

T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

BSCCO YÜKSEK SICAKLIK SÜPERİLETKENİNE ERBİYUM (Er)  
KATKILAMASININ KRİTİK AKIM YOĞUNLUĞU ÜZERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS

Selami AÇIKEL

ARALIK-2023  
GÜMÜŞHANE



T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

BSCCO YÜKSEK SICAKLIK SÜPERİLETKENİNE ERBİYUM (Er)  
KATKILAMASININ KRİTİK AKIM YOĞUNLUĞU ÜZERİNE ETKİSİ

EFFECT OF ERBIUM (Er) DOPING IN BSCCO HIGH TEMPERATURE  
SUPERCONDUCTOR ON CRITICAL CURRENT DENSITY

YÜKSEK LİSANS

Selami AÇIKEL

ARALIK-2023

GÜMÜŞHANE



T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

BSCCO YÜKSEK SICAKLIK SÜPERİLETKENİNE ERBİYUM (Er)  
KATKILAMASININ KRİTİK AKIM YOĞUNLUĞU ÜZERİNE ETKİSİ

EFFECT OF ERBIUM (Er) DOPING IN BSCCO HIGH TEMPERATURE  
SUPERCONDUCTOR ON CRITICAL CURRENT DENSITY

YÜKSEK LİSANS

Selami AÇIKEL

Danışman: Doç. Dr. İbrahim DÜZGÜN

ARALIK-2023

GÜMÜŞHANE

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

**Yüksek Lisans Tezi** olarak hazırlamış olduğum “**BSCCO Yüksek Sıcaklık Süperiletkenine Erbiyum (Er) Katkılamaının Kritik Akım Yoğunluğu Üzerine Etkisi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kısıtlara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

21/12/2023

.....  
Selami AÇIKEL

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca yardımlarını benden esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerini benimle her zaman paylaşan, kıymetli danışman hocam Doç. Dr. İbrahim DÜZGÜN'e çok teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte laboratuvar çalışmasında bana destek olan Doç. Dr. Mehmet BAŐOĐLU'na teőekkürlerimi sunarım.

Tüm çalıőmalarım aőamasında yanımda olan, sıkıntılarımı ve mutluluğumu paylaőtđm, can yoldaőtım, sevgili eőtım, Rukiye AÇIKEL'e teőekkürü bir borç bilir ve biricik oğlum Mustafa Kayra AÇIKEL'e sevgilerimi yolluyorum.

**Selami AÇIKEL**  
**GÜMÜŞHANE – 2023**

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, BSCCO süperiletken sisteminde Kalsiyum (Ca) alkali metalinin yerine belirli stokiometrik oranlarda Erbiyum (Er) nadir toprak elementi katkılması yapılarak kritik akım yoğunluğu üzerindeki değişimi incelendi.

Burada vurgulamak gerekirse, Er katkısı BSCCO yüksek sıcaklık süperiletken sistem için, Er ve Ca atomlarının efektif iyonik yarıçap değerlerinin birbirine çok yakın olması, stokiometrik açıdan bu çalışmayı mümkün kıldığı söylenebilir.

Ancak yapısal olarak Er elementinin iyi bir seçim olmadığı ve katkı oranı arttıkça süperiletken fazdan yarıiletken faza kaydığı görüldü. Saf BSCCO sisteminin aynı sıcaklık değerinde katkılı süperiletken numuneden %14 daha iyi kritik akım yoğunluğu değerine sahip olduğu hesaplandı.

**Anahtar Kelimeler:** BSCCO süperiletken, Erbiyum (Er) katkısı, Kritik akım yoğunluğu

## SUMMARY

In this thesis, the doping of Erbium (Er) rare earth element at certain stoichiometric ratios instead of Calcium (Ca) alkali metal in the BSCCO superconducting system will be investigated.

It should be emphasized here that for the Er doped BSCCO high temperature superconducting system, the effective ionic radius values of Er and Ca atoms are very close to each other, which makes this study possible from a stoichiometric point of view.

However, structurally, it was observed that Er was not a good choice and shifted from the superconducting phase to the semiconducting phase as the doping ratio increased. The pure BSCCO system was shown to have 14% better critical current density value than the doped superconducting sample at the same temperature.

**Keywords:** BSCCO superconductor, Erbium (Er) doping, Critical current density

## İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	III
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY .....	VII
İÇİNDEKİLER .....	VIII
TABLOLAR DİZİNİ .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Süperiletkenlikle İlgili Tarihsel Gelişmeler.....	3
1.2. Süperiletkenlerin Bazı Temel Özellikleri.....	8
1.2.1. Sıfır Direnç.....	8
1.2.2. Kritik Sıcaklık ( $T_c$ ).....	8
1.2.3. Kritik Akım Yoğunluğu ( $J_c$ ).....	9
1.2.4. Kritik Manyetik Alan ( $H_c$ ) .....	9
1.2.5. Meissner-Ochsenfeld Etkisi .....	9
1.3. Süperiletkenlerin Manyetik Özellikleri.....	10
1.3.1. I. Tip Süperiletkenler .....	11
1.3.2. II. Tip Süperiletkenler .....	11
1.3.3. Süperiletkenlerde Histeresiz.....	13
2. BiSrCaCuO SÜPERİLETKEN SİSTEMİ (BSCCO).....	17
2.1. BiSrCaCuO Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni (BSCCO).....	17
2.1.1. Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CuO <sub>6</sub> (2201 Fazının) oluşumu .....	17
2.1.2. Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (2212 Fazının) oluşumu.....	18
2.1.3. Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (2223 Fazının) oluşumu .....	19
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	21
3.1. Erbiyum Katkılı BSCCO Numunelerinin Katıhal Tepkime Yöntemiyle Üretimi ....	21
3.1.1. S1 Numunesinin (Bi <sub>1.85</sub> Pb <sub>0.35</sub> Sr <sub>1.9</sub> Ca <sub>2.1</sub> Cu <sub>3.1</sub> O <sub>10+δ</sub> ) Üretilmesi .....	21
3.1.2. S2 Numunesinin (Bi <sub>1.85</sub> Pb <sub>0.35</sub> Sr <sub>1.9</sub> Ca <sub>1.55</sub> Er <sub>0.55</sub> Cu <sub>3.1</sub> O <sub>10+δ</sub> ) Üretilmesi .....	22
3.1.3. S3 Numunesinin (Bi <sub>1.85</sub> Pb <sub>0.35</sub> Sr <sub>1.9</sub> CaErCu <sub>3.1</sub> O <sub>10+δ</sub> ) Üretilmesi.....	23
3.1.4. S4 Numunesinin (Bi <sub>1.85</sub> Pb <sub>0.35</sub> Sr <sub>1.9</sub> Ca <sub>0.7</sub> Er <sub>1.4</sub> Cu <sub>3.1</sub> O <sub>10+δ</sub> ) Üretilmesi .....	24

3.1.5. S5 Numunesinin ( $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Er}_{2.1}\text{Cu}_{3.1}\text{O}_{10+\delta}$ ) Üretilmesi.....	25
3.2. Üretilen Numuların Isıl İşlem Süreci .....	26
3.3. Üretilen Numuların XRD Ölçümleri.....	27
3.3. Üretilen Numuların SEM Ölçümleri.....	28
3.4. Üretilen Numuların M-H Ölçümleri.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	30
4.1. BSCCO Numunelerine ait XRD Kırınım Desenler .....	31
4.2. BSCCO Numunelerine Ait SEM ve EDS Grafikleri .....	35
4.3. BSCCO Numunelerine Ait R-T Ölçümleri.....	43
4.4. BSCCO Numunelerine Ait M-H Ölçümleri.....	45
4.5. Manyetik Alana Göre Kritik Akım Yoğunluğunun ( $J_c$ ) Değişimi .....	52
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	54
KAYNAKÇA.....	55
ÖZGEÇMİŞ .....	59

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. Süperiletkenlik alanındaki önemli keşiflerin kronolojisi (Vanderah, 1990).....	5
Tablo 2. Bi-2201 fazında bulunan süperiletken sistem için bağ uzunluğu ve her bir düzlemde bulunan en yakın oksijen sayısı .....	18
Tablo 3. Bi-2212 fazında bulunan süperiletken sistem için bağ uzunluğu ve her bir düzlemde bulunan en yakın oksijen sayısı .....	18
Tablo 4. Bi-2223 fazında bulunan süperiletken sistem için bağ uzunluğu ve her bir düzlemde bulunan en yakın oksijen sayısı .....	19
Tablo 5. BiSrCaCuO süperiletken sistemi (BSCCO) için özet tablosu .....	20
Tablo 6. S1 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları ....	21
Tablo 7. S2 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları ....	22
Tablo 8. S3 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları ....	23
Tablo 9. S4 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları ....	24
Tablo 10. S5 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları ..	25
Tablo 11. Numunelerin boyutları, örgü parametreleri ve birim hücrelerin hacimleri ....	30
Tablo 12. Süperiletken numunelere ait fazların hacimsel oranı.....	33
Tablo 13. R-T verilerinden elde edilen kritik sıcaklık değerleri ve numunelere ait bazı kritik akım yoğunluğu değerleri.....	43
Tablo 14. T=20 K için teorik olarak hesaplanan parametreler.....	51
Tablo 15. T=30 K için teorik olarak hesaplanan parametreler.....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bir süperiletkende sıcaklık, manyetik alan ve kritik akım arasındaki ilişki (Sheahen, 2002).....	2
Şekil 2. Normal bir metalin ve bir süper iletkenin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Kumar, 2010).....	4
Şekil 3. (a) Metallerin öz direncinin sıcaklığa bağlı değişimi (Rose ve Rhoderick, 1980). (b) Kalayda süperiletken geçiş üzerine saflığın etkisi (Omar, 1993).....	8
Şekil 4. Meissner etkisi: $T < T_c$ için (Omar, 1993).....	10
Şekil 5. I. Tip süperiletken maddelerin gösterdiği mıknatıslanma grafikleri.....	11
Şekil 6. II. Tip süperiletken maddelerin gösterdiği mıknatıslanma grafikleri. ....	12
Şekil 7. Karışık halde bulunan numuneye akı nüfuzu (Cyrot ve Pavuna, 1992). ....	13
Şekil 8. Mükemmel yakın kanonik tip II mıknatıslanma davranışı (Sheahen, 2002). ..	15
Şekil 9. Çivilenmiş (pinning) tip II histeresiz eğrisi (Sheahen, 2002). ....	15
Şekil 10. Başlangıç tozlarının 1. ve 2. kalsine ısı işlem grafiği .....	26
Şekil 11. Üretilen numunelerin sinterleme grafiği .....	26
Şekil 12. XRD ölçümlerinde kullanılan cihaz.....	27
Şekil 13. SEM ölçümlerinde kullanılan cihaz.....	28
Şekil 14. M-H ölçümlerinde kullanılan Quantum Design Physical Property Measurement System (PPMS) cihazı.....	29
Şekil 15. M-H ölçümlerinde kullanılan Lakeshore 7000 series cihazı .....	29
Şekil 16. Numunelerin XRD grafiği .....	31
Şekil 17. Numunelerin katkı oranı (x)'e göre fazların hacimsel oranı grafiği.....	32
Şekil 18. Bazı katyonların koordinasyon sayısına göre efektif iyonik yarıçapları .....	34
Şekil 19. S1 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM).....	35
Şekil 20. Taranan S1 numunesinin harita spekturumu .....	36
Şekil 21. S1 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü .....	36
Şekil 22. S2 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM).....	37
Şekil 23. Taranan S2 numunesinin harita spekturumu .....	37
Şekil 24. S2 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü .....	38
Şekil 25. S3 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM).....	38
Şekil 26. Taranan S3 numunesinin harita spekturumu .....	39
Şekil 27. S3 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü .....	39
Şekil 28. S4 numunesinin Taramalı Elektron spekturumu SEM .....	40

Şekil 29. Taranan S4 numunesinin harita Spekturumu.....	40
Şekil 30. S4 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü .....	41
Şekil 31. S5 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM).....	41
Şekil 32. Taranan S5 numunesinin harita toplamı spekturumu .....	42
Şekil 33. S5 numunesi için EDS katmalı görüntüsü .....	42
Şekil 34. S1 ve S2 numunelerinin R-T grafikleri.....	43
Şekil 35. S3 ve S4 numunelerinin R-T grafikleri.....	44
Şekil 36. S5 numunesinin R-T grafiği .....	44
Şekil 37. S1 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri .....	46
Şekil 38. S1 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri .....	46
Şekil 39. S2 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri .....	47
Şekil 40. S2 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri .....	47
Şekil 41. S3 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi	48
Şekil 42. S3 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi	48
Şekil 43. S4 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi	49
Şekil 44. S4 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi	49
Şekil 45. S5 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi	50
Şekil 46. S5 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi	50
Şekil 47. S1 süperiletken numunesinin T=20 ve 30 K sıcaklıklarındaki kritik akım yoğunluğunun manyetik alana göre değişimi .....	52
Şekil 48. S2 süperiletken numunesinin T=20 ve 30 K sıcaklıklarındaki kritik akım yoğunluğunun manyetik alana göre değişimi .....	53

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a, b, c,	: Örgü parametreleri
Å	: Angström (uzunluk ölçü birimi $1\text{Å}=10^{-10}\text{m}$ )
<b>B</b>	: Manyetik Alan
BCS	: Bardeen-Cooper-Schrieffer Teorisi
Bi-2201	: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_1\text{O}_y$ yapısı
Bi-2212	: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ yapısı
Bi-2223	: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ yapısı
BSCCO	: BiSrCaCuO bileşiği
<b>E</b>	: Elektrik Alan
DC	: Doğru Akım
EDS	: Elektron X-ışını Saçılımı
$H_c$	: Kritik manyetik alan
$H_{c1}$	: Alt kritik manyetik alan
$H_{c2}$	: Üst kritik manyetik alan
<b>J</b>	: Akım Yoğunluğu
$J_c$	: Kritik akım yoğunluğu
K	: Kelvin, Sıcaklık birimi
<b>M</b>	: Manyetizasyon, mıknatıslanma
Oe	: Oersted, Manyetik alan birimi
R	: Direnç
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
T	: Tesla, Manyetik alan birimi
$T_c$	: Kritik sıcaklık
XRD	: X-Ray Diffraction (X-ışını kırınımı)
(hkl)	: Miller indisleri
$\rho$	: Özdirenç

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Süperiletkenler, numunenin içerisinde akım geçtiğinde bu akıma karşı direnç göstermeyen malzemelerdir. Normal iletkenler, elektrik akımını iletmek için voltaj uygulandığında direnç nedeniyle enerji kaybederken, süperiletkenler dirençsiz bir şekilde akımı iletebilirler. Evlerde kullanılan bakır teller gibi normal iletkenler, düşük dirence sahiptir ve elektrik iletiminde etkilidirler. Öte yandan, elektronik cihazlar, direncin voltaj kontrolü altında değişebildiği yarı iletken bileşenlerle çalışırken, süperiletkenler hiçbir dirence sahip olmadığı için benzersizdir.

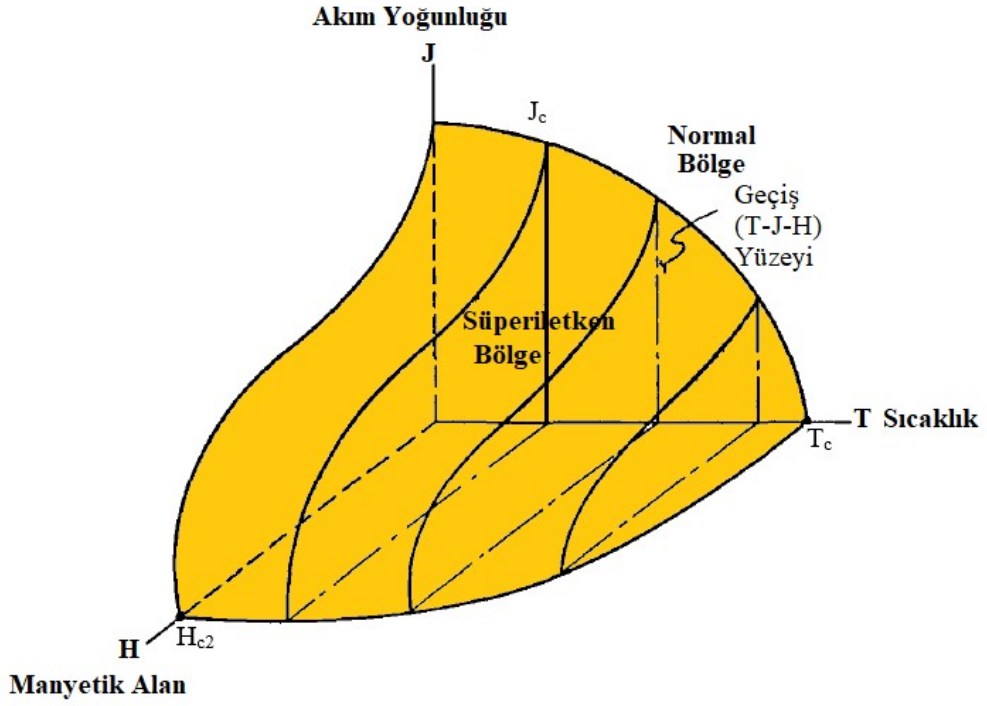
Birçok metal, oda sıcaklıklarında belirli bir elektrik direncine sahiptir, ancak mutlak sıfır sıcaklığına yakın sıcaklıklarda süperiletkenlik gösterirler. Süperiletkenlik, ilk olarak 1908'de helyumun sıvı hale geldiği 4.2 K sıcaklıkta civa elementi üzerinde yapılan düşük sıcaklık deneylerinde gözlemlendi. Daha sonraki 60 yıl içinde birçok süperiletken madde keşfedildi. Örnek olarak, 1960'larda, niyobyum alaşımları gibi bazı malzemelerin 10-23 K sıcaklık aralığında süperiletkenlik özellikleri sergilediği gözlemlendi. Bu dönemde teorik olarak, 30 K üzerinde süperiletkenlerin bulunmayacağına inanılıyordu (Sheahen, 2002).

Süperiletkenlerin direnci olmadığı için, bir kez başlatılan akımın devam etmesi için gerilim uygulamaya ihtiyaç yoktur. Bu akım, süperiletkenin düşük sıcaklıklarda tutulması koşuluyla uzun yıllar boyunca devam edebilir. İletkenin direnci sıcaklık ile doğru orantılıdır. Sıcaklığın düşmesi ile süperiletken olamayan maddelerin direncinde azalma olur. Süperiletkenlik araştırmalarını sınırlayan faktörlerden biri, süperiletkenleri düşük sıcaklıklarda tutma zorunluluğudur. Süperiletken bir akım döngüsünü sürdürmek için gereken maliyet, temel olarak soğutma işlemine olan maliyetle sınırlıdır (Sheahen, 2002).

Direncin sıfır olduğu andaki sıcaklık değerine o maddenin “*Kritik Sıcaklığı*” denir ve “ $T_c$ ” ile gösterilir.

Süperiletken haldeki bir malzeme, manyetik alan içinde bu özelliğini kaybederek normal hale dönebilir. Süperiletkenliği bozan manyetik alanın bu değerine “*Kritik manyetik alan*” denir ve “ $H_c$ ” ile temsil edilir. Süperiletken haldeki bir maddenin dirençsiz olarak taşıyabileceği en fazla akım yoğunluğuna ise “*Kritik akım yoğunluğu*”

ismi verilir ve “ $J_c$ ” ile gösterilir. Bu kritik değerlerin birbirleriyle olan ilişkisi Şekil-1’de görülmektedir.



Şekil 1. Bir süperiletkende sıcaklık, manyetik alan ve kritik akım arasındaki ilişki (Sheahen, 2002).

### 1.1.1. Süperiletkenlikle İlgili Tarihsel Gelişmeler

Süperiletkenlik olgusu, yalnızca düşük sıcaklıklarda gözlemlendiğinden, ilk olarak mutlak sıfır sıcaklığına yaklaşma çabalarını ve bu yöndeki başarıları inceledik.

Gazları sıvılaştırmanın oldukça yaygın bir yöntemi, onları sıkıştırmaktan geçer. Bu işlem, gaz moleküllerinin birbirine yaklaşmasına neden olarak kohezyon kuvvetlerinin etkisini artırır. Bu, gazdan sıvıya geçişi mümkün kılar; ancak kritik noktanın üzerindeki sıcaklıklarda, yüksek basınca rağmen gazı sıvıya dönüştürmek mümkün değildir. Bu nedenle gazı sıkıştırmadan önce soğutmak gereklidir.

1877'de Fransız bilim insanı Louis Paul Cailletet, oksijeni ( $O_2$ ) 90.2 K sıcaklıkta sıvılaştırmayı başardı (Flynn, 1997). Bundan 6 yıl sonra, Azot ( $N_2$ ) 77.4 K sıcaklıkta sıvılaştırıldı. Hidrojenin ise 20.4 K sıcaklıkta sıvılaştırılabildiği bulundu. Bu başarı, Sir James Dewar tarafından 1877'de mümkün kılındı ve kendisi tarafından, 1898'de, günümüzde hala sıvı hidrojen depolamak için kullanılan vakumlu kabı icat etti (Dewar, 1927). Helyum, 1869'da güneş korona spektrumunda keşfedildi, ancak uzun süre yeryüzünde tespit edilemedi. Sir William Ramsay, bunu ancak 1895'te bazı mineraller ısıtıldığında açığa çıkan gazlar arasında buldu. Yirminci yüzyılın başlarına gelindiğinde helyumun kaynama noktasının hidrojeninkinden bile düşük olduğu anlaşıldı. 1890'ların sonlarına doğru Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes, helyumu sıvılaştırmayı amaçlayan deneylere başladı. Sonuç olarak, 10 Temmuz 1908'de sıvılaştırmayı 4.2 K' de başardı.

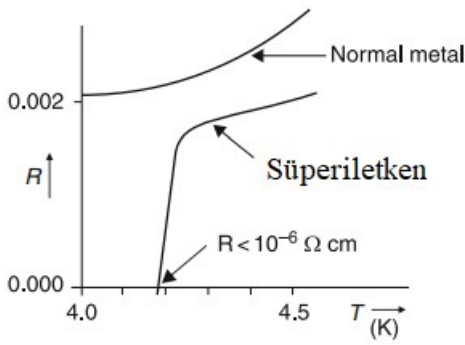
Sıvı helyum genellikle kuantum sıvısı olarak adlandırılır. Bu, kuantum davranışının büyük cisimler tarafından da sergilenebileceğini gösteren çarpıcı bir örnektir. Sıvı helyum, mutlak sıfır sıcaklıkta (0 K' de hiçbir termal hareket olmamasına rağmen) sıvı olarak kalır. Bu, sıvı helyumun son derece düşük yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklanır ve sudan 8 kat daha hafiftir. Bu nedenle, hafif ve pasif helyum atomları geniş bir şekilde dağılırlar. Mutlak sıfıra yakın bir sıcaklıkta, klasik anlamda atomların mutlak sıfırda tamamen durağan olduğu fikrine karşın, kuantum fiziği yasaları onun katı bir hal almasını engeller.

Onnes, sıvı helyum sayesinde maddelerin düşük sıcaklıklardaki elektriksel özelliklerine dair sistematik araştırmalarını yürütme imkânı buldu.

Onnes, 8 Nisan 1911 tarihinde, donmuş cıvanın elektriksel özelliklerini inceleyerek, 4.2 K'ne yaklaşıldığında cıvanın elektrik direncinin tamamen kaybolduğunu keşfetti.

Deney, ölçüm hassasiyeti arttıkça direncin tamamen ortadan kaybolduğu konusunda hiçbir şüphe bırakmadı. Ancak bu sırada beklenmedik bir gelişme yaşandı. Direncin düşüşü ani bir şekilde gerçekleşti. Böylece 4.2 K sıcaklığındaki cıva, kendine özgü elektriksel özellikleri nedeniyle süperiletkenlik durumu olarak adlandırılan yeni bir durumdaydı.

En güncel veriler, bir süperiletkenin elektrik öz direncinin  $10^{-27} \Omega \cdot \text{cm}$ ' nin altında olduğunu göstermektedir. Bu değer, mükemmel bir iletken olarak kabul edilen bakırın direnci olan  $10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$  ile karşılaştırılabilir. Dolayısıyla, ideal iletkenlik durumu (elektrik direncinin tamamen ortadan kalkması) ile karşı karşıya olduğumuz konusunda hiçbir şüphe bulunmamaktadır.



Şekil 2. Normal bir metalin ve bir süper iletkenin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Kumar, 2010).

K. Onnes'in keşfinin ardından bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirildi. Yeni süperiletken malzemeler keşfedildi ve bu malzemelerin fiziksel özellikleri detaylı bir şekilde incelendi.

Tablo 1. Süperiletkenlik alanındaki önemli keşiflerin kronolojisi (Vanderah, 1990)

Yıl	Buluş	Buluşu Yapan/Yapanlar
1911	Hg cinsinden süperiletkenlik	Heike Kamerlingh Onnes
1933	Meisner-Ochsenfeld etkisi	Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld
1934	Süperiletkenlerin iki akışkan modeli	Cornelis Jacobus (Cor) Gorter ve Hendrik Brugt Gerhard Casimir
1935	London denklemleri	Fritz London ve Heinz London
1950	İzotop etkisi $T_c M^{-1/2}$	Emanuel Maxwell ve C. A. Reynolds
1950	Süperiletkenlik teorisi	Vitaly Lazarevich Ginzburg ve Lev Davidovich Landau
1953	Tutarlılık uzunluğu	Alfred Brian Pippard
1953	Enerji açığına dair deneysel kanıt	C. H. L. Goodman
1957	BCS Teorisi	John Bardeen, Leon Cooper ve John Robert Schrieffer
1959	Elektron eşleşmesini bozan yabancı manyetik kirlilik	Harry Suhl ve Bernd Matthias
1960	Tünel etkisi	Ivar Giaever ve Leo Esaki
1961	"Sert" veya "Yüksek alan" süperiletkenleri	John Eugene Kunzler
1962	Josephson etkisi, tünel bariyerinden süper akım akışı	Brian David Josephson ve Arkadaşları
1964	Organik bileşimlerde yüksek $T_c$ tahmini	William Little
1973-1974	Nb <sub>3</sub> Ge'de sıvı H <sub>2</sub> bariyerini aşarak 23 K'lik kritik sıcaklığa ulaşıldı	J. R. Gavaler
1986	La-Ba-Cu-oksitlerde yüksek $T_c$ kanıtı	Karl Alexander Müller ve Johannes Georg Bednorz
1987	Y-Ba-Cu-O'da 95 K $T_c$ gözlemi	Paul Ching Wu Chu ve Maw-Kuen Wu

1913 yılında Onnes'e maddelerin düşük sıcaklık değerlerinde yapmış olduğu çalışmalar ve Helyumu sıvılaştırmayı başardığı için Nobel Fizik Ödülü verildi.

