

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**Bi-2223 SÜPERİLETKEN BOBİN/ŞERİT TASARIMI, YAPIMI VE AA  
KARATERİZASYONU: MANYETİK ENERJİ DEPOLAMA KAPASİTESİNİN  
İNCELENMESİ**

**Ebru ŞİMŞEK KILIÇARSLAN**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2018**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Ebru ŞİMŞEK KILIÇARSLAN tarafından hazırlanan “Bi-2223 Süperiletken Bobin/Şerit Tasarımı, Yapımı ve AA Karakterizasyonu: Manyetik Enerji Depolama Kapasitesinin İncelenmesi ” adlı tez çalışması 27/09/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman :** Prof. Dr. Ali GENÇER  
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



**Jüri Üyeleri :**

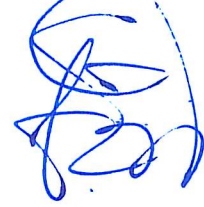
**Başkan :** Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ  
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



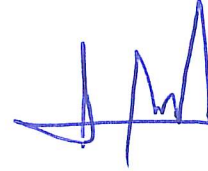
**Üye :** Prof. Dr. İbrahim BELENLİ  
Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



**Üye :** Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ  
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



**Üye :** Prof. Dr. Haluk KORALAY  
Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



**Üye :** Prof. Dr. Ali GENÇER  
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**

**Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN**  
Enstitü Müdürü

## ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları ve atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

27/09/2018



Ebru ŞİMŞEK KILIÇARSLAN

## ÖZET

Doktora Tezi

Bi-2223 SÜPERİLETKEN BOBİN/ŞERİT TASARIMI, YAPIMI VE AA  
KARATERİZASYONU: MANYETİK ENERJİ DEPOLAMA KAPASİTESİNİN  
İNCELENMESİ

Ebru ŞİMŞEK KILIÇARSLAN

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali GENÇER

Bu tez çalışmasında, süperiletken (Bi,Pb)-2223 fazlı tel/şeritler kullanılarak süperiletken bobinlerin tasarımı, yapımı ve kritik parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda ilk olarak  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ve  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip olacak şekilde katıhal reaksiyonu ve sıvı amonyum nitrat yöntemleri ile yüksek sıcaklık süperiletkeni B(Pb)SCCO tozu üretilmiştir. Bu üretilen tozlardan külçe ve Ag, Ag-Cu, Nb kılıflı tel numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan külçe ve tel numunelerin kristal yapı özellikleri; X-ışını toz kırınımı yöntemi (XRD) ile mikroyapı özellikleri ise; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. Manyetik özellikleri ise AA alınganlık sistemi ile araştırılmıştır. Külçe ve tel numuneler üzerinde tavlama süresinin süperiletkenlik parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak için 50 ile 140 K aralığında standart dört nokta kontak yöntemi ile numune üzerinden 50 mA DC akım uygulanarak sıcaklığın fonksiyonu olarak elektriksel direnç ölçümleri alınmıştır. Sıfır manyetik alanda transport kritik akım değerleri sıvı azot içerisinde dört nokta kontak yöntemi ile ölçülmüştür. Daha sonrada üretilen (Bi,Pb)-2223 fazlı tel kullanılarak süperiletken bobin üretimi yapılmıştır. Ayrıca dış kılıfta farklı güçlendirme malzemesi kullanılan iki çeşit Bi-2223 şeritler satın alınmıştır. Satın alınan bu şeritlerden pancake tipi bobinler hazırlanmıştır. Bununla birlikte bobin yapımında kullanılan şeritlerin ve süperiletken bobinlerin önemli bir araştırma konusu olan AA kayıplar ölçülmüştür. Son olarak, bu tez çalışmasında aynı alanda farklı geometriye sahip süperiletken bölgenin AA kayıpları COMSOL paket programı yardımıyla hesaplanmıştır.

**Ekim 2018, 102 sayfa**

**Anahtar Kelimeler** Bi-2223, Süperiletken tel/şerit ve bobin; transport alternatif akım (AA) kayıpları, enerji depolaması

## ABSTRACT

Ph.D. Thesis

### Bi-2223 SUPERCONDUCTOR COIL/TAPES, DESIGN, CONSTRUCTION AND CHARACTERISATION: INVESTIGATION OF MAGNETIC ENERGY STORAGE CAPACITY

Ebru ŞİMŞEK KILIÇARSLAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Ali GENÇER

The main purpose of this thesis is to determine the design, construction and critical parameters of the superconducting coils by using (Bi,Pb)-2223 phase wires. In this respect, the high-temperature superconducting B(Pb)SCCO powder has firstly been produced by solid state reaction and liquid ammonium nitrate techniques in such a way that they also possess  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  and  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stoichiometry. Then, bulk and Ag, Ag-cu, Nb sheated wires were prepared from produced powder mixture. Accordingly, Crystal structure of the prepared bulk and wire samples were determined by X-ray powder diffraction method (XRD) and the microstructure properties by scanning electron microscopy (SEM). The magnetic properties were investigated via AC susceptibility system. Throughout the analyses, Electrical resistivity measurements were taken in the range of 50 to 140 K with a standard fourpoint contact method by applying 50 mA DC current over the sample as a function of temperature for investigating the effect of annealing time on the superconductivity parameters on bulk and wire/strip samples. Eventually, the superconducting coil was produced by using produced (Bi,Pb)-2223 phase wire. On the other hand, two type Bi-2223 strips with different reinforcement materials were purchased for the outer sheath. These strips were used to prepare pancake type coils. In addition to this, AC losses, which is an important research topic for the strips used for making coils and superconducting coils were measured. Finally, in this thesis study, AC losses of the superconducting region having different geometries in the same area were calculated with the help of COMSOL package program.

**October 2018, 102 pages**

**Key Words** Bi-2223, Superconductor wire/tape and coil, transport AC loss, energy storage.

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim ve bu tez çalışmam sürecinde eşsiz deneyimi ve bilgisi ile beni sürekli öğrenme ve araştırma yapmaya teşvik eden, her türlü desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali GENCER'e (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) en derin saygılarımla teşekkür ederim.

Tez çalışmam sürecinde değerli bilgilerini benimle paylaşan, çalışmalarımda beni yönlendiren, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan Sayın hocam Doç. Dr. Serap SAFRAN'a (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarını sürdürdüğüm Ankara Üniversitesi Katı Hal Fiziği Laboratuvarı'nda ve Ankara Üniversitesi Süperiletken Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde beraber çalıştığım Hamit ÖZTÜRK, Meryem ALP, Dr. Sahure GEÇER, Dr. Ercan ERTEKİN ve Elvan COŞKUN'a çalışmalarım sırasında verdikleri destek ve yaptıkları yardımlardan dolayı teşekkür ederim.

Üretilen numunelerimin direnç sıcaklık ölçümleri sırasındaki katkılarından dolayı Sayın hocam Doç Dr. Mustafa AKDOĞANA'a (Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı), Tez izleme komitesi jürisinde bulunan Sayın hocalarım Prof. Dr. İbrahim BELENLİ (Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) ve Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ'e (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) saygılarımla teşekkür ederim.

Doktora eğitimim sürecinde bana her türlü desteği verip, sevgisini hiç esirgmeden her koşulda yanımda olan hayat arkadaşım sevgili eşim Ercan KILIÇARSLAN'a ve hayatımın ışığı oğlum Yiğit Feza'ya sonsuz teşekkür ederim.

Beni bugünlere yetiştiren her zaman yanımda olup, desteğini esirgemeyen bu hayattaki en büyük şansım olan aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 113F150-1001 numaralı "Farklı Klıflı Bi-2223 Süperiletken Tel ve Şeritlerden Bobin Yapımı ve Transport Alternatif Akım Kayıplarının İncelenmesi" başlıklı proje tarafından desteklenmiştir.

Ebru KILIÇARSLAN  
Ankara, Eylül 2018

## İÇİNDEKİLER

### TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. TEMEL KAVRAMLAR .....	4
2.1 Süperiletkenliğin Keşfi.....	4
2.2 Meissner-Ochsenfeld Etkisi.....	5
2.3 I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler.....	6
2.4 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri .....	7
2.4.1 BSCCO sistemi .....	8
2.5 AA Kayıp .....	9
2.5.1 Histeretik kayıplar .....	10
2.5.2 Çiftlenim kayıpları.....	11
2.5.3 Eddy-Akım kayıpları .....	12
2.6 Norris Model.....	12
3. GEREÇ VE YÖNTEMLER.....	13
3.1 BSCCO Süperiletken Toz üretimi .....	13
3.2 Külçe Numunelerin Üretimi.....	17
3.3 Tel Numunelerin Üretimi .....	18
3.3.1 Ag kılıflı tel numuneler .....	19
3.3.2 Ag-Cu alaşım kılıflı tel numuneler .....	21
3.3.3 Nb kılıflı teller.....	22
3.3.4 Çok damarlı Ag kılıflı teller .....	23
3.4 BSCCO Süperiletken Bobin Yapımı .....	30
4. BULGULAR .....	33

<b>4.1 XRD Analizleri .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.1 Külçe numunelerin XRD analizleri .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 AA Alınganlık Ölçümleri.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.1 Külçe numunelerin AA alınganlık ölçümleri.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.2 Tel numunelerin AA alınganlık ölçümleri.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.2.1 Ag kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.2.2 Ag-Cu alaşım kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.2.3 Nb kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.2.4 Çok damarlı Ag kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3 <math>\rho</math>-T Ölçümleri .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.1 Külçe numunelerin <math>\rho</math> -T ölçümleri .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.2 Tel numunelerin <math>\rho</math>-T Ölçümleri.....</b>	<b>60</b>
<b>4.3.2.1 Ag kılıflı tellerin <math>\rho</math>-T ölçümleri .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3.2.2 Ag-Cu alaşım kılıflı tellerin <math>\rho</math>-T ölçümleri.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.2.3 Çok damarlı Ag kılıflı tellerin <math>\rho</math>-T ölçümleri.....</b>	<b>67</b>
<b>4.4 I-V Ölçümleri .....</b>	<b>69</b>
<b>4.5 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri .....</b>	<b>72</b>
<b>4.5.1 Külçe numunelerin SEM analizleri.....</b>	<b>72</b>
<b>4.5.2 Tel ve şerit numunelerin SEM analizleri.....</b>	<b>73</b>
<b>4.6 Transport AA Kayıp Ölçümleri.....</b>	<b>75</b>
<b>4.6.1 Şeritlerin transport AA kayıp ölçümleri .....</b>	<b>76</b>
<b>4.6.2 Bobinlerin transport AA kayıp ölçümleri .....</b>	<b>78</b>
<b>4.7 Süperiletken Bobinlerin Analizi .....</b>	<b>83</b>
<b>4.7.1 İndüktans.....</b>	<b>83</b>
<b>4.7.2 Depolanan enerji.....</b>	<b>85</b>
<b>4.8 Farklı Geometriye Sahip Süperiletken Bölgenin AA Kayıpları .....</b>	<b>86</b>
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>94</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>97</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>101</b>



## SİMGELER DİZİNİ

$\mu$	Manyetik Geçirgenlik
A	Vektör Potansiyeli
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
E	Elektrik Alan
$E_d$	Enerji
H	Manyetik Alan
$H_c$	Kritik Manyetik Alan
$H_{c1}$	Alt Kritik Manyetik Alan
$H_{c2}$	Üst kritik Manyetik Alan
J	Akım Yoğunluğu
$J_c$	Kritik Akım Yoğunluğu
P	Toplam Kayıp
T	Sıcaklık
$T_c$	Kritik Sıcaklık
V	Skaler Potansiyeli
$\mu_0$	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
$\rho$	Özdirenç
$\sigma$	İletkenlik
$\chi$	Alınanlık

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kritik alan $H_c$ 'nin sıcaklık bağımlılığı.....	4
Şekil 2.2 İdeal iletken için, a) $T < T_c$ durumunda manyetik alan uygulandığında b) $T > T_c$ durumunda manyetik alan uygulandığında.....	5
Şekil 2.3 I. tip süperiletkenlerin: a. mıknatıslanma eğrileri, b. faz diyagramları.....	6
Şekil 2.4 II. tip süperiletkenlerin: a. mıknatıslanma eğrileri, b. faz diyagramları .....	7
Şekil 2.5 $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ bileşiği için: a. $n=1$ için 2201 fazının, b. $n=2$ için 2212 fazının ve c. $n=3$ için 2223 fazının kristal yapısı .....	9
Şekil 2.6 M-H eğrisi.....	11
Şekil 3.1 Tozların kalsinasyon süreci.....	16
Şekil 3.2 Külçe numunelerin ısıl işlem süreci.....	18
Şekil 3.3 Doldurulan tüplerin şematik gösterimi, tel çekme cihazı ve çekilmiş telin.....	18
Şekil 3.4 Tel numunelerin ısıl işlem süreci .....	19
Şekil 3.5 Nb teller: a. hava ortamında ısıl işlem görmüş, b. havası boşaltılmış tüpler içinde, c. ısıl işlemde sonra.....	23
Şekil 3.6 M serisi: a. 7 damarlı, b. 49 damarlı tellerin fotoğrafları.....	25
Şekil 3.7.a. 1 damarlı, b. 7 damarlı, c. 49 damarlı M serisine numunelerin optik mikroskobu ile alınan görüntüleri .....	26
Şekil 3.8 MX serisi tellerin fotoğrafları .....	28
Şekil 3.9.a. 7 damarlı, b. 49 damarlı MX serisine numunelerin optik mikroskobu ile alınan görüntüleri .....	28
Şekil 3.10 Bobin sarımı için kullanılan: a. 19,9 m uzunluğundaki tele ait görsel, b. tamburda tel çekme işlemi yapılırken ve c. dışı yalıtılmış tele ait görsel.....	30
Şekil 3.11 Üretilen telden bobin sarımı esnasında çekilen fotoğraflar .....	31
Şekil 3.12 Satın alınan şeritten bobin sarımı esnasında çekilen fotoğraflar .....	32
Şekil 4.1 SS(1,85) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri .....	33
Şekil 4.2 AN(1,85) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri.....	34
Şekil 4.3 SS(1,65) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri .....	34
Şekil 4.4 AN(1,65) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri.....	35
Şekil 4.5 Farklı ısıl işlem süreleri için SS(1,85) ve AN(1,85) grubu numunelerin AA alınganlık grafiği .....	38
Şekil 4.6 Farklı ısıl işlem süreleri için SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerin AA alınganlık grafiği .....	39
Şekil 4.7 SS(1,85) grubu numunelerin $d\chi^2/dT$ 'nin sıcaklığa karşı grafiği .....	40

Şekil 4.8 AN(1,85) grubu numunelerin $d\chi'/dT$ 'nin sıcaklığa karşı grafiği.....	41
Şekil 4.9 Farklı ısıtım süreleri (48/72/96/120 saat) için SS(1,85), AN(1,85), SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa bağlı değişimi.....	43
Şekil 4.10 SS(1,85)-120s, AN(1,85)-120s, SS(1,65)-120s ve AN(1,65)-120s numunelerinin 125 Hz'de 80, 640 ve 1280 [A/m] AA alan büyüklüğü.....	44
Şekil 4.11 845 °C'de, 72 saat ısıtım süresine tabi tutulmuş SS(1,65)Ag tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	45
Şekil 4.12 845 °C'de, 120 saat ısıtım süresine tabi tutulmuş SS(1,65)Ag tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	45
Şekil 4.13 SS(1,65)AgT1-72s ve SS(1,65)AgT1-120s numunelerine ait AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	46
Şekil 4.14 845 °C'de, 120 saat ısıtım süresine tabi tutulmuş AN(1,65)Ag tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	47
Şekil 4.15 845 °C'de, 120 saat ısıtım süresine tabi tutulmuş SS(1,85)AgT1 tel numunenin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	48
Şekil 4.16 845 °C'de, 120 saat ısıtım süresine tabi tutulmuş SS(1,65)AgT1, AN(1,65)AgT1 ve SS(1,85)AgT1 tel numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	49
Şekil 4.17 845 °C'de ısıtım tabi tutulmuş, 120 saat ısıtım süresine sahip: a. SS(1,65)Cu1T, b. SS(1,65)Cu2, c. SS(1,65)Cu3 d. SS(1,65)Cu4 alaşım kılıflı tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	50
Şekil 4.18 845 °C'de ısıtım tabi tutulmuş, 120 saat ısıtım süresine sahip SS(1,65)AgT1, SS(1,65)Cu1T1, SS(1,65)Cu2T1 ve SS(1,65)Cu3T1 tel numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	52
Şekil 4.19 845 °C'de ısıtım tabi tutulmuş, 120 saat ısıtım süresine sahip SS(1,85)AgT1 ve SS(1,85)Cu1T1 tel numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	53
Şekil 4.20 845 °C'de ısıtım tabi tutulmuş, iki farklı ısıtım süresine sahip SS(1,85)NbT1-48s ve SS(1,85)NbT172s tel numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	54
Şekil 4.21 M serisi numuneler için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	55
Şekil 4.22 MX serisi numuneler için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	56
Şekil 4.23 MY serisi numuneler için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	56

Şekil 4.24 M-1, MX-1 ve MY-1 serisi numuneleri için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği .....	57
Şekil 4.25 Ohmmetre kullanılan direnç ölçüm düzeneği .....	58
Şekil 4.26 4 nokta kontak yöntemiyle direnç ölçüm düzeneği .....	58
Şekil 4.27 SS(1,85) serisi külçe numunelerin $\rho$ -T grafikleri .....	59
Şekil 4.28 AN(1,85) serisi külçe numunelerin $\rho$ -T grafikleri .....	59
Şekil 4.29 SS(1,65)Ag-72s serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği .....	60
Şekil 4.30 SS(1,65)Ag-120s serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	61
Şekil 4.31 AN(1,65)Ag-120s serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği .....	62
Şekil 4.32 SS(1,65)Cu1 serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	63
Şekil 4.33 SS(1,65)Cu2 serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	64
Şekil 4.34 SS(1,65)Cu3 serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	64
Şekil 4.35 SS(1,65)Cu4 serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	65
Şekil 4.36 SS(1,65)AgT1, SS(1,65)Cu1T1, SS(1,65)Cu2T1, SS(1,65)Cu3T1 ve SS(1,65)Cu4T1 numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	66
Şekil 4.37 M serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	67
Şekil 4.38 MX serisi numunelerin $\rho$ -T grafiği.....	67
Şekil 4.39 Ölçüm için hazırlanan şerit ve pancake bobinlerin resimleri.....	71
Şekil 4.40.a. SS(1,65)-48s, b. SS(1,65)-72s, c. SS(1,65)-96s, d. SS(1,65)-120s, e. AN(1,65)-48s, f. AN(1,65)-72s, g. AN(1,65)-96s h. AN(1,65)-120s numunelerinin SEM mikroyapı ölçümleri .....	73
Şekil 4.41.a. SS(1,65)AgT1-72s, b. SS(1,65)AgT1-120s, c. SS(1,65)Cu1T1-120s, d. SS(1,65)Cu2T1-120s, e. SS(1,65)Cu3T1-120s, f. SS(1,65)Cu4T1-845-120s, g. AN(1,65)AgT1-845-72s h. AN(1,65)AgT1-845-120s numunelerinin SEM mikroyapı ölçümleri.....	74
Şekil 4.42 Bakır alaşımlı Sumitomo şeridinin SEM mikroyapı ölçümleri .....	75
Şekil 4.43 Transport AA kayıp düzeneği.....	76
Şekil 4.44 SS BSCCO şeride ait transport AA kaybın normalize akım değerine karşı grafiği .....	77
Şekil 4.45 CA BSCCO şeride ait transport AA kaybın normalize akım değerine karşı grafiği .....	77
Şekil 4.46 CA ve SS BSCCO şeritlerinin 144,8 Hz'de transport AA kaybın normalize akım değerine karşı grafiği.....	78
Şekil 4.47 Ölçüm yöntemi için pancake bobinde gerilim kontaklarının gösterimi.....	79
Şekil 4.48 Bobinler üzerindeki kontaklız halkanın ve kontaklı halkanın gösterimi.....	80
Şekil 4.49 SS bobin için transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği .....	80
Şekil 4.50 CA bobin için transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği .....	81

Şekil 4.51 SS ve CA bobinler için transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği .....	82
Şekil 4.52 Dairesel sarımlı pancake bobin şekli .....	83
Şekil 4.53 Elips şeklindeki süperiletken bölgenin akım yoğunluğu dağılımının gösterimi.....	90
Şekil 4.54 Elips şeklindeki süperiletken bölgenin manyetik alan dağılımının gösterimi.....	90
Şekil 4.55 Elips şeklindeki süperiletken bölge için uygulanan akım değerlerine karşı gelen akım yoğunluğu grafiği.....	91
Şekil 4.56 Dikdörtgen şeklindeki süperiletken bölgenin akım yoğunluğu dağılımının gösterimi .....	91
Şekil 4.57 Dikdörtgen şeklindeki süperiletken bölgenin manyetik alan dağılımının gösterimi .....	92
Şekil 4.58 Daire şeklindeki süperiletken bölgenin akım yoğunluğu dağılımının gösterimi.....	92
Şekil 4.59 Daire şeklindeki süperiletken bölgenin manyetik alan dağılımının gösterimi.....	92
Şekil 4.60 Aynı alana sahip elips, dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgelerin transport AA kayıp grafiği .....	93

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 YSS aletlerin DSS aletlere göre avantajları ve dezavantajları.....	2
Çizelge 3.1 Elementlerin ağırlıkları .....	13
Çizelge 3.2 Bileşiklerin özellikleri.....	14
Çizelge 3.3 $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ve $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ stokiyometrisi için hesaplanan başlangıç toz miktarları .....	15
Çizelge 3.4 Külçe numunelerin isimlendirilmesi.....	17
Çizelge 3.5 Ag kılıflı üretilen t°el numunelerin adlandırılmaları .....	20
Çizelge 3.6 Ag-Cu alaşım kılıflı tel numunelerin adlandırılmaları.....	22
Çizelge 3.7 Nb kılıflı tel numunelerin adlandırılmaları .....	23
Çizelge 3.8 Üç seri çok damarlı tellerin kılıf özellikleri.....	24
Çizelge 3.9 M serisi numune özellikleri .....	25
Çizelge 3.10 M serisi tel numunelerin adlandırılmaları.....	26
Çizelge 3.11 MX serisi numune özellikleri .....	27
Çizelge 3.12 MX serisi tel numunelerin adlandırılmaları.....	28
Çizelge 3.13 MY serisi numune özellikleri .....	29
Çizelge 3.14 MY serisi tel numunelerin adlandırılmaları.....	30
Çizelge 3.15 Bi-2223 şeritlerin ve pancake tipi bobinlerin özellikleri .....	31
Çizelge 4.1 SS(1,85) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri .....	36
Çizelge 4.2 AN(1,85) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri. ....	36
Çizelge 4.3 SS(1,65) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri. ....	36
Çizelge 4.4 AN(1,65) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri .....	37
Çizelge 4.5 SS(1,85) ve AN(1,85) grubu numunelerin tane içi ve taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklıkları .....	41
Çizelge 4.6 SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerin tane içi ve taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklıkları .....	42
Çizelge 4.7 Cu-Ag alaşım kılıflı tellerin AA alınganlık grafiklerinden elde edilen kritik sıcaklık değerleri.....	51
Çizelge 4.8 SS(1,65)Cu1, SS(1,65)Cu2, SS(1,65)Cu3 ve SS(1,65)Cu4 alaşım kılıflı tel numune serilerinin $\rho$ -T grafiklerinden elde edilen kritik sıcaklık değerleri .....	65
Çizelge 4.9 M ve MX serisi numunelerin $T_{c,0}$ (K) ve t değerleri.....	68

Çizelge 4.10 Hazırlanan bazı tel numunelerin sıfır dış manyetik alanda transport kritik akım değerleri (77 K).....	70
Çizelge 4.11 CA ve SS şeritlerinin ve bu şeritlerden yapılan pancake bobinlerin kritik akım yoğunluğu değerleri .....	71
Çizelge 4.12 Pancake bobinin sarım şekline göre değişken sabitlerinin değerleri .....	85
Çizelge 4.13 Elips şeklindeki süperiletken bölgenin AA kayıp hesaplarında kullanılan parametreler .....	88
Çizelge 4.14 Dikdörtgen şeklindeki süperiletken bölgenin AA kayıp hesaplarında kullanılan parametreler .....	88
Çizelge 4.15 Daire şeklindeki süperiletken bölgenin AA kayıp hesaplarında kullanılan parametreler .....	89



## 1. GİRİŞ

Günümüzde mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olması ve her geçen gün azalması artan enerji ihtiyacı da düşünüldüğünde önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yıllara göre enerji üretim ve tüketim verimliliği alanında yapılan çalışmalar incelendiğinde her zaman ilk sıralarda yer almıştır. Enerji üretimi ve tüketimi bir ülkenin gelişmişliği ile orantılıdır. Artan enerji tüketimi o ülkenin gelişme eğiliminde olduğunun göstergesidir. Mevcut enerji kaynakları göz önüne alındığında (petrol, kömür, su ve nükleer kaynaklar vb.) bu kaynakların gelecekte yetersiz kalacağı herkes tarafından iyi bilinmektedir. Bununla birlikte güneş, rüzgâr, hidrojen ve benzeri gibi yenilenebilir enerji kaynakları enerji üretimi alanında kullanılmaktadır. Ancak bu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliği ve verimliliği dikkate alındığında toplam enerji üretiminde çok düşük bir paya sahiptirler. Bu sebeple bilim çevreleri alternatif enerji kaynaklarının daha yaygın kullanımını sağlamak için çaba sarf etmektedirler. Ayrıca var olan kaynaklardan üretilen enerjinin kullanımına ilişkin tasarrufların yapılması, depolanması ve şebekedeki kayıpların minimize edilmesi önemlidir. Şebekede tasarruflu kullanım, depolama ve kayıpların minimize edilmesi için bazı devre elemanları kullanılmaktadır. Bu devre elemanları; bobinler, güç devreleri ve soğutucu kısımlardan oluşmaktadır. Bobin yapımında genellikle normal iletkenler kullanılmaktadır. Ancak normal iletkenlerden yapılan bobinlerin, bazı dezavantajları vardır. Bunlar sistemdeki kayıpların büyük miktarda olması ve artan enerji talebi sebebiyle ortaya çıkan ihtiyacı karşılamada yetersiz kalması şeklinde ifade edilebilir. Buna rağmen günümüzde maliyet ve teknolojik kullanılabilirlik analizi yapıldığında, bu iletkenler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Normal iletkenin dezavantajları göz önüne alındığında son yıllarda süperiletken şerit/teller kullanılarak süperiletken bobinler yapılmaktadır. Süperiletken bobinler, MRI (Magnetic resonance imaging), SQUID (superconducting quantum interference device), SMES (Distributed Superconducting Magnetic Energy Storage) ve FCL (Fault-Current Limiters) gibi süperiletkenlerin en güncel uygulamalarında kullanılmaktadır (Rose-Innes 1994, Kleiner vd. 2004, Kim vd. 2005, Eckroad 2009, Weijia vd. 2009). Bu uygulamalarda kullanılan süperiletken bobinler, düşük sıcaklık süperiletken (DSS) ve yüksek sıcaklık süperiletken (YSS) tel/şeritler kullanılarak yapılmaktadır. DSS ve YSS birbirlerine göre avantajlara ve



dezavantajlara sahiptirler. YSS'lerin LTS'lere göre avantajları ve dezavantajları çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1 YSS aletlerin DSS aletlere göre avantajları ve dezavantajları

YSS Avantajları	YSS Dezavantajları
Krojenik sistemi ucuz	Düşük akım yoğunluğu
Yüksek soğutma verimliliği	Büyük kırılgenlik
Büyük güvenilirlik	İletkenin büyüklüğünde artış (yüksek maliyet)
Çevresel faydalar	Quench'e karşı az tolerans

Süperiletkenlerin kullanıldığı teknolojik sistemlerin en büyük dezavantajından biri soğutma mekanizmasıdır. Soğutma sistemleri çalışma maliyetini artırır ve süperiletken sistemlerin tercihini az hale getirir. Süperiletken bobin yapımında düşük sıcaklık süperiletkenleri kullanılırsa, sistemi soğutmak için sıvı helyuma ihtiyaç duyulur. Düşük sıcaklık süperiletkenlerinin kullanılması maliyeti artırır ve daha karmaşık bir soğutma sistemini gerektirir. Ancak son yıllarda soğutma teknolojilerindeki büyük gelişmeler sayesinde soğutucu sıvı olmaksızın kapalı devre sistemler kullanılarak istenilen düşük sıcaklıklara inilmesinde maliyet oldukça azalmıştır. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri sistemi soğutmak için sıvı azota ihtiyaç duyması bakımından süperiletken uygulamalarda kolaylık sağlamaktadır. İlk yüksek sıcaklık süperiletkeni 1986 'da Bednorz ve Müller tarafından bulunan 30 K civarında kritik sıcaklığa sahip  $La_2CuO_4$  bileşiğidir (Bednorz and Müller 1986). Yaygın olarak uygulamada  $YBa_2Cu_3O_x$  (Y-123),  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$  (Bi-2212) ve  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  (Bi-2223) yüksek sıcaklık süperiletkenleri kullanılmaktadır (Yamasaki vd. 1993, Wagner vd. 1995, Seeber 1998, Larbalestier vd. 1998, Malozemoff vd. 1999). Tüm seramik bazlı yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin kristal yapısı diğer elementlerin arasında sandviç edilmiş bakır-oksit tabakalardan oluşur.

Yüksek sıcaklık süperiletkenliği önemli avantajlara sahip olmasına ve gelecek vadetmesine rağmen teorik olarak oluşumu henüz tam olarak anlayamamıştır. Düşük sıcaklık süperiletkenliğini başarılı bir şekilde açıklayan BCS ((Bardeen-Cooper-

Schrieffer) teorisi yüksek sıcaklık süperiletkenliğini tam olarak açıklayamamaktadır. Bununla beraber yüksek sıcaklık malzemeleri II. tip süperiletkenleri olarak adlandırılırlar (Oomen 2000). II. tip süperiletkenlerinde alternatif manyetik alanlar ve transport akımlar enerji kaybına sebep olur. Bu enerji kaybı alternatif akım (AA) kaybı olarak adlandırılır. Süperiletkenlerdeki AA kayıp aynı şartlar altındaki normal iletkendeki resistif kayıptan çok daha düşüktür. 77 K'de çalışan tipik bir aletin toplam güç tüketimi, süperiletkendeki AA kaybın yaklaşık 15 katıdır (Ries vd. 1998). Bundan dolayı AA kaybın doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Kayıp, uygulanan akım ve manyetik alana bağlıdır (Ries vd. 1998).

Bu tez çalışmasında yüksek sıcaklık süperiletkeni olan Bi-2223 alaşımı üzerine detaylı bir araştırma yapılmıştır. İlk olarak yüksek sıcaklık süperiletkeni olan Bi-2223 tozları üretilmiştir. Üretilen tozlardan külçe ve farklı kılıflı tel numuneler hazırlanmıştır. Daha sonrada üretilen Bi-2223 fazlı tel kullanılarak süperiletken bobin üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dış kılıfta farklı güçlendirme malzemesi kullanılan iki çeşit Bi-2223 şeritler satın alınmıştır. Satın alınan bu şeritlerden pancake tipi bobinler yapılmıştır. Bu tez çalışmasında bölüm 2'de süperiletkenliğin temel kavramları verilmiştir. Bölüm 3'de hazırlanan külçelerin, tellerin ve bobinlerin üretim koşulları ve kullanılan teknikler detaylı olarak anlatılmıştır. Bölüm 4'de hazırlanan külçe ve tel numunelerin yapısal, mikro yapı ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Bununla birlikte bölüm 4'de bobin yapımında kullanılacak olan şeritlerin ve süperiletken bobinlerin önemli bir araştırma konusu olan AA kayıpları sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde COMSOL paket programı yardımıyla hesaplanan, sabit alanda farklı geometriye sahip süperiletken bölgenin AA kayıpları incelenmiştir. Bölüm 5'de de bu tez çalışmasındaki araştırma sonuçları verilmiştir.

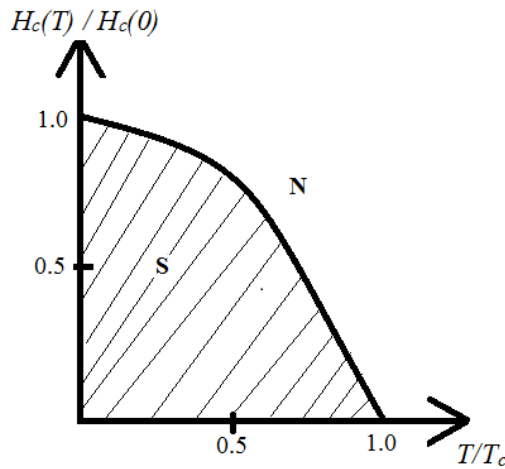
## 2. TEMEL KAVRAMLAR

### 2.1 Süperiletkenliğin Keşfi

Süperiletkenlik 1911 yılında Lieden Laboratuvarı'nda keşfedildi. H. Kamerlingh-Onnes Cıvanın elektriksel direncinin sıcaklığa bağımlılığını çalışırken, sıcaklık 4 K civarındayken direncin aniden sıfıra düştüğünü ve sıcaklık 4 K altında olduğunda da bu durumun devam ettiğini gözlemledi (Onnes 1911). En önemlisi sıcaklık azaltıkça direncin kademeli olarak azalmayıp aniden sıfıra düşmesiydi. Bu olay süperiletkenlik olarak adlandırıldı. Cıva'nın süperiletkenliği keşfedildikten sonra kalay, kurşun, indiyum, alüminyum, niyobyum ve diğer elementlerde de aynı özelliği gösterdiği keşfedildi. Bunun yanı sıra bazı alaşımların ve intermetalik alaşımların da süperiletken özellik gösterdiği bulundu. Normal durumdan süperiletken duruma geçiş sıcaklığı kritik sıcaklık  $T_c$  olarak adlandırıldı. Bu keşiften kısa bir süre sonra süperiletkenlik durumunun sadece sıcaklık değil aynı zamanda manyetik alana da bağımlı olduğu bulundu. Bu manyetik alan malzemenin kritik alanı  $H_c$  olarak adlandırıldı ve  $H_c$ 'nin sıcaklığa bağımlılığın deneysel formülü

$$H_c(T) = H_0(T) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmiştir (Schmidt 1997). Bu bağımlılık şekil 2.1'de verilmiştir.



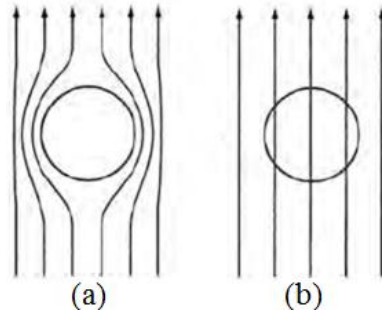
Şekil 2.1 Kritik alan  $H_c$ 'nin sıcaklık bağımlılığı

## 2.2 Meissner-Ochsenfeld Etkisi

Süperiletkenliğin keşfinden sonra 22 yıl boyunca bilim adamları bir süperiletkenin ideal bir iletken olduğunu yani sıfır dirence sahip bir metal parçası olduğuna inandılar. Bu inanın doğru olmadığını bilinen bir düşünce deneyi ile göstereyim. İdeal bir iletkeni ele alalım, farz edelim ki ideal bir iletken sıfır dış manyetik alanda kritik sıcaklığın altına soğutulsun ve daha sonra manyetik bir alan uygulansın. Bu durumda şekil 2.2.a'da görüldüğü gibi manyetik alan numuneye nüfuz etmez. Aslında manyetik alan ideal iletkenin yüzey tabakasına nüfuz ettikten sonra Lenz Yasası'na göre indüklenmiş akım anında dış alanın zıttı yönünde bir manyetik alan oluşturur. Bundan dolayı numune içindeki toplam manyetik alan sıfır olur. Bu durum Maxwell denklemleriyle gösterilebilir. Faraday yasasına göre değişen manyetik alan ile numune içinde

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

bağlantısına göre bir elektrik alan indüklenir. Burada  $c$  ışığın vakumdaki hızı,  $E$  elektrik alan ve  $B$  manyetik alanı göstermektedir. İdeal bir iletkende  $\mathbf{E}=\mathbf{J} \rho$  bağlantısına göre  $\mathbf{E}=0$ 'dır. Burada  $\rho$  öz direnç (ideal iletkende  $\rho=0$ ),  $\mathbf{J}$  indüklenmiş akım yoğunluğudur. Yani manyetik akı yoğunluğunu  $\mathbf{B}=\text{sabit}$  olduğunu, aynı zamanda dış manyetik alan uygulanmadan önce  $\mathbf{B}=0$  olduğu göz önüne alınırsa manyetik alan uygulandıktan sonrada  $\mathbf{B}=0$  olduğu sonucuna varılır. Fakat ideal bir iletkeni dış manyetik alan uygulanıp daha sonra kritik sıcaklığın altına soğutulup ( $T < T_c$ ), manyetik alan kaldırılırsa elektrodinamik tamamen farklı bir sonuç öngörür. Bu durumundan şekil 2.2.b'de görüldüğü gibi manyetik alan numuneye nüfuz eder (Schmidt 1997).



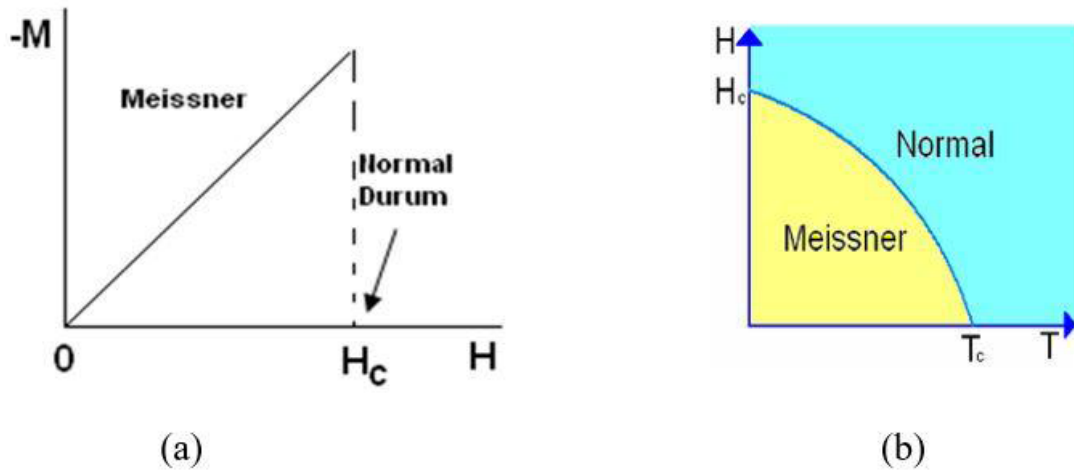
Şekil 2.2 İdeal iletken için, a)  $T < T_c$  durumunda manyetik alan uygulandığında b)  $T > T_c$  durumunda manyetik alan uygulandığında.

1933'den önce süperiletkenin basitçe bir ideal iletken olduğuna inanılıyordu. Fakat Meissner ve Ochsenfeld 1933'de yaptıkları deneyle bunun doğru olmadığını ortaya çıkardılar (Meissner ve Ochsenfeld 1933). Onlar süperiletkenin başlangıç durumdan bağımsız olarak dış manyetik alanın varlığında  $T < T_c$  durumunda numune içindeki manyetik alanın sıfır olduğunu gösterdiler.

