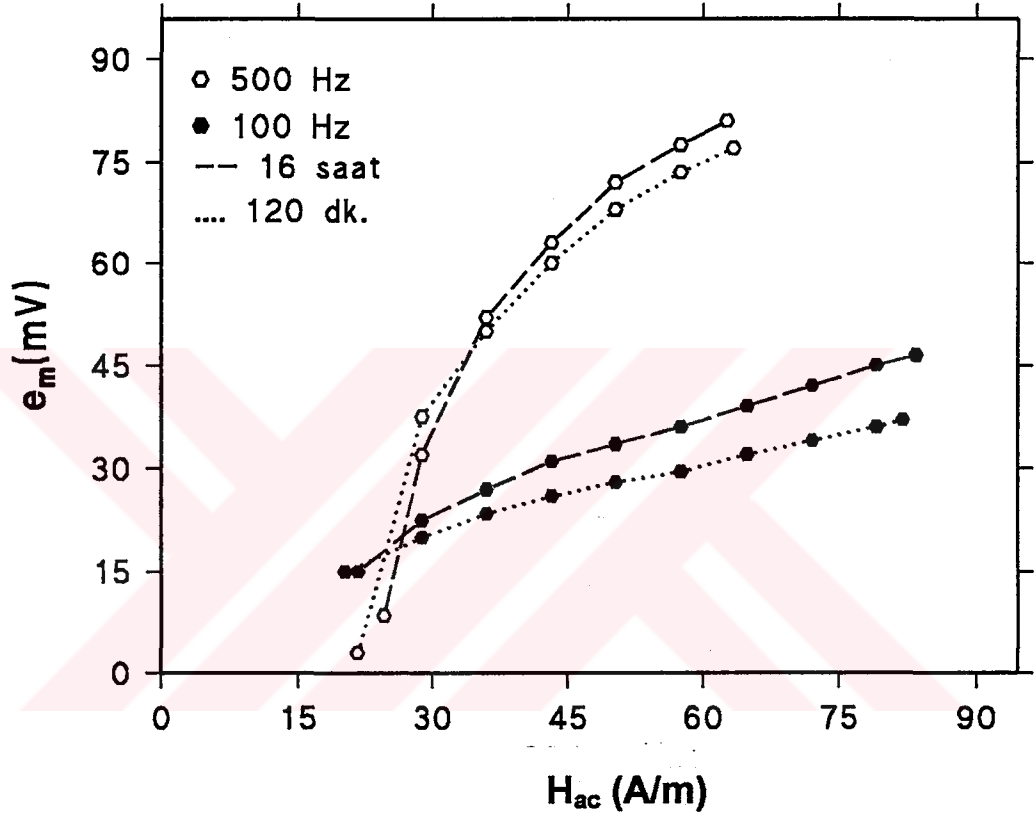
Şekil 4.11.  $H_{ac}=50$  A/m altında  $500^{\circ}\text{C}$ 'de çeşitli zamanlar için ısı işlem görmüş 20 cm uzunlukta ve  $125\ \mu\text{m}$  çapındaki FeSiB telde  $e_m$ 'ye karşı frekans grafiği.



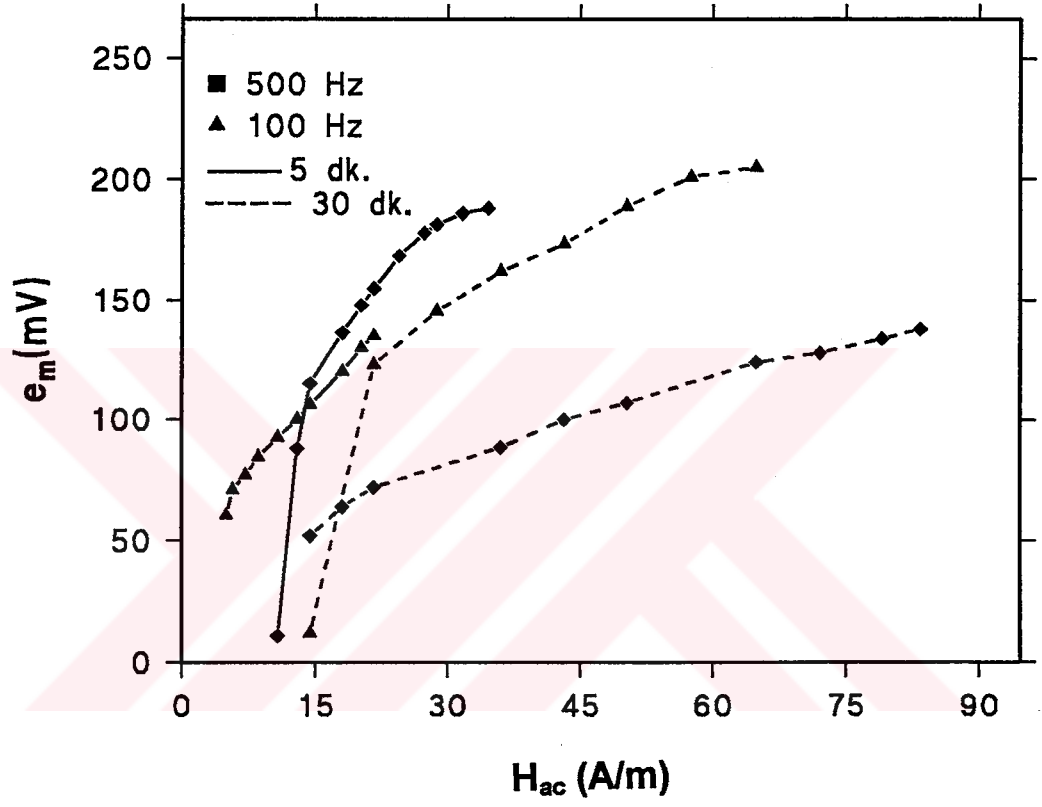
Şekil 4.12. 400°C'de 5 ve 15 dakika ısıtım görmüş 125  $\mu$ m çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.



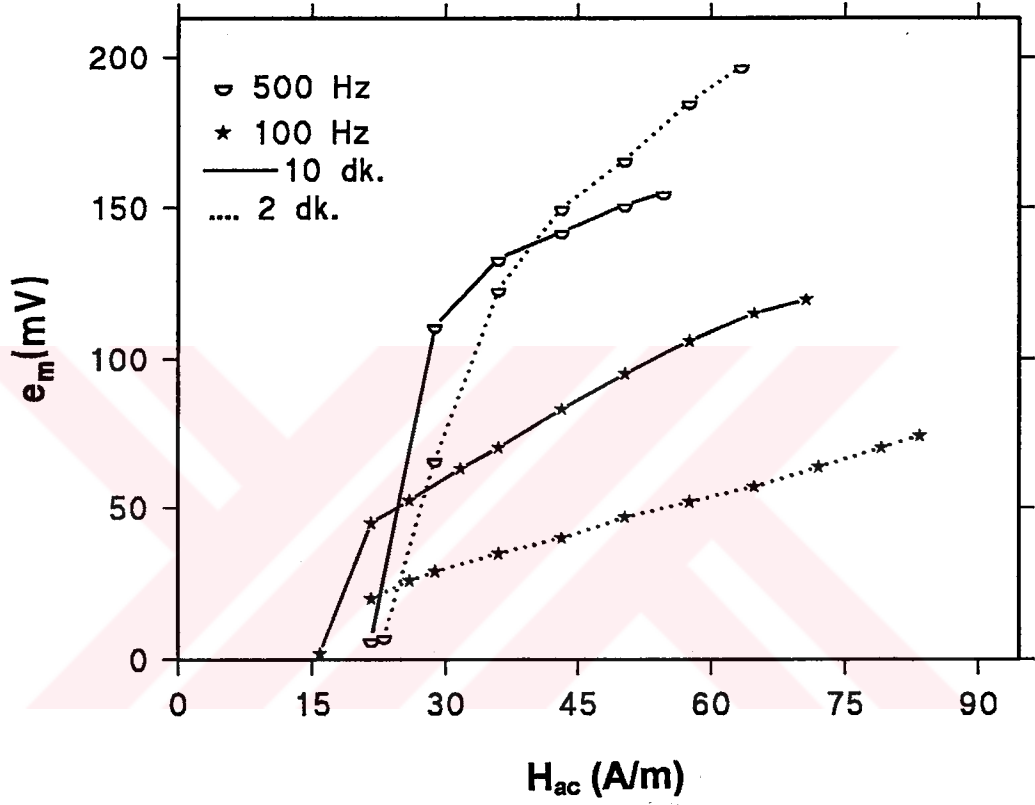
Şekil 4.13. 400°C'de 40 ve 60 dakika ısıtım görmüş 125  $\mu$ m çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.



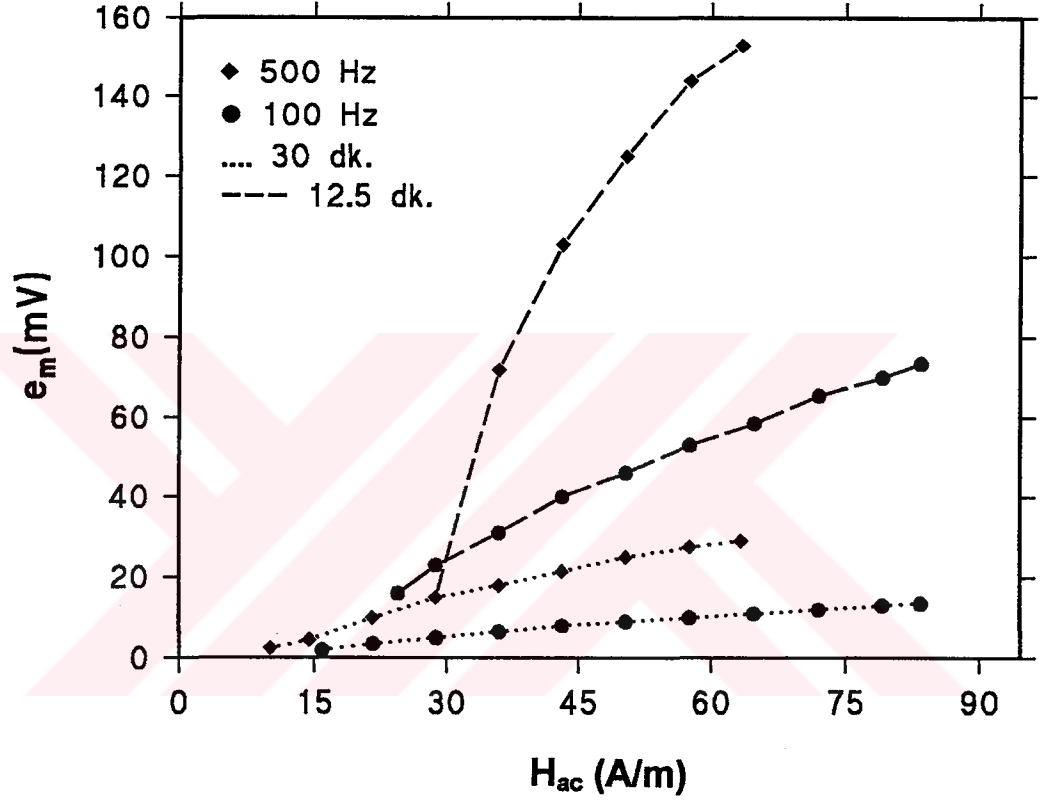
Şekil 4.14. 400°C'de 120 dakika ve 16 saat ısıl işlem görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.



Şekil 4.15. 420°C'de 5 ve 30 dakika ısıtılma görmüş 125  $\mu$ m çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.

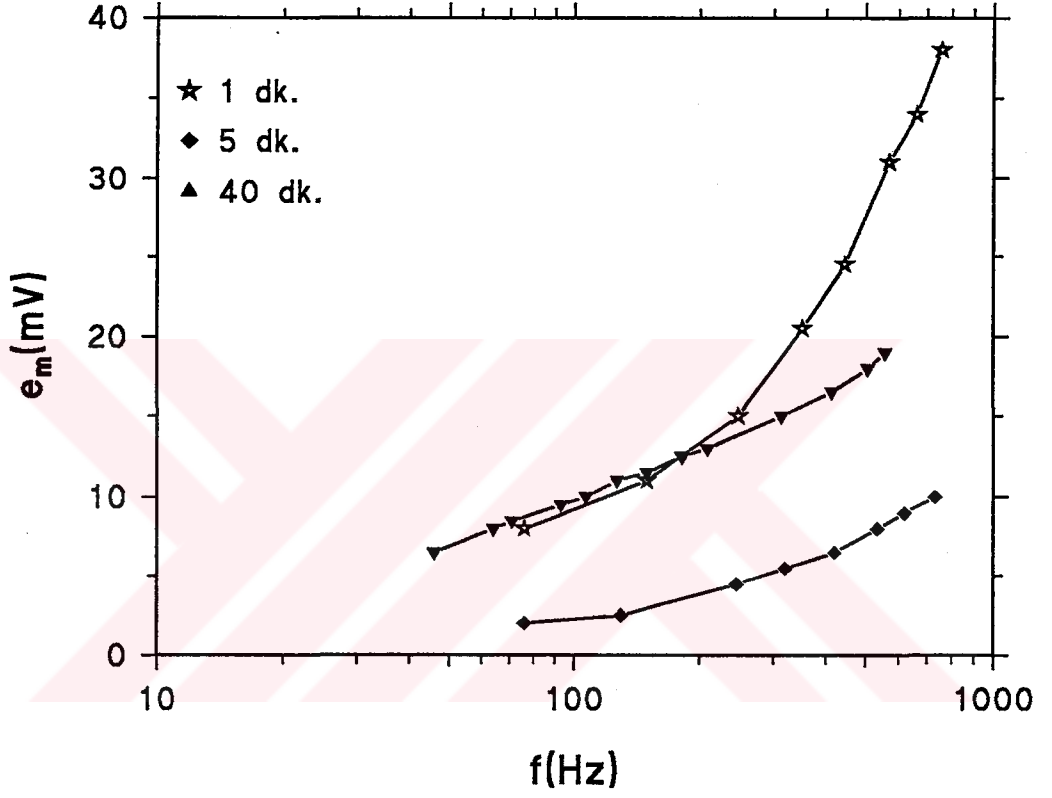


Şekil 4.16. 500°C'de 2 ve 10 dakika ısıtım görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.

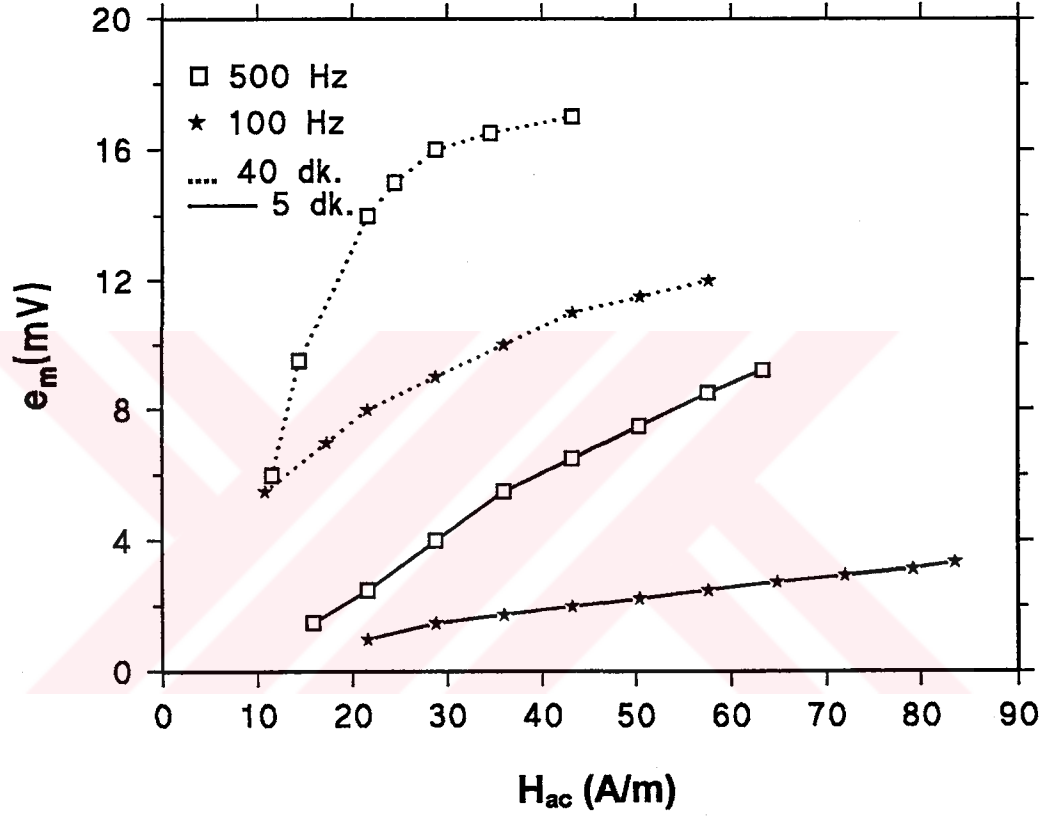


Şekil 4.17. 500°C'de 12.5 ve 30 dakika ısıl işlem görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.





Şekil 4.18.  $H_{ac}=50$  A/m manyetik alan altında  $500^{\circ}\text{C}$ 'de çeşitli süreler için ısıtılmış  $130\ \mu\text{m}$  çapında CoSiB telde  $e_m$ 'nin frekansa karşı grafiği.



Şekil 4.19. 500°C'de 5 ve 40 dakika ısıtılma görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB tel için 100 ve 500 Hz'de  $e_m$ 'nin uygulanan AC manyetik alan genliğine karşı olan grafiği.

