

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK SICAKLIK SÜPERİLETKEN Bi:2223/Ag ŞERİTLERDE AC KAYIPLARI  
VE EN İYİ ÇALIŞMA ŞARTLARININ BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İbrahim DÜZGÜN**

**HAZİRAN 2010  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK SICAKLIK SÜPERİLETKEN Bi:2223/Ag ŞERİTLERDE AC  
KAYIPLARI VE EN İYİ ÇALIŞMA ŞARTLARININ BELİRLENMESİ**

**İbrahim DÜZGÜN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor (Fizik)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31. 05. 2010  
Tezin Savunma Tarihi : 16. 06. 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selahattin ÇELEBİ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mustafa ALTUNBAŞ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ekrem YANMAZ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Saffet NEZİR**

**Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2010**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında ‘Doktora Tezi’ olarak hazırlandı.

Bu çalışmada, satın alınan farklı üretim metotlarına sahip gümüş kılıflı Bi:2223/Ag süperiletkenlerde sıcaklığın, frekansın, AC alanın, DC alanın ve şerit yüzeyine göre manyetik alan yönünün (dik veya paralel) fonksiyonu olarak AC kayıpları ölçüldü. AC kayıplarını hesaplamak için yapılacak modellemenin denklemleri türetildi, bilgisayar programı yapılarak AC kayıpları hesaplandı, deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırarak AC kayıplarına katkıda bulunan histerezis kaybı, Eddy akımı kaybı, filamanlar arası çiftlenim kaybı, akı akışı kaybı gibi katkıları belirlendi ve AC kayıplarının nasıl en aza indirilebileceği araştırıldı. Deneysel çalışmalar Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı’nda yapıldı.

Doktora öğrenciliğimin her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Selahattin ÇELEBİ’ye en içten dileklerle teşekkür ederim.

Doktora Tez çalışmalarımın deneysel ve teorik modelleme olarak bilgi yönünden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK ve Doç. Dr. Fedai İNANIR’a, teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmanın hayata geçirilmesinde maddi kaynak sağlayan TÜBİTAK’a ve Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) olarak kabul eden Karadeniz Teknik Üniversitesi’ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu zamana kadar hiçbir desteği benden esirgemeyen ANNEME, BABAMA ve biricik KARDEŞİME en içten teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim DÜZGÜN  
Trabzon 2010

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No:</u></b>
ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER .....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar DİZİNİ .....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.1.1. Süperiletkenlik ve Tarihçesi Hakkında Genel Bilgi.....	2
1.1.1.1. Sıfır Direnç.....	2
1.1.1.2. Meissner Etkisi.....	4
1.1.1.3. Kritik Manyetik Alan ve Kritik Akım Yoğunluğu.....	6
1.1.1.4. I. ve II. Tip Süperiletkenler.....	8
1.1.1.5. Tersinmezlik Çizgisi (Irreversibility Line).....	12
1.1.2. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerde AC Kayıp Mekanizmaları.....	13
1.1.2.1. Histerezis Kaybı.....	14
1.1.2.2. Eddy Akımı Kaybı.....	16
1.1.2.3. Çiftlenim Kaybı.....	19
1.1.3. Kritik Hal ve Kritik Hal Modelleri.....	20
1.1.3.1. Geliştirilmiş Kritik Hal Modelleri.....	22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	23
2.1. Süperiletken Şerit Numunelerin Tanımı.....	23
2.1.1. Şerit Numunelerin Üretim Teknikleri Hakkında Genel Bilgi.....	24
2.1.1.1. CTF (Continuous Tube Filling and Forming) Tekniği.....	24
2.1.1.2. PIT (Powder in Tube) Tekniği.....	25
2.2. DeneYlerin Gerçekleştirildiği Ölçüm Cihazları .....	27
2.2.1. AC Manyetik Ölçüm Sistemi (ACMS) .....	27
2.2.2. Titreşen Örnek Manyetometresi (VSM).....	28

3.	BULGULAR VE TARTIŞMA .....	30
3.1.	CTFF Numunesine Ait Deneysel Ölçümler ve Analizleri.....	30
3.1.1.	AC Alınganlık Ölçümleri.....	30
3.1.1.1.	AC Kayıpların Sıcaklık ve Alan Bağlılığı.....	30
3.1.1.2.	Histerezis Kayıpların Hesaplanması.....	36
3.1.1.3.	AC Kayıpların Frekans Bağlılığı.....	41
3.1.1.4.	DC Manyetizasyon Ölçümleri .....	53
3.1.1.5.	Tersinmezlik Çizgisi.....	59
3.2.	PIT Numunesine Ait Deneysel ve Analizleri.....	61
3.2.1.	AC Alınganlık Ölçümleri.....	61
3.2.1.1.	AC Kayıpların Sıcaklık ve Alan Bağlılığı.....	61
3.2.1.2.	Histerezis Kayıpların Hesaplanması.....	64
3.2.1.3.	AC Kayıpların Frekans Bağlılığı.....	65
3.2.1.4.	DC Manyetizasyon Ölçümleri .....	69
4.	SONUÇLAR .....	81
5.	ÖNERİLER.....	84
6.	KAYNAKLAR .....	85
	ÖZGEÇMİŞ	

## ÖZET

Bu çalışmada, CTFF ve PIT isimli iki farklı metotla üretilen gümüş kılıflı Bi:2223/Ag süperiletken şeritlerde AC kayıpları; sıcaklığın, frekansın, AC alanın, DC alanın ve şerit yüzeyine göre manyetik alan yönünün dik veya paralel olmasına göre araştırıldı. AC kayıplarını hesaplamak için modelleme denklemleri türetildi, bilgisayar programı yapılarak AC kayıpları hesaplandı. Histerezis kaybı, eddy akımı kaybı, filamanlar arası çiftlenim kaybı, akı akışı kaybı ve bunların AC kayıplarına katkıları deneysel veriler ve teorik hesaplamaların sonuçları sayesinde belirlendi. Ve sonrasında AC kayıplarının nasıl en aza indirilebileceği araştırıldı.

CTFF şerit numune için her iki yönelimde AC kayıplarının alan genliğine, sıcaklığa ve güçlü bir şekilde frekansa bağlı olduğu görüldü. Numunenin frekansa aşırı bağlı olduğundan dolayı CTFF şerit numunesinin yüzeyine göre manyetik alanın dik ve paralel yöneliminde farklı sıcaklıklarda ve geniş frekans aralığında ölçümler yapıldı. AC alan genliğinin artmasıyla sanal kısımdaki pik sıcaklıklarının düşük alan bölgesine kaydığı gözlemlendi. Akı sürüklenmesinden ileri gelen kaybın çok küçük olduğu, manyetik gevşeme (relaxation) deneyleri ile belirlendi. Çiftlenim kaybı pikinin yüksekliğinde, paralel yönelimin aksine sıcaklık arttıkça artma gözlemlendi. ACS yönteminden elde edilen tersinmezlik çizgisi, DC manyetizasyon yönteminden elde edilen tersinmezlik çizgisinden daha yüksek sıcaklık bölgesinde yer aldığı belirlendi. DC alanın varlığında ve yokluğunda sabit sıcaklıkta tüm frekans değerlerinde DC alan varken ve arttıkça AC kaybının arttığı görüldü. Ayrıca DC alan varken AC manyetik alan genliğinin artmasıyla kayıp maksimumlarında bir azalma gözlenmiştir. PIT şerit numunesi için AC kaybının, geniş bir frekans aralığında farklı iki sabit sıcaklıkta (20 ve 30 K) değişimi incelendiğinde; CTFF şerit numunesindeki gözlemlerinin aksine bu frekans aralığında (10 kHz'e kadar) bir maksimum gözlenmemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AC kaybı, Bi:2223/Ag süperiletken şerit, kritik hal modelleri, kritik akım yoğunluğu, eddy akım kaybı, tersinmezlik çizgisi, akı sürüklenmesi.

## SUMMARY

### **AC Losses and Investigation of the Optimum Operation Conditions in High-Tc Superconducting Bi:2223/Ag Tapes**

In this study, AC losses were investigated in silver clad Bi:2223/Ag tape which produced by two different methods named PIT and CTFF, as functions of temperature, frequency, AC field, DC field and according to perpendicular or parallel orientation of the magnetic field with respect to tape surface. Modelling equations were derived for the calculation of AC losses and these losses were calculated by made of a computer program. Hysteresis loss, eddy current loss, interlamantary coupling loss, flux flow loss and their contributions to AC losses were determined thanks to results of experimental data and theoretical calculations. And then it was investigated how to minimise the AC losses.

AC losses in the sample of CTFF for both orientations were observed to be depend on the field amplitude, temperature and strongly frequency. We have measured in perpendicular and parallel orientations of the magnetic field with respect to the CTFF tape sample surface at different temperatures and wide frequency range because of the sample dependent on excessively frequency. We note that peak temperatures of the imaginary part shift to the lower field region with increasing AC field amplitude. The loss because of flux creep was determined to be very small by magnetic relaxation experiments. We have observed that the height of coupling loss peak increases with increasing temperature in contrast to parallel orientation. We have observed that the irreversibility line determined from AC susceptibility method locates at higher temperature than that was obtained from DC magnetization method. It was observed that AC loss was increased with the presence and increase of DC field at a constant temperature and in all frequency ranges in the presence and absence of DC field. Also we observed a reduction in the loss maxima with increasing AC magnetic field amplitude in the presence of DC field. When two different constant temperatures (20 and 30 K) and wide frequency ranges were investigated, at AC losses for the sample of PIT tape a maximum was not observed in this frequency range (up to 10 kHz) unlike the observations in CTFF sample.

**Key Words:** AC loss, Bi:2223/Ag superconducting tape, critical state models, critical current densities, eddy current loss, irreversibility line, flux creep.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Onnes'in süperiletkenliğe dair yaptığı ilk ölçümlerden olan civa numunesinin direncin sıcaklığa karşı çizilen bu grafikte süperiletken hale geçişte direncin sıfıra düşüşü gösterilmektedir. ....	3
Şekil 2.	Manyetik alan çizgilerinin davranışını (a) Normal metalden geçerken, (b) Manyetik bir malzemedan geçerken, (c) yüzey etkileri ihmal edilmiş bir süperiletken malzemenin varlığında, (d) bir süperiletken numune için, alanın yüzeyden numunenin içerisine doğru nüfuzunu göstermektedir .....	5
Şekil 3.	Süperiletken ve normal durum manyetik alanın sıcaklığa karşı çiziminde gösterilmektedir. Kritik alan $H_c(T)$ ağırsı tarafından bu iki bölge ayrılmıştır. ....	6
Şekil 4.	%52 Niyobyum ve %48 titanyum alaşımının süperiletken ve normal durumları için uygulanan kritik akım yoğunluğunun sıcaklığa göre değişimini göstermektedir.....	8
Şekil 5.	(a) Ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (b) ortalama manyetizasyonun I. Tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alana bağlılığı, (c) ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (d) ortalama manyetizasyonun II. Tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alana bağlılığı.....	10
Şekil 6.	II. Tip süperiletkenler için H- T eğrisi. ....	11
Şekil 7.	(a) I. tip süperiletken, (b) geleneksel II. tip süperiletken, (c) yüksek sıcaklık süperiletkenleri için faz diyagramları. ....	11
Şekil 8.	Yarı-sonsuz dilim (slab) geometrisine sahip süperiletken numune kesitine akı girişi. Şekilde $H_a$ uygulanan alanı ve $\otimes$ ile $\odot$ sembolleri indüklenen akımın yönünü göstermektedir. (a), (b), (c) 'de başlangıçta alan yokken zamanla artan bir alanın varlığında (d) 'de ise azalan alan ile profilin değişimini göstermektedir.....	15
Şekil 9.	Zamanla değişen manyetik alanın dik uygulandığı iki filamanlı bir iletkende eddy akımı ve çiftlenim akımlarının gösterimi. ....	17
Şekil 10.	Farklı iletkenliğe sahip 2b kalınlıklı iki tabaka için eddy akım kayıplarının frekans bağlılığı. ....	18
Şekil 11.	CTFF tekniğiyle üretilmiş Bi:2223/Ag şerit numunesinin kesit yüzeyinden çekilmiş mikroskop görüntüsü. ....	23
Şekil 12.	PIT tekniğiyle üretilmiş Bi:2223/Ag şerit numunesinin kesit yüzeyinden çekilmiş mikroskop görüntüsü. ....	24
Şekil 13.	CTFF tel ve şerit üretim makinesi. ....	25
Şekil 14.	CTFF tel ve şerit üretim tekniğinin şematik gösterimi. ....	25
Şekil 15.	PIT tel ve şerit üretim tekniğinin şematik gösterimi. ....	26
Şekil 16.	QD-P500 AC Alınanlık Ölçme sistemi.....	28



Şekil 17.	VSM modülünün sıvı helyum takımının içerisindeki yerleşimi. Üstteki kısım gradiometreyi alttaki kısım algılama bobinini göstermektedir. ....	29
Şekil 18.	$f=20$ Hz ve $H_{DC}=0$ alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine paraleldir. ....	30
Şekil 19.	$f=20$ Hz ve $H_{DC}=10$ Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. ....	31
Şekil 20.	$f=20$ Hz ve $H_{DC}=0$ alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir. ....	32
Şekil 21.	$f=20$ Hz ve $H_{DC}=10$ Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. ....	32
Şekil 22.	$f=20$ Hz ve $H_{DC}=10$ Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC kayıp maksimumundaki azalma ve bir minimumdan sonra tekrar artmayı göstermekte olan AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. ....	33
Şekil 23.	$f=20$ Hz'de, $H_{DC} = 0$ ve $H_{DC} = 10$ Oe, seçilen AC alan genlikleri için AC alınganlığın imajiner kısmının AC manyetik alanla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine paraleldir. ....	34
Şekil 24.	$f=20$ Hz'de, $H_{DC} = 0$ ve $H_{DC} = 10$ Oe, seçilen AC alan genlikleri için AC alınganlığın imajiner kısmının AC manyetik alanla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine diktir. ....	35
Şekil 25.	$f=20$ Hz'de, $H_{AC} = 5$ Oe, seçilen farklı DC alan değerleri için AC alınganlığın imajiner kısmının sıcaklıkla değişimi. ....	36
Şekil 26.	(a) ve (b) şekil üzerinde verilen parametreler seçildiğinde kritik hal modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar. Bu üç parametre uygun olarak seçildiğinde deneysel verilere çok iyi uyum sağlayan teorik sonuçlar elde edilebilmektedir. ....	40
Şekil 27.	$f=20$ ve $1000$ Hz ile $H_{AC}= 5$ ve $10$ Oe için AC alınganlığın imajiner kısmının sıcaklıkla değişimi. ....	41
Şekil 28.	Bi:2223/Ag şeritte $T= 20$ K ve $30$ K sıcaklığı için $H_{AC} =10$ Oe iken AC kayıplarının frekansa göre değişimi. ....	43
Şekil 29.	Bi:2223/Ag şeritte $T= 20$ K ve $30$ K sıcaklığı için denklem (5) 'den elde edilen AC çiftlenim kaybının $w \tau$ 'ya göre değişimi. ....	44
Şekil 30.	$f=20$ ve $1000$ Hz ve $H_{AC}= 5$ ve $15$ Oe için AC alınganlığın imajiner kısmının sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir. ....	46
Şekil 31.	Farklı sıcaklıklarda, $H_{AC} = 10$ Oe, $H_{DC} = 0$ Oe için AC alınganlığın imajiner kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir. ....	47
Şekil 32.	(a) Filamanlar arası çiftlenim kaybının teorik hesaplaması ve (b) Filamanlar arası çiftlenim kaybının histerezis kayıpları dahil ederek teorik hesaplaması. Şekil 31 ile karşılaştırıldığında her bakımdan iyi bir uyum elde edildiği görülmektedir. ....	48
Şekil 33.	Zaman sabitinin sıcaklıkla değişimi. ....	49

Şekil 34.	Histerezis kayıplarının bir ölçüsü olan $\chi_{hys}$ 'nin sıcaklığa göre $p=2$ ve $p=1.5$ alınarak hesaplanan veriler. İçteki şekil 10–80 K aralığını göstermektedir.....	51
Şekil 35.	$T=30$ K'de ve $H_{AC} = 10$ Oe iken, seçilen DC alan değerleri için AC alınganlığın sanal kısmının frekansla değişimi. ....	52
Şekil 36.	Bi:2223/Ag CTFF şerit numunesinin geniş yüzeyi alana dik yani c eksenine alana dik yönelimde 20 K sıcaklığında M-H histerezis eğrisi. ....	54
Şekil 37.	Farklı iki sıcaklıkta ZFC işleminden sonra ilk (virgin) manyetizasyon eğrisi ve FC işlemi ile ölçülen manyetizasyon $M_{FC}$ verileri.....	55
Şekil 38.	(a) 500 Oe (b) 2500 Oe 'lik bir alanda elde edilen alan altında soğutma (FC) manyetizasyonu $M_{FC}$ ve alansız (sıfır alan) soğutma manyetizasyonu $M_{ZFC}$ eğrileri. ....	56
Şekil 39.	CTFF şerit numunesinde alan şeridinin geniş yüzeyine dik yöneliminde 20K ve 30K sıcaklığında yeterince yüksek alan (10 kOe) uygulanıp sonra alan sıfırlanmış durumda tuzaklanan manyetizasyonun manyetik gevşeme eğrisi. ....	57
Şekil 40.	CTFF şerit numunesinde alan şeridinin geniş yüzeyine dik yöneliminde tuzaklanan manyetizasyonun $M_{rem}$ sıcaklığa göre değişimi. ....	59
Şekil 41.	İki farklı yöntemle AC alınganlık ve DC Manyetizasyon yöntemi ile belirlenen tersinmezlik çizgisi (IL).....	60
Şekil 42.	$f=20$ Hz ve $H_{DC}=0$ alan büyüklüğünde seçilen AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine diktir. ....	61
Şekil 43.	$f=20$ Hz ve $H_{DC}=10$ Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine paraleldir.....	62
Şekil 44.	Farklı üretim tekniğine sahip şerit numunelerin, $f=20$ Hz ve $H_{DC}=10$ Oe ile $H_{AC}= 5$ Oe AC alan genliği ve Manyetik alan şerit yüzeyine göre paralel yönelimde uygulandığında AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. ....	63
Şekil 45.	Farklı üretim tekniğine sahip şerit numunelerin, $f=20$ Hz ve $H_{DC}=10$ Oe ile $H_{AC}= 10$ Oe AC alan genliği ve Manyetik alan şerit yüzeyine göre paralel yönelimde uygulandığında AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. ....	63
Şekil 46.	Farklı üretim tekniğine sahip şerit numunelerin, $f=20$ Hz ve $H_{DC}=10$ Oe ile $H_{AC}= 15$ Oe AC alan genliği ve Manyetik alan şerit yüzeyine göre paralel yönelimde uygulandığında AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. ....	64
Şekil 47.	Şekil üzerinde verilen parametreler seçildiğinde kritik hal modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar. Bu üç parametre uygun olarak seçildiğinde deneysel verilere çok iyi uyum sağlayan teorik sonuçlar elde edilebilmektedir. ....	65
Şekil 48.	Farklı iki sıcaklıkta, $H_{AC} = 10$ Oe ve $H_{DC} = 0$ Oe için PIT şerit numunesinin AC alınganlığının sanal kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridinin düz yüzeyine paraleldir. ....	66
Şekil 49.	$f=20$ ve $f=1000$ Hz frekanslarında, $H_{AC} = 10$ Oe, $H_{DC} = 0$ Oe için AC alınganlığın sanal kısmının sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridinin düz yüzeyine paraleldir.....	67

Şekil 50.	Üretim metotları ayrı olan ve farklı iki sıcaklıkta, $H_{AC} = 10$ Oe, $H_{DC} = 0$ için AC alınganlığın sanal kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine paraleldir. ....	68
Şekil 51.	Üretim metotları ayrı olan şerit numunelerin farklı iki sıcaklıkta, $H_{AC} = 10$ Oe, $H_{DC} = 0$ için AC alınganlığın sanal kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir. ....	68
Şekil 52.	Bi:2223/Ag PIT şerit numunesinin c eksenine paralel yönelimde 30 K sıcaklığında M-H histerezis eğrisi. ....	69
Şekil 53.	PIT şerit numunesinde alan şeridin geniş yüzeyine dik yönelimde ve 30K sıcaklığında iki farklı $H_{DC}=1000$ Oe ve $H_{DC}=2000$ Oe uygulandığında manyetizasyonun manyetik gevşeme eğrileri arasındaki değişim. ....	70
Şekil 54.	PIT şerit numunesinde alan şeridin geniş yüzeyine dik yönelimde tuzaklanan manyetizasyonun $M_{rem}$ sıcaklığa göre değişimi. ....	71
Şekil 55.	20 K sabit sıcaklıkta, PIT şerit numunesinin deneysel M-H eğrisi ve bu verilere teorik hesaplamalar sonucu elde edilen uyum eğrisi. Burada manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir. ....	72
Şekil 56.	20 K ve 30 K sıcaklıklarında, PIT şerit numunesinin 1Tesla uygulanan maksimum manyetik alan altındaki M-H histeresiz çevriminin karşılaştırılması. Burada manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir. ....	73
Şekil 57.	PIT şerit numunesinin 20 K ve 30 K sıcaklıkları için kritik akım yoğunluklarının alan bağılılığı. Burada manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir. ....	74
Şekil 58.	PIT şerit numunesinin $H_{çevrim}=3000$ Oe maksimum uygulanan manyetik alana kadar farklı alanlarda ve $T = 30$ K sıcaklığında iç içe çizdirilmiş M-H histerezis eğrisi. ....	75
Şekil 59.	PIT şerit numunesinin tuzaklanan manyetizasyonun ( $M_{rem}$ ) maksimum alana ( $H_{çevrim}$ ) göre değişimi. ....	76
Şekil 60.	PIT şerit numunesinin $T = 30$ K sıcaklığında $H_{çevrim} = 200$ Oe için zamanla gevşeme eğrisi. ....	79
Şekil 61.	PIT şerit numunesinin $T = 30$ K sıcaklığında $H_{çevrim} = 200$ Oe için zamanla gevşeme eğrisi, $t_0=40$ s eklenmiştir. ....	80

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Bazı elementsel süperiletkenlerin geçiş sıcaklıkları.....	4
Tablo 2. Şekil 32 (b) 'de sunulan hesaplamalarda kullanılan bazı parametreler .....	51
Tablo 3. Şekil 59 için, Şekil 58 'den elde edilen veriler .....	76
Tablo 4. Şekil 59 için, Tablo 3 'ten normalize edilen veriler .....	77

## SEMBOLLER DİZİNİ

B	: Numune İçindeki İndüksiyon (Manyetik Akı Yoğunluğu)
E	: Elektrik Alan
H	: Manyetik Alan
M	: Manyetizasyon (Mıknatıslanma)
R	: Direnç
V	: Gerilim
$F_p$	: Çivileme (Pinning) Kuvveti
$F_L$	: Lorentz Kuvveti
$H_a$	: Uygulanan Manyetik Alan
$H_c$	: Kritik Manyetik Alan
$H_{c1}$	: Alt Kritik Alan
$H_{c2}$	: Üst Kritik Alan
$H^*$	: İlk Tam Nüfuz Alanı
$H^{**}$	: İkinci Nüfuz Alanı
$H_{*0}$	: $T=0$ 'daki İlk Tam Nüfuz Alanı
$H_{irr}$	: Tersinmezlik Alanı
$H_{AC}$	: AC Manyetik Alan
$H_{DC}$	: DC Manyetik Alan
$I_c$	: Kritik Akım
$J_c$	: Kritik Akım Yoğunluğu
$M_{rem}$	: Tuzaklanan Manyetizasyon (Mıknatıslanma)
$T_c$	: Kritik Geçiş Sıcaklığı
$T_{cm}$	: Matris Kritik Sıcaklığı
$T_{irr}$	: Tersinmezlik Sıcaklığı
$U_0$	: Çivileme (Pinning) Potansiyeli
$\chi$	: Manyetik Alınganlık
$\chi'$	: Manyetik Alınganlığın Gerçel Kısmı
$\chi''$	: Manyetik Alınganlığın Sanal Kısmı
$\Phi$	: Manyetik Akı
$\omega$	: Açısal Frekans

$\tau$	: Zaman sabiti
$\lambda$	: Nüfuz Derinliği
$\epsilon_0$	: Boşluğun Dielektrik Katsayısı
$\mu_0$	: Boşluğun Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
$\rho$	: Özdirenç
$\xi$	: Uyum Uzunluğu
$k$	: Boltzmann sabiti

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Süperiletken teknolojisi iki ana kategoriye bölünebilir. Bunlardan birincisi, küçük ölçekli uygulamalar olup genellikle elektronik devre ve elektronik devre elemanları örnek olarak verilebilir. İkincisi ise mıknatıs ve enerji uygulamalarını barındıran ve diğer gruba nispeten daha önemli olan geniş ölçekli gruptur. Geniş ölçekli grup, hayatımızın her sahasında uygulama alanı bulduğu için bu grup da kendi içinde sınıflara ayrılabilir. Örnek olarak, ulaşımda maglev trenleri, tanı aracı olarak tıpta MRI ve SQUID, makine-elektronik ve enerji sektöründe manyetik ayırıcılar, hata akımı sınırlayıcıları, motorlar, transformatörler, iletim kabloları verilebilir. Bu uygulamalarda karşılaşılan sıkıntılardan en önemlisi ekonomi, maliyet ve uluslar arası düzeyde uygulamanın kendine pazar imkanı bulma problemidir. Bu yüzden süperiletkenlik alanında uğraşan bilim insanları bu probleme alternatif çözümler üretmekte ve bunun için yoğun çaba harcamaktadırlar.

Bu çözümlerden bir tanesi ve en önemlisi, AC kayıplarının hesaplanması ve en verimli çalışma şartlarının belirlenmesidir. AC kayıplarının ölçümü için çeşitli teknikler (kalorimetrik, transport, manyetik ) arasında manyetik teknik; güvenilirlik, duyarlılık ve basitlik açısından en önemlisidir. Tek filamanlı yüksek sıcaklık süperiletken şerit (tape) ve tellerde transport ve manyetik teknikler ile ölçülen AC kayıplarına ana katkı histerezis kayıplarından gelmektedir. Histerezis kayıpları, kritik hal modelleri (manyetik kayıplar) ve Norris formülleri (transport kayıplar) ile açıklanmıştır. Histerezis kayıplar süperiletken göbeği, düzgün çok filamanlı yapıya bölerek azaltılabilir. Ancak, manyetik kayıplar durumunda çoklu filaman yapısı, Eddy akım kayıpları ve filamanlar arası çiftlenim akımı kayıpları gibi kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıpları da en aza indirecek yöntemleri belirlemek için daha fazla araştırma gereklidir.

Bu çalışmada, gümüş kılıflı Bi:2223/Ag süperiletkenlerde AC kayıplarını sıcaklığın, frekansın, AC alanın, DC alanın, AC transport akımın ve şerit yüzeyine göre manyetik alan yönünün (dik veya paralel) fonksiyonu olarak ölçmek için AC alınganlık tekniği kullanıldı. Son olarak AC kayıplarını en aza indirecek yolu bulmak ve yukarıda söz edilen kayıp katkılarını belirlemek için AC kayıpları hesaplandı.

### 1.1.1. Süperiletkenlik ve Tarihçesi Hakkında Genel Bilgi

Süperiletkenlik, düşük sıcaklıklarda meydana gelen bir olaydır. Her süperiletken malzeme, belli bir sıcaklığın altında süperiletken ve bu sıcaklığın üzerinde normal davranış gösterdiği kritik bir sıcaklık değerine sahiptir. Süperiletken durumda, malzeme elektriksel dirence sahip değildir ve böylece kayıpsız olarak akımı iletebilir. Normal durumda ise malzeme dirence sahiptir, bundan dolayı enerji dağılımı ve ısı oluşur. 1986 da ilk keşfedilen yeni nesil süperiletkenler, yüksek geçiş sıcaklığına sahip oldukları biliniyordu ve örnek olarak Nb<sub>3</sub>Ge kimyasal formülü ile verilen Niyobyum ve Germanyum metalik bileşiği için geçiş sıcaklığı 23.2 K olarak bulunmuştu. Bu olayı gözlemlemek için geçiş sıcaklığının altına soğutulmalıydı ve bunu yapmanın en kolay yolu soğuk bir sıvının (cryogenic fluid) içerisine batırılmasıydı. 1986'dan önce bu sıvı için genellikle sıvı helyum kullanılıyordu.

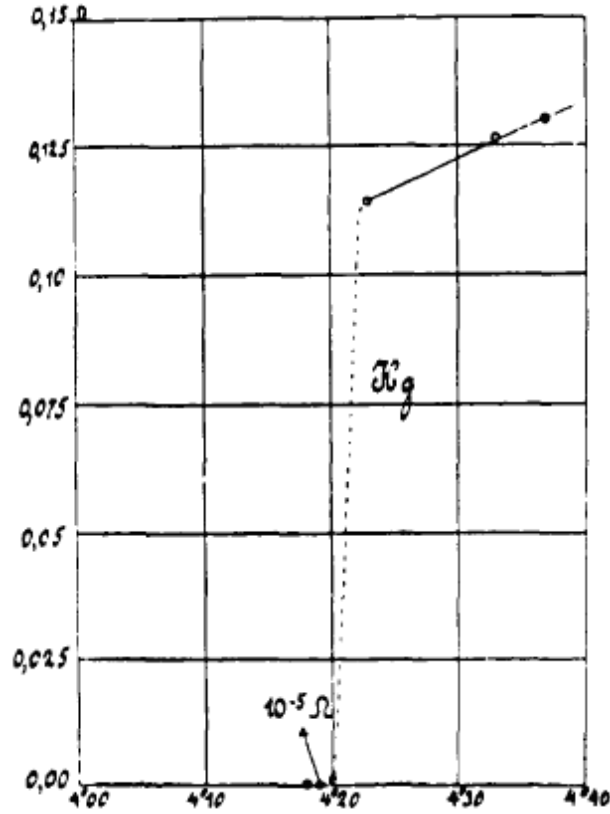
1908'de Hollanda'da, Leiden Üniversitesinden H. Kamerlingh Onnes [1] helyumu sıvılaştırmak için bir deneysel süreç geliştirdi. Bu süreç, 4.2 K sıcaklığında meydana geldi. Bu sıvılaştırma işlemi yapmada helyum gazı çok küçük hacimde sıkıştırılıp sıcaklığı yükseltilmekte ve sıkıştırılmış bu sıcak gaz etrafı soğuk bir sıvıyla çevrili borunun içerisinden geçirilmekteydi. Gazda meydana gelen sıcaklık borunun etrafındaki soğuk sıvıya aktarılmakta ve hala sıkıştırılmış fakat soğumuş olan gaz genişleyeceği küçük bir delikten geçmeye zorlanmakta ve böylece daha fazla soğuma meydana gelmekteydi. Bu adımlar sıkışmış gazın sıcaklığı, bu helyum için 4.2 K, sıvılaşacağı değere gelinceye kadar sürekli tekrar edilmekteydi. Onnes tarafından kullanılan bu süreç bugün hala modern soğutma sistemlerinde ve özellikle buzdolaplarında kullanılmaktadır.

#### 1.1.1.1. Sıfır Direnç

Bu süreçte helyumun başarılı bir şekilde sıvılaşdırılmasından sonra, diğer malzemeleri soğutmak için çok basit olarak 4.2 K 'deki helyum banyosuna koyulabilirdi. Bundan sonra Onnes daha önce mümkün olmayan fakat bu sonucun ardından artık sıvı helyum içerisine batırılmış malzemeler üzerinde deneylerini yapabileme imkanı bulmuş oldu. İlk deneylerinden bir tanesi katı cıvanın elektrik direncini ölçmek oldu ve bunu 1911



yılında gerçekleştirdi. Bu ölçümün yapılması sırasında, Onnes şimdi süperiletkenlik diye isimlendirilen kayda değer bir davranış keşfetti. Ölçüm, cıvaya voltaj uygulayarak akan I akımı kaydedilmesi ve voltajın akıma bölünmesiyle R direncini hesaplamaktan ( $R=V/I$ ) oluşmaktaydı. Cıva 4.3 K civarına soğutulduğunda voltaj uygulanmazsa akımın beklendiği gibi akmayı durduğunu gözlemledi. Ancak cıva'nın 4.2 K sıcaklığının altına soğutulduğunda voltaj uygulanmadığında akımın akmayı devam ettirdiğini fark etti. Aslında bu halde akım aylarca hatta yıllarca akmaya devam eder. Çünkü malzemenin direnci sıfır olmuştur. Malzemenin direncinin sıfır olduğu bu durum süperiletken durum olarak bilinmektedir. Daha açık bir şekilde sıfır direnç bir süperiletkenin birinci karakteristik özelliğidir. İkinci özelliği ise manyetik doğasından kaynaklanmaktadır ve daha sonra açıklanacaktır. Şekilde 1'de Onnes'in süperiletkenliğe dair ilk gözlemleri olan orijinal direnç-sıcaklık ölçümü gösterilmektedir.



Şekil 1. Onnes'in süperiletkenliğe dair yaptığı ilk ölçümlerden olan cıva numunesinin direncin sıcaklığa karşı çizilen bu grafikte süperiletken hale geçişte direncin sıfıra düşüşü gösterilmektedir.

Şekil 1'den görüleceği gibi dar bir sıcaklık aralığında direnç keskin bir şekilde düşmektedir. Değer verilecek olursa 4.22 K'de 0.11 Ohm'dan 4.19 K'de 0.00001 Ohm ( $10^{-5}$  Ohm)'a düşmektedir. Diğer tek tip atom içeren metalik elementler, örneğin alüminyum ve çinko gibi, cıvanın altındaki bir sıcaklık değerinde süperiletken oldukları bulundu. İki sene sonra kurşun elementinin 7.2 K'de süperiletken olduğu bulundu. 17 sene sonra 1930'da Niyobyum 9.2 K'de süperiletken olarak bulundu. Buna göre Tabloda 1'de bazı elementel süperiletkenlerin geçiş sıcaklıkları liste halinde verilmektedir.

Tablo 1. Bazı elementel süperiletkenlerin geçiş sıcaklıkları

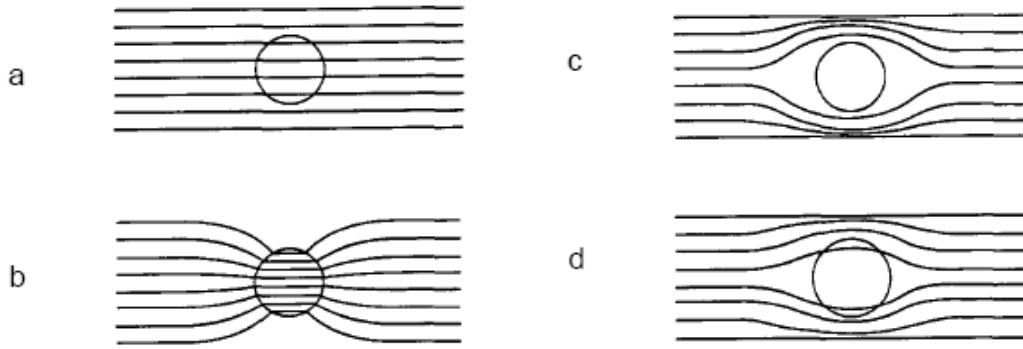
Element	Sembol	$T_c$ (K)	$H_c$ (T)
Cadmium	Cd	0,52	0,0028
Zinc	Zn	0,85	0,0054
Gallium	Ga	1,1	0,0058
Aluminum	Al	1,2	0,011
Indium	In	3,4	0,028
Tin	Sn	3,1	0,031
Mercury	Hg	4,2	0,042
Tantalum	Ta	4,5	0,083
Vanadium	V	5,4	0,141
Lead	Pb	7,2	0,081
Niobium	Nb	9,2	0,206

### 1.1.1.2. Meissner Etkisi

Onnes'in keşfinden 22 yıl sonra 1933'de Alman Profesör Alexander Meissner ve onun öğrencisi R. Ochsenfeld [2] tarafından Meissner etkisi olarak bilinen süperiletkenlik durumunun ikinci karakteristik özelliğini keşfettiler. Sıradan bir metal bir  $H_a$  manyetik alana yerleştirildiğinde, şekilde 2.a'da gösterildiği gibi alan malzemenin içinden geçer. Şekilde yatay, bazen de eğri, çizgiler manyetik alanın güçlü olduğu yerlerde birbirine yakın çizilir. Bir manyetik malzemede, örneğin demir, içinden geçen çizgilerin yaklaşması sonucu şekil 2.b'de görüldüğü gibi alan artar. Meissner ve Ochsenfeld bir süperiletken malzemenin manyetik alana yerleştirilmesi ve sonrasında geçiş sıcaklığına kadar soğutulmasıyla manyetik alanın dışarılandığını keşfettiler. Bu olaya Meissner etkisi denmektedir. Şekil 2.c'de bu etki gösterilmiştir.

1935 yılında, Fritz ve Heinz London [3] kardeşler, Meissner etkisini açıklamayı başardılar. Elektromanyetizmada Maxwell denklemlerini süperiletken durum için uyguladılar. Uygulanan  $H_a$  manyetik alanın yüzeyde bir akım indüklediğini gösterdiler. İşte bu yüzey akımı süperiletken içerisinde oluşan manyetik alanı tam olarak iptal edecek yönde bir iç manyetik alan oluşturmaktadır. Böylece süperiletken içerisinde manyetik alan bulunmamaktadır. Diğer bir deyişle, indüklenen manyetik alan uygulanan manyetik alanın yönüne zıt fakat eşit büyüklüktedir. Böylece birbirlerini yok etmektedir.

Bu durum için daha fazla detaylı araştırmalar göstermiştir ki, yüzeyde akan akımın varlığında süperiletkenin yüzey tabakasının içerisinde nüfuz derinliğine sahip manyetik alan vardır. Süperiletkende manyetik alan yoktur açıklaması malzemenin bulk ( yığın - külçe ) kısmına atıfta bulunmakta olup yüzey bölgesini kastetmemektedir. Şekil 2.d'de yüzeyden numuneye giriş mesafesi gösterilmiştir.



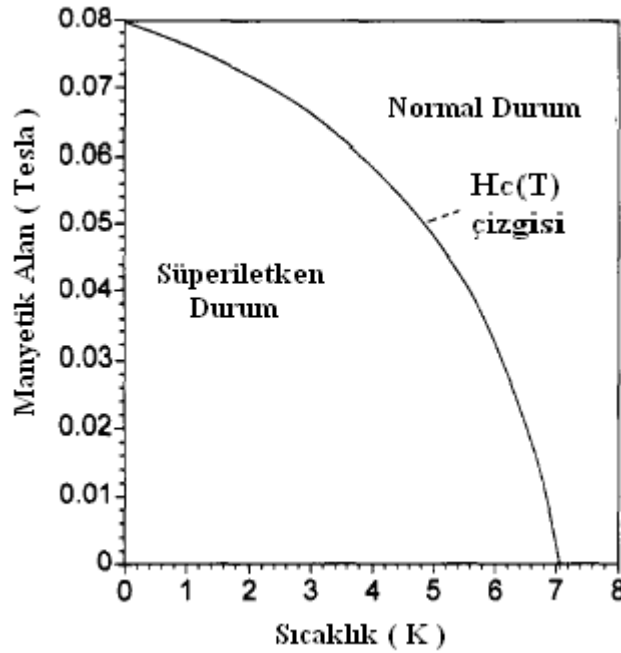
Şekil 2. Manyetik alan çizgilerinin davranışını (a) Normal metalden geçerken, (b) Manyetik bir malzemedan geçerken, (c) yüzey etkileri ihmal edilmiş bir süperiletken malzemenin varlığında, (d) bir süperiletken numune için alanın yüzeyden numunenin içerisine doğru nüfuzunu göstermektedir.