1933 yılında, Meissner ve Ochsenfeld süperiletken hale geçen bir malzemenin, bir manyetik alanı ittiğini keşfettiler. Bir süperiletken malzeme kritik geçiş sıcaklığının altında iken dış bir manyetik alan uygulanırsa, malzeme bu alanı yok edecek şekilde manyetize olur. Bu özellik mükemmel diyamanyetizma ve bu olaya "Meissner etkisi" denir.

Sonraki yıllarda, metalleri alaşımlar ve bileşiklerinde süperiletken oldukları keşfedildi. 1941'de Niyobyum Nitrür'ün (NbN) süperiletken olduğu (16 K), 1953 yılında ise Vanadyum-Silikon'un Süperiletken özelliği (17.5 K) gösterdiği bulundu.

Süperiletkenlik ile ilgili ilk teori 1957'de Amerikalı fizikçiler John Bardeen, Leon Cooper ve John Schrieffer tarafından açıklandı. Bu teori elementler ve basit alaşımlar için mutlak sıfıra yakın sıcaklıklarda süperiletkenliği açıklamayı başardı. Fakat yüksek sıcaklıklarda ve farklı süperiletken sistemlerde bu teori süperiletkenliğin nasıl olduğunu tam açıklayamadı. Kısaca bu teoriye BCS ismi verildi.

1986 yılında, Georg Bednorz ve Alex Müller, İsviçre Rüşchlikon'daki IBM Zürih Araştırma laboratuvarında La-Ba-Cu-O (LBCO) sisteminin geçiş sıcaklığını 30 K olarak ölçmesiyle yüksek sıcaklık süperiletkenliği başlamış oldu (Bednorz and Müller, 1986). 1987 yılında, Tanaka ve arkadaşları, LBCO sisteminde Ba'nın yerine Sr'yi katarak kritik geçiş sıcaklığını 42.5 K olarak buldular (Tanaka ve ark., 1987). Chu ve Arkadaşları, 1987 yılında, LBCO sisteminde 12 kbar basınç altında kritik geçiş sıcaklığını 57 K olarak buldular (Chu ve ark., 1987). Yine 1987 yılında Wu ve arkadaşları kritik geçiş sıcaklığı 90 K olan Y-Ba-Cu-O (YBCO) sistemini keşfettiler (Wu ve ark., 1987). Bi- tabanlı  $Bi_2Sr_2Cu_1O_y$  örneği 1988 yılında Micheal ve arkadaşları tarafından 15-20 K kritik geçiş sıcaklığı ile bulundu (Micheal ve ark., 1988). 1988 yılında Tarascon ve arkadaşları,  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$  örneğinin kritik geçiş sıcaklığını 110 K olarak literatüre tanıttılar (Tarascon ve ark., 1988). Hazen ve arkadaşları,  $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$  numunesinde kritik sıcaklığı 125 K olarak elde ettiler (Hazen ve ark., 1988). 1993 yılında Chu ve arkadaşları HgBaCaCuO numunesinin kritik geçiş sıcaklığını 153 K olarak buldular (Chu ve ark., 1993). 1994 yılında  $RNi_2B_2C$  numunesi 17 K civarında süperiletken özelliği gösterdiği bulundu. 2001 yılında Nagamatsu ve arkadaşları  $MgB_2$  metal alaşımının süperiletken özelliğini 39 K olarak buldu (Nagamatsu ve ark., 2001).

Ayrıca özet olarak söylemek gerekirse, süperiletkenliğin tarihsel gelişimini Ginzburg 2000 yılında 3 kısma ayırmıştır (Ginzburg ve ark., 2000). Buna göre:

- i) 1911 ve 1941 yılları arası düşük sıcaklık süperiletkenliğinin keşfi
- ii) 1942 ve 1986 yılları arası süperiletkenlik teorileri üzerine yapılan çalışmalar
- iii) 1987 yılından günümüze kadar yüksek sıcaklık süperiletkenliğin keşfi şeklindedir.

2016 yılında H.Azhan ve arkadaşları,  $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{1.9}\text{RE}_{0.1}\text{Cu}_3\text{O}_8$  (RE=Nd, Er) örneğinin yapısal ve transport özellikleri üzerindeki etkileri araştırdılar. Hem Nd hem de Er katkılı  $x = 0.10$  için kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) ve geçiş sıcaklığı ( $T_{c \text{ sıfır}}$ ) standart numunelerden daha düşük buldular. XRD verileri, Bi-2223 fazı için hacim fraksiyonunun azaldığını ve Nd ve Er katkısı ile Bi-2212 fazının hacim fraksiyonunun arttığını gözlemladiler (Azhan, 2016).

2016 yılında D. Paladhi ve arkadaşları, farklı oranlarda Er katkılı  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Er}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$  polikristal sistemlerin termal olarak aktiveleştirilen akı akışı (TAFF) rejimi incelediler. Aktivasyon enerjisinin, Er ikamesi ile azaldığı ve aktivasyon enerjisinin ( $U_0$ ) manyetik alan (H) ile üstel olarak bir kuvvet ile ( $U_0 \propto H^{-\alpha}$ ) bağlılığı takip ettiğini gördüler. Tersinmezlik çizgilerinin daha yüksek Er konsantrasyonu ile daha düşük sıcaklığa kaydığını gözlemladiler. Er katkısıyla çivileme kuvvetinin zayıfladığını doğrulamış oldular (Paladhi, 2016).

2016 yılında Kırat ve arkadaşları tarafından,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Er}_x\text{O}_{10+\delta}$  numunesi üretilerek yapısal, manyetik ve akı çivileme özellikleri incelendi. Diamanyetik sinyalin başlangıç sıcaklığı Er ilavesi ile azaldığını ve ana malzemedeki Er iyonlarının çivileme merkezleri olarak hareket ettiğini ve bunun da  $J_c$  değerinin artmasına yol açtığını gözlemladiler (Kırat, 2016).

2003 yılında Harima ve arkadaşları, BSCCO 2212 numunesinde Ca yerine farklı oranlarda Er katkılanmışlardır. Yaptıkları çalışmada özellikle kimyasal potansiyel kaymasına odaklanmışlardır ve sonuç olarak kayma, alt katkılanmış bölgede yavaş bir şekilde meydana gelirken, LSCO konumuna kıyasla daha iyi olduğunu gözlemladiler (Harima ve ark., 2003).

Literatürde, Er elementinin Ca elementinin yerine katkılандığı (Azhan, 2016) (Paladhi, 2016) çok fazla makale bulunmamaktadır. Bu yüzden yapılan bu tezin orijinalliğini göstermesi açısından önemlidir.

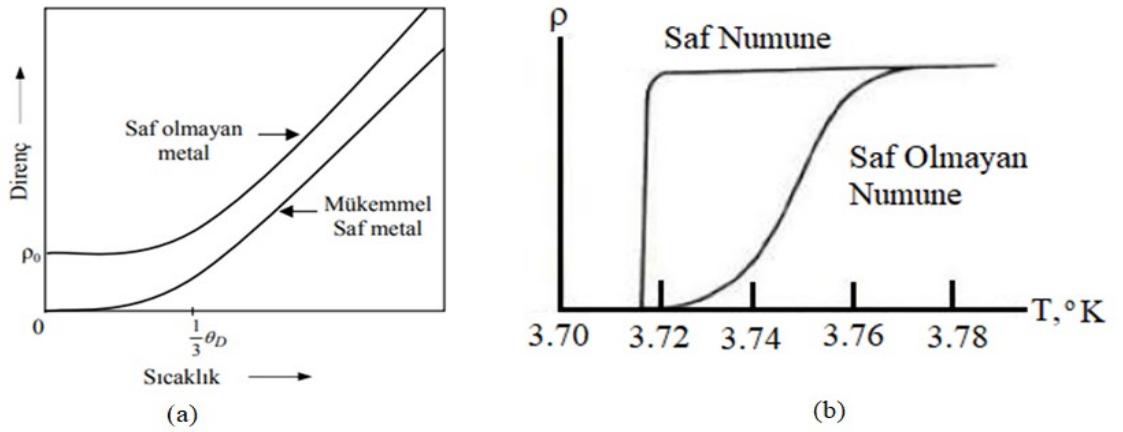
## 1.2. Süperiletkenlerin Bazı Temel Özellikleri

### 1.3.1. Sıfır Direnç

Bir metal veya alaşımın sıcaklığını azalttığımızda elektriksel direncini de azaltmış oluruz. Bir metalin öz direnci; sıcaklığına, yabancı atomlarına (safsızlık) ve şekil değişimlerine bağlıdır (Matthiessen kuralı). Metalden akım geçtiğinde kristal örgüdeki sıcaklık, yabancı atomlar ve şekil değişimleri sonucu elektron dağılmasına sebebiyet verir bu da direnç oluşmasına sebep olur. Metaldeki bu etkiler ortadan kalktığında, yani saf bir metal elde edildiğinde, normal iletkenlerden farklı olarak sıcaklık, kritik sıcaklığın altına düşürüldüğünde yeni bir faz ortaya çıkar bu dirençsiz duruma süperiletken durum denir.

### 1.2.2 Kritik Sıcaklık ( $T_c$ )

Bir malzemenin süperiletken olup olmadığını belirlemede kullanılan tekniklerden birisi de bu malzemenin direncinin veya öz direncinin, sıcaklığa göre ölçülmesidir. Dört nokta yöntemi ile düşük sıcaklıklarda ölçülen malzemenin sıcaklık-direnç grafiği elde edilir. Dört nokta yöntemi, iki uçta akım, iki uçtan gerilim ölçülerek veriler elde edilir. Bir malzemenin süperiletken duruma geçişi,  $T_c$  kritik sıcaklığında olmaktadır. Sıcaklığını düşürülmesi ile normalden süperiletken faza geçilen sıcaklık değerine Kritik Sıcaklık ( $T_c$ ) denir. BSCCO-2223 Fazı için bu değer 110 K'dir. Bu değer aynı zamanda direncin sıfır olduğu en yüksek sıcaklık değeridir ve her süperiletken malzeme için farklıdır.



Şekil 3. (a) Metallerin öz direncinin sıcaklığa bağlı değişimi (Rose ve Rhoderick, 1980).

(b) Kalayda süperiletken geçiş üzerine saflığın etkisi (Omar, 1993).

### 1.2.3. Kritik Akım Yoğunluğu ( $J_c$ )

Kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ), süperiletken malzemelerde önemli bir parametredir ve süperiletkenliğin sürdürülmesi için belirli bir sınıra kadar akımın dirençsiz bir şekilde iletilmesini sağlar.

Kritik Akım Yoğunluğu, elektriksel iletkenlerde ve süperiletkenlerde belirli bir sıcaklık ve mıknatıslanma koşulu altında, maksimum izin verilen akım yoğunluğunu ifade eder. Bu değer aşırsa, malzeme süperiletkenlik özelliğini kaybeder veya hasar görür.

Süperiletken malzemeler, düşük sıcaklıklarda belirli bir akım yoğunluğuna kadar elektrik akımını dirençsiz bir şekilde iletebilir. Ancak, bu akım yoğunluğu aşıldığında, süperiletken malzeme normal duruma geçer ve elektrik direnci göstermeye başlar.

Kritik akım yoğunluğu, süperiletken malzemelerin pratik kullanımını sınırlayan önemli bir faktördür. Yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip süperiletken malzemeler, daha büyük akım yoğunluklarına dayanabilir ve elektro mıknatıs olarak kullanıldıklarında daha güçlü manyetik alanlar üretebilir. Bu, manyetik rezonans görüntüleme (MR) gibi uygulamalarda kullanılır.

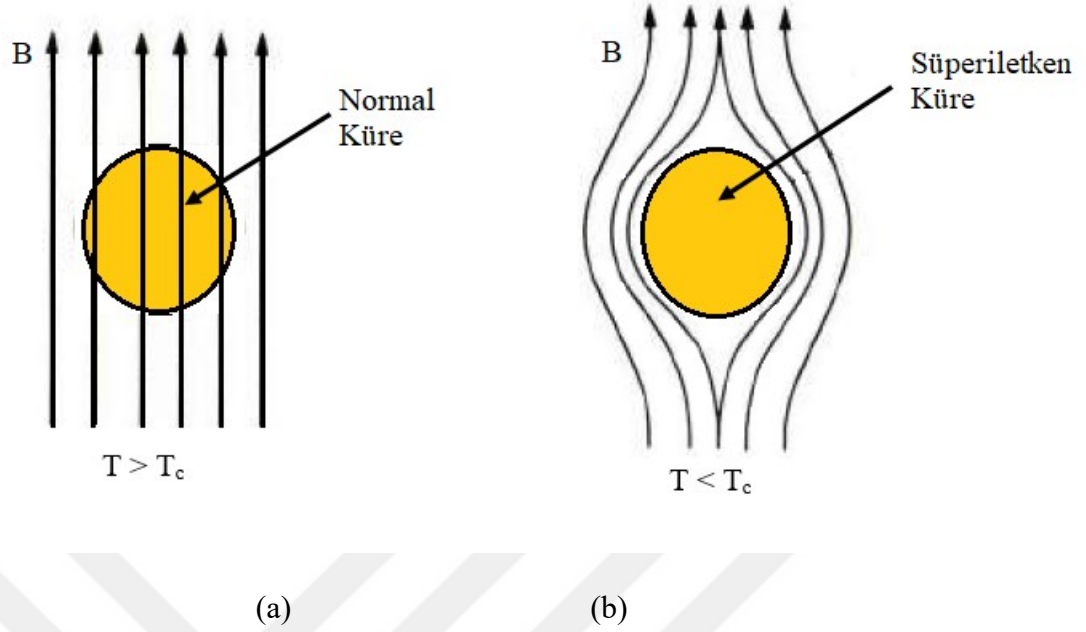
### 1.2.4. Kritik Manyetik Alan ( $H_c$ )

Kritik Manyetik Alan, süperiletkenliğin en önemli özelliklerinden biridir. Süperiletken bir malzeme, dışarıdan uygulanan manyetik alana karşı direnç gösterir. Ancak, bu manyetik alan belli bir değeri aştığında, malzemenin süperiletkenlik özelliği ortadan kalkar. Kritik Manyetik Alan adı verilen bu değer  $H_c$  sembolü ile temsil edilir.

Kritik Manyetik Alan, süperiletken malzemelerde süperiletkenlik durumunun ortadan kalktığı veya bozulduğu maksimum manyetik alan şiddetini ifade eder. Bir malzeme kritik manyetik alan değerini aştığında, süperiletken özelliğini kaybeder ve normal iletken haline geçer.

### 1.2.5. Meissner-Ochsenfeld Etkisi

Süperiletken özelliğine sahip bir madde normal şartlarda diyamanyetik özellik göstermez. Maddenin kritik sıcaklığının üstündeki bir sıcaklıkta, manyetik alan maddenin içerisine nüfuz eder. Süperiletken olan madde kritik sıcaklığın altında olur ise uygulanan manyetik alanı dışarılar. Şekil 4'de 1933 yılında Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld tarafından bu durum mükemmel diyamanyetizma veya Meissner etkisi olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4. Meissner etkisi:  $T < T_c$  için (Omar, 1993).

Meissner-Ochsenfeld etkisi, süperiletkenlik özelliğine sahip bazı maddelerin manyetik alanı dışarı iterken tamamen içlerine kabul etmemesini söyler. Bu etki, süperiletken maddenin belirgin bir özelliğidir. Meissner-Ochsenfeld etkisi, süperiletken maddenin manyetik alanı dışarı itmesiyle birlikte, içerisindeki akımın da sıfıra yaklaşmasına neden olur. Bu etki, süperiletken maddenin mükemmel bir şekilde manyetik alanı ekarte ettiği ve akıyı dirençsiz bir şekilde taşıdığı anlamına gelir. Meissner-Ochsenfeld etkisi, süperiletken maddenin belirli bir sıcaklıkta, yani kritik sıcaklık altında çalışırken ortaya çıkar. Süperiletken madde soğutulduğunda, manyetik alan içine nüfuz etmeye çalışsa da, madde kendisini manyetik alandan tamamen izole eder ve manyetik alanı maddenin dışına iter. Bu nedenle, süperiletken maddenin içerisinde manyetik alan sıfıra yaklaşır ve madde manyetik alanın etkisinden kurtulur.

Ayrıca, Meissner-Ochsenfeld etkisi süperiletken levitasyonda da kullanılır. Süperiletken bir plaka manyetik bir alana yerleştirildiğinde, manyetik alanın malzeme üzerinde yarattığı itici kuvvetler sayesinde plaka manyetik alanda süzülerek yerçekimi ile temas etmeden havada kabılır. Bu şekilde, Meissner-Ochsenfeld etkisi süperiletkenlik fenomeninin önemli bir yönünü temsil eder.

### 1.3. Süperiletkenlerin Manyetik Özellikleri

Süperiletkenler, göstermiş oldukları manyetik özelliğine göre ve I. Tip ve II. Tip süperiletkenler olarak iki kısma ayrılır.

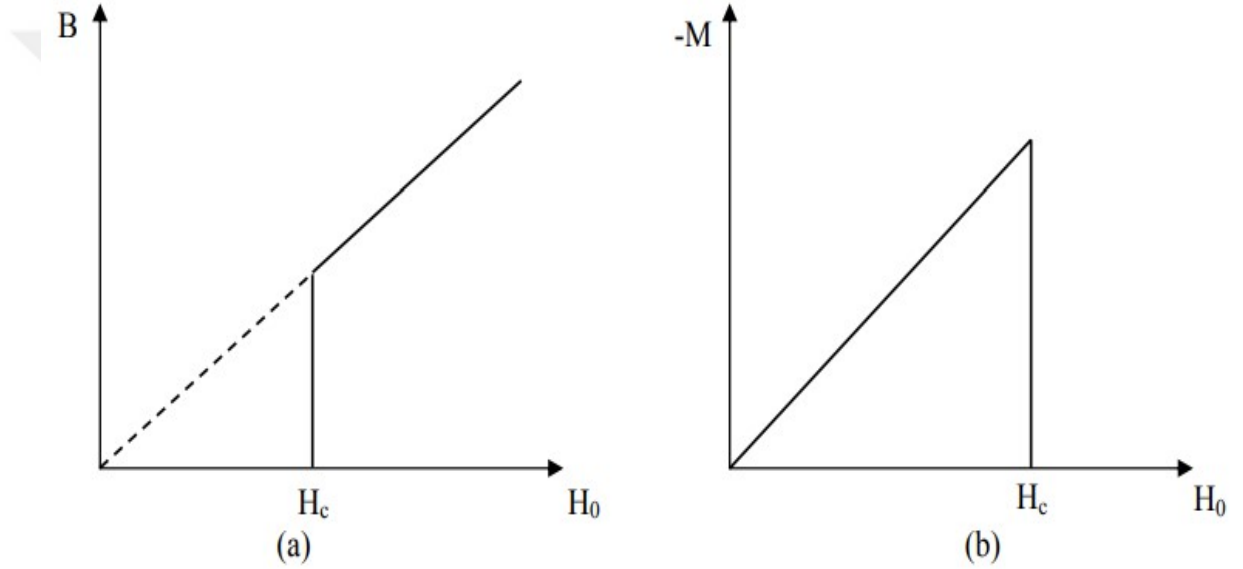
Neobyum elementi dışında kalan süperiletkenlik özelliği gösteren elementler I. Tip süperiletken grubunu oluşturur. II. Tip süperiletken grubunu ise Neobyum elementi ve alaşımlar ile kimyasal bileşikler oluşturur ve bunlara yüksek sıcaklık süperiletkenleri de denir. Bu iki grup arasındaki en belirgin özellik manyetik alanda göstermiş oldukları davranışlardır.

### 1.3.1. I. Tip Süperiletkenler

Manyetik alan ( $H_0$ ) uzun bir silindire paralel olacak şekilde uygulansın. Manyetik alan artarken, silindirin iç kısmında manyetik alan değişmez ve  $B = 0$  olur. Manyetik alan ( $H_0$ ), ( $H_c$ ) değerine geldiğinde manyetik alan silindirin içine nüfuz eder ve süperiletkenlik bozulur  $B=H_0$  olur. Burada oluşan mıknatıslanma eğrisi ( $B = B(H_0)$ ) şekilde olduğu gibidir. Buradaki Manyetik Alan ( $H_0$ ) ve Manyetik indüksiyon ( $B$ ) arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$B = \mu_0(H_0 + M)$$

Burada,  $M$  birim hacimde var olan manyetik momenti gösterir. Mıknatıslanma eğrisi olan  $M$ 'nin, Manyetik Alan ( $H_0$ )'a karşı grafiği şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. I. Tip süperiletken maddelerin gösterdiği mıknatıslanma grafikleri.

Şekil 5. (a)'da Dış alan  $H_0$ 'ın  $B$  manyetik indüksiyonuna göre değişimi gösterilmiştir ve Şekil 5. (b)'de Birim hacimde bulunan manyetik moment ( $M$ )'nin ( $H_0$ )'a göre değişimi gösterilmiştir (Müller ve Ustinov, 1997).

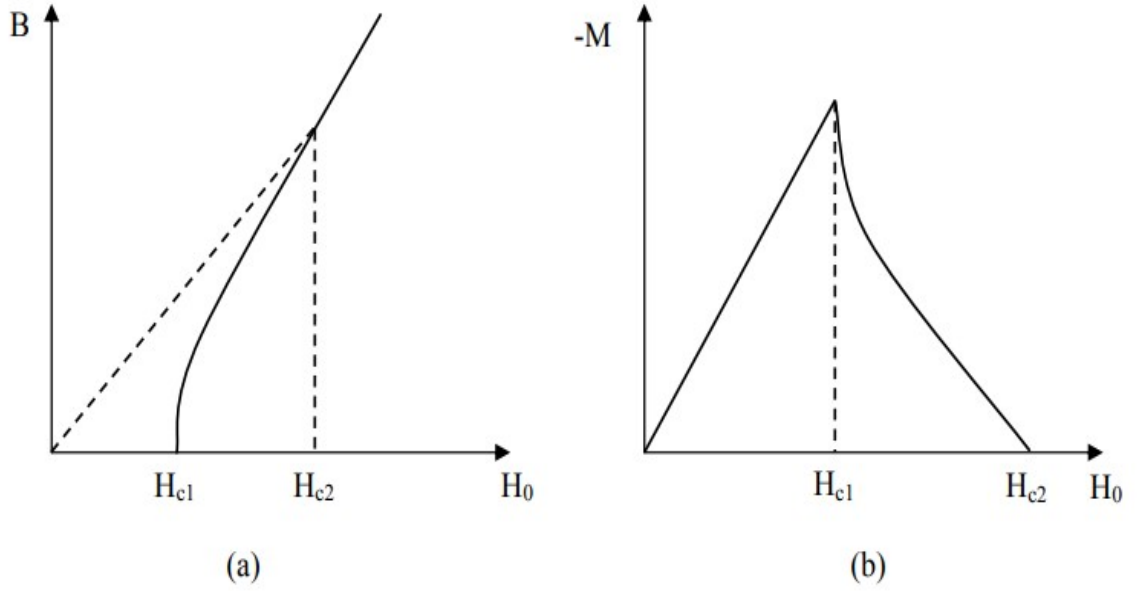
### 1.3.2. II. Tip Süperiletkenler

Manyetik alan ( $H_0$ ) bir silindire paralel olacak şekilde uygulansın. Manyetik alan artarken Meissner etkisi gözlemlenerek silindirin içindeki manyetik indüksiyon sıfır olur. Manyetik alan silindirin içinde artmaya devam ederken belirli bir değere vardığında numuneye manyetik alan nüfuz eder ve bu değere *alt kritik alan* denir,  $H_{c1}$  olarak ifade edilir. Dışarıdan uygulanmaya devam eden manyetik alan artmasıyla birlikte silindirin içindeki manyetik indüksiyon Manyetik alana ( $H_0$ ) eşit olur. Böylece numune normal duruma gelir. Numune normal durumuna döndüğünde, bu manyetik alan değeri *üst kritik alan* olarak adlandırılır ve  $H_{c2}$  ile temsil edilir.

Şekil 6'da II. tip süperiletkenlere ait mıknatıslanma eğrisi verilmiştir. Dışarıdan uygulanan manyetik alan değeri  $H_0 < H_{c1}$  olduğunda silindirin içinde ortalama manyetik indüksiyon  $\mathbf{B}=0$  olur.  $H_{c1} < H_0 < H_{c2}$  olduğunda manyetik indüksiyon numunenin içine nüfuz eder. Silindirin içindeki indüklenen B alanı,  $H_0 = H_{c2}$  olduğunda ortalama olarak  $H_0$  değerine eşit olur, bu durumda süperiletkenlik etkisi bozulur.