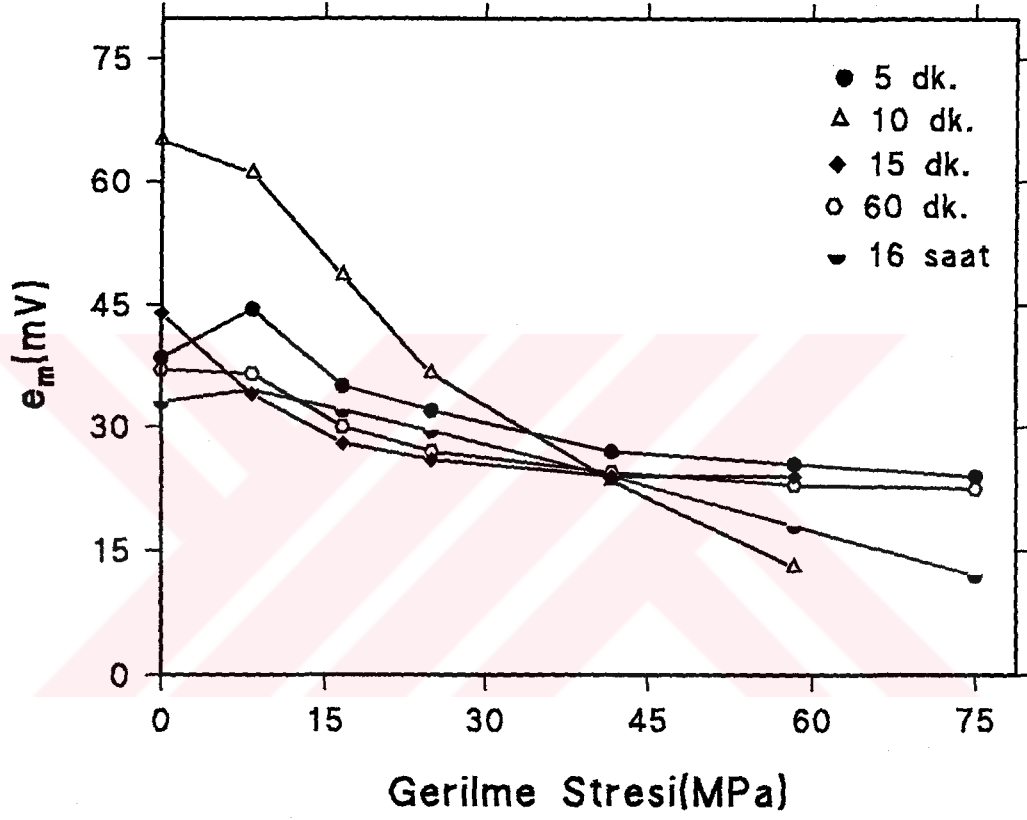
$e_m$ 'nin hem frekans hem de manyetik alan ile artmasını aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz.

$$e_m = \frac{d\phi_c}{dt} \quad (4.2)$$

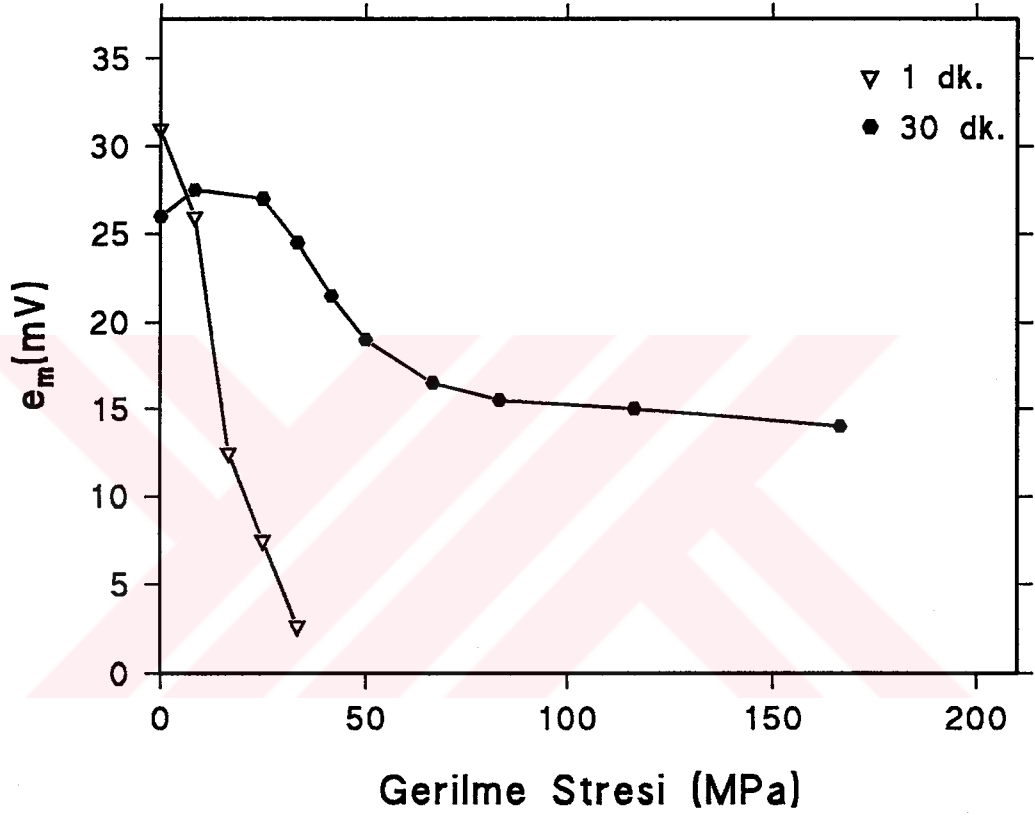
Burada  $\phi_c$  telin içinde uygulanan AC alana dik yönde oluşan manyetik akıdır. Biz frekans değerini veya alanın şiddetini arttırdıkça akı değişimi fazla olacağından daha büyük bir  $e_m$  voltajı elde ederiz.

#### 4.5. Amorf Ferromanyetik Tellerde Stresin Etkisi

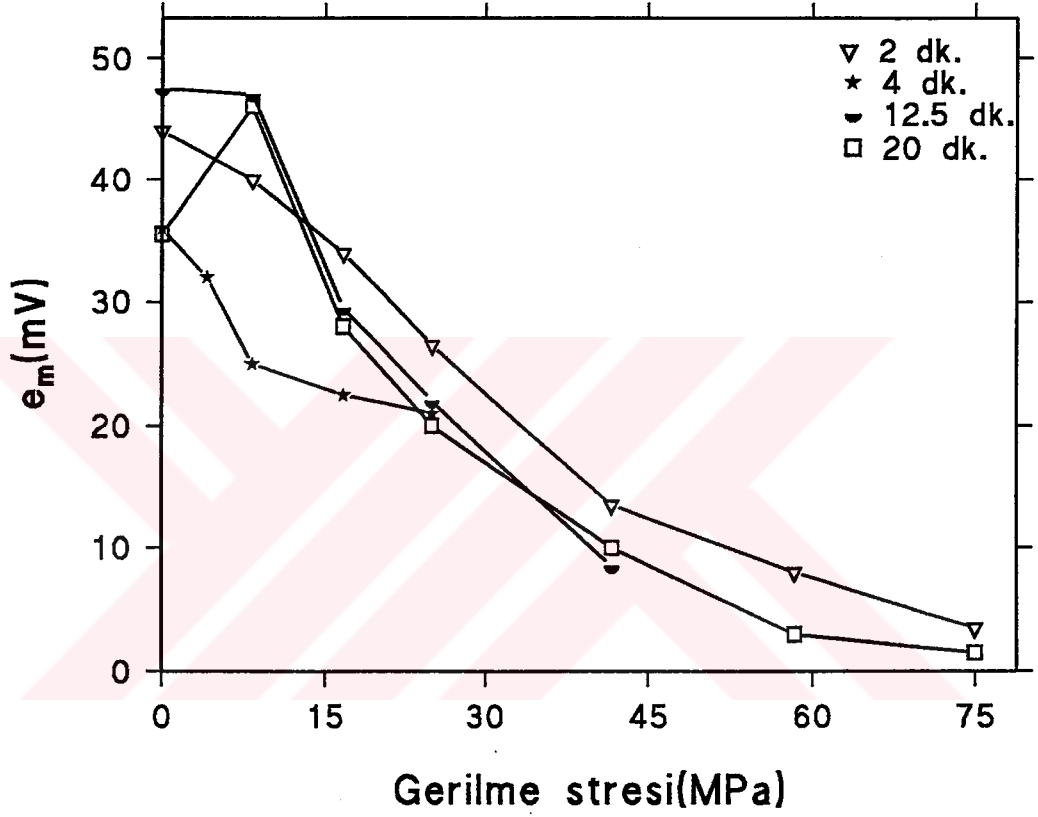
Şekil 4.20., 21., 22. değişik AC manyetik alana tabi tutulmuş tellerin  $e_m$  voltajını dışarıdan uygulanan stresle değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi artan stres değeri ile  $e_m$  azalmaktadır. Çünkü stres FeSiB tel pozitif manyetostriksiyona sahip olduğunda manyetik momentleri kesim 2.6'da belirtildiği gibi kendi doğrultusunda yönlentmeye çalışacaktır [20,21,24]. Bu nedenle teldeki helisel yöndeki manyetizasyon bileşeni azalacak ve artan stresle  $e_m$  değeri sifıra yaklaşacaktır. Bu yüzden FeSiB tellerde stres  $e_m$  değerini azaltmaktadır.



Şekil 4.20.  $f = 100$  Hz,  $H_{ac} = 50$  A/m altında 400°C'de çeşitli zamanlar için ısıtılmış 20 cm uzunlukta ve  $125 \mu\text{m}$  FeSiB telin  $e_m$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği.



Şekil 4.21.  $f=100$  Hz,  $H_{ac}=72$  A/m altında  $460^{\circ}\text{C}$ 'de 1 ve 30 dakika için ısıtım işlem görmüş 20 cm uzunlukta ve  $125\ \mu\text{m}$  çapındaki FeSiB telde  $e_m$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği.



Şekil 4.22.  $f = 100$  Hz,  $H_{ac} = 50$  A/m altında  $500^\circ\text{C}$ 'de çeşitli zamanlar için ısıl işlem görmüş 20 cm uzunlukta ve  $125 \mu\text{m}$  çapındaki FeSiB telde  $e_m$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği.

## 5. MANYETO-İNDÜKTİF ETKİ İLGİLİ DENEYSEL SONUÇLAR

### 5.1 Giriş

Amorf telin iki ucu arasında oluşan  $e_L$  voltajı, bölüm 3 kesim 3.3.'de anlatılan deney sistemi kullanılarak ölçülmüştür.  $e_L$ 'nin dış DC manyetik alan ile değişimi yani manyeto-indüktif etki değişik amorf teller için incelenmiştir.

Ayrıca telden geçirilen  $I_w$  akımının frekansının, genliğinin ve dıştan uygulanan stresin telin iki ucu arasında oluşan  $e_L$  voltajının üzerine olan etkisi incelenmiştir. Yine aynı deney sistemi kullanılarak tellerin dairesel yöndeki histerisis eğrisi elde edilmiş, histerisis eğrilerine dışarıdan uygulanan DC manyetik alanın ve telden geçirilen AC akımın frekansının etkisi incelenmiştir.

### 5.2. Isıl İşlem Görmemiş Amorf Ferromanyetik FeSiB ve CoSiB Teller

Isıl işlem görmemiş FeSiB tellerde  $e_L$  voltajı ölçülememiştir. Bunun nedeni bu tellerin düşük manyetik alan değerlerinde dairesel yönde manyetize etmenin imkansız olmasıdır. Dolayısı ile bu tellerin dairesel yöndeki manyetik duygunluğu sıfırdır. Bu nedenle denklem 2.5'e göre  $e_L$  voltajı sıfır olması gayet normaldir. Başka bir şekilde açıklayacak olursak, ısıtılma işlem görmemiş FeSiB telin domain yapısına baktığımızda (şekil 2.5.) telin iç kısmında manyetik momentler telin boyu doğrultusunda, telin dış kısmında manyetik momentler telin çapı yönünde yönelmişlerdir ve bu manyetik momentleri bu yönlerde büyük bir iç stres tutmaktadır. Dairesel yönde yönelmiş net bir manyetizasyon yoktur. Bu nedenle dışarıdan dairesel yönde uygulanan düşük manyetik alan teldeki iç stresin etkisine üstün gelip manyetizasyonu kendi doğrultusunda yani dairesel yönde yönlendiremediğinden dairesel yönde bir manyetik histerisis eğrisi elde edilememektedir (şekil 5.1.). Bu nedenle bu telde manyetik duygunluk sıfırdır dolayısı ile  $e_L$  değeri sıfırdır.

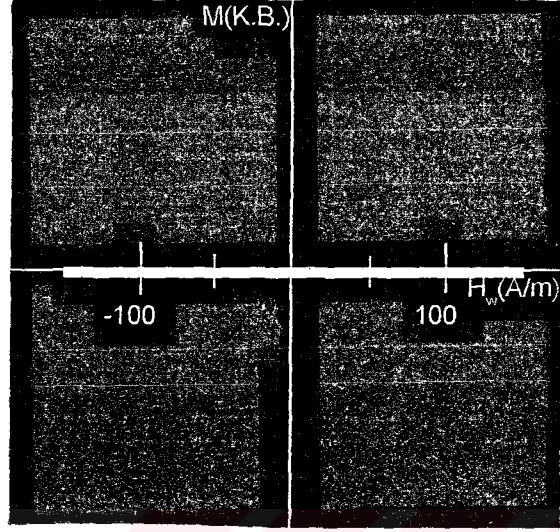
Fakat, ısıtım işlem görmemiş CoSiB telin her iki ucu arasında  $e_L$  voltajı ölçülebilmektedir. Şekil 5.2. CoSiB telin dairesel yöndeki histerisis eğrisini göstermektedir. Bu tel için kolaylıkla  $M-H_w$  eğrisini elde ettik. Çünkü domain yapısına baktığımızda telin dış kısmındaki manyetik momentlerin telde dairesel yönde yönlendiğini görmekteyiz. Bu nedenle bu telde küçük bir manyetik alan ile dairesel yönde bir manyetizasyon kolaylıkla oluşturulabilmekte ve  $M-H_w$  eğrisi elde edilebilmektedir.

Şekil 5.2. tele uygulanan  $I_w$  akımının frekansının ve şekil 5.3. ise tele dışarıdan uygulanan DC H manyetik alanının  $M-H_w$  eğrilerinin üzerine olan etkisini göstermektedir. Bilindiği gibi manyetik duyunluk  $\chi=M/H_w$  ile verilir. Dolayısı ile biz manyetik duyunluğu  $M-H_w$  eğrilerinin eğimi olarak kabul edebiliriz. Buna göre şekil 5.2.'ye baktığımızda eğim büyümekte yani artan frekans ile  $\chi$  büyümektedir. Benzerince şekil 5.3.'e baktığımızda eğim azalmakta yani dış DC H'in artan şiddeti ile  $\chi$ 'nin azalmakta olduğunu görmekteyiz.

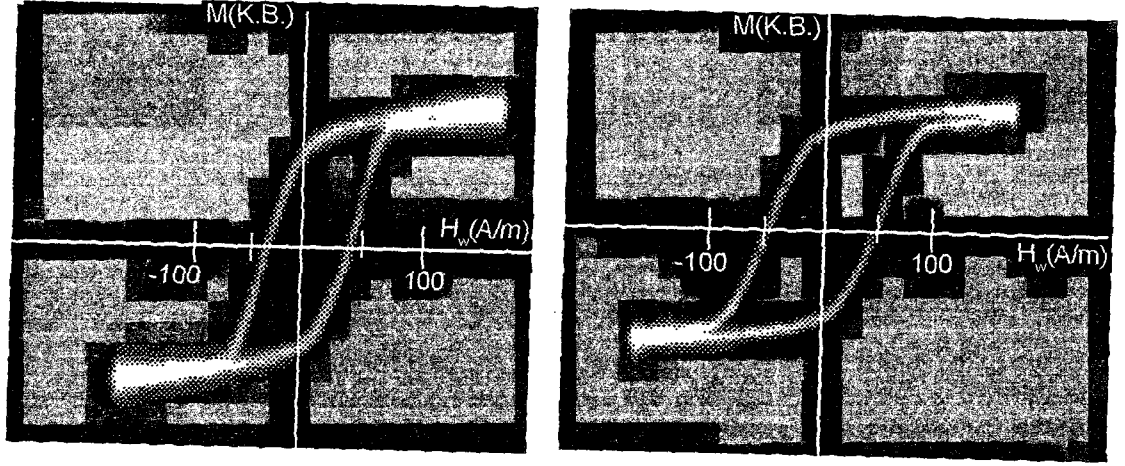
Şekil 5.4.  $I_w$  akım frekansının  $e_L$  üzerine olan etkisini göstermektedir ve artan frekans değeri ile  $e_L$ 'nin şiddetinin arttığını gözlemekteyiz. Çünkü bir önceki paragrafta söylediğimiz gibi frekans artıkça  $\chi$  artmakta idi ve  $e_L \propto \chi$  olduğundan artan frekans ile  $e_L$  artacaktır.

Şekil 5.5. ise DC H Manyetik alanının  $e_L$  üzerine olan etkisini göstermektedir. Görüldüğü gibi  $|H|$  değeri arttığında  $\chi$  azalmaktadır. Şekil 5.6.  $I_w$  akımının  $e_L$  üzerine olan etkisini göstermektedir. Artan  $I_w$  ile  $e_L$  değerinin arttığı gözlenmiştir.



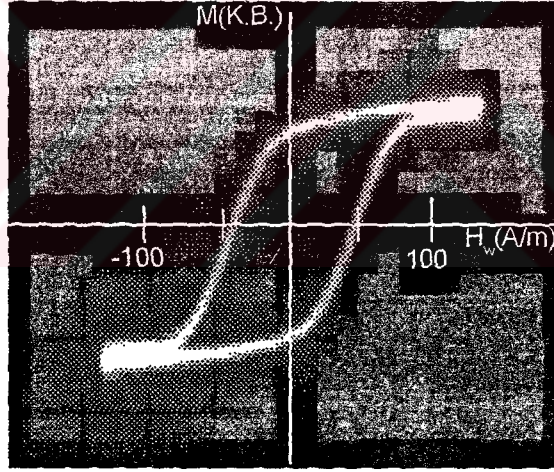


Şekil 5.1. Isıl işlem görmemiş FeSiB telin  $M-H_w$  eğrisi.