Girmenin ya da nüfuzun meydana geldiği yüzey tabakasının kalınlığına London girme derinliği ismi verilir ve  $\lambda$  ile sembolize edilir. London kardeşler tarafından türetilen ve London denklemleri diye isimlendirilen süperiletkenin içerisine yüzey tabakasından itibaren manyetik alanın girme mesafesini açıklamada kullanılan bir parametredir. Girme derinliği  $\lambda$  her bir süperiletken malzeme için farklı karakteristik değere sahip olup 0.2 – 0.8  $\mu\text{m}$  arasında değişen tipik bir değerdedir.

Geçiş sıcaklıkları olarak bakıldığında sıcaklığın artmasıyla girme mesafesi artmaktadır. DC ve AC manyetik alanları kullanarak Meissner etkisini ölçmek için birçok yol bulunabilir.

### 1.1.1.3. Kritik Manyetik Alan ve Kritik Akım Yoğunluğu

Süperiletkenlik özelliklerini yok etmeksizin bir süperiletken malzemeye uygulanacak  $H_a$  manyetik alan şiddetinin bir üst limit değeri mevcuttur. Eğer bir metal süperiletken durumda ve  $H_a$  yavaşça artırılırsa, alan sonunda numuneden süperiletkenlik durumu kaldıracağı bir değere ulaşır. İşte tam bu andaki manyetik alanın limit değerine  $H_c$  kritik manyetik alan denir.  $H_c$  değeri malzemenin cinsine bağlı olmakla birlikte bazı  $H_c$  değerleri tablo 1’de liste halinde verilmiştir. Özellikle süperiletkenler için, bu kritik manyetik alan büyüklüğü  $H_c(T)$  geçiş sıcaklığının altında sıcaklık değerleri azaldıkça artar. Şekil 3’de süperiletken haldeki kurşun için  $H_c(T)$  eğrisi görülmektedir.



Şekil 3. Süperiletken ve normal durum manyetik alanının sıcaklığa karşı çiziminde gösterilmektedir. Kritik alan  $H_c(T)$  eğrisi tarafından bu iki bölge ayrılmıştır.

Süperiletkenliği kaldıracak bir kritik manyetik alanın varlığı maksimum bir akım yoğunluğuna işaret eder ve bu maksimum akım yoğunluğuna kritik akım yoğunluğu " $J_c$ " denir. Diğer bir ifadeyle, numunede süperiletkenlik durumu kalkmadan taşınabilecek maksimum akım miktarına kritik akım yoğunluğu denir. Bu kritik manyetik alan varlığının

doğrudan bir sonucudur. Çünkü akım bir manyetik alan üretir ve manyetik alan da bir akım üretir. Kritik akım süperiletken durumdaki malzemenin yüzeyinde bir manyetik alan üretir.

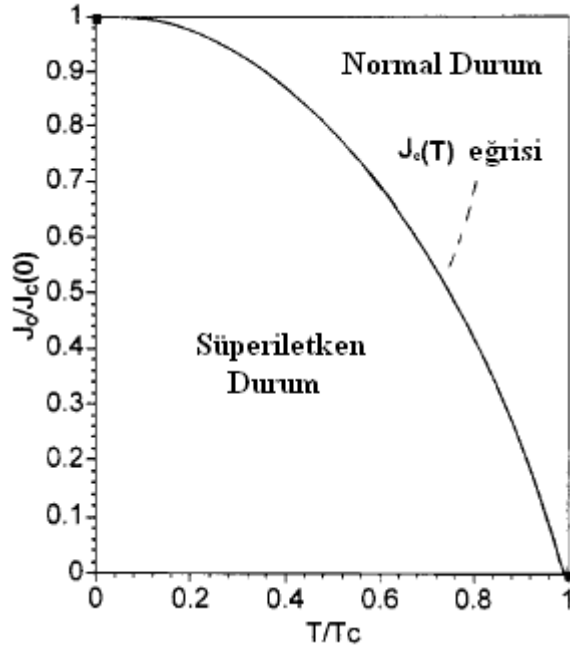
Kritik alan  $B_c$  ve kritik akım yoğunluğu  $J_c$  arasında basit bir ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$B_c = \mu_0 \lambda J_c \quad (1)$$

Burada  $\mu_0$  serbest uzayın geçirgenliği olup değeri  $4\pi \times 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup> 'dir.

Kritik akım yoğunluğu  $J_c$  (T)'de sıcaklıkla kritik alanın benzer bağılılığına sahiptir. Bu durum şekilde 4'te gösterilmiştir. II. Tip süperiletkenlerde  $J_c$  'nin sıcaklığa ve manyetik alana bağılılığı manyetizasyon ölçümlerinden elde edilebildiği gibi, AC alınganlık ölçümlerinden de belirlenebilmektedir. Ayrıca dört nokta yöntemi ile de kritik akım yoğunluğunu ölçmek mümkündür. Kritik akım yoğunluğu, hem manyetik alan hem de sıcaklık arttıkça azalmaktadır.

Süperiletken mıknatısların geliştirilmesi açısından kritik akım değerinin önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Tablo 1'den de görüleceği üzere Nb elementinin kritik alan değeri  $H_c = 0.206$  T'dir. Bu elementsel süperiletkenler için en yüksek manyetik alan değeridir. Eğer süperiletken elektromıknatısta Niyobyum tel kullanılırsa 0.206 T değerinde bir manyetik alan üretilirdi. Daha yüksek alanlar, 2 T ve üzerindeki değerler, geleneksel elektromıknatıs tarafından üretilebilir. İşte bu yüzden niyobyum magnet tel için uygun bir malzeme değildir.



Şekil 4. %52 Niyobyum ve %48 titanyum alaşımının süperiletken ve normal durumları için uygulanan kritik akım yoğunluğunun sıcaklığa göre değişimini göstermektedir.

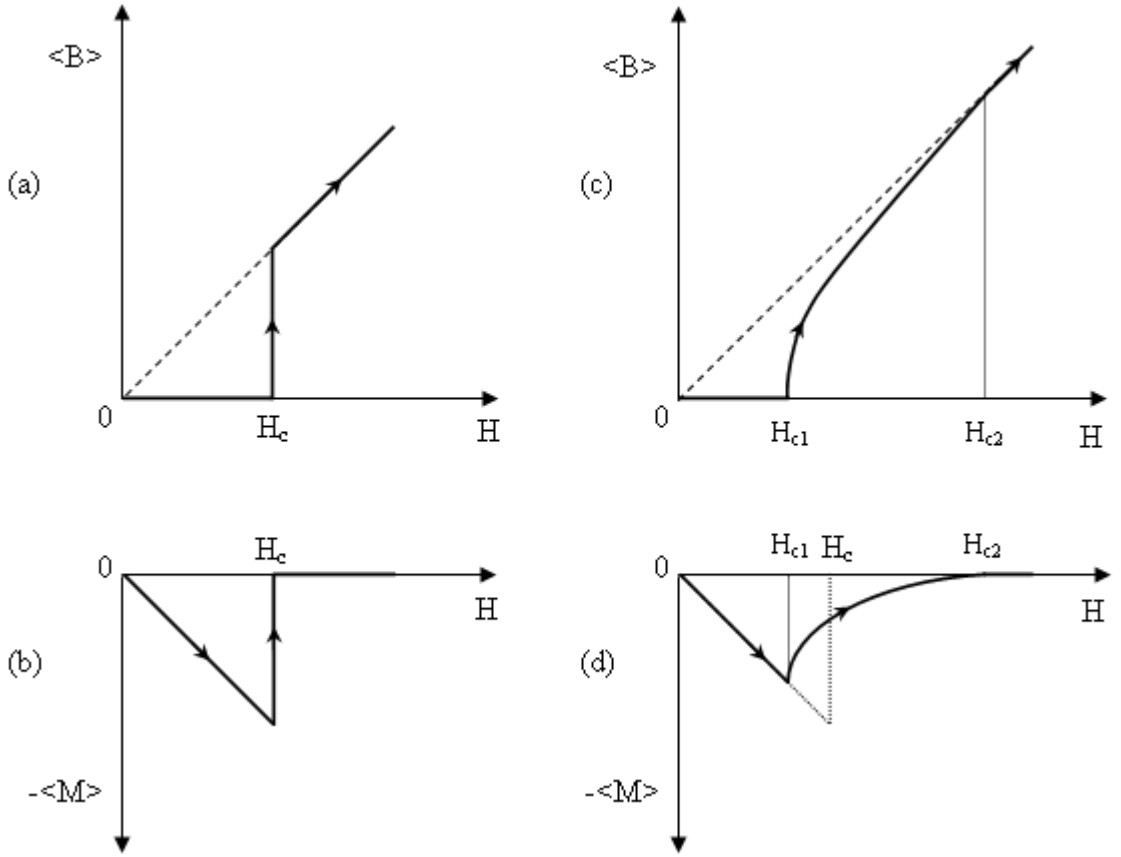
#### 1.1.1.4. I. ve II. Tip Süperiletkenler

Süperiletkenler uygulanan dış manyetik alan  $H_a$  altındaki davranışlarına göre sınıflandırılabilirler. I. Tip süperiletkenler diğer bir deyişle yumuşak (soft) süperiletkenler tam anlamıyla Meissner etkisine uyar yani bu gruba giren süperiletken numunelerde uygulanan manyetik alan  $H_c$  kritik manyetik alan değerini aştığında süperiletken durum ortadan kalkar. Mesela kurşun, kalay ve cıva gibi oldukça saf elementler bu gruba örnek olarak gösterilebilir. II. Tip süperiletkenleri yani sert (hard) süperiletkenleri iki bölgeye ayırabiliriz. 1. bölgede yani  $H < H_{c1}$  bölgesinde süperiletken numune manyetik alanı tamamen dışlamaktadır. Yani bu bölgede Meissner etkisi gözlenmektedir. İkinci bölge yani  $H_{c1} < H_a < H_{c2}$  bölgesidir ve yaygın olarak karışık durum (mixed state) yada girdap durumu (vortex state) olarak bilinir. Bu durumda süperiletken hal ve normal hal birlikte bulunur. Manyetik alan kuantize olmuş akı çizgileri şeklinde bu bölgede numuneye nüfuz eder.  $\Phi_0 = h/2e = 2.067 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$  şeklindedir.

Manyetik alan arttıkça akı çizgilerinin yoğunluğu artacak yani girdaplar arasındaki uzaklık azalacaktır. Akı çizgilerinin düzenlenişi minimum enerjili durumu oluşturmak üzere üçgen veya hegzagonal akı çizgisi örgüsü oluşturacak şekildedir.

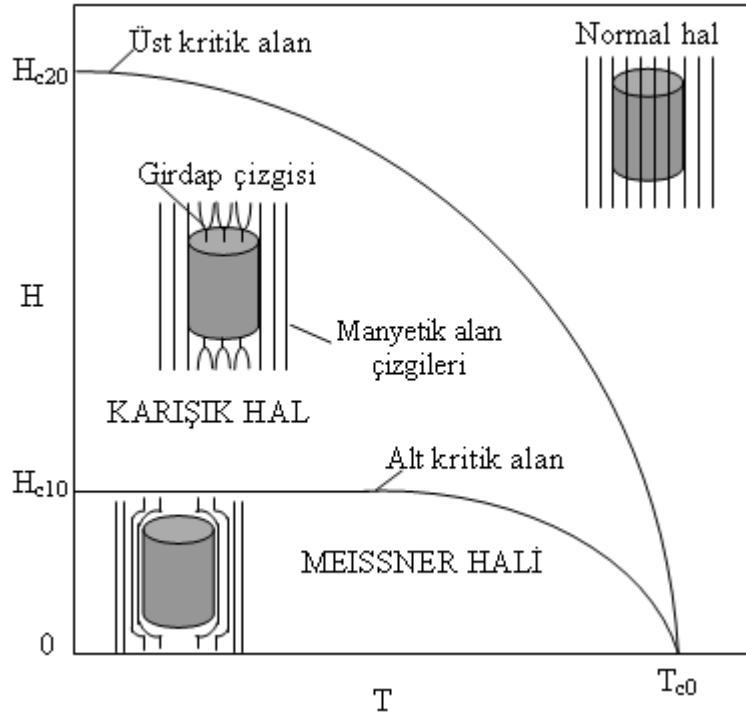
Bu malzemeler Şekil 5 ve 6'da görüldüğü gibi  $H_{c1}$  ve  $H_{c2}$  olarak gösterilen iki kritik manyetik alan ile karakterize edilir.

İdeal tersinir II. Tip süperiletkenlerde manyetik alan  $H$ , düşük kritik alan adı verilen kritik değerden ( $H_{c1}$ ) az olunca  $\langle B \rangle = 0$ 'dır.  $H_{c1} < H < H_{c2}$  olan bölgesinde süperiletkenin karışık halde olduğu söylenir. Şekil 6'da faz diyagramı verilmektedir. Ayrıca şekil 7'de karşılaştırma amaçlı olarak faz diyagramları verilmektedir. Şekil 7.a'da verilen diyagramda süperiletken durum  $H_c$  eğrisinin sınırı ile normal durumdan ayrılmış olup kurşun, kalay gibi elementleri örnek olarak verebiliriz. Şekil 7.b'de sunulan şekil süperiletken alaşımlar için verilmekte olup alt kritik alan  $H_{c1}$ , termodinamik kritik alan  $H_c$  ve üst kritik alan  $H_{c2}$  ile sınırlandırılmış üç bölge mevcuttur ve bu grafik için  $Nb_3Sn$  örnek gösterilebilir. Şekil 7.c'de ise YBCO, BSCCO sistemleri gibi yüksek sıcaklık süperiletkenleri (HTSC) için verilen faz diyagramıdır. Burada ısıl destekli akı akışı, termodinamik tersinirlik ve rijit akı örgüsü gibi  $T_c$  civarındaki dalgalanmaların neticesinde dört bölgeye ayrılmış bir faz diyagramı olup  $H_{irr}$  eğrisi tersinmez geçişi simgelemektedir.

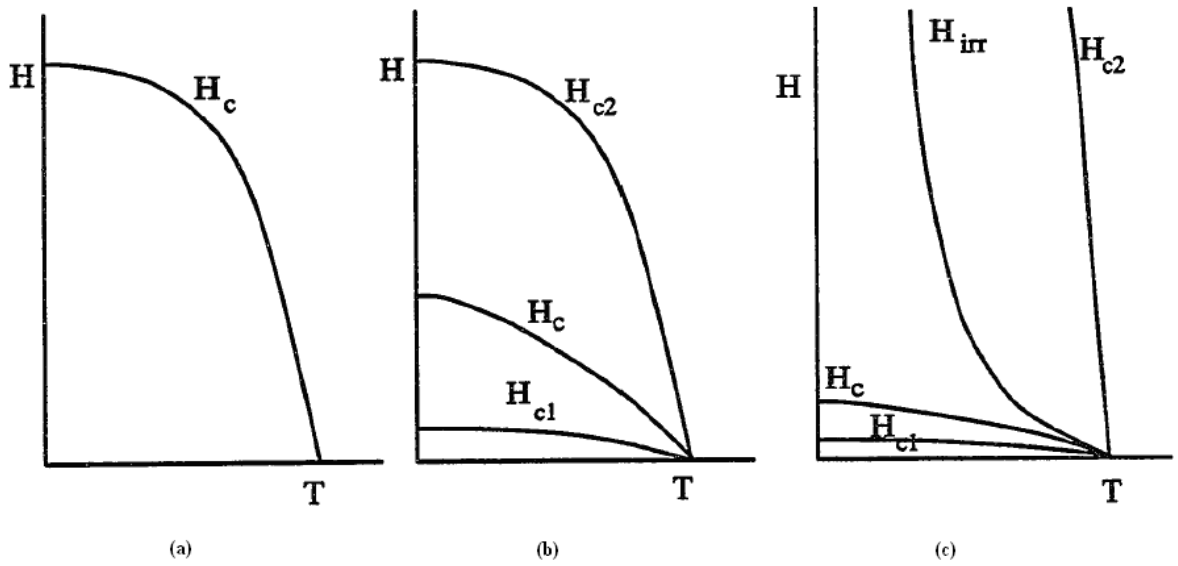


Şekil 5. (a) Ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (b) ortalama manyetizasyonun I. Tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alana bağlılığı, (c) ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (d) ortalama manyetizasyonun II. Tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alana bağlılığı.





Şekil 6. II. Tip süperiletkenler için H- T eğrisi.



Şekil 7. (a) I. tip süperiletken, (b) geleneksel II. tip süperiletken, (c) yüksek sıcaklık süperiletkenleri için faz diyagramları.

### 1.1.1.5. Tersinmezlik Çizgisi (Irreversibility Line)

Yüksek sıcaklık süperiletken malzemelerde diyamanyetik davranışın gözleendiği ancak kritik akım yoğunluğunun ( $J_c$ ) sıfır olduğu bir bölge mevcut olup bu bölge H – T faz diyagramında tersinmezlik çizgisi ile belirlenebilmektedir. Tersinmezlik çizgisi, H-T faz diyagramında tersinir ve tersinmez bölgeyi birbirinden ayıran çizgi olarak tanımlanır. Tersinmezlik çizgisinin üzerinde malzemenin manyetizasyonu tamamen tersinir özellikte ve bu çizginin altında ise malzeme histeretik davranış sergilemektedir. Tersinmezlik çizgisinin fiziksel olarak açıklaması, çivilenme kuvvetinin akı çizgilerinin üzerinden kalktığı alana karşılık gelmesidir [4]. Herhangi bir süperiletkenin tersinmezlik çizgisini araştırmak, akı çizgilerinin çivileme özelliği hakkında çok önemli bilgi sağlar. Tersinmezlik çizgisi hakkında ilk rapor Müller ve arkadaşları [5] tarafından yayınlandı. Daha sonra bu konuda çok çalışma yapıldı [6]. Tersinmezlik çizgisinin belirlenmesinde en yaygın teknik şunlardır:

- 1- Seçilen alanlarda alan altında soğutma (FC) manyetizasyonu  $M_{FC}$  ve alan yokken soğutma (ZFC) manyetizasyonu  $M_{ZFC}$  eğrileri ölçülür. Eğrilerin birleştiği sıcaklık tersinmezlik sıcaklığı  $T_{irr}$  değerini verir ve bu sıcaklıktaki alan değeri de  $H_{irr}$  olarak belirlenir [5, 6, 7].
- 2-  $T_{irr}$  olarak gösterilen seçilen sıcaklıklarda histeretik eşsıcaklık manyetizasyon eğrileri ölçülür. Histerezisin kaybolduğu alan değeri tersinmezlik alan değerini vermektedir [8]. Bu şekilde farklı sıcaklıklarda tekrarlanan ölçümlerle tersinmezlik çizgisi belirlenir.
- 3- Sabit DC alanda kompleks AC alınganlık ölçülür ve  $H_{irr}$  belirlenir. Sanal kısmın  $\chi''$  onset sıcaklığı [9] ya da pik sıcaklığı [10] tersinmezlik sıcaklığı  $T_{irr}$  değerini verir. AC alınganlık ölçümlerinden tersinmezlik çizgisini belirlemede alınganlığın 3. harmoniğinin onset değeri uygun bir ölçüt oluşturduğu rapor edilmiştir [11].
- 4- Seçilen manyetik alanların varlığında sıcaklığın fonksiyonu olarak direnç ölçümlerinden belirlenebilir. Her bir seçilmiş alanda ( $H_{irr}$ ) sıfır dirençle ilişkili kritik sıcaklıklardan tersinmezlik sıcaklığı ( $T_{irr}$ ) belirlenebilir [12].

### 1.1.2. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerde AC Kayıp Mekanizmaları

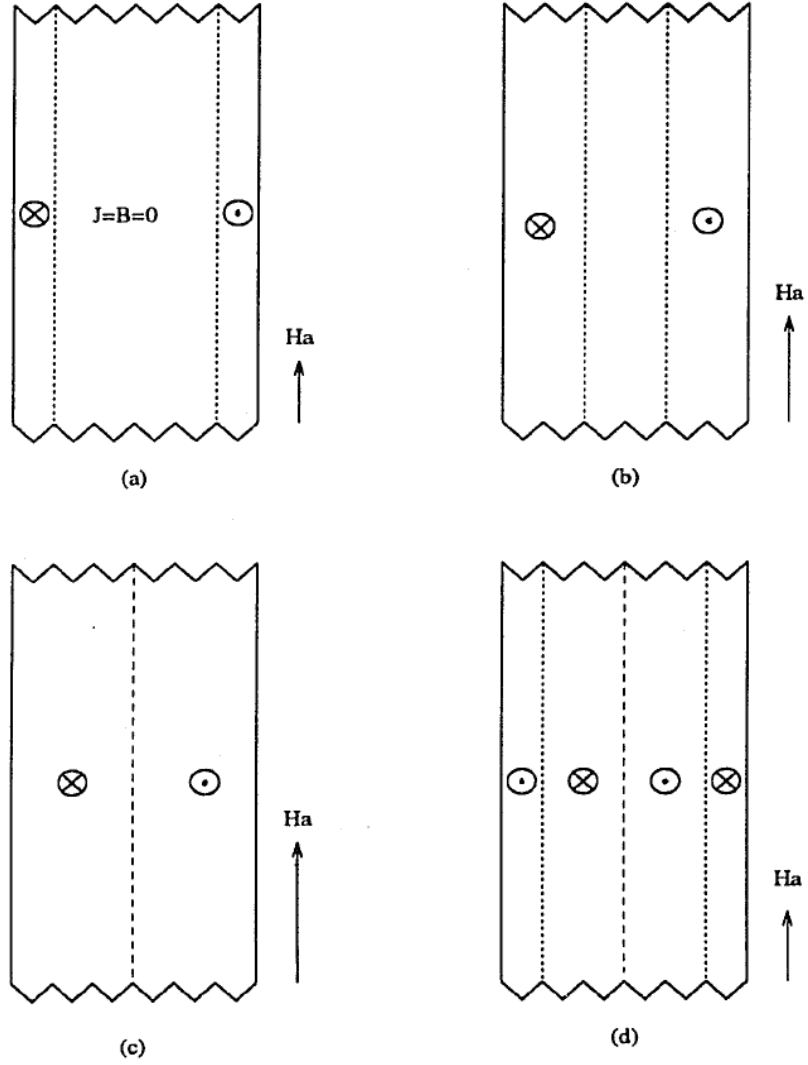
AC manyetik alan ve iletim akımları yüksek sıcaklık süperiletken malzemelerinde enerji kaybına neden olmaktadır. Bu enerji kaybına AC kayıp denilmektedir. Bir yüksek sıcaklık süperiletken şerit için AC kayıplarına katkı temelde iki ana kaynak olan manyetizasyon kaybı ve iletim kaybından gelmektedir. Ayrıca başka kayıp mekanizmaları da mevcut olup katkıları bu iki kaynağın yanında fazla önem arz etmemektedir. Ancak kayıpların iyileştirilmesinde geliştirilecek yöntem ve hesaplamalar için göz ardı edilemeyecekleri unutulmamalıdır. Manyetizasyon kaybı AC manyetik alan tarafından, iletim kaybı ise AC iletim akımı tarafından oluşmaktadır. AC kayıpları başlıca üç mekanizma tarafından üretilir. Bunlar a) Histerezis kayıpları b) Eddy akım kayıpları c) Çiftlenim kayıpları'dır. Çok filamanlı düşük sıcaklık süperiletken (LTS) tellerinde AC kayıpların teorisi Wilson [13] ve Carr [14] tarafından oldukça başarılı bir şekilde tasvir edilmiştir. AC kayıpların çoğu benzer davranışlarından dolayı bu teorilerin düşük sıcaklık süperiletkenlerinin yanı sıra yüksek sıcaklık süperiletkenlere de uygulanabileceği keşfedildi. Tek filamanlı şeritteki AC kaybı, süperiletken göbekte histeretik kayıplardan ve gümüş kılıfta Eddy akım kaybından oluşur. Çok filamanlı Bi-2223/Ag şerit için, süperiletken filamanlar arasında akan akımlardan dolayı çiftlenim kaybı da vardır. Tek filamanlı şeritlerin AC alınganlığı üzerine kapsamlı bir çalışma Savvides ve Müller tarafından rapor edilmiştir [15]. Tek filamanlı HTSC şerit ve tellerde hem transport hem de manyetik tekniklerle ölçülen AC kayıplarına ana katkı histerezis kayıplardan gelir. Bu tür kayıplar, manyetik kayıplar için kritik hal modelleri uygulamalarıyla ya da transport kayıpları için Norris formülleri yardımıyla açıklanmıştır. Düzgün çok filamanlı bir yapı içerisinde süperiletken göbeklerin arttırılmasıyla histerezis kayıpları azaltılabilir. Filaman sayısının çoğaltılmasıyla eddy akımları ve filamanlar arası çiftlenim akım kayıpları gibi diğer kayıp kaynakları artmaktadır. Eddy akım kayıplarının azaltılmasına yönelik en iyi metodların tespiti için ayrıntılı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Şerit ve tellerde pek çok süperiletken filaman, histeretik kayıplardan gelecek katkıyı azaltmak amacıyla akımı taşımak için birlikte kullanılır. Çiftlenim kayıplarını azaltmada, nüfuz bölgesinde indüklenen akı tarafından oluşan etkiyi azaltma temeldir. Bu filamanları bükerek ya da matris direnci arttırarak veya filamanların etrafında yapay direnç bariyerleri oluşturarak gerçekleştirilebilir [16]. Süperiletken şeritler, transformatör, motor, mıknatıs veya parçacık hızlandırıcılarında kullanılırken AC kayıplarını etkileyen faktörler önemli olduğundan, son

zamanlarda bu konuda yoğun bir çalışma yapılmıştır [17–26]. Lee ve arkadaşları [24] 3 fazlı 60 MVA süperiletken transformatörlerin dizaynı, verimliliği ve AC kaybının nasıl azaltılacağı konusunda araştırma yapmış ve düşük akım yoğunluklu sarımlarla manyetizasyon kayıplarının %66, normal sarımlara göre daha az olduğunu rapor etmişlerdir. Kim ve arkadaşları da [25] BSCCO–2223 süperiletken şeritleri kullanarak 1 MVA tek fazlı transformatör imal etmiş ve test etmiş ve böyle bir dizaynın uygulanabileceği sonucunu belirtmişlerdir. Zhang ve arkadaşları süperiletken şeritlerin sarım amacıyla kullanırken büküleceğinden dolayı, farklı eğrilik yarıçapında şerit örnekleri bükerek yaptıkları araştırma da, bükmeden kaynaklanan gerilme veya zorlamanın hem kritik akım yoğunluğunu hem de AC kaybını etkilediği sonucuna varmışlardır [19]. Reaktör bobinlerinde veya transformatörlerde, kritik dizayn parametresinin AC kaybı olduğu ve şeride dik yöndeki alan bileşenlerinin en aza indirilmesinin optimum bobin dizaynı ile mümkün olduğu belirtilmiştir [20]. Süperiletkenden yapılan güç cihazlarında histerezis kayıplarının önemli bir faktör olduğu rapor edilmiş ve buna, manyetik alana bağlı akım-voltaj ilişkisinin etkisi tartışılmıştır [23]. Bir güç cihazının toplam AC kaybı farklı bileşenlerden oluştuğu ve AC kaybını en aza indirmekte önemli olduğundan [27] dolayı, AC kaybına etkisi ne kadar kapsamlı ve farklı açılardan araştırılsa o kadar yararlı olacaktır. Bu yüzden farklı sıcaklık ve frekans bölgelerinde sunulan AC ve DC manyetik alanlarda farklı kayıpları belirlemek için hem teorik hem de deneysel olarak ayrıntılı çalışmalara gerek duyulmaktadır.

#### 1.1.2.1. Histerezis Kaybı

II. tip süperiletkenlerde AC kaybına en büyük katkı histerezis kayıplardan gelmektedir. Süperiletken bir numuneye dışarıdan bir manyetik alan uygulanırsa alan numunenin içerisine nüfuz etmeye başlayacaktır. Ve numunenin yüzeyinde bakır bir iletkendeki yüzey etkisine (skin effect) benzer şekilde manyetik alan tarafından indüklenen akımlar oluşacaktır. Açıkçası bu karşılaştırmada iki türlü fark görülmektedir. Bunlardan birincisi, sonsuz iletkenliğin başlangıç durumundan dolayı frekansın olmadığı durumda bile süperiletken numune bir yüzey etkisi sergiler. İkincisi, indüklenen akım yoğunluğu sabit frekansta alan genliğiyle orantılı olup normal yüzey etkisinin aksine verilen bir sıcaklıkta manyetik alanın azalan fonksiyonu olarak indüklenen akım yoğunluğu kritik bir değere ( $J_c$ ) sahiptir [14].

Şekil 8’de, (a) ve (b) alanın arttırılmasıyla süperiletken numune içerisine doğru akı nüfuz derinliğini, c’de ise akının numunenin merkezine ulaştığını göstermektedir. Eğer bu durumda uygulanan manyetik alan tersine çevrilirse, akı numuneye girerken izlediği yolu numuneden çıkarken aynı şekilde takip etmeyecektir. Malzemedeki kusurlardan dolayı akı çivilenmesi olacaktır. Böylece şekil 8’de görüldüğü gibi, yüzeydeki elektrik alan yönü değiştirildiğinde yüzeyde zıt yönelimde akım yoğunluğuna sahip yeni bölge oluşur ve uygulanan alan azaldığından içeriye doğru yayılmaya başlar. Böylece tersinmezlik oluşur ve bu durum histerisiz kaybına neden olan akı çivilenmesi olarak bilinir.



Şekil 8. Yarı-sonsuz dilim (slab) geometrisine sahip süperiletken numune kesitine akı girişi. Şekilde  $H_a$  uygulanan alanı ve  $\otimes$  ile  $\odot$  sembolleri indüklenen akımın yönünü göstermektedir. (a), (b), (c)’de başlangıçta alan yokken zamanla artan bir alanın varlığında (d)’de ise azalan alan ile profilin değişimini göstermektedir.

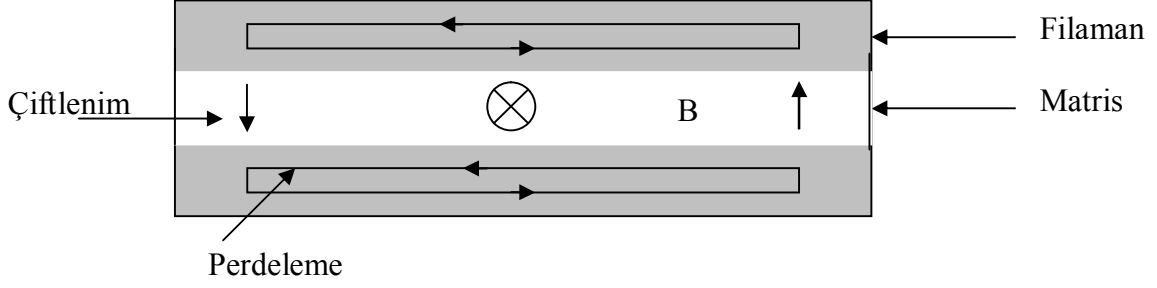
Çivilenmiş akı çizgileri süperiletkenlik için zararlı değildir. Temelde, enerji kaybı iki farklı mekanizma tarafından meydana gelir. Bunlar elektriksel direnç ya da değişen manyetik akıdır. Süperiletken malzemelerde yerel elektrik direnci olmamasına karşın Faraday kanunu  $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$  devam eder. II. tip süperiletkenlerde histerezisin varlığı enerji kaybına neden olur ve akımın devam ettirilmesi için bir voltaj gereklidir. DC uygulamalarında  $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$  olduğundan akı çivilenir ve sonuçta kayıp gözlenmez. AC uygulamalar için süperiletkenlerde M-H grafiğindeki histerisiz çevrim enerji kaybını belirler. Histerezis eğrilerinin detaylı araştırması Mårten Sjöström tarafından 2001 yılında yapılan doktora tezinde bulunabilir [28].

Norris tarafından, düz ince sonsuz dikdörtgen şeklinde (strip) ve eliptik geometriye sahip süperiletken malzemeler için herhangi bir manyetik alan yokken ve iletim akımı geçirilerek elde edilen histerezis kayıpları teorik olarak hesaplanmıştır [29].

Genellikle dışarıdan bir manyetik alan uygulanarak elde edilen histerezis kaybına manyetizasyon kaybı denilmektedir. Dilim (slab) [30], ince şerit (strip) [31], ve silindirik teller [13] gibi basit geometriye sahip II. tip süperiletken malzemelerde manyetizasyon kayıplarını hesaplamaya yönelik analitik çözümler yapılmıştır.

### 1.1.2.2. Eddy Akımı Kaybı

Eddy akım kaybı, bir dış manyetik alanın varlığında ya da manyetik alan uygulanmıyorken numuneden akım iletildiğinde bu akımın oluşturduğu manyetik alan (self-field) tarafından normal metal malzemedeki indüklenen akımların sonucunda meydana gelir. Normal matris'in direnci süperiletken göbeğin direncinden daha yüksek mertebede olduğundan ve metal kaplama kısmında elektronların sürtünme ve hareketlerinden dolayı istenmeyen Eddy akımlarının akışı ohmik ısı kaybına yol açacağından bu kayıp yüksek sıcaklık süperiletken uygulamalarında önem arz etmektedir.



Şekil 9. Zamanla değişen manyetik alanın dik uygulandığı iki filamanlı bir iletkende eddy akımı ve çiftlenim akımlarının gösterimi.

Çok filamanlı iletkenlerde, filamanlar bir alternatif manyetik alan tarafından çiftlenirler. Şekil 9’da görüldüğü gibi iki filaman bir matris ile ayrılmıştır. Faraday yasasına göre değişen manyetik alandan dolayı indüklenmiş voltaj oluşacaktır. Bu voltaj şekil 9’da gösterildiği gibi akımı kapalı çevrimler boyunca sürecektir. Süperiletken filamanlarda direnç olmadığı için, akım matrise geçmeden önce bu filamanlarda uzun bir mesafe dolanacak ve kayıp üretecektir. Yani, indüklenen voltaj, çevrimin uzunluğuyla orantılıdır. Eğer çevrimimin uzunluğu kritik uzunluktan daha büyükse, filamanda indüklenen akım kritik akım değerinde doyuma ulaşacaktır. Bu olay süperiletken telde tam çiftlenim (full coupling) olarak bilinir. Bu durumda, çok filamanlı süperiletkenin manyetik momentleri ve AC kaybı, aynı kesit alan ve kritik akımda tek filamanlı iletkenler ile aynı olacaktır. Tam çiftlenimde AC kayıplar, çiftlenim eddy kayıplarından dolayı çok filamanlı teller tek filamanlı tellere göre daha yüksektir. Şekil 9’daki yapıya göre kritik uzunluk aşağıdaki formülle belirlenebilir [13].

$$\frac{L_c}{4} = \sqrt{\frac{\rho_m J_c d_f}{2\omega B_0}} \quad (2)$$

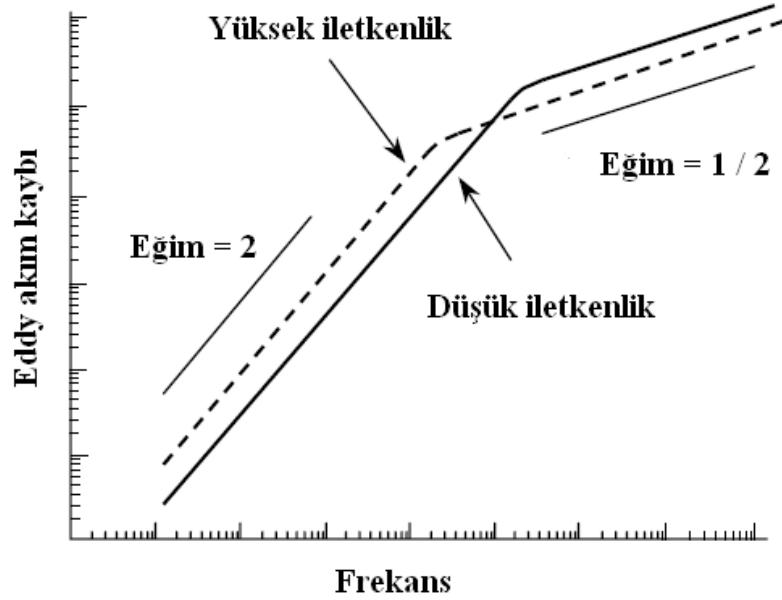
Burada  $J_c$  ve  $d_f$  sırasıyla kritik akım yoğunluğu ve filamanın kalınlığıdır.  $\rho_m$  matris malzemenin direnci,  $B_0$  uygulanan alanın genliği ve  $\omega$  açısal frekanstır.

Buradan da görüleceği gibi kritik uzunluk süperiletken filamanlar arası mesafeden bağımsızdır. Ayrıca Eddy akımı indüklenen manyetik alan bölgesiyle sınırlandırılmıştır. Eddy akımlarının girme derinliği, elektriksel iletkenlik  $\sigma$  ve malzemenin bağlı manyetik geçirgenliği  $\mu_r$ ’nin fonksiyonu olarak ve iletim akım frekansı  $\omega$  ile azalır. Bu bağımlılığa

“*skin effect*” yani yüzey etkisi denilmektedir. Girme ya da yüzey derinliği aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (3)$$

Eddy akım kaybının farklı iletkenliğe sahip iki metal tabaka için frekansa bağlılığı çizdirildiğinde (Şekil 10) farklı frekans bağlılığına sahip iki ayrı bölge vardır. Düşük frekansta kayıplar  $\omega^2$  ile yüksek frekansta  $\omega^{1/2}$  ile orantılıdır [32].



Şekil 10. Farklı iletkenliğe sahip 2b kalınlıklı iki tabaka için Eddy akım kayıplarının frekans bağlılığı.

Şekil 10'dan da görüleceği üzere bu iki bölge arasında geçiş, yarı-kalınlık  $b$ 'nin  $\delta$ 'ya eşit olduğu bir kritik frekansı  $\omega_c$  yer almaktadır. Buradan geçiş frekansını,

$$f_c = \frac{2}{2\pi b^2 \sigma \mu_0 \mu_r} \quad (4)$$

olarak yazabiliriz.



Bu kritik frekans değeri  $f_c$  değeri, güç uygulamalarında ilgilenilen bölgenin çok üzerinde Bi:2223 süperiletken şerit numuneler için Eddy akım kaybının frekansın karesine bağlılığını geçerli kılmaktadır.

### 1.1.2.3. Çiftlenim Kaybı

Değişen manyetik alan tarafından indüklenen Eddy akımı, kısmen süperiletken kısmen de filamanlar arasındaki matristen akar. Akımlar bir filamandan diğer filaman aktığında manyetik sistem içerisindeki çiftlenmiş filaman akımları, matris akım yolları boyunca bir dirençle karşılaşır. Metal matris içerisindeki bu ohmik kayba genellikle çiftlenim kaybı denilmektedir.