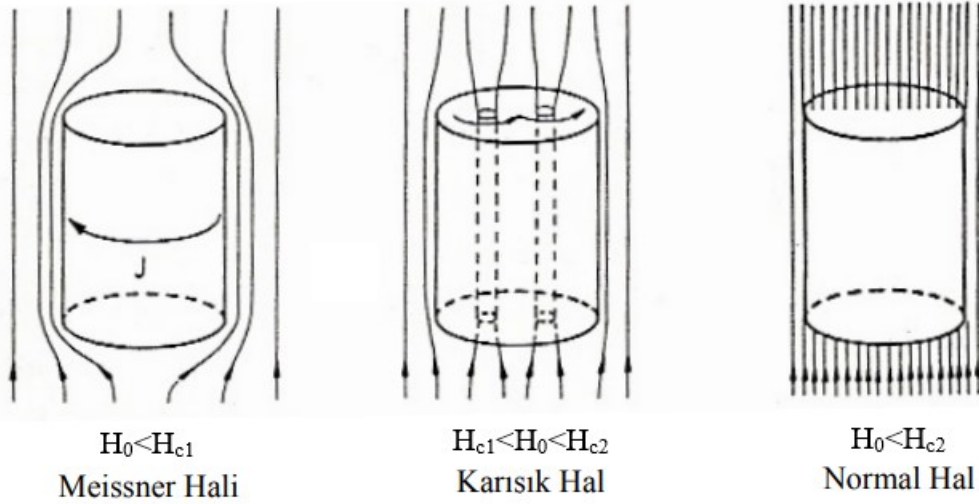
II. tip süperiletkenlerde,  $H_{c1}$ 'in üstünde Meissner etkisi oluşmaz ve süperiletken madde Girdaplı hal denilen karışık halde olur.

Numuneye uygulanan alan  $H_{c1}$  değerine geldiğinde girdaplı bölgeler, normal kısımlardan meydana gelen iplikçikler şeklinde oluşur. (Şekil 7). Numunenin bu kısmına akı girmesi sonucunda, numune normal hale dönmez, uygulanan güçlü manyetik alana dayanabilir. Numuneye uygulanan alanın şiddeti artırıldığı zaman oluşan iplikçik sayısında artma olur. Uygulanan alan  $H_{c2}$ 'e geldiği zaman, numune normal hale gelir (Müller ve Ustinov, 1997).



Şekil 6. II. Tip süperiletken maddelerin gösterdiği mıknatıslanma grafikleri.

Şekil 6. (a)'da Dış alan  $H_0$ 'ın B manyetik indüksiyonuna göre değişimi gösterilmiştir ve Şekil 6. (b)'de Birim hacimde bulunan manyetik moment ( $M$ )'nin ( $H_0$ )'a göre değişimi gösterilmiştir (Müller ve Ustinov, 1997).



Şekil 7. Karışık halde bulunan numuneye akı nüfuzu (Cyrot ve Pavuna, 1992).

### 1.3.3. Süperiletkenlerde Histeresiz

Malzemelerin quasi-statik (60 Hz dahil) manyetik davranışı,  $M$  mıknatıslanmasının uygulanan  $H$  manyetik alanına karşı bir grafikte temsil edilir.  $M$ , yalnızca  $H$ 'nin mevcut değerine bağlı olduğunda ve başka hiçbir faktöre bağlı olmadığında, malzeme başlangıç manyetik durumuna geri döner. Bu, uygulanan manyetik alanın başlangıç durumuna dönüştüğü ve enerji kaybının olmadığı bir durumu ifade eder. Bakır, pratikte bu şekilde davranır; özellikle bakırın mıknatıslanması, uygulanan herhangi bir manyetik alan için neredeyse sıfırdır. Ancak, demir, kobalt ve nikel farklı davranır ve mıknatıslanmaları geçmişlerine ve şu anki manyetik alanın değerine bağlıdır.

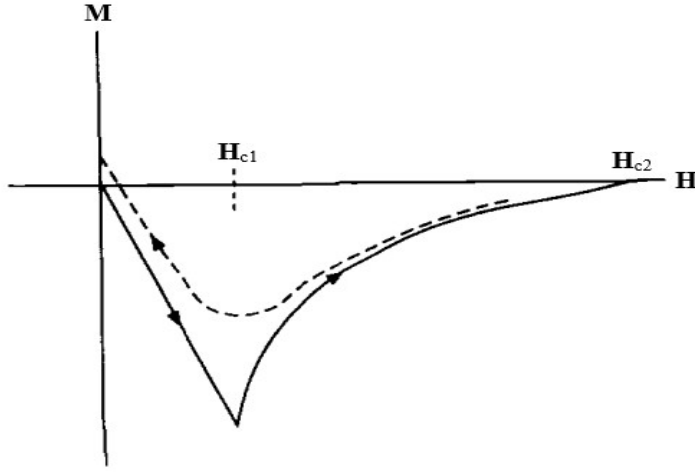
Uygulanan manyetik alan birçok kez değiştirildiğinde, demirin mıknatıslanması, her  $H$  değeri için iki farklı  $M$  değeri ile bilinen histeresiz eğrisini takip ederek tepki verir.  $H$  bir kez çevrildikten sonra,  $M$  başlangıç değerine geri dönmez; bunun yerine manyetik enerji ısıya dönüşür. Bu dönüşüm geri alınamaz ve enerji kaybına neden olur. Bu, transformatörlerin soğutma gereksinimlerini karşılar.  $M$ ,  $H$ 'nin tek bir değerli bir fonksiyonu olduğunda, malzeme  $H$  değiştiğinde manyetik enerjiyi dağıtmaz, bunu korur. Ancak  $M$ ,  $H$ 'nin tek bir değerli bir fonksiyonu olmadığında, malzeme (demir veya süperiletken)  $H$  değiştiğinde ısınır. Özellikle büyük bir histeresiz döngüsüne sahip olan mıknatıslı demir sert olarak adlandırılırken, bir süperiletken de büyük bir histeresiz döngüsüne sahipse sert olarak adlandırılır.

Süperiletkenlerde histeresiz (beraberinde gelen tersinmezlikle birlikte) akı çivilenmesi (pinning) nedeniyle ortaya çıkar. Akı çivilenmesi olmadığında, aynı şekilde

tersinmezlik de bulunmaz; yani süperiletkenin manyetik davranışı tamamen geri alınabilir. Tip I süperiletkenler için durum, Şekil 5'de gösterildiği gibi olur. İdealize edilmiş Tip II süperiletkenlerde ise, herhangi bir akı çivilemesi olmadan davranış da tersine çevrilebilir; **B**, **H** ve **M** birbirleriyle benzersiz bir şekilde ilişkilidir. Şekil 6'ya geri dönersek, uygulanan **H** manyetik alanı sıfırdan  $H_{c2}$  'ye artırıldığında ve ardından azaltıldığında, **H** azaldıkça çizgi tamamen geri çekilecektir.

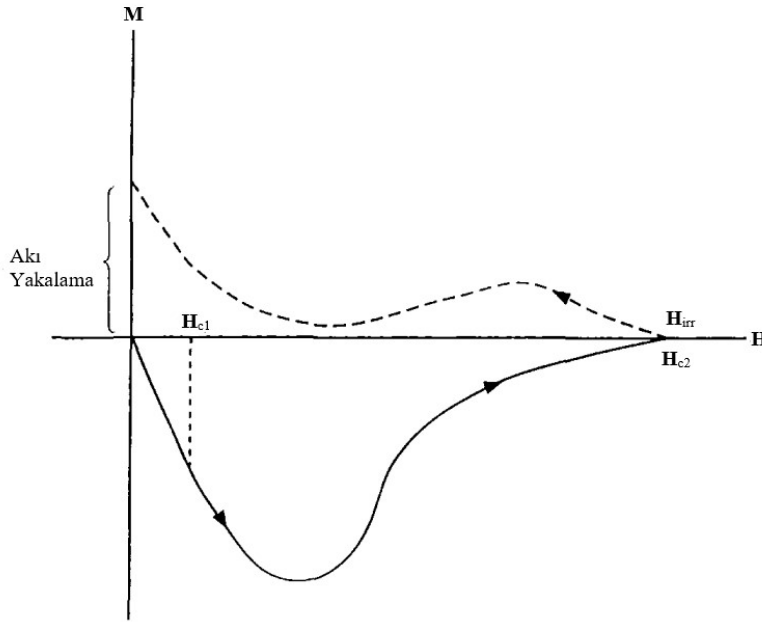
Ancak gerçek malzemeler, idealize edilmiş eğrinin gösterdiği tam bir geri çekilmeyi sergilemezler. Yapısal kusurlar veya kimyasal kirlilikler, akı çizgilerinin kristal boyunca serbestçe hareket etmesini engeller; bu duruma akı çivilemesi denir. 1960'lara gelindiğinde, niyobyum bileşiklerinin kristal kusurlu bölgelerde akı çizgilerini çivilediği iyi biliniyordu. Bu durum bilim insanlarının pratik hedefini, yüksek manyetik alanlarda yüksek akımların aktığı durumlar için mümkün olduğunca çok çivileme bölgesi eklemeye odakladı.

Çivileme olgusunu daha iyi anlamak amacıyla Farrell ve ekibi, çivilemeyi en aza indirmeyi amaçlayan özel kurşun-indiyum alaşımları (ultra yumuşak bir süperiletken) üzerinde çalıştılar ( Farrell ve ark., 1969). En iyi sonucu elde edebildikleri durum, Şekil 8'de gösterildiği gibi görünüyordu: **H**'yi  $H_{c2}$ 'ye yükselttikten sonra, **M**'ye karşı **H**'nin azalan yolu, yukarı doğru kademeli olarak saptı; bu sapma neredeyse en büyüktü. Özellikle  $H_{c1}$  civarında uygulanan **H** alanı tamamen sıfıra indirildiğinde, malzemede hapsolmuş bir miktar akı bulunuyordu ve bu, küçük bir artık mıknatıslanma **M**'ye neden oluyordu, bu da kalıcı bir mıknatısla benzer bir davranış sergiliyordu. 1970 yılına gelindiğinde, J. E. Evetts, bu durumun faz sınırlarındaki, özellikle yüzeydeki çivilemeye atfedilebileceğini gösterdi (Evetts J.E., 1970). Bu nedenle, tip II süperiletkenlerde bir miktar akı çivilemesi pratik olarak kaçınılmazdır ve çoğu pratik uygulama için büyük miktarlarda çivileme merkezleri arzu edilir.



Şekil 8. Mükemmele yakın kanonik tip II mıknatıslanma davranışı (Sheahen, 2002).

Şekil 8’de neredeyse hiç çivileme olmadan mükemmele yakın kanonik tip II mıknatıslanma davranışı grafiği görülmektedir. Akı çivilemesi nedeniyle, mıknatıslanmanın dönüş yolu ( $H$  alanı ilk önce  $H_{c2}$  'ye yükseltilip sonra azaltıldığında) ileri yoldan farklıdır. Sıfır uygulanan alanda bile az miktarda mıknatıslanma kalır (Sheahen, 2002).



Şekil 9. Çivilenmiş (pinning) tip II histeresiz eğrisi (Sheahen, 2002).

Şekil 9’da Çivileme ile gerçekçi tip II histeresiz eğrisi gösterilmiştir. İyi tasarlanmış bir tip II süperiletken çok büyük bir akı sabitlemesine sahiptir, bu da  $J_c$  'nin büyük olmasını sağlar ve mıknatıslanma diyagramında geri dönüş yolunun ileri yoldan önemli ölçüde uzaklaşmasına neden olur. Tersinmezliğin olduğu alan  $H_{irr}$ , hemen hemen  $H_{c2}$  ile aynıdır (Sheahen, 2002).

Daha gerçekçi bir Tip II süperiletken, Şekil 9'da gösterilen Şekilde daha karmaŐık bir manyetik geçmiŐe sahiptir. İlk olarak,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{H}_{c1}$ 'den geereken  $\mathbf{M}$  mıknatıslanmasında ani bir deėiŐiklik meydana gelmez; bu, yalnızca  $\mathbf{M}$ - $\mathbf{H}$  eğrisinin doğrusallığından sapmanın, diyamanyetizmanın mkemmelenmadığını ve bir miktar akının malzemeye nüfuz ettiğini gösterir. Sonunda,  $\mathbf{H}$ 'nin artması akının yoğun bir Şekilde malzemeye girmesine yol açar,  $\mathbf{M}$  azalır ve  $\mathbf{H}_{c2}$ 'de nüfuz etme tamamlandığında malzeme normale döner. Süperiletken durumunda, akının büyük bir kısmı süperiletkenin içinde çivilenir.  $\mathbf{H}$  azaldıkça,  $\mathbf{B}$  yüksek kalır ve  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$  olduğundan, bu  $\mathbf{M}$ 'nin pozitif bir değere yükseldiği anlamına gelir.  $\mathbf{H}$ 'deki daha fazla azalmaya, malzemedeki akının sıkıŐması nedeniyle  $\mathbf{H}=0$  olduğunda bile  $\mathbf{B}$ 'deki deėiŐiklikler eŐlik eder. Bu kalıcı manyetizma sıcaklık deėiŐene kadar varlığını sürdürecektir.



## 2. BiSrCaCuO SÜPERİLETKEN SİSTEMİ (BSCCO)

### 2.1. BiSrCaCuO Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni (BSCCO)

Micheal ve arkadaşları, 1987 yılında, Bi-Sr-Cu-O süperiletken sistemini buldular (Micheal ve ark., 1988). Yapılan çalışmalar sonucunda BSCCO sistemin genel formülü  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+y}$  olarak belirlendi. Burada CuO düzleminin sayısı n ile gösterilmiştir. Kritik geçiş sıcaklığı ile CuO'daki düzlem sayısı arasında doğru orantı vardır.

Akimutsu ve arkadaşları n=1 olarak  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  (2201 fazı) Kritik geçiş sıcaklığını 20 K'den düşük olarak buldular. 1988 yılında Maeda ve arkadaşları n=2 olarak  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  (2212 fazı) kritik geçiş sıcaklığını 85 K olarak buldular. 1988 yılında Tarascon ve arkadaşları n=3 olarak  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  (2223 fazı) kritik geçiş sıcaklığını 110 K olarak buldular (Tarascon ve ark., 1988). Burada n=1 ve n=2 için tek faz elde edilebilirken n=3 için tek faz elde etmek çok zordur (Maeda ve ark., 1990). BSCCO sistemi genelde ortorombik veya tetragonal bir yapıya sahiptir.

#### 2.1.1. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ (2201 Fazının) oluşumu

Kritik geçiş sıcaklığı 20 K civarında olan faz BSCCO ailesinin en düşük geçiş sıcaklığına sahip fazıdır. Burada Sr ve CuO tabakaları iki BiO tabakasına sıkışmış durumdadır. 2201 fazında Ca atomu bulunmamaktadır ve BiO/SrO/CuO/SrO/BiO şeklinde bir yapıya sahiptir. Dokuz tane oksijen atomu stronsiyum atomuna komşudur. Bu faz genel olarak tetragonal bir yapıya sahiptir fakat bazen ortorombik yapı özelliği de gösterir. Tetragonal yapı için  $a=b=5.4 \text{ \AA}$ ,  $c=24.4 \text{ \AA}$ , ortorombik yapı için  $a=3.9 \text{ \AA}$ ,  $b=3.9 \text{ \AA}$  ve  $c=24.4 \text{ \AA}$ 'dur. İki BiO (Bi-Bi) düzlemi arası uzaklık  $3.1 \text{ \AA}$ , BiO-SrO tabakaları arası uzaklık  $2.9 \text{ \AA}$  ve SrO-CuO arasındaki uzaklık ise  $1.7 \text{ \AA}$ 'dur (Tablo1).

Tablo 2. Bi-2201 fazında bulunan süperiletken sistem için bağ uzunluğu ve her bir düzlemde bulunan en yakın oksijen sayısı

Bağ	Bağ Uzunluğu (Å)	Oksijen Sayısı
Cu-O (1)	1.90	4
Cu-O (2)	2.58	2
Bi-O (2)	2.00	1
Bi-O (3)	2.20	1
	2.70	2
	3.21	1
	3.28	1
Sr-O (1)	2.53	2
	2.94	2
Sr-O (2)	2.95	1
	2.81	2
	2.68	1
Sr-O (3)	2.87	1

### 2.1.2. Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (2212 Fazının) oluşumu

n=2 için 2212 fazına ait T<sub>c</sub> değerleri 80 - 90 K arasındadır. 2201 fazı ile 2212 bazı arasındaki en önemli fark Sr/Cu/Sr sıralamasında görülür. Ca atomu iki CuO düzlemi arasına yerleştirilir. 2201 fazında BiO/SrO/CuO/SrO/BiO şekilde yapı 2212 fazında BiO/SrO/CuO/Ca/CuO/SrO/BiO şeklinde yapıya sahip olur. Bu yapıda Kare piramidin köşelerine yerleşmiş beş oksijen atomu Bakır atomunu çevrelemiştir. Birim hücredeki CuO düzlemi iki tanedir. (Tablo 2). Birim hücre bu fazda Ortorombik ve Tetragonal yapıya sahiptir. Burada Ortorombik kristal yapıda birim hücre değerleri a=5.39 Å, b=5.41 Å, c=30.8 Å şeklindedir. Tetragonal kristal yapıda ise a=5.39 Å, b=5.39 Å ve c=30.6 Å olur.

Tablo 3. Bi-2212 fazında bulunan süperiletken sistem için bağ uzunluğu ve her bir düzlemde bulunan en yakın oksijen sayısı

Bağ	Bağ Uzunluğu (Å)	Oksijen Sayısı
Ca-O (1)	2.52	8
Cu-O (1)	1.91	4
Cu-O (2)	2.16	1
Bi-O (2)	2.22	1
Bi-O (3)	2.71	4
	2.97	1
Sr-O (1)	2.56	4
Sr-O (2)	2.74	4
Sr-O (3)	2.91	1

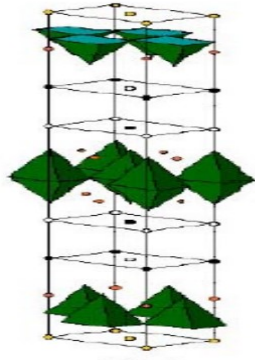
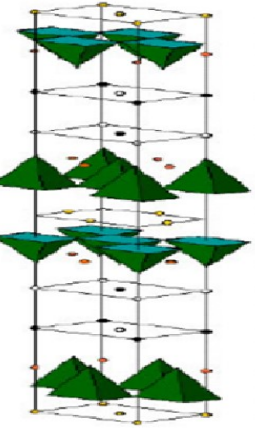
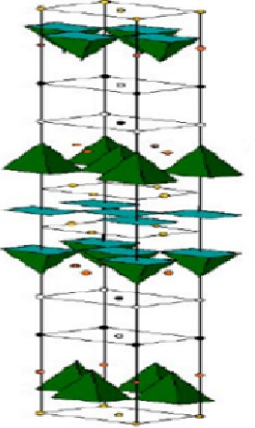
### 2.1.3. Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> (2223 Fazının) oluşumu

BSCCO ailesinin en yüksek geçiş sıcaklığına sahip olan fazın kritik geçiş sıcaklığı 110 K civarındadır. Bu fazda BiO tabakaları arasında üç adet CuO ve iki adet CaO bulunur. Dış tarafta ise Cu atomları kare piramit biçimde dört oksijen atomuyla ve CaO tabakaları arasında ise kare biçiminde sıralanmış oksijen atomları bakır atomunu çevirmiştir. Bu fazda birim hücre tetragonal yapıya sahiptir ve birim hücre değerleri a=5.4 Å, b=5.4 Å ve c=37.1 Å'dır. 2212 fazındaki ortaya çıkan parametreler Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 4. Bi-2223 fazında bulunan süperiletken sistem için bağ uzunluğu ve her bir düzlemde bulunan en yakın oksijen sayısı

Bağ	Bağ Uzunluğu (Å)	Oksijen Sayısı
Ca-O(1)	2.48	8
Cu(1)-O(1)	1.91	4
Cu(1)-O(2)	2.31	1
Cu(2) -O(1)	1.91	4
Sr-O(1)	2.65	4
Sr-O(2)	2.77	4
Sr-O(3)	2.99	1
Bi-O(2)	2.03	1
Bi-O(3)	1.87	1
	2.77	2
	3.35	1
	3.15	1
	3.82	1

Tablo 5. BiSrCaCuO süperiletken sistemi (BSCCO) için özet tablosu

n Değeri	Formül $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{-1Cu}_n\text{O}_{2n+4}$	Faz	$T_c$	Buluş Yılı	Bulan Kişi	a,b,c	Kristal Yapı	
n=1	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$	2201 Fazı	20 K	1987	Micheal ve arkadaşları	Tetragonal a=5.4 Å b=5.4 Å c=24.4 Å	Ortorombik a=3.9 Å b=3.9 Å c=24.4 Å	 <p>CaO CuO<sub>2</sub> SrO BiO BiO SrO CuO<sub>2</sub> SrO BiO BiO SrO CuO<sub>2</sub> CaO</p> <p><b>2201</b></p>
n=2	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	2212 Fazı	85 K	1988	Maeda ve arkadaşları	Tetragonal a=5.39 Å b=5.39 Å c=30.6 Å	Ortorombik a=5.39 Å b=5.41 Å c=30.8 Å	 <p>CaO CuO<sub>2</sub> SrO BiO BiO SrO CuO<sub>2</sub> CaO CuO<sub>2</sub> SrO BiO BiO SrO CuO<sub>2</sub> CaO</p> <p><b>2212</b></p>
n=3	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	2223 Fazı	110 K	1988	Tarascon ve arkadaşları	Tetragonal a=5.4 Å b=5.4 Å c=37.1 Å	 <p>CaO CuO<sub>2</sub> SrO BiO BiO SrO CuO<sub>2</sub> CaO CuO<sub>2</sub> CaO CuO<sub>2</sub> SrO BiO BiO SrO CuO<sub>2</sub> CaO</p> <p><b>2223</b></p>	

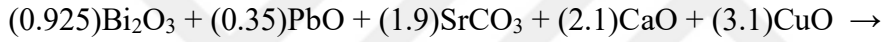
### 3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Erbiyum Katkılı BSCCO Numunelerinin Katıhal Tepkime Yöntemiyle Üretimi

BSCCO yüksek sıcaklık süperiletkeninde Bi-2223 fazının üretimini yapılırken, Bi-2201 ve Bi-2212 fazıda oluşabilir. Üç fazın etkisiyle sistemin tek bir fazda birleşmesini engelleyen enerjiler vardır. Grivel 1996 yılında, yapmış olduğu çalışmada Bi bölgesine kısmen Pb eklenerek Bi-2223 fazının kararlılığında önemli bir iyileştirme olduğunu gösterdi (Grivel vd., 1996).

##### 3.1.1. S1 Numunesinin ( $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_{2.1}\text{Cu}_{3.1}\text{O}_{10+\delta}$ ) Üretilmesi

$\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_{2.1}\text{Cu}_{3.1}\text{O}_{10+\delta}$  bileşiğini hazırlamak için  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{CuO}$  tozları ve aşağıdaki kimyasal tepkime kullanıldı.



2 gram numune hazırlamak için:

$$\text{Bileşik Miktarı} = [(Katsayı * \text{Molekül Ağırlığı}) * \text{Miktar}] / \text{Toplam}$$

formülü kullanıldı. Buna göre aşağıdaki tablo oluşturuldu.

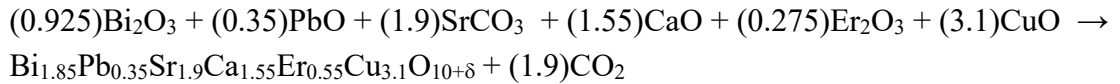
Tablo 6. S1 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları

Adı	Sembolü	Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Bileşik Miktarı (g)
Bizmut(III) oksit	$\text{Bi}_2\text{O}_3$	99.90	465.96	0.74699
Stronsiyum karbonat	$\text{SrCO}_3$	99.90	147.63	0.13539
Kurşun monoksit	$\text{PbO}$	99.90	223.20	0.48613
Kalsiyum oksit	$\text{CaO}$	99.90	56.08	0.20410
Bakır(II) oksit	$\text{CuO}$	99.99	79.55	0.42739
<b>TOPLAM</b>				<b>2</b>

2 gram numune üretebilmek için tabloda belirtilen stokiyometrik oranda hazırlanan tozlar agat havana konularak 1 saat homojen bir karışım elde edilinceye kadar öğütüldü. Öğütülen tozlar alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pota içine konularak kalsinasyon işlemine hazır hale getirildi.

### 3.1.2. S2 Numunesinin (Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>Ca<sub>1.55</sub>Er<sub>0.55</sub>Cu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub>) Üretilmesi

Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>Ca<sub>1.55</sub>Er<sub>0.55</sub>Cu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub> bileşiğini hazırlamak için Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrCO<sub>3</sub>, PbO, CaO, CuO ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ve aşağıdaki kimyasal tepkime kullanıldı.



2 gram numune hazırlamak için:

$$\text{Bileşik Miktarı} = [(Katsayı * \text{Molekül Ağırlığı}) * \text{Miktar}] / \text{Toplam}$$

formülü kullanıldı. Buna göre aşağıdaki tablo oluşturuldu.

Tablo 7. S2 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları

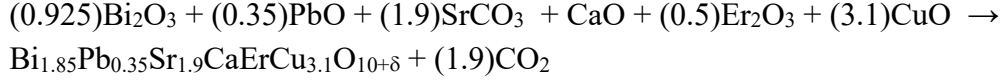
Adı	Sembolü	Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Bileşik Miktarı (g)
<b>Bizmut(III) oksit</b>	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	465.96	0.70891
<b>Stronsiyum karbonat</b>	SrCO <sub>3</sub>	99.90	147.63	0.46135
<b>Kurşun monoksit</b>	PbO	99.90	223.20	0.12849
<b>Kalsiyum oksit</b>	CaO	99.90	56.08	0.13836
<b>Bakır(II) oksit</b>	CuO	99.99	79.55	0.40561
<b>Erbiyum(III) oksit</b>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	382.52	0.15729
<b>Toplam</b>				2

2 gram numune üretebilmek için tabloda belirtilen Stokiyometrik oranda hazırlanan tozlar agat havana konularak 1 saat homojen bir karışım elde edilinceye

kadar öğütüldü. Öğütülen tozlar alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pota içine konularak kalsinasyon işlemine hazır hale getirildi.