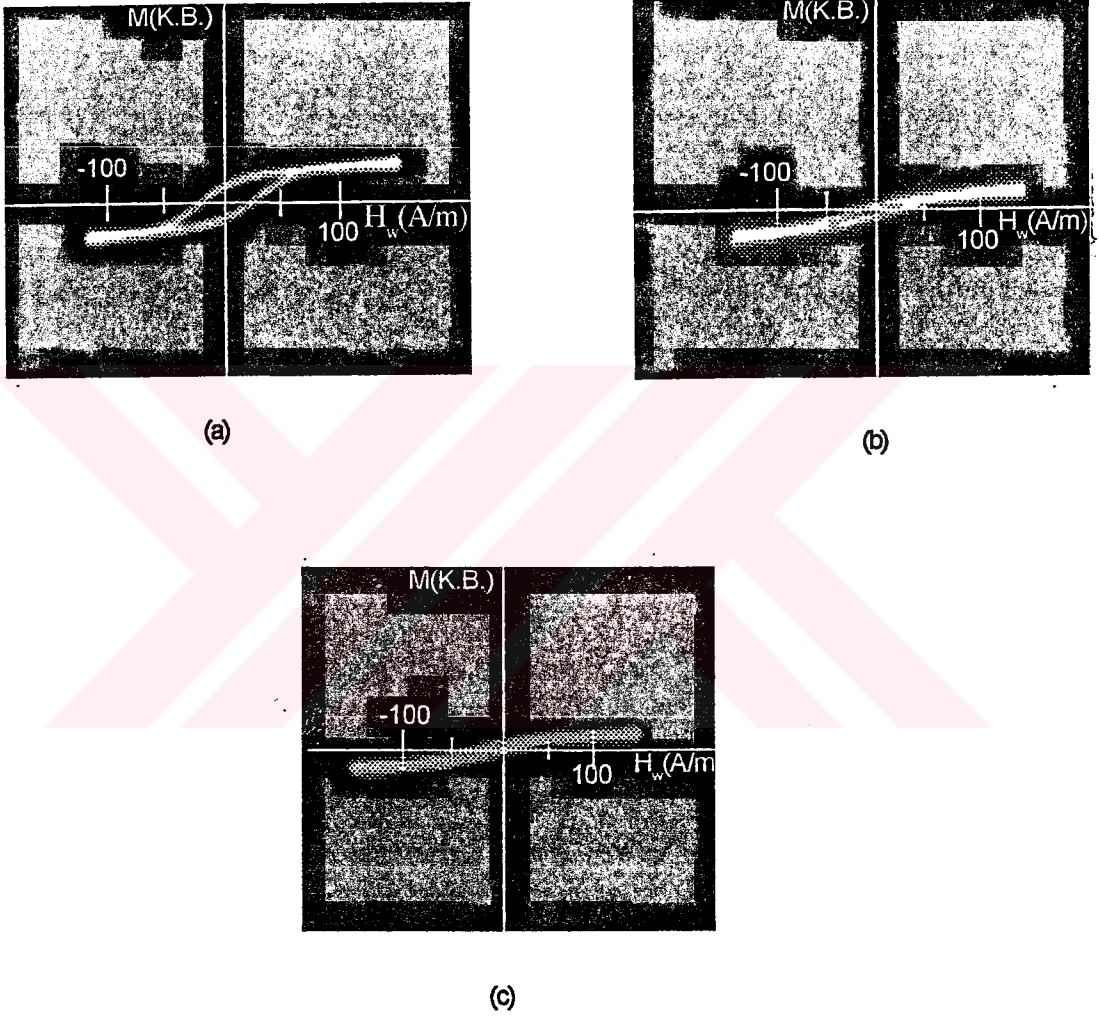
(a)

(b)

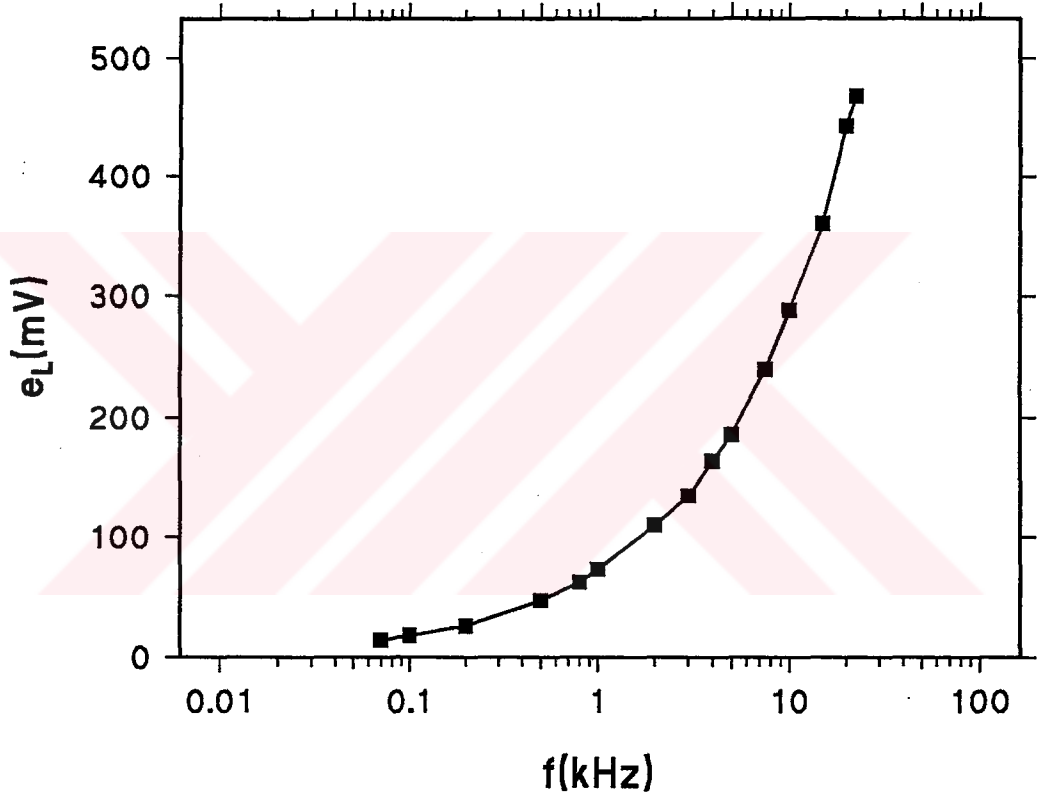


(c)

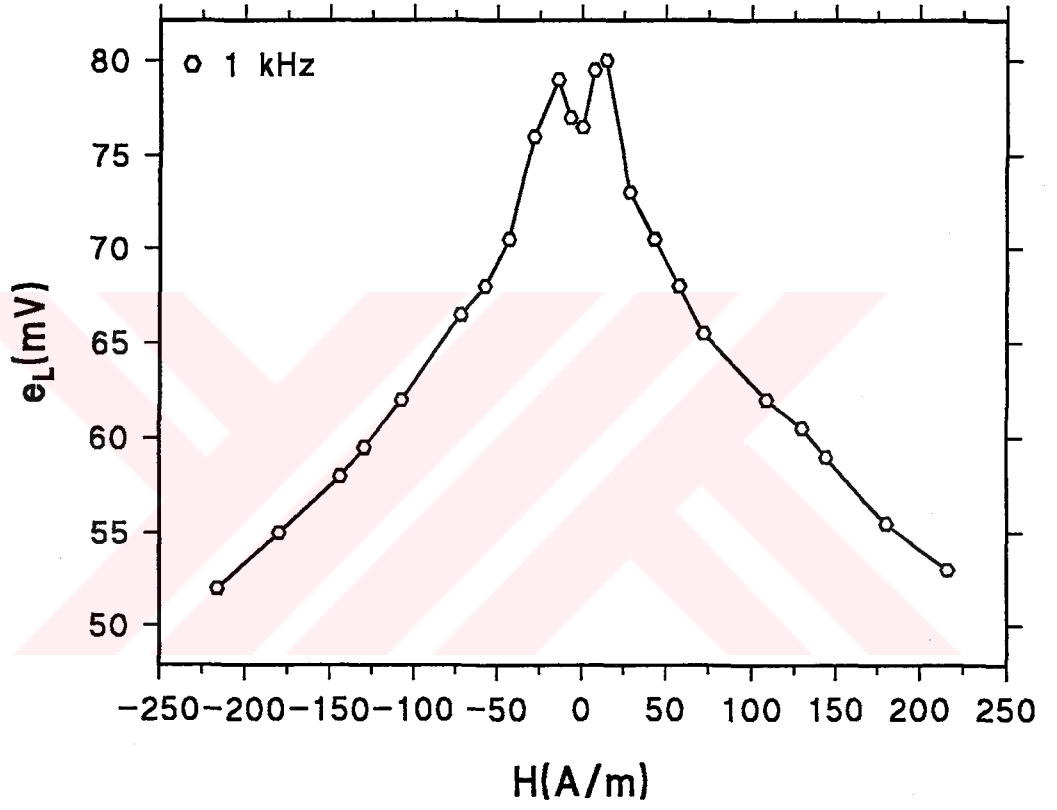
Şekil 5.2. Isıl işlem görmemiş CoSiB telin  $H=0$  iken dairesel yöndeki  $M-H_w$  eğrilerine frekansın etkisi (a) 1 kHz, (b) 4 kHz ve (c) 7 kHz'de.



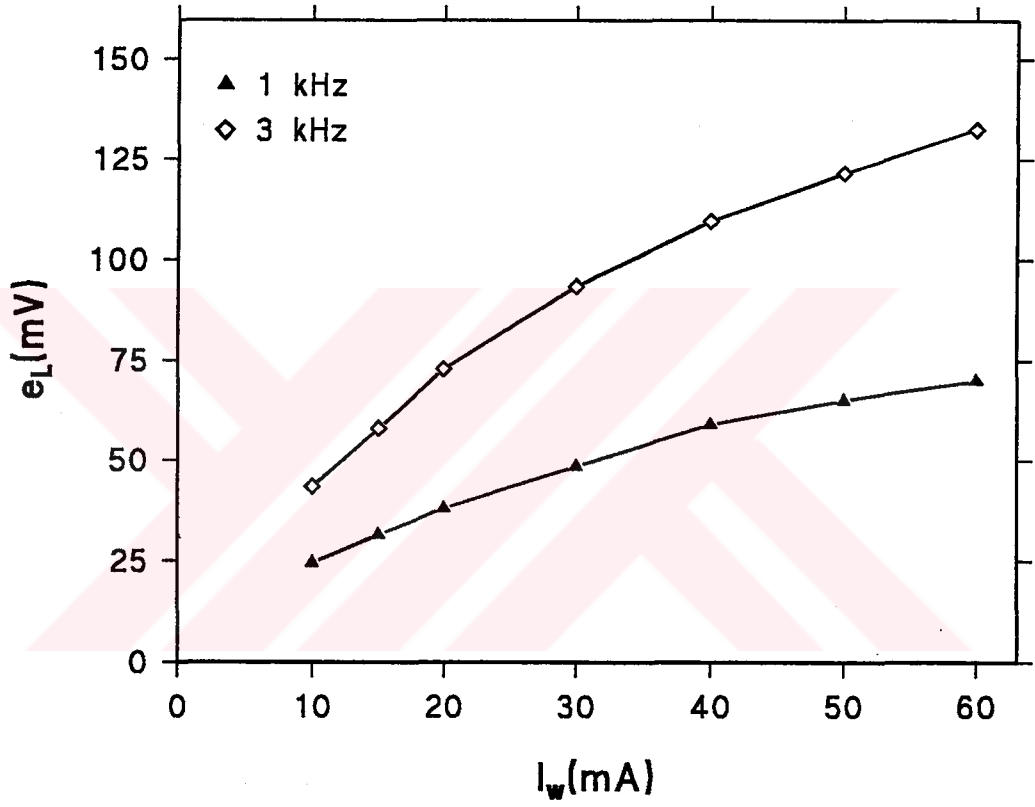
Şekil 5.3. Isıl işlem görmemiş CoSiB telin 4.17 kHz'de DC manyetik alanın  $M$ - $H_w$  eğrileri üzerine etkisi (a)  $H=720$  A/m, (b)  $H=1080$  A/m ve (c)  $H=1800$  A/m.



Şekil 5.4. Isıl işlem görmemiş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin  $I_w=60\text{ mA}$ 'de  $e_L$ 'nin frekansa karşı grafiği.



Şekil 5.5. Isıl işlem görmemiş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telde  $e_L$ 'nin DC manyetik alana karşı grafiği.

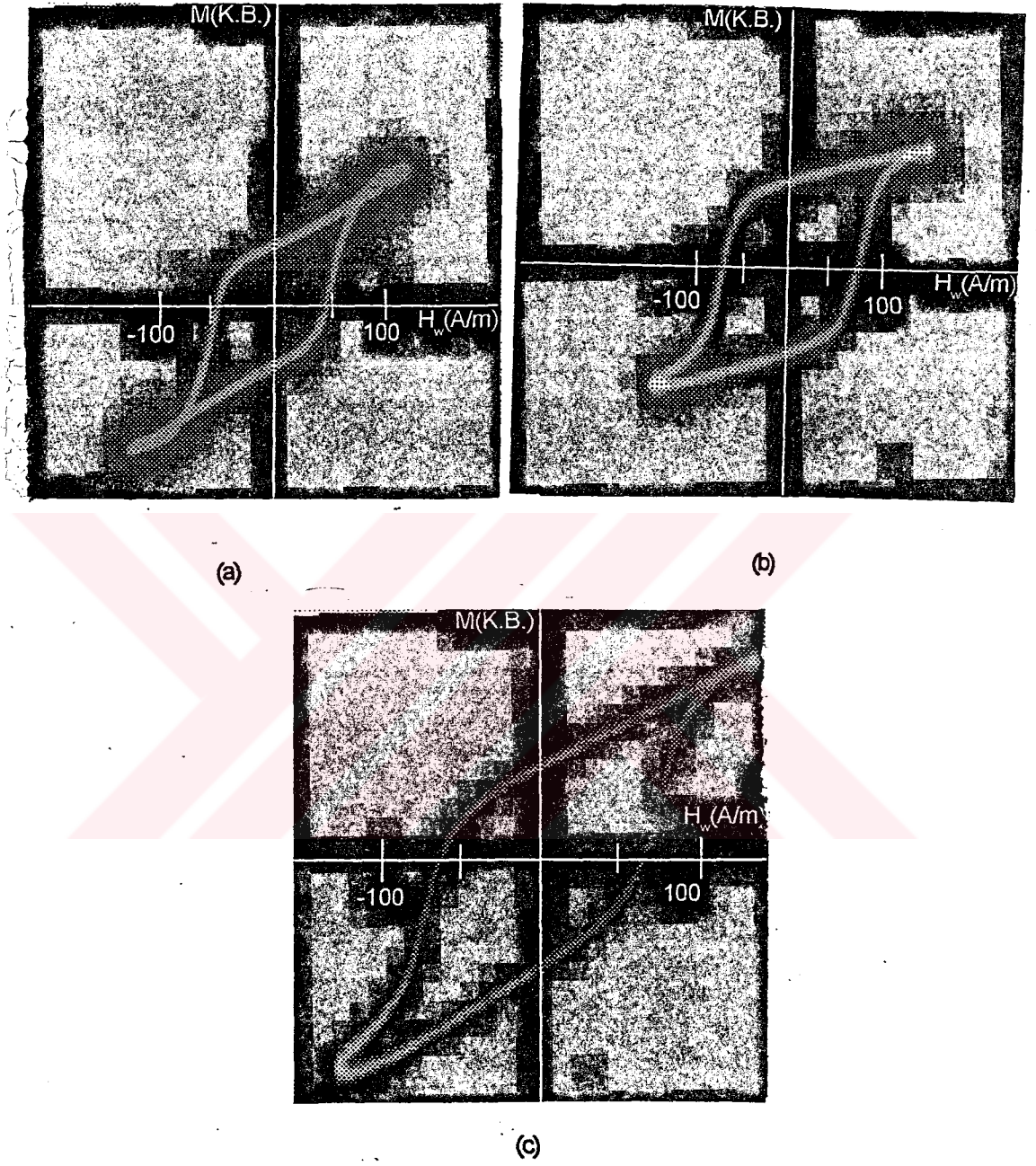


Şekil 5.6. Isıl işlem görmemiş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telde  $e_L$ 'nin uygulanan  $I_w$  akımına karşı grafiği.

### 5.3. Isıl İşlem Görmüş Amorf Ferromanyetik Teller

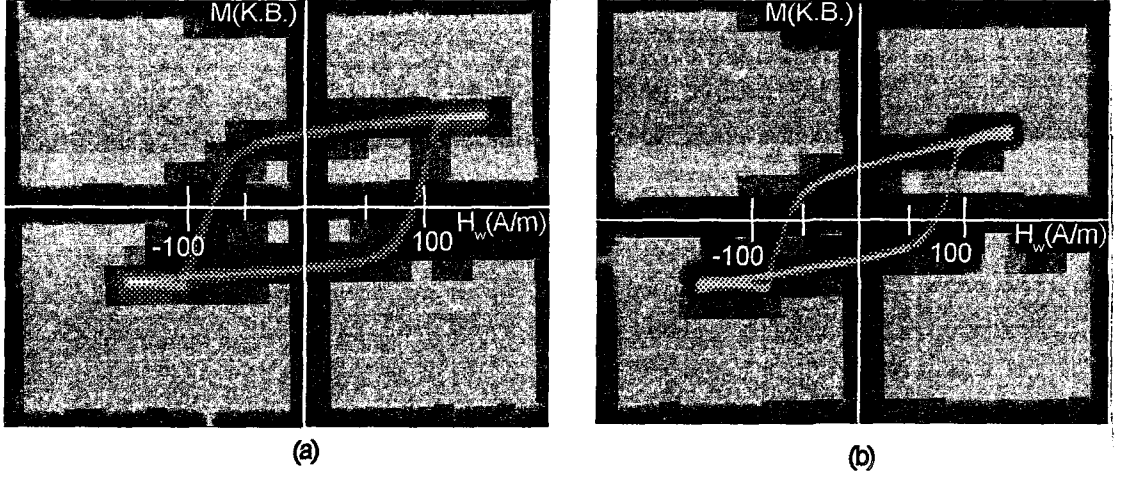
Şekil 5.7., 5.8. ve 5.9. 370°C, 420°C ve 500°C'de değişik zaman aralıklarında ısıtılma işlemi görmüş FeSiB tellerin  $M-H_w$  eğrilerini göstermektedir. Bilindiği gibi ısıtılma işlemi görmemiş FeSiB tel için  $M-H_w$  eğrisi elde edilememiştir. Fakat teller ısıtılma işlemi gördükten sonra bunların  $M-H_w$  eğrileri kolaylıkla elde edilmiştir. Bunun nedeni ise telin manyetik domain yapısının değişmesidir. Yani telde bulunan iç stresler ısıtılma işlemi sonucunda azaldığından artık bu iç stres numunenin manyetizasyonunun yöneliminde etkin rol oynamamaktadır. Bu nedenle dairesel yönde uygulanan düşük bir manyetik alan, teli dairesel yönde manyetize edebilmekte ve bu yönde kolaylıkla  $M-H_w$  eğrisi elde edilebilmektedir.

Şekil 5.10. ısıtılma işlemi zamanının  $e_L$  üzerine olan etkisini göstermektedir.  $e_L$ , sıfır değerinden başlayarak artmakta ve sonra tekrar azalmaktadır. 12.5 dakikalık ısıtılma işlemi sonrasında  $e_L$  maksimum değerine ulaşarak tekrar azaldığı gözlenmiştir.  $e_L$ 'nin ilk olarak artmasının nedeni iç stresin minimuma inmesi ve numunenin kolaylıkla dairesel yönde manyetize edilmesidir. 500°C'de 5 dakikalık ısıtılma işleminden sonra telin yüzeyinde kristalleşmelerin oluştuğu belirtilmiştir [36,38]. Bu nedenle telin bazı kısımlarında tekrar stresler oluşur, bu da  $e_L$ 'nin genlik değerinin azalmasına yol açar. Ancak 15 dakikalık ısıtılma işleminden sonra telin yüzeyinin kristalleştiği ve iç kısmının amorf kaldığı gözlenmiştir [36,38] (Şekil 5.11.). Yüzey kısmı amorf yapıdan kristal yapıya geçtiğinde, bu kısım daha az hacim kaplayacağından yüzeyden içe doğru bir büzülme meydana gelecek ve bu büzülme şekil 5.11.'de olduğu gibi bir stres oluşturacaktır.