Bazı araştırmacılar [21, 30] birim hacim ve çevrim başına çiftlenim kaybını aşağıda belirtildiği üzere tanımladılar.

$$Q_c = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \left[ 2\pi\chi_0 \left( \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \right] \quad (5)$$

Burada  $\tau$ , geometriye bağlı ve demanyetizasyon faktörleriyle ilişkili “zaman sabiti” dir.  $\omega$  ise açısal frekanstır. Denklem (5) çiftlenim kaybının frekansa ve  $B_0$ 'ın karesine nasıl bağlı olduğunu göstermektedir. Oysa histeresiz kayıplar  $B_0^3$  ile bağlı iken frekansla çok az bağımlıdır [33].  $B_0$  ile frekansa bağlı olarak farklı olan bu davranış, farklı kayıp mekanizmaları arasında ayırım yapmak için kullanılabilir. Denklem (5) bir maksimum verecek şekilde AC kayıplarının frekansla değişimini vermektedir. Deneysel olarak küçük  $B_0$  uygulandığında, maksimumun meydana geldiği frekans belirlenerek zaman sabiti tahmin edilebilir.

AC alınganlığın birinci harmoniğinin sanal kısmı  $\chi''$ , histeresiz kayıpları ile bağlantılıdır [34].

$$Q = \frac{\pi\chi''\chi_0 B_0^2}{\mu_0} \quad (6)$$

Dikkat edilirse  $Q$  ve  $\tau$ , AC alınganlık ölçümlerinden elde edilebilir üstelik  $\chi_0$  şeridin geometrik faktörü olduğundan deneysel olarak elde edilebilir [35].

Ayrıca,  $\tau$  aşağıdaki gibi verilir,

$$\tau = \frac{\ell^2 \mu_0}{\pi^2 \chi_0 \rho_{\text{eff}}} \quad (7)$$

Bükülmemiş (untwisted) BSCCO şeritler için,  $\ell$  numunenin uzunluğudur. Bu yüzden zaman sabiti etkin direnç  $\rho_{\text{eff}}$  ile ters orantılıdır.

Basitlik ve kolaylık için Denklem (5)'i aşağıdaki şekilde yazabiliriz;

$$Q_c / \text{sabit} = \frac{\omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \quad (8)$$

Buradan da anlaşılacağı üzere çiftlenim kayıpları da uzunluğun karesiyle orantılı ve dirençle ters orantılıdır.

### 1.1.3. Kritik Hal ve Kritik Hal Modelleri

Uygulanan alan  $H_a=0$  iken,  $T_c$ 'nin altındaki T sıcaklığına soğutulmuş yani alansız soğutma (ZFC) işlemi sonrasında, hiç girdap içermeyen bir numuneye bir  $H_a$  alanının sıfırdan başlayarak uygulandığı düşünülün.  $H_a$ ,  $H_{c1}$ 'i aştığında, akı çizgileri çekirdeklenmeye başlar ve numuneye nüfuz eder. Eğer numune çivileme merkezlerine sahip değil (ideal) ise bu akı çizgileri numune kesiti boyunca düzgün şekilde dağılır. Ancak çivileme kuvvetleri akı çizgilerinin nüfuzuna ve hareketine karşı koyacaktır. Bu yüzden, akı çizgilerinin dağılımı düzgün olmaz ve akı yoğunluğu profilinde kritik bir meyil (gradyent) oluşur.

Tekdüze (düzgün) olmayan bir konfigürasyonda, tek bir akı çizgisi üzerine (veya akı çizgisi tabakasına) etki eden kuvvetleri incelemek öğretici olur. Akı çizgilerinin karşılıklı itmelerinden ötürü, her akı çizgisi arkasındaki akı çizgisinden dolayı içeri doğru (ileri) bir itmeye ve önündeki akı çizgisinden dolayı dışarı doğru (geriye) bir itmeye maruz kalır. Ancak akı çizgilerinin yoğunluğu ilerleme yoluna boyunca değişirse, yani bir akı çizgisi yoğunluğu gradyenti  $dB/dx$  oluşursa, net bir kuvvet ortaya çıkacaktır. Yer değiştirme eşiğindeki sabit bir akı çizgisi üzerine etki eden net (itici) kuvvet, buna Lorentz kuvveti  $\vec{F}_L = \vec{J}_c \times \vec{B}$  de denir, çivileme merkezlerinden kaynaklanan  $F_p(B)$  maksimum çivileme

kuvvet yoğunluğu ile dengelenir. Akı çizgisi yoğunluğunda küçük bir artış olması için, çivileme engellerinin aşılması gerekir. Bu yüzden  $dB/dx$ , bir kritik halde mevcut olmalıdır.

Manyetik akı yoğunluğu profili ve ona eşlik eden indüklenmiş kalıcı akımların deseninin kritik bir halde olduğu bir konfigürasyon ortaya çıkar. Buradan, Maxwell-Ampere denklemi

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}_c \quad (9)$$

olur ve  $\vec{B}$ 'nin y-z düzlemi boyunca yönlendiği düzlemsel geometri için;

$$\frac{dB}{dx} = \pm \mu_0 J_c \quad (10)$$

şekline indirgenir. İzotropik (her yönde aynı özelliği gösteren) malzemelerde, indüklenmiş elektrik alan  $\vec{E}$  ve kritik akım yoğunluğu  $\vec{J}_c$ , akı çizgisi yoğunluğu  $\vec{B}$ 'ye diktir (ortogondur). Kritik akım yoğunluğu  $J_c$ , akı çizgilerini yerinden sökmek (depinning) için gerekli eşik kuvveti ile ilişkilidir ve Lorentz sürücü kuvveti,

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B} \quad (11)$$

$\vec{F}_p$  çivileme kuvvet yoğunluğunu yendiğinde bu değere ulaşılır.

Buradan kritik hal

$$\vec{J}_c \times \vec{B} + \vec{F}_p = 0 \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir.

$H_a$ ,  $H_{c1}$ 'in üzerinde artmaya devam ettikçe, ilerleyen akımın önü sonunda numunenin merkezine (bir dilim için orta düzlem veya bir silindir için eksen) ulaşır. Bu duruma karşılık gelen  $H_a$  ilk tam nüfuz alanı olarak adlandırılır ve  $H^*$  ile belirtilir. Akı çizgilerini yerinden söken (depinning) kritik akımlar, akım yoğunluğu kritik değer  $J_c$ 'yi aştığında  $\vec{E} \cdot \vec{J}$  oranında enerji kaybına yol açarlar. Dolanmaları, normal metallerde olduğu

gibi tamamen elektrik alanın yönü ile belirlenir. Normal metallere önemli fark, bu akımlar yoğunlukları  $J_c$  değerini aşmadıkça kayıpsız olmaları ve dolayısı ile kalıcı olmalarıdır [36].

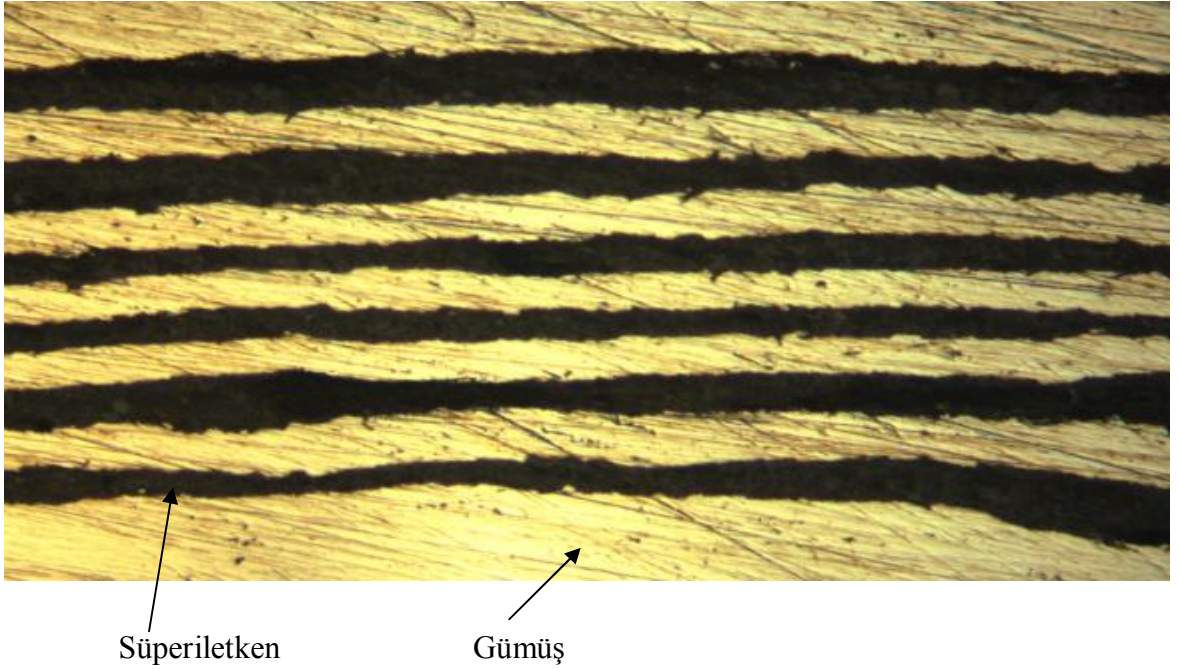
### 1.1.3.1. Geliştirilmiş Kritik Hal Modelleri

Bean [33] ve London [37] tarafından ortaya konulan kritik hal modeli, II. tip süperiletkenlerin manyetik davranışının analizinde birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Bu basit modelde,  $J_c$  kritik akım yoğunluğu,  $B$  manyetik akı yoğunluğundan bağımsız varsayılır. Kim vd.'nin [38] modeli  $J_c = k / (B_0 + |B_i|)$ , kritik akım yoğunluğunun  $B$ 'ye bağımlılığını içermekteydi. Irie ve Yamafuji [39] ve Green ve Hlawiczka [40] bir üs yasası modeli yani  $J_c = k / B^n$  önerdiler. Burada  $k$  ve  $n$  pozitif sabitlerdir.  $n=0.5$  Yasukochi vd. [41,42] tarafından önerildi. Tüm bu modellerde düşük kritik alan  $H_{c1}$ 'in altındaki akı dışarlama etkisini ihmal ettiler. Fietz vd. [43] kritik hal modelini denge manyetizasyonu ile iyileştiren bir üstel (eksponansiyel) model  $J_c = J_{c0} \exp(-B_i/B_0)$  önerdiler. Clem [44], numunenin içine akı girişi (dışarı çıkışı) için ekstra alan artışı  $\Delta H_{en}(\Delta H_{ex})$  gerektiren yüzeyde potansiyel bariyeri içeren bir kritik hal modeli öne sürdü. LeBlanc ve Lorrain [45] kritik akım yoğunluğu  $J_c$ 'nin  $B$ 'den bağımsız olduğu ve  $\Delta H = \Delta H_{ex} = \Delta H_{en} = \text{sabit}$  için bazı basit ilmeklerin hesabını gerçekleştirdiler. Chen ve Sanchez [46], II. Tip süperiletkenlerin özelliklerini açıklamak için, külçe çivileme etkilerini, termal denge manyetizasyonu ve yüzey bariyerini içeren bir modeli geliştirdiler. Çelebi vd. [47] ve LeBlanc vd. [48] yüzeyde dolaşan Meissner akımını da hesaba katan kritik hal modelini kullanarak deneysel manyetik verilerini analiz ettiler.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

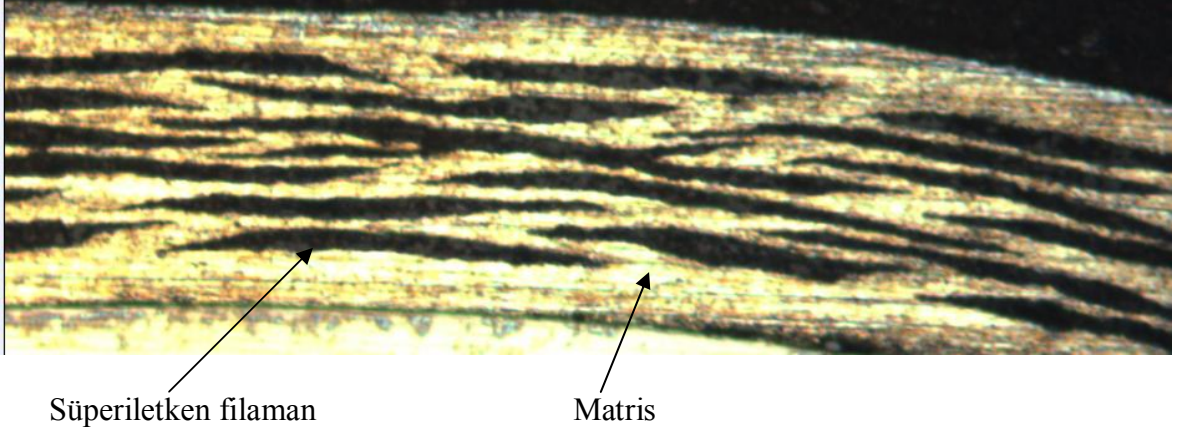
### 2.1. Süperiletken Şerit Numunelerin Tanımı

Bu çalışmada, CTFF ve PIT olmak üzere farklı iki teknikle üretilmiş ticari Bi:2223/Ag şerit numuneler hazır satın alınmış olmasına rağmen, numunelerin kısaca tanımlanması yararlı olacaktır. Birinci numune, CTFF (continuous tube filling and forming) işlemiyle hazırlanmış olup Eurus Technologies Inc. (USA) tarafından üretilmiştir. Şerit numune, gümüş içine gömülmüş  $\approx 10\text{--}15\ \mu\text{m}$  kalınlığında BSCCO filamanlardan 6 tabakada içermektedir. En dış kılıf olarak ta gümüş kullanılmıştır. 77K'de kendi alanında 12.8 A kritik akım göstermekte ve bu şartlarda süperiletken malzeme tarafından işgal edilen kesit alan için  $J_c \approx 10^8\ \text{A/m}^2$  'dir. Tanelerin c eksenine, şeridin geniş yüzeyine dik olacak şekilde yönelmiştir. Bi:2223/Ag şerit numunesi boyutları 0.011 cm x 0.25 cm x 0.25 cm olarak yaklaşık kare biçiminde kesilmiştir. Şekil 11'de CTFF numunesinin kesit yüzeyinin optik mikroskop altındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 11. CTFF tekniğiyle üretilmiş Bi:2223/Ag şerit numunesinin kesit yüzeyinden çekilmiş mikroskop görüntüsü.

İkinci numune, PIT (powder in tube) işlemiyle Australian Superconductors tarafından üretilmiş 37 filamandan oluşmaktadır. Taneler, c eksenine şeridin geniş yüzeyine dik olacak şekilde yönelmiş olup Bi:2223/Ag şerit numunesi, boyutları 0.032 cm x 0.29 cm x 0.35 cm olarak yaklaşık kare biçiminde kesilmiştir. Şekil 12’de PIT numunesinin kesit yüzeyinin optik mikroskop altındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 12. PIT tekniğiyle üretilmiş Bi:2223/Ag şerit numunesinin kesit yüzeyinden çekilmiş mikroskop görüntüsü.

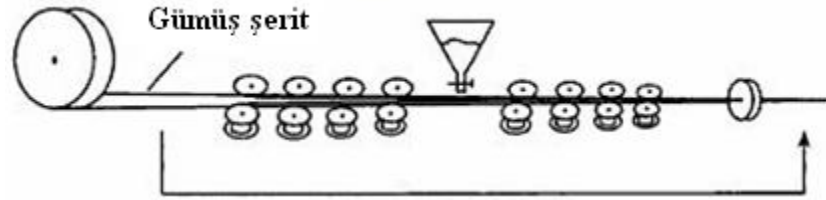
### 2.1.1. Şerit Numunelerin Üretim Teknikleri Hakkında Genel Bilgi

#### 2.1.1.1. CTFF (Continuous Tube Filling and Forming) Tekniği

CTFF tekniği, uzun gümüş şeridin üzerine süperiletken toz karışımının sürekli ve bir kütle kontrol birimi tarafından aynı miktarda doldurulmasına dayanan bir metottur. Bu metoda göre CTFF makinesinin makara düzeninde, şeridin başlangıç çapından başlayarak ilerleyen süreçte giderek bu çapın küçültülmesi ve şeklin değiştirilmesi işlemi esas alınır.



Şekil 13. CTFF tel ve şerit üretim makinesi.



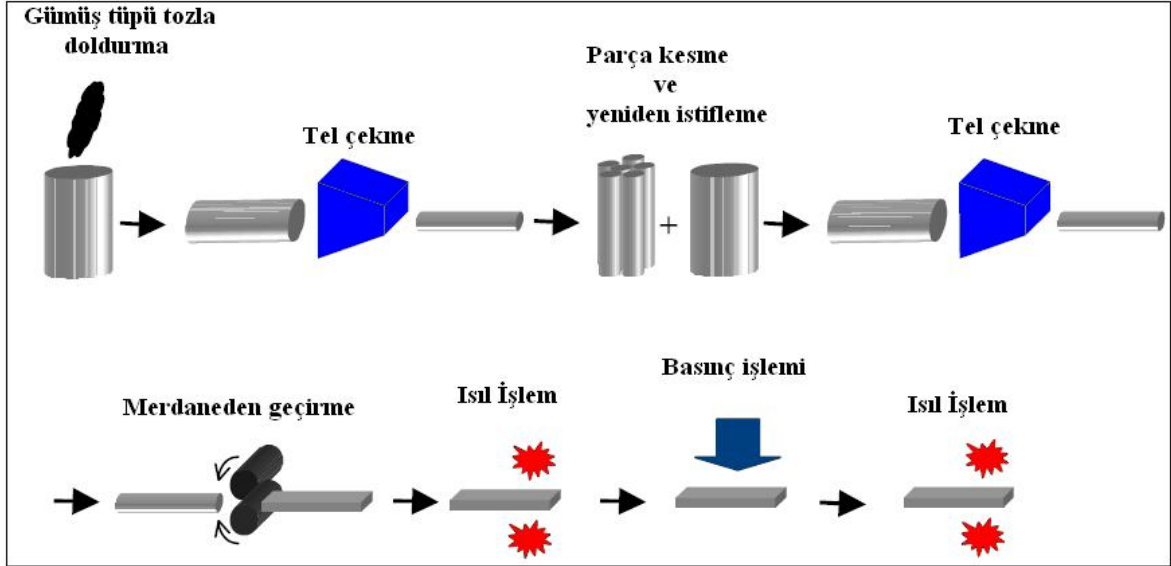
Şekil 14. CTFF tel ve şerit üretim tekniğinin şematik gösterimi.

Bu teknikte şeridin üretim uzunluğunda bir sınırlama yoktur. İstenilen uzunlukta üretme olanağı tanıdığı için bu yönüyle diğer metotlara üstünlük sağlar. Ayrıca toz miktarı makine tarafından hassas bir şekilde ayarlanabilir ve homojen bir dağılım elde edilebilir. Gümüş ya da gümüş alaşımı ve oksit malzemeler arasındaki mekanik özelliklerin farklılığından ileri gelen mekanik deformasyon süreci sırasında farklı biçim değişikliğine zorlayan dirençler tarafından oluşturulan etkiye sosis etkisi denilmektedir. Bu açıklamaya göre CTFF tekniğinde mekanik deformasyon etkisi PIT yöntemine göre oldukça azdır ve sosis etkisi “sausage effect” minimumdur. En önemlisi CTFF işlemi, basit, hızlı ve sürekli tel üretimi için iyi bir teknik olduğundan yüksek sıcaklık süperiletken tel ve şerit üretiminde geniş ölçekli endüstriyel uygulamaları için daha uygundur.

#### 2.1.1.2. PIT (Powder in Tube) Tekniği

PIT yöntemi, yüksek sıcaklık süperiletken tel ve şerit yapımı için geliştirilen ilk tekniklerden birisidir ve hala yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bazen süperiletken tel ve

şerit yapımı için Bi:2212 kullanılmasına rağmen çoğunlukla Bi:2223 kullanımı daha yaygındır. Şekil 15'te süreç sırasında takip edilen adımlar gösterilmiştir.



Şekil 15. PIT tel ve şerit üretim tekniğinin şematik gösterimi.

Tüp için seçilen malzeme gümüş veya gümüş alaşımıdır. Çünkü gümüş oksijenle reaksiyona girebilir fakat yüksek sıcaklık süperiletken çekirdek malzemeyle etkileşmez, ısıtım sırasında Bi tabanlı yüksek sıcaklık süperiletken malzemenin erime noktasından daha düşük ve bu malzemeyi büyötmek için istenilen şekle sokulabilir olmasından dolayı gümüş veya gümüş alaşımı kullanılır. Genellikle, tüpe yüksek sıcaklık süperiletken tozu doldurulduktan sonra tel oluncaya kadar çekilir. Toz ince Bi:2223 taneleri içerir. Çok filamanlı iletkenler için, genellikle altıgen (hexagonal) şekilde tel çekilir, küçük uzunluklarda kesilir ve 7, 19, 37, 55, 61, 85 veya daha yüksek sayıda filaman istif edilerek şekillendirilir. Bu istifledikten sonra başka bir tüpün içine yerleştirilir ve yeniden tel olacak şekilde çekme işlemi uygulanır. Yeniden istifleme ve çekme işlemi adımları tek filamanlı tel üretilirken bu adım uygulanmaz. Silindirik şeklindeki tel için, son adım ısıtım işlemidir. Fakat Bi:2223 süperiletkenler, istenilen en ve boy oranında merdanelen geçirme işlemi yardımıyla düz şerit olarak yapılır. Bi:2212'nin ince filamanları 800 ve 900 °C'de kısmi erime sürecine maruz bırakılarak bileşimin tanelerini büyötmeye işlemi gerçekleştirilir.

Bu taneler şeridin geniş yüzeyine paralel olacak şekilde ara basınç ve merdanelenme işlemleriyle yönlendirilmiştir. Bi:2223 ise sinterleme işlemiyle oluşturulur ve bundan dolayı taneler daha düzgün nitelikte dizilime sahiptir. Isıtım işlemi ve sinterleme sıcaklığı



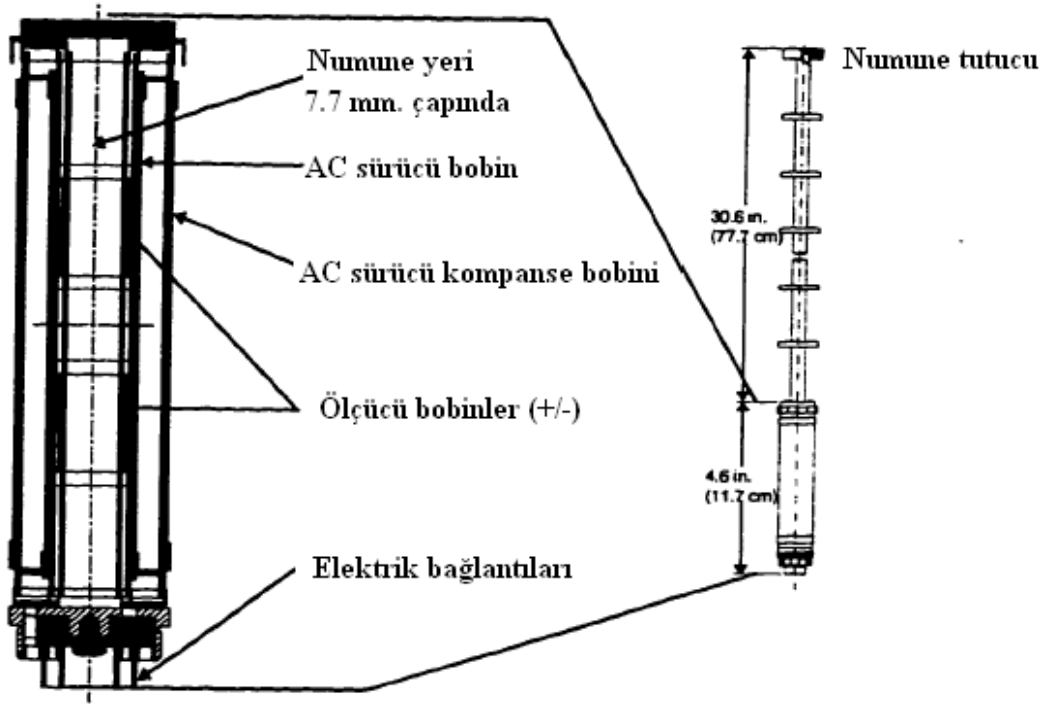
tozun özel stokiyometrisine göre dikkatli bir şekilde seçilir ve bu seçim 1K'lık sıcaklık aralığında hassas bir şekilde yapılır. Hem Bi:2223 hem de Bi:2212 oldukça yöne bağımlı malzemelerdir. Süperiletken akımı ab düzleminde ( CuO tabakaları ) akar. Yüksek kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) elde etmek için bu iki malzemedeki tanelerin c eksenini iyi yönelmiş olması gereklidir.

## **2.2. Deneylerin Gerçekleştirildiği Ölçüm Cihazları**

### **2.2.1. AC Manyetik Ölçüm Sistemi (ACMS)**

AC manyetik ölçümler Quantum Design Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi (PPMS) de ACMS olarak isimlendirilen QD-P500 AC alınganlık ölçme opsiyonu kullanılarak ölçülmüştür. Numune farklı ölçümler için manyetik alan şeridinin düz yüzeyine paralel ve dik olacak yönde numune tutucu yardımıyla ölçücü bobinin merkezine yerleştirilmiştir.

Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi (Quantum Design- PPMS cihazı) için satın alınan şekil 16'da gösterilen QD-P500 AC alınganlık ölçme opsiyonunda AC alan, sürücü bobin (drive coil) aracılığı ile uygulanmakta ve ölçücü bobinlerden (detection coils) süperiletken örneğin manyetik alana tepkisi ölçülmektedir. Ölçümler bilgisayar kontrollü olup istenilen alan, frekans ve sıcaklık aralığına göre otomatik olarak yapılabilmektedir. Satın alınan ticari süperiletken Bi:2223/Ag şeritler, örnek tutucunun ebatlarına uygun olarak kesildi ve hem alana dik hem de paralel şekilde yerleştirildiği durumlar için ayrı ayrı ölçüldü. AC alınganlık, AC kayıplarının direkt bir ölçüsü olduğundan, AC kayıplar bu şekilde deneysel olarak ölçüldü. Kritik hal modelleri için teorik hesaplamalar, Mathematica 6.0 adı verilen yazılım programında gerçekleştirildi. Sonrasında deneysel ve teorik sonuçların analizi literatür ile karşılaştırmalı olarak yorumlandı.

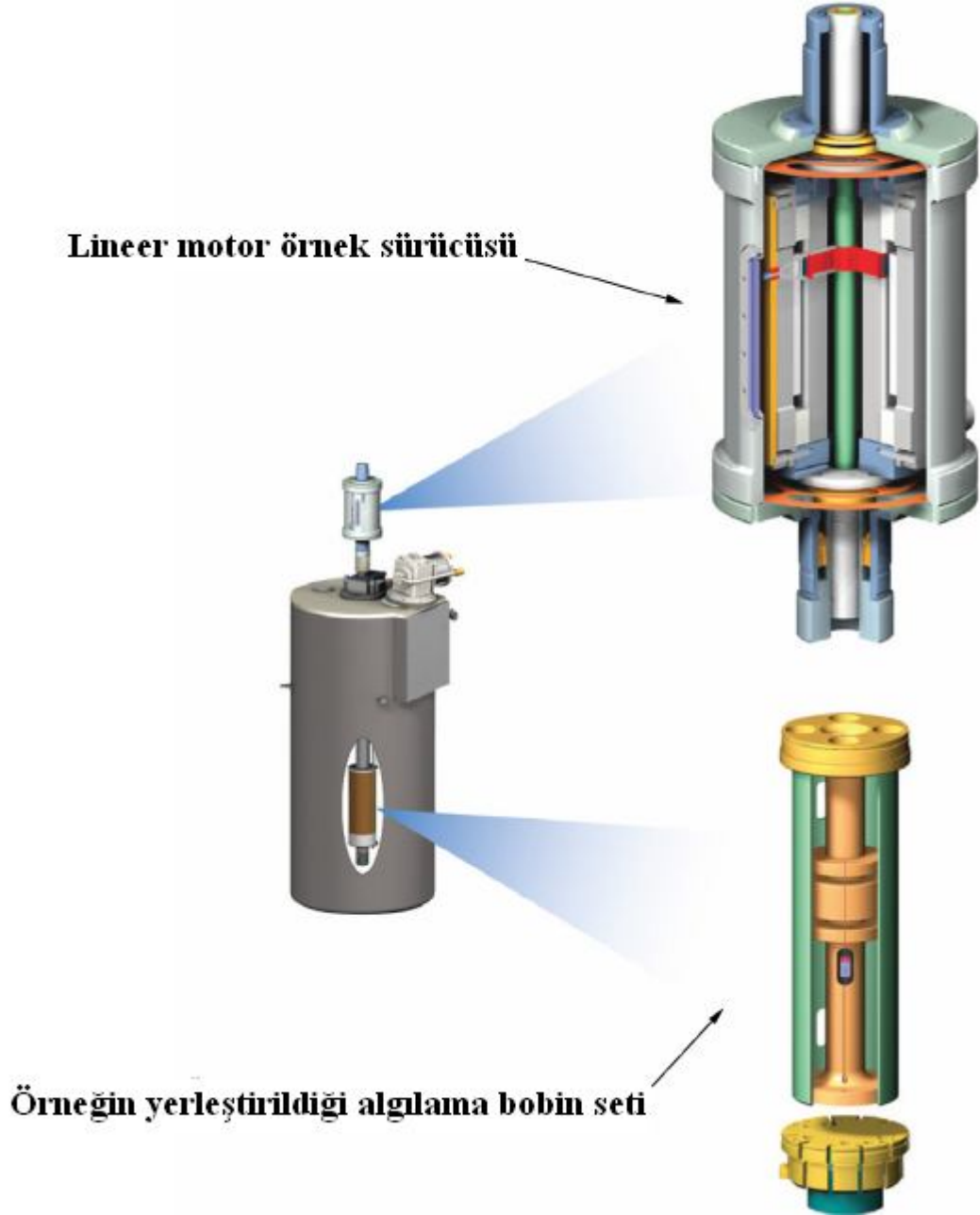


Şekil 16. QD-P500 AC Alinganklık Ölçme sistemi.

### 2.2.2. Titreşen Örnek Manyetometresi (VSM)

VSM numunenin manyetik momentini ölçer. Neredeyse değişmeyen manyetik alan numuneye uygulanır. Numunenin kendisi titreştirilerek manyetik momenti pick-up bobinleri tarafından belirlenir. Pick-up bobininin voltaj sinyali numunenin manyetik momentiyle orantılıdır. Numune, sinüsel titreşim yapan numune çubuğunun ucuna takılır. Titreşim merkezi tayini, gradiyometre algılama bobinin dikey ortasında isteğe bağlı olarak otomatik veya elle oluşturulabilir. Doğru merkezleme ve titreşim genliği, VSM lineer motor hareketini sağlayıcı tarafından optik lineer kod çözücü kullanan VSM motor modülü ile kontrol edilir. Algılama bobininde indüktif voltaj yükseltildikten sonra frekans ve faz kilitlemeli yükselteç tarafından VSM algılama modülünde ölçülür. VSM algılama bobini, eş zamanlı algılama için referansa göre konum çözücü sinyali kullanılır. Bu çözücü sinyal, VSM lineer motor hareketini sağlayan modülden gelen işlenmemiş sinyali dönüştüren VSM motor modülünden elde edilir. VSM algılama modülü, çözücünden ve algılama bobininden gelen yükseltilmiş voltajdan faz içi veya belirli fazlardaki sinyali algılar. Bu sinyallerin ortalaması alınır ve bir arayüzey aracılığıyla bilgisayardaki programa komut karşılığı olarak gönderilir. Zamana göre pick-up bobininden gelen voltaj sinyalinin

integrasyonundan sonra manyetizasyon hesaplanabilir ve böylece M-H çevrimi üretilebilir. Bu sinyal standart Nikel'in doyum manyetizasyonuna göre ayarlanmıştır. M-H çevrimindeki çevrelenen alan, çevrim başına numunenin AC kaybıdır. VSM sistemindeki algılama bobini ve gradiyometre birimleri Şekil 17'de gösterilmektedir.



Şekil 17. VSM modülünün sıvı helyum takının içerisindeki yerleşimi. Üstteki kısım gradiyometreyi alttaki kısım algılama bobinini göstermektedir.

## 1. BULGULAR VE TARTIŞMA

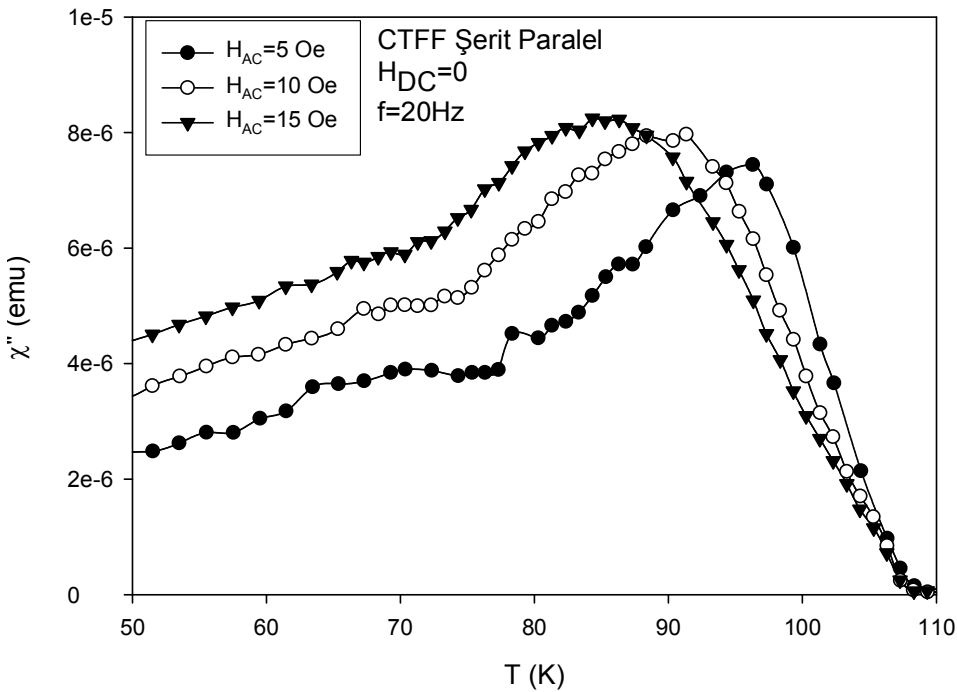
### 1.1. CTFF Numunesine Ait Deneysel Ölçümler ve Analizleri

#### 1.1.1. AC Alınganlık Ölçümleri

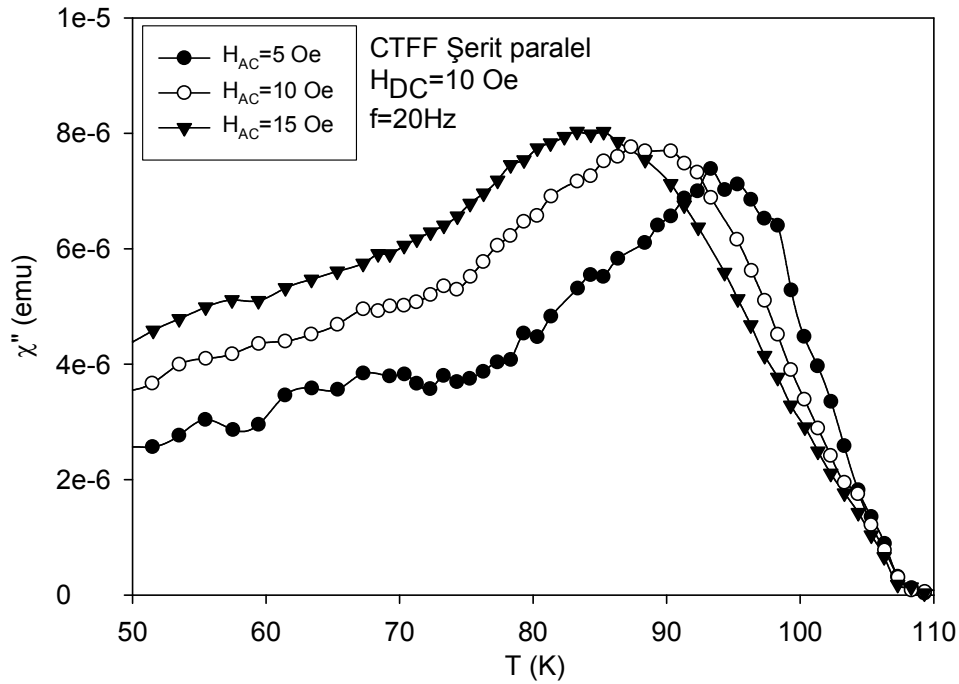
##### 1.1.1.1. AC Kayıpların Sıcaklık ve Alan Bağlılığı

Bu başlık altında, histerezis kayıpların bir ölçüsü olan  $\chi''$  (emu) 'nün sıcaklığa göre değişimi, şerit yüzeyine göre manyetik alanın paralel ve dik yöneliminde, DC manyetik alanın varlığında ve yokluğunda olmak üzere CTFF üretim tekniğine sahip şerit numune için incelendi.

Şekil 18 ve 19, CTFF metodu ile üretilmiş şerit numunesi için manyetik alan şeridin geniş yüzeyine paralel yönelimde olduğunda sabit frekansta (  $f = 20$  Hz ) ve DC manyetik alan sırası ile  $H_{DC}=0$  ve  $H_{DC}=10$  Oe için pik sıcaklıklarının alan bağlılığını göstermektedir.



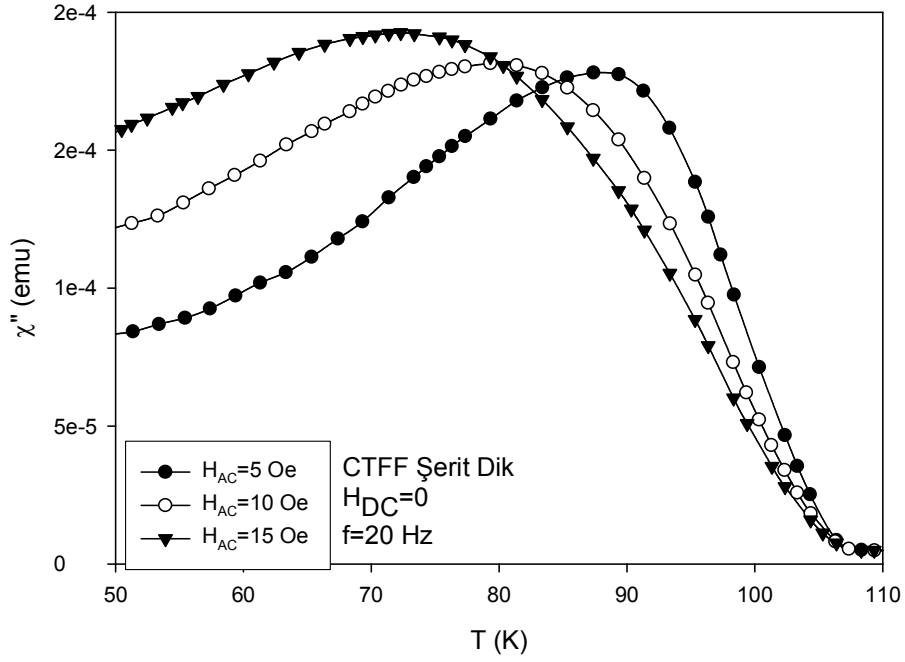
Şekil 18.  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=0$  alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine paraleldir.