### 3.1.3. S3 Numunesinin (Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>CaErCu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub>) Üretimi

Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>CaErCu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub> bileşimini hazırlamak için Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrCO<sub>3</sub>, PbO, CaO, CuO ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ve aşağıdaki kimyasal tepkime kullanıldı.



2 gram numune hazırlamak için:

$$\text{Bileşik Miktarı} = [(\text{Katsayı} * \text{Molekül Ağırlığı}) * \text{Miktar}] / \text{Toplam}$$

formülü kullanıldı. Buna göre aşağıdaki tablo oluşturuldu.

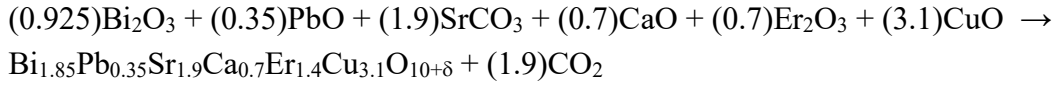
Tablo 8. S3 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları

Adı	Sembolü	Safılık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Bileşik Miktarı (g)
<b>Bizmut(III) oksit</b>	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	465.96	0.67158
<b>Stronsiyum karbonat</b>	SrCO <sub>3</sub>	99.90	147.63	0.43706
<b>Kurşun monoksit</b>	PbO	99.90	223.20	0.12172
<b>Kalsiyum oksit</b>	CaO	99.90	56.08	0.08738
<b>Bakır(II) oksit</b>	CuO	99.99	79.55	0.38425
<b>Erbium(III) oksit</b>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	382.52	0.29801
<b>Toplam</b>				2

2 gram numune üretebilmek için tabloda belirtilen Stokiyometrik oranda hazırlanan tozlar agat havana konularak 1 saat homojen bir karışım elde edilinceye kadar öğütüldü. Öğütülen tozlar alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pota içine konularak kalsinasyon işlemine hazır hale getirildi.

### 3.1.4. S4 Numunesinin (Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>Ca<sub>0.7</sub>Er<sub>1.4</sub>Cu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub>) Üretilmesi

Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>Ca<sub>0.7</sub>Er<sub>1.4</sub>Cu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub> bileşimini hazırlamak için Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrCO<sub>3</sub>, PbO, CaO, CuO ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ve aşağıdaki kimyasal tepkime kullanıldı.



2 gram numune hazırlamak için:

$$\text{Bileşik Miktarı} = [(Katsayı * \text{Molekül Ağırlığı}) * \text{Miktar}] / \text{Toplam}$$

formülü kullanıldı. Buna göre aşağıdaki tablo oluşturuldu.

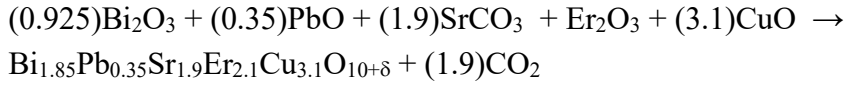
Tablo 9. S4 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları

Adı	Sembolü	Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Bileşik Miktarı (g)
Bizmut(III) oksit	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	465.96	0.64174
Stronsiyum karbonat	SrCO <sub>3</sub>	99.90	147.63	0.41764
Kurşun monoksit	PbO	99.90	223.20	0.11631
Kalsiyum oksit	CaO	99.90	56.08	0.05845
Bakır(II) oksit	CuO	99.99	79.55	0.36718
Erbiyum(III) oksit	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	382.52	0.39868
<b>Toplam</b>				<b>2</b>

2 gram numune üretebilmek için tabloda belirtilen Stokiyometrik oranda hazırlanan tozlar agat havana konularak 1 saat homojen bir karışım elde edilinceye kadar öğütüldü. Öğütülen tozlar alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pota içine konularak kalsinasyon işlemine hazır hale getirildi.

### 3.1.5. S5 Numunesinin (Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>Er<sub>2.1</sub>Cu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub>) Üretilmesi

Bi<sub>1.85</sub>Pb<sub>0.35</sub>Sr<sub>1.9</sub>Er<sub>2.1</sub>Cu<sub>3.1</sub>O<sub>10+δ</sub> bileşimini hazırlamak için Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrCO<sub>3</sub>, PbO, CuO ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ve aşağıdaki kimyasal tepkime kullanıldı.



2 gram numune hazırlamak için:

$$\text{Bileşik Miktarı} = [(\text{Katsayı} * \text{Molekül Ağırlığı}) * \text{Miktar}] / \text{Toplam}$$

formülü kullanıldı. Buna göre aşağıdaki tablo oluşturuldu.

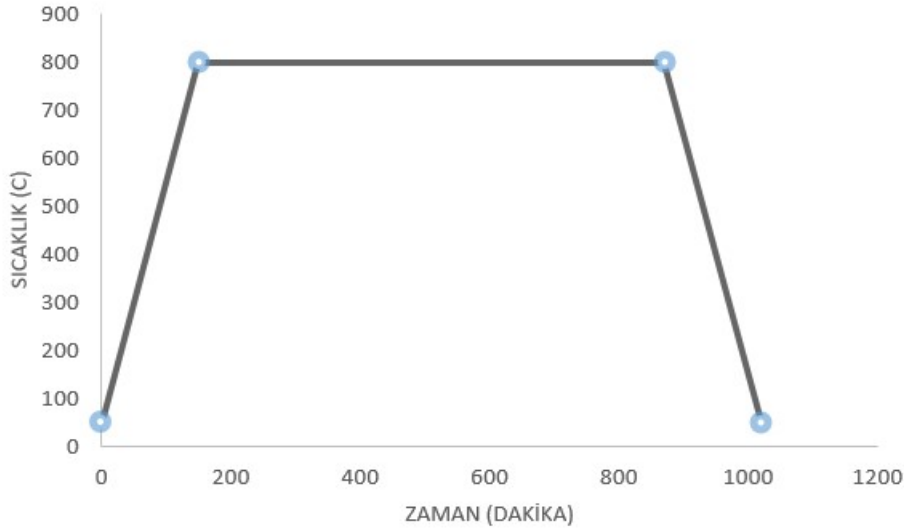
Tablo 10. S5 numunesi hazırlanırken kullanılan toz bileşenler ve bunların miktarları

Adı	Sembolü	Safılık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Bileşik Miktarı (g)
<b>Bizmut(III) oksit</b>	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	465.96	0.60759
<b>Stronsiyum karbonat</b>	SrCO <sub>3</sub>	99.90	147.63	0.39541
<b>Kurşun monoksit</b>	PbO	99.90	223.20	0.11012
<b>Bakır(II) oksit</b>	CuO	99.99	79.55	0.34764
<b>Erbiyum(III) oksit</b>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.90	382.52	0.53923
<b>Toplam</b>				2

2 gram numune üretebilmek için tabloda belirtilen Stokiyometrik oranda hazırlanan tozlar agat havana konularak 1 saat homojen bir karışım elde edilinceye kadar öğütüldü. Öğütülen tozlar alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pota içine konularak kalsinasyon sürecine hazır edildi.

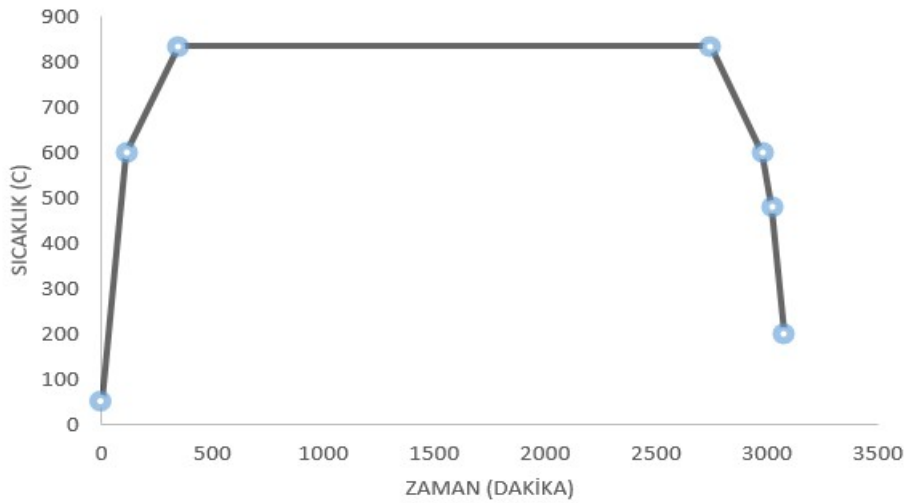
### 3.2. Üretilen Numelerin Isıl İşlem Süreci

2 gram olarak öğütülen üretilen numuneler alümina ( $Al_2O_3$ ) pota içinde kare fırına konuldu. Fırının sıcaklığı oda sıcaklığından başlayarak dakikada 5 °C artırıldı ve sıcaklık 800 °C'ye çıkartıldı. Burada numune 12 saat boyunca bu sıcaklık değerinde bekletildi. Sonra tekrar oda sıcaklığına düşürüldü. Kalsine edilen tozlar kare fırından alınarak agat havanda tekrar 1 saat öğütüldü. Öğütülen tozlar alümina potaya konularak kare fırında tekrar aynı süre ve sıcaklıkta 2. kez kalsine edildi.



Şekil 10. Başlangıç tozlarının 1. ve 2. kalsine ısıl işlem grafiği

Kare fırından alınan tozlar tekrar 1 saat süre öğütüldükten sonra 3 ton/cm<sup>2</sup> basınç altında preslenerek tablet haline getirildi. Tablet halindeki numune tekrar alümina potaya konularak 835 °C de silindir fırında oksijen verilerek 2400 dakika süreyle sinterleme işlemi yapıldı.



Şekil 11. Üretilen numunelerin sinterleme grafiği

### 3.3. Üretilen Numelerin XRD Ölçümleri

Hazır hale gelen tablet halindeki numuneler Şekil 12’de görülen BRUKER D8 DISCOVER cihazı ile XRD ölçümleri yapıldı.



Şekil 12. XRD ölçümlerinde kullanılan cihaz

### 3.3. Üretilen Numuların SEM Ölçümleri

Morfolojik özellikleri belirlemek için, Şekil 13’de gösterilen, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri JEOL JSM 6610 cihazı kullanılarak alınmıştır.



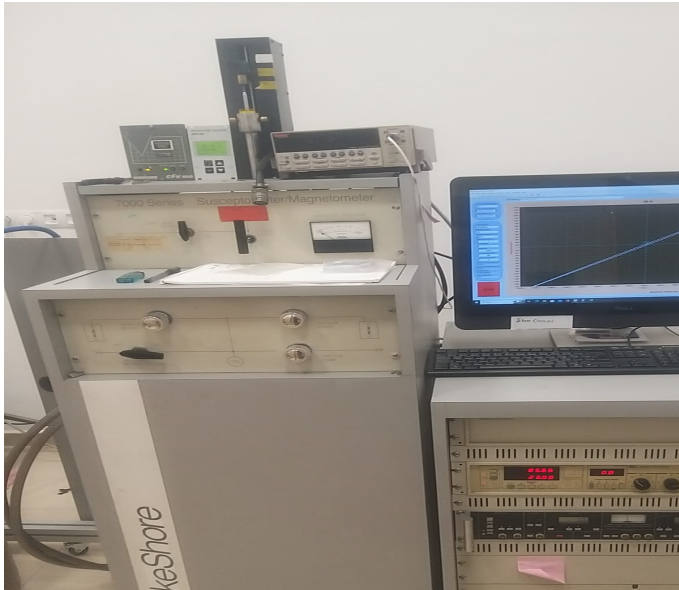
Şekil 13. SEM ölçümlerinde kullanılan cihaz

### 3.4. Üretilen Numunelerin M-H Ölçümleri

Hazır haldeki tablet S1 ve S2 numunelerinin manyetik özelliklerini belirlemede kullanılan veriler Şekil 14’de gösterilen Quantum Design Physical Property Measurement System (PPMS) cihazı kullanılarak alındı. S3, S4 ve S5 numunelerin manyetik özellikleri ise Şekil 15’de görülen Lakeshore 7000 series cihazı ile M-H ölçümleri yapıldı.



Şekil 14. M-H ölçümlerinde kullanılan Quantum Design Physical Property Measurement System (PPMS) cihazı



Şekil 15. M-H ölçümlerinde kullanılan Lakeshore 7000 series cihazı

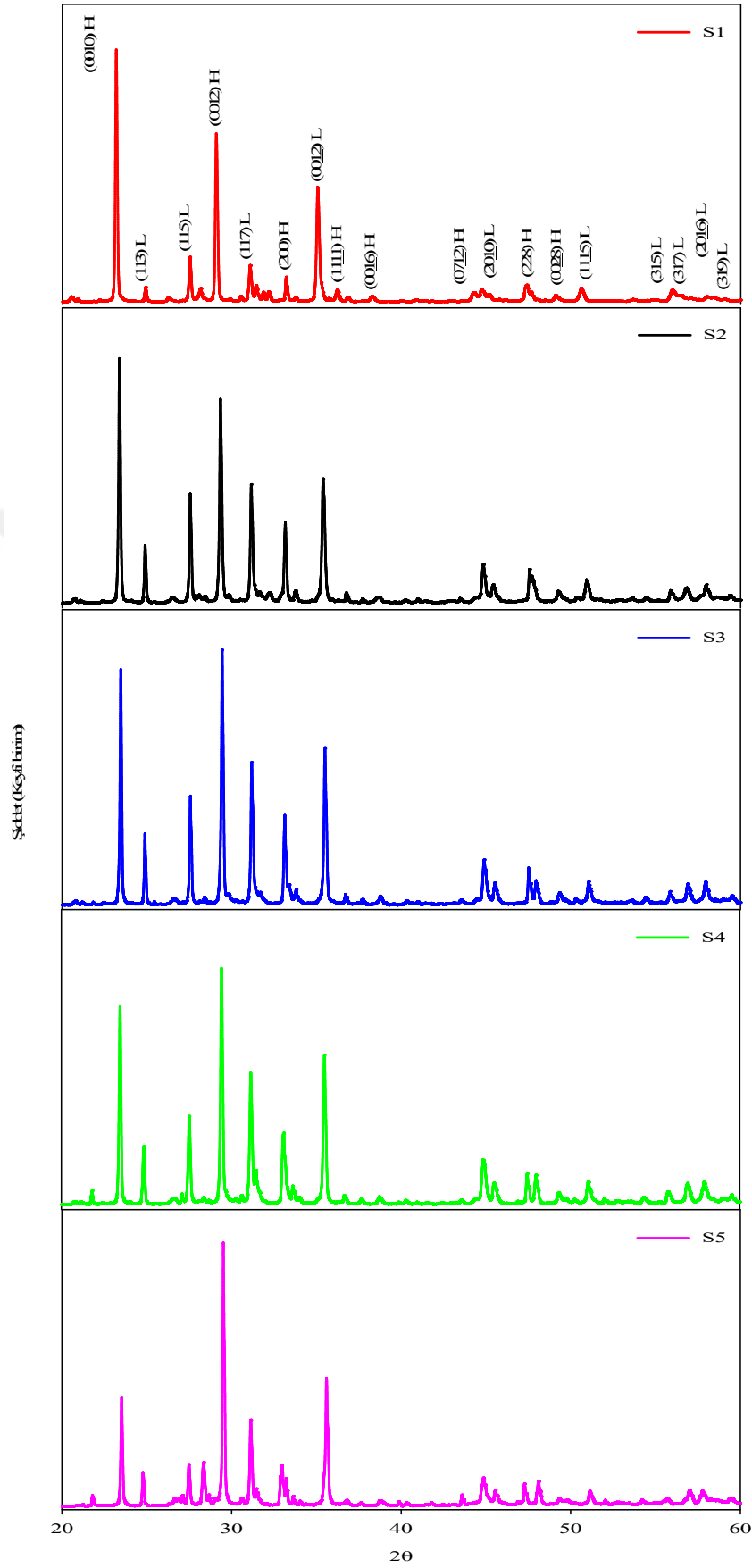
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde,  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_{1,9}\text{Ca}_{2,1}\text{Cu}_{3,1}\text{O}_{10+\delta}$  süperiletken numuneyi (S1) ve farklı oranlarda Er katkılı  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_{1,9}\text{Ca}_{1,55}\text{Er}_{0,55}\text{Cu}_{3,1}\text{O}_{10+\delta}$  (S2) numunesini,  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_{1,9}\text{CaErCu}_{3,1}\text{O}_{10+\delta}$  (S3) numunesini,  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_{1,9}\text{Ca}_{0,7}\text{Er}_{1,4}\text{Cu}_{3,1}\text{O}_{10+\delta}$  (S4) numunesini ve  $\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_{1,9}\text{Er}_{2,1}\text{Cu}_{3,1}\text{O}_{10+\delta}$  (S5) numunesinin yapısal ve manyetik özellikleri incelendi. Üretilen numunelerin, XRD kırınım desenleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri, R-T eğrileri, M-H eğrileri ile Kritik akım yoğunluğu  $J_c$  değerleri araştırıldı.

Tablo 11. Numunelerin boyutları, örgü parametreleri ve birim hücrelerin hacimleri

Numuneler	S1	S2	S3	S4	S5
$D_1$ (mm)	2.42	2.14	2.54	2.17	2.3
$D_2$ (mm)	2.56	2.3	2.36	2.55	2.14
$D_3$ (mm)	2.88	2.7	2.42	2.59	2.63
$a$ (Å)	5.40200	5.39460	5.41000	5.38076	5.39400
$b$ (Å)	5.36400	5.38950	5.46280	5.52360	5.68394
$c$ (Å)	37.03400	30.64900	30.64700	30.64030	30.64200
$V$ (Å <sup>3</sup> )	1073.10900	891.09505	905.73371	910.66544	939.45836

#### 4.1. BSCCO Numunelerine ait XRD Kırınım Desenler



Şekil 16. Numunelerin XRD grafiği

X-Işını Kırınımı desenlerinden, 5 numune içinde, pik değerlerin indekslenmesi XRD PDXL yazılımından faydalanılarak bulundu. Ayrıca piklerin şiddetleri yardımıyla BSCCO süperiletken sistemine ait fazların hacimsel oranları elde edildi.

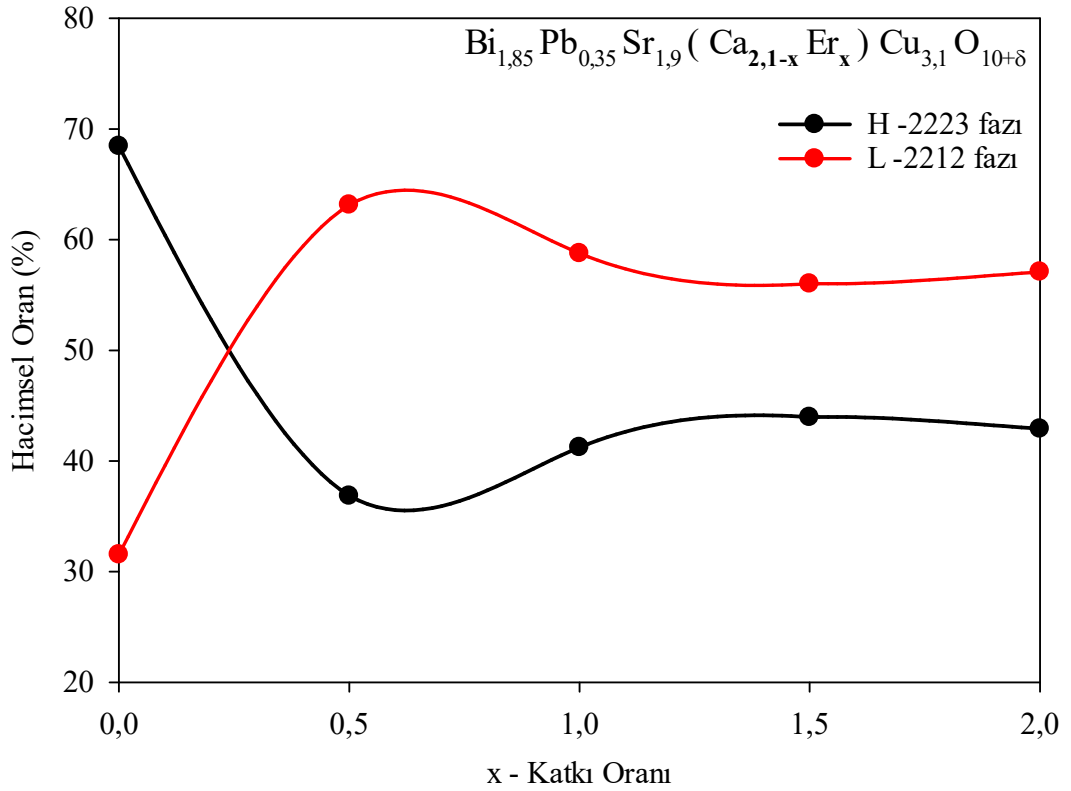
Hacimsel oranın tespitinde kullanılan formüller aşağıda verildi.

$$f_{2223} = \frac{\sum I_{H(hkl)}}{\sum I_{H(hkl)} + \sum I_{L(hkl)}}$$

$$f_{2212} = \frac{\sum I_{L(hkl)}}{\sum I_{H(hkl)} + \sum I_{L(hkl)}}$$

Burada yüksek fazı (2223) ifade eden H ve düşük fazı (2212) ifade eden L indekslemeleri yapılmıştır.  $I_{H(hkl)}$  ve  $I_{L(hkl)}$  parametreleri Bi-2223 ve Bi-2212 fazları için kırınım desenindeki pik çizgilerinin şiddet değerleridir.

Buna göre hem süperiletken özellik gösteren hem de göstermeyen numuneler için Şekil 17'deki grafik çizilebilir. Detaylı veriler Tablo 12'de sunulmuştur.



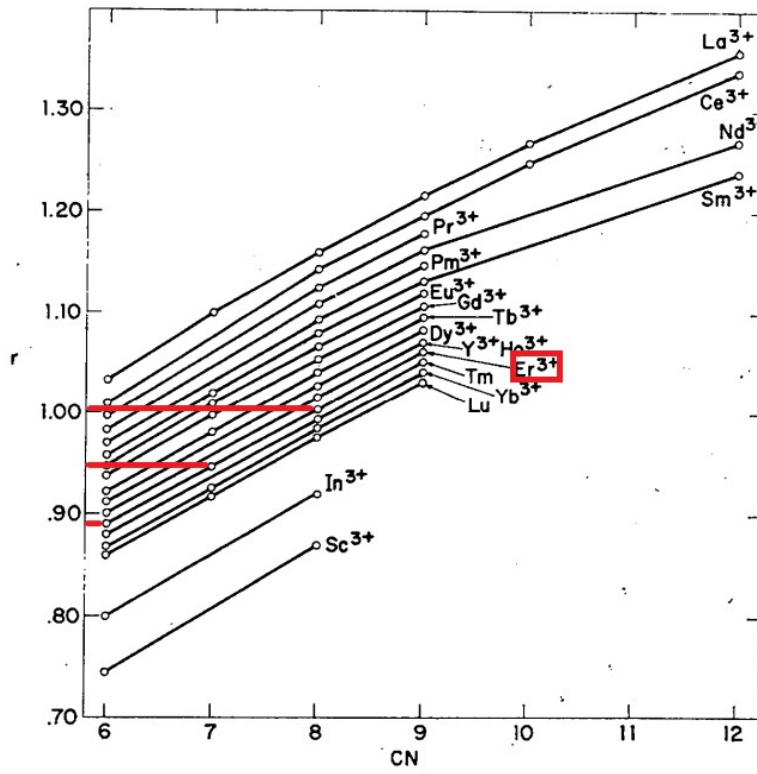
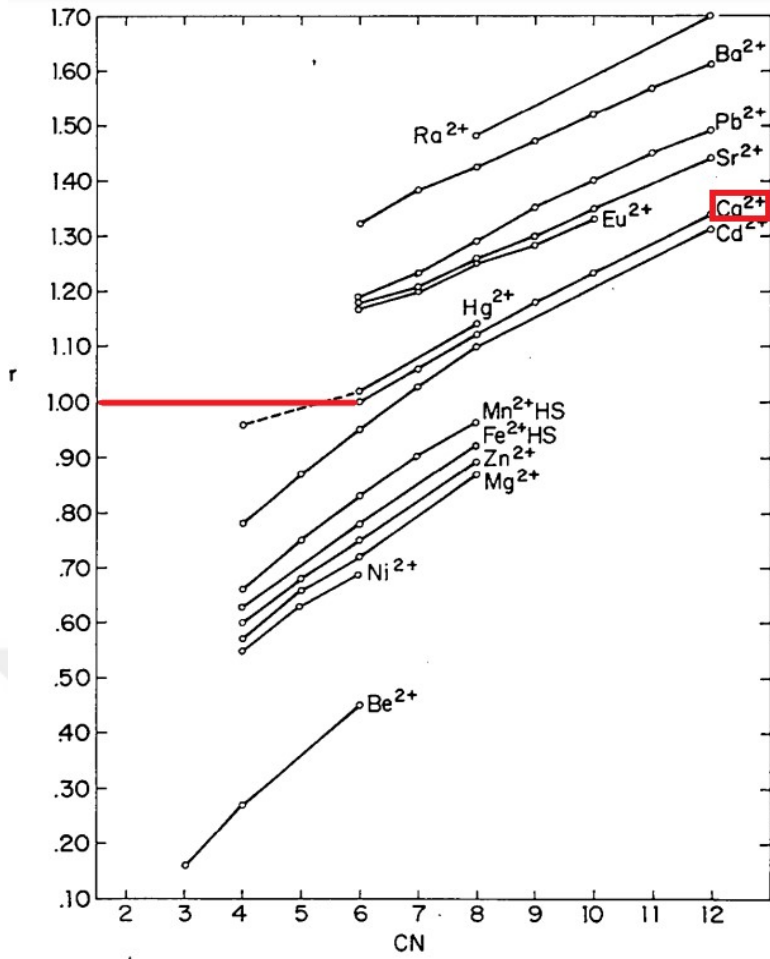
Şekil 17. Numunelerin katkı oranı (x)'e göre fazların hacimsel oranı grafiği

Tablo 12. Süperiletken numunelere ait fazların hacimsel oranı

Bileşiğin Stokiyometrisi	Numune Kodu	X - Katkı oranı	2223 faz oranı (%)	2212 faz oranı (%)
$\text{Bi}_{1,85}\text{Pb}_{0,35}\text{Sr}_{1,9}(\text{Ca}_{2,1-x}\text{Er}_x)\text{Cu}_{3,1}\text{O}_{10+\delta}$	S1	0.0	68.46590	31.53410
	S2	0.5	36.84200	63.15700
	S3	1.0	41.22807	58.77193
	S4	1.5	43.96200	56.03700
	S5	2.0	42.91100	57.08800

Tablo 12’den görüleceği üzere Erbiyum katkısı arttıkça numune yüksek fazdan düşük faza kaymıştır. Oran hemen hemen tersine dönmüştür. Burada alkali metal olan  $\text{Ca}^{+2}$  iyonik yarıçapı 100 pm iken nadir toprak elementlerinden olan  $\text{Er}^{+3}$  iyonik yarıçapı 88.1 pm ’dir. Şekil 18’de gösterilen grafik bazı katyonlar için koordinasyon sayısının (CN) angström boyutunda efektif iyonik yarıçapına göre çizimleri gösteren bir çalışmadır. Shannon tarafından 1976 yılındaki makalesinden alınmıştır (Shannon, R.D., 1976). Burada koordinasyon sayısından kısaca bahsedilecek olunursa, merkezdeki bir atoma temas eden atomların sayısı yahut en yakın komşu atomların sayısıdır. Bu atomun ne şekilde ya da ne kadar yoğun paketlenmiş olduğunu gösterir. Şekil 18’deki grafiklerde  $\text{Ca}^{+2}$  ve  $\text{Er}^{+3}$  iyonlarının farklı koordinasyon sayılarına denk gelecek şekilde iyonik yarıçapları verilmiştir. Örneğin  $\text{Ca}^{+2}$  iyonunun koordinasyon sayısı 6 olduğunda iyonik yarıçapı 1 (Å) yahut 100 pm olduğu görülmektedir. Aynı şekilde  $\text{Er}^{+3}$  iyonu için ise koordinasyon sayısı 6 olduğundan 0.9 (Å) değerine çok yakın olduğu görülmektedir.