### 2.3 I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler

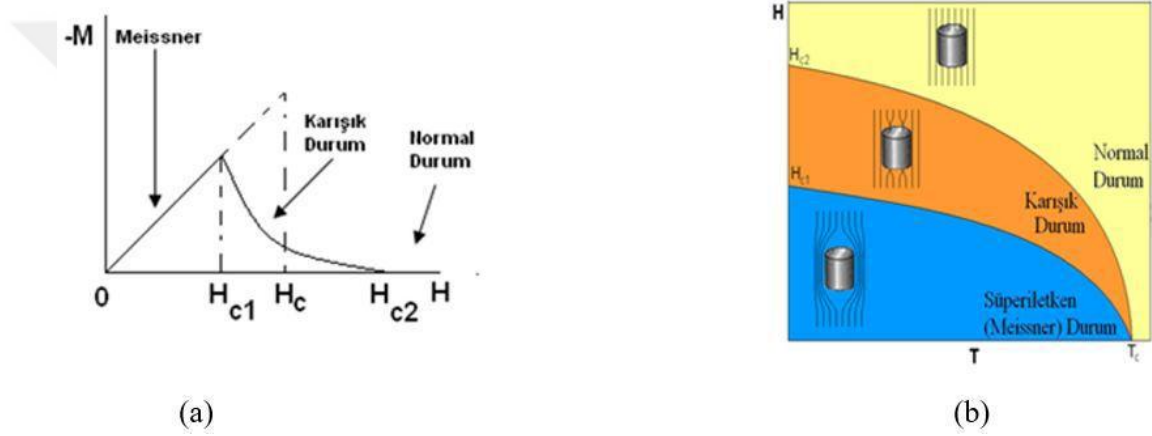
1950 yılında Abrikosov, Ginzburg Landau teorisiyle uygulanan manyetik alana bağlı olarak bilinen tüm süperiletkenleri I. tip ve II. tip olmak üzere iki kategoriye ayırmamızı sağlamıştır (Abrikosov 1957).

Süperiletkenler uygulanan dış manyetik alana bağlı olarak ya normal ya da süperiletken durumda bulunabilirler. I. tip süperiletken numuneler  $H_c$  değerine kadar Meissner etkisi gösterir. Manyetik alan  $H_c$  değerini üzerine çıkarılırsa Meissner etkisi kırılır ve numune normal duruma geçer. Yani manyetik alan numunenin içine nüfuz eder. Cıva, kurşun alüminyum ve kalay gibi birçok element I. tip süperiletkenlere örnek verilebilir. Şekil 2.3'de I. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrileri ve faz diyagramları gösterilmiştir. Şekil 2.3.a'da pozitif düşey eksen boyunca mıknatıslanmanın negatif olduğunu gösterir.



Şekil 2.3 I. tip süperiletkenlerin: a. mıknatıslanma eğrileri, b. faz diyagramları

II. tip süperiletken numuneler ise; alt kritik alan ( $H_{c1}$ ) ve üst kritik alan ( $H_{c2}$ ) olmak üzere iki farklı kritik alana sahiptirler. Şekil 2.4'de I. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrileri ve faz diyagramları gösterilmiştir  $H_{c1}$  değerine kadar I. tip süperiletken numunelerle benzer davranışı gösterirler.  $H_{c1}$  ve  $H_{c2}$  değerleri arasında karışık durum olarak adlandırılan durumda bulunurlar. Bu durumda numune hala süperiletkenlik özelliği gösterir. Fakat uygulanan manyetik alanın bir kısmı numuneye nüfuz eder ve numunenin içinde oluşan akıdan dolayı girdap (vortex) durumu ortaya çıkar. Uygulanan alan  $H_{c2}$ 'i aştığında numune süperiletken fazdan normal duruma geçiş yapar.



Şekil 2.4 II. tip süperiletkenlerin: a. mıknatıslanma eğrileri, b. faz diyagramları

## 2.4 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

1986 yılında, 30 K civarında kritik sıcaklığa sahip  $La_2CuO_4$  süperiletkeni bulan Bednorz ve Müller, bu buluşları ile Nobel ödülüne layık görüldüler. Daha sonra peroksit olarak bilinen daha yüksek geçiş sıcaklığına sahip bakır-oksit ( $CuO$ ) düzlemleri içeren süperiletkenler keşfedildi. Bu yüksek sıcaklık süperiletkenleri  $YBa_2Cu_3O_x$  (Y-123),  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$  (Bi-2212),  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  (Bi-2223),  $TlBa_2Ca_2Cu_3O_9$  ve  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$  olup, sırasıyla kritik sıcaklık ( $T_c$ ) değerleri 92 K, 85 K, 110 K, 123 K ve 135 K'dir (Sheahan 2002). Süperiletken transport akımı  $CuO_2$  tabakalarında lokalize olmuştur. Bundan dolayı seramik malzemeler izotropik değildir. Bütün yüksek

sıcaklık süperiletkenleri yüksek anizotropik kristal yapıya sahiptirler ve süperiletken yük taşıyıcılarının lokalize olduğu katmanlı  $\text{CuO}_2$  düzlemlerini içermektedirler.

#### 2.4.1 BSCCO sistemi

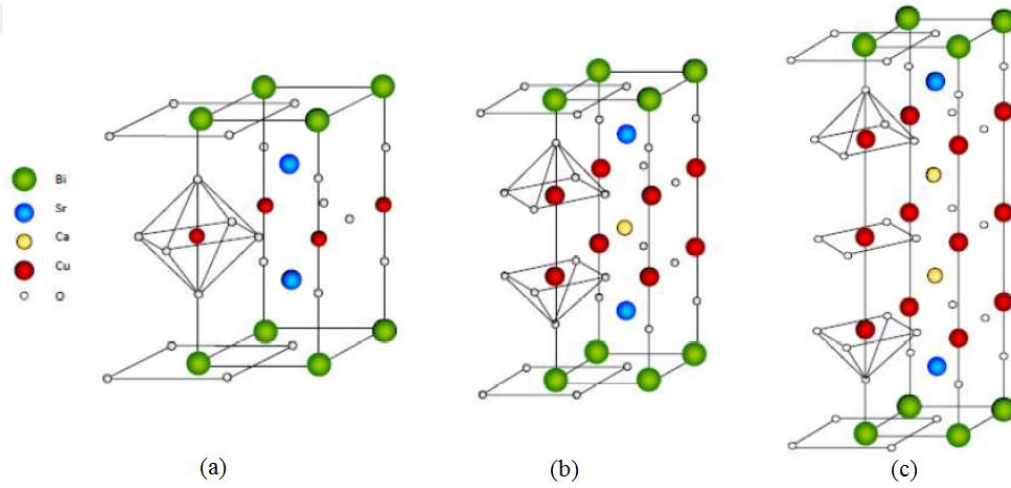
BSCCO sisteminin tarihsel sürecini incelemek anlaşılmasını kolaylaştırır. İlk olarak Michel ve arkadaşları tarafından Bi-Sr-Cu-O sistemi keşfedildi.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_2\text{O}_{6+x}$  stokiyometrisine sahip olacak şekilde  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$  ve  $\text{SrCO}_3$  başlangıç tozlarını kullanarak hazırlanan birleşige  $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 12 saat kalsinasyon işleminden sonra,  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat sinterlenme işlemi yapıldı. Bu bileşiğin elektriksel özdirenç ölçümlerinden  $22\text{ K}$ 'de süperiletkenliğe geçtiği sonucuna ulaşıldı. Ancak özdirenç  $14\text{ K}$ 'de sıfır değerine düştü (Michel vd. 1987).

Maeda ve arkadaşları bu birleşige kalsiyum ilave ederek  $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip bileşiği elde ettiler.  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$  ve  $\text{SrCO}_3$  başlangıç tozlarını kullanarak hazırlanan bu bileşiği  $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 8 saat ısıl işleme tabi tuttular. Bu bileşiğin  $83\text{ K}$ 'de süperiletken faza geçtiğini ve  $75\text{ K}$ 'de özdirençin sıfıra düştüğünü gözlemlediler (Maeda vd. 1988).

1988 yılında, Tarascon ve arkadaşları, Bi-Sr-Ca-Cu-O bileşiğinin üç farklı süperiletken faza sahip olduğunu gösterdiler ve en genel bileşiği  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$  şeklinde tanımladılar. Bu birleşikteki  $n=1,2,3$  olmak üzere 3 farklı değer alır.  $n=1$  olduğunda birleşik  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+x}$  şeklinde olup 2201 faz adını alır ve kritik sıcaklığı  $6\text{ K}$  olarak ölçtüler.  $n=2$  olduğunda birleşik  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8+x}$  şeklinde olup 2212 faz adını alır ve kritik sıcaklığı  $75\text{ K}$  buldular.  $n=3$  olduğunda ise  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$  şeklinde olup 2223 faz adını alır ve kritik sıcaklığı  $110\text{ K}$  ölçülmüştür fakat  $80\text{ K}$ 'e kadar uzanan geniş geçişi yok edememişlerdir (Tarascon vd. 1988).

Daha sonra Bi-Sr-Ca-Cu-O sistemine Mazaki vd. bir miktarda Kurşun (Pb) ilave ettiler ve  $n=3$  fazı için özdirenç eğrilerinde ortaya çıkan kuyruğu yok ettiler. Bu çalışmayla Bi-Sr-Ca-Cu-O sistemine Pb katılması, 2223 faz oranını arttırdığı ve daha kararlı bir yapı

elde edildiği sonucuna varılmıştır (Mazaki vd. 1988). Şekil 2.5’de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$  bileşiği için üç fazdaki kristal yapısı verilmiştir (Safran 2010). Şekil 2.5.a’da  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+x}$  bileşiğinin kristal yapısının iki Bi-O, iki Sr-O ve bir Cu-O düzleminde olduğu gösterilmiştir. Ayrıca 2201 bileşiğinde Cu atomu, 6 oksijen atomuyla oktahedral bir yapı oluşturmuştur. Şekil 2.5.b’de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8+x}$  bileşiğinin kristal yapısının iki Bi-O, iki Sr-O, iki Cu-O ve bir Ca düzleminde olduğu gösterilmiştir. 2212 bileşiğinde Cu atomu 5 oksijen atomuyla piramit şeklinde bağlanmıştır. Şekil 2.5.c’de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$  bileşiğinin kristal yapısının iki Bi-O, iki Sr-O, üç Cu-O ve iki Ca düzleminde olduğu gösterilmiştir. 2223 bileşiğinde tetragonal yapıya sahiptir.



Şekil 2.5  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$  bileşiği için: a.  $n=1$  için 2201 fazının, b.  $n=2$  için 2212 fazının ve c.  $n=3$  için 2223 fazının kristal yapısı

## 2.5 AA Kayıp

Düşük frekanslı tipik elektriksel güç uygulamalarında akı akışı ve akı sızıntısından dolayı sıradan II. tip süperiletkenlerinde direnç ortaya çıkar. II. tip süperiletkenler teknolojiye büyük kullanım alanına sahiptirler. Çünkü II. tip süperiletkenler yüksek manyetik alanlarda daha çok akım taşırlar. Fakat içinde elektrik alan olduğu II. tip süperiletkenlerde kayıplar meydana gelir (Carr 2001).

Süperiletkende ki AA kayıp aynı koşullar altındaki normal iletkendeki dirençsel kayıplardan çok daha düşüktür. AA kayıp, ısı olarak ortaya çıkacağı için, AA kaybın



doğru hesaplaması, doğru ölçülmesi ve minimizasyonu oldukça önemlidir. AA kayıplar enerjiiyi sağlayan kaynağa bağlı olarak iki kategoriye ayrılır. Eğer süperiletkene enerjiiyi manyetik alan sağlıyorsa, mıknatıslanma kaybı oluşur,  $Q_m$  ile gösterilir. Süperiletkene enerjiiyi akım sağlıyorsa, tranport kayıp oluşur.  $Q_t$  ile gösterilir. Numune ki toplam kayıp  $Q = Q_m + Q_t$  şeklindedir.

Üç tip AA kayıp vardır: histeretik kayıplar, çiflenim kayıpları ve eddy akım kayıpları (Ainslie 2012).

### 2.5.1 Histeretik kayıplar

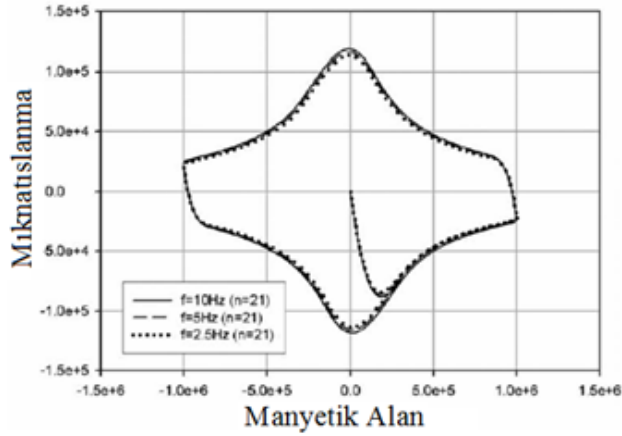
Süperiletken bir malzemeye dış bir manyetik alan uygulandığında, manyetik alan akı çizgileri formunda malzemeye nüfuz eder. Eğer uygulanan manyetik alan değişirse, akı çizgilerinin formu ve iç manyetik alan değişir. Malzeme içindeki manyetik alanın zaman ile değişimi Faraday yasasına göre

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (2.3)$$

şeklinde elektrik alan indükler. Bu elektrik alan malzeme içinde perdeleme akımlarına sebep olur. Bu perdeleme akımları, malzeme içindeki manyetik alan dağılımı Amper yasasına ( $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ ) göre belirler. Perdeleme akımları  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$  ile verilen güç yoğunluğu enerjisi olarak dağılır. Enerji, dış manyetik alan tarafından sağlanır ve alan oluşturan magnetin güç kaynağı ile desteklenir. Akı çizgilerinin hareketini ve perçinlenmenin bozulmasını sağlayan bu enerji, kayıp yaratır. Histeretik kayıplar, girdap perçinlenmesinin sebep olduğu tersinmezliğin bir sonucudur (Carr 2001). Bunun Histeretik kayıp olarak adlandırması, süperiletken içine giren akı perçinlenmeden dolayı girdiği formu koruyamamasıdır. Eğer mıknatıslanma,  $M$ , manyetik alan,  $H$ , karşı çizilir ise, bir histeretik eğrisi elde edilir. Bu eğrinin alanı bize enerji kaybını verir (Rabbers 2001). Bu histeretik kayıplar ısı olarak dağılır. Güçlü perçinleme daha yüksek kayıplara sebep olur. Bu yüzden II. tip süperiletkenlerdeki yüksek akımlar, yüksek histeretik kayıplara yol açar (Golubov 1998). Histeretik döngünün bir örneği şekil 2.4'de

verilmiştir (Hong vd. 2007). Şekil 2.6'dan görüldüğü üzere histeretik kayıplar frekanstan bağımsızdır.

Ayrıca süperiletken bir malzemeye alternatif akım uygulandığında, malzemenin etrafında öz-alan denilen manyetik alan oluşur. Bu öz-alan süperiletken malzemeye nüfuz eder ve öz-alandan kaynaklı histeretik kayıplar meydana gelir.



Şekil 2.6 M-H eğrisi

### 2.5.2 Çiftlenim kayıpları

Histeretik kayıpları minimize etmek için, aynı miktarda akım taşıyan tek damarlı süperiletken tel yerine, çok damarlı süperiletken teller üretilmektedir. Çok damarlı süperiletkenlerde çiftlenim kayıpları önemli bir problemdir, örneğin gümüş kılıflı çok damarlı BSCCO (Bi-Sr-Ca-Cu-O) süperiletken telinde olduğu gibi (Farhoudi, 2005). Değişen manyetik alan çok damarlı süperiletkene uygulandığında bu manyetik alanın oluşturduğu akım süperiletken damarlardan akmaya başlar. Uygulanan manyetik alan yeterince büyükse, süperiletken damarlardan akan akım, süperiletken damardan çıkarak metal matrisin üzerinden geçerek diğer süperiletken damarlara ulaşırlar. Böylece süperiletken damarlar çiftlenmiş olur. Metal matrisin üzerinden geçerken oluşan ohmik kayıplar çiftlenim kayıpları olarak adlandırılır. Çiftlenim kayıpları frekansa bağımlı kayıplardır.

### 2.5.3 Eddy-Akım kayıpları

Zamanla değişen dış bir manyetik alan normal bir iletkene nüfuz ettiğinde, değişen bir elektrik alan indükler ve akımların akmasına sebep olur (Carr 2001). Bunlarda eddy akımları olarak bilinir. Eddy akımları sürtünmeden ve elektronların metal kılıf örgüsündeki hareketinden dolayı bir ısı kaybına sebep olur. Bu ısı kaybı Eddy-akım kaybı olarak isimlendirilir. Eddy-akım kayıplarını azaltmaya yönelik temel yaklaşım, matrisin etkili direncini arttırmaktadır.

### 2.6 Norris Model

Norris 1969 yılında, öz alan altındaki AA kaybı tahmin etmek için analitik bir metot önerdi. Bu method idel davranışı varsayan London model üzerine kurulmuştur. Kritik akımın sadece alanın büyüklüğüne değil aynı zamanda alanın doğrultusuna da bağlı olduğu bilinmesine rağmen, akım yoğunluğunun ortamın manyetik alanından bağımsız olduğu varsayılmıştır.  $I_0$  büyüklüğünde transport akım taşıyan bir süperiletken bir şerit için tranport AA kayıp aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Norris 1970).

$$P_{\text{şerit}} \left[ \frac{W}{m} \right] = \frac{\mu_0 I_c^2 f}{\pi} \left[ \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right) \ln \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right) + \left(1 + \frac{I_0}{I_c}\right) \ln \left(1 + \frac{I_0}{I_c}\right) - \left(\frac{I_0}{I_c}\right)^2 \right] \quad (2.4)$$

Denkelmden görüldüğü gibi şerit için kayıp  $(I_0/I_c)^4$  ile orantılıdır.

Diğer taraftan  $I_0$  büyüklüğünde transport akım taşıyan bir süperiletken bir elips için tranport AA kayıp aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$P_{\text{elips}} \left[ \frac{W}{m} \right] = \frac{\mu_0 I_c^2 f}{\pi} \left[ \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right) \ln \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right) + \left(2 - \frac{I_0}{I_c}\right) \left(\frac{I_0}{2I_c}\right) \right] \quad (2.5)$$

Son olarak elips için kayıp ise  $(I_0/I_c)^3$  ile orantılıdır.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEMLER

#### 3.1 BSCCO Süperiletken Toz üretimi

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$  ( $n=1, 2, 3$ ) serisine uygun şekilde kristallenen, Bi bazlı süperiletkenlerden  $n=3$  fazı olarak bilinen  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  (2223 fazı olarak adlandırılmıştır) süperiletkeninde bir miktar Bi yerine Pb katkı yapılmasının, keskin bir normal-süperiletken faz dönüşümü sağladığı,  $T_c$ ,  $H_c$  ve  $J_c$  değerlerini arttırdığı, erime noktasını düşürdüğü ve süperiletken özellikleri daha kararlı hale getirdiği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Bruno vd.1991, Dorris vd. 1994).

Bu tez çalışmasında,  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ve  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip olacak şekilde katıhal reaksiyonu ve sıvı amonyum nitrat yöntemleri ile Pb katkılı B(Pb)SCCO tozu üretilmiştir. Başlangıç tozları olarak  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (% 99,99),  $\text{PbO}$  (% 99,9995),  $\text{SrCO}_3$  (% 99,994),  $\text{CaCO}_3$  (% 99,9+) ve  $\text{CuO}$  (% 99,9995) istenilen stokiyometride tartılarak karıştırılmıştır. Sr ve Ca kaynağı olarak karbonatlı bileşikler tercih edilmiştir. Çünkü SrO ve CaO atmosferden  $\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{CO}_2$ 'i soğurarak hedeflenen yapı oluşmadan önce bu bileşiklerin hidroksit ve karbonatlı yapıları oluşur. (Balachandran, vd, 1989, Hellstrom 1995). Kullanılan elementlerin ağırlıkları ve bileşiklerin özellikleri sırasıyla çizelge 3.1-3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Elementlerin ağırlıkları

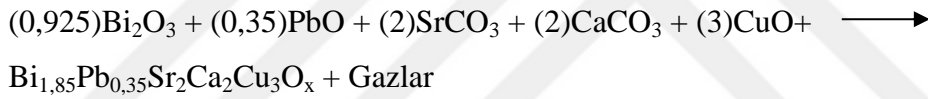
Element	Atomik ağırlığı (au)
Bi	208,98
Pb	207,19
Sr	87,62
Ca	40,08
Cu	63,54
C	12,01
O	15,99

Çizelge 3.2 Bileşiklerin özellikleri

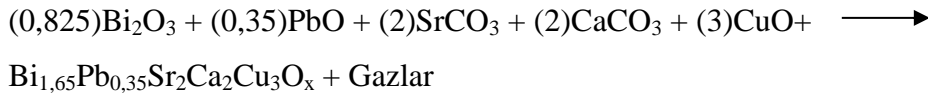
Bileşik	Safılık (%)	Atomik ağırlığı (mol gram)	Renji	Ergime sıcaklığı
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,99	465,96	Açık sarı	860 °C
PbO	99,9995	223,19	Koyu gri	200 °C
SrCO <sub>3</sub>	99,994	147,6282	Beyaz	1497 °C
CaCO <sub>3</sub>	99,9+	56,08	Beyaz	1339 °C
CuO	99,9995	79,5454	Siyah	1362 °C

Bu üretimlerde kimyasal formül şu şekilde yazılabilir.

1. Bi<sub>1,85</sub>Pb<sub>0,35</sub>Ca<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> stokiyometri için;



2. Stokiyometri için (Bi<sub>1,65</sub>Pb<sub>0,35</sub>Ca<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>);



şeklinde olur. Üretilecek numunenin 1 molünün a.k.b. (atomik kütle birimi) cinsinden mol gramı T olarak hesaplanır. Reaksiyona göre bir orantı kurulacak olursa ve A, 1 mol başlangıç maddesinin a.k.b. cinsinden miktarı, X ise numune hazırlığı için başlangıç madde miktarı ve N hazırlanacak numunenin gram cinsinden miktarı olmak üzere;

$$X = \frac{N(\text{gram}). A(\text{a. k. b.})}{T(\text{a. k. b.})} \quad (3.1)$$

denklemleriyle verilir.

Buna göre, denklem 3.1 kullanılarak başlangıç toz miktarı 10 gram olan Bi<sub>1,85</sub>Pb<sub>0,35</sub>Ca<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> ve Bi<sub>1,65</sub>Pb<sub>0,35</sub>Ca<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> stokiyometrilere için hesaplar

yapılmıştır. Bu stokiyometrilere için, toz hazırlanırken kullanılması gereken bileşiklerin toz miktarları çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ve  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisi için hesaplanan başlangıç toz miktarları

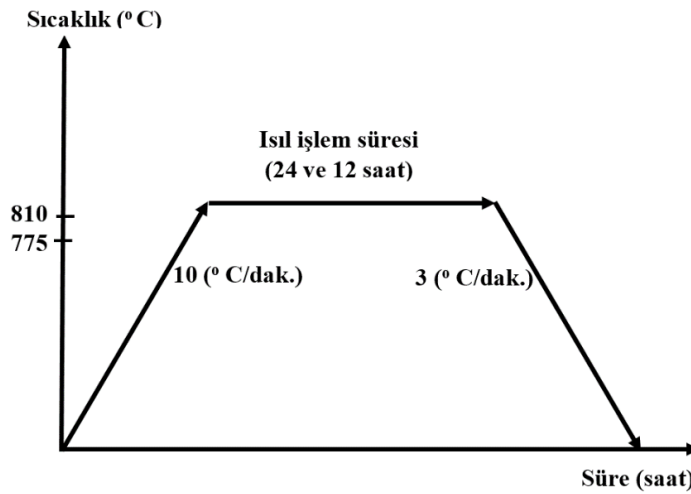
Bileşik	$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (gram)	$\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (gram)
$\text{Bi}_2\text{O}_3$	4,0469	3,7568
PbO	0,7335	0,7634
$\text{SrCO}_3$	2,7722	2,8855
$\text{CaCO}_3$	1,8795	1,9562
CuO	2,2405	2,3319
Toplam	11,6727	11,6938

10 gram numune hazırlamak için toplamda 10 gramdan fazla madde girişi vardır, arta kalan madde miktarı reaksiyondan gaz olarak çıkar.

Katıhal reaksiyonu metodu ile  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ve  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  olacak şekilde iki farklı stokiyometride B(Pb)SCCO tozu üretilmiştir. B(Pb)SCCO üretimi için gerekli olan bileşikler çizelge 3.3’deki ağırlıklarda hassas terazi ile tartılmıştır. Katıhal reaksiyonu metodu ile toz üretim aşaması basamakları aşağıdaki gibi yapılmıştır;

1. Toz karışımı ilk olarak agat havan içine konularak 1 saat homojen bir karışım oluşuncaya kadar karıştırılmıştır. Daha sonra 3 saat boyunca 75 devir/dak. hız ve ağırlıkça top:toz oranı 1:3 olacak şekilde bilyeli değirmen (ball-milling) cihazı ile öğütülmüştür.
2. Birinci öğütmesi tamamlanan tozlara 10 °C /dak. ısıtma, 3 °C /dak. soğutma hızı ile 775 °C’de 12 saat süre ile kalsinasyon işlemi yapılmıştır. Kalsinasyon süreci şekil 3.1’de gösterilmektedir.

3. Tozlar tekrar bilyeli değirmene konulup, ilk öğütmeyle aynı şartlarda karıştırılmıştır.
4. İkinci öğütmesi tamamlanan tozlara 10 °C/dak. ısıtma, 3 °C/dak. soğutma hızı ile 810 °C'de 24 saat süre ile kalsinasyon işlemi yapılmıştır. Kalsinasyon süreci şekil 3.1'de gösterilmektedir.
5. Kalsinasyon işlemi tamamlanmış olan tozlar son kez agat havanda 1 saat süreyle öğütülmüştür.



Şekil 3.1 Tozların kalsinasyon süreci

Amonyum nitrat metodu ile de  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ve  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  olacak şekilde iki farklı stokiyometride B(Pb)SCCO tozu üretilmiştir. Amonyum nitrat metodu ile toz üretiminde; 10 gr B(Pb)SCCO tozu elde etmek için,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CuO}$  bileşiklerin çizelge 3.3'de hesaplanan madde miktarları hassas terazi ile istenilen stokiyometride tartılarak hazırlanmıştır. Daha sonra 10 gr B(Pb)SCCO tozuna, 10 gr amonyum nitrat ilave edilmiştir ve amonyum nitratın buharlaşması için bu tozlar beher içinde 250 °C'de gaz çıkışı bitine kadar karıştırılmıştır. Elde edilen tozun kalsiyonasyon ve öğütme koşulları katihal reaksiyonu metodu ile aynı şekilde yapılmıştır. Elde edilen B(Pb)SCCO tozu külçe ve tel/şerit yapımı için kullanılmıştır.

### 3.2 Külçe Numunelerin Üretimi

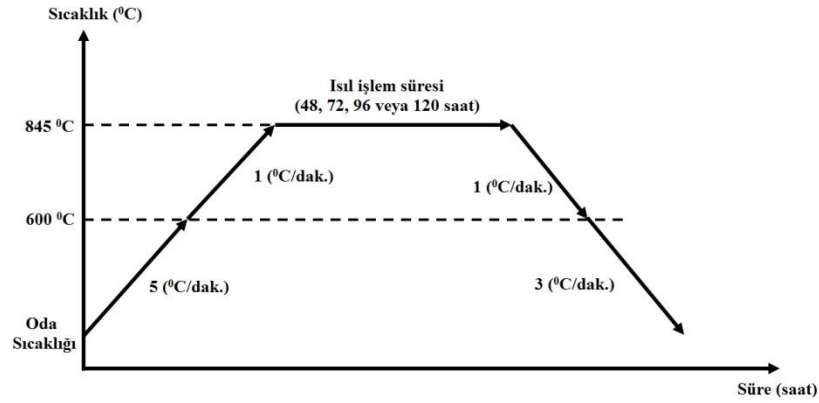
1 gr'lık B(Pb)SCCO tozları, 400 MPa basınç altında 13 mm çapında külçe numune haline getirilmiştir. Bu numunelerin ısıtılma sıcaklığı sabit tutulup, ısıtılma süresinin süperiletkenlik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Bütün numuneler 845 °C'de ısıtılma tabii tutulmuştur. Ayrıca iki farklı üretim metodu ve iki farklı stokiometri oranı birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Üretilen külçe numunelerin adlandırılmaları çizelge 3.4'de özetlenmektedir. Numuneler X-Y şeklinde isimlendirilmiştir. Burada X= SS(1,85), SS(1,65), AN(1,85) ve AN(1,65) şeklinde ifade edilmiştir. Bu numunenin hangi stokiometriye sahip olduğunu ve hangi yöntemle üretildiğini göstermektedir. SS, katıhal reaksiyonu metodu ile, AN amonyum nitrat metodu ile ve (1,85), (1,65) sırasıyla  $Bi_{1,85}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ ,  $Bi_{1,65}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiometriye sahip olarak üretildiğini ifade etmektedir. Y, ise saat cinsinden ısıtılma süresini göstermektedir. Örneğin; SS(1,85)-48s numunesi;  $Bi_{1,85}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiometrisine sahip, katıhal reaksiyon yöntemi ile üretilmiş, 845 °C'de 48 saat ısıtılma tabii tutulmuş numunedir.

Çizelge 3.4 Külçe numunelerin isimlendirilmesi

Katıhal reaksiyonu yöntemi		Sıvı amonyum nitrat yöntemi	
$Bi_{1,85}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$	$Bi_{1,65}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$	$Bi_{1,85}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$	$Bi_{1,65}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$
SS(1,85)- 48s	SS(1,65)- 48s	AN(1,85)-48s	AN(1,65)- 48s
SS(1,85)-72s	SS(1,65)-72s	AN(1,85)-72s	AN(1,65)-72s
SS(1,85)-96s	SS(1,65)-96s	AN(1,85)-96s	AN(1,65)-96s
SS(1,85)-120s	SS(1,65)-120s	AN(1,85)-120s	AN(1,65)-120s

Külçe numunelerin ısıtılma süreci şekil 3.2'de verilmiştir. Külçe numuneler oda sıcaklığında fırına konulduktan sonra 600 °C'ye kadar 5 °C /dakika, 600 °C'den 845 °C'ye kadar 1 °C/dakika ile ısıtılmıştır. 845 °C'de ısıtılma süresi kadar bekledikten sonra şekil 2'de gösterildiği gibi 600 °C ve daha sonra oda sıcaklığına kadar sırasıyla 1 °C/dakika ve 3 °C/dakika hız ile kontrollü olarak soğutulmuştur.





Şekil 3.2 Külçe numunelerin ısıtım süreci

### 3.3 Tel Numunelerin Üretimi

Tel numunelerin hazırlanmasında "tüp içinde toz- powder in tube PIT" yöntemi kullanılmıştır. 10 cm uzunluğundaki tüplerin, uç kısmı 2 cm'lik alüminyum folyo ile kapatılmış ve tüplerin içine kalsinasyonu tamamlanmış tozlar konulduktan sonra tüpün diğer uçtan 1,5 cm'lik kısmı da alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Bu şekilde hazırlanan teller, istenen çapa kadar birkaç cm/s hızda her adımda çapı 0,05 mm inceltilerek, konik şeklindeki haddelerden geçirilerek tel çekme cihazı ile çekilmiştir. Doldurulan tüplerin şematik gösterimi, tel çekme cihazı ve çekilmiş telin başlangıç ve son hali Şekil 3.3'de verilmektedir.

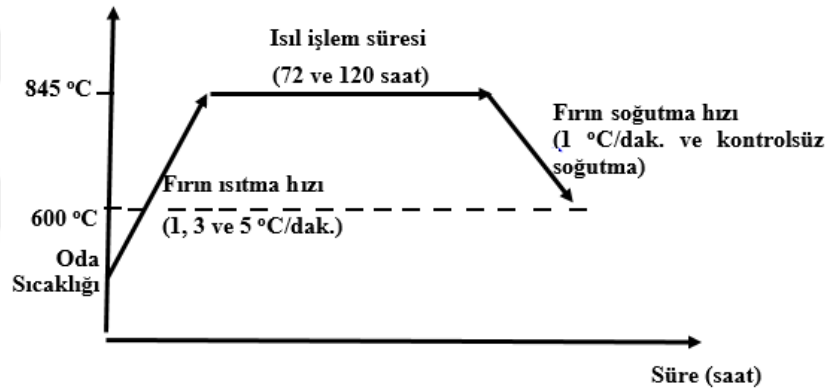


Şekil 3.3 Doldurulan tüplerin şematik gösterimi, tel çekme cihazı ve çekilmiş telin başlangıç ve son hali

Tel numuneler gümüş (Ag) , niobyum (Nb) ve gümüş-bakır (Ag-Cu) alaşım kılıf malzemeleri kullanılarak iki farklı yöntem ve iki farklı stokiyometri için hazırlanmıştır.

Ayrıca  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometriye sahip tozdan, Ag kılıf kullanılarak çok damarlı teller üretilmiştir. Tel numunelerde, kılıf malzemesi, fırın ısıtma hızının, ısı işlem sıcaklığının, ısı işlem süresinin ve fırın soğutma hızının süperiletkenlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Tel numunelerin ısı işlem süreci şekil 3.4’de verilmiştir. Tel numuneler oda sıcaklığında fırına konulduktan sonra 845 °C’ye kadar fırın ısıtma hızı 1, 3 ve 5 °C/dakika olacak şekilde ısıtılmıştır. 845 °C’de ısı işlem süresi kadar bekledikten sonra şekil 3.4’de gösterildiği gibi fırın soğutma kısmı iki şekilde yapılmıştır. Birincisi 600 °C kadar 1 °C /dakika hız ile kontrollü olarak soğutulmuştur. İkinci ise, kontrolsüz bir şekilde fırın soğutmasına bırakılmıştır.



Şekil 3.4 Tel numunelerin ısı işlem süreci

### 3.3.1 Ag kılıflı tel numuneler

Başlangıçta dış kılıf çapı 6 mm ve iç kılıf çapı 4 mm olan gümüş boru içersine süperiletken B(Pb)SCCO tozu konulup, son durumda dış çapı 1,15 mm olan Ag kılıflı teller üretilmiştir. Ag kılıflı tel numuneler, iki farklı yöntemle hazırlanan süperiletken B(Pb)CCO tozları kullanarak yapılmıştır. Katıhal reaksiyonu ve sıvı amonyum nitrat yöntemi ile  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometriye sahip olacak şekilde üretilen süperiletken tozlar kullanılarak hazırlanan Ag kılıflı süperiletken teller 845 °C’de, 72 saat ve 120 saat olmak üzere iki farklı sürede ısı işleme tabi tutulmuştur. Bu

numunelerde, ısıtma süresinin, fırın ısıtma hızının ve fırın soğutma hızının süperiletkenlik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu tellerin ölçüm sonuçları göz önüne alınarak, katıhal reaksiyonu metoduyla  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometriye sahip olacak şekilde üretilen tozlar kullanarak hazırlanan Ag kılıflı süperiletken teller  $845\text{ }^\circ\text{C}$ 'de, 120 saat ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bu numunelerde de, fırın ısıtma hızının ve fırın soğutma hızının süperiletkenlik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üretilen tel numunelerin adlandırılmaları çizelge 3.5'de gösterilmektedir. Çizelge 3.5'de gösterilen numunelerin isimlendirilmeleri külçe numune isimlendirmeye benzer şekilde yapılmıştır. Örneğin,  $\text{AN}(1,65)\text{AgT1F-120s}$  numunesi; amonyum nitrat yöntemiyle üretilmiş ve  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip; Ag kılıflı tel,  $1^\circ\text{C}/\text{dak}$  hız ile  $845\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra, kontrolsüz fırın soğutmasına bırakılmıştır.  $\text{SS}(1,85)\text{AgT5-120s}$  numunesi; katıhal reaksiyonu metoduyla  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip; Ag kılıflı tel,  $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{dak}$  hız ile  $845\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra,  $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{dak}$  hız ile  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur.

Çizelge 3.5 Ag kılıflı üretilen tel numunelerin adlandırılmaları

Katıhal reaksiyonu yöntemi		Sıvı amonyum nitrat yöntemi
$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$	$\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$	$\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
	$\text{SS}(1,65)\text{AgT1-72s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT1F-72s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT3-72s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT3F-72s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT5-72s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT5F-72s}$	$\text{AN}(1,65)\text{AgT1-72s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT1F-72s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT3-72s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT3F-72s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT5-72s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT5F-72s}$
$\text{SS}(1,85)\text{AgT1-120s}$ $\text{SS}(1,85)\text{AgT3-120s}$ $\text{SS}(1,85)\text{AgT5-120s}$	$\text{SS}(1,65)\text{AgT1-120s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT1F-120s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT3-120s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT3F-120s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT5-120s}$ $\text{SS}(1,65)\text{AgT5F-120s}$	$\text{AN}(1,65)\text{AgT1-120s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT1F-120s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT3-120s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT3F-120s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT5-120s}$ $\text{AN}(1,65)\text{AgT5F-120s}$

### 3.3.2 Ag-Cu alaşım kılıflı tel numuneler

% 1Cu - % 99Ag, % 2Cu - % 98Ag, % 3Cu - % 97Ag ve % 4Cu - % 96Ag olmak üzere dört farklı oranda gümüş ve bakır içeren alaşımlı kılıflar kullanılarak gümüş bakır alaşımlı teller üretilmiştir.  $Bi_{1,65}Pb_{0,35}Ca_2Sr_2Cu_3O_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanan süperiletken toz kullanılarak, farklı oranlarda bakır katkısına sahip gümüş bakır alaşım kılıflı (% 1Cu - % 99Ag, % 2Cu - % 98Ag, % 3Cu - % 97Ag, % 4Cu - % 96Ag) üretilen teller, 845 °C'de, 120 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur. Bu numunelerde, dış kılıftaki bakır oranının ve fırın ısıtma hızının süperiletkenlik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu tellerin ölçüm sonuçları göz önüne alınarak, katıhal reaksiyonu metoduyla  $Bi_{1,85}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiyometriye sahip olacak şekilde üretilen tozlar kullanarak hazırlanan % 1Cu - % 99Ag kılıflı süperiletken teller 845 °C'de, 120 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur. Bu numunelerde de, fırın ısıtma hızının süperiletkenlik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üretilen tel numunelerin adlandırılmaları çizelge 3.6'da gösterilmektedir. Çizelge 3.6'da gösterilen numunelerin isimlendirilmeleri Ag kılıflı tel numune isimlendirmeye aynı şekilde yapılmıştır. Örneğın,

-SS(1,65)Cu4T1-120s numunesi; katıhal reaksiyonu metoduyla  $Bi_{1,65}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiyometrisine sahip; % 4Cu - % 96Ag kılıflı tel, 1 °C/dak hız ile 845 °C'ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra, 1 °C/dak hız ile 600 °C'ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur.

