

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



BSCCO SÜPERİLETKENLERE NİKEL OKSİT
KATKISININ YAPISAL, MEKANİK VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE KARA

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Rıfki TERZİOĞLU

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Uğur DOĞAN

BOLU, AĞUSTOS - 2022

KABUL VE ONAY SAYFASI

Emre KARA tarafından hazırlanan “**BSCCO SÜPERİLETKENLERE NİKEL OKSİT KATKISININ YAPISAL, MEKANİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği kabul edilmiştir. 5/08/2022

Jüri Üyeleri

İmza

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

.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Şenol Kaya
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, Lisansüstü Eğitim 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 19/08/2022 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 26 olarak tespit edilmiştir.

.....

EMRE KARA

ÖZET

BSCCO SÜPERİLETKENLERE NİKEL OKSİT KATKISININ YAPISAL, MEKANİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE KARA

**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. RIFKI TERZİOĞLU)
(İKİNCİ DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ MUHSİN UĞUR DOĞAN)
BOLU, TEMMUZ - 2022
(XIV + 69)**

Bu tez çalışmasında, Bi tabanlı süperiletken seramiklerin temel özellikleri üzerine nikel oksit (NiO) katkısının etkileri araştırılarak, süperiletkenlik ve elektriksel performansının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda NiO metalik bileşeni Bi-2223 seramiklerinin üzerine katı hal reaksiyon yöntemi ile 0.0-1.2 molar oranları arasında NiO eklemesi yapılmıştır. NiO katkısı yapılan Bi-2223 seramik örneklerin yapısal, mekanik, elektriksel, manyetik ve süperiletken özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak yorumlanarak çalışma sonlandırılmıştır. Süperiletken örnekler X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektriksel öz direnç (R-T), manyetizasyon (M-H) ve dinamik Vickers mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilerek analiz edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Bi-2223 Seramik, NiO katkılama, Öz direnç, XRD, Dinamik Mikrosertlik

ABSTRACT

THE EFFECTS OF NICKEL OXIDE DOPED BSICO SUPERCONDUCTORS ON STRUCTURAL, MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES

MSC THESIS

EMRE KARA

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

ELECTRIC ELECTRONIC ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. RIFKI TERZIOGLU)

(CO-SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. MUHSIN UGUR DOGAN)

BOLU, JULY 2022

(XIV + 69)

In this thesis, it is aimed to improve superconductivity and electrical performance by investigating the effects of nickel oxide (NiO) additives on the basic properties of Bi-based superconducting ceramics. In line with this target, NiO additions between 0.0-1.2 molar ratios were made on the NiO metallic component Bi-2223 ceramics with the solid-state reaction method. The study was concluded by systematically interpreting the effects on the structural, mechanical, electrical, magnetic and superconducting properties of NiO-doped Bi-2223 ceramic samples. Superconducting samples were analyzed by performing X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), electrical resistivity (R-T), magnetization (M-H) and dynamic Vickers microhardness measurements.

KEYWORDS: Bi-2223 Ceramic, NiO Doped, Resistivity, XRD, Dynamic Microhardness

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	x
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜPERİLETKENLİK VE GENEL ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1 Kritik Sıcaklık (T_c).....	6
2.2 Kritik Manyetik Alan Kuvveti (H_c)	8
2.3 Kritik Akım Yoğunluğu (J_c)	9
2.4 Meissner Etkisi	9
2.5 I. ve II. Tip Süperiletkenler.....	10
2.6 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri	12
2.6.1 Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) sistemi	13
2.6.2 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ (Bi-2201) Sisteminin Kristal Yapısı	13
2.6.3 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) Sisteminin Kristal Yapısı	14
2.6.4 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223) Sisteminin Kristal Yapısı.....	15
2.7 Süperiletkenlerin Uygulama Alanları	16
2.7.1 SMES (Süperiletken Manyetik Enerji Depolama)	16
2.7.2 SFCL (Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcı)	17
2.7.3 Süperiletken Motor ve Jeneratörler	18
2.7.4 Süperiletken Transformatörler.....	19
2.7.5 Süperiletken Güç İletim Kabloları.....	19
2.7.6 Teknolojideki Diğer Uygulamalar.....	20
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	21
4. DENEYSEL YÖNTEMLER	30
4.1 Katı Hal Reaksiyon Yöntemi.....	30
4.2 Numunelerin Hazırlanması	30
4.1 DeneySEL Ölçümler	32
4.1.1 X Işını Kırınım (XRD) Ölçümü	33
4.1.2 Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Ölçümü.....	34
4.1.3 Elektriksel Direnç (R-T) Ölçümü	35
4.1.4 Manyetizasyon (M-H) Ölçümü	35

4.1.5 Dinamik Mikrosertlik Ölçümü	36
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
5.1 X-Işını Kırınım (XRD) Ölçümü Analizi	39
5.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümü Analizi	43
5.3 Elektriksel Direnç ($R-T$) Ölçümü Analizi	45
5.4 NiO Katkılı Numunelerin Süperiletkenlik Özellikleri	49
5.5 Manyetizasyon (M-H) Ölçümü ve Manyetik J_c Hesap Analizi	51
5.6 Dinamik Mikrosertlik Ölçümü Analizi	53
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
7. KAYNAKLAR	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Cıvanın sıcaklık-direnç grafiği (29).....	5
Şekil 2.2. Süperiletken olmayan metal ve süperiletken malzemelere ait karakteristik öz direnç-sıcaklık grafiği.....	7
Şekil 2.3. Saf ve saf olmayan iki süperiletken malzemenin sıcaklık- direnç eğrisi	7
Şekil 2.4. a) I.tip süperiletken kritik manyetik alan kuvveti grafiği, b) II.tip süperiletken kritik manyetik alan kuvveti grafiği (34).....	8
Şekil 2.5. Süperiletken malzemenin sıcaklık-kritik akım yoğunluğu grafiği (35).....	9
Şekil 2.6. Meissner Etkilerinin Şemaları (34).....	10
Şekil 2.7. Tip I süperiletkenin a) manyetik alanı, b) manyetizasyonu (34).....	11
Şekil 2.8. Tip II süperiletkenin T_c sıcaklığındaki a) manyetik alanı, b) manyetizasyonu (34)	11
Şekil 2.9. Zaman içinde kritik sıcaklığın gelişimi (36).....	12
Şekil 2.10. $Bi_2Sr_2CuO_6$ bileşiklerinin kristal yapısı (46).....	14
Şekil 2.11. $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ bileşiklerinin kristal yapısı (46)	15
Şekil 2.12. $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ bileşiklerinin kristal yapısı (46).....	16
Şekil 2.13. SMES sistemi ve kontrolü (49)	17
Şekil 2.14. SFCL eşdeğer devresi (2)	18
Şekil 4.1. Numune hazırlanış prosedürü	33
Şekil 4.2. Dört nokta ölçüm yöntemi	35
Şekil 4.3. (a) Girintinin kesit görünümü, (b) Örnek yükleme/boşaltma- derinlik eğrisi (76).....	36
Şekil 5.1. Saf ve Ni katkılı Bi-seramiklerin XRD spektrumları ve karakteristik H(117) zirvesinin genişlemesiyle birlikte.	39
Şekil 5.2. (a) Ni0, (b) Ni1, (c) Ni2, (d) Ni3, (e) Ni4 ve (f) Ni5 numunelerinin SEM görüntüsü	44
Şekil 5.3. Saf ve farklı oranlarda NiO katkılanmış Bi bazlı seramiklerin sıcaklık-öz direnç eğrileri.....	46
Şekil 5.4. ρ_{300K} ve ρ_{115K} öz direnç değerleri arasındaki korelasyonlar	48
Şekil 5.5. Örneklere ait 15 K'de ölçülen manyetizasyon eğrileri	52
Şekil 5.6. Örneklere ait 15 K'de hesaplanan manyetik kritik akım yoğunluk-manyetik alan eğrileri	53
Şekil 5.7. (a) Ni0, (b) Ni1, (c) Ni2, (d) Ni3, (e) Ni4, (f) Ni5 numunelerinin yükleme/boşaltma derinliği eğrisi.....	54
Şekil 5.8. Uygulanan yükün fonksiyonu olarak sertlik değerleri.....	56
Şekil 5.9. Uygulanan yükün fonksiyonu olarak indirgenmiş elastisite modülünün değerleri	56

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Güç sistemlerini bekleyen sorunlar ve bu sorunların çözümü (2)	2
Tablo 2.1. Süperiletken bazı elementler/bileşikler ve kritik sıcaklıkları.....	6
Tablo 2.2. Süperiletken uygulamaların geleneksel uygulamalara göre boyut ve ağırlığındaki azalma oranları. (2)	19
Tablo 5.1. Bi bazlı seramiğin bazı kristalografik parametreleri.....	42
Tablo 5.2. Oda sıcaklığı öz dirençleri, artık öz dirençler, artık öz direnç oranları, ρ_{norm} ve $\Delta\rho$ dahil olmak üzere çeşitli öz direnç değerleri.....	47
Tablo 5.3. Dökme seramik süperiletkenlerin başlangıç/kayma kritik geçiş sıcaklıkları ve boşluk taşıyıcı yoğunlukları	50
Tablo 5.4. Her numune için dinamik mikro girinti analizinin sonuçları	55

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 4.1. Karıştırma makinesi	30
Fotoğraf 4.2. SPECAC (Model GS25011) hidrolik pres	31
Fotoğraf 4.3. PROTHERM (Model PTF 12/75/200) programlanabilir kıl fırını.....	32
Fotoğraf 4.4. Rigaku MultiFlex 2kW X-Işını kırınım ölçeri	34
Fotoğraf 4.5. FEI Quanta FE-250 20 kV Taramalı electron mikroskobu	34
Fotoğraf 4.6. Ultra mikro sertlik test sistemi	38



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AA	: Alternatif akım
a, c	: Örgü parametreleri
B	: Manyetik alan
B_c	: Kritik manyetik alan
B_{c1}	: Alt kritik manyetik alan
B_{c2}	: Üst kritik manyetik alan
BSCCO	: Bizmut stronsiyum kalsiyum bakır oksit
BPSCCO	: Bizmut kurşun stronsiyum kalsiyum bakır oksit
D	: Ortalama kristal tane boyutu
DA	: Doğru akım
EDX	: Enerji dağılım X-ışını Spektrometresi
E_r	: Elastik modülü
FACTS	: Esnek AA iletim sistemleri
FCL	: Arıza akım sınırlayıcı
h_c	: Temas derinliği
H_c	: Kritik manyetik alan kuvveti
H_{c1}	: Alt kritik manyetik alan manyetik kuvveti
H_{c2}	: Üst kritik manyetik alan manyetik kuvveti
I_c	: Kritik akım
ICDD	: Uluslararası Kırınım Verileri Merkezi
J_c	: Kritik akım yoğunluğu
K	: Kelvin sıcaklık değeri
LBCO	: Lantan baryum bakır oksit
LFZ	: Lazer yüzey bölge
M	: Manyetizma
MAGLEV	: Manyetik levitasyon
MRI	: Manyetik rezonans görüntüleme
NMR	: Nükleer manyetik rezonans
PCS	: Güç düzenleyici sistemi
P_{max}	: Yük
R	: Direnç
SCADA	: Denetleyici kontrol ve veri toplama sistem

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SFCL	: Süperiletken arıza akım sınırlayıcı
SMES	: Süperiletken manyetik enerji depolama
SQUID	: Süperiletken kuantum girişim cihazı
T	: Tesla
T_c	: Kritik Sıcaklık
T_c^{onset}	: Onset Geçiş Sıcaklığı
T_c^{offset}	: Offset Geçiş Sıcaklığı
XRD	: X-Işını Kırınım (X-Ray Diffraction)
YBCO	: İtiryum baryum bakır oksit
YSS	: Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler
Θ	: Bragg açısı
ΔT_c	: Geçiş sıcaklığı
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
λ	: Doluluk oranı
β	: FWHM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca akademik anlamda beni yönlendiren ve her konuda desteğini esirgemeyen, tez çalışmalarımın her adımında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Rıfkı TERZİOĞLU'na teşekkürlerimi ve en içten saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteklerini hiçbir şekilde esirgemeyen, her konuda yardımları olan ve her zaman yanımda olan değerli hocam ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Uğur DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca tez malzemelerimin hazırlama süreci ve deneysel ölçümler sırasında ilgisini ve yardımlarını esirgemeyen, her türlü bilgisini benimle paylaşan, değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Şenol KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda bana laboratuvarını açan ve her türlü bilgisini benimle paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Cabir TERZİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca tüm bilgi ve deneyimi ile yorumlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Gürcan YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda her türlü konuda desteklerini esirgemeyen ve bilgisini benimle paylaşan Dr. Arş. Gör. Ali MERCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu süreçte maddi manevi her zaman yanımda olan aileme, babam Öğr. Gör. Cafer KARA ve annem Sevgi KARA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Elektrik gücü modern uygarlığın temelini oluşturmaktadır. Aydınlatmamızı sağlar, fabrikalarımızı çalıştırır ve tüm motorlarımıza, veri merkezlerimize ve telekomünikasyon ağlarımıza güç sağlar. Elektrik enerjisi genellikle jeneratörler tarafından alternatif akım (AA) olarak üretilen alternatif gerilimlerdir. Güç sistemlerinde bu üretilen AA gerilimler elektrik şebekesi ile daha sonra transformatörler aracılığı ile uygun bir gerilime dönüştürülerek uzun mesafelerce iletim hatlarıyla taşınır ve yerel dağıtım için tekrar uygun gerilime dönüştürülürler. Elektrik şebekesi veya kısaca "şebeke", elektrik gücünün büyük çoğunluğunu temiz ve rahat bir şekilde dünyaya sağlayan birbirine bağlı ağıdır.

Şebeke, üretim ve kullanım arasındaki tüm elektrik bağlantılarından oluşur. Jeneratörler, fosil yakıtlar, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji gibi enerji kaynaklarıyla beslenen türbinlerden sağlanan mekanik enerjiyi trafolar, şalt cihazları ve voltaj regülatörleri gibi ekipmanlarla elektrik enerjisine dönüştürür. Bu geniş kapsamlı karmaşık ekipman dizisi, merkezi denetleyici ve veri toplama (SCADA) sistemlerini, yerel ve bölgesel kontrol merkezlerini ve giderek artan bir şekilde izleme, kontrol, çalıştırma ve üretimi korumaya yönelik bilgisayarlı sistemler ve bileşenleri içeren karmaşık bir iletişim ve denetleme ağı tarafından denetlenir. Bu fiziksel sistemi kapsamı, bir ekonomik ve iş ağının yanı sıra, müşteri işlemleri, birden fazla şebeke kuruluşu ve bunların tedarik ve destek zincirleri arasındaki finansal ve bilgi alışverişlerine uzanan bir düzenleyici ağıdır(1).

Elektrik mühendisliği açısından bakıldığında, şebeke, devre kesiciler ve anahtarlar tarafından gerektiği şekilde kesilen dirençler, indüktörler ve kapasitörler gibi dev bir empedans ağıdır. Güç hatları, kablolar, transformatörler ve dönen makineler, bu temel elemanlardan oluşan eşdeğer bir devre ile modellenenir. Elektrik akımları bu ağ üzerinden Kirchoff yasalarının belirlediği bir şekilde akar. Bununla birlikte akıllı şebekelere giderek artan bir yönelim vardır. Bu durum iki yönlü elektrik ve bilgi akışını sağlamak, şebekedeki akım akışını kontrollü bir şekilde ayarlanması ve yönlendirilmesi, şebekenin işleyişini müşterinin sahasına kadar takip edilmesi ve müşteri talebini karşılayabilmek için modern sensör ve iletişim teknolojilerini kullanma gereksinimi doğurmaktadır. Bu tür bir denetimi sağlamak için genellikle güç elektroniğine dayalı esnek AA iletim sistemleri (FACTS) gibi yeni cihazların ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Yıllar geçtikçe elektrik enerjisi hayatın her alanında temel bir ihtiyaç haline geldi. Elektrik enerjisinin hayatımızın her alanına dahil olması, enerji sistemlerinin planlanması ve analizinin önemini artırmaktadır. Güç sistemleri birçok sorunla karşı karşıyadır. Bu sorunlardan bazıları kısa devreler, aşırı yükler, düşük gerilim, yeni iletim hatları için yetersiz alan ve yüksek kayıplar olarak sıralanabilir. Geleneksel güç iletim ve dağıtım sistemlerinin kayıpları en aza indirmesi gerekir. Kentsel alanlarda artan enerji talebi daha fazla güç iletim, kayıp ve gerilim düşümü sorunlarına neden olmaktadır. Bu konulara ek olarak, çevreye zararsız temiz enerji olarak tanımlanan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmaktadır. İleride enerji birim fiyatının artacağı düşünüldüğünde, kayıpların daha da önemli bir konu haline gelmesi kaçınılmazdır.

Gelecekte güç sistemlerinde meydana gelecek sorunlar ve bu sorunları çözmek için ihtiyaç duyulan gelişmeler Tablo 1.1’de gösterilmiştir. Güç sistemlerinde oluşabilecek sorunlar birbirini tetikleyen türdendir. Yani enerji talebinin artması beraberinde daha fazla enerji iletimini ve kayıpları getirmektedir. Enerjideki bu kayıplar CO₂ emisyonunun artmasına sebep olmaktadır(2).

Tablo 1.1. Güç sistemlerini bekleyen sorunlar ve bu sorunların çözümü (2)

Gelecekteki Güç Sistemleri	
Gelecekteki güç sistemlerinde meydana gelecek sorunlar	Bu sorunlar sonucunda ihtiyaç duyulan gelişmeler
Güç kesintileri ve bozulmaları meydana gelmekte	Güvenli ve güvenilir bir şebekeye ihtiyaç duyulmakta
Daha fazla enerji depolama ve üretimde esneklik	Akıllı şebekelere ihtiyaç duyulmakta
Daha fazla enerji ihtiyacı/petrole olan bağımlılığın artması	Enerji verimliliğinde gelişmeye ihtiyaç duyulmakta
Daha fazla CO ₂ emisyonu/ artan çevre sorunları	Çevresel olarak temiz bir şebekeye ihtiyaç duyulmakta
Daha fazla enerji iletimi/ iletim ve dağıtımda kayıpların artması	Kayıplar minimize edilmeli

Bir güç sistemlerinde kayıpları azaltmanın yollarından biri, sistemdeki elemanları süperiletken denilen bir malzemeden yapılmış elemanlarla değiştirmektir. Süperiletken malzemelerin birçok uygulaması sistemin daha kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlamakta, sistemin verimliliğini artırmakta, yeni

teknolojileri mümkün kılmakta, sistemde kullanılan elemanların boyutlarını küçültmekte ve ağırlıklarını azaltmaktadır. Güç sistemlerinin karşılaştıkları güçlükleri (gerilim çökmesi, aşırı yüklenme, kayıplar vb.) en aza indirmek üzere süperiletken malzemelerden birçok uygulama yapılmış ve hala çeşitli uygulamalar geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu uygulamaların en önemlileri Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)(3–8), güç iletim kabloları (9–14), güç transformatörleri, arıza akım sınırlayıcı (FCL) dir (15–19). Bu süperiletken donanımlar hakkında birçok çalışma yapılmıştır.

Süperiletken elemanların güç sistemlerinde kullanılabilmeleri için, süperiletken malzemelerin belirli şartları (kritik sıcaklık, kritik manyetik alan, kritik akım yoğunluğu) sağlıyor olmaları gerekmektedir. Bu açıdan 77 K sıvı azot sıcaklığın üzerinde süperiletken özelliklere sahip YSS (Yüksek Sıcaklık Süperiletken) malzemeler büyük önem taşımaktadır. Bu malzemelerden en popüler olanı Bi bazlı BSCCO süperiletken seramik malzemelerdir. Birçok Bi bazlı süperiletken malzemenin elektriksel, mikroyapısal, mekanik ve akı sabitleme özelliklerini geliştirmek için farklı oksitler, elementler ve partiküllerin eklenmesi veya yer değiştirmesi ile kimyasal katkı üretilir. Kolay ve hızlı faz oluşumu, termodinamik stabilitesi, ucuz ve zararsız kimyasal içerikleri ile bi-bazlı bileşikler, 850 °C gibi daha yüksek tavlama sıcaklıklarında kazanç veya oksijen kaybı olmaksızın üretilebilir olmaları endüstriyel ve mühendislik uygulamaları için kullanım alanı sağlayabilmektedir (20–22). Bi tabanlı süperiletken seramik malzemelerdeki Bi-2223 fazı faz kararlılığı, yüksek kritik sıcaklığı, manyetik alanı ve akım taşıma kapasitesi gibi özelliklerinden dolayı en kullanışlı olanıdır (23).

