

**T.C.**  
**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM**  
**DALI**



**ZİRKONYUM KATKILANMIŞ Bİ-TABANLI SÜPERİLETKEN**  
**SERAMİKLERİN MEKANİK, YAPISAL VE ELEKTRİKSEL**  
**ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EMRE ORHAN**

**TEZ DANIŞMANI**

**Doç. Dr. Rifkî TERZİOĞLU**

**İKİNCİ TEZ DANIŞMANI**

**Dr. Öğr. Üyesi Şenol KAYA**

**BOLU, HAZİRAN - 2022**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Emre ORHAN tarafından hazırlanan “Zirkonyum Katkılanmış Bi-Tabanlı Süperiletken Seramiklerin Mekanik, Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi ” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans olarak oy birliği/oy çokluğuyla kabul edilmiştir. 28/11/2022

### Jüri Üyeleri

Danışman  
Doç. Dr. Rıfkı Terzioğlu  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

### İmza

.....

Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Uğur Doğan  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Emiroğlu  
Sakarya Üniversitesi

.....

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı**

**Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü**

## ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin \_\_/\_\_/\_\_ tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % \_\_ olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışma için \_\_\_\_ Araştırmalar Etik Kurulundan \_\_\_\_ sayısı ile etik izin alınmıştır. (Eğer varsa yazınız, yoksa siliniz)

.....  
**EMRE ORHAN**

## ÖZET

**ZİRKONYUM KATKILANMIŞ Bİ-TABANLI SÜPERİLETKEN  
SERAMİKLERİN MEKANİK, YAPISAL VE ELEKTRİKSEL  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
EMRE ORHAN  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. RIFKI TERZİOĞLU)  
(İKİNCİ DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ŞENOL KAYA  
BOLU, KASIM – 2022  
XIV+47**

Bu çalışma kapsamında Bi-tabanlı süperiletken seramiklerin temel özelliklerine yüzey safsızlık katkılamaının etkileri araştırılarak, elektriksel performanslarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Zirkonyum metali Bi-2223 seramiklerinin üzerine buharlaştırma yöntemiyle kaplanmış ve 650 °C ile 840 °C arasında sıcaklıklarda tavlama yapılarak Zr difüzyonu gerçekleştirilmiştir. Zr difüzyonunun Bi-2223 seramiğinin yapısal, morfolojik, mekanik, elektriksel ve süperiletken özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik olarak yorumlanarak çalışma sonlandırılmıştır. Yapılan analizlerde yapısal kusurlar ve geçiş sıcaklıkları arasındaki etkileşimlerde tartışılmıştır. Sonuç, Zr'nin Bi-seramiklerin daha derin seviyelerine kolayca yayılabileceğini ve yüksek termal enerjinin itici gücü nedeniyle olası Zr/Sr yer değiştirmesinin meydana geldiğini göstermiştir. Zr difüzyonu, Bi-2223 seramiğinin kristalografisini 800 °C tavlama sıcaklığına kadar iyileştirmiştir. Ek olarak, 800 °C'de tavllanmış numunelerin yüzey morfolojisinde daha iyi düzlem benzeri yapı ve taneler arası bağlantı gözlemlenmiştir. 800 °C tavlama işleminden sonra yüzeyine Zr kaplanmış Bi-2223 seramikleri için hem temel elektriksel öz direnç, boşluk (hol) taşıyıcı yoğunlukları hem de dar geçişli kritik sıcaklıklarda önemli bir gelişme elde edildi. Bu kritik özelliklerin elde edilen iyileştirmesi, süperiletken kümelerdeki bipolaron oluşumlarına, optimum eşleşme mekanizmasına, en iyi kristal yapı kalitesine ve ideal Cu-O<sub>2</sub> ara katman birleştirme kuvvetlerine ve Zr yayılmış süperiletken taneler arasındaki etkileşime atfedilebilir. 800 °C'de Zr safsızlık difüzyonunun, süperiletken teknolojisinde

gelecekteki uygulamalar için Bi-2223 sistemlerinin temel özelliklerinin iyileştirilmesi için umut verici olduğu sonucuna varılabilir. Bu tez çalışması, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri koordinatörlüğü 2022.09.03.1560 numaralı “Zirkonyum katkılanmış Bi-tabanlı süperiletken seramiklerin mekanik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi” başlıklı proje tarafından desteklenmiştir.



**ANAHTAR KELİMELELER:** Bi-2223 seramik; Zr difüzyon mekanizması; Yapısal bozukluk; süperiletkenler

## **ABSTRACT**

### **RESEARCH ON THE MECHANICAL, STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ZIRCONIUM DOPED BI-BASED SUPERCONDUCTOR CERAMICS**

**MSC THESIS**

**EMRE ORHAN**

**BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY**

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOS. PROF. DR. RIFKI TERZİOĞLU )**

**(CO-SUPERVISOR: ASSIS. PROF. DR. ŞENOL KAYA)**

**BOLU, NOVEMBER 2022**

**XIV+47**

The aim of this study is to investigate influences of the zirconium (Zr) diffusion on the structural, morphological, mechanical, electrical and superconducting features of the Bi-2223 ceramic. The present study also covers in-depth understanding of correlations between the disorders and transition temperatures. The Zr diffusion was carried out via annealing process between 650 °C and 840 °C. Result have depicted that the Zr can easily diffuse into the deeper level of the Bi-ceramics and possible Zr/Sr substitution have occurred due to the driving force of high thermal energy. The Zr diffusion improves the crystallography of the Bi-2223 ceramic up to 800 °C annealing process. In addition, better intergranular couplings with smoother plate-like structure have been observed in surface morphology for the samples annealed at 800 °C. A significant improvement on the both basic electrical resistivity, hole carrier densities and critical temperatures with narrow transition was also obtained for the Zr surface-layered Bi-2223 ceramics after 800 °C annealing process. The obtained refinement of these critical features can be attributed to the formations of bipolaron in the superconducting clusters, optimum pairing mechanism, best crystal structure quality and ideal Cu-O<sub>2</sub> interlayer coupling strengths and interaction between Zr diffused superconducting grains. It can be concluded that the Zr impurity diffusion at 800 °C is promising for the improvement of basic features of the Bi-2223 systems for future applications in superconductor technology.

---

**KEYWORDS:** Bi-2223 ceramic; Zr diffusion mechanism; Structural disorder;



# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                  |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY SAYFASI .....                                                                                      | iv   |
| ETİK BEYAN.....                                                                                                  | v    |
| ÖZET.....                                                                                                        | v    |
| ABSTRACT .....                                                                                                   | vii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                                               | xi   |
| TABLO LİSTESİ .....                                                                                              | xii  |
| KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ .....                                                                              | xiii |
| TEŞEKKÜR .....                                                                                                   | xiv  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                                    | 1    |
| 1.1 Süperiletkenliğin Tarihçesi .....                                                                            | 2    |
| 1.2 Kritik Sıcaklık.....                                                                                         | 4    |
| 1.3 Meissner Etkisi .....                                                                                        | 5    |
| 1.4 Kritik Manyetik Alan ( $H_c$ ).....                                                                          | 5    |
| 1.5 Kritik Akım ( $J_c$ ) .....                                                                                  | 5    |
| 1.6 Tip I - Tip II Süperiletkenler .....                                                                         | 6    |
| 1.7 Süperiletkenlik Teorileri .....                                                                              | 7    |
| 1.8 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri .....                                                                       | 9    |
| 1.8.1 BSCCO .....                                                                                                | 11   |
| 1.8.2 YBCO .....                                                                                                 | 12   |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI.....                                                                                     | 15   |
| 3. DENEYSEL YÖNTEMLER .....                                                                                      | 19   |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR.....                                                                            | 23   |
| 4.1 Zr difüze edilmiş $Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_y$ numunelerinin atomik, morfolojik sonuçları .....     | 23   |
| 4.2 Zr difüze $Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_y$ numunelerinin elektriksel direnç sonuçlarındaki değişim..... | 30   |
| 4.3 Zr yüzey katmanlı $Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_y$ numunelerinin süperiletkenlik özellikleri.....       | 35   |
| 4.4 Zr yüzey katmanlı $Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_y$ numunelerinin mekanik özellikleri.....               | 40   |
| 5. SONUÇ .....                                                                                                   | 41   |
| 6. KAYNAKLAR.....                                                                                                | 43   |

|                  |    |
|------------------|----|
| 7. ÖZGEÇMİŞ..... | 47 |
|------------------|----|



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|            |                                                                                                                |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 1.1. | Normal metallerde ve süperiletkenlerde özdirenç-sıcaklık ilişkisi. .3                                          |
| Şekil 1.2. | a) Normal bir metal ile bir süperiletkenin sıcaklık-direnç korelasyonu, b-) Meissner Etkilerinin Şeması .....4 |
| Şekil 1.3. | a) Tip I ve b) Tip II süperiletkenlerin sızma derinliği ve koherent uzunluğu ile şematik gösterimi. ....6      |
| Şekil 1.4. | Keşfedilen bazı süperiletken malzemelerin kritik sıcaklıklarının yıllara göre gösterimi .....8                 |
| Şekil 1.5. | $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 'un birim hücresi .....12                             |
| Şekil 1.6. | YBCO ve BSCCO'nun kristal yapısı .....14                                                                       |
| Şekil 3.1. | Bilyalı öğütme işlemi .....19                                                                                  |
| Şekil 3.2. | Protherm programlanabilir kül fırını .....20                                                                   |
| Şekil 3.3. | Akik havan .....20                                                                                             |
| Şekil 3.4. | EDWARDS Auto 306 Termal Buharlaştırıcı.....21                                                                  |
| Şekil 4.1. | İşlenmemiş ve Zr-yüzey katmanlı Bi bazlı seramiklerin XRD spektrumları.....25                                  |
| Şekil 4.2. | a-) Saf-Bi, b-) Zr-650, c-) Zr-700, d-) Zr-750, e-) Zr-800 ve f-) Zr-840 örneklerinin SEM görüntüsü .....29    |
| Şekil 4.3. | Saf ve Zr-yüzey katmanlı Bi bazlı seramiklerin sıcaklığa bağlı özdirenci .....31                               |
| Şekil 4.4. | $\rho_{300K}$ , $\rho_{115K}$ ve $\rho_{res}$ özdirenç değerleri arasındaki korelasyonlar.....34               |

# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1.</b> Güç uygulamaları için YSS süperiletkenlerinin kritik parametreleri.....                                                                                            | 10 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Bi bazlı seramiğin bazı kristalografik parametreleri .....                                                                                                         | 25 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Oda sıcaklığı özdirençleri, artık özdirençler, artık özdirenç oranları, $\rho_{\text{norm}}$ ve $\Delta\rho$ dahil olmak üzere çeşitli DA özdirenç değerleri. .... | 32 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Dökme seramik süperiletkenlerin başlangıç/kayma kritik geçiş sıcaklıkları ve boşluk taşıyıcı yoğunlukları.....                                                     | 36 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Mevcut çalışma ile benzer bir çalışmanın karşılaştırması.....                                                                                                      | 39 |
| <b>Tablo 4.5.</b> Zr katkılı Bi-2223 süperiletken seramiğin farklı tavlama sıcaklıklarında mikrosertlik ölçümleri .....                                                              | 40 |

## KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

|                |                                    |
|----------------|------------------------------------|
| AA             | : Alternatif Akım                  |
| B              | : Manyetik Akım Yoğunluğu          |
| C              | : Celcius                          |
| DA             | : Doğrusal Akım                    |
| E              | : Elektrik Alan                    |
| F              | : Fahrenheit                       |
| H              | : Manyetik Alan                    |
| H <sub>c</sub> | : Kritik Manyetik Alan             |
| YSS            | : Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri |
| J <sub>c</sub> | : Kritik Akım                      |
| K              | : Kelvin                           |
| DSS            | : Düşük Sıcaklık Süperiletkenleri  |
| R              | : Direnç                           |
| T <sub>c</sub> | : Kritik Sıcaklık                  |
| V              | : Gerilim                          |
| $\lambda$      | : Nüfuz Derinliği                  |
| $\rho$         | : Özdirenç                         |
| $\beta$        | : Çekirdek yarıçapı                |
| $\theta$       | : Bragg Açısı                      |

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve tez çalışmam süresince yakın ilgisini, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, bilimsel çalışmanın yöntem ve ilkelerini öğreten, akademik anlamda beni yönlendiren değerli danışman hocam, **Doç. Dr. Rıfki TERZİOĞLU’na** saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezdeki katkılarından dolayı ikinci danışman hocam **Dr. Öğr. Üyesi Şenol Kaya’ya** saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Deneysel süreçlerde yardımları bulunan çalışma arkadaşım **Emre Kara’ya** ayrıca teşekkür etmek isterim.

Son olarak hayatımın tamamında desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşime ayrıca desteklerinden dolayı iş yerim **Ak-Ay Elektrik Dış Tic. Koll. Şti. Hasan Gülşen ve Ort.** ailesine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri koordinatörlüğü 2022.09.03.1560 numaralı “Zirkonyum katkılanmış Bi-tabanlı süperiletken seramiklerin mekanik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi” başlıklı proje tarafından desteklenmiştir.

**Emre ORHAN**

# 1. GİRİŞ

İletkenden elektrik akımı aktığında elektronların hareketine karşı, iletkenin saflığına bağlı olarak bir direnç ile karşılaşır. Bu direnç enerji kaybına yol açmaktadır. Akımın akmaya devam etmesi için potansiyel fark uygulamak gereklidir. Süperiletkenlik kavramı, iletken malzemenin direncinin sıfır olduğu anlamına gelmektedir. Sıradan iletkenlerin mutlak sıfır noktasında süperiletken özellikler göstereceği bilinmektedir. Süperiletken özellik gösteren malzemenin içerisinde akım akarken bir direnç ile karşılaşmamaktadır. Bunun sonucunda ısı, ses gibi herhangi bir enerjiye dönüşmeden sonsuz akım akabilir. Bu nedenle, malzemelerin süperiletkenlik özelliklerinin keşfedilmesi büyük öneme sahiptir. Direncin sıfır olduğu şartlarda daha yaygın olarak elektriksel enerji iletiminin kullanılması, elektrik enerjisinin iletiminde verimliliği arttıracaktır ve kayıpları en aza indirecek önemli bir çözüm sunmaktadır. Aynı zamanda süperiletken malzemelerin özelliklerinden Elektrik Mühendisliği uygulamalarında ve teknolojiye faydalanabilmek için yeni malzeme arayışı ve araştırmaları devam etmektedir. Yeni araştırmalar süperiletken malzemelerin kritik sıcaklığı, mekanik özellikleri, manyetik alan ve akım taşıma kapasiteleri gibi özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

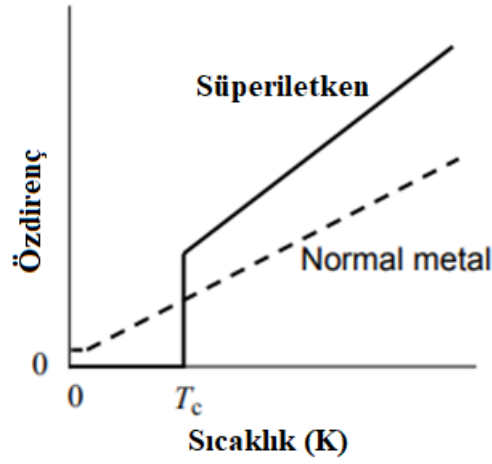
Bu tezde, süperiletkenlik kavramını daha iyi anlamak amacı ile öncelikle önemli olan bir takım temel kavramlara yer verilmiştir. Zirkonyum katkılanmış süperiletken seramiklerin yapısal, elektriksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bi-2223 süperiletken seramik malzemesi difüzyon yöntemi ile Zr kaplanmış ve 650 °C – 840 °C aralığında farklı sıcaklıklarda tavlansak elektriksel performansının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında, Bi-2223 süperiletken seramiğe Zr katkılanmasının BSCCO süperiletken seramik malzemenin özelliklerini düşürdüğü gözlemlenmiştir (Akdemir, 2015). Ancak, Zr'nin de içinde bulunduğu geçiş metalleri grubundan farklı tip elementlerin Bi-2223 süperiletken seramiğe difüze edilmesi sonucunda genellikle mekanik, yapısal, elektriksel ve süperiletkenlik özelliklerinde gelişmeler olduğu gözlemlenmiştir. (Hamid, 2000; Terzioğlu, 2008; Cevizci, 2013) Bu nedenle Zr elementinin Bi-2223 süperiletken seramiğine difüze edilmesi sonucunda mekanik, yapısal ve elektriksel özelliklerde gelişmeler olması beklenmektedir. Bu

Çalışmada X Işını Difraksiyonu (XRD), Taramalı Elektron Mikroskop görüntüsü (SEM), sıcaklık- öz direnç (R-T) ve statik Vickers mikrosertlik ölçüm verileri analiz edilmiştir.

### 1.1 Süperiletkenliğin Tarihçesi

Süperiletkenlik olgusu ilk olarak 1911 yılında Leiden Üniversitesinden Hollandalı fizikçi Heike Kamerling Onnes tarafından, sıvı Helyum sıcaklığına (4.2K, -452F, -269C) kadar soğutulan cıva metali ile keşfedildi (Onnes, 1911). Bu deneyde, Onnes sıvı Helyum sıcaklığında cıvanın direncinin aniden sıfıra düştüğünü fark etti. Sıcaklık mutlak sıfıra yaklaştıkça metallerin elektrik direncinin kaybolması gerektiği yıllardır biliniyordu, ancak o zamanlar sonlu sıcaklıklarda direncin sınır değerleri bilinmiyordu. Süperiletkenlik,  $T_c$  olarak gösterilen kritik sıcaklık olarak adlandırılan belirli bir sıcaklığın altında elde edildi. H.K. Onnes bu alandaki araştırmaları sayesinde 1913 yılında fizik dalında Nobel Ödülü kazandı.

Daha sonra birçok farklı süperiletken keşfedildi. 30 K'nın altında süperiletkenlik özellikleri sergileyen metalik elementler ve alaşımlar, düşük sıcaklık süperiletkenler (DSS) olarak adlandırılırken, 30 K'yi aşan  $T_c$ 'ye sahip bazı oksit bileşikleri, yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS) olarak adlandırılmıştır.  $T_c$ 'lerinin üzerinde, süperiletkenler, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi bakır (Cu) gibi iyi metal iletkenlerin direncinden daha yüksek elektrik direncine sahiptir. Çoğu oda sıcaklığında dirençli malzemelerdir.



