

T.C.  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



AL-KATKILI Bİ-2223 SÜPERİLETKEN SERAMİKLERE AİT  
OLAN YAPISAL, SÜPERİLETKENLİK VE MEKANİK  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANIL KÖRPE

BOLU, EYLÜL - 2019

T.C.  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



AL-KATKILI Bİ-2223 SÜPERİLETKEN SERAMİKLERE AİT  
OLAN YAPISAL, SÜPERİLETKENLİK VE MEKANİK  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANIL KÖRPE

BOLU, EYLÜL - 2019

## KABUL VE ONAY SAYFASI

ANIL KÖRPE tarafından hazırlanan "AL-KATKILI Bİ-2223 SÜPERİLETKEN SERAMİKLERE AİT OLAN YAPISAL, SÜPERİLETKENLİK VE MEKANİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında 15.08.2019 tarihinde savunularak **Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

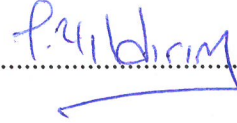
### Jüri Üyeleri

Danışman  
Doç. Dr. Gürcan YILDIRIM  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

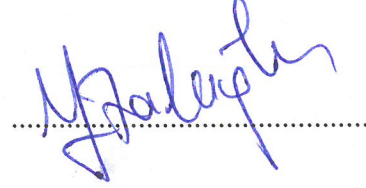
Üye  
Prof. Dr. Murat PAKDİL  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Yusuf ZALAOĞLU  
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

### İmza

  
.....

  
.....

  
.....

Prof. Dr. Ömer ÖZYURT   
.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü 



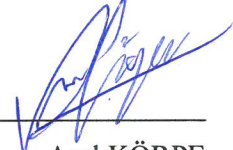
**Aileme,**

## ETİK BEYAN

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.



Anıl KÖRPE

## ÖZET

### AL-KATKILI Bi-2223 SÜPERİLETKEN SERAMİKLERE AİT OLAN YAPISAL, SÜPERİLETKENLİK VE MEKANİK ÖZELLİKLER DEĞİŞİMİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

ANIL KÖRPE

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. GÜRCAN YILDIRIM)

BOLU, EYLÜL - 2019

Bu kapsamlı çalışma, geleneksel katı hal reaksiyon yöntemi ile 24 saat 840 °C sabit tavlama sıcaklığında üretilen  $Bi_{1.8}Sr_2Ca_{2.2}Cu_3.0Al_xO_y$  seramik kupratlarının mikroyapısal, elektriksel ve süper iletkenlik özelliklerinin değişimini Kütle yoğunluğu, dc direnç ( $\rho-T$ ), taşıma kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ), X-ışını kırınımı (XRD) ve Vickers mikro sertlik incelemeleri gibi standart karakterizasyon ölçümleri sayesinde inceler. Elde edilen sonuçlar, tüm özelliklerin Bi-2223 süperiletken matrisindeki Al konsantrasyonunun arttırılmasıyla bozulduğunu, bunun ötesinde yalnızca Bi-2223 plakalar arasındaki çarpılma nedeniyle değil, gözenekliliklerde ve tane sınırında zayıf bağlantıların artışından dolayı bozulduğunu doğruladı. Örneğin; onset(offset) kritik sıcaklık değerleri, kirlilik içeriği ile birlikte 109,61 K(107,18 K)'den 92,63 K(13,41 K)'e düşer. Öte yandan, kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) 81  $A/cm^2$ 'den (saf numune için) ile 17  $A/cm^2$ 'ye (Al-6 için) aralığında ölçülür. Dahası, XRD ölçümleri, Al katkılmasının Bi-2223 fazının oluşum hızını azaltarak kristal yapıya girdiğini göstermektedir. Vickers mikrosertlik ölçümlerine gelince, kristal yapısındaki Al safsızlıklarının varlığı mekanik performansı oldukça azaltır. Aslında, Al konsantrasyon seviyesinin arttırılması, mekanik dayanıklılık, sertlik, süneklik, tokluk, sertlik, kırılma ve özellikle yerel mikroyapısal bozulma, gözeneklilik, yanlışlıklar dahil olmak üzere yeni oluşturulan yapısal problemler nedeniyle özellikle bükülme mukavemeti gibi temel mekanik tasarım özelliklerine sürekli olarak zarar verir. Ayrıca, üretilen örneklerin mekanik karakterizasyonları ve mikrosertlik değerleri Meyer yasası, orantılı numune direnci(PSR) modeli, elastik / plastik deformasyon(EPD) modeli ve Hays-Kendall (HK) modeliyle analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, HK modeli bu çalışmada hazırlanan örneklerin

mikrosertlik hesaplamaları için en uygun modeldir. Sonuç olarak, üretilen  $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{3.0}\text{Al}_x\text{O}_y$  seramiklerinin yapısal, elektriksel, süperiletkenlik ve mekanik özellikleri Al katkılama miktarının artmasıyla yavaş bir şekilde azalır.

**ANAHTAR KELİMELER:**  $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{3.0}\text{Al}_x\text{O}_y$ , Al ilavesi, Katkılama mekanizması.



## **ABSTRACT**

### **THE INVESTIGATION OF STRUCTURAL, SUPERCONDUCTIVITY AND MECHANICAL PERFORMANCES BELONGING TO AL-ADDED BI-2223 SUPERCONDUCTOR CERAMICS**

**MASTER DEGREE  
ANIL KORPE**

**BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF  
NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
MECHANICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. GURCAN YILDIRIM)**

**BOLU, SEPTEMBER 2019**

This comprehensive study investigates the change of the microstructural, electrical and superconducting properties of the  $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{3.0}\text{Al}_x\text{O}_y$  ceramic cuprates produced by the conventional solid state reaction method at the constant annealing temperature of 840 °C for 24 h with the aid of the standard characterization measurements such as bulk density, dc resistivity ( $\rho$ -T), transport critical current density ( $J_c$ ), X-ray diffraction (XRD) and Vickers microhardness examinations. The results obtained confirm that all the properties degrade with the enhancement of the Al concentration level in the Bi-2223 superconducting system because of not only the distortion between the Bi-2223 slabs but also the increase in the porosities and grain boundary weak-links. For example; the onset (offset) critical temperature retrogrades from 109.61 K (107.18 K) to 92.63 K (13.41 K) depending on the augmentation of the Al concentration level. However, the transport critical current density is measured in the range from 81 A/cm<sup>2</sup> (for pure sample) to 17 A/cm<sup>2</sup> (for Al-6 sample). Moreover, one can see from the XRD measurements that Al particle introduces into the crystal structure by reducing the formation velocity of the Bi-2223 phase. As for Vickers microhardness measurements, the presence of Al impurities in the crystal structure diminishes remarkably the mechanical performance. In fact, the enhancement Al concentration level damages constantly the key mechanical design properties such as the mechanical durability, hardness, ductility, toughness, stiffness, fracture and especially flexural strengths due to new induced structural problems including the local microstructural distortion, porosity, misorientations (grain alignment distributions), defects, lattice strains, structural



inhomogeneity and grain boundary coupling problems in the crystal matrix. Further, the mechanical characterization and microhardness values of the samples produced are analyzed by Meyer's Law, Proportional Sample Resistance (PSR) Model, Elastic/Plastic Deformation (EPD) Model and Hays-Kendall (HK) Model. According to the experimental results obtained, HK model is the best model for microhardness calculations of the samples prepared for this study. As a result, the microstructural, electrical and superconducting properties of  $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{3.0}\text{Al}_x\text{O}_y$  ceramics degrades slowly with the enhancement of the Al dopant level.

**KEYWORDS:**  $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{3.0}\text{Al}_x\text{O}_y$ , Al inclusion, Doping mechanism.



# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	x
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xi
<b>KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	xii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	xiii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. SÜPERİLETKENLİK PARAMETRELERİ</b> .....	4
2.1 Sıfır Direnç .....	4
2.2 Kritik Manyetik Alan .....	5
2.3 Kritik Akım Yoğunluğu .....	7
2.4 Meissner-Ochsenfeld Etkisi .....	8
2.5 Süperiletkenlik Teorileri .....	10
2.6 Uyum Uzunluğu .....	11
2.7 Sızma Derinliği.....	12
<b>3. DENEYSEL YÖNTEM</b> .....	13
3.1 Numune Hazırlama .....	13
3.2 Deneysel Ölçümler .....	15
3.2.1 Elektriksel Özdirenç Analizi.....	15
3.2.2 X-Işımları Analizi .....	16
3.2.3 Vickers Sertlik Analizi .....	17
3.2.4 Taşıyıcı Kritik Akım Yoğunluğu Analizi.....	18
3.2.5 Kütle Yoğunluğu Analizi.....	18
<b>4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA</b> .....	19
4.1 Elektriksel Özdirenç Ölçümleri.....	19
4.2 X-Işımları Ölçümleri.....	21
4.3 Vickers Mikrosertlik Ölçümleri .....	25
4.3.1 Gerçek Mikrosertlik Değerlerinin Teorik Modellerle İncelenmesi .	29
4.3.1.1 Meyer Kanununa (MK) Dayalı İnceleme .....	29
4.3.1.2 Orantılı Numune Direnci (PSR) Modeli.....	31
4.3.1.3 Elastik/Plastik Deformasyon (EPD) Modeli.....	32
4.3.1.4 Hays Kendall (HK) Modeli.....	33
4.4 Taşıyıcı Kritik Akım Yoğunluğu Ölçümleri.....	35
4.5 Kütle Yoğunluğu Ölçümleri.....	35
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	38
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	40
<b>7. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	43

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1. 1. Süperiletkenliğin Kronolojisi .....	3
Şekil 2. 1. Civa direncinin sıcaklığa bağlılığını gösteren direnç-sıcaklık grafiği .	5
Şekil 2. 2. Kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlı değişimi .....	6
Şekil 2. 3. I. Tip ve II. Tip süperiletken malzemeler için manyetik alan-sıcaklık faz diyagramı.....	7
Şekil 2. 4. Kritik yüzey faz diyagramı.....	8
Şekil 2. 5. Meissner etkisi (a) $T > T_c$ ; (b) $T < T_c$ durumunun gösterimi .....	9
Şekil 2. 6. Malzemeye uygulanan manyetik alanın mıknatıslanma ile değişimi 10	
Şekil 2. 7. Elektron-fonon etkileşimi kaynaklı Cooper çifti oluşumu.....	11
Şekil 3. 1. XR 205SM-DR Precisa terazi.....	13
Şekil 3. 2. PROTHERM (Model PTF 12/75/200) programlanabilir kül fırın ....	14
Şekil 3. 3. TSEK TÜMAS pres cihazı.....	15
Şekil 3. 4. Kriyostat sistemi .....	16
Şekil 3. 5. Rigaku X-Işını Kırınım Ölçeri.....	17
Şekil 4. 1. Hazırlanan süperiletken malzemelerin 10 K-150 K sıcaklık aralığındaki sıcaklığa bağlı öz direnç grafikleri.....	19
Şekil 4. 2. Al-0, Al-1 ve Al-2 malzemelerinin XRD desenleri .....	22
Şekil 4. 3. Al-3, Al-4, Al-5 ve Al-6 malzemelerinin XRD desenleri .....	22
Şekil 4. 4. İncelediğimiz örneklerin Vickers Hv sertlik parametrelerine karşı uygulanan girinti test yükünün farklılaşması .....	26
Şekil 4. 5. Örneklerin $\ln F$ in $\ln d$ ile değişim grafiği .....	30
Şekil 4. 6. Örneklerin $F/d-d$ değişim grafiği .....	31
Şekil 4. 7. Örneklerin $F1/2-d$ değişim grafiği .....	33
Şekil 4. 8. Örneklerin $F-d2$ değişim grafiği .....	34

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 4. 1. Hazırlanan numunelerin özdirenç sıcaklık grafiğinden elde edilen verilerin sayısal değerleri.....	20
Çizelge 4. 2. Hazırlanan numunelerin X-ışınları, kritik akım yoğunluğu ve tane boyutu ölçüm sonuçlarının sayısal değerleri.....	24
Çizelge 4. 3. Hazırlanan Al katkılı Bi-2223 süperiletken malzemeler için yüke bağlı elastik modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu (KIC), elastik sertlik katsayısı(C11), parlaklık indeksi (B) ve süneklik (D) parametrelerinin sayısal değerleri.....	29
Çizelge 4. 4. Saf ve Al katkılı Bi-2223 örnekler için mikrosertlik ölçüm sonucu ile uygulanan yük arasındaki ilişkiler .....	30
Çizelge 4. 5. Saf ve Al katkılı Bi-2223 örnekler için mikrosertlik ölçüm sonucu ile uygulanan yük arasındaki ilişkiler .....	31
Çizelge 4. 6. Üretilen örneklerin yükten bağımsız mikrosertlik .....	33

## KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

<b>B</b>	: Manyetik Akım Yoğunluğu
<b>E</b>	: Elektrik Alan
<b>H</b>	: Manyetik Alan
<b>M</b>	: Manyetizasyon (Mıknatıslanma)
<b>R</b>	: Direnç
<b>V</b>	: Gerilim
<b>H<sub>a</sub></b>	: Uygulanan Manyetik Alan
<b>H<sub>c</sub></b>	: Kritik Manyetik Alan
<b>H<sub>c1</sub></b>	: Alt Kritik Alan
<b>H<sub>c2</sub></b>	: Üst Kritik Alan
<b>I<sub>c</sub></b>	: Kritik Akım
<b>J<sub>c</sub></b>	: Kritik Akım Yoğunluğu
<b>T<sub>c</sub></b>	: Kritik Geçiş Sıcaklığı

## TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanın olan hocam sayın Doç. Dr. Gürcañ YILDIRIM'a tez boyunca bana olan rehberliği, güveni ve bana verdiği değerli önerileri nedeniyle teşekkür ederim. Ayrıca, danışman hocamın çalıştığım konu olan süperiletkenlik konusuyla ilgili çok faydalı bilgileri bana öğrettiği için minnettarım.

Bu ilaveten, yapmış olduğum bu değerli çalışmayı geliştirmeye yönelik olarak yaptıkları yorumları, verdikleri fikirleri ve sundukları önerileri için tez komite üyelerime ayrı ayrı teşekkür ediyorum.

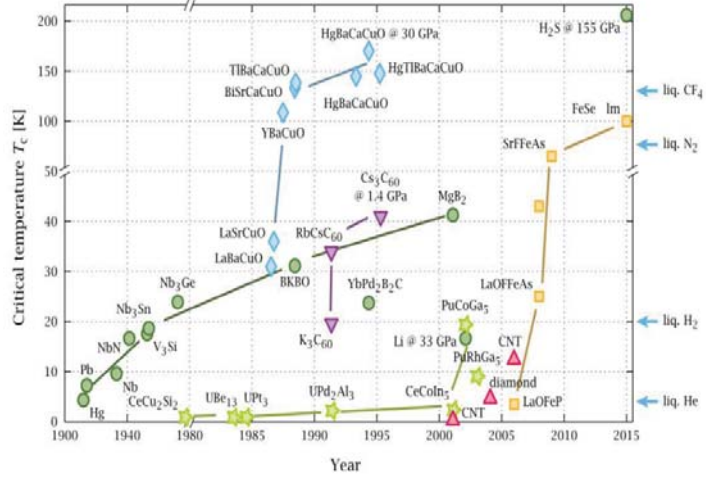
Son olarak, lisansüstü eğitimim sürecinde (özellikle de tez yazımı sürecinde) ailemin ve yakın arkadaşlarımin bana gösterdikleri sabır ve duaları için sonsuz teşekkür ederim.