-SS(1,65)Cu3T3-120s numunesi; katıhal reaksiyonu metoduyla  $Bi_{1,65}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiyometrisine sahip; % 3Cu - % 97Ag kılıflı tel, 3 °C/dak hız ile 845 °C'ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra, 1 °C/dak hız ile 600 °C'ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur.

Çizelge 3.6 Ag-Cu alaşım kılıflı tel numunelerin adlandırılmaları

	Katıhal reaksiyonu yöntemi	
	$\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$	$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
<b>% 1Cu-% 99Ag kılıf</b>	SS(1,65)Cu1T1-120s SS(1,65)Cu1T3-120s SS(1,65)Cu1T5-120s	SS(1,85)Cu1T1-120s SS(1,85)Cu1T3-120s SS(1,85)Cu1T5-120s
<b>% 2Cu-% 98Ag kılıf</b>	SS(1,65)Cu2T1-120s SS(1,65)Cu2T3-120s SS(1,65)Cu2T5-120s	
<b>% 3Cu-% 97Ag kılıf</b>	SS(1,65)Cu3T1-120s SS(1,65)Cu3T3-120s SS(1,65)Cu3T5-120s	
<b>% 4Cu-% 96Ag kılıf</b>	SS(1,65)Cu4T1-120s SS(1,65)Cu4T3-120s SS(1,65)Cu4T5-120s	

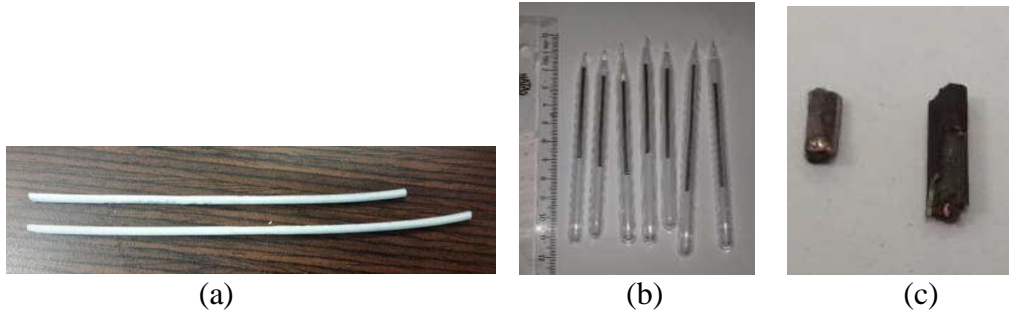
### 3.3.3 Nb kılıflı teller

$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanan süperiletken B(Pb)SCCO tozu kullanılarak, Nb kılıflı tel numuneler üretilmiştir. 20 cm uzunluğundaki dış çapı 6 mm, iç çapı 4,8 mm olan, içi boş Nb tüpün uç kısmından 2,5 cm'lik kısmı alüminyum folyo ile kapatılmıştır. İçi toz ile doldurulduktan sonra diğer uçtan 1,5 cm'lik kısmı tekrar alüminyum folyo ile kapatılarak çekme işlemine hazırlanmıştır. Hazırlanan tel 2,00 mm çapa gelince kadar çekilmiştir. Nb kılıflı süperiletken teller 845 °C' de, 48 saat, 72 saat ve 120 saat olmak üzere üç farklı sürede ısıl işleme tabi tutulmuştur. Üretilen tel numunelerin adlandırılmaları çizelge 3.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.7 Nb kılıflı tel numunelerin adlandırılmaları

Katıhal reaksiyonu yöntemi
$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
SS(1,85)NbT1-48s
SS(1,85)NbT1-72s
SS(1,85)NbT1-120s

Nb kılıflı tel numuneler ilk olarak hava ortamında ısıl işleme tabi tutulmuştur. Ancak şekil 3.5.a'da da görüldüğü üzere malzeme tamamen oksitlenmiştir. Bunun üzerine 5 cm uzunluğunda kesilen teller şekil 3.5.b'de gösterildiği gibi havası boşaltılmış kuartz tüplerin içine konularak ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlem tamamlandıktan sonra tüpün ucu kırılarak numune tüpün dışına çıkartılmış ve AA alınganlık ölçümleri alınmıştır. Ancak bu malzemelerde süperiletkenlik özelliğinin oluşmadığı tespit edilmiştir. (Şekil 3.20'de alınganlık ölçümleri gösterilmiştir.) şekil 3.5.c'de görülen numuneler oldukça kırılğan yapıya sahip olduğu elle kırılarak belirlenmiştir. Bu seride üretilen Nb kılıflı bütün numuneler benzer özellikler taşıdığı belirlenmiştir.



Şekil 3.5 Nb teller: a. hava ortamında ısıl işlem görmüş, b. havası boşaltılmış tüpler içinde, c. ısıl işlemden sonra

### 3.3.4 Çok damarlı Ag kılıflı teller

$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanan süperiletken B(Pb)SCCO tozu kullanılarak, Ag kılıflı bir seri tek ve çok

damarlı tel numuneler üretilmiştir. Dış kılıf özellikleri farklı üç seri çok damarlı tel üretilmiştir. Bu tellerin kılıf özellikleri çizelge 3.8’de verilmektedir.

M, MX ve MY serilerinin ısıtma işlem süresi aynıdır. Üretilen tek ve çok damarlı Ag kılıflı süperiletken teller 1 °C/dak hız ile 845 °C’ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra, 1 °C/dak hız ile 600 °C’ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur.

Çizelge 3.8 Üç seri çok damarlı tellerin kılıf özellikleri

	M serisi (Ag kılıf)	MX serisi (Ag kılıf)	MY serisi (Ag kılıf)
Damar Sayısı	Dış kılıf-İç kılıf (mm)		
1	8-5	6-4	7-6
7	8-5	6,3-5,8	7-6
49	8-5	6,3-5,8	

#### **M serisi:**

$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanan süperiletken B(Pb)SCCO tozu kullanılarak, dış çapı 8 mm ve iç çapı 5 mm olan 15 cm uzunluğundaki içi boş Ag tüpün uç kısmı 2 cm’lik alüminyum folyo ile kapatılmış ve içi toz ile doldurulduktan sonra diğer uçtan 1,5 cm’lik kısmı tekrar alüminyum folyo kapatılarak tek damarlı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 1,65 mm çapında, 293 cm uzunluğunda tek damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir.

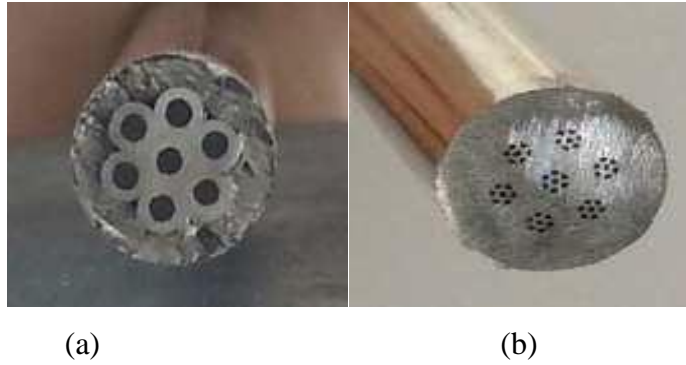
Bu tek damarlı telden 20 cm uzunluğunda 7 adet tel kesilerek dış çapı 8 mm ve iç çapı 5 mm olan, 20 cm uzunluğundaki Ag tüpün içine konularak, 7 damarlı Ag kılıflı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 1,65 mm çapında, 342 cm uzunluğunda 7 damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir.

Daha sonra 7 damarlı telden 20 cm uzunluğunda 7 adet tel kesilerek dış çapı 8 mm ve iç çapı 5 mm olan, 20 cm uzunluğundaki Ag tüpün içine konularak, 49 damarlı Ag kılıflı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 1,65 mm çapında, 307 cm uzunluğunda 49 damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir. Üretilen tellerde kullanılan Ag tüplerinin çapı, tüplerin duvar kalınlığı, elde edilen tellerin çapları ve tellerin ulaşılan uzunlukları çizelge 3.9'da verilmektedir.

Şekil 3.6.a,b'de sırasıyla numune hazırlanması esnasında çekilen 7 ve 49 damarlı tellere ait fotoğraflar gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 M serisi numune özellikleri

Filaman sayısı	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Duvar kalınlığı (mm)	Son çap (mm)	Son uzunluk (cm)
1	8	5	1,5	1,65	293
7	8	5	1,5	1,65	342
49	8	5	1,5	1,65	307



Şekil 3.6 M serisi: a. 7 damarlı, b. 49 damarlı tellerin fotoğrafları

Şekil 3.7.a, b, c'de sırasıyla 1, 7 ve 49 damarlı MA serisine ait teller numunelerinin optik mikroskobu ile alınan görüntüleri gösterilmiştir.



Üretilen tek ve çok damarlı Ag kılıflı süperiletken teller 1 °C/dak hız ile 845 °C'ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra, 1 °C/dak hız ile 600 °C'ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur.



Şekil 3.7.a. 1 damarlı, b. 7 damarlı, c. 49 damarlı M serisine numunelerin optik mikroskobu ile alınan görüntüleri

Üretilen tel numunelerin adlandırılmaları çizelge 3.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.10 M serisi tel numunelerin adlandırılmaları

Katılmal reaksiyonu yöntemi
$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
M-1
M-7
M-49

Çizelge 3.10'da gösterilen çok damarlı tel numuneleri X-Y şeklinde isimlendirilmiştir. Burada X=M, MX ve MY şeklinde ifade edilmiştir. M, MX ve MY kullanılan gümüş kılıfın iç ve dış çap özelliğini göstermektedir. Y= 1,7,49 şeklinde ifade edilmiştir. Bu 1, 7 ve 49 sayıları ise damar sayısını belirtmektedir.

Örneğin; M-7 numunesi; dış çapı 8 mm ve iç çapı 5 mm olan gümüş boru kullanılarak üretilen 7 damarlı teli ifade etmektedir.

### MX serisi:

$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanan süperiletken B(Pb)SCCO tozu kullanılarak, dış çapı 6 mm ve iç çapı 4 mm olan 12 cm uzunluğundaki içi boş Ag tüpün uç kısmı 2 cm'lik alüminyum folyo ile kapatılmış ve içi toz ile doldurulduktan sonra diğer uçtan 1,5 cm'lik kısmı tekrar alüminyum folyo kapatılarak tek damarlı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 1,90 mm çapında, 86,8 cm uzunluğunda tek damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir.

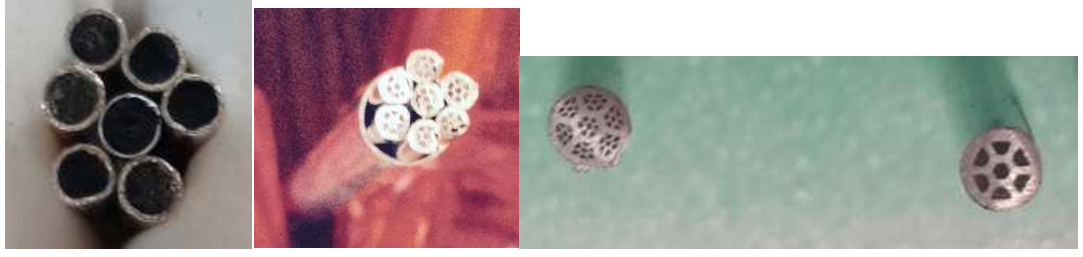
Bu tek damarlı telden 10 cm uzunluğunda 7 adet tel kesilerek dış çapı 6,3 mm ve iç çapı 5,8 mm olan, 15 cm uzunluğundaki Ag tüpün içine konularak, 7 damarlı Ag kılıflı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 1,90 mm çapında, 97 cm uzunluğunda 7 damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir.

Daha sonra 7 damarlı telden 10 cm uzunluğunda 7 adet tel kesilerek dış çapı 6,3 mm ve iç çapı 5,8 mm olan, 10 cm uzunluğundaki Ag tüpün içine konularak, 49 damarlı Ag kılıflı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 1,90 mm çapında, 60 cm uzunluğunda 49 damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir. Üretilen tellerde kullanılan Ag tüplerinin çapı, tüplerin duvar kalınlığı, elde edilen tellerin çapları ve tellerin ulaşılan uzunlukları çizelge 3.11'de verilmektedir.

Çizelge 3.11 MX serisi numune özellikleri

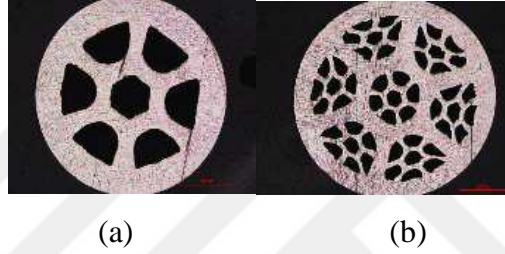
Filaman sayısı	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Duvar kalınlığı (mm)	Son çap (mm)	Son uzunluk (cm)
1	6	4	1	1,90	86,8
7	6,3	5,8	0,25	1,90	97
49	6,3	5,8	0,25	1,90	60

Şekil 3.8'de tel üretim esnasında çekilen bazı fotoğraflar gösterilmiştir.



Şekil 3.8 MX serisi tellerin fotoğrafları

Şekil 3.9.a.b’de sırasıyla 7 ve 49 damarlı MA serisine ait teller numunelerin optik mikroskobu ile alınan görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.9.a. 7 damarlı, b. 49 damarlı MX serisine numunelerin optik mikroskobu ile alınan görüntüleri

Üretilen tek ve çok damarlı Ag kılıflı süperiletken teller 1 °C/dak hız ile 845 °C’ ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra, 1 °C/dak hız ile 600 °C’ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur. Üretilen tel numunelerin adlandırılmaları çizelge 3.12’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.12’de gösterilen numunelerin isimlendirilmeleri çok damarlı M serisi tel numuneleriyle aynı şekilde yapılmıştır. Örneğin; MX-49 numunesi dış çapı 6,3 mm ve iç çapı 5,8 mm olan gümüş boru kullanılarak üretilen 49 damarlı teli ifade etmektedir.

Çizelge 3.12 MX serisi tel numunelerin adlandırılmaları

Katılmal reaksiyonu yöntemi
$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
MX-1
MX-7
MX-49

### MY Serisi:

$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanan süperiletken B(Pb)SCCO tozu kullanılarak, dış çapı 7 mm ve iç çapı 6 mm olan 25 cm uzunluğundaki içi boş Ag tüpün uç kısmı 2 cm'lik alüminyum folyo ile kapatılmış ve içi toz ile doldurulduktan sonra diğer uçtan 1,5 cm'lik kısmı tekrar alüminyum folyo kapatılarak tek damarlı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 2 mm çapında, 151 cm uzunluğunda tek damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir.

Bu tek damarlı telden 14 cm uzunluğunda 7 adet tel kesilerek dış çapı 7 mm ve iç çapı 6 mm olan, 14 cm uzunluğundaki Ag tüpün içine konularak, 7 damarlı Ag kılıflı tel çekme işlemine hazırlanmıştır. Tel çekme işlemi sonunda, 2 mm çapında, 43 cm uzunluğunda 7 damarlı Ag kılıflı tel üretilmiştir.

Bu seride tel üretim esnasında kopmalar meydana gelmiştir. İstenilen uzunluk elde edilemediği için 49 damarlı tel üretilmemiştir. Üretilen tellerde kullanılan Ag tüplerinin çapı, tüplerin duvar kalınlığı, elde edilen tellerin çapları ve tellerin ulaşılan uzunlukları çizelge 3.13'de verilmektedir.

Çizelge 3.13 MY serisi numune özellikleri

Filaman sayısı	Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Duvar kalınlığı (mm)	Son çap (mm)	Son uzunluk (cm)
1	7	6	0,50	2	151
7	7	6	0,50	2	43

Üretilen tek ve çok damarlı Ag kılıflı süperiletken teller 1 °C/dak hız ile 845 °C'ye ısıtılmış, bu sıcaklıkta 120 saat bekledikten sonra, 1 °C/dak hız ile 600 °C'ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur. Üretilen tel numunelerin adlandırılmaları çizelge 3.13'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.14 MY serisi tel numunelerin adlandırılmaları

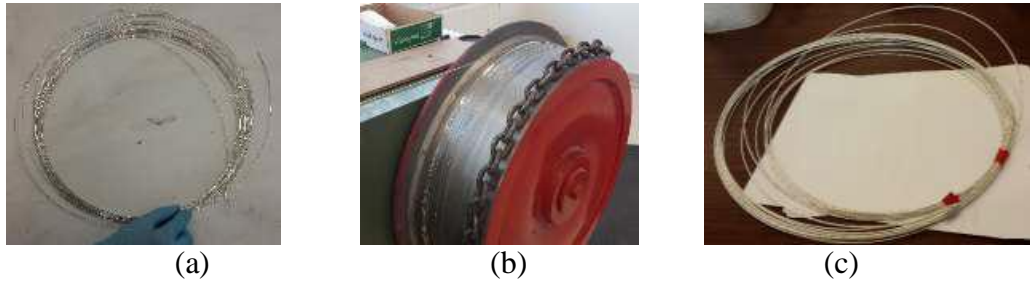
Katıhal reaksiyonu yöntemi
$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$
MY-1
MY-7

Çizelge 3.14’de gösterilen numunelerin isimlendirilmeleri çok damarlı M serisi tel numuneleriyle aynı şekilde yapılmıştır. Örneğin; MY-1 numunesi dış çapı 7 mm ve iç çapı 6 mm olan gümüş boru kullanılarak üretilen tek damarlı teli ifade etmektedir.

### 3.4 BSCCO Süperiletken Bobin Yapımı

Bu tez çalışmasında, üretilen teller ve ticari olarak satılan yüksek sıcaklık süperiletkeni Bi-2223 şeritler kullanılarak iki tip bobin sarımı yapılmıştır. Üretilen teller ve satın alınan Bi-2223 şeritler ile sırasıyla solenoid ve pancake tipi bobin sarımı gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu dış çapı 6 mm, iç çapı 4 mm olan, 1m uzunluğundaki Ag tüpünden başlanarak 1,2 mm çapında 19,8 m uzunluğunda süperiletken tel üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10.a,b) . Sonra bu tel izolasyon malzemesi ile örülerek yalıtımlı hale getirilmiştir (Şekil 3.10.c).



Şekil 3.10 Bobin sarımı için kullanılan: a. 19,9 m uzunluğundaki tele ait görsel, b. tamburda tel çekme işlemi yapılırken ve c. dışı yalıtılmış tele ait görsel

İzolasyonu tamamlanmış olan bu tel kullanılarak çapı 70 mm olan quartz camın etrafına 32 sarım, 2 tabakalı solenoid bobin yapımı gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan solenoid şeklindeki bobine ait bazı fotoğraflar şekil 3.11’de gösterilmektedir. Süperiletken yapıyı oluşturmak için hazırlanan bobin 845 °C’de 48 saat ısıtılma tabii tutulmuştur.

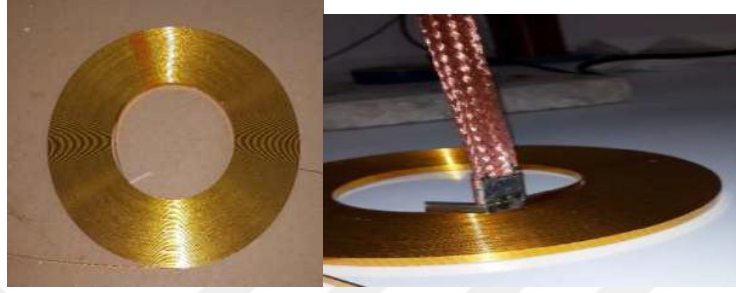


Şekil 3.11 Üretilen telden bobin sarımı esnasında çekilen fotoğraflar

Dış kılıfta farklı güçlendirme malzemesi kullanılan iki çeşit Bi-2223 şeritler satın alınmıştır. Bu dış kılıflardan, biri paslanmaz çelik (SS), diğeri ise bakır alaşım (CA)’dır. Satın alınan bu şeritlerden pancake tipi bobinler yapılmıştır. Bu şeritlerin ve yapılan pancake tipi bobinlerin özellikleri çizelge 3.15’de verilmiştir. Şekil 3.12’de bobin sarımı esnasında çekilen bazı fotoğraflar gösterilmektedir.

Çizelge 3.15 Bi-2223 şeritlerin ve pancake tipi bobinlerin özellikleri

Bobin adı	Şerit genişliği (mm)	Şerit kalınlığı (mm)	İç kılıf /Dış kılıf Malzemesi	İç çap – dış çap (mm)	sarım sayısı- kullanılan şerit uzunluğu
SS	4.6±0.3	0.33	Ag/Paslanmaz çelik (20 µm) x 2	64 - 144	110 - 30 m
CA	4.6±0.3	0.39	Ag /Bakır alaşım (50 µm) x 2	64 - 144	95 – 26 m



Şekil 3.12 Satın alınan şeritten bobin sarımı esnasında çekilen fotoğraflar

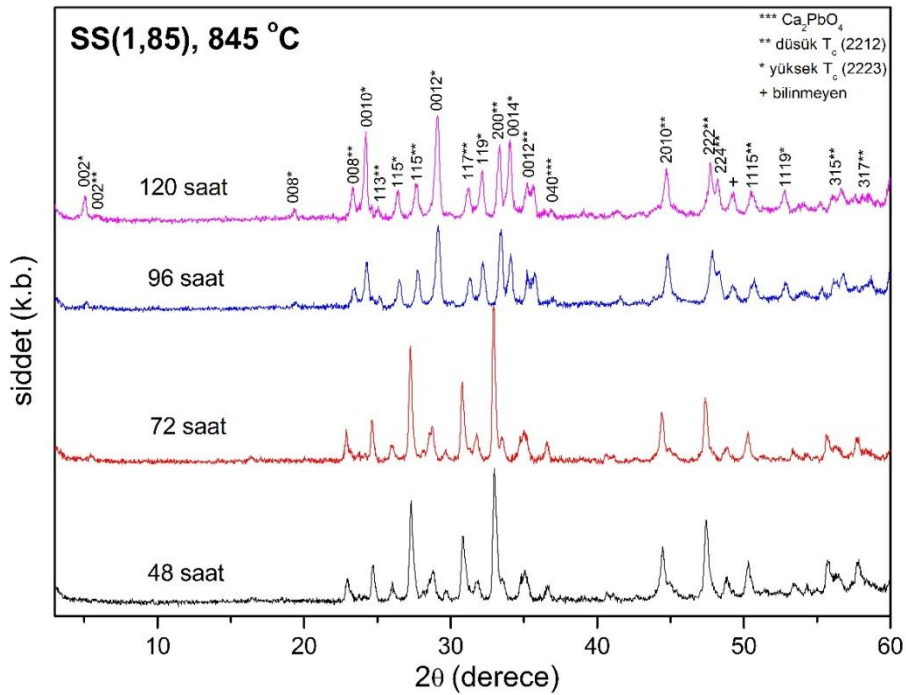
## 4. BULGULAR

### 4.1 XRD Analizleri

Numunelerin kristal yapısını, örgü parametrelerini, miller indislerini ve ana fazın yanında oluşabilecek safsızlıkları belirlemek için X-ışını kırınımı yöntemi kullanılmıştır. XRD ölçümleri Rigaku marka D/Max-IIIC model difraktometre ile  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ) radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında,  $2\theta=3-60^\circ$  aralığında  $0,02$  derece/dak tarama hızıyla alınmıştır. Elde edilen desenlerde piklerin indislenmesi ve yapı parametrelerinin belirlenmesi için XRD PDXL programı kullanılmıştır.

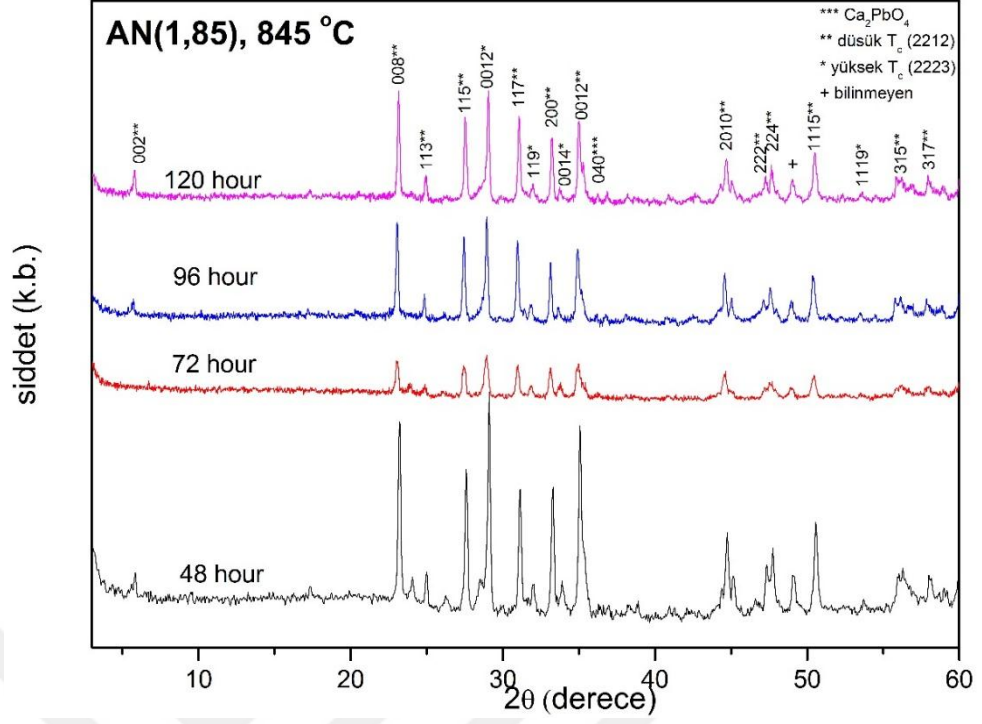
#### 4.1.1 Külçe numunelerin XRD analizleri

Şekil 4.1 - 4.4'de,  $845^\circ\text{C}$ 'de 48, 72, 96 ve 120 saat ısıl işleme tabi tutulmuş, sırasıyla SS(1,85), AN(1,85), SS(1,65) ve AN(1,65) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri verilmektedir.

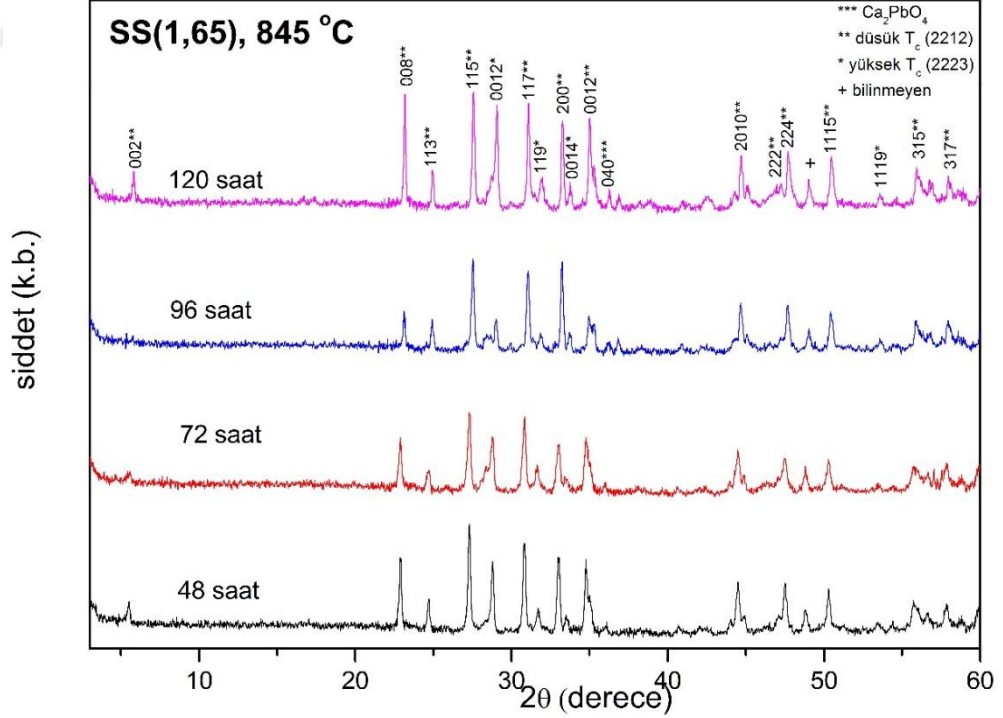


Şekil 4.1 SS(1,85) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri

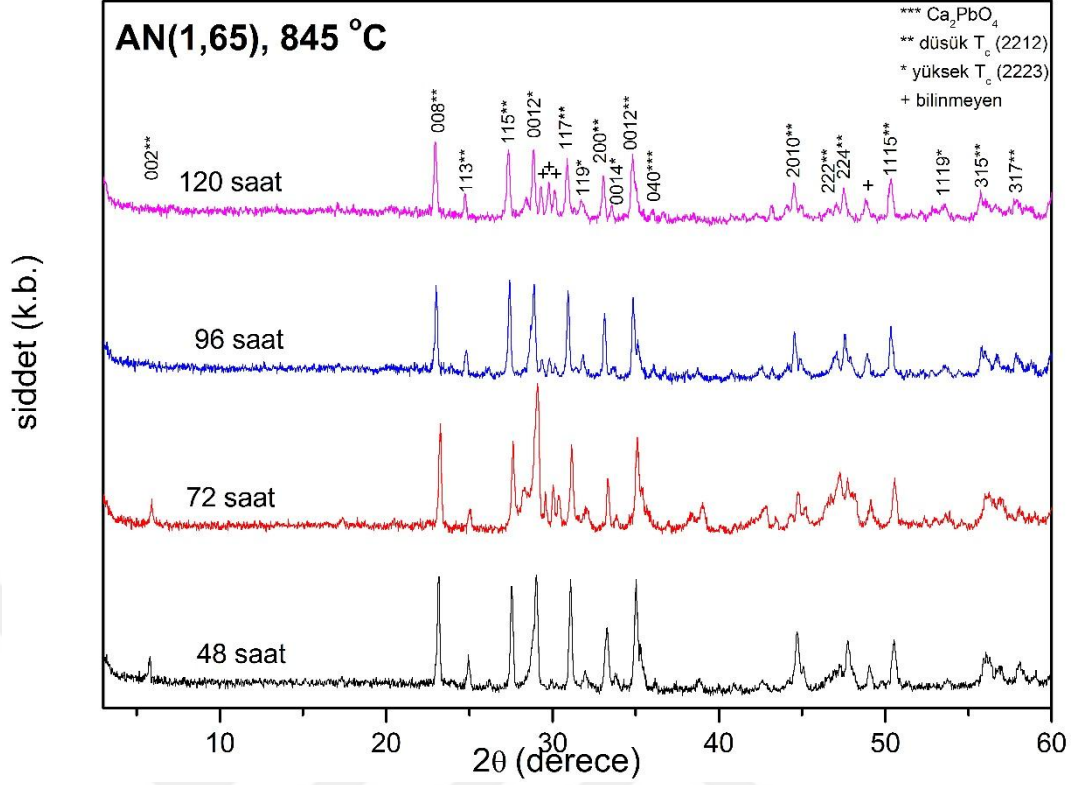




Şekil 4.2 AN(1,85) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri



Şekil 4.3 SS(1,65) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri



Şekil 4.4 AN(1,65) grubu külçe numunelere ait XRD grafikleri

Bu XRD desenlerindeki piklerin şiddetlerinden yararlanılarak külçe numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı sırasıyla denklem (4.1) ve (4.2) yardımı ile hesaplanmıştır;

$$f_{(2223)} = \frac{\sum I_H(hkl)}{\sum I_H(hkl) + \sum I_L(hkl)} \quad (4.1)$$

$$f_{(2212)} = \frac{\sum I_L(hkl)}{\sum I_H(hkl) + \sum I_L(hkl)} \quad (4.2)$$

Burada  $I_H(hkl)$  ve  $I_L(hkl)$  sırasıyla Bi-2223 ve Bi-2212 fazların kırınım desenindeki piklerin şiddeti olarak verilmektedir. Ayrıca Bi-2223 ve Bi-2212 fazlarına karşılık gelen pikler kullanılarak “WHATFOR” programı yardımıyla örgü parametreleri hesaplanmıştır. SS(1,85), AN(1,85), SS(1,65) ve AN(1,65) grupları için bu iki fazın hacimsel oranları ve örgü parametreleri sırasıyla çizelge 4.1 - 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 SS(1,85) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri

Isıl işlem süresi	Hacimsel oran (%) ) SS(1,85) grubu		Bi-2223 (Å) (±0,01 Å)		Bi-2212 (Å) (±0,01 Å)	
	2223	2212	a=b	c	a=b	c
48 saat	27	73	5,29	36,99	5,41	30,84
72 saat	19	81	5,47	36,55	5,41	30,95
96 saat	39	61	5,38	36,87	5,38	30,52
120 saat	51	49	5,22	37,05	5,38	30,63

Çizelge 4.2 AN(1,85) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri.

Isıl işlem süresi	Hacimsel oran (%) ) AN(1,85) grubu		Bi-2223 (Å) (±0,01 Å)		Bi-2212 (Å) (±0,01 Å)	
	2223	2212	a=b	c	a=b	c
48 saat	20	80	5,32	36,62	5,37	29,21
72 saat	19	81	5,16	37,33	5,35	29,45
96 saat	20	80	5,16	37,23	5,39	29,28
120 saat	21	79	5,32	36,54	5,38	29,20

Çizelge 4.3 SS(1,65) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri.

Isıl işlem süresi	Hacimsel oran (%) ) SS(1,65) grubu		Bi-2223 (Å) (±0,01 Å)		Bi-2212 (Å) (±0,01 Å)	
	2223	2212	a=b	c	a=b	c
48 saat	15	85	5,36	36,81	5,44	30,82
72 saat	15	85	5,35	36,87	5,45	30,84
96 saat	13	87	5,35	36,69	5,43	30,73
120 saat	18	82	5,30	36,69	5,44	30,60

Çizelge 4.4 AN(1,65) grubu numuneler için 2223 ve 2212 fazlarının hacimsel oranı ve örgü parametreleri

Isıl işlem süresi	Hacimsel oran (%) ) AN(1,65) grubu		Bi-2223 (Å) (±0,01 Å)		Bi-2212 (Å) (±0,01 Å)	
	2223	2212	a=b	c	a=b	c
48 saat	18	82	5,31	36,61	5,42	30,62
72 saat	21	79	5,34	36,60	5,42	30,60
96 saat	17	83	5,25	36,95	5,45	30,73
120 saat	16	84	5,35	36,82	5,45	30,79

XRD grafikleri incelendiğinde üretilen bütün külçe numunelerde Bi-2223 ve Bi-2212 fazının yanında çok az miktarda  $\text{Ca}_2\text{PbO}_4$  pikinin varlığı tespit edilmiştir. SS(1,85) grubunda ısıl işlem süresi arttıkça Bi-2223 fazının arttığı görülmektedir. Ancak AN(1,85) SS(1,65) ve AN(1,65) gruplarına bakıldığında zaman ısıl işlem süresinin Bi-2223 ve Bi-2212 fazları üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.

#### 4.2 AA Alınganlık Ölçümleri

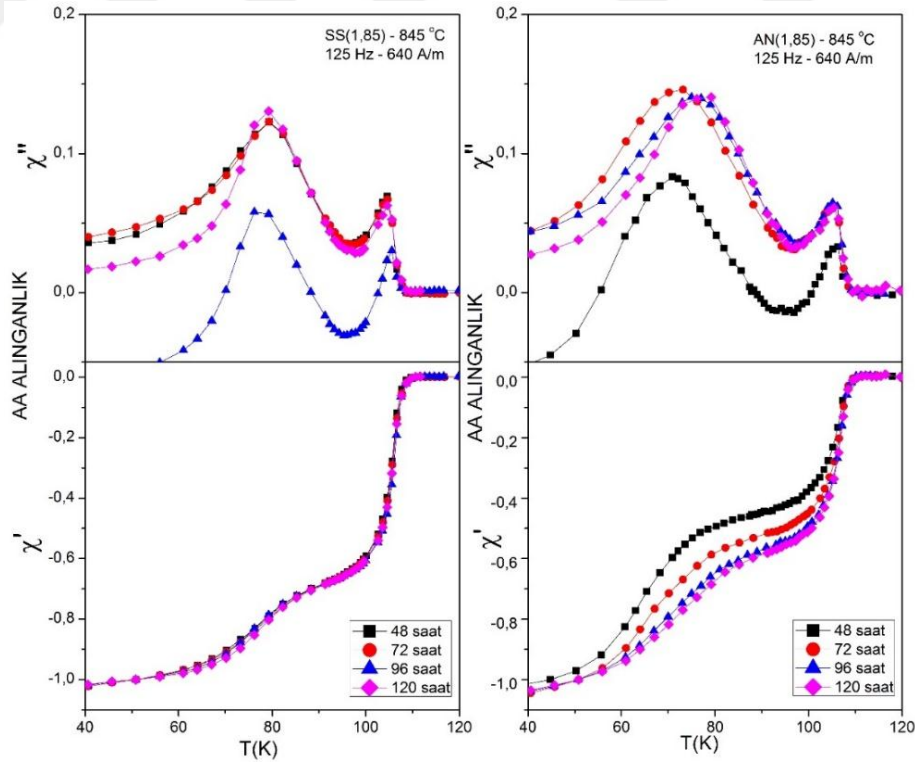
Üretilen numunelerin manyetik özelliklerini karakterize etmek için AA alınganlık ölçümleri yapılmıştır. AA alınganlık ölçümleri, yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin tane-içi ve taneler arası özelliklerini belirlemede yaygın olarak kullanılan süperiletken yapıyı bozmayan bir yöntemdir. AA alınganlık ölçüm sistemi; karşılıklı indüktans ölçüm yöntemi ile manyetik alınganlığın faz içi ve faz dışı bileşenini sıcaklığın, uygulanan AA alanın frekansının ve genliğinin fonksiyonu olarak ölçen bir sistemdir. AA alınganlık ölçümleri “Lake Shore 7130 AC Susceptometer” sistemi kullanılarak yapılmıştır. AA manyetik alınganlık  $\chi = \chi' + i\chi''$  şeklinde ifade edilir. Burada  $\chi'$ , AA manyetik alınganlığın reel kısmı ve  $\chi''$  ise AA manyetik alınganlığın sanal kısmıdır. Genellikle yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde  $\chi'$ , sıcaklığın bir fonksiyonudur ve iki kademeli geçiş gösterir.  $T_c$  yakınındaki ilk geçiş tane-içi ve bunu takip eden daha düşük sıcaklıklardaki diğer geçiş ise taneler-arası özelliklere karşılık gelmektedir.  $\chi''$ 'de numune üzerinde soğrulan enerjiye karşılık gelir. Yani AA kayıpları ile ilişkilidir.  $\chi''$  ve AA kayıp arasındaki ilişki

$$Q = \pi \chi'' S \frac{B^2}{\mu_0} \quad (4.3)$$

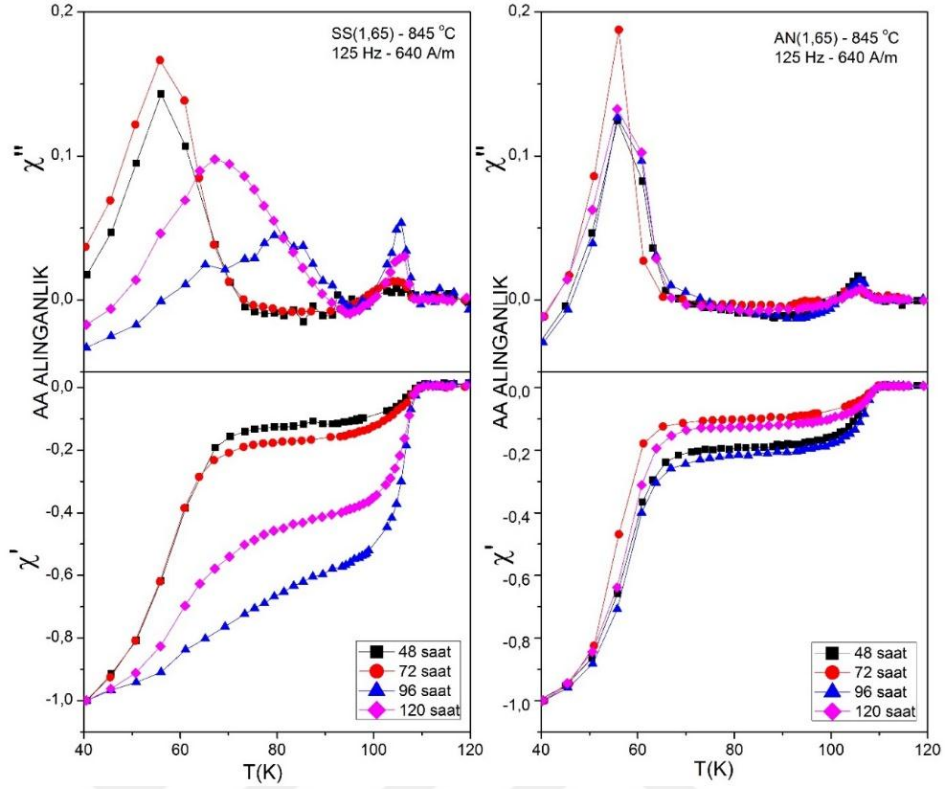
denklemlerle ifade edilir (Clem 1988) Burada Q kayıp, S numunenin kesit alanı ve B manyetik akı yoğunluğudur.