**Şekil 1.1.** Normal metallerde ve süperiletkenlerde özdirenç-sıcaklık ilişkisi.

Süperiletkenliğin gelişmesiyle birlikte, malzemelerin sahip olduğu kritik sıcaklıklar artmıştır ve şimdi 130 K değerini aşan süperiletkenler mevcuttur.  $T_c$  ne kadar yüksek olursa, uygulamalarında süperiletkenleri soğutmak için gereken kriyojenik sistemlerin yapımı ve bakımı o kadar kolay olur. Kriyojenik malzemenin miktarı dolayısıyla harcanacak enerji ve kaynak azalacaktır.

İletkenin sıcaklığı mutlak sifıra yaklaştıkça elektrik direncinin azalacağı yıllarca biliniyordu. Ancak süperiletkenlerin sıradan iletkenlerden farkı sıradan iletkenlerin elektrik direnci sıcaklık azaldıkça kademeli olarak azalırken, süperiletkenlerde ise belirli bir sıcaklığın altında “kritik sıcaklık,  $T_c$ ” sifıra düşer. Süperiletkenin elektriği dirençsiz iletebilmesi ısı, ses veya diğer enerji biçimlerinin boşaltılmayacağı anlamına gelir. Şekil 1.1’de sıradan iletken ile süperiletkenin örnek özdirenç sıcaklık eğrisi bulunmaktadır.

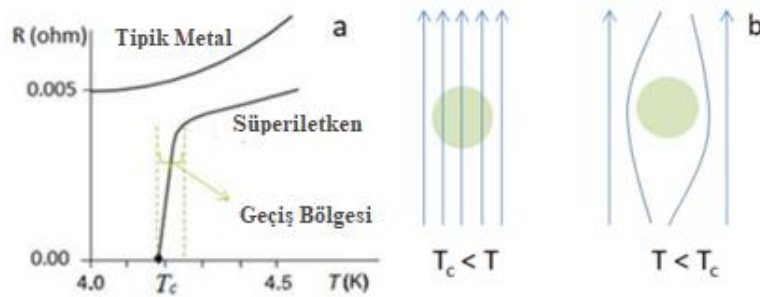
Süperiletkenlik üzerine yapılan araştırmaların temel amacı, ideal şartlarda (oda sıcaklığında veya yakın sıcaklıklarda) süperiletken özelliği gösteren malzemelere ulaşmaktır. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS) sıvı azot ile kritik sıcaklık seviyesine kadar soğutulabilir. Böylece soğutma maliyetleri oldukça düşüktür. Daha etkili ve maliyetli soğutma yöntemleri gerekiyor ise düşük sıcaklık süperiletkenidir (DSS).

Süperiletkenliğin keşfinden bu yana, süperiletken tabanlı teknolojilerde muazzam ilerleme kaydedildi (Liu, 2021; Wilson, 2012). Manyetik rezonans

görüntüleme, manyetik enerji depolama, havaya kaldırılmış trenler, güç iletim kablosu, kriyojenik seviye sensörleri, yüksek enerjili fizik deneylerinde parçacık hızlandırıcıları ve akım sınırlayıcı teknolojileri, süperiletkenlerin hayati uygulama alanlarından bazılarıdır (Sato, 2015; Gour, 2017).

## 1.2 Kritik Sıcaklık

Süperiletkenler özel malzemelerdir, yani doğal olarak tüm iletkenler süperiletken davranışlar sergilemez. Süperiletken ve normal iletkenlerin tipik direnç-sıcaklık ilişkisi Şekil 1.1'de gösterilmiştir (Saxena, 2012; Yıldırım, 2012).  $T_c$ 'nin üzerindeki sıcaklıklar için, malzeme direnci geleneksel Ohm yasasına uyar (Dikici, 2013). Sıcaklık  $T_c$ 'ye yaklaştıkça, süperiletken malzemelerin direnci geçiş bölgesinin altında neredeyse sıfıra düşer. Bu geçiş bölgesinin genişliği, süperiletken malzemeler üzerindeki safsızlıklara sıkı sıkıya bağlıdır (Semerci, 2015). Geçiş bölgesinin genişliği, saf ve tek fazlı süperiletkenler için dar ve keskin iken, bölge safsızlıkların etkisiyle genişletilebilir (Pakdil, Bekiroğlu, Öz, Sarıtekin ve Yıldırım, 2016; Yıldırım vd., 2012). Ayrıca dışarıdan uygulanan manyetik alan, aşağıdaki bölümde açıklanan Meissner Etkisi nedeniyle geçiş bölgesinin genişliğini de değiştirebilir (Doğruer, Aksoy, Yıldırım, Öztürk ve Terzioğlu, 2021).



**Şekil 1.2.** a) Normal bir metal ile bir süperiletkenin sıcaklık-direnç korelasyonu (Yıldırım, 2012), b-) Meissner Etkilerinin Şeması (Dikici, 2013), ( Şekil 1.2b: yeşil: süperiletken, oklar: manyetik akı)

### 1.3 Meissner Etkisi

Süperiletkenliğin keşfinden sonra, ikinci dönüm noktası W. Meissner ve R. Ochsenfeld tarafından 1933'lerde keşfedildi (Meissner & Ochsenfeld, 1933). Süperiletken malzemeler manyetik alan varlığında  $T_c$ 'nin altına soğutulurken, süperiletken malzemelerin içindeki manyetik akının olmadığı yani süperiletkenin içinden akı atıldığı bulunmuştur (Semerci, 2015). Bu gözlem, Şekil 1.2b'de gösterildiği gibi Meissner Etkisi olarak adlandırılmaktadır (Dikici, 2013). Meissner Etkisi, sıfır dirençli süperiletkenin birlikte mükemmel diamanyetizma özellikleri sergilediğini gösterir. Süperiletkenlerin bu benzersiz özelliklerinin keşfi ile birlikte, demiryollarında kullanılan manyetik kaldırma ile yüksek hızlı trenler gibi manyetik alanlarda uygulamalar için yeni kapılar açmaktadır.

### 1.4 Kritik Manyetik Alan ( $H_c$ )

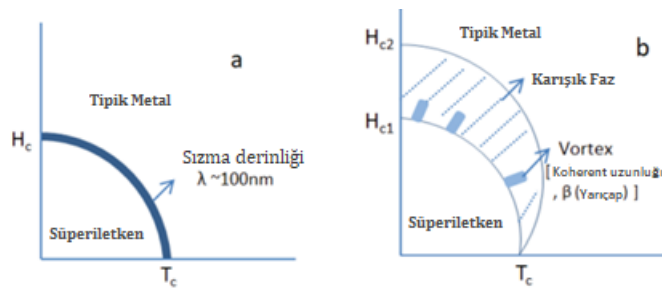
Yüksek bir manyetik alanda yani belirli bir değerinin ötesinde süperiletkenler sıradan bir iletken gibi davranır. Süperiletkenliğin bozulmasına sebep olan ve tekrar direncin ortaya çıkmasına sebep olan bu değere kritik manyetik alan " $H_c$ " adı verilir. Bu manyetik alan dışarıdan etki eden veya süperiletkenin içinden geçen akımın oluşturduğu manyetik alan olabilir. Kritik manyetik alan " $H_c$ " değeri sıcaklığa göre değişebilir. Ortam sıcaklığı  $T_c$ 'nin altına düştükçe  $H_c$  değeri artar.

### 1.5 Kritik Akım ( $J_c$ )

Süperiletken durumlarının bozulmasına neden olan ana bir parametre daha olabilir. Belirli bir akım değerinin üzerinde süperiletken durumu normal duruma geçer (Semerci, 2015). Bu belirli değerler literatürde kritik akım olarak adlandırılmakta ve  $J_c$  olarak ifade edilmektedir (Cabassi, Delmonte, Abbas, Abdulridha ve Gilioli, 2020).

## 1.6 Tip I - Tip II Süperiletkenler

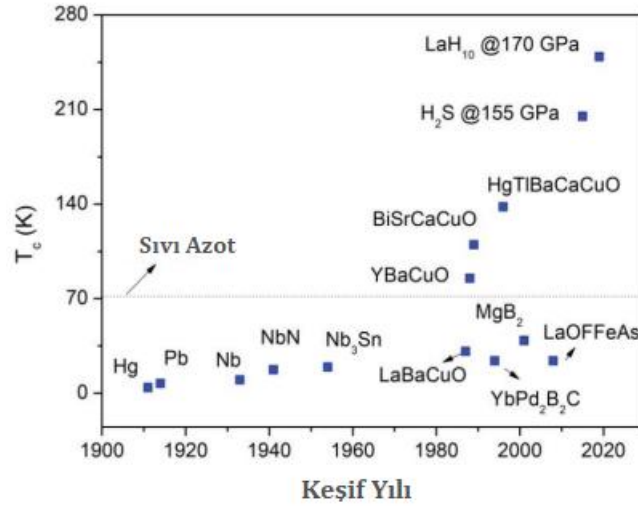
Manyetik akı dışlama özellikleri göz önüne alındığında süperiletken malzemeler Tip I ve Tip II süperiletkenler olarak iki gruba ayrılabilir. Normal iletkenlik ile süperiletken durumlar arasındaki geçiş kenarı dardır, yani manyetik akının nüfuz etme mesafesi ( $\lambda$ ) düşüktür ( $Ae^{-p}$  ile değişir ve yaklaşık olarak 100 nm'nin altındadır) (Dikici, 2013). Dolayısıyla, bu iki faz arasında keskin bir modülasyon gözlenir. Bu nedenle,  $H_c$  değerleri Tip II süperiletkenlerden nispeten küçüktür. Öte yandan, keskin kenar ile birlikte hem normal hem de süperiletken durumların karışımlarının bulunduğu geniş bir geçiş bölgesi bulunmaktadır (Dikici, 2013; Semerci, 2015). Bu karışım fazları sayesinde manyetik alanlar girdap adı verilen küçük silindirler şeklinde nüfuz eder. Manyetik alanı daha da artırmak, girdap sayısını artırır. Her silindirik girdabın çekirdek yarıçapı tutarlı uzunluk ( $\beta$ ) olarak adlandırılır. Bu, süperiletkenden normal iletkene faz geçişine neden olur.  $\lambda$ , Tip I süperiletken için  $\beta$ 'dan daha küçüktür, Tip II süperiletkenler için ise  $\beta$ ,  $\lambda$ 'dan daha düşüktür (Yıldırım, 2012). Tip I ve II süperiletkenlerin şematik gösterimleri sırasıyla Şekil 1.3a-b'de gösterilmektedir (Dikici, 2013; Semerci, 2015). Tip I süperiletkenler neredeyse saf metallerdir (Dikici, 2013) ve düşük  $H_c$  değerleri nedeniyle mıknatıs yapımında kullanışlı değildirler (Semerci, 2015). Genel olarak, Tip II süperiletkenler, Tip I süperiletkenlerden daha yüksek kritik sıcaklık sergiler ve daha fazla akım taşır. Tip II süperiletkenlerin bu özelliklerine ek olarak, yüksek  $H_c$  değerleri onları mıknatıs üretimine uygun hale getirir.



**Şekil 1.3.** a) Tip I ve b) Tip II süperiletkenlerin sızma derinliği ve koherent uzunluğu ile şematik gösterimi (Semerci, 2015; Kaya, 2022).

## 1.7 Süperiletkenlik Teorileri

Süperiletkenlerin teorisi oldukça karmaşıktır. 1934'te araştırmacılar, manyetik alan altındaki malzeme davranışlarını anlamak için Tip I süperiletkenlerin mekanizmaları için farklı modeller geliştirdiler (Ketterson, 2016). 1950 yılına gelindiğinde, Ginzburg-Landau'nun fenomenolojik makroskopik teorisi süperiletkenliği açıklamada büyük başarı elde etti (Ray, 2015). Bu teori, süperiletkenliğin bir tür makroskopik kuantum hali olduğunu varsayan Landau ikinci dereceden faz geçiş teorisinin matematiksel ve fiziksel bir formülasyonunu kullanır (Ketterson, 2016). 1957'de süperiletken teorisi için bir dönüm noktası elde edildi. Malzemelerin süperiletken davranışlarını John Bardeen, Leon N. Cooper ve J. Robert Schrieffer, kuantum mekaniği ile BCS teorisi olarak bilinen mikroskopik düzeyde açıkladılar (Bardeen, Cooper, & Schrieffer, 1957; Ray, 2015). Tahmin gücü sınırlı olmasına rağmen, mevcut başlangıçtan itibaren kullanılan yöntemlerle karşılaştırıldığında, süperiletkenlerin sınıflandırılması ve anlaşılması için hala geçerli bir olgudur (Flores-Livas ve diğerleri, 2020). BCS teorisi, elektronların, dolaştıkları kristaldeki fonon kafes titreşimlerinin aracılık ettiği Cooper çiftleri olarak bilinen bozonik çiftlerde nasıl çiftleştiklerini tanımlar (Ray, 2015). Başka bir deyişle, aralarında bir tür çekici etkileşim bulunan bağlı durumdaki iki elektronun tek bir sistem oluşturmak üzere eşleşmesi beklenir. Fononun yapışkan özelliğinden dolayı birleşen elektron-örgü-elektron etkileşimi sonucu oluşan bu elektronlara Cooper çiftleri denir (Yıldırım, 2012). BCS teorisi ile birlikte 1962'lerde Josephson Junction üzerinde elektronun kuantum tünellenmesine dayalı uygulamalar süperiletken malzeme teknolojisinin yolunu açmıştır (Dikici, 2013).



**Şekil 1.4.** Keşfedilen bazı süperiletken malzemelerin kritik sıcaklıklarının yıllara göre gösterimi (Ray, 2015; Kaya, 2022)

BCS teorisi, tipik olarak 30 K'nin altında, sıfır Kelvin'e yakın malzemelerin süperiletken davranışlarını tanımlar. Bunun nedeni, elektronlar arasındaki Coulomb itme kuvvetinin, 30 K'nin üzerindeki fononlar yoluyla bağlanmadan daha büyük olmasıdır (Ray, 2015). Bu nedenle, 30 K'nin üzerinde  $T_c$ 'ye sahip süperiletkenlerin icadı ile BCS teorisi yetersiz kalır. Bu nedenle, süperiletkenlik teorisi oldukça karmaşıktır (Flores-Livas ve diğerleri, 2020). Süperiletkenin keşfinden bu yana yığın, seramik ve tel şeklinde çeşitli elementler ve bileşikler teknolojik uygulamalar için araştırılmıştır (Bednorz ve Muller, 1986; Gajda et al., 2016; Karaboga, Yetiş, Akdoğan, Gajda & Belenli, 2018; Liu et al., 2021; Poole, Canfield & Ramirez, 2000; Wilson, 2012; Zalaoğlu, Karaboga, Terzioğlu & Yıldırım, 2017). Son yüzyılda süperiletken malzemelerin evrimi Şekil 1.4'te gösterilmektedir (Ray, 2015; Wilson, 2012). 30 K'nin üzerinde  $T_c$  sergileyen süperiletkenlerin icadı, süperiletken teknolojisi için başka bir kilometre taşı olarak kabul edilebilir. Bednorz ve Müller, 1986'da La-Ba-CuO<sub>x</sub> (Bednorz & Muller, 1986) gibi olası yeni bir süperiletken sınıfı bildirdiler ve Y-Ba-CuO<sub>x</sub> ve Bi-Sr-Ca-CuO<sub>x</sub> vb. dahil olmak üzere aşağıdaki çalışmalar buluşlarını desteklediler. (Hazen ve diğerleri, 1988; Kirschner ve diğerleri, 1987; Ray, 2015; Takahashi ve diğerleri, 2008). 30 K'nin üzerinde  $T_c$  sergileyen süperiletkenler, yüksek sıcaklık süperiletkenleri olarak adlandırıldı. Bu tür süperiletkenler, Tip II Süperiletkenler malzemeleri olarak sınıflandırılır. 77 K'nin üzerinde  $T_c$  ile süperiletken

malzemelerin keşfi de önemli bir dönüm noktasıdır. 77 K'nin üzerinde, sıvı azot, süperiletken tabanlı cihazların kullanım maliyetini önemli ölçüde azaltan bir soğutma maddesi olarak kullanılabilir. Şekil 1.4'te görülen demir bazlı yapı,  $MgB_2$  vb. gibi yeni malzemelerin keşfine rağmen, Bakır oksit ( $CuO_x$ ) bazlı (77 K'nin üzerinde ve atmosfer basıncında kullanışlı olan  $T_c$ ) süperiletkenlere hala özel bir ilgi gösterilmiştir. Kuprat süperiletkenleri olarak bilinen  $CuO_x$  bazlı süperiletkenler. BCS teorisi ile birlikte, bazı araştırmacılar Cu 3d ve O 2p dalga fonksiyonları arasındaki dalgalanma/örtüşme mekanizması doğrultusunda kupratların süperiletkenliğini açıklamaktadır (Aftabi & Mozaffari, 2021; Pakdil ve diğerleri, 2016). Ek olarak, çok katmanlı CuO'nun anizotropik kristal yapısı da kuprat süperiletkenlerin yüksek  $T_c$  özelliklerinin katkısıdır (Dikici, 2013). Kupratların bu benzersiz özellikleri sayesinde, önümüzdeki yıllarda bir çok çalışma yapılacağı düşünülmektedir.

### 1.8 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

1911 yılında Onnes tarafından süperiletkenliğin keşfinden itibaren, çok fazla süperiletken keşfedildi ve kritik sıcaklık günden güne arttı. 1975 yılına kadar 2000'den fazla süperiletken keşfedildi ve  $Nb_3Ge$ 'nin 1973'de keşfi ile birlikte kritik sıcaklık 22.3 K değerlerine kadar arttırıldı. Bundan sonra, 10 yıl boyunca kritik sıcaklık değerlerinde bir gelişme kaydedilemedi. 1980 'li yıllarda süperiletkenliğin yeni bir yapısı keşfedildi. Süperiletkenliğin gelişiminde büyük bir artış 1986'da, Zürih'teki IBM araştırma laboratuvarından J. George Bednorz ve Karl Müller'in, 30 K teorik tavanının ve yüksek sıcaklık çağıının üzerinde süperiletken özelliklere sahip ilk oksit bileşiklerini keşfetmesiyle tetiklendi ve yüksek sıcaklık süperiletkenleri dönemi başladı (Bednorz, Müller, 1986). Metal ve alaşımların yerini, oksit ve seramik malzemeler aldı.

Güçlü DA mıknatısların uygulanması için DSS malzemelerinin kullanımı yıllardır süperiletkenlerin önde gelen bir uygulaması iken, yeni YSS bileşikleri, sıvı azot sıcaklığında 77 K'de AA güç uygulamaları için yeni olanaklar sundu.

Süperiletkenlerde sadece DA akım uygulandığında sıfır direnç gözlemlenir ve AC çalışma koşullarında Joule (ısı) dağılımı ortaya çıkar.