## 1. GİRİŞ

Bir metal üzerinden bir elektrik akımı aktığında elektronların malzeme boyunca hareketine karşı bir direnç vardır. Bu direnç, metalin saflığına bağlıdır. Bu akımın devamını sağlamak için bir potansiyel fark uygulamak gereklidir. Bilindiği gibi, süperiletken malzemeler hiç direnci olmayan bir malzemedir. Bununla birlikte, metallerin pek çoğu normal oda sıcaklığında bir elektrik direnci göstermekle beraber ancak mutlak sifira çok yakın bir sıcaklık değerine soğutulduğunda bu malzemelerde süperiletkenlere dönüşür. Artık bu malzemenin içerisinde akım geçirildiğinde herhangi bir dirençle karşılaşmadan ve böylelikle de herhangi bir gerilime veya elektrik harcamasına ihtiyaç duymadan süresiz olarak akım taşıyabilir. Bu nedenle, malzemelerin süperiletkenlik özelliklerinin keşfedilmesi önem kazanmıştır. Malzemelerin gösterdiği bu olağanüstü davranışı belirleyebilmek için ilk çalışmalar Heike Kamerlingh Onnes tarafından yapılmıştır. Öncelikle, Onnes ve diğer araştırmacılar maddenin çok düşük sıcaklıklarda elektriksel özelliklerini belirlemeye çalıştılar. Yaptıkları çalışmalarda, bakır (Cu), platin (Pt), altın (Au) gibi bazı metalik malzemelerde, azalan sıcaklıkta elektriksel direncin sürekli azaldığını gözlemlemişlerdir. Dahası, süperiletkenlik ilk önce Hg'de 4,20 K'da 1911'de Heike Kamerlingh Onnes tarafından keşfedildi (Onnes, 1997) Daha sonrasında da, Onnes bu çalışmayı takip ederek indiyum (In), kalay (Sn) ve kurşun (Pb) 'nin sırasıyla 3,4, 3,7 ve 7,2 K'da süper iletken olduğunu gösterdi. Ancak, malzemelerin elektrik direncinin “kritik sıcaklık” veya “geçiş sıcaklığı” altında kaybolması süperiletkenlerin sıra dışı tek özelliği değildir. Dolayısıyla, dışarıdan uygulanan bir manyetik alan da malzemenin elektrik direncini etkileyen diğer bir etkidir. Buna ilaveten, süperiletkenlerin manyetik özellikleri bakımından ideal bir diamagnetik malzeme olduğu 1933'te Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld tarafından keşfedildi. Süperiletkenlik olayının ilk teorik açıklaması 1957'de John Bardeen, Leon Neil Cooper ve John Robert Schrieffer tarafından ortaya konulan BCS teorisi ile başarılıydı (Bardeen ve ark., 1957). Daha sonra, John Bardeen, Leon Neil Cooper ve John Robert Schrieffer 1972'de ortaya koydukları BCS teorisi ile fizik dalında Nobel Ödülü'ne layık görüldü. Bununla birlikte, cıvalı tel iletkenlerinde süperiletkenliğin keşfedilmesinden beri ilk önemli gelişme 1973'te Nb<sub>3</sub>Ge bileşiği için kritik geçiş sıcaklığının 23,4 K değerine

yükselmesiyle elde edilmiştir. Yani, 1986 yılına kadar, bileşikler arasında gözlenen en yüksek kritik sıcaklık değeri 23,4 K ile Nb<sub>3</sub>Ge bileşiğine aitti. 1986'da George Bednorz ve Karl Alex Müller (Bednorz ve Müller, 1986), bakır okside dayalı süperiletken olan La-Ba-Cu-O seramiklerinde T<sub>c</sub>=30 K'da keşfetti. Bu keşif yepyeni bir süperiletken türü olan yüksek sıcaklık süperiletkenleri için başlangıç noktası olmuştur. Keşiflerinden dolayı iki bilim insanına 1987'de fizik dalında Nobel Ödülü verildi (Bednorz ve Müller, 1988). Daha sonra, Cava ve arkadaşları (Cava ve ark., 1987; Chu ve ark., 1987; Cava ve ark., 1987), Ba ile Sr'nin yerini değiştirdiklerinde T<sub>c</sub> değerinin 36 K değerine kadar yükseldiğini buldular. Buna ilaveten, 1987 yılında La yerine Y ile yer değiştirilerek M. K. Wu ve P. W. Chu yönetimindeki gruplar ile sıvı azotun (77 K) kaynama noktasından daha yüksek 93 K geçiş sıcaklığına sahip YBCO süperiletken sistemini keşfedildiğini açıkladılar (Wu ve ark., 1987; Le Page ve ark., 1987). Bu keşiften kısa bir süre sonra, Maeda ve arkadaşları Bi-Sr-Ca-Cu-O sisteminde 105 K'da süperiletken buldular (Maeda ve ark., 1988). 1988 yılında, bir başka karakteristik bakır oksit süperiletken bileşiği olan Tl-Ba-Ca-Cu-O Sheng ve Hermann tarafından keşfedildi (Schilling ve ark., 1993; Sheng ve ark., 1988; Sheng ve Hermann, 1988). Bu bileşiklerin kimyasal formülü, Bi-tabanlı sisteminkine benzer. Dahası, 1993'te 135 K geçiş sıcaklığına sahip Hg bazlı bakır oksit bileşikler keşfedildi (Schilling ve ark., 1993; Gao ve ark., 1993). Bu bileşiğin 30 GPa yüksek basınç altındaki geçiş sıcaklığı 164 K olarak kaydedilmiştir (Schilling ve ark., 1993; Gao ve ark., 1994; Chu ve ark., 1993). Son olarak, 2001 yılında 39 K geçiş sıcaklığına sahip olan metalik bileşik magnezyum diborid bileşikleri keşfedildi (Nagamatsu ve ark., 2001).





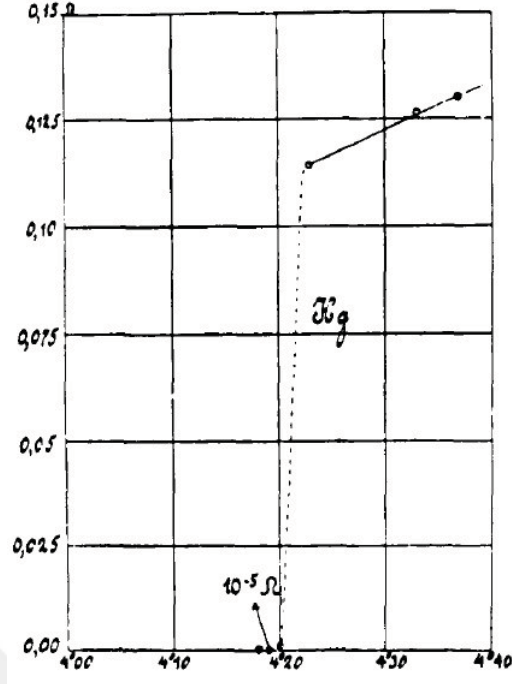
**Şekil 1. 1.** Süperiletkenliğin Kronolojisi (Onnes, 1997)

Şekil 1.1, Kamerlingh-Onnes'in keşfinden bu yana geçiş sıcaklıklarının gelişimini göstermektedir.

## 2. SÜPERİLETKENLİK PARAMETRELERİ

### 2.1. Sıfır Direnç

Onnes 1911 yılında yaptığı katı cıvanın elektrik direnci ölçme deneyini yaptığı sırada daha önce gözlemediği ve şimdilerde süperiletkenlik olarak bilinen olağanüstü davranışı bulmuştur. Yaptığı ölçümde, bir V potansiyel farkı uygulayarak akan akımı buldu ve ohm yasasını da kullanarak R direncini hesapladı. Fakat, sıcaklık 4.2 K'nin altına düştüğü zaman, Onnes gerilimi kapatması durumunda akımın durması gerekirken akımın akmaya devam ettiğini gözlemlemiştir. Yani malzemenin direnci sıfır olmuştu. Dolayısıyla, direncin sıfır olmasıyla beraber süperiletkenliğin ilk karakteristik özelliği olan sıfır direnç özelliği keşfedildi. Şekil 2.1'de Onnes'in orijinal iletkenlik ölçümlerinin bir grafiğini ve süper iletkenliğin ilk gözlemini göstermektedir. Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi sıcaklık 4.22 K-4.20 K gibi çok dar bir sıcaklık aralığında direnç değerinin 0.11 ohm'dan 0.00001 ohm değerine düştüğü görülmektedir ve ayrıca azalan sıcaklık değerlerinde de direnç değerinin daha da azaldığını gözlemlemiştir. Bu gözlem de daha düşük sıcaklıklarda malzemenin neredeyse sıfıra yakın direnç gösterdiğinin ve artık süperiletken duruma geçtiğinin göstergesidir.



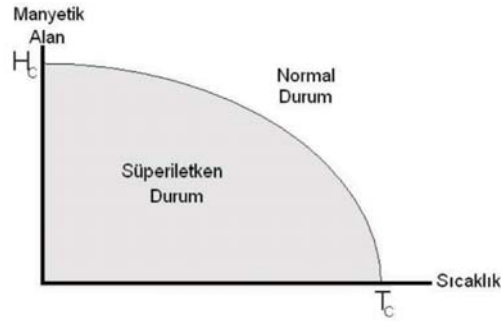
**Şekil 2. 1.** Civa direncinin sıcaklığa bağlılığını gösteren direnç-sıcaklık grafiği  
(Onnes, 1997)

## 2.2. Kritik Manyetik Alan

Malzemelerin süperiletken özelliklerine zarar vermeden bir süperiletkene uygulanabilecek manyetik alanın bir üst sınırı vardır. Örneğin; bir metal süperiletken durumda ise ve uygulanan manyetik alanın değeri yavaşça artarsa, belli bir değerden sonra uygulanan manyetik alan değeri malzemeyi süperiletken durumdan çıkaran bir değere ulaşabilmektedir. Bunu yapan manyetik alanın büyüklüğü kritik alan  $H_c$  olarak adlandırılır. Süperiletkenliği ortadan kaldırmak için gereken minimum manyetik alan kritik manyetik alan olarak adlandırılır.  $H_c$  değeri malzemeye bağlıdır. Belirli bir süperiletken için bu kritik değerın büyüklüğü  $H_c(T)$  alanı, sıcaklık geçiş sıcaklığının altına düştüğünde artar. Bununla birlikte manyetik alan şiddetinin sıcaklığa bağlı olarak değişiminin fonksiyonu şu bağıntıyla açıklanabilir:

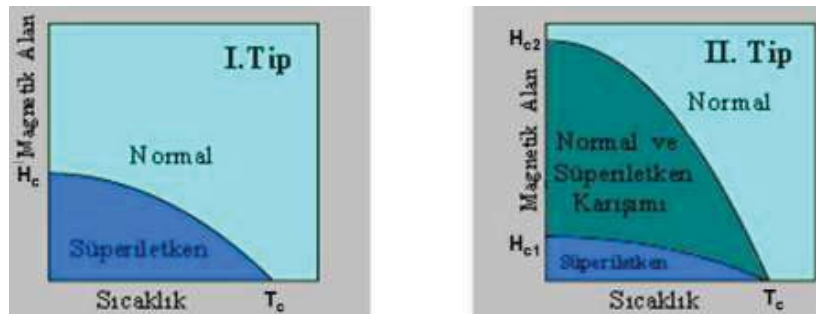
$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

Yukarıda yazdığımız denklem Şekil 2.2'de ile gösterilmiştir.



**Şekil 2. 2.** Kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlı değişimi (Onnes, 1997)

Bu grafik yardımı ile bu eğrinin içinde kalan bölgede malzeme süperiletkenlik özellik gösterirken, dışında kalan kısımda ise normal metal olarak davranmaktadır. Normalden süper iletken duruma ani geçiş, yalnızca geçiş sıcaklığı ( $T_c$ ) ile değil aynı zamanda manyetik alan gücü ile tanımlanan bir sınırdan gerçekleşir. Üzerinde süper iletkenliğin tahrip olduğu kritik bir manyetik alan ( $H_c$ ) değeri vardır. Bununla birlikte, aynı malzeme  $T_c$ 'nin altındaki düşük bir sıcaklığa soğutularak süper iletken hale getirildiğinde, manyetik kuvvet çizgileri tamamen malzemenin içinden çıkarılır. Bu etki Meissner etkisi olarak adlandırılır. Dahası, süperiletken malzemeler, uygulanan manyetik alan değerine göre I. Tip ve II. tip süperiletkenler olarak sınıflandırılır. Bununla birlikte, süperiletken durumundan normal duruma keskin bir geçiş varsa normal durumda, o zaman bu malzeme türüne bir tür I. Tip süperiletken adı verilir. Bu tür davranışlar genel olarak saf metallerle gösterilir. Bu durum Şekil 2.3'te gösterilmiştir. II. Tip süperiletkenlerde ise, I. Tip süperiletkenlerden farklı olarak kritik alanın iki değeri vardır. Bu kritik alanlar alt kritik alan,  $H_{c1}$  ve üst kritik alan,  $H_{c2}$  olarak belirlenmiştir.(Şekil 2.3)



**Şekil 2. 3.** I. Tip ve II. Tip süperiletken malzemeler için manyetik alan-sıcaklık faz diyagramı (Onnes, 1997)

Uygulanan manyetik alan değeri  $H < H_{c1}$  için, manyetik alan süperiletkenden tamamen çıkarılmıştır. Bununla birlikte,  $H > H_{c1}$  değeri için, uygulanan manyetik alan malzemeye yavaşça nüfuz eder ve malzemenin tamamen süperiletken durumdan normal duruma tamamen dönüştüğü  $H_{c2}$  değerine kadar devam eder. Ayrıca, manyetik alanın  $H_{c1}$  ve  $H_{c2}$  arasındaki durumuna girdap veya karışık durum denir. II. Tip süperiletkenlere uygulanan manyetik alan değeri  $H_{c2}$  manyetik alan değerine ulaştığında ise süperiletkenlik tamamen tahrip olmuştur. Yüksek  $T_c$  süper iletkenler için  $H_{c1}$  değeri düşük iken  $H_{c2}$  değeri ise oldukça yüksektir.