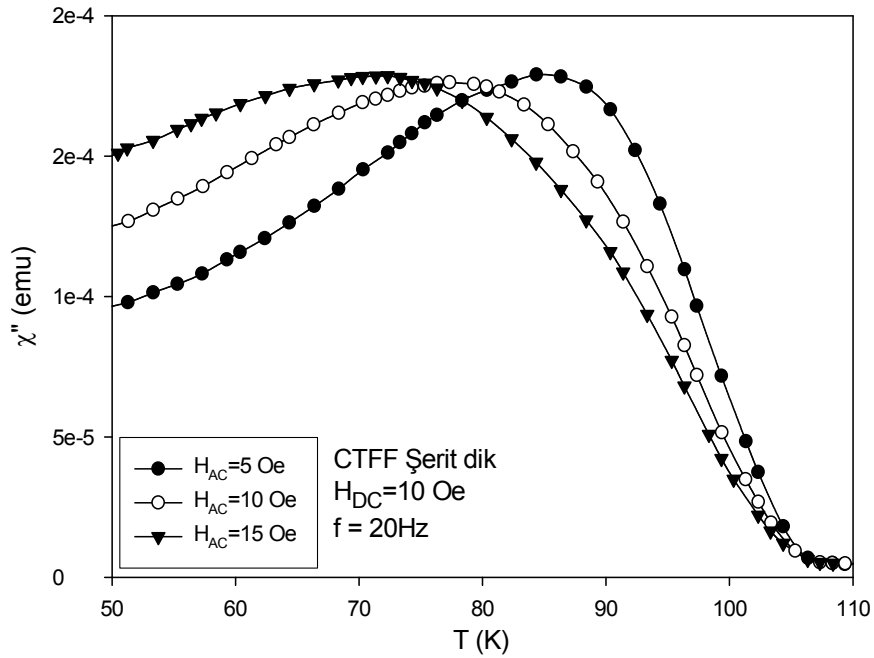
Şekil 19.  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=10$  Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi.

Şekil 20 ve 21, CTFF metodu ile üretilmiş şerit numunesi için manyetik alan şeridin geniş yüzeyine dik yönelimde olduğunda sabit frekansta ( $f = 20$  Hz) ve DC manyetik alan, sırası ile  $H_{DC}=0$  ve  $H_{DC}=10$  Oe için AC kayıp piklerinin, sıcaklığa ve AC alan genliğine bağlılığını göstermektedir.

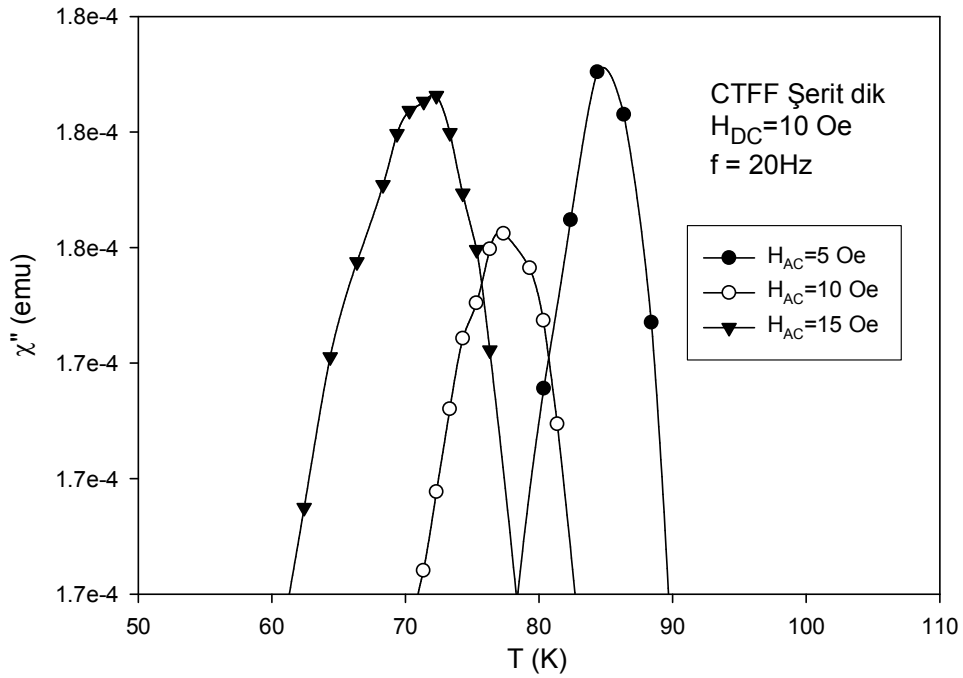
Şekil 22 ise Şekil 21'nin maksimum kayıp piklerine odaklanılarak sıcaklık ölçeklendirilmesi ayrıntılı hale getirilmiştir. Burada, AC kayıp maksimumundaki azalma ve bir minimumdan sonra tekrar artmayı açık bir şekilde göstermektedir. Bu davranışa histeresis kayıp vadisi denilmektedir [49,50].



Şekil 20.  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=0$  alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir.



Şekil 21.  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=10$  Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi.

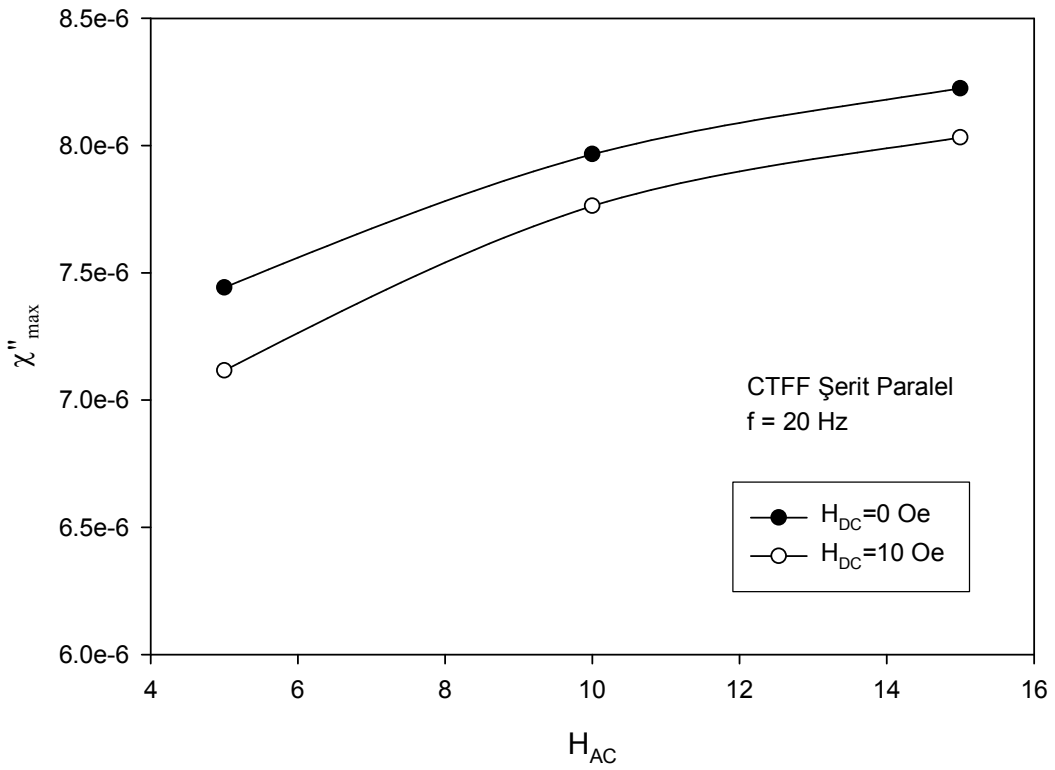


Şekil 22.  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=10$  Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC kayıp maksimumundaki azalma ve bir minimumdan sonra tekrar artmayı göstermekte olan AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi.

DC alan varlığında pik yüksekliklerindeki ve pik sıcaklıklarındaki kayma miktarı gözlenebilmektedir. Manyetik alanın şerit yüzeyine göre dik yönelimindeki ölçümler paralel yönelimdeki ölçümlere göre pik sıcaklıkları daha düşüktür.  $\chi''$  (T) deki pikler alan genliğinin artmasıyla düşük sıcaklıklara kaymaktadır. AC alan genliğinin artması ile pik sıcaklığındaki kayma miktarı, çivileme kuvvetinin büyüklüğü veya şiddeti ile orantılıdır.  $\chi''$  nün maksimumundaki kayma ne kadar büyükse çivileme ve bu yüzden kritik akım yoğunluğu o kadar zayıf olacaktır.

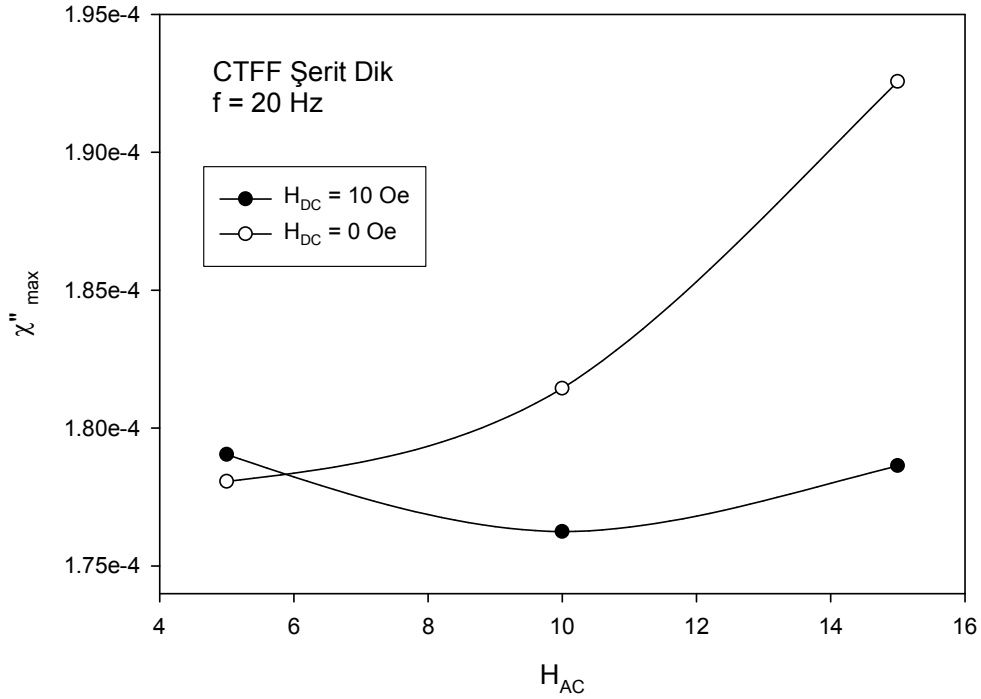
Şekil 18, 19, 20 ve Şekil 21'deki grafiklerden imajiner kısımların maksimum değerleri kullanılarak oluşturulan Şekil 23 ve 24'de görülen grafikler DC alanın varlığında ve yokluğunda uygulanan manyetik alan genliğine göre değişimi çizdirilmiştir. Burada paralel yönelimin aksine şekil 24'te yapılan incelemede DC alan varken AC manyetik alanın artmasıyla kayıp maksimumlarında bir azalma gözlenmiştir. Histerezis kayıp vadisi (loss valley) denilen bu davranış, ayrıntılı bir şekilde hem deneysel hem teorik hesaplamalarla YBCO süperiletken malzemeler için ref. [49,50]'de yayınlanmıştır. Bi:2223/Ag CTFF şerit numunesinde gözlenen bu davranış, teorik modelleme ile izah

edilebilmektedir. Bu tip kayıp vadisinin AC alan genliğinin, yaklaşık olarak DC alana eşit olduğu değerlerde, süperiletken malzemenin kritik akım yoğunluğundaki alan bağıllığına da bağlı olarak, gözlenebileceğini öngörmekteyiz. Kayıp vadisindeki derinlik alan bağıllığını gösteren  $n$  değeri arttıkça artacaktır. Yani  $n=0$  Bean modeline uyan malzemelerde AC kayıp vadisi gözlenemezken,  $n=1$  olduğunda yani Kim modeline uyan malzemelerde AC kayıp vadisi daha derin olmaktadır.



Şekil 23.  $f=20$  Hz'de,  $H_{DC} = 0$  ve  $H_{DC} = 10$  Oe, seçilen AC alan genlikleri için AC alınganlığın imajiner kısmının AC manyetik alanla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine paraleldir.

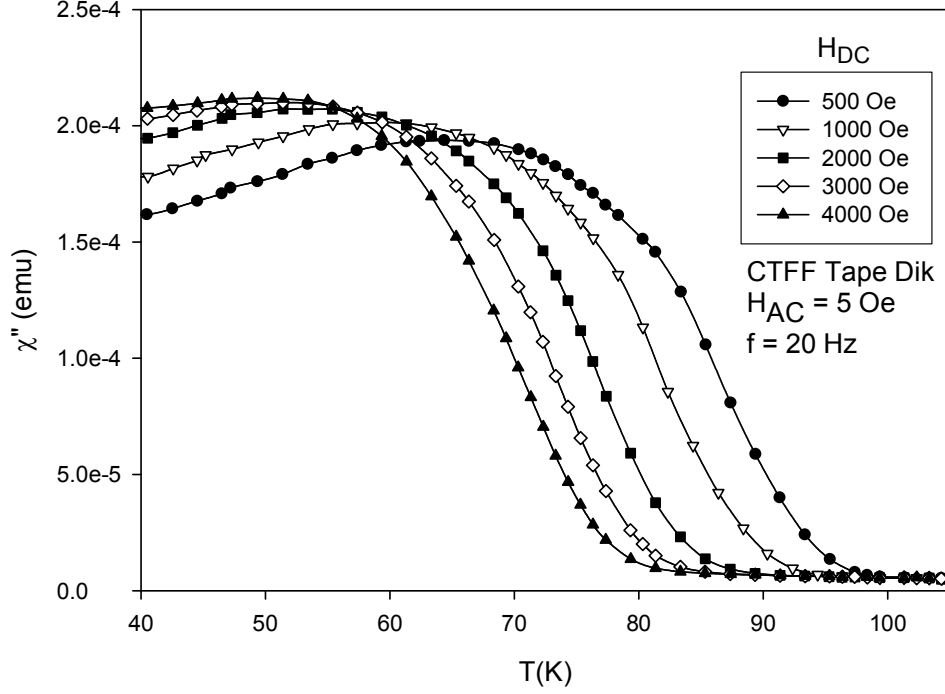




Şekil 24.  $f=20$  Hz'de,  $H_{DC} = 0$  ve  $H_{DC} = 10$  Oe, seçilen AC alan genlikleri için AC alınganlığın imajiner kısmının AC manyetik alanla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine diktir.

Şekil 25 'te AC alınganlık sıcaklığın fonksiyonu olarak sergilenmiştir. Sanal kısım  $\chi''$  soğutmadan sonra 30K 'e ısıtma sırasında ölçüldü ve  $H_{DC}$  alan uygulandı. Bu ölçümler sırasında AC alan genliği 5 Oe ve frekans 20 Hz'de sabit tutuldu.  $H_{DC}$  arttırıldığında ( $\chi''$  'nün) pik sıcaklığı ve onset sıcaklıkları literatürde (Fuchs, 1995) rapor edildiği gibi düşük sıcaklıklara kaymıştır. Bu davranış II. tip süperiletkenlerde tipik bilinen bir davranıştır ve girdapların çivileme (pinning) mekanizması ile ilişkilidir. Pik sıcaklığında, uygulanan toplam alan, girme (penetration) alanına karşılık gelir. Girme alanı, sıcaklık azaldıkça (çivileme kuvvetinin artması ile dolayısı ile kritik akım yoğunluğunun artması ile) artacağından, alanın artmasıyla pik sıcaklığının azalması yani pikin düşük sıcaklık bölgesine kayması beklenir. AC alınganlığın sanal kısmının ( $\chi''$ ) onset sıcaklıkları her  $H_{dc}$  için ( $H_{irr}$  bu metotla belirlendi) tersinmezlik sıcaklığı  $T_{irr}$  olarak alınabilir. Literatürde onset sıcaklığı tersinmezlik sıcaklığı olarak yorumlandığından, bu verilerden tersinmezlik çizgisi (irreversibility line) belirlenebilir. Tersinmezlik çizgisi II. tip süperiletkenler için güçlü akı çivilemesine bağlı bir özellik olduğuna inanılmaktadır. Tersinmezlik çizgisini araştırmak

yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin akı dinamiğini anlamada çok önemli ipucu verebilir [5, 51].



Şekil 25.  $f=20$  Hz'de,  $H_{AC} = 5$  Oe, seçilen farklı DC alan değerleri için AC alınganlığın imajiner kısmının sıcaklıkla değişimi.

### 1.1.1.2. Histeresis Kayıpların Hesaplanması

Bu kesimde kritik hal modellerini ve Maxwell denklemlerini kullanarak, düşük frekansta ölçülen AC kayıplarının büyük ölçüde histeresis kayıplarından kaynaklandığını ve aşağıda açıklanacak modelleme hesapları ile uygun parametreler seçildiğinde deneysel verilerle (Şekil 18, 19, Şekil 43, 44 ve 46) uyum içinde olan teorik eğrilerinin elde edilebileceği gösterildi. Hesaplamalar Mathematica 'da geliştirilen alt program yazılımları kullanılarak gerçekleştirildi.

Modelleme hakkında kısaca ön bilgi vermek uygun olur. Akı çizgisinin hareketini engelleyen çivileme kuvvetinden dolayı numune içinde manyetik akı yoğunluğu profili ve ona eşlik eden indüklenmiş kalıcı akımların deseninin kritik bir halde olduğu bir konfigürasyon ortaya çıkar. Buradan, Maxwell-Ampere denklemi,

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}_c \quad (13)$$

ve buradan  $\vec{B}$ 'nin z eksenine boyunca yönlendiği dilim (slab) geometri için denklem (14) 'e indirgenir.

$$\frac{dB}{dx} = \pm \mu_0 J_c \quad (14)$$

Kritik akım yoğunluğu  $J_c$ , akı çizgilerini yerinden sökmek (depinning) için gerekli eşik kuvveti ile ilişkilidir ve Lorentz sürücü kuvveti,  $\vec{F}_p$  çivileme kuvvetini yendiğinde bu  $J_c$  değerine ulaşılır. Buradan kritik hal, denklem (15) ile ifade edilir.

$$\vec{J}_c \times \vec{B} + \vec{F}_p = 0 \quad (15)$$

$H_a$ ,  $H_{c1}$ 'in üzerinde artmaya devam ettikçe, ilerleyen akımın önü sonunda numunenin merkezine (bir dilim için orta düzlem veya bir silindir için eksen) ulaşır. Bu duruma karşılık gelen  $H_a$  ilk tam nüfuz alanı olarak adlandırılır ve  $H^*$  ile belirtilir.

Denklem (15) ile ifade edilen kritik halde numunede dolaşan akımın alan ve sıcaklık bağılığı için,

$$j_c(B, T) = \frac{\alpha(T)}{B^n} \quad (16)$$

denklemini kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Burada  $\alpha(T)$  sıcaklığa bağlı çivileme (pinning) şiddeti parametresidir ve  $B^n$  indüklenen akım yoğunluğunun alan bağıllığını temsil etmektedir. Ayrıca,

$$\alpha(T) = \alpha_0 \left[ 1 - \frac{T}{T_c} \right]^p \quad (17)$$

ile verilir, burada  $\alpha_0$   $T=0$  daki çivileme şiddeti parametresidir. İdeal sonsuz uzunlukta dilim geometrisi için,  $B(x) = \mu_0 H(x)$  olarak,

Denklem (16), denklem (14) 'de yerine yazılır ve integral alınırsa,

$$B_1^{n+1}(x) = (\mu_0 H_a)^{n+1} \pm \mu_0 (n+1) \alpha(T) (X - x) \quad (18)$$

$$B_2^{n+1}(x) = B_1^{n+1}(x_i) \mp \mu_0 (n+1) \alpha(x_i - x) \quad (19)$$

elde edilir. Burada  $x$ ,  $x = \pm X$  yüzeyli sonsuz dilimin kalınlığı boyuncadır. Denklem (18)  $x_i \leq x \leq X$  için ve denklem (19),  $0 \leq x \leq x_i$  aralığında geçerlidir,  $x_i$  alan artırma ve alan azaltma durumundaki akı yoğunluğu  $B(x)$  profillerinin kesişme noktasına karşılık gelir.

Denklem (18) 'den ilk tam nüfuz alanı,

$$H_a = [ \mu_0 (n+1) \alpha(T) X ]^{1/(n+1)} / \mu_0 = H_*(T) \quad (20)$$

şeklinde elde edilir. Uygulanan alan  $H_a$ ,  $H_{\max}$  ile  $H_{\min}$  arasında değıştikçe çok çeşitli akı yoğunluğu profilleri ile karşılaşılır.

Numunedeki ortalama akı yoğunluğu,

$$\langle B \rangle = \frac{1}{X} \left[ \int_0^{x_i} B_2(x) dx + \int_{x_i}^X B_1(x) dx \right] \quad (21)$$

ile verilir. Histerezis ilmeđi tarafından çevrelenen alan,

$$\frac{W}{\mu_0} = \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} H_a \frac{d\langle H \rangle \uparrow}{dH_a} - \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} H_a \frac{d\langle H \rangle \downarrow}{dH_a} \quad (22)$$

şeklinde yazılabilir. Burada integrallerin sınırları  $H_{\max} = h_0$  ve  $H_{\min} = -h_0$  arasındadır.

Ayrıca,  $H_a$  artarken  $\frac{d\langle H \rangle \uparrow}{dH_a}$  ve  $H_a$  azalırken  $\frac{d\langle H \rangle \downarrow}{dH_a}$  türevleri bulunmalıdır.

Bu profillerin integrasyonu,  $X$  kalınlıklı ideal bir şeritte, seçilen her  $H_a$  değerine karşılık gelen,  $B(x)$ 'in uzaysal ortalaması  $\langle B \rangle$ , için analitik formüllerini verecektir. Dolayısı ile  $\langle B \rangle$  'nin  $H_a$  'ya karşı çizdirilen histerezis çevriminin içinde kalan alan

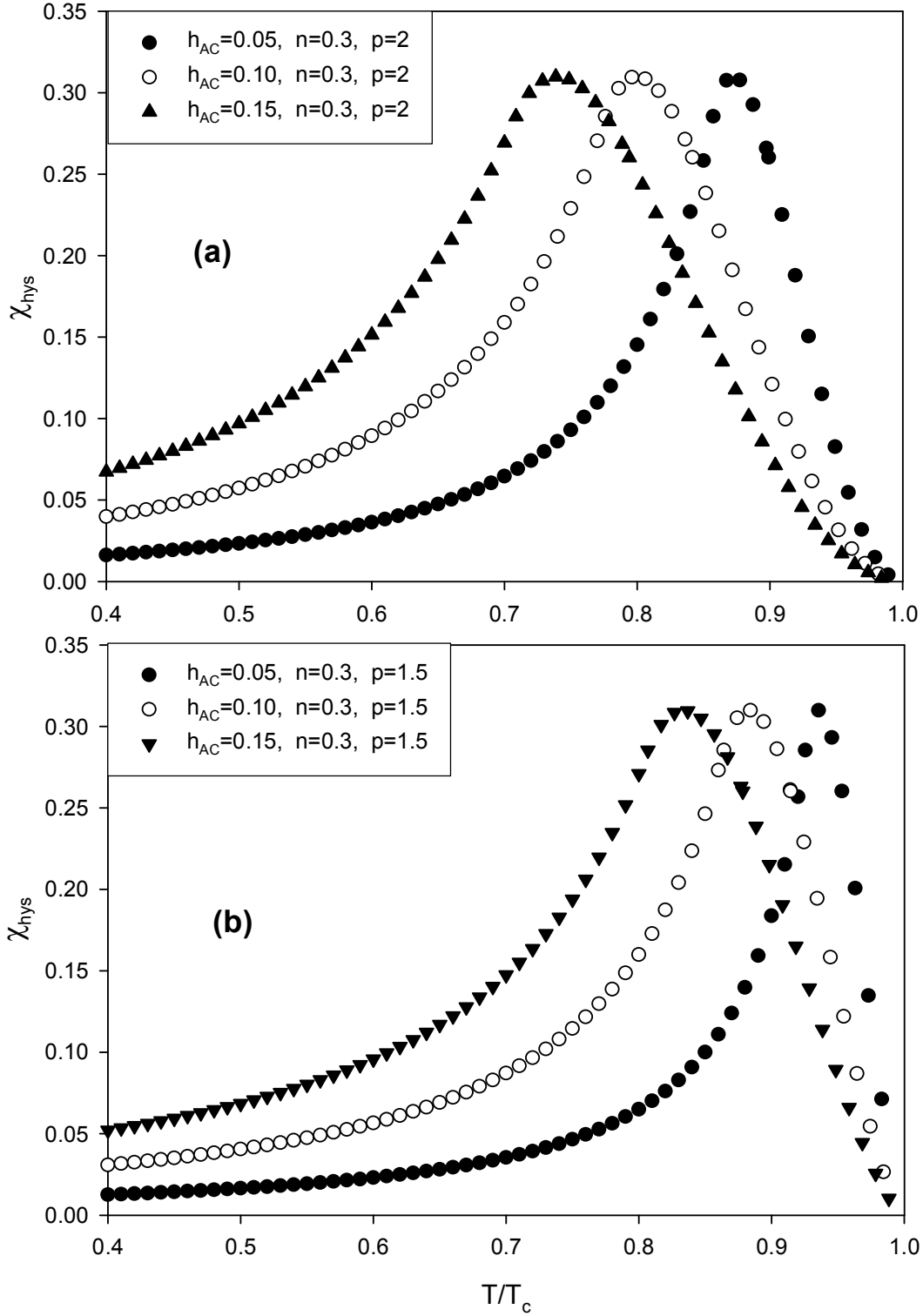
kolayca hesaplanabilir.  $W$  ile gösterilen bu alan birim hacimde çevrimi histerezis kaybının ölçüsüdür. Böyle bir hesaplamanın detayları [49] 'da verilmektedir.

Bu nedenle alınganlığın sanal kısmı teorik olarak aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\chi_{hys} = W/\mu_0\pi H_{ac}^2 \quad (23)$$

burada  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$  dir.

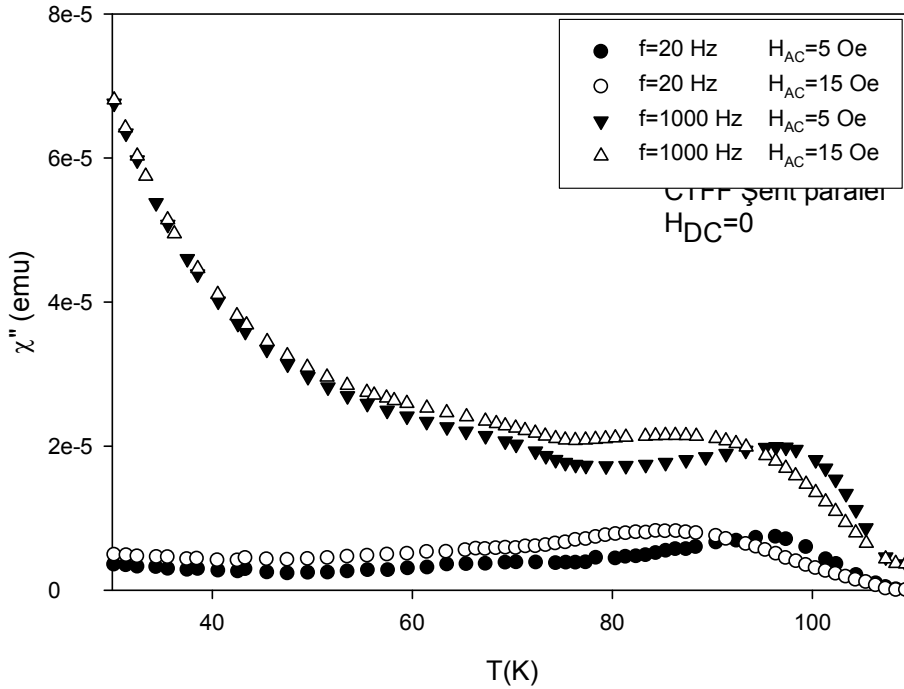
Şekil 26 (a) ve (b), basit model hesaplamalarımızın sonuçlarıyla ilişkili olarak Şekil 18, 19, Şekil 43, 44 ve 46'de gösterilen verilerle karşılaştırma yapabilmemize olanak tanımaktadır. Karşılaştırma yapılan hesaplanmış iki eğri ailesinde, denklem (17) 'de üs parametresi  $p=2$  ve  $p=1.5$  için farklı değerlerde yapılmıştır. 20, 30 ve 77 K 'de ölçülen bir kısmı daha sonra verilen M-H histerezis çevriminde alan üssü Bean tipi ( $n=0$ ) ile Yasukochi tipi ( $n=0.5$ ) arasında bulunmaktadır. En iyi uyumu sağlaması açısından  $n=0.3$  seçildi. Şekil üzerinde verilen  $h_{ac}$  değerleri normalize edilmiş alan genliklerini temsil etmektedir. Bu nicelik uygulanan alan genliğinin  $H_{AC}$  girme alanına  $H^*$  oranı olarak tanımlanmaktadır. Girme alanı  $H^*$ , numunenin tamamına akının nüfuz ettiği andaki uygulanan alan olarak tanımlanmakta olup ve süperiletken numunenin boyutu ve kritik akım yoğunluğunu karakterize eden bir niceliktir. Pik sıcaklığında uygulanan alan girme alanına karşılık gelmektedir.  $p$  parametresi çivileme şiddetinin veya kritik akım yoğunluğunun sıcaklığa bağlılığını gösterdiğinden, AC alınganlığı pikinin daha geniş veya daha dar sıcaklık bölgesine yayılmasında önemli rol oynar. Pikin yüksekliğinde ise kritik akım yoğunluğunun alan bağlılığını gösteren  $n$  parametresi belirleyicidir.  $n=0$  için normalize edilmiş  $\chi_{hys\max} = 0.23$  iken,  $n=1$  için 0.40 değerine çıkmaktadır. Uygulanan alan arttıkça, pikin daha küçük sıcaklık bölgesine kayması sağlanarak en iyi uyum eğrisi elde edilir. Böylece numune için sözü edilen bu parametreler belirlenebilir.



Şekil 26. (a) ve (b) şekil üzerinde verilen parametreler seçildiğinde kritik hal modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar. Bu üç parametre uygun olarak seçildiğinde deneysel verilere çok iyi uyum sağlayan teorik sonuçlar elde edilebilmektedir.

### 1.1.1.3. AC Kayıpların Frekans Bağlılığı

AC kayıplarının frekans bağlılığını deneysel ve teorik olarak önce CTFE şerit numunesinin geniş yüzeyi alana paralel yöneldiği durumda araştırıldı. Deneysel sonuçlardan anlaşıldığına göre, Bi:2223/Ag süperiletken şerit numunede AC kayıpları AC alan genliğine, sıcaklığa ve frekansa bağlı olmaktadır. Şekil 27’de görüldüğü gibi 5 ve 15 Oe AC alanda ve 20 Hz ile 1000 Hz de ölçülen AC alınganlığın imajiner kısmının sıcaklığa göre değişim eğrisinde ilginç sonuçlar elde edilmiştir. 20 Hz de gözlemlenen eğrilerde histerezis kayıplarının baskın olduğu görüldü. Frekans 1000 Hz iken AC kayıpları çok farklı bir davranış göstermektedir. Özellikle  $T < 75$  K için sıcaklık azaldıkça AC kayıplarında kayda değer dik bir artış gözlemlendi. Ag matris’in özdirenci küçük olduğundan dolayı, yüksek frekanslarda kayıplarda, gümüşte dolaşan eddy akımlarından ileri gelen AC kayıplarının baskın olması beklenir. Sıcaklık azaldıkça, belki de eddy akım kayıpları ya da frekansa bağlı flamanlar arası çiftlenim kayıplarından dolayı AC kayıpları artmaktadır.

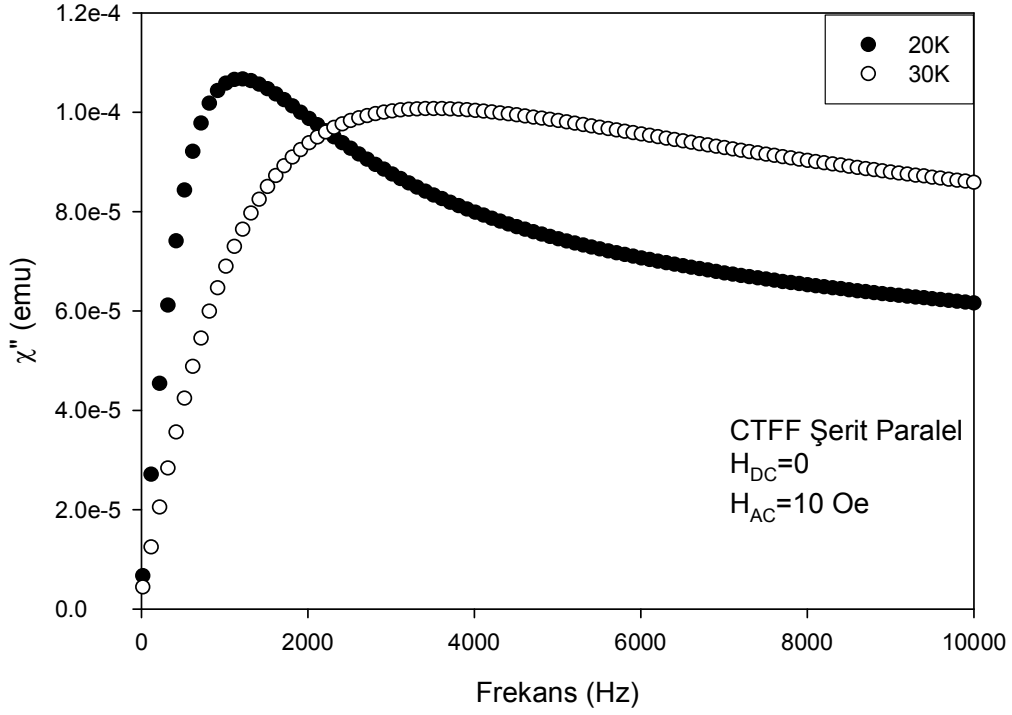


Şekil 27.  $f=20$  ve  $1000\text{Hz}$  ve  $H_{AC}=5$  ve  $10$  Oe için AC alınganlığın imajiner kısmının sıcaklıkla değişimi.

Süperiletkenlik davranışın aksine, Eddy akımı alınganlığı AC alan genliği tarafından direkt etkilenmemektedir. Ayrıca süperiletken flaman için, frekans etkileri genellikle kritik akımın alan bağımlılığından çok küçüktür [52,15].

Çok filamanlı şerit olması halinde, süperiletken ve dirençli akım yollarından oluşan filamanlar arası çiftlenim mevcuttur [53,54]. Bu nedenle düşük sıcaklık ve yüksek frekans bölgesinde gözlemlenen bu olayı Eddy akımı kayıpları ya da filamanlar arası çiftlenim kayıplarına bağlamaktayız.  $\chi''$  maksimum ile ilişkili olarak, eğriler iki kısımdan oluşur. Takacs ve arkadaşları [55, 56] pik değerinin üzerindeki sıcaklıklarda, kayıpların yüksek frekansla arttığını ve pik sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda kayıpların artan frekansla azaldığını rapor etmişlerdir. Oysaki yapılan ölçümlerde tüm sıcaklık bölgelerinde (20Hz'den 1000Hz'e) artan frekansla AC kayıpların arttığı gözlenmiştir. Ayrıca  $f=1000\text{Hz}$  için AC kayıpları normal durumda sıfır olmayan bir değere sahiptir. Bunun eddy akım kayıplarından ileri geldiği düşünülmektedir. Polak ve arkadaşları [57], düşük frekanslarda (1mHz-250Hz 77 K de) kayıpların frekans bağımlılığı ölçümlerine dayanan toplam ölçülen kayıplardan, histerezis kayıplarını ayırmak için bir yöntem önerdiler. Önceki kesimde açıklandığı gibi kritik hal modellerini ve Maxwell denklemlerini kullanarak düşük frekansta ölçülen AC kayıplarının büyük ölçüde histerezis kayıplarından kaynaklandığı teorik modelleme hesapları ile doğrulanmıştır.

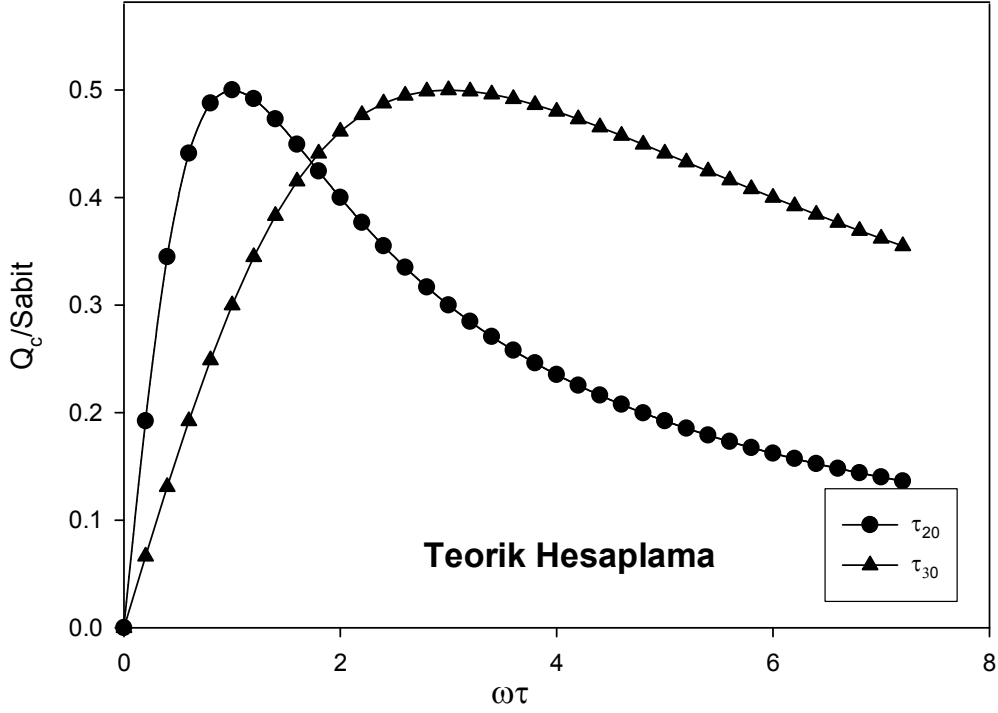




Şekil 28. Bi:2223/Ag şeritte T= 20K ve 30 K sıcaklığı için  $H_{AC} = 10$  Oe iken AC kayıplarının frekansa göre değişimi.

Şekil 28, Bi:2223/Ag şerit için  $H_{AC} = 10$  Oe iken 20 ve 30 K 'de kayıpların frekans bağımlılığını göstermektedir. 20 ve 30 K sabit sıcaklıklarında frekansın bir fonksiyonu olarak AC kayıp eğrilerinde zirve gözlemlendi. Bu zirve veya maksimum değere karşılık gelen frekans değerinden çiftlenim zaman sabiti belirlenebilir. Çünkü  $\omega\tau = 2\pi f\tau = 1$  eşitliği mevcuttur [58]. Örneğin T=20 K de ölçülen pik yaklaşık  $f=1100$ Hz de gerçekleşmiştir. Dolayısı ile alan şerit yüzeyine paralel olarak yapılan 20 K deki ölçümden  $\tau = 145\mu s$  bulunur. Sıcaklık arttıkça bu değer azalacağı deneysel verilerden de anlaşılmaktadır. 30 K için bunun 1/3 değerine yani yaklaşık  $\tau = 50\mu s$  değerine düştüğü görülmektedir. Literatürde 77K için verilen değerlerle uyum göstermektedir.