#### 4.2.1 Külçe numunelerin AA alınganlık ölçümleri

Bütün AA alınganlık grafiklerinde, numunelere ait faz içi bileşenin alınganlık değerlerine göre normalize edilerek çizilmiştir. Şekil 4.5 ve 4.6'de sırasıyla SS(1,85), AN(1,85) ve SS(1,65), AN(1,65) grubu numunelerin AA alınganlığının sıcaklığa karşı grafiği verilmiştir. Bu grafikler de 48, 72, 96 ve 120 saat olmak üzere dört farklı ısıl işlem süresinin süperiletken özelliklerine etkisi gösterilmiştir. Bu numunelerin ölçümlerinde AA manyetik alan ( $H_{ac}$ ) 640 A/m ve frekansı (f) 125 Hz olarak seçilmiştir. Grafiklerde alınganlığın hem faz – içi ( $\chi'$ ) hem de faz– dışı ( $\chi''$ ) bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Farklı ısıl işlem süreleri için SS(1,85) ve AN(1,85) grubu numunelerin AA alınganlık grafiği



Şekil 4.6 Farklı ısıl işlem süreleri için SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerin AA alınganlık grafiği

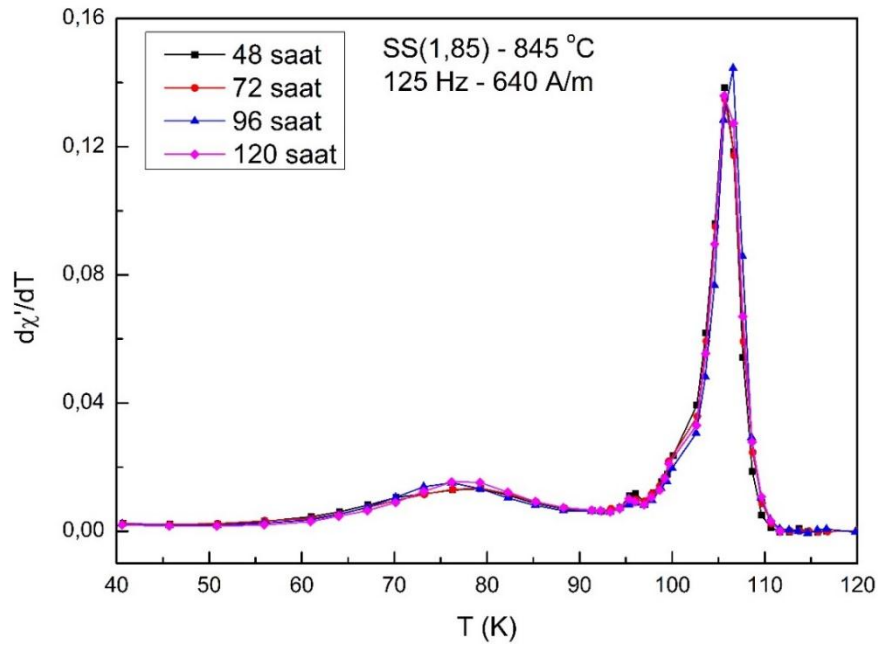
Şekil 4.5'deki grafiklerden görüldüğü üzere, bütün numuneler için alınganlığın faz-içi bileşeni,  $\chi'$ , iki adımda süperiletken faza geçiş yapmıştır.  $T_c$  yakınındaki ilk geçiş tane-içi özelliklere karşılık gelmektedir. Böylece ilk olarak taneler süperiletken faza geçiş yapmıştır. Bunu takip eden daha düşük sıcaklıklardaki diğer geçiş ise taneler-arası özelliklere karşılık gelmektedir. Yani süperiletken akımların taneden taneye akışını belirleyen taneler-arası bölgenin süperiletken olduğu durumu göstermektedir. Bu özellik, külçe numunenin tanecikli yapıya sahip olması ile ilişkilidir.  $\chi''$ 'de benzer davranışı sergilemekte olup,  $\chi''$ 'de bütün numunelerde iki pik gözlenmektedir. Bu pikler karışık durumda bulunan süperiletkenin üzerinde soğrulan enerjiye karşılık gelir. Yani AA kayıpları ile ilişkilidir.

SS(1,85) grubu numunelerde  $\chi'$ 'de, ısıl işlem süresinin belirgin bir etkisi gözlenmezken AN(1,85) grubu numunelerde ısıl işlem süresi arttıkça süperiletken geçişin daha

keskinleştığı ve akım taşıma kapasitesinin, kritik akım yoğunluğunun arttığı görülmektedir.

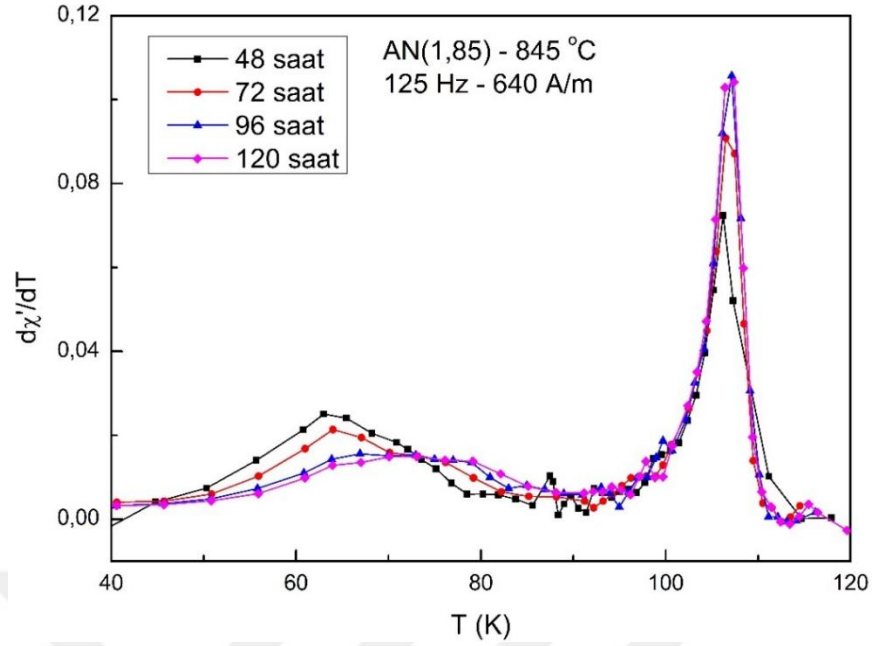
Şekil 4.6'daki grafiklerden de görüldüğü üzere her iki grup numune için alınganlığın faz-ıçi bileşeni,  $\chi'$ , iki adımda süperiletken faza geçiş yapmıştır.  $T_c$  yakınındaki ilk düşüş 2223 fazına ait, bunu takip eden daha düşük sıcaklıklardaki diğer düşüş ise 2212 fazına ait olduğu düşünülmektedir.  $\chi''$  'de iki pik gözlenmektedir. Bu pikler karışık durumda bulunan süperiletkenin AA kayıpları ile ilişkilidir. SS(1,65) grubu numunelerdeki  $\chi'$  bileşeninde ısıl işlem süresinin olumlu etkisi olduğu görülmektedir. 120 saatlik ısıl işlem süresine sahip olan numunenin farklı bir fırında ısıl işlemi gerçekleştirildiğinden sistematik davranışı bozduğu düşünülmektedir. AN(1,65) grubu numunelerde ise ısıl işlem süresinin belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerinde 2212 fazının baskın olduğu grafikten anlaşılmaktadır.

AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa bağlı grafiğinden reel kısmın eğimi ( $d\chi'/dT$ ) hesaplanmıştır. SS(1,85) ve AN(1,85) grubu numuneleri için sırasıyla şekil 4.7 - 4.8'de ( $d\chi'/dT$ )'nin sıcaklığa karşı grafiği verilmektedir.



Şekil 4.7 SS(1,85) grubu numunelerin  $d\chi'/dT$ 'nin sıcaklığa karşı grafiği





Şekil 4.8 AN(1,85) grubu numunelerin  $d\chi'/dT$ 'nin sıcaklığa karşı grafiği

Grafikte görülen pikler tane içi ve taneler arası kritik geçiş sıcaklıklarına karşılık gelmektedir. SS(1,85) serisi numuneler için tane içi ve taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı sırasıyla yaklaşık olarak 106 K ve 76 K olarak bulunmuştur. AN(1,85) serisi numunelerde ise tane-içi süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı 106 K civarında iken, taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı tavlama süresine bağımlılık göstermektedir. AN(1,85) seride tavlama süresi arttıkça taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı artmıştır.  $d\chi'/dT$  karşı sıcaklık grafiğinden elde edilen geçiş sıcaklıkları çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 SS(1,85) ve AN(1,85) grubu numunelerin tane içi ve taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklıkları

Isıl işlem süresi (saat)	Süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı (K)		Süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı (K)	
	SS(1,85) grubu		AN(1,85) grubu	
	Tane-içi (2223 fazı)	Taneler arası (2212 fazı)	Tane-içi (2223 fazı)	Taneler arası (2212 fazı)
48	106,1	76,3	106,2	63,0
72	106,2	76,3	106,5	64,0
96	106,6	76,2	107,1	66,9
120	106,2	76,2	107,4	73,0

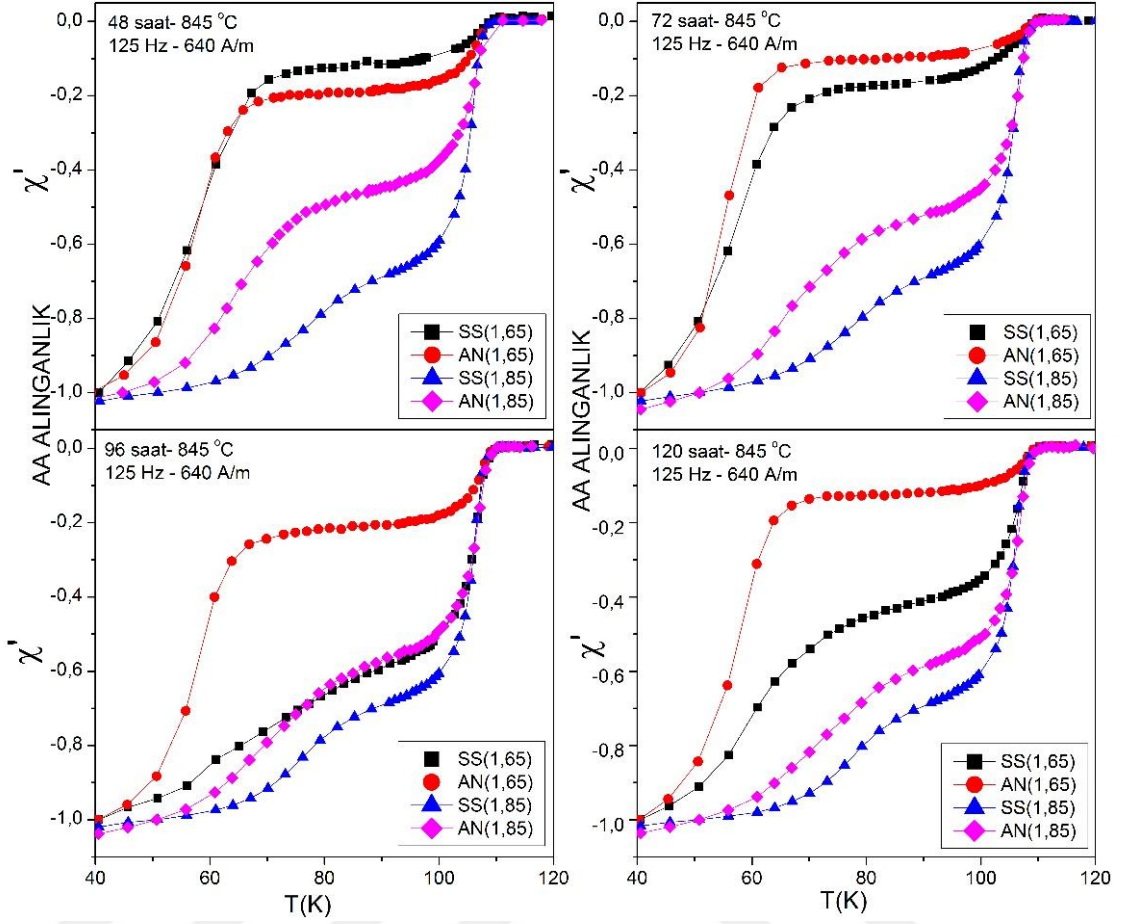


SS(1,65) ve AN(1,65) grubu külçe numunelerin süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı, SS(1,85) ve AN(1,85) grubuna benzer olarak belirlenmiştir. Süperiletkenliğe geçiş sıcaklıkları çizelge 4.6'da verilmiştir. SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerin ısıtma işlem süresinin 2223 ve 2212 fazına geçiş sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır.

Çizelge 4.6 SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerin tane içi ve taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklıkları

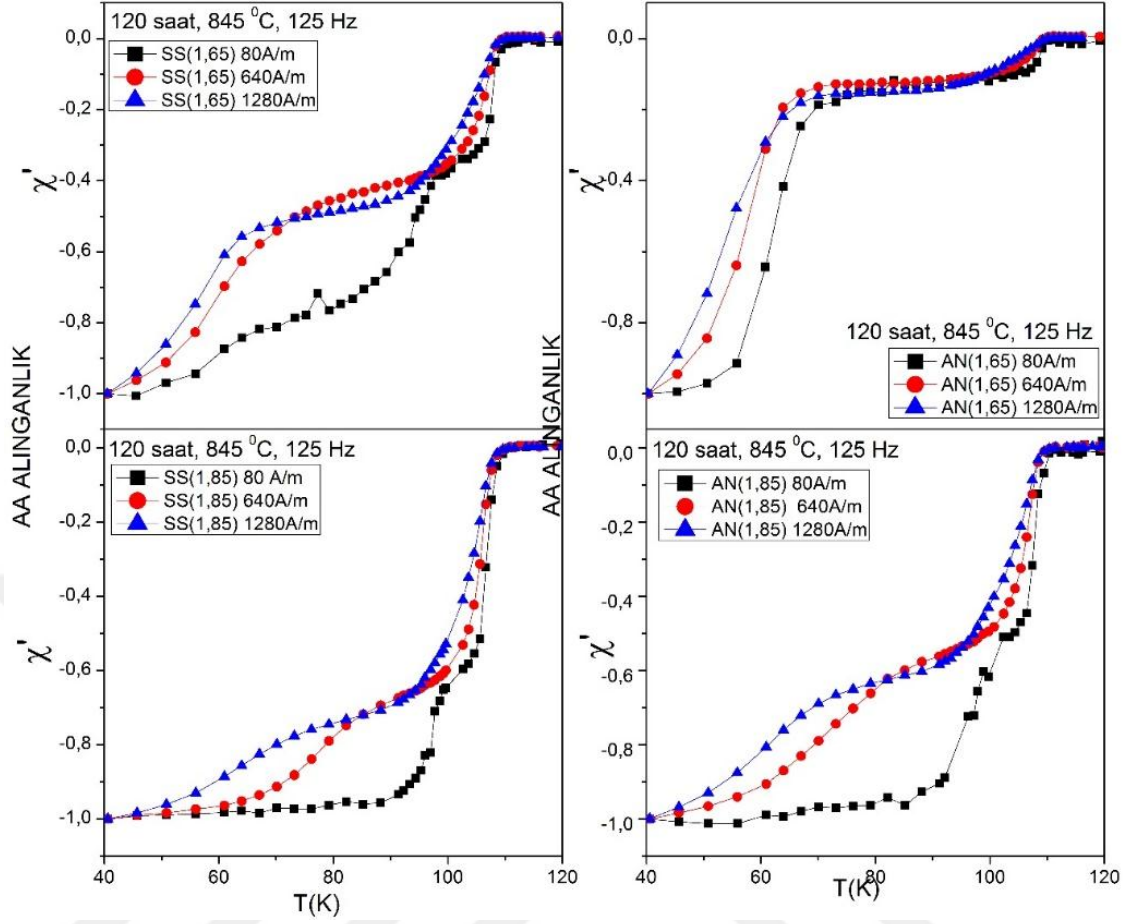
Isıl işlem süresi (saat)	Süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı (K) SS(1,65) grubu		Süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı (K) AN(1,65) grubu	
	Tane-içi (2223 fazı)	Taneler arası (2212 fazı)	Tane-içi (2223 fazı)	Taneler arası (2212 fazı)
	48	106,7	58,0	107,5
72	107,2	57,5	107,8	56,1
96	106,7	61,0	108,0	58,5
120	107,3	61,0	108,0	58,5

SS(1,85), AN(1,85), SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerinin 48 saat, 72 saat, 96 saat ve 120 saat ısıtma işlem süreleri için AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa bağlı değişimi şekil 4.9'da gösterilmiştir. Katihal reaksiyonu ve amonyum nitrat yöntemi ile üretilen numunelerin AA alınganlık özelliği incelendiğinde katihal reaksiyonu yöntemi ile üretilen numunelerin daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni ise amonyum nitrat yöntemi ile üretilen numunelerde kalsinasyon işlemi sırasında istenmeyen gazların tam olarak yapıdan uzaklaştırılmamış olmasındandır. İki stokiometri karşılaştırıldığında ise  $Bi_{1,85}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiometrisi ile üretilen numunelerin  $Bi_{1,65}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiometrisi ile üretilen numunelerden daha iyi süperiletken özellikte olduğu görülmektedir. SS(1,85) ve AN(1,85) grubu numunelerde süperiletken faza geçiş SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerine göre daha keskin ve akım taşıma kapasitelerinin daha yüksek olduğu şekil 4.9'daki grafiklerden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9 Farklı ısıl işlem süreleri (48/72/96/120 saat) için SS(1,85), AN(1,85), SS(1,65) ve AN(1,65) grubu numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 4.10'da SS(1.85)-120s, AN(1.85) -120s, SS(1.65) -120s ve AN(1,65) -120s numunelerine ait 125 Hz frekansta farklı AA alan büyüklüklerinde ölçülen AA alınganlığın reel kısmı göstermektedir. Manyetik alan 80, 640 ve 1280 [A/m] büyüklüklerinde uygulanmıştır. Alan 80[A/m]'den 1280[A/m]'ye arttırıldığı zaman  $\chi'$  davranışı düşük sıcaklığa doğru değişmektedir. Yani numuneler düşük alan değerinde daha güçlü bir diyamanyetik davranış göstermektedir. Malzemelere küçük manyetik alan uygulandığı zaman numunelerin akım taşıma kapasiteleri daha yüksektir.

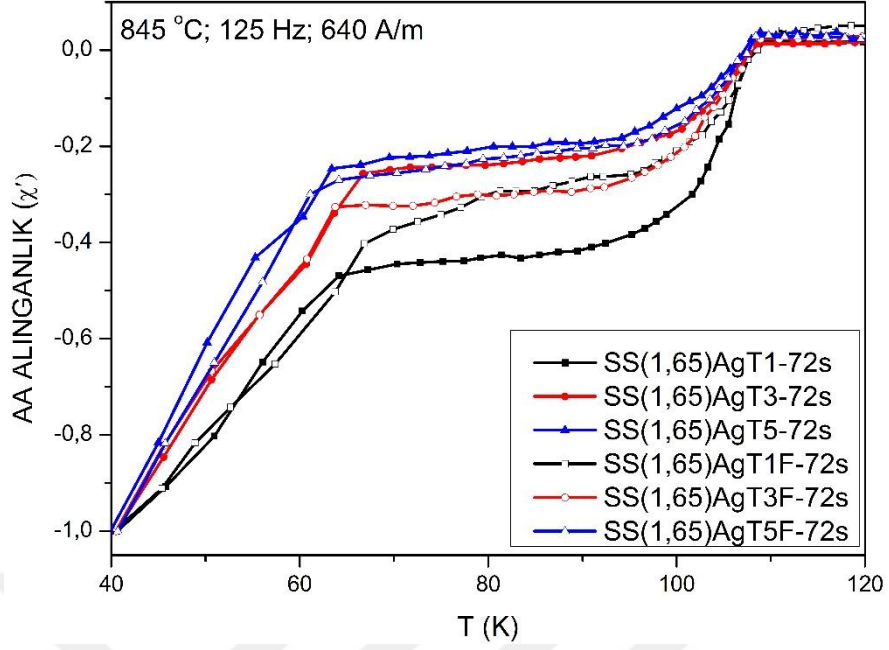


Şekil 4.10 SS(1,85)-120s, AN(1,85)-120s, SS(1,65)-120s ve AN(1,65)-120s numunelerinin 125 Hz'de 80, 640 ve 1280 [A/m] AA alan büyüklüğü

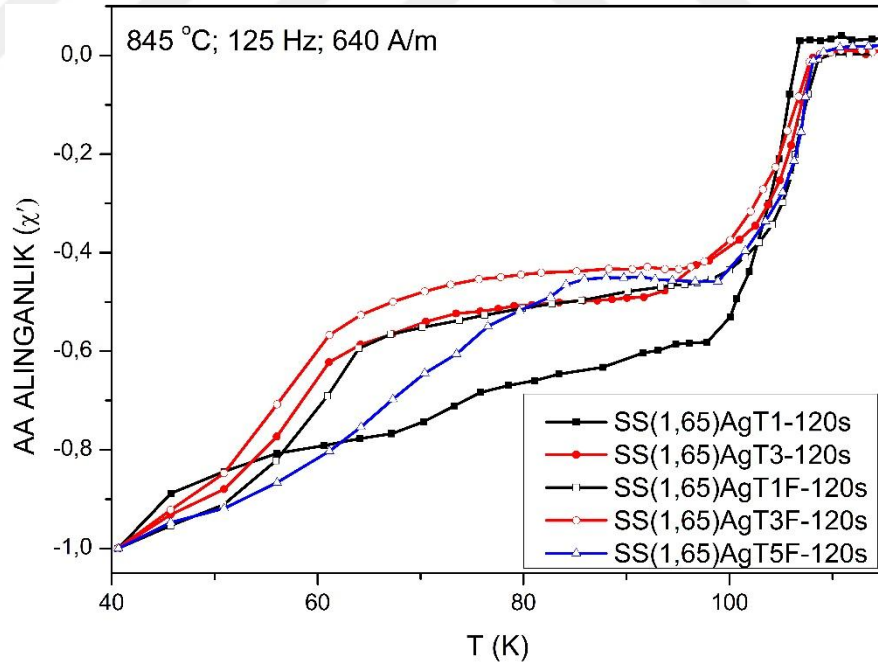
## 4.2.2 Tel numunelerin AA alınganlık ölçümleri

### 4.2.2.1 Ag kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri

Katıhal reaksiyonu yöntemi ile  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometriye sahip olacak şekilde üretilen süperiletken toz kullanılarak hazırlanan Ag kılıflı süperiletken teller 845 °C'de, 72 saat ve 120 saat olmak üzere iki farklı sürede ısıl işleme tabi tutulmuş numune serilerinin sırasıyla şekil 4.11 - 4.12'de AA alınganlığının reel kısmının ( $\chi'$ ) sıcaklığa karşı grafiği verilmiştir. Bu ölçümlerde AA manyetik alan  $H_{aa} = 640 \text{ A/m}$  ve frekans  $f=125 \text{ Hz}$  olarak seçilmiştir. Bu grafiklerde tel numunelerin fırın ısıtma hızının ve fırın soğutma hızının süperiletken özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



Şekil 4.11 845 °C'de, 72 saat ısıl işlem süresine tabi tutulmuş SS(1,65)Ag tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

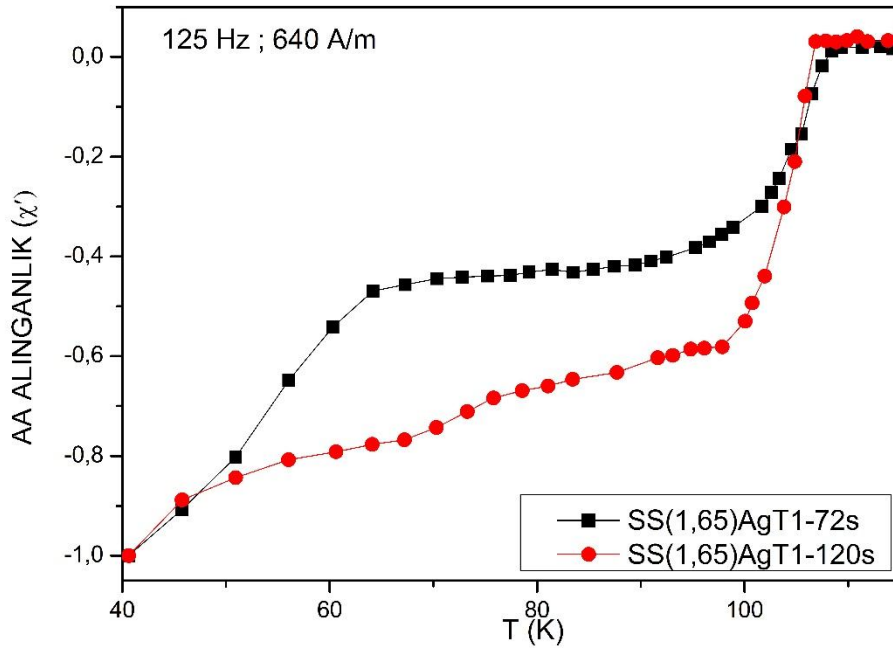


Şekil 4.12 845 °C'de, 120 saat ısıl işlem süresine tabi tutulmuş SS(1,65)Ag tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Her iki seride de numune yavaş ısıtılıp, kontrollü olarak soğutulduğu zaman (1 °C/dak) süperiletkenlik özelliklerinin iyileştiği görülmektedir. Her iki grafikte de 1 °C/dak ile ısıtılıp, kontrollü soğutulan numuneler daha fazla akım taşıma kapasitesine sahiptirler. Şekil 4.11 - 4.12'de ki ( $\chi'$ -T) grafiklerden  $T_{c,on}$  değerleri belirlenmiştir. Her iki grup numune için süperiletkenliğe geçiş başlangıç sıcaklığı ( $T_{c,on}$ ), yaklaşık 108 K'dir. Isıl işlem süresinin  $T_{c,on}$  üzerinde kayda değer bir etkisi olmamıştır. 72 saat ısıl işlem süresine sahip numunelerde Bi-2212 fazı baskın iken 120 saat ısıl işlem süresine sahip numunelerde Bi-2223 fazının baskın olduğu değerlendirilmektedir.

AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa bağlı grafiğinden reel kısmın eğimi ( $d\chi'/dT$ ) hesaplanmıştır.  $d\chi'/dT$ -T grafiğinde oluşan pik değerinden kritik sıcaklık değeri  $T_c$ ,  $\chi'$ -T grafiğinden ise  $T_{c,on}$  değerleri belirlenmiştir.

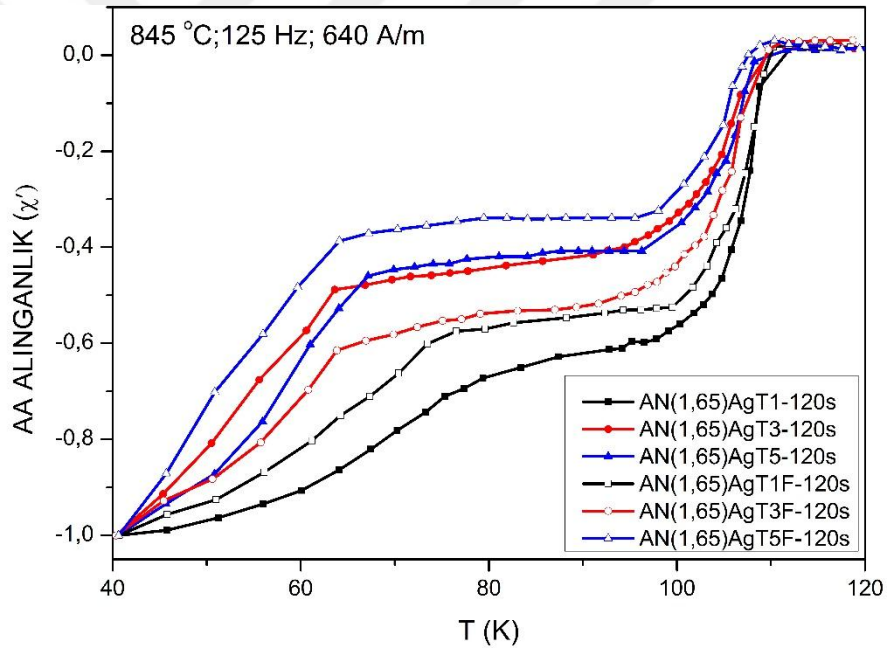
SS(1,65)AgT1-72s ve SS(1,65)AgT1-120s numunelerine ait AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği şekil 4.13'de verilmiştir. Bu numunelerde ısıl işlem süresinin süperiletken özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



Şekil 4.13 SS(1,65)AgT1-72s ve SS(1,65)AgT1-120s numunelerine ait AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Isıl işlem süresi arttıkça  $T_{c,on}$  değerinde kayda değer bir değişiklik gözlenmemiştir. Isıl işlem süresinin arttırılması ile Bi-2212 fazının Bi-2223 fazına dönüşüm sağlayarak Bi-2223 fazının artmasını sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca şekil 4.13'deki grafikten anlaşılacağı üzere daha uzun süre ısıl işleme tabi tutulmuş numunenin daha yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olacağı aşikar bir şekilde görülmektedir.

Amonyum nitrat yöntemi ile  $Bi_{1,65}Pb_{0,35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiometriye sahip olacak şekilde üretilen süperiletken toz kullanılarak hazırlanan Ag kılıflı süperiletken teller 845 °C'de, 120 saat sürede ısıl işleme tabi tutulmuş numune serilerinin şekil 4.14'de AA alınganlığının reel kısmının ( $\chi'$ ) sıcaklığa karşı grafiği verilmiştir. Bu tel numunelerin fırın ısıtma ve soğutma hızının süperiletken özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

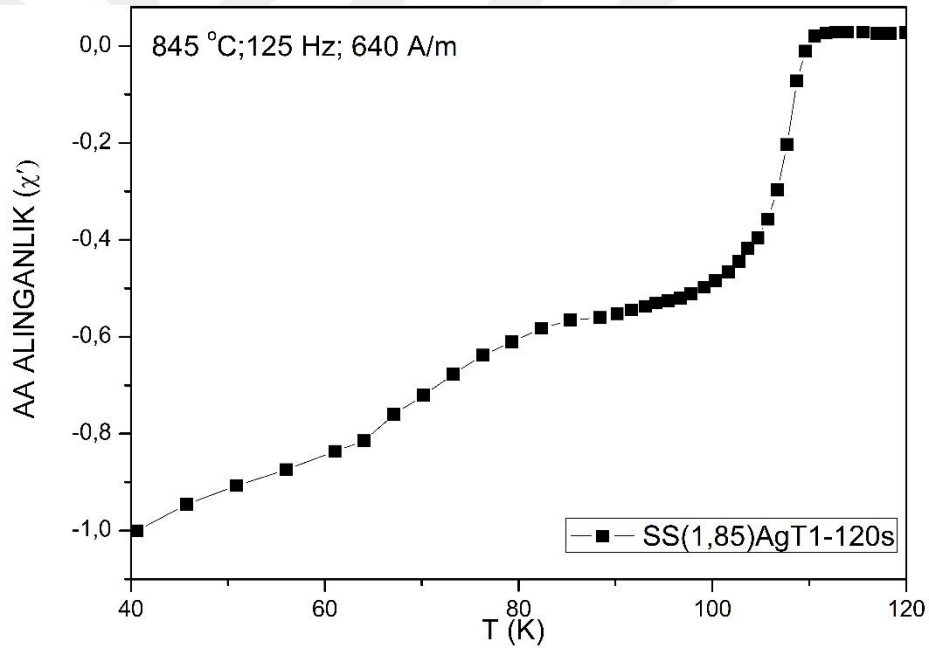


Şekil 4.14 845 °C'de, 120 saat ısıl işlem süresine tabi tutulmuş AN(1,65)Ag tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Fırın ısıtma hızı 1 °C/dak'dan 5°C/dak'ya çıkartıldığı zaman numunelerin diyamanyetik davranışında sistematik olarak bir bozulma görülmektedir. Ayrıca fırın soğutma hızı, kontrolsüz olarak fırının kendi soğumasına bırakıldığı zaman yani fırın soğutma hızı arttırıldığı zaman yine numunelerin diyamanyetik davranışında bozulma görülmektedir. Şekil 4.14'deki grafikten görüldüğü üzere; AN(1,65)Ag tel numune serisinde de

numuneler yavaş ısıtılıp, kontrollü olarak soğutulduğu zaman (1 °C/dak) süperiletken özellikler iyileştirilmiştir. 1 °C/dak olarak işlem gören numuneler diğer numunelere göre daha fazla akım taşıma kapasitesine sahiptir. Bu gruptaki numuneler için  $T_{c,on}$  değeri yaklaşık 109 K'dir.

Bu ölçüm sonuçları göz önüne alınarak; katihal reaksiyonu metoduyla  $Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiyometrisine sahip ile gümüş kılıf kullanılarak hazırlanan tel 845 °C ısıtım sıcaklığında, 120 saat ısıtım süresinde bekledikten sonra, 1 °C/dak hız ile 600 °C'ye kadar kontrollü olarak soğutulmuştur. Şekil 4.15'de AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği verilmiştir. Bu ölçümde AA manyetik alan  $H_{aa} = 640$  A/m ve frekans  $f=125$  Hz olarak seçilmiştir.

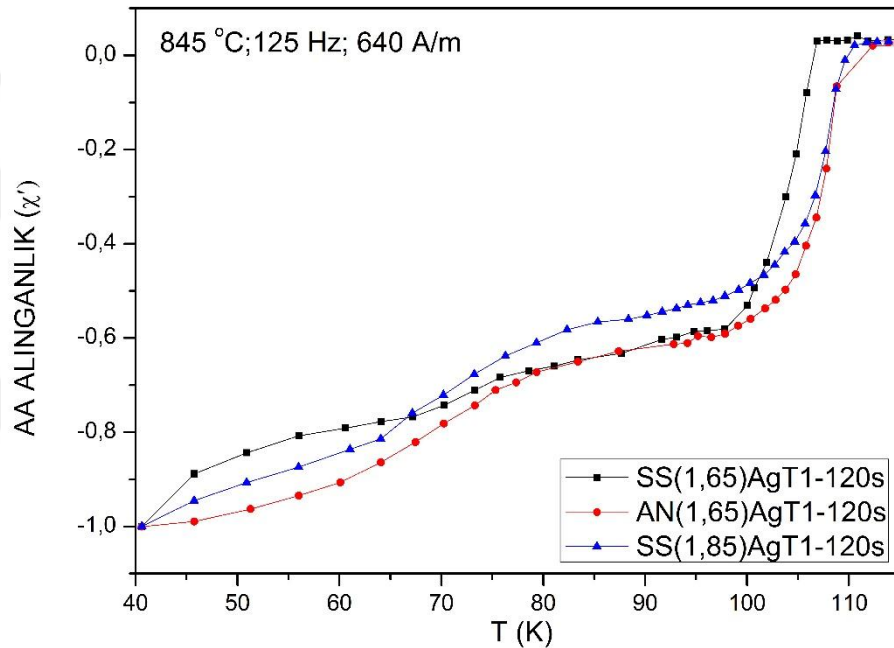


Şekil 4.15 845 °C'de, 120 saat ısıtım süresine tabi tutulmuş SS(1,85)AgT1 tel numunenin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Şekil 4.16'da her iki stokiyometriye sahip, katihal reaksiyonu ve amonyum nitrat yöntemi ile Ag kılıf kullanılarak, 845 °C'de ısıtım tabi tutulmuş, 120 saat ısıtım süresine sahip 1 °C/dak fırın ısıtım ve soğutım hızına sahip numune serisinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği verilmektedir. SS(1,65)AgT1-120s, AN(1,65)AgT-120s ve SS(1,85)AgT1-120s numuneleri için sırasıyla  $T_{c,on}$  değerleri 107



K, 110 K ve 110 K olarak belirlenmiştir. Bu numunleri için, AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa bağlı grafiğinden reel kısmın eğimi ( $d\chi'/dT$ ) hesaplanmıştır.  $d\chi'/dT$ -T grafiğinden elde edilen; SS(1,65)AgT1-120s, AN(1,65)AgT1-120s ve SS(1,85)AgT1-120s numuneleri için  $T_c$  değerleri ise sırasıyla 106 K, 108 K ve 108 K olarak belirlenmiştir. Şekil 4.16'daki grafik değerlendirildiğinde AN(1,65)AgT1-120s ve SS(1,85)AgT1-120s numuneleri benzer davranış göstermektedir. Ancak AN(1,65)AgT1-120s numunesinin akım taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 4.16 845 °C'de, 120 saat ısıtım süresine tabi tutulmuş SS(1,65)AgT1, AN(1,65)AgT1 ve SS(1,85)AgT1 tel numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

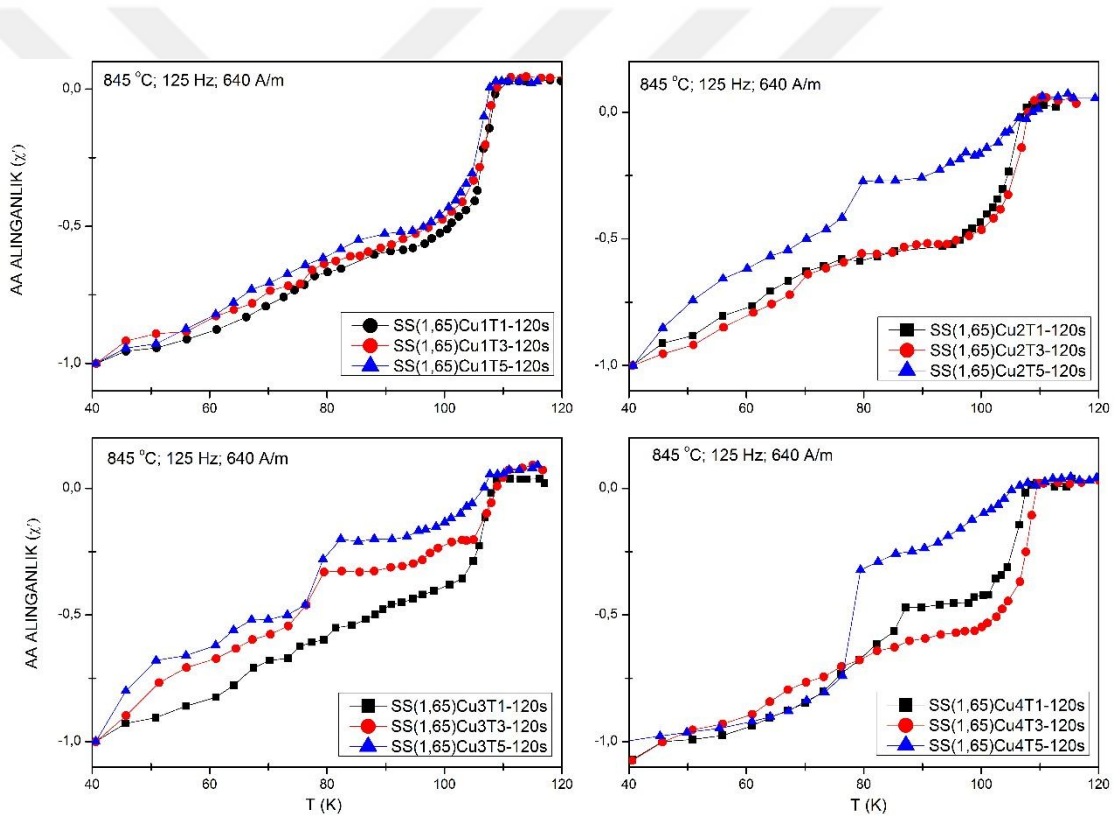
#### 4.2.2.2 Ag-Cu alaşım kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri

Şekil 4.17'de  $Bi_{1,65}Pb_{0,35}Ca_2Sr_2Cu_3O_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile hazırlanan süperiletken toz kullanılarak, 845 °C'de 120 saat ısıtım tabi tutulmuş, farklı oranlarda bakır katkısına sahip gümüş bakır alaşım kılıflı (% 1Cu-% 99Ag, % 2Cu-% 98Ag, % 3Cu-% 97 Ag, % 4Cu-% 96Ag) tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği verilmiştir. Bu grafikler de



numunelerin, dış kılıftaki bakır oranının ve fırın ısıtma hızının süperiletkenlik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

SS(1,65)Cu4 serisi hariç genel olarak 1 °C/dak ısıtma hızına sahip numunelerin süperiletkenlik özelliklerinin daha iyi ve süperiletkenliğe geçişin daha keskin olduğu görülmektedir. Şekil 4.17'deki  $\chi'$ -T grafiğinden Ag-Cu alaşım kılıflı tel numunelerin  $T_{c,on}$  değerleri belirlenmiştir. AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa bağlı grafiğinden reel kısmın eğimi ( $d\chi'/dT$ ) hesaplanmıştır.  $d\chi'/dT$ -T grafiğinde oluşan pik değerinden Ag-Cu alaşım kılıflı tel numunelerin  $T_c$  değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu geçiş sıcaklık ( $T_{c,on}$  ve  $T_c$ ) değerleri çizelge 4.7'de verilmektedir.