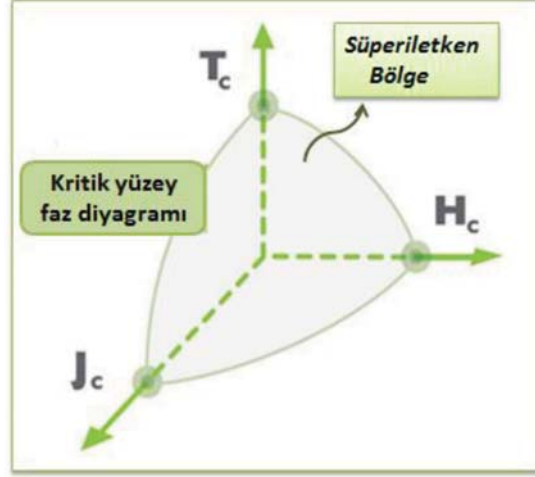
### 2.3. Kritik Akım Yoğunluğu

Geçiş sıcaklığı ( $T_c$ ) ve kritik manyetik alan ( $H_c$ ) gibi kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) da malzemelerin süperiletken ve normal durumları arasındaki sınırı belirleyen önemli parametredir. Bilindiği gibi, kritik manyetik alanın varlığı malzemelerin süperiletkenlik durumunu sınırlandıran olgudur. Aynı zamanda da böyle bir kritik manyetik alanın varlığı süperiletken malzemelerin taşıyabileceği maksimum akım yoğunluğu anlamına gelen kritik akım yoğunluğu parametresi fikrini ortaya çıkarmıştır. Bu durum, süperiletkenlik durumun malzemedan kaldırılmadan önce akabilen maksimum bir akım miktarının varlığını ifade eder. Buna ilaveten, kritik akım yoğunluğu kritik bir manyetik alanın varlığının doğrudan bir sonucudur, çünkü akım bir manyetik alan üretir ve bir manyetik alan bir akım üretir. Kritik akım yoğunluğu ( $J_c$ ) malzemenin taşıyabileceği maksimum miktarının akımın geçtiği kesit alana bölünmesi ile bulunur. Bu kritik sınırın üstünde, dc akımı süper iletken durumunu yok eder. Kritik bir akım, süper iletken durumu söndüren malzemenin yüzeyinde bir manyetik alan üretir. Kritik alan  $H_c$  ve kritik akım  $J_c$ , basit ifade ile birbirleriyle şu şekilde ilişkilidir:

$$B_c = \mu_0 \lambda_L J_c$$

Burada,  $\mu_0$  boş alanın geçirgenliği olarak adlandırılan, değere sahip evrensel bir fiziksel sabit,  $\lambda_L$  ise sıcaklık değerine bağlı olarak değişen sızma derinliğidir. Ayrıca, kritik akım yoğunluğu da sıcaklık bağımlılığına sahiptir. Bununla birlikte, süperiletkenliğin devamlılığının sağlanması için üç parametrenin kritik sınırın altında

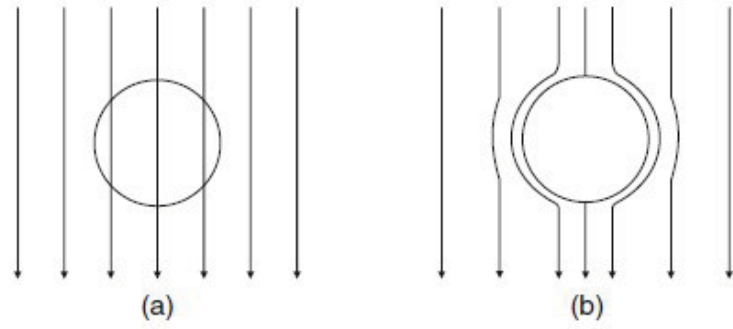
olması gerekmektedir.  $T_c$ ,  $J_c$  ve  $H_c$  parametrelerinin faz diyagramı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. Kritik yüzey faz diyagramı (Cevizci, 2013)

#### 2.4 Meissner-Ochsenfeld Etkisi

Süperiletkenlerin üstün özelliklerin yanı sıra, olağanüstü manyetik özelliklere sahip olduğu düşünülmüştür. 1933 yılında Meissner ve yüksek lisans öğrencisi Ochsenfeld, günümüzde Meissner etkisi olarak bilinen süperiletkenlerin ikinci karakteristik özelliğini keşfetti. Yapılan deneylerde, normal bir metal manyetik alana yerleştirildiğinde, alan Şekil 2.5(a)'da gösterildiği gibi içinden geçmektedir. Meissner ve Ochsenfeld yaptıkları deneyde kritik bir sıcaklığın ( $T < T_c$ ) altında bir süperiletkenin bir manyetik alan içerisine yerleştirildiğinde, manyetik alanın süperiletken tarafından dışarılandığını gözlemlemişlerdir.

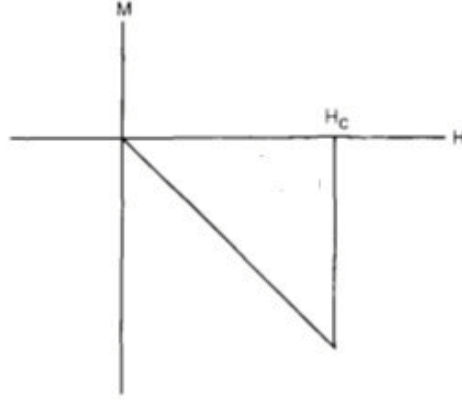


**Şekil 2. 5.** Meissner etkisi (a)  $T > T_c$ ; (b)  $T < T_c$  durumunun gösterimi (Cevizci, 2013)

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, süperiletkenin bir manyetik alana yerleştirildiği zaman sadece manyetik bir alanın ( $T < T_c$  için) dışlanması değil, aynı zamanda da başlangıçta normal bir numunede bulunan bir alanın dışarı atılmasıdır. Ayrıca, bir metal manyetik alan içerisine yerleştirilir ve sonra da metal kritik sıcaklığın altına soğutulursa aynı şekilde manyetik alanın dışarı atılacağını bulunmuştur. Fakat, kritik manyetik alanın ( $H_c$ ) altındaki tüm manyetik alan değerlerinde dışlanma söz konusu iken uygulana değer  $H_c$ 'yi aştığında manyetik alanları engelleme olmadan kabul eder. Bu durum, süperiletkenlikte mükemmel diyamanyetizma olarak adlandırılır. Dahası, herhangi bir malzemede uygulanan manyetik alan, mıknatıslanma ve manyetik indüksiyon arasında şu şekilde bir ilişki bulunmaktadır (Jackson, 1962):

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

Mükemmel bir diamagnetik malzemede  $M = -H$ , ve dolayısıyla  $B = 0$ . Bu durum, şekilsel olarak Şekil 2.6'da görülmektedir.



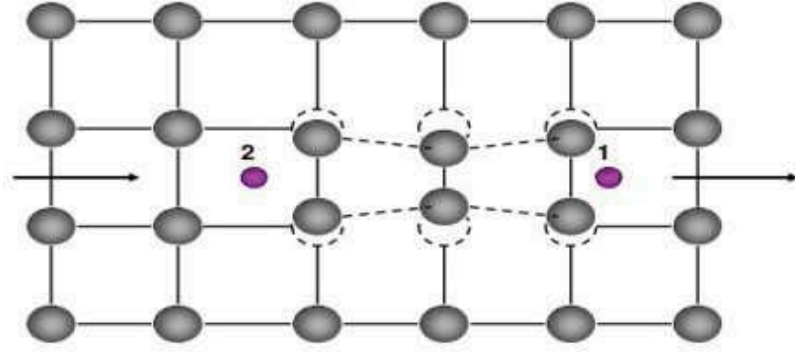
Şekil 2. 6. Malzemeye uygulanan manyetik alanın mıknatıslanma ile değişimi  
(Cevizci, 2013)

Şekil 2.6'ya göre, H'nin herhangi bir değeri için, tam olarak M değerine karşılık gelen bir değer vardır ve B, sıfır veya  $\mu_0 H$ 'dir. Bu, manyetik alanın yüklendiği yoldan bağımsız olarak geçerlidir.

## 2.5 Süperiletkenlik Teorileri

Süperiletkenlik olayını tam olarak anlayabilmek için pek çok model önerilmiştir. Çünkü, yapılan deneylerde süperiletken durumda akım ilerlemesinin bir çift elektron içerdiğine dair göstergeler vardı, ve bu yüzden fizikçiler bu eşleşmenin nasıl gerçekleştiğini merak ettiler. Bu nedenle, süperiletkenlik özelliğinin keşfedilmesinden sonra önerilen ilk model Gorter ve Casimir tarafından ortaya konulmuştur (Gorter, 1957). Bu modele göre, bir süperiletkende iki tür şarj taşıyıcısı olduğunu düşünülür ve süperiletken durumun, metalin iletken elektronlarının sıralı bir hali olduğunu belirtir. Süperiletkenlik ile ilgili diğer bir model de 1957'de Bardeen, Cooper ve Schrieffer (BCS) tarafından açıklanmıştır (Bardeen ve ark., 1957). Bu teori, katıdaki elektronlar arasında normal elektrostatik itme güçlüklerinin üstesinden gelen çekici bir etkileşim öneriyor ve bu sayede Cooper çiftleri olarak bilinen elektron bağ çiftleri oluşturuyor. Burada, bir arada tutulan Cooper çiftleri cinsinden formülasyonu, BCS fononu olarak bilinir. Bu teori, örgü boyunca hareket eden iletken elektronlarının ilerlemesi ile Şekil 2.7'de gösterilmektedir.





**Şekil 2. 7.** Elektron-fonon etkileşimi kaynaklı Cooper çifti oluşumu (Cevizci, 2013)

Şekil 2.7'ye bakıldığında, bir kafes boyunca hareket eden kafes elektronlarının yol boyunca örgü atomlarının bozulmasına neden olmaktadır. Böylece, merkezdeki dört atomun elektrona doğru hafifçe yer değiştirdiği görülmektedir. Bu bozulma ile kafes elektronlarının olduğu bölgede kafesin geri kalanından biraz daha fazla pozitif olan bir bölge oluşur. Dolayısıyla, arkadan gelen elektronlar pozitif yüklü bölgeye doğru çekilir ve böylece iki elektron bir arada hareket ederek o bölgeden geçer. Birlikte geçen elektronlar kafesleri hafifçe bozar, böylece titreşim frekansları değişir. Bu bozulma bölgesi, iletken elektronu kafes içinden geçerken takip eder.

## 2.6 Uyum Uzunluğu

Süperiletkenlik teorisine katkı, genel olarak  $\xi$  ile gösterilen bir tutarlılık uzunluğu kavramını ortaya koyan Ginzburg ve Landau tarafından yapıldı. Ginzburg ve Landau tarafından ortaya konulan hipotezlerini ortaya koyarken elektronlar arasında bir etkileşim olduğu kabul etmişlerdir. Bu nedenle de sınırlı bir mesafede gerçekleşen bu etkileşimi tanımlamaya çalışmışlardır. Ortaya koydukları hipotezlerde temel olarak, uyum uzunluğu bir çift elektronun birbiriyle etkileşime girme ihtimalinin bir ölçüsü olarak tanımlanmıştır. Genel anlamda, uyum uzunluğu Cooper çiftini oluşturan iki elektronun bir arada hareket edebileceği maksimum mesafe olarak belirlenebilir ve  $\xi$  simgesi belirtilir. Bununla birlikte, tutarlılık uzunluğunun doğrudan ölçümü zordur. Bu nedenle, tutarlılık uzunluğunun değeri, spesifik ısıya, duyarlılığa veya iletkenliğe olan dalgalanma katkılarından elde edilebilir. Dahası, I. Tip süperiletkenlerde, uyum

uzunluğu 1000 A civarında iken, II. Tip süperiletkenler olan yüksek sıcaklık süperiletkenlerde uyum uzunluğu bu değerden birkaç kat küçük boyuttur.

## 2.7 Sızma Derinliği

Daha önceki bölümlerde de belirttiğimiz üzere, uygulanan manyetik alan değeri  $H_{c1}$  değerinin altına azaldığında, dış manyetik alan, bir süperiletken malzemenin yüzey bölgesinde sürekli bir süper akımla dışlanır, bu da uygulanan alana tam olarak uyan bir alana neden olur. 1938'de Fritz ve Heinz London kardeşler, elektromanyetizma teorisini temel alarak Meissner etkisi hakkında bir açıklama yaptı. Yapılan açıklamada, uygulanan manyetik alanın bir yüzey akımını indüklediğini gösterdiler; ve dolayısıyla bu yüzey akımı, süper iletken içindeki uygulanan alanı tam olarak iptal eden bir iç manyetik alan üretir. Böylelikle, malzemenin içerisinde hiçbir manyetik alan yoktur. Yani, indüklenen iç alan, uygulanan alana göre büyüklük olarak aynıdır ve eşit zıtlıktadır. Bu nedenle bu iki manyetik alan birbirini iptal eder. Ancak, Fritz ve Heinz London kardeşler bu durumun daha ayrıntılı bir analizini yaptıklarında bazı manyetik alanların gerçekten süper iletkenin yüzey katmanlarına nüfuz ettiğini ve yüzey akımının aktığı yerde bulunduğunu belirlemişlerdir. Böylelikle, uygulanan manyetik alanın yalnızca süperiletken malzemenin tamamından geçebildiğini değil yalnızca çok küçük bir yüzey bölgesinden geçebildiği belirlenmiştir. Bu yüzeyin derinliğine penetrasyon derinliği ( $\lambda$ ) denir ve dış alan süper iletkene azalan bir şekilde girer. Diğer bir ifade ile, nüfuz etme derinliği, uygulanan bir manyetik alanın yüzeydeki değerinin  $1/e$  değerine düştüğü mesafe olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, nüfuz etme derinliğinin büyüklüğü malzemeye ve sıcaklığa bağlıdır. Ayrıca, süperiletkenleri sınıflandırma kolaylığı için, Ginsburg-Landau oranı  $\kappa = \lambda/\xi$  olarak tanımlanmıştır. I. Tip süperiletkenlerde  $\kappa < 1/\sqrt{2}$ 'dir; yani, tutarlılık uzunluğu penetrasyon derinliğinden daha büyüktür. Dahası, herhangi bir manyetik alan, bir uyum uzunluğu içindeki elektronları etkileyecek kadar nüfuz etmeyecektir. II. Tip süperiletkenlerde ise bu durum  $\kappa > 1/\sqrt{2}$  olarak gerçekleşmektedir. Yani, süperiletkenlik, malzemeye nüfuz eden yakındaki bir manyetik alanla yaşayabileceği kadar kısa bir tutarlılık uzunluğunda sınırlandırılmıştır.

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1. Numune Hazırlama

Al ile katkılandırılmış Bi-2223 süperiletken malzemeler katıhal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Kullandığımız kimyasal tozlar hassas terazide tartıldı. (Şekil 3.1)



**Şekil 3. 1.** XR 205SM-DR Precisa terazi

Daha sonra, homojen bir anayapı elde etmek için Al hariç diğer kimyasal tozlar öğütücü makinede 6 saat boyunca karıştırıldı. Elde edilen karışım PROTHERM-MODEL PTF 12/75/200 programlanabilir kül fırında (Şekil 3.2) 5°C/dk. ısıtma ve soğutma hızı ile 800°C'de 36 saat kalsinasyon işlemine tabi tutuldu.