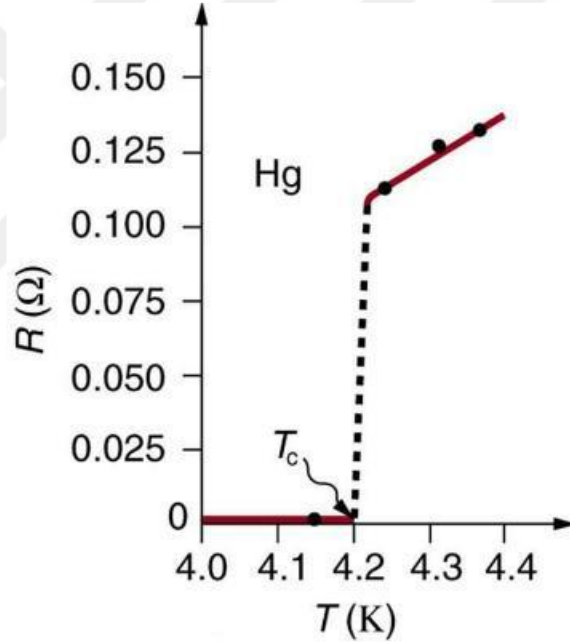
Bu çalışma kapsamında yüksek saflıkta bulunan hazır stokiometrik oranda $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Ca}_{2.2}\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223 fazı) toz bileşiği kullanılarak standart katı hal reaksiyon yöntemi ile farklı oranlarda Nikel oksit (NiO) katkılanması yapılarak süperiletken seramik malzemeler üretilmiştir. Hazırlanan $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Ca}_{2.2}\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x + x\text{NiO}$ YSS malzemelerin yapısal, elektriksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Endüstriyel ve teknolojik uygulamalar için, saf ve NiO katkılı numuneler için elektriksel sonuçlar, karakteristik kritik geçiş sıcaklıkları, kristallik kalitesi kafes parametresi, kristal yapı kalitesi, tane hizalama dağılımları, yüzey morfolojisi görünümü ve Vickers mikrosertlik değerleri gibi önemli özellikler karşılaştırılmıştır. Bi-2223 seramik malzemeye farklı oranlarda eklenen NiO metal oksit bileşiğin süperiletken seramik malzemenin elektriksel performansını

geliştirmesi amaçlanmıştır. Literatüre bakıldığında Ni elementinin Bi-2212 seramik malzemeye yer değiştirme reaksiyonu ile katkılamaı yapılmış ve Ni'nin süperiletken özellikleri bozduğu görülmüştür (24). Ayrıca Ni'in içinde bulunduğu diğer geçiş metalleri grubundan farklı elementlerin Bi-2223 süperiletken seramik malzemeye eklenmesi ile hem olumlu hem de olumsuz etki ettiği görülmüştür (25–28). Bu sebepten dolayı Bi-2223 süperiletken malzemede NiO farklı katkılama oranları ve üretim safhasında sinterleme sıcaklığı, peletleme basıncı, karıştırma süresi gibi değişkenlerde değişiklik yapılarak malzemenin yapısal, mekanik ve elektriksel özelliklerinde gelişmeler olması beklenmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümde süperiletkenlerin genel özellikleri yüksek sıcaklık süperiletkenleri, BSCCO seramik malzemenin yapısı ve özellikleri ile süperiletkenlerin güç sistemlerinde ve diğer alanlardaki uygulamaları incelenmiştir. nc bölümde dünya literatüründe yapılan bizmut tabanlı YSS malzemelerde katkılama, elektriksel, yapısal ve mekanik özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Dördüncü bölümde çalışmada yapılan deneysel yöntem, numunelerin hazırlanması ve çalışmada kullanılan deneysel ölçüm yöntemleri anlatılmaktadır. Beşinci bölümde ise farklı oranlarda katkılama yapılan BSCCO malzemelere ilişkin deneysel sonuçlar tartışılmış ve literatürde yapılan benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilip gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler verilmiştir.

2. SÜPERİLETKENLİK VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Süperiletkenlik ilk olarak 1911 yılında Lieden’de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes ve çalışma arkadaşları tarafından keşfedilmiştir (29). Onnes araştırmasında, sıvı helyum kullanarak civa elementinin sıcaklığını 4.2 K sıcaklığına düşürerek civanın direncinin sıfıra ($<10^{-27}\Omega m$) yaklaştığını görmüştür. Direncin sıfıra gittiği bu sıcaklık değerine kritik sıcaklık (T_c) denir. Civa direncinin T_c 'nin altında her zaman sıfır olduğunu görmüşlerdir. Süperiletkenliğin keşfini sağlayan bu çalışma aynı ekibin 1908 yılında helyumu sıvılaştırmasıyla gerçekleşmiştir. Onnes ve arkadaşları yaptıkları bu çalışma ile 1913 yılında Nobel ödülünü kazanmıştır.



Şekil 2.1. Civanın sıcaklık-direnç grafiği (29)

Civanın süperiletkenliğinden sonra kalay (Sn), kurşun (Pb), indiyum (In), alüminyum (Al) ve neobiyum (Nb) gibi birçok elementin süperiletken olduğu deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır. Daha sonra 1940 yılında NbN ve 1973’te sıvı hidrojenle Nb₃Ge bileşiklerinin süperiletken olduğu bulunmuştur. Tablo 2.1’de süperiletken olan bazı element ve bileşiklerin süperiletken oldukları kritik sıcaklıklar gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Süperiletken bazı elementler/bileşikler ve kritik sıcaklıkları.

Element ve Bileşikler	T_c (K)
Al	1.175
In	3.4
Sn	3.72
Hg	4.2
Pb	7.2
Nb	9.2
NbN	17
Nb ₃ Ge	23.2

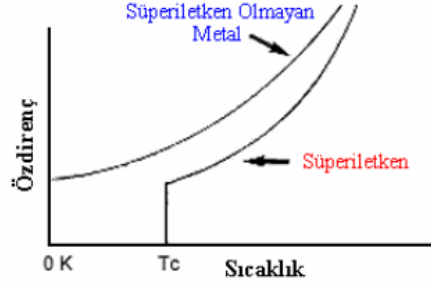
Süperiletkenliğin keşfinden sonra, yeni bir dönüm noktası sayılan süperiletkenlerin üzerlerine uygulanan manyetik alanları dışlama özelliği gösterdikleri 1933 yılında W. Meissner ve R. Ochsenfeld tarafından keşfedilmiştir (30). Bir manyetik alan varlığında süperiletken malzeme T_c 'nin altına soğutulurken, süperiletkendeki akının kaybolduğu, yani süperiletken içindeki akının dışlandığı bulunmuştur. Bu gözlem Meissner Etkisi olarak adlandırılmaktadır.

1957'de John Bardeen, Leon N. Cooper ve J. Robert Schrieffer, malzemelerin süperiletken davranışlarını kuantum mekaniği ile BCS teorisi olarak bilinen mikroskobik düzeyde açıklamışlardır (31). BCS teorisi, elektronların hareket ettiği kristalin fonon kafes titreşimlerinin meydana getirdiği Cooper çifti adı verilen bozonik çiftlerde elektronların nasıl bağlandığını açıklar (32).

Süperiletken malzemelerin özelliklerini etkileyen temel üç parametre kritik sıcaklık (T_c), kritik manyetik alan kuvveti (H_c) ve kritik akım yoğunluğu (J_c) olarak bilinir. Buradan sonra süperiletkenler ile ilgili çok yaygın kullanılan bazı terim ve kavramlar açıklanacaktır.

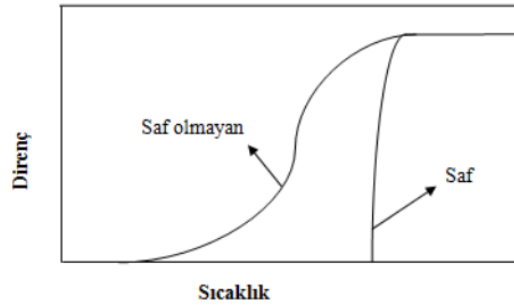
2.1 Kritik Sıcaklık (T_c)

Bir malzeme süperiletken özellik göstermesi için sıcaklığı belirli bir değerin, yani süperiletken normal bir durumdan süperiletken duruma geçtiği sıcaklık değerinin altında olduğunda süperiletkenlik gösterir. Bu sıcaklığa kritik sıcaklık denir ve T_c ile gösterilir. Kritik sıcaklık değerinin altında malzemenin direnci aniden sıfıra düşer. Bunun anlamı, kritik sıcaklık değeri altındaki sıcaklıklarda, doğru akımın kayıpsız bir şekilde malzeme içinden akabilmesidir(33). Şekil 2.2.'de süperiletken olmayan metal ve süperiletken malzemelere ait karakteristik öz direnç-sıcaklık grafiği verilmiştir.



Şekil 2.2. Süperiletken olmayan metal ve süperiletken malzemelere ait karakteristik özdirenç-sıcaklık grafiği

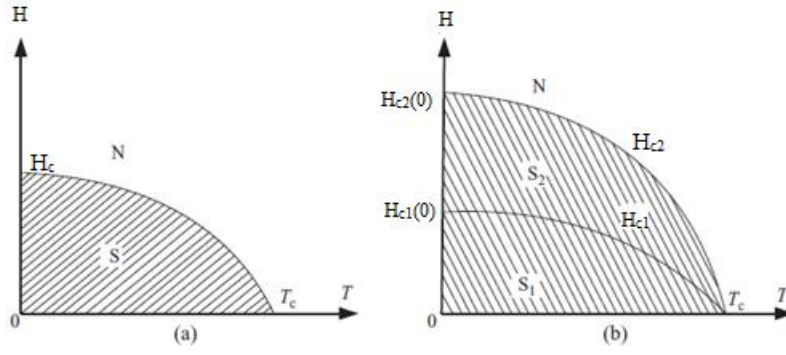
Genel olarak, süperiletken geçiş sıcaklığı, sıcaklık geçiş genişliği adı verilen bir aralığa sahiptir ve ΔT_c ile ifade edilir. Bu, malzeme direncinin azalmaya başladığı (T_c^{onset}) sıcaklık ile direncin sıfır olduğu andaki sıcaklık (T_c^{offset}) arasındaki farka eşittir. Bu ΔT_c aralığının genişliği malzemenin ne kadar saf olup olmadığını gösterir. Yüksek saflıkta tek kristalli ve gerilimsiz metal veya alaşımlı süperiletkenlerde ΔT_c 10^{-3} K'den küçüktür. BSCCO, YBCO gibi II. Tip süperiletken malzemelerin geçiş genişliği (ΔT_c), dahili homojen olmama, zayıf bağlantı, taneciklilik ve kusurlar gibi içsel özellikleri nedeniyle genellikle 0,5-1 K aralığındadır. Bu nedenle II. Tip süperiletkenlerin ΔT_c aralığı I. Tip süperiletkenlere oranla daha geniştir. Şekil 2.3'te saf ve saf olmayan iki malzemenin sıcaklık-direnç eğrisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Saf ve saf olmayan iki süperiletken malzemenin sıcaklık-direnç eğrisi

2.2 Kritik Manyetik Alan Kuvveti (H_c)

Süperiletkenler, uygulanan harici bir manyetik alanda manyetik alan kuvveti ya da süperiletkenin içinden geçen akımın kendi üzerinde oluşturduğu manyetik alan kuvveti belirli bir değeri aştığında süperiletkenliklerini kaybederler. Bir süperiletkenin süperiletkenlik özelliğini kaybetmesine neden olan manyetik alan kuvvetine kritik manyetik alan kuvveti denir ve H_c ile gösterilir. H_c sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık kritik sıcaklık T_c 'den düşük olduğunda sıcaklık düşüşü ile orantılı olarak sürekli artar. Şekil 2.4'te kritik manyetik alan kuvvetinin sıcaklıkla değişimi görsel olarak verilmiştir.

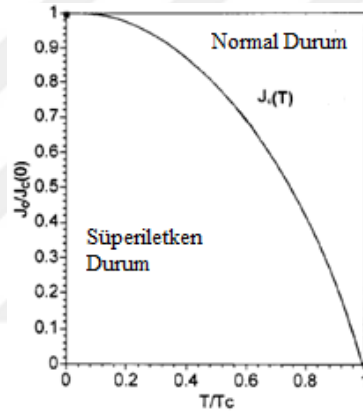


Şekil 2.4. a) I.tip süperiletken kritik manyetik alan kuvveti grafiği, b) II.tip süperiletken kritik manyetik alan kuvveti grafiği (34)

Kritik sıcaklık T_c gibi, süperiletken normal durumdan süperiletken duruma geçtiğinde, H_c civarında H_c alan geçiş genişliği vardır (34). I. tip süperiletkenler, kritik manyetik alan (H_c) denilen alandan daha düşük manyetik alanlarda ideal diyamanyetizma özelliği gösterir. Kritik alandan daha yüksek alanlarda ise keskin bir şekilde normal duruma bir geçiş yaparlar. II. Tip süperiletkenlerde ise üst kritik alan H_{c2} ve alt kritik alan H_{c1} olmak üzere iki kritik alan vardır. Eğer süperiletken alt kritik alan H_{c1} değerinin altında ise ideal diyamanyetizma özelliği gözlenir. H_{c1} 'den büyük ve H_{c2} 'den küçük değerlerde ise manyetik akı çizgileri süperiletken malzeme içine kısmen girmeye başlar ve karışık durum ortaya çıkar. Uygulanan alan, üst kritik alan H_{c2} 'den büyük olduğunda süperiletkene uygulanan manyetik alan malzemeye nüfuz eder bu durumda diyamanyetizasyon özelliği kaybolur yani normal iletken durumuna geçer.

2.3 Kritik Akım Yoğunluğu (J_c)

Süperiletkenliğin oluşmasını engelleyen başka bir kritik parametre daha vardır. Sıcaklık kritik sıcaklığın altına düştüğünde, süperiletken malzeme süperiletken hale gelir ve dirençsiz akım taşıyabilir, ancak dirençsiz akım taşıma yeteneği sınırlıdır. Taşıma akımı belirli bir değerden daha büyük olduğunda, süperiletken malzeme süperiletken durumdan normal duruma geçer. Bir süperiletkenin sıfır dirençle aktarabileceği maksimum DA'ya kritik akım I_c veya bir akımın kritik değeri numune boyutuna bağlı olduğundan kritik bir akım yoğunluğu, yani bir süperiletkenin birim kesiti boyunca iletilen akım olarak tanımlanır. Bu değer J_c ile gösterilir ve A/m^2 ile A/cm^2 ve diğer birimlerle ölçülür (33). Şekil 2.5'te süperiletken malzemenin sıcaklık-kritik akım yoğunluğu grafiği gösterilmiştir.



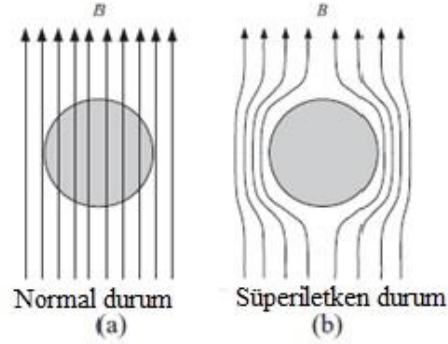
Şekil 2.5. Süperiletken malzemenin sıcaklık-kritik akım yoğunluğu grafiği (35)

2.4 Meissner Etkisi

W. Hans Meissner ve Robert Ochsenfeld, 1933 yılında süperiletkenlerin manyetik özelliklerini incelemişler ve süperiletkenin mükemmel diyamanyetizma olarak adlandırılan ikinci belirgin özelliğini keşfetmişlerdir (30). Manyetik alan içinde soğutulan bir süperiletkenin kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklara doğru inildiğinde, Şekil 2.6.(b)'de gösterildiği gibi, süperiletkenin içindeki manyetik akının yok olduğunu ($B=0$) buldular.

Süperiletken, süperiletken olmayan bir durumda bir manyetik alana maruz kaldığında, manyetik alan süperiletkene nüfuz edebilir ve bu nedenle iç manyetik alan normal durumunda sıfır değildir. Bununla birlikte, süperiletken, süperiletken durumdayken içindeki manyetik akı süperiletkenden tamamen dışlanır ve iç

manyetik alan sıfırdır, yani süperiletken tamamen diyamanyetiktir. Bu olgu Meissner etkisi olarak adlandırılır. Şekil 2.6'da Meissner etkisi şematik olarak gösterilmiştir.

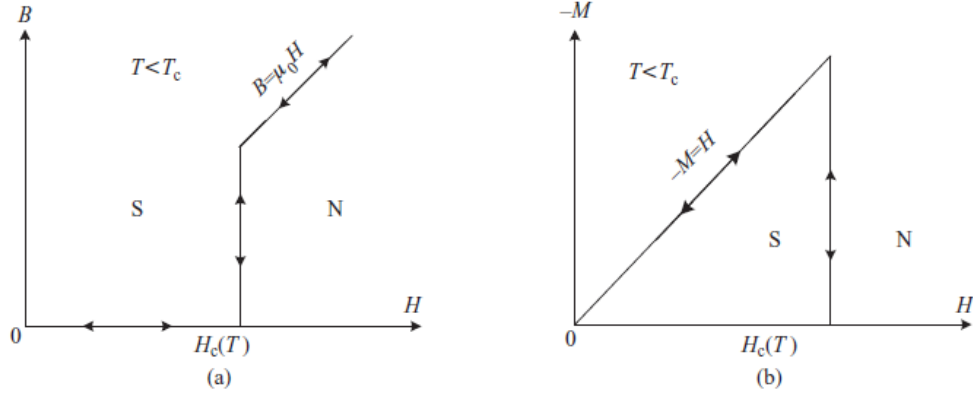


Şekil 2.6. Meissner Etkilerinin Şemaları (34)

2.5 I. ve II. Tip Süperiletkenler

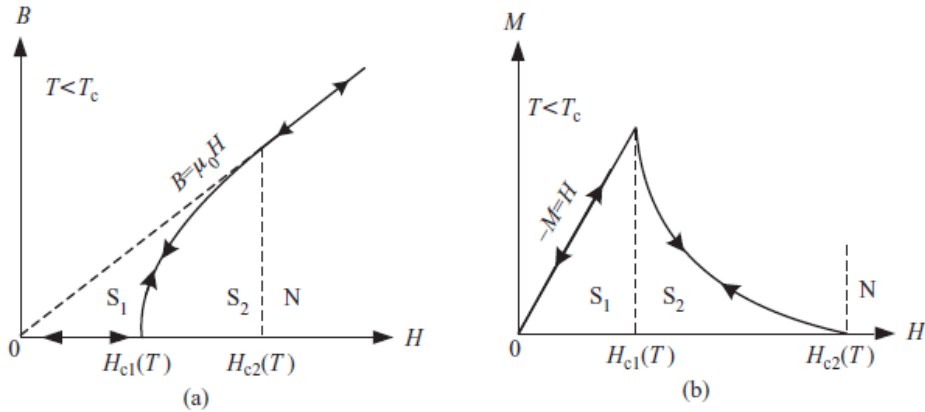
Süperiletkenler 1950'li yıllarda A. Abrikosov tarafından dış manyetik alandaki davranışlarına göre I. ve II. tip olmak üzere iki sınıfa ayrılmışlardır. Bu iki tip süperiletken arasında süperiletkenliğin oluşumu açısından bir fark yoktur. Ancak, bu tipler arasında Meissner Olayı tümü ile değişik şekillerde meydana gelir.

Klasik süperiletkenler veya yumuşak süperiletkenler olarak da bilinen Tip I süperiletkenler, yalnızca bir kritik manyetik alan B_c 'ye sahiptir. Sıcaklık kritik sıcaklığın ($T < T_c$) ve dış manyetik alan $B < B_c$ 'nin altında ise süperiletken Meissner durumundadır yani mükemmel diyamanyetizma gösterir ve içerideki manyetik alan sıfırdır. Dış manyetik alan arttıkça ve kritik manyetik alan $B_c = \mu_0 H_c$ 'ye ulaştığında, süperiletken hemen süperiletken durumdan normal duruma geçer. Şekil 2.7 normal durumlarda ve süper iletken durumlarda Tip I süper iletkenlerin manyetik alanını ve manyetizasyonunu gösterir. Şekil 2.7 (b)'de gösterildiği gibi, Tip I süperiletkenin manyetizasyonu tersine çevrilebilir ve sadece iki durum vardır, yani süperiletken (Meissner) ve normal durumlar. Süper iletken faz diyagramı Şekil 2.7 (a)'da gösterilmiştir. Genel olarak, bir Tip I süper iletken, çok düşük kritik manyetik alanı B_c nedeniyle yüksek manyetik alanda kullanışlı değildir.



Şekil 2.7. Tip I süperiletkenin a) manyetik alanı, b) manyetizasyonu (34)

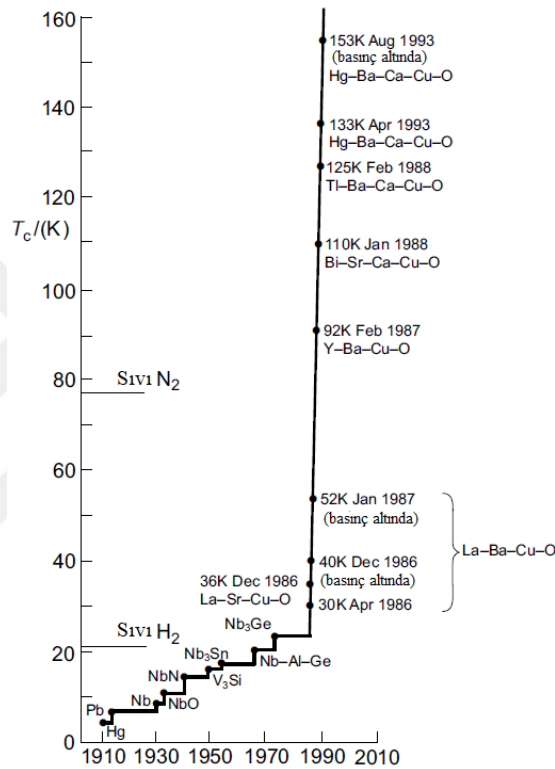
Tip II süperiletkenler, tip I süperiletkenlerden farklı olarak, alt kritik manyetik alan $B_{c1} = \mu_0 H_{c1}$ ve üst kritik manyetik alan $B_{c2} = \mu_0 H_{c2}$ olarak ayrı ayrı tanımlanan iki kritik manyetik alana sahiptir. Harici manyetik alan $B < B_{c1}$ 'i sağladığında, süperiletken Meissner durumunda kalır ve baştan sona sıfır manyetik alana ve tam diyamanyetizmaya sahiptir. Harici manyetik alan $B_{c1} < B < B_{c2}$ aralığında olduğunda, karışık durum olarak bilinen süper iletken durum ve normal durum bir arada bulunur ve manyetik akı numunenin gövdesine kısmen nüfuz eder. Manyetik akının bir kısmının numuneye nüfuz ettiği, bazen girdap durumu olarak da adlandırılan karışık bir durum meydana gelir. Son olarak harici manyetik alan daha fazla arttığında ($B \geq B_{c2}$), süperiletken bölge yavaş yavaş azalır ve normal alan genişler. Böylece süperiletken durum tamamen normal duruma döner. Şekil 2.8 (a) ve Şekil 2.8 (b), her ikisinin de Tip I süperiletken ile tersinir olarak benzer olduğu bir Tip II süperiletkenin manyetik alanını ve manyetizasyonunu gösterir.



Şekil 2.8. Tip II süperiletkenin T_c sıcaklığındaki a) manyetik alanı, b) manyetizasyonu (34)

2.6 Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

Civanın 4.2 K’de süperiletkenliğinin keşfinden sonra bilim adamları yaklaşık 75 yıl boyunca daha yüksek sıcaklıklarda süperiletkenlik gösteren yeni bir malzeme elde etmeye çalışmışlardır. Araştırmalar sonucunda seksenlere kadar sadece birkaç metal, alaşım ve sadece kritik sıcaklığı 23 K olan (Nb_3Ge alaşımı) olan bir grup seramik malzeme bulunmuştur. Şekil 2.9’da zaman içinde kritik sıcaklığın gelişimi görülmektedir.