Yüksek sıcaklıklı süperiletkenler, kriyojenikteki en basit soğutuculardan biri olan sıvı azotun kaynama noktası olan 77 K ( $-196.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $-321.1\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) üzerindeki sıcaklıklarda süperiletkenler gibi davranan malzemeler olarak işlevsel olarak tanımlanır (Timmer, 2012). Şu anda normal basınçlarda ilettiği bilinen tüm malzemeler, ortamın çok altındaki sıcaklıklarda süperiletken hale gelir ve bu nedenle soğutma gerektirir. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin çoğu seramik malzemelerdir. Öte yandan, Metalik süperiletkenler genellikle  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında çalışır: daha sonra düşük sıcaklık süperiletkenleri olarak adlandırılırlar. Metalik süperiletkenler, yüksek sıcaklıktaki süperiletkenlerden önce keşfedilip kullanıldıklarından, aynı zamanda sıradan süperiletkenlerdir.

Yüksek  $T_c$  süperiletkenler, birim hücreler olarak adlandırılan farklı elementlerin atomlarının tekrar eden modellerinden oluşan kimyasal bileşiklerdir. Bir YSS süperiletkeninin  $-\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  – birim hücresi, Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Trilyonlarca birim hücre, tane olarak bilinen çok küçük bir kristal oluşturur. Makroskopik bir örnek yapmak için milyonlarca taneye ihtiyaç vardır. YSS, çoğu oksit olan kırılğan seramik malzemelerdir - oda sıcaklığındaki dirençleri bakırdan yaklaşık 100 kat daha yüksektir (Tixador, 1995).

**Tablo 1.1.** Güç uygulamaları için YSS süperiletkenlerinin kritik parametreleri (Stavrev, 2002)

|                                    | YBCO     | Bi-2212 | Bi-2223 |
|------------------------------------|----------|---------|---------|
| $T_c$ (K)                          | 93       | 87      | 110     |
| $B_{irr}$ @ 4.2 K (T)              | >30      | >30     | >30     |
| $B_{irr}$ @ 77 K (T)               | >5       | 0.005   | 0.5     |
| $J_c$ @ 4.2 K (A/mm <sup>2</sup> ) | >100,000 | 5,000   | 3,000   |
| $J_c$ @ 77 K (A/mm <sup>2</sup> )  | >10,000  | 100     | 500     |

Bednorz ve Müller tarafından keşfedilen ilk yüksek  $T_c$  süperiletken, 30 K'nin hemen üzerinde bir  $T_c$ 'ye sahip olan lantan bakır oksit  $(\text{La, Ba})_2\text{CuO}_4$  idi. Şimdiye kadar keşfedilen en yüksek  $T_c = 134\text{ K}$  değerine sahip YSS malzemesi  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ 'dir.  $T_c > 77\text{ K}$  olan ilk süperiletken, bizmut oksitler  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  ve  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2212 ve Bi-2223 olarak anılır) ile birlikte şu anda en gelişmiş YSS malzemeleri olarak bahsedilen YBCO veya Y-123

olarak bilinen itriyum baryum bakır oksit  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 'tur. Son iki bileşik, bizmut stronsiyum kalsiyum bakır oksit anlamına gelen BSCCO olarak da adlandırılır.

Tablo 1, en yaygın kullanılan YSS olan YBCO, Bi-2212 ve Bi-2223'ün kritik parametrelerini sunmaktadır.

### 1.8.1 BSCCO

BSCCO iletkenleri, YSS'nin mevcut tüm büyük ölçekli uygulamalarının temelini temsil eder. 1. nesil iletkenler olarak adlandırılırlar. BSCCO, köklü bir üretim teknolojisine sahiptir ve uzun uzunluklarda (1 km'ye kadar) ticari iletkenler mevcuttur.

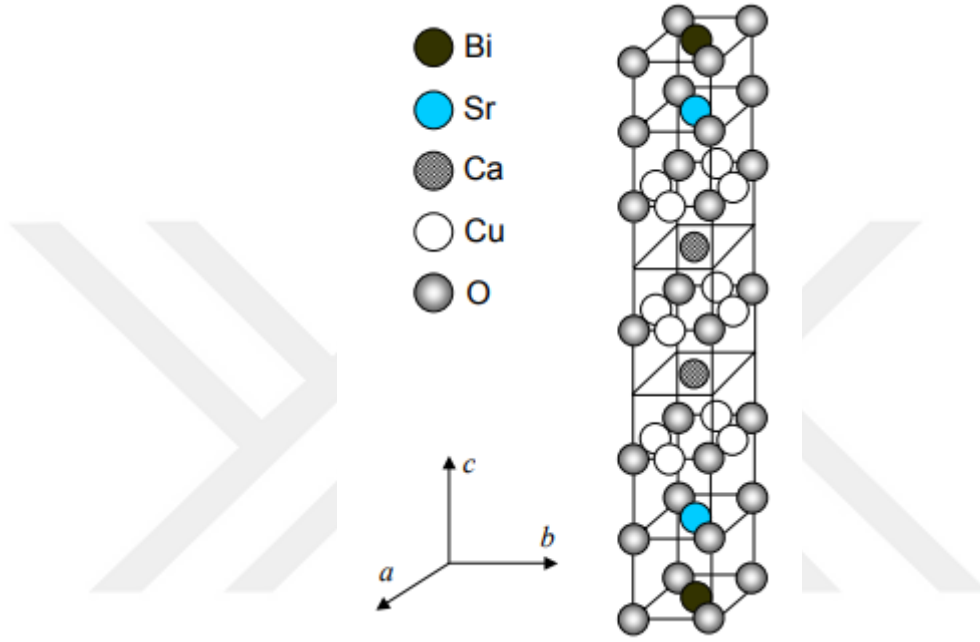
BSCCO, bizmut (Bi), stronsiyum (Sr), kalsiyum (Ca), bakır (Cu) ve oksijenden (O) oluşan süperiletkenler grubudur. Böyle bir bileşiğin kimyasal formülü  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+x}$ 'tir. n en yaygın olarak 2 değerini alır. x, YBCO'ya benzer şekilde oksijen içeriğini belirtir. YBCO'dan farklı olarak nadir toprak elementleri içermez. Bu bileşik 1988'de keşfedildi (Maeda, Tanaka, Fukutomi, Asano, 1988). BSCCO türleri, belirli atomların sayısı ve n parametresinden sonra adlandırılır. Bu nedenle Bi-2201, Bi-2212, Bi-2223 ve Bi-2234 vardır.

YBCO'ya benzer şekilde, BSCCO özellikleri büyük ölçüde oksijen içeriğine bağlıdır. Bakır atomu başına 0,16 boşluk fazlası olduğunda optimum kritik sıcaklığa ulaşılır (Presland, 1991). Aşırı ve yetersiz katkı, kritik sıcaklığın düşmesine neden olur. Yetersiz katkı ayrıca kritik manyetik alanın dramatik bir şekilde azalmasına yol açar. Bi-2201 için optimum kritik sıcaklık yaklaşık 20K, Bi-2212 için 95K, Bi-2223 - 108K ve Bi-2234 için 104K'dır. Yüksek basınçlarda bu sıcaklıklar artma eğilimindedir. 4,2K'da üst kritik manyetik alan 200T olarak bulunmuştur (Golovashkin, 1991). Bu, girdapların erimeye ve ayrılmaya meyilli olduğu tersinmezlik alanı ile sınırlıdır. Bi-2212'nin penetrasyon derinliği 269 nm ve koherens uzunluğu 1,6 nm'dir (Prozorov, 2000).

BSCCO'nun yapısı Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Bizmut atomları talyum veya cıva ile değiştirilebilir, bu da 135K kritik sıcaklığa sahip süperiletken oluşumuna yol açar. Bizmutun çift katmanları, Van der Waals kuvvetleri aracılığıyla yalnızca

zayıf bir şekilde bağlanır. Bu nedenle grafitte olduğu gibi kayma meydana gelebilir ve yapı deforme olabilir. Bundan dolayı kolayca hizalanırlar.

BSCCO, şekillendirilebilirliği nedeniyle kablolar için malzeme olarak uygulama bulur. Bunlar elektrik ve enerji endüstrisinde kullanılabilir. BSCCO telleri ayrıca sargı malzemesi olarak transformatörlerde ve jeneratörlerde de uygulanabilir.

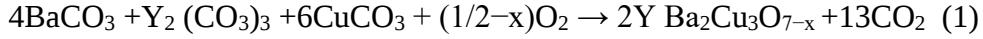


Şekil 1.5.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 'un birim hücresi

### 1.8.2 YBCO

YBCO, itriyum (Y), baryum (Ba), bakır (Cu) ve oksijenden (O) yapılmış süperiletken seramik malzemeler grubunun adıdır (Alikhanzadeh, Salavati-Niasari, 2012).  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  formülü ile gösterilir. YBCO'nun kritik sıcaklığı normal basınçta 93K olarak bulunmuştur (Wu, Ashburn, Torng, Hor, Meng, Gao, Huang, Wang, Chu, 1987). Bu keşif, süperiletkenlerin gelecekteki uygulamaları için büyük önem taşıyordu. Sıvı helyum yerine ilk kez YBCO'nun keşfi ile sıvı azotla soğutma gerçekleşmiştir. (Sıvı azot kaynama sıcaklığı 77 K'dir.) Sıvı azot sıcaklığının üzerinde süperiletken özellikler sergilediği bulunan ilk malzemeydi.

YBCO sentezinin birkaç yöntemi vardır. Başlangıçta, bir metal karbonat karışımının yüksek sıcaklıklara (1000K'nin üzerinde) ısıtılması işlemiyle üretildi. Böyle bir işlem için kimyasal formül aşağıda gösterilmiştir.



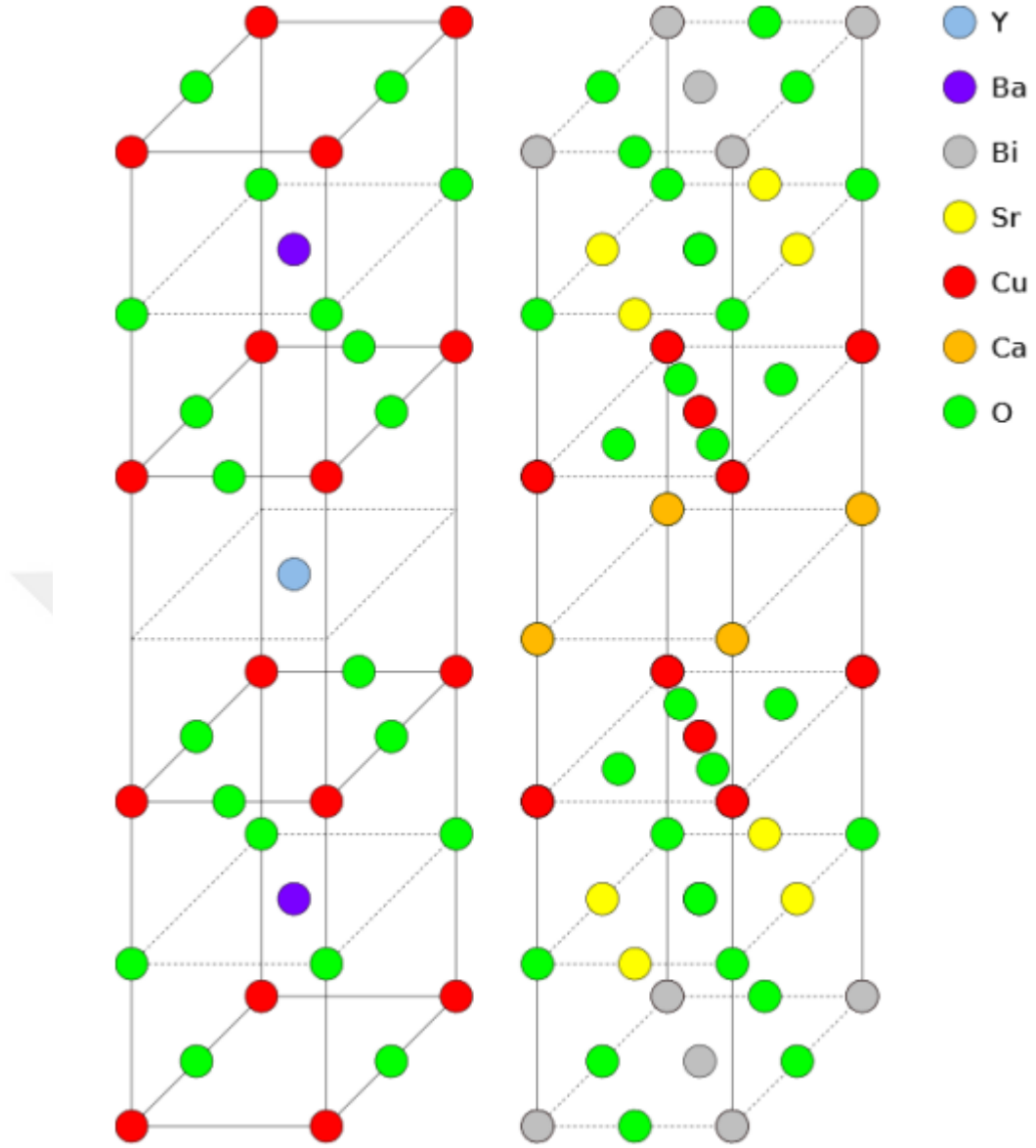
BSCCO ve YBCO arasındaki temel yapısal farklılıklardan biri, ikincisinin şarj rezervuar tabakasının metalik olması ve birincisi gibi yalıtkan olmamasıdır. Bu nedenle, YBCO daha az anizotropiktir.

YBCO'nun bir diğer önemli avantajı, YBCO iletkenlerinde elde edilen çok büyük akım yoğunluklarıdır - 77 K'da 10.000 A/mm<sup>2</sup>'nin üzerinde. Ancak bu iletkenler, laboratuvar numunelerinde en fazla 1 m'lik kısa uzunluklarda üretilir.

YBCO en temiz ve en düzenli kristal yapıya sahip malzeme olduğu için en çok çalışılan malzeme olmuştur.

Uzun YBCO iletkeni elde etmenin zorluğu, BSCCO'nunkinden tamamen farklı olan üretim teknolojisine özgüdür. YBCO, esnek bir alt tabaka üzerinde biriktirilmiş birkaç µm YSS malzemesinden oluşan ince bir filminden oluşan kaplanmış bir iletkenidir. Bu işlemin bir varyasyonu, IBAD adı verilen İyon Işını Destekli Biriktirmedir. Bu işlemde, YSS malzemesi filmleri, esnek bir alt-tabaka üzerine yerleştirilen hizalanmış bir tampon tabaka (IBAD tabakası) üzerine biriktirilir. Bu işlem, YSS filmlerinin hizalanmasını ve dolayısıyla elektriksel performanslarını iyileştirir. Diğer iki rakip süreç vardır – Yuvarlanma Destekli Dokulu Yüzey (RABiTS) ve Eğimli Yüzey Biriktirme (ISD).

YBCO, 2. nesil iletkenler için en uygun malzeme olarak kabul edilir. Bununla birlikte, şu an için uzun YBCO iletkenleri elde etmek mümkün değildir ve bu soruna çok sayıda araştırma çalışması yapılmaktadır.



**Şekil 1.6.** YBCO ve BSCCO'nun kristal yapısı

BSCCO, neredeyse yalıtkan olan çift Bi-O katmanına sahiptir (bkz. Şekil 1.6), bu da bileşikleri elektronik uygulamalar için çok uygun olan bir süperiletken-yalıtkan-süperiletken yığını yapar (Larbalestier, 2000).

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Bi tabanlı süperiletkenler insan sağlığı açısından toksin maddeye sahip olmaması, içerisinde nadir toprak elementi içermemesi sebepleriye difüzyon esnasında tehlike arz etmemesi, elektriksel açıdan yüksek kritik sıcaklığa ve manyetik alan taşıma kapasitesine sahip olması nedenleriyle diğer süperiletkenlerden ayrılmaktadır. BSCCO süperiletkenlik özelliklerini geliştirmek için yapılan çalışmalarda tavlama sıcaklığı, peletizasyon basıncı, sinterleme süresi gibi parametlerde değişiklikler yaparak ve farklı metalik katkılamalar ile daha iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Bu bölümde kristal yapı içerisine yapılan katkılama çalışmaları araştırılmıştır. Literatüre bakıldığında birçok çalışmada temel süperiletkenlik ve mekaniksel özellikleri geliştirirken, bazı çalışmalarda süperiletkenlik yapısının bozulduğu göstermektedir.

1987 yılında Michel vd. yaptıkları çalışmada,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$  ve  $\text{CuO}$  bileşiklerini kullanarak BSCCO sisteminin süperiletken özellik gösterdiğini keşfetmişlerdir. Bu toza 12 saat süresince  $800^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kalsinasyon işlemi uygulamışlar ve ardından 2 saat  $900^\circ\text{C}$  sıcaklığa maruz bırakmışlardır. Elektriksel direnç ölçümleri sonucunda 14 K'de direncin sıfıra düşüşü ve 22 K'de süperiletkenlik fazına geçtiği gözlemlenmiştir (Michel vd. 1987).

1988 yılında Maeda vd. yaptıkları çalışmada, Bizmut sistemine Kalsiyum ilave etmişlerdir. Elde ettikleri  $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$  karışımına 8 saat süresince  $800^\circ\text{C}$  sıcaklığa maruz bırakmışlardır. 75 K'de elektriksel direncin sıfıra düştüğü ve 83 K'de süperiletken özellik gösterdiği gözlemlenmiştir (Maeda vd. 1988).

1988 yılında Tarascon vd. yaptıkları çalışmada, Bizmut bulunduran süperiletken bileşiklere ait kristal yapının faz serisinin  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$  şeklinde olduğunu göstermişlerdir.  $n=1$ 'de 2201 fazına sahip ve  $n=2$ 'de 2212 fazına sahip süperiletken malzemeyi üretmişlerdir.  $n=1$  için kritik sıcaklık değerini 6 K,  $n=2$  için ise 75 K olarak ölçmüşlerdir. Devamında elde ettikleri  $n=3$  fazı için kritik sıcaklık değerini 110 K olarak bulmuşlardır ancak geçiş genişliğinin 80 K'e kadar olmasını ortadan kaldıramamışlardır (Tarascon vd. 1988).

1988 yılında Mazaki vd. yaptıkları araştırmada, BSCCO sistemine Kurşun (Pb) ilave etmişlerdir. Toz numunelerle yapılan ölçümlerde, Bi-Sr-Ca-Cu-O sisteminde Bi yerine Pb kısmi yer değiştirmesinin yüksek  $T_c$ 'nin hacim fraksiyonunu arttırdığı ve sistemin %90 oranında tek fazdan oluştuğu gözlemlenmiştir (Mazaki vd. 1988).