**Şekil 3. 2.** PROTHERM (Model PTF 12/75/200) programlanabilir kül fırın

Kalsinasyon işleminden sonra  $Al_2O_3$  kimyasal tozları  $Bi_{1.8}Sr_{2.2}Ca_{2.2}Cu_{3.0}Al_xO_y$  bileşiğinde yedi farklı molar konsantrasyonda elde edilen karışıma katıldı.  $x=0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.10$  ve  $0.30$  gibi yedi farklı molar konsantrasyonlarda hazırlanan her bir karışımın homojen olması için agat havanda yaklaşık olarak yarım saat boyunca karıştırıldı. Daha sonra, elde edilen katkılı toz karışım  $300$  MPa basınç altında ve oda sıcaklığında kalıplar yardımıyla  $1.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$  boyutlarında dikdörtgen çubuk elde edebileceğimiz şekilde preslendi. (Şekil 3.3)



**Şekil 3. 3.** TSEK TUMAS pres cihazı

Sonrasında hazırladığımız dikdörtgen çubuklar  $5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ . ısıtma ve soğutma hızı ile  $840^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat tavlama işlemine tabi tutuldu. Farklı molar konsantrasyon oranlarına göre Bi-2223 sistemine Al katkılanmış ve tavllanmış numuneler sırasıyla Al-0, Al-1, Al-2, Al-3, Al-4, Al-5 ve Al-6 olarak isimlendirildi.

### **3.2 Deneysel Ölçümler**

#### **3.2.1 Elektriksel Özdirenç Analizi**

Hazırladığımız numunelerin elektriksel özdirenç ölçümleri dört nokta yöntemi ile elde edildi. Dört nokta yöntemi özdirenç ölçme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemlerin başında gelir. Dört nokta yönteminde malzeme yüzeyinde dört adet bağlantı noktası(uç) bulunur. Bu bağlantı noktalarından dış kısımda olanlarından akım geçirilirken içteki iki bağlantı noktası yardımıyla potansiyel fark ölçülür. Elde

ettiğimiz veriler Keithley 2700 nano-voltmetre ve 5 mA doğru akım uygulayan Keithley 220 programlanabilir akım kaynağı yardımıyla 35 K-105 K sıcaklık aralığında ve helyum gazı bulunan çevrimli bir kriyojenik soğutma sisteminde özdirenç ölçümleri gerçekleştirildi. Elde edilen sıcaklık-özdirenç eğrileri sayesinde oda sıcaklığı özdirenci, artık özdirenç, artık özdirenç oranı, derece genişlemesi,  $\pm 0.01$  K sıcaklık hassasiyetinde offset ve onset kritik geçiş sıcaklık parametreleri belirlendi.



Şekil 3. 4. Kriyostat sistemi

### 3.2.2 X-Işınları Analizi

Hazırladığımız örneklerin kristal yapı analizleri oda sıcaklığında 36 kV ve 26 mA gücünde 1.54 Å dalgaboyuna sahip  $K\alpha$  ışınına sahip X-ışınları yayan Rigaku Multiflex +XRD 2 kW difraktometre ile gerçekleştirildi. Kırınım görüntüsündeki

kırınım tepeleri  $2^\circ/\text{dk}$  tarama hızında  $0.02^\circ$  aşama hızı ile  $3^\circ$  ve  $60^\circ$  arasındaki  $2\theta$  açılarında elde edildi. Örneklerin X-ışınları eğrilerinin tanımlanması işlemi, uluslararası kırınım verileri merkezi (JCPD-ICDD) veri tabanında bulunan 41-0317 ve 41-0374 numaralı JCPDS endeks kartlarına göre yapıldı. Bununla birlikte, X-ışınları eğrileri yardımıyla numunelerin faz oranları, ortalama kristal boyutları, hareketli hol taşıyıcı konsantrasyonları, Lotgering indisleri ve örgü hücre parametreleri belirlendi.



Şekil 3. 5. Rigaku X-ışını Kırınım Ölçeri

### 3.2.3 Vickers Sertlik Analizi

Al katkılı Bi-2223 süperiletken malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi oda sıcaklığında ve hava ortamında SHIMADZU HVM-2 model dijital mikrosertlik cihazı kullanılarak yapılan Vickers sertlik ölçümleri yardımıyla gerçekleştirildi. Sertlik ölçümleri yapılırken dikdörtgen çubuk şeklinde hazırladığımız numuneleri dijital test cihazına dikey olarak yerleştirildi. Bununla birlikte, girinti test yükleri 10 s yükleme zamanı için 0,245 N-2,940 N aralığında çubuklara uygulandı. Malzeme yüzeyindeki izlerin ortalama değerleri, yaklaşık  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  hassasiyetle malzeme yüzeyinde 8 farklı yerden yapılan ölçümlerden belirlendi. Hazırlanan tüm malzemeler için esneklik katsayısı, akma dayanımı, kırılma tokluğu, çekme dayanımı, esneklik katsayısı ve gevreklik indeksi gibi parametrelerin hesaplanması yapıldı.

Ayrıca, numunelerden elde edilen deneysel veriler sayesinde Meyer Yasası, orantılı numune direnci(PSR) modeli, elastik/plastik deformasyon(EPD) modeli ve Hays-Kendall(HK) yaklaşımı gibi dört farklı teorik yaklaşımla Vickers mikrosertlik deneysel sonuçları incelendi.

### **3.2.4 Taşıyıcı Kritik Akım Yoğunluğu Analizi**

Taşıyıcı kritik akım yoğunluğu ölçümleri dört nokta yöntemi kullanılarak sıfır manyetik alan altında ve 77 K sabit sıvı azot sıcaklığında el yapımı bir sistemle gerçekleştirildi. Öz alanlı kritik akım değerleri 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  standart kriter sayesinde belirlendi. Sıcaklık değişimini gözlemek için  $\pm 0.01$  K kesinlik ve hassasiyetle çalışan Lakeshore sıcaklık kontrol cihazı (Model:340) kullanıldı ve deneysel bulgular Labview yazılımı ile kayıt altına alındı.

### **3.2.5 Kütle Yoğunluğu Analizi**

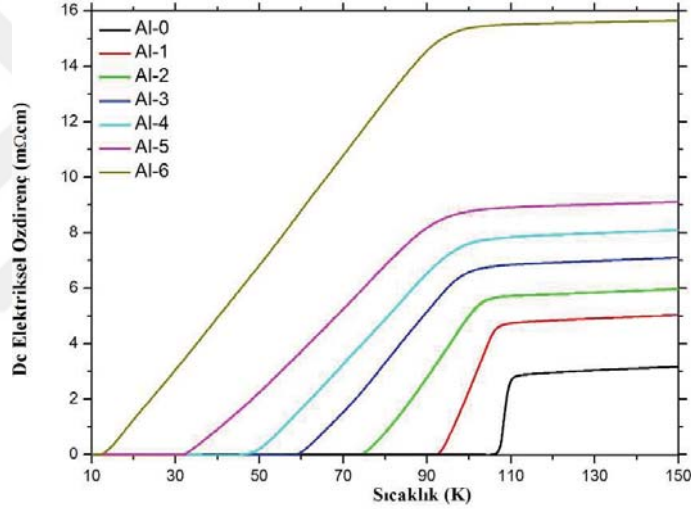
Üretilen inorganik seramiklerin kütle yoğunluk analizleri Arşimed su yer değiştirme yöntemine dayanan yoğunluk ölçüm kiti (Sartorius) ile deneysel olarak belirlendi. Literatürde tanecikli olma derecesi olarak bilinen gözeneklilik ve taneler arasındaki bağlantının gücü kütle yoğunluk analizi yardımıyla gerçekleştirildi.



## 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Elektriksel Özdirenç Ölçümleri

Süperiletken polikristal malzemelerin dc elektrik direncinin sıcaklığa bağlılığı, grafiksel olarak Şekil 4.1’de verilmiştir. Numunelerin öz direnç-sıcaklık eğrilerinin Al içeriği seviyesiyle değiştiği şekilden açıkça görülmektedir. Başlangıçtaki kritik geçiş sıcaklığının altında süperiletkenlik durumuna geçiş elde eden saf ve Al katkılı örnekler,  $T_c^{onset}$  sıcaklık değerlerinin üzerinde öz direncin pozitif sıcaklık katsayısına sahip olmasıyla metalik davranış sergilerler.



**Şekil 4. 1.** Hazırlanan süperiletken malzemelerin 10 K-150 K sıcaklık aralığındaki sıcaklığa bağlı öz direnç grafikleri

İncelenen numunelerin oda sıcaklığı direncine (300 K'de) gelince, direnç değerleri bozukluk ve lokalizasyon probleminin bir sonucu olarak Bi-2223 matrisindeki Al katkı maddelerinin varlığında sistematik olarak artmaktadır (Çizelge 4.1). Başka bir deyişle, Al parçacıkları Bi-2223 yapısına dahil edilirken, üç değerlikli durumdaki Al katkılamaları iki değerlikli durumdaki Cu ve Ca gibi elementlerin yerine geçmiş olabilir. Bu durum da, her katkılamadaki Al atomunun her dopinginin kristal yapıdaki bir deliği doldurması gerçeğine bağlanır. Böylelikle, Cu-O<sub>2</sub> düzlemindeki hol taşıyıcı konsantrasyonu azalmaya başlar ve sistemlerin oda sıcaklığına direnci monoton bir şekilde artar (Turkoz ve ark., 2013). Bu çalışmada, oda sıcaklığı

direncinin saf numune için yaklaşık 3.90 mΩcm olduğu gözlenirken, Al-6 numunesi için 16,29 mΩcm'nin direnci olduğu belirtilmiştir.  $\rho_{res}$ ,  $\rho_{110K}$  ve RRR parametreleri ile ilgili olarak, ilk parametre, herhangi bir sıcaklıktaki numunenin dirençliliğinin iki ana kısımdan oluştuğu Matthiessen kuralından belirlenebilir (Ekin, 2006). Bu parametre, doğrudan sıcaklık-bağımsız özdirence uygundur, ve bu özellik özdirenç-sıcaklık eğrilerinden ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilir. Dahası,  $\rho_{res}$  parametresi kristal yapı kalitesi ve bölgeler arası bölgeler arasındaki metalik bağlantılarla ilişkilidir (Li ve ark., 2010).

**Çizelge 4. 1.** Hazırlanan numunelerin özdirenç sıcaklık grafiğinden elde edilen verilerin sayısal değerleri

Örnekler	$\rho_{300K}$ (mΩcm)	$\rho_{res}$ (mΩcm)	RRR ( $\rho_{300K}/\rho_{110K}$ )	$\rho_{110K}$ (mΩcm)	$T_c^{offset}$ (K)	$T_c^{onset}$ (K)	$\Delta T_c$ (K)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	P (%)
Al-0	3,90	2,03	1,34	2,91	107,18	109,61	2,43	5,87	6,50
Al-1	5,99	3,99	1,25	4,79	93,14	106,62	13,48	5,71	9,36
Al-2	6,91	4,95	1,20	5,75	75,08	102,95	27,87	5,68	9,84
Al-3	7,92	6,25	1,15	6,89	59,89	98,75	38,86	5,57	11,58
Al-4	8,84	7,27	1,12	7,90	49,29	97,15	47,86	5,51	12,53
Al-5	9,80	8,34	1,09	8,97	32,66	93,40	60,74	5,46	13,33
Al-6	16,29	15,08	1,05	15,52	13,41	92,63	79,22	5,38	14,60

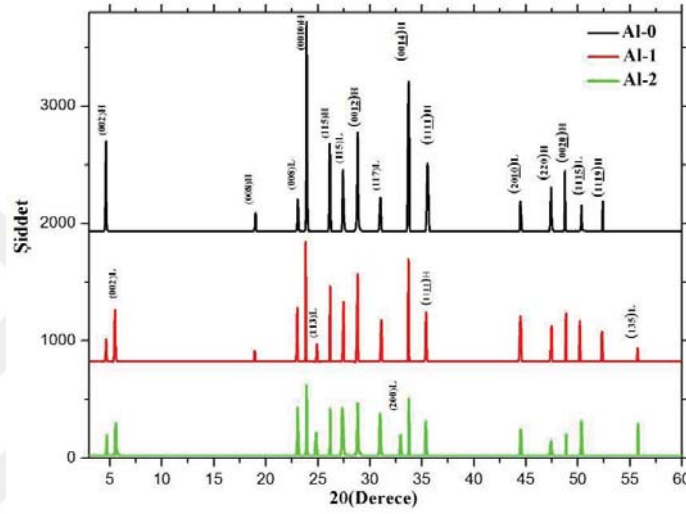
Bu deneysel çalışmada,  $\rho_{res}$  değerlerinin başlangıçta 2,03 mΩcm'den maksimum değer olan 15,08 mΩcm'ye hızlı bir şekilde yükseldiği ve Al konsantrasyon seviyesinin artmasıyla birlikte bu artışında daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 4.1). İkinci olarak  $\rho_{90K}$  parametresine gelince,  $\rho_{300K}$  ve  $\rho_{res}$  parametrelerindeki benzer azalma eğilimini (artan katkılama seviyesine bağlı olarak hızlı şekilde azalmayı) bu parametre değerinde de görmekteyiz. Buna göre, Al-0 malzemesi 2,91 mΩcm değerini gösterirken, Al-6 malzemesi ise 15,52 mΩcm değerini sunar (Çizelge 4.1). Son olarak, artık özdirenç oranı olarak bilinen RRR( $\rho_{300K}/\rho_{110K}$ ) parametresi, özdirenç-sıcaklık eğrilerinden elde edilen üçüncü karakteristik parametredir. Bu karakteristik özellik, örnek üretim kalitesi ile tutarlıdır, ve  $\rho_{300K}$  ve  $\rho_{110K}$  parametreleri arasındaki orandan elde edilen değerdir (Xu ve ark., 2009). Çizelge 4.1'den, saf bileşik için bu değer 1,34 ile minimum değerde olduğunu, en kötü bileşik olan Al-6 için ise bu değer azalarak 1,05'e kadar azaldığını görmekteyiz. Dolayısıyla, artan katkılama seviyesine bağlı olarak RRR parametresinin azalma eğiliminde olduğu ve artan katkılama

seviyesi ile de malzemenin kalitesinin kötüleştiği tespit edildi. Yani, Al-6 malzemesinin en düşük örnek kalitesini sergilediği gerçeğini ortaya koyar. Dolayısıyla, karakteristik elektriksel eğrilerin Al konsantrasyon seviyesine güçlü bir şekilde bağımlı olduğu belirlenmekle birlikte incelenen malzemeler arasında da Al-0(Al-6) seramik malzemesinin en iyi(en kötü) elektriksel özellikleri gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 4.1'den elde edilen diğer muhtemel sonuç başlangıçtaki kritik geçişin ( $T_c^{onset}$ ) ve offset kritik geçişin  $T_c^{offset}$  sıcaklıklarının Al katkılmasının artmasıyla değişmesidir. Burada,  $T_c^{onset}$  ve  $T_c^{offset}$  değerleri, izole edilmiş tanelerin süperiletken hale geçişine ve temel fazın veya tanelerarası bileşenin özelliklerinin hacim kesirine bağlıdır.  $T_c^{onset}$  ve  $T_c^{offset}$  değerlerinin Bi-2223 matrisindeki Al katkılmalarının bir fonksiyonu olarak değişimi Çizelge 4.1'de görülebilir. Hem hol konsantrasyonundaki azalmasından hem de süperiletken taneler arasındaki gözenekliliğin ve zayıf bağlantıların artmasından dolayı Bi-2223 sistemine Al parçacıklarının artışıyla  $T_c^{onset}$  değerleri ve  $T_c^{offset}$  değerleri önemli ölçüde azalır. Ayrıca, Bi-2223 levhaları arasındaki bozulma ve örgü titreşimindeki muhtemel değişiklikler de  $T_c^{onset}$  ve  $T_c^{offset}$  değerlerinin düşmesine yol açabilir. İncelenen örneklerle ait maksimum  $T_c^{onset}$  ve  $T_c^{offset}$  değerlerinin, saf örnek için sırasıyla yaklaşık 109,61 K ve 107,18 K olduğu bulunmuştur. Öte yandan, Al-6 örneği 92,63 K'daki en küçük  $T_c^{offset}$  ve 13,41 K'daki  $T_c^{onset}$ 'i elde etmiştir. Bu sonuçlara dayanarak,  $\Delta T_c(T_c^{onset} - T_c^{offset})$  değerlerinin değişmesi, Bi-2223 matrisindeki Eu içeriğinin arttırılması ile tutarlı şekilde artmaktadır.  $\Delta T_c$ 'nin (genişlemenin derecesi) saf numune için yaklaşık 2,43 K olduğu belirtilirken, 79,22 K'nin maksimum  $\Delta T_c$ 'si Al-6 örneğine aittir. Sonuçta, Al katkılmasının Bi-2223 faz oluşumunun hızı için elverişsiz olduğunu söylemek yanlış değildir.