Şekil 2.9. Zaman içinde kritik sıcaklığın gelişimi (36)

1986 yılında IBM Zürich Araştırma laboratuvarında J.G. Bednorz ve K.A. Mueller, La-Ba-Cu-O (LBCO) sisteminde 30 K yeni bir süperiletken bulmuşlardır (37) ve bunun için kısa sürede fizikte Nobel Ödülü'ne layık görüldüler. Bir yıl sonra, M.K. Wu ve C.W. Chu (38), kritik sıcaklığı 92 K olan Y-Ba-Cu-O (YBCO) sisteminde süperiletkenleri keşfetmişlerdir. Bu buluş yüksek sıcaklık süperiletkenliği için bir dönüm noktası olmuştur. Çünkü ilk defa sıvı azotun kaynama sıcaklığı olan 77 K'den daha yüksek kritik sıcaklık elde edilmiştir. 1988 yılında Maeda ve arkadaşları Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) sisteminde kritik sıcaklığı 110 K civarında olan süperiletkenleri keşfetmişlerdir (39). Aynı yıl içersinde Sheng

ve Hermann tarafından Tl-Sr-Ca-Cu-O seramik bileşiğinin 120 K'de süperiletkenliğe geçtiği bulunmuştur (40). 1993 yılında Schilling ve grubu tarafından 130 K'de cıva (Hg) tabanlı Hg-Ba-Ca-Cu-O süperiletken seramiği keşfedilmiştir. Bu bileşiğin kritik sıcaklığının basınç ile hemen hemen orantılı olarak değiştiği fark edilince 17 K bar basınç altında bu yapıya ait geçiş sıcaklığının 150 K'e yükseldiği görülmüştür (41,42).

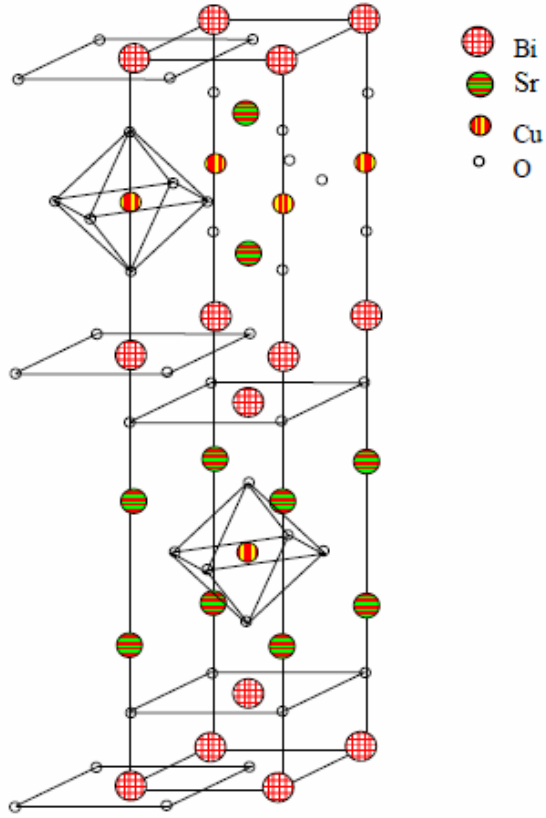
2.6.1 Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) sistemi

1988 yılında Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfedilmesiyle (39), bu malzemelerin hem teknolojiye hem de endüstrideki temel araştırma ve uygulamalarına olan ilgi, sahip oldukları dikkate değer yüksek geçiş sıcaklığı, daha küçük güç kayıpları, yüksek akım ve manyetik alan taşıma kapasitesi, optik ve elektronik özellikler sayesinde her geçen gün artmaktadır. Katmanlı bir yapıya sahip olan BSCCO sistemi kimyasal bileşimlerine göre Bi-2201 fazı ($n = 1$, T_c 20 K), Bi-2212 fazı ($n = 2$, T_c 85 K) ve Bi-2223 fazı ($n = 3$, T_c 110 K) üç farklı faza sahiptir (43,44).

2.6.2 Bi₂Sr₂CuO₆ (Bi-2201) Sisteminin Kristal Yapısı

Michel ve diğerleri tarafından keşfedilen Bi₂Sr₂CuO₆ (2201) bileşiği 1987'de Bi-tabanlı süperiletkenler arasında en düşük T_c 'ye (0-20 K) ve kafes parametreleri $a = b = 5.39 \text{ Å}$, $c = 24.6 \text{ Å}$ olan bir tetragonal simetriye sahiptir (45).

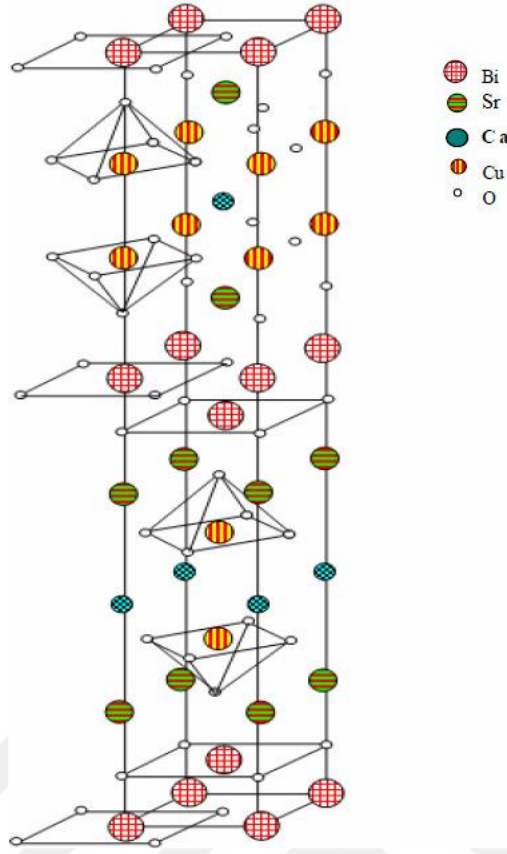
Bi₂Sr₂CuO₆ sisteminin birim hücresi Şekil 2.10'da gösterilmiştir (46). Şekilden görüldüğü gibi, c eksenini boyunca iki Sr-O ve bir Cu-O katmanından oluşan blok, xy düzleminde $a/2$, $a/2$ ötelenmesi ile kendini tekrar ederek birim hücreyi oluşturur. Ayrıca bazılar Bi-O katmanlarıdır ve bakır atomları kristal yapıda en yakın 6 oksijen atomu ile oktahedral bir yapı oluşturur.



Şekil 2.10. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ bileşiklerinin kristal yapısı (46)

2.6.3 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) Sisteminin Kristal Yapısı

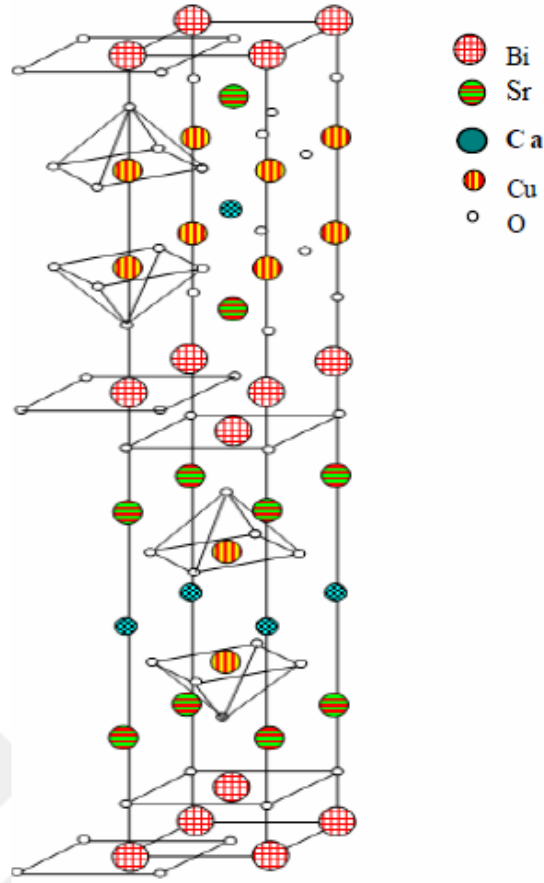
Maeda ve diğerleri 1988 yılında $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ sistemine Ca ekleyerek $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (2212) bileşiğini keşfetti. Kristal yapısı, $a = b = 5.4 \text{ \AA}$ ve $c = 30.6 \text{ \AA}$ kafes parametreleriyle tetragonaldır (46). Saflık ve hazırlama koşullarına göre kritik geçiş sıcaklığının 75 K 'dan 85 K 'e değişmektedir. Şekil 2.11 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ bileşiklerinin kristal yapısını göstermektedir. Bi-2212 sisteminin tabanlarda Bi-O katmanları ve iki Sr-O katmanı, iki Cu-O katmanı ve bir Ca katmanından oluştuğu şekilden açıkça görülmektedir. Bakır atomları sırasıyla 2201 bileşiğinde 6 oksijen atomlu oktahedral bir yapı ve 2212 bileşiğinde 5 oksijen atomlu piramit yapı oluşturur. Bununla birlikte, Ca atomları, Cu-O piramitleri arasındaki ab düzlemi boyunca oksijen bağlı olmadan gömülür.



Şekil 2.11. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ bileşiklerinin kristal yapısı (46)

2.6.4 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223) Sisteminin Kristal Yapısı

Bi bazlı süperiletken seramik serisinde $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (2223) bileşiği 110 K ile en yüksek kritik geçiş sıcaklığına sahiptir. Kafes parametreleri $a = b = 5.4 \text{ \AA}$, $c = 37.1 \text{ \AA}$ olan bir tetragonal yapı şeklindedir (46). Şekil 2.12, Bi 2223 fazının kristal yapısını göstermektedir. İki Bi-O katmanı, iki Sr-O katmanı, iki Ca ve üç Cu-O katmanından oluşan Bi-2223 sisteminin hem Ca hem de Cu-O₂ katmanının eklenmesiyle oluştuğu şekilden görülebilir. Kristal yapısına ek olarak bir Ca ve bir CuO₂ düzleminin gelmesi, c-eksenini 37.1 Å'a yükseltmiştir.



Şekil 2.12. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ bileşiklerinin kristal yapısı (46)

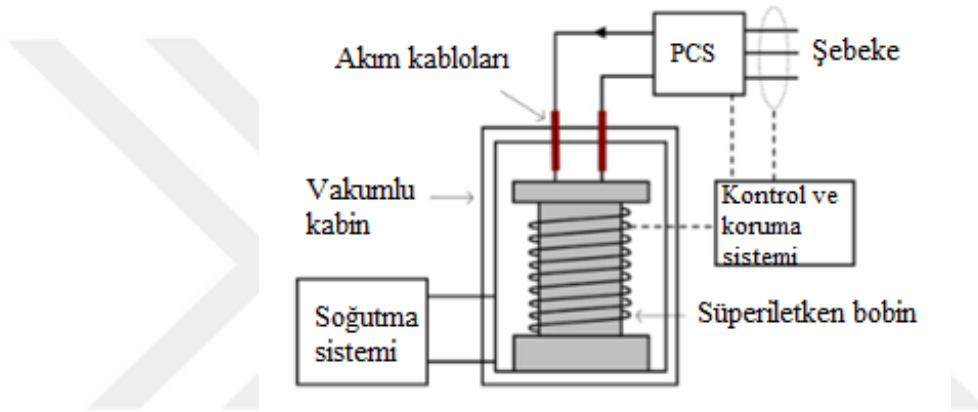
2.7 Süperiletkenlerin Uygulama Alanları

Yüksek sıcaklık süper iletken (YSS) malzemelerin keşfi ile dünya çapında kolay bulunuyor olması ve uygun fiyatlı soğutma sistemleri (sıvı azot 77 K) ve düşük maliyeti ile YSS'lere olan ilgi arttırmıştır. YSS malzemelerin yüksek geçiş sıcaklıkları, yüksek kritik akım yoğunlukları, yüksek manyetik alan taşıma kapasiteleri ve çok düşük güç kaybı gibi özelliklere sahip olmaları teknolojiye çeşitli mıknatıslara ve güç ekipmanlarına uygulanması için teşvik edici olmuştur. YSS'ler elektrik güç sistemlerinde SMES, SFCL, motor, jeneratör, transformatör ve güç kabloları gibi uygulamalarıyla yer alırlar. Bunlar dışında ulaşım, medikal, teknoloji ve elektronikte de uygulamaları bulunmaktadır.

2.7.1 SMES (Süperiletken Manyetik Enerji Depolama)

SMES içinden akan DA akımın oluşturduğu manyetik alanda elektrik enerjisini depolayabilen büyük bir süperiletken bobindir (47). Elektrik şebekesinin güç gereksinimlerine göre gerçek güç ve reaktif güç SMES bobini tarafından şarj

veya deşarj edilebilir. SMES sistemleri, hızlı tepkileri ve yüksek verimlilikleri (%95'in üzerinde bir şarj-deşarj verimliliği) nedeniyle hem elektrik kuruluşlarının hem de askeri alanlarda kullanılmaktadır. SMES'lerin uygulamaları arasında yük dengeleme, dinamik kararlılık, geçici kararlılık, gerilim kararlılığı, frekans regülasyonu, iletim kapasitesi geliştirme, güç kalitesi iyileştirme, otomatik üretim denetimi, kesintisiz güç kaynakları vb. sayılabilir (48). Şekil 2.13.'de SMES sisteminin blok diyagramı verilmiştir. Güç düzenleyici sistemi (Power Conditioning System (PCS)), soğutma, kontrol ve koruma sistemi de dahil olmak üzere bir SMES sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



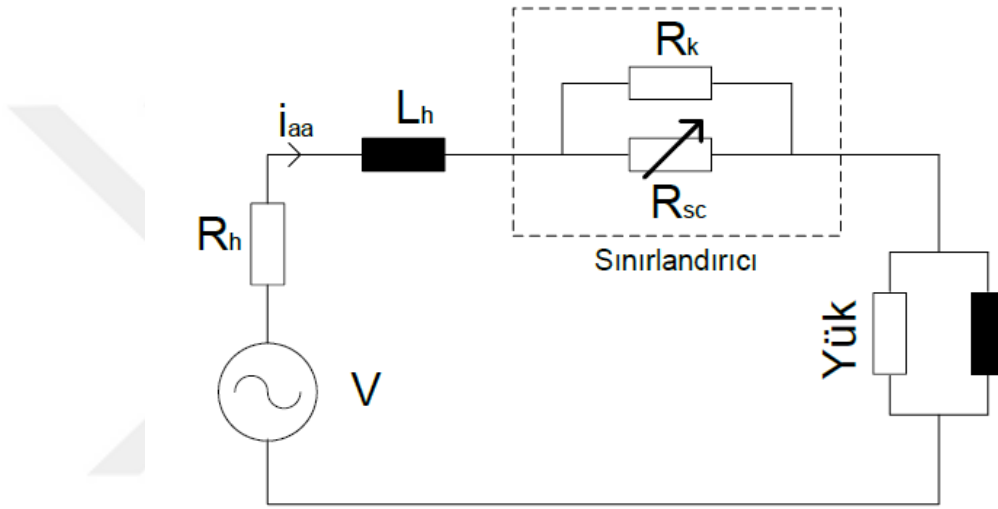
Şekil 2.13. SMES sistemi ve kontrolü (49)

SMES sistemi süperiletken bobbin, güç düzenleyici sistemi (PCS), soğutma sistemi ve kontrol ve koruma sistemi gibi birleşenlerden meydana gelir.

2.7.2 SFCL (Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcı)

Bir elektrik şebekesi için yıldırım düşmesi, kısa devre, topraklama vb. sebeplerle oluşan çeşitli arızalar gibi olağanüstü doğa olayları yaşanması uygun şekilde sınırlandırılmamış ve güç sistemi güvenliği tarafından kontrol edilmemiş bir sistemde büyük akımların akmasına neden olabilir. Bu durumda yangın, cihaz ve tesis hasarı gibi ciddi beklenmedik olaylar ve hatta elektrik kesintisi meydana gelebilir. Süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar (SFCL), büyük bir kısa devre arıza akımını sınırlandırılmanın en etkili yoludur. SFCL'nin prensibi basittir. Bir hatta seri olarak bir süperiletken eleman eklenir. Normal çalışma sırasında sistem herhangi bir sınırlama olmaksızın çalışır çünkü süperiletken elemanın direnci

sıfırdır. Bununla birlikte, bir arıza sırasında arıza akımı, nominal değerin birkaç katına ulaştığında, süperiletken eleman hızla normal durumuna döner yani direnci, önceden tanımlanan bir değere yükselir. Artan direnç/empedans, arıza akımını istenen seviyede sınırlar. Arıza ortadan kalktığında, süperiletken bobin sistemin normal akımını sıfır dirençle taşır (50,51). İnsan müdahalesine ihtiyaç duymadan otomatik olarak çalışan kompakt sistemlerdir. Fiyatı uygun, hafif ve son derece güvenilirlerdir. Şekil 2.14'te süperiletken arıza akım sınırlayıcı eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2.14. SFCL eşdeğer devresi (2)

SFCL eşdeğer devresi AA gerilim kaynağı, hat direnci (R_h), hat empedansı (L_h), süperiletken kablo (R_{sc}), süperiletken kabloya paralel bağlı koruma direnci (R_k) ve yükten oluşmaktadır.

2.7.3 Süperiletken Motor ve Jeneratörler

YSS tel tabanlı süperiletken motor ve jeneratörler daha hafif daha küçük hacimli ve yüksek verimle çalışırlar. Aynı kapasitedeki geleneksel rakipleriyle karşılaştırıldıklarında yarı boyutta ve hacimdedir. Tablo 2.2'de aynı güç değerleri ile üretilen normal ve süperiletken ekipman için boyutsal değişim oranlarını göstermektedir.

Tablo 2.2. Süperiletken uygulamaların geleneksel uygulamalara göre boyut ve ağırlığındaki azalma oranları. (2)

Uygulama Alanı	Boyut ve ağırlıktaki azalma
Jeneratörler	%30-50
Transformatörler	%30-50
Kablolar	>%50

Süperiletken jeneratör teknolojileri, boyut ve ağırlık için değerli bir azalma sağlar. Rüzgar türbini sistemleri için YSS jeneratörleri, temiz enerji maliyetini düşürür. Kompakt ve hafif 10 MW sınıfı YSS jeneratörleri ve yüksek güçlü rüzgar türbini sistemleri pratik ve az bakım gerektiren operasyonlar sağlar (52).

2.7.4 Süperiletken Transformatörler

Transformatörler, bir elektrik şebekesinde en yaygın kullanılan ekipmandır. Gücün çoğu, nispeten yüksek gerilimlerde AA olarak üretilir ve düşük gerilimlerde kullanılır. Ancak gücün büyük kısmı üretim noktalarından tüketim noktalarına çok yüksek gerilimlerde iletilir. Transformatörler, elektrik gücünü bir gerilim seviyesinden diğerine dönüştürür. Genel olarak, güç, üretim ve kullanım noktaları arasında neredeyse 5-10 kez dönüştürülür (53). Geleneksel bir transformatörde normal iletken (bakır veya alüminyum) sargılar kullanılır ve gücün küçük bir kısmı bu sargılarda ısı şeklinde kaybolur. Bir transformatörün ortalama veriminin (tüm boyutlar dahil) yaklaşık %99 olduğu varsayıldığında, transformatörlerde toplam gücün %5 ila %10'unu kaybetmek mümkündür. Normal iletken sargıları süperiletken sargılarla değiştirerek transformatörlerdeki enerji kaybını %60 veya daha fazla azaltmak mümkündür. Süperiletken transformatörler geleneksel rakiplerine göre ömürleri daha uzun, aşırı yüklenmeye dayanıklı, daha küçük boyut ve ağırlıklara sahiptirler. Ayrıca geleneksel transformatörlerden farklı olarak soğutma işlemi için yağ yerine sıvı azot kullanmaları güvenilir ve çevre dostu olmalarını sağlar (54).

2.7.5 Süperiletken Güç İletim Kabloları

Süperiletken kabloların en büyük avantajı yüksek akım taşıma kapasitesi sayesinde aynı kesitteki geleneksel kablolardan 2-10 kat daha fazla akım taşırlar. Geleneksel kabloların aksine, YSS kabloları yakın çevrelerine ısı yaymaz ve

geleneksel rakiplerine göre birim uzunluk başına çok daha hafiftir. Bu özellikler, YSS kablolarının geleneksel kablolardan çok daha kolay ve uygun maliyetli bir şekilde kurulmasını sağlar. Yer altına yerleştirilen geleneksel yüksek güçlü kablolar yeterli ısı dağılımını sağlamak için yüzeye yakın, genellikle termal olarak iletken özel kumla çevrili ve komşu yeraltı altyapısından bir metre veya daha fazla uzağa yerleştirilirken süperiletken kablolar diğer kabloların yanına veya daha derine yerleştirilebilirler (1,55).

2.7.6 Teknolojideki Diğer Uygulamalar

Süperiletkenlerin teknolojiye birçok sektörde uygulama alanı vardır. Bunlardan bazıları ulaşım, medikal, elektronik ve bilimsel araştırmalar olarak sayılabilir.

Uygulama alanlarından ulaşım sektöründe manyetik levitasyon (MAGLEV) trenlerinin yapımında kullanılırlar. MAGLEV trenleri altında bulunan güçlü süperiletken mıknatıslar sayesinde hava askıda kalır. Bu sayede sürtünme olmadan 500 km/s gibi yüksek hızlara ulaşabilirler.