2001 yılında Khalil vd yaptıkları araştırmada, Bi-2223 süperiletken sisteminde Kurşun (Pb) elementi katkılanarak süperiletkenlik ve mekaniksel özellikleri araştırmışlardır. Katı hal tepkime yöntemi ile  $Bi_{2-x}Pb_xSr_2Ca_2Cu_3O_y$  ( $x=0.00$  ile  $x=0.5$  aralığında) yapısında süperiletken numuneler hazırlandı. Farklı oranlarda Pb katkılı numuneler X Işını Difraksiyonu, Taramalı Elektron Mikroskop görüntüsü, elektriksel direnç ve mikrosertlik ölçümleri ile karakterize edildi.  $x=0.00$ ,  $0.18$ ,  $0.22$ ,  $0.25$ ,  $0.30$ ,  $0.35$ ,  $0.50$  değerlerinde örnekler kullanılmıştır ve  $x=0.3$  örneğine kadar Bi-2223 fazının giderek geliştiği ve safsızlık fazlarının azaldığı sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, yüzey analizlerinde Bi-2223  $x=0.3$  oranına kadar tane yapılarının giderek arttığı, ebatlarının geliştiği ve boşluklu yapının azaldığı gözlemlenmiştir.  $x=0.30$  oranına kadar süperiletkenlik özelliklerinin yanı sıra mikrosertlik ölçümlerinde mekaniksel özelliklerinin de geliştiği gözlemlenmiştir ve en iyi sonuçlar bu oranda elde edilmiştir ama ileri katkılama oranlarında Bi-2223 fazının Bi-2212 fazına dönüşmesi ve diğer safsızlık fazlarının oluşması ile süperiletkenlik özellikleri bozulmuştur (Khalil, 2001).

2008 yılında Bilgili vd. yaptıkları araştırmada, katı hal tepkime yöntemi ile Lityum katkılı yüksek sıcaklık süperiletkeni  $Bi_{17}Pb_{0.3}Sr_2Ca_2Cu_{3-x}Li_xO_y$  ( $x=0.00$ - $0.20$  aralığında farklı değerlerde) özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Örnekler X Işını Difraksiyonu, Taramalı Elektron Mikroskop görüntüsü ve elektriksel direnç ölçümleri ile karakterize edilmiştir.  $x=0.05$  ve  $x=0.20$  örneklerin Bi-2223 yüksek  $T_c$  fazının %81 oranında en yüksek hacim fraksiyonuna sahip olduğu analiz edilmiştir.  $x=0.20$  değerinde sıfır dirençte maksimum kritik sıcaklık ( $T_c=98$  K) gösterirken, geçiş aralığı minimumdur. Artan Lityum oranı ile  $T_c^{offset}$  değerinin geliştiği gözlemlenmiştir. (Bilgili, 2008)

2008 yılında Terzioğlu vd. yaptığı araştırmada, süperiletken örneklerin kristal yapısı ve süperiletkenlik özellikleri üzerine altın elementinin etkileri

araştırıldı. Saf numune ile katı hal tepkime yöntemi ile altın kaplanarak tavlama işlemi gerçekleştirilen numunenin süperiletkenlik özellikleri X Işını Difraksiyonu, Taramalı Elektron Mikroskop görüntüsü ve elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen bulgularda, altın elementi katılanan numunede, süperiletken tanelerin ebatlarının büyüdüğü, bağlarının daha kuvvetli olduğu ve daha homojen yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Elektriksel ölçümlerde kritik sıcaklık değerinin yükseldiği gözlemlenmiştir (Terzioğlu, 2008).

2011 yılında Yıldırım vd yaptığı çalışmada, katı hal tepkime yöntemi ile Cr (Krom) elementinin Bi-2212 süperiletken seramiklerine eklenmesinin etkilerini X Işını Difraksiyonu, Taramalı Elektron Mikroskop görüntüsü, elektriksel direnç ölçümleri ile çalışmışlardır. Bulgulara göre, Cr elementi ile doğru orantılı olarak örneklerin kritik sıcaklık seviyesinin azaldığı, SEM sonuçlarında tanelerin ebatlarının küçüldüğünü ve taneler arası boşlukların arttığı gözlemlenmiştir. Cr elementinin seramiklerin süperiletken özelliklerini düşürdüğü sonucuna varılmıştır (Yıldırım, 2011).

2015 yılında Abbas vd yaptığı çalışmada,  $\text{Bi}_{2-x}\text{Cd}_x\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  ( $x=0.00$  ile  $x=0.5$  aralığında) karışımında farklı oranlarda Cd elementinin katılanması ile katı hal tepkime yöntemi ile hazırlanan süperiletken örneklerin mekaniksel ve yapısal özelliklerini çalışmışlardır. Örneklerin özellikleri Vickers mikrosertlik, X Işını Difraksiyonu ve elektriksel ölçümleri ile karakterize etmişlerdir. Örnekler  $x=0.0$ ,  $0.1$ ,  $0.2$ ,  $0.3$ ,  $0.4$ ,  $0.5$  oranlarında hazırlamışlardır. Elde edilen sonuçlarda,  $x=0.2$  oranına kadar yüzey morfolojisinin gelişmesi ve Bi-2223 fazının yoğunluğunun artması ile süperiletkenlik geçiş sıcaklığı değerinin azalmaya başladığı görülmektedir. Cd oranının artması ile Cd elementleri taneler arasına girerek mekaniksel özelliklerin gelişmesine sebep olmuştur (Abbas, 2015).

2015 yılında Akdemir vd yaptığı çalışmada, katı hal tepkime yöntemi ile Zr katılanmış Bi-2223 süperiletken seramiklerinin yapısal, mekaniksel ve elektriksel özelliklerini X Işını Difraksiyonu, Taramalı Elektron Mikroskopu, Vickers mikrosertlik ölçümleri ile karakterize etmişlerdir. Elde edilen bulgularda, kritik sıcaklık seviyesinin düştüğü, taneler arasındaki bağlantının gerilediği, Bi-2223 süperiletken seramiklere Zr katılanmasının süperiletken özellikleri düşürdüğü sonucuna varmışlardır (Akdemir, 2015).

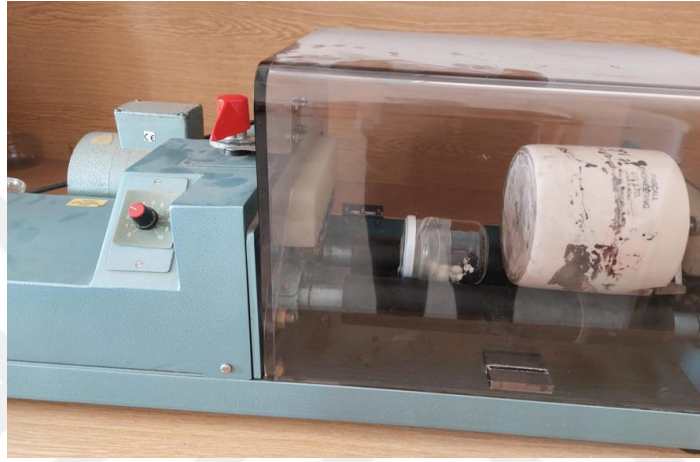
Literatür çalışmalarından görüldüğü gibi katkılama yapılan birçok element, BSCCO süperiletken yapının süperiletken özelliklerini önemli derecede geliştirmiştir. Metalik element katkılama çalışmalarının yanında tavlama sıcaklığı, süresi, peletizasyon basıncı gibi malzeme hazırlama yöntemlerinde temel parametrelerde yapılan değişiklikler ile daha iyi sonucu elde etmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır.

2013 yılında Özkurt vd. yapılan çalışmada, tavlama sıcaklığında yapılan değişikliklerin, katı hal tepkime yöntemi ile hazırlanan Bi-2223 seramiklerin yapısal ve süperiletkenlik özellikleri üzerinde etkisi araştırılmıştır. Tavlama sıcaklığı etkisi numunelere 730 °C'den 830 °C'ye değiştirilerek X Işını Difraksiyonu, Taramalı Elektron Mikroskop görüntüsü, elektriksel direnç ve manyetik ölçümler ile analiz edildi. Elde edilen bulgularda, en iyi süperiletken özellik gösteren bulgular 830 C'de tavlama işlemi uygulanan numunede gözlemlenmiştir. En yüksek geçiş sıcaklığı ve akım yoğunluğu, taneler arası safsızlık fazlarının azalması ve daha geniş histeresiz eğrisi gözlemlenmiştir. Diğer tavlama sıcaklıklarında ise numunelerde süperiletkenlik kritik sıcaklık değerinin giderek azaldığı, Bi-2223 fazının Bi-2212 fazına dönüştüğü, tane ebatlarının küçüldüğü ve manyetik özelliklerinin zayıfladığı bulunmuştur (Özkurt, 2013).

2015 yılında Ghazala vd yapılan çalışmada, sinterleme süresinde yapılan değişikliklerin, katı hal tepkime yöntemi ile hazırlanan Antimon katkılı Bi tabanlı süperiletken örneklerin  $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.2}\text{Sb}_{0.1}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  karışımında etkisi araştırıldı. Numunelerin üzerine 850 °C'de 80, 100, 120, 140 ve 160 saat sinterleme sürelerinin etkisi X Işını Difraksiyonu, Taramalı Elektron Mikroskop görüntüsü, elektriksel direnç ölçümleri ile analiz edildi. Elde edilen bulgularda, 160 saat boyunca sinterlenen örneklerde Bi-2223 fazının Bi-2212 fazına dönüştüğü, tanelerin ebatlarının küçüldüğü tespit edilmiştir. 140 saate kadar artan sinterleme süreleri ile kritik geçiş sıcaklığının arttığı, tanelerin ebatlarının geliştiği, Bi-2223 yüksek sıcaklık fazının yoğunluğu giderek arttığı görülmüştür. 140 saat sinterleme işlemi uygulanan örneklerde tanelerin daha düzgün yöneldiği ve birbirleriyle bağlantılarının arttığı görülmektedir. Sonuç olarak 140 saat süresince sinterlenen numunede en iyi süperiletkenlik özellikler gözlemlenmiştir (Ghazala, 2015).

## 2.1 DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu çalışmada temel superiletken malzeme olarak Alfa Aesar tarafından  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$  (Bi-2223) spesifik oranı ile sentezlenen kurşun katkılı Bizmut Kalsiyum Stronsiyum Bakır Oksit (BPSCCO) tozu kullanılmıştır. Bilyalı öğütme işlemi, toz malzemeyi farklı boyutta toplar kullanarak darbe ve aşınma yolu ile çok küçük parçalara öğütmek ve karıştırmak için kullanılmaktadır. Bi-2223 tozu, malzemelerin homojenleştirilmesi ve toz boyutunun küçültülmesi için Şekil 3.1'deki gibi bilyalı öğütme sisteminde iki saat öğütüldü.



Şekil 2.1. Bilyalı öğütme işlemi

Toz içerisindeki olası karbon kontaminasyonunu ve emilen nemi uzaklaştırmak için öğütülmüş Bi-2223 tozunun kalsinasyon işlemi tüp fırında 800 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca gerçekleştirilmiştir.(bkz. Şekil 3.2) Isıtma ve soğutma hızı dakikada 5 °C olacak şekilde ayarlandı. Kalsinasyon işleminin ardından, partikül boyutlarını en aza indirmek için Şekil 3.3'te görüldüğü gibi tozlar ayrıca akik havanda yaklaşık 30 dakika öğütüldü.



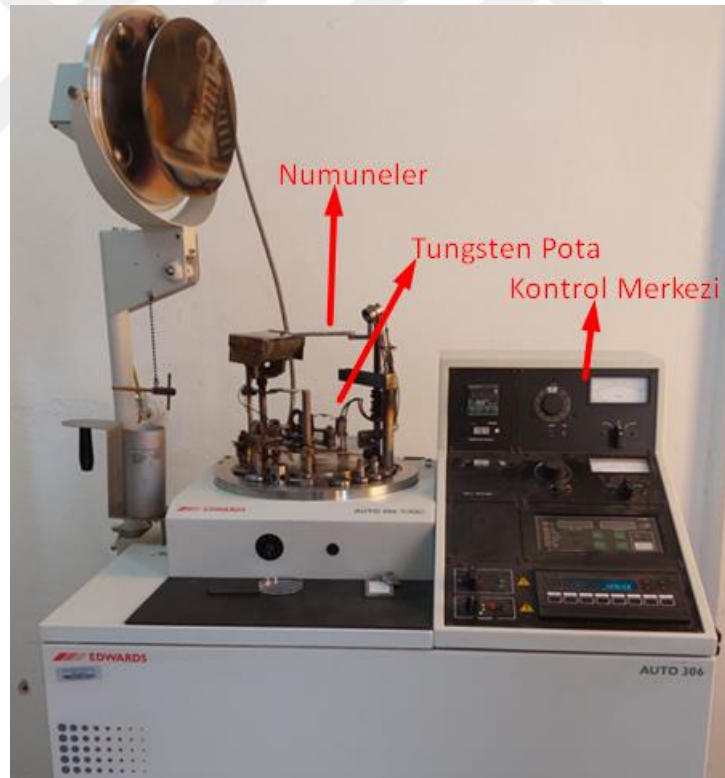
**Şekil 2.2.** Protherm programlanabilir kül fırını



**Şekil 2.3.** Akik havan

Külçe süperiletken seramikler, bu tozların peletlenmesi yoluyla üretildi. Akik öğütme işleminden hemen sonra, tozlar  $2.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$  dikdörtgen boyutlarında bir çubuk halinde peletlenmiştir. Peletleme işlemleri çevre koşullarında 5 dakika

boyunca 948 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi toz karışımlarına veya toz tanelerine ısı (termal enerji) uygulayarak, boşluklu yapısını azaltıp katı hale getirmeyi sağlayan bir sıkıştırma metodudur. Sinterleme işlemi temelinde, yoğunlaşma ve tane büyümesidir. Üretilen dökme seramikler, aynı ısıtma ve soğutma hızlarında 840 °C'de 36 saat boyunca sinterlendi. Sinterleme işleminin ardından Bi bazlı dökme seramikler altı gruba ayrıldı. Birinci grup numuneler işlenmeden tutuldu ve kalan numuneler Zirkonyumun çökeltilmesi için buharlaştırma odasına yüklendi (Şekil 3.4). %99.95 saflıktaki Zirkonyum (Zr) tel de buharlaşma odasının içine tungsten tekneye yüklenmiştir. Temel oda basıncı  $10^{-5}$  Torr'un altında olacak şekilde ayarlandı. Zr teli Bi bazlı toplu süperiletken seramiklerin bir yüzeyi üzerinde termal olarak buharlaştırıldı. Dökme seramiklerin tüm yüzeyinin siyah rengi, Zr buharlaşmasından sonra gri renge dönüşmüştür. Zr'nin birikmesi ayrıca multimetre ile yüzey özdirenç ölçümleri ile doğrulandı.



Şekil 2.4. EDWARDS Auto 306 Termal Buharlaştırıcı

Tavlama, bir metalin erime noktasının altında yüksek bir sıcaklıkta ısıtılması ve ardından soğutulması sonucu özelliklerinin iyileştirilmesi işlemidir. Kırılgenliği azaltma ve iç gerilmeleri azaltarak toklaştırma etkisine sahiptir. Tavlama için uygun sıcaklıklar malzemenin türüne göre değişkenlik göstermektedir. Zr buharlaştırma işleminden sonra, gruplandırılmış numunelerin tavlama yoluyla Bi bazlı dökme seramiklere Zr difüzyonları gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle numuneler ayrı ayrı 650 °C, 700 °C, 750 °C, 800 °C ve 840 °C'de iki saat süreyle tavlama yapılmıştır. İlerleyen bölümlerde saf Bi esaslı dökme seramikler saf-Bi olarak işaretlenirken, diğer örnekler difüzyon tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak Zr-650, Zr-700, Zr-750, Zr-800 ve Zr-840 olarak ifade edilmiştir. Numunelerin X-ışını toz kırınım (XRD) ölçümlerinin analizi yoluyla faz tanımlaması, hücre parametreleri ve hacim fraksiyonu dahil kristalografik karakterizasyon yapıldı. Bu nedenle, üretilen numunelerin XRD spektrumları, dakikada 2.5° derecelik bir tarama hızında 5°-65° aralığında Cu-Ka'lı bir Rigaku Multiflex difraktometre ile ölçülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri ile numunelerin taneleri arasındaki olası çatlak, boşluk ve sınırların dağılımları araştırıldı. SEM ölçümleri JEOL elektron mikroskobu ile 20 kV harici voltajlarda  $\times 1500$  büyütmede görüntü alınarak gerçekleştirilmiştir. Bi-bulk seramiklerin süperiletken elektriksel özellikleri üzerinde Zr difüzyonunun etkilerini belirlemek için numunelerin sıcaklığa bağlı elektrik dc dirençleri ölçülmüştür. Bu nedenle, kontak direncinin katkısını en aza indirmek için yüksek iletken gümüş boya ile dört noktalı kontaklar yapılmıştır. Numuneler, vakum için sağlanan Helyum kapalı çevrim kriyostat sistemine yerleştirildi. Sıcaklığa bağlı dc özdirenç değerleri, numune yüzeyleri boyunca 10 mA'lık programlanabilir dc akımı uygulanarak 65 K'dan 300 K'ya kadar Keithley nano voltmetre ile ölçülmüştür.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR

#### 3.1 Zr difüze edilmiş $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$ numunelerinin atomik, morfolojik sonuçları