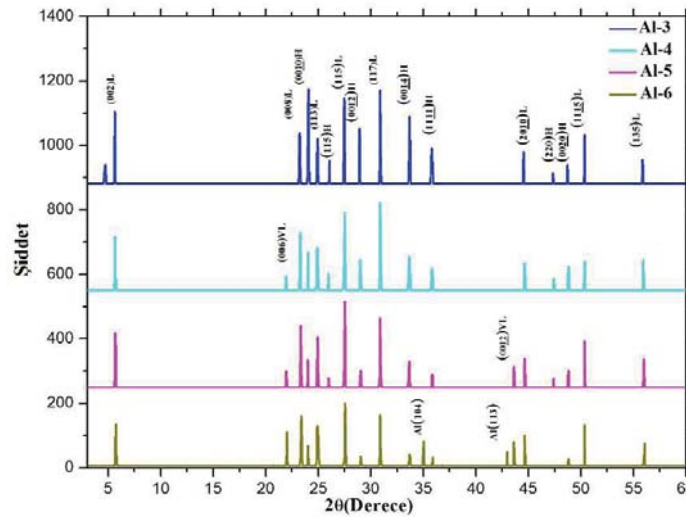
#### 4.2 X-Işınları Ölçümleri

Tezin bu bölümünde, çalışılan Bi-2223 süper iletken dökme malzemelerine ait kristal düzlem hizalama, tane büyüklüğü, faz analizi ve hücre parametreleri incelenen kırınım desenlerinden çıkarılmaktadır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te, Bi-2223, Bi-2212 ve Bi-2201 fazlarına karşılık gelen karakteristik tepeleri sırasıyla (hkl)H, (hkl)L ve (hkl)VL Miller indisleri ile gösterilir. Ayrıca, Bi-2212 fazının oluşum hızının süperiletken anayapıdaki Al konsantrasyon seviyesi attıkça arttığı şekilden açıkça

görülebilmektedir. Başka bir ifadeyle, Al parçacıkları Bi-2223 faz oluşumu için elverişsizdir. Ayrıca, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te, saf ve Al katkılı Bi-2223 malzemelerin kırınım çizgilerinin değişen yoğunluğu ile süperiletken fazları (Bi-2223, Bi-2212, Bi-2201) elde ettiğini göstermektedir. Bi-2223 fazına ait tüm karakteristik tepe yoğunlukları sistematik olarak azalırken, Bi-2212 fazının tepe yoğunlukları, Al katkılarıyla sürekli olarak artma eğilimindedir. Belirli bir katkılama seviyesinden sonra ise her iki faz yoğunlukları hızlı bir şekilde azalmaya başlar.



Şekil 4. 2. Al-0, Al-1 ve Al-2 malzemelerinin XRD desenleri



Şekil 4. 3. Al-3, Al-4, Al-5 ve Al-6 malzemelerinin XRD desenleri

Dahası, Al katkılaması ve diğer katyonlar dahil olmak üzere farklı bir fazın olmaması, Bi-2223 sisteminde Al'nin çözünürlük sınırının uyguladığımız molar

konsantrasyon seviyesine kadar olmadığını onaylar. Aslında, katkılanan bütün Al parçacıklarının Bi-2223 kristal yapısına tamamen girildiğini söylemek daha doğru olacaktır (Vinu ve ark., 2008; Shabna ve ark., 2009). Elde edilen verilere göre, Bi-2223 yüksek fazının önemli ölçüde azaldığı, düşük Bi-2212 fazının, Bi-2223 kristal yapısındaki Al safsızlıklarının artmasıyla giderek daha güçlü hale geldiği görülmektedir. Artan katkılama seviyesine bağlı olarak Bi-2223 fazının giderek bozulduğu bununla birlikte çok düşük Bi-2201 fazının ise Al-4, Al-5 ve Al-6 kodlu örneklerde bariz bir şekilde görülmektedir. Dahası, Al yabancı safsızlıklarının artışıyla birlikte (008)H ve (1119)H zirveleri ortadan kalkarken (006)VL ve (0012)VL zirveleri gözlemlenmiştir. Bu durumda, malzemenin yüksek fazlı yapıdan düşük fazlı yapıya doğru dönüştüğünün göstergesidir. Buna ilaveten,  $x=0,30$  olması durumunda ise  $2\theta=35,02^\circ$  ve  $2\theta=42,99^\circ$   $Al_2O_3$  bileşiğine ait yeni zirveler gözlemlendiği belirlenmiştir. (Şekil 4.3). Böylelikle, Al parçacıklarının Bi-2223 kristal sistemindeki çözünürlük sınırlarının yaklaşık olarak  $x = 0.10$  olduğu tespit edilmiştir. Üretilen malzemelerin faz yoğunluklarına bakacak olursak, Bi-2223 yüksek faz yoğunluğunun kristal yapıdaki Al katkılanmasının artmasıyla gözle görülür ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Bi-2212 düşük faz yoğunluğunun ise katkılama seviyesinin artmasına bağlı olarak artış göstermektedir. Üretilen örneklerin zirve yoğunluğundaki değişiklik, aşağıdaki denklemler yardımıyla hacim kesir değerlerini hesaplayabiliriz:

$$f(2223) = \frac{\sum I_{2223(hkl)}}{\sum I_{2223(hk)} + \sum I_{2212(hkl)} + \sum I_{2201(hkl)} + \sum I_{Al_2O_3(hk)}} \cdot x\%100$$

$$f(2212) = \frac{\sum I_{2212(hk)}}{\sum I_{2223(hkl)} + \sum I_{2212(hkl)} + \sum I_{2201(hkl)} + \sum I_{Al_2O_3(hkl)}} \cdot x\%100$$

$$f(2201) = \frac{\sum I_{2201(hkl)}}{\sum I_{2223(hkl)} + \sum I_{2212(hkl)} + \sum I_{2201(hkl)} + \sum I_{Al_2O_3(hkl)}} \cdot x\%100$$

$$f(Al_2O_3) = \frac{\sum I_{Al_2O_3(hkl)}}{\sum I_{2223(hkl)} + \sum I_{2212(hkl)} + \sum I_{2201(hkl)} + \sum I_{Al_2O_3(hkl)}} \cdot x\%100$$

Yukarıda verilen denklemlerdeki I değeri mevcut fazın tepe yoğunluğuyla ilgilidir. Yapılan hesaplamalar sayısal olarak Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bi-2223 yüksek fazının hacim kesir değeri %82,53'den %11,21'e düştüğü Çizelge 4.2'de açıkça görülmektedir. Diğer taraftan, Bi-2212 düşük fazına ait hacim kesir değeri ise artarak %73,47'ye

yükselmektedir. Dahası, örgü parametreleri, a ve c, yüksek sıcaklık süper iletken sistemindeki süperiletkenlik özelliklerinin değişimini araştırmak için önemlidir. Bu çalışmada, hücre parametreleri, tetragonal birim hücre yapısı için belirlenen d değerleri ve (hkl) düzlemleri vasıtasıyla en küçük kare yöntemiyle hesaplanmaktadır. Elde edilen a ve c hücre parametreleri Çizelge 4.2’de listelenmiştir. Çizelgeye dikkatlice bakıldığında, a eksen uzunluğu yavaş bir şekilde uzarken c ekseni uzunluğunun ise Al parçacıklarının katkılanmasının artmasıyla düzenli olarak küçüldüğü görülebilir. Bu, hücre parametresinin a içindeki Cu-O bağ uzunluğuyla düzenlendiği gerçeğine bağlanmaktadır. Cu-O<sub>2</sub> (düzlem içi) düzlemleri, sistemin taban düzlemlerindeki boyutlardan sorumludur. a örgü parametresindeki artış, etkin Cu değerindeki artışın sonucu olarak fazladan elektronlardan bağlanma karşılığı yörüngeye dönüşür (Sanderson ve Hewitt, 2005). c örgü parametresine gelince, oksijeni eksik olan Bi-O düzlemlerindeki pozitif yükün değişimi Bi - O çift katmanlarındaki oksijen yükleri ile dengelenir. Böylelikle, Cu-Ca-Cu ve Ca-Sr bölgelerinin ara tabaka mesafeleri sistematik olarak genişlerken, Sr- Bi, Bi-Bi ve Sr-Bi-Bi-Sr sahalarının uzaklığı katkılama miktarının artışına bağlı olarak yavaşça küçülür. Başka bir ifadeyle, Bi ve O yüzeyleri arasındaki itme Bi-O katmanlarındaki net pozitif yükteki azalmayla birlikte azalır. Bu durum, Bi-O çift katmanındaki Bi-O bağlarının kopmasının yanında c ekseni uzunluğunda küçülmeye yol açar (Nguyen-van-huong ve ark., 1997).

**Çizelge 4. 2.** Hazırlanan numunelerin X-ışınları, kritik akım yoğunluğu ve tane boyutu ölçüm sonuçlarının sayısal değerleri

Örnekler	a (Å)	c (Å)	Volume fraction (≈%)			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Average grain size (nm)	J <sub>c</sub> (A.cm <sup>-2</sup> )
			2212	2223	2201			
Al-0	5,398	37,268	17,47	82,53	0	0	43,91	81
Al-1	5,401	37,035	35,24	64,76	0	0	40,55	76
Al-2	5,404	36,975	48,84	51,16	0	0	40,79	64
Al-3	5,408	36,860	58,34	41,66	0	0	39,66	52
Al-4	5,409	36,424	68,24	29,43	2,33	0	38,02	41
Al-5	5,410	36,057	73,47	20,12	6,41	0	32,62	26
Al-6	5,412	35,179	69,30	11,21	11,71	7,78	28,48	17

Ayrıca, XRD tepe noktalarının genişlemesi özelliği kullanılarak, nanometre ölçeğinde bulunan kristalit büyüklüğü, aşağıdaki formül ile XRD modellerinden belirlenebilir (Yıldız ve ark., 2012);

$$t = 0.941\lambda / B \cos \theta_B$$

burada t, kristal kalınlığıdır; k, dalga boyunu gösterir, ve B mikronize edilmiş karşılık gelen tepe kullanılarak düzeltilen Bragg tepe noktasının maksimum yarısındaki (FWHM) tam genişliği belirtir ve  $\theta_B$ , Bragg açısıdır. Ayrıca,

$$B^2 = B_m^2 - B_s^2$$

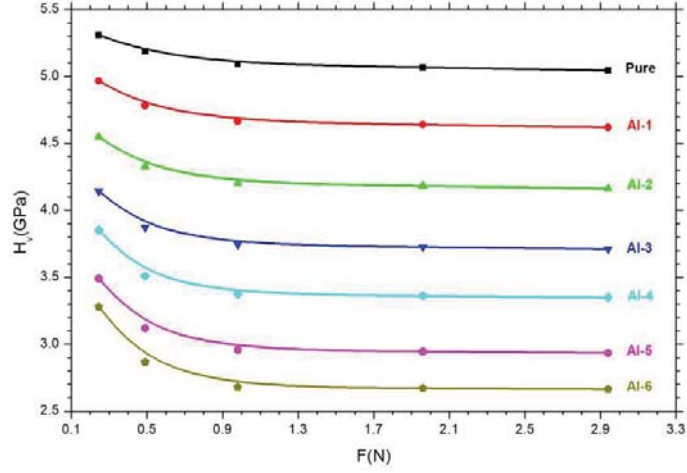
burada da  $B_s$ , standart malzemenin yarı genişliğini radyan cinsinden temsil eder. Üretilen tüm örneklerin XRD desenleri incelendiğinde, saf numunenin en dar FWHM değerini elde etmesi en büyük tane büyüklüğünü (43,91 nm) ve en iyi kristallite ve taneler arasındaki bağlantıyı kanıtlar. (Çizelge 4.2).

### 4.3 Vickers Mikrosertlik Ölçümleri

Vickers sertlik ( $H_v$ ) değerleri geleneksel Denklem kullanılarak hesaplanır.

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

Vickers mikrosertliğinin süperiletken malzemelerin yüzeylerinde (0,245 N-2,940 N aralığında) uygulanan yüke göre değişimi Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Bu sonuç, kristal yapı problemleri, gözeneklilik, boşluklar, çatlaklar, bozukluklar, örgü gerilimleri, bozukluklar, çarpıtmalar, çatlak üreten omnipresent kusurları, tane hizalama dağılımları ve Bi-2223 sisteminin bitişik katmanlarında bağlanma sorunları gibi yapısal deformasyonlardan kaynaklanabilir.