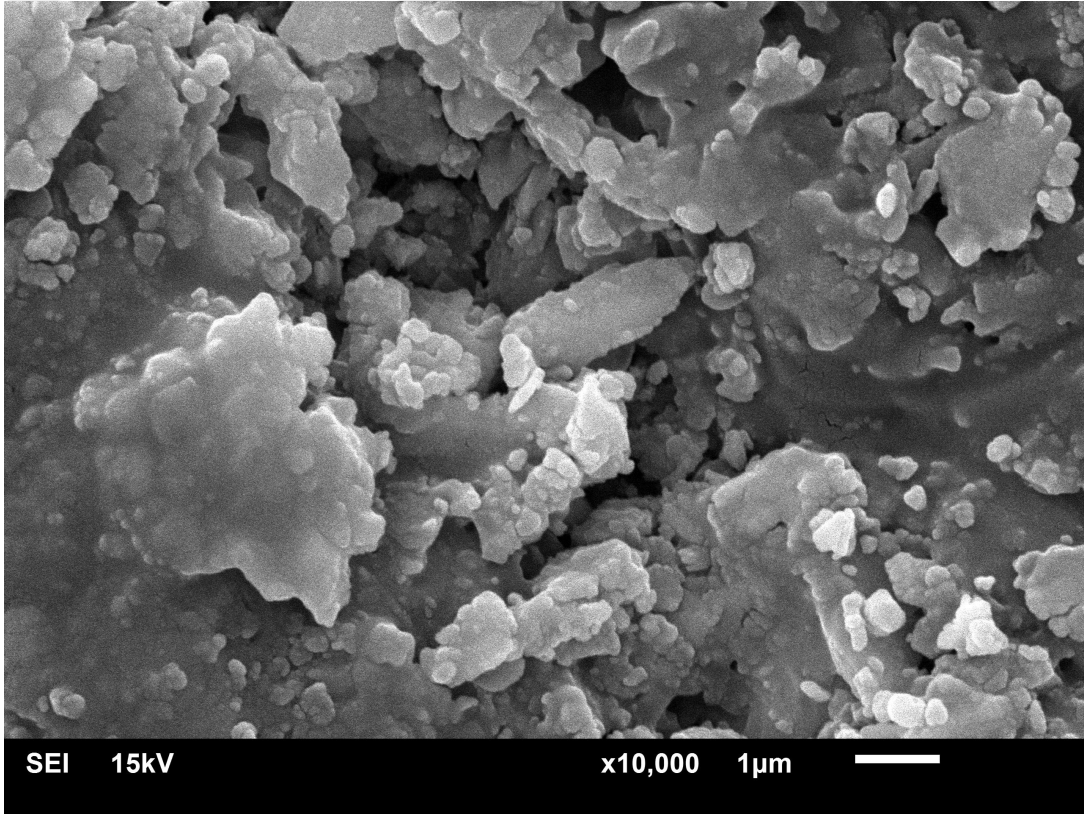
Özetlemek gerekirse, katkılama oranı arttıkça iyonik yarıçap değişmekte ve buda örgü parametrelerinde özellikle “b” parametresinde artışa sebep olduğu Tablo 11’den görülmektedir. Kristal yapıdaki bu değişim X-ışını kırınım desenindeki yüksek faz piklerinde düşüşe, düşük faz piklerinin ise artışına sebebiyet vermektedir. Böylelikle Erbiyum katkı oranının artışı düşük faza doğru kayarak süperiletkenliği bozmaktadır. Burada S1 numunesi 2223 fazına ait olan “c” örgü parametresi değeri olan 37 Å civarında iken diğer numuneler 2221 fazına ait “c” örgü parametrik değeri olan 30 Å değerinde olması bunu göstermektedir.



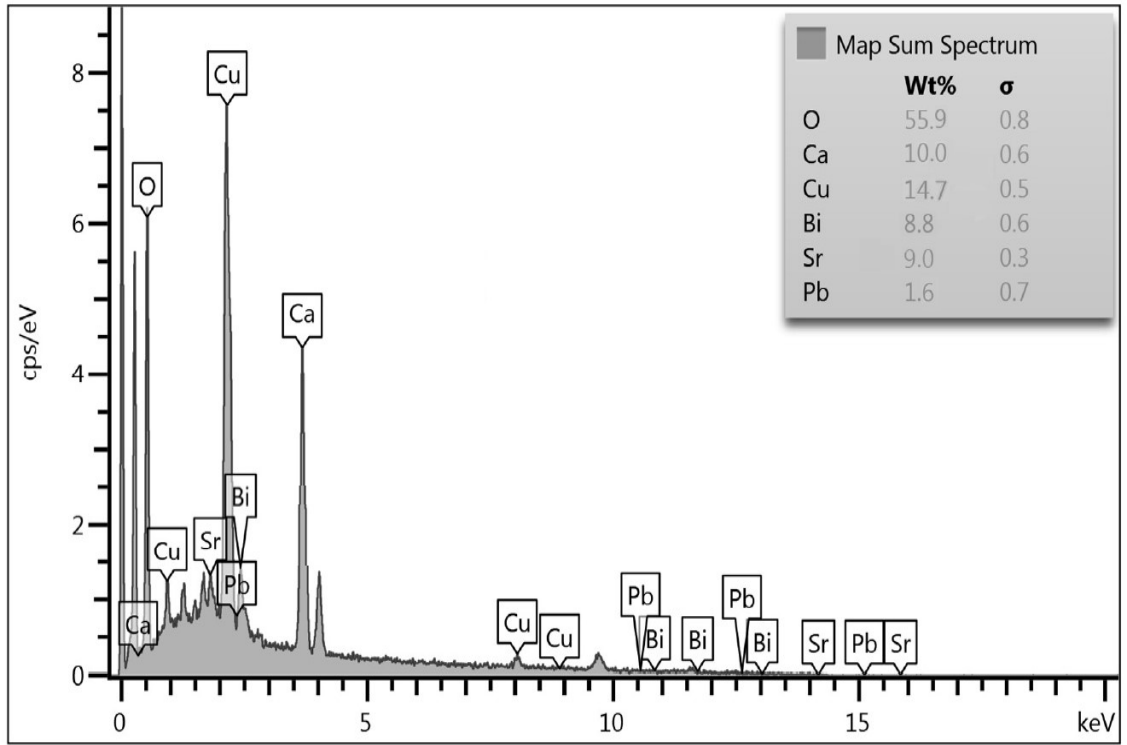
Şekil 18. Bazı katyonların koordinasyon sayısına göre efektif iyonik yarıçapları

#### 4.2. BSCCO Numunelerine Ait SEM ve EDS Grafikleri

Morfolojik özellikleri belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri için JEOL JSM 6610 cihazı kullanılmıştır. Üretilen örneklerin EDS katmanlı görüntüleri, element oranları ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 19-33'de verildi. Şekil 21-24-27-30 ve 33'dan da görüleceği üzere her bir numune için 10.000 büyütme yapılan görüntüleri çekilmiştir. Görüntüler incelendiğinde numunelerin katmanlı yapıda oldukları ve Erbiyum katkılama oranı arttıkça ortalama tane büyüklüklerinin arttığı görülmektedir. Şekil 19-20-22-23-25-26-28-29-31 ve 32'de EDS ölçümlerine bakıldığında S1 numunesi yani katkının bulunmadığı saf numunede Erbiyum bileşenine ait pik gözlenmemiştir. Ayrıca S5 numunesinde de katkı oranı %100 olduğundan Ca pik bileşeni görülmemektedir. Bütün numuneler için EDS ölçümlerinde stokiometrik olarak eklenen bileşenlerin dışında farklı bir safsızlık bileşeni görülmemektedir.

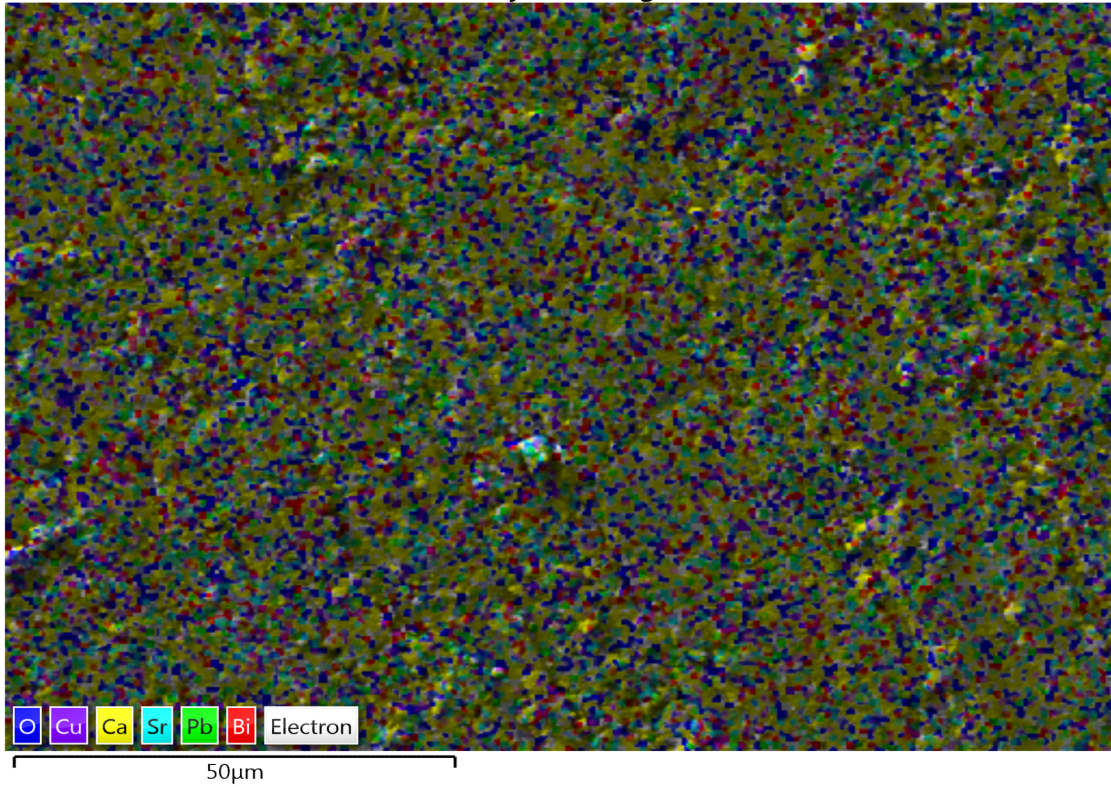


Şekil 19. S1 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM)

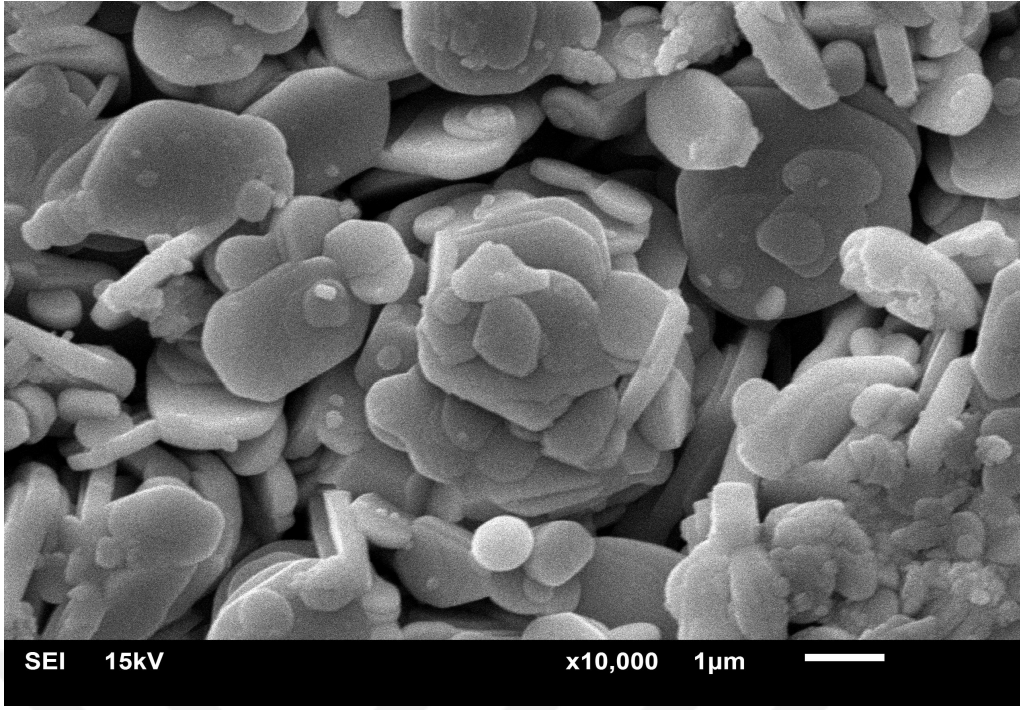


Şekil 20. Taranan S1 numunesinin harita spekturumu

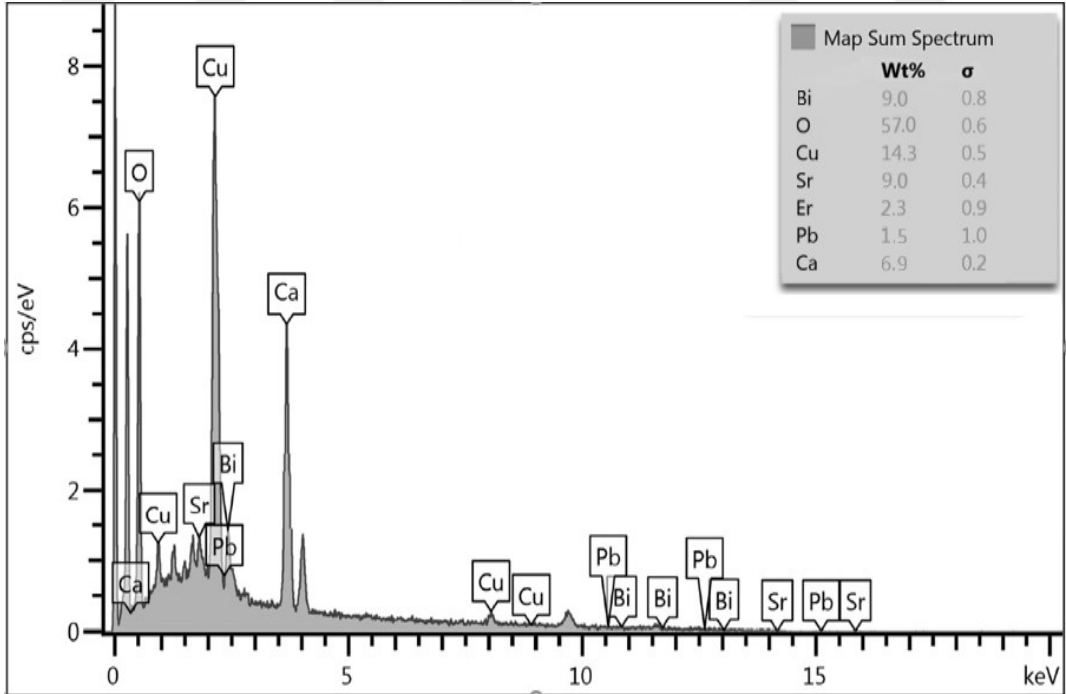
EDS Layered Image 5



Şekil 21. S1 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü

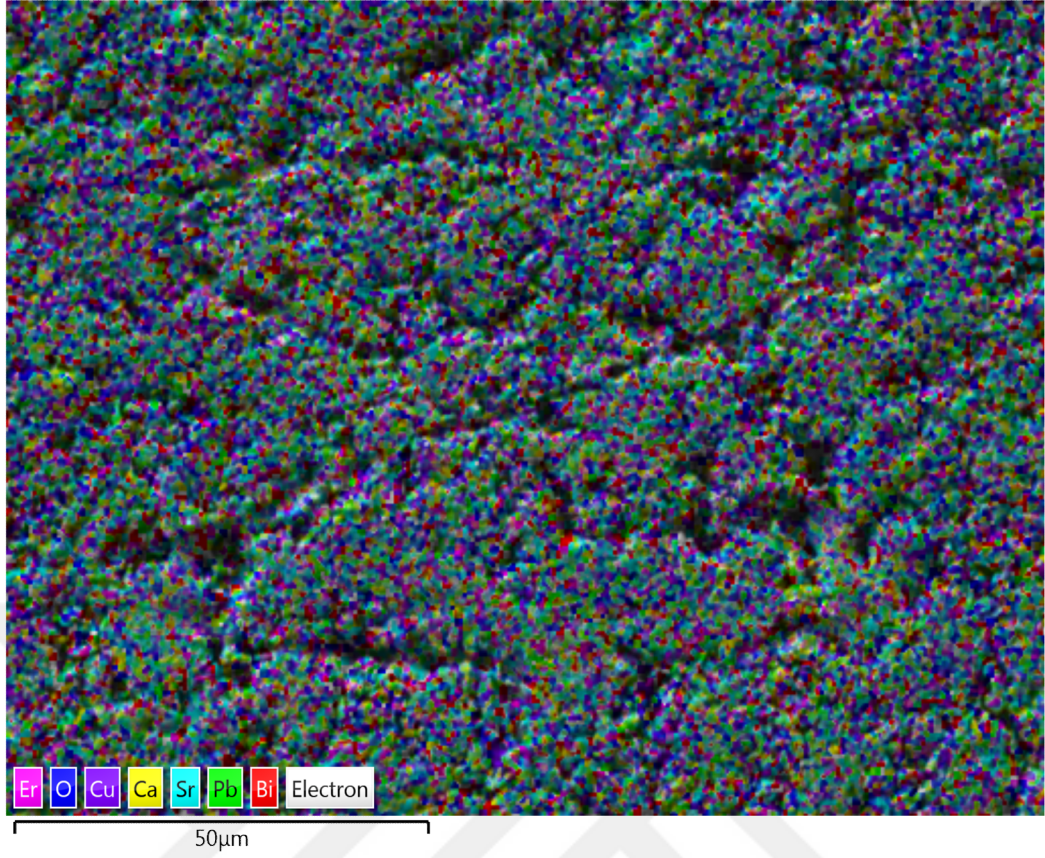


Şekil 22. S2 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM)

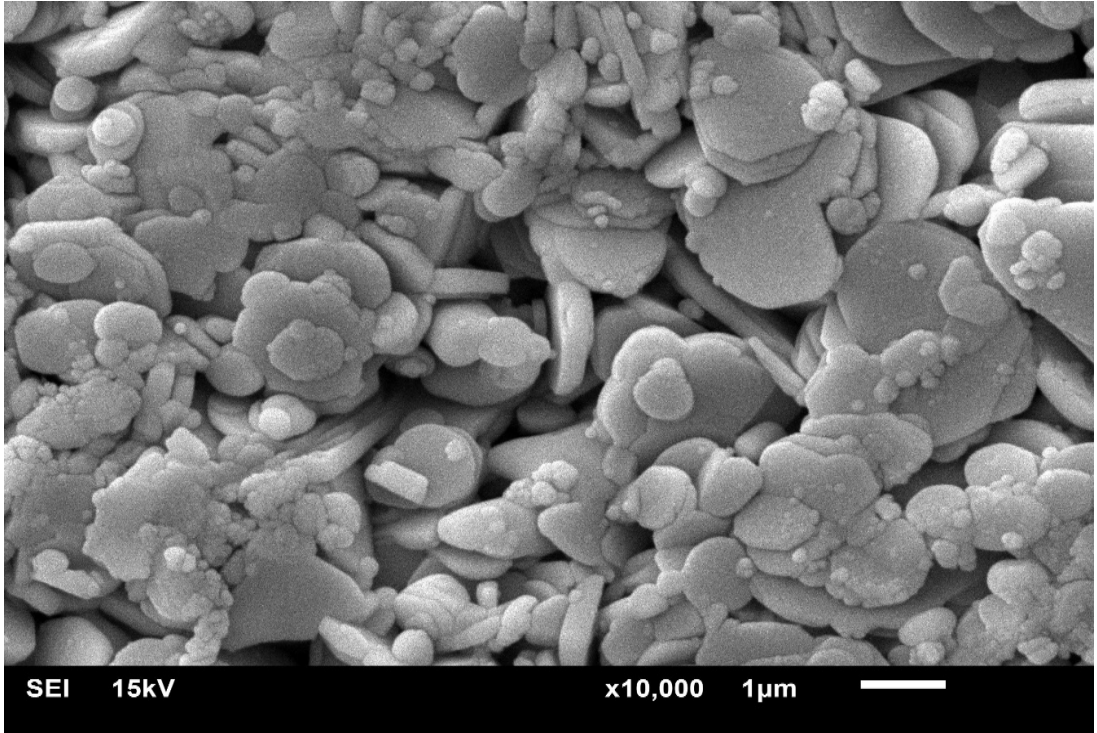


Şekil 23. Taranan S2 numunesinin harita spekturumu

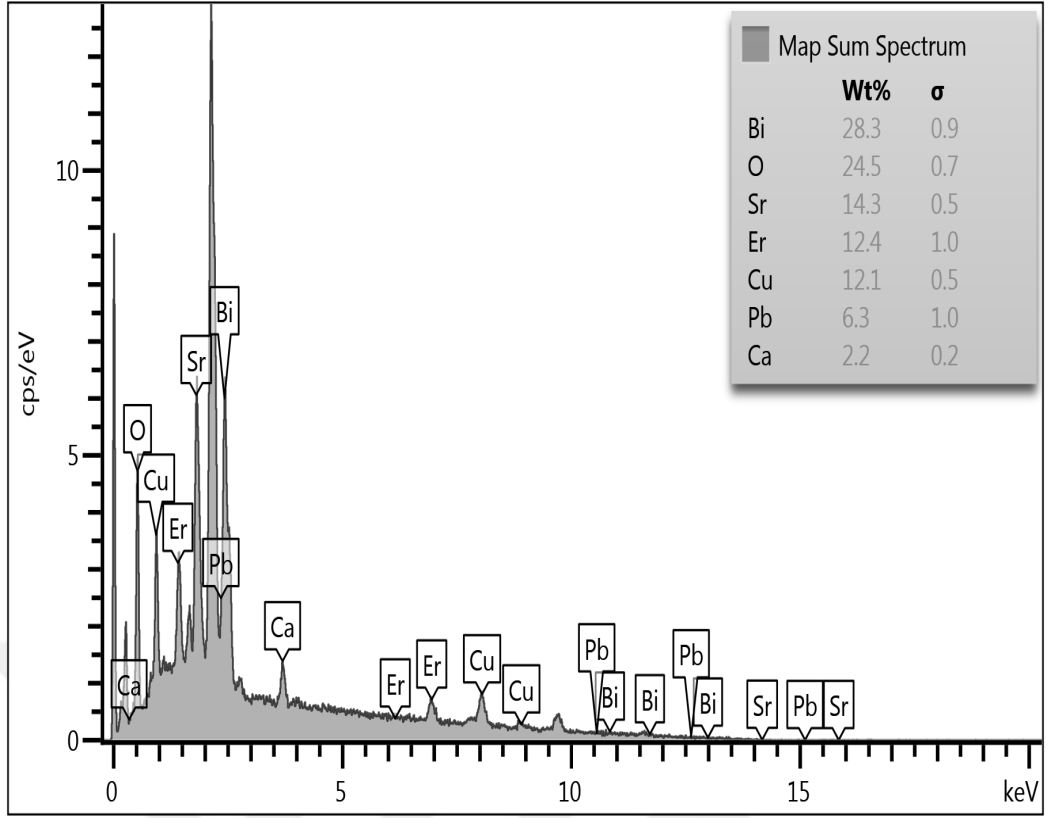
EDS Layered Image 1



Şekil 24. S2 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü

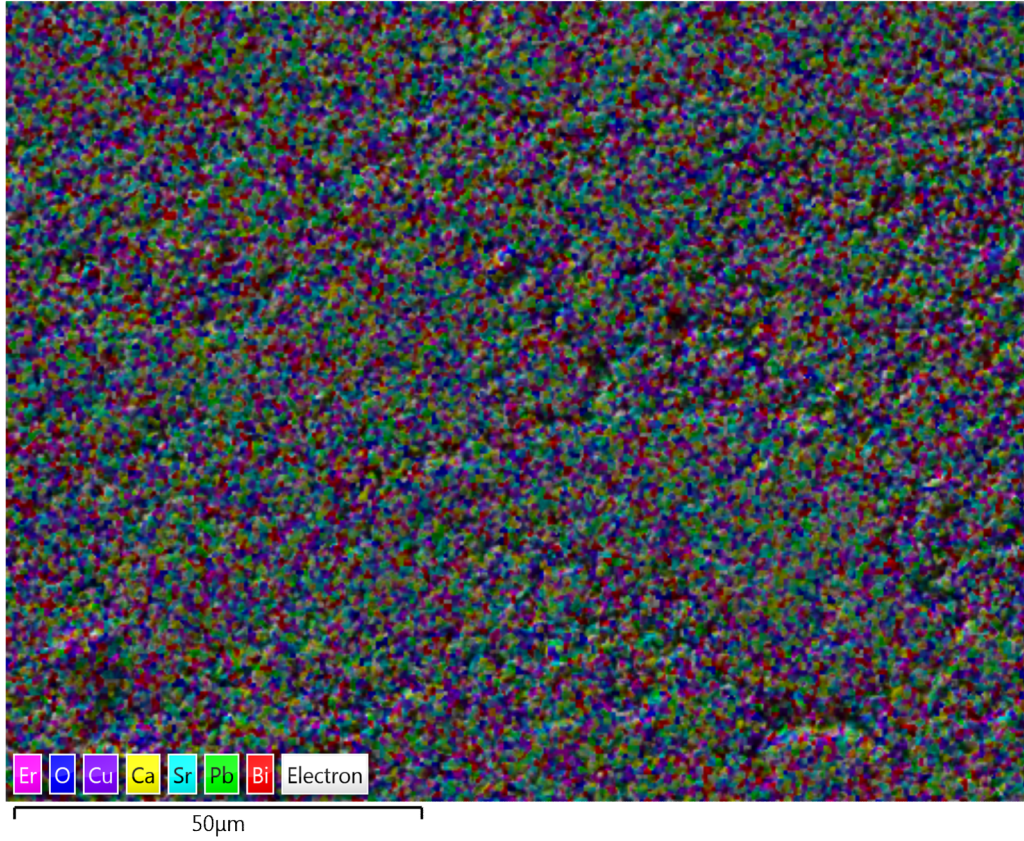


Şekil 25. S3 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM)