Zr difüzyon tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak üretilen Bi-seramiklerin kristalografik değişimleri, X-ışını kırınım yöntemi ile araştırıldı. Saf-Bi ve Zr-yüzey katmanlı Bi-seramiklerin ölçülen XRD spektrumları Şekil 4.1'de gösterilmektedir. XRD spektrumlarında elde edilen pikler, International Center for Diffraction Data (ICDD) yazılımı ile indekslenmiştir. Elde edilen pikler Bi-seramik malzemelerin tetragonal-2223 fazı (ICDD kart numarası: 46-0780) ve tetragonal-2212 fazı (ICDD kart numarası: 46-0545) ile uyumludur. BPSCCO'nun Bi-2223 fazı yüksek faz olarak bilinirken, Bi-2212 fazı düşük faz olarak tanınır (Pakdil, 2016). Bu nedenle, Şekil 4.1'deki XRD spektrumunda Bi-2223 fazı “H” olarak ve Bi-2212 fazı “L” olarak gösterildi. Üretilen tüm Bi-seramiklerde hem Yüksek hem de Düşük fazlar bir arada bulunmaktadır. Pik yoğunlukları göz önüne alındığında, Bi-seramik içindeki difüzyon tavlama sıcaklığına bağlı olarak H-fazı ve L-fazının fraksiyonel konsantrasyonundaki değişimler açıkça gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle, Zr-650 ve Zr-700 süperiletken numuneler için L(008) ve L(107)'nin tepe yoğunlukları artarken, H(0010) ve H(119) fazının tepe yoğunlukları azalmıştır. Diğer bir açıdan, 700 °C'nin üzerindeki difüzyon tavlama sıcaklıklarının artmasıyla, H(0010) ve H(119) fazının yoğunlukları, L(008) ve L(107) yoğunlukları azaldıkça daha baskın hale gelmiştir. Bu gözlem, Zr-yüzey katmanlı Bi-seramiklerin difüzyon tavlama sıcaklığına bağlı olarak çift yönlü faz geçişinin gözlemlenebileceğini göstermektedir. Saf ve Zr-yüzey katmanlı Bi-seramiklerin Bi-2223 ve Bi-2212 faz konsantrasyonunun,  $f$ , yüzdeleri denklem 1a ve 1b aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$f_{(2223)} = \frac{\Sigma I_{(2223)(hkl)}}{\Sigma I_{(2223)(hkl)} + \Sigma I_{(2212)(hkl)}} \quad (1a)$$

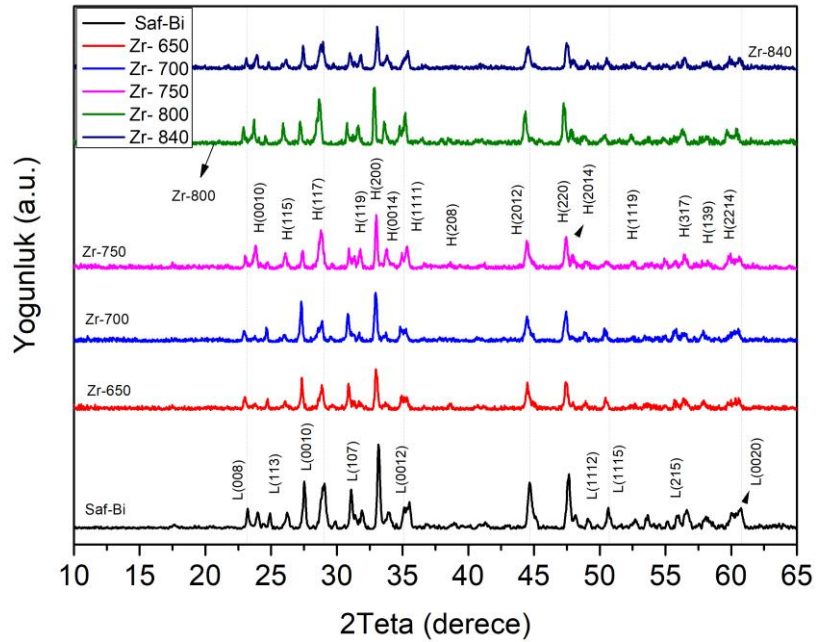
$$f_{(2212)} = \frac{\Sigma I_{(2212)(hkl)}}{\Sigma I_{(2223)(hkl)} + \Sigma I_{(2212)(hkl)}} \quad (1b)$$

burada I, mevcut fazların en yüksek yoğunluklarıdır. Hesaplanan  $f$  değerleri Tablo 4.1'de listelenmiştir. 650 °C tavlama sıcaklığından sonra yüksek faz (Bi-2223 fazı) fraksiyonundaki azalma Tablo 4.1'de açıkça görülmektedir. Difüzyon tavlama sıcaklıklarında daha fazla artış, kademeli olarak yüksek fazın hacim fraksiyonunu 840 °C'ye kadar artırır. Bi-seramiklerin süperiletken özellikleri için önemli olan Zr-800 numunesinde yüksek fazın en büyük hacim fraksiyonu elde edilmiştir (Adachi, 2019). Bi-2223 fazına ait hacim oranı, Zr-800 numuneleri için %76.0'dır. Difüzyon tavlama sıcaklığı 840 °C'ye ulaştığında yüksek faz fraksiyonu %72.2'ye düşer. Kaplanan safsızlık atomlarının, difüzyon tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak BPSSCO dökme seramik bileşiğinin daha derin seviyelerine yayılabileceği bilinmektedir (Ozturk, 2012; Zaloglu, Yıldırım, 2017). Bi-2223 fazının ideal kafes sabitleri  $a=5.41\text{\AA}$  ve  $c=37.2\text{\AA}$ 'dır (ICDD kart numarası: 46-0780'de). Zr iyonlarının atom yarıçapının yaklaşık 1.55 Å olduğu ve bu da BSCCO'nun (Slater, 19664) Sr ve Ca atomlarından daha düşük olduğu göz önüne alındığında; Zr, yüksek termal enerjinin itici kuvveti nedeniyle Bi-seramiklerin daha derin seviyelerine kolayca yayılabilir. Öte yandan, difüzyon tavlama sıcaklığı da kimyasal olarak kararlı bağların oluşumu için önem arz etmektedir. Zr'nin elektron ilgisi, BPSSCO'da bulunan Ca ve Sr atomlarınınkinden daha yüksektir. Böylece Zr-yüzey katmanlı Bi-seramikte yer değiştirme reaksiyonu meydana gelebilir. Jassim ve Abbas, herhangi bir deneysel kanıt olmaksızın Zr ve Bi arasında yer değiştirme reaksiyonunun oluştuğunu iddia ederken (Jassim, Abbas, 2021), Jia ve arkadaşları, BPSSCO matrisinden eser miktarda Sr ve Cu ile Zr'nin varlığını bildirmişlerdir (Jia, 2000). 750 °C'nin altındaki düşük difüzyon tavlama sıcaklıklarında, termal enerjinin Bi/Zr, Zr/Sr (Almessiere, 2019) veya Zr/Ca (Smirnov, 2017) (muhtemelen Zr, Sr'nin yerine geçer) arasında stokiometrik yer değiştirme reaksiyonu oluşturacak kadar yüksek olmadığına inanıyoruz, bu sadece kristal yapıyı bozabilir. Kararlı Zr/Sr yer değiştirme reaksiyonu, kristal yapıyı da iyileştirebilecek yeterli termal enerjinin (bu çalışmada tipik olarak 800 °C) varlığında meydana gelebilir. Tavlama sıcaklığındaki aşırı artışların, kristalografıyı de bozabilecek olan Zr'nin Cu-O bölgelerine sızması nedeniyle Cu-O bağlarını bozabileceği unutulmamalıdır (Saritekin, 2016). Bi-seramiklerin gözlemlenen çift yönlü faz geçişi, kaplanmış Zr atomlarının BPSSCO kristal yapısına difüzyonuna ve termal enerji vasıtasıyla BPSSCO malzemelerindeki atomlarla olası yer değiştirme reaksiyonuna

bağlanabilir. Bilindiği üzere, düşük faz ile karşılaştırıldığında BPSCCO sisteminin yüksek fazını elde etmek zordur. Herhangi bir deneysel varyasyonda yüksek fazdan düşük faza faz geçişi kolaylıkla gözlemlenebilir (Bilgili, Selamet, Kocabas, 2008). Süperiletken kafeste 800 °C'de Zr safsızlık difüzyonu, yüksek Bi-2223 fazının büyümesini destekler. Bu süperiletkenlik için olumlu bir gelişmedir.

**Tablo 3.1.** Bi bazlı seramiğin bazı kristalografik parametreleri

| Numune | Hacim Kesri (%) |         | $a = b$<br>(Å) | $c$<br>(Å) | Tane<br>Büyüklüğü<br>(nm) |
|--------|-----------------|---------|----------------|------------|---------------------------|
|        | Bi-2223         | Bi-2212 |                |            |                           |
| Saf-Bi | 69.9            | 30.1    | 5.393          | 36.54      | 35.1                      |
| Zr-650 | 58.8            | 41.2    | 5.426          | 36.39      | 36.8                      |
| Zr-700 | 60.1            | 39.9    | 5.432          | 36.43      | 35.5                      |
| Zr-750 | 75.1            | 24.9    | 5.427          | 36.67      | 41.4                      |
| Zr-800 | 76.0            | 24.0    | 5.448          | 36.85      | 42.7                      |
| Zr-840 | 72.2            | 27.8    | 5.407          | 36.66      | 39.4                      |



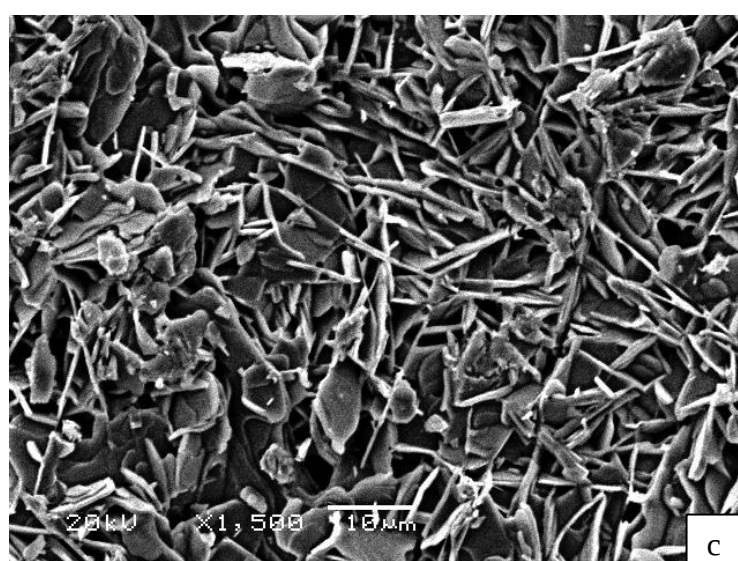
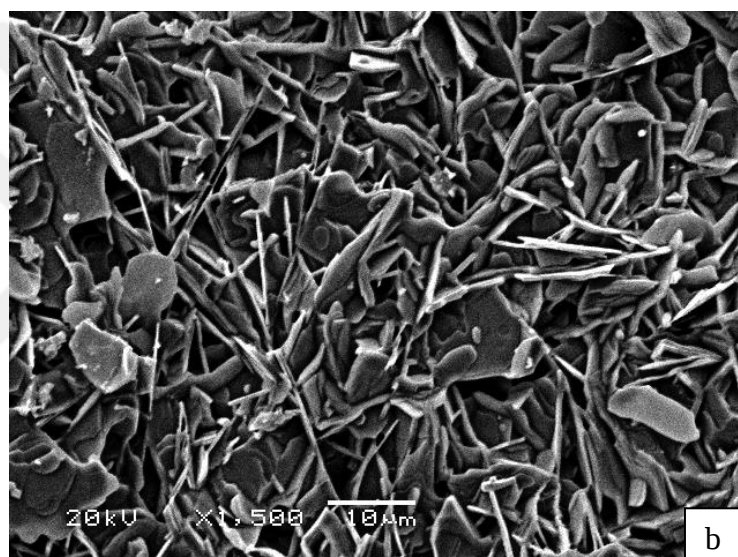
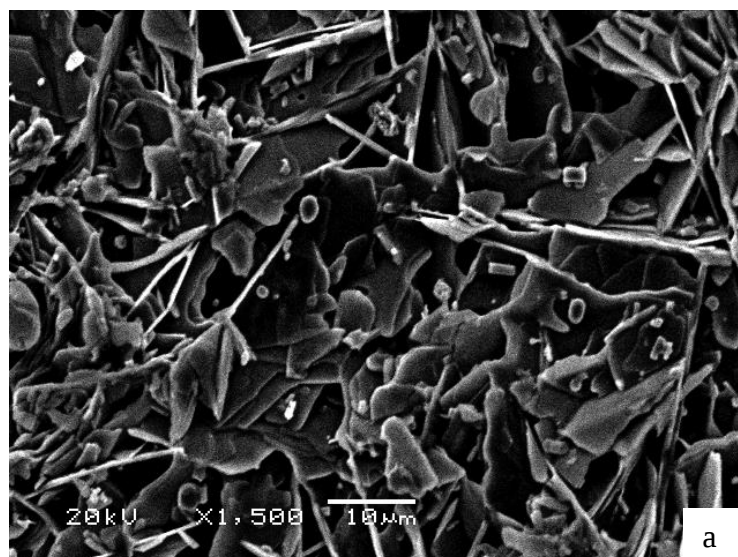
**Şekil 3.1.** İşlenmemiş ve Zr-yüzey katmanlı Bi bazlı seramiklerin XRD spektrumları

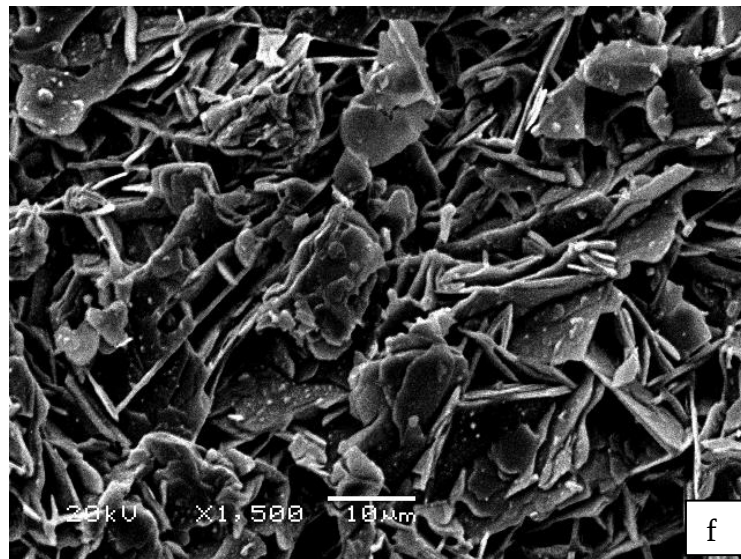
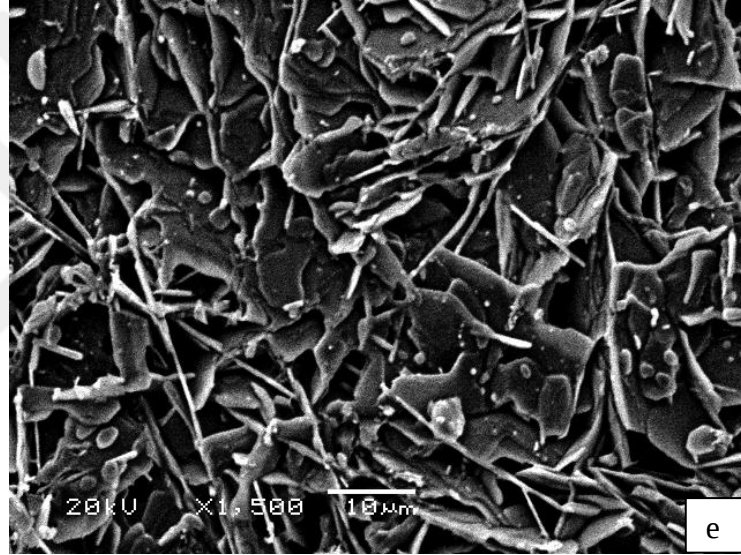
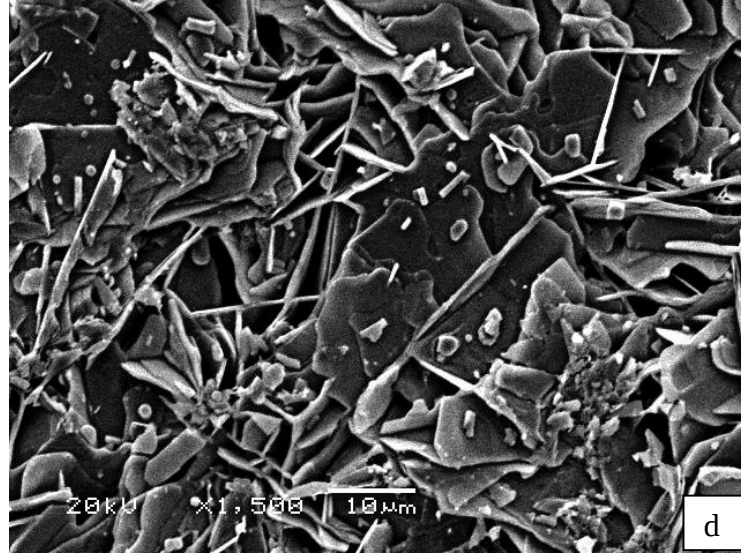
Ayrıca, difüzyon tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak daha düşük ve daha yüksek açılara doğru çift yönlü pik konum kaymaları da gözlemlenmiştir. Tepe açılarındaki konumsal değişiklikler, Zr safsızlıklarının süperiletken Bi-seramiklere nüfuz ettiğini doğrulamaktadır (Yıldırım, 2017). XRD difraktogramlarındaki kırınım tepe noktaları, BPSCCO sistemlerinin baskın fazının yüksek (Bi-2223) fazı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yüksek faza ait pikler, Bi-seramiklerin daha ileri kristalografik değerlendirmesi için kullanılmıştır. Kafes parametreleri  $a$  ve  $c$ , yüksek fazın ilgili tetragonal yapısının  $d$  değeri ve karşılık gelen (hkl) düzlemleri kullanılarak en küçük kareler metodu ile hesaplanmıştır (Ozturk, 2012). Bi-seramiklerin tetragonal yapısı için hesaplanan  $a$  ve  $c$  değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablo 4.1'den görüldüğü gibi, difüzyon tavlama işlemi ile hem  $a$  hem de  $c$  değerleri biraz değişir.  $a$  parametresinin 840 °C'ye kadar hafifçe arttığı gözlemlenmiştir (Kaya, 2022). Sıcaklık 840 °C'ye ulaştığında  $a$  parametresinde keskin bir düşüş elde edilmiştir.  $a$ 'nın hücre parametresinin Cu-O sitelerinin düzlem uzunluğu tarafından kontrol edildiği bildirilmektedir (Boudjaoui, 2022; Ozturk, 2012). Bu uzunluk, elektronların bağ-önler (antibonding) orbitaline dönüşmesiyle uzayabilir veya daralabilir (Ozturk, 2012). 840 °C tavlama işleminden sonra  $a$  parametrelerinde gözlenen düşüş, Zr'nin Cu-O düzlemlerine difüzyonu hakkında yukarıdaki tartışmayı da desteklemektedir. Öte yandan,  $c$  parametrelerinin dağılımı oldukça karmaşıktır. Daha düşük difüzyon sıcaklıklarında üretilen Zr-650 ve Zr-700 numunelerinde  $c$ 'nin hücre parametreleri azalmaktadır. Sıcaklıklar 700 °C'ye ulaştığında,  $c$  parametresi Zr-800 numunesi için en yüksek 36,85 Å değerine ulaşır. 840 °C'de tavllanmış Zr-840 numuneleri için de  $c$  parametresinde bir düşüş gözlemlenmiştir.  $c$  parametresindeki bu varyasyonlar, Bi-2223 fazının hacimsel fraksiyonel değişiklikleriyle tutarlıdır. Ek olarak, BPSCCO sistemlerine Zr ilavesinin doping konsantrasyonuna bağlı olarak kristalografiyi iyileştirdiği veya bozduğu bildirilmiştir. Düşük içerikli Zr ilavesi kristal yapıyı iyileştirirken yüksek içerikli Zr ilavesi kristalografik yapıyı bozar (Jassim, Abbas, 2021; Saritekin, 2016). Bu çalışmada, doğrudan moleküler Zr ilavesi yerine Zr'nin BPSCCO matrisine difüzyonu incelenmiştir. Faz geçişi ve  $c$  hücre parametrelerinin gelişimi göz önüne alındığında, mevcut difüzyon çalışması, Jassim'in düşük içerikli Zr ilavesine benzer ve hatta daha iyi kristalografik evrim sergilemektedir. Ortalama