**Şekil 4. 4.** İncelediğimiz örneklerin Vickers Hv sertlik parametrelerine karşı uygulanan girinti test yükünün farklılaşması

Bu yapısal deformasyonların, Al katkılama seviyesinin artmasıyla sürekli arttığı gözlenmektedir. Bu nedenle, Bi-2223 kristal matrisinde Al ilavelerinin varlığı hem kritik stres değerinin hem de dayanıklı tetragonal fazın azalmasına yol açtığı söylenebilir. Aynı zamanda, Al parçacıkları, kristal sistemde çatlak üreten kusurlar olarak hareket eden gerilme yükselticileri ve çatlak başlatma bölgelerini kalıcı olarak sebep olur, böylelikle çatlak başlatan kusurların, boşlukların, çatlakların ve çıkıkların yayılması, kritik yayılma hızına ulaşmak için mümkün olduğu kadar hızlanır. Ayrıca, süperiletken malzemelerin endüstriyel uygulamalar için gerekli olan elastik modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ), elastik sertlik katsayısı ( $C_{11}$ ), parlaklık indeksi (B) ve süneklik (D) parametrelerinin özellikleri (Zhao ve ark., 2004; Birajdara ve ark., 2009; Zhao ve ark., 2009; Ozturk ve ark., 2012) aşağıda verilen deklemler yardımıyla bulunabilir:

$$E = 81.9635H_v$$

$$Y \approx \frac{H_v}{3}$$

$$K_{IC} = \sqrt{2E\alpha} \quad (\alpha, \text{ yüzey enerjisi})$$

$$B = \frac{H_v}{K_{IC}}$$

$$C_{11} = H_v^{7/4}$$



$$D = \frac{1}{B}$$

Hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelgedeki  $H_v$  değerlerine göre, Bi-2223 süper iletken sistemindeki Al safsızlık seviyesindeki artışın mikro sertlik değerlerine önemli ölçüde zarar verdiğini anlamak kolaydır. Örneğin, 0,245 N sabit girinti deney yükünde  $H_v$  parametreleri, 4,772 GPa'dan (saf için), genel minimum 3,725 GPa değerine (Al-6 için) düşmek üzere elde edilir. Uygulanan herhangi bir test yükünde, diğer  $H_v$  parametreleri için de benzer bulgular kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Al katkı maddesi seviyesinin artmasına bağlı olarak  $H_v$  değerlerinin hızlı bir şekilde azaltılması, yapısal deformasyonun Bi-2223 kristal yapısında indüklendiğine işaret eder. Çizelgeye göre, katkılama mekanizması ve uygulanan test yükleri, elde edilen kritik parametreleri kuvvetle etkiler. Yani, katkılama seviyesi yükseldikçe, her parametre sistematik olarak düşme eğilimindedir. Bu bakımdan, Bi-2223 süperiletken sistemine yerleştirilen Al katkılamasının yüke bağlı mekanik performanslar üzerindeki olumsuz etkisi açıktır. Young modülü (Y) değerleri, 0,245 N'lik sabit uygulamalı test yükünde 1,591 GPa (saf için) – 0,998 GPa (Al-6 için) aralığında bulunuyor. Benzer şekilde, 1,591 GPa'nın değeri, uygulanan girinti deney yükündeki 2,490 N değerine kadar olan artış ile 1,453 GPa değerine doğru düşer. 2,490 N yükündeki Al-6 bileşiğinin değeri gelince, elastik modül (E) 0,988 GPa değerine doğru azalır. Diğer parametreler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar, Al-6 bileşiğinin, malzemenin mukavemetinde, stabilitesinde, sertliğinde ve dayanıklılığındaki önemli düşüş nedeniyle, uygulanan yükle kırılması için en küçük enerji değerini gerektirdiğini göstermektedir. Dahası, mikrosertlik bulguları ile uygulanan test yükleri arasında nasıl bir ilişki olduğunu girdap test yükleri üzerindeki mikrosertlik değerlerindeki değişimin dördüncü dereceden formüllerden çıkarılan uydurma denklemlerinin üretilen malzemeler için en yüksek korelasyon değerinde  $R^2=1$  olduğu durumda inceliyoruz. Yapılan tüm hesaplamalar sayısal olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.4'ten elde edilen verilere göre,  $x^4$  parametresinin değişimi, Al katkılama miktarına kuvvetlice bağlı olduğu açıktır.  $x^4$  parametrelerinin sistematik olarak 0,0442'den 0,2952'ye kadar artış gösterdiği bulunmuştur. Bu durum, fazla katkı maddesinin daha fazla sayıda çatlak ve daha fazla sınırlandırılmamış yer değiştirme hareketi ile sonuçlanmasına ve bununla birlikte kritik stres, sertlik, mekanik dayanım, plastik deformasyona karşı direnç gibi temel özelliklere bağlanmaktadır. Ayrıca, artan Al miktarına bağlı olarak yeni geometrik olarak gerekli yer değiştirmeler ve yerinden çıkma çarpma bölgeleri

önemli ölçüde oluşmaya başlar. Ayrıca, Al-0 örneği için minimum 0,0442 değeri, uygulanan daha büyük mekanik yüklerin, kristal yapısında çatlak-başlatıcı kusurların, çatlakların ve çıkıkların başlatılması için gerekli olduğunu doğrular.

**Çizelge 4. 3.** Hazırlanan Al katkılı Bi-2223 süperiletken malzemeler için yüke bağlı elastik modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ), elastik sertlik katsayısı ( $C_{11}$ ), parlaklık indeksi (B) ve süneklik (D) parametrelerinin sayısal değerleri

Örnekler	F (N)	d( $\mu$ m)	$H_v$ (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	$K_{IC}$ (MPa $m^{1/2}$ )	$C_{11}$ (GPa) <sup>7/4</sup>	B (m <sup>-1/2</sup> )	D (x10 <sup>-3</sup> )(m <sup>1/2</sup> )
Al-0	0,245	292,552	5,308	435,096	1,769	6,870	18,565	772,747	1,294
	0,490	418,460	5,189	425,317	1,730	6,792	17,841	764,013	1,309
	0,980	597,319	5,093	417,481	1,698	6,729	17,269	756,943	1,321
	1,960	846,934	5,067	415,318	1,689	6,712	17,113	754,979	1,325
	2,940	1039,516	5,045	413,532	1,682	6,697	16,985	753,354	1,327
Al-1	0,245	302,472	4,966	407,023	1,655	7,492	16,520	662,837	1,509
	0,490	435,952	4,781	391,871	1,594	7,351	15,458	650,382	1,538
	0,980	624,179	4,665	382,324	1,555	7,261	14,805	642,412	1,557
	1,960	885,106	4,639	380,268	1,546	7,241	14,666	640,682	1,561
	2,940	1086,316	4,620	378,668	1,540	7,226	14,559	639,333	1,564
Al-2	0,245	316,111	4,547	372,659	1,516	7,590	14,157	599,006	1,669
	0,490	458,195	4,328	354,747	1,443	7,406	12,987	584,432	1,711
	0,980	657,599	4,202	344,451	1,401	7,297	12,335	575,888	1,736
	1,960	932,298	4,182	342,744	1,394	7,279	12,228	574,460	1,741
	2,940	1144,392	4,163	341,210	1,388	7,263	12,133	573,173	1,745
Al-3	0,245	331,104	4,144	339,673	1,381	7,679	12,037	539,710	1,853
	0,490	484,375	3,873	317,436	1,291	7,423	10,692	521,745	1,917
	0,980	696,803	3,743	306,782	1,248	7,297	10,072	512,914	1,950
	1,960	987,629	3,726	305,416	1,242	7,281	9,994	511,771	1,954
	2,940	1211,936	3,712	304,237	1,237	7,267	9,926	510,782	1,958
Al-4	0,245	343,387	3,853	315,807	1,284	7,966	10,596	483,655	2,068
	0,490	508,825	3,510	287,662	1,170	7,603	8,999	461,600	2,166
	0,980	733,832	3,375	276,603	1,125	7,456	8,403	452,640	2,209
	1,960	1040,004	3,360	275,429	1,120	7,440	8,340	451,679	2,214
	2,940	1276,071	3,348	274,424	1,116	7,426	8,287	450,854	2,218
Al-5	0,245	360,764	3,491	286,117	1,164	8,163	8,915	427,647	2,338
	0,490	539,656	3,120	255,733	1,040	7,717	7,325	404,303	2,473
	0,980	783,799	2,958	242,460	0,986	7,514	6,672	393,671	2,540
	1,960	1110,644	2,947	241,507	0,982	7,499	6,627	392,897	2,545
	2,940	1362,740	2,936	240,627	0,979	7,486	6,584	392,181	2,550
Al-6	0,245	372,194	3,280	268,814	1,093	8,419	7,993	389,568	2,567
	0,490	563,067	2,866	234,909	0,955	7,870	6,313	364,173	2,746
	0,980	823,191	2,682	219,811	0,894	7,613	5,620	352,275	2,839
	1,960	1166,395	2,672	218,972	0,891	7,598	5,583	351,602	2,844
	2,940	1430,159	2,666	218,475	0,889	7,590	5,561	351,203	2,847

**Çizelge 4. 4.** Saf ve Al katkılı Bi-2223 örnekler için mikrosertlik ölçüm sonucu ile uygulanan yük arasındaki ilişkiler

<i>Örnekler</i>	<i>Denklemler(R<sup>2</sup>=1)</i>
<i>Al-0</i>	$y = 0,0442 x^4 - 0,3273 x^3 + 0,8656 x^2 - 0,9954 x + 5,5050$
<i>Al-1</i>	$y = 0,0995 x^4 - 0,6917 x^3 + 1,6804 x^2 - 1,7210 x + 5,2965$
<i>Al-2</i>	$y = 0,1285 x^4 - 0,8831 x^3 + 2,1094 x^2 - 2,0997 x + 4,9470$
<i>Al-3</i>	$y = 0,1859 x^4 - 1,2528 x^3 + 2,9037 x^2 - 2,7561 x + 4,6629$
<i>Al-4</i>	$y = 0,2664 x^4 - 1,7691 x^3 + 4,0065 x^2 - 3,6618 x + 4,5347$
<i>Al-5</i>	$y = 0,2685 x^4 - 1,7985 x^3 + 4,1294 x^2 - 3,8518 x + 4,2121$
<i>Al-6</i>	$y = 0,2952 x^4 - 1,9812 x^3 + 4,5632 x^2 - 4,2750 x + 4,0812$

### 4.3.1 Gerçek Mikrosertlik Değerlerinin Teorik Modellerle İncelenmesi

Bu bölümde, saf ve Al katkılı süperiletken malzemelerin doygunluk-limit bölgesinde mikrosertlik ölçümleri yükten bağımsız olarak Meyer Kanunu (MK), Orantılı Numune Direnci (PSR) Modeli, Elastik/Plastik Deformasyon (EPD) Modeli ve Hays Kendall (HK) Modeli gibi 4 farklı teorik modeller ile incelendi.

#### 4.3.1.1. Meyer Kanununa (MK) Dayalı İnceleme

Meyer kanunu, bir malzemenin mekanik karakterlerini tanımlamak için güvenilir ve kullanışlı yöntemlerden biridir ve aşağıda verilen formül tanımlanmıştır:

$$F = A_{Meyer} d^n$$

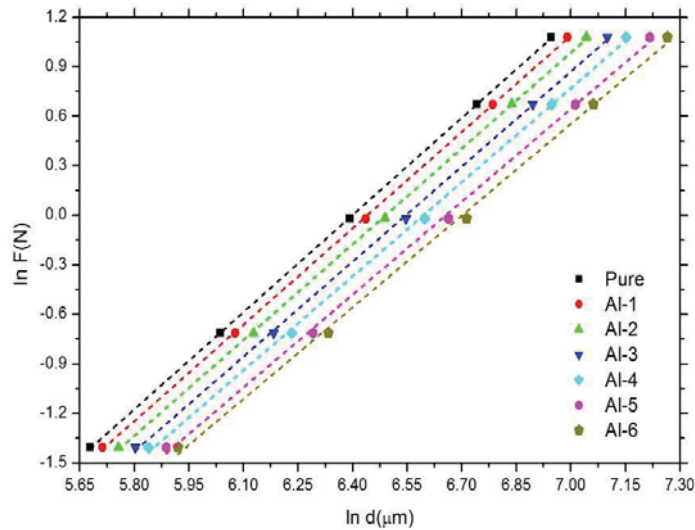
Burada n, Meyer sayısını,  $A_{Meyer}$  ise mikrosertlik değerini gösterir. n değeri, çalışılan materyalin Çentik Boyutu Etkisi(ISE) ve Ters Çentik Boyutu(RISE) davranışını belirlememize yardımcı olmaktadır. Buna göre materyalin n değeri,  $n > 2$  olduğu durumlarda malzeme ters çentik boyutu etkisi (RISE) davranışı gösterirken,  $n < 2$  olduğu durumda ise çentik boyutu etkisi (ISE) gösterir ve yüke bağlı olarak

mikrosertlik değeri azalır. Eğer Meyer sabiti  $n=2$  olursa malzemenin mikrosertlik değerleri yüke bağımlı olmaktan çıkar (Mohammed ve ark.,2009). Hazırladığımız örnekler için,  $\ln F$  ve  $\ln d$  (Şekil 4.5) eğrilerinde bulunan  $n$  ve  $A_{MEYER}$  değerleri Çizelge 4.5'te listelenmiştir.

**Çizelge 4. 5.** Saf ve Al katkılı Bi-2223 örnekler için mikrosertlik ölçüm sonucu ile uygulanan yük arasındaki ilişkiler

Örnekler	Meyer Yasası		PSR Model		EPD Model		HK Model	
	$A_{MEYER} \times 10^{-6}$ ( $N/\mu m^2$ )	$n$	$\alpha \times 10^{-5}$ ( $N/\mu m$ )	$\beta \times 10^{-6}$ ( $N/\mu m^2$ )	$d_e \times 10^{-1}$ ( $\mu m$ )	$A_{2EPD} \times 10^{-2}$ ( $N^{1/2}/\mu m$ )	$W \times 10^{-1}$ ( $N$ )	$A_{3HK} \times 10^{-6}$ ( $N/\mu m^2$ )
Al-0	3,560	1,961	5,423	2,667	0,163	0,163	0,145	2,709
Al-1	3,621	1,945	6,895	2,424	0,215	0,156	0,181	2,476
Al-2	3,531	1,934	7,730	2,172	0,253	0,147	0,207	2,229
Al-3	3,499	1,919	8,679	1,922	0,300	0,139	0,234	1,985
Al-4	3,637	1,899	10,048	1,717	0,363	0,131	0,273	1,787
Al-5	3,782	1,876	11,644	1,486	0,446	0,122	0,331	1,563
Al-6	4,082	1,852	13,183	1,331	0,526	0,116	0,381	1,415

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde,  $n$  değerlerinin 2'den küçük olduğu görülmektedir ve bu nedenle üretilen örnekler çentik boyutu etkisi(ISE) davranışını göstermektedir (Dogruer ve ark., 2013).