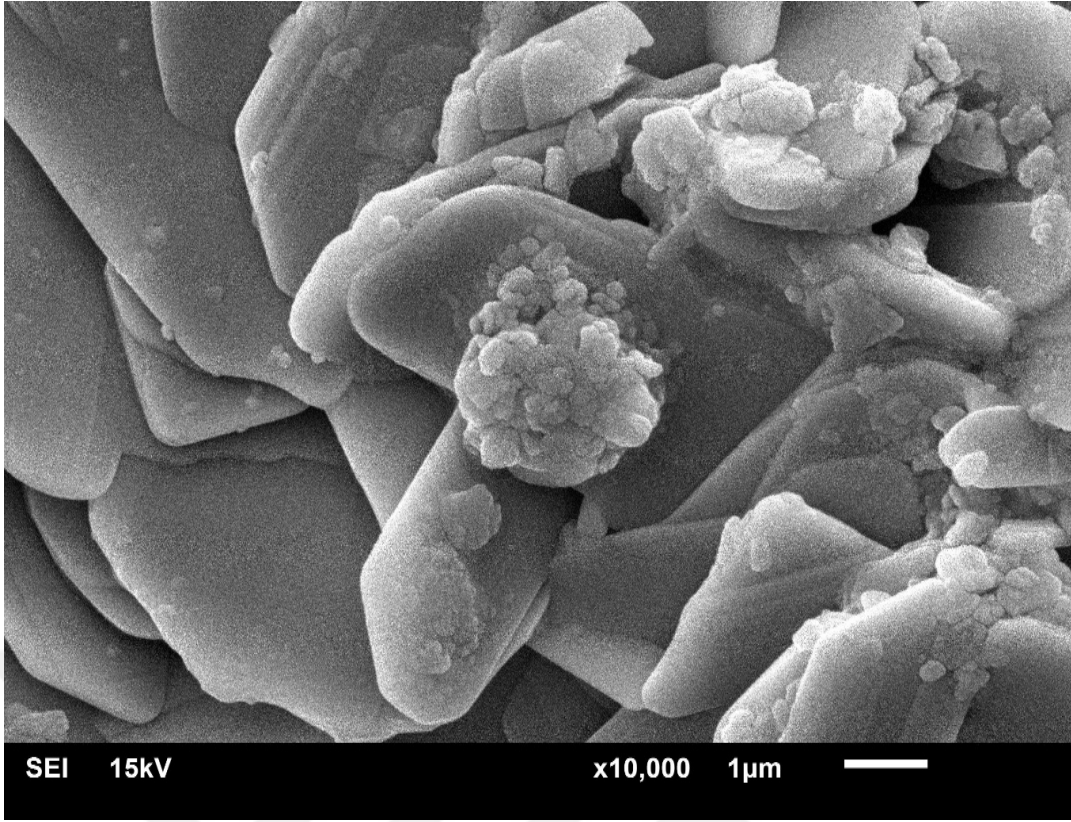


Şekil 26. Taranan S3 numunesinin harita spekturumu

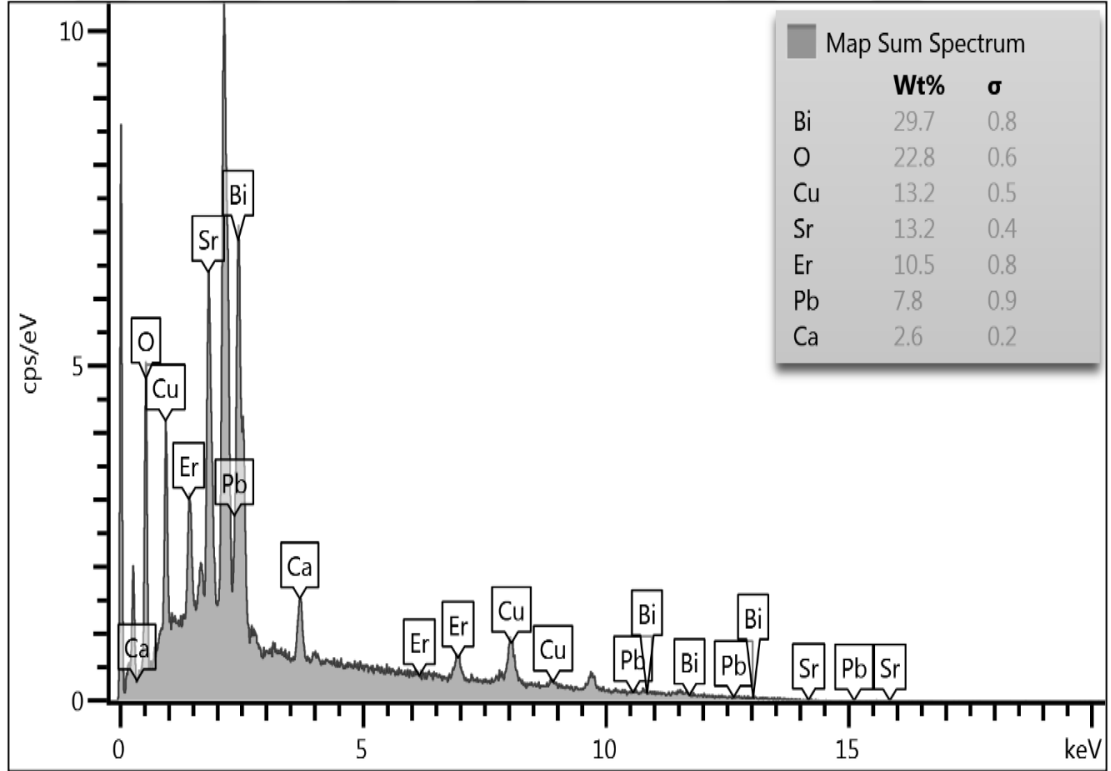
EDS Layered Image 3



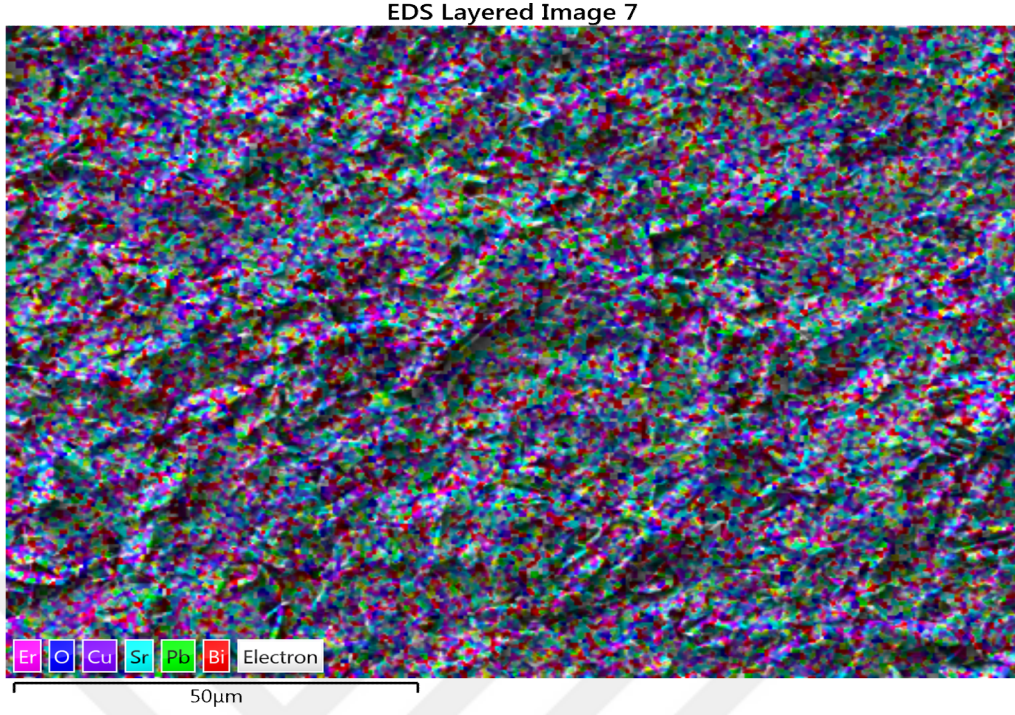
Şekil 27. S3 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü



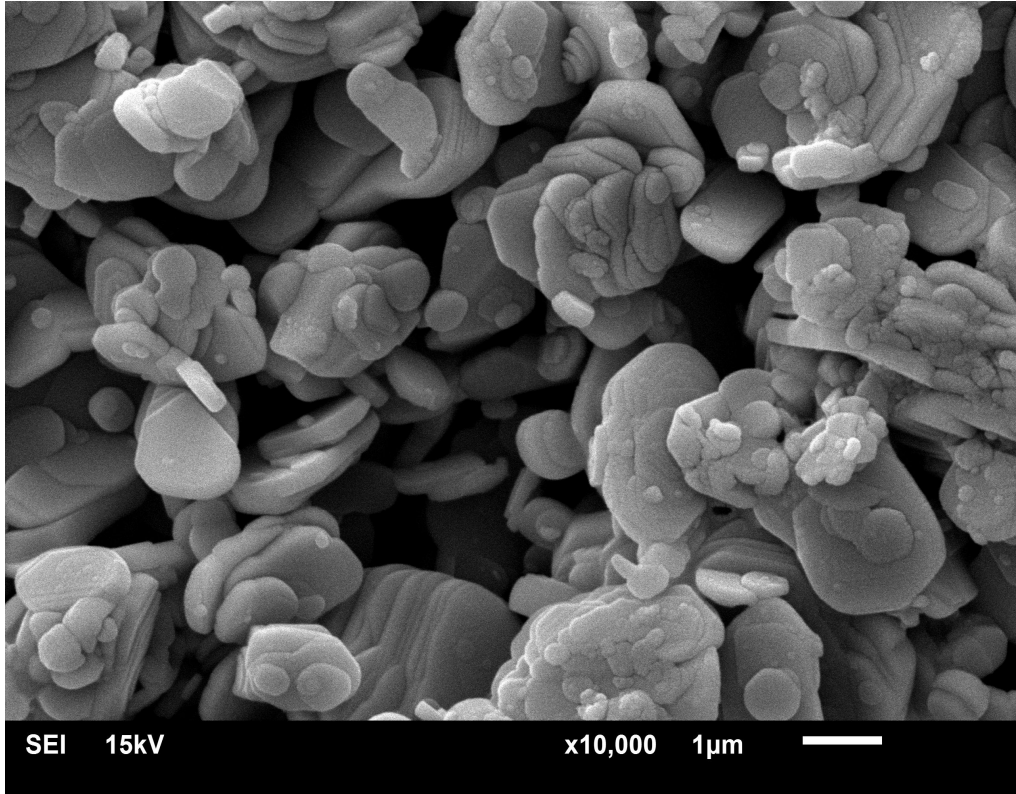
Şekil 28. S4 numunesinin Taramalı Elektron spekturumu SEM



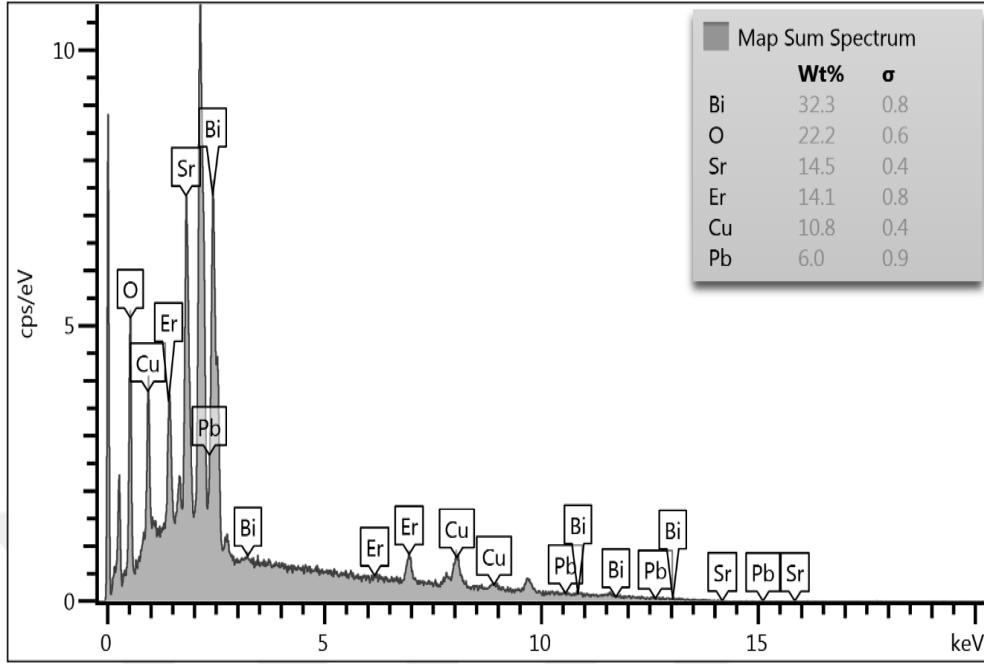
Şekil 29. Taranan S4 numunesinin harita Spekturumu



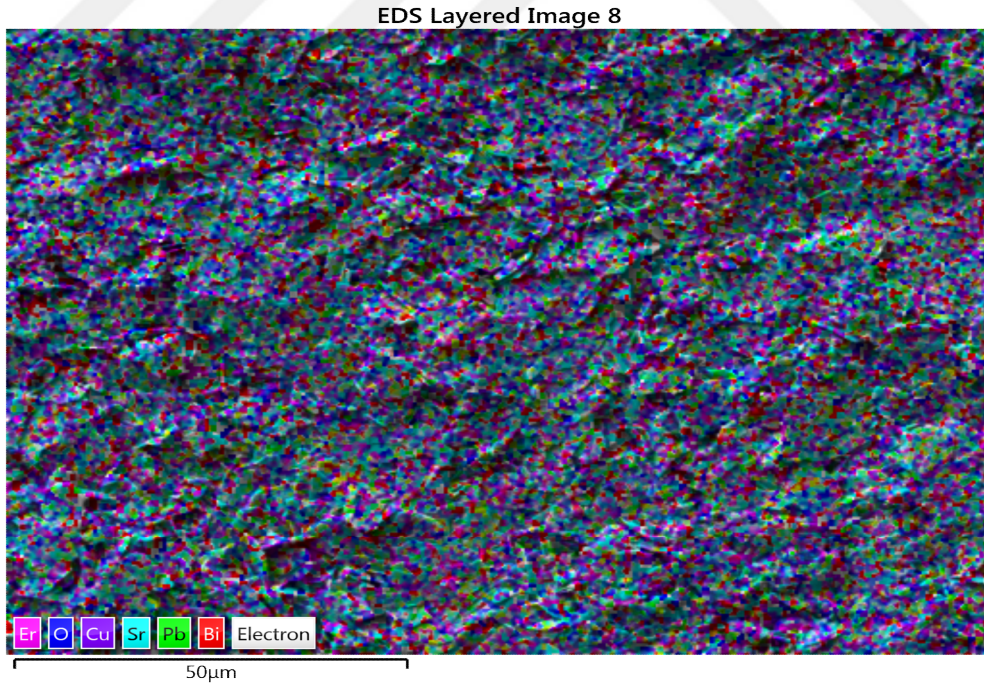
Şekil 30. S4 numunesi için EDS katmanlı görüntüsü



Şekil 31. S5 numunesinin Taramalı Elektron Spekturumu (SEM)



Şekil 32. Taranan S5 numunesinin harita toplamı spekturumu



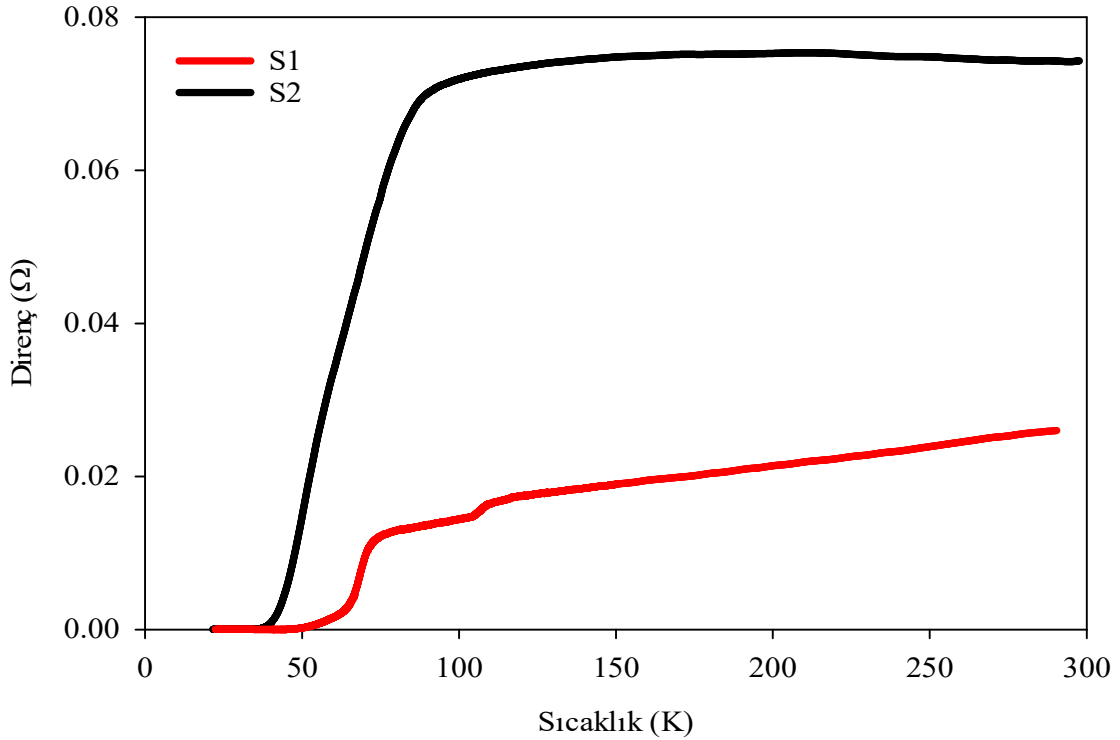
Şekil 33. S5 numunesi için EDS katmalı görüntüsü

### 4.3. BSCCO Numunelerine Ait R-T Ölçümleri

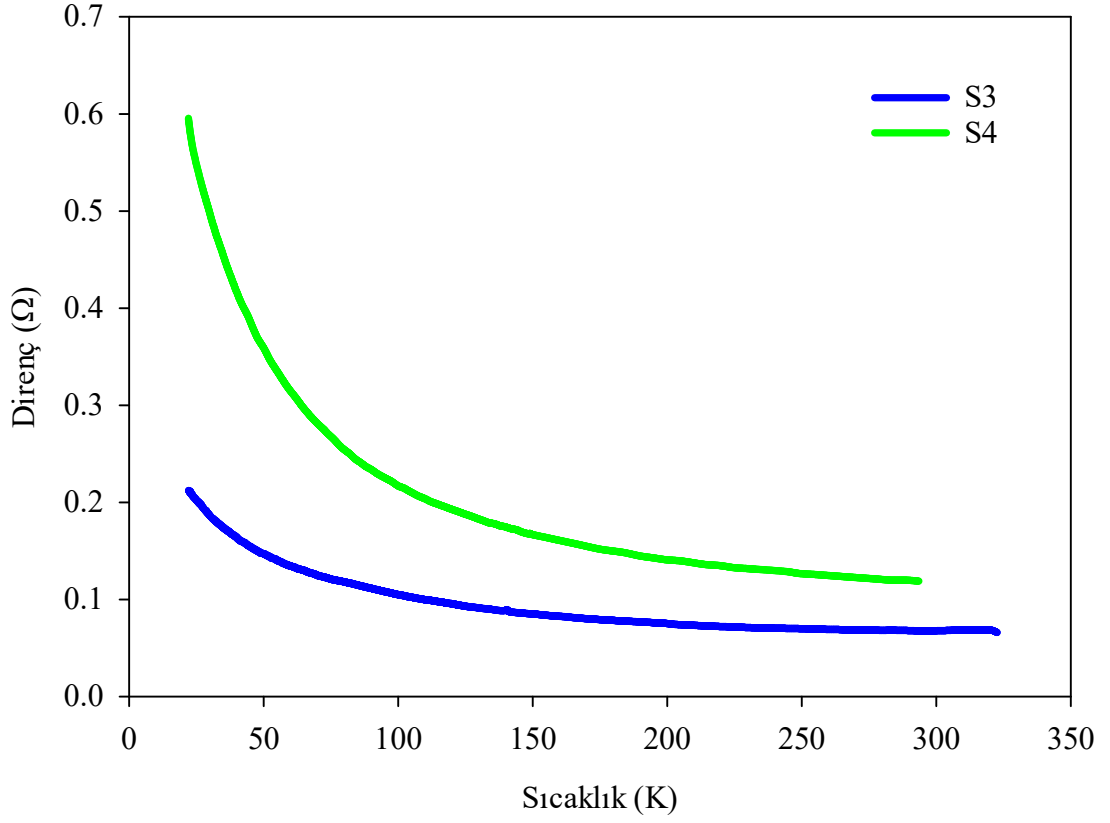
BSCCO numunelerinde katkı oranının geçiş sıcaklığını nasıl etkilediğini araştırmak amacıyla, Lake Shore 7000 cihazının AC/DC Direnç Ölçüm sistemiyle, oda sıcaklığından başlayıp (300 K) sıcaklığın 20 K 'e kadar düşürülmesiyle elektriksel direnç ölçümleri alınmıştır. Şekil 34'den, S1 ve S2 numunelerinin süperiletken fazda olduğu, Şekil 35 ve Şekil 36'dan S3, S4 ve S5 numunelerinin yarıiletken faza kaydığı görülmektedir. Şekil 34'den en yüksek geçiş sıcaklığına sahip numunenin S1 olduğu fakat görüleceği üzere çoklu faz içermekte olup katkı oranıyla beraber süperiletkenliğe geçiş sıcaklığının düştüğü görülmektedir. Tablo 13 de S1 ve S2 numunelerine ait veriler görülmektedir.