Şekil 28'de frekansa karşı ölçülen  $\chi''$  eğrisi görülmektedir. Şekil 29'da sırasıyla 30K ve 20K sıcaklıklarıyla ilişkili olan  $\tau_{30}$  ve  $\tau_{20}$  farklı iki zaman sabiti için denklem (5) kullanılarak  $Q_c$  gösterilmektedir.

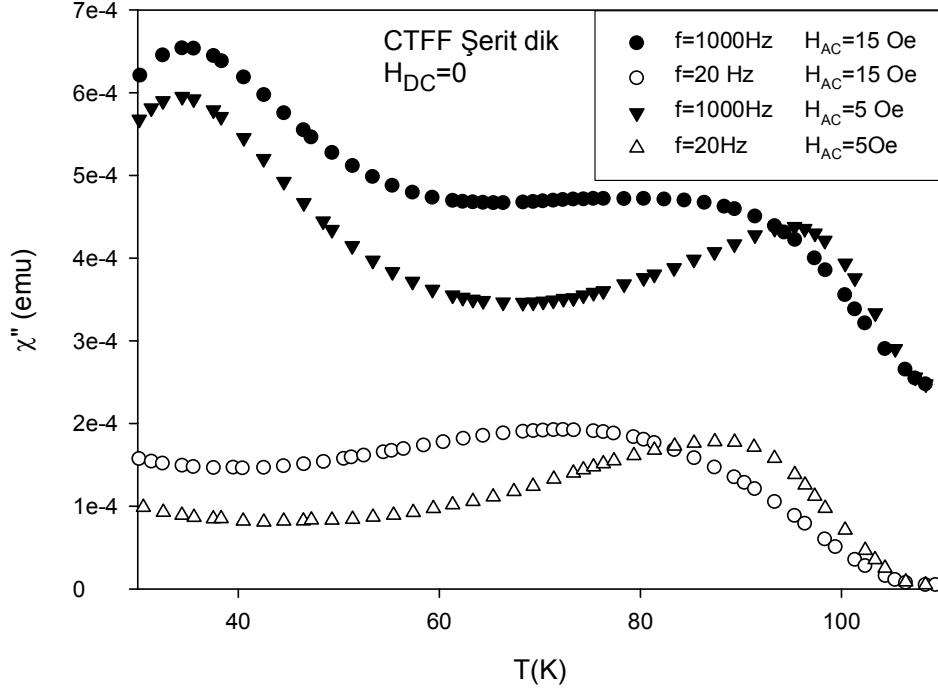


Şekil 29. Bi:2223/Ag şeritte  $T= 20K$  ve  $30 K$  sıcaklığı için denklem (5)' den elde edilen AC çiftlenim kaybının  $w \tau$  ' ya göre değişimi.

Dikkat edilirse  $\tau_{30} < \tau_{20}$  olarak  $20 K$  ve  $30 K$  sıcaklıklarında ve  $20 K$ ' deki etkin özdirenç  $30 K$  dekinden küçük olacağından deneysel ve hesaplanan eğriler arasında oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile yüksek frekans bölgesinde (maksimumun üzerinde) denklem (8)'den elde edilen sonuçlar arasındaki uyumsuzluk da çevrim başına toplam AC kayıplarının yüzey etkisi benzeri (skin-effect-like) frekans bağıllığı ile ilişkili olabilir [59, 60]. Görüldüğü üzere ölçülen (bükülmemiş-sarılmamış) numuneler için eddy akım ve çiftlenim kayıpları ayırt edilememektedir. Çünkü her ikisi de uzunluğun karesiyle orantılı ve dirençle ters orantılıdır ( her iki akım tipi de aynı matris içerisinden akmaktadır). Bu nedenle numunemizde gözlemlenen frekansa bağlı AC kayıplarını, eddy akım kayıpları ya da flamanlar arası çiftlenim kayıplarına atfediyoruz.

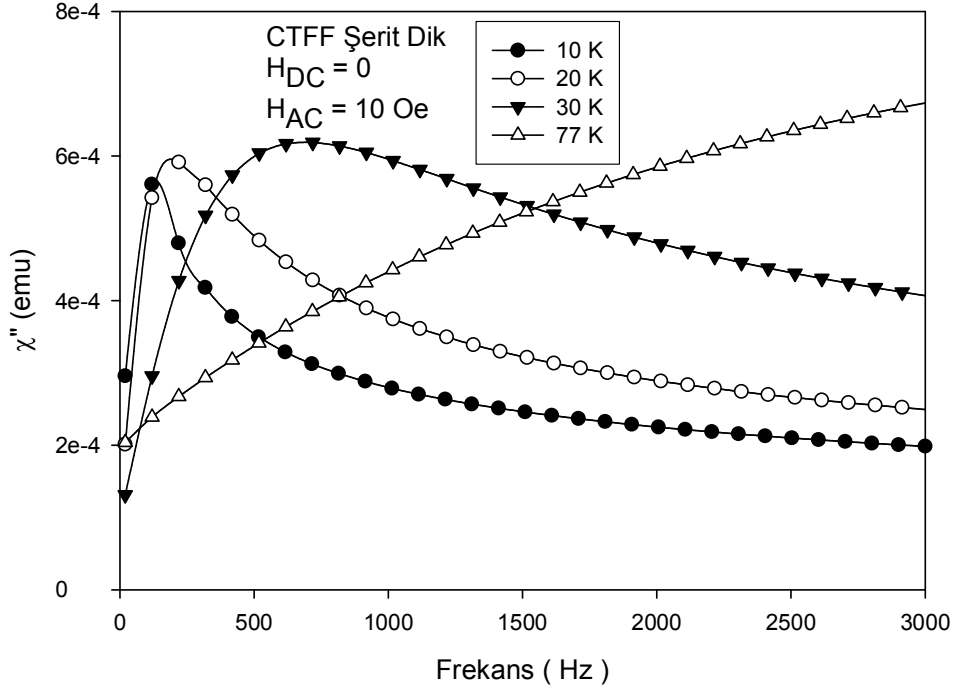
AC kayıplarının frekans bağıllığını CTFE şerit numunesinin geniş yüzeyi alana dik yöneldiği durumda araştırmak için aşağıdaki deneysel ve teorik çalışmalar gerçekleştirildi. Şekil 30,  $f=20 Hz$  ve  $1000 Hz$  frekanslarında,  $H_{AC}=5 Oe$  ve  $15 Oe$  AC alan genlikleri için AC alınganlığın sanal kısmının sıcaklık bağıllığını göstermektedir. Şekil 27'den farkı,

numunenin geniş yüzeyi manyetik alana dik olarak konumlandırılmıştır. Böylece sıcaklık, frekans, AC alan genişliğinin yanı sıra alanın numuneye göre yöneliminin etkisi araştırılmıştır. Frekans düşük olduğunda (20 Hz) histerezis kayıplarının baskın olduğuna dikkat edilmelidir. Ancak frekans 1000 Hz olduğunda AC alınganlığın sanal kısmı  $\chi''$  oldukça farklı davranış göstermektedir.  $\chi''$ 'deki maksimumlar dikkate alındığında eğriler iki kısımdan oluşmaktadır. Takacs ve arkadaşları [55, 56], pik değerinin üzerindeki sıcaklıklarda kayıpların frekansın artmasıyla arttığını ve pik sıcaklığının altındaki düşük sıcaklıklarda kayıpların frekans artışıyla azaldığını rapor ettiler. Ancak, incelenen numunedeki gözlemlere göre tüm sıcaklık aralığında AC kayıplarının frekansın (20 Hz'den 1000 Hz'e) artmasıyla arttığını göstermektedir. 1000 Hz'deki AC alınganlığın sanal kısmı  $\chi''$ , 20 Hz'deki AC alınganlığın sanal kısmı ile karşılaştırıldığında büyük oranda yukarı doğru kaymaktadır. Hatta geçiş sıcaklığının üzerinde (normal bölge) bile pozitif yönde kayma gözlemlendi. Halbuki histerezis kayıpları normal bölgede sıfır olmasını öngörmektedir. Dolayısı ile 1000 Hz gibi yüksek frekanstaki bu davranış Eddy akımı kayıplarına atfedilebilir. Diğer yandan,  $H_{AC}=5$  Oe ve 15 Oe için düşük sıcaklık bölgesinde (yaklaşık 35 K) ikinci pik gözlenmiştir. Bu yüzden geniş bir frekans aralığında ölçüm yapılmıştır. Frekansın etkisini araştırmak için, 20–5000 Hz frekans aralığında seçilen 4 farklı sabit sıcaklıkta (10, 20, 30, 77K), AC kayıplarının frekansa göre değişimi ölçüldü.



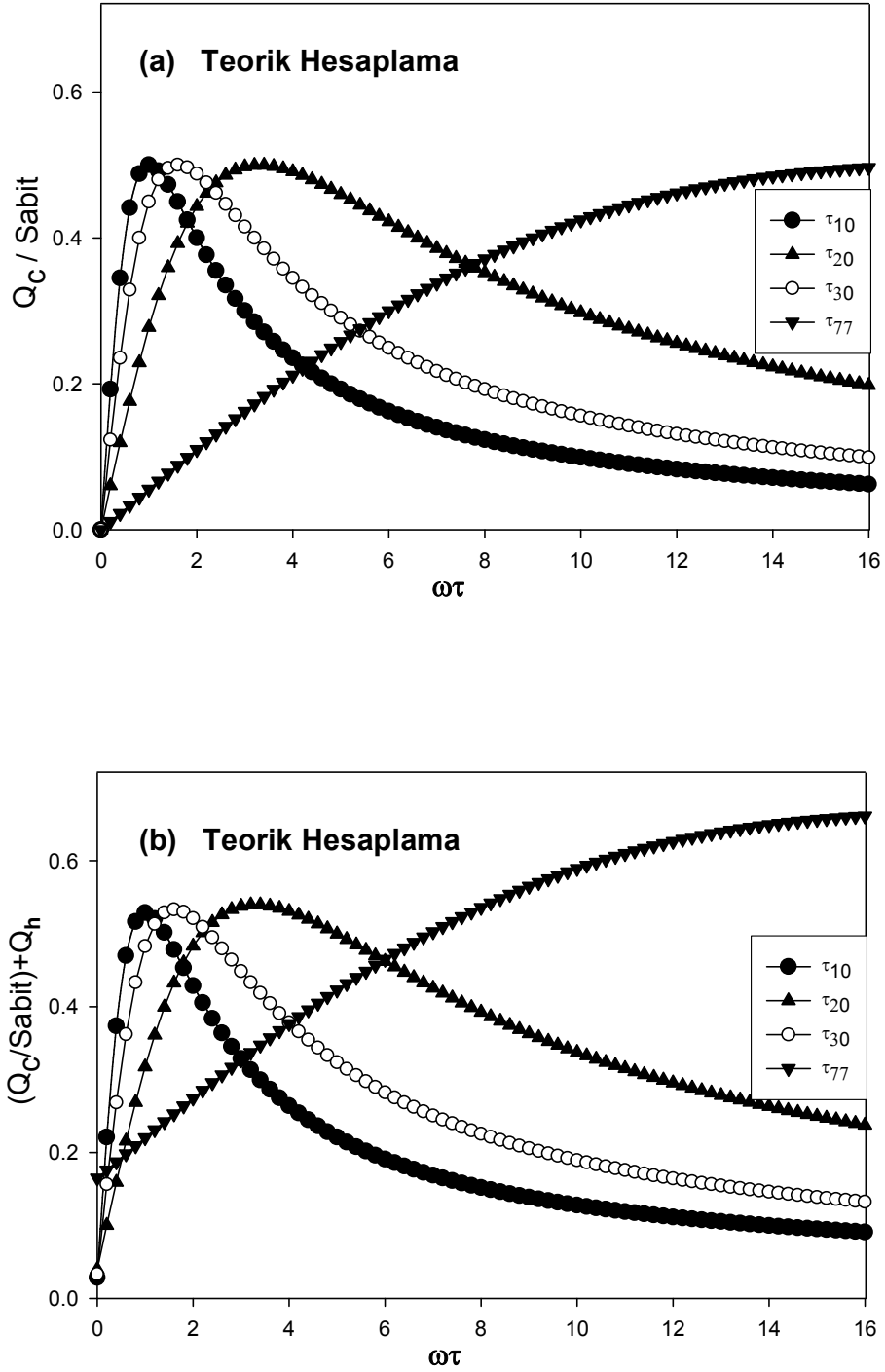
Şekil 30.  $f=20$  ve  $1000$  Hz ve  $H_{AC}=5$  ve  $15$  Oe için AC alınganlığın imajiner kısmının sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir.

Şekil 31, farklı sıcaklıklarda,  $H_{AC} = 10$  Oe,  $H_{DC} = 0$  Oe için AC alınganlığın imajiner kısmının frekansla değişimini göstermektedir. Şekilden görüleceği gibi düşük AC manyetik alanda sıcaklık arttıkça alınganlığın kayıp bileşeni olan  $\chi''$  nin maksimum değeri yüksek frekans bölgesine kaymaktadır. Daha önceki sonuçlarımıza benzer davranış bu alan yöneliminde de gözlenmiştir. Frekansın artması ile AC kayıplarının önce artması ve bir maksimumdan sonra azalması, eddy akım kayıpları veya az da olsa filamanlar arası çiftlenim kaybının etkisi olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca en düşük frekansta gözlenen sıfırdan farklı değer süperiletken filamanlarda histerezis kaybı katkısı olarak yorumlanmıştır. Bundan başka pikin yüksekliği sıcaklık artışıyla artmaktadır, bu da histerezis kaybının sıcaklığa bağlı katkısı ile açıklanabilir. Bunun için aşağıda tanımlanan teorik hesaplama yapıldı.



Şekil 31. Farklı sıcaklıklarda,  $H_{AC} = 10$  Oe,  $H_{DC} = 0$  Oe için AC alınganlığın imajiner kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir.

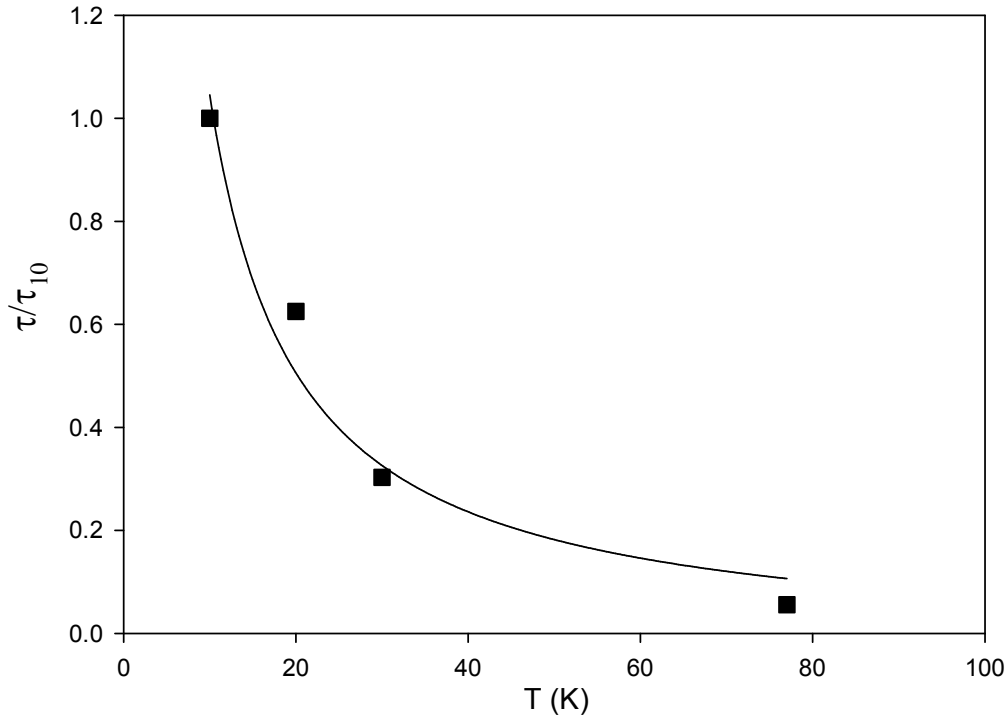
Denklem (5) 'den, denklem (8) 'e kadar yukarıda verilen açıklamalar dikkate alınarak yapılan hesaplamalar Şekil 32 (a)'da sunulmuştur. Şekil 32 (a)'da çiftlenim kayıpları denkleminde (Denklem (5)) 10, 20, 30 ve 77 K sıcaklıklarına karşılık gelen sırasıyla dört farklı zaman sabiti  $\tau_{10}$ ,  $\tau_{20}$ ,  $\tau_{30}$  ve  $\tau_{77}$  kullanılarak hesaplama yapıldı. Hepsini aynı grafikte göstermek için zaman sabitlerini  $\tau_{10}$ 'a bölerek bağıl zaman sabiti tanımlandı. Denklem (8) 'de kullanılan bağıl zaman sabitleri için  $\tau/\tau_{10}$ 'u 1, 1/1.6, 1/3.3 ve 1/18 değerlerini alarak 10 K, 20 K, 30 K ve 77 K için deneysel ve hesaplanan eğriler arasında iyi bir uyum eğrisi elde edildi. Bu, düşük sıcaklıklardaki etkin öz direncin yüksek sıcaklıklardakilerden daha az olması gerektiği gerçeği ile uyumludur. Zaman sabitleri için bu değerler sıcaklığın fonksiyonu olarak çizdirildiğinde, Şekil 33'de görüldüğü gibi birinci mertebeden ters orantılı bir bağımlılık gösterdiği görüldü.



Şekil 32. (a) Filamanlar arası çiftlenim kaybının teorik hesaplaması ve (b) Filamanlar arası çiftlenim kaybının histerezis kayıpları dahil ederek teorik hesaplaması. Şekil 31 ile karşılaştırıldığında her bakımdan iyi bir uyum elde edildiği görülmektedir.

Şekil 32(a)'de sunulan hesaplanmış eğriler Şekil 31'deki deneysel eğrilere oldukça benzer desen vermesine rağmen, hem maksimumlarda ve hem de en düşük frekanstaki (20 Hz) değerlerde bir uyumsuzluk vardır. Bu uyumsuzluğu düzeltmek için toplam kayba histerezis kaybı aşağıda tanımlandığı gibi dahil edildi.

Histerezis kaybı AC alınganlığın sanal kısmı ile ilişkili olduğundan, ilk önce AC alınganlığın teorik sanal kısmı  $\chi_{hys}$  hesaplandı. Amaç, frekans taraması esnasında toplam kayba, histerezis kaybının tahmin edilen katkısını bulmaktır. Bu nedenle, basitlik ve uygunluk için, kritik hal modeline dayalı hesaplamalarımızda sonsuz dilim yaklaşımı kullanıldı. Demanyetizasyon düzeltmesi hariç dilim (slab) ve alana dik dilim (strip) geometrisi arasındaki hesaplamalarda çok fark olmadığına dikkat edilmelidir. Paralel bir alanda süperiletken bir dilimin davranışı için öngörüler [61] ve dik bir alanda bir strip için hesaplamalar [62] literatürde verilmiştir. İki arasında AC alınganlığın sanal kısmı için çok büyük farklılık olmadığı, [63] 'de her iki hesaplamalar bir arada sunulmuş olarak gösterilmiştir.



Şekil 33. Zaman sabitinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 34, Denklem (17) 'deki farklı üs değerleri  $p=2.0$  ve  $p=1.5$  için basit modelimizin  $\chi_{hys}$  hesaplamalarının sonuçlarını sergilemektedir. İçteki şekil ilgili sıcaklık aralığı için hesaplanan verileri göstermektedir. 10, 20 ve 30 K için  $p=2.0$  ve  $p=1.5$  alınarak yapılan hesaplarda fazla fark yok iken 77K de her ikisi kayda değer farklılık göstermiştir. Büyük içi dolu kareler ve içi boş kareler Şekil 32 (b)'de kullanılan verilere karşılık gelmektedir ve 10–77 K sıcaklık aralığı için  $\chi_{hys}$ 'nin yükselişine dikkat çekmek için gösterilmektedir. En iyi uyum sağlayacak eğriyi bulma işleminde üs için  $p=1,5$  seçilerek oluşturulan eğrinin  $p=2$  seçilerek oluşturulan eğriden daha iyi uyum sağladığı görülmektedir. Bu işlem sırasında  $H_*$  nüfuz alanı olmak üzere  $h_{AC} = H_{AC} / H_* = 0.05$  olarak normalize edilmiş alan genliği kullanılmıştır. Bu hesaplamalarda  $n=0.3$  seçilmesinin nedeni, 20, 30 ve 77 K 'de ölçülen M-H çevriminde alan üssü Bean tipi ( $n=0$ ) ile Yasukochi tipi ( $n=0.5$ ) arasında bulunmaktadır.

Şekil 31'de gösterilen deneysel verilere, Şekil 32 (b)'de sunulan en iyi uyum eğrilerinde kullandığımız, 10 K, 20 K, 30 K, ve 77 K'e karşılık gelen teorik değerler (içi boş kareler) aşağıdaki gibi kullanıldı.

Deneysel verilerimizde en düşük frekans 20 Hz'de 77 K için  $\chi''$  'nin sıfırdan farklı değeri  $2.04 \times 10^{-4}$  emu'dur ve 30 K için  $\chi''$  'nin maksimum değeri  $6.19 \times 10^{-4}$  emu'dur (bakınız Şekil 31).  $Q_c/sabit$ 'in maksimumu, Şekil 32 (a)'da görüldüğü gibi, tüm farklı zaman sabitleri için 0.5 'tir. Buna ek olarak, Tablo 2'de verildiği gibi, her sıcaklık için hesaplanmış  $\chi_{hys}$  değerlerini kullandık. Deneysel verilere en iyi uyumu elde etmek için, toplam kayba ilave edilen  $Q_h$  histerezis kaybı, ( $Q_c/sabit$  boyutlarında) şu şekilde dahil edildi:

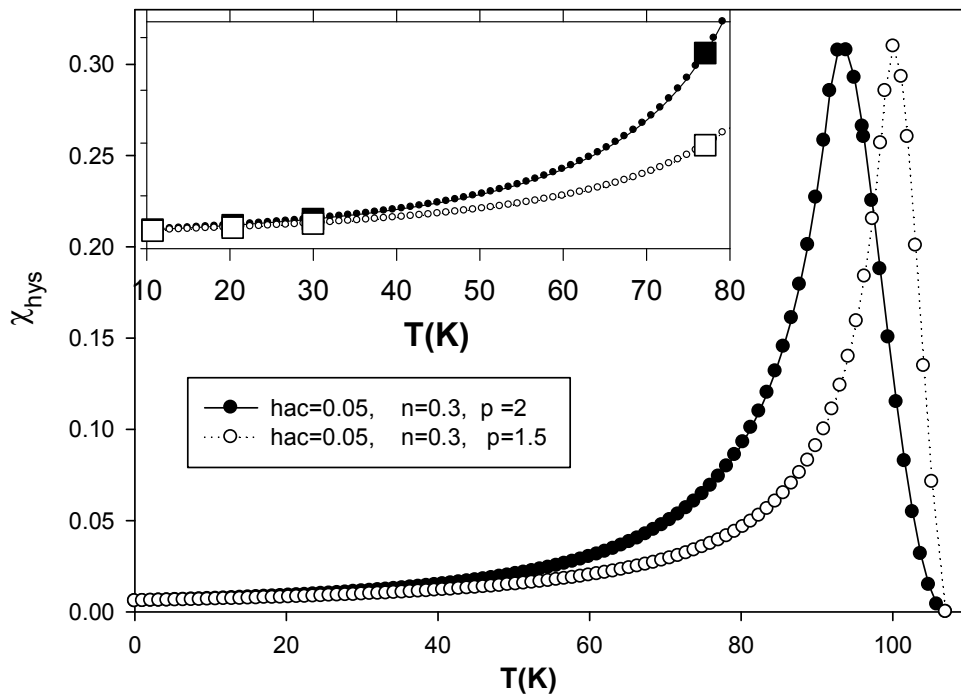
$$Q_h = 0.5 \left( \frac{2.04}{6.19} \right) \left( \frac{\chi_{hys}(T)}{\chi_{hys}(77)} \right) \quad (24)$$



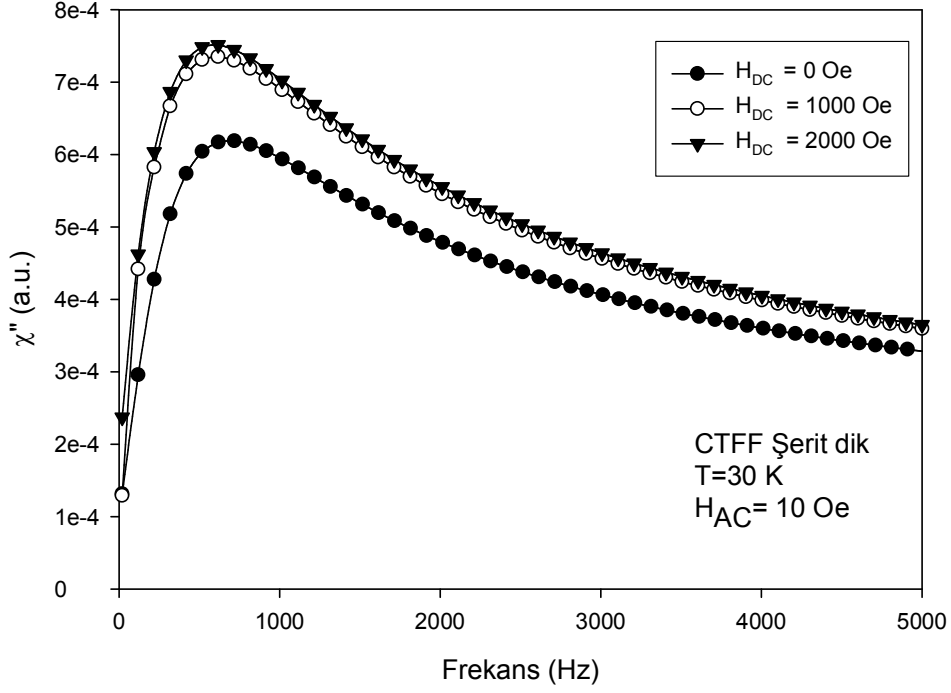
Tablo 2. Şekil 32 (b)'de sunulan hesaplamalarda kullanılan bazı parametreler.

T(K)	$\tau/\tau_{10}$	$\chi_{\text{hys}}$ (p=1.5)	$\chi''_{\text{max}}$	$\chi''_{20}$ (f=20 Hz)
10	1	$6.8031 \times 10^{-4}$	$5.6066 \times 10^{-4}$	$2.9567 \times 10^{-4}$
20	1/1.6	$7.9679 \times 10^{-4}$	$5.9123 \times 10^{-4}$	$2.0099 \times 10^{-4}$
30	1/3.3	$9.5076 \times 10^{-4}$	$6.19 \times 10^{-4}$	$1.3119 \times 10^{-4}$
77	1/18	0.0392	$7.5315 \times 10^{-4}$	$2.04 \times 10^{-4}$

Toplam kayba  $Q_h$  histerezis kaybı teriminin ilave edilmesinin, Şekil 32(b)'de gösterildiği gibi deneysel verilere iyi bir uyum verdiği görülebilir. Bu, hem histerezis kaybının hem de çiftlenim ve/veya Eddy akım kaybının AC kayıp verilerinde önemli rol oynadığını göstermektedir. Aynı zamanda, ölçülen bükülmemiş (untwisted) numuneler için Eddy akım ve çiftlenim kayıplarının her ikisi de uzunluğun karesi ile doğru ve öz direnç ile ters orantılı olduğundan, ayırt edilemezler (her iki tip akım da aynı matris boyunca akar).



Şekil 34. Histerezis kayıplarının bir ölçüsü olan  $\chi_{\text{hys}}$ 'nin sıcaklığa göre p=2 ve p=1.5 alınarak hesaplanan veriler. İçteki şekil 10–80 K aralığını göstermektedir.



Şekil 35.  $T=30$  K'de ve  $H_{AC} = 10$  Oe iken, seçilen DC alan değerleri için AC alınganlığın sanal kısmının frekansla değişimi.

Şekil 35, DC alan varlığında  $H_{DC} = 1000$  Oe ve  $2000$  Oe,  $H_{AC} = 10$  Oe için  $30$  K'de  $20$  Hz'den  $5$  kHz'e frekans taraması altında numunedeki AC kayıp davranışını göstermektedir. Histerezis kayıp hesabından beklendiği ve Şekil 35'deki deneysel verilerden görüldüğü gibi,  $H_{AC} = 10$  Oe' e karşılık gelen pik sıcaklığının altındaki sıcaklıkta ( $30$  K), DC alan arttıkça histerezis kaybı artmaktadır. Bu bizim gözlemimizdeki durumdur ki  $H_{DC}$  0'dan  $1000$  Oe ve  $2000$  Oe 'e artırıldığında, AC kaybı, frekans taraması boyunca artmaktadır. Ayrıca yüksek DC alanın varlığında azda olsa akı sürüklenmesi kaybı ya da akı akışı kaybı katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Bundan başka, AC kayıptaki artma miktarı,  $\omega\tau = 1$  'e karşılık gelen pik frekansı civarında en büyük olduğu görülmektedir.

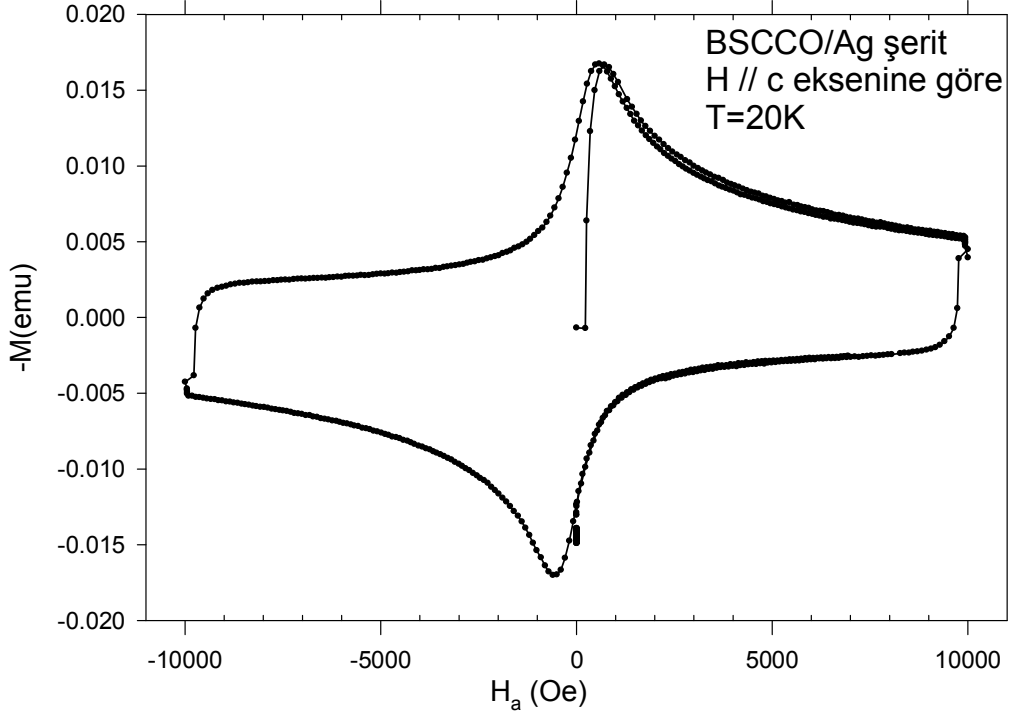
#### 1.1.1.4. DC Manyetizasyon Ölçümleri

II. Tip Süperiletken malzemelerde numunenin manyetik davranışını çivileme (pinning) mekanizması belirlemektedir. DC manyetizasyon ölçümleri de çivileme mekanizması dolayısı ile kritik akım yoğunluğu hakkında bilgi verdiği için, bu kesimde DC manyetizasyon ölçümlerine yer verilecektir.

Manyetik gevşeme ya da akı sürüklenmesi ölçümleri süperiletkenlerin kayıpsız akım taşıma kapasitesini belirlemede önemlidir. Isıl aktivasyon işlemi ilk defa 1962'de Kim [38] tarafından II. Tip süperiletken içi boş silindir tüpte gözlemlendi. Akı sürüklenmesi olarak isimlendirilen bu kayda değer olayın açıklaması 1962'de P.W. Anderson [64] tarafından önerildi. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin keşfinden kısa süre sonra, bu malzemelerde sadece 77K'de değil 4.2 K 'de de normal iletkenliğe doğru değişim (bozulma) oranı bulundu. İlave olarak, bu malzemelerde, değişim oranı sıcaklıkla belirgin biçimde zamanla logaritmik bağımlılıktan sapma gözlenir. Bulachkov [65] manyetizasyonun  $I_{nt}$  'ye göre çiziminden elde edilen sonuçlar için yüzey gevşemesi ve bulk (yığın - külçe) gevşemesi arasındaki olayı rapor etmiştir.

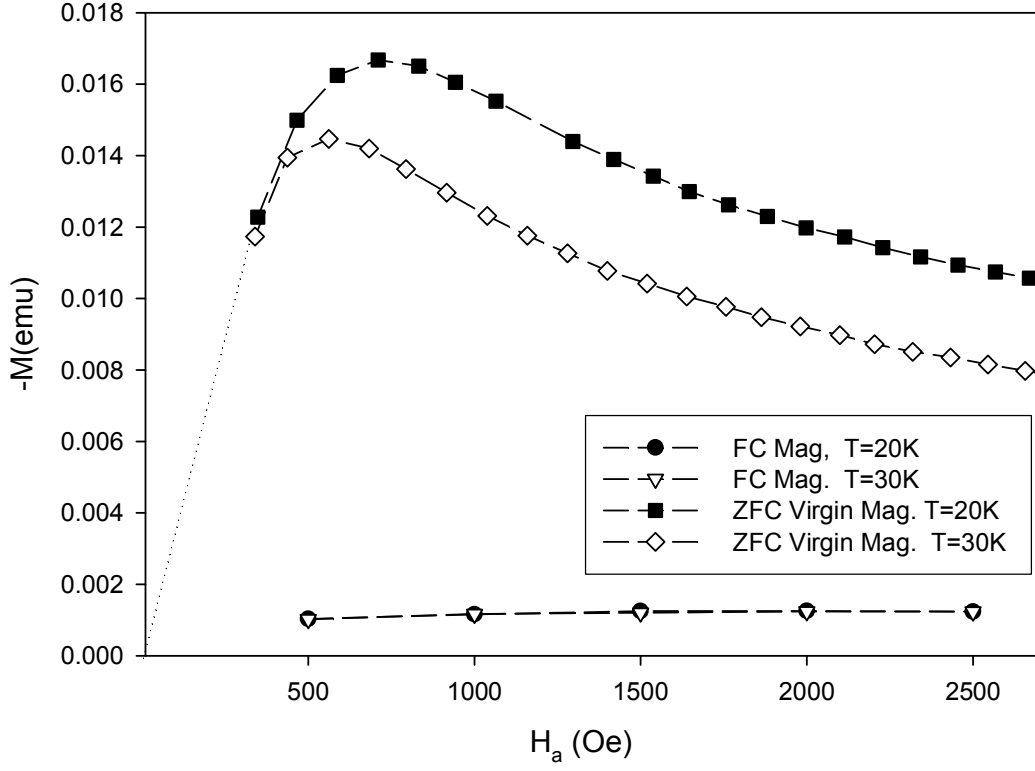
Yoğun teorik ve deneysel çalışmalar bu olayı 1962'den beri akı sürüklenmesi üzerine farklı çivileme merkezlerinin etkisini [66–82] göstermiştir. LeBlanc ve arkadaşları [67], Kwasnitza ve arkadaşları [66], Beasley ve arkadaşları [68], Shi ve arkadaşları [69] gözlemlerini tekrar üretebilmek için manyetik gevşemenin basit bir modelini geliştirdiler. II. Tip süperiletkenlerde tuzaklanan alanın kalıcı manyetizasyonunun değişim oranına etkisi referans [70] 'de açıklanmıştır.

Bir malzemenin tersinirliğinin, çivileme etkisine ve kritik akım yoğunluğuna bağlılığını şöyle ifade edebiliriz. Çivileme yoksa yani  $J_c = 0$  ise malzeme tersinirdir. Çivileme normal şiddette, yani  $J_c > 0$  ise malzeme yarı tersinirdir. Bu durumda yüzeyde dolaşan Meissner akımı da etkili olabilir ve manyetizasyon eğrisinin diyamanyetik bölgeye kaymasına neden olur [83]. Çivileme çok kuvvetli ise numune tersinmezdir. Bu durumda yüzeyde dolaşan Meissner akımı ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu bağlamda yüksek akım taşıma kapasitesine sahip gümüş kılıflı BSCCO (2223) şerit malzemeleri için hem sabit sıcaklıkta M-H histerezis ölçümü hem de seçilen farklı alanlar altında FC - ZFC işlemi ile manyetizasyon - sıcaklık ölçümü yapıldı. Tuzaklanan manyetizasyonun zamanla gevşemesi yani akı sürüklenmesi ve tuzaklanan manyetizasyonun maksimum alanla ( $H_{çevrim}$ ) değişimi araştırıldı. Ayrıca tersinmezlik çizgisi belirlendi.