Süperiletken bobin ve mıknatıslar kullandığı manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve Nükleer manyetik rezonans (NMR) gibi medikal uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bir başka uygulama alanı ise bilimsel araştırmalarda kullanılan, Josephson bağlantılarını içeren süperiletken döngülere dayanan, son derece ince manyetik alanları ölçmek için kullanılan SQUID (süperiletken kuantum girişim cihazı) cihazıdır. SQUID'ler 5×10^{-14} T'ya kadar düşük alanları ölçebilecek hassasiyete sahiptir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1986'daki keşfinden bu yana, birçok şirket ve laboratuvar, kristal yapısının içerisinde bakır oksit içeren Bi tabanlı malzemelerin süperiletken özelliklerini geliştirip ticarileştirmek için çaba sarf etmiştir. Bi tabanlı bakır oksit süper iletkeninin sıvı azot kaynama sıcaklığından (77 K) daha yüksek kritik sıcaklıklara sahip olması, yüksek manyetik alan taşıma kapasitesi, yüksek kritik akım yoğunluğu yapı içerisinde nadir toprak elementi içermemesi ve insan sağlığına zarar verici madde bulundurmaması gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlı özellikleri nedeniyle BSCCO süperiletkenleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde BSCCO sseramik malzemeler üzerine çalışmalar, genel olarak ya kristal yapı içerisine katkılama/ekleme ya da hazırlanış sürecinde kalsinasyon sıcaklığı/süresi, sinterleme sıcaklığı/süresi ve peletizasyon basıncı gibi parametreleri değiştirilerek optimum değerleri bulmaya yönelik çalışmalardır.

Maqsood ve arkadaşları (1992), BPSCCO süperiletken seramik malzeme katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak ($x = 0.4, 0.05, 0.6, 0.8$ ve 1.6) farklı oranlarda baryum (Ba) eklemiş ve üretilmiş numunelerin yapısal ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen numunelerin XRD analizi incelendiğinde kristal yapı içerisine $0.4-0.8$ arasında baryum eklenmesi Bi-2223 yüksek sıcaklık faz yapısını desteklediği görülmüştür. $x=0.8$ 'in üzerinde ekleme oranlarında Bi-2223 fazının düşük sıcaklık Bi-2212 fazı ve diğer fazlara evrilmiştir. Elektriksel direnç ölçümü sonucunda en yüksek süperiletken geçiş sıcaklığı $x = 0.8$ oranında Ba eklenmiş ve 160 saat sinterleme işlemi uygulanan numunede elde edilmiştir (56).

Hamid ve arkadaşları (2000), Bi-2212 ve Bi-2223 süperiletken seramik malzelerine sırasıyla ($x = 0.0, 0.05, 0.10$ ve 0.15) ve ($y = 0.0, 0.10, 0.10, 0.20$ ve 0.40) farklı oranlarda katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak TiO_2 eklenmiş ve iki farklı örnek dizisi elde etmiştir. Bu örnekler XRD, SEM ve DA elektriksel ölçümler kullanılarak analiz etmiştir. XRD ölçüm sonuçlarından elde edilen sonuçlarda Bi-2212 yüksek sıcaklık fazının temel faz yapısının Bi-2212 sistemine ait tüm numunelerde gözlemlendiği görülmüştür. Bi-2223 sistemi ile elde edilen XRD ölçüm sonuçlarında Bi-2212 ve Bi-2223'ün faz yapısının birlikte oluştuğu görülmüştür.

Elektriksel ölçümler, yapıdaki artan TiO_2 içeriği, Bi-2212 sisteminde safsızlık fazlarının oluşumu ve kristal tane yapısının bozulması nedeniyle kritik geçiş sıcaklığında kademeli bir düşüş gösterdi. Bi-2212 sistemine benzer şekilde Bi-2223 sisteminin elektriksel ölçüm sonuçları, TiO_2 yapısının Bi-2223 faz yoğunluğunun azaltması, süperiletken tane yapısını olumsuz etkilemesi geçiş sıcaklığı ve kritik akım yoğunluğu değerlerinin azalmasına neden olmuştur. TiO_2 'nin her iki sistemde de yapıya eklenmesi süperiletken özelliklerde azalma meydana gelmiştir (25).

Sykorova ve arkadaşları (2004), Li ve Cs elementlerini Bi-2223 seramik malzemesine katkılayarak süperiletken özelliklerini incelemişlerdir. Numuneleri $\text{Bi}_{3.2}\text{Pb}_{0.8}\text{Sr}_4\text{Ca}_5\text{Cu}_7\text{V}_x\text{O}_y$ ($A = \text{Li, Cs}$ ve $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$, ve 0.8) nominal bileşiğinde katı hal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmış ve XRD analizi, öz direnç ve alınganlık ölçümleri ile analiz etmişlerdir. Sonuçlar, katkılı tüm numunelerin 104–110.5 K aralığında T_c 'ye sahip olduğunu göstermiştir. Li katkılı numunelerde Bi-2223 fazının geçiş genişliği ΔT_c , katkı konsantrasyonu artışı ile artmıştır. Sezyum katkılı örneklerde, geçiş genişliği, artan Cs seviyesi ile $x = 0.6$ 'ya kadar azalmış, ardından biraz artmıştır. Lityum içeren numunelerin J_c değerleri, katkılı lityum miktarı arttıkça azalmıştır. Düşük miktarda Cs ($x = 0.2, 0.4$) katkılı numuneler, katkısız numuneden önemli ölçüde daha yüksek kritik akım yoğunluklarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Cs miktarı yüksek olan örneklerin J_c 'leri standardinkinden daha kötüdür. Lityum, $x = 0.6$ hariç tüm konsantrasyonlarda Bi-2223 fazının oluşumu üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Cs katkılı numunelerde Bi-2223 fazının hacmi katkısız numuneye göre daha yüksek olmasına rağmen lityum katkılı numunelerdeki kadar yüksek olmadığı görülmüştür (57).

Igbal ve arkadaşları (2006), antimon (Sb) elementinin Bi-2223 süperiletken üzerine katkılamasının etkilerini incelemiştir. $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_{2x}\text{Sb}_x\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($x = 0.00, 0.02, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08$ ve 0.15) nominal bileşime sahip bir dizi antimon katkılı Bi-2223 süper iletken malzeme katı hal reaksiyon yoluyla üretilmiştir. Antimonun örneklerin süperiletken davranış üzerindeki etkisi XRD, DA elektrik öz direnci, AA manyetik alınganlık ve enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizleri ile araştırılmıştır. Sb içeriği $x = 0.06$ olan numune için Bi-2223 fazının hacim yüzdesinin maksimum değeri 69.44 çıkmış ve aynı örnek, diğer örnekler arasında 107 K ile en yüksek T_c değerini de göstermiştir. Tüm numunelerin, AA manyetik alınganlık ve XRD verileriyle gösterildiği gibi çok fazlı bir karaktere sahip olduğu görülmüştür. Kafes

parametrelerinin ve hücre hacminin, stronsiyum bölgesindeki antimon ikamesinden etkilendiği bulunmuştur. Antimon bu sistemde %4-6 gibi düşük bir katılama seviyesinde yüksek T_c fazının oluşumunda etkili bulunmuştur (58).

Biju ve arkadaşları (2007), Bi-2212 süperiletken sisteminde Bi elementinin azaltılarak, yerine eklenen kurşun ve bazı toprak elementlerinin etkilerini incelemişlerdir. $Bi_{2-x}PbSr_2Ca_{1.1}Cu_{2.1}RE_{0.25}O_y$ ($x = 0.0, 0.4$ RE = La, Gd ve Yb) nominal bileşiğinde süperiletken seramikler katı hal reaksiyon yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen malzemelerin XRD, SEM ve elektriksel özdirenç ölçümleri ile analizleri yapılmıştır. Bi-2212'nin oluşum sıcaklığının RE ilavesi ile arttığı, ancak Bi bölgesinde Pb ikamesi ile azaldığı sonucuna varılmıştır. SEM ölçüm sonuçlarından elde edilen bulgularda, nadir toprak elementleri içeren örneklerde, Pb elementi yapıya dahil edildiğinde daha düzenli bir dizilim ile daha büyük parçacıkların oluşumu gözlenmiştir. Elektriksel ölçüm sonuçlarından elde edilen bulgularda, tek başına Pb ve tek başına RE (La, Gd ve Yb) katkılı sistemlere kıyasla Pb ve RE ortak katkılı sistemin süperiletkenlik özelliklerinde önemli bir gelişme olduğu göstermiştir (59).

Terzioğlu ve arkadaşları (2009), altın difüzyonunun Bi-2223 süper iletken numunelerinin kristal yapısı ve süper iletken özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, $Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_3O_y$ bileşimi ile katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak altın, difüzyon işlemine tabi tutulan numuneler hazırlanmıştır. Difüzyon işleminin uygulandığı numunenin yüzeyi sinterleme işleminden önce altın kaplamış ve ısıtma işlemi uygulanmıştır. Saf numunelerin ve altın difüzyonlu numunelerin Bi-2223 faz oranı, kafes parametreleri, tane boyutu ve elektriksel özellikleri hakkında bilgi elde etmek için sırasıyla XRD ve SEM, kritik geçiş sıcaklığı, kritik akım yoğunluğu ve oda sıcaklığı özdirenç ölçümleri yapılmıştır. XRD ölçümleriyle altının kristal yapıya nüfuz ettiğini ve altının safsızlık fazının olmadığı sonucuna varılmıştır. Elektriksel ölçümlerdeki bulgularda ise, Bi-2223 faz yoğunluğu ve taneciksel özelliklerinin gelişimi süperiletken geçiş sıcaklığı değerini arttırmış oda sıcaklığı direnç değerini ise azaltmıştır. Edinilen bulgulardan da anlaşıldığı gibi sinterleme aşamasından önce uygulanan altın difüzyon işlemi numunenin temel süperiletkenlik özelliklerini arttırmıştır. Bu çalışma elde edilen bulgularda sinter aşaması önce uygulanan altının difüzyonlu örnekte temel süperiletkenlik özellikleri geliştiğini gözlemlenmiştir. (60).

Sasakura ve arkadaşları (2009), Bi-2212 fazı için Bi yerine bor katkısı yapmış ve süperiletkenlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırmıştır. Süper iletken numuneler, başlangıç bileşimi $\text{Bi}_{2-x}\text{B}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ve 1.0) kullanılarak katı hal reaksiyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Numuneler XRD, elektriksel özdirenç ve manyetik alınganlık ölçümleri yapılarak analiz edilmiştir. XRD ölçüm sonuçlarına göre örneklerin $0.0 \leq x \leq 0.6$ kompozisyon aralığında sadece 2212 fazından olduğu görülmüştür. Manyetik alınganlık ve elektrik direnç ölçümlerinden, süperiletken geçiş sıcaklığının artan x ile $x=0,6$ 'ya kadar arttığı bulunmuştur. Bu sonuçlar $(\text{Bi}_{2-x}\text{B}_x) \text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_z$ sisteminde $x=0,6$ 'ya kadar Bi yerine bor ikamesinin bu sistemde delik taşıyıcı sayısının azalmasına neden olduğunu göstermiştir (61).

Sarun ve arkadaşları (2009), kurşun katkılı Bi-2212 süperiletken sistemine farklı oranlarda itriyum katkılama yapmıştır. $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.1}\text{O}_{8+\delta} + \text{Y}_x$ ($x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) başlangıç bileşiminde numuneler katı hal reaksiyon yöntemiyle hazırlanmış ve hazırlanan numuneler XRD, SEM ve elektriksel direnç ölçümleri ile karakterize edilmiştir. XRD ölçüm sonuçlarına göre temel fazın Bi-2212 fazı olduğu gözlemlenmiştir. Bi-2212 faz yoğunluğu $x = 0.3$ 'lük bir katkılama oranına kadar artmış, $x = 0.3$ 'ün üzerine çıktığında Bi-2212'nin faz yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. SEM ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre $x=0.1$ itriyum katkılı örnek diğer örneklerden daha büyük ölçekte ve daha az boşluklu tanelerden oluşmuştur. Elektriksel ölçümlerden elde edilen bulgulara ise, kritik sıcaklık (T_c) ve kritik akım yoğunluğunun (J_c), optimum Y ilavesi ile önemli ölçüde arttığı bulunmuştur. T_c ve J_c 'nin maksimum değerleri sırasıyla $x=0,3$ ve $0,2$ için gözlemlenmiştir (62).

Vinu ve arkadaşları (2010), kurşun katkılı Bi-2212 süperiletken malzemesine lütesyum katkısı yaparak malzemenin mikro yapısı ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Numuneler $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.5}\text{Sr}_{2-x}\text{Lu}_x\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.1}\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125$ ve $0,15$) başlangıç bileşiminde katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Hazırlanan numuneler XRD, SEM, elektriksel özdirenç ve manyetik alınganlık ölçümleri gerçekleştirilerek analiz edilmiştir. XRD analizi, Lu atomlarının (Bi, Pb)-2212 sistemine başarılı bir şekilde nüfuz edildiğini göstermiştir. Lu katkısının artışı ile Bi-2212 faz şiddetlerinin azalmaya başladığı görülmüştür. SEM ölçümü ile yapılan mikro yapı analizlerinde Lu katkısının artmasıyla plaka benzeri tane oluşumu giderek azalmış ve gözenekli yapı artmıştır.

Elektriksel ölçüm sonuçlarına göre, örneklerde Lu katkısının artması ile geçiş sıcaklığı artmıştır. Lu ikameli numuneler arasında $x=0.10$ için maksimum J_c değerine sahip olduğu görülmüştür. (63).

Azhan ve arkadaşları (2010), Bi-2223 süperiletkenler üzerine zirkonyum katkılanması yapılarak ısıtılma işlemin etkileri araştırmıştır. Süperiletken numuneler katı hal reaksiyon yöntemi ile $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y + \text{Zr}_x$ ($x = 0.00, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1$ ve 0.2) başlangıç bileşiminde sentezlenmiştir. Numune 850°C 'de sinterlenmiş ve daha sonra 830 ve 860°C 'de 30 saat ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan süperiletken seramik numuneler, XRD ve elektriksel öz direnç ölçümleriyle analiz edilmiştir. Örnekler XRD ve R-T ölçümleri ile analiz edilmiştir. $x=0.01$ Zr katkılı ve sinterleme sonrası 30 saat 830°C 'de ısıtılma işlemi görmüş numunede Bi-2223 fazının oluşumu daha yüksek oranda olmuş ve en yüksek geçiş sıcaklığı bu numunede görülmüştür (26).

Yıldırım ve arkadaşları (2011), $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_{2.0}\text{Cr}_x\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.2}\text{O}_y$ nominal bileşimindeki süperiletken örnekler içerisinde $x = 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ ve 1 oranlarda Cr elementi eklemiştir. Örnekler katı hal reaksiyon yöntemine göre hazırlanmış ve XRD, SEM ve elektriksel öz direnç ölçümleri ile incelenmiştir. XRD ölçümlerinden faz ve kafes parametreleri belirlenmiştir. Yapısal modülasyon dikkate alınarak yapılan hücre parametrelerinin iyileştirilmesine dayalı olarak, Cr ilavesi, katılanmamış numuneye kıyasla numunelerin kafes parametresi artarken hücre parametreleri azalmıştır. Ayrıca krom oranı arttıkça Bi-2212 fazı azalmış Bi-2201 fazı artmıştır. SEM ölçümlerine göre katkısız örnek diğer örneklerle göre daha iyi bir morfolojik yapıya sahiptir. Elektriksel ölçüm sonuçları incelendiğinde ise, geçiş sıcaklığının artan Cr ile azaldığı görülmektedir (27).

Özkurt tarafından (2012), Bi-2212 seramik malzemesine nikel katkısı üzerine bir çalışma yapılmıştır. Katı hal reaksiyon yöntemi ile hazırlanan $\text{Bi}_{2-x}\text{Ni}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ ($x = 0.00, 0.05, 0.10$ ve 0.20) süperiletkenlerin özellikleri XRD, DA elektriksel direnç ve manyetizasyon ölçümleri ile incelenmiştir. XRD sonuçlarına göre örneklerin temel fazının Bi-2212 fazı olduğu gözlemlenmiştir. Elektriksel öz direnç ölçümü (R-T) sonuçlarına göre, Ni katkısı arttıkça süperiletken geçiş sıcaklığının giderek azalmıştır. Numunenin manyetik özelliklerini incelemek için uygulanan alana karşı mıknatıslanma (M-H) ölçümleri sonucu elde edilen bulgularda manyetik özelliklerin giderek azaldığı görülmüştür (24).

Bilgili ve Kocabaş tarafından gerçekleştirilen çalışmada (2014), farklı oranlarda Nb_2O_5 ilavesinin $\text{Bi}_{1.7-x}\text{Pb}_{0.3}\text{Nb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($x=0.00-0.20$) süperiletken numunelerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. BPSCCO süper iletken numuneler, geleneksel katı hal reaksiyon yöntemiyle hazırlanmış ve XRD, SEM ve manyetizasyon ölçümleri ile incelenmiştir. XRD sonuçları numunelerin ana bileşenler olarak Bi-2223 ve Bi-2212 fazlarının ve ikincil olarak süper iletken olmayan faz Ca_2PbO_4 'ün bir karışımından oluştuğunu ortaya koydu. Nb ilavesi arttırıldığında, yüzey morfolojisi ve tane bağlanabilirliğinin bozulduğu, $x=0.2$ Nb ilaveli numune hariç SEM görüntüleri numunelerin tane boyutlarının azaldığı ve numunelerin gözenekliliğinin arttığı göstermiştir. AA alınganlık ölçümlerinden, artan Nb ilavesiyle ($x=0.00-0.20$) kritik başlangıç sıcaklıklarının yaklaşık 108-98 K'den düştüğü gözlemlendi (28).

Özkurt tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada (2015), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_{2-x}\text{Na}_x\text{O}_y$ nominal bileşiğine geleneksel katı hal reaksiyon yöntemiyle farklı oranda ($x = 0.3, 0.35, 0.4$ ve 0.5) sodyum (Na) katkısı yapılmış ve numunelerin yapısal, fiziksel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan numuneler XRD, SEM, DA elektriksel özdirenç ve M-H ölçümleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada maksimum $x=0.5$ Na içeriği içeren numune için Bi-2212 fazının granüler yapısının önemli ölçüde iyileştiğini SEM görüntülerinden gözlemlemiştir. Manyetizasyon sonuçları elde edilen bulgulara bakıldığında $x=0.5$ Na içeriğine sahip numunenin, daha granüler mikroyapısı ile kanıtlanmış süperiletkenlik özellikleri nedeniyle en yüksek J_c değerlerine sahip olduğunu bulmuştur (64).

Çam ve arkadaşları (2016), ($x = 0.0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.2$) için $\text{Bi}_{1.75-x}\text{Pb}_{0.25}\text{Sb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ süperiletkeninin yapısal ve süperiletken özellikleri üzerindeki antimon (Sb) katkısının etkilerini araştırmıştır. Seramik süperiletken örnekler katı hal tepkime reaksiyon yöntemi ile hazırlanmış ve XRD, SEM ve elektriksel ölçümler kullanılarak incelemiştir. XRD analizi Bi-2212 fazından oluşan numunelerin tüm numunelerde baskın olduğunu ve katkı oranının artmasıyla safsızlık fazlarının arttığını göstermiştir. Düşük sıcaklık fazı Bi-2212 ve yüksek sıcaklık fazı Bi-2223 tepe noktalarının yoğunluğu artan Sb katkısı ile azalmıştır. SEM ölçümlerinden elde edilen yüzey analizi tüm numunelerin rastgele yönlendirilmiş plaka benzeri parçacıklardan oluştuğunu göstermiştir. Direncin sıcaklığa bağımlı olduğu elektriksel özdirenç ölçüm sonuçlarına göre en yüksek

süperiletkenlik geçiş sıcaklığı $x=0.1$ Sb katkılı örnekte 110 K olarak bulunmuştur (65).

Gün ve arkadaşları (2017), Cr katkılı $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1$ ve 0.25) süperiletken seramik örnekleri polietilen yöntemiyle hazırlamış olup, LFZ yöntemi kullanılarak düzgün kristal yapı elde ettiğini göstermiştir. Hazırlanan örnekler XRD, SEM, DA öz direnç ve M-H ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. XRD ölçüm analizleri tüm numunelerin temel olarak Bi-2212 fazından oluştuğunu göstermiştir. Bu durum Cr'nin kristal yapıya yerleşebileceğini göstermiştir. Yüksek oranda Cr katkılı numunelerin mikro yapısı, taneler arasındaki iletkenliği azaltan bazı safsızlık fazlarının ortaya çıktığını göstermiştir. SEM mikroyapı analizi ile elde edilen yüzey görüntülerinde, tüm numunelerin LFZ yönteminin özelliği olan iyi hizalanmış parçacıklardan oluştuğu görülmüştür. Elektriksel öz direnç ölçümünden elde edilen sonuçlar ise, 0.05 Cr katkılı örneğin en yüksek süperiletken geçiş sıcaklığına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca sıcaklık- öz direnç ölçümlerinde $x=0.25$ oranında Cr katkılı örnekte süperiletken geçişi elde edilmemiştir. Manyetik ölçüm sonuçlarına göre ise, $x=0.05$ Cr katkılı numunenin 0.2-0.9 T arasında uygulanan manyetik alanlarda kritik akım yoğunluğu (J_c) değerinin en iyi numune olduğunu ifade etmiştir (66).

Safran ve arkadaşları (2017), $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ bileşiğini kullanarak Bi-2223 yüksek sıcaklıkta süperiletken sisteminde tavlama işleminden sonra numuneler üzerine ikinci presleme (400 MPa) işlemini ve her örneği farklı sürelerde ısıtma işlemi (845°C 'de 40, 60 ve 120 saat) uygulayarak sistemin yapısal mekaniksel ve süperiletken özellikleri incelemişlerdir. Üç farklı yığın numunenin hazırlanması için geleneksel katı hal reaksiyon yöntemini kullanmıştır. Hazırlanan numuneler XRD, elektriksel direnç, manyetik ve mikro sertlik ölçümleri ile analiz edilmiştir. XRD ölçümlerinde yüksek oranda yüksek sıcaklık süperiletken Bi-2223 fazı belirlenmiştir. Manyetizasyon ölçümü ve elektriksel direnç ölçümü ile elde edilen geçiş sıcaklığı ölçümü sonucunda 40 saat ısıtma işlemi görmüş numunede en iyi Bi-2223 faz yapısı olduğu tespit edilmiştir. Mekanik ölçüm sonuçları 0,245-2,940 N kuvvet değerlerinde Vickers mikro sertlik ölçümü ile gerçekleşmiş ve sinterleme işleminden sonra ikinci defa 845°C 'de 40 saat ısıtma işlemi uygulanan numunenin daha iyi mekanik sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir (67).