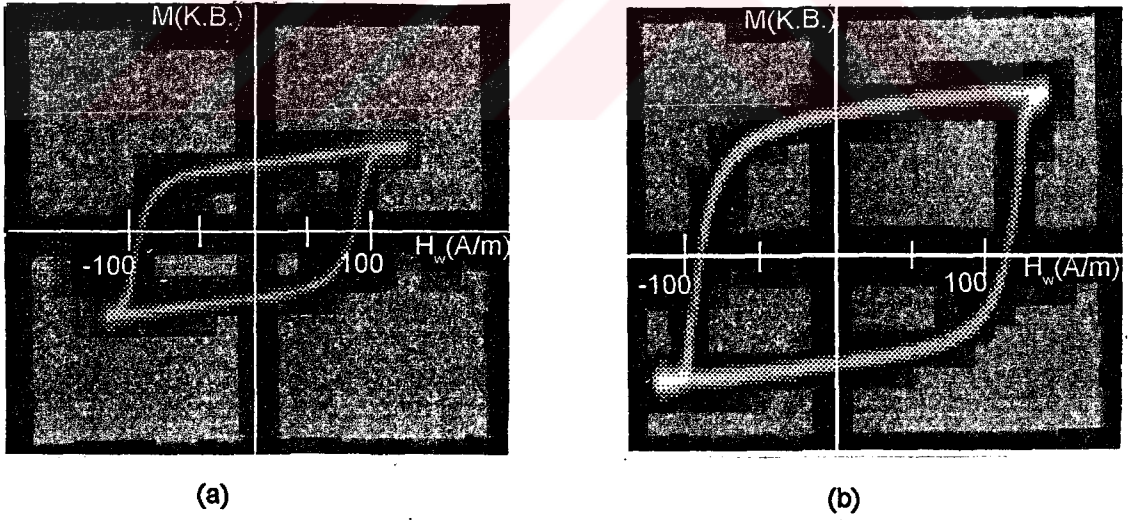


Şekil 5.7. 370°C'de değişik süreler için ısıtılmış FeSiB tellerin 3 kHz'de dairesel yöndeki M- $H_w$  eğrileri (a) 5 dk., (b) 25 dk. ve (c) 150 dk..

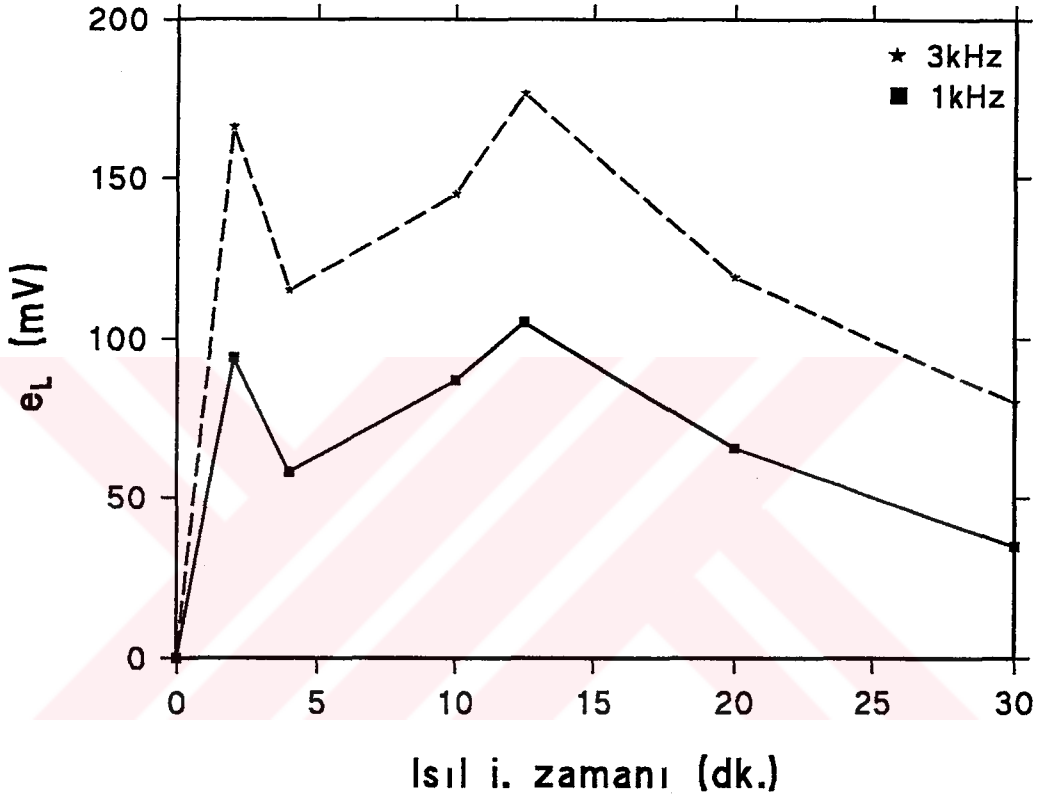




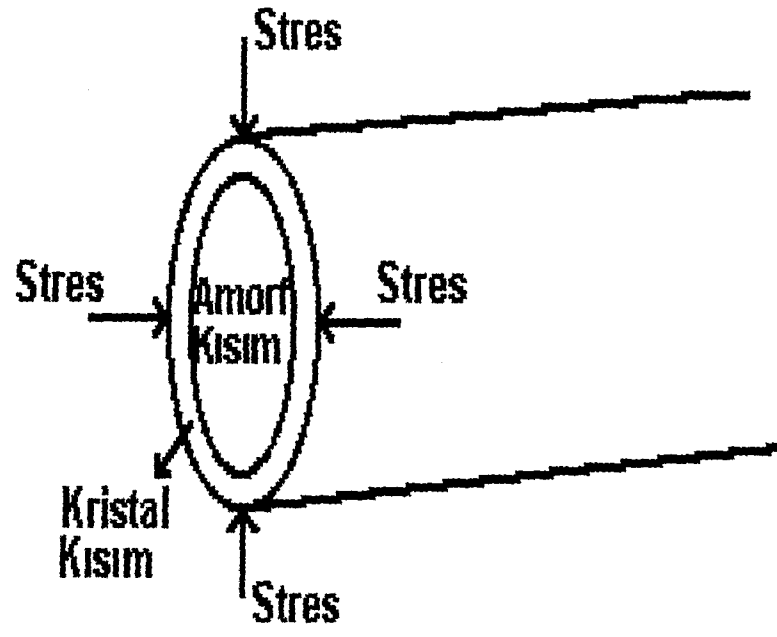
Şekil 5.8. 420°C'de değişik süreler için ısıt işlem görmüş FeSiB tellerin 1 kHz'de dairesel yöndeki M-H<sub>w</sub> eğrileri (a) 5 dk. ve (b) 10 dk..



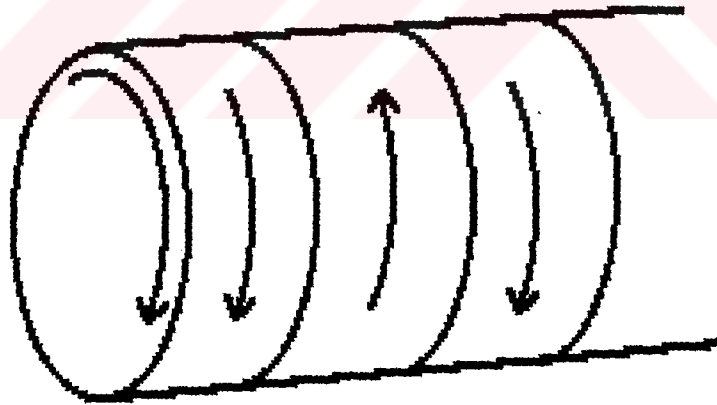
Şekil 5.9. 500°C'de değişik süreler için ısıt işlem görmüş FeSiB tellerin 3 kHz'de dairesel yöndeki M-H<sub>w</sub> eğrileri (a) 2 dk. ve (b) 10 dk..



Şekil 5.10. 500°C'de ısı i. işlem görmüş FeSiB telin 3 ve 1 kHz'de  $e_L$ 'nin ısı i. işlem zamanına karşı grafiği.



Şekil 5.11. Yüzeysel kristalleşmiş FeSiB telin şematik görünüşü.

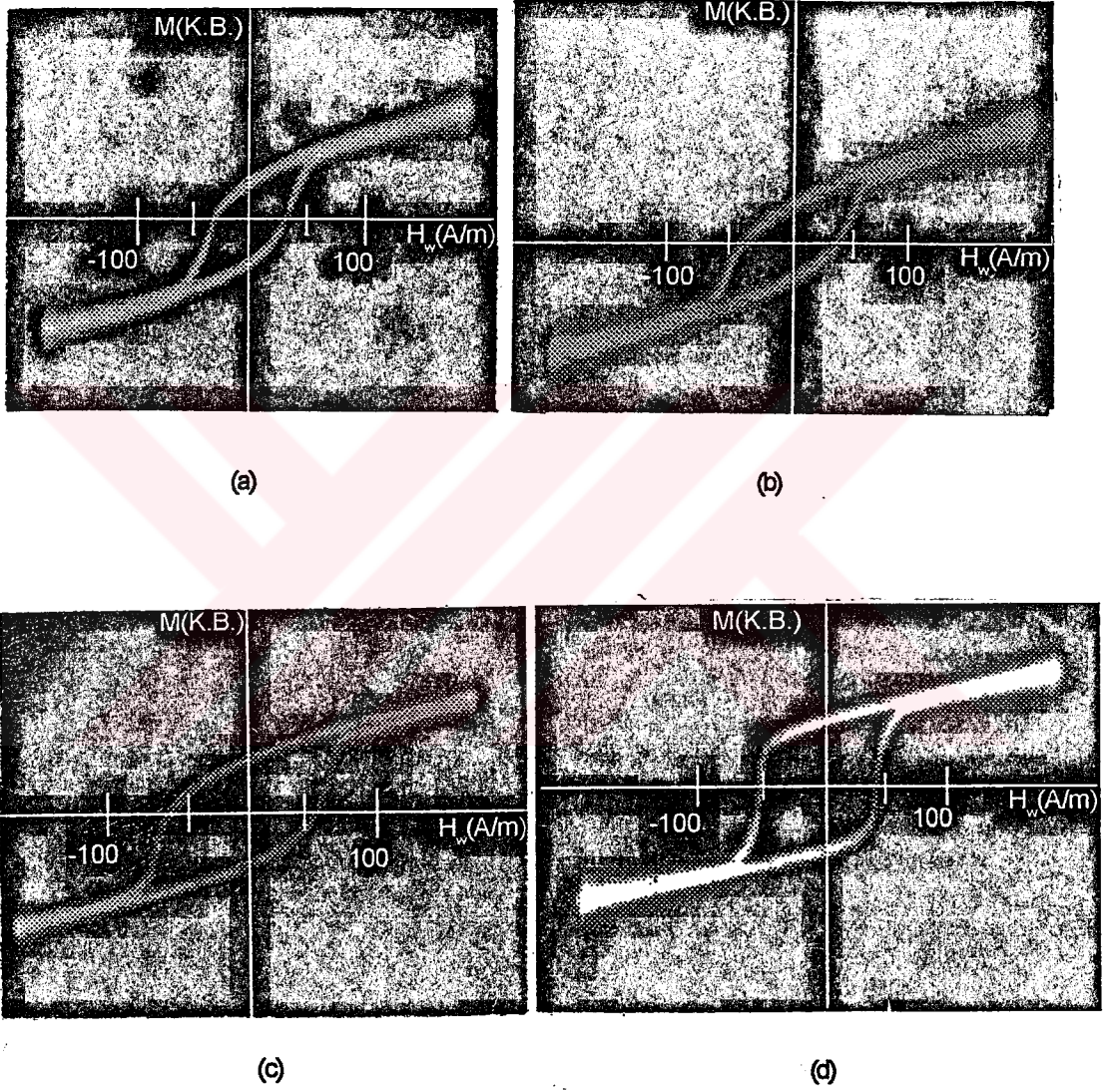


Şekil 5.12. Yüzeysel kristalleşmiş FeSiB tel için önerilen domain yapısı.

Telin manyetostriksiyonu pozitif ve bu stres enine bir stres olduğundan telde manyetik momentler dairesel yönde yönelecektir (şekil 5.12.). Bu nedenle yüzeyi kristalleşmiş tel kolaylıkla dairesel yönde manyetize edilebileceğinden yüksek manyetik duygunluğa yani yüksek  $e_L$  değerine sahiptirler. Teller 20 dakika veya daha fazla ısıtma işlemine tabi tutulduğunda artık kristalleşme tüm tele rastgele yayıldığından telde rastgele stresler oluşacaktır. Bu yüzden  $e_L$  değerinin azaldığı gözlenmiştir.

Isıl işlem FeSiB telde olduğu gibi CoSiB telde de benzer etkiye sahiptir (şekil 5.13.). Ancak CoSiB tellerde FeSiB tellerdeki gibi kristalleşme yüzeyden başlamamış telde rastgele kısımlarda oluşmuş olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni telin üretimi sırasında telde oluşan çok küçük kristal odacıklarının olduğu düşünülmektedir.



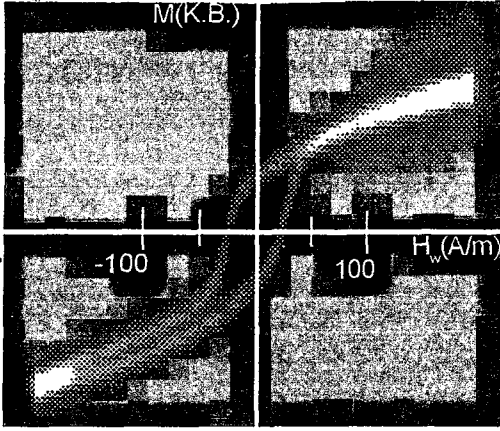


Şekil 5.13. 500°C'de değişik süreler için ısıtılmış CoSiB tellerin 3 kHz'de dairesel yöndeki  $M-H_w$  eğrileri (a) 10 dk., (b) 20 dk., (c) 30 dk. ve (d) 50dk..

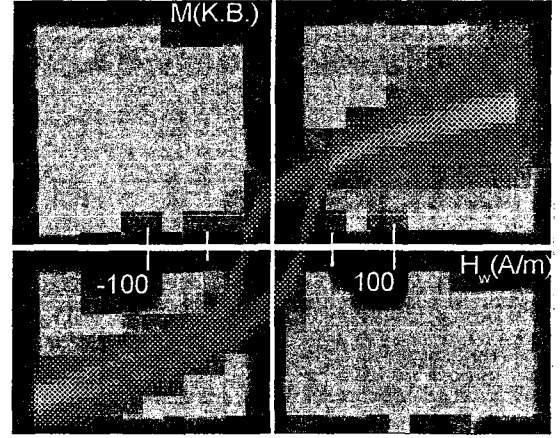
#### 5.4. Frekansın ve DC Dış Manyetik Alanın Etkileri

Şekil 5.14., 5.15., ve 5.16.'da ısı görmüş CoSiB amorf ferromanyetik tellerin  $M-H_w$  eğrilerinde  $I_w$  akım frekansının ve dıştan uygulanan DC manyetik alan şiddetinin etkisini gösterilmektedir. Daha önce belirttiğimiz gibi artan frekansla  $M-H_w$  eğrisinin eğimi yani manyetik duygunluğun artmakta olduğu ve artan DC alan şiddeti ile manyetik duygunluk değerinin azalmakta olduğu gözlenmiştir.

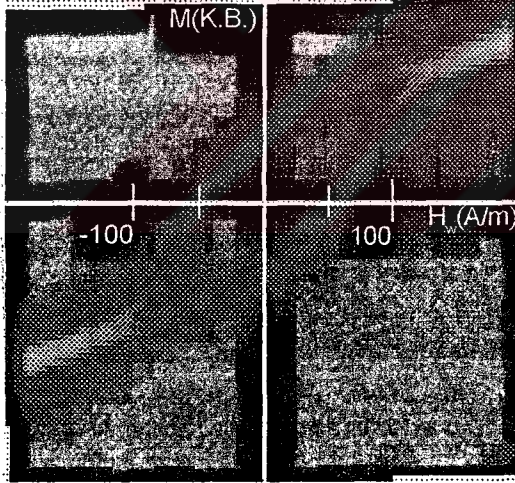
5.18.'den 5.26'ya kadar olan şekillerde çeşitli ısı işlem görmüş olan FeSiB ve CoSiB tellerde tele uygulanan  $I_w$  akım frekansının ve dış DC H manyetik alanının etkisini gösterilmiştir. Her iki telde de artan frekansla  $e_L$  değerinin arttığı ve artan H değeri ile  $e_L$  değerinin azaldığı gözlenmiştir. Çünkü artan frekansla manyetik duygunluk,  $\chi$ , artmakta dolayısı ile  $e_L \propto \chi$  olduğundan  $e_L$  artmakta, benzerince artan H ile  $\chi$  azalmakta yani  $e_L$  azalmaktadır. Ayrıca denklem 2.6'ya bakıldığında  $e_L$  direkt olarak frekansın fonksiyonu olduğundan artan frekans değeri ile  $e_L$  artacaktır.