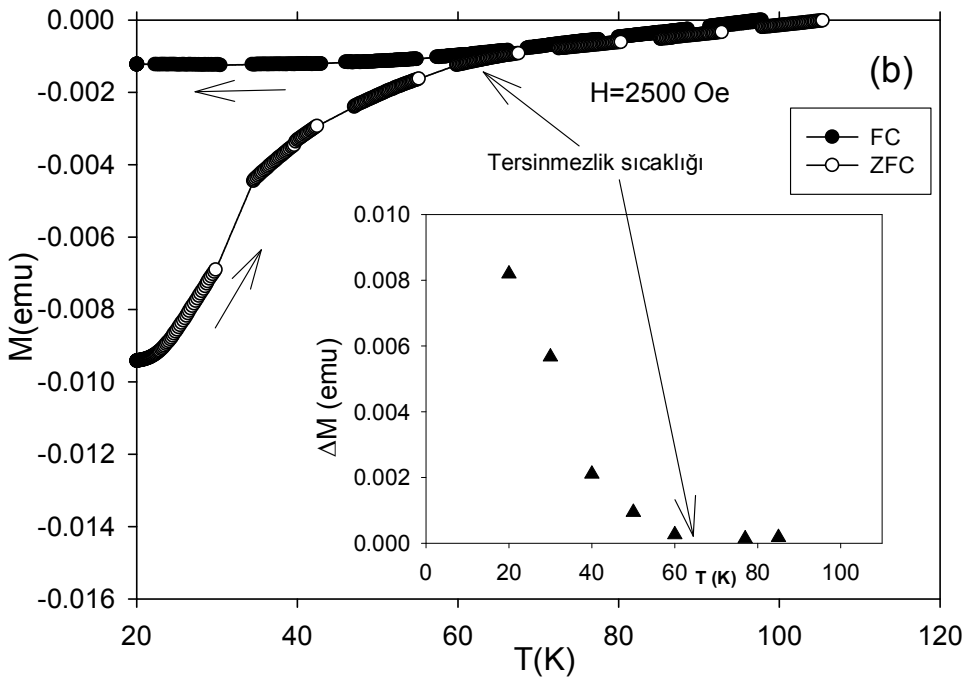
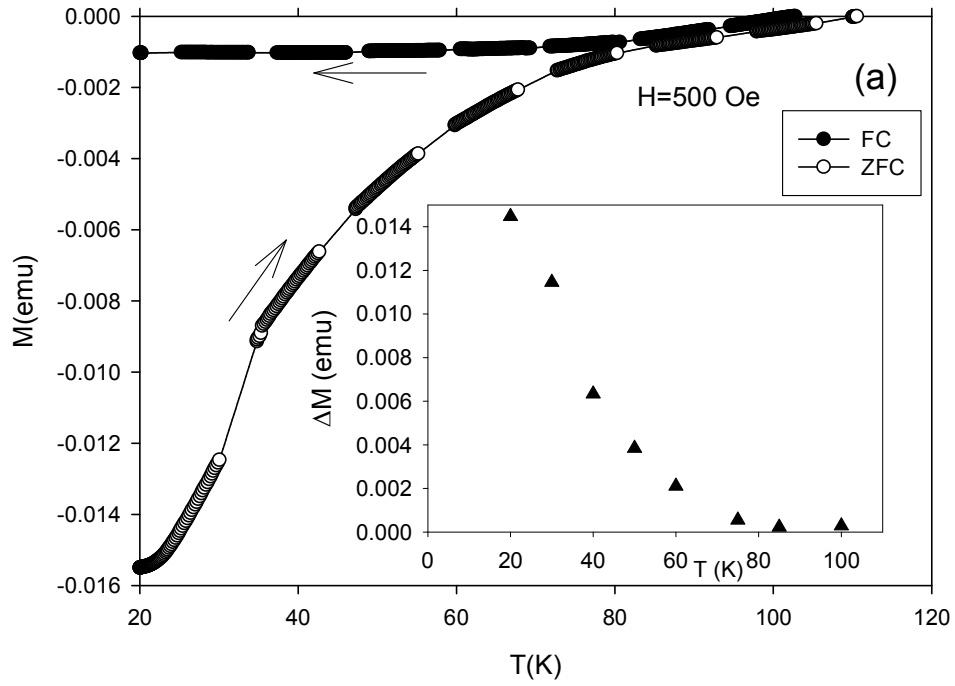
Şekil 36. Bi:2223/Ag CTFF şerit numunesinin geniş yüzeyi alana dik yani c eksenine alana paralel yönelimde 20 K sıcaklığında M-H histerezis eğrisi.

Şekil 36, 20 K sıcaklığında Bi:2223/Ag CTFF şerit numunesinin geniş yüzeyi alana dik yani c eksenine alana paralel yönelimde M-H histerezis eğrisini göstermektedir. Görüldüğü gibi M-H eğrisi, diyamanyetik çeyreğe doğru biraz kaymıştır. Bunun nedeni süperiletken numunenin etrafında Meissner perdeleyici yüzey akımının dolanıyor olmasıdır. Bu sonuç, şekil 37’de sunulan alan altında soğutma işlemindeki farklı sıcaklıklarda (20 ve 30 K) farklı alanlarda ölçülen manyetizasyon  $M_{FC}$  değerlerinden de çıkartılabilir.



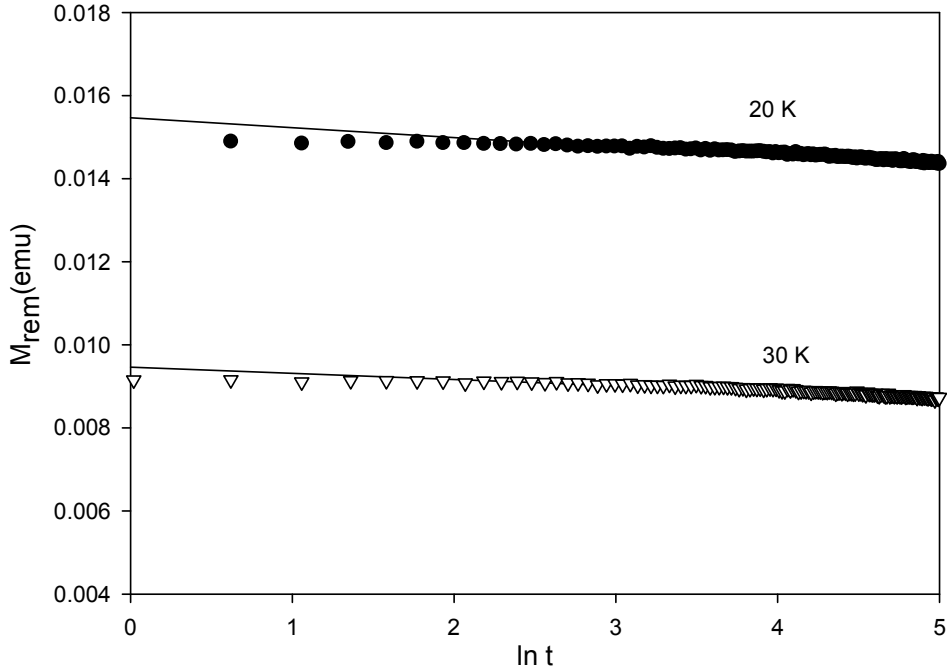
Şekil 17. Farklı iki sıcaklıkta ZFC işleminden sonra ilk (virgin) manyetizasyon eğrisi ve FC işlemi ile ölçülen manyetizasyon  $M_{FC}$  verileri.

Birinci girme alanı  $H_*$ , 20 K 'de yaklaşık 800 Oe değerindedir. Bu şekil 37 'den de doğrulanabilir. Manyetizasyonun pik değeri, pikin gerçekleştiği alan değeri ve girme alanı, sıcaklığın 20K den 30K'e çıkarılması ile azaldığı görülmektedir. Bu II. tip süperiletkenlerde çok iyi bilinen, çivileme (pinning) şiddetinin dolayısı ile kritik akım yoğunluğunun sıcaklık ile ters orantılı olmasının bir yansımasıdır.



Şekil 38. (a) 500 Oe (b) 2500 Oe 'lik bir alanda elde edilen alan altında soğutma (FC) manyetizasyonu  $M_{FC}$  ve alansız (sıfır alan) soğutma manyetizasyonu  $M_{ZFC}$  eğrileri.

Şekil 38 (a) 500 Oe (b) 2500 Oe 'lik bir alanda elde edilen alan altında soğutma (FC) manyetizasyonu  $M_{FC}$  ve alansız (sıfır alan) soğutma manyetizasyon  $M_{ZFC}$  eğrilerini göstermektedir. Alansız (sıfır alan) soğutma işleminde (ZFC) , yerin manyetik alanı ihmal edilirse, numune 120 K 'den ( $T_c$  'nin üzeri bir sıcaklık) istenen bir sıcaklığa soğutuldu ve sonra seçilen ve şekillerde verilen alan uygulandı. Bu durumda verilen alan uygulanıp sıcaklığın artması ile ölçülen manyetizasyon  $M_{ZFC}$  olarak kaydedildi. Şekilde ok yönü verilerin ısıtılırken alındığına işaret etmektedir. FC işleminde ise, kritik sıcaklığın üzerinde (120K) iken uygulanan ve şekilde verilen alanın varlığında numune soğutuldu.  $M_{FC}$  ile gösterilen manyetizasyon ok yönünden de anlaşılacağı gibi numune soğutulurken ölçüldü. Hem  $M_{FC}$  ve  $M_{ZFC}$  aynı grafikte çizildiğinde iki eğrinin buluştuğu nokta tersinmezlik sıcaklığını  $T_{irr}$  vermektedir. Bu işlem çeşitli alan uygulayarak tekrarlandığında tersinmezlik çizgisi elde edilebilir. Şekil 38'in içindeki şekilde  $\Delta M = M_{FC} - M_{ZFC}$  olarak tanımlanan nicelik seçilen farklı sıcaklıklar için çizildiğinde, seçilen alana karşılık gelen  $T_{irr}$  ,  $\Delta M = 0$  olduğu sıcaklık olarak, bir başka açıdan teyit edilebilir.

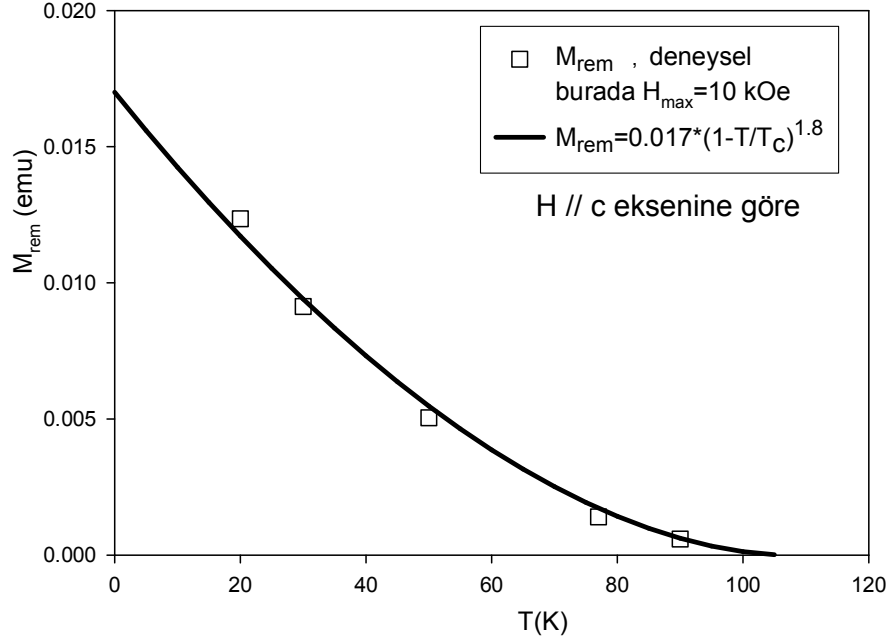


Şekil 39. CTFF şerit numunesinde alan şeridin geniş yüzeyine dik yöneliminde 20K ve 30K sıcaklığında yeterince yüksek alan (10 kOe) uygulanıp sonra alan sıfırlandığında tuzaklanan manyetizasyonun manyetik gevşeme eğrisi.

AC kayıplarını analiz ederken akı sürüklenmesi kaybı olup olmadığını anlamak için kullanılacak yöntemlerden biri herhangi bir manyetizasyon değerinin zamanla ne hızla değiştiğini araştırmaktır. Değişim mekanizmasının akı çizgisi demetlerinin ısı yolla hareketinin sonucu [64] olduğuna inanılır ve yüksek gevşeme oranı (yüksek sıcaklıklarda) akı sürüklenmesinin yanı sıra küçük uyum uzunluğunun sonucudur. Akı yoğunluğu profili tekdüze (uniform) olduğunda, aktivasyon enerjisi ya da aktivasyon engeli olarak isimlendirilen U derinliğine sahip çivileme potansiyel kuyusundan akı çizgilerinin kaçış oranı, uygun bir zaman aralığında ve uzaysal boyutta potansiyel kuyuları tarafından yakalanma oranı ile dengededir. Oysaki  $\Delta U$  miktarı kadar düşük potansiyel kuyusunun bir tarafı ile aynı miktardaki yüksek tarafındaki bariyerde indüklenen elektrik akımları tarafından bir akı yoğunluğu gradyenti üretilir. Böylece düşük akı yoğunluğu tarafında  $e^{+\frac{\Delta U}{kT}}$  miktarı kadar artışla ve yüksek tarafta  $e^{-\frac{\Delta U}{kT}}$  azalmasıyla kaçış olasılıkları değiştirilir. Böylece akı çizgilerinin net sürücü hareketi ısı dalgalanmaya ve akı yoğunluğunda düşüşe yol açar. Bundan dolayı akı yoğunluğu (B) profillerinin “gevşemesi” akı yoğunluğu gradyentinin hızlıca düşmesine neden olacaktır. Olaylar bu ilişki içerisinde gerçekleşeceği için,  $dB/dx$  'in azalmasının nedeni olarak akım yoğunluğu (J) azalacağından akı sürüklenmesi oranı düşecektir. Bu yüzden  $\Delta U$  gittikçe küçülecektir. Bilindiği üzere  $\Delta U$ , akı yoğunluğu (B), kritik akım yoğunluğu (J) ve sıcaklık (T) 'ye bağlıdır.

Şekil 39, CTFF şerit numunesinde alan şeridin geniş yüzeyine dik yöneliminde 20K ve 30K sıcaklığında  $H_{\text{çevrim}}=10$  kOe uygulanıp sonra alan sıfırlandığında tuzaklanan manyetizasyonun manyetik gevşeme eğrisini göstermektedir. Logaritmik bir zaman bağıllığı olduğu görülmektedir [64, 84]. Bu grafikten aktivasyon enerjisi belirlenebilmektedir. Örnek olarak 20 K sıcaklığındaki akı gevşemesi verilerinden aktivasyon enerjisi  $E_a=200$  meV olarak tahmin edilmiştir. 120 s 'lik bekleme süresindeki manyetizasyon değişikliği, AC alınganlık ölçümlerindeki frekansla karşılaştırılırsa, Akı sürüklenmesi kaybı diğer AC kayıplarına göre ihmal edilebilir.





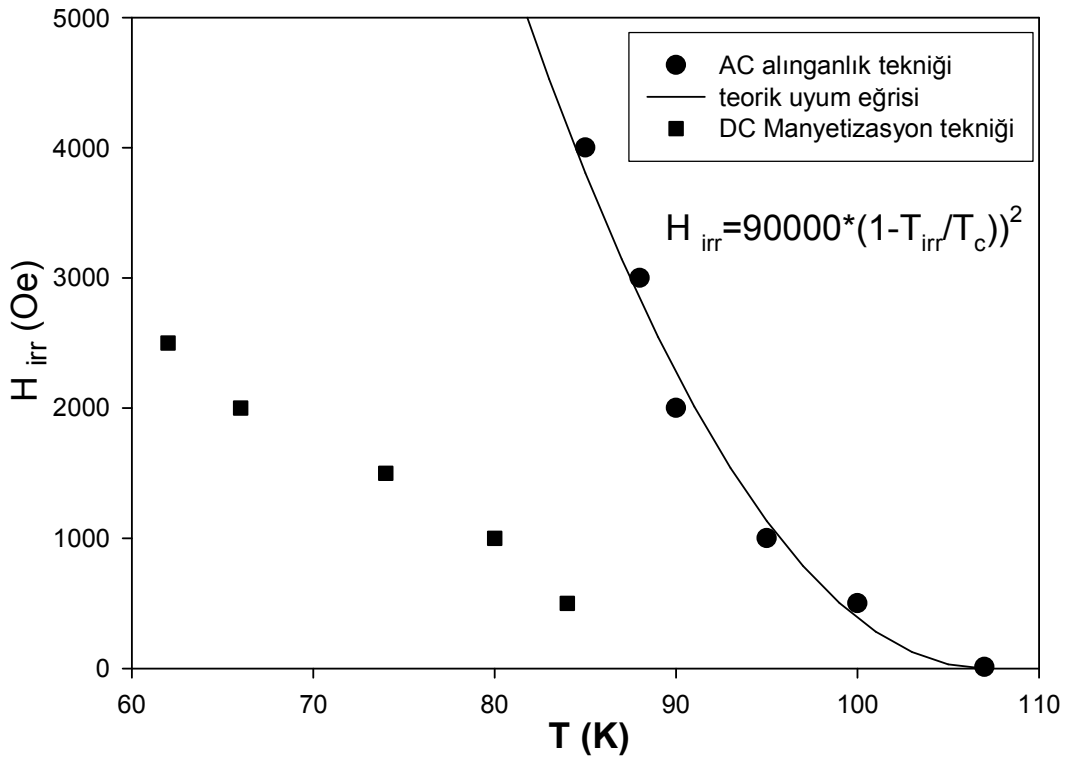
Şekil 40. CTFF şerit numunesinde alan şeridin geniş yüzeyine dik yöneliminde tuzaklanan manyetizasyonun  $M_{rem}$  sıcaklığa göre değişimi.

Kritik akım yoğunluğu hem girme alanı  $H^*$  hem de  $M_{rem}$  ile ilişkili olduğu için bu niceliklerin sıcaklıkla değişimini belirlemek, kritik akım yoğunluğunun sıcaklıkla değişimini belirlemek demektir. Bu amaçla 5 farklı sıcaklıklarda ölçülen  $M_{rem}$ , Şekil 40'da gösterilmektedir. Bu verilere uyum eğrisini hesapladığımızda kritik akım yoğunluğunun sıcaklık bağılılığı  $J_c = J_{c0}(1-T/T_c)^{1.8}$  olarak tahmin edilmiştir.  $p=1.8$  değerinin histerezis kayıplarında hesapladığımız  $p=1.5$  ve  $p=2.0$  değerleri arasında olması, hem AC alınganlık (bakınız Şekil 32 (b) ve Şekil 34) hem de DC manyetizasyon yöntemi ile aynı sıcaklık parametresinin bulunması, analizin başarılı olduğuna işaret etmektedir.

#### 1.1.1.5. Tersinmezlik Çizgisi

Şekil 41'deki tersinmezlik çizgisi, şekil 36 ve 38 'den elde edildi. Burada iki farklı metod kullanılmıştır. Bunlardan birincisi AC alınganlık metodu ile yani sabit bir AC alan ile çeşitli DC alanın uygulanması durumunda AC alınganlığın sıcaklıkla değişimindeki pik veya onset sıcaklıklarından belirlenen ve diğeri ise, sabit bir alan altında FC - ZFC işlemi

ile Şekil 38 'in açıklamasında tanımlanan manyetizasyon-sıcaklık değişimi ölçümlerinden belirledi. Fark edilebileceği gibi AC alınganlık metodundan bulunan tersinmezlik sıcaklığı DC manyetizasyondan bulunandan daha yüksek sıcaklık bölgesindedir. Bu kayma akı çizgelerinin ürettiği viskoz dağılıma atfedilebilir. AC alınganlık tekniğinden bulunan Tersinmezlik çizgisini hesaplamalarımızla elde edebilmek için  $T_c=107$  K ve  $H_{irr} (Oe) = 90000 (1-T_{irr}/T_c)^2$  parametreleri seçilmiŐtir.



Şekil 41. İki farklı yöntemle AC alınganlık ve DC Manyetizasyon yöntemi ile belirlenen tersinmezlik izgisi (IL).

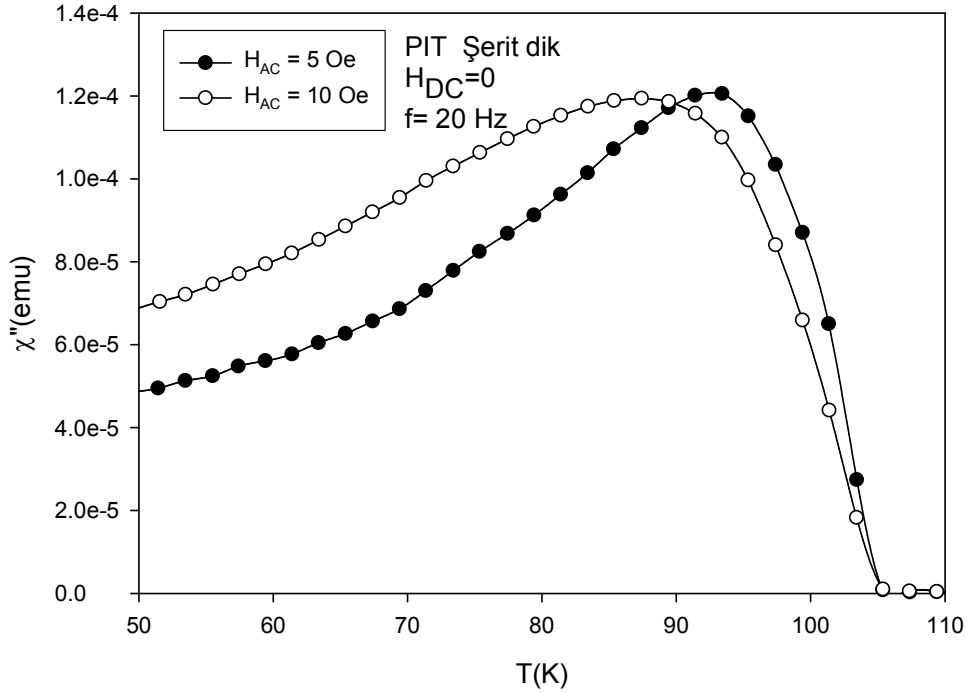
## 1.2. PIT Numunesine Ait Deneysel Ölçümler ve Analizleri

### 1.2.1. AC Alınganlık Ölçümleri

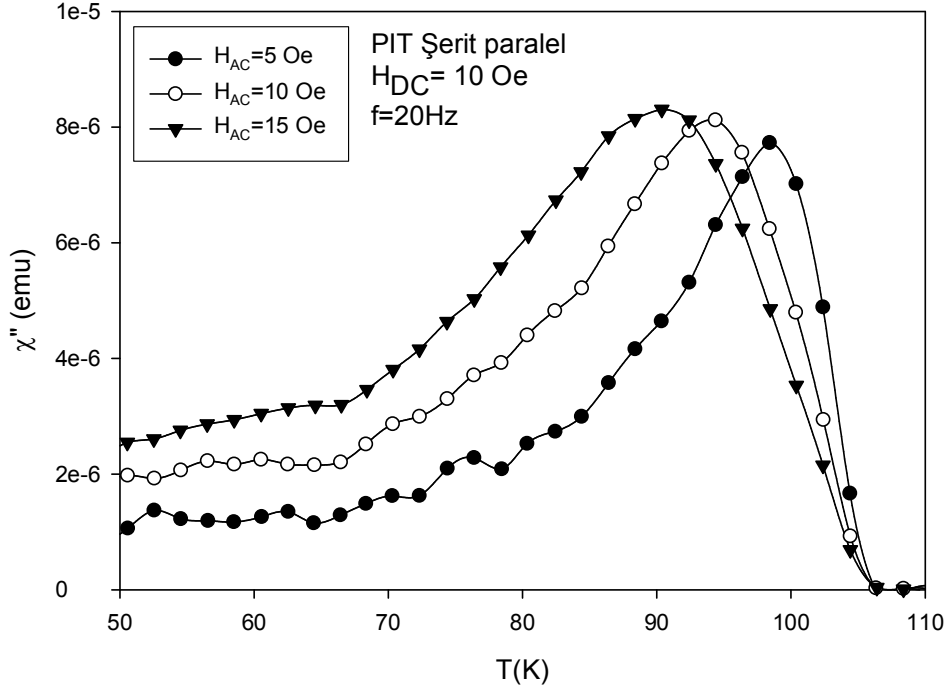
#### 1.2.1.1. AC Kayıpların Sıcaklık ve Alan Bağlılığı

Bu kesimde, PIT metodu ile üretilmiş şerit numune için histerezis kayıpların bir ölçüsü olan alınganlığın sanal bileşeninin sıcaklığa göre değişimi, şerit yüzeyine göre manyetik alanın paralel ve dik yöneliminde, DC manyetik alanın varlığında ve yokluğundaki ölçümleri incelenmiştir.

Şekil 42'de, PIT tekniğiyle üretilmiş şerit numunesi için, manyetik alan şerit yüzeyine paralel yönelimde olduğunda, Şekil 43'de ise manyetik alan şerit yüzeyine dik uygulanması sonucu sırasıyla sabit frekansta ( $f = 20$  Hz) ve DC manyetik alan büyüklüğü  $H_{dc} = 0$  ve  $H_{dc} = 10$  Oe için AC kayıp piklerinin sıcaklık ve alan bağlılığını göstermektedir.



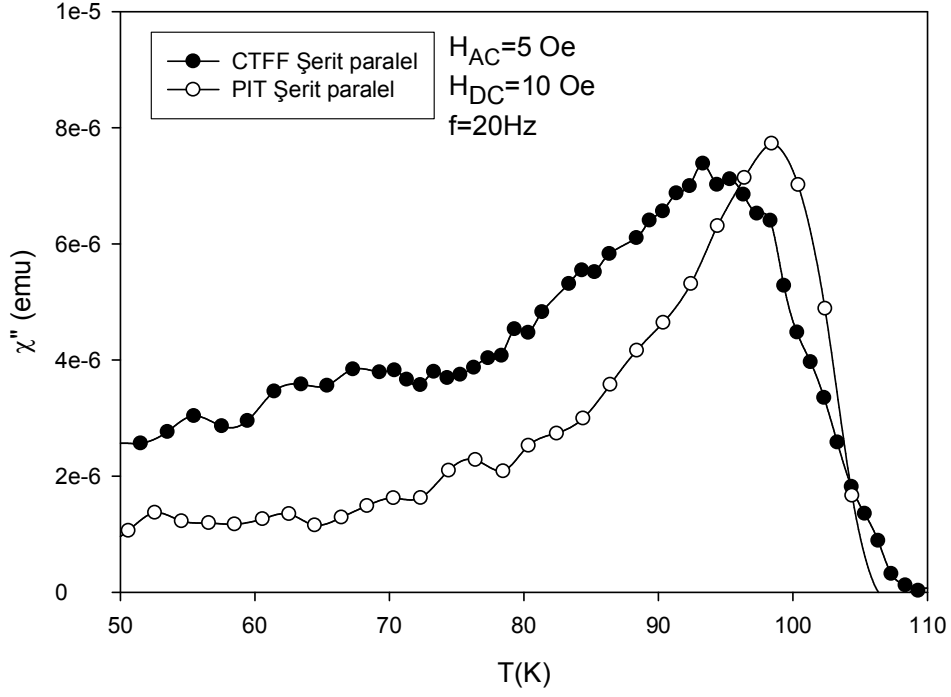
Şekil 42.  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=0$  alan büyüklüğünde seçilen AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine diktir.



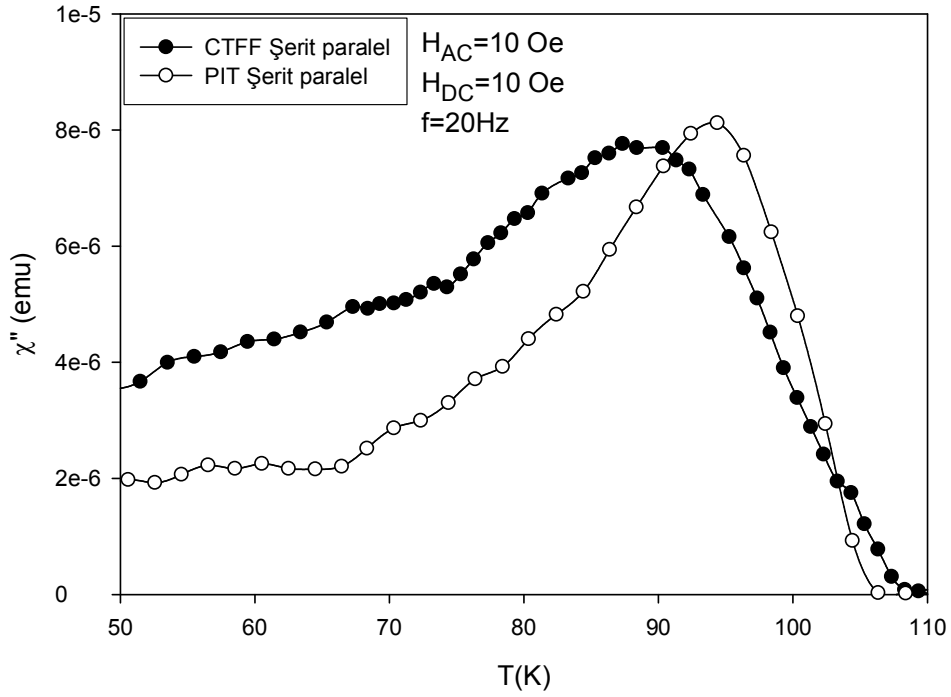
Şekil 43.  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=10$  Oe alan büyüklüğünde farklı AC alan genlikleri için AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şerit yüzeyine paraleldir.

PIT şerit numunesi için, CTFF şerit numunesi ile benzer davranışı sergilemekte olup DC alan varlığında pik yüksekliklerindeki ve pik sıcaklıklarındaki kayma miktarının değişimi gözlenebilmektedir. Ayrıca manyetik alanın şeridin düz yüzeyine göre dik yönelimindeki ölçümler paralel yönelimdeki ölçümlere göre pik sıcaklıkları daha düşüktür.

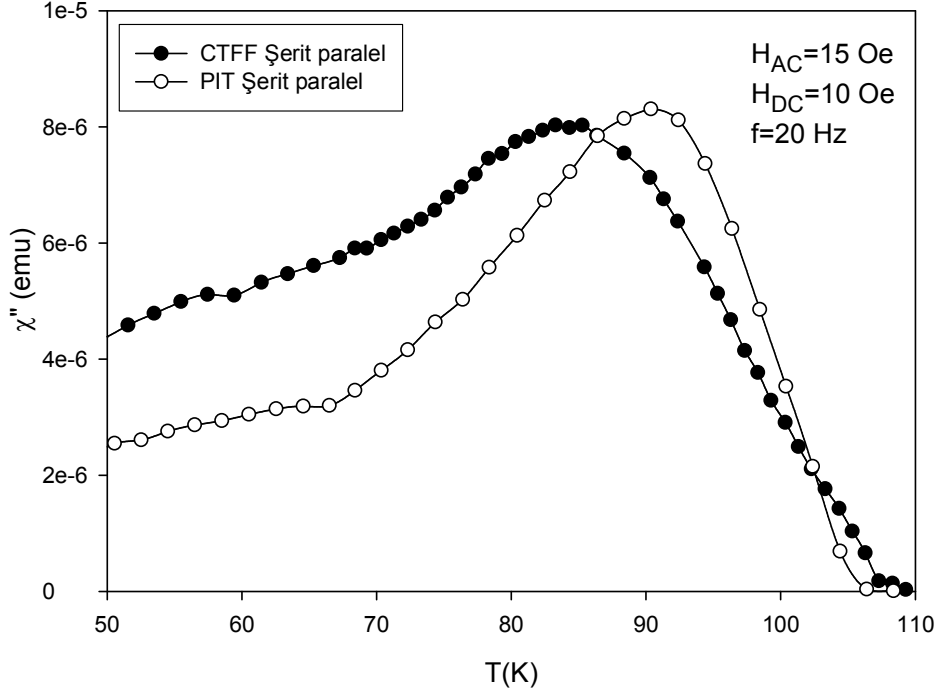
Şekil 44, 45 ve 46 'da CTFF ve PIT tekniğiyle üretilmiş şerit numunelerinin alanın numune yüzeyine göre paralel yönelimine bağlı olarak sabit frekansta ( $f = 20$  Hz) ve sabit DC manyetik alan büyüklüğünde ( $H_{DC} = 10$  Oe) pik sıcaklıklarının alan bağılılığını farklı AC alan genliklerine göre değişimi incelenmiştir.  $\chi''$  (T) deki pikler alan genliğinin artmasıyla düşük sıcaklıklara kaymaktadır.



Şekil 44. Farklı üretim tekniğine sahip şerit numunelerin,  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=10$  Oe ve  $H_{AC}=5$  Oe AC alan genliği ve Manyetik alan şerit yüzeyine göre paralel yönelimde uygulandığında AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi.



Şekil 45. Farklı üretim tekniğine sahip şerit numunelerin,  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=10$  Oe ve  $H_{AC}=10$  Oe AC alan genliği ve Manyetik alan şerit yüzeyine göre paralel yönelimde uygulandığında AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi.

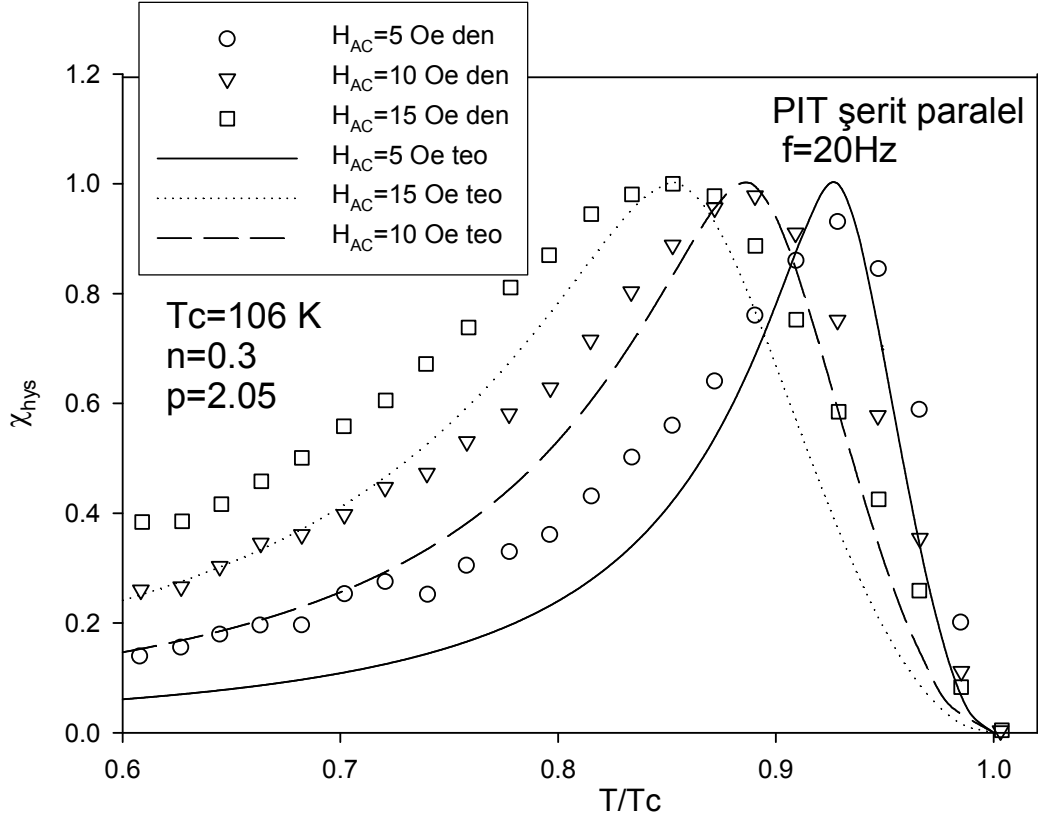


Şekil 46. Farklı üretim tekniğine sahip şerit numunelerin,  $f=20$  Hz ve  $H_{DC}=10$  Oe ve  $H_{AC}=15$  Oe AC alan genliği ve Manyetik alan şerit yüzeyine göre paralel yönelimde uygulandığında AC alınganlığın sıcaklıkla değişimi.

### 1.2.1.2. Histerezis Kayıpların Hesaplanması

Bu bölümde incelenen PIT şerit numunesi için, düşük frekansta ölçülen AC kayıpları büyük ölçüde histerezis kayıplarından kaynaklanmaktadır. Önceki bölümlerde açıklanan kritik hal modellerini ve Maxwell denklemlerini kullanarak, modelleme hesapları ile uygun parametreler seçildiğinde deneysel verilerle (Şekil 47) uyum içinde olan teorik eğrilerinin elde edilebileceği gösterildi.

Şekil 47, basit modelleme hesaplamamızın sonuçlarıyla ilişkili olarak Şekil 43'de gösterilen verilerle karşılaştırma yapabilmemize olanak tanımaktadır. Karşılaştırma yapılan hesaplanmış eğri için, denklem (17) 'de üs parametresi  $p=2.05$  alınmıştır. M-H histerezis çevriminde alan üssü en iyi uyumu sağlaması açısından  $n=0.3$  seçildi. Şekil üzerinde verilen  $h_{AC}$  değerleri normalize edilmiş alan genliklerini temsil etmektedir.

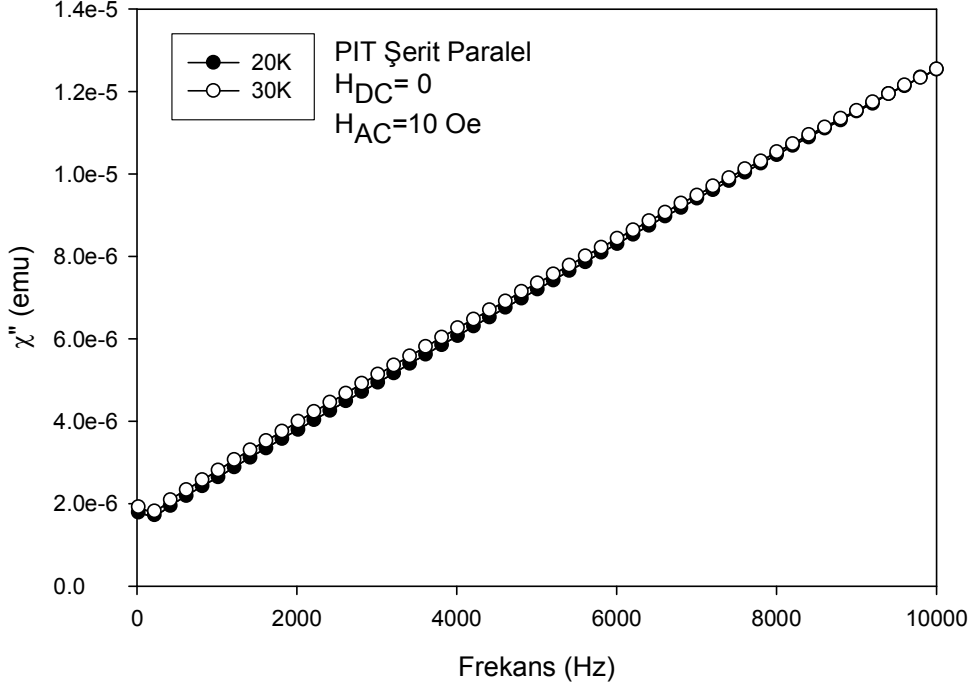


Şekil 47. Şekil üzerinde verilen parametreler seçildiğinde kritik hal modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar. Bu üç parametre uygun olarak seçildiğinde deneysel verilere en iyi uyum sağlayan teorik sonuçlar elde edilebilmektedir.

### 1.2.1.3. AC Kayıpların Frekans Bağlılığı

Şekil 48’de PIT şerit numunesi için AC kaybının, geniş bir frekans aralığında farklı iki sabit sıcaklıkta (20 ve 30 K) nasıl değiştiğini göstermektedir. CTFF şerit numunesindeki gözlemlerden farklı olarak bu frekans aralığında (10 kHz ’e kadar) bir maksimum gözlenmemiştir. Bunun nedeni PIT numunesinde her bir filaman için girme alanı CTFF numunesindekinden daha küçük olduğudur. Eğer uygulanan alan girme alanından daha düşük ise, artan frekansla AC kaybı artmakta ancak bir maksimumdan geçmemektedir [58]. PIT şerit numunesi için bu frekans taraması verilerinde sıcaklık

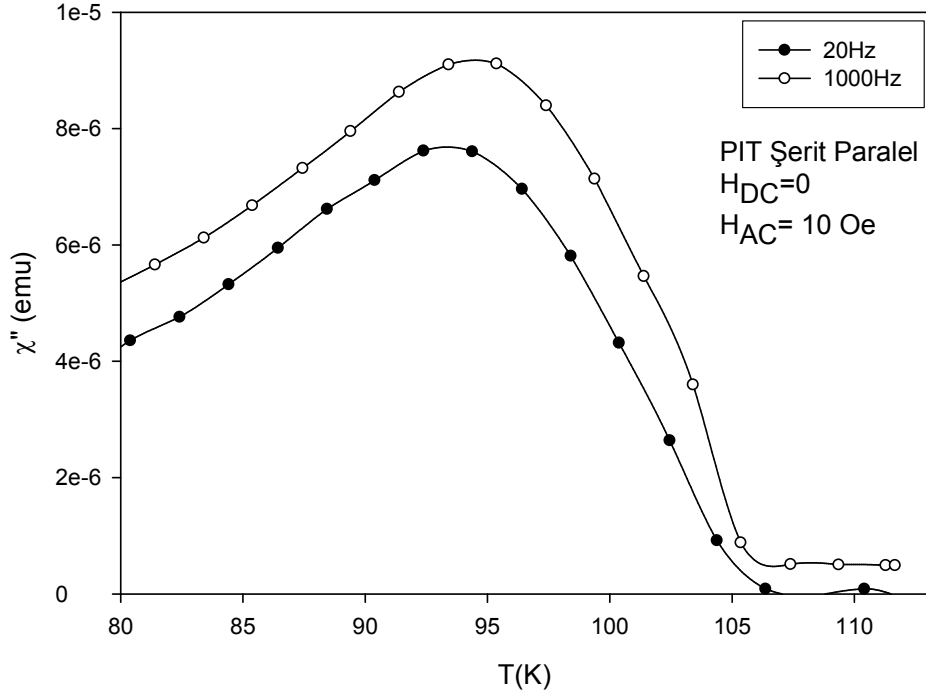
artısıyla çok az bir artış gözlemlenmektedir. Bu artış süperiletken bölgedeki girdap hareketi ile ilişkili histeretik kayıplardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 48. Farklı iki sıcaklıkta,  $H_{AC} = 10$  Oe ve  $H_{DC} = 0$  Oe için PIT şerit numunesinin AC alınganlığının sanal kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine paraleldir.