Tablo 13. R-T verilerinden elde edilen kritik sıcaklık değerleri ve numunelere ait bazı kritik akım yoğunluğu değerleri

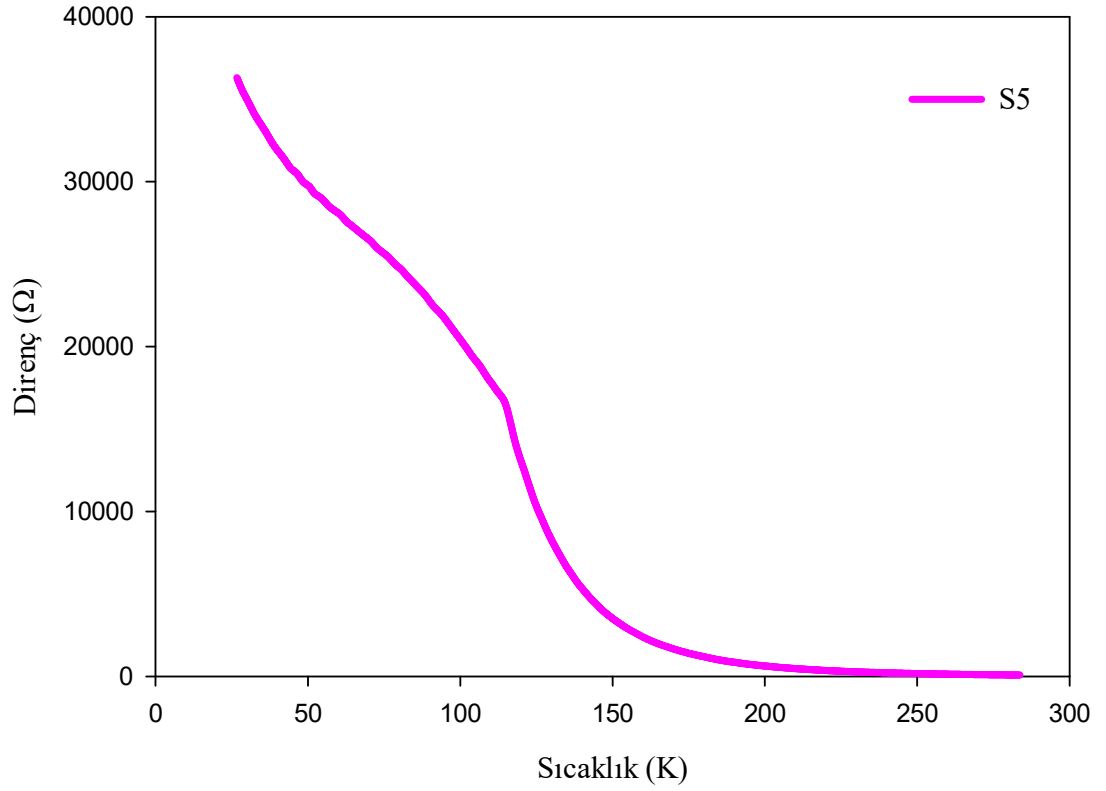
Numuneler	S1	S2	S3	S4	S5
$T_c^{\text{onset}}$ (K)	108.28-76.44	87.60	-	-	-
$T_c^{\text{offset}}$ (K)	56.39-105.31	41.88	-	-	-
$J_{c, \text{max}}$ (A/cm <sup>2</sup> ) (20 K)	5650	4900	-	-	-
$J_{c, \text{max}}$ (A/cm <sup>2</sup> ) (30 K)	4020	3400	-	-	-



Şekil 34. S1 ve S2 numunelerinin R-T grafikleri.



Şekil 35. S3 ve S4 numunelerinin R-T grafikleri.

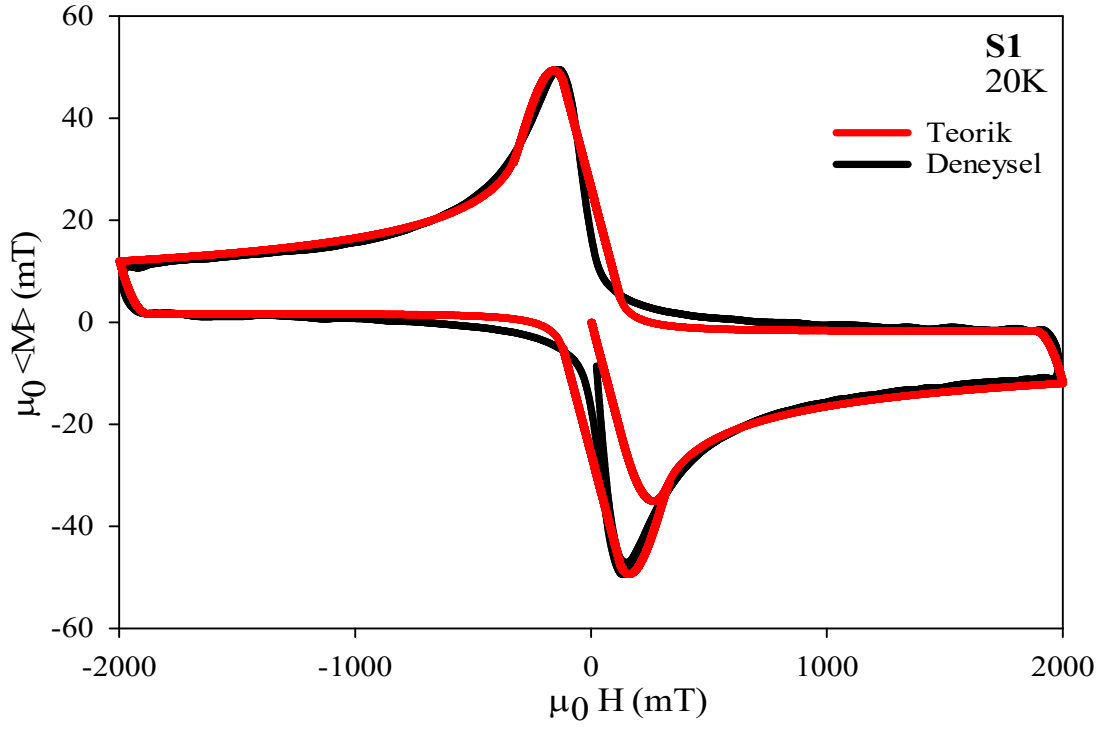


Şekil 36. S5 numunesinin R-T grafiği

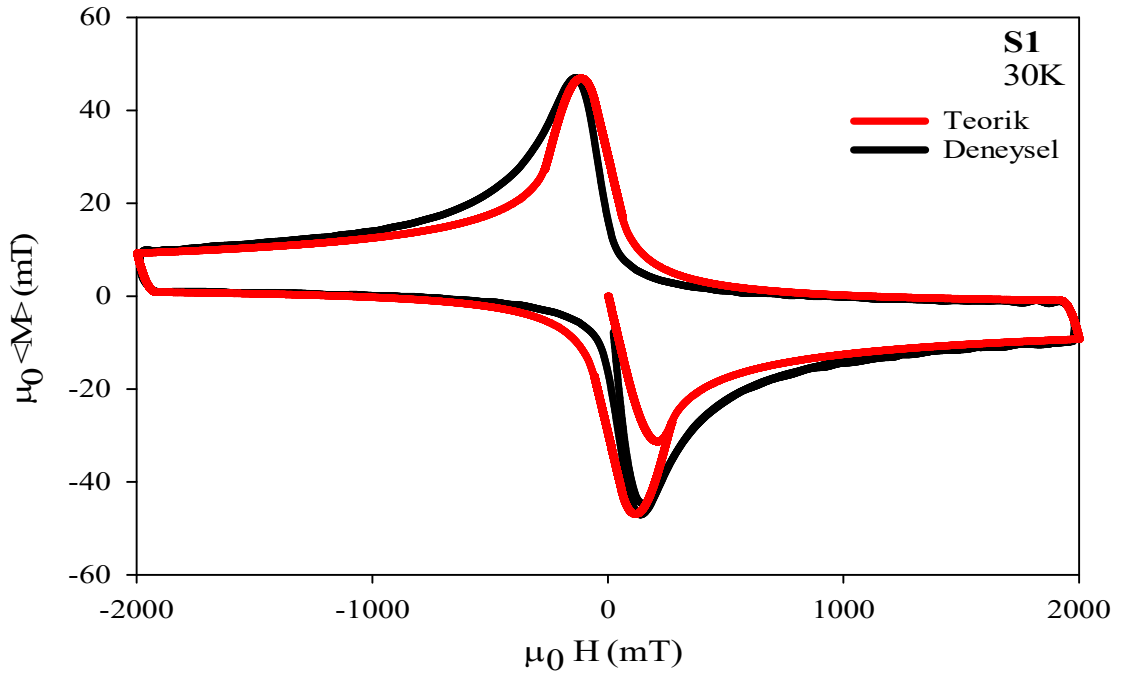
#### 4.4. BSCCO Numunelerine Ait M-H Ölçümleri

Süperiletken numunelerin manyetik davranışlarını inceleyebilmek için M-H ölçümleri alındı. M-H eğrileri, üretilen numunelerin kayıpsız taşıyabilecekleri kritik akım yoğunluğunun belirlenebilmesine olanak sağlar.  $\pm 2$  Tesla aralığında değişen dış manyetik alan uygulanarak alınan manyetizasyon verileri birim olarak  $\text{emu}/\text{cm}^3$  şeklindedir.

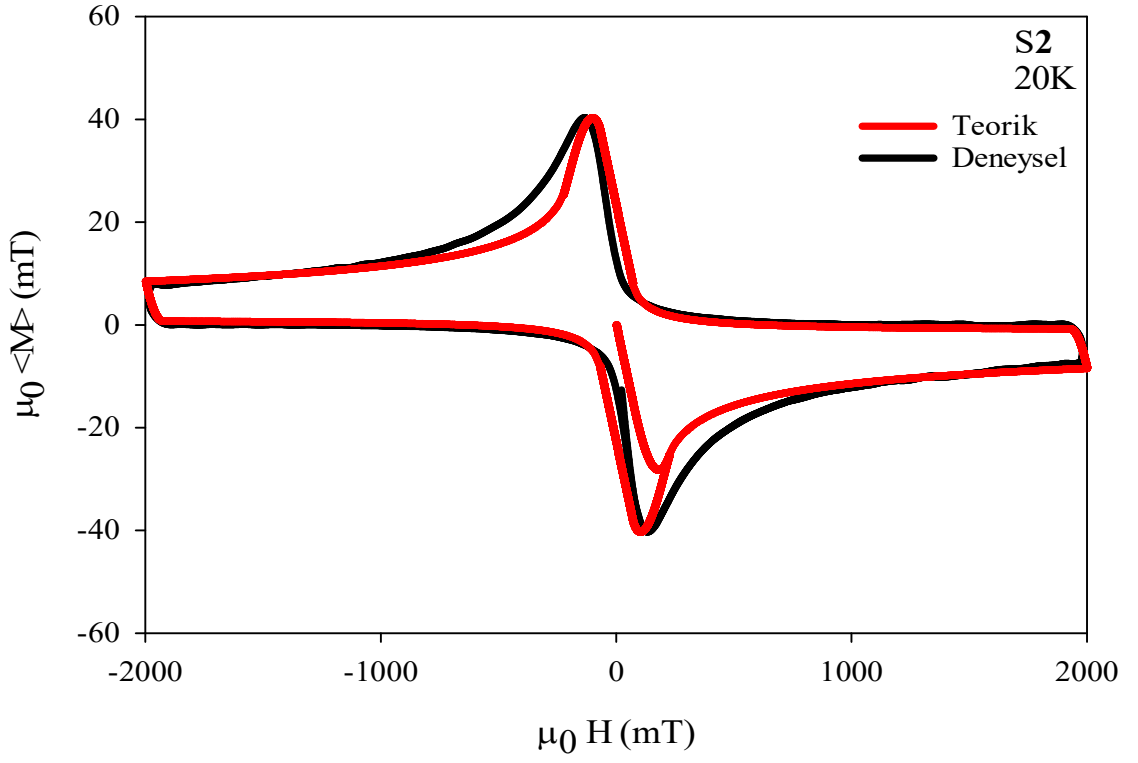
Üretilen numunelerin (M-H) ölçümleri, S1 ve S2 numuneleri Quantum Design Physical Property Measurement System (PPMS) cihazı kullanılarak S3, S4 ve S5 numuneleri ise Lake Shore 7000 cihazı yardımıyla alınmıştır. Bu cihazlar kapalı devre Helyum sistemine sahiptir. M-H verileri 20 K ve 30 K sabit sıcaklıklarında, Alansız soğutma (Zero Field Cooling) süreci ile  $\pm 2$  Tesla arasında değişen dış manyetik alan uygulanarak alındı. Ölçümler manyetizasyonun alanın bir fonksiyonu olarak Şekil 37'den Şekil 46'a kadar olan grafiklerde gösterilmiştir. Burada S1 ve S2 numuneleri süperiletken fazda olduğundan deneysel ölçümler ile kritik hal çerçevesinde Kim modeli kullanılarak yeniden M-H eğrisi teorik olarak türetilmiş ve grafikler üst üste çizdirilmiştir. S3, S4 ve S5 numunelerinin süperiletken fazda olmadığından M-H eğrileri deneysel olarak gözlemlenemediğinden teorik olarak da türetilenmemiştir. Tablo 14 ve Tablo 15 sırasıyla 20 K ve 30 K sıcaklıklarında alınan numunelerin M-H ölçümlerinden teorik olarak elde edilen bazı süperiletkenlik parametrelerini vermektedir. S1 ve S2 numunelerin dışındaki numunelerde teorik parametreler elde edilememiştir. Tablo 14'te S1 numunesinin grafiğine bakılacak olursa, grafiğin altında kalan alan S2 numunesine göre daha büyük bir alana sahiptir. Daha geniş olan alan daha büyük kritik akım yoğunluğuna işaret ettiğinden S1 numunesinin S2 numunesine göre daha yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip olduğunu söyleyebiliriz. Aynı şekilde S1 numunesinin 20 K grafiğin altında kalan alan 30 K değerindeki alan değerinden daha büyüktür. Bu da kritik akım yoğunluğunun sıcaklık artışıyla azalmasının sonucuyla uyumludur. Katılama oranı arttıkça kritik akım yoğunluğu düşmekte olduğu görülmektedir.



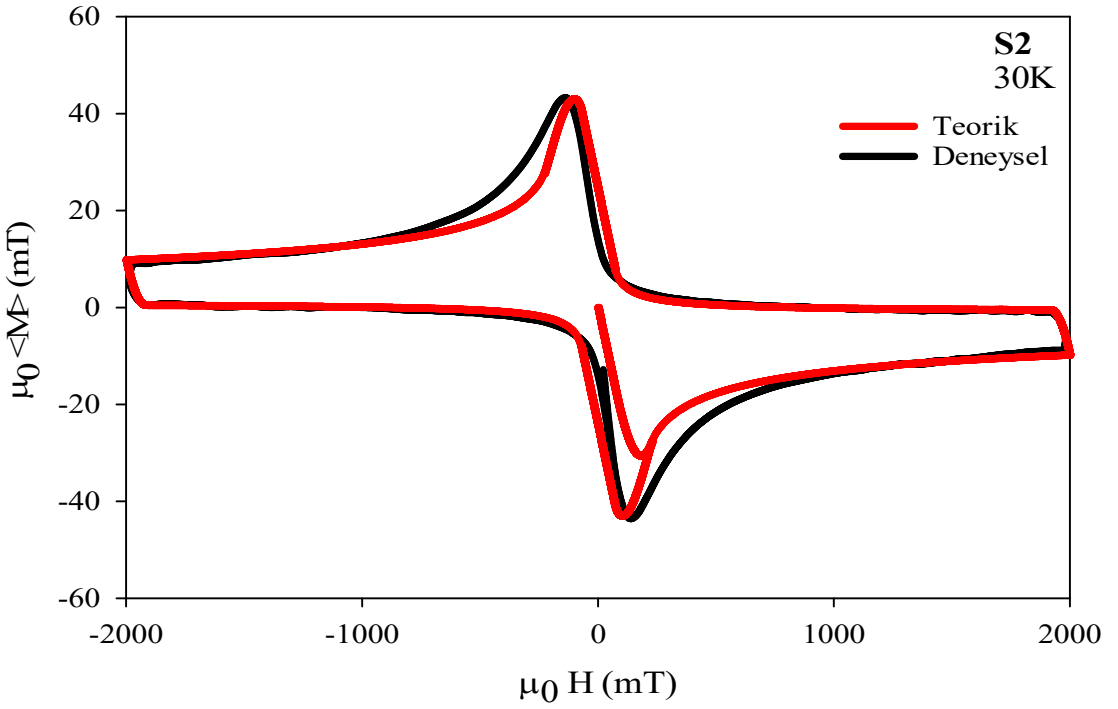
Şekil 37. S1 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri



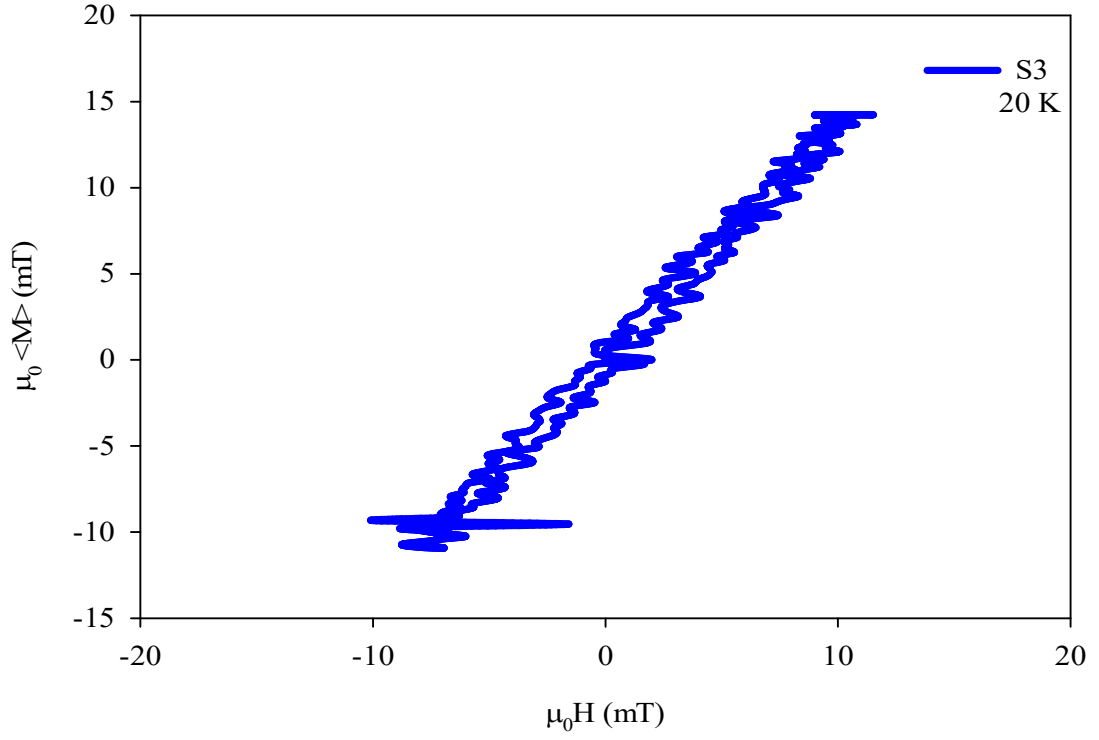
Şekil 38. S1 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri



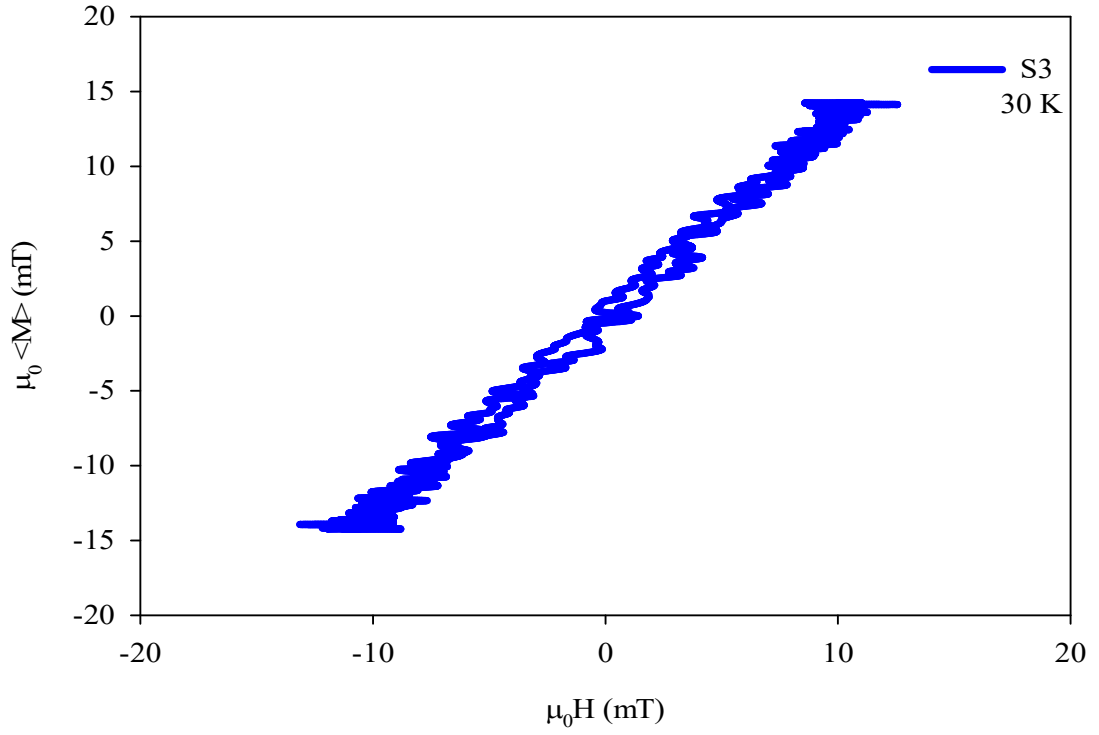
Şekil 39. S2 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri



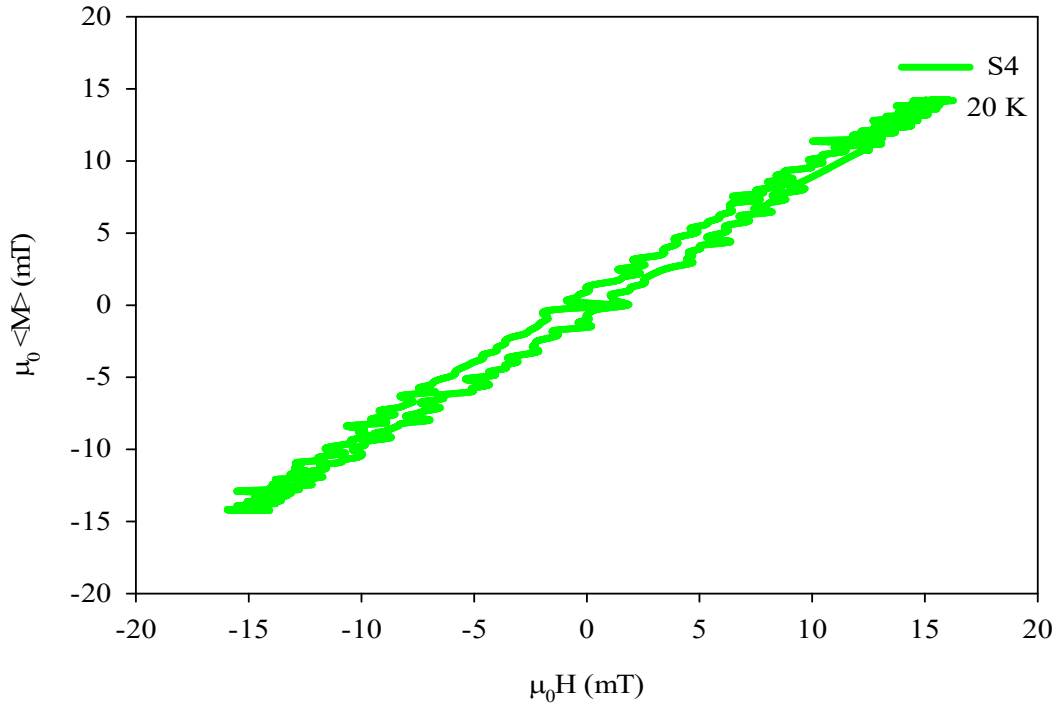
Şekil 40. S2 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel ve teorik M-H eğrileri



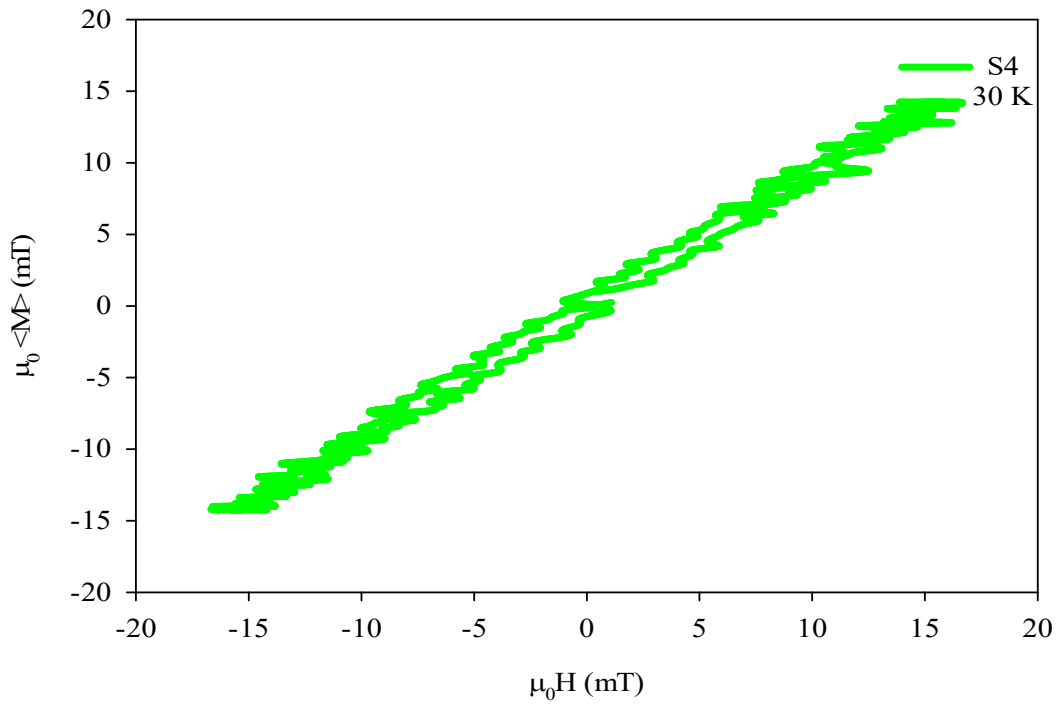
Şekil 41. S3 süperiletken numunesinin T=20 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi



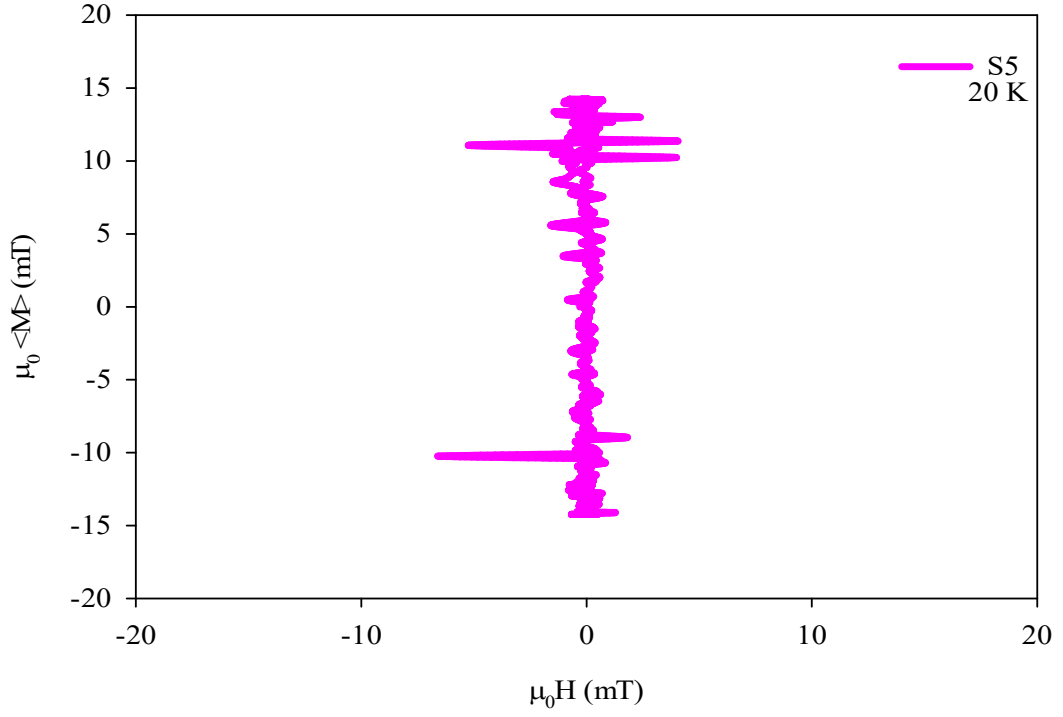
Şekil 42. S3 süperiletken numunesinin T=30 K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi



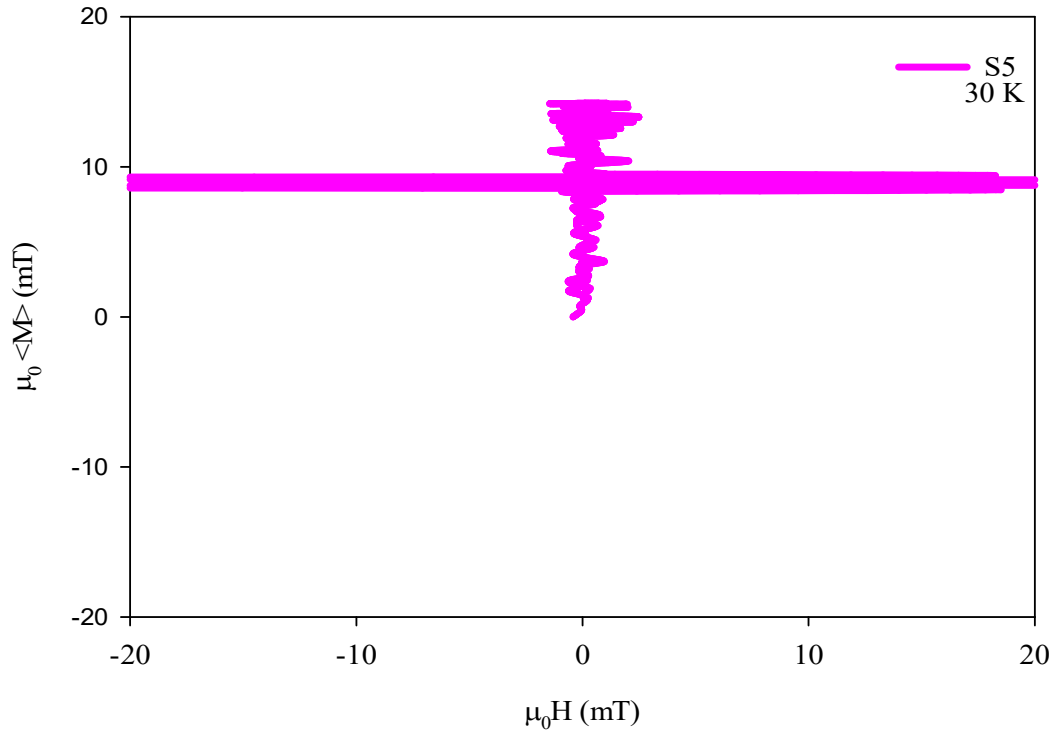
Şekil 43. S4 süperiletken numunesinin  $T=20$  K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi



Şekil 44. S4 süperiletken numunesinin  $T=30$  K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi



Şekil 45. S5 süperiletken numunesinin  $T=20$  K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi



Şekil 46. S5 süperiletken numunesinin  $T=30$  K sıcaklıklarındaki deneysel M-H eğrisi

Tablo 14. T=20 K için teorik olarak hesaplanan parametreler

<b>Numuneler</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>
$\mu_0 H^*$ (mT)	246	210	-	-	-
$H_{c1}$ (mT)	80	68	-	-	-
N	0.60	0.64	-	-	-
S	0.28	0.3	-	-	-
$h_M$ (mT)	8.1300	9.5238	-	-	-
$h_{c1}$ (mT)	0.3252	0.3238	-	-	-
$I_M$ ( $H_a=2000$ mT)	32.4838	20.955	-	-	-

Tablo 15. T=30 K için teorik olarak hesaplanan parametreler

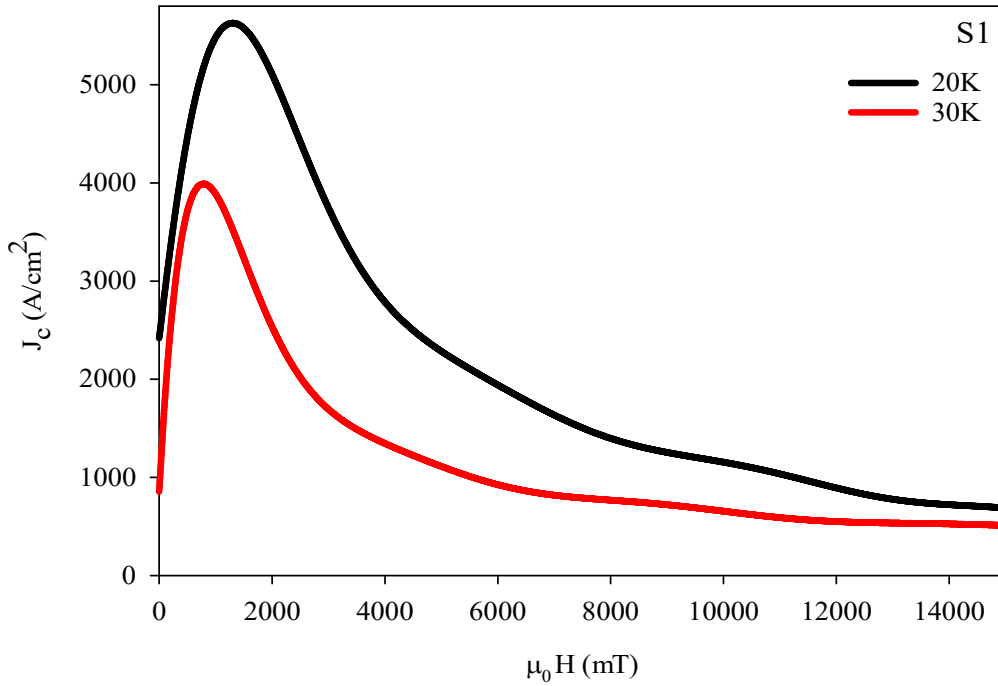
<b>Numuneler</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>
$\mu_0 H^*$ (mT)	175	172	-	-	-
$H_{c1}$ (mT)	60	60	-	-	-
N	0.62	0.64	-	-	-
S	0.24	0.26	-	-	-
$h_M$ (mT)	11.43	11.63	-	-	-
$h_{c1}$ (mT)	0.3428	0.3488	-	-	-
$I_M$ ( $H_a=2000$ mT)	25.8619	24.1103	-	-	-

#### 4.5. Manyetik Alana Göre Kritik Akım Yoğunluğunun ( $J_c$ ) Değişimi

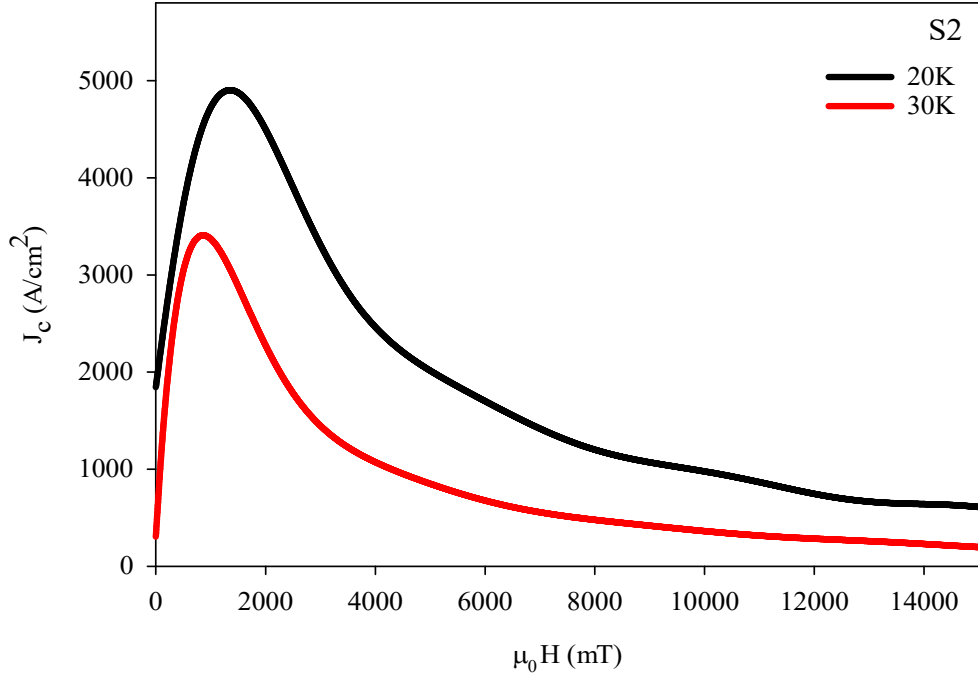
Kritik akım yoğunlukları M-H eğrilerinden kritik hal çerçevesinde yararlanılarak belirlenmiştir. Burada kullanılan formül;

$$J_c(H) = 20 \frac{\Delta M(H)}{L_1 \left(1 - \frac{L_1}{3L_2}\right)}$$

şeklindedir. Burada  $\Delta M(H)$  terimi  $M_+$  pozitif manyetizasyonu ve  $M_-$  negatif manyetizasyonu göstermektedir. Böylece  $\Delta M(H) = (M_+) - (M_-)$  şeklinde verilir.  $L_1$  ve  $L_2$  ifadeleri ise malzemenin genişlik ve uzunluk boyutlarıdır. S1 numunesinin 20 K ve 30 K sabit sıcaklıklarında farklı alan değerlerine karşılık çizdirilen kritik akım yoğunluğu grafiği Şekil 47’de gösterilmiştir. S2 numunesine ait grafik ise Şekil 48’de verilmiştir. Sayısal veriler Tablo 13’de verilmiştir. S1 numunesi yani katkısız saf BSCCO numunesi için 20 K sıcaklığındaki maksimum kritik akım yoğunluğu değeri en yüksektir. S1 numunesinin S2 numunesine göre daha iyi süperiletkenlik özellik gösterdiği R-T ve M-H ölçümlerinden görülmektedir.



Şekil 47. S1 süperiletken numunesinin T=20 ve 30 K sıcaklıklarındaki kritik akım yoğunluğunun manyetik alana göre değişimi



Şekil 48. S2 süperiletken numunesinin T=20 ve 30 K sıcaklıklarındaki kritik akım yoğunluğunun manyetik alana göre değişimi

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Katıhal Tepkime Metodu ile üretilen S1, S2, S3, S4, S5 numuneleri stokiyometrik olarak artan Erbiyum katkı oranına göre üretildi. Üretilen numunelerin XRD grafiklerinden yapısal özellikleri incelendi. BSCCO-2212 düşük faz ile BSCCO-2223 yüksek fazlarına ait pik değerleri ile (hkl) parametreleri bulundu. Buradan her bir numunenin faz oran değerleri hesaplandı ve S1 ile S2 numunelerinin süperiletken fazda oldukları görüldü.

Ayrıca Erbiyum katkısının artmasının yapıyı bozmasına sebebiyet veren durumu, efektif iyonik yarıçap değerinin koordinasyon sayısı ile değişimine vurgu yapılarak neden katkılamanın süperiletkenliği bozduğu açıklanmaya çalışıldı.

Morfolojik ölçüm için SEM ve EDS ölçümleri alındı. Burada katkılama oranı arttıkça tane büyüklüklerinde artma olduğu gözlemlendi. EDS verilerinden stokiyometrik yapı içerisindeki bileşenlerin dışında herhangi safsızlık atomu görülmemiştir.

R-T ölçümlerinden; S1 saf numunesinin süperiletkenlik geçiş sıcaklığı 105.31 K-56.39 K ile katkılı S2 numunesine göre daha yüksek olduğu, katkı oranıyla kritik sıcaklık değerinin azaldığı gözlemlendi. Katkı oranı arttıkça numuneler yarıiletken faza kaydığı belirlendi.

20 K ve 30 K sabit sıcaklıklarındaki M-H eğrilerinden, kritik akım yoğunluğu grafikleri çizdirilmiş ve S1 numunesinin katkılı S2 numunesine göre kritik akım yoğunluğu değerinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Katkı oranı arttıkça kritik akım yoğunluğu değeri azaldığı ve Erbiyum katkısının artmasının sonucu olarak süperiletkenliğin bozulduğu görülmüştür.

S1 numunesinin kritik akım yoğunluğu değeri 20 K için S2 numunesine göre % 13.27 oranında daha iyiyken 30 K sıcaklık değerindeki akım yoğunluğu % 15.42 oranında daha yüksektir. Yani ortalama olarak S1 numunesi % 14 oranında S2 numunesinden daha yüksek akım yoğunluğu değerine sahiptir.

Sonuç olarak, çalışmamızda Erbiyum elementinin katkı maddesi olarak kullanılması uygun çalışma şartlarının oluşmadığını göstermektedir. Şartların optimize edilmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir ancak bu koşullara altında erbiyum elementinin katkılama oranıyla kritik akım yoğunluğuna etkisi olumsuz yönde olmaktadır. S3- S4 ve S5 numuneleri süperiletkenlik özelliği göstermediğinden hesaplamalar yapılmadı ancak katkı oranı artışı ile yarıiletken faza geçişin hızlandığı görülmüştür.

## KAYNAKÇA

- Aksan, M. A., Yakinci, M. E. ve Kadowaki, K. (2010). The effect of Ru substitution on the thermal, structural and magnetic properties of  $\text{Bi}_3\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  superconducting system. *J. Supercond. Nov. Magn*, 23, 371–380.
- Albiss, B. A., Obaidat, I. M., Gharaibeh, M., Ghamlouche, H. ve Obeidat, S. M. (2010). Impact of addition of magnetic nanoparticles on vortex pinning and microstructure properties of Bi–Sr–Ca–Cu–O superconductor, *Solid State Commun*, 150, 1542–1547.
- Azhan, H., Syuhaida, I. N., Azman, K., Azura, C. M. N., Robaiah, M., Syamsyir, A. S., Rosli, M. M. (2016). Influence of Rare-Earth (Doped) on Low-density  $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{1.9}\text{RE}_{0.1}\text{Cu}_3\text{O}_8$  (RE=Nd, Er) Superconductors via Co-Precipitation Method, *Materials Science Forum*, 846, ss:574-578.
- Bednorz, J.G. ve Müller, K.A. (1986). Possible High Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System, *Z.Phys. B-Condensed Matter*, 64, 189-193.
- Cardwell, D.A. (2003). *Handbook of Superconducting Materials*, IOP Publishing Ltd, ISBN 0 7503 0432 4, Philadelphia.
- Cyrot, M. ve Pavuna, D. (1992). *Introduction to Superconductivity and High-Tc Metaterials*, World Scientific, Singapore.
- Chu, C.W., Hor, P.H., Meng, R.L., Gao, L. and Huang, Z.J. (1987). Superconductivity at 52.5 k in the lanthanum-barium-copper-oxide system, *Science*, 235, 567.
- Chu, C.W., Gao, L., Chen, F., Huang, Z.J., Meng, R.L., Xue, Y.Y. (1993). Superconductivity above 150 K in  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  at high pressures, *Nature*, Vol. 365, p. 323.
- Darminto, D., Tjia, M. O., Motohashi, T., Kobayashi, H., Nakayama, Y., Shimoyama, J. ve Kishio K. (2000). Effects of Pb substitution on the vortex state of oxygen-overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  single crystal. *Phys. Rev. B*, 62, 649–6655.
- Dewar J. (1927). in *Collected Papers of Sir James Dewar*, L. Dewar, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, s. 678-91.
- Düzgün, İ. (2005). *Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde  $\text{Ag}_2\text{O}$  ilavesinin AC kayıplarına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Farrell, D. E, Chandrasekhar, S., and Culbert, H. V. (1969). *Phys. Rev.*, 177, 694.

- Flynn, T. M. (1997). *Cryogenic Engineering*. New York: Marcel Dekker
- Evetts, J. E. (1970). *Phys. Rev. B*, 2, 95.
- Ginzburg, V. L. (2000). Superconductivity: the day before yesterday-yesterday-today-tomorrow, *Physics-Uzbeki*, 43 (6), 573-583.
- Grivel, J.C. ve Flukiger, R. (1996). Factors Influencing the Apparent Activation Energy for the Formation of the  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  Compound, *Journal of Alloys and Compounds*, 241, 127-133.
- Harima N., Fujimori A., Sugaya T. and Terasaki I. (2003). Chemical potential shift in lightly-doped to overdoped  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{CuO}_{8+y}$  (R = Pr, Er)., *Phys. Rev. B*, 67, 172501 .
- Hazen, R. M., Finger, L.W., Angel, R.J., Prewitt, C.T., Ross, N.L., Hadidiacos, C.G., Heaney, P. J., Veblen, D. R., Sheng, Z.Z., Elali, A., Hermann, A. M. (1988). *Physical Review Letters*, 60, ss: 1657-1660.
- Jabur, A. R. (2013).  $\text{Bi}_{2-x}\text{Hg}_x\text{Sr}_{2-y}\text{Ba}_y\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_{10}$ /Ag sheath HTSC wires, (Hg, Ba) substitution effect on the critical temperature. *Energy Procedia*, 36, 985–994.
- Kırat, G., Kızılaslan, O. ve Aksan, M. A. (2016). Effect of the Er-substitution on critical current density in glass-ceramic  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2(\text{Cu}_{3-x}\text{Er}_x)\text{O}_{10+\delta}$  superconducting system. *Ceramics International*, 42, 15072 – 15076.
- Kumar, A. (2010). *Series in materials science High-Temperature Superconductors*, Springer Heidelberg Dordrecht, ISBN 978-3-642-00711-8, New york.
- Li, Q., Pan, H. B., Zhu, C. G., Xu, P. S. ve Zhang, X. Y. (2000). XRD and PES studies of the  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$  system. *J. Supercond. Nov. Magn*, 13, 565–568.
- Li, S. Y., Cao, Q., Sun, Z., Chen, X. H. ve Cao, L. Z. (2000). Crystallinity and transport properties in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Cu}_2\text{O}_y$  single crystals. *Supercond. Sci. Technol*, 13, 1595–1599.
- Lu, T., Zhang, C., Gou, S., Wu, Y., Li, C. ve Zhou, L. (2015). The influence of critical current density of Bi-2212 superconductors by defects after Ybdoping. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 519,:24-27.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M. ve Asano, T. (1988). A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27, L209-L210
- Majevski, P., (1997). Phase diagram studies in the system Bi - Pb - Sr - Ca - Cu - O - Ag. *Supercond. Sci. Technol.*, 10, 453-467.
- Majewski, P., (2000). Materials Aspects of the High-temperature Superconductors in the System  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SrO-CaO-CuO}$ . *Journal of Materials Research*, 15, 854- 870.

- Makarova, M. V., Kazin, P. E., Tretyakov, Y. D., Jansen, M., Reissner, M. ve Steiner, W. (2005). Zr, Hf, Mo and W-containing oxide phases as pinning additives in Bi-2212 superconductor. *Physica C*, 419, 61–69.
- Marconi, D., Stiufluoc, G. and Pop, A.V. (2022). Effect of partial substitution of Ca by 4f elements on dissipative processes in Bi:2223 superconductors, *Journal of Physics: Conference Series*, 153
- Marino, A. ve Rodriguez, J. E. (2000). Influence of thermodynamic fluctuations on the thermoelectric coefficient in Ag-doped Bi-samples. *Physica C*, 341, 1923–1924.
- Mihalache, V., Deac, I. G., Pop, A. V. ve Miu, L. (2011). The pinning force density in poly-crystalline  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2-x}\text{Y}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$  multiphase systems. *Curr. Appl. Phys*, 11, 1010–1014.
- Murugakoothan, P., Jayavel, R., Rao, C. R. V., Subramanian C. ve Ramasamy, P. (1994). Growth and characterization of bulk-textured  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_8$  by the float-zone technique. *Supercond. Sci. Technol*, 7, 367–371.
- Müller, P. ve Ustinov, A.V. (1997). *The Physics of Superconductors*, Springer, Germany
- Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y., ve Akimitsu, J. (2001). Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. *Nature*, 410 (6824), 63-64.
- Noetzel, R., vom Hedt, B. ve Westerholt, K. (1996). Magnetic irreversibility lines and critical currents of Bi(2212) single crystals doped by Fe, Ni, Co and Zn. *Physica C*, 260, 290-296.
- Omar, A. (1993). *Elementary Solid State Physics: Principles and Applications*. Addison-Wesley Publishing Company, USA
- Onnes, H. Kamerlingh (1894). On the cryogenic laboratory at Leyden and on the production of very low temperatures, *Comm. Phys. Lab.*, Leiden, No. 14.
- Paladhi, D., Mandal, P., Sahoo, R. C., Giri, S. K. ve Nath, T. K. (2016). Effect of Erbium substitution on temperature and field dependence of thermally activated flux flow resistance in Bi 2212 superconductor. *Physica B*, 502, 113–118.
- Rentschler, T., Kemmler-Sack, S., Hartman, M., Hübener, R.P., Kessler, P. ve Lichte, H. (1992). Influence of Nd substitution on the superconducting properties of ceramics in the 2212 system  $\text{Bi}_{2-w}\text{Pb}_w\text{Sr}_{2-x}\text{Ca}_{1-y}\text{Nd}_{x+y}\text{Cu}_2\text{O}_{8+z}$ . *Physica C*, 200, 287-295.

- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A.*, 32(5), 751-767.
- Sheahen, T. P. (2002). Introduction to High-Temperature Superconductivity, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-306-44793-2, New York, 3-34
- Sun, X., Zhao, X., Wu, W., Fan, X., Li, X. G. ve Li, H. C. (1998). Pr-doping effect on the structure and superconductivity of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Cu}_2\text{O}_y$  single crystals. *Physica C*, 307, 67–73.
- Taghipour, J., Abbasi, H., Sedghi, H. (2010). The effect of Sb substitution on properties of  $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_{2-x}\text{SbCa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  superconductors. *Physica B*, 405, 1349–1352.
- Tamegai, T., Ooi, S., Itaka, K. ve Shibauchi, T. (2000). Vortex matter phase transitions under tilted fields in pristine and Pb-substituted  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ . *Physica C*, 341, 1183–1184.
- Tarascon, J. M., McKinnon, W. R., Barbour, P., Hwang, D. M., Bagley, B. G., Greene, L. H., Hull, G. W., LePage, Y., Stoffel, N. and Giroud, M. (1988). Preparation, structure, and properties of the superconducting compound series  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$  with  $n=1,2$ , and 3. *Phys. Rev. B*, 38 (13), 8885-8892.
- Vanderah, T.A. (1990). Chemistry of superconductor materials, Noyes Publications, ISBN 0-8155-1279-1, New Jersey, USA.
- Wu, M.K. , Ashburn, J.R., Torng, C.J., Hor, P., Meng, R.L., Gao, L., Huang, Z.J., Wang, Y.Q., Cu, C.W. (1987). Superconducting at 93 K in New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O compound system at Ambient Pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 58(9), 908-910.

## ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve lise öğrenimini Tokat-Başçiftlik'te tamamladı. Üniversite eğitimi Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü 2005 yılında tamamladı, ardından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Eğitimi Tezsiz Yüksek Lisans yaptı. Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Felsefe Bölümünü 2016 yılında bitirdi. Daha sonra Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Kamu yönetimi bölümü 2020 yılında bitirdi. Milli Eğitim Bakanlığında Fizik Öğretmeni olarak görev yapmakta.

### Yayınlar:

- Kaya, S. Açikel, S. ve Düzgün, İ. (2023). Calculation of the effects of Erbium (Er) dopant on radiation shielding efficiency of BiPbSrCaCuO samples using EGS4 code, 4th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, 20-21 November 2023, Konya, Turkey: s. 201-206
- Düzgün, İ ve Açikel, S. (2023). Examination of the Influence of Erbium (Er) Addition on the Crystal Dimensions and Lattice Parameter in BSCCO High-Tc Superconductors, 9th Ankara International Congress On Scientific Research, 26-29 December 2023, Ankara, Turkey, s. 627