Arani ve arkadaşları (2018), Bi-2212 kristal yapısına bor oksit ekleyerek temel süperiletkenlik özelliklerini incelemişlerdir. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_y + (\text{B}_2\text{O}_3)$ ($x =$

0.0, 0.05, 0.1, ve 0.2) eşitliğine sahip süperiletken seramik örnekler katı hal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Seramik örnekler XRD, SEM, manyetizasyon ve kritik akım yoğunluğu ölçümleri kullanılarak analiz edilmiştir. XRD ölçümlerinden elde edilen bulgular, numunedeki temel faz yapısının Bi-2212 faz yapısı olduğunu göstermektedir. SEM analizinde $x=0.05$ bor oksit eklenen örneğin daha büyük taneler, daha kuvvetli taneler arası bağlar ve daha az boşluklu yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Manyetizasyon ölçümü ile $x=0.05$ bor oksit katkılı numunenin kritik akım yoğunluğu $J_c = 3.71 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ olarak bulunmuştur ve manyetik histerezis döngüsü ile kritik akım yoğunluğu değerine bakıldığında $x=0.05$ bor oksit katkılı numunenin en iyi numune olduğu görülmüştür (68).

Vera ve arkadaşları (2019), Bi-2212 süperiletken seramik malzemenin Sr bölgesine indiyum (In_2O_3) katkısının örneklerin süperiletkenlik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Örnekler $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{In}_x\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (0.0-0.8) başlangıç bileşiminde katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Hazırlanan örnekler XRD, SEM ve elektriksel direnç ölçümleri ile incelenmiştir. XRD ölçümüne göre Bi-2212 fazının baskın olduğu ve $x=0.4$ ve üzerinde indiyum katkılı numunelerde ikincil fazların oluşumu tespit edilmiştir. SEM ölçümleri sonuçlarında düşük katkılı numunelerde küçük tane yapıları oluşurken katkı oranının yüksek olduğu numunelerde tane yapısının büyüdüğü görülmüştür. Sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümünde ise $x=0.2$ indiyum katkılı numunenin en iyi süperiletken geçiş sıcaklığı değerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir (69).

Shalaby ve arkadaşları (2021), Bi-2223 sistemine farklı oranlarda nano boyutta Bi_2Te_3 katkısının yapısal ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb})_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta})_{1-x}/(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_x$ ($x=0.00, 0.01, 0.02$ ve 0.03) başlangıç bileşiminde katı hal reaksiyon yöntemi ile üretilmiştir. Hazırlanan örnekler XRD, SEM, EDX ve manyetik ölçümler ile analiz edilmiştir. XRD ölçümünde ana fazların Bi-2212 ve Bi-2223 fazları olduğu bulunmuştur. SEM ölçümleri ile elde edilen sonuçlar ile, plaka benzeri bir tane yapısı gözlemlenirken, artan Bi_2Te_3 ilavesiyle tane boyutu azalmış ve gözeneklilik artmıştır. Manyetizasyon (M-T) sonuçlarından elde edilen bulgular, $x=0.00$ katkılanmamış malzemenin kritik akım yoğunluğunun (J_c) diğer numunelere göre daha iyi olduğunu göstermiştir (70).

Doğruer ve arkadaşları (2021), Bi-2223 süperiletken sisteminde Sr bölgesine neodyum (Nd) katkılanması yaparak akı pinleme mekanizmasındaki

değişim ile fiziksel, mekanik ve yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Örnekler $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9-y}\text{Nd}_y\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($0 \leq x \leq 0.1$) bileşimde katı hal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler SEM, DA öz direnç, statik ve dinamik mikro sertlik ölçümleri ile analiz edilmiştir. SEM ölçümleri Nd katkılamaının tane bağlantıları ve yüzey morfolojisinde önemli ölçüde bozulmalara yol açtığını göstermiştir. Elektriksel ölçüm sonuçlarına bakıldığında, saf numunenin en iyi manyetik performansa sahip olduğu ve Nd katkı miktarı arttıkça manyetik özelliklerin azaldığı görülmüştür. Statik mikro sertlik sonuçlarına bakıldığında her numunenin girinti boyutu etkisi çentik bölgesi davranışı gösterdiği görülmektedir. Dinamik micro sertlik sonuçlarında ise, uygulanan yük (1, 2, 3, 4, ve 5 N) büyüklükleri ile sertlik değerleri artmıştır. Sonuç olarak, tüm numuneler için uygulanan yükün artmasıyla sertlik değerlerinin arttığını ifade etmişlerdir (71).

Literatür çalışmalarından da anlaşılacağı gibi BSCCO süperiletkenleri ile kullanılan Nb, B, Cd, Sn, Ag, Pb, Ni, Na gibi birçok faydalı element yapının süperiletkenlik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir.

4. DENEYSEL YÖNTEMLER

4.1 Katı Hal Reaksiyon Yöntemi

Süperiletken malzemeler üretmek için birçok işlem süreci vardır. Mükemmel fazlar elde etmek için istenen numuneler yoğun, daha düşük gözenekli, daha büyük taneler ve iyi tanımlanmış mikro yapılar olmalıdır. Katı hal teknikleri genellikle toz sentezi, stokiometrik oksitlerin karıştırılması, öğütme, biçimlendirme, presleme ve tavlamaya dayanır (72–75).

4.2 Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada BPSCCO-2223 sistemine nikel oksit (NiO) ilavesinin etkisi incelenmiştir. Başlangıç malzemeleri ticari olarak temin edilebilen %99,99 saflıktaki hazır $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Ca}_{2.2}\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Alfa Aesar Co., Ltd.) ve NiO tozlarıdır. $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Ca}_{2.2}\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_y + x(\text{NiO})$ nominal bileşiği $x = 0.0, 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$ ve 1.2 mol oranlarında standart katı hal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmıştır.

İlk olarak yüksek saflıktaki $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Ca}_{2.2}\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (BPSCCO) tozu, ağırlıkları ve boyutları farklı seramik bilyeler ile cam bir kaba (1g toz/4g bilye) oranında konulmuş, 2 saat boyunca karıştırma makinesinde (Fotoğraf 4.1) bilyeli öğütme (ball-milling) yapılarak karıştırılmış ve öğütülmüştür. Öğütme ve karıştırma işlemi daha homojen ve daha ince tanecikli bir toz elde etmek için yapılır. Deneyde kullanılan karıştırma makinesi Fotoğraf 4.1’de gösterilmiştir.



Fotoğraf 4.1. Karıştırma makinesi

Öğütme işleminden sonra homojen toz 800°C’de 24 saat 5°C/dk ısıtma ve soğutma hızında kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bilindiği gibi sinterleme işlemine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi, toz içerisindeki nemin uzaklaştırılması ve istenmeyen karbonların serbest kalmasına yardımcı olur. Süperiletken numune hazırlanırken bu süreç, safsızlık fazlarının oluşumundan kurtarılmasında hayati bir rol oynar.

Kalsinasyon işleminden sonra NiO tozları $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Ca}_{2.2}\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_y + x(\text{NiO})$ başlangıç bileşiğinde 6 farklı molar oranda $x = 0.0, 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$ ve 1.2 katkılanmıştır. Homojen bir yapı elde edebilmek için katkılama yapılan her bir karışım akik havanda 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen karışım sıkıştırılması için 25mm x4mm boyutunda kalıp kullanılarak oda sıcaklığında SPECAC (Model GS25011) hidrolik pres kullanılarak 0.98 GPa basınç altında 3 dakika preslenmiş ve külçe şeklinde dikdörtgen çubuklar elde edilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan hidrolik pres Fotoğraf 4.2’de verilmiştir.



Fotoğraf 4.2. SPECAC (Model GS25011) hidrolik pres

Preslenen numuneler süperiletken fazları oluşturmak, yapısal kristal kusurlarını en aza indirmek, polikristaller oluşturmak ve atomlar arasındaki bağları güçlendirmek için sinterlenmelidir. Hazırlanan külçe formundaki numuneler PROTHERM (Model PTF 12/75/200) programlanabilir kül fırını kullanılarak 840°C sıcaklıkta 36 saat 5°C/dk ısıtma ve 5°C/dk soğutma hızında sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi için kullanılan kül fırınının görseli Fotoğraf 4.3’te verilmiştir.

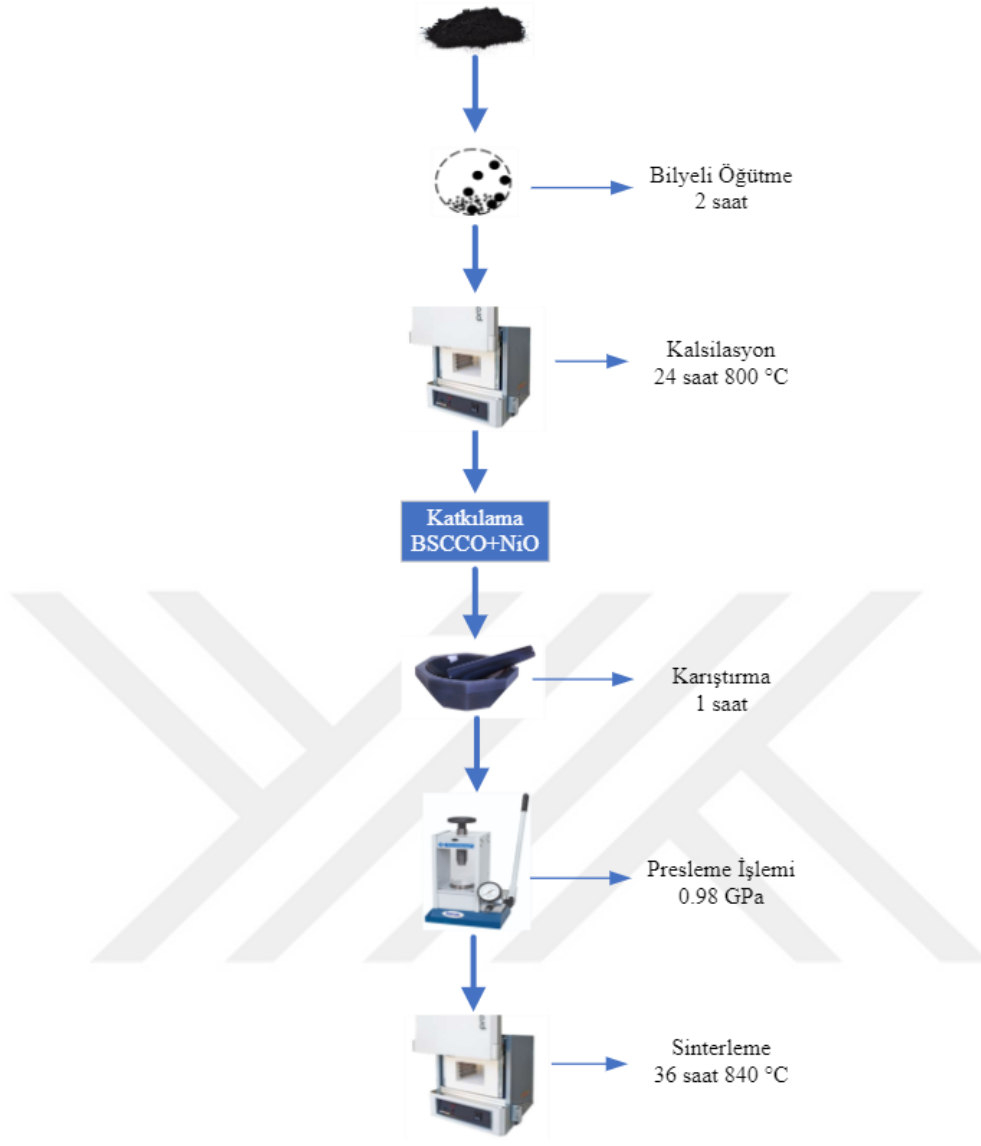


Fotoğraf 4.3. PROTHERM (Model PTF 12/75/200) programlanabilir kül fırını

Sinterleme işleminden sonra $x = 0.0, 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$ ve 1.2 molar oranlarında katkılanan numuneler sırasıyla Ni0, Ni1, Ni2, Ni3, Ni4 ve Ni5 olarak isimlendirildi ve ölçüm için hazır hale getirildi. Şekil 4.1’de numunelerin hazırlanış süreci akış şeması olarak gösterilmektedir.

4.1 Deneysel Ölçümler

Deneysel olarak üretilen NiO katkılı BPSCCO seramik süperiletkenlerin yapısal, elektriksel ve mekanik özelliklerini analiz edebilmek için X-ışını kırınım ölçümü (XRD), taramalı elektron mikroskobu ölçümü (SEM), elektriksel özdirenç (R-T), DA manyetizasyon ve dinamik Vickers mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirildi. Ölçüm yöntemleri devam eden bölümlerde açıklanacaktır.



Şekil 4.1. Numune hazırlanış prosedürü

4.1.1 X Işını Kırınım (XRD) Ölçümü

X-Işını difraktometresi, bir malzemenin yapısını saçılma modelinden incelemek için en önemli araçlardan biridir. Çalışma mekanizması, yüksek enerjili radyasyon ışınları veya yüklü parçacıklar ile bir malzeme arasındaki etkileşime bağlıdır. Bu çalışmada, numunelerin faz bileşimleri, kristal yapı analizleri ve örgü parametrelerinin tespiti için oda sıcaklığında 36 kV ve 26 mA gücünde 1.54 Å dalgaboyuna sahip $K\alpha$ ışınına sahip X-ışınları yayan bilgisayar kontrollü Rigaku Multiflex+XRD 2 kW difraktometre cihazı kullanılmıştır. X-ışını kırınımı ölçümünde kullanılan cihaz Fotoğraf 4.4’de verilmiştir. Kırınım ölçümleri $2.50^\circ/\text{dk}$ tarama hızında ve $2\theta = 3-65^\circ$ aralığında gerçekleştirildi. XRD ölçümünden

elde edilen pik değerleri Uluslararası Kırınım Verileri Merkez (ICDD) yazılımı vasıtasıyla analiz edilerek örneklerdeki farklı süperiletken fazları ve Miller indis değerleri saptanmıştır.



Fotoğraf 4.4. Rigaku MultiFlex 2kW X-Işını kırınım ölçeri

4.1.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümü

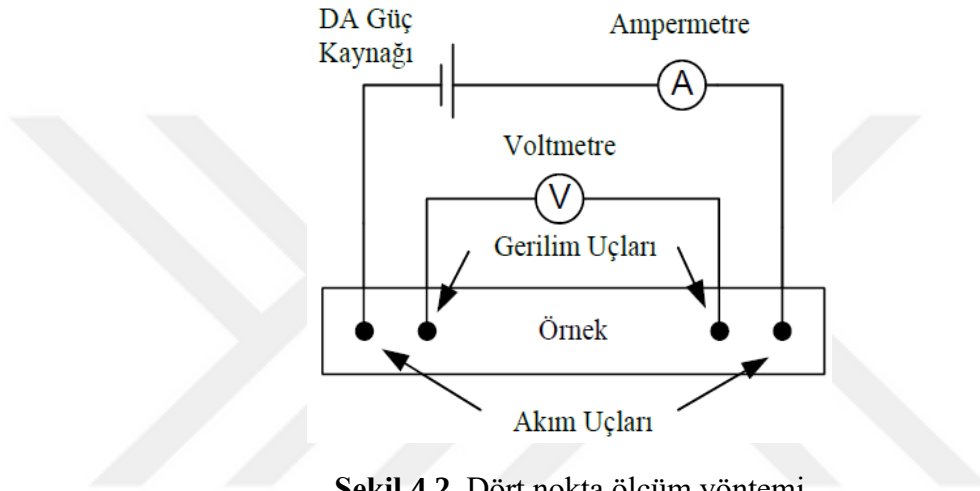
Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek enerjili bir elektron demeti yardımıyla bir malzemenin yüzey morfolojisini tespit etmek için kullanılır. Bu çalışmada numunelerin taneleri arasındaki olası çatlak, boşluk ve sınırların dağılımları gibi parametreler FEI Quanta FE-SEM elektron mikroskobu ile 20 kV harici voltajlarda $\times 1500$ büyütmede görüntü alınarak gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 4.5'te taramalı elektron mikroskobu ölçüm cihazı gösterilmiştir.



Fotoğraf 4.5. FEI Quanta FE-250 20 kV Taramalı electron mikroskobu

4.1.3 Elektriksel Direnç (R-T) Ölçümü

Hazırlanan numunelerin elektriksel özellikleri, sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümü yapılarak incelenmiştir. Bu ölçüm ile numunelerin süperiletkenliğe geçiş sıcaklığını (T_c) belirlendi. Elektriksel öz direnç ölçümleri standart dört nokta yöntemi ile elde edilmiştir. Dört nokta yöntemi ile malzemenin yüzeyine gümüş pasta ve bakır teller ile birbirine paralel 4 kontak notası yapılmıştır. Bu kontak noktalarından dış tarafta olanlara akım kaynağı vasıtası ile akım verilir ve iç kısımda olan iki kontak notasından voltmetre aracılığı ile potansiyel fark ölçülür.



Şekil 4.2. Dört nokta ölçüm yöntemi

Bu çalışmada sıcaklık-öz direnç ($R-T$) ölçümleri süperiletkenliğe geçiş sıcaklığının (T_c^{onset} ve T_c^{offset}) belirlenmesi için 30-300 K sıcaklık aralığında ve helium gazı bulunan kapalı döngü bir kriyojenik soğutma sisteminden yararlanılmıştır.

4.1.4 Manyetizasyon (M-H) Ölçümü

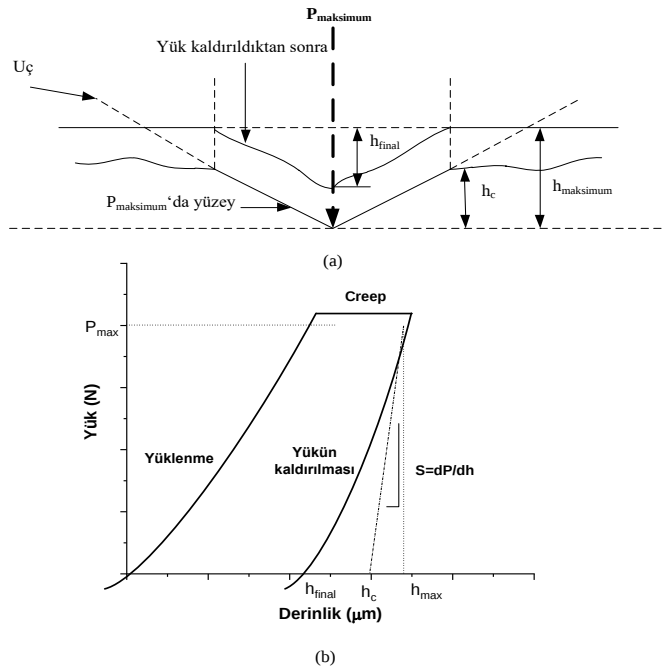
Teknolojide süperiletken malzemelerin elektriksel iletim uygulamalarına ek olarak bu malzemelerin diyamanyetik özelliklerde kullanımı da önemli bir uygulamadır. Bu nedenle, süperiletken malzemelerin geliştirme araştırmalarında manyetik analiz de oldukça önemlidir. Numunelerin manyetik özelliklerinin belirlenmesinde manyetizasyon histerezis eğrilerinden yararlanılmıştır. Manyetik histerezis eğrileri süperiletken numunelerin diyamanyetik davranışını gösteren önemli bir grafikdir ve histerezis eğrilerinin altında kalan alan (dM/dH) numunelerin duymunluğunu, yani süperiletken özelliğin kaybolması için gerekli

minimum enerji miktarını ifade eder. Ayrıca, DA manyetik alanın bir fonksiyonu olarak kritik akım yoğunluğu (J_c) hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin manyetik ölçümleri 7407 model Lake Shore titreşimli numune manyetometresi (VSM) sistemi ile yapılmıştır. Ölçümler 15 K sıcaklıkta ve ± 2 T manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir.

4.1.5 Dinamik Mikrosertlik Ölçümü

Bu çalışmada kullanılan Vickers mikro girinti tekniğinde mekanik parametreler hem plastik hem de elastik deformasyon dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu tür ölçümlerde malzemenin mekanik özellikleri hesaplanabilir. Malzemenin mekanik davranışının anlaşılabilmesi için elastik modülü (E) ve mikrosertlik (H) değerleri bu deneyler sonucu elde edilmiştir. Girintinin enine kesit görünümü ve dinamik girinti ölçümlerinden elde edilen yükleme/boşaltma penetrasyon derinliği eğrisinin bir örneği Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca yükleme/boşaltma işlemi sırasında, malzeme elastik ve plastik deformasyona maruz kalır. Şekilde h_f son temas derinliğini ve h_{max} , maksimum temas derinliğini göstermektedir.