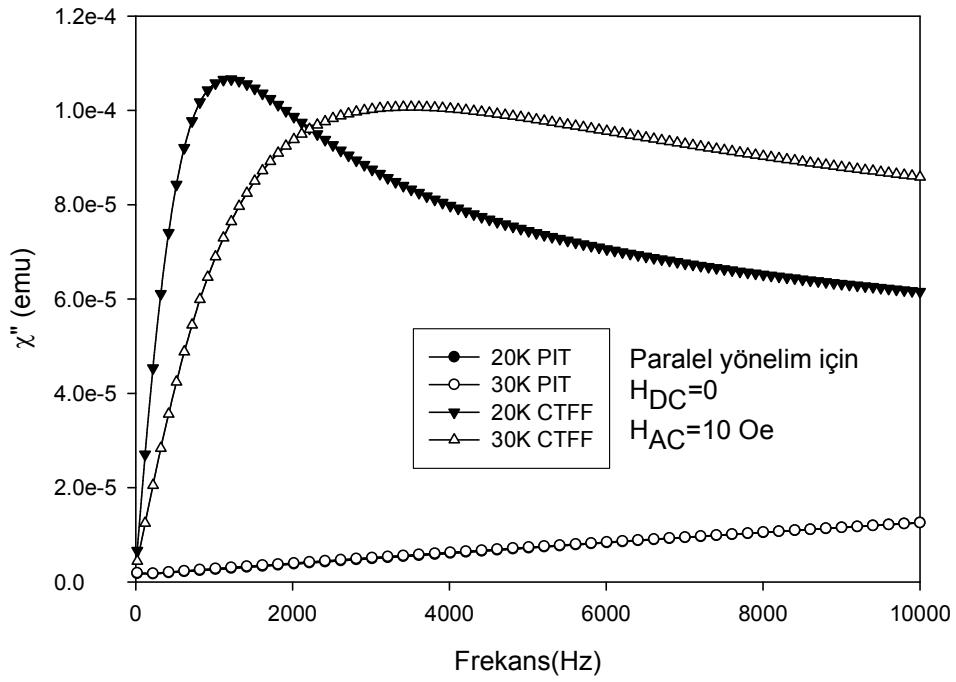
Şekil 49,  $f=20$  ve  $f=1000$  Hz frekanslarında,  $H_{AC} = 10$  Oe,  $H_{DC} = 0$  Oe için PIT şerit numunesinde AC alınganlığın sanal kısmının sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Şekil 27'de görülen CTFE numunesi için ölçülen sonuçlara benzerlik görülmektedir. Yani frekans 20 Hz'ten 1000 Hz'e artırıldığında tüm sıcaklık bölgesinde AC kaybı artmıştır ve AC kaybı normal bölgede bile sıcaklık ekseninde pozitif yönde kaymaya neden olmuştur. Yine bu grafik içinde 20 Hz'te gözlenen AC kaybında daha çok histeresiz kaybının baskın olduğu, frekansın 1000 Hz değerinde gözlenen AC kaybında ise eddy akımı veya çiftlenim kaybının da katkıda bulunduğu düşünülmektedir.



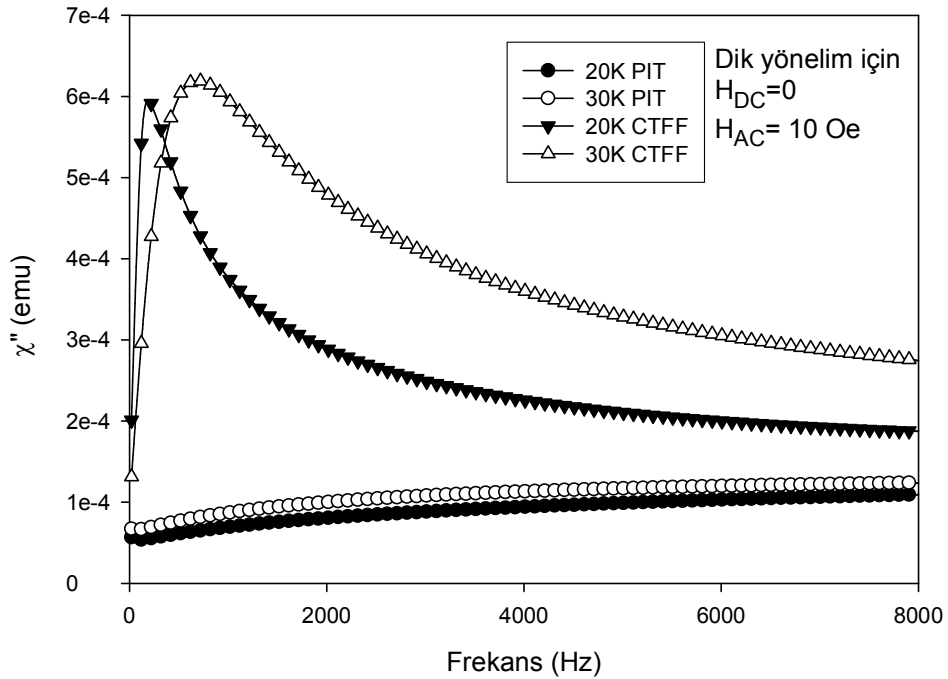


Şekil 49.  $f=20$  ve  $f=1000$  Hz frekanslarında,  $H_{AC} = 10$  Oe,  $H_{DC} = 0$  Oe için AC alınganlığın sanal kısmının sıcaklıkla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine paraleldir.

Şekil 50 ve 51 'de, PIT ve CTFE yöntemi ile hazırlanmış süperiletken numunelerin AC kayıplarının frekans bağıllığı karşılaştırma amacıyla ve sırası ile paralel ve dik yönelim için sunulmuştur. Her iki grafikte de PIT yöntemiyle üretilmiş şerit numunesinin AC alınganlığın sanal kısmının bir maksimuma gelmediği görülmektedir. CTFE numunesinde gözlenen maksimum değere karşılık gelen frekans değerinden çiftlenim zaman sabiti belirlenebilir. Örneğin  $T=20$  K de paralel yönelimde ölçülen pik yaklaşık  $f=1100$ Hz de gerçekleşmiştir. Dolayısı ile alan şerit yüzeyine paralel olarak yapılan 20 K deki ölçümden  $\tau = 145\mu s$  bulunur. Halbuki dik yönelimde 20 K deki ölçümde maksimum 175 Hz de gerçekleşmiştir. Bu, daha büyük bir zaman sabiti demektir yani  $\tau = 900\mu s$ . Yine bu veriler literatürde [58] verilen verilerle uyum içindedir.



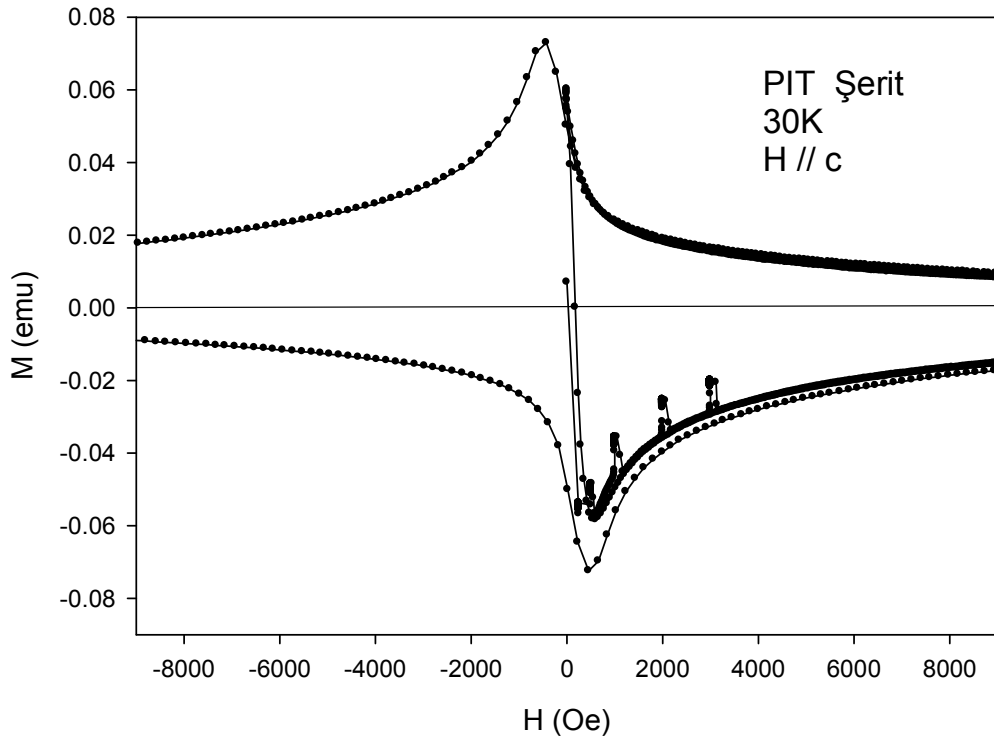
Şekil 50. Üretim metotları ayrı olan ve farklı iki sıcaklıkta,  $H_{AC} = 10$  Oe,  $H_{DC} = 0$  için AC alınganlığın sanal kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine paraleldir.



Şekil 51. Üretim metotları ayrı olan şerit numunelerin farklı iki sıcaklıkta,  $H_{AC} = 10$  Oe,  $H_{DC} = 0$  için AC alınganlığın sanal kısmının frekansla değişimi. Manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir.

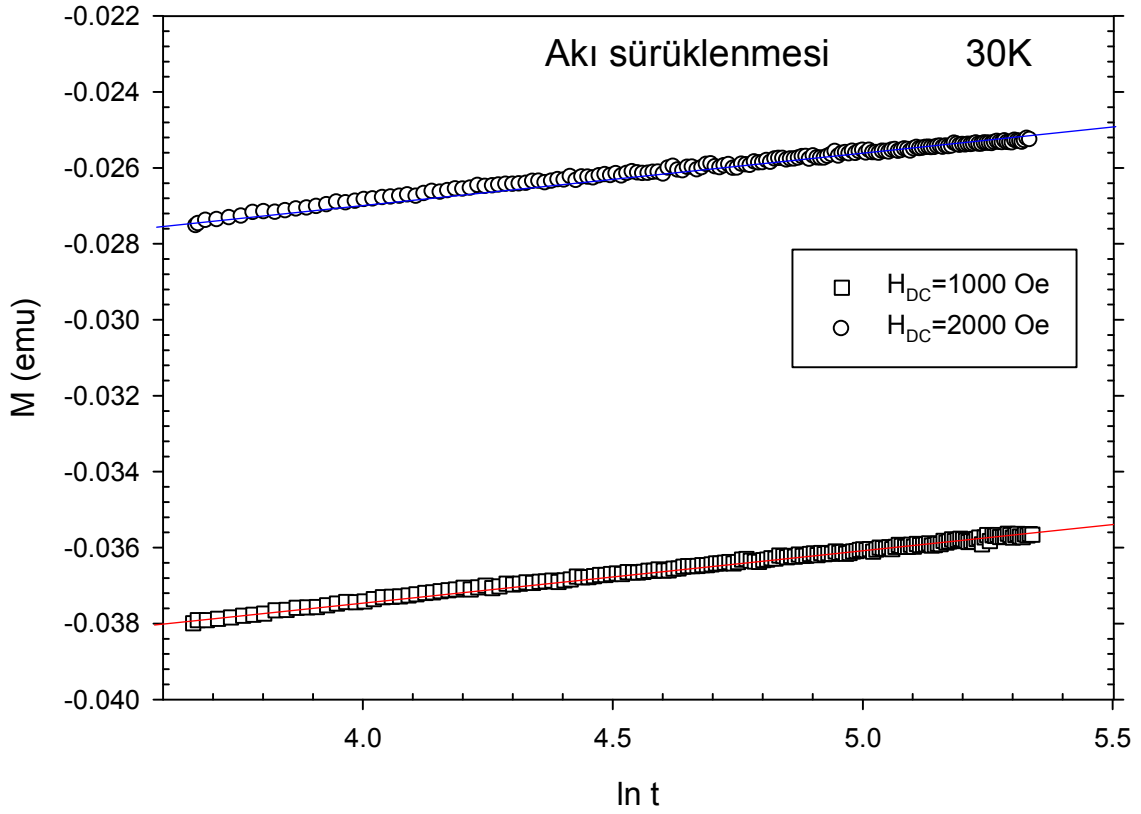
#### 1.2.1.4. DC Manyetizasyon Ölçümleri

Yüksek sıcaklık süperiletken malzemelerde numunenin manyetik davranışını çivileme (pinning) mekanizması belirlemektedir. DC manyetizasyon ölçümleri de çivileme mekanizması dolayısı ile kritik akım yoğunluğu hakkında bilgi verdiği için, bu başlık altında PIT şerit numunesine ait DC manyetizasyon ölçümlerine yer verilecektir.



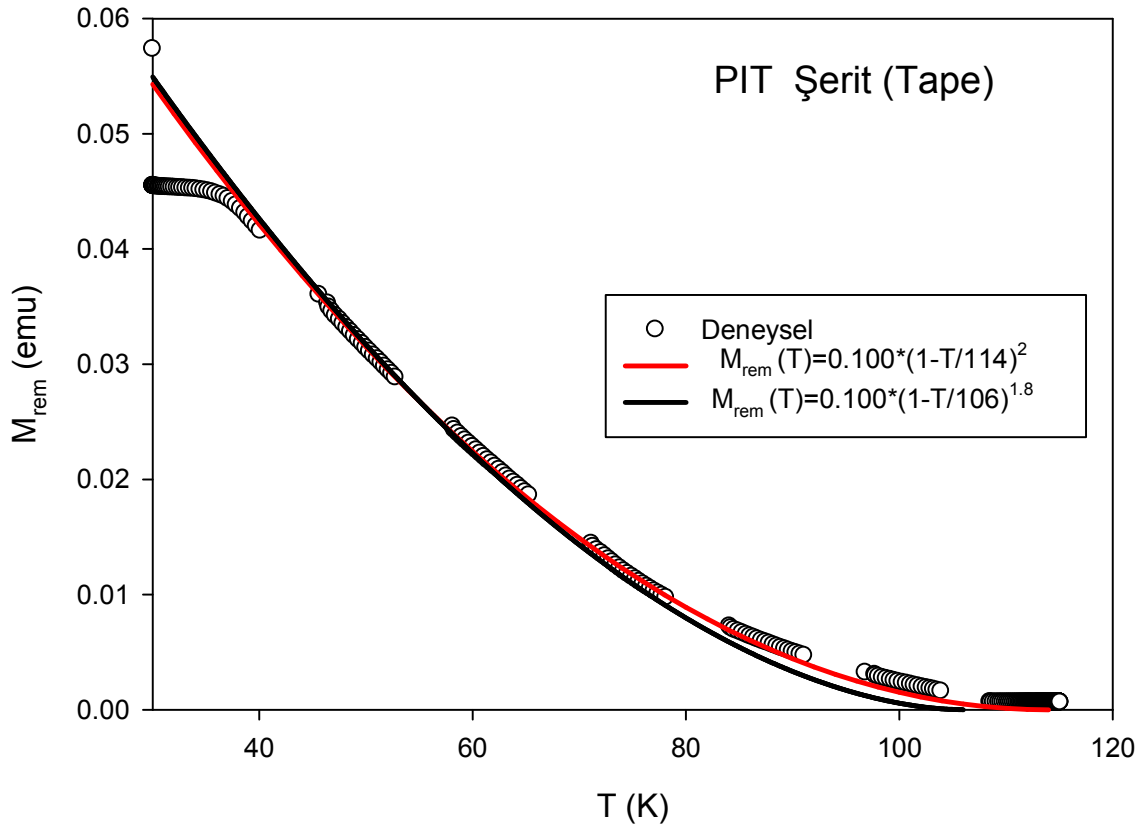
Şekil 52. Bi:2223/Ag PIT şerit numunesinin c eksenine paralel yönde 30 K sıcaklığında M-H histerezis eğrisi.

Şekil 52, 30 K sıcaklığında Bi:2223/Ag PIT şerit numunesinin geniş yüzeyi alana dik yani c eksenine paralel yönde M-H histerezis eğrisini göstermektedir. M-H eğrisinde, diyamanyetik bölgeye doğru kayma görülmektedir. CTFF numunesinde bahsedildiği gibi PIT tekniğiyle üretilen süperiletken numune içinde çivilemenin normal şiddette, yani  $J_c > 0$  olduğu durum için numunede Meissner perdeleme akımının yüzeyde dolanmasının bir sonucu olarak manyetizasyon eğrisinin diyamanyetik bölgeye kaymasını açıklayabiliriz.



Şekil 53. PIT şerit numunesinde alan şeridin geniş yüzeyine dik yöneliminde ve 30K sıcaklığında iki farklı  $H_{DC}=1000$  Oe ve  $H_{DC}=2000$  Oe uygulandığında manyetizasyonun manyetik gevşeme eğrileri arasındaki değişim.

PIT şerit numunesinde akı sürüklenmesi kaybı olup olmadığını anlamak için manyetizasyon değerinin zamanla değişim hızını araştırmak bilgi verici olacaktır. Şekil 53, PIT şerit numunesinde alan şeritin geniş yüzeyine dik yöneliminde ve 30K sıcaklığında farklı iki alanın uygulanması sonucu manyetizasyonun manyetik gevşeme eğrilerini göstermektedir. Bu grafik içinde CTFE numunesinde olduğu gibi logaritmik bir zaman bağılılığı olduğu görülmektedir. İki eğrinin eğimi hemen hemen aynıdır. Yani aktivasyon enerjileri uygulanan manyetik alanın büyüklüğü ile dikkate değer bir değişim sergilememiştir.

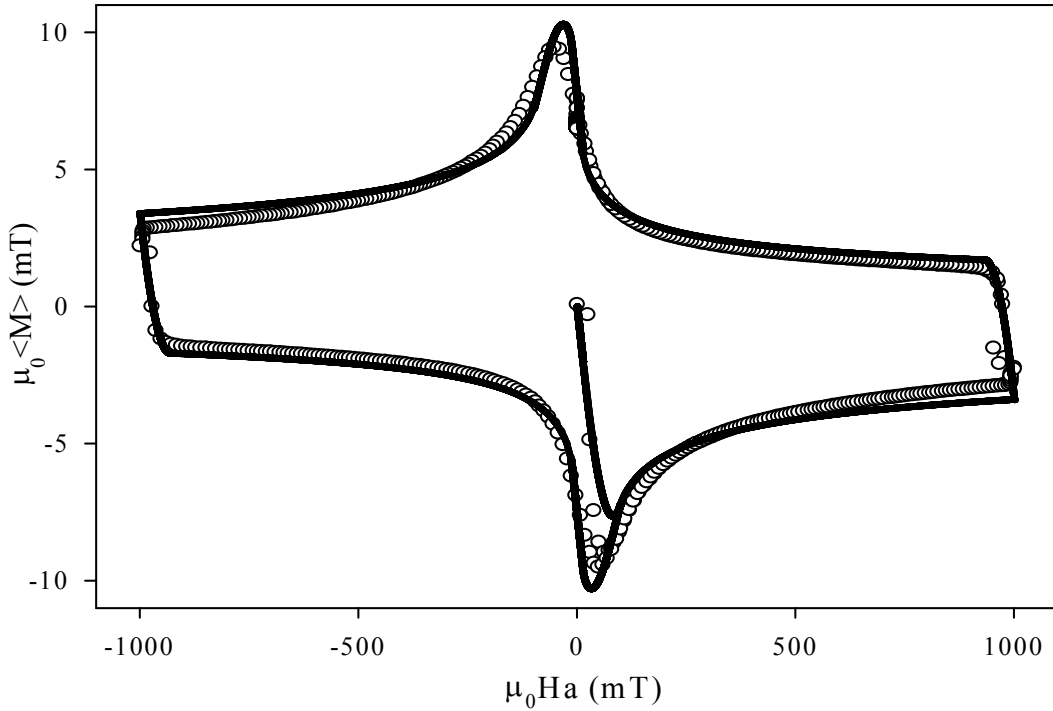


Şekil 54. PIT şerit numunesinde alan şeridin geniş yüzeyine dik yöneliminde tuzaklanan manyetizasyonun  $M_{rem}$  sıcaklığa göre değişimi.

PIT şerit numunesinde, kritik akım yoğunluğunun sıcaklıkla değişimini belirlemek için Şekil 54 'de alanın c eksenine göre paralel olduğu durumda tuzaklanan manyetizasyonun ( $M_{rem}$ ) sıcaklığa göre değişimi gösterilmektedir. Bu verilere en iyi uyum eğrisini elde etmek için hesaplamada kullanılan kritik akım yoğunluğunun sıcaklık bağıllığı parametresi,  $p=1.8$  ve  $p=2$  değerleri için uyum eğrileri aynı grafikte çizdirilmiştir. Burada  $p=2$  için daha iyi uyum eğrisi elde edildiği görülmektedir.

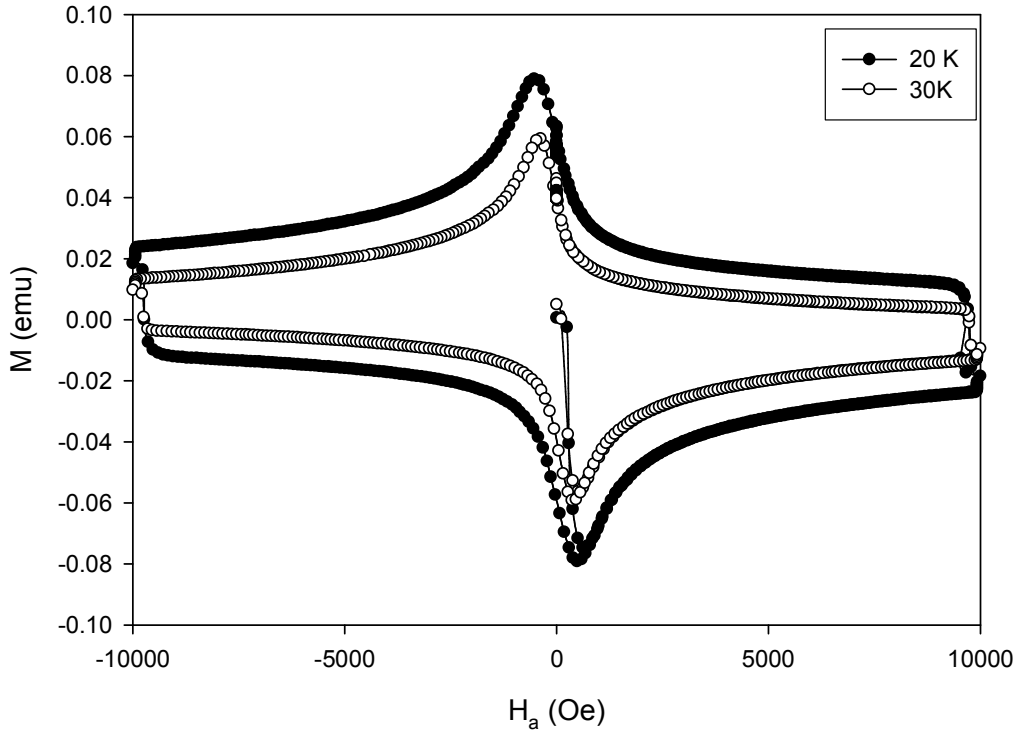
Şekil 55'de 20 K sıcaklıkta ve manyetik alanın numunenin geniş yüzeyine dik olacak şekilde PIT yöntemi ile hazırlanan Bi:2223/Ag süperiletken şerit numunesi için VSM cihazı ile ölçülen M-H histeresiz çevrimi gösterilmektedir. Burada uygulanan maksimum manyetik alan değeri 1 Tesla 'dır.  $T = 20$  K sıcaklığında ölçülen deneysel veriler, Mathematica 6.0 ticari paket programında yapılan modelleme hesapları ile karşılaştırılarak en iyi uyum gösteren süperiletkenlik uyum (fit) parametreleri  $n= 0.3$ ,  $s = 0.2$ ,  $h_{c1} = 0.15$ ,  $\mu_0 H^* = 90$  mT,  $\mu_0 H_{c1} = 13,5$  mT olarak belirlendi.  $H_{c1}$  alt kritik alanı temsil etmektedir. Buradaki  $s$  parametresi Meissner yüzey akımının alan bağıllığını gösteren bir

parametredir. Diğer parametreler daha önce tanımlanmıştır. Hesaplamaların ayrıntıları [83]'de bulunabilir. CTFF numunesi için de benzer bir teorik hesaplama yapıp, teorik M-H eğrisi kolaylıkla elde edilebilir. Ancak tez çalışmasında daha çok AC kaybına odaklanıldığı için CTFF numunesi için hesaplama yapılmadı. Tezde öncelik vererek araştırma yapılan sıcaklık aralığı 20–30 K dir. Çünkü kritik belirleyici değerler ve maliyet birlikte düşünüldüğünde, literatürde 20 ile 30K arası sıcaklık bölgesinin en uygun olacağı belirtilmektedir.



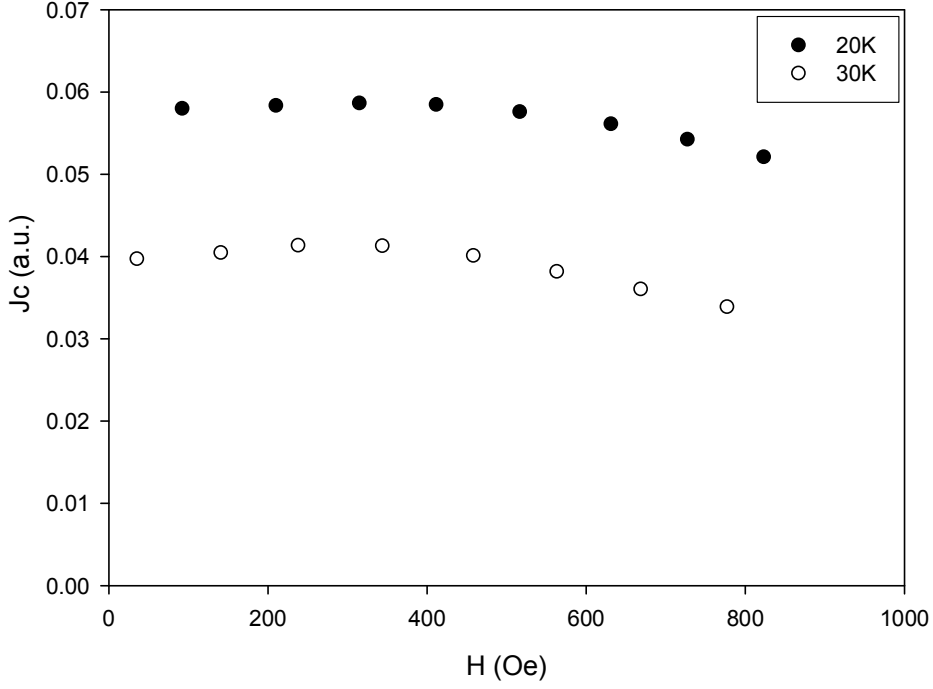
Şekil 55. 20 K sabit sıcaklıkta, PIT şerit numunesinin deneysel M-H eğrisi ve bu verilere teorik hesaplamalar sonucu elde edilen uyum eğrisi. Burada manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir.

Şekil 56'da, 20 K ve 30 K sıcaklıklarında çizdirilen M-H grafiği görülmektedir. 20 K sıcaklıktaki histerezis çevrimi ile 30 K de görülen histerezis çevrimi karşılaştırıldığında sıcaklık artışı ile M-H histerezis genişliğinin daraldığını ve buna bağlı olarak da kritik akım yoğunluğunun azalacağını söyleyebiliriz. Çünkü çivileme şiddeti azaldıkça çivileme kuvveti ve buna bağlı olarak da kritik akım yoğunluğu azalmaktadır.



Şekil 56. 20 K ve 30 K sıcaklıklarında, PIT şerit numunesinin 1Tesla uygulanan maksimum manyetik alan altındaki M-H histeresiz çevriminin karşılaştırılması. Burada manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir.

Şekil 57’de, 20 K ve 30 K sıcaklıkları için kritik akım yoğunluğu Şekil 56’daki M-H histerezis çevriminden elde edilerek çizdirilmiş olup sıcaklığın artmasıyla kritik akım yoğunluğundaki azalma gösterilmektedir. Düşük alanlarda yaklaşık 500 Oe kadar kritik akım yoğunluğu sabit kalmakta daha sonra alan ile azalmaktadır.

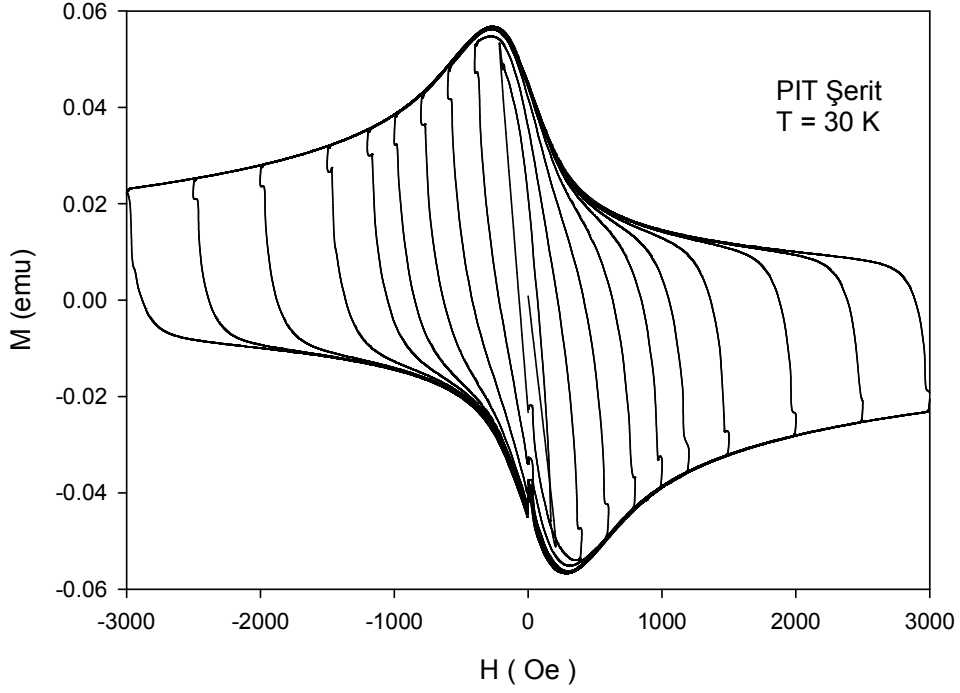


Şekil 57. PIT şerit numunesinin 20 K ve 30 K sıcaklıkları için kritik akım yoğunluklarının alan bağıllığı. Burada manyetik alan şeridin düz yüzeyine diktir.

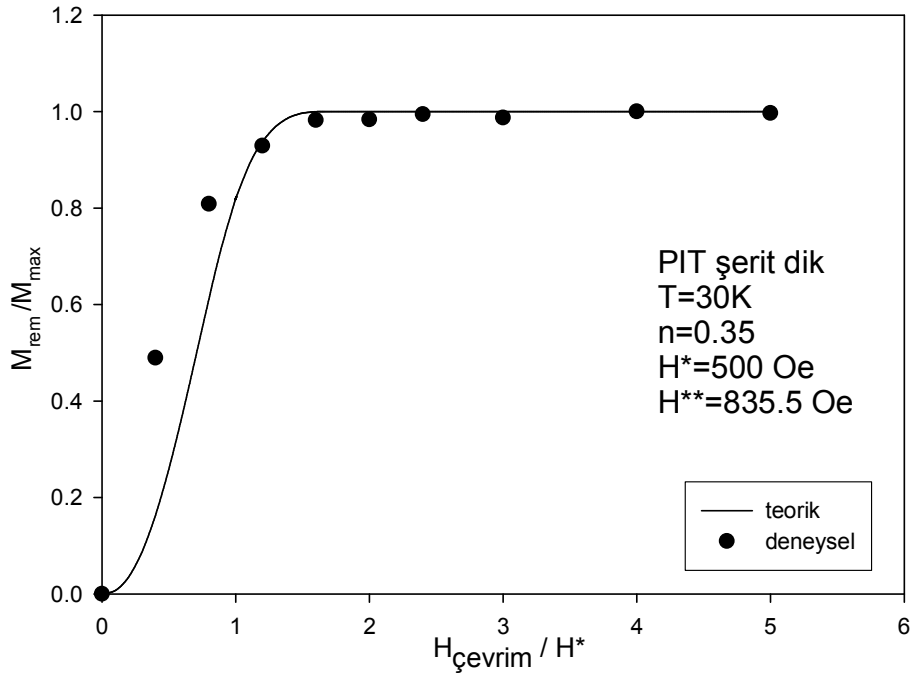
Yüksek sıcaklık süperiletkenlerde girdapların (vortex) çivilenmesi sürecinde etkili olan çivileme (pinning) kuvveti, girdapların hareketi, akının zamanla gevşemesi gibi konularında en iyi bilgi sabit sıcaklıkta ölçülen M-H histeresiz eğrisi ve seçilen bir sabit alanda akının zamanla nasıl değiştiğini gösteren ölçümler ile elde edilir. Ayrıca II. Tip süperiletkenlerin manyetik ve sıcaklık geçmişi oldukça önemlidir. Şekil 58'de PIT tekniği ile üretilmiş süperiletken şerit numunesine ait  $T = 30$  K sıcaklığında alansız soğutma (ZFC) işleminden sonra en küçük maksimum alandan başlayarak en büyük maksimum alan değerine doğru manyetik alanı adım adım artırarak ölçülmüş histerezis çevrimleri gösterilmektedir. Buradaki amaç;  $H_{\text{çevrim}}$  adı verilen akı tuzaklama işlemi ile tuzaklanan manyetizasyonun maksimum alana ( $H_{\text{çevrim}}$ ) göre değişimini elde etmek ve Kritik Hal Modeli (KHM) ile hesaplanan verilerle karşılaştırdığımızda bazı süperiletkenlik parametrelerinin belirlenmesine imkan sağlamaktır. Şekil 58'den elde edilen ve yukarıda tanımlanan tuzaklanan manyetizasyonun ( $M_{\text{rem}}$ ) maksimum alana ( $H_{\text{çevrim}}$ ) göre değişimi Şekil 59'da görülmektedir. Buradaki  $M_{\text{rem}}$  değerleri tuzaklama sonrası alınan yani bekleme sürecine girmeden ilk saniyedeki verilerdir. Şekildeki kalın eğri Kritik Hal Modeline göre hesaplanmış verileri göstermektedir. Oldukça iyi bir uyum eğrisi kritik akım yoğunluğunun



alan bağıllığını gösteren (  $J_c = J_{c0}/H^n$  ) için  $n = 0.35$  ve numunenin merkezinin akıyı hissettiği ilk manyetik alan olarak tanımlanan girme alanı  $H^* = 500$  Oe alınarak elde edilmiştir.



Şekil 58. PIT şerit numunesinin  $H_{\text{çevrim}} = 3000$  Oe maksimum uygulanan manyetik alana kadar farklı alanlarda ve  $T = 30$  K sıcaklığında iç içe çizdirilmiş M-H histerezis eğrisi.



Şekil 59. PIT şerit numunesinin tuzaklanan manyetizasyonun ( $M_{rem}$ ) maksimum alana ( $H_{çevrim}$ ) göre değişimi.

Şekil 59 'da tuzaklanan manyetizasyonun maksimum alana göre değişimini teorik olarak elde etmek için Şekil 58 'de verilen  $T = 30$  K de ve farklı alanlarda iç içe çizdirilmiş M-H histerezis eğrisi verilerinden yararlanılmıştır. Teorik hesaplamalar referans [85] Bean ( $n=0$ ) ve Kim ( $n=1$ ) modelleri için hesaplananlara benzer şekilde  $n=0.35$  alınarak yapılmıştır. Diğer parametreler Şekil 59'da verilmektedir. Burada her bir çevrim için uygulanan maksimum alan  $H_{çevrim}$  ve bu alana karşılık gelen manyetizasyon değerleri Tablo 3 'de verilmiştir.

Tablo 3. Şekil 59 için, Şekil 58 'den elde edilen veriler.

$H_{çevrim}$ (Oe)	$M_{rem}$ (emu)
200	0,021988
400	0,036336
600	0,041753
800	0,044135
1000	0,0442028
1200	0,044692
1500	0,04436521
2000	0,04494897
2500	0,0448019

Şekil 58 'den ilk girme nüfuz alanı değeri M-H eğrisinden  $H^* = 500$  Oe olarak belirlendi. Mathematica programında yazılan yazılım normalize değerlere uyum yapacağından, alan değerlerimizi  $H^*$  değeri olarak belirlenen 500 Oe değerine ve manyetizasyon değerlerimizi de tabloda maksimum M (emu) değeri olarak 2000 Oe alan değerindeki veri olan 0.04494897 emu değerine bölerek deneysel veriler normalize edildi.

Tablo 4. Şekil 59 için, Tablo 3 'den normalize edilen veriler.

$H_{\text{çevrim}} / H^*$	$M_{\text{rem}} / M_{\text{max}}$
0	0
0,4	0,489177
0,8	0,808383
1,2	0,928898
1,6	0,981891
2	0,9834
2,4	0,994283
3	0,987013
4	1
5	0,996728

Mathematicada yapılan Kritik Hal Modeline göre teorik hesaplama programda İdeal silindir için  $B(r) = \mu_0 H(r)$  alarak,

Denklem 16, denklem 14 'de kullanılarak integrali alınır,

$$B_1^{n+1}(r) = (\mu_0 H_a)^{n+1} \pm \mu_0 (n+1) \alpha(T)(R-r) \quad (25)$$

$$B_2^{n+1}(r) = B_1^{n+1}(r_i) \mp \mu_0 (n+1) \alpha(r_i - r) \quad (26)$$

denklemleri elde edilir, denklem (25)  $r_i \leq r \leq R$  için ve denklem (26),  $0 \leq r \leq r_i$  aralığında geçerlidir,  $r_i$  alan artırma ve alan azaltma durumundaki akı yoğunluğu  $B(r)$  profillerinin kesişme noktasına karşılık gelir.