kristal tane boyutundaki (D) varyasyonlar, 2. denklem kullanılarak yüksek Bi-2223 fazının (200) düzleminin karakteristik zirvesinden belirlendi.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (2)$$

burada  $\beta$ , karakteristik (200) düzleminin FWHM'sidir,  $\lambda$  ( $= 1.54 \text{ \AA}$ ) XRD'de kullanılan X-ışınının dalga boyudur ve  $\theta$ , Bragg açısıdır. Hesaplanan D değerleri de Tablo 4.1'de verilmiştir. Numunelerin kristal boyutunun 35.1 nm ile 42.7 nm arasında değiştiği bulunmuştur. Zr safsızlık birikimi, saf Bi seramiklere kıyasla Zr-650 ve Zr-700 numunelerinin kristal boyutunu biraz artırır. Bununla birlikte, kristal boyutunda belirgin artışlar, Zr-750 ve Zr-800 numuneleri için elde edilmiştir. D değerlerindeki artışlar, termal enerji sayesinde aktif çekirdeklenme ve aglomerasyon süreci ile ilişkilendirilebilir (Kaya, 2019; Suh, 2004). Termal enerji ile birlikte, safsızlık parçacıklarının varlığı, serbest enerji değerlerindeki değişikliklerden dolayı malzemelerin çekirdeklenmesine önemli ölçüde katkıda bulunabilir (Oztel, 2019). Bu çalışma için tipik olarak 800 °C'lik yüksek sıcaklıkta, atomik parçacıklar daha büyük bir kümede birleşmek için yeterli enerji kazanır ve bu sıcaklıkta Zr'nin varlığı çekirdeklenme sürecini destekleyebilir (Kaya, 2019). Böylece D değerleri 42.7 nm'ye kadar yükselir. Öte yandan, tavlama sıcaklığındaki aşırı artış kristal boyutunu küçültür. Bu, Zr-840 numunelerinin kristal ve kimyasal faz geçişinden kaynaklanıyor olabilir. XRD analizi, Zr-yüzey katmanlı Bi-seramiklerin kristalografik gelişimi için optimum difüzyon tavlama sıcaklığının 800 °C olduğunu göstermiştir.





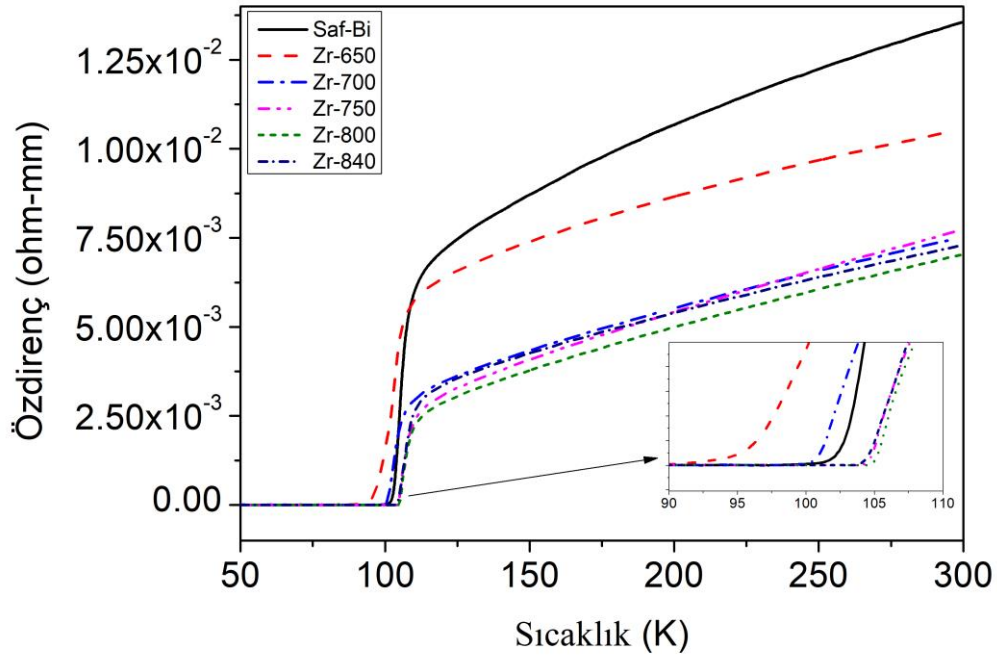
Şekil 3.2. a-) Saf-Bi, b-) Zr-650, c-) Zr-700, d-) Zr-750, e-) Zr-800 ve f-) Zr-840 örneklerinin SEM görüntüsü

Morfolojik gelişimin incelenmesi Bi-seramiklerin süperiletken özellikleri için de çok önemlidir. Taneler arası sınır bölgelerinin morfolojik dağılımı, Bi-seramiklerin süperiletken özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, üretilen Bi-seramiklerin SEM görüntüleri Şekil 4.2a-f'de gösterilmektedir. Numuneler, Bi-seramik yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin tipik bir morfolojisi olan, aralarında bazı gözenekli bölgelerin bulunduğu granüler plaka benzeri bir yüzey yapısı sergilemektedir (Bilgili, Selamet, Kocabas, 2008; Aftabi, Mozaffari, 2021; Akkurt, 2021). Zr-650 ve Zr-700 numuneleri için rastgele dağılmış daha ince plaka benzeri granüler yapılar, saf Bi seramiklere kıyasla daha belirgindir. Bu, taneler arasındaki bağlantıların kalitesinin düşük olduğunu gösterir (Bilgili, Selamet, Kocabas, 2008; Miller, 2006). Öte yandan, plaka benzeri yapının tane boyutu artar ve Zr-750 ve Zr-800 numuneleri için Zr-700'e kıyasla tanelerin daha iyi hizalanmasıyla tekstüre daha pürüzsüz hale gelmiştir. Ek olarak, Zr-750 numunesine kıyasla Zr-840 numuneleri için taneler arasındaki etkileşimlerde sadece hafif azalmalar gözlemlenmiştir (Kaya, 2022). Daha yüksek tane boyutu ve daha iyi tekstüre özellikleri ile Zr-750 ve Zr-800 örnekleri kalanlardan daha iyi yüzey morfolojisi sergiler. Elde edilen morfolojik görüntüler, XRD sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olan Zr-750 ve Zr-800 numunelerinde daha iyi bir taneler arası bağlantı olduğunu göstermektedir.

### **3.2 Zr difüze $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$ numunelerinin elektriksel direnç sonuçlarındaki değişim**

Difüzyon tavlama sıcaklığının zirkonyum katkılanmış  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$  numuneleri için süperiletkenlik ve genel elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi, deneysel olarak 65 K ile 300 K değerleri arasında alınan sıcaklığa bağlı elektriksel öz direnç ölçümlerinin değişimi ile 10 mA dc akımında vakum sağlayan Helyum kapalı çevrim kriyostat sisteminde dört kontak yöntemi ile araştırılmıştır. Öz direnç eğrilerinin tamamı Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekilden zirkonyum yüzey katmanlı Bi-2223 örneklerine ait karakteristik sıcaklığa bağlı öz direnç eğrilerinin difüzyon tavlama sıcaklığına bağlı olarak çok fazla değiştiği görülmektedir. Bu, termal enerjinin itici gücü sebebiyle kristal yapıda biriken Zr safsızlık atomlarının değişik daha derin seviyelerinin penetrasyonuna atfedilir. Benzer şekilde, elektrik öz direnç eğrilerindeki varyasyon, kimyasal olarak kararlı bağların oluşumu, çekirdeklenme ve

aglomerasyon sürecinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, elektrik direncinin pozitif lineer varyasyonu (Fermi enerji seviyesinde elektronik durumların (DOS) logaritmik dağılımına dayalı olarak) başlangıç geçiş sıcaklığının ilerisinde sıcaklığa karşı standart metalik benzeri özelliği her Zr yüzey katmanlı Bi-2223 numunesi göstermektedir (Xu, 2009; Turkoz, 2019).



**Şekil 3.3.** Saf ve Zr-yüzey katmanlı Bi bazlı seramiklerin sıcaklığa bağlı özdirenci

Ayrıca, elektrik direncinin lineer farklılaşması, süperiletken sistemin mikro bölge kümelerinde elektron-elektron ve elektron-fonon arasındaki eşleşme mekanizmasının (düzlem içi Cu-O<sub>2</sub> katmanı  $x^2 - y^2$  bantlarında  $\sigma$  bağ karşıtı  $d_{x^2-y^2}$  eşleşme simetrisinde görünen antiferromanyetik spin dalgalanmaları ile ilgili) varlığına işaret eder (Sahoo, Behare, 2014; Allen, W.E. Pickett, Krakauer, 1988). Ayrıca, uzunlamasına taşıma için gevşeme oranı  $1/\tau \sim T$  olduğunda, düzlem içi Cu-O<sub>2</sub> bantlarındaki elektron spin yükünün ayrılması, geçiş faz değişikliğine yol açar (Coombs, T.A. 2011). Öte yandan, hareketli boşluk üzerindeki difüzyon tavlama sıcaklığının, düzlem içi Cu-O bağlarına karşı  $\sigma$  antikorlarını taşıdığı, bir süperiletkenin metalik karakteristik davranışını etkileyen başka bir faktör olduğu iyi bilinmektedir (Oh, S.Y., 2007; Chen, 2002). Şekil 4.3'teki grafiklere göre, 800 °C tavlama sıcaklığında hazırlanan zirkonyum yüzey katmanlı

$\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$  seramik numunesi, daha kapsamlı bir kümede mikrokristal birleşme yönelimleri, yüzey morfolojik özellikleri, kimyasal olarak kararlı bağların oluşumu, düşük mikroskobik yapısal problemleri ve taneler arasındaki bağlantıları göz önüne seriyor. Bu tartışmayı SEM ve XRD sonuçları desteklemektedir. Aynı zamanda, deneysel eğriler, temel elektriksel ve süperiletken niceliklerdeki farklılaşmayı değerlendirmemizi sağlar; tek tek saymak gerekirse, difüzyon tavlama sıcaklığı ile zirkonyum katkılanmış Bi-2223'ün artık-direnç oranı ( $RRR$ ), artık-direnç ( $\rho_{res}$ ), oda sıcaklığında öz direnç değeri ( $\rho_{300K}$ ),  $\rho_{115K}$ ,  $\rho_{norm}$ ,  $\Delta\rho$ , onset ( $T_c^{onset}$ ), ofset geçişi ( $T_c^{offset}$ ) kritik sıcaklıkları ve kritik geçiş sıcaklığı genişliğini ( $\Delta T_c = T_c^{onset} - T_c^{offset}$ ) sayabiliriz. Bütün temel elektrik öz direnç parametreleri Tablo 4.2'de sayısal olarak görülebilir.

**Tablo 3.2.** Artık öz direnç oranları, artık öz dirençler, oda sıcaklığı öz dirençleri,  $\rho_{norm}$  ve  $\Delta\rho$  dahil olmak üzere çeşitli öz direnç değerleri.

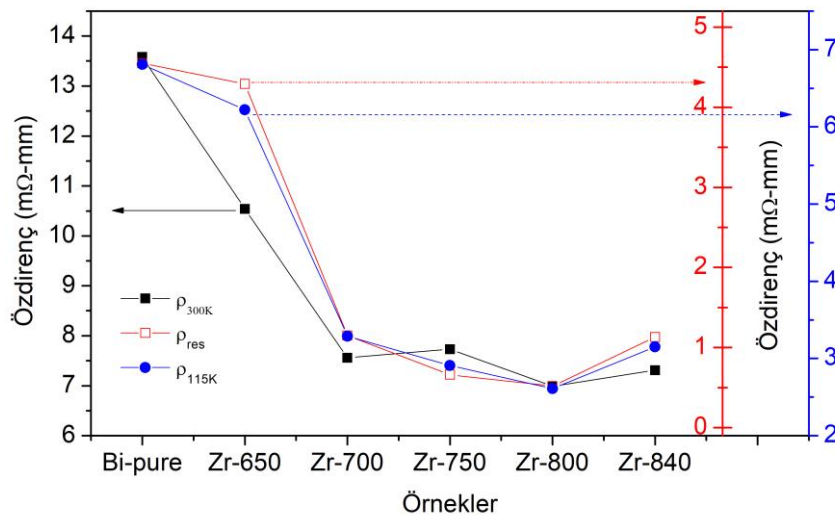
| Numune | $\rho_{300K}$<br>( $m\Omega.mm$ ) | $\rho_{res}$<br>( $m\Omega.mm$ ) | RRR<br>( $\rho_{300K}/\rho_{115K}$ ) | $\Delta\rho$                                      |                                              |                                   |
|--------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
|        |                                   |                                  |                                      | ( $\rho_{300K}-\rho_{115K}$ )<br>( $m\Omega.mm$ ) | $\rho_{norm}$<br>( $\rho_{115}/\Delta\rho$ ) | $\rho_{115K}$<br>( $m\Omega.mm$ ) |
| Saf-Bi | 13.58                             | 4.55                             | 1.994                                | 6.77                                              | 1.006                                        | 6.81                              |
| Zr-650 | 10.54                             | 4.29                             | 1.695                                | 4.32                                              | 1.44                                         | 6.22                              |
| Zr-700 | 7.56                              | 1.15                             | 2.298                                | 4.27                                              | 0.77                                         | 3.29                              |
| Zr-750 | 7.73                              | 0.66                             | 2.656                                | 4.82                                              | 0.604                                        | 2.91                              |
| Zr-800 | 6.99                              | 0.52                             | 2.678                                | 4.38                                              | 0.596                                        | 2.61                              |
| Zr-840 | 7.31                              | 1.13                             | 2.231                                | 4.16                                              | 0.757                                        | 3.15                              |

Oda sıcaklığında öz direnç değerinin ( $\rho_{300K}$ ) ilk parametresine gelince, Zr-800 örneği minimum 6.99  $m\Omega.mm$  değerine sahipken, saf örnek maksimum 13.58  $m\Omega.mm$  değerine sahiptir. Daha düşük veya daha yüksek tavlama sıcaklığına sahip diğer örnekler için bir artış bulunmaktadır. Bu bağlamda Zr-650 seramik bileşiği 10.54  $m\Omega.mm$ , Zr-700 seramik bileşiği 7.56  $m\Omega.mm$ , Zr-750 seramik bileşiği 7.73  $m\Omega.mm$  ve Zr-840 seramik bileşiği 7.31  $m\Omega.mm$   $\rho_{300K}$  parametresini sunar. Difüzyon tavlama sıcaklığının  $\rho_{300K}$  değerlerine bakarak; kristal yapı

kalitesi, süperiletken taneler arasındaki etkileşim güçleri ve Cu-O<sub>2</sub> ara katman birleştirme güçleri üzerinde çok kritik bir rol oynadığı görülmektedir. Bu doğrultuda, kristal yapıdaki mikroskobik yapısal problemlerdeki azalmadan dolayı, en iyi kristallik kalitesine sahip olan numune minimum  $\rho_{300K}$  değerine sahip olan Zr-800 numunesidir. Ayrıca, 800 °C'lik difüzyon tavlama sıcaklığının, eşleşme mekanizmasında, antiferromanyetik spin dalgalanmalarında ve  $\sigma$  antibağ düzlem içi Cu-O<sub>2</sub> katmanı  $x^2-y^2$  bantlarındaki hareketli boşluk taşıyıcılarında çok daha fazla iyileştirme için en ideal değer olduğu vurgulanabilir (Yamauchi, 2000).