Şekil 4.3. (a) Girintinin kesit görünümü, (b) Örnek yükleme/boşaltma-derinlik eğrisi (76)

Malzemenin sertliğini ve elastik modülünü belirlemek için, yükleme/boşaltma penetrasyon derinliği eğrisinden tepe yükü (P_{max}), temas alanı (A_c) ve ilk yük boşaltma temas sertliği (S) tanımlanabilir. Mikro girinti sertliği aşağıdaki denklem 4.1’de tanımlanmıştır.

$$H = \frac{P_{max}}{A_c} = \frac{P_{max}}{24.5h_c^2} \quad (4.1)$$

Burada $A_c = \pi h_c^2 \tan^2 \alpha$, girinti baskısının alanıdır ve h_c , Şekil 4.3 (b)’de gösterildiği gibi boşaltma eğrisinin ayarlanmasıyla hesaplanan temas derinliğidir. Bir Vickers veya Berkovich girintisi için, temasın öngörülen alanı $A_c = 24.5h_c^2$ ’dir ve bu bağlamda eşdeğer bir konik girinti için yarı çapı 70.3 alınabilir. Yük boşaltma eğrilerinden temas derinliğini (h_c) belirlemek için farklı yaklaşımlar yapılmıştır. Bu yaklaşımlardan biri de 1992’de Oliver ve Pharr (77) tarafından bulunmuştur. Oliver ve Pharr yöntemi, boşaltma eğrisini ampirik bir güç yasası ilişkisine eğri uydurmakla başlar.

$$P = \alpha(h - h_f)^m \quad (4.2)$$

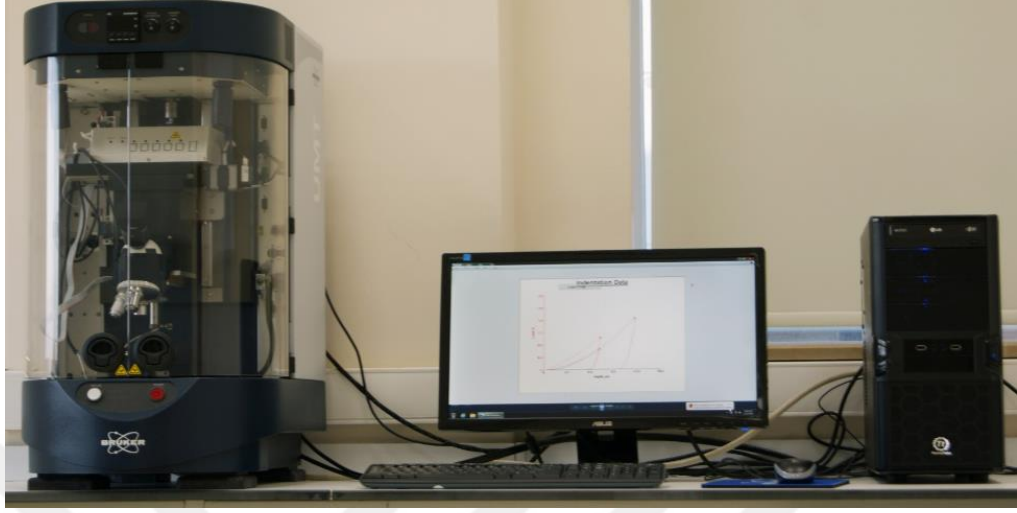
Burada P uygulanan yük, h girintinin diyagonal uzunluğu, h_f nihai derinlik, α ve m montaj parametreleridir. Boşaltma eğrisinin ilk kısmı ve denklem 4.2 kullanılarak rijitlik değeri şu şekilde hesaplanır (78).

$$S = \left| \frac{dP}{dh} \right| = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_c} \quad (4.3)$$

Burada E_r , indirgenmiş elastik modülüdür. Bu çalışmadaki mekanik özellikler yukarıda bahsedilen Oliver ve Pharr yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Malzemelerin mekaniksel özellikleri, Vickers uçlu dinamik ultra mikro sertlik test cihazı (Bruker UMT TriboLab) kullanılarak analiz edilmiştir. Malzeme davranışının incelenmesi için örnekler 10 s süre ile 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 ve 2 N gibi sistematik farklı yüklemelere maruz bırakılmıştır. Dinamik mikrosertlik ölçümlerinde elde edilen temas derinliği (h_c), elastik modülü (E_r) ve maksimum yük (P_{max}) ölçüm verileri elde edilmiştir. Daha sonra bu ham veriler yük-derinlik

grafiklerini elde etmek için kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümünde kullanılan cihaz Fotoğraf 4.6’da verilmiştir.

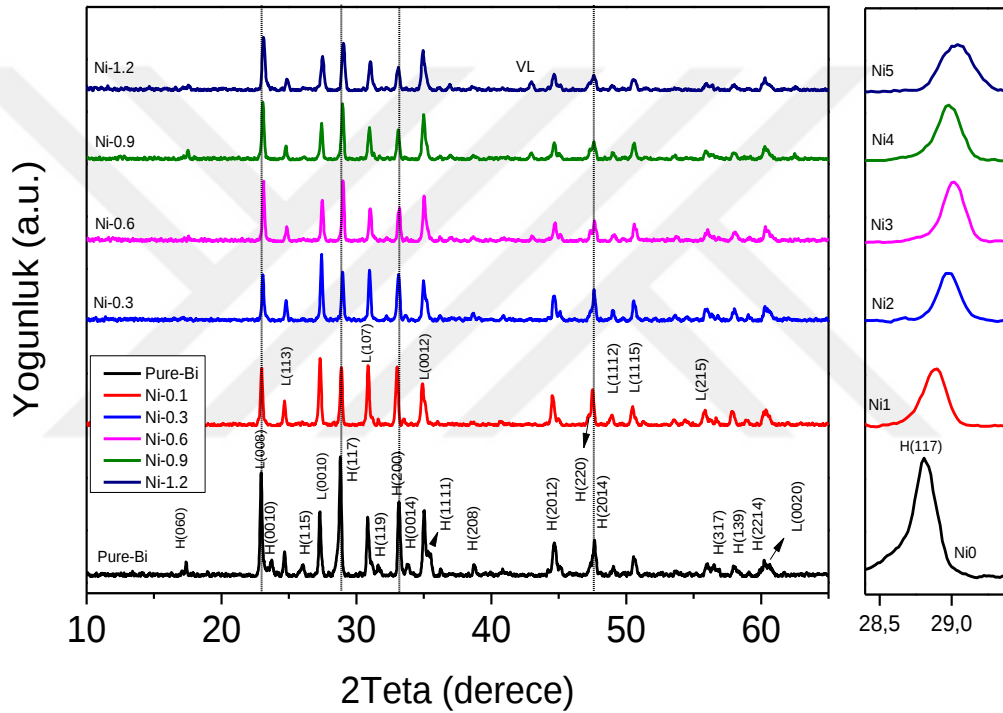


Fotoğraf 4.6. Ultra mikro sertlik test sistemi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 X-Işını Kırınım (XRD) Ölçümü Analizi

Bi-seramikte kristal yapı ve olası çok fazın varlığı Bi-seramiklerin süperiletkenlik özelliklerini kesin olarak etkiler (79–81). Bu nedenle, NiO ilavesinin, Bi-seramiklerin faz teşhisi/kayması, kafes parametreleri ve kristal boyutu dahil olmak üzere kristalografik yapı üzerindeki etkisi, numunelerin X-ışını kırınım (XRD) spektrumlarının analizi yoluyla tanımlanmıştır. Saf-Bi ve Ni katkılı Bi-seramiklerin ölçülen XRD spektrumları Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Saf ve Ni katkılı Bi-seramiklerin XRD spektrumları ve karakteristik H(117) zirvesinin genişlemesiyle birlikte.

XRD spektrumlarında gözlenen tepe noktaları, Uluslararası Kırınım Verileri Merkezi (ICDD) yazılım paketi aracılığıyla endekslenmiştir. Şekil 5.1'deki saf-Bi örneklerinin pikleri, Bi-seramiklerin tetragonal Bi-2223 ve Bi-2212 fazı (ICDD no: 46-0780 ve 46-0545) ile iyi uyum sağlamıştır. Bi-2223 fazı Bi-seramik süperiletkenler (82) için yüksek T_c değeri sergilediği için, bu Bi-2223 fazı XRD spektrumlarında “H” olarak gösterilirken Bi-2212 fazı “L” olarak Şekil 5.1’de gösterilmiştir. NiO örneğinde hem yüksek hem de düşük fazlar bulunur. Bi-

seramiklere Ni ilavesi ile fazlardaki pik yoğunlukları ve fraksiyonel değişiklikler açıkça görülmüştür. Ni ilavesiyle Bi-seramiklerin yüksek fazının genel yoğunlukları azalmış ve H(0010), H(115), H(119) faz spektrumlarının varlığı görünmez hale gelmiştir. Ayrıca, Ni katkı konsantrasyonu 0.3 molara ulaştığında ve aşıldığında, Şekil 5.1'de VL olarak gösterilen Bi-seramik süper iletkenin (83) Bi-2201 fazına ait yeni bir faz meydana gelmiştir. Kristal yapıdaki baskın fazları belirlemek için saf ve Ni katkılı Bi-seramiklerin yüksek (Bi-2223), düşük (Bi-2212) ve çok düşük (Bi-2201) faz konsantrasyonunun (f) yüzdeleri denklem 5.1, 5.2 ve 5.3 ile hesaplanmıştır.

$$f_{(2223)} = \frac{\sum I_{(2223)(hkl)}}{\sum I_{(2223)(hkl)} + \sum I_{(2212)(hkl)} + \sum I_{(2201)(hkl)}} \quad (5.1)$$

$$f_{(2212)} = \frac{\sum I_{(2212)(hkl)}}{\sum I_{(2223)(hkl)} + \sum I_{(2212)(hkl)} + \sum I_{(2201)(hkl)}} \quad (5.2)$$

$$f_{(2201)} = \frac{\sum I_{(2201)(hkl)}}{\sum I_{(2223)(hkl)} + \sum I_{(2212)(hkl)} + \sum I_{(2201)(hkl)}} \quad (5.3)$$

Burada I, mevcut fazların en yüksek yoğunluklarıdır. Hesaplanan f değerleri Tablo 5.1'de listelenmiştir. Bi-seramiklerin yüksek fazı, saf Bi numuneler için kristal yapıya hakimdir. Ni ilavesiyle birlikte Bi-seramiklerin düşük fazları kristalografide baskın hale gelir. 0,9 molar Ni ilavesine kadar, düşük Bi-2212 fazının katkısı kademeli olarak artar. Ni konsantrasyonu 0.9 molara ulaştığında, yüksek Bi-2223 fazının konsantrasyonu %35.8'den %38.7'ye yükselirken, düşük Bi-2212 fazının bir kısmı azalır. Ni içeriğindeki daha fazla artış, düşük Bi-2212 fazını geliştirir. Bu gözlem, Ni içeriği 0.3 Molar'ı aştığında kristal yapıda iki yönlü faz değişikliklerinin mevcut olduğunu ve Bi-2223 ve Bi-2212 fazı arasında hiçbir sistematik faz evrimi olmadığını göstermektedir. Öte yandan, çok düşük Bi-2201 fazının varlığı, 0.6 molar Ni ilavesinden sonra görünür hale gelmekte ve Ni içeriğinin artmasıyla oranı %1.5'ten %3.7'ye yükselmektedir. Gözlenen çift yönlü faz değişiklikleri, Ni ve Bi-seramiklerin elementleri arasındaki ikame reaksiyonuna bağlanabilir. Dissanayake ve arkadaşları, BSCCO sisteminde Ni atomlarının Cu ile yer değiştirdiğini bildirmiştir (84). Memon ve Tanner, Ni'nin öncelikle Bi atomları ve kısmen de Cu atomları ile ikame edildiğini bildirmiştir (85). Öte yandan, Çelebi, Ni ve Ca bölgeleri arasındaki yer değiştirme sayesinde nominal bileşimsel

stokiyometrinin üretildiğini bildirmektedir (86). Bazı durumlarda, katkı atomları ve BSCCO atomları arasında çoklu ikame reaksiyonu meydana gelebilir (87). Bu nedenle, iki yönlü faz değişiklikleri, Ni içeriğine bağlı olarak farklı kısımlara sahip Ni ve BSCCO atomları arasındaki çoklu ikame reaksiyonu ile ilişkilendirilebilir. Küçük atom yarıçapı (88) ve BSCCO malzemelerindeki elementlere kıyasla Ni'nin benzer/daha yüksek elektron ilgisi ile bu çoklu ikame reaksiyonu olasılıklarını destekler.

Ölçülen XRD difraktogramları, baskın fazın, saf-Bi numuneleri için BPSCCO sistemlerinin yüksek (Bi-2223) fazı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, H(117) düzleminin karakteristik piki, tüm numunelerin kristal boyut gelişimi için kullanılmıştır. Ni ilavesinden önce ve sonra H(117) zirvesinin genişlemesi Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Artan Ni içeriği ile H(117) tepe konumunun neredeyse daha yüksek açılara doğru kaydığı, yoğunluk ve genişleme değerlerinin Ni ilavesine bağlı olarak farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Pik pozisyonundaki bu varyasyonlar aynı zamanda Ni atomlarının saf BSCCO kristal matrisine dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır.

H (117) düzleminin tepe genişleme değerlerinde elde edilen varyasyonlar kullanılarak, ortalama kristal tane boyutu (D) denklem 5.2 ile hesaplanmıştır.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (5.4)$$

Burada β , karakteristik H(117) düzleminin FWHM'sidir, λ ($= 1.54 \text{ \AA}$) XRD'de kullanılan X-ışınının dalga boyudur ve θ , Bragg açısıdır. Hesaplanan D değerleri de Tablo 5.1'de verilmiştir. D değeri Ni konsantrasyonuna bağlı olarak 46.1 nm ile 29.3 nm arasında değişmektedir.

Tablo 5.1. Bi bazlı seramiğin bazı kristalografik parametreleri

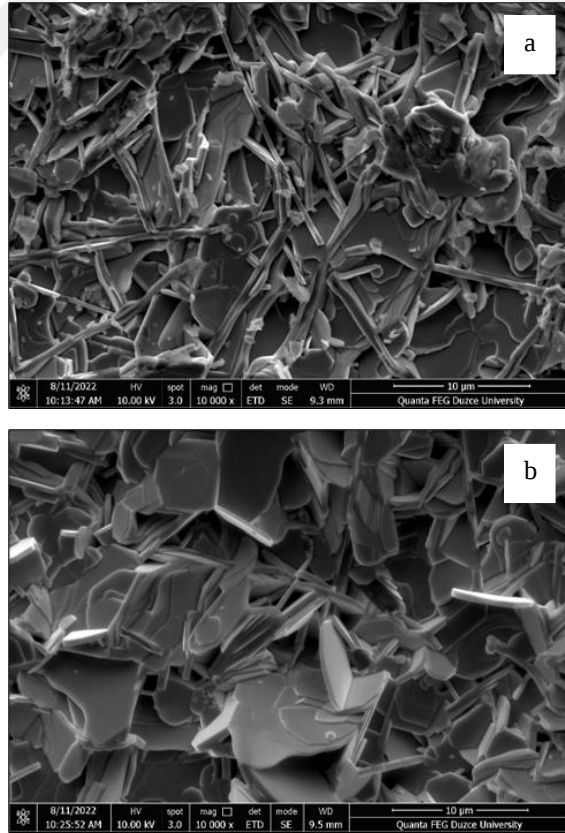
ID	Hacim Kesri (%)			Ortalama Tanecik Boyutu (nm)	a ve b (Å)	c (Å)
	Bi-2223	Bi-2212	Bi-2201			
Ni0	54.7	45.3	-	46.1	5.420	36.87
Ni1	41.9	58.1	-	43.2	5.419	36.44
Ni2	38.9	61.1	-	39.1	5.402	36.40
Ni3	35.8	62.7	1.5	41.5	5.395	36.41
Ni4	38.7	58.7	2.6	37.4	5.406	36.34
Ni5	35.4	60.9	3.7	29.3	5.408	36.15

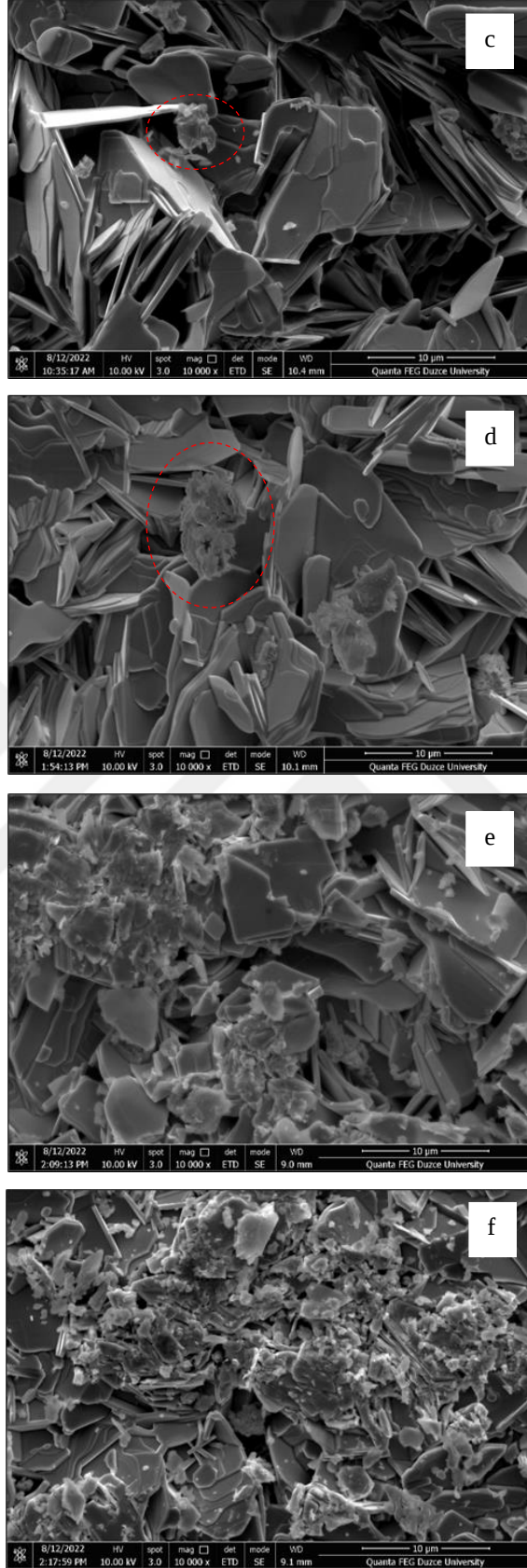
Tablo 5.1'de görüldüğü gibi, Ni konsantrasyonu arttıkça Ni3 numunesi dışında D değerleri neredeyse dramatik bir şekilde düşmektedir. Ortalama tane boyutunda gözlemlenen azalma, tane bağlantısını bozabilir. Tane boyutu düşük malzemeler olarak taneler arasındaki sınır sayıları artar. Hareketli yüklerin saçılacağı ve/veya tutulabileceği (89,90) tane sınırları arasında bulunan çok sayıda kusurlu bölge nedeniyle, elektriksel/süper iletken özellikler, zayıf tane iletkenlik özelliklerinden (91) zarar görebilir. Ayrıca a ve c parametrelerinin kafes sabiti de ilgili yüksek fazlı dörtgen yapının d değeri ve karşılık gelen (hkl) düzlemleri kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmıştır (92). Kafes parametrelerinin hesaplanması sırasında H(117) ve H(200) düzleminin tepe dağılımı kullanılmıştır. Bi-2223 fazının tipik kafes sabitleri $a = 5.41 \text{ Å}$ ve $c = 37.2 \text{ Å}$ 'dir (ICDD kart no: 46-0780'de) ve Bi-seramiklerin hesaplanan a ve c değerleri Tablo 5.1'de listelenmiştir. Ni0 örnekleri için a'nın parametreleri tipik değerlere yakinken, c parametreleri ICDD'den elde edilen tipik değerden biraz daha küçüktür. Bu, Ni0 numunesi için sıkıştırma stresinin varlığına işaret edebilir. Hem a hem de c kafes parametreleri, Ni konsantrasyonunun varlığına bağlı olarak değişiklik gösterir. Ni1 numuneleri için c değerinde keskin bir düşüş gözlemlenirken, bir parametre hemen hemen aynı kalmıştır. Ni miktarının konsantrasyonunda daha fazla artış, özellikle Ni2 numunesi için a değerinde keskin bir düşüş de gözlenmiştir. Ni3, Ni4 ve Ni5 numuneleri için Ni içeriğinde sistematik olmayan varyasyonların daha da arttığı gözlemlenmiştir. Literatürde a'nın hücre parametresinin Cu-O sitelerinin düzlem uzunluğu tarafından kontrol edildiği rapor edilmiştir (92,93). Ek olarak, c parametresinin düşüşü, Bi, Sr ve/veya Ca'dan (93)

daha küçük olan Ni (88) yarıçapı dikkate alınarak anlaşılabilir. Bu gözlem, Ni'nin BCSSCO matrisine dahil edildiğini ve Ni içeriğine bağlı olarak çoklu trafo reaksiyonlarının varlığını gösterir. Bu bulgular, (85)'de daha önce bildirilen çalışma ile uyumludur. XRD analizi, toplu Bi-2223 seramik matrisindeki Nikel ilavesinin yalnızca yüksek faza önemli ölçüde zarar vermekle kalmayıp, aynı zamanda düşük ve safsızlık fazlarını da güçlendirdiğini göstermiştir. Bunun nedeni, nikelin kurtarılamayan yapısal sorunlara, bozukluklara, bozulmalara, kafes gerilmelerine, tane yanlış yönlendirmelerine ve tane sınırı birleştirme etkileşim sorunlarına yol açmasıdır (94).

5.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümü Analizi

Bi-2223 seramiklerinin yüzey morfolojik evrimi, tane dağılımındaki herhangi bir bozulma, Bi-seramiklerin süperiletken özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilecek tane bağlantısını etkilemesi nedeniyle çok önemlidir. Bu nedenle, üretimi yapılmış Bi-seramiklerin SEM görüntüleri Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



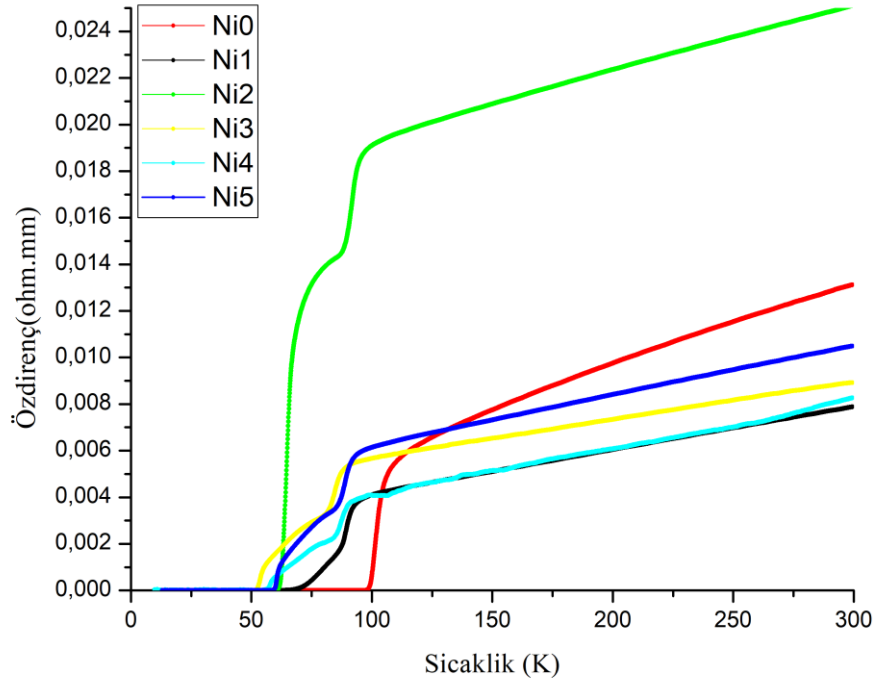


Şekil 5.2. (a) Ni0, (b) Ni1, (c) Ni2, (d) Ni3, (e) Ni4 ve (f) Ni5 numunelerinin SEM görüntüsü

Bu mikrograflar, özellikle NiO numunelerinde HTS Bi-2223 faz oluşumunun (80,95) tipik bir yapısı olan çeşitli boyutlarda plaka benzeri taneler sergiler. Plaka benzeri tanelerin boyutu, NiO numunesine kıyasla Ni1'de geliştirilmiştir. Yüzey tanelerinde boyut artışına rağmen, Ni1'deki tam taneler arasındaki bağlantıların NiO numunelerine göre daha zayıf olduğu görülmektedir. Özellikle Ni4 ve Ni5 için Ni içeriğindeki daha fazla artış, trombosit benzeri tane şekillerinin pul pul katmanlarına belirgin şekilde zarar verir. Ni ilavesi $x=0.3$ 'e ulaştığında, ana dokunun bazı bölgelerinde erimiş oluşumların (71,95) (kırmızı daire ile gösterilmiştir) olduğuna dikkat edilmelidir. Ni içeriği arttıkça, ergime oluşumunun dağılımı artar, bu da sadece homojen olmayan oluşumların hızlı büyümesine değil, aynı zamanda Bi-seramiklerin kristallik kalitesini bozan taneler ve boşluklar arasındaki zayıf bağların artmasına neden olur (71,95–97). Sonuç olarak, Ni ilavesinin varlığı, Bi-seramik sistemde tane sınırı birleştirme-etkileşim sorunlarına neden olan yerel yapısal sorunlara, kısmi erime bölgelerine, doku bozulmasına yol açar.