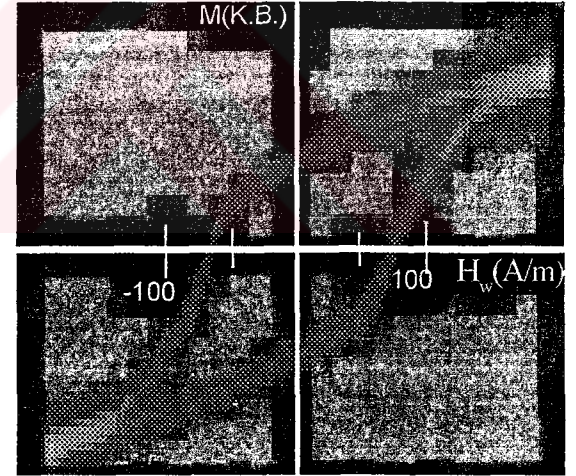
(a)



(b)

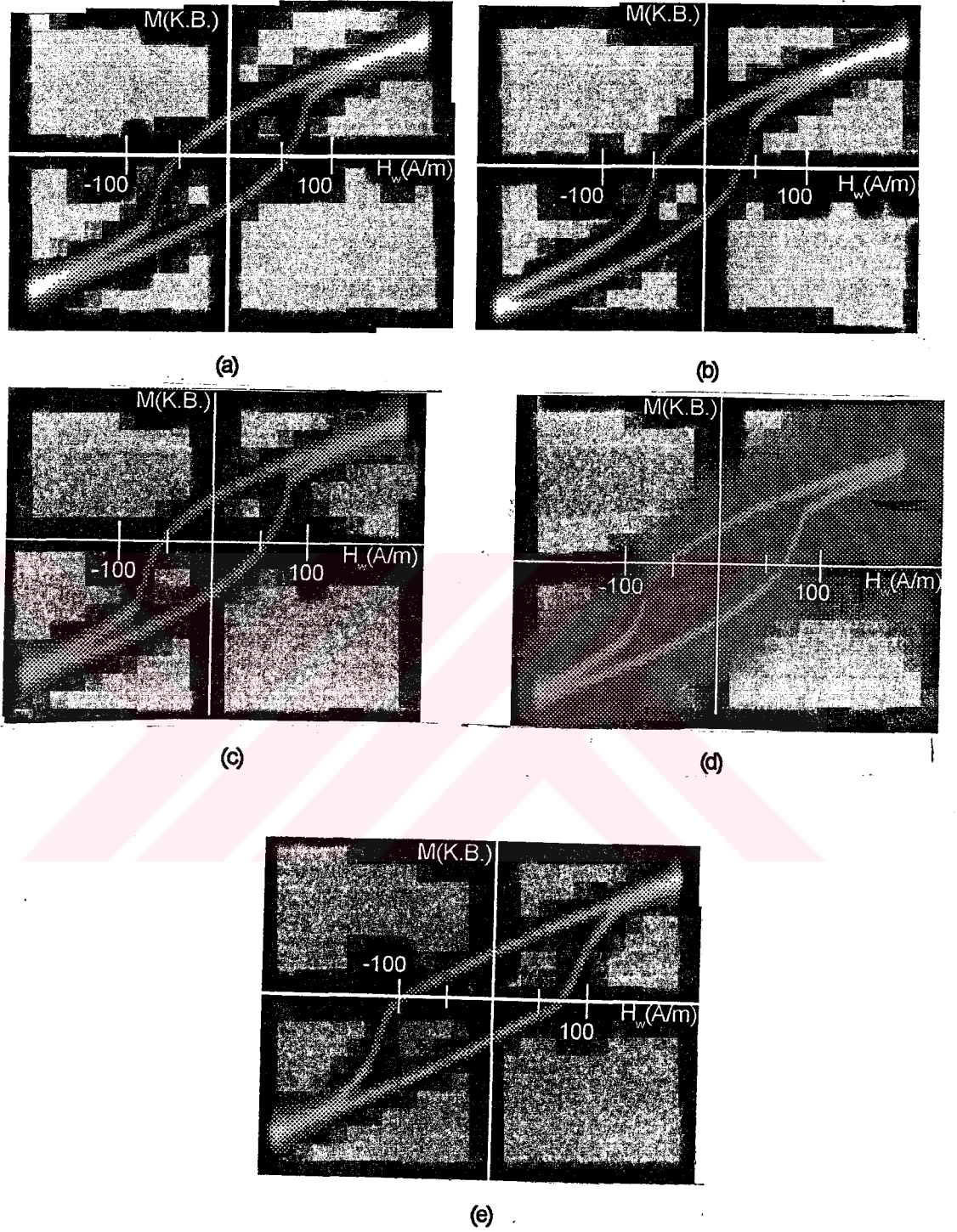


(c)



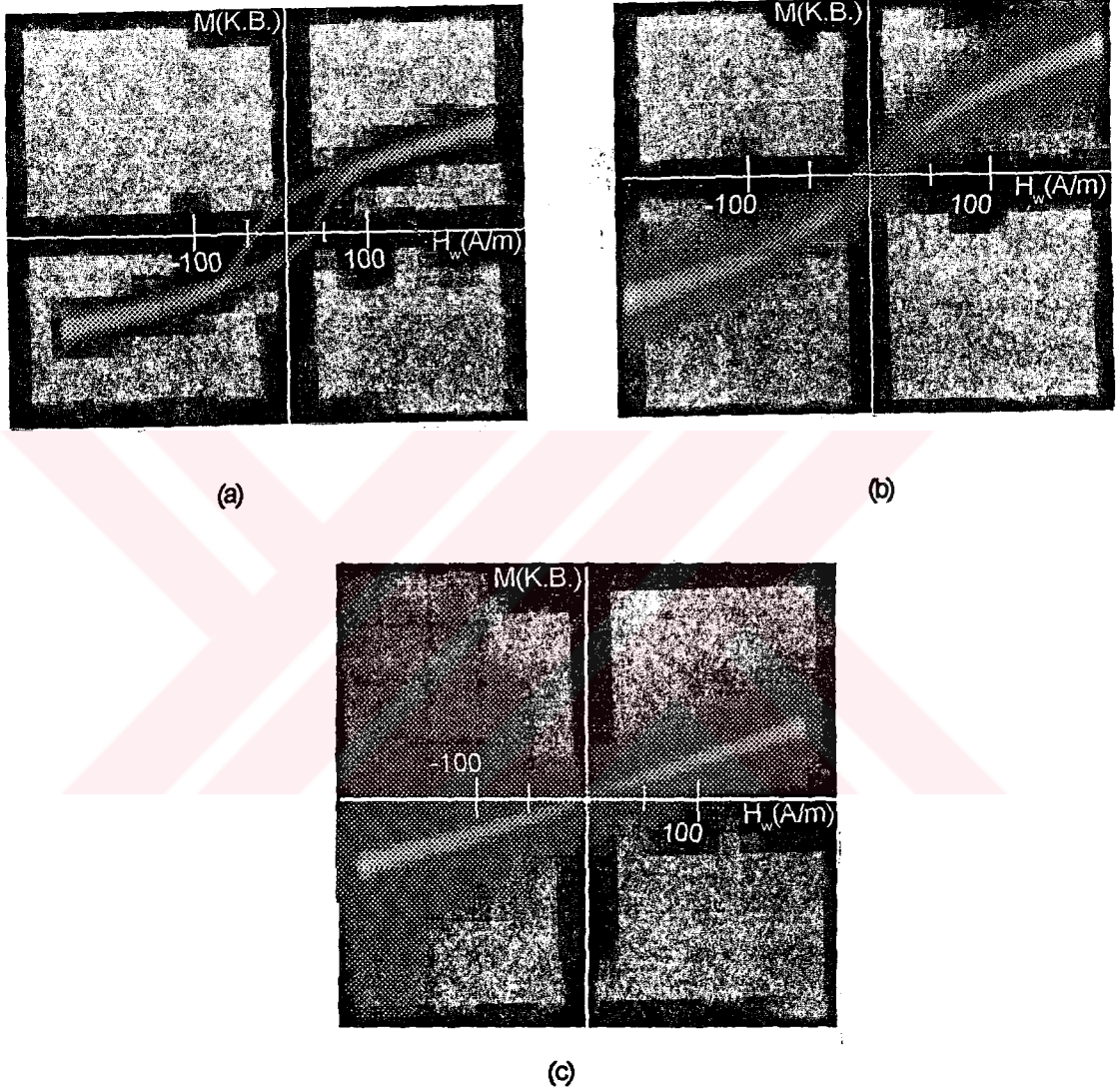
(d)

Şekil 5.14. 500°C'de ve  $H=0$  A/m'de 10 saniye için ısıtılmış CoSiB telin dairesel yöndeki M-H<sub>w</sub> eğrilerine frekansın etkisi (a) 1 kHz, (b) 6 kHz, (c) 10.1 kHz ve (d) 15 kHz.

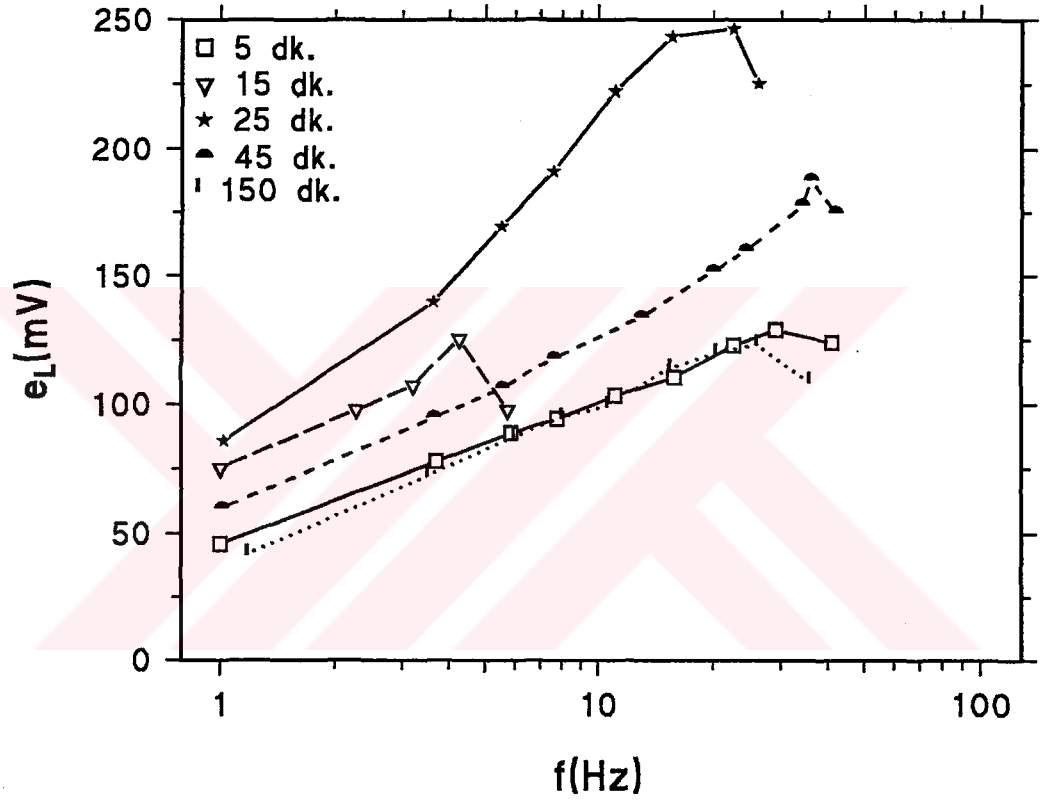


Şekil 5.15. 500°C'de 5 dk. ısıtılmış CoSiB telin dairesel yöndeki M-H<sub>w</sub> eğrilerine frekansın etkisi (a) 2 kHz, (b) 3 kHz, (c) 7.5 kHz, (d) 14.5 kHz.

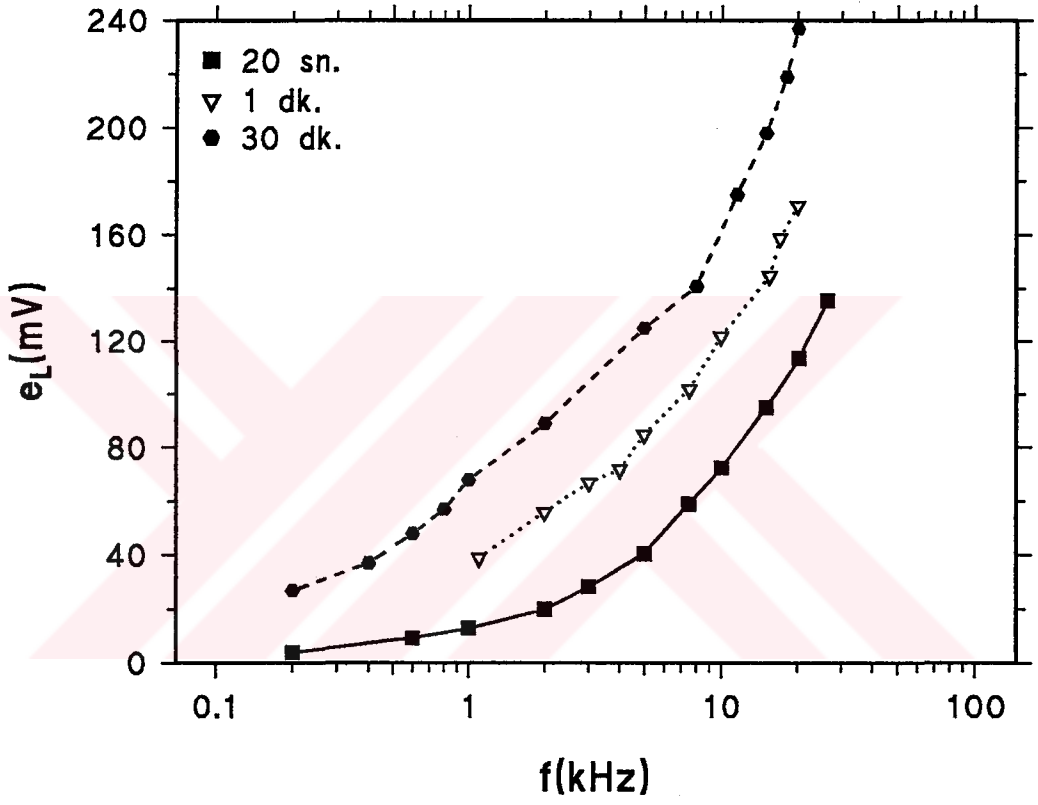




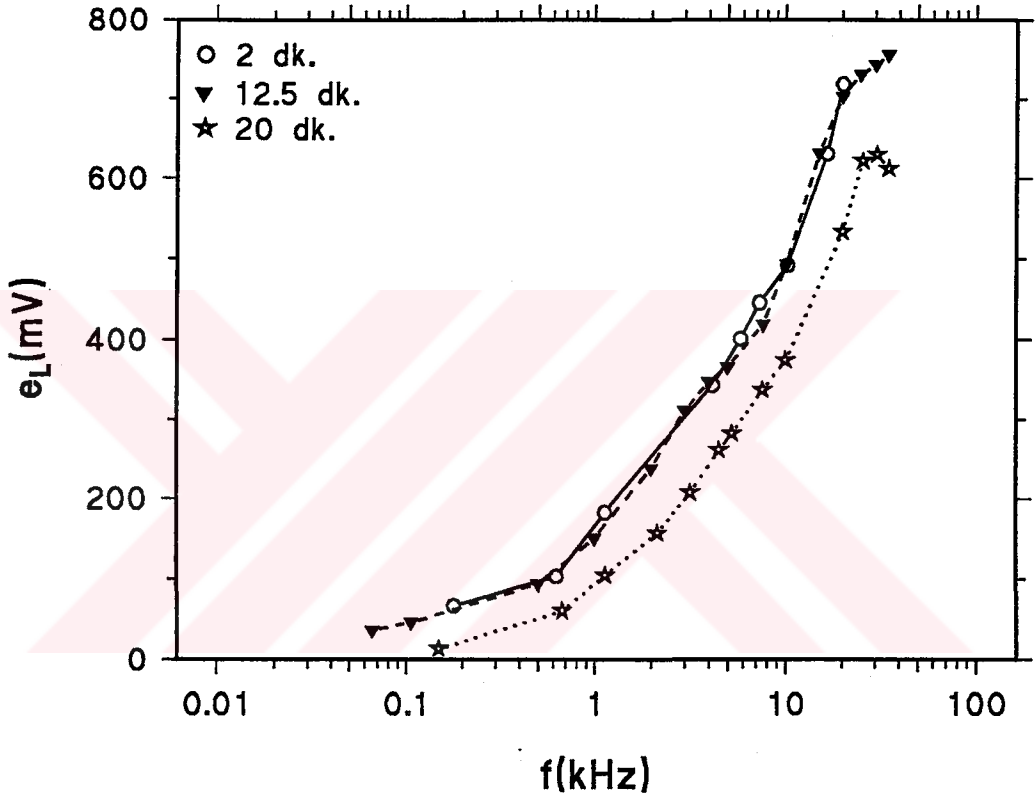
Şekil 5.16. 500°C'de 10 saniye ısıtma işlemi görmüş CoSiB telin 3 kHz'de dairesel yöndeki  $M$ - $H_w$  eğrilerine DC manyetik alanın etkisi (a)  $H=72$  A/m, (b)  $H=288$  A/m ve (c)  $H=1440$  A/m.



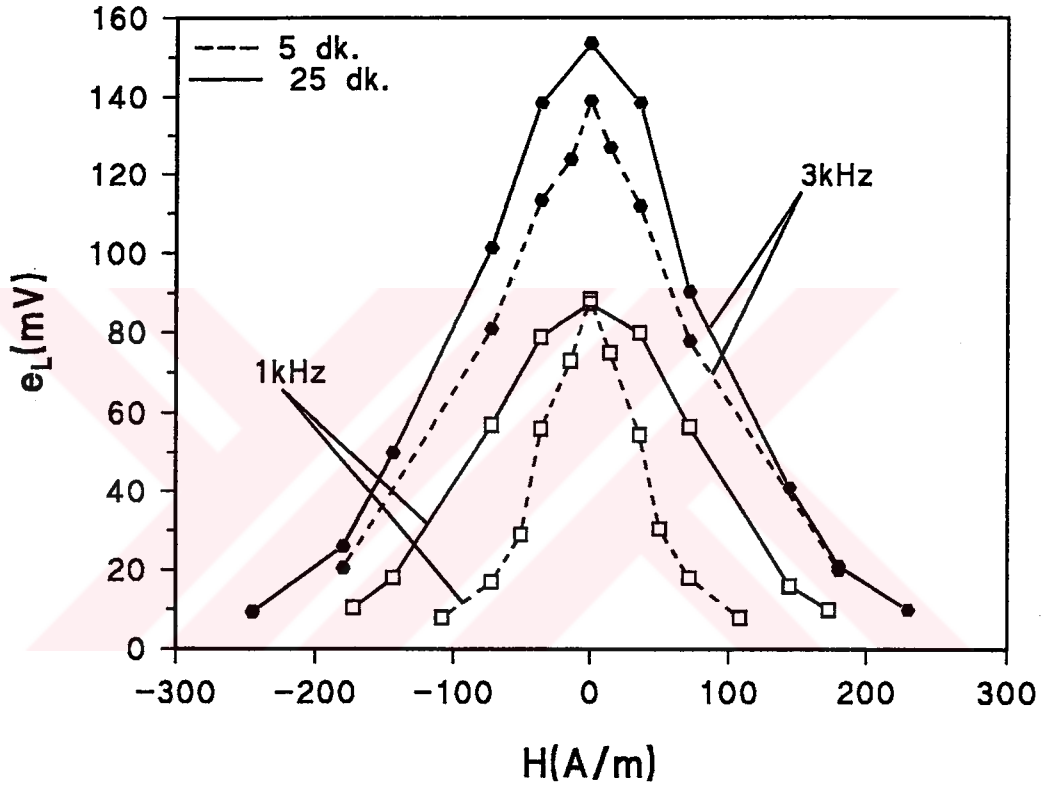
Şekil 5.17. 370°C'de ısıtılmış ve 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_w=30$  mA için  $e_L$ 'nin frekansa karşı grafiği.