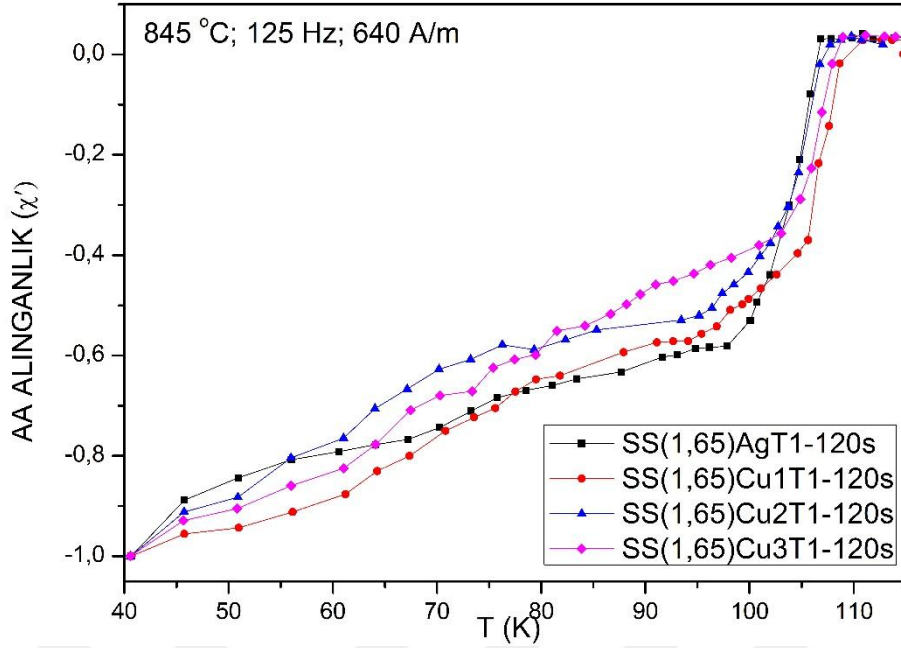
Şekil 4.17 845 °C'de ısıl işleme tabi tutulmuş, 120 saat ısıl işlem süresine sahip: a. SS(1,65)Cu1T, b. SS(1,65)Cu2, c. SS(1,65)Cu3 d. SS(1,65)Cu4 alaşım kılıflı tel numune serilerinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Çizelge 4.7 Cu-Ag alaşım kılıflı tellerin AA alınganlık grafiklerinden elde edilen kritik sıcaklık değerleri

Numune adı	$T_{c,on}$ (K)	$T_c$ (K)
SS(1,65)Cu1T1	109	106
SS(1,65)Cu1T3	109	106
SS(1,65)Cu1T5	109	106
SS(1,65)Cu2T1	108	105
SS(1,65)Cu2T3	108	105
SS(1,65)Cu2T5	108	80
SS(1,65)Cu3T1	108	103
SS(1,65)Cu3T3	108	80
SS(1,65)Cu3T5	108	80
SS(1,65)Cu4T1	107	105
SS(1,65)Cu4T3	107	107
SS(1,65)Cu4T5	107	80

Fırın ısıtma hızının  $T_{c,on}$  değeri üzerinde etkisi gözlenmezken,  $T_c$  değerleri üzerinde etkisi gözlenmiştir. Fırın ısıtma hızı 5 °C/dak olarak üretilen tel numunelerde 80 K civarında keskin bir geçişin olduğu anlaşılmaktadır. 5 °C/dak fırın ısıtma hızına sahip numunelerde Bi-2212 fazı baskın iken 1 °C/dak fırın ısıtma hızına sahip numunelerde ise Bi-2223 fazının baskın olduğu değerlendirilmektedir. Dış kılıftaki bakır oranının etkisine bakıldığında, çizelge 4.7'den de görüldüğü üzere, alaşım kılıf malzemesindeki bakır oranı yüzdece arttıkça  $T_{c,on}$  değerinde sistematik bir azalmanın olduğu belirlenmiştir.

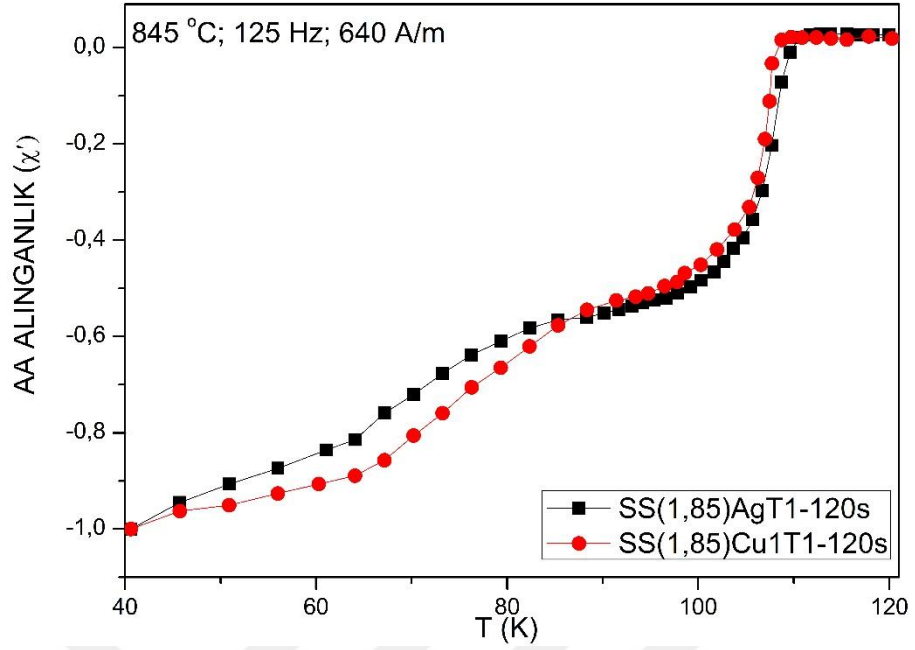
Tel numunelerde dış kılıf malzemesinin süperiletken üzerinde etkisini araştırmak için Ag kılıflı ve Ag-Cu alaşım kılıflı tel numuneler karşılaştırılmıştır. Şekil 4.18'de Bi<sub>1.65</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> stokiyometrisine sahip, katıhal reaksiyonu yöntemi ile Ag kılıf ve Ag-Cu alaşım kılıf kullanılarak, 845 °C'de ısıtma işlemi tabi tutulmuş, 120 saat ısıtma işlem süresine sahip 1 °C/dak fırın ısıtma hızına sahip numune serisinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği verilmektedir.



Şekil 4.18 845 °C’de ısıl işleme tabi tutulmuş, 120 saat ısıl işlem süresine sahip SS(1,65)AgT1, SS(1,65)Cu1T1, SS(1,65)Cu2T1 ve SS(1,65)Cu3T1 tel numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

SS(1,65)AgT1-120s Ag kılıflı tel numunenin  $T_{c,on}$  değeri 107 K iken, SS(1,65)Cu1T1-120s, SS(1,65)Cu2T1-120s ve SS(1,65)Cu3T1-120s alaşım kılıflı tellerin  $T_{c,on}$  değeri yaklaşık 109 K civarındadır. Ag-Cu alaşım kılıflı teller Ag kılıflı tele göre daha yüksek  $T_{c,on}$  değerine sahiptir. Bu serideki numuneler karşılaştırıldığında en keskin süperiletkenliğe geçişin SS(1,65)Cu1T1-120s numunesine ait olduğu görülmektedir. Ancak orta sıcaklık bölgesinde (77 K) SS(1,65)AgT1-120s ve SS(1,65)Cu1T1-120s telleri benzer davranış sergilemektedir. Düşük sıcaklık bölgesinde ise Ag-Cu alaşım kılıflı tellerin Ag kılıflı tele göre daha yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Şekil 4.19’da  $Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  stokiyometrisine sahip, katıhal reaksiyonu yöntemi ile Ag ve % 1Cu-% 99Ag kılıf kullanılarak, 845 °C’de ısıl işleme tabi tutulmuş, 120 saat ısıl işlem süresine ve 1 °C/dak fırın ısıtma ve soğutma hızına sahip numune serisinin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği verilmektedir.



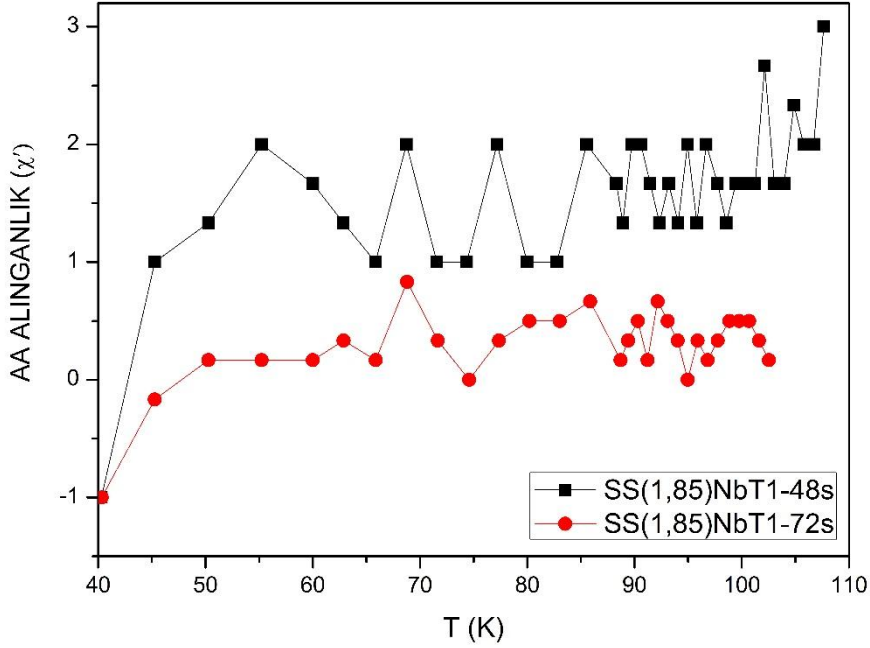
Şekil 4.19 845 °C’de ısıl işleme tabi tutulmuş, 120 saat ısıl işlem süresine sahip SS(1,85)AgT1 ve SS(1,85)Cu1T1 tel numunelerin AA alinganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

SS(1,85)AgT1-120s ve SS(1,85)Cu1T1-120s numuneleri için  $T_{c,on}$  değerleri sırasıyla 110 K ve 109 K;  $T_c$  değeri ise 108 K ve 107 K olarak belirlenmiştir. 85 K sıcaklığının altında SS(1,85)Cu1T1-120s numunesinin akım taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu grafikten anlaşılmaktadır.

BSCCO yapısı içerisinde CuO düzlemleri süperiletkenlikten sorumlu düzlemlerdir. CuO düzlem sayısı  $n=1$  den  $n=3$ ’e arttıkça kritik sıcaklık değeri artmakta ve Bi-2201 fazından Bi-2223 fazına doğru geçiş olmaktadır.  $n=3$  değeri BSCCO yapı için bulunmuş optimum değerdir.  $n>4$  olduğu durumda ise CuO düzlemleri artması rağmen süperiletkenlik özelliklerinin kötüleştiği bilinmektedir. Cu’nun fazlası süperiletkenlik özelliklerini kötüleştirmektedir. Üretilen tellerde kullanılan bakır alaşımlı tüplerde dış kılıftaki Cu oranı arttıkça süperiletkenlik özelliklerde bozulma görülmektedir. Bunun sebebi ise kılıf malzemesi içerisinde yer alan bakırın yüzdesinin arttıkça, bu fazla Cu’nun süperiletken çekirdek ile etkileşime girerek stokiyometride bozulmaya sebep olduğu değerlendirilmektedir.

#### 4.2.2.3 Nb kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri

Şekil 4.20'de  $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip, katıhal reaksiyonu yöntemi ile Nb kılıf kullanılarak, 845 °C'de 48 ve 72 saat ısıl işleme tabi tutulmuş numunelere ait AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği gösterilmektedir.



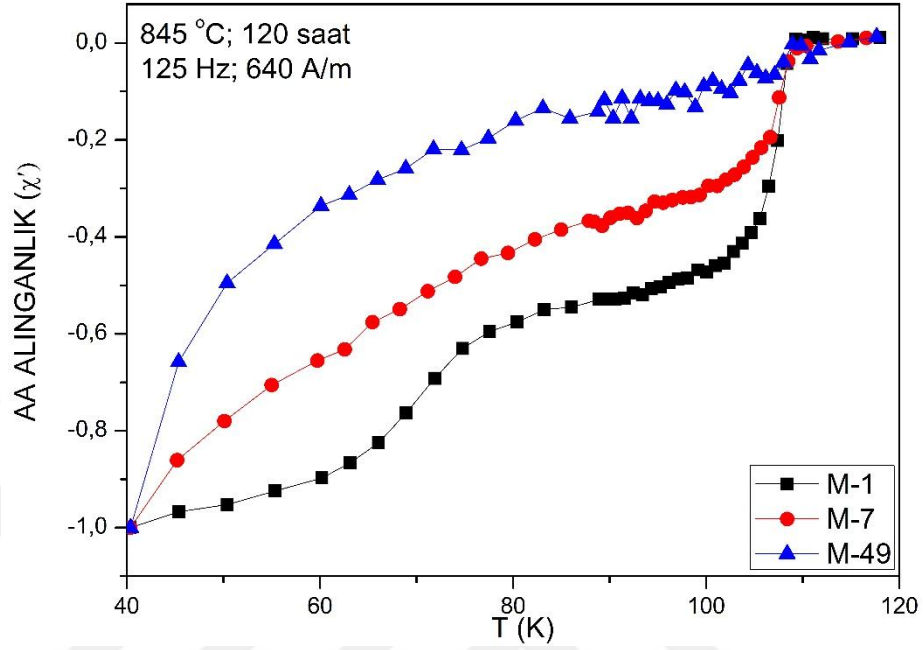
Şekil 4.20 845 °C'de ısıl işleme tabi tutulmuş, iki farklı ısıl işlem süresine sahip SS(1,85)NbT1-48s ve SS(1,85)NbT172s tel numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Numunelerde süperiletkenlik geçişi gözlenememiştir. Bu ölçüm sonuçları göz önüne alınarak üretilen SS(1,85)NbT1-120s numunesinin ölçümü alınmamıştır. Ayrıca bu sonuçlara göre, Nb kılıfın BSCCO süperiletken tel/şerit malzeme hazırlamak için uygun bir malzeme olmadığına karar verilmiştir.

#### 4.2.2.4 Çok damarlı Ag kılıflı tellerin AA alınganlık ölçümleri

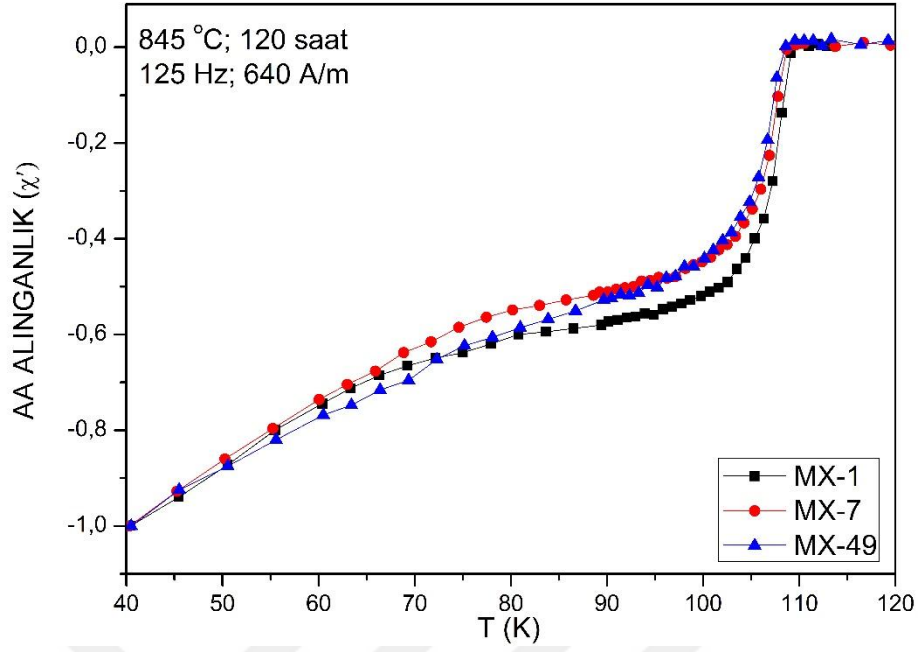
$\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip katıhal reaksiyonu yöntemi ile gümüş kılıf kullanılarak hazırlanan, 845 °C'de 120 saat ısıl işleme tabi tutulmuş M, MX ve MY serisi numunelerin AA alınganlığının reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği sırasıyla şekil

4.21 - 4.23’de verilmiştir. Bu ölçümlerde AA manyetik alan  $H_{aa} = 640$  A/m ve frekans  $f=125$  Hz olarak seçilmiştir.

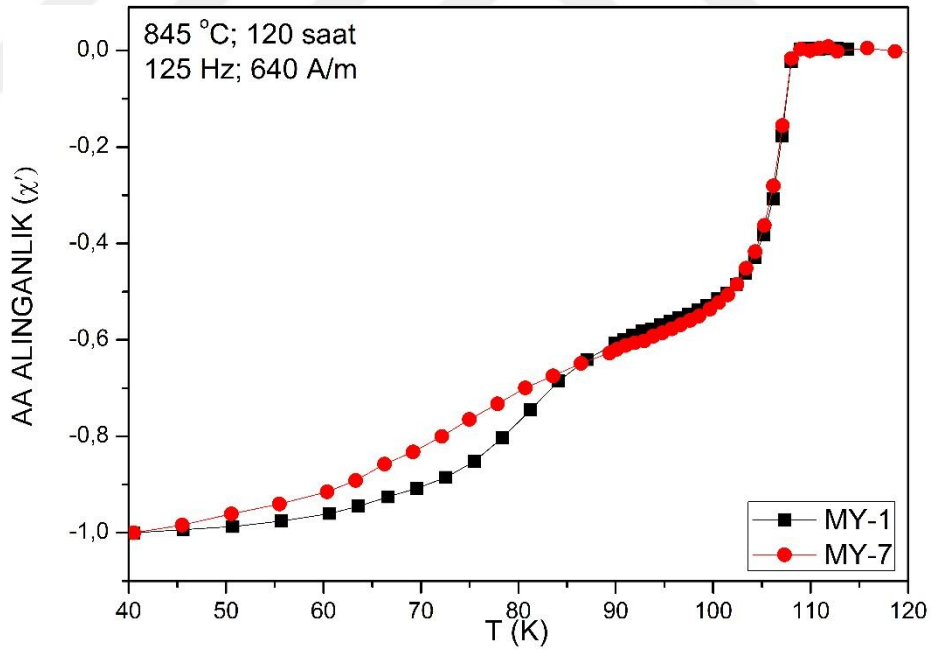


Şekil 4.21 M serisi numuneler için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Şekil 4.21’de ki M serisi numunelerine bakıldığında zaman yaklaşık  $T_{c,on}$  değerlerinin 110 K’lik bir sıcaklığa sahip oldukları görülmektedir. Diyamanyetik geçiş görülmeyle beraber numuneler tam olarak diyamanyetik doyuma ulaşmamıştır. M-1 telinin en yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.22’de ki MX serisi, M serisine benzer olarak 110 K’lik bir  $T_{c,on}$  değerine sahiptir. MX serisi M serisine ile karşılaştırıldığında zaman, MX serisi daha keskin bir süperiletkenlik geçişi yapmıştır. MX serisinde de diyamanyetik geçişteki plato bölgesine tam olarak ulaşamamıştır.



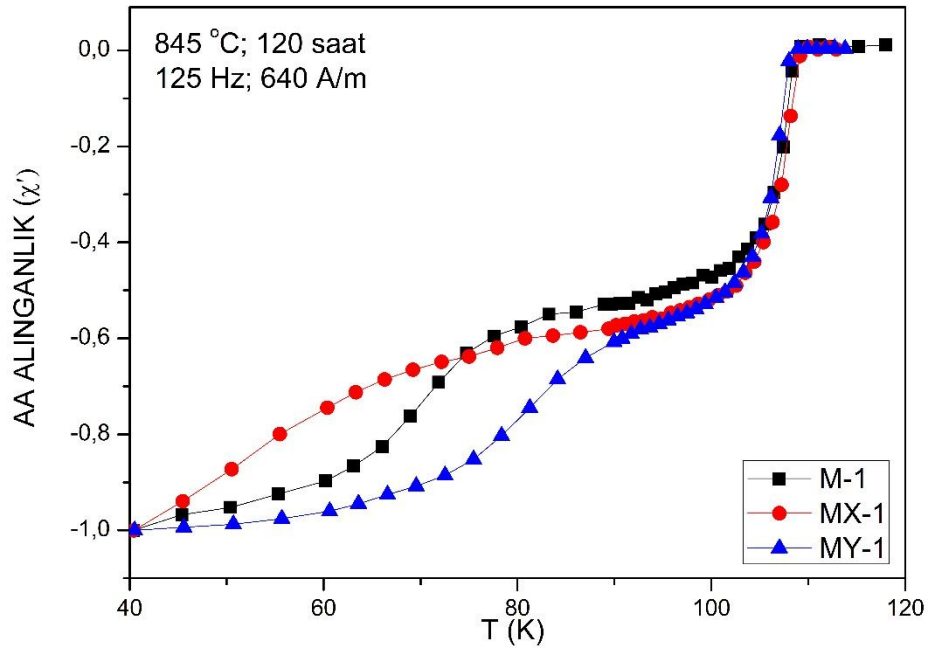
Şekil 4.22 MX serisi numuneler için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği



Şekil 4.23 MY serisi numuneler için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

Şekil 4.23'deki MY serisi ise 109 K'lik bir  $T_{c,on}$  değerine sahiptir. MY-1 numunesi 60 K değerinin altında plato bölgesine ulaşmıştır ve akım taşıma kapasitesi MY-7'ye göre daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

Bu grafiklerden yola çıkarak bütün serilerin tek damarlı telleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.24'de 845 °C'de 120 saat süreyle ısıtılmış M-1, MX-1 ve MY-1 numunelerinin AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği verilmektedir.



Şekil 4.24 M-1, MX-1 ve MY-1 serisi numuneleri için AA alınganlığın reel kısmının sıcaklığa karşı grafiği

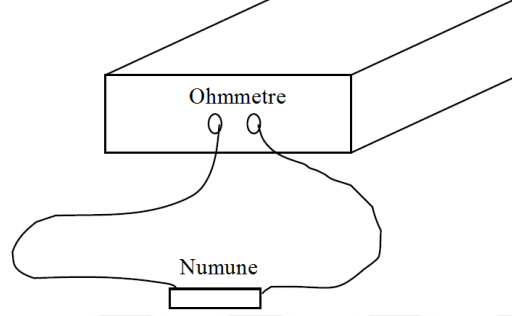
Bu numuneler hemen hemen aynı  $T_{c,on}$  değerine sahiptirler. Ancak MY-1 numunesi bu numuneler arasında en yüksek akım taşıma kapasitesine sahiptir.

### 4.3 $\rho$ -T Ölçümleri

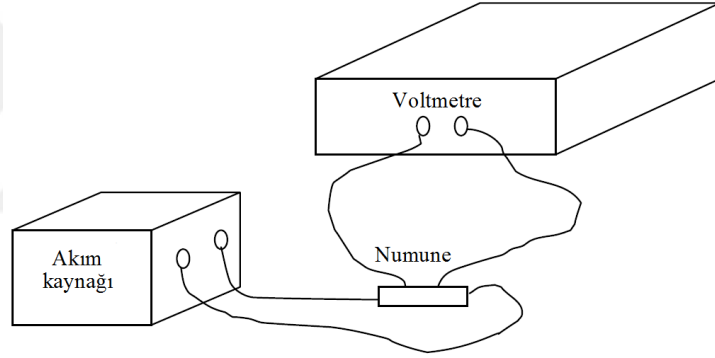
Ohmmetre kullanarak düşük dirençli örnekleri ölçmek zordur. Multimetre üzerindeki ohmmetre ayarının kullanılması, şekil 4.25'de görüldüğü gibi, numunenin ve numunedeki kontak noktalarının direncinin ölçülmesi demektir. Bir numunenin yalnızca direncini ölçmek için, 4 nokta kontak tekniğini kullanmak gereklidir. Şekil 4.26'da



gösterildiği gibi 4 nokta kontak metodunda, numunenin uçları boyunca akım uygulanır ve numunedeki iki nokta arasındaki voltaj farkı ölçülür ve ohm yasası kullanılarak direncin değeri bulunur. Bu durumda, ölçülen direnç numunenin voltaj farkının olduğu iki nokta arasındaki dirençtir (<http://www.cpp.edu> 2018).



Şekil 4.25 Ohmmetre kullanılan direnç ölçüm düzeneği



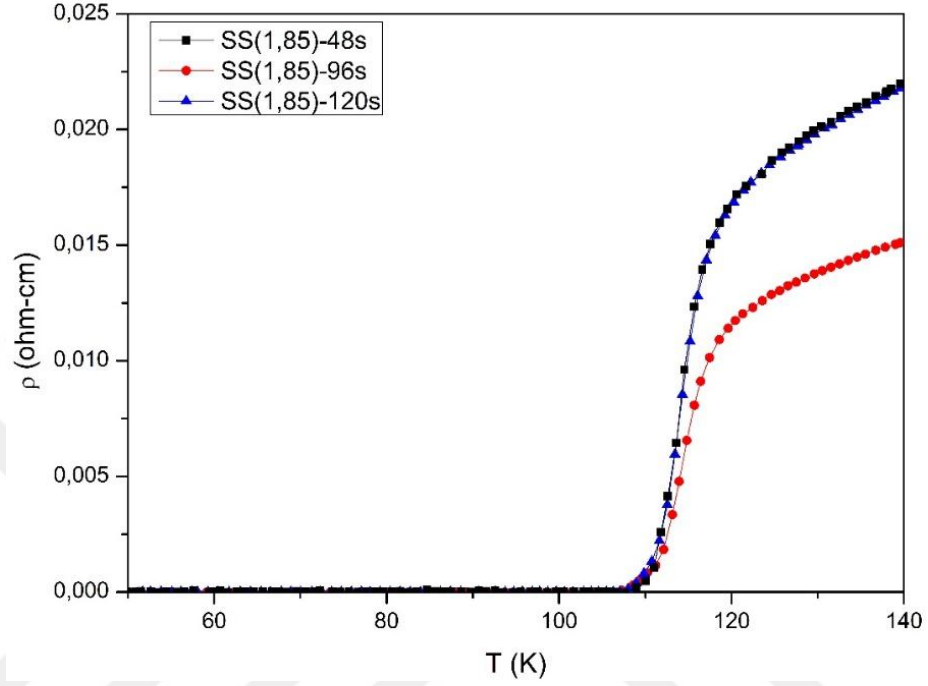
Şekil 4.26 4 nokta kontak yöntemiyle direnç ölçüm düzeneği

### 4.3.1 Külçe numunelerin $\rho$ -T ölçümleri

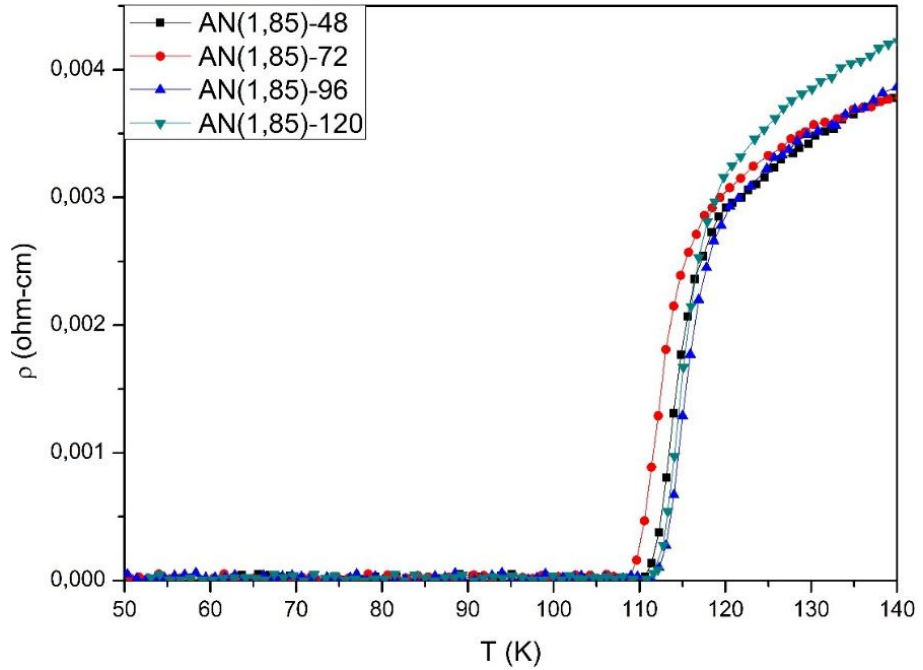
Külçe numuneler üzerindeki ısıl işlem süperiletkenlik parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak için 50 ile 140 K aralığında standart dört nokta kontak yöntemi ile numune üzerinden 50 mA DC akım uygulanarak sıcaklığın fonksiyonu olarak elektriksel direnç ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.27 - 4.28'de sırasıyla SS(1,85) ve AN(1,85) serisi külçe numunelerin  $\rho$  -T grafikleri verilmiştir.

Şekil 4.27'de SS(1,85) serisi külçe numuneleri için sıfır direnç geçiş sıcaklığı yaklaşık 109 K olarak belirlenmiştir. Isıl işlem süresinin süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı üzerinde

bir etkisi gözlenmemiştir. Bu serideki külçe numunelerin süperiletkenlik geçişi oldukça dar ve keskindir. SS(1,85)-96s numunesinin onset sıcaklığı üzerindeki direnci diğer numunelerden daha küçüktür.



Şekil 4.27 SS(1,85) serisi külçe numunelerin  $\rho$ -T grafikleri



Şekil 4.28 AN(1,85) serisi külçe numunelerin  $\rho$ -T grafikleri

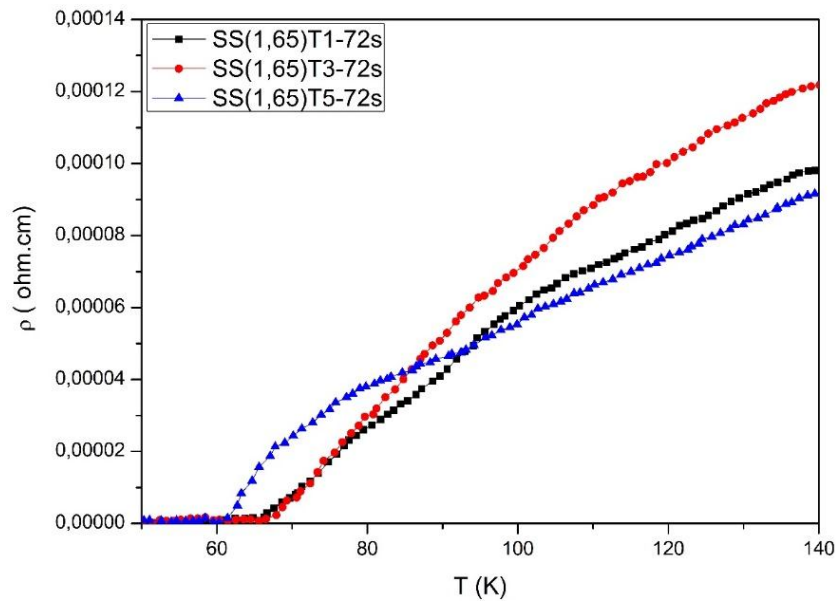
Şekil 4.28'den AN(1,85) serisi için sıfır direnç geçiş sıcaklığı ısıtma işlem süresi 48, 72, 96 ve 120 saat için sırasıyla 111 K, 109 K, 111 K ve 111 K olarak belirlenmiştir. AN(1,85) serisi içinde ısıtma işlem süresinin süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Bu serideki numuneler de oldukça dar ve keskin bir süperiletkenlik geçişine sahiptirler. AN(1,85)-120s numunesinin onset sıcaklığı üzerindeki direnci diğer numunelerden daha büyüktür. SS(1,85) ve AN(1,85) serisindeki onset sıcaklığı üzerinde bütün numuneler metalik davranış sergilemektedir.

### 4.3.2 Tel numunelerin $\rho$ -T Ölçümleri

Tel numuneler üzerinde ısıtma işlem süresinin, fırın ısıtma hızının ve fırın soğutma hızının süperiletken özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için 50 ile 140 K aralığında standart dört nokta kontak yöntemi ile numune üzerinden 50 mA DC akım uygulanarak sıcaklığın fonksiyonu olarak elektriksel direnç ölçümleri alınmıştır.

#### 4.3.2.1 Ag kılıflı tellerin $\rho$ -T ölçümleri

Şekil 4.29'da SS(1,65)AgT1-72s, SS(1,65)AgT3-72s ve SS(1,65)AgT5-72s seri numunelerin  $\rho$  T grafikleri verilmiştir.

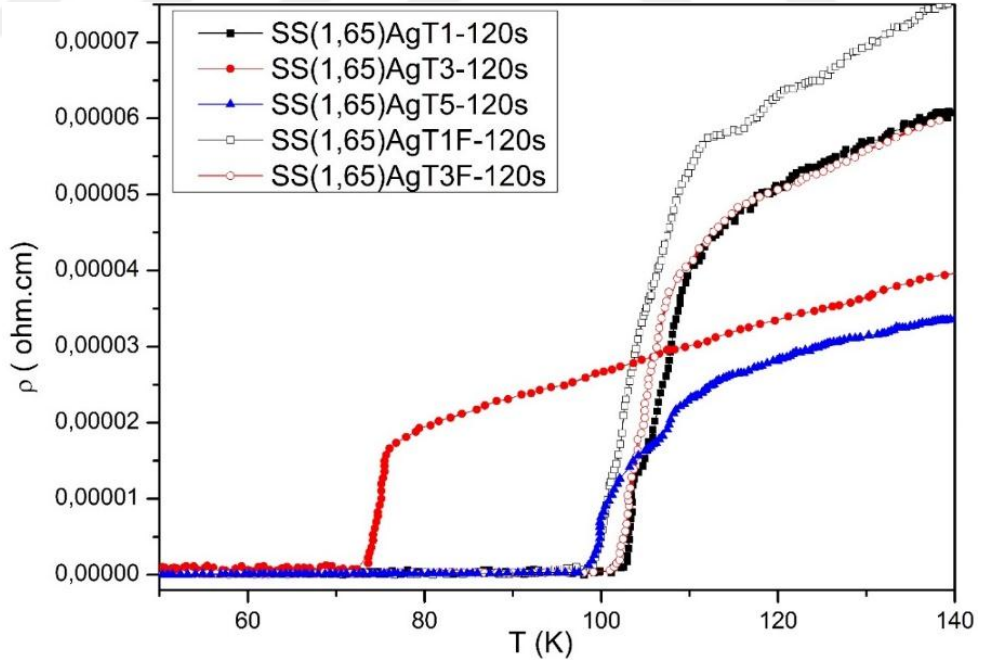


Şekil 4.29 SS(1,65)Ag-72s serisi numunelerin  $\rho$  -T grafiği

SS(1,65)AgT1-72s, SS(1,65)AgT3-72s ve SS(1,65)AgT5-72s numuneler için sıfır direnç geçiş sıcaklığı fırın sırasıyla 67, 67 ve 61 K olarak belirlenmiştir. Geçiş sıcaklığından anlaşılacağı üzere bu numunelerde sadece Bi-2221 fazı oluşmuştur. Süperiletkenliğe geçiş oldukça geniştir. Bu numunelerin AA alınganlık grafiklerinde Bi-2223 fazı da gözlenmişti. Burada Bi-2223 fazını göremeyişimizin sebepleri şunlar olabilir:

$\rho$  -T ve AA alınganlık ölçümleri aynı anda ısıl işlem görmüş 8 cm uzunluktaki telin farklı parçalarından alınmıştır.  $\rho$  -T ve AA alınganlık ölçümlerindeki bu uyuşmazlığın nedeni aynı numuneye ait farklı parçalar kullanılarak ölçümlerin alınmasından kaynaklandığı ya da numune  $\rho$  -T ölçümüne hazırlanırken seramik yapının mekaniksel olarak zarar görmüş olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.30'da SS(1,65)AgT1-120s, SS(1,65)AgT3-120s, SS(1,65)AgT5-120s, SS(1,65)AgT1F-120s ve SS(1,65)AgT3F-120s numunelerin  $\rho$  -T grafikleri verilmiştir.