5.3 Elektriksel Direnç ($R-T$) Ölçümü Analizi

NiO katkılama oranı farklı $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$ örnekleri için genel elektriksel ve süperiletkenlik özellikleri, 30 K ila 300 K arasında alınan sıcaklığa bağlı elektriksel öz direnç ölçümleri, 10 mA doğru akım altında Helyum kapalı çevrim kriyostat sisteminde dört kontak yöntemi ile deneysel olarak araştırılmıştır. Tüm öz direnç eğrileri Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Şekilden NiO katkılanmış Bi-2223 numunelerine ait karakteristik sıcaklığa bağlı öz direnç eğrilerinin NiO katkı oranına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Ayrıca, tüm NiO katkılı Bi-2223 numuneleri, başlangıç geçiş sıcaklığının ötesinde sıcaklığa karşı elektrik direncinin pozitif lineer varyasyonu (Fermi enerji seviyesinde elektronik durumların (DOS) logaritmik dağılımına dayalı olarak) ile standart metalik benzeri özelliği sunmaktadır (98,99).



Şekil 5.3. Saf ve farklı oranlarda NiO katkılanmış Bi bazlı seramiklerin sıcaklık-özdirenç eğrileri

Şekil 5.3'teki grafiklere göre, 0.1 mol oranında NiO katkılanan $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$ seramik numunesi, saf numune hariç diğer numunelere nazaran daha büyük oranda bir mikrokristal birleşme yönelimi, kimyasal olarak kararlı bağların oluşumu, yüzey morfolojik özellikleri, taneler arasındaki bağlantılar ve düşük mikroskobik yapısal problemleri göz önüne sermektedir. XRD ve SEM bulguları bu tartışmayı desteklemektedir. Sıcaklık-özdirenç deneysel verileri aynı zamanda numunelerin temel elektriksel ve süperiletken niceliklerindeki farklılıkları değerlendirmemiz amacıyla bazı büyüklüklerin tespitinde kullanılmıştır. Bu büyüklükler; farklı oranlarda NiO katkılanmış Bi-2223'ün oda sıcaklığında özdirenç değeri (ρ_{300K}), artık-direnç (ρ_{res}), artık-direnç oranı (RRR), ρ_{115K} , ρ_{norm} , $\Delta\rho$, ofset geçişi (T_c^{offset}), onset (T_c^{onset}) kritik sıcaklıkları ve kritik geçiş sıcaklığı genişliğidir ($\Delta T_c = T_c^{onset} - T_c^{offset}$). Tablo 5.2'de tüm temel elektrik özdirenç parametreleri sayısal olarak verilmiştir.

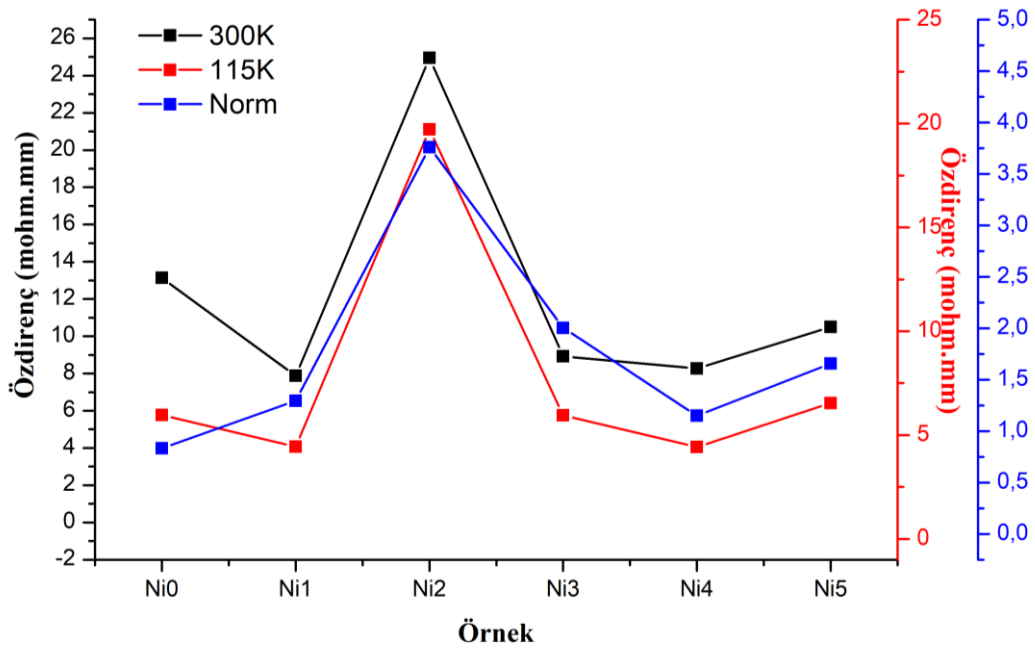
Tablo 5.2. Oda sıcaklığı öz dirençleri, artık öz dirençler, artık öz direnç oranları, ρ_{norm} ve $\Delta\rho$ dahil olmak üzere çeşitli öz direnç değerleri.

Numune	ρ_{115K} (m Ω .mm)	ρ_{300K} (m Ω .mm)	RRR (ρ_{300K}/ρ_{115K})	$\Delta\rho$ ($\rho_{300K}-\rho_{115K}$) (m Ω .mm)	ρ_{norm} ($\rho_{115}/\Delta\rho$)
Ni0	5.9677	13.13	2.2002	7.1623	0.8332
Ni1	4.447	7.878	1.7715	3.431	1.296
Ni2	19.715	24.957	1.2658	5.242	3.7609
Ni3	5.955	8.926	1.4989	2.971	2.0044
Ni4	4.422	8.271	1.8704	3.849	1.1489
Ni5	6.542	10.49	1.6035	3.948	1.657

Oda sıcaklığında öz direnç değerinin (ρ_{300K}) ilk parametresine gelince, saf numune maksimum 13.13 m Ω .mm değerine sahipken, Ni1 numunesi minimum 7.878 m Ω .mm değerine sahiptir. Daha yüksek katkılama değerine sahip diğer numuneler için bir artış bulunmaktadır. Bu bağlamda Ni2, Ni3, Ni4 ve Ni5 örnekleri sırasıyla 24.957, 8.926, 8.271 ve 10.49 m Ω .mm ρ_{300K} parametresine sahiptir. ρ_{300K} değerlerine dayanarak, NiO katkılama oranının; kristal yapı kalitesi, Cu-O₂ ara katman birleştirme güçleri ve süperiletken taneler arasındaki etkileşim güçleri üzerinde çok önemli bir rol oynadığı açıktır. Bu temelde kristal yapıdaki mikroskobik yapısal problemlerdeki azalma nedeniyle iyi kristallik kalitesini göstermesi ile alakalıdır.

DeneySEL sonuçlar, NiO katkısının temel kristal yapı kalitesini ciddi şekilde etkilediğini göstermektedir. Aynı zamanda, saf ve NiO katkılı Bi-2223 seramik numunelerinin 115 K'deki (ρ_{115K}) elektrik öz direnç değerleri NiO katkısının, çatlak kusurlar, kafes gerinim alanları, kalıcı yapısal problemler, ana matris ile birlikte tane içi/taneler arası sınır eşleşmeleri ve kirlilik saçılmaları üzerindeki etkisini araştırmak için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Tablo 5.2'de Ni2 numunesinin en büyük ρ_{115K} değerine sahip olduğunu (24.957 m Ω .mm) göstermektedir. Buna göre Ni malzemesinin küçük oranlarda katkılanmasının iyi bir tercih olduğu söylenebilir. Bu nedenle, deneySEL sonuçlar, yüksek kaliteli malzeme üretimi için 0.1'den daha küçük bir değer olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, 0.1'in altındaki değerlerde, ana matris ile birlikte çatlak oluşturan kusurları, kafes gerinim alanlarını, geçirgen yapısal sorunları, tane içi/taneler arası sınır bağlantılarını ve

safsızlık saçılmalarını önemli ölçüde azaltacağını düşünülmesidir. Ayrıca Tablo 5.2’de elektriksel özdirenç grafiklerinden yararlanılarak, farklı oranlarda NiO katkılanmış Bi-2223 örnekleri ile kristal yapı kalitesi ve elektriksel iletkenlik davranışlarındaki değişikliklerini incelemek için artık özdirenç oranları (300 K ile 115 K arasındaki direkt özdirenç oranıdır) verilmiştir. Tablodan, saf numunenin 2.2002 RRR parametresi ile maksimum değeri gösterdiği, minimum değer ise Ni2 örneğine (1.2658) ait olduğu görülmektedir. En iyi örneğin saf olduğunu fakat literatürdeki çalışmalardan 0.1 oranından daha düşük oranlarda iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir (100). Buna göre, yeni süperiletken matrisin manyetik rezonans görüntüleme, manyetik enerji depolama, levitasyon trenleri, güç iletim kablosu, kriyojenik seviye sensörleri, parçacık hızlandırıcılar gibi endüstriyel ve teknolojik uygulama alanlarında yüksek enerji fizik deneylerinde ve akım sınırlayıcı teknolojilerinde çok daha fazla yer alabileceği açıktır.



Şekil 5.4. ρ_{300K} ve ρ_{115K} özdirenç değerleri arasındaki korelasyonlar

Şekil 5.4’te 65 K ile 300 K arasında gerçekleştirilen sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç grafikleri yardımıyla NiO katkılama oranı ile 115 K ve 300 K özdirençleri (ayrıca tabloda $\Delta\rho = \rho_{300K} - \rho_{115K}$) arasındaki fark, ρ_{115K} ve $\Delta\rho$ parametreleri kullanılarak elde edilen ρ_{norm} ($\rho_{115K}/\Delta\rho$) oranı sunulmuştur. (101,102)

referanslı çalışmaların vurguladığı gibi, ρ_{norm} , kristal yapıdaki kalıcı yapısal sorunları, mikroskobik yapısal bozuklukları ve çatlak üreten kusurları belirlemek için yararlı bir parametredir. Mevcut çalışmada, elde edilen minimum ρ_{norm} parametresi saf numuneye ait olup değeri 0.8332'dir. Elde edilen sonuca göre Bi-2223 süperiletkenlerinde optimum nikel iyonlarının varlığının, rafine kristal yapı kalitesi ve süperiletken taneler arasındaki etkileşim sonucunda malzeme kalitesini ciddi şekilde kötüleştirdiği açıktır. $\rho_{300\text{K}}$, $\rho_{115\text{K}}$ ve ρ_{norm} 'in öz direnci arasındaki olası korelasyon Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Hesaplanan dirençleri eğilimi ve dağılımı benzer davranış sergilemiştir, yani korelasyon dışı hiçbir anormal değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu aynı zamanda yapısal bozuklukların ek saçılma bölgeleri yaratarak yığın yapının direncini etkileyecek kadar yüksek olmadığını da gösterir.

5.4 NiO Katkılı Numunelerin Süperiletkenlik Özellikleri

DA elektrik öz direnç grafikleri, farklı NiO katkılama oranları ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$ ve 1.2) ile $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_y$ seramik bileşiklerinin kritik ofset (T_c^{offset}), onset (T_c^{onset}) ve kritik geçiş sıcaklığı genişliği ($\Delta T_c = T_c^{\text{onset}} - T_c^{\text{offset}}$) gibi temel süperiletkenlik parametrelerinin değerlerini bulmak için kullanılmıştır. İç kısım, metalden süperiletkenliğe faz geçişi, süperiletken kümelerde bipolaron oluşumları, eşleşme mekanizması (elektron-fonon ve elektron-elektron arasındaki etkileşimlerin başlangıcı) ve doğrudan taneler arası bileşenin elektriksel karakteristiği ile ilgilidir (103). Buna uygun olarak, bir malzeme T_c^{offset} değerinden önce tamamen süperiletken özellikler sergiler. Diğer bir parametre T_c^{onset} , ana matristeki tanecikler arası bölgelerin süperiletken geçişine işaret eder ve bu nedenle metastabilite, orbital hibridizasyon mekanizması, oksidasyon durumundaki homojensizlikler, çift bağlanma enerjisi, süper elektronların sıra parametresi, temiz veya kirli limit karakteristikleri, elektronik durum yoğunluklarının lokalizasyonu ve Cu-3d ve O-2p dalga fonksiyonları için örtüşme mekanizması gibi bazı kritik parametrelerdeki değişiklikleri tartışmak için yararlıdır (104). Ayrıca, ana sistemdeki kalıcı yapısal problemlerin, mikroskobik yapısal bozuklukların ve çatlak üreten kusurların varyasyonu, T_c^{onset} parametresi tarafından kapsamlı bir şekilde belirlenir (101,105). T_c^{onset} ve T_c^{offset} arasındaki farklılaşmaya ilişkin ikinci parametreye gelince, ΔT_c değeri bir malzemenin üretim kalitesin tarafından doğrudan etkilenir. Bu nedenle, parametre, malzemenin ileri teknolojiye potansiyel uygulamalar için uygun olduğunu tartışmak için kullanılır.

Tablo 5.3. Dökme seramik süperiletkenlerin başlangıç/kayma kritik geçiş sıcaklıkları ve boşluk taşıyıcı yoğunlukları

Numune	T_c^{offset} (K)	T_c^{onset} (K)	ΔT_c (K)	P Değeri
Ni0	98.97	108.02	8.14	0.15954
Ni1	70.58	92.20	15.04	0.159116
Ni2	61.83	95.48	31.06	0.157969
Ni3	52.66	88.44	25.78	0.158015
Ni4	56.01	90.08	23.93	0.158215
Ni5	59.78	93.43	23.56	0.158292

Bu tez için yaptığımız araştırmada, NiO katkılı Bi-2223 süperiletken numuneleri için 65 K ile 300 K arasında alınan sıcaklığa bağlı elektrik öz direnç eğrilerinden T_c^{onset} , T_c^{offset} ve ΔT_c parametrelerini çıkardık. Tablodan NiO katkısının parametreleri önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu bağlamda saf numune sırasıyla 98.97 K ve 108.02 K olarak T_c^{offset} ve T_c^{onset} değerleri sergilemektedir. NiO içeriğindeki artışla T_c 'nin düştüğü ve tüm katkılı numuneler için ikinci süperiletken geçişin görüldüğü bulunmuştur. Buna uygun olarak, süperiletken geçiş genişliği (ΔT_c), NiO içeriğini artması ile yükselmiştir. Bu da süperiletken taneler arasındaki daha yüksek homojenliğe ve bağlantı sırasına atfedilebilir. Bu bakımdan, en yüksek T_c^{offset} ve T_c^{onset} değerlerine sahip saf numune, sadece optimum eşleşme mekanizmasını, süperiletken kümelerde bipolaron oluşumlarını, taneler arası bileşeni değil, aynı zamanda en iyi kristal yapı kalitesini, Cu-O₂ ara katman birleştirme güçleri ve süperiletken taneler arasındaki etkileşim sunmaktadır (106,107). Ayrıca, NiO katkısının etkisini belirlemek için saf ve NiO katkılı Bi-2223 süperiletkenler için geçiş genişlikleri değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan her ΔT_c parametresi Tablo 5.3'de hassas bir şekilde verilmiştir. Tablo 5.3'e göre, ΔT_c değerleri 31.06 K ila 8.14 K aralığında bulunmuştur. Saf numune 8.14 K ΔT_c değerini gösterirken katkılı numuneler arasında minimum değer (12.04 K) Ni1 seramik numunesinde gözlemlenmiştir. Bu açıdan katkılı numuneler arasında Ni1 numunesi en iyi kristal yapı kalitesini ve süperiletken taneler arasındaki etkileşimi gösterdiği açıktır.

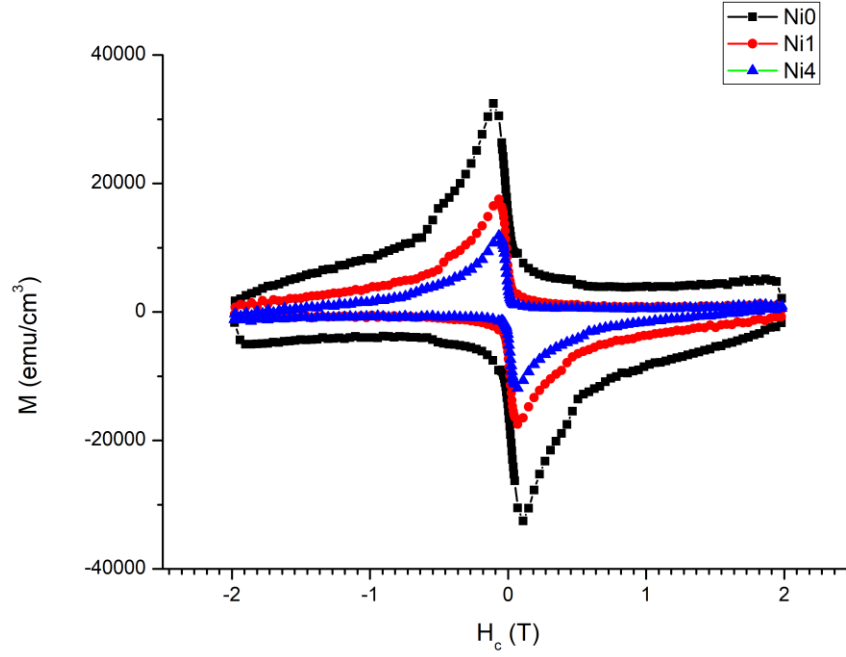
Son olarak, NiO katkılama oranının, boşluk tuzak enerjisiyle ilgili düzlem içi Cu-O₂ katmanı $x^2 - y^2$ bantlarındaki σ bağ-önler hareketli boşluk taşıyıcı yoğunlukları üzerindeki etkisine, sıcaklığa bağlı öz direnç ölçümlerini kullanarak yapının stabilizasyonu ve orbital hibridizasyon mekanizması incelenmiştir. Bu bağlamda, Bi-seramik bileşikler için mobil boşluk taşıyıcı konsantrasyonu (P) sayılarını aşağıdaki bağıntı aracılığıyla sayısal olarak hesaplanmaktadır (108):

$$P = 0.16 - \left[\left(1 - \frac{T_c^{offset}}{T_c^{max}} \right) / 82.6 \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

Mobil boşluk taşıyıcı yoğunluklarının sayıları Tablo 5.3'te görülmektedir. Ni katkısının Bi-2223 kristal sisteminin boşluk kapalı enerjisini, yapı stabilizasyonunu ve orbital hibridizasyon mekanizmasını ciddi şekilde etkilediği tablodan açıkça görülmektedir (109). Sayısal olarak, saf numune 0.15954 P değerine sahipken, Ni1 bileşiği için maksimum 0.159116 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla NiO katkılamasının artması P değerinin 0.159116'den 0.158292'e azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.

5.5 Manyetizasyon (M-H) Ölçümü ve Manyetik J_c Hesap Analizi

Saf, 0.1 ve 0.9 mol oranında katkılanmış örnekler için 15 K'de gerçekleştirilen manyetik-histerezis çevrim ölçümleri Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5'te görüldüğü üzere çevrim eğrilerindeki genişlik katkı miktarı arttıkça azalmıştır. Akı sabitleme kuvveti, ikincil veya istenmeyen fazların varlığı, tutarlılık uzunluğu ve mikroyapı kalitesi gibi birçok parametre manyetik histerezis çevriminin boyutunu etkilemektedir (110–113). Bu etkinin sebebi elektriksel ölçümlerde SEM yardımıyla açıklanan sebeplerle aynıdır. Ayrıca tüm örneklerin MH ölçümlerinde görülen diyamanyetik davranışları örneklerin geleneksel tip-II süperiletkenler olduğunu desteklemektedir.

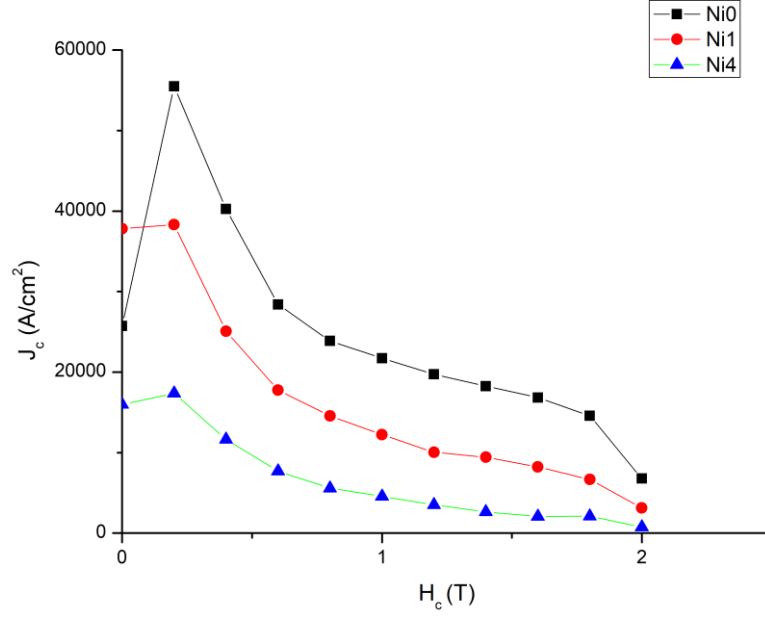


Şekil 5.5. Örneklerle ait 15 K’de ölçülen manyetizasyon eğrileri

Bilindiği gibi J_c ile gösterilen kritik akım yoğunluğu, süperiletken faz yapısını bozmadan bir malzemedan geçebilen maksimum akım miktarıdır. Süper iletken malzemelerin kritik akım yoğunluğu değerini ölçmenin birçok yolu vardır. Pratikte kritik akım yoğunluğu, malzemeye uygulanan voltaj farkından akım değeri ölçülerek bulunabilir. Öte yandan teorik olarak da kritik akım yoğunluğu değerlerine ulaşabilmektedir. Teorik olarak numunelerin J_c değerleri Bean modeli (114) kullanılarak 15 K’da histerezis döngülerinden hesaplanmıştır.

$$J_c = 30 \frac{\Delta M}{d} \quad (5.6)$$

Burada J_c santimetre kare başına manyetik akım yoğunluğudur. $\Delta M = M_+ - M_-$ manyetik histeresis çevriminden elde edilen manyetizasyon değişimidir ve d malzemenin kalınlığıdır. Şekil 5.6’da örneklerle ait 15 K’de hesaplanan manyetik kritik akım yoğunluk-manyetik alan eğrileri verilmiştir.