Ayrıca, difüzyon tavlama sıcaklığının, Matthiessen kuralına (Ekin, 2006) göre Zr yüzey katmanlı Bi-2223 numunelerine dayalı artık öz direnç ( $\rho_{res}$ ) parametreleri üzerindeki etkisini, Şekil 4.4'te sağlanan sıcaklığa bağlı öz direnç sonuçları yardımıyla analiz ediyoruz. Bilindiği gibi  $\rho_{res}$  parametresi kristal yapı kalitesi, metalik bağlantılar ve kristal sistemdeki mikroskobik yapısal problemlerin miktarı ile ilişkilidir (Plakida, 2010). Deneysel sonuçlar, difüzyon tavlama sıcaklığının temel kristal yapı kalitesini ciddi şekilde etkilediğini göstermektedir. Bu bağlamda,  $\rho_{res}$  parametresinin 0.52 m $\Omega$ .mm (Zr-800 numunesi için) - 4.55 m $\Omega$ .mm (Bi-saf için) aralığında olduğu bulunmuştur. Diğer numuneler (Zr-650, Zr-700, Zr-750 ve Zr-840) sırasıyla 4.29 m $\Omega$ .mm, 1.15 m $\Omega$ .mm, 0.66 m $\Omega$ .mm ve 1.13 m $\Omega$ .mm gibi orta değerlere sahiptir. XRD bölümü deneysel sonucuna benzer şekilde, 650 °C'lik daha yüksek difüzyon tavlama sıcaklık değerinden, Zr iyonlarının yüksek termal enerjinin itici kuvvetinin bir sonucu olarak daha derin seviyeye yayıldığı açıktır. Buna uygun olarak, kristal sistemdeki katmanlar arasındaki metalik etkileşimdeki iyileştirme ve mikroskobik yapısal problemler nedeniyle kristal yapı kalitesi 800 °C'ye kadar yükselme eğilimindedir. Ayrıca, saf ve zirkonyum yüzey katmanlı Bi-2223 seramik örneklerinin 115 K ( $\rho_{115K}$ ) elektrik öz direnç değerlerindeki değişim, kafes gerinim alanları, çatlak üreten kusurlar, ana matris ile birlikte tane içi/taneler arası sınır eşleşmeleri, kalıcı yapısal problemler ve kirlilik saçılmaları üzerindeki difüzyon tavlama sıcaklığının rolünü tartışmak için detaylı olarak incelenmiştir. Tablo 4.2, saf numunenin en büyük  $\rho_{115K}$  değerini 6.81 m $\Omega$ .mm gösterdiğini, oysa zirkonyum yüzey katmanlı Bi-2223 numunelerinin saf numuneye kıyasla 6.22-2.61 m $\Omega$ .mm daha küçük  $\rho_{115K}$  değer aralıklarına sahip olduğunu göstermektedir. Buna göre Zr malzemesinin difüzyon mekanizması için iyi bir tercih olduğu söylenebilir. Zr dağınık Bi-2223

süperiletkenleri arasında, Zr-800 numunesi için minimum 2.61 mΩ.mm değeri gözlemlenmiştir. Bu nedenle, deneysel sonuçlar, yüksek kaliteli malzeme üretimi için 800 °C'nin en iyi tavlama sıcaklığı olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, 800 °C tavlama sıcaklığındaki hazırlama işleminin, ana matris ile birlikte çatlak oluşturan kusurları, geçirgen yapısal sorunları, kafes gerinim alanlarını, safsızlık saçılmalarını ve tane içi/taneler arası sınır bağlantılarını büyük oranda azaltmasıdır. Ayrıca elektriksel özdirenç grafikleri, Zr yüzey katmanlı Bi-2223 numunelerinin 650 °C- 840 °C aralığındaki difüzyon tavlama sıcaklıkları ile elektriksel iletkenlik davranışları ve kristal yapı kalitesindeki değişiklikleri artık özdirenç oranını (300 K ile 115 K arasındaki direkt özdirenç oranıdır) kullanarak belirlememizi sağlar. Hesaplanan tüm oranlar sayısal olarak Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablodan, saf numunenin 1.994 RRR parametresini gösterdiği, maksimum 2.678 değerinin ise Zr-800 seramik bileşiğine ait olduğu görülmektedir. Bu temelde, RRR parametresi, en yüksek kristal yapı kalitesine ve gelişmiş elektriksel iletkenlik özelliklerine sahip Zr yüzey katmanlı Bi-2223 numunelerini üretmek için 840 °C'nin en iyi sıcaklık değeri olduğunu göstermektedir (Turkoz, 2020). Buna istinaden, yeni süperiletken manyetik enerji depolama, matrisin manyetik rezonans görüntüleme, levitasyon trenleri, parçacık hızlandırıcılar, kriyojenik seviye sensörleri, güç iletim kablosu gibi akım sınırlayıcı teknolojilerinde, yüksek enerji fizik deneylerinde, teknolojik ve endüstriyel uygulama alanlarında daha önemli oranda yer alabileceği açıktır.



**Şekil 3.4.**  $\rho_{300K}$ ,  $\rho_{115K}$  ve  $\rho_{res}$  özdirenç değerleri arasındaki korelasyonlar

Ayrıca 65 K ile 300 K arasında gerçekleştirilen sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç grafikleri yardımıyla difüzyon tavlama sıcaklığı ile 115 K ile 300 K özdirençleri ( $\Delta\rho=\rho_{300K}-\rho_{115K}$ ) arasındaki fark olarak atanan diğer temel elektriksel özelliğin değişimi hassas bir şekilde belirlenir böylece  $\rho_{115K}$  ve  $\Delta\rho$  parametreleri ( $\rho_{norm}=\rho_{115K}/\Delta\rho$ ) arasındaki oranı inceleyebiliriz. (Zalaoglu, 2021; Turgay, Yıldırım, 2019) vurguladığı gibi,  $\rho_{norm}$ , çatlak üreten kusurları, mikroskobik yapısal bozuklukları ve kristal yapıdaki kalıcı yapısal sorunları belirlemek için faydalı bir parametredir. Bu çalışmada, diğer önemli özdirenç bulgularına benzer şekilde, Zr-800 seramik bileşiği Tablo 4.2'de görüldüğü gibi minimum  $\rho_{norm}$  parametresi 0.596'dır. Elde edilen bulgulara göre Bi-2223 süperiletkenlerinde en iyi zirkonyum iyonlarının varlığının, süperiletken taneler arasındaki etkileşim sonucunda malzeme kalitesi ve rafine kristal yapı kalitesini önemli seviyede arttırdığı açıktır.  $\rho_{300K}$ ,  $\rho_{115K}$  ve  $\rho_{res}$ 'in özdirenç arasındaki olası korelasyon Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Hesaplanan direnç dağılımı ve eğilimi yakın davranış sergilemiştir, yani korelasyon dışı hiçbir beklenmedik değişiklik gözlemlenmemiştir (Kaya, 2022). Bu ayrıca ek saçılma bölgeleri yaratarak yığın yapının direncini etkileyecek kadar yapısal bozuklukların fazla olmadığını da gösterir. Özetlemek gerekirse, kristallik kalitesi, temel elektriksel özdirenç bulguları, süperiletken taneler arasındaki etkileşim kaliteleri ve Cu-O<sub>2</sub> ara katman bağlanma güçlerinde Bi-2223 ana matrisindeki çatlak üreten kusurlar, geçirgen yapısal problemler, kafes gerinim alanları, tane içi/ taneler arası sınır kuplajları ve safsızlık saçılmalarındaki azalma nedeniyle 800 °C'nin en iyi tavlama sıcaklığı olduğuna dikkat çekildiğini göstermektedir.

### 3.3 Zr yüzey katmanlı Bi<sub>1.8</sub>Pb<sub>0.4</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2.2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> numunelerinin süperiletkenlik özellikleri

Dc elektrik özdirenç grafikleri, difüzyon tavlama sıcaklıkları ( $650\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 840\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ile zirkonyum yüzey katmanlı Bi<sub>1.8</sub>Pb<sub>0.4</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2.2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> seramik bileşiklerinin kritik ofset ( $T_c^{offset}$ ), onset ( $T_c^{onset}$ ) ve kritik geçiş sıcaklığı genişliği ( $\Delta T_c = T_c^{onset} - T_c^{offset}$ ) dahil olmak üzere temel süperiletkenlik parametrelerinin değişimini bulmak için kullanıldı. Süperiletken kümelerde bipolaron oluşumları, metalden süperiletkenliğe faz geçişi, doğrudan taneler arası

bileşenin elektriksel karakteristiği ve eşleşme mekanizması (elektron-fonon ve elektron-elektron arasındaki etkileşimlerin başlangıcı) iç kısım ile ilgilidir (Awad, 2012). Buna göre,  $T_c^{offset}$  değerinden önce bir malzeme tamamen süperiletken özellikler gösterir. İkinci parametre ( $T_c^{onset}$ ), ana matristeki tanecikler arası bölgelerin süperiletken geçişine işaret eder ve bu nedenle orbital hibridizasyon mekanizması, çift bağlanma enerjisi, temiz veya kirli limit karakteristikleri, Cu-3d ve O-2p dalga fonksiyonları için örtüşme mekanizması, metastabilite, oksidasyon durumundaki homojensizlikler, süper elektronların sıra parametresi ve elektronik durum yoğunluklarının lokalizasyonu gibi bazı önemli parametrelerdeki değişiklikleri tartışmak için faydalıdır (Saritekin, 2016). Aynı zamanda,  $T_c^{onset}$  parametresi tarafından çatlak üreten kusurların, mikroskobik yapısal bozuklukların ve ana sistemdeki kalıcı yapısal problemlerin varyasyonu detaylı bir şekilde belirlenir (Zalaoglu, 2021; Salama, 1989).  $T_c^{onset}$  ve  $T_c^{offset}$  arasındaki farklılaşmaya ilişkin ikinci parametreye gelince,  $\Delta T_c$  değeri bir malzemenin üretim kalitesin tarafından doğrudan etkilenir. Bu sebeple, malzemenin ileri teknolojiye potansiyel uygulamalar için uygun olup olmadığını tartışmak için parametre kullanılır.

**Tablo 3.3.** Dökme seramik süperiletkenlerin başlangıç/kayma kritik geçiş sıcaklıkları ve boşluk taşıyıcı yoğunlukları

| Numune | $T_c^{offset}$ (K) | $T_c^{onset}$ (K) | $\Delta T_c$ (K) | P Değeri |
|--------|--------------------|-------------------|------------------|----------|
| Saf-Bi | 101.71             | 107.21            | 5.5              | 0.129794 |
| Zr-650 | 94.71              | 105.84            | 11.13            | 0.118978 |
| Zr-700 | 100.75             | 104.96            | 4.21             | 0.128093 |
| Zr-750 | 104.48             | 108.52            | 4.04             | 0.135352 |
| Zr-800 | 105.06             | 108.88            | 3.82             | 0.136683 |
| Zr-840 | 103.95             | 108.29            | 4.34             | 0.134196 |

Bu tez için yaptığımız araştırmada, Zr yüzey katmanlı Bi-2223 süperiletken örnekleri için  $T_c^{onset}$ ,  $T_c^{offset}$  ve  $\Delta T_c$  parametrelerini 65 K ile 300 K arasında alınan sıcaklığa bağlı elektrik özdirenç eğrilerinden çıkardık. Tablo 4.3'teki tüm hesaplamalar sunulmuştur. Tablodan difüzyon tavlama sıcaklığının parametreleri

büyük ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu nedenle saf örnek sırasıyla 101.71 K ve 107.21 K olarak  $T_c^{offset}$  ve  $T_c^{onset}$  değerleri göstermektedir. Zr-650 numunesi için her iki parametrede de hafif bir düşüş vardır. Bir diğer taraftan, 800 °C'lık kritik değere kadar difüzyon tavlama sıcaklığı ile yüksek termal enerji, Zr iyonlarını daha derin bir seviyeye yaymak için tetikler ve böylece onset ve offset parametrelerinin sistematik olarak arttığı bulunmuştur. Çekirdeklenme ve aglomerasyon sürecinin uyarılması nedeniyle 105.06 K ve 108.88 K'nin maksimum  $T_c^{offset}$  ve  $T_c^{onset}$  değerleri elde edilmiştir. Öte yandan, maksimum difüzyon tavlama sıcaklığı durumunda, Zr iyonlarının kristal sistemin  $\sigma$  bağ-önler Cu-O bölgelerinin iç düzleminin farklı daha derin seviyelerinde daha fazla işlemesi sonucunda onset ve offset kritik geçiş sıcaklığı değerinin yeniden azaldığı kaydedilmiştir. Bu açıdan, en fazla  $T_c^{offset}$  ve  $T_c^{onset}$  değerlerine sahip Zr-800 bileşiği, sadece süperiletken kümelerde bipolaron oluşumlarını, optimum eşleşme mekanizmasını, taneler arası bileşeni değil, ayrıca süperiletken taneler arasındaki etkileşim, Cu-O<sub>2</sub> ara katman birleştirme güçleri ve en fazla kristal yapı kalitesini sunmaktadır (Shabna, 2010; Newns, 1991). Ayrıca, difüzyon tavlama sıcaklığının etkisini belirlemek için geçiş genişlikleri değerleri, Zr yüzey katmanlı ve saf Bi-2223 süperiletkenler için hesaplanmıştır. Hesaplanan her  $\Delta T_c$  parametresi Tablo 4.3'te detaylı bir şekilde verilmiştir. Tabloya göre,  $\Delta T_c$  değerleri 11.13 K ila 3.82 K aralığında olacak şekilde hesaplandı. Saf numune 5.50 Kelvin  $\Delta T_c$  değerini gösterirken minimum değer (3.82 K) Zr-800 seramik numunesinde gözlemlenmiştir. Zr-840 numunesi için 11.13 K maksimum değeri vermektedir. Bulgular, yüksek termal enerjinin (difüzyon tavlama sıcaklığı ile ilgili) süperiletken kümelerde aktif çekirdeklenme ve aglomerasyon sürecinin oluşumu üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Bu açıdan Zr-800 numunesinin en iyi süperiletken taneler arasındaki etkileşimi ve kristal yapı kalitesini gösterdiği açıktır.

Ayrıca, difüzyon tavlama sıcaklığının, boşluk tuzak enerjisiyle ilgili düzlem içi Cu-O<sub>2</sub> katmanı  $x^2 - y^2$  bantlarındaki  $\sigma$  bağ-önler hareketli boşluk taşıyıcı yoğunlukları üzerindeki etkisine, sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümlerini kullanarak yapının stabilizasyonu ve orbital hibridizasyon mekanizmasına odaklanacağız. Bu amaçla, aşağıdaki bağıntı aracılığıyla Bi-seramik bileşikler için

mobil boşluk taşıyıcı konsantrasyonu (P) sayılarını hesaplıyoruz (Akkurt, 2021):

$$P = 0.16 - \left[ \left( 1 - \frac{T_c^{offset}}{T_c^{max}} \right) / 82.6 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Mobil boşluk taşıyıcı yoğunluklarının sayıları Tablo 4.3'te görülebilir. Difüzyon tavlama sıcaklığının Bi-2223 kristal sisteminin orbital hibridizasyon mekanizmasını, yapı stabilizasyonunu ve boşluk kapanı enerjisini önemli seviyede etkilediği tablodan net olarak görülmektedir (Eskes,1988). Sayısal olarak, saf numune 0.129794 P değerine sahipken, Zr-800 bileşiği için maksimum değer 0.136683 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla difüzyon tavlama sıcaklığının artmasıyla P değerinin 0.118978'den 0.136683'e yükselme eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu temelde 800 °C, en yüksek elektriksel iletkenlik ve süperiletkenlik özelliklerini sergileyen Zr yüzey katmanlı Bi-2223 süperiletken için optimum difüzyon tavlama sıcaklığı olarak fark edilir (Kaya, 2022).

Tablo 4.4'te farklı yöntemlerle gerçekleştirilen Bi-2223 süperiletken seramiğine Zr katkılanması sonucu elde edilen bulgular ile mevcut çalışmamızın karşılaştırmasına yer verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında Zr safsızlık atomları difüzyon yöntemiyle eklenirken, Tablo 4.4 yer alan diğer çalışmada seramik tozların üretimi esnasında Zr tüm matris yapıya eklenmiştir. Geçmiş çalışmalar ile karşılaştırıldığında tez kapsamında yapmış olduğumuz Zr difüzyon odaklı katkılamanın süperiletken özellikleri saf numuneye kıyasla arttırdığı gözlemlenirken, toz üretim aşamasında tüm matris yapısına eklenen Zr'nin malzemenin süperiletkenlik özelliğini bozduğu Akdemir, 2015'de yaptığı çalışmanın özeti olan Tablo 4.4'te açıkça görülmektedir. Zr malzemesi özelinde safsızlık atomlarının ekleme yönteminde Bi-tabanlı süperiletkenlerin özelliklerini kritik oranda etkilediği görülmekte ve difüzyon yönteminin Zr katkılanması için ideal bir yöntem olduğu görülmektedir.

**Tablo 3.4.** Mevcut çalışma ile benzer bir çalışmanın karşılaştırması (Akdemir, 2015).

| Numune<br>adı/<br>Büyükölük             | Mevcut Çalışma |        |        |        |        |        | Akdemir, 2015 |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                         | Bi-Saf         | Zr-650 | Zr-700 | Zr-750 | Zr-800 | Zr-840 | Zr0           | Zr1    | Zr2    | Zr3    | Zr4    | Zr5    | Zr6    |
| $T_c^{\text{offset}}$ (K)               | 101.71         | 94.71  | 100.75 | 104.48 | 105.06 | 103.95 | 108.7         | 105.4  | 101.3  | 93.1   | 84.7   | 72.2   | 40.8   |
| $T_c^{\text{onset}}$ (K)                | 107.21         | 105.84 | 104.96 | 108.52 | 108.88 | 108.29 | 110.8         | 109.8  | 107.7  | 104.1  | 99.1   | 97.7   | 84.9   |
| $\Delta T_c$ (K)                        | 5.5            | 11.13  | 4.21   | 4.04   | 3.82   | 4.34   | 2.1           | 4.4    | 6.4    | 11.0   | 14.4   | 25.5   | 44.1   |
| P değeri                                | 0.1298         | 0.1190 | 0.1281 | 0.1354 | 0.1367 | 0.1342 | 0.1480        | 0.1375 | 0.1291 | 0.1169 | 0.1072 | 0.0955 | 0.0727 |
| a=b                                     | 5.393          | 5.426  | 5.432  | 5.427  | 5.448  | 5.407  | 5.26          | 5.28   | 5.29   | 5.31   | 5.38   | 5.40   | 5.44   |
| c                                       | 36.54          | 36.39  | 36.43  | 36.67  | 36.85  | 36.66  | 37.02         | 36.97  | 36.68  | 36.11  | 35.04  | 34.57  | 30.72  |
| Bi-2223<br>(%)                          | 69.9           | 58.8   | 60.1   | 75.1   | 76.0   | 72.2   | 91.6          | 89.5   | 86.4   | 82.1   | 77.8   | 69.3   | 52.4   |
| Bi-2212<br>(%)                          | 30.1           | 41.2   | 39.9   | 24.9   | 24.0   | 27.8   | 9.4           | 10.5   | 23.6   | 17.9   | 22.2   | 30.7   | 47.6   |
| Tane<br>Büyükölüğü                      | 35.1           | 36.8   | 35.5   | 41.4   | 42.7   | 39.4   | 69.2          | 67.8   | 65.3   | 62.1   | 59.9   | 53.8   | 42.6   |
| $\rho_{300K}$<br>(m $\Omega$ .mm)       | 13.58          | 10.54  | 7.56   | 7.73   | 6.99   | 7.31   | 36.9          | 41.2   | 44.1   | 50.3   | 61.4   | 99.6   | 136.0  |
| $\rho_{\text{res}}$<br>(m $\Omega$ .mm) | 4.55           | 4.29   | 1.15   | 0.66   | 0.52   | 1.13   | 0.9           | 3.4    | 8.7    | 14.7   | 26.8   | 65.5   | 97.9   |
| RRR                                     | 1.994          | 1.695  | 2.298  | 2.656  | 2.678  | 2.231  | 2.42          | 2.19   | 1.94   | 1.73   | 1.51   | 1.26   | 1.18   |

### 3.4 Zr yüzey katmanlı Bi<sub>1.8</sub>Pb<sub>0.4</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2.2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> numunelerinin mekanik özellikleri

Farklı sıcaklıklarda difüzyon katkılanması sonucunda elde edilen Zr katkılı Bi-2223 süperiletken seramiğinin mekanik ölçümü tek bir yükleme (1.960 N) kuvveti altında incelenmiştir. Bunun neticesinde elde edilen külçeler mikrosertlik cihazı kullanılarak Tablo 4.5'te görüldüğü gibi statik ölçümleri alınarak mikro sertlikleri ( $H_v$ ) hesaplanmıştır. Mikrosertlik hesaplamalarında Denk. (4) kullanıp değerlerin ne ölçüde değiştiği Tablo 4.5'te gösterilmiştir. Tablo 4.5'te de görüleceği üzere difüzyon yapılmamış saf Bi-2223 süperiletken seramiğin sertliği difüzyon katkılı külçelere kıyasla daha yumuşak olduğu görülmektedir. Ayrıca, en sert malzeme özelliği 650 C'de gözlemlenirken tavlama sıcaklığı artırıldıkça sertlikte düşüşler görülmüştür. Sonuç olarak, tavlama sıcaklığı 650 C'den 840 C'ye çıkarıldığında süperiletken seramiğinde yumuşama gerçekleşmiş olup sertlik ölçüğü baz alındığında en iyi mekanik özelliği 650 C'de yakalandığı anlaşılmaktadır.

$$H_v = 1854,4 \frac{F}{d^2} (GPa) \quad (4)$$

**Tablo 3.5.** Zr katkılı Bi-2223 süperiletken seramiğin farklı tavlama sıcaklıklarında mikrosertlik ölçümleri

|       | Kuvvet (N) | d1     | d2     | d (um)  | Hv (Gpa) |
|-------|------------|--------|--------|---------|----------|
| saf   | 1.96       | 126.15 | 114.24 | 120.195 | 0.2516   |
| T-840 | 1.96       | 116.75 | 112.39 | 114.57  | 0.2769   |
| T-800 | 1.96       | 110.06 | 105.96 | 108.01  | 0.3116   |
| T-750 | 1.96       | 99.35  | 106.2  | 102.775 | 0.3441   |
| T-700 | 1.96       | 92.47  | 97.83  | 95.15   | 0.4015   |
| T-650 | 1.96       | 93.29  | 91.87  | 92.58   | 0.4241   |

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada Bi-2223 seramiklerin Zr difüzyonunun kristalografik, morfolojik, elektriksel ve süperiletken karakteristikleri üzerindeki etkisi, elde edilen ölçümler arasındaki korelasyonlar dahil edilerek sistematik olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddelenmiştir.