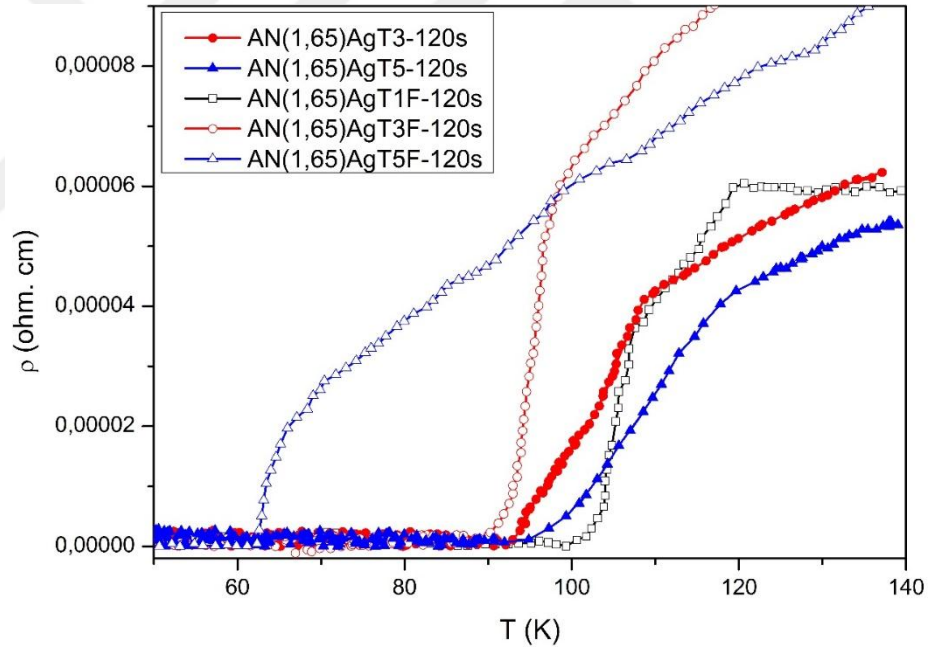


Şekil 4.30 SS(1,65)Ag-120s serisi numunelerin  $\rho$  -T grafiği

SS(1,65)AgT1-120s, SS(1,65)AgT3-120s, SS(1,65)AgT5-120s, SS(1,65)AgT1F-120s ve SS(1,65)AgT3F-120s numunelerin sıfır direnç geçiş sıcaklığı sırasıyla 102, 73, 98,

99 ve 101 K olarak belirlenmiştir. SS(1,65)AgT1-845-120 numunesi en yüksek süperiletkenliğe geçiş sıcaklığına sahiptir. SS(1,65)AgT3-120s numunesi sistematik davranışı bozmaktadır. Dış kılıf malzemesi olan gümüşün yumuşak bir malzeme olmasından dolayı dışarıdan gelen en ufak bir sert davranışta gümüş kılıf içerisindeki BSCCO yapının içinde çatlaklar oluşabilmektedir. Bu sebeple SS(1,65)AgT3-120s numunenin zarar gördüğü veya dolum faktörü ve tel çekme işleminin etkisi olduğu düşünülmektedir. Fırını 1 °C/dak hız ile 600 °C'ye kadar kontrollü soğutmasının olumlu etkisi  $\rho$  -T grafiklerinde de görülmektedir. Onset sıcaklığı üzerinde bütün numuneler metalik davranış sergilemektedir.

Şekil 4.31'de AN(1,65)AgT1F, AN(1,65)AgT3, AN(1,65)AgT3F AN(1,65)AgT5 ve AN(1,65)AgT5F numunelerin  $\rho$ -T grafiği verilmiştir.



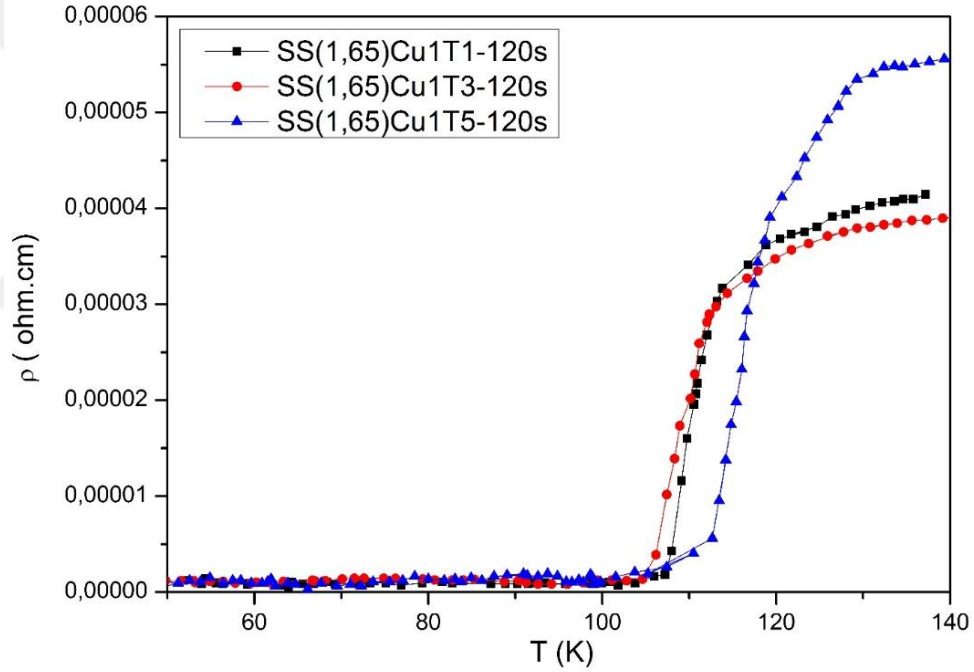
Şekil 4.31 AN(1,65)Ag-120s serisi numunelerin  $\rho$ -T grafiği

AN(1,65)AgT1F, AN(1,65)AgT3, AN(1,65)AgT3F AN(1,65)AgT5 ve AN(1,65)AgT5F numuneleri için sıfır direnç geçiş sıcaklığı sırasıyla 101, 93, 90, 95 ve 62 K olarak belirlenmiştir. AN(1,65)AgT1F-120s numunesi en yüksek süperiletkenliğe geçiş sıcaklığına sahiptir. AN(1,65)AgT1-120s numunesinin AA alınganlık ölçümlerinde keskin bir geçişe sahip olmasına rağmen,  $\rho$ -T ölçümünde süperiletken geçiş

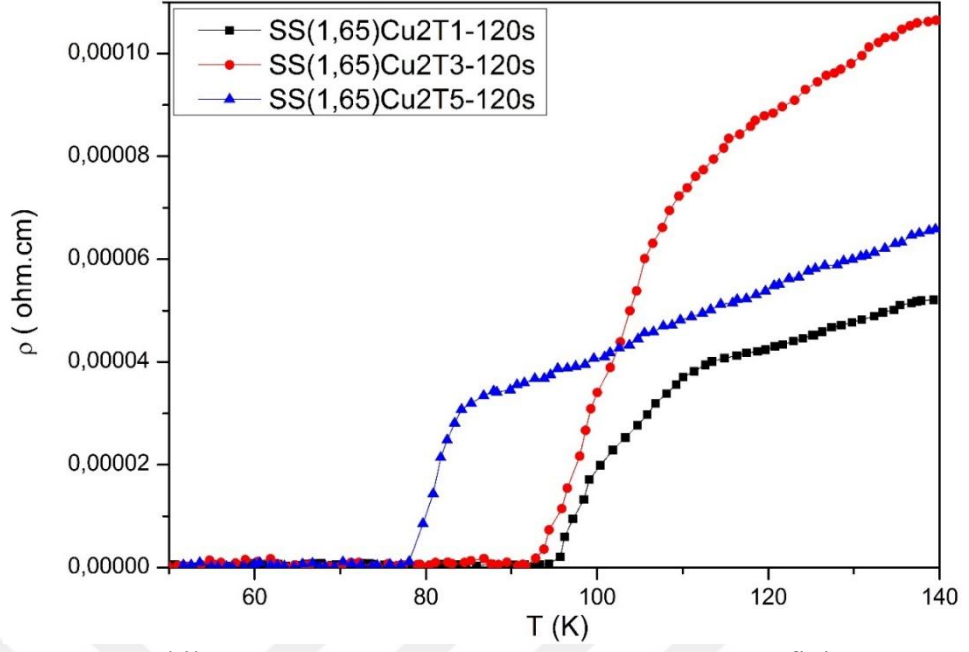
gözlenmediği için burada gösterilmemiştir. Bunun sebebi olarak  $\rho$ -T ölçümünün başka bir parça üzerinden alınması ve muhtemelen numune ölçüme hazırlanırken mekaniksel olarak zarar görmüş olabileceği değerlendirilmektedir. AN(1,65)Ag-120s serisi numunelerde sistematik bir davranış gözlenmemiştir.

#### 4.3.2.2 Ag-Cu alaşım kılıflı tellerin $\rho$ -T ölçümleri

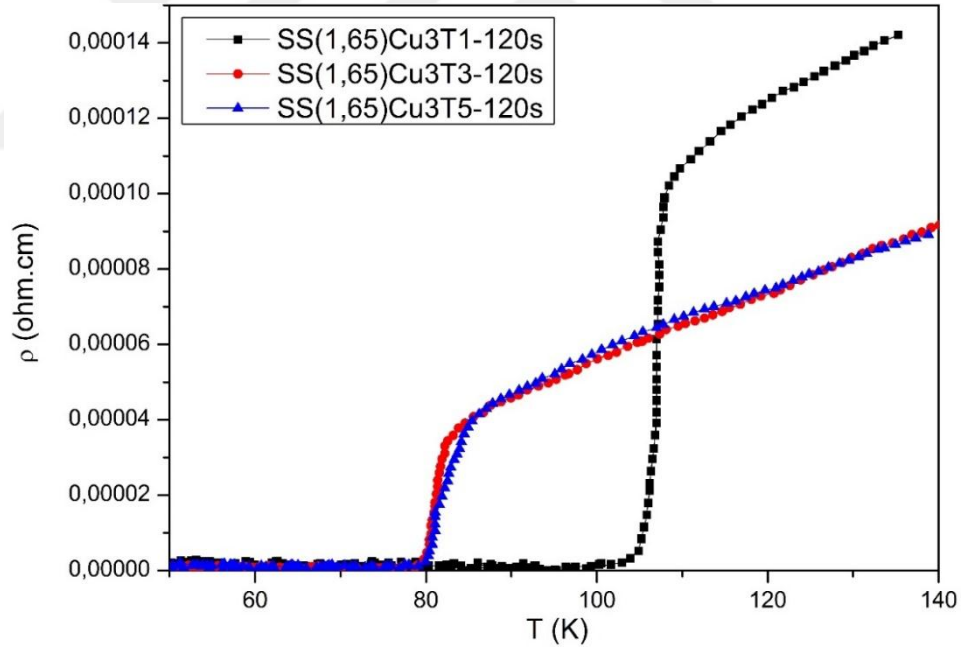
Şekil 4.32-4.35’de 845 °C’de 120 saat ısıl işleme tabi tutulmuş, sırasıyla SS(1,65)Cu1, SS(1,65)Cu2, SS(1,65)Cu3 ve SS(1,65)Cu4 alaşım kılıflı tel numune serilerinin  $\rho$ -T grafiği verilmiştir.



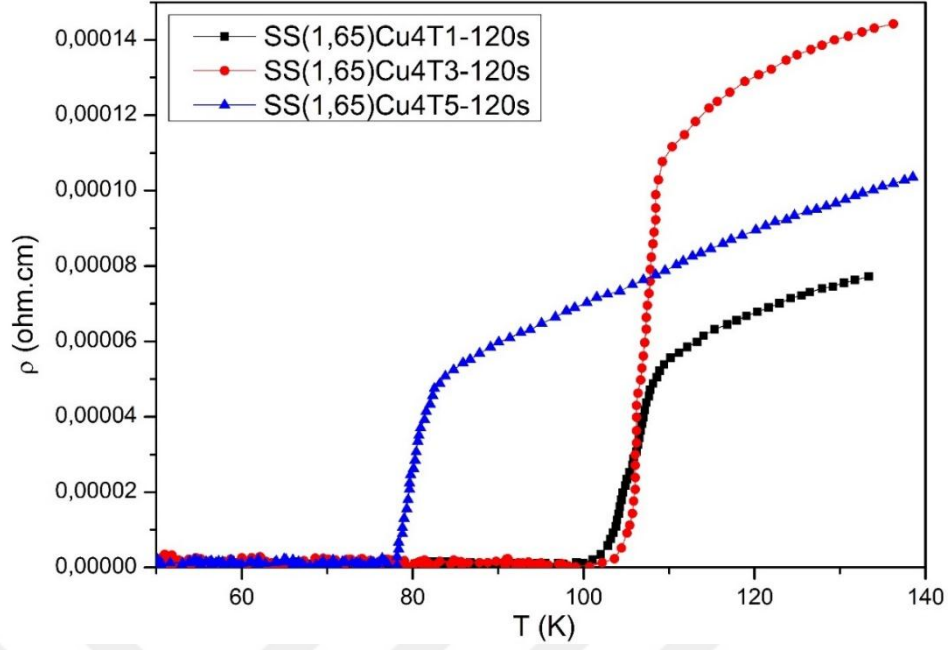
Şekil 4.32 SS(1,65)Cu1 serisi numunelerin  $\rho$ -T grafiği



Şekil 4.33 SS(1,65)Cu2 serisi numunelerin  $\rho$ -T grafiği



Şekil 4.34 SS(1,65)Cu3 serisi numunelerin  $\rho$ -T grafiği



Şekil 4.35 SS(1,65)Cu4 serisi numunelerin  $\rho$ -T grafiği

Bu grafiklerden SS(1,65)Cu1, SS(1,65)Cu2, SS(1,65)Cu3 ve SS(1,65)Cu4 alaşım kılıflı tel numune serilerinin sıfır direnç süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı çizelge 4.8’de verilmektedir.

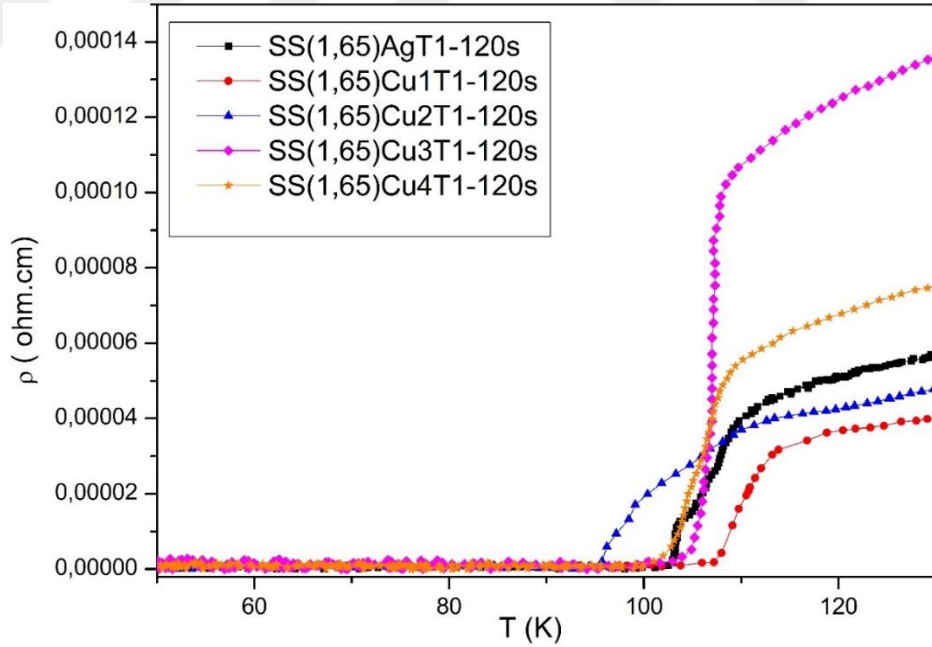
Çizelge 4.8 SS(1,65)Cu1, SS(1,65)Cu2, SS(1,65)Cu3 ve SS(1,65)Cu4 alaşım kılıflı tel numune serilerinin  $\rho$ -T grafiklerinden elde edilen kritik sıcaklık değerleri

Numune adı	$T_c$ (K)
SS(1,65)Cu1T1-120s	106
SS(1,65)Cu1T3-120s	105
SS(1,65)Cu1T5-120s	106
SS(1,65)Cu2T1-120s	95
SS(1,65)Cu2T3-120s	92
SS(1,65)Cu2T5-120s	78
SS(1,65)Cu3T1-120s	103
SS(1,65)Cu3T3-120s	80
SS(1,65)Cu3T5-120s	80
SS(1,65)Cu4T1-120s	101
SS(1,65)Cu4T3-120s	101
SS(1,65)Cu4T5-120s	78



SS(1,65)Cu1, SS(1,65)Cu2, SS(1,65)Cu3 ve SS(1,65)Cu4 serileri karşılaştırıldığı zaman SS(1,65)Cu1 serisindeki numunelerin Bi-2223 fazına sahip olduğu görülmektedir. SS(1,65)Cu1T1-120s numunesi en yüksek süperiletkenliğe geçiş sıcaklığına sahiptir. SS(1,65)Cu2T3-120s, SS(1,65)Cu2T5-120s, SS(1,65)Cu3T3-120s, SS(1,65)Cu3T5-120s, SS(1,65)Cu4T3-120s ve SS(1,65)Cu4T5-120s numunelerinde Bi-2212 fazının oluştuğu belirlenmiştir. Bu dört serideki bütün numuneler onset sıcaklığı üzerinde metalik davranış sergilemektedir. Genel olarak fırın ısıtma hızı 1 °C/dak olan numunelerin onset sıcaklığı üzerindeki direnci diğer numunelerden daha küçüktür.

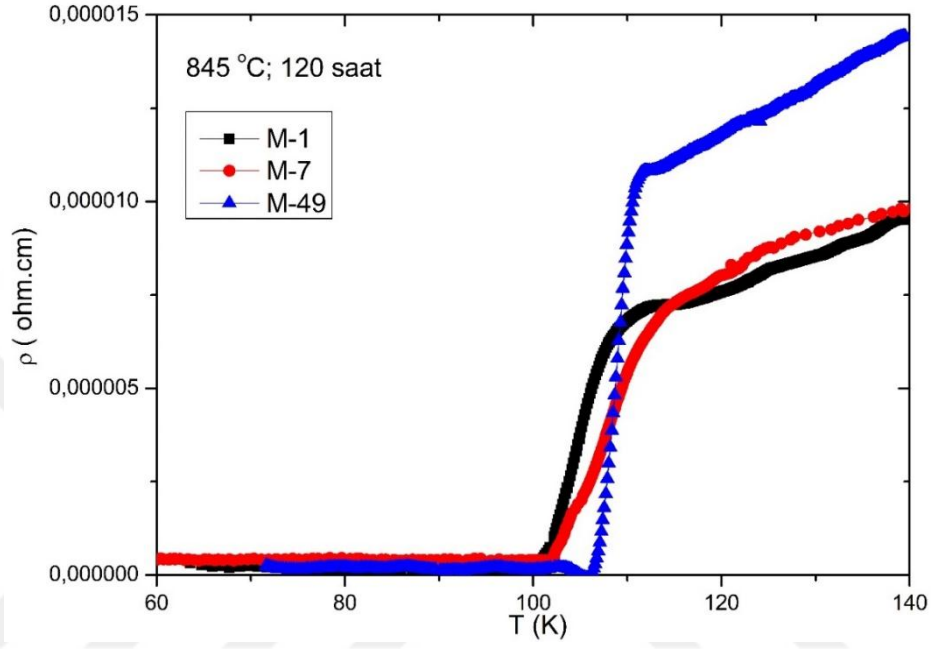
Şekil 4.36'da 845 °C'de, 120 saatlik ısıl işlem süresine sahip SS(1,65)AgT1, SS(1,65)Cu1T1, SS(1,65)Cu2T1, SS(1,65)Cu3T1 ve SS(1,65)Cu4T1 numunelerin  $\rho$ -T grafiği verilmiştir. SS(1,65)Cu1T1-120s numunesi en yüksek geçiş sıcaklığına sahiptir. Ayrıca SS(1,65)Cu1T1-120s numunesinin onset sıcaklığı üzerindeki direnci diğer numunelerden daha küçüktür. SS(1,65)Cu2T1-120s numunesi muhtemel mekaniksel deformasyon sebebiyle sistematik davranışı bozmaktadır.



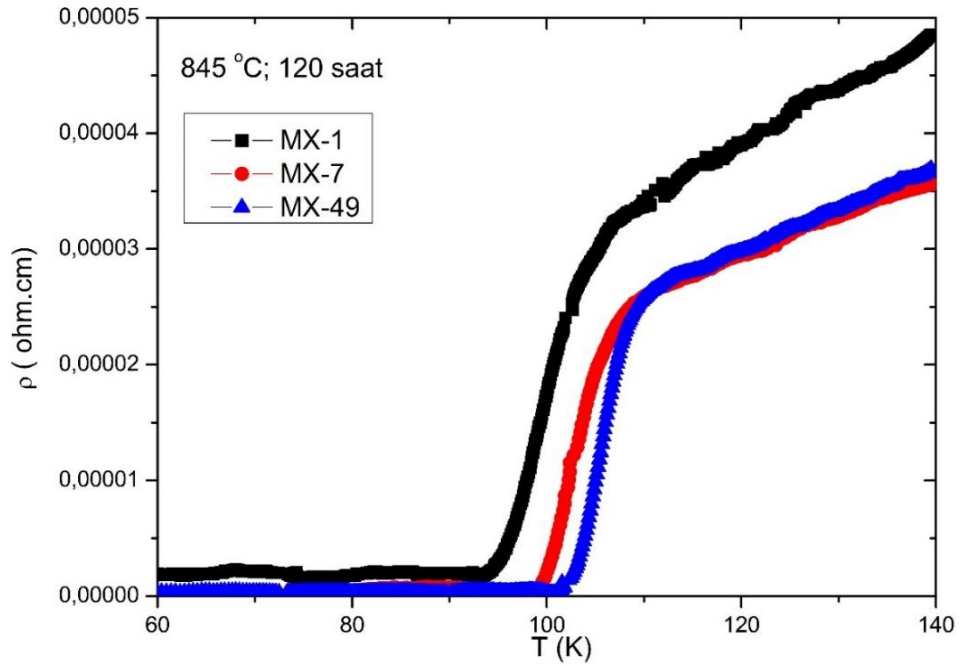
Şekil 4.36 SS(1,65)AgT1, SS(1,65)Cu1T1, SS(1,65)Cu2T1, SS(1,65)Cu3T1 ve SS(1,65)Cu4T1 numunelerin  $\rho$ -T grafiği

### 4.3.2.3 Çok damarlı Ag kılıflı tellerin $\rho$ -T ölçümleri

Şekil 4.37 - 3.38'de sırasıyla 845 °C'de 120 saat süreyle ısıl işleme tabi tutulmuş M ve MX serisi numunelerin  $\rho$ -T grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.37 M serisi numunelerin  $\rho$ -T grafiği



Şekil 4.38 MX serisi numunelerin  $\rho$ -T grafiği

Bu grafiklerden elde edilen M ve MX serilerinin sıfır direnç süperiletkenliğe geçiş sıcaklıkları çizelge 4.9'da verilmektedir. Ayrıca çizelge 4.9'da optik mikroskop resimlerinden elde edilen süperiletken yüzey alanının, toplam yüzey alanına oranı (t ile ifade edilmektedir) da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 M ve MX serisi numunelerin  $T_{c,0}$  (K) ve t değerleri

Numune adı	$T_{c,0}$ (K)	t
M-1	100	0,38
M-7	103	0,15
M-49	106	0,04
MX-1	94	-
MX-7	99	0,30
MX-49	101	0,30

M-49 ve MX-49 numunelerin  $T_{c,0}$  (K) değerleri diğer numunelerden daha yüksektir. Damar sayısı arttıkça  $T_{c,0}$  (K) değeri sistematik olarak artmaktadır. Bunun sebebi şu şekilde açıklanabilir; akım her zaman gidebileceği en kolay yolu tercih eder. Damar sayısı arttıkça akım, süperiletkenliğin olduğu bir yol bulması kolaylaşmıştır. Üretilen numunelerde damar sayısı arttıkça,  $T_{c,0}$  (K) değerinde artış bu şekilde açıklanabilir.

Onset sıcaklığı üzerinde ise bütün numuneler metalik davranış sergilemektedir. Çizelge 4.9'da görüldüğü üzere, M serisinde damar sayısı arttıkça malzemedeki toplam süperiletken oranı azalmakta, malzemedeki Ag oranı artmaktadır. Onset sıcaklığı üzerinde 49 damarlı telin direnci diğer numunelerden daha büyüktür ve sistematik olarak damar sayısı azaldıkça azalmaktadır. MX serisinde ise 7 ve 49 damarlı tel için t değerinin aynı olduğu tespit edilmiştir.  $\rho$ -T eğrisinden onset sıcaklığı üzerinde bu iki telin direnç davranışının benzer olduğu görülmektedir.

#### 4.4 I-V Ölçümleri

Hazırlanan tel numunelerin bir kısmı, bu tellerden yapılan süperiletken selonoid bobin, satın alınan şeritler (CA ve SS) ve bu şeritlerden yapılan bobinlerin sıfır manyetik alanda sıvı azot içerisinde transport kritik akım değerleri dört nokta kontak yöntemi ile ölçülmüştür. Transport kritik akım değerleri akım-gerilim grafiğinden  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  kriteri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Hazırlanan tel numunelerin bir kısmının kritik akım değerleri çizelge 4.10'da verilmektedir. Çizelge 4.10'dan da görüldüğü üzere, üretilen tellerin kritik akım değerleri çok düşüktür. Hemen hemen bütün tel numuneler yaklaşık 1000 mA'lık bir kritik akıma sahiptirler. Elde edilen bu sonuçlar SEM ölçümleri ile de uyumludur. Tel numuneler için yapılan SEM analizinde yapı içerisinde çatlaklar ve boşluklar görülmüştür. Üretilen tellerde süperiletken malzeme doluluk oranı arttırıldığı zaman kritik akım değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu amaçla tellerin doluluk oranları arttırılmış ve çok damarlı teller üretilmiştir. Ancak üretilen tellerde istenilen düzeyde homojen ve kritik akım yoğunluğu yüksek toz hazırlanamadığı için ölçülen en yüksek kritik akım değeri yaklaşık 5 A civarındadır. Üretilen süperiletken selenoid bobin için kritik akım değeri 1 A ölçülmüştür.

Çizelge 4.10 Hazırlanan bazı tel numunelerin sıfır dış manyetik alanda transport kritik akım değerleri (77 K)

Numune Adı	Kritik Akım ( $I_c$ ) (mA)
SS(1,85)AgT5-120s	1100
SS(1,85)Cu1T5-120s	945
SS(1,65)AgT1-120s	917
SS(1,65)AgT1F-120s	904
SS(1,65)AgT3-120s	895
SS(1,65)AgT3F-120s	901
SS(1,65)AgT5-120s	904
SS(1,65)AgT5F-120s	898
SS(1,65)Cu1T1-120s	1034
SS(1,65)Cu1T3-120s	1012
SS(1,65)Cu1T5-120s	1380
SS(1,65)Cu2T1-120s	912
SS(1,65)Cu2T3-120s	906
SS(1,65)Cu2T5-120s	899
SS(1,65)Cu3T1-120s	920
SS(1,65)Cu3T3-120s	906
SS(1,65)Cu3T5-120s	891
SS(1,65)Cu4T1-120s	1903
SS(1,65)Cu4T3-120s	906
SS(1,65)Cu4T5-120s	899
AN(1,65)AgT1-120s	906
AN(1,65)AgT3-120s	299
AN(1,65)AgT5-120s	906
M-1	700
M-7	2200
M-49	550
MX-1	1600
MX-7	2300
MX-49	4100
MY-1	5000
MY-7	5150

Sumitomo Electric Industries Ltd.'den satın alınan iki farklı Bi-2223 şerit ve bu şeritlerden yapılmış farklı çapa ve sarım sayısına sahip pancake bobinlerin kritik

akımları ölçülmüştür. Bu kritik akım değerleri çizelge 4.11’de verilmiştir. Ayrıca şekil 4.39’da şerit ve bobinlerin I-V ölçümleri için hazırlanan numunelerin resimleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.11 CA ve SS şeritlerinin ve bu şeritlerden yapılan pancake bobinlerin kritik akım yoğunluğu değerleri

Numune adı	Kritik akım değeri (A)
SS (paslanmaz çelik) şerit (12 cm uzunluğunda)	183
CA (Bakır alaşımlı) şerit (12 cm uzunluğunda)	189
CA bobin (2 sarım, 6,4cm iç çap, 61 cm uzunluk)	160
CA bobin (3 sarım, 6,4 cm iç çap, 73 cm uzunluk)	140
SS bobin(110 sarım, 6,4 cm iç çap, 30 m uzunluk)	93
CA bobin (95 sarım, 6,4 cm iç çap, 26 m uzunluk)	103



Şekil 4.39 Ölçüm için hazırlanan şerit ve pancake bobinlerin resimleri

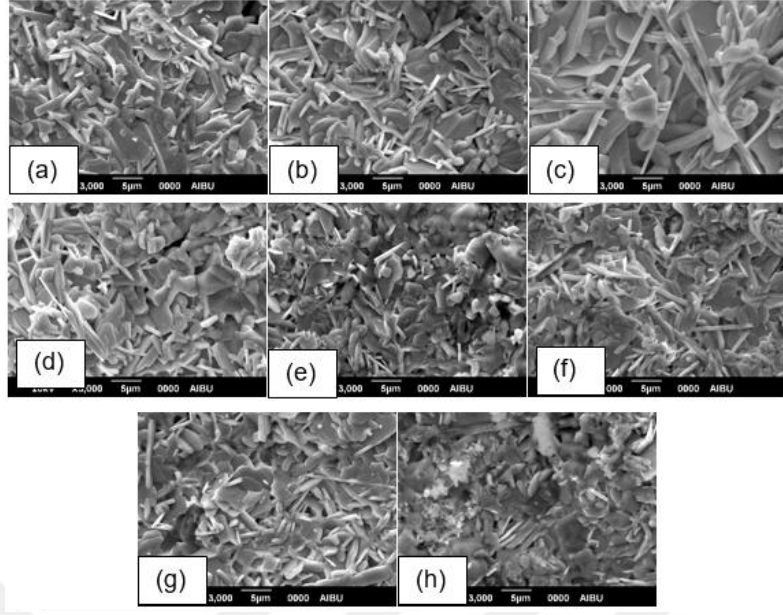
Düz şeritlerin kritik akım değerleri, bobinlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu beklenen bir sonuçtur. Bobin yapmak için şerit ufak çaplara sarıldığı zaman şerit içerisindeki süperiletken çekirdeğin akım taşıma kapasitesi yönelimden dolayı azalmaktadır. Minimum bükülme çapı üretici firma tarafından 6 cm olarak belirlendiği için bobin sarımı gerçekleştirilirken bu değer göz önüne alınmıştır.

#### **4.5 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri**

Mikroyapı analizleri Abant İzzet Baysal Üniversitesi bünyesinde bulunan JEOL 6390LV taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir.

##### **4.5.1 Külçe numunelerin SEM analizleri**

Şekil 4.40'da dört farklı ısıl işlem süreleri (48/72/96/120 saat) için SS(1,65) ve AN(1,65) grubu külçe numunelerinin SEM analizlerinden elde edilen mikroyapıları verilmiştir. Numuneler 20kV, 3000 büyütme uygulanarak incelenmiştir. SS(1,65) ve AN(1,65) serisi numunelerinde yaygın olarak çubuksu yapıda tanelerin olduğu görülmektedir. Taneler gelişi güzel bir dağılım göstermektedir. Katıhal reaksiyon yöntemi ile üretilen numunelerde tane boyutu yaklaşık 10 µm olarak belirlenmiştir ve amonyum nitrat metodu ile üretilen numunelerin tane boyutundan daha büyüktür. Buna ek olarak, amonyum nitrat metodu ile üretilen numuneler de kısmi erime ve boşluklu yapının daha fazla olduğu görülmektedir.

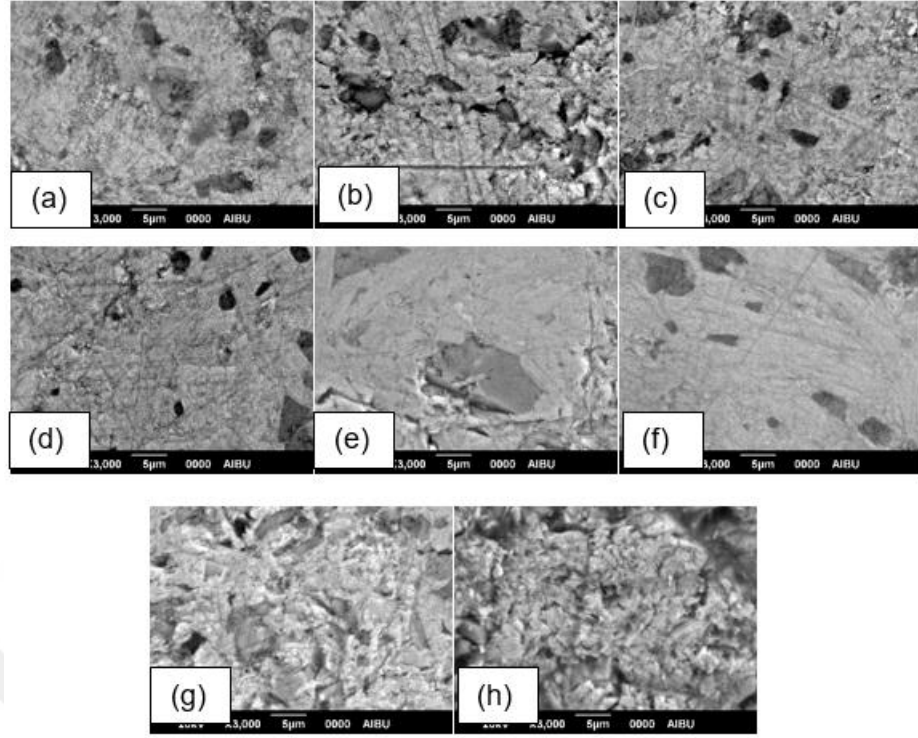


Şekil 4.40.a. SS(1,65)-48s, b. SS(1,65)-72s, c. SS(1,65)-96s, d. SS(1,65)-120s, e. AN(1,65)-48s, f. AN(1,65)-72s, g. AN(1,65)-96s h. AN(1,65)-120s numunelerinin SEM mikroyapı ölçümleri

#### 4.5.2 Tel ve şerit numunelerin SEM analizleri

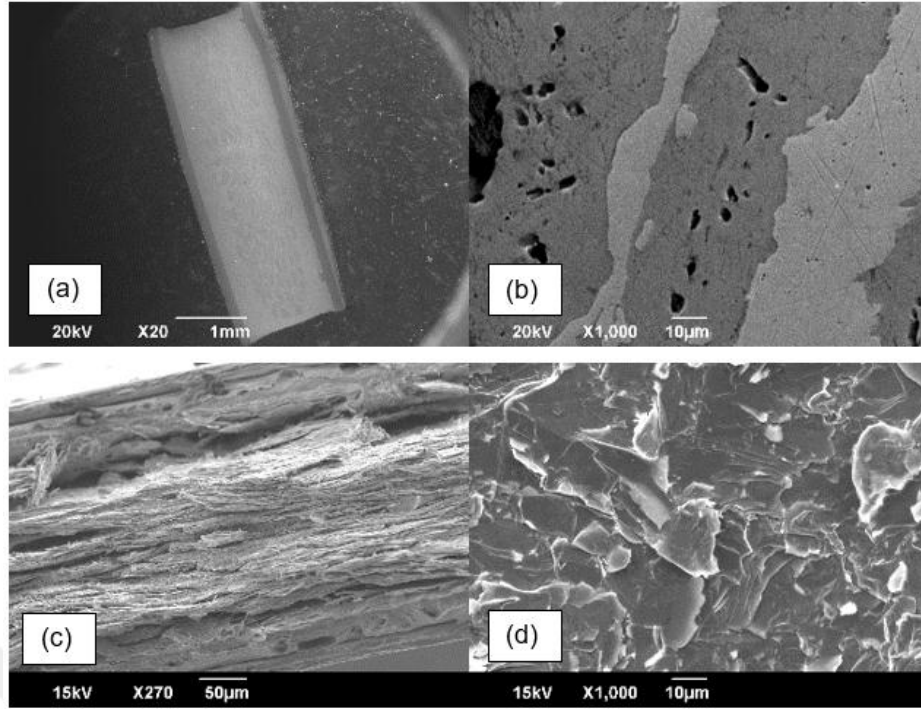
Şekil 4.41'de üretilen tel numunelerden bazılarının SEM analizlerinden elde edilen mikroyapıları verilmiştir. Numune analizleri yapılmadan önce numuneler dik ve yatay şekilde bakalite alınarak parlatılmıştır. Numuneler 20kV, 3000 büyütme uygulanarak incelenmiştir. Numunelerin gözenekli bir yapıya sahip olduğu, yapılarda boşluklar ve çatlaklar olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, kritik akım değerlerinin düşük olması ile uyumludur.





Şekil 4.41.a. SS(1,65)AgT1-72s, b. SS(1,65)AgT1-120s, c. SS(1,65)Cu1T1-120s, d. SS(1,65)Cu2T1-120s, e. SS(1,65)Cu3T1-120s, f. SS(1,65)Cu4T1-845-120s, g. AN(1,65)AgT1-845-72s h. AN(1,65)AgT1-845-120s numunelerinin SEM mikroyapı ölçümleri

Satın alınan bakır alaşımlı şeridin SEM analizlerinden elde edilen mikroyapıları ise şekil 4.42'de gösterilmiştir. Şekil 4.42.a'da şeridin genelinden alınan SEM görüntüsünde, çok damarlı süperiletken bölge eliptik bir süperiletken bir çekirdek olarak görülmektedir. Şekil 4.42.b'de BSCCO şeridin ortasından alınan süperiletken filamanların görüntüsü verilmiştir. Yapının oldukça homojen olduğu, kısmi boşluklar bulunduğu görülmektedir. Şekil 4.42.c'de şeridin kesitten alınan görüntüde boşluklu yapının ve çatlakların olmadığını, homojen bir yapıya sahip olduğunu söylenebilir. Şekil 4.42.d'de ise Ag kılıf kaldırılarak iç yüzeyinden alınmış görüntü verilmiştir.