Denklem (25) 'den ilk tam nüfuz alanı,

$$H_a = [ \mu_0 (n+1) \alpha(T) R ]^{1/(n+1)} / \mu_0 = H_*(T) \quad (27)$$

şeklinde elde edilir. Uygulanan alan  $H_a$ ,  $H_{max}$  ile  $H_{min}$  arasında değıştikçe çok çeşitli akı yoğunluğu profilleri ile karşılaşılır. Ayrıntılı bilgi [49,85] 'de bulunabilir.

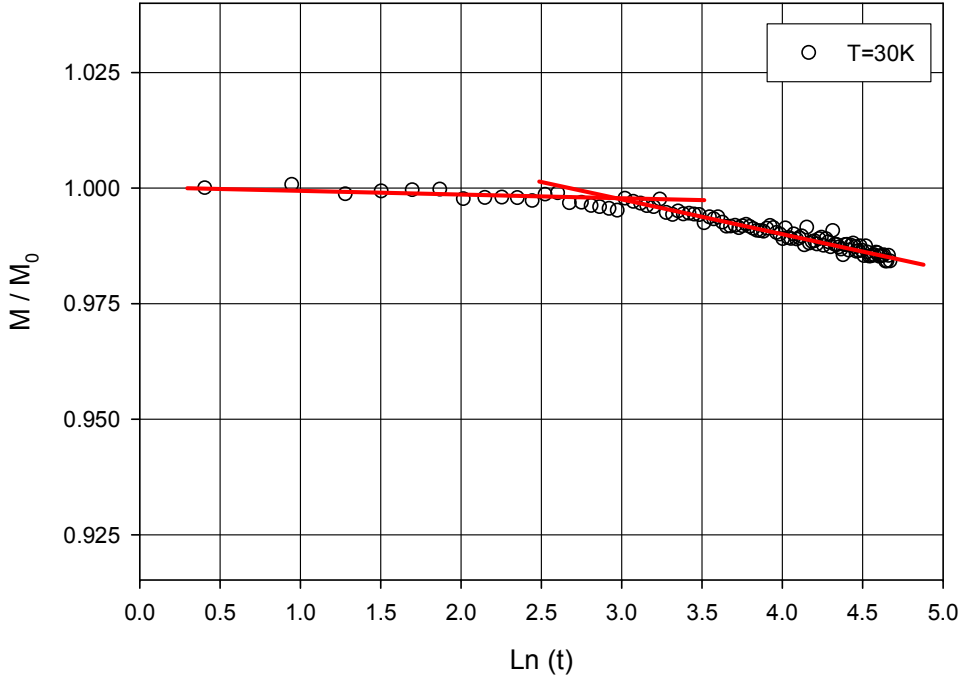
Numunedeki ortalama akı yoğunluğu,

$$\langle B \rangle = \frac{2}{R^2} \left[ \int_0^{r_i} B_2(r) r dr + \int_{r_i}^R B_1(r) r dr \right] \quad (28)$$

ile verilir.

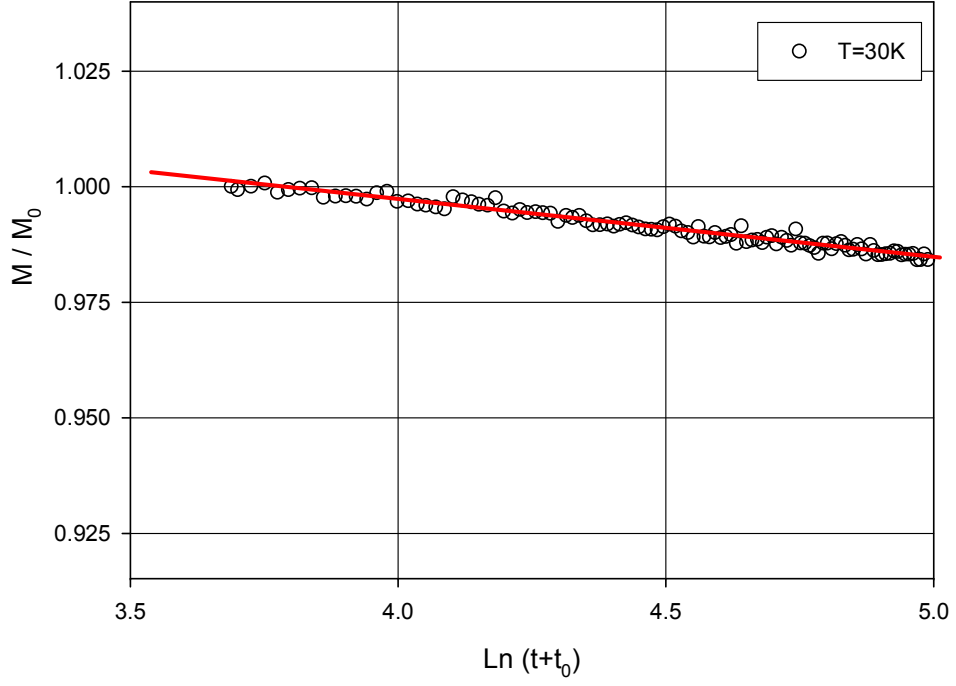
Burada akı yoğunluğu profillerinin sınır şartları önemlidir ve bu sınırlamalara göre integrasyon yapılmalıdır. Programda  $H^*$  değerine kadar olan kısım ve ikinci girme nüfuz derinliği  $H^{**}$  değerinde kullanılacak denklemler yukarıdaki integrasyonlar ve sınır şartlarıyla belirlenmekte ve program koşturularak teorik veriler elde edilebilmektedir. Programda, bilinen fiziksel parametreler yardımıyla diğer kullanılmakta olan değışken parametrelerin ayarlanmasıyla en iyi uyum parametreleri hesaplanmıştır.

Herbir akı tuzaklama sürecinden sonra 120 s beklenerek manyetik gevşeme ölçülmüş ve örnek olarak  $H_{\text{çevrim}} = 200$  Oe için zamanla gevşeme eğrisi yani  $M_{\text{rem}}-Lnt$  eğrisi Şekil 60 'da sunulmuştur. Her bir  $H_{\text{çevrim}}$  değerine karşılık gelen  $M_{\text{rem}}-Lnt$  eğrisindeki küçük farklılıkların nedeni, her bir maksimum alan sonrası numunede tuzaklanan akının akı yoğunluğu profiline birbirinden farklı olmasıdır. Akı yoğunluğu profiline,  $M_{\text{rem}}-Lnt$  eğrisine etkisi ile ilgili tartışmalar teorik modelleme hesapları ile ayrıntılı bir şekilde [70] 'de verilmiştir. Şekil 60 'da iki farklı logaritmik gevşeme görülmektedir. Bazı araştırmacılar [65] böyle bir davranışı şöyle açıklamışlardır. Bu  $M_{\text{rem}}-Lnt$  çiziminde rastlanan doğrulardan birisi süperiletken malzemenin yüzeyinde yüzey çivilemesine (surface pinning) ve diğeri külçe çivilemesine (bulk pinning) eşlik eden logaritmik akı gevşemesidir denilmiştir. PIT süperiletken şerit için Şekil 60'da sunulan veriler ile literatürde yapılan yorum uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bundan dolayı numunede yüzey ve külçe çivilemesine eşlik eden iki farklı gevşeme olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 60. PIT şerit numunesinin  $T = 30$  K sıcaklığında  $H_{\text{çevrim}} = 200$  Oe için zamanla gevşeme eğrisi.

Eğer gevşeme zamanının başlangıcına 30–40 s gibi bir zaman eklenirse tek bir logaritmik bağıllıkta söz konusu olabilir. Bu eklenecek sürenin nedeni gevşeme zamanından önce cihazın alanı sıfır yapma ve sıcaklığı sabit tutma aşamasında belli bir süre geçmesidir. Ancak cihaz bu arada veri almadığı için ve aldığı ilk veriden sonra gevşeme zamanının başladığı düşünülerek çizim yapıldığından dolayı böyle bir durum söz konusu olabilir. Cihaz veri almasa da zamanın geçmesiyle numunede manyetik gevşeme veya akı sürüklenmesi süreci başladığı için bunu dikkate almada yarar vardır. Şekil 61, aynı verilerin  $t$  zamanına  $t_0=40$  s eklenerek çizdirilmiş yarı-logaritmik grafiğini göstermektedir. Görüldüğü gibi lineer logaritmik bir zaman bağıllığı gözlenmiştir.



Şekil 61. PIT şerit numunesinin  $T = 30$  K sıcaklığında  $H_{\text{çevrim}} = 200$  Oe için zamanla gevşeme eğrisi,  $t_0=40$  s eklenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, PIT ve CTFF olmak üzere iki farklı üretim metoduna sahip gümüş kılıflı Bi:2223/Ag süperiletken şeritlerde AC kayıp mekanizmaları; sıcaklığın, frekansın, AC alanın, DC alanın ve şerit yüzeyine göre manyetik alan yönünün dik veya paralel olmasına göre araştırıldı. AC kayıplarını hesaplamak için bilgisayar programı yapılarak modellemenin denklemleri türetildi, deneysel veriler ile teorik hesaplamalar karşılaştırılarak AC kayıp mekanizmasına katkıda bulunan histerezis kaybı, Eddy akımı kaybı, flamanlar arası çiftlenim kaybı gibi kayıpların katkıları belirlendi ve AC kayıplarının nasıl en aza indirilebileceği araştırıldı.

CTFF şerit numune için her iki yönelimde AC kayıpları alan genliğine, sıcaklığa ve güçlü bir şekilde frekansa bağlı olduğu görüldü. Frekansa aşırı bağlı olmasından dolayı şeritin alana paralel yöneliminde 20 ve 30 K sıcaklıklarında 20 Hz 'den 10 kHz 'e kadar olan frekans aralığında ölçümler yapıldı. Bu sıcaklıklarda güçlü frekans bağımlılığı Eddy akımı kayıpları ve filamanlar arası çiftlenim kayıplarından kaynaklanmakta olup teorik uyum eğrilerinden bağıl çiftlenim zaman sabiti  $\tau_{30}/\tau_{20} = 1/3$  oranı bulundu. Düşük frekans ve yüksek sıcaklıklarda, AC kayıplarına ana katkı histerezis kayıplarından gelmektedir. Bu teorik hesaplamalarla (uyum eğrileri) ile doğrulanmıştır. AC alan genliğinin artmasıyla sanal kısımdaki pik sıcaklıklarının düşük alan bölgesine kaydığı gözlemlendi. Kritik akım yoğunluğunun alan ve sıcaklık bağımlılığı ile bu piklerin oluştuğu şartlar ve kayma miktarı ilişkilendirilerek sonuçlar yorumlandı. Karşılaştırma yapılan hesaplanmış iki eğri ailesinde, çivileme şiddet parametresi

$\alpha(T) = \alpha_0 \left[ 1 - \frac{T}{T_c} \right]^p$  denkleminde üs ifadesi  $p=2$  ve  $p=1,5$  için yapılan hesaplar ve ölçülen

verilerden,  $p=2$  için yapılan hesaplamaların  $p=1.5$  için elde edilen hesaplama sonuçlarına

göre daha iyi uyum göstermiştir [86]. Burada kritik akım yoğunluğunun  $j_c(B,T) = \frac{\alpha(T)}{B^n}$  ile

verilen bağıntısında alan üssü  $n$  için  $n=0,3$  seçildi. Akı sürüklenmesinden ileri gelen kaybın, çok küçük olduğu manyetik gevşeme (relaxation) deneyleri ile belirlendi.

CTFF şerit numune alana dik yöneldiği zaman frekans taraması 20 Hz ve 5 kHz arasındaki geniş frekans aralığında,  $T=10, 20, 30$  ve  $77$  K'deki dört farklı sıcaklıkta yapıldı. Çiftlenim kaybı pikinin yüksekliğinde paralel yönelimin aksine sıcaklık arttıkça artma gözlemlendi. Bu deneysel veriye klasik çiftlenim kaybı denkleminin yanı sıra histerezis

kaybı katkısını da ilave ettiğimizde oldukça iyi uyum eğrileri elde edildi. Bağlı zaman sabitleri için  $\tau/\tau_{10}$ 'u 1, 1/1.6, 1/3.3 ve 1/18 değerlerini alarak 10 K, 20 K, 30 K ve 77 K için deneysel ve hesaplanan eğriler arasında iyi bir uyum eğrisi elde edildi [87]. Dolayısı ile bu sıcaklıklara karşılık gelen zaman sabitleri ile sıcaklıklar arasında birinci mertebeden ters orantılı bir bağıllık belirlendi. Ayrıca pik frekansını ve dolayısı ile zaman sabitini CTFF şerit için T=20 K de paralel ve dik yönelim için karşılaştırsak, paralel yönelimde ölçülen pik yaklaşık  $f=1100\text{Hz}$  de gerçekleşmiştir. Dolayısı ile alan şerit yüzeyine paralel olarak yapılan 20 K deki ölçümden  $\tau = 145\mu\text{s}$  bulunur. Halbuki dik yönelimde 20 K deki ölçümden maksimum 175 Hz de gerçekleşmiştir. Bu, daha büyük bir zaman sabiti demektir yani  $\tau = 900\mu\text{s}$ . Manyetizasyon kayıplarını azaltmak için çiftlenim zaman sabitinin küçük olması gerekir. Yani paralel yönelimde kayıp daha azdır. Dik yönelimde kaybı azaltmak için şerit daha küçük boyutta çoklu filaman şeklinde üretilmelidir. Zaten CTFF şerit ve PIT şerit numunesindeki ölçümler bunu doğrulamıştır. Dik yönelimde literatürde filamanların bükülmesi ile de AC kayıpları belli ölçüde azaltılabileceği belirtilmektedir.

Manyetik gevşeme deneylerinden 20–5000 Hz frekans aralığında akı sürüklenmesi kaybı ihmal edilebilir olarak düşünülmektedir. Sabit bir AC alan genliği ile DC alan arttıkça AC alınganlığın sanal kısmı  $\chi''$ 'nin hem onset sıcaklıkları hemde pik sıcaklıkları düşük sıcaklık bölgesine doğru kaymaktadır. Bu davranış yüksek sıcaklık süperiletkenlerde tipik bilinen bir davranıştır ve girdapların çivileme (pinning) mekanizması ile ilişkilidir.  $\chi''$ 'nin onset sıcaklığından elde edilen tersinmezlik çizgisi,  $H_{irr} (Oe)=90000 (1-T_{irr}/T_c)^2$  şeklinde bir üs yasasına uyduğu belirlendi. DC manyetizasyon yöntemi (ZFC ve FC manyetizasyon verilerinden) ile elde edilen tersinmezlik çizgisi verileri karşılaştırıldığında; ACS yönteminden elde edilen tersinmezlik çizgisi, DC manyetizasyon yönteminden elde edilen tersinmezlik çizgisinden daha yüksek sıcaklık bölgesinde yer almaktadır. Bu kayma, akı çizgilerinin osilasyonundan kaynaklanan viskoz kayıplarla ilişkilendirilebilir.

DC alanın varlığında ve yokluğunda yapılan incelemede sabit sıcaklıkta tüm frekans değerlerinde, DC alan varken ve arttıkça AC kaybının arttığı görüldü. Ayrıca DC alan varken AC manyetik alan genliğinin artmasıyla kayıp maksimumlarında bir azalma gözlenmiştir. Buna histerezis kayıp vadisi (loss valley) denilmektedir.

Hem M-H histerezis eğrilerinden hem de FC ve ZFC eğrilerinin analizinden CTFF şerit numunede azda olsa Meissner yüzey akımının da dolaştığı sonucu çıkarıldı [88]. Farklı sıcaklıklarda tuzaklanan alanın  $M_{rem}$  sıcaklığa göre çiziminden kritik akım



yoğunluğunun sıcaklık üssü  $p=1.8$  olarak belirlendi. Bu da histerezis kayıplarını hesaplarken kullanılan iki iyi değerin (1.5 ve 2.0) arasında bir değerdir ki böylece hesaplamalar bir başka ölçümle teyit edilmiş oldu.

PIT şerit numunesi için AC kaybının, geniş bir frekans aralığında farklı iki sabit sıcaklıkta (20 ve 30 K) değişimi incelendiğinde; CTFF tape numunesindeki gözlemlenenlerden farklı olarak bu frekans aralığında (10 kHz'e kadar) bir maksimum gözlenmemiştir. Bunun nedeni PIT numunesinde her bir filaman için girme alanı CTFF numunesindekinden daha küçük olduğudur. Literatürde belirtildiği gibi eğer uygulanan alan girme alanından daha düşük ise, artan frekansla AC kaybı artmakta ancak bir maksimumdan geçmemektedir. PIT şerit numunesi için, düşük frekansta ve manyetik alanın şerit numunenin düz yüzeyine paralel yöneliminde, AC alan genliğinin artmasıyla sanal kısımdaki pik sıcaklıklarının düşük alan bölgesine kaydığı gözlemlendi. Yine CTFF şerit numunesinde yapıldığı gibi kritik akım yoğunluğunun alan ve sıcaklık bağılılığı ile bu piklerin oluştuğu şartlar ve kayma miktarı ilişkilendirilerek sonuçlar yorumlandı. Kritik hal modellerini ve Maxwell denklemlerini kullanarak, modelleme hesapları ile çivileme şiddet parametresi  $p=2.05$  ve kritik akım yoğunluğunun alan üssü  $n$  için  $n=0.3$  seçilmesiyle deneysel verilerin uyum içinde olduğu gösterildi.

## 5. ÖNERİLER

Histerezis kayıplar süperiletken göbeği, düzgün çok filamanlı yapıya bölerek azaltılabilir. Ancak, manyetik kayıplar durumunda, çoklu filaman yapısı eddy akım kayıpları ve filamanlar arası çiftlenim akımı kayıpları gibi kayıplara neden olacaktır. Hem transport akımın hem de AC ve DC alanın birlikte uygulandığı durumlardaki kayıpların doğasını anlamak için ayrıntılı bir şekilde hem deneysel hem de teorik çalışmalar yapılabilir. Çünkü II. Tip süperiletkenlerin yüzey çivileme (surface pinning), külçe çivileme (bulk pinning), Meissner akımı, taneli yapı, tanelerin büyüklüğü ve farklı yönelimi ve karmaşık yapısına ilave olarak, metal matristen geçen değişen akımın (AC) neden olduğu eddy akımı kaybı ve çoklu filaman yapılarında filamanlar arası çiftlenim kaybı ve akı sürüklenmesi kaybı deneysel verileri analiz etmeyi zorlaştırmaktadır.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin kritik sıcaklık ve kritik akım yoğunluğunu arttırmak amacıyla bu alanda araştırmacılar, süperiletken numunelere farklı katkı ve ilavelerle bu durumu geliştirme çabasındadırlar. Satın alınan şerit numuneler Bi:2223/Ag gümüş kılıflı olarak üretilmiştir. Çok filamanlı şeritte zaman sabitinin düşük olması manyetizasyon kaybını azaltacaktır. Bunun için öz direnci yüksek ve metal tabakaların kalınlığı düşük olabilen bir metale ihtiyaç olacaktır. Belki gümüşe farklı ilaveler yapılarak manyetik özelliklere etkisi incelenebilir.

İncelenen PIT ve CTFE metodunun dışındaki diğer üretim yöntemleri ile veya bu yöntemlerle üretilmiş ancak filaman sayıları farklı şeritler için AC kayıpları ile ilgili alınganlık, manyetizasyon çalışmaları yapılabilir. Alanın süperiletken filamanlara yönelimi de AC kaybında rol aldığı için şerite dik alan bileşenini azaltacak bir dizayn yapılabilir.

Ayrıca bu numuneler için manyetik ölçümlerin dışında mekanik özellikleri de araştırılabilir.

Mathematica da yapılan programın histerezis kaybın dışındaki kayıplarında gerekli ve yeter parametreler ile denklemlerin türetilmesiyle, programın geliştirilmesi sonucunda farklı geometriler için modellemeler yapabilme özelliği kazandırılabilir. Böylece uygun geometri ve optimum şartlarda şerit numune üretilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Onnes, H.K., Superconductivity And Magnetizm, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 13-15 (1911) 119–120.
2. Meissner, W.H. ve Ochsenfeld, R., Upper Critical Fields of High  $T_c$  Superconducting Y-Ba-Cu-O, Nature, 132 (1933) 931-935.
3. London, F. ve London, H., Proc. Roy. Soc., London, A149, 71,1935.
4. Seeber, B., Handbook Of Applied Superconductivity, Volume 1, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.,1998.
5. Müller. K. A., Tagashie. M. ve Bednortz. J. G., Flux Trapping And Superconductive Glass State In  $\text{La}_2\text{CuO}_{4-y}\text{:Ba}$ , Phys. Rev. Lett., 58 (1987) 1143.
6. Frischherz, M.C. Sauerzopf, F M, Weber, H.W, Murakami, M. and Emel'chenko, G. A., Comparative Study Of Experimental Techniques For Irreversibility Lines And Critical Current Densities In High-Temperature Superconductors , Supercon. Sci. Technol, 8 (1995) 485.
7. Malozemoff, A.P.,Worthington, A.P., Yeshurun, Y., Holtzberg, F. ve Kes, P.H., Frequency Dependence Of The AC susceptibility In a Y-Ba-Cu-O Crystal: A Reinterpretation Of  $H_{c2}$ , Phys. Rev. B, 38 (1988) 7203-7206.
8. Revaz, B., Triscone, G., Fabrega, L., Junod, A. ve Muller, J., Low-field dc Magnetization Investigations In a  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  Single Crystal: Observation Of a Magnetic Phase Transition At The Vortex Melting Line, Europhys. Lett., 33,9 (1996) 701.
9. Civale L., Worthington T. K. ve Gupta A., Thickness Dependence Of The Irreversibility Line In  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Thin Films, Phys. Rev. B., 43 (1991) 5425.
10. Emmen, J. H. P. M., Stollman, G. M. ve De Jonge, W. J. M., Frequency And Field Dependence Of The Irreversibility Line In a  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Film, Physica C, 169 (1990) 418.
11. Dubois, S., Carmona, F. ve Flandrois, S., Irreversibility line of YBaCuO Sintered Ceramics, YBaCuO Single Crystal And Superconducting Composites Studied By AC Susceptibility And Transport Measurements, Physica C, 260 (1996) 19.
12. Çelebi, S., Karaca, I., Öztürk, A. ve Nezir, S., Fabrication And Characterization Of  $\text{Bi}_{1.84}\text{Pb}_{0.34}\text{Sr}_{1.91}\text{Ca}_{2.03}\text{Cu}_{3.06}\text{O}_{10}$  Superconductors Prepared By a Wet Technique, Journal of Alloys and Compounds, 268 (1998) 256.
13. Wilson, M.N., Superconducting Magnets, Monograph on Cryogenics,Clarendon Press, Oxford, 1983.

14. Carr, W.J., AC Loss and Macroscopic Theory Of Superconductors, Hordon And Breach Science Publisher, 1983.
15. Savvides, N. ve Müller, K.H., AC Susceptibility Of a Monofilament Bi-2223/Ag Superconducting Tape In a Perpendicular Field, Physica C, 314 (1999)183.
16. Zola, D., Gömory, F., Polichetti, M., Strýcek, F., Souc, J., Kov'ac, P. ve Pace, S., Analysis Of Coupling Losses In Multifilamentary Untwisted BSCCO/Ag Tapes through A.C. Susceptibility Measurements, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15 (2005) 2903.
17. Jiang, Z.N., Amemiya, N., Nishioka, T. ve Oh, S.S., AC Loss Measurements Of Twisted And Untwisted BSCCO Multifilamentary Tapes, Cryogenics, 45 (2005) 29-34.
18. Jiang, Z.N., Amemiya, N., Ayai, N. ve Hayashi, K., Total AC Loss Characteristics Of Untwisted And Twisted Bi-2223 Multifilamentary Tapes And Interaction Between Self And External Magnetic Fields, Supercon. Sci. Technol, 17 (2004) 1311–1318.
19. Zhang, G.M., Schwartz, J., Sastry, P.V.P.S.S., Lin, L.Z., Xiao, L.Y. ve Yu, Y.J., Effects Of Bending Strain On The Critical Current And AC Loss of BSCCO/Ag Tapes, Supercon. Sci. Technol, 17 (2004) 1018–1021.
20. Oomen, M.P., Rieger, J., Hussennether, V. ve Leghissa, M., AC Loss In High Temperature Superconducting Conductors, Cables And Windings For Power Devices, Supercon. Sci. Technol, 17 (2004) S394-S399.
21. Zola, D., Gomory, F., Polichetti, M., Strycek, F., Seiler, E., Husek, I., Kovac, P. ve Pace, S., A Study Of Coupling Loss On bi-Columnar BSCCO/Ag Tapes Through AC Susceptibility Measurements, Supercon. Sci. Technol, 17 (2004) 501–511.
22. Rabbers, J.J., Ten Haken, B. ve Ten Kate, H.H.J., Hysteresis Loss And The Voltage-Current Relation In BSCCO Tape Superconductors, Physica C, 401 (2004) 165–170.
23. Lee, C. ve Soek, B.Y., Design Of The 3 Phase 60 MVA HTS Transformer With YBCO Coated Conductor Windings, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15 (2005) 1867-1870.
24. Kim, S.H., Kim, W.S., Choi, K.D., Joo, H.G., Hong, G.W., Han, J.H., Lee, H.G., Park, J.H., Song, H.S. ve Hahn, S.Y., Characteristic Tests Of a 1 MVA Single Phase HTS Transformer With Concentrically Arranged Windings, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15 (2005) 2214–2217.
25. Gouge, M.J., Cole, M.J., Demko, J.A., Fisher, P.W., Foster, C.A., Grabovickic, R., Lindsay, D.T., Lue, J.W., Roden, M.L. ve Tolbert, J.C., High-Temperature Superconducting Tri-Axial Power Cable, Physica C, 392 (2003) 1180-1185.

26. Amemiya, N., Jin, F., Jiang, Z., Shirai, S., ten Haken, B., Rabbers, J.J., Ayai, N. ve Hayashi, K., Total AC Losses In Twisted And Untwisted Multifilamentary Bi-2223 superconducting tapes carrying AC transport current in AC longitudinal magnetic field, Supercon. Sci. Technol., 16 (2003) 314–321.
27. Rabbers, J.J., Ten Haken, B. ve Ten Kate, H.H.J., Analysis Of AC Loss In Superconducting Power Devices Calculated From Short Sample Data, IEEE Trans. Appl. Supercond., 13 (2003) 1731–1734.
28. Sjöström, M., Hysteresis Modelling of High Temperature Superconductors, Ph.D. Thesis No: 2372, Swiss Federal Institute of Technology – Lausanne., 2001
29. Norris, W.T., Calculation Of Hysteresis Losses In Hard Superconductors Carrying As: Isolated Conductors And Edges Of Thin Sheets, Journal of Physics D, 3 (1970) 489
30. Campbell, A.M., A General Treatment Of Losses In Multifilamentary Superconductors, Cryogenics, 22 (1982) 3.
31. Müller K.-H., Andrikidis, C., Liu, H.K. ve Dou, S.X., AC Hysteresis Losses In Monofilamentary Pb-Bi-Sr-Cu-O/Ag Tapes, Physica C, 247 (1995) 74.
32. Hughes, T., Darmann, F., Horvat, J. ve Dou, S.X., Reduction Of The A.C. Losses In Ag Sheathed PbBi2223 Tapes With Twisted Filaments, Physica C, 325 (1999) 77.
33. Bean, C.P., Magnetisation Of High-Field Superconductors, Review of Modern Physics, 36 (1964) 31.
34. Clem, J. R., Magnetic Susceptibility of Superconductors And Other Spin Systems, ed Hein, R. A., Francavilla, T. L. and Liebenberg, D. H., New York: Plenum, 1991.
35. Fabbriatore, P., Farinon, S., Gömöry, F. ve Innocenti, S., AC Losses In Multifilamentary High- $T_C$  Tapes Due To A Perpendicular AC Magnetic Field, Supercond. Sci. Technol., 13 (2000) 1327.
36. Çelebi, S. ve LeBlanc, M.A.R., Flux Line Cutting In Granular High  $T_c$  Superconducting Tubes, Narlikar, A.V. (Editör), Studies of High Temperature Superconductors: Vortex Physics, 42, 169-245, Nova Science Publishers, New York, 2002.
37. London, H., Alternating Current Losses In Superconductors Of The Second Kind, Physics Letters, 6 (1963) 162-165.
38. Kim, Y.B., Hempstead, C.F. ve Strnad, A.R., Critical Persistent Current In Hard Superconductors, Physical Review Letters, 9 (1962) 306-309.
39. Irie, F. ve Yamafuji, K., Theory of Flux Motion in Non-Ideal Type-II Superconductors, Journal of the Physical Society of Japan, 23 (1967) 255-268.

40. Green, I. M. ve Hlawiczka, P., Pinning Forces And Hysteresis In Type 2 Superconductors, Proceedings of The Institution of Electrical Engineers, 114 (1967) 1329.
41. Yasukochi, K., Ogasawara, T., Usui, N. ve Ushio, S., Magnetic Behaviour And Effect Of Transport Current On It In Superconducting Nb-Zr Wire, Journal of the Physical Society of Japan, 19 (1964) 1649-1661.
42. Yasukochi, K., Ogasawara, T., Usui, N., Kobayashi, H. ve Ushio, S., Effect Of External Current On The Magnetization Of Non-Ideal Type II Superconductors, Nb-Zr Wire, Journal of the Physical Society of Japan, 31 (1966) 89-99.
43. Fietz, W.A., Silcox, J., Beasley, M.R., Webb, W.W. ve Strnad, A.R., Magnetization Of Superconducting Nb-25%Zr Wire, Phys. Rev. A, 43 (1964) 130–159.
44. Clem, J.R., Theory Of AC Losses In Type-II Superconductors With A Field-Dependent Surface Barrier, Journal of Applied Physics, 50 (1979) 3518–3530.
45. LeBlanc, M.A.R. ve Lorrain J.P., Effect Of Field Independent Surface Barriers On Hysteresis Losses In Type II Superconductord, Cryogenics, 24 (1984) 143–155.
46. Chen, D.-X. ve Sanchez, A.,. Magnetic Properties Of High-T<sub>c</sub> Superconducting Grains, Phys. Rev. B, 45 (1992) 10793-10796.
47. Çelebi, S., Öztürk, A. ve Çevik, U., Magnetic Responses Of A High-T<sub>c</sub> Semi Reversible YBCO Superconductors, Journal of Alloys and Compounds, 288 (1999) 249-254.
48. LeBlanc, M.A.R., LeBlanc, D., Cameron, D.S.M. ve Çelebi, S., Disclosure Hidden Magnetic Moments In Low And High T<sub>c</sub> Hysteretic And Semi-Reversible Type II Superconductors During Warming To T<sub>c</sub>, Supercon. Sci. Technol., 13 (2000) 109–126.
49. Ozturk, A., Celebi, S. ve LeBlanc, M.A.R., Observations And Model Of A New AC-Loss Valley In A YBCO Superconductor, Supercon. Sci. Technol., 18 (2005)1029.
50. Çelebi, S., Ozturk, A., Kolemen, U. ve LeBlanc, M.A.R., Observations Of A Hysteresis Loss Valley In Yttrium Barium Copper Oxide Superconductors, J. of Appl. Phys., 100, 7 2006 073912-073918.
51. Tang, H., Wang, Y.Z., Yang, Z.Q., Zhang, C., Hua, L., De Boer, F.R., Qiao, G.W., Zhou, S.H. ve Peng, H.T., Irreversibility Line Of Tl-1223/Ag Sheathed Superconducting Composite Tape, Physica C, 282-287 (1997) 2111-2112.
52. Fagnard, J.F., Vanderbemden, P., Cloots, R. ve Ausloos, M., Anisotropic AC Behavior Of Multifilamentary Bi-2223/Ag Tapes, IEEE Trans. Appl. Supercond., 13 (2003) 2976.

53. Majoros, M., Glowacki, B.A., ve Campbell, A.M., Magnetic Screening As A Possible Way To Decrease Transport AC Losses In Multifilamentary Superconductors — Basic Theoretical Considerations, Physica C, 334 (2000) 129-40.
54. Duchateau, J. L., Turck, B. ve Ciazynski, D., Handbook Of Applied Superconductivity, Edited by Seeber, B., (Institute of Physics), 31-205, 1998.
55. Takacs, S. ve Gömöry, F., Influence Of Viscous Flux Flow On AC Magnetisation Of High-Tc Superconductors, Supercon. Sci. Technol., 3 (1990) 94-99.
56. Takacs, S., Gömöry, F., Pevela, A. ve Lobotka, P., Penetration Field In Superconductors With Considerable Flux Creep And Flux Flow, Supercon. Sci. Technol., 5 (1992) S452-455.
57. Polak, M., Kvitkovic, J., Mozola, P., Usak, E., Barnes, P.N. ve Levin, G.A., Frequency Dependence Of Hysteresis Loss In YBCO Tapes, Supercon. Sci. Technol., 20 (2007) 293-298.
58. Friend, C. M., Studies of High Temperature Superconductors, 32, 1–61, edited by Narlikar Nova Science Publishers, Inc. New York, 1999.
59. Takacs, S. ve Yamamoto, J., Time Constants Of Flat Superconducting Cables At Low And High Frequencies, Cryogenics, 34 (1994) 571.
60. Kwasnitza, K. and Clerc, St., AC Losses Of Superconducting High-Tc Multifilament Bi-2223/ Ag Sheathed Tapes In Perpendicular Magnetic Fields ,Physica C, 233 (1994) 423.
61. Goldfarb, R. B, Lelental, M. ve Thompson, C. A., Magnetic Susceptibility Of Superconductors And Other Spin Systems, eds R A Hein, T L Francavilla and D H Liebenberg (New York: Plenum), 49, 1991.
62. Brandt E. H., Thin Superconductors In A Perpendicular Magnetic AC Field: I. General Formulation And Strip Geometry, Phys. Rev. B, 49 (1994) 9024.
63. Gomory, F., Souc, J., Laudis, A., Kovac P. ve Husek, I., Experimental Study Of The Effect Of Filament Orientation On Transport And Magnetic AC Loss In Bi-2223/Ag Multifilamentary Tapes, Supercond. Sci. Technol., 13 (2000) 1580–1586.
64. Anderson, P.W., Theory of Flux Creep In Hard Superconductors, Phys. Rev. Lett., 9 (1962) 309.
65. Bulachkov, L., Magnetic Relaxation Over The Bean-Livingston Surface Barrier , Phys. Rev. B, 47 (1993) 8056.
66. Kwasnitza, K. ve Widmer, Ch., Strong Magnetic History Dependence Of Magnetic Relaxation In High-Tc Superconductors , Physica C, 184 (1991) 341.

67. LeBlanc, M.A.R., Cameron, D.S.M., Krzywinski, M. ve LeBlanc, D., Magnetic Relaxation On Bridges Between The Envelopes Of Major Hysteresis Loops Of Type II Superconductors, Supercond. Sci. Technol. 10 (1998) 625.
68. Beasley, M.R., Labusch, R. ve Webb, W.W., Flux Creep In Type-II Superconductors , Phys. Rev., 181 (1969) 682.
69. Shi, D., Xu, M., Umezawa, A. ve Fox, R.F., Temperature And Field Dependence Of Magnetic Relaxation In A  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  Single Crystal, Phys. Rev. B., 42 (1990) 2062.
70. LeBlanc, M.A.R., Cameron, D.S.M., Çelebi, S. ve Pascal, J.-P., Effect Of The Configuration Of The Trapped Flux On The Decay Rate Of Remanent Magnetic Moments In Type II Superconductors , Supercond.Sci. Technol., 11 (1998) 359.
71. Blinov, E.V., Lahderanta, E., Laiho, R. ve Stepanov, Y.P., Trapping And Relaxation Of Inter- And Intragrain Vortices In  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , Physica C, 199 (1992) 201.
72. Brandt, E.H., Universality Of Flux Creep In Superconductors With Arbitrary Shape And Current-Voltage Law, Phys. Rev. Lett., 76 (1996) 4030.
73. Brandt, E.H. ve Gurevich, A., Linear AC Response Of Thin Superconductors During Flux Creep, Phys. Rev. Lett., 76 (1996) 1723.
74. Gurevich, A. ve Küpfer, H., Phys. Rev. B., Time Scales Of The Flux Creep In Superconductors, 48 (1993) 6477.
75. Isaac, I., Jung, J., Murakami, M., Tanaka, S., Mohamed, M.A.-K. ve Friedrich, L., Relaxation Of Persistent Current And The Energy Barrier  $U_{\text{eff}}(J)$  Close To  $T_c$  In A Grain-Aligned  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , Phys. Rev. B., 51 (1995) 11806.
76. Lairson, B.M., Sun, J.Z., Bravman, J.C. ve Geballe, T.H., Reduction Of The Magnetization Decay Rate In High- $T_c$  Superconductors, Phys. Rev.B., 42 (1990)1008.
77. Maley, M.P., Willis, J.O., Lessure, H. ve McHenry, M.E., Dependence Of Flux –Creep Activation Energy Upon Current Density In Grain-Aligned  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , Phys. Rev.B., 42 (1990) 2639.
78. Malozemoff, A.P., Flux Creep In High Temperature Superconductors, Physica C, 185–189 (1991) 264.
79. Mota, A.C., Juri, G., Visani, P. ve Pollini, A., Flux Motion In High- $T_c$  Superconductors, Physica C, 162–164 (1989) 1152.
80. Mohamed, M.A.-K., Jung, J. ve Franck, J.P., Flux Creep And Penetration In Fe Doped  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , Phys. Rev. B., 41 (1990) 4286.



81. Yeshurun, Y. ve Malozemoff, A.P., Giant Flux Creep And Irreversibility In An Y-Ba-cu-O Crystal: An Alternative To The Superconducting-Glass Model, Phys. Rev. Lett., 60 (1988) 2202.
82. Yeshurun, Y., Malozemoff, A.P. ve Shaulov, A., Magnetic Relaxation In High-Temperature Superconductors, Rev. Mod. Phys., 68 (1996) 911.
83. Çelebi, S., Comparative AC Susceptibility Analysis On Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O High-Tc Superconductors, Physica C, 316 (1999) 251-256.
84. Anderson, P.W. ve Kim, Y.M., Hard Superconductivity: Theory Of The Motion Of Abrikosov Flux Lines, Rev. Mod. Phys., 36 (1964) 39.
85. Çelebi, S. ve LeBlanc, M.A.R., Flux Trapping Phenomena In Sintered Tubes Of High-Tc Superconductors, Phys. Rev. B., 49 (1994) 16009.
86. Çelebi, S. ve Düzgün, İ., AC Losses In A Commercial Bi:2223/Ag Tape, Supercond.Sci. Technol., 22 (2009) 034018.
87. Çelebi, S., Düzgün, İ. ve Öztürk, A., AC Loss Study By AC Susceptibility Measurement In A Commercial Bi:2223/Ag Tape Prepared By The CTFF Method: H // c Axis And Short Specimen, Supercond.Sci. Technol., 23 (2010) 025021.
88. Düzgün, İ., Öztürk, A. ve Çelebi, S., Irreversibility Line And Flux Relaxation In Bi:2223/Ag Tape Prepared By CTFF Technique: H // c Axis, J.Supercond.Nov.Magn., (2010), DOI 10.1007/s10948-010-0780-2

## ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Samsun'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Samsun'da tamamladı. 1998 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Rize Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı. 2002 yılında bölüm ikincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. İlk yıl İngilizce hazırlık programına katıldı ve başarıyla tamamladı. 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Rize Fen-Edebiyat Fakültesine Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2005 yılında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı ve aynı enstitüde Doktora öğrenimine başladı. 2006 yılında Rize Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesine araştırma görevlisi olarak atandı. Halen Rize Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.