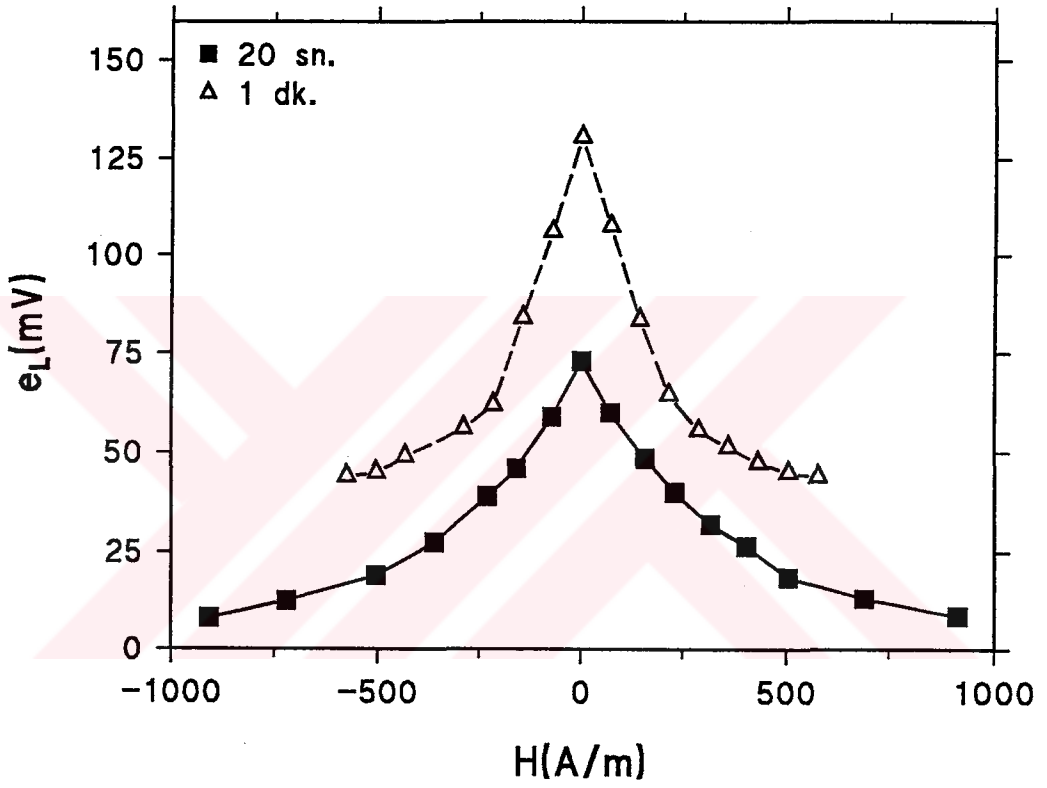
Şekil 5.18. 460°C'de ısıl işlem görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_W=60$  mA için  $e_L$ 'nin frekansa karşı grafiği.



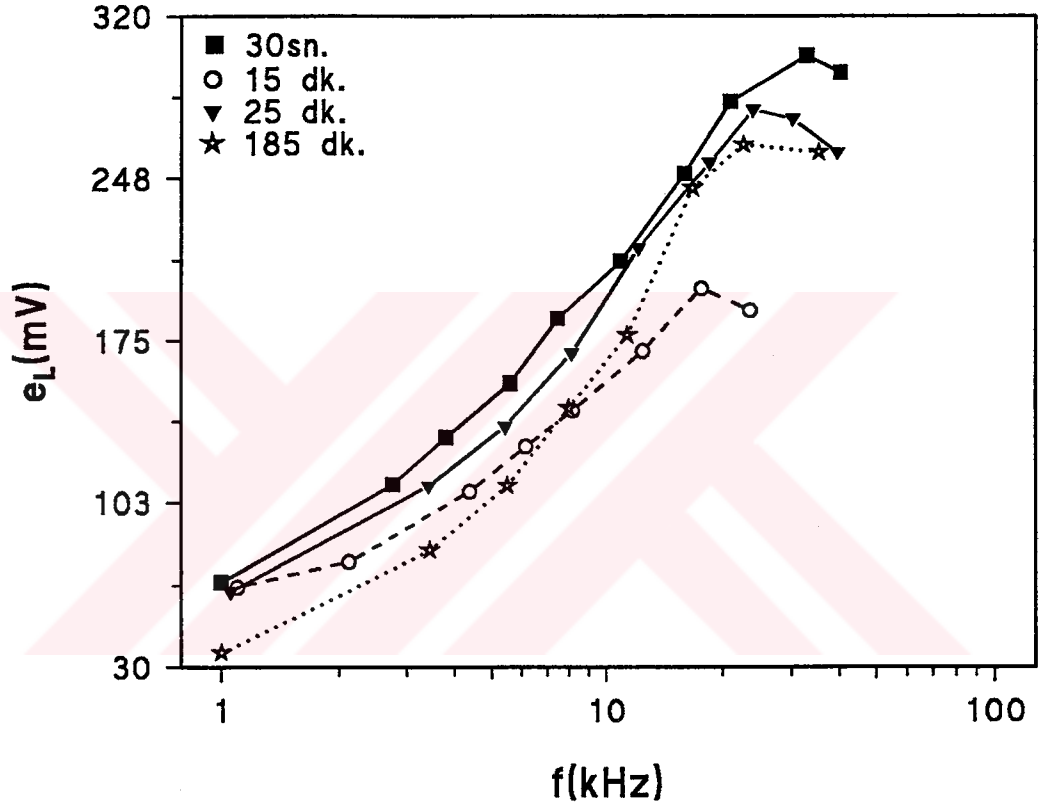
Şekil 5.19. 500°C'de ısıl işlem görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_W=55$  mA için  $e_L$ 'nin frekansa karşı grafiği.



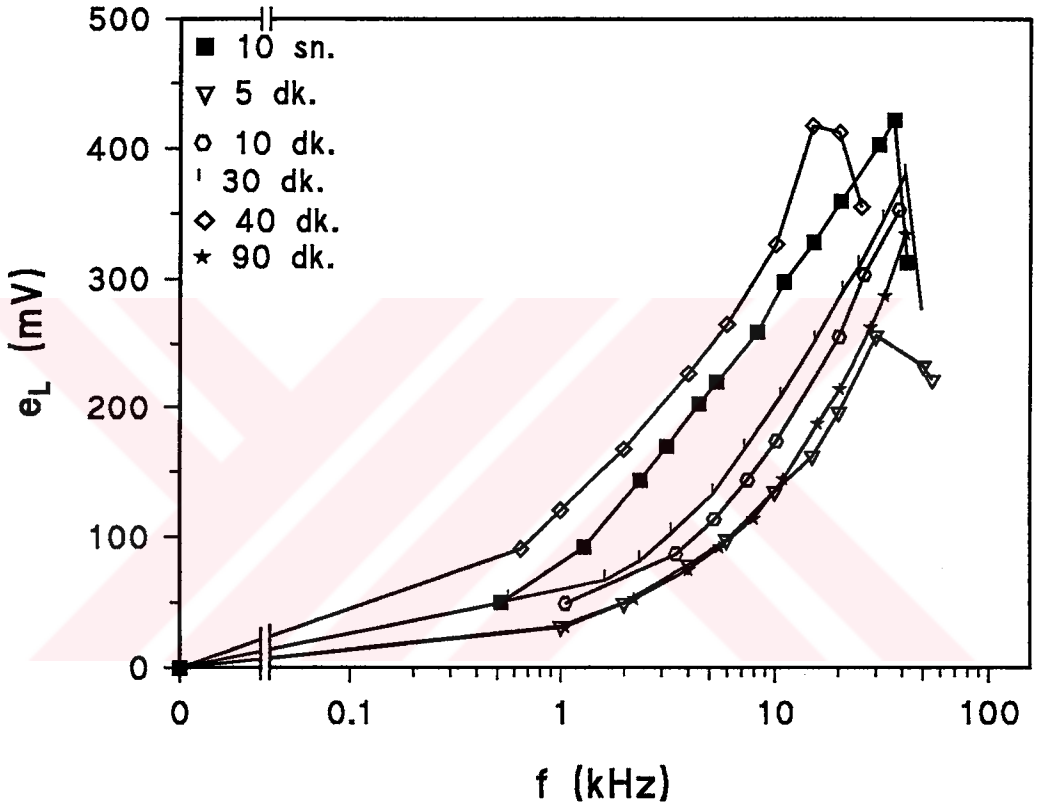
Şekil 5.20. 370°C'de 5 ve 25 dakika ısıtım görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_w=55$  mA, 1 ve 3 kHz için  $e_L$ 'nin DC manyetik alan,  $H$ 'a karşı grafiği.



Şekil 5.21. 460°C'de 20 sn. ve 1 dakika ısıl işlem görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_w=60$  mA, 10 kHz için  $e_L$ 'nin DC manyetik alana karşı grafiği.

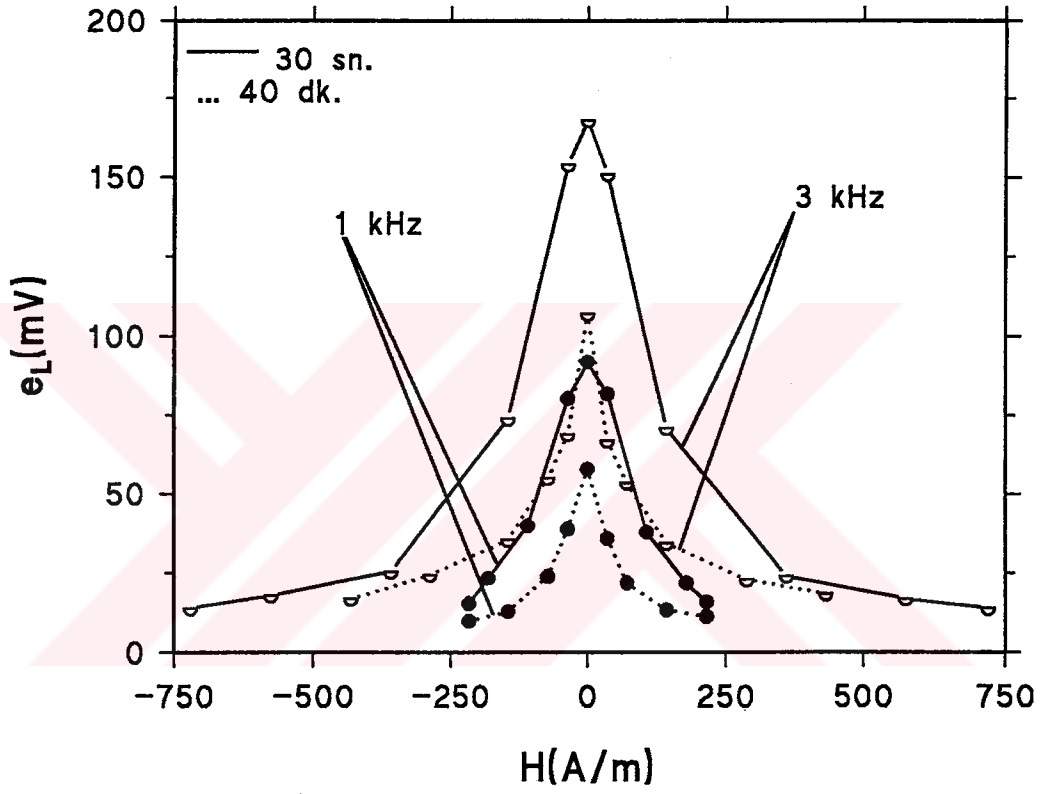


Şekil 5.22. 450°C'de ısıl işlem görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin  $I_w=30$  mA için  $e_L$ 'nin frekansa karşı grafiği.

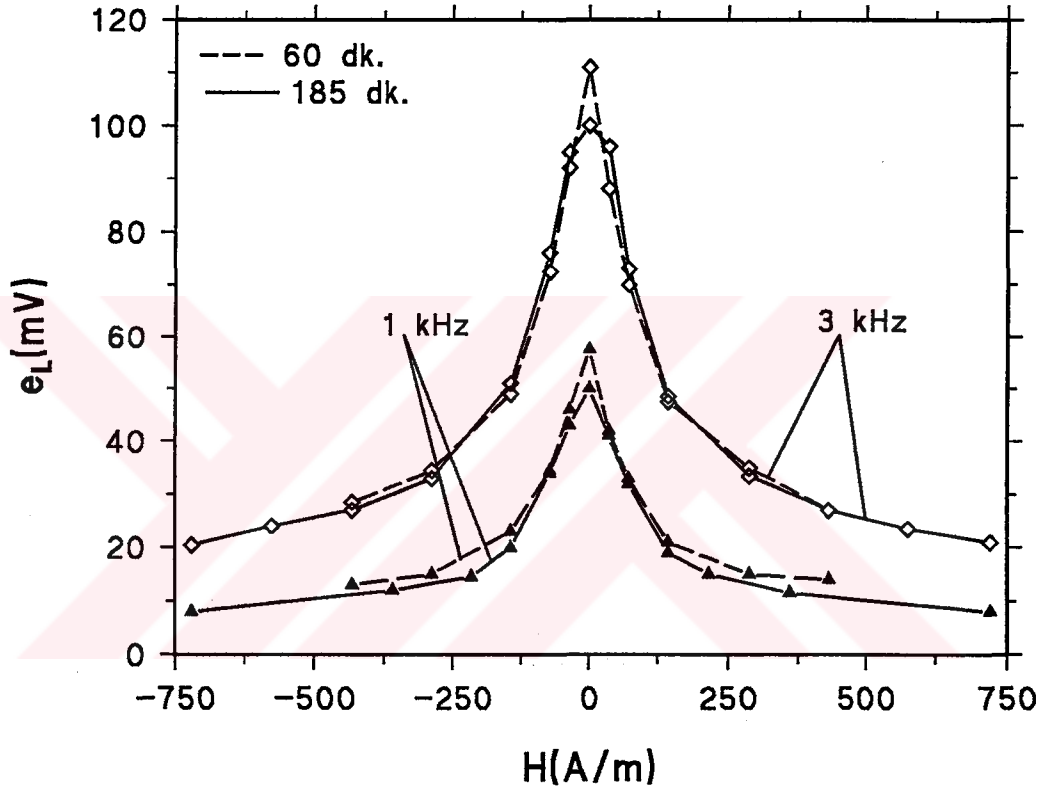


Şekil 5.23. 500°C'de ısıl işlem görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin  $I_w=55$  mA için  $e_L$ 'nin frekansa karşı grafiği.

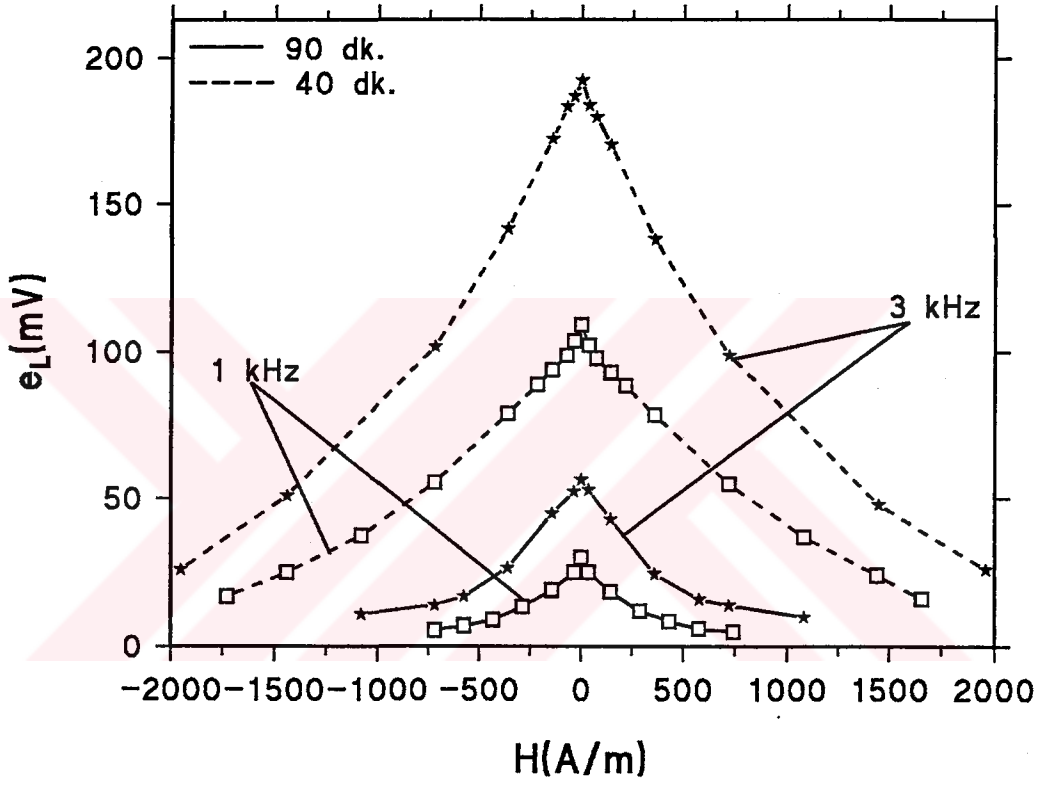




Şekil 5.24. 450°C'de 30 sn. ve 40 dakika ısıtım görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin  $I_w=55$  mA, 1 ve 3 kHz için  $e_L$ 'nin DC manyetik alana karşı grafiği.



Şekil 5.25. 450°C'de 60 ve 185 dakika ısıl işlem görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin  $I_w=55$  mA, 1 ve 3 kHz için  $e_L$ 'nin DC manyetik alana karşı karşı grafiği.

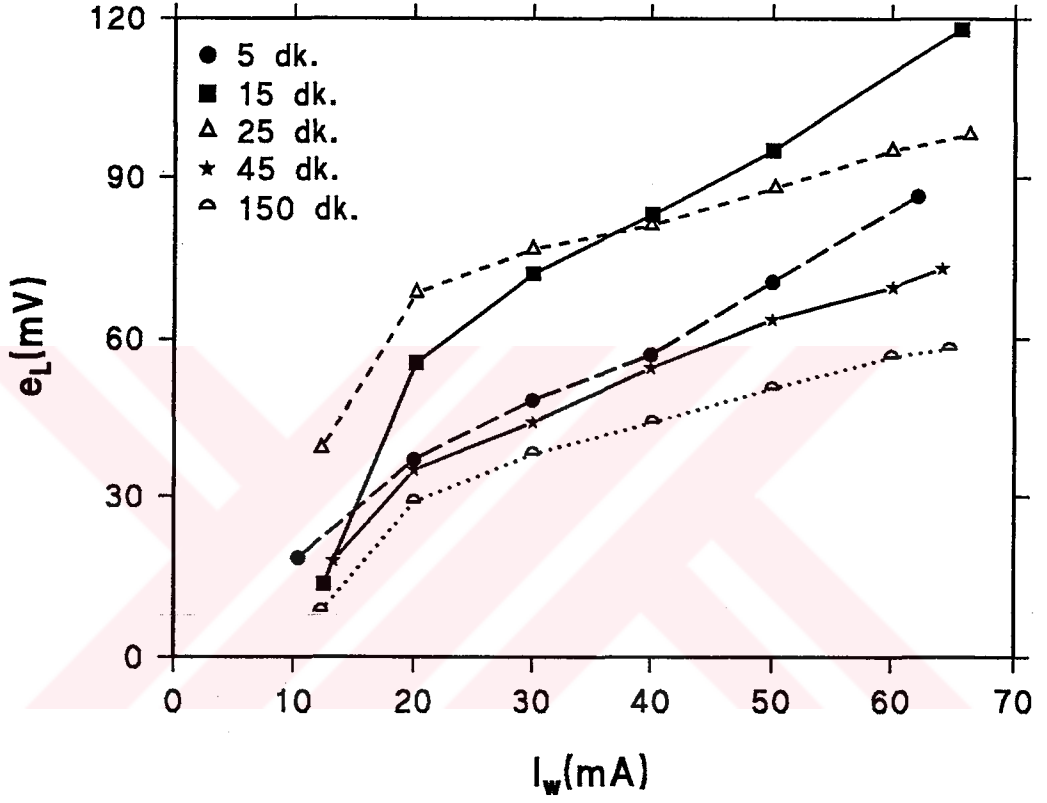


Şekil 5.26. 500°C'de 40 ve 90 dakika ısıl işlem görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin  $I_W=55$  mA, 1 ve 3 kHz için  $e_L$ 'nin DC manyetik alana karşı grafiği.