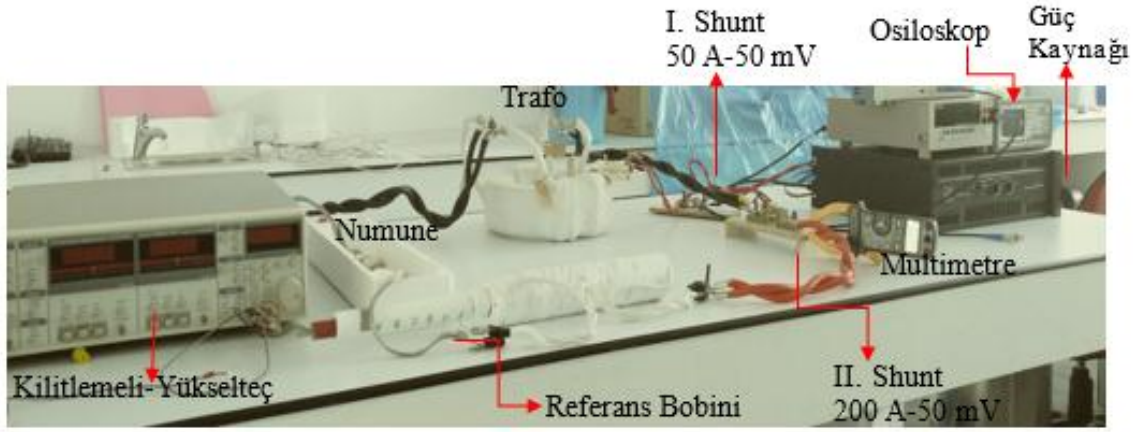
Şekil 4.42 Bakır alaşımlı Sumitomo şeridinin SEM mikroyapı ölçümleri

#### 4.6 Transport AA Kayıp Ölçümleri

Şekil 4.43’de sıvı azot içinde transport AA kayıp ölçüm düzeneği verilmiştir. Numunenin AA kaybını ölçmek için öncelikle numune sıvı azot içine konulup ısı dengeye ulaştığında sisteme güç kaynağından alternatif akım verilir. Verilen bu akımın değeri I. shunt yardımıyla kontrol edilir. Sisteme bağlanan trafo yardımıyla akım değeri artırılıp, numuneye akım indüklenir. Artırılan bu akım 2. shunt yardımıyla ölçülür. Daha sonra referans bobininden ve numune üzerinden gelen sinyal kilitlemeli yükselteç kullanılarak analiz edilir. Kilitlemeli yükselteçten okunan numune üzerindeki gelen gerilim değeri kullanılarak

$$Q = \frac{I_{rms} \cdot Y}{l \cdot f} \quad (4.4)$$

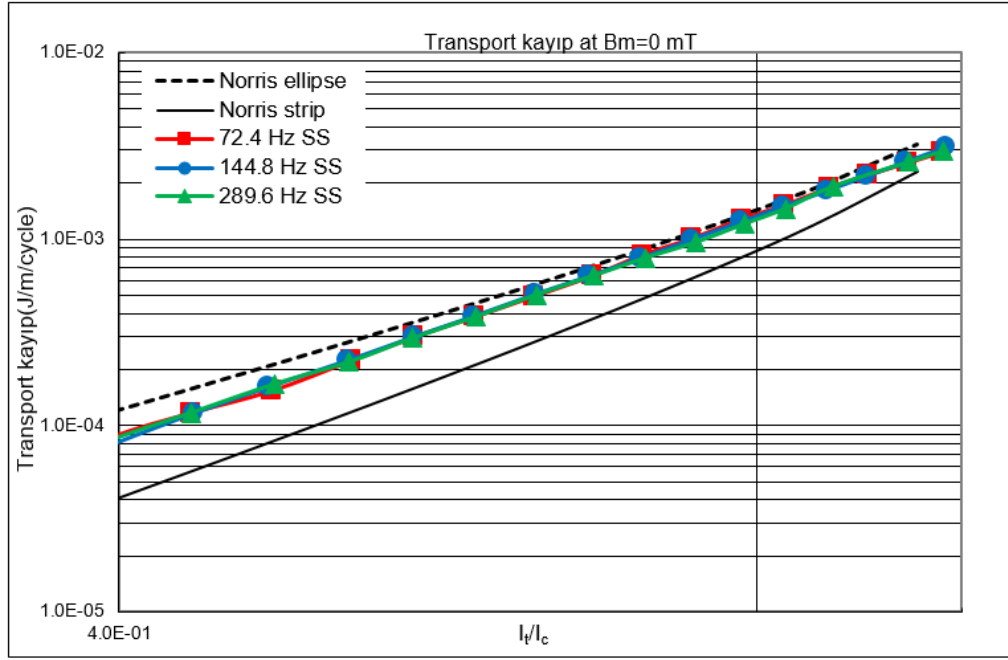
formülüyle kayıp hesaplanır. Burada Q; kaybı,  $I_{rms}$ ; sistemin akımını, Y; numune üzerindeki gerilimi, l; numune üzerindeki kontaklar arasındaki mesafeyi ve f; frekansı göstermektedir.



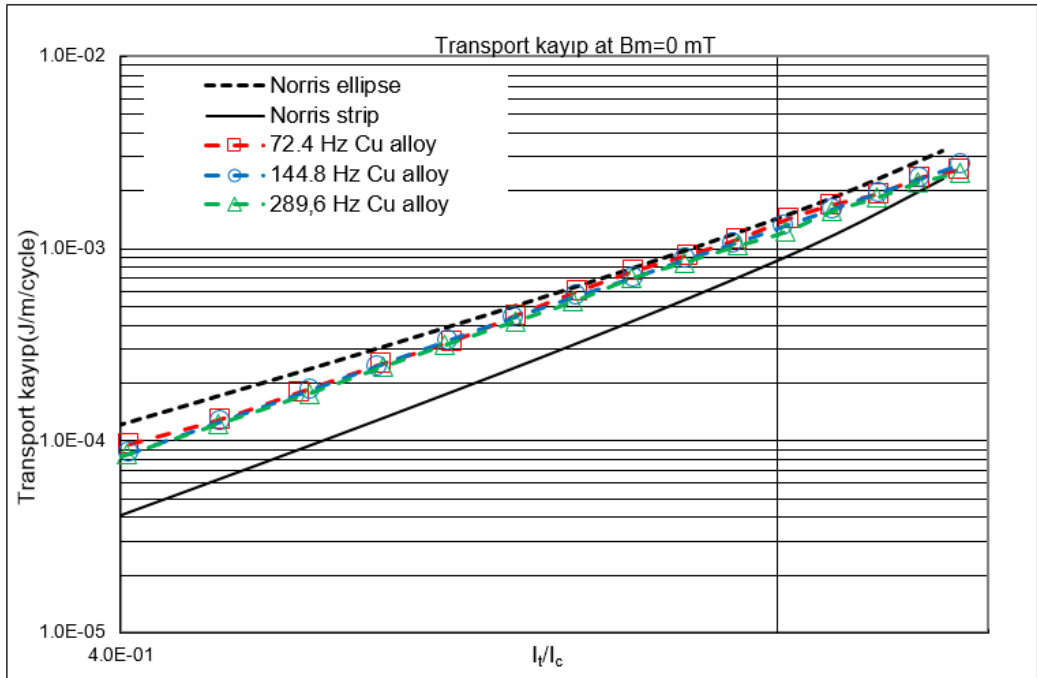
Şekil 4.43 Transport AA kayıp düzeneği

#### 4.6.1 Şeritlerin transport AA kayıp ölçümleri

Şekil 4.44 - 4.45'de sırasıyla SS ve CA BSCCO şeritlere ait transport AA kaybın normalize akım değerine karşı çizilmiş grafikleri verilmektedir. Transport AA kayıp ölçümler 72,4 Hz, 144,8 Hz ve 289,6 Hz olmak üzere 3 farklı frekansta alınmıştır. Ayrıca bu ölçümler Norris Model (Norris 1970) ile de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.44 ve şekil 4.45'de verilen grafiklerden de görüldüğü üzere; satın alınan SS ve CA Bi-2223 şeritlerinin transport AA ölçümlerinde frekans bağımlılığı gözlenmemiştir. Frekans bağımlılığının olmaması şeritlerde oluşan kayıpların tamamen histeretik olduğu anlamına gelmektedir. Bu şeritler için yapılan SEM mikroyapı ölçümleri (Şekil 4.42) göz önüne alındığı zaman süperiletken çekirdek kısmın elips şeklinde olduğu görülmektedir. Burada gözlenen kaybın Norris elips modeline daha yakın çıkması SEM sonuçları ile de uyum içinde olduğunu göstermektedir.

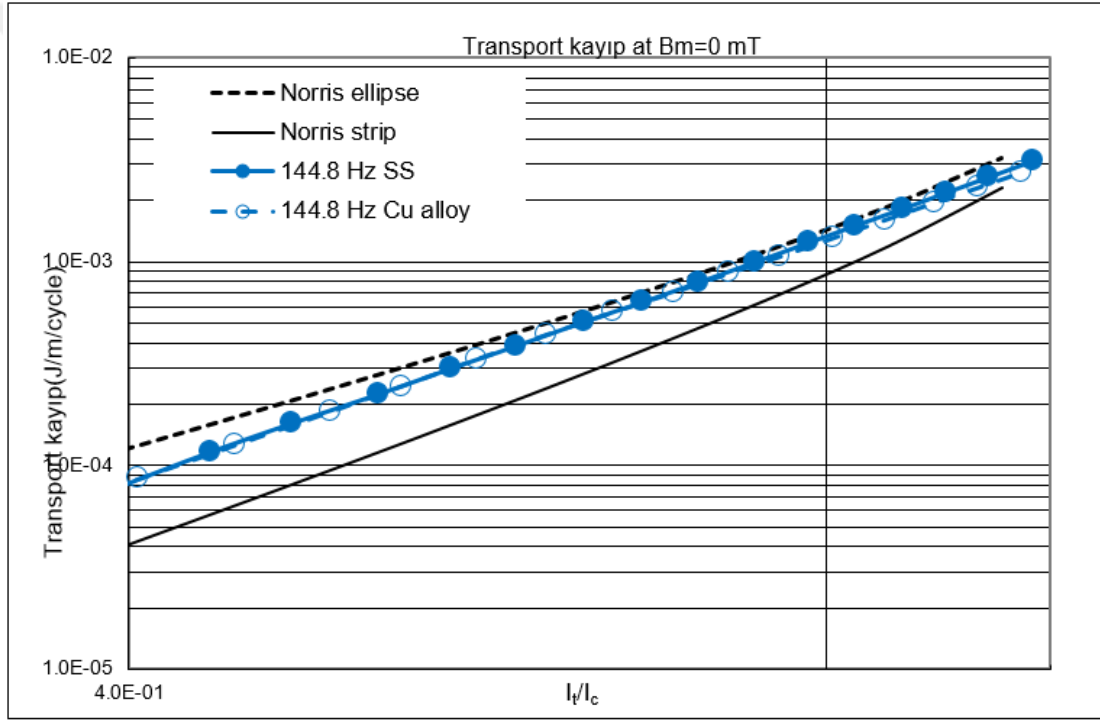


Şekil 4.44 SS BSCCO şeride ait transport AA kaybın normalize akım değerine karşı grafiği



Şekil 4.45 CA BSCCO şeride ait transport AA kaybın normalize akım değerine karşı grafiği

Şekil 4.46'da 144,8 Hz'de CA ve SS BSCCO şeritlerinin transport AA kaybın normalize akım değerine karşı grafiği gösterilmektedir. Üzerinde içi dolu daire sembolü olan düz çizgiler SS şeritlerde 144,8 Hz'de alınmış olan deneysel AA kayıp sonuçları, içi boş daire sembolü olan kesikli çizgiler ise CA şeritlerde 144,8 Hz'de alınmış olan deneysel AA kayıp sonuçlarını göstermektedir. Bu şeritlerde frekans bağımlılığı gözlenmemiştir. Yani bu şeritlerde ki AA kayıp tamamen histeretiktir. Ayrıca bu grafikten görüldüğü üzere, CA ve SS BSCCO şeritleri için AA kayıp aynıdır (ölçümden kaynaklanan ufak hatalar vardır.). Deney başka frekanslarda tekrarlanmıştır ve herhangi bir frekans bağımlılığı gözlenmemiştir.



Şekil 4.46 CA ve SS BSCCO şeritlerinin 144,8 Hz'de transport AA kaybın normalize akım değerine karşı grafiği

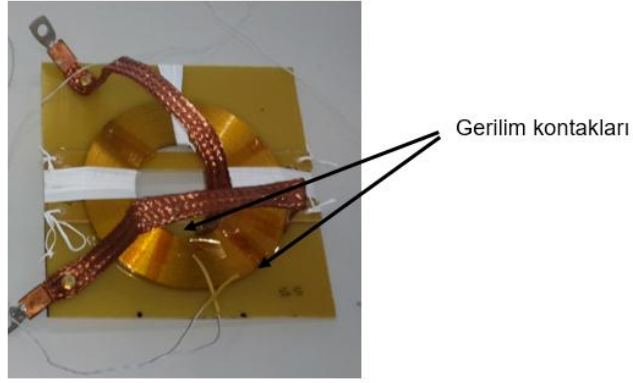
#### 4.6.2 Bobinlerin transport AA kayıp ölçümleri

Bobinlerin transport AA kayıpları ölçümleri alınırken, devreye bir potansiyometre bağlayarak okunan gerilim değeri 300 kat azaltılarak ölçümler alınmıştır. Bu sebebi ise bobinlerden okunan gerilim değerleri kilitlemeli yükseltecin okuyabileceği değerden

oldukça yüksek olmasıdır. Daha sonra alınan ölçümler (J/m) olacak şekilde normalize edilmiştir.

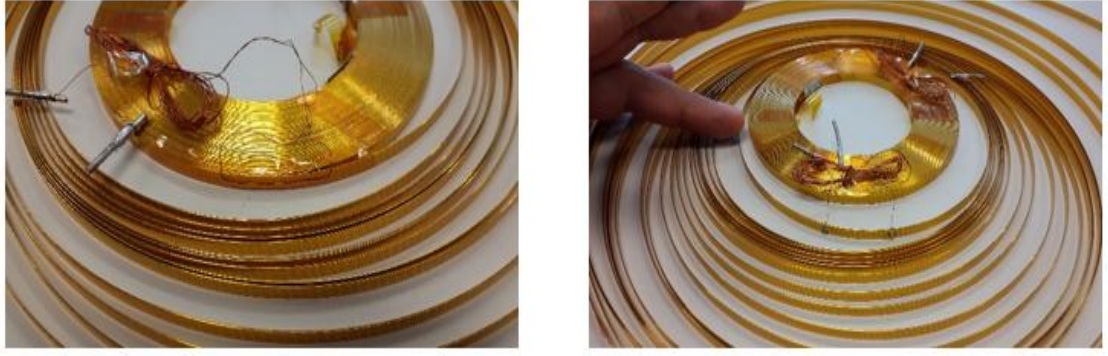
SS ve CA BSCCO şeritlerinden hazırlanan pancake bobinlerin 3 farklı şekilde transport AA kayıp ölçümleri alınmıştır.

İlk ölçüm için şekil 4.47’de gösteriliği gibi gerilim kontakları bobinin başlangıç ve bitiş noktalarından olacak şekilde şeritlerin akım uçlarına 2 cm mesafeden lehim yapılmıştır.



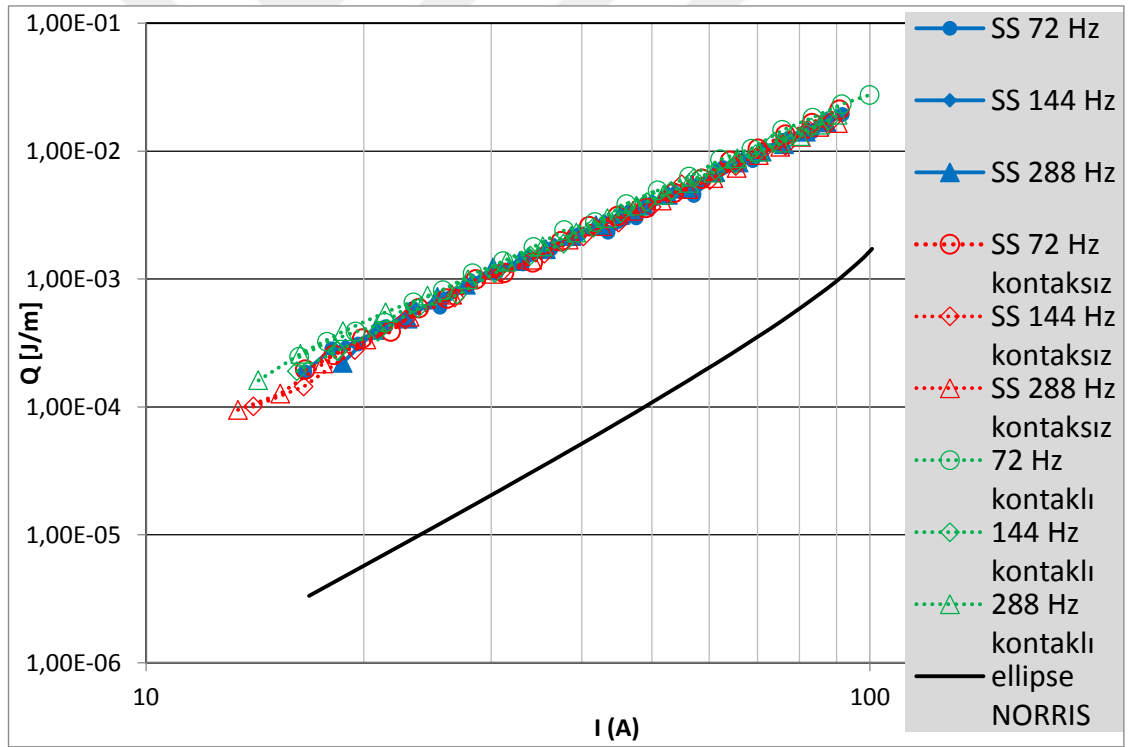
Şekil 4.47 Ölçüm yöntemi için pancake bobinde gerilim kontaklarının gösterimi

Tüm bobinden alınan sinyal ile ölçümler tamamlandıktan sonra, şekil 4.48’de gösterildiği gibi bobinin dış kısmından 1/3’lük kısmı açılarak 3cm’lik iki adet halka şeklinde gerilim kontağı hazırlanmıştır. Bu kontaklardan biri şekilde gösterildiği gibi şeridin tam ortasına gelecek şekilde şerit üzerine kapton bant ile yapıştırılmıştır (“kontaksız halka”). Diğer 3 cm’lik gerilim kontağı ise şerit üzerindeki yalıtım malzemesi kaldırılarak lehim yapılmış (“kontaklı halka”) ve transport AA kayıp ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.48 Bobinler üzerindeki kontaklı halkanın ve kontaklı halkanın gösterimi

SS bobini için 3 farklı şekilde alınan transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği şekil 4.49’da gösterilmektedir. Ölçümler 72,144 ve 288 Hz frekans olmak üzere, 3 farklı frekansta alınmıştır.

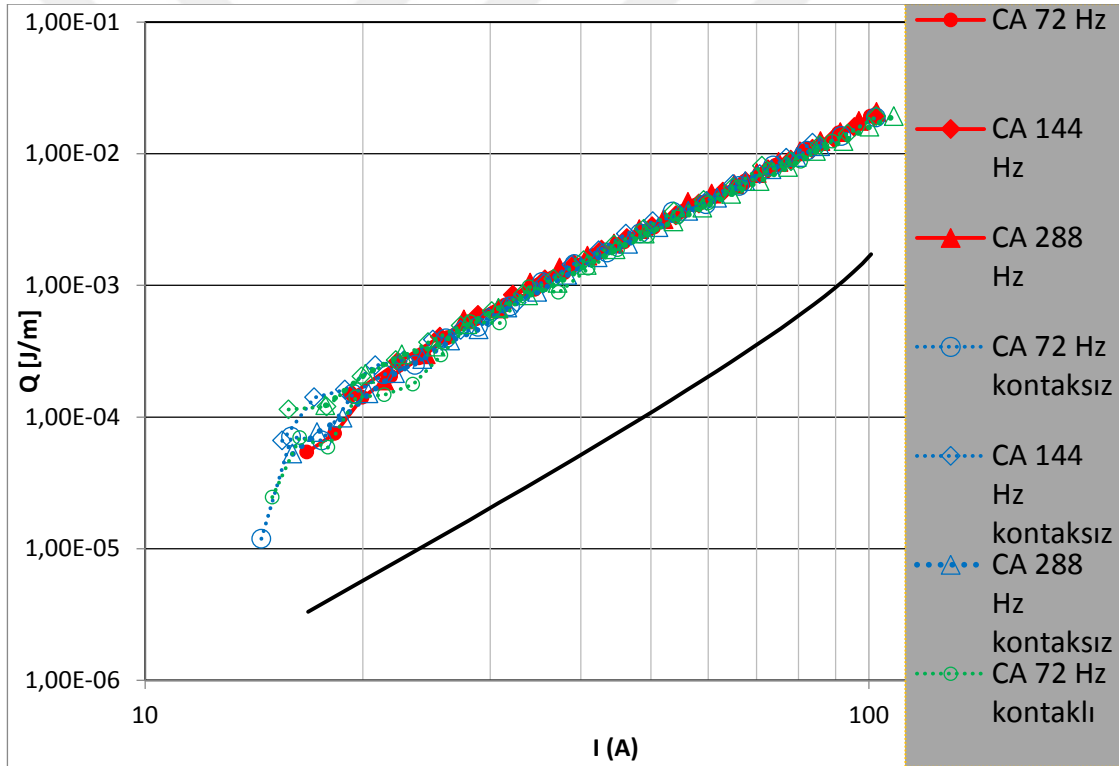


Şekil 4.49 SS bobin için transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği

Şekil 4.49’deki grafikte gösterilen mavi çizgiler, gerilim kontaktları bobinin başlangıç ve bitiş noktalarından alınan ölçümleri (30 m uzunluğundaki telden alınan ölçümlerdir, (J/m)’ye normalize edilmiştir), kırmızı kesik çizgiler, kontaklız halkadan alınan

ölçümleri, yeşil kesik çizgiler ise kontaklı halkadan alınan ölçümleri göstermektedir. SS bobini için, 3 farklı şekilde yapılan transport AA kayıp ölçümlerinde frekans bağımlılığı yoktur. Bütün halka ve kontaklı halkadan alınan ölçümler birbirleri ile uyum içindedir. Kontaklı halkadan alınan ölçümler ise diğer iki ölçüme kıyasla yaklaşık % 10'luk bir hata söz konusudur. Ölçüm sırasında kontaklı halka için kullanılan halkanın şeklinin bozulmuş olabileceği ve bu sebeple halka içinden geçen akıyı yanlış algıladığı için ölçüm sonuçlarında diğer iki ölçüme göre hata oluştuğu düşünülmektedir.

CA bobini içinde, 3 farklı şekilde alınan transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği şekil 4.50'de gösterilmektedir. Ölçümler 72,144 ve 288 Hz frekans olmak üzere, 3 farklı frekansta alınmıştır.



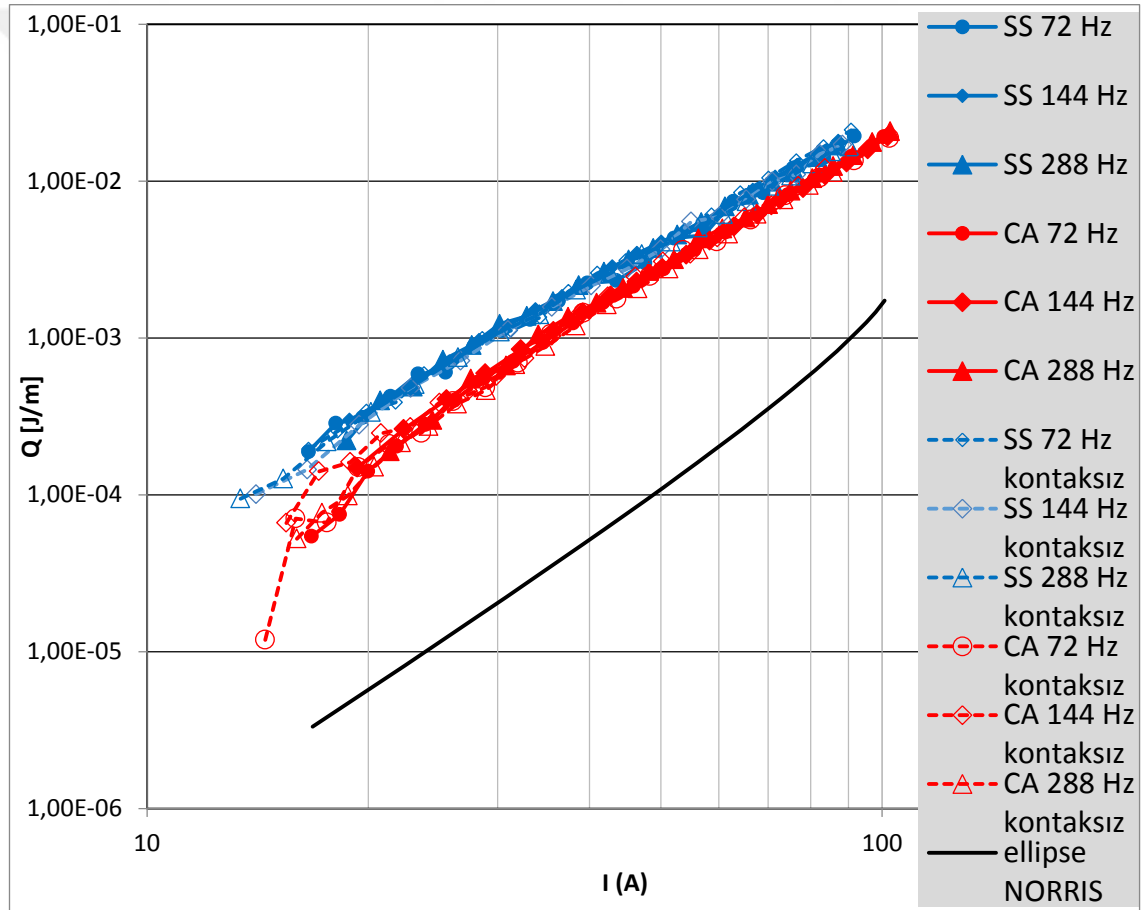
Şekil 4.50 CA bobin için transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği

Şekil 4.50'deki grafikte gösterilen kırmızı çizgiler bütün bobinden alınan ölçümleri (26 m uzunluğundaki telden alınan ölçümlerdir, (J/m)'ye normalize edilmiştir), yeşil kesik çizgiler kontaklız halkadan alınan ölçümleri, mavi kesik çizgiler ise kontaklı halkadan alınan ölçümleri göstermektedir. CA bobini için 3 ayrı yöntem ile ölçülen sonuçlar alınmıştır.



birbirleri ile güzel bir uyum içindedir. Ayrıca frekans bağımlılığı yoktur. Bobinlerde ölçülen kayıplar saf histeretik kayıplardır. Çiftlenim veya eddy akım kayıpları söz konusu değildir. Self-alanda başka bir alternatif manyetik alan yoksa eliptik bir yüzey için birim hacimde tek bir döngüdeki kayıp  $I^3$  ile orantılıdır (Norris 1970). Bu tez çalışmasında incelenen bobinlerdeki ve şeritlerdeki kayıpların  $I^3$  ile orantılı olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar Norris model ile de uyum içindedir.

Şekil 4.51’de 3 farklı frekanstaki SS ve CA bobinler için transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.51 SS ve CA bobinler için transport AA kaybın uygulanan akıma karşı grafiği

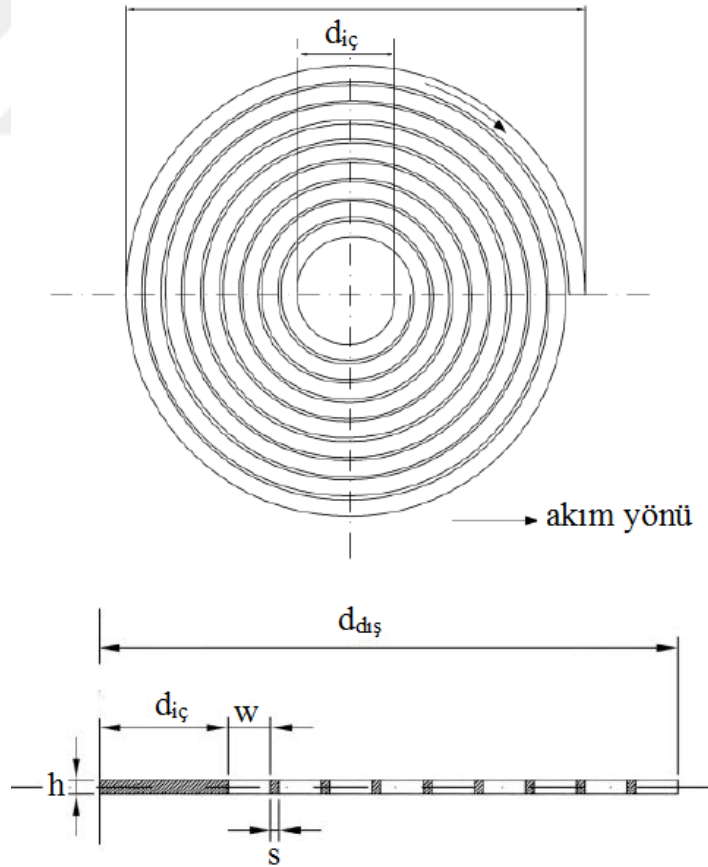
Şekil 4.51’deki grafikte gösterilen mavi çizgiler SS bobini için bütün bobinden alınan ölçümleri, mavi kesik çizgiler SS bobini için kontaksız halkadan alınan ölçümleri, kırmızı çizgiler CA bobini için bütün bobinden alınan ölçümleri, kırmızı kesik çizgiler

ise CA bobini kontaklız halkadan alınan ölçümleri göstermektedir. Bobin boyutları yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen SS bobindeki kayıp CA bobindeki kayıba göre daha fazladır. Bunun sebebi, SS bobinin sarım sayısının, CA bobinin sarım sayısına göre fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

## 4.7 Süperiletken Bobinlerin Analizi

### 4.7.1 İndüktans

Şekil 4.52’de dairesel sarımlı pancake bobinin şekli verilmiştir. Burada  $d_{iç}$  mm cinsinden bobinin iç çapını,  $d_{dış}$  ise mm cinsinden bobinin dış çapını,  $s$  mm cinsinden sarımlar arası boşluğu,  $w$  mm cinsinden iletkenin genişliğini ve  $h$  ise mm cinsinden iletkenin kalınlığını göstermektedir.



Şekil 4.52 Dairesel sarımlı pancake bobin şekli

Pancake tipli bobin sarımı gerçekleştirirken bobinin teorik olarak sarım sayısını hesaplamak için

$$d_{dış} = d_{iç} + 2 * w + (w + s) * (2N - 1) \quad (4.5)$$

denklemini kullanıldı.

Daha sonra bobinlerinin indüktansları teorik olarak hesaplandı.

Bobinin indüktans değerini teorik olarak hesaplamak için,

$$L = \frac{\mu_0 N^2 d_{ort} C_1}{2} \left( \left( \ln \frac{C_2}{\rho} \right) + C_3 \rho + C_4 \rho^2 \right) \quad (4.6)$$

denklemini kullanılabilir.

Burada  $\rho$  doluluk oranıdır ve

$$\rho = \frac{d_{dış} - d_{iç}}{d_{dış} + d_{iç}} \quad (4.7)$$

denklemini ile ifade edilir.

$d_{ort}$  ortalama çaptır ve

$$d_{ort} = \frac{d_{dış} + d_{iç}}{2} \quad (4.8)$$

şeklinde ifade edilir.

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ve  $C_4$  ise bobinin şekline bağlı olarak değişen sabitlerdir. Pancake bobinin sarım şekline göre bu sabitler değişir. Çizelge 4.12'de pancake bobinin sarım şekline göre  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ve  $C_4$  sabitlerinin değerleri verilmiştir (Zhao 2010).

Çizelge 4.12 Pancake bobinin sarım şekline göre değişken sabitlerinin değerleri

Pancake bobinin sarım şekli	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
Kare	1,27	2,07	0,18	0,13
Hegzagonal	1,09	2,23	0	0,17
Ortagonal	1,07	2,29	0	0,19
Dairesel	1	2,46	0	0,2

Denklem 4.6'dan yararlanarak, SS ve CA bobinlerinin indüktansları teorik olarak hesaplanmıştır. SS ve CA bobini için hesaplanan indüktans değerleri sırasıyla 1511,4 µH ve 1128,1 µH'dir.

SS ve CA bobinlerinin sarımı yapıldıktan sonra, indüktansmetre yardımıyla bobinlerini indüktansları deneysel olarak ölçülmüştür. SS ve CA bobini için ölçülen indüktans değerleri sırasıyla 1502,4 µH ve 1133,5 µH'dir. Her bir bobin için hata payı yaklaşık olarak % 0,5 olarak bulunmuştur.

#### 4.7.2 Depolanan enerji

SS ve CA süperiletken bobinlerin depoladığı enerji

$$E_d = \frac{1}{2}LI^2 \quad (4.9)$$

denklemini kullanarak bulunabilir. Burada L, bobinin indüktansı; I, bobininden geçen akımı göstermektedir (Pascal 2008). İndüktansları ve kritik akım değerleri belli olan SS ve CA bobinleri için denklem 4.9 kullanılarak depoladığı enerji sırasıyla 6,497 J ve 7,903 J olarak bulunmuştur.

#### 4.8 Farklı Geometriye Sahip Süperiletken Bölgenin AA Kayıpları

Bu tez çalışmasında aynı alana sahip elips, dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgelerin COMSOL paket programı yardımıyla transport AA kayıpları hesaplanmıştır. Farklı geometrinin AA kayıpla ilişkisi incelenmiştir.

Genel olarak süperiletkenlerin elektromanyetik davranışının modellenmesi için 3 temel model kullanılmaktadır. Bunlar; A-V formülasyonu (manyetik vektör potansiyeli  $\mathbf{A}$ 'ya dayalı) (Campbell 2009, Yıldız vd. 2017), T- $\Omega$  formülasyonu (akım vektör potansiyeli  $\mathbf{T}$  dayalı) (Amemiya vd. 1998) ve H formülasyonu (doğrudan 2 boyutlu manyetik alan çözümüne dayalı) (Hong vd. 2006) şeklinde ifade edilebilir.

Bu çalışmada aynı alanlı, farklı geometriye sahip süperiletken bölgeler için AA kayıp COMSOL MP yazılımında A-V formülasyonu kullanılması esasına dayanmaktadır. A-V formülasyonu temelinde, manyetik vektör potansiyeli varlığında Amper-Maxwell denklemi

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} = -\sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \quad (4.10)$$

ile ifade edilir.

Burada  $\mathbf{A}$  z-ekseni boyunca vektör potansiyelini,  $\mathbf{J}$  akım yoğunluğunu,  $V$  skaler potansiyeli,  $\mu$  manyetik alınganlığı ve  $\sigma$  süperiletkenin iletkenliğini göstermektedir. Manyetik akı yoğunluğu  $\mathbf{B}$  ile manyetik vektör potansiyeli  $\mathbf{A}$  arasındaki ilişki

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.11)$$

ile ifade edilir. Diğer taraftan elektrik alanın, manyetik vektör ve skaler potansiyel cinsinden ifadesi aşağıdaki gibi verilir:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (4.12)$$

Süperiletken bölgenin manyetik özelliğini tanımlamak için

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.13)$$

denklemleri kullanılır.

Süperiletken bölgeyi tanımlamak için çizgisel olmayan E-J arasındaki bağıntı

$$E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (4.14)$$

şeklindedir. Burada,  $E_c$  elektrik alan karakteristiğini ( $1 \mu\text{V/m}$ ),  $J_c$  süperiletkenin kritik akımını ve  $n$  güç değerini göstermektedir. Denklem 4.14'de elektrik alan yerine çizgisel ohm kanunu  $E=\rho J$  bağıntısı yazılırsa süperiletken bölgenin öz direnci

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{J}{J_c} \right)^{n-1} \quad (4.15)$$

olur ve  $\sigma=1/\rho$  ilişkisinden süperiletken bölgenin iletkenliği

$$\sigma = \frac{J_c}{E} \left( \frac{E}{E_c} \right)^{1/n} \quad (4.16)$$

şeklindedir. Sonuç olarak, , denklem 4.16'da verilen süperiletken bölgenin iletkenliği kullanılarak, COMSOL MP yazılımı yardımı ile Amper-Maxwell denklemi 4.10 çözdürülerek süperiletken bölgenin akım dağılımı elde edilmektedir.

COMSOL MP programı kullanılarak süperiletken bölgenin yapısı ve yapılan hesapları sonlu bir alanda yapabilmek için boşluk olarak tanımlanan bir yapı oluşturulmuştur. Aynı alana sahip elips, dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgelerin modellemeleri için kullanılan parametreler sırasıyla çizelge 4.13- 4.15'de verilmiştir.