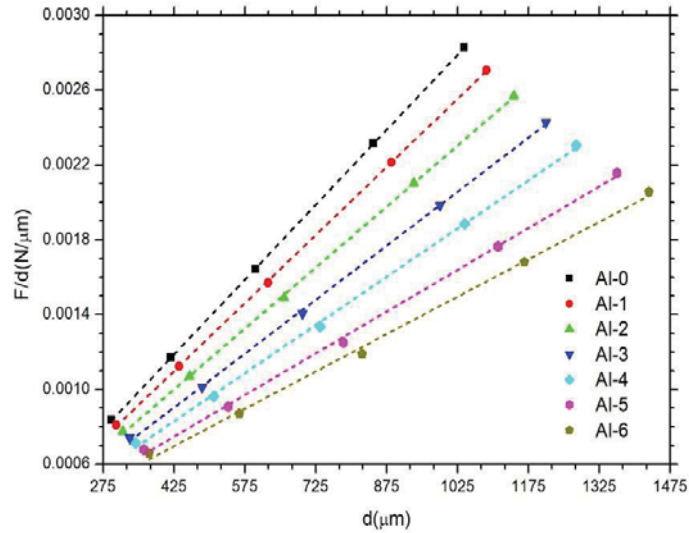
**Şekil 4. 5.** Örneklerin  $\ln F$  in  $\ln d$  ile değişim grafiği

#### 4.3.1.2. Orantılı Numune Direnci (PSR) Modeli

Orantılı Numune Direnci (PSR) Modeli 1993 yılında Li ve Bradt tarafından kullanılan malzemelerin yüke bağlı ve yükten bağımsız mikrosertlik özelliklerini incelenmiştir (Li ve Bradt, 1993). Bu model, malzemenin mekanik özellikleri ile yüzey enerjisi arasında ilişki kurar ve enerji değerini formüle eder. Bu ilişki iki kısımdan oluşur ve ilkinde yüzey enerji değeri ( $\alpha$ ), ikincisinde ise mikrosertlik ( $\beta$ ) değerleri hesaplanabilir (Michels ve Frischat, 1982; Fröhlich ve ark., 1977).  $\beta$  değeri malzemenin mekanik karakteristiğini göstermekle birlikte bu değer negatif veya pozitif olması önemlidir. Bu değer pozitif ise malzemenin tipik ISE davranışı sergilediğini açıklarken, negatif olması durumunda ise RISE davranışı gösterdiği söylenebilir. Dahası, aşağıdaki denklem sayesinde üretilen örneklerin yüzey enerjileri ve mikrosertlik değerleri hesaplanabilir:

$$F = \alpha d + \beta d^2$$

İncelenen tüm örneklerin yukarıdaki denkleme göre  $\alpha$  ve  $\beta$  değerlerinin hesaplanabilmesi için F/d-d grafiği çizilmiştir. (Şekil 4.6)



Şekil 4. 6. Örneklerin F/d-d değişim grafiği

Hesaplanan tüm değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir. Elde edilen veriler göre, katkılama miktarının artmasıyla  $\alpha$  değeri artmış  $\beta$  değeri ise azalmıştır. Bununla birlikte, üretilen

süperiletken malzemelerin de doyunluk limitindeki bölgede yüke bağlı olmadan mikrosertlik değerlerini aşağıdaki formül yardımıyla inceledik.

$$H_{PSR} = 1854,4 \beta$$

Ayrıca, elde edilen  $H_{PSR}$  değerleri Çizelge 4.6'da rapor edilmiştir.

**Çizelge 4. 6.** Üretilen örneklerin yükten bağımsız mikrosertlik değerleri

Örnekler	$H_{PSR}$ (GPa)	$H_{EPD}$ (GPa)	$H_{HK}$ (GPa)	$H_v$ (GPa)
<i>Al-0</i>	4,946	4,927	5,024	5,308-5,045
<i>Al-1</i>	4,495	4,513	4,591	4,966-4,620
<i>Al-2</i>	4,028	4,007	4,133	4,547-4,163
<i>Al-3</i>	3,564	3,583	3,681	4,144-3,712
<i>Al-4</i>	3,184	3,182	3,314	3,853-3,348
<i>Al-5</i>	2,756	2,760	2,898	3,491-2,936
<i>Al-6</i>	2,468	2,495	2,624	3,280-2,666

Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi, bu model sayesinde hesaplanan yükten bağımsız mikro sertlik değerlerinin yüke bağlı sertlik değerinden uzaktır. Dolayısıyla, bu modelin, ürettiğimiz örneklerin orijinal mikro sertlik değerinin belirlenmesinde yeterli olmadığını söylemek yanlış değildir.

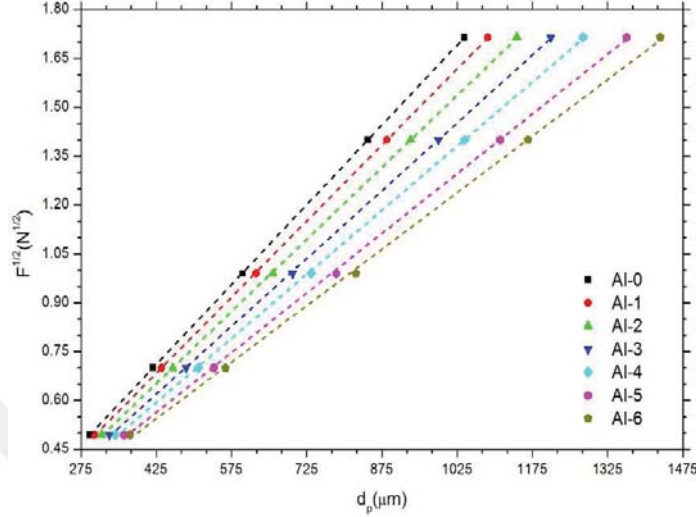
#### 4.3.1.3. Elastik/Plastik Deformasyon (EPD) Modeli

Bu model, bir malzemenin ISE ve RISE davranışını tartışmak için başka bir modeldir. Bu modelde, girinti boyutunun uygulanan yüke bağımlılığı formül ile hesaplanabilir (Ozkurt, 2014):

$$F = A_{2EPD}(d_e + d_p)^2$$

Burada,  $A_{2EPD}$ , elastik deformasyon ( $d_e$ ) ve plastik deformasyonla ( $d_p$ ) ilişkili olduğunda yükten bağımsız mikro sertlik sabitini belirtir. İncelediğimiz süperiletken

örneklerin  $d_e$  ve  $A_{2EPD}$  parametrelerini bulabilmek için  $F^{1/2}$ 'ye karşı  $d_p$ 'nin doğrusal grafikleri, Şekil 4.7'de görselleştirilmiştir.



Şekil 4. 7. Örneklerin  $F^{1/2}$ - $d$  değişim grafiği

$A_{2EPD}$  ve  $d_e$  değerleri Çizelge 4.5'te toplanmıştır. Dahası, yükten bağımsız mikro sertlik değeri şu denklem ile tanımlanabilir:

$$H_{EPD} = 1854,4 A_{2EPD}$$

Bu denklemden elde edilen veriler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Buna göre, bu modele göre hesaplanan yükten bağımsız mikrosertlik değerleri gerçek mikrosertlik değerlerinden oldukça uzaktır. Dolayısıyla, bu model gerçek mikrosertlik değerinin belirlenebilmesi için uygun bir model değildir.

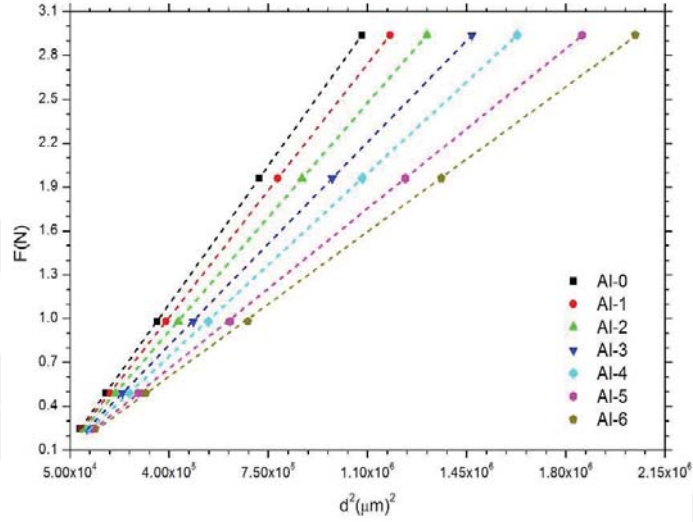
#### 4.3.1.4. Hays Kendall (HK) Modeli

Hays-Kendall (HK) modeline göre, plastik deformasyonun bir malzemedeki elastik deformasyona kıyasla daha baskın bir rol oynamaya başladığı minimum bir test yükü ( $W$ ) vardır (Tarkanian, 1973). Eğer, test yükü minimum değerinin altındaysa, elastik deformasyon sadece malzemede meydana gelir (Hays ve Kendall, 1973). Böylece,

uygulanan yük (F) yerine etkili bir yük  $F_{\text{eff}} = F - W$  ile orantılı olarak ölçülen girinti büyüklüğü aşağıdaki denklemde bulunabilir:

$$F - W = A_{3HK} d^2$$

Burada,  $A_{3HK}$  sertlik sabitini belirtir.  $A_{3HK}$  ve  $W$  parametreleri, Şekil 4.8’de gösterildiği gibi F-d<sup>2</sup> doğrusal grafiğinden elde edilir.



Şekil 4.8. Örneklerin F-d<sup>2</sup> değişim grafiği

Grafikten elde edilen değerler Çizelge 4.5’te verilmiştir. Elde edilen  $W$  değerlerine bakıldığında, Al-0 (0,0145 N) kodlu örnek en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülürken, bu oran arttıkça malzemenin mekanik dayanımı, kritik gerilme değeri, sertliği ve uygulanan kuvvete karşı gösterdiği dirence kötü etkilemiştir. Ayrıca, bu modelde de tüm örneklerin mikrosertlik değerleri doyunluk limit bölgesinde yüke bağlı olmadan aşağıdaki denklem ile incelenmiştir:

$$H_{HK} = 1854,4 A_{3HK}$$

Yukarıdaki denklem yardımıyla elde edilen  $H_{HK}$  değerleri Çizelge 4.6’da verilmektedir. Bu değerlere bakacak olursak diğer modellere kıyasla doyunluk limit bölgesinde yüke bağlı olmayan mikrosertlik değerlerinin gerçek değerlere yakın olarak hesaplandığı ortaya çıkmıştır. Buna bağlı olarak, HK modelinin saf ve Al katkılı Bi-2223 süperiletkenlerinin mekanik karakteristiklerini ve mikrosertlik özelliklerini belirlemede başarılı olduğunu söyleyebiliriz.



#### 4.4 Taşıyıcı Kritik Akım Yoğunluğu Ölçümleri

Taşınım ve manyetik kritik akım yoğunluğu ölçümleri, bir süperiletken malzemenin sıkıştırma mekanizmasını incelemek ve kristal yapıdaki süperiletken taneler arasındaki bağlantı kalitesini belirlemek için iki ana yöntemdir (Yıldırım ve ark., 2012). İlki, numunenin tamamı boyunca akıyla ilgilidir, ikincisi ise hem düşük hem de yüksek uygulamalı alanlarda gerçek yoğunluktan çok farklı olan yoğunluk değerini ölçer (Horvat ve ark., 2004). Bu nedenle, bu çalışmada, Al parçacıklarının kritik akım yoğunluğu üzerindeki rolü, taşınım kritik akım yoğunluğu ölçümleri vasıtasıyla incelenmekte ve tüm bulgular sayısal olarak Çizelge 4.2'de detaylı olarak gösterilmektedir. Çizelgeye göre, oldukça belirgin bir gerçek, belirlenen  $J_c$  değerlerinin Bi-2223 matrisindeki Al süslemelerine sağlam bir şekilde bağlı olduğudur. Saf numune için  $81 \text{ A/cm}^2$  en yüksek  $J_c$  değeri gözlenirken, Al-6 numunesi  $77 \text{ K}$  sabit sıcaklıkta  $17 \text{ A/cm}^2$  minimum  $J_c$  değerini gösterir. Al'nin dahil olduğu taşınım kritik akım yoğunluğu değerindeki bu azalma, tane sınırındaki zayıf bağlantılar, gözeneklilik ve tane sınır öz direncindeki artışın bir sonucu olarak, Bi-2223 süperiletkenlerinde akı sabitleme merkezlerinin bozulmasına karşılık gelir (Dogruer ve ark., 2013).

#### 4.5 Kütle Yoğunluğu Ölçümleri

Hem saf ve Al katkılı süperiletken malzemelerin gözeneklilik analizi hem de yapıdaki tane sınırlarının taşınım özellikleri için Archimedes su yer değiştirme metodu temelinde yoğunluk ölçümlerini gerçekleştirdik. Malzemelerin nispi yoğunluklarını, yaklaşık  $6,302 \text{ g/cm}^3$  olarak kabul edilen saf BSCCO sisteminin yoğunluğunun yardımıyla belirleyebiliriz (Yang ve Chaki, 1993; Kocabas ve Ciftcioglu, 2000). Elde edilen nispi yoğunluklar Çizelge 4.1'de gösterilmektedir. Çizelgeden görülebilir ki, Al katkılmasının artmasıyla birlikte kütle yoğunluğu değerleri  $5,87 \text{ g/cm}^3$  değerinden  $5,38 \text{ g/cm}^3$ 'e düşer. Maksimum yoğunluk değeri saf örneğine aitse de, en küçük değer Al-6 örneğine aittir. Kütle yoğunluğu değerindeki bu azalma, kritik akım yoğunluğu ölçümleri ile de desteklenen süperiletken taneler arasındaki bağlantının bozulması ile ilişkilidir (Yucel ve ark., 2011). Dahası, hesaplanan göreceli yoğunluk değerleri Bi-2223 sistemindeki taneciklik (gözeneklilik) derecesindeki değişimi belirlememize

yardımcı olur, ve böylelikle süperiletken taneler arasındaki bağlantının gücü hakkında bilgi sahibi olabiliriz. Ayrıca, malzemelerin gözeneklilik değerleri için, literatürde daha önce tanımlanan iki yöntem kullanıyoruz (Poole ve ark., 1995; Reddy ve ark., 1996). Hesaplanan gözenekler Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Gözeneklilik değerlerinde, Al konsantrasyon seviyesinin artması ile sistematik bir artış olduğunu ve bunun ötesinde%14,60 değerine doğru daha keskin bir artış olduğunu çizelgeden açıkça görülmektedir (Çizelge 4.1). Bu sonuçların ışığı altında, Bi-2223 matrisindeki Al katkılamalarının varlığı süperiletken taneler arasındaki etkileşimi bozduğu söylenebilir.



## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, X-ışını kırınımı, dc direnç, taşıma kritik akım yoğunluğu, kütle yoğunluğu, gözeneklilik ölçümleri, mekanik ölçümler gibi standart ölçüm teknikleri sayesinde Bi-2223 süperiletken matrisine katılan Al parçacıklarının elektriksel, yapısal, mekanik ve süperiletken özellikler üzerindeki rolünü belirlemeyi amaçladık. X-ışını kırınım ölçümleri, kristal düzlemi hizalamasını, kristal yapısını, kristal büyüklüğünü, faz saflığını ve kafes sabit parametrelerini incelememize olanak sağlar. XRD bulgularına gelince, Al içerik seviyesinin artmasına bağlı olarak kırınım çizgi yoğunluğundaki ve c hücre parametresindeki azalma Al safsızlıklarının Bi-2223 fazının oluşum hızını azaltarak Bi-2223 kristal yapısına dahil olduğunu gösterir. Başka bir deyişle, Al parçacıkları Bi-2223 faz oluşumu için elverişsizdir. XRD eğrilerinden elde edilen tane büyüklüğü ölçümleri sayesinde tane boyutlarındaki küçülmeler belirlenmiş ve böylelikle Bi-2223 sistemine katılan Al nanoparçacıklarının artmasıyla örneklerin kademeli olarak kötüleştiği görülmüştür. Ayrıca, dc direnç incelemeleri oda sıcaklığı direncini, kritik geçiş sıcaklığını, geçiş sıcaklığının değişimi ile ilgili konularda bilgi sahibi olmamızı sağlar. Dahası, Al konsantrasyon seviyesi arttıkça, numunelerin oda sıcaklığı öz direnci ve atık direnç gibi parametreler numunelerdeki yapısal bozukluklardan ve lokalizasyon probleminden dolayı yavaş bir şekilde artar. Buna ilaveten, örneklere ait  $T_c^{onset}$  ve  $T_c^{offset}$  değerlerinin her ikisi de süperiletken taneler arasındaki gözeneklilik ve zayıf bağlantıların artması nedeniyle önemli ölçüde azalır. Bu durum da, genişleme derecesinin ( $\Delta T_c$ ) katkılama seviyesi ile arttığı da söylenebilir. Yani saf numunede, 109,61 K maksimum  $T_c^{onset}$  ve 107,8 K  $T_c^{offset}$  değerlerine sahipken ( $\Delta T_c=2,43$  K), Al-6 numunesi için  $\Delta T_c$  değerinin yaklaşık 79,22 K olduğu belirtilmiştir.  $\Delta T_c$ 'deki bu hızlı artış, Bi-2223 plakaları arasındaki bozulmadan ve özellikle de sistemdeki gözenekliliklerden ve tane sınırları zayıf bağlantılardan kaynaklanmaktadır. Saf ve Al ile katılan tüm örnekler,  $T_c^{onset}$  değerlerinin üzerindeki sıcaklıklarda metalik davranışı sunar. Dc öz direnç incelemelerine benzer şekilde, tane sınırı zayıf bağlantıların, gözenekliliğin ve tane sınırı öz direncin artmasının bir sonucu olarak örneklerin akı sabitleme merkezleri azalmaktadır. Bundan dolayı, taşıma kritik akım yoğunluğu değerleri, Al katkılama seviyesine bağlı olarak önemli ölçüde azalma göstermektedir. Yoğunluk ve gözeneklilik analizlerine gelince, kütle yoğunluğu değerlerinin Al katkılama seviyesinin artmasıyla sistematik olarak azalması süperiletken taneler arasındaki

bağlantının azalmasının sonucudur. Öte yandan, diğerleri, tane sınırındaki zayıf bağlar, numune çatlama/gözeneklilik, düzensizlik, safsızlık fazları ve düzensiz tane yönelimi dağılımındaki artıştan dolayı ISE davranışını sunmaktadır. Ayrıca, mikrosertlik ölçümlerinin deneysel sonuçları, Meyer yasası, PSR, EPD ve HK yaklaşımları gibi farklı standart yöntemlerle incelenmiştir. Elde edilen deneysel verilere göre, bu çalışmada incelenen saf ve Al katkılı Bi-2223 süperiletken polikristal örnekler ISE davranışı göstermektedir. Dahası, PSR ve EPD modelleri hazırladığımız örneklerin mekanik özelliklerini açıklayamazken HK modeli orijinal mikrosertlik değerlerini açıklamada en iyi olduğu tespit edilmiştir. Yani, HK modeli tüm örneklerin mekanik özelliklerini tanımlamak için en iyi örnektir. Özetlemek gerekirse, hazırladığımız tüm örneklerin yapısal, elektriksel, mekanik ve süperiletkenlik özellikleri Al katkılama seviyesine bağlı olarak giderek bozulmaktadır. Dolayısıyla, Bi-2223 süperiletken sistemine Al katkılmasının temel özelliklere önemli ölçüde zarar verdiği sonucuna varılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Bardeen J, Cooper LN, Schrieffer JR (1957), Physical Review, 108: 1175.
- Bednorz GJ and Müller KA (1986) "Possible High  $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", Zeitschrift für Physik B-Condensed Matter, 64: 189-193.
- Bednorz GJ and Müller KA (1988) "Perovskite-Type Oxides-The New Approach to High- $T_c$  Superconductivity", Review Modern Physics, 60: 585-600.
- Birajdar B, Eibl O (2009) "Microstructure-Critical Current Density Model for  $MgB_2$  Wires and Tapes", Journal of Applied Physics, 105: 033903.
- Cava RJ, Batlogg B, Van Dover RB, Murphy DW, Sunshine S, Siegrist T, Remeika JP, Rietman EA, Zahwra S, Espinosa GI (1987) "Bulk Superconductivity at 91-K in Single-Phase Oxygen-Deficient Perovskite  $Ba_2YCu_3O_{9-\delta}$ ", Physical Review Letters, 58: 1676-1679.
- Cava RJ, Van Dover RB, Batlogg B, Rietmann EA (1987) "Bulk Superconductivity at 36 K in  $La_{1.8}Sr_{0.2}CuO_4$ ", Physical Review Letters, 58: 408-410.
- Cevizci E (2013) Ag Katkılı Bi-2223 Süperiletken Seramiklerin Mekanik Özelliklerinin Saptanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Chu CW, Gao L, Chen F, Huang ZJ, Meng RL, Xue YY (1993) "Superconductivity Above 150 K in  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$  at High Pressures", Nature, 365: 323-325.
- Chu CW, Hor PH, Meng RL, Gao L, Huang ZJ, Wang YQ (1987) "Evidence for Superconductivity above 40 K in the La-Ba-Cu-O Compound System", Physical Review Letters, 58: 405-407.
- Dogruer M, Yildirim G, Ozturk O, Belenli I, Terzioglu C (2013) "Variation of Mechanical Properties of Cr Doped Bi-2212 Superconductors", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 26: 2949.
- Dogruer, M, Zalaoglu Y, Yildirim G, Varilci A, Terzioglu C (2013) "Effect of Diffusion-Annealing Time ( $0.5 \leq t \leq 2$  h) on the Mechanical and Superconducting Properties of Cu-Diffused Bulk  $MgB_2$  Superconductors by Use of Experimental and Different Theoretical Models", Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 24: 2019-2026,
- Ekin J (2006) Experimental Techniques for Low-temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-current Testing, Oxford University Press, New York.
- Fröhlich F, Grau P, Grellmann W, (1977) "Performance and Analysis of Recording Microhardness tests", Physica Status Solidi (a), 42: 79.

- Gao L, Huang ZJ, Meng RL, Lin JG, Chen F, Beauvais L, Shen YY, Xue YY, Chu CW (1993) "Study of Superconductivity in the Hg-Ba-Ca-Cu-O System", *Physica C*, 213: 261-265.
- Gao L, Xue YY, Chen F, Xiong Q, Meng RL, Ramirez D, Chu CW (1994) "Superconductivity up to 164-K in  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{M-1}\text{Cu}_M\text{O}_{2M+2+\delta}$  ( $M=1,2$  and 3) Under Quasi-Hydrostatic Pressures", *Physical Review B*, 50: 4260-4263.
- Gorter CJ (1957) *Prog. in Low Temp. Phys.* 2, North Holland, Amsterdam.
- Hays C and Kendall EG (1973) "An Analysis of Knoop microhardness", *Metallography*, 6: 275-366.
- Horvat J, Soltanian S, Wang XL, Dou SX (2004) "Effect of Sample Size on Magnetic  $J(c)$  for  $\text{MgB}_2$  Superconductor", *Applied Physics Letters*, 84: 3109-3111.
- J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, *Phys.Rev.* 108, 117 (1957).
- Jackson JD (1962) *Classical Electrodynamics*, Wiley, New York.
- Kocabas K, Ciftcioglu M (2000) "The Effect of Sb Substitution of Cu in  $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Sb}_x\text{O}_y$  Superconductors", *Physica Status Solidi A-Applied Research*, 177: 539-545.
- Le Page Y, Mckinnon WR, Tarascon JM, Greene LH, Hull G, Hwang DM (1987) "Room-Temperature Structure of the 90-K Bulk Superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8-x}$ ", *Physical Review B*, 35: 7245-7248.
- Li H, Bradt R C (1993) "The Microhardness Indentation Load/Size Effect in Rutile and Cassiterite Single Crystals", *Journal of Material Science*, 28: 917-926.
- Li M, Zhang Y, Li Y, Qi Y (2010) "Granular Superconductivity in Polycrystalline  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  by Homovalent La Substitution on Bi Sites", *Journal of Non-Crystal Solids*, 356: 2831-2835.
- Maeda H, Tanaka Y, Fukutomi M, Asano T (1988) "A New High- $T_c$  Oxide Superconductor Without a Rare-Earth Element", *Japanese Journal of Applied Physics*, 27: L209-L210.
- Michels B D, Frischat G H (1982) "Microhardness of Chalcogenide Glasses of the System Se-Ge-As" *Journal of Material Science*, 17: 329-334.
- Mohammed NH, Abou-Aly AI, Ibrahim IH, Awad R, Rekaby M (2009) "Mechanical Properties of  $(\text{Cu}_{0.5}\text{Tl}_{0.5})_{1-223}$  Added by Nano-SnO<sub>2</sub>", *Journal of Alloys and Compounds*, 486: 733-737.
- Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, Zenitani Y, Akimitsu J (2001) "Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride", *Nature*, 410: 63-64.

- NguyenVanHuong C, Hinnen C, Siffre JM (1997) “Superconductivity and X-ray Photoelectron Spectroscopy Studies of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, *Journal of Materials Science*, 32: 1725–1731.
- Onnes HK (1997) “Further Experiments With Liquid Helium. C. On the Change of Electric Resistance of Pure Metals at Very Low Temperatures etc. IV. The Resistance of Pure Mercury at Helium Temperatures, *Proceedings Of The Koninklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen*, 120b, 122b, 124c.
- Ozkurt B (2014) “The Influence of Na Addition on the Mechanical Properties of Bi-2212 Superconductors”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 27: 2407–2414.
- Ozturk O, Erdem M, Asikuzun E, Yildiz O, Yildirim G, Varilci A, Terzioglu C (2013) “Investigation of Indentation Size Effect (ISE) and Micro-Mechanical Properties of Lu Added  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  Ceramic Superconductors”, *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 24: 230-238.
- Poole CJ, Farach HA, Creswick R (1995) *Superconductivity*, Academic Press, San Diego.
- Reddy RR, Murakami M, Tanaka S, Reddy PV (1996) “Elastic Behavior of a Y-Ba-Cu-O Sample Prepared by the MPMG Method”, *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, 257: 137-142.
- Sanderson RJ, Hewitt KC (2005) “Stoichiometry Control of Magnetron Sputtered  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_y$  ( $0 \leq x \leq 0.5$ ) Thin Film, Composition Spread Libraries: Substrate Bias and Gas Density Factors”, *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, 425: 52-61.
- Schilling A, Cantoni M, Guo JD, Ott HR (1993) “Superconductivity Above 130-K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O System”, *Nature*, 363: 56-58.
- Shabna R, Sarun PM, Vinu S, Biju A, Syamaprasad U (2009) “Doping Controlled Metal to Insulator Transition in the (Bi,Pb)-2212 System”, *Superconductor Science & Technology*, 22: 045016–045022.
- Sheng ZZ and Hermann AM (1988) “Bulk Superconductivity at 120-K in the Tl-Ca-Ba-Cu-O System”, *Nature*, 332: 138-139.
- Sheng ZZ, Kiehl W, Bennet J, El Ali A, Marsh D, Mooney GD, Arammash F, Smith J, Viar D, Hermann AM (1988) “New 120 K Tl-Ba-Ca-Cu-O Superconductor”, *Applied Physics Letters*, 52: 1738-1745.
- Tarkanian M L, Neumann J P, Raymond L (1973) “The Science of Hardness Testing and Its Research Application”, *American Society for Metals*, 620: 126
- Turkoz MB, Nezir S, Terzioglu C, Varilci A, Yildirim G (2013) “Investigation of Lu effect on  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Superconducting Compounds”, *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 24: 896–905.

- Vinu S, Sarun PM, Shabna R, Biju A, Syamaprasad U (2008) “Improved Microstructure and Flux Pinning Properties of Gd-Substituted (Bi,Pb)-2212 Superconductor interred between 846 and 860 C”, *Material Letters*, 62: 4421-4424.
- Wu MK, Ashurn JR, Torng CJ, Hor PH, Meng RL, Gac L, Huang ZJ, Wang YQ, Chu CW (1987) “Superconductivity at 93-K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure”, *Physical Review Letters*, 58: 908-910.
- Xu X, Kim JH, Dou SX, Choi S, Lee JH, Park HW, Rindfleish M, Tomsic M (2009) “A Correlation Between Transport Current Density and Grain Connectivity in MgB<sub>2</sub>/Fe Wire Made from Ball-Milled Boron”, *Japanese Applied Physics*, 105: 103913.
- Yang XM, Chaki TK (1993) “Hot-Rolling of Bi<sub>1.6</sub>Pb<sub>0.4</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> Superconducting Pellets”, *Superconductor Science & Technology*, 6: 343-348.
- Yildirim G, Bal S, Yucel E, Dogruer M, Akdogan M, Varilci A, Terzioglu C (2012) “Effect of Mn Addition on Structural and Superconducting Properties of (Bi,Pb)-2223 Superconducting ceramics”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 25: 381-390
- Yildiz A, Kocabas K, Akyuz GB (2012) “Dependence of the Structural, Electrical and Magnetic Properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> Bulk Superconductor on the Ag Doping”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 25: 1459-1467.
- Yucel E, Terzioglu C, Varilci A, Gencer A, Belenli I (2011) “Fabrication and Superconducting Properties of Ex-Situ Processed MgB<sub>2</sub>/Fe Monofilament Tapes without any Intermediate Annealing”, *Chinese Journal of Physics*, 49: 809-821.
- Zhao Y, Ionescu M, Horvat J, Dou SX (2004) “Comparative Study of in situ and ex situ MgB<sub>2</sub> Films Prepared by Pulsed Laser Deposition”, *Superconductor Science & Technology*, 17: S482–S485.



## 7. ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Anıl Körpe

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Ankara/25.02.1991

**Lisans Üniversite** : Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

**Y. Lisans Üniversite (varsa):**

**Elektronik posta** : anil\_557@hotmail.com

**İletişim Adresi** : Eryaman Yavuz Selim mah. 10. Cad.  
Ayatakent Sitesi D:16, Etimesgut/ANKARA

**Yayın Listesi** :

**Ödüller** :