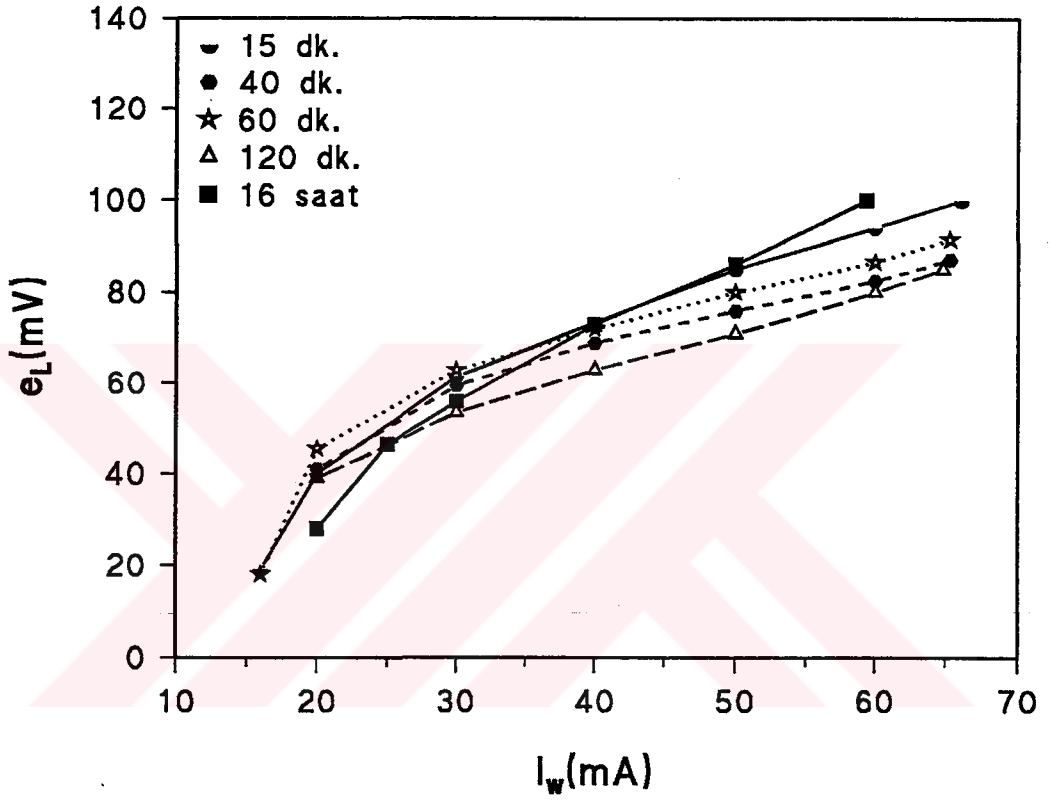
### 5.5. Amorf Ferromanyetik Tellere Uygulanan AC Akımın $e_L$ Üzerine Etkisi

Şekil 5.27., 28., 29., 30. ve 31. değişik sıcaklıklarda değişik zamanlar için ısı işlem görmüş FeSiB ve CoSiB tellerin  $e_L$  genliğinin uygulanan AC akım,  $I_w$ 'ya bağılılıklarını göstermektedirler.  $e_L$  genliğinin yapılan ölçümler sonucunda AC akım,  $I_w$  ile arttığı görülmüştür. Uygulanan AC akım,  $I_w$ ,  $I_w = I_m \cos \omega t$  ile verilmektedir. Manyetik duygunluk AC akımın genliği,  $I_m$ 'in fonksiyonu olduğu bilinmektedir. Dolayısı ile AC akım,  $I_w$ 'nın da foksionudur. Bu nedenle AC akım,  $I_w$  arttıkça  $e_L$  genliği artmaktadır. Yani,  $I_m$  genliği arttıkça  $e_L$  genliği de artacaktır.

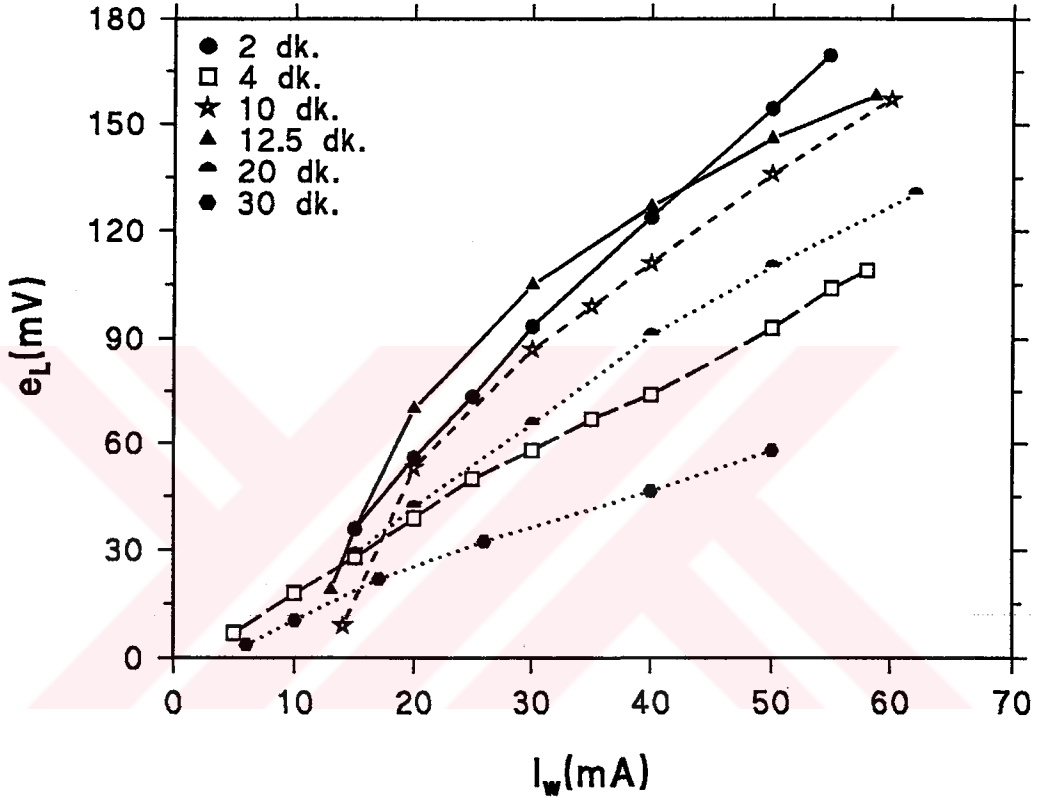
Isıl işlem görmüş FeSiB ve CoSiB tellerin  $e_L$  genliklerinin AC akım,  $I_w$ 'ya bağılılıkları bu şekilde açıklanabilmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçlarına bakıldığında daha önce literatürde bulunan sonuçlar ile uyduğu görülmüştür.



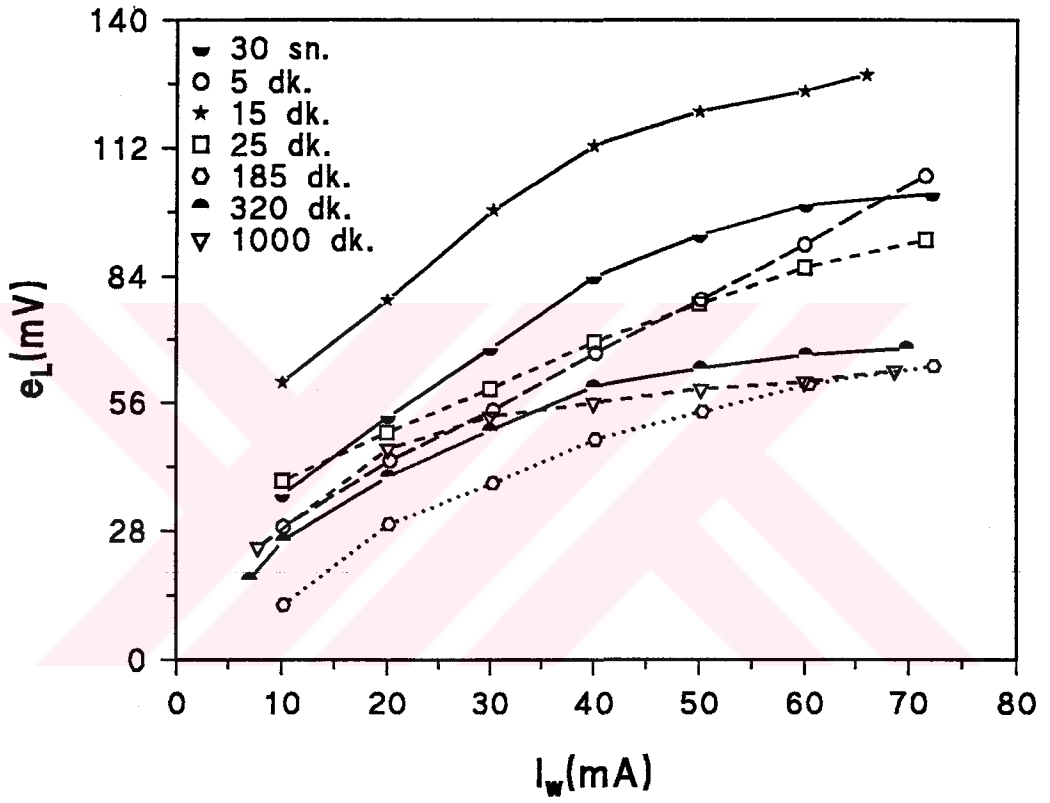
Şekil 5.27. 370°C'de değişik zamanlar için ısıtım görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin 1 kHz için  $e_L$ 'nin AC  $I_w$  akımına karşı grafiği.



Şekil 5.28. 400°C'de değişik zamanlar için ısıtılmış 125  $\mu$ m çapında FeSiB telin 1 kHz için  $e_L$ 'nin AC  $I_w$  akımına karşı grafiği.

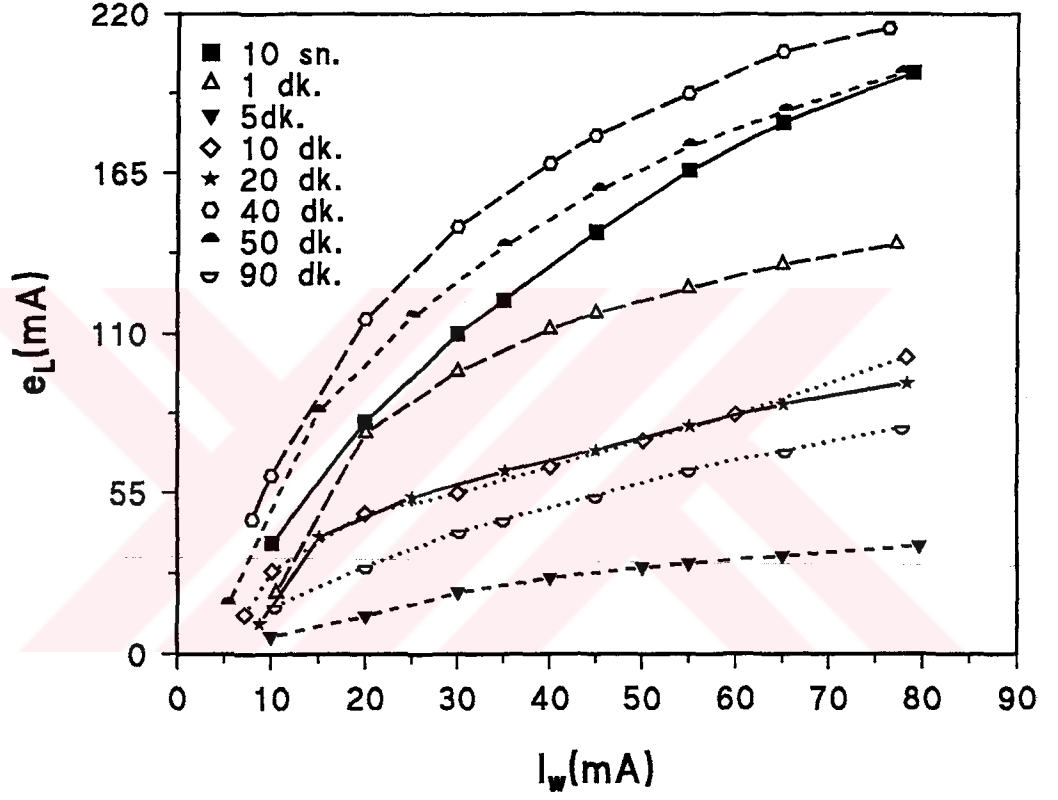


Şekil 5.29. 500°C'de değişik zamanlar için ısıtım görmüş 125  $\mu$ m çapında FeSiB telin 1 kHz için  $e_L$ 'nin AC  $I_w$  akımına karşı grafiği.



Şekil 5.30. 450°C'de değişik zamanlar için ısıtılmış 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin 1 kHz için  $e_L$ 'nin AC  $I_w$  akımına karşı grafiği.





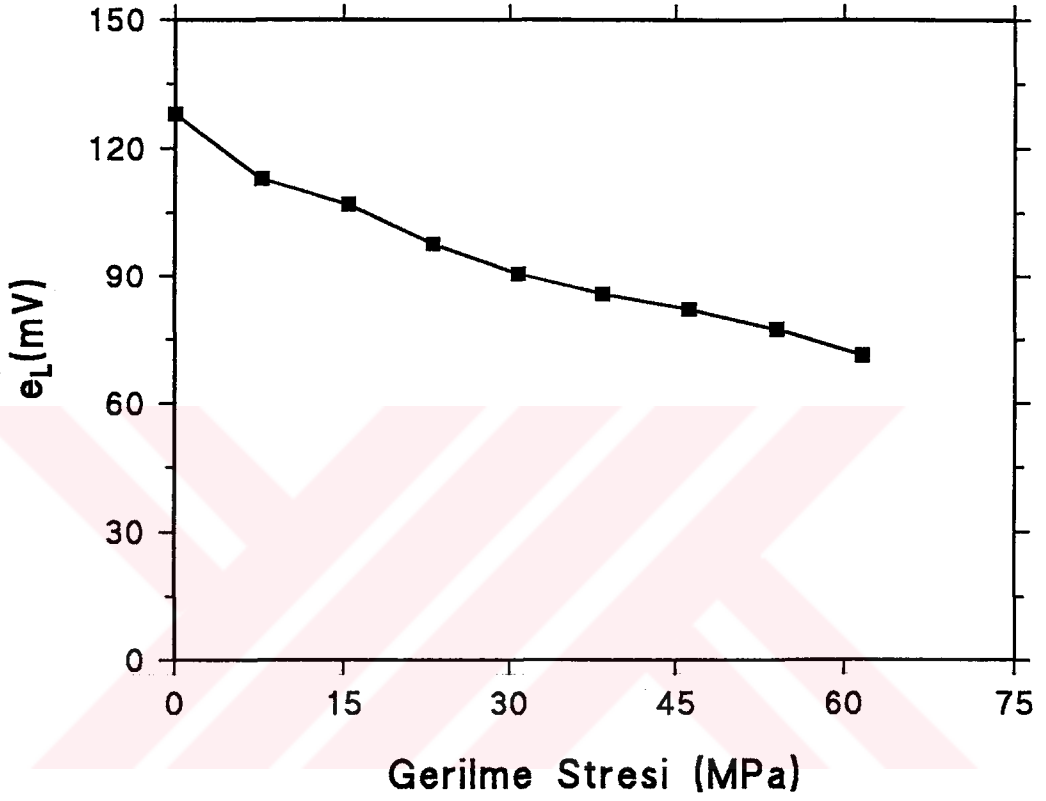
Şekil 5.31. 500°C'de değişik zamanlar için ısıtılmış 130  $\mu$ m çapında CoSiB telin 3 kHz için  $e_L$ 'nin AC  $I_w$  akımına karşı grafiği.

## 5.6. Amorf Ferromanyetik FeSiB ve CoSiB Tellere Dış Stresin Etkisi

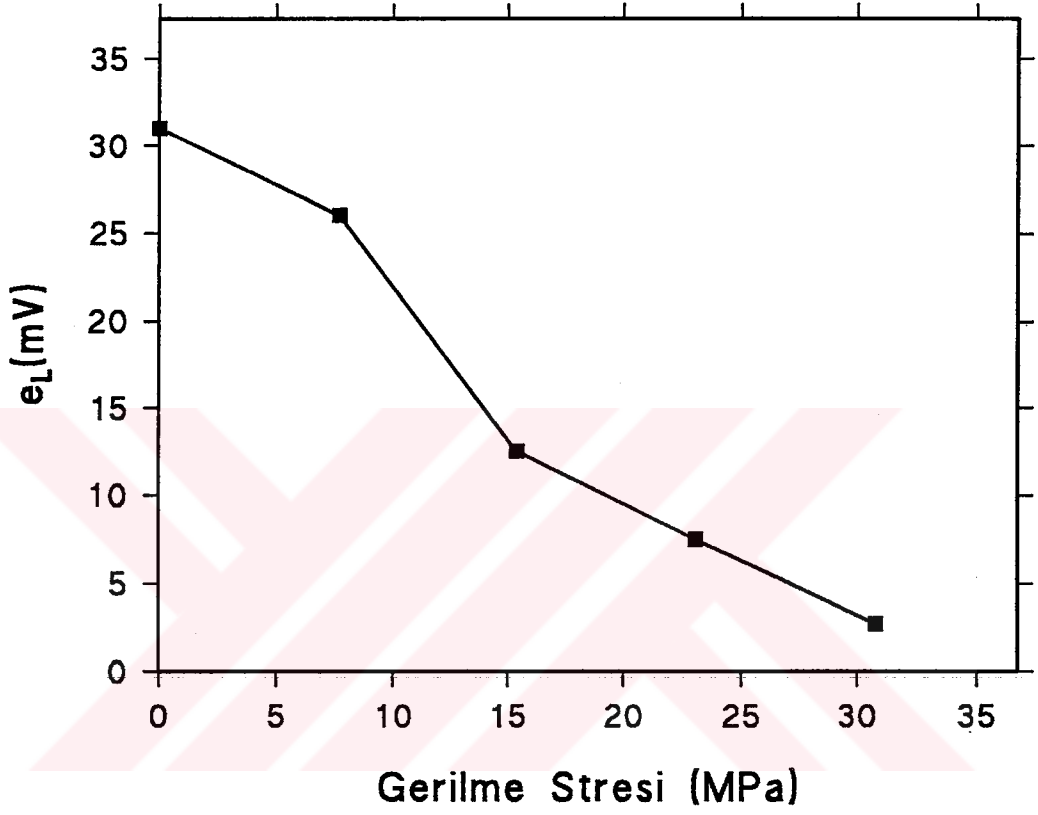
Şekil 5.32., 33.,34.,35. ve 36. değişik sıcaklıklarda ısı işlem görmüş FeSiB tellerin  $e_L$  genliği üzerine dış gerilme stresinin etkisini göstermektedirler. Dış gerilme stresi arttıkça  $e_L$  genliğinin azaldığı görülmüştür.