Çizelge 4.13 Elips şeklindeki süperiletken bölgenin AA kayıp hesaplarında kullanılan parametreler

Parameters			
▼ Parameters			
Name	Expression	Value	Description
bel	0.0000965[m]	9.65E-5 m	Elipsin küçük yarıçapı
ael	0.0019595[m]	0.0019595 m	Elipsin büyük yarıçapı
I0	0.1*Ic	10 A	Uygulanan Akım
Ic	100[A]	100 A	Kritik akım
Ec	1e-4[V/m]	1E-4 V/m	iletkenlik parametresi
deltaY	1e-5[V/m]	1E-5 V/m	iletkenlik parametresi
n	25	25	Güç yasası n değeri
mu0	4*pi*1e-7	1.2566E-6	Manyetik geçirgenlik
R	50e-3[m]	0.05 m	Boşluğun çapı
An	5e-4	5E-4	Vektör potansiyeli
f	72[Hz]	72 Hz	Frekans
Jc	Ic/(ael*bel*pi)	1.6834E8 A/m <sup>2</sup>	Kritik akım yoğunluğu

Çizelge 4.14 Dikdörtgen şeklindeki süperiletken bölgenin AA kayıp hesaplarında kullanılan parametreler

Parameters			
▼ Parameters			
Name	Expression	Value	Description
ael	0.0019595[m]	0.0019595 m	dikdörtgen bölgenin uzun kenarı
bel	0.0000965*pi	3.0316E-4	dikdörtgen bölgenin kısa kenarı
R	10e-3[m]	0.01 m	Boşluğun çapı
Ic	100[A]	100 A	Kritik akım değeri
I0	0.1*Ic	10 A	Uygulanan akım
n	25	25	Güç yasası n değeri
An	5e-4	5E-4	Vektör potansiyel
f	72[Hz]	72 Hz	Frekans
mu0	4*pi*1e-7	1.2566E-6	Manyetik geçirgenlik
Jc	Ic/(ael*bel)	1.6834E8 A/m	Kritik akım yoğunluğu
Ec	1e-4[V/m]	1E-4 V/m	iletkenlik parametresi
deltaY	1e-5[V/m]	1E-5 V/m	iletkenlik parametresi

Çizelge 4.15 Daire şeklindeki süperiletken bölgenin AA kayıp hesaplarında kullanılan parametreler

Parameters			
▼ Parameters			
Name	Expression	Value	Description
ael	4.348468121e-4	4.3485E-4	Dairenin yarıçapı
R	10e-3[m]	0.01 m	Boşluğun çapı
Ic	100[A]	100 A	Kritik akım
I0	0.1*Ic	10 A	Uygulanan akım
n	25	25	Güç yasası n değeri
An	5e-4	5E-4	Vektör potansiyeli
f	72[Hz]	72 Hz	Frekans
mu0	4*pi*1e-7	1.2566E-6	Manyetik geçirgenlik
Jc	Ic/(ael*ael*pi)	1.6834E8 A	Kritik akım yoğunluğu
Ec	1e-4[V/m]	1E-4 V/m	İletkenlik parametresi
deltaY	1e-5[V/m]	1E-5 V/m	İletkenlik parametresi

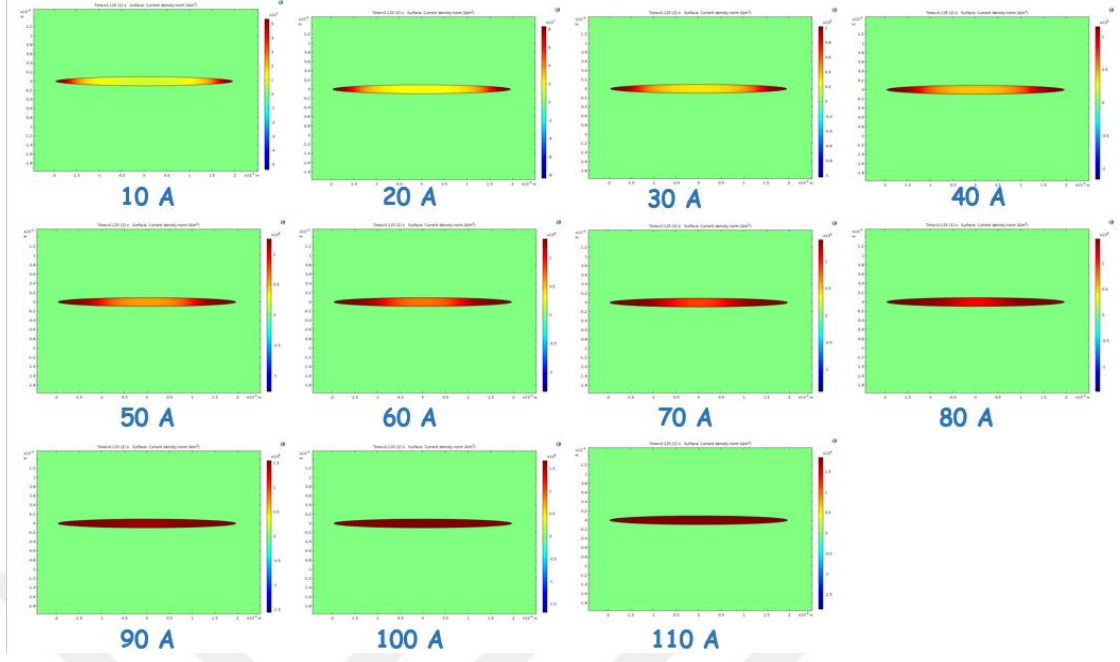
Süperiletken bölgelere akım

$$I(t) = I_0 \sin(2\pi ft) \quad (4.17)$$

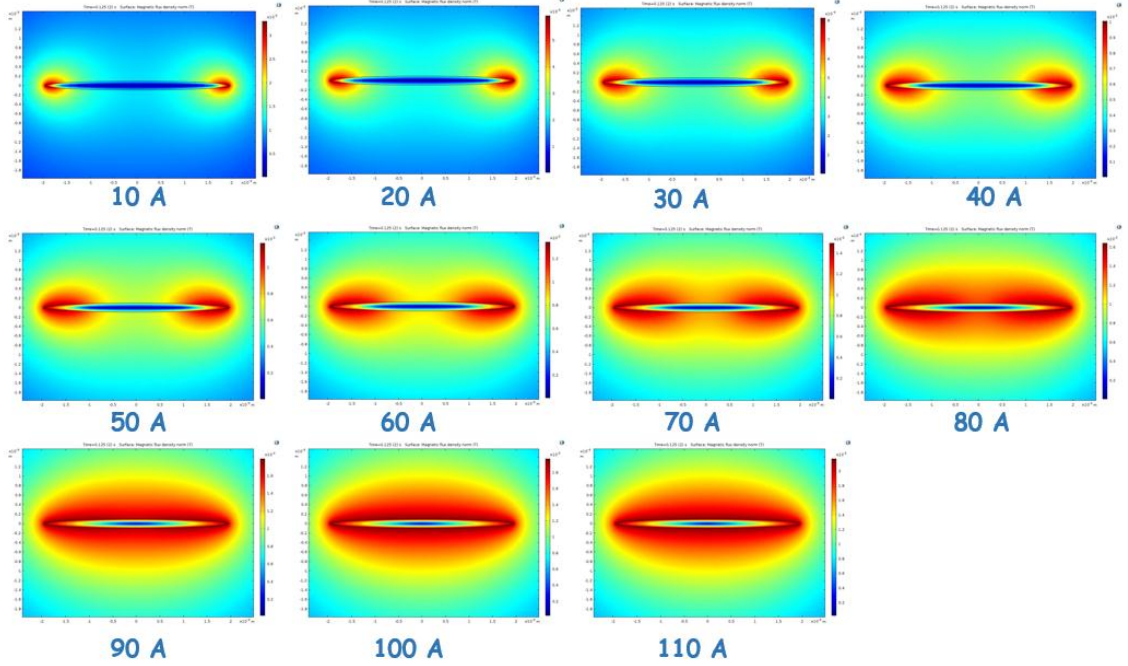
şeklinde sinüsoidal biçimde uygulanmıştır. Elips, dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgeler için 10A, 20A, 30A, 40A, 50A, 60A, 70A, 80 A, 90A ve 100 A olmak üzere 10 farklı akım değeri için hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca süperiletken bölgelere alternatif akımın uygulandığı durumlar ele alınmış, dış bir kaynaktan kaynaklanan manyetik alan uygulanmamıştır.

COMSOL MP yazılı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu elips şeklindeki süperiletken bölgenin belli bir zamandaki 10A, 20A, 30A, 40A, 50A, 60A, 70A, 80 A, 90A, 100 A ve 110A akım değerleri için akım yoğunluğunun ve manyetik alan dağılımının görünümü sırasıyla şekil 4.53 - 4.54'de verilmiştir.



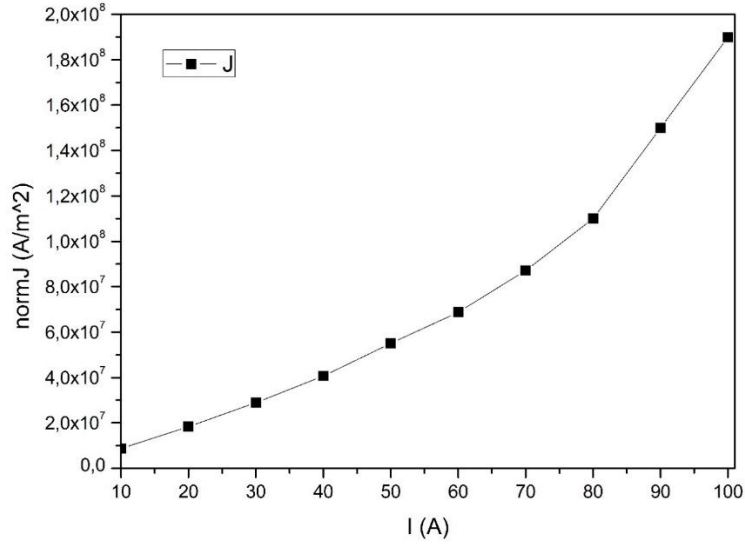


Şekil 4.53 Elips şeklindeki süperiletken bölgenin akım yoğunluğu dağılımının gösterimi



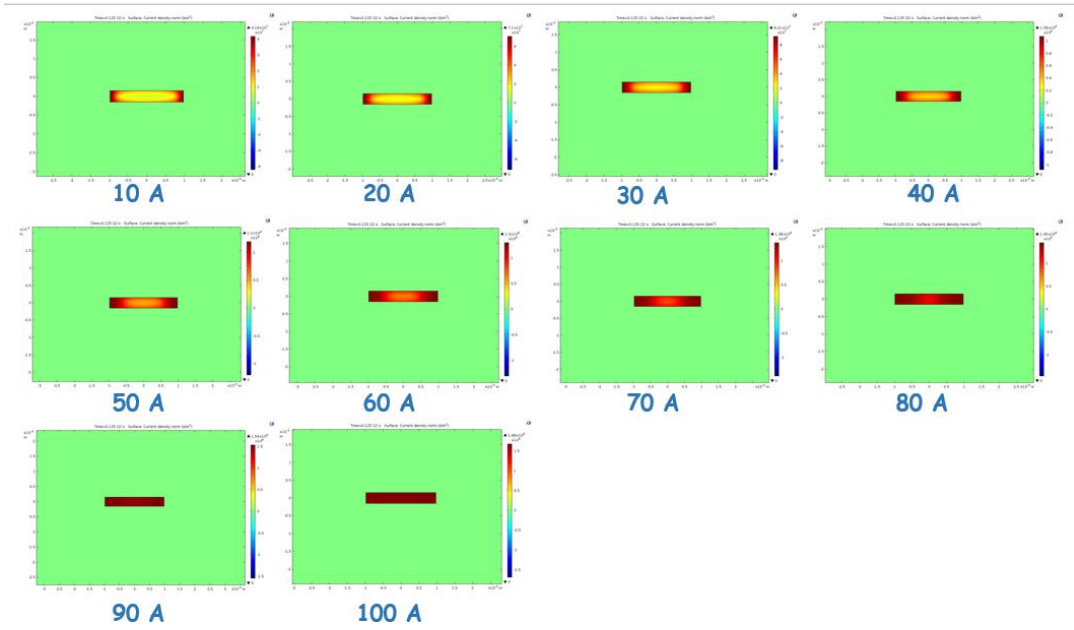
Şekil 4.54 Elips şeklindeki süperiletken bölgenin manyetik alan dağılımının gösterimi

Şekil 4.53’de gösterilen elips şeklindeki süperiletken bölgeye uygulanan akım arttıkça akım yoğunluğu artmıştır. Şekil 4.55’de uygulanan akım değerlerine karşı gelen akım yoğunluğu gösterilmiştir.

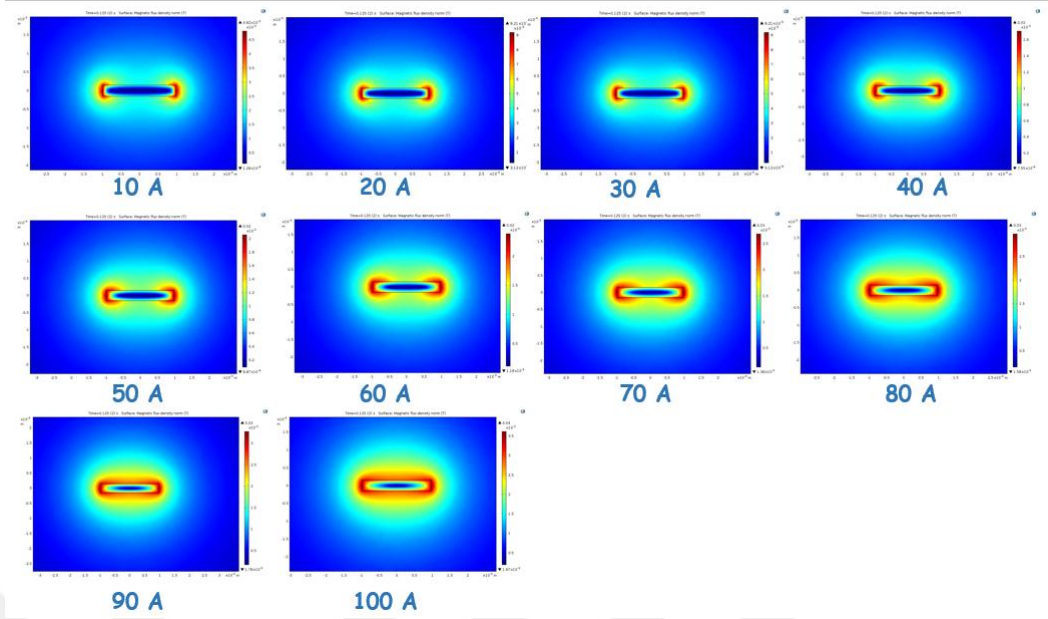


Şekil 4.55 Elips şeklindeki süperiletken bölge için uygulanan akım değerlerine karşı gelen akım yoğunluğu grafiği

COMSOL MP yazılı kullanılarak elips şeklindeki süperiletken bölge için yapılan hesaplamalar dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgeler için de yapılmıştır. Dikdörtgen şeklindeki süperiletken bölgeler için 10A, 20A, 30A, 40A, 50A, 60A, 70A, 80 A, 90A ve 100A akım değerleri için akım yoğunluğunun ve manyetik alan dağılımının görünümü sırasıyla şekil 4.56 - 4.57’de verilmiştir.

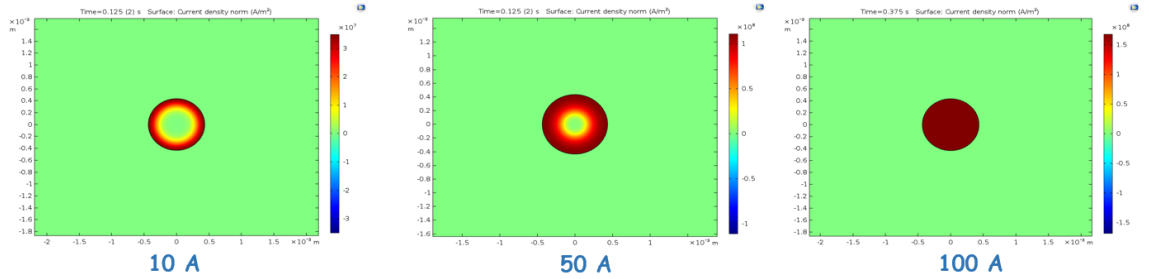


Şekil 4.56 Dikdörtgen şeklindeki süperiletken bölgenin akım yoğunluğu dağılımının gösterimi

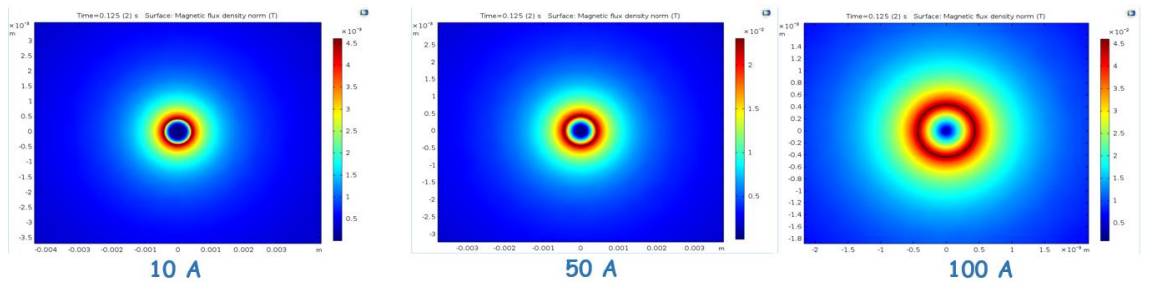


Şekil 4.57 Dikdörtgen şeklindeki süperiletken bölgenin manyetik alan dağılımının gösterimi

Daire şeklindeki süperiletken bölgeler için 10A, 50A ve 100A akım değerleri için akım yoğunluğunun ve manyetik alan dağılımının görünümü sırasıyla şekil 4.58 - 4.59'da verilmiştir.



Şekil 4.58 Daire şeklindeki süperiletken bölgenin akım yoğunluğu dağılımının gösterimi

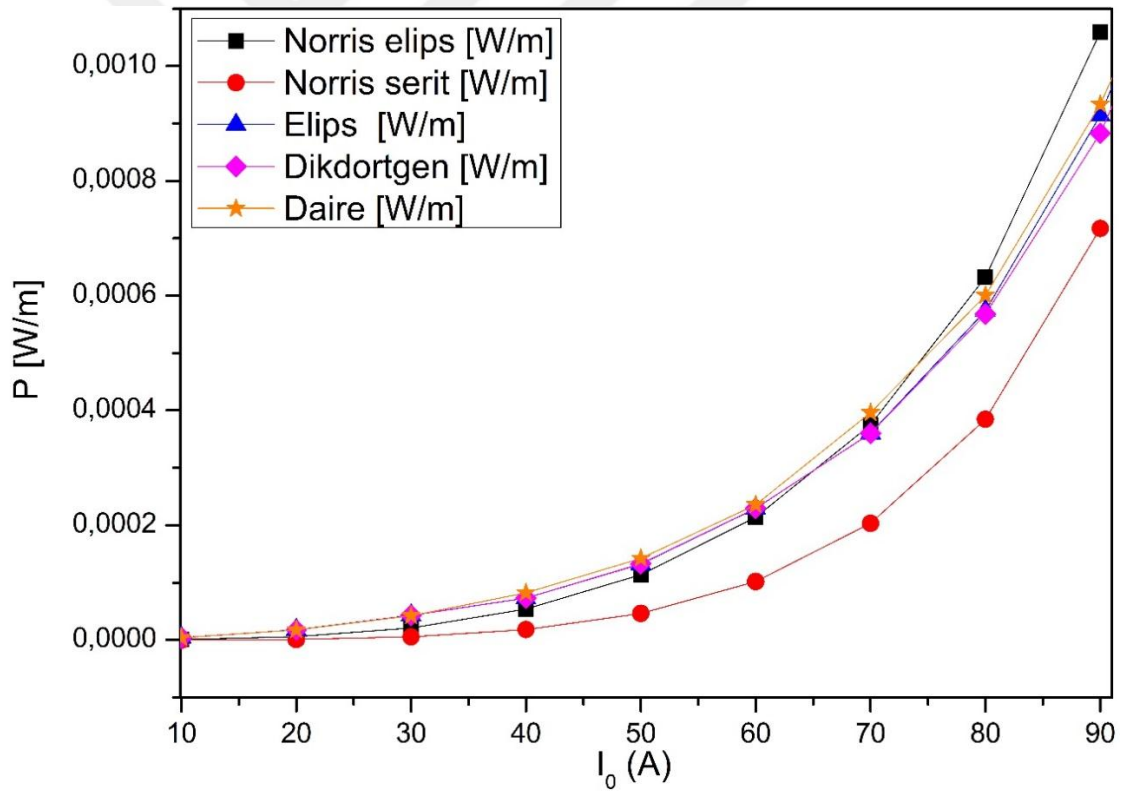


Şekil 4.59 Daire şeklindeki süperiletken bölgenin manyetik alan dağılımının gösterimi

Süperiletken bölgenin bir döngüsündeki AA kaybı (W/m cinsinden) aşağıdaki integral vasıtasıyla hesaplanabilir (Grilli vd. 2014):

$$P = \int_0^{1/f} dt \iint \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (4.18)$$

Comsol MP yazılımı kullanılarak süperiletken bölge için E.J yüzey integralinin değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler için Mathematica programında yazılan kod yardımı ile interpolasyonu yapılmıştır ve Denklem 4.18 çözdürülüp aynı alana sahip elips, dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgelerin transport AA kayıpları hesaplanmıştır. Şekil 4.60'da aynı alana sahip elips, dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgelerin transport AA kayıpları verilmiştir. Ayrıca bu kayıplar Norris elips ve Norris şerit modellerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.60 Aynı alana sahip elips, dikdörtgen ve daire şeklindeki süperiletken bölgelerin transport AA kayıp grafiği

Şekil 4.60'dan görüldüğü üzere aynı alana sahip süperiletken bölgeler geometriden bağımsız olarak aynı AA kayba sahiptirler.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında,  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ve  $\text{Bi}_{1,65}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisine sahip olacak şekilde katıhal reaksiyonu ve sıvı amonyum nitrat yöntemleri ile Pb katkılı B(Pb)SCCO tozu üretilmiştir. Üretilen bu B(Pb)SCCO tozlarından ilk olarak SS(1,85), SS(1,65), AN(1,85) ve AN(1,65) olmak üzere 4 grup külçe numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan külçe numunelerin 845 °C'de farklı ısıtma işlem süresine tabi tutulmuştur ve ısıtma işlem süresinin süperiletken özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Dört grup numune için alınganlığın faz-içi bileşeni  $\chi'$ , ve faz-dışı bileşeni,  $\chi''$ , iki adımda süperiletken faza geçiş yapmıştır. Bütün serilerde süperiletkenliğe ilk geçiş sıcaklığı (tane içi süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı) yaklaşık olarak 106-107 K olarak belirlenmiştir. Ancak SS(1,85), SS(1,65), AN(1,85) ve AN(1,65) grupları için taneler arası süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı sırasıyla yaklaşık 76 K, 70 K, 60 K ve 58 K olarak belirlenmiştir. Katıhal reaksiyon ve amonyum nitrat yöntemi ile üretilen numunelerin AA alınganlık davranışları incelendiğinde katıhal reaksiyonu yöntemi ile üretilen numunelerin daha iyi süperiletken özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak ise amonyum nitrat yöntemi ile üretilen numunelerde kalsinasyon işlemi sırasında istenmeyen gazların tam olarak yapıdan uzaklaştırılmadığı düşünülmektedir. İki stokiyometri karşılaştırıldığında ise  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometrisi ile üretilen numune serilerinin daha iyi süperiletken özellikte olduğu görülmüştür.

Külçe numunelerde analizler tamamlandıktan sonra B(Pb)SCCO tozlarından tel numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Tel numuneler gümüş (Ag), niobyum (Nb) ve gümüş-bakır (Ag-Cu) alaşımlı kılıf malzemeleri kullanılarak iki farklı yöntem ve iki farklı stokiyometri için hazırlanmıştır. Ayrıca  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  stokiyometriye sahip tozdan, Ag kılıf kullanılarak çok damarlı teller üretilmiştir. Tel numunelerde, kılıf malzemesi, fırın ısıtma hızının, ısıtma işlem sıcaklığının, ısıtma işlem süresinin ve fırın soğutma hızının süperiletkenlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Nb kılıflı teller hava ve asalgaz ortamında ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Ancak BSCCO yapısının oksitli olması sebebiyle Nb kılıf bozulmuştur ve Nb ile hedeflenen çalışmalar

yapılamamıştır. Ag ve Ag-Cu kılıflı tel numuneler 845 °C’de, 72 saat ve 120 saat olmak üzere 2 farklı sürede ısıtılma tabii tutulmuştur. Alınan ölçümler sonucunda optimum parametreler, 120 saat ısıtılma süresi, 1 °C/dak fırın ısıtılma ve soğutılma hızı ve % 1Cu - % 99Ag kılıf olarak belirlenmiştir. Ancak % 1Cu - % 99Ag kılıf kullanılarak hazırlanan SS(1,65)Cu1T1-120s telinin kritik akım değeri yaklaşık 1 A’dır.

Bu sebeple farklı çaplarda ve farklı et kalınlığına sahip dış kılıf malzemeleri kullanılarak çok damarlı tel numuneler hazırlanmıştır. Çok damarlı tellerde ulaşılan en yüksek kritik akım değeri yaklaşık 5 A civarındadır.

Bu tez çalışmasında, üretilen teller ve ticari olarak satılan yüksek sıcaklık süperiletken Bi-2223 şeritler kullanılarak iki tip bobin sarımı yapılmıştır. 1m uzunluğundaki başlangıç Ag tüpünden başlanarak 1.2 mm çapında 19,8 m uzunluğunda üretilen süperiletken telden selenoid şeklinde bobin sarımı gerçekleştirilmiştir. Üretilen süperiletken selenoid bobin için kritik akım değeri 1 A ölçülmüştür. Hedeflenen kalitede süperiletken toz üretilmemesi sebebiyle kritik akım değerlerinin düşük olduğu düşünülmektedir. Dış kılıfta biri SS, diğeri ise CA güçlendirme malzemesi kullanılan yaklaşık kritik akım değerleri 180 A olan iki çeşit Bi-2223 şeritler satın alınmıştır. Satın alınan bu şeritlerden pancake tipi bobinler yapılmıştır. Üretilen SS ve CA bobininin kritik akım değerleri sırasıyla 93 A ve 103 A ölçülmüştür.

Satın alınan Bi-2223 şeritlerin ve bu şeritlerden yapılan bobinlerin sıvı azot sıcaklığında kilitlemeli yükselteç cihazı kullanılarak öz alan altında transport aa kayıpları ölçülmüştür. SS ve CA Bi-2223 şeritlerine ait transport AA kayıp ölçümleri 3 farklı frekansta alınmıştır. Her iki şeridinde ölçümde herhangi bir frekans bağımlılığı gözlenmemiştir. Bu şeritlerde oluşan kayıpların tamamen histeretik olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca alınan veriler Norris model (Norris 1970) ile de karşılaştırılmıştır. Çekilen SEM fotoğraflarına bakıldığında süperiletken çekirdek kısmın elips şeklinde olduğu görülmektedir. Burada gözlenen kaybın Norris elips modeline daha yakın çıkması SEM sonuçları ile de uyum içinde olduğunu göstermektedir.

SS ve CA pancake bobinlerde de transport AA kayıp ölçümleri 3 farklı şekilde ve 3 farklı frekansta alınmıştır. CA bobinde 3 ayrı yöntem ile ölçülen sonuçlar birbirleri ile uyum içindedir. Frekans bağımlılığı yoktur. Fakat SS bobinde kontaklı halka ölçümleri diğer iki ölçümden % 10 büyük çıkmıştır. Burada ölçüm sırasında kontaklı halkanın şeklinin bozulduğu düşünülmektedir. SS ve CA pancake bobinlerde de frekans bağımlılığı gözlenmemiştir. Bu yüzden ölçülen kayıplar saf histeretik kayıplardır. Çiftlenim veya eddy akım kayıpları söz konusu değildir. Self-alanda başka bir alternatif manyetik alan yoksa eliptik bir yüzey için birim hacimde tek bir döngüdeki kayıp  $I^3$  ile orantılıdır (Norris 1970), bu çalışmada ölçülen kayıplar Norris model ile uyum içindedir.

SS ve CA bobinlerinin indüktansları teorik olarak hesaplanmış ve bu bobinlerin sarımı gerçekleştirildikten sonra indüktans metre ile deneysel olarak ölçülmüştür. Ayrıca SS ve CA bobinlerinin depoladığı enerji hesaplanmıştır. SS ve CA bobinlerinin depoladığı enerji sırasıyla 6,497 J ve 7,903 J olarak bulunmuştur.

Son olarak; bu tez çalışmasında elips, dikdörtgen ve daire şeklinde geometriye ve aynı alana sahip süperiletken bölgelerin COMSOL paket programı yardımıyla transport AA kayıpları teorik olarak hesaplanmıştır. Aynı alana sahip olduklarından AA kayıpların geometriden bağımsız olduğu bulunmuştur.

## KAYNAKLAR

- Abrikosov, A.A. 1957. On Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group. Soviet Physics JETP. 9, 1174.
- Ainslie, M. 2012. Transport AC loss in high temperature superconducting coils. Ph.D dissertation, University of Cambridge, 30 s., England.
- Amemiya, N., Miyamoto, K., Murasawa, S., Mukai, H. and Ohmatsu, K. 1998. Finite Element Analysis of AC Loss in Non-Twisted Bi-2223 Tape Carrying AC Transport Current and/or Exposed to DC or AC External Magnetic Field. Physica C, 310; 30–35.
- Anonymous 2018. Web Sitesi: [http://www.cpp.edu/~kvandervoort/Adv% 20Lab% 208% 20% 20instructions.pdf](http://www.cpp.edu/~kvandervoort/Adv%20Lab%20%20instructions.pdf) Erişim Tarihi: 7.08.2018.
- Balachandran, U., Poeppel, R.B., Emerson, J.E., Johnson, S.A., Lanagan, M.T., Youngdahl, C.A., Shi, D., Goretta, K.C. and Eror, N.G. 1989. Synthesis of Phase-Pure Orthorhombic  $\text{YB}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  under Low Oxygen Pressure. Materials Letters, 8, 454-456.
- Bednorz, J.G. and Müller, K.A 1986. Possible High-Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. Physical B, 64, 189.
- Bruno, G., Burrafato, G., Petta, C., Troja, S.O. and Turrisi, E. 1991. Influence of Pb Doping on Properties of BSCCO Superconductor. Nuovo Cimento Della Societa Italiana di Fisica D Condensed Matter Atomic Molecular and Chemical Physics Fluids Plasmas Biophysics, 13; 1315-1319.
- Campbell, A.M. 2009. A Direct Method for Obtaining The Critical State in Two and Three Dimensions. Superconductor Science and Technology, 22; 034005, 8.
- Carr, W.J. 2001. AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors, 2nd ed. CRC Press.
- Clem, J.R. 1988. AC Losses in Type II Superconductors. Physica C, 153–155; 50.
- Dorris, S.E., Prokok, B.C., Lanagan, M.T., Browning, N.B., Hagen, M.R., Parrell, J.A., Feng, Y., Umezawa, A. and Larbalestier, D.C. 1994. Methods of Introducing Lead into Bismuth-2223 and Their Effects on Phase Development and Superconducting Properties, Physica C, 223; 163-172.
- Eckroad S. 2009. Superconducting Fault Current Limiters. Electric Power Research Institute, 1017793.
- Farhoudi, M.M. 2005. AC loss in Ag/Bi-2223 tapes in AC field. Master's thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia.



- Golubov, A.A. 1998. Handbook of Applied Superconductivity. IOP Publishing, 1; 37-52.
- Grilli, F., Zermeno, V.M., Pardo, E., Vojenciak, M., Brand, J., Kario, A. and Goldacker, W. 2014. Self-Field Effects and AC Losses in Pancake Coils Assembled From Coated Conductor Roebel Cables, 24(3).
- Hellstrom, E.E. 1995. Processing Bi-based High-Tc Superconducting Tapes, Wires, and Thick Films for Conductor Applications. High-Temperature Superconducting Materials: Science and Engineering, 383.
- Hong Z., Campbell A.M. and Coombs T.A. 2006. Numerical Solution of Critical State in Superconductivity by Finite Element Software. Superconductor Science and Technology 19; 1246–1252.
- Hong, Z., Campbell, A.M. and Coombs, T.A. 2007. Computer Modeling of Magnetisation in High Temperature Bulk Superconductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 17(2); 3761–3764.
- Kim, J. H., Kim, W. S., Hahn, S.Y., Lee, J.M., Rue, M.H., Cho, B.H., Hwan, H.C.I. and Jung, K. 2005. Characteristic Test of HTS Pancake Coil Modules for Small-sized SMES. IEEE Transactions on Applied Superconductivity; 15(2); 1919–1922.
- Kleiner, R. Koelle, D., Ludwig, F. and Clarke, J. 2004. Superconducting Quantum Interference Devices: State of the Art and Applications. Proceeding of the IEEE, 92, 10.
- Larbalestier, D.C., Anderson, W.A., Babcock, S.E., Cai, X.Y., Dorris, S.E., Feldmann, M., Jiang, J., Li Q., Parrell, J.A., Parrella, R., Polak, M., Polyanskii, A., Riley, Jr.G.N., Rupich, M. and Y. Wu 1998. New Experiments Elucidating the Currentlimiting Mechanisms of Ag-sheathed (Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> Tapes. presented at ISS '98, Fukuoka. Japan.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M. and Asano, T. 1988. A New High T<sub>c</sub> Oxide Superconductor Without a Rare-Earth Element. Japanese Journal of Appl. Phys. 27; L209.
- Malozemoff, A.P., Carter, W., Fleshler, S., Fritze-meier, L., Li, Q., Masur, L.J., Miles, P., Parker, D., Parrella, R., Podtburg, E., Riley, Jr.G.N., Rupich, M., Scudiere, J. and Zhang, W. 1999. HTS Wire at Commercial Performance Levels. presented at ASC '98, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 9(2); 2469
- Mazaki, H., Takano, M., Takada, J., Oda, K., Kitaguchi, H., Miura, Y., Ikeda, Y., Tomii, Y. and Kubozoe, T. 1988. Complex susceptibility of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O Superconductors. Japanese Journal of Appl. Physc., 27; L1639.
- Meissner, W. and Ochsenfeld, R. 1933. Superconductivity. Naturwiss 21.

- Michel, C., Hervieu, M., Borel, M.M., Grandin, A., Deslandes, F., Ppovost, J. and Raveau, B. 1987. Superconductivity in the Bi-Sr-Cu-O System, *Z. Physica B: Condensed Matter* 68; 421.
- Norris, W.T. 1970. Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying as: Isolated Conductors and Edges of Thin Sheets. *Journal of Physics D*, 3, 489-507.
- Onnes, H.K. 1911. *Leiden Comm.* 122b, 124
- Oomen, M.P. 2000. AC Loss in Superconducting Tapes and Cables. PhD thesis. University of Twente, 12 s. Netherlands.
- Pascal, T. 2008. Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective. IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, No. 3.
- Rabbers, J.J. 2001. AC Loss in Superconducting Tapes and Coils. Ph.D. dissertation, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Ries, G., Leghissa, M., Rieger, J., Wiezoreck, J. and Oomen, M. 1998. High-Tc Superconductors and AC loss in Electrotechnical Devices, *Physica C*, 310; 283.
- Rose-Innes, A.C. and Rhoderick, E.H. 1994. *Introduction to Superconductivity*. Pergamon Pres plc.
- Safran, S. 2010. MgB<sub>2</sub> Süperiletken Tellerde Alternatif Akım Kaybı ve Akı Perçinlenme Mekanizmaları. Doktora tezi (basılmamış). Ankara Üniversitesi, 18 s., Ankara.
- Schmidt, V.V. 1997. *The Physics of Superconductors*. Nauka Publishers, 5 s Moscow.
- Seeber, B. 1998. *Handbook of Applied Superconductivity*. Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.
- Sheahan, T.P. 2002. *Introduction to High Temperature Superconductivity*. Kluwer Academic Publishers, New York, United States of America.
- Tarascon, J.M., Lepage, Y., Greene, L.H., Bagley, B.G., Barboux, P., Hwang, D.M., Hull, G.W., McKinnon, W.R. and Giroud, M. 1988. Origin of the 110 K Superconducting Transition in the Bi-Sr-Ca-Cu-O System. *Physical Review B*, 38; 2504.
- Wagner, P., Frey, U., Hillmer, F. and Adrian, H. 1995. Evidence for a Vortex-Liquid – Vortex-Glass Transition in Epitaxial Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+d</sub> Thin Films. *Physical Review B* 51; 1206.
- Weijia, Y., Campbell, A. M. and Coombs, T. A. 2009. A Model for Calculating the AC Losses of Second-generation High Temperature Superconductor Pancake Coils. *Superconductor Science and Technology*, 22 (7); 12.

- Yamasaki, H., Endo, K., Kosaka, S., Umeda, M., Yoshida, S. and Kajimura K. 1993. Scaling of the Flux-Pinning Force in Epitaxial  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  Thin Films. *Physical Review Letters* 70; 3331.
- Yıldız, Ş., İnanır, F., Çiçek, A. and Gomory, F. 2017. Numerical Study of AC Loss of Two-Layer HTS Power Transmission Cables Composed of Coated Conductors with a Ferromagnetic Substrate. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25; 3528 – 3539.
- Zhao, J. 2010. A New Calculation for Designing Multilayer Planar Spiral Inductors. In *Electronics Design, Strategy, News*, 37-40.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ebru ŞİMŞEK KILIÇARSLAN

Doğum Yeri : Diyarbakır

Doğum Tarihi : 23.04.1987

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ziya Gökalp Lisesi (2004)

Lisans : Dicle Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü (2009)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı (Eylül 2010 – Haziran 2012)

Doktora : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı (Eylül 2012-

### Uluslararası Hakemli Dergi

S. Safran, , A. Kılıç, **E. Kılıçarslan**, A. Kılıç, E. Asikuzun, O. Ozturk, A. Gencer. Influence of different boron precursors on superconducting and mechanical properties of MgB<sub>2</sub>. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Volume 25, June 2014, Pages 2737-2747.

S. Safran, **E. Kılıçarslan**, A. Kılıç, A. Gencer. The role of various boron precursor on superconducting properties of MgB<sub>2</sub>/Fe..(Cryogenics, Volume 63, October 2014, Pages 133–137.

S. Safran, A. Kılıç, **E. Kılıçarslan**, H. Öztürk, M. Alp, E. Asikuzun, O. Ozturk. Mechanical, microstructural and magnetic properties of the bulk BSCCO superconductor prepared by two different methods..Journal of Materials Science: Materials in Electronics April 2015, Volume 26, Issue 4, pp 2622-2628.

S. Safran, **E. Kılıçarslan**, H. Öztürk, M. Alp, A. Kılıç, M. Akdoğan, E. Asikuzun, O. Ozturk Superconducting and mechanical properties of the bulk Bi(Pb)SCCO system prepared via solid state and ammonium nitrate precipitation methods. Physica B: Condensed Matter Volume 472, 1 September 2015, Pages 34–40.

S. Gecer, E. Ertekin, E. Yanmaz, J. Kosa, S. Safran, R. Özgüzel, **E. S. Kılıçarslan**, A. Kılıç, and A. Gencer Switching and Decoupling Effects in a Single-Phase Transformer

Using Extra DC Current. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 26, No. 3, April 2016.

E. Ertekin, S. Gecer, E. Yanmaz, S. Safran, J. Kosa, **E. S. Kılıçarslan**, A. Kilic, N. Amemiya, A. Gencer. Test of 6-kVA Three-Phase Flux Transfer-Type Current-Limiting Transformer. J Supercond Nov Magn, DOI 10.1007/s10948-016-3623-y, 6 July 2016.

### **Uluslararası Kongre Sunum**

**E. Kılıçarslan**, S. Safran, A. Gencer, E. Yanmaz. Effect of Turkish Raki on Superconducting Properties of Bulk MgB<sub>2</sub> Fabricated by an Novel Method Using Nano Boron. 6th International Conference on Superconductivity and Magnetism 2018 (Poster)

S. Safran, **E. Kılıçarslan**, H. Ozturk, M. Alp, A. Genç, A. Kılıç. Superconducting properties of Ag and Ag Cu Alloy Sheathed Bi 2223 Wires. 5th International Conference on Superconductivity and Magnetism 2016 (Poster)

S. Safran, **E. Kılıçarslan**, H. Ozturk, M. Alp, A. Gencer, A. Kilic Superconducting properties of Ag and Ag-Cu alloy sheathed/Bi-2223 wires, 5th International Conference of Superconductivity and Magnetism (ICSM), 2016 (Poster)

S Safran, A Kılıç, E Asikuzun, **E Kılıçarslan**, O Ozturk, A Gencer. Influence of Different Boron Precursors on Superconducting and Mechanical Properties of MgB<sub>2</sub>. 4th International Conference on Superconductivity and Magnetism 2014 (Poster)

S Safran, **E Kılıçarslan**, A Kılıç, A Gencer. Effect of Boron powder purity on the superconducting and microstructural properties of MgB<sub>2</sub> Fe superconductor. 7th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics 2013 (Poster)