- XRD analizleri sonucunda, Zr yüzey katmanlı Bi-seramiklerin difüzyon tavlama sıcaklığına bağlı olarak Bi-2223 ve Bi-2212 arasında çift yönlü faz geçişinin gözlemlendiğini göstermiştir. Daha düşük difüzyon sıcaklıklarında üretilen numuneler için c'nin hücre parametreleri azaldığı görülmüştür. Sıcaklıklar 800 °C'ye ulaştıkça c parametresi en yüksek değere ulaşırken, 840 °C'de tavllanmış numunelerde c parametresinde düşüş gözlemlenmiştir. Zr, yüksek termal enerjinin itici gücünden dolayı Bi-seramiklerin kristal matrisine kolayca yayılabileceği gözlemlenmiştir. Termal enerjiye bağlı olarak, BPSCCO malzemelerindeki atomlarla stokiometrik (muhtemelen 750-800 °C'de Sr/Zr) veya stokiometrik olmayan (750 °C'nin altında Sr/Zr veya 840 °C'de Cu/Zr) yerdeğiştirme reaksiyonu meydana gelmektedir. Bi-2223'ün kristalografisindeki farklılıkların nedeni bu olabileceği düşünülmektedir.
- Morfolojik analizler sonucunda 800 °C'de tavllanmış numuneler için XRD sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olan daha düzgün ve yoğun plaka benzeri yapıya sahip güçlü taneler arası bağlantı gözlemlenmiştir.
- Zirkonyum yüzey katmanlı Bi-2223 örneklerinin sıcaklığa bağlı öz direnç eğrilerinin, difüzyon tavlama sıcaklığına bağlı olarak önemli seviyede değiştiği gözlemlenmiştir. Bu, termal enerjinin itici gücü sebebiyle kristal yapıda kaplanan Zr safsızlık atomlarının değişik derinlik seviyelerine işlemesine atfedilir. Bir süperiletkenin metalik karakteristik davranışını etkileyen diğer faktör, Zr'nin Bi-2223 matrisine dahil edilmesidir, çünkü düzlem içi Cu-O bağlarını birbirine bağlayan  $\sigma$  bağ-önleyici hareketli boşluk taşıyan çeşitler etkilenmektedir.  $\rho_{300K}$ ,  $\rho_{res}$  ve  $\rho_{115K}$ 'de öz direnç

değeri 800 °C tavlama sıcaklıklarında en elverişli değerleri göstermekte olup, Bi-2223 ana matrisinde çatlak oluşturan kusur yoğunluklarında, tane içi/taneler arası sınır kuplaj sorunlarında ve safsızlık saçılmalarında minimalin varlığını gösterir. Öte yandan, Zr-yüzey katmanlı Bi-2223 seramiklerinin süperiletkenlik özellikleri için çift yönlü değişiklikler de gözlemlendi. 800 °C'deki difüzyon tavlama işlemi, Zr-yüzey katmanlı Bi-2223 seramiklerinin hem onset/ofset kritik sıcaklığını hem de geçiş bölgesini iyileştirdi. Zr difüzyonunun Bi-2223 seramik süperiletkenlerin temel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılabilir.

- Vickers mikrosertlik ölçümleri sonucunda, difüzyon yapılmamış saf Bi-2223 süperiletken seramiğin, 650 °C ile 840 °C arasında farklı sıcaklıklarda tavlanan Zr yüzey katmanlı Bi-2223 tabanlı süperiletken seramiklere kıyasla daha yumuşak olduğu gözlemlenmiştir. En sert malzeme özelliğini 650 °C'de tavlanan külçede görülmüştür. Difüzyon tavlama sıcaklığı arttıkça sertlikte düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.)

Adachi, S., et al., Pressure effect in Bi-2212 and Bi-2223 cuprate superconductor. *Applied Physics Express*, 2019. 12(4).

Aftabi, A. and M. Mozaffari, Fluctuation induced conductivity and pseudogap state studies of  $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  superconductor added with ZnO nanoparticles. *Scientific Reports*, 2021. 11(1): p. 4341.

Akkurt, B., et al., Evaluation of crystallographic and electrical-superconducting features of Bi-2223 advanced ceramics with vanadium addition. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2021. 32(4): p. 5035-5049.

Alikhanzadeh-Arani S., Salavati-Niasari M.: Synthesis and characterization of hightemperature ceramic YBCO nanostructures prepared from a novel precursor, *Journal of Nanostructures* 1, pp. 63, 2012

Allen, P.B., W.E. Pickett, and H. Krakauer, Anisotropic normal-state transport properties predicted and analyzed for high- $T_c$  oxide superconductors. *Physical Review B*, 1988. 37(13): p. 7482-7490.

Awad, R., et al., The Influence of  $\text{SnO}_2$  Nano-Particles Addition on the Vickers Microhardness of (Bi, Pb)-2223 Superconducting Phase. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2012. 25(4): p. 739-745.

Bardeen, J., Cooper, L.N., & Schrieffer, J.R. (1957). Microscopic Theory of Superconductivity. *Physical Review*, 108, 162.

Bednorz, J. G., & Muller, K. A. (1986). Possible High- $T_c$  Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. *Zeitschrift Fur Physik B-Condensed Matter*, 64(2), 189-193.

Bilgili, O., Y. Selamet, and K. Kocabas, Effects of Li Substitution in Bi-2223 Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2008. 21(8): p. 439-449.

Boudjaoui, S., Quench of the Superconductivity in the Yttrium-Doped Compounds  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6-x}\text{La}_{0.4}\text{Y}_x\text{CuO}_6 + \delta$  of the Bi-2201 Phase. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2022.

Cabassi, R., Delmonte, D., Abbas, M. M., Abdulridha, A. R., & Gilioli, E. (2020). The Role of Chemical Substitutions on Bi-2212 Superconductors. *Crystals*, 10(6). doi:ARTN 462

Cevizci, E. B., "to determine mechanical properties of ag doped bi-2223 superconductors ceramics", 2013.

Coombs, T.A., A Finite Element Model of Magnetization of Superconducting Bulks Using a Solid-State Flux Pump. *Ieee Transactions on Applied Superconductivity*, 2011. 21(6): p. 3581-3586.

Dikici, M. (2013). *Katıhal Fiziği*: Seckin Yayınları.

Doğruer, M. (2021). Full Characterization of Sr Site Nd Substituted Bulk Bi-2223 Superconducting Samples with Standard Experimental Methods and Theoretical Approaches. (Ph.D. Thesis), Bolu Abant İzzet Baysal University

E. Orhan, E. Kara, Ş. Kaya, M. U. Doğan, R. Terzioğlu, G. Yildirim, C. Terzioğlu. "Refinement of some basic features of Zr surface-layered Bi-2223 superconductor with

diffusion annealing temperature" , Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022.

Ekin, J., Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing. 2006: Oxford University Press.

Eskes, H. and G.A. Sawatzky, Tendency towards Local Spin Compensation of Holes in the High- $T_c$  Copper Compounds. Physical Review Letters, 1988. 61(12): p. 1415-1418.

Flores-Livas, J. A., Boeri, L., Sanna, A., Profeta, G., Arita, R., & Eremets, M. (2020). A perspective on conventional high-temperature superconductors at high pressure: Methods and materials. Physics Reports-Review Section of Physics Letters, 856, 1-78.

Golovashkin A. I., Ivanenko O. M., Kudasov Yu. B., Mitsen K. V., Pavlovsky A. I., Platonov V. V., Tatsenko O. M.: Low temperature direct measurements of  $H_{c2}$  in HTSC using megagauss magnetic fields, Physica C: Superconductivity, pp. 1859, 1991

Gour, A.S., P. Sagar, and R. Karunanithi, Investigation of cryogenic level sensors for LN2 and LOX. Cryogenics, 2017. 84: p. 76-80.

Hazen, R. M., Prewitt, C. T., Angel, R. J., Ross, N. L., Finger, L. W., Hadidiacos, C. G., . . . Chu, C. W. (1988). Superconductivity in the High- $T_c$  Bi-CaSr-Cu-O System - Phase Identification. Physical Review Letters, 60(12), 1174-1177.

J.C. Bednorz and K.A. Müller, "Possible high- $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O System ", Zeitschrift für Physik B. 64 (2), p. 189, 1986

Jassim, A.K. and M.M. Abbas, Superconductivity of BSCCO Compound Substituted Partially by Zr Nanoparticles at Bi Site. Journal of Physics: Conference Series, 2021. 2114(1): p. 012065.

Jia, Z.Y., et al., Effects of nano-ZrO<sub>2</sub> particles on the superconductivity of Pb-doped BSCCO. Physica C, 2000. 337(1-4): p. 130-132.

Kaya, S., Evolutions on surface chemistry, microstructure, morphology and electrical characteristics of SnO<sub>2</sub>/p-Si heterojunction under various annealing parameters. Journal of Alloys and Compounds, 2019. 778: p. 889-899.

Kaya, Ş., Determination of Electron Trajectories for SEM/EDS Analysis of Bi-(2212) Bulk Superconductors: A Monte Carlo Simulation for Surface Impurity Diffusion, İyit N. editors, Current Research in Science and Mathematics. Gece Publishing; 2022. p. 57 -76.

Ketterson, J.B. . (2016). The Physics of Solids: Oxford Scholarship.

Liu, Z., et al., The magnetic and levitation characteristics of single-grain YBaCuO and GdBaCuO-Ag bulk superconductors in high magnetic fields. Journal of Applied Physics, 2021. 130(18).

Maeda H., Tanaka Y., Fukutomi M., Asano T.: A New High- $T_c$  Oxide Superconductor without a Rare Earth Element, Jpn. J. Appl. Phys. 27, pp. L209, 1988

Meissner, W., & Ochsenfeld, R. (1933). Ein neuer effect bei eintritt der supraleitfähigkeit. Naturwissenschaften 21, 787.

Miller, W., et al., Superconducting properties of BiPbSrCsCuO and BiSrCaCuO glass-ceramics. Acta Physica Polonica A, 2006. 109(4-5): p. 627-631.

Onnes, H.K. . (1911). The Resistance of Pure Mercury at Helium Temperatures. Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 12, 120.

Oztel, S., et al., Influences of platinum doping concentrations and operation temperatures on oxygen sensitivity of Pt/SnO<sub>2</sub>/Pt resistive gas sensors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019.

Ozturk, O., et al., Physical Properties and Diffusion-Coefficient Calculation of Iron Diffused Bi-2223 System. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2012. 25(7): p. 2481-2487.

Pakdil, M., Bekiroglu, E., Oz, M., Saritekin, N. K., & Yildirim, G. (2016). Role of preparation conditions of Bi-2223 ceramic materials and optimization of Bi-2223 phase in bulk materials with experimental and statistical approaches. *Journal of Alloys and Compounds*, 673, 205-214.

Pakdil, M., et al., Role of preparation conditions of Bi-2223 ceramic materials and optimization of Bi-2223 phase in bulk materials with experimental and statistical approaches. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016. 673: p. 205-214.

Plakida, N., *High Temperature Cuprate Superconductors*. 2010: Springer Series in Solid-State Sciences.

Presland M.R., Tallon J.L., Buckley R.G., Liub R.S., Flower N.E.: General trends in oxygen stoichiometry effects on T<sub>c</sub> in Bi and Tl superconductors, *Physica C: Superconductivity* 176, pp. 95, 1991

Prozorov R., Giannetta R. W., Carrington A., Fournier P., Greene R. L., Guptasarma P., Hinks D.G., Banks A. R.: Measurements of the absolute value of the penetration depth in high-T<sub>c</sub> superconductors using a tunnel diode resonator, *arXiv*, 2000

Sahoo, M. and D. Behera, Effect of Ti Doping on Structural and Superconducting Property of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> High T<sub>c</sub> Superconductor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2014. 27(1): p. 83-93.

Salama, K., et al., High-Current Density in Bulk Yba<sub>2</sub>cu<sub>3</sub>ox Superconductor. *Applied Physics Letters*, 1989. 54(23): p. 2352-2354.

Saritekin, N.K., et al., Decrement in metastability with Zr nanoparticles inserted in Bi-2223 superconducting system and working principle of hybridization mechanism. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2016. 27(1): p. 956-965.

Sato, K., 3 - Bismuth-based oxide (BSCCO) high-temperature superconducting wires for power grid applications: Properties and fabrication, in *Superconductors in the Power Grid*, C. Rey, Editor. 2015, Woodhead Publishing. p. 75-95.

Saxena, A.K. (2012). *High-Temperature Superconductors*: Springer- Verlag.

Semerçi, T. (2015). *Terahertz Wave Sensitive Superconducting Bolometric Detector*. (M.Sc. Thesis), İzmir Institute of Technology.

Slater, J.C., Atomic Radii in Crystals. *Journal of Chemical Physics*, 1964. 41: p. 3199 ç

Smirnov, V.V., et al., Effect of Titanium and Zirconium Substitutions for Calcium on the Formation and Structure of Tricalcium Phosphate and Hydroxyapatite. *Inorganic Materials*, 2017. 53(12): p. 1254-1260.

Suh, J.Y., et al., Semiconductor to metal phase transition in the nucleation and growth of VO<sub>2</sub> nanoparticles and thin films. *Journal of Applied Physics*, 2004. 96(2): p. 1209-1213.

Svetlomisr Stavrev, *Modelling of high temperature superconductors for AC power applications*, 2002.

Timmer, John (May 2011). "25 years on, the search for higher-temp superconductors continues". *Ars Technica*. Archived from the original on 4 March 2012. Retrieved 2 March 2012.

Turgay, T. and G. Yildirim, Effect of aliovalent Si/Bi partial substitution on propagation mechanisms of cracking and dislocation in Bi-2212 crystal system. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2019. 30(8): p. 7314-7323.

Turkoz, M.B., et al., Evaluation of key mechanical design properties and mechanical characteristic features of advanced Bi-2212 ceramic materials with homovalent Bi/Ga partial replacement: Combination of experimental and theoretical approaches. *Ceramics International*, 2019. 45(17): p. 21183-21192.

Ulgen, A.T., et al., Contribution of vanadium particles to thermal movement of correlated two-dimensional pancake Abrikosov vortices in Bi-2223 superconducting system. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2022.

Yamauchi, H. and M. Karppinen, Application of high-pressure techniques: stabilization and oxidation-state control of novel superconductive and related multi-layered copper oxides. *Superconductor Science & Technology*, 2000. 13(4): p. R33-R52.

Yıldırım, G., Yücel, E., Bal, S., Doğruer, M., Varılcı, A., Akdoğan, M., Terzioğlu, C. and Zalaoglu, Y., "Investigation of Structural and Superconducting Properties of Cr Added Bi-2212 Superconducting Ceramics", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 25(2): 231-237, (2011).

Yildirim, G. (2012). Electrical and Magnetic Properties of Bi(Pb)SrCaCuO Superconductor Thin Film Produced by Sputtering Method. (Ph.D. Thesis), Bolu Abant Izzet Baysal University

Yildirim, G., Determination of optimum diffusion annealing temperature for Au surface-layered Bi-2212 ceramics and dependence of transition temperatures on disorders. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017. 699: p. 247-255.

Wilson, M.N., A Century of Superconducting Technology. *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol 58, 2012. 1435: p. 11-35.

Wu M. K., Ashburn J. R., Torng C. J., Hor P. H., Meng R. L., Gao L., Huang Z. J., Wang Y. Q., Chu C. W.: Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure, *Physical Review Letters* 58, pp. 908, 1987

Xu, X., et al., A correlation between transport current density and grain connectivity in MgB<sub>2</sub>/Fe wire made from ball-milled boron. *Journal of Applied Physics*, 2009. 105(10).

Zalaoglu, Y., et al., Improvement in fundamental electronic properties of Bi-2212 electroceramics with trivalent Bi/Tm substitution: a combined experimental and empirical model approach. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2021. 32(14): p. 19846-19858.

Zalaoglu, Y. and G. Yildirim, An effective research for diffusion annealing temperature and activation energy in Au surface-layered Bi-2212 ceramic composites. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2017. 28(23): p. 17693-17701.

## 6. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre ORHAN

Doğum Yeri ve Tarihi :

Üniversite : Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi –

Elektrik Elektronik Mühendisliği

E-Posta

İletişim Adresi :