Yani artan stres manyetik momentleri kesim 2.7'de belirtildiği gibi kendi yönünde yönlendirecektir. Bu durumda stres telin boyu doğrultusunda uygulandığından artan stres ile manyetizasyon telin boyu doğrultusunda yönlenmeye çalışacaktır. Bu da telin dairesel yöndeki manyetik duygunluğunun yani  $e_L$  değerinin azalmasına neden olacaktır.

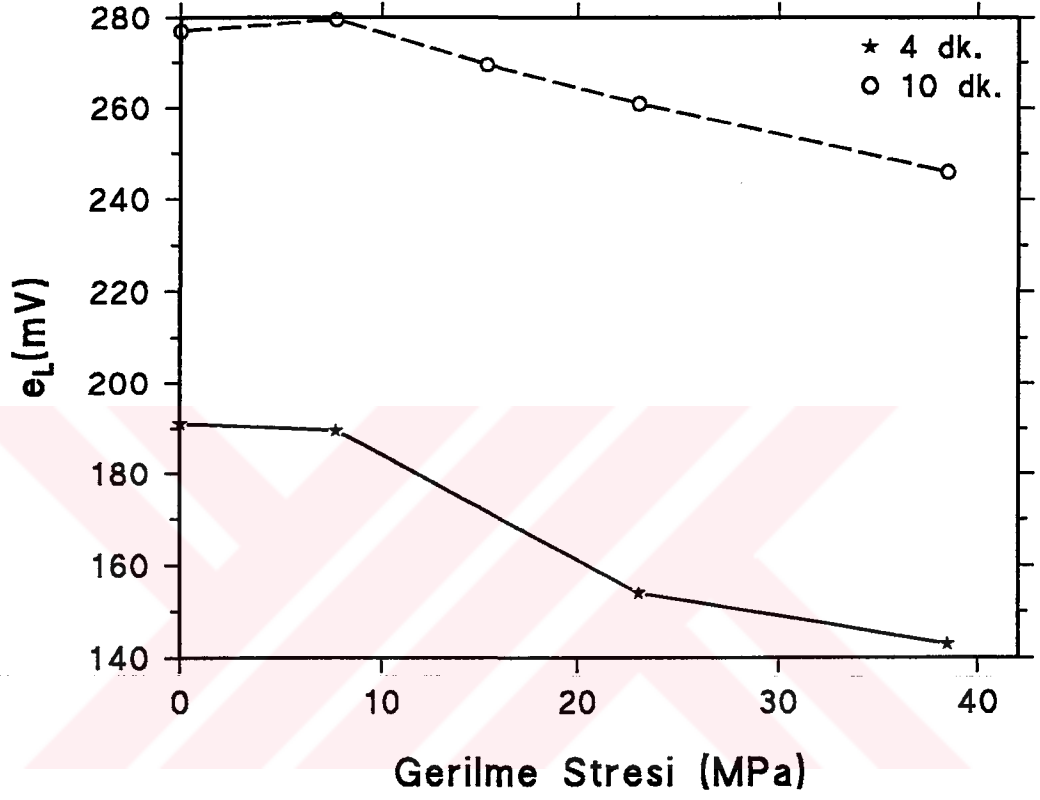




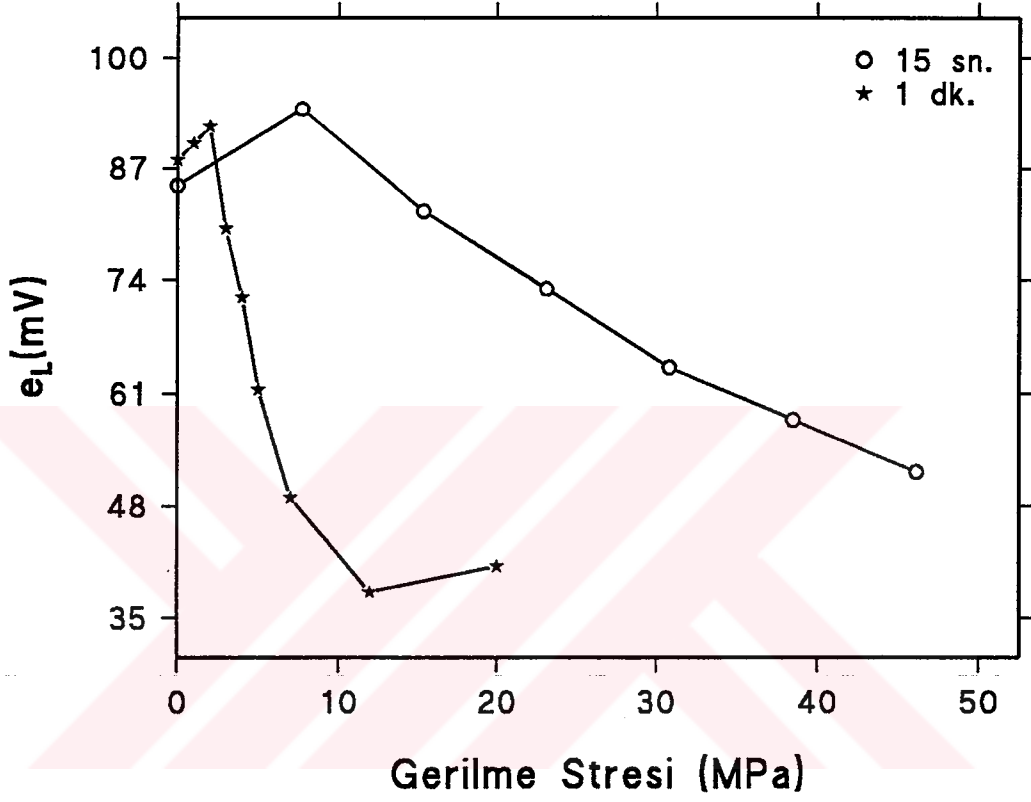
Şekil 5.32. 460°C'de ısıtılmış 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_w=60$  mA ve 10 kHz için  $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği.



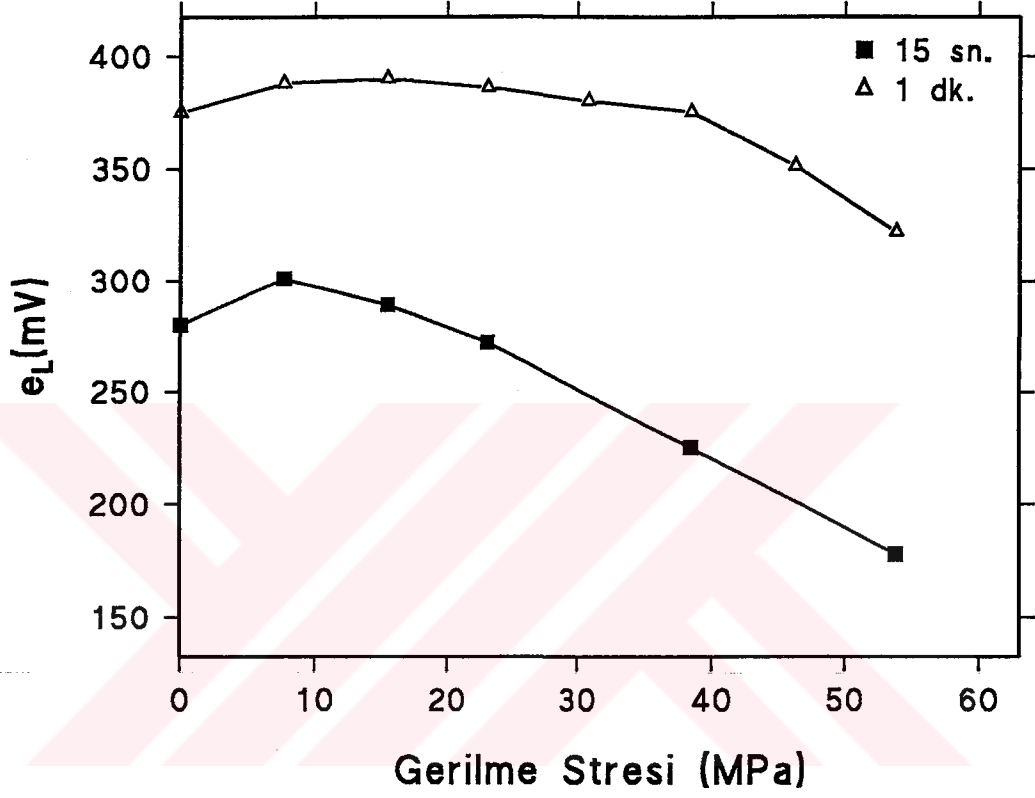
Şekil 5.33. 460°C'de ısıtılmış 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_w=72$  mA ve 500 Hz için  $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği.



Şekil 5.34. 500°C'de ısıtıl işlem görmüş 125  $\mu\text{m}$  çapında FeSiB telin  $I_w=60$  mA ve 3 kHz için  $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği.



Şekil 5.35. 500°C'de ısıl işlem görmüş 130  $\mu\text{m}$  çapında CoSiB telin  $I_w=60$  mA ve 1 kHz için  $e_L$ 'nin gerilme stresine karşı grafiği.



Şekil 5.36. 500°C'de ısıtılmış 130 µm çapında CoSiB telin  $I_w=55$  mA ve 3 kHz için  $e_L$ 'nin gerilme stresi karşı grafiği.

## 6. SONUÇLAR

Bölüm 3 şekil 3.2. ve 4.'de gösterilen sistemler kullanılarak amorf ferromanyetik FeSiB ve CoSiB tellerin dairesel yöndeki manyetik özellikleri Matteucci ve Manyeto-İndüktif etki ölçümleri ile incelenmiştir. Bu ölçümlerde frekansın, dış manyetik alanın, gerilme stresinin ve uygulanan AC akımın amorf tellerde değişimlere sebep olduğu görülmüştür.

Isıl işlem görmüş ve görmemiş amorf teller ile ölçümler yapılarak ısıtılmanın teller üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu söz konusu tellerin  $M-H_w$  eğrileri elde edilerek amorf tellerin manyetik özellikleri incelenmiştir.

Bu incelemeler sonucu  $e_m$  genliğinin frekans, dış manyetik alan ile arttığı, gerilme stresi ile azaldığı gözlenmiştir.  $e_m$  genliğindeki artışa telde iç stresin azalmasından dolayı manyetizasyonun helisel bileşeninin artmasının sebep olduğu sonucuna varıldı.  $e_m$  genliğindeki azalmaya ise uygulanan dış stresin sonucu olarak manyetizasyonun helisel bileşeninin azalmasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

$e_L$  genliğinin de frekans, uygulanan AC akım ile arttığı, dış manyetik alan ve gerilme stresi ile azaldığı gözlenmiştir.  $e_L$  genliğindeki artış veya azalışın iç stres ile alakalı olarak manyetik duygunluktaki değişimin neden olduğu ortaya çıkmıştır. Isıl işlem görmemiş FeSiB telin  $e_L$  genliği hemen hemen sıfır iken tel ısıtılınca  $e_L$  genliğinde büyük bir artış görülmüştür. Isıl işlem sonucu  $e_L$  genliğindeki bu artışın telin manyetik yapısının neden olduğu belirlenmiştir.

Bizim çalışmamızın amacı ısıtılmanın telin yapısına olan etkisini incelemektir. Bu da büyük oranda açıklanmıştır. Ancak ölçümler sırasında elde edilen  $e_m$  ve  $e_L$  voltajlarının dış manyetik alan şiddetine veya dışarıdan uygulanan stres şiddetine çok hassas olduğuda gözlenmiştir. Bu nedenle çalışmanın ileriye yönelik kısmını telin bu özelliklerini kullanarak hassas şekilde manyetik alan ve stresi ölçen sistemleri geliştirmek olacaktır.



## 7. Kaynaklar

1. HUMPREY F.B., Satellite Symposium on Amorphous Magnetic Wires, INTERMAG'90, (1990).
2. ATALAY S. and P.T. SQUIRE, J. Magn. Mater., Vol. 101, pp. 47, (1991).
3. ATALAY S. and P.T. SQUIRE, J. Appl. Phys., Vol.70, pp.6516, (1991).
4. JAKUBOVICS J.P., Magnetism and Magnetic Materials (The Institute of Metals, London,1987)
5. CULLITY B.D., Introduction to Magnetic Materials (Addision-Wesley, Reading, MA, USA,1972).
6. JILES D., Magnetism and Magnetic Materials (Chopman and Hall, London, 1991).
7. HECK I., Magnetic Materials Their Applications (Butterworths, London, 1967).
8. LUBROSKY F.E. (Ed.), Amorphous Metallic Alloys (Butterworths, London, 1983).
9. HUDSON P.D., "Magnetic Property Control in Ferromagnetic Amorphs Alloys", PhD. Thesis, University of Cambridge (1986).
10. DUWEZ P., "Structure and Properties of Alloys Rapidly Quenched From The Liquid State", Trans.Am. Soc. Metals, Vol. 60, pp. 607, (1967).
11. O'HANDLEY R.C., "Physics of Ferromagnetic Amorphous Alloys", J. Appl. Phys., 62(10), R15, (1987).
12. GRAZYK J. F., "Structure Argon Sputtered Gd-Co-Ho Amorphous Thin Films", J. Appl. Phys.,Vol. 49, pp. 1738, (1978).
13. MASUMATO T., I. OHNAKA and M. HAGIWARA, "Production of Pd-Cu-Si Amorf Wires by A Melt spinning Method Using Rotating Water, Scripta Metall"., Vol. 15, pp. 293, (1981).
14. HAGIWARA M.,A. INOUE and T. MASUMATO, "Production of Amorphous Co-Si-B and Co-M-Si-B (M= Group IV-VIII Transitia Metals) Wires by A Method Employing Melt Spining into Rotating Water and Some Properties of The Wires", Mater. Sci. Eng., Vol. 54, pp. 197, (1982).
15. INOUE A., M. HAGIWARA and T. MASUMATO, "Production of Fe-P-C Amorphous

- Wires by in-rotating-water Spining Method and Mechanical Properties of The Wires", *J. Mater. Sci.* Vol. 17, pp.580, (1982).
16. INOUE A., S. FURUKAWA, M. HAGIWARA, T. MASUMATO, "Preparation Mechanical Strenghts and Thermal Stability of Ni-S-B and Ni-P-B Amorphous Wires", *Mettal. Trans. A*, Vol. 18A, pp. 621, (1987).
  17. BOZORTH R.M., *Ferromagnetism* (Van Nostrand, New York, 1951)
  18. ANANTHARAMAN T., (Chapter 1- An Overview) *Metallic Glasses: Production, Properties and Applications* ( Ed. T. Anantharaman) (Trans. Tech. , Netherlands, 1984)
  19. MITRA A., A. HERNANDO, G. RIVERO and M. VAZQUEZ, "Succceptibility and Coercivity of Amorphous Wires", *J. Magn. Mag. Mater.*, Vol. 83, pp.339, (1990).
  20. LIU J., R. MAKMAHALL, L. ARNBERG and S. J. SAVAGE, "Theorical Analaysis of Residual Stress Effect on The Magnetostrictive Properties of Amorphous Wires", *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, pp. 4238, (1990).
  21. ATALAY S., "Magnetoelastik Properties Of Iron Based Amorphous Wires", Ph.D thesis, University of Bath (1992).
  22. MOHRI K., T. KOHZAWA, K. KAWASHIMA, H. YASHIDA and L.V. PANINA, *IEEE Trans. Magn.* Vol. 28(5), pp. 3150, (1992).
  23. MOHRI K. et al., *IEEJ Mag-84-95*, 1984; *J. Magn. Soc. Jpn.*, 9(2), 157-160, 1985
  24. WUN-FOGLE M., H. T. SAVAGE, L.T. KABACOFF, M.L. SPANO and J. R. CULLEN, "Effect of Apllied Stress on The Magnetisation of Amorphous Magnetoelastic Wires", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 25(5), pp. 3617, (1989).
  25. MATTEUCCI C. H., *Memoire sur le Magnetisme Developpe par le Courant Electrique*, C.R. 24, pp. 301, (1847).
  26. MOHRI K., F.B. HUMPREY, J. YAMASAKI and F. KINOSHITA, *IEEE Tras. Magn.*, Mag-21, No.5, pp. 2017-2019, (1985).
  27. MOHRI K. and S. TAKEUCHI, *J. Appl. Phys.*, Vol. 53(11), pp. 8386-8388, (1982).

28. KIMURA K., M. KANO, K. KAWASHIMA, K. MOHRI, M. TAKAGI and L.V. PANINA, "Data Tablet Utilizing Matteuchi Effect of Amorphous Magnetic Wire Matrix", IEEE Trans. on Magn., Vol. 27, pp. 4561, (1991).
29. KINOSHITA F., "Estimation of The Radius of The Inner Core and Angle Easy Axis of Its Magnetisation For As-Prepared Amorphous Magnetostrictive Wire", IEEE Trans. on Magn., Vol. 25(1), pp. 1786, (1990).
30. MOHRI K., F.B. HUMPHREY, K. KAWASHIMA and M. MIZUTANI, IEEE Trans. on Magn., Vol. 26, No.5, (1990).
31. KAWASHIMA K., T. KOZAWA, H. YOSHIDA and K. MOHRI, IEEE Trans. on Magn., Vol.29, No. 6, pp.1245, (1993).
32. MOHRI K., K. KAWASHIMA, T. KOZAWA and H. YOSHIDA, IEEE Trans. on Magn., Vol.MAG-29, No.2, pp. 1245-1248, (1993).
33. KAWASHIMA K. et al., Tech. Meeting on Magnetics of IEE of Japon, MAG-91-157, pp.25-32, (1992).
34. HERNANDO A., M. VAZQUEZ and J.M. BARANDIARAN, Metallic Glasses and Sensing Applications, J. Phys. E.: Sci. Instrum., Vol. 21, pp.1129, (1988).
35. ATALAY S., Tr. J. of Physics, Vol. 19, pp. 758-765, (1995).
36. SQUIRE P.T. and D. ATKINSON, IEEE Trans. Magn., Vol. 31, No. 2, pp. 1239, (1992).
37. ATALAY S. and P.T. SQUIRE, IEEE Trans. Magn., Vol. 28, No. 5, pp. 3144, (1992).
38. ATALAY S. and H. MALKAS, "Influence of Annealing on Magneto-Inductive Effect in FeSiB Amorphous Wires", 6th European Magnetik Materials and Application Conference, Wien (1995).

## 9. ÖZGEÇMİŞ

08.12.1968 tarihinde İstanbul'da doğdu. 1987 yılında İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne girdi. 1991 yılında mezun olarak takip eden 1992 yılında Fizik Bölümünde Yüksek Lisansa başladı. 1992 yılında araştırma görevlisi sınavını kazanarak, İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı.

### Yayınlar

1. B.ULUĞ, S. ATALAY, H. MALKAŞ ve Ö. AYTEKİN, "Argon Ortamının C20+2H Moleküllerinin Eldesine Etkisi", 14. Ulusal Fizik Kongresi, Lefkoşe (1993).
2. S. ATALAY and H. MALKAŞ, "Influence of Annealing on Magneto-İndüktive Effect in FeSiB Amorphous Wires", 6th European Magnetic Materials and Application Conference, Wien (1995) (Also, to be published J.Mag. Mag. Mater.).