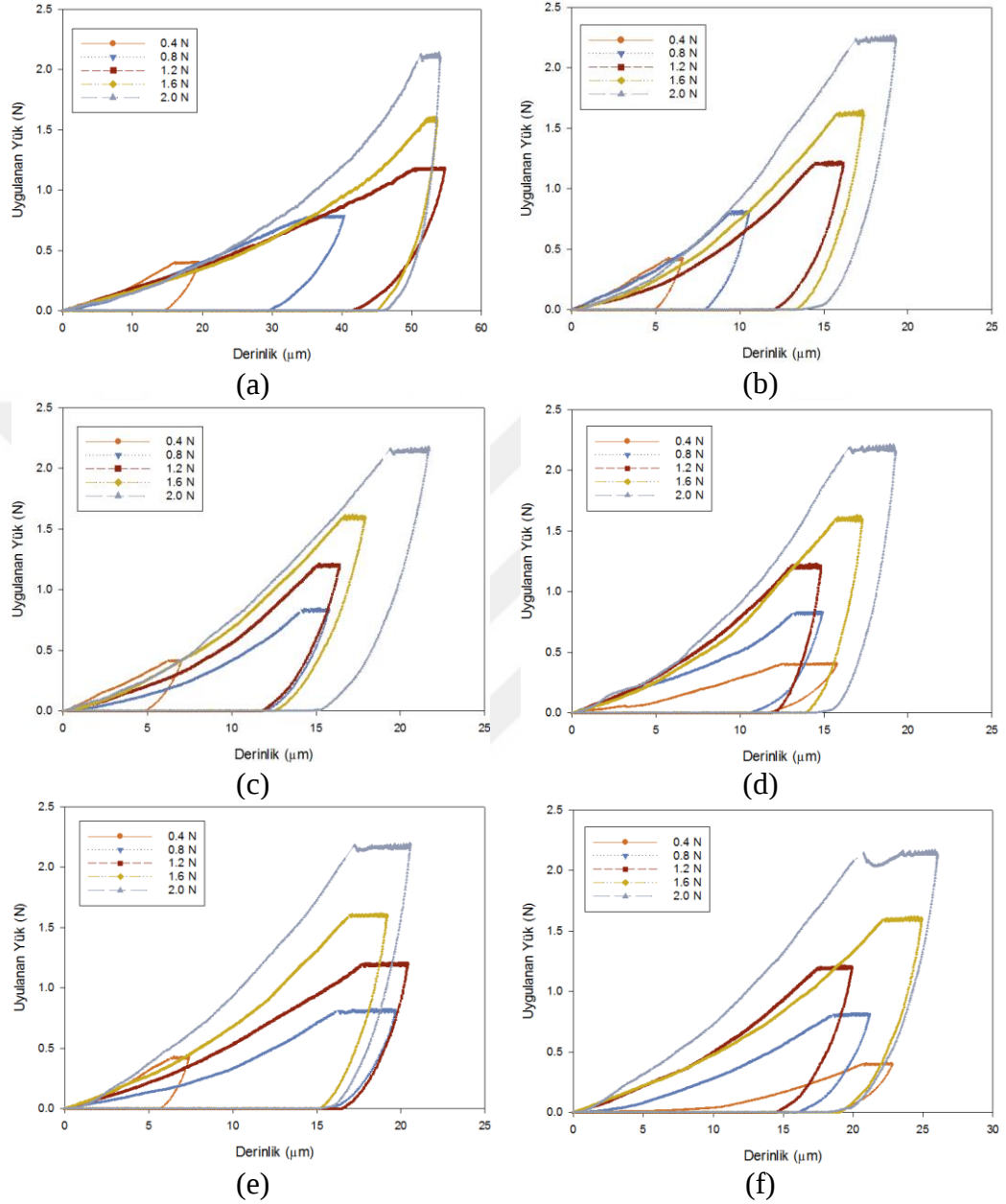
Şekil 5.6. Örnekler için 15 K’de hesaplanan manyetik kritik akım yoğunluk-manyetik alan eğrileri

Bütün örnekler için hesaplanan J_c ’lerde NiO katkı oranının olumsuz etki yaptığı görülmektedir. Katkılı örneklerin saf örneğe göre kritik akım yoğunluklarındaki önemli düşüş, akı çivileme merkezleri olarak davranış göstermeyen daha düşük süperiletkenlik özelliklerine sahip Bi-2212 fazının varlığı ve katkılı örneklerin akı sürüklenmelerine karşı gösterdiği direncin daha düşük olmasıyla açıklanabilmektedir. Manyetik alansız durumda maksimum J_c değeri Ni1 numunesine ait olup değeri 37799.23 A/cm²’dir. NiO katkısının daha az oranlarda yapılmasıyla kritik akım yoğunluklarında artma beklenebilirdi fakat bu çalışmada katkılanan oranların yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Düşük oranlarda katkılamanın yapay çivileme merkezleri olarak davrandığı fakat yüksek katkılamalarda istenmeyen fazların oluşumu, gözeneklilik, zayıf bağlar ve kusurların arttığı ve J_c ’nin azaldığı bilinmektedir. Bu yorum önceki bölümlerde anlatılan XRD ve SEM ölçüm sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

5.6 Dinamik Mikrosertlik Ölçümü Analizi

Bi-2223 süperiletken seramik numunelerinde farklı yük büyüklükleri için Ni0, Ni1, Ni2, Ni3, Ni4 ve Ni5 örnekleri için yükleme/boşaltma derinliği eğrileri

Şekil 5.4'te verilmiştir. Tüm numuneler için yükleme/boşaltma derinliği eğrilerinde küçük saçılmalar vardır. Bu saçılmalar yapısal homojensizlikten kaynaklanabilir.



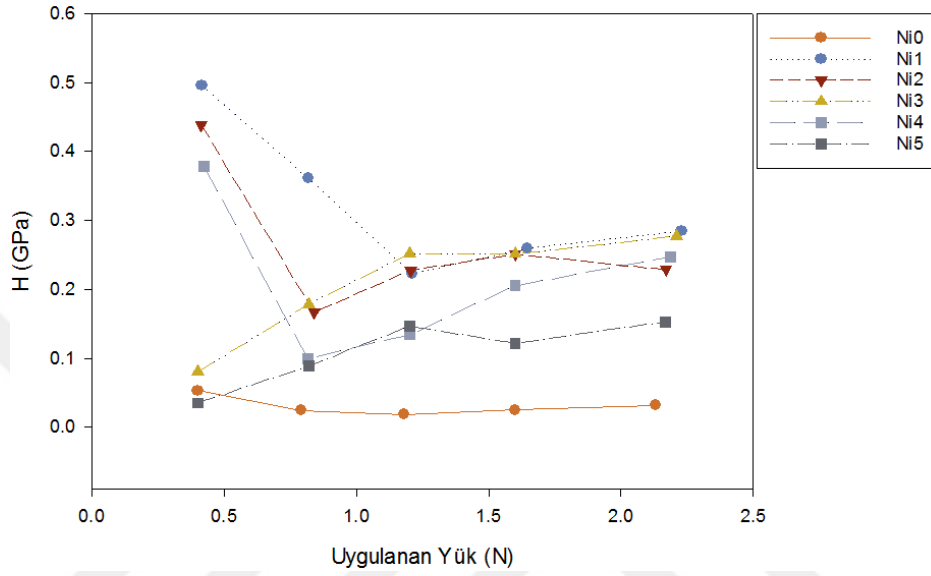
Şekil 5.7. (a) Ni0, (b) Ni1, (c) Ni2, (d) Ni3, (e) Ni4, (f) Ni5 numunelerinin yükleme/boşaltma derinliği eğrisi

Tablo 5.4. Her numune için dinamik mikro girinti analizinin sonuçları

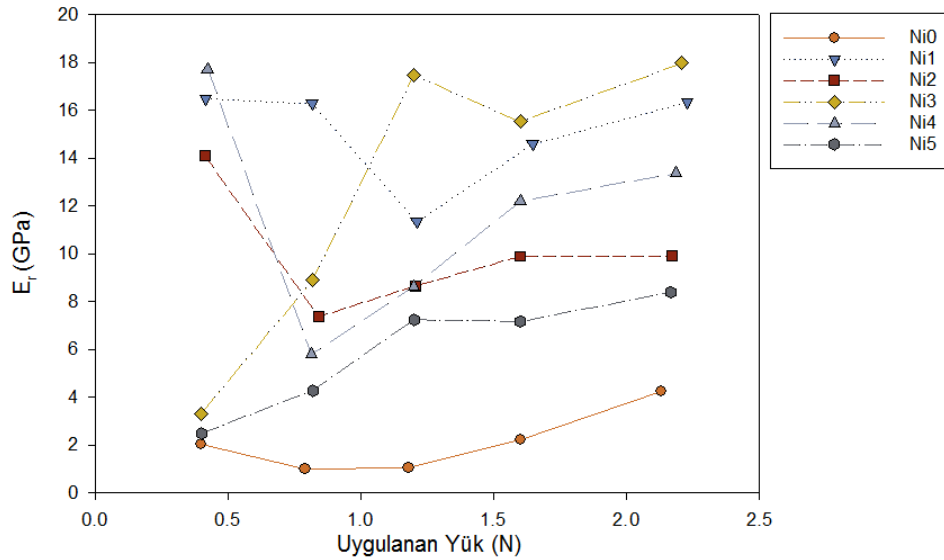
Örnek Adı	P_{max} (N)	$h_c(\mu m)$	$h_{max}(\mu m)$	h_{min}	$creep(\mu m)$	$A(m^2)$	S (MN/m)	H (GPa)	E_r (GPa)
Ni0	0.4	17.52	19.53	14.34	3.38	7.52E-09	0.19858	0.0530	2.0289
Ni0	0.79	36.32	40.27	29.507	4.54	3.233E-08	0.20045	0.0244	0.9877
Ni0	1.18	50.701	54.72	41.49	4.27	6.299E-08	0.2936	0.0187	1.0366
Ni0	1.6	51.076	53.62	44.98	0.56	6.391E-08	0.6290	0.0250	2.2043
Ni0	2.13	52.287	54	46.22	3.66	6.698E-08	1.2436	0.0318	4.2572
Ni1	0.4155	5.849	6.62	4.84	1	8.3816E-10	0.5389	0.4957	16.4925
Ni1	0.8163	9.6006	10.536	7.96	1.23	2.2582E-09	0.8727	0.3615	16.2706
Ni1	1.2106	14.8853	16.1695	12.03	1.83	5.42852E-09	0.9427	0.2230	11.3360
Ni1	1.6467	16.0846	17.3419	13.49	1.75	6.3385E-09	1.3097	0.2598	14.5752
Ni1	2.2289	17.8804	19.2451	14.92	2.3451	7.83286E-09	1.6333	0.2846	16.3503
Ni2	0.4134	6.2047	7.05	4.9178	0.81	9.4321E-10	0.4891	0.4383	14.1088
Ni2	0.8398	14.3515	15.7737	11.9	1.614	5.0462E-09	0.5905	0.1664	7.36498
Ni2	1.2055	14.7017	16.3979	11.83	1.3551	5.2954E-09	0.7107	0.2276	8.65318
Ni2	1.6	16.1265	17.9205	12.607	1.2028	6.3716E-09	0.8919	0.2511	9.8994
Ni2	2.17	19.6909	21.6812	15.4	2.3295	9.4994E-09	1.0903	0.2284	9.9112
Ni3	0.4	14.2776	15.7889	11.72	3.26	4.9943E-09	0.2647	0.0801	3.3182
Ni3	0.8192	13.6891	14.89	10.71	1.68	4.5911E-09	0.6822	0.1784	8.9199
Ni3	1.2	13.9319	14.8145	12.07	1.8145	4.7554E-09	1.3596	0.2523	17.4686
Ni3	1.6	16.1157	17.26	14.053	1.58	6.3630E-09	1.3982	0.2515	15.5304
Ni3	2.2094	18.0398	19.26	15.54	2.81	7.9731E-09	1.8107	0.2771	17.9665
Ni4	0.4228	6.7522	7.3844	5.68	1.0658	1.1170E-09	0.6688	0.3785	17.7291
Ni4	0.8145	18.2969	19.6714	15.74	3.5714	8.2020E-09	0.5926	0.0993	5.7972
Ni4	1.2	19.1002	20.4022	16.687	2.8022	8.9380E-09	0.9217	0.1343	8.6374
Ni4	1.6	17.8387	19.1537	15.2	2.2229	7.7964E-09	1.2167	0.2052	12.2090
Ni4	2.1867	18.9991	20.5392	15.941	3.3496	8.8437E-09	1.4198	0.2473	13.3770
Ni5	0.4	21.5137	22.8535	18.788	2.1925	1.1340E-08	0.2986	0.0353	2.4840
Ni5	0.8192	19.3994	21.1635	16.2	2.7863	9.2203E-09	0.4644	0.0888	4.2848
Ni5	1.2	18.2761	19.9	14.738	2.4515	8.1834E-09	0.7390	0.1466	7.2375
Ni5	1.6	23.175	24.9	19.123	2.8078	1.3159E-08	0.9275	0.1216	7.1641
Ni5	2.1665	24.0796	26	19.47	6	1.4206E-08	1.1282	0.1525	8.3863

Tablo 5.4 incelendiğinde malzeme rijitliğinde uygulanan kuvvet arttıkça artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Ayrıca 0.4 N uygulama yükü bazı numunelerde bu davranışın aksini gösterse de diğer uygulama yüklemelerde de davranış aynı eğilimde olduğu anlaşılmaktadır. NiO katkılı bi-2223 süperiletken seramiği Ni0-Ni2 numunelerinde uygulama yükünün artırılmasıyla sertliğinde düşüş görülmesine rağmen Ni3-Ni6 numunelerinde sertlikte yükselme tespit edilmiştir. Sertliklerdeki bu değişim bize Ni0-Ni2 numuneleri arasında çeltik

etkisinin (ISE) olduğunu gösterirken Ni3-Ni6 numunelerinde ters çeltik etkisinin olduğunu göstermektedir. Buradan da anlaşılabacağı üzere NiO katkısı 0.6 mol üzerine çıkması durumunda davranış değişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca saf malzeme haricinde NiO katkılı numunelerde kayma uzaması (creep) NiO miktarının artırılmasıyla arttığı görülmüştür.



Şekil 5.8. Uygulanan yükün fonksiyonu olarak sertlik değerleri



Şekil 5.9. Uygulanan yükün fonksiyonu olarak indirgenmiş elastisite modülünün değerleri

Tüm numuneler incelendiğinde NiO katkısının malzemenin hem sertliğinde hem de elastisite modülünde gözle görülür artışlar görüldüğü saptanmıştır. Bu bağlamda da NiO katkısının Bi-2223 süperiletken seramiğinin mekanik davranışı üzerinde gözle görülür bir iyileşme gösterdiği sonucuna varılabilir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hazır olarak satın alınmış Bi-2223 tozlarına NiO sonradan katkılanarak NiO katkısının kristalografik, morfolojik, elektriksel, süperiletken karakteristiği ve mekanik davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen ölçüm sonuçları ve aralarındaki korelasyonlar dahil edilerek sistematik olarak araştırılmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. XRD analizi, toplu Bi-2223 seramik matrisindeki Nikel ilavesinin yalnızca yüksek faza önemli ölçüde zarar vermekle kalmayıp, aynı zamanda düşük ve safsızlık fazlarını da güçlendirdiğini göstermiştir. Bunun nedeni, nikelin kurtarılamayan yapısal sorunlara, bozukluklara, bozulmalara, kafes gerilmelerine, tane yanlış yönlendirmelerine ve tane sınırı birleştirme etkileşim sorunlarına yol açmasıdır.
2. SEM analizlerinden elde edilen bulgular Ni ilavesinin varlığının, Bi-seramik sistemde tane sınırı birleştirme-etkileşim sorunlarına neden olan yerel yapısal sorunlara, kısmi erime bölgelerine, doku bozulmasına yol açtığını göstermiştir.
3. Nikel oksit katkılı Bi-2223 numunelerine ait sıcaklığa bağlı öz direnç eğrilerinin, NiO katkı oranına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği fark edilmiştir. Bu, termal enerjinin itici gücü nedeniyle kristal yapıda kaplanan NiO safsızlık atomlarının farklı derinlik seviyelerine penetrasyonu ile açıklanabilir. Ni'nin Bi-2223 matrisine dahil edilmesi, süperiletkenin metalik karakteristik davranışını etkileyen bir faktördür, çünkü düzlem içi Cu-O bağlarını birbirine bağlayan σ bağ-önleyici hareketli boşluk taşıyan varyasyonlar etkilenmektedir.
4. ρ_{300K} , ρ_{norm} ve ρ_{115K} 'de öz direnç değerleri katkılanan numuneler arasında Ni1 en optimum değerleri sergilemekte olup, Bi-2223 ana matrisinde çatlak oluşturan kusur yoğunluklarında, tane içi/taneler arası sınır kuplaj problemlerinde ve safsızlık saçılmalarında minimal varlık göstermiştir.
5. Nikel oksit katkısının kritik akım yoğunluğuna olumsuz bir etkisi olduğu manyetizasyon ölçümleri ile gösterilmiştir.
6. Dinamik Vickers mikrosertlik sonucunda, tüm numuneler incelendiğinde NiO katkısının malzemenin hem sertliğinde hem de elastisite modülünde gözle görülür artışlar görüldüğü saptanmıştır. Bu bağlamda

da NiO katkısının Bi-2223 süperiletken seramiğinin mekanik davranışı üzerinde gözle görülür bir iyileşme gösterdiği sonucuna varılabilir.



7. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

1. Rey CM. Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications. Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications. 2015 Apr 23;1–438.
2. Terzioğlu R. Merkez İletkeni Bakır Olan Süperiletken CORC Kabloların Alternatif Akım Kayıpları [Doktora Tezi]. [Sakarya]: Fen Bilimleri Enstitüsü; 2017.
3. Zhu J, Qiu M, Wei B, Zhang H, Lai X, Yuan W. Design, dynamic simulation and construction of a hybrid HTS SMES (high-temperature superconducting magnetic energy storage systems) for Chinese power grid. Energy. 2013 Mar 1;51:184–92.
4. Fang J, Wen J, Wang S, Shi J, Ren L, Tang Y, et al. Laboratory and field tests of movable conduction-cooled high-temperature SMES for power system stability enhancement. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2013;23(4).
5. Arai Y, Seino H, Yoshizawa K, Nagashima K. Development of superconducting magnetic bearing with superconducting coil and bulk superconductor for flywheel energy storage system. Physica C: Superconductivity. 2013 Nov 15;494:250–4.
6. Chen X, Xie Q, Bian X, Shen B. Energy-saving superconducting magnetic energy storage (SMES) based interline DC dynamic voltage restorer. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2022 Jan 1;8(1):238–48.
7. Salama HS, Vokony I. Comparison of different electric vehicle integration approaches in presence of photovoltaic and superconducting magnetic energy storage systems. Journal of Cleaner Production. 2020 Jul 1;260:121099.
8. Mukherjee P, Rao V v. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications - A review. Physica C: Superconductivity and its Applications. 2019 Aug 15;563:67–73.
9. Cheadle MJ, Wozniak M, Bromberg L, Glowacki BA, Jiang X, Zeng R, et al. DC superconducting cable using MgB₂ wires. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2013;23(3).
10. Hull JR. Applications of high-temperature superconductors in power technology. Reports on Progress in Physics [Internet]. 2003 Oct 7 [cited 2022 Jun 13];66(11):1865. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/66/11/R01>
11. Malozemoff AP, Maguire J, Gamble B, Kalsi S. Power applications of high-temperature superconductors: Status and perspectives. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2002 Mar;12(1):778–81.
12. Hartwig ZS, Vieira RF, Sorbom BN, Badcock RA, Bajko M, Beck WK, et al. VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable. Superconductor Science and Technology [Internet]. 2020 Oct 7 [cited 2022 Jun 22];33(11):11LT01. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/abb8c0>
13. Uglietti D. A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors. Superconductor Science and Technology [Internet]. 2019 Apr 9 [cited 2022 Jun 22];32(5):053001. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ab06a2>
14. Pong I, Hafalia A, Higley H, Lee E, Lin A, Naus M, et al. Cable Design and Development for the High-Temperature Superconductor Cable Test Facility Magnet. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2021 Oct 1;31(7).

15. Noe M, Steurer M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology* [Internet]. 2007 Jan 15 [cited 2022 Jun 13];20(3):R15. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/20/3/R01>
16. Morandi A. State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system. *Physica C: Superconductivity*. 2013 Jan 15;484:242–7.
17. Chen X, Gou H, Chen Y, Jiang S, Zhang M, Pang Z, et al. Superconducting fault current limiter (SFCL) for a power electronic circuit: experiment and numerical modelling. *Superconductor Science and Technology* [Internet]. 2022 Feb 25 [cited 2022 Jun 22];35(4):045010. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ac5504>
18. Zhang GM, Wang H, Qiu Q, Zhang Z, Xiao L, Lin L. Recent progress of superconducting fault current limiter in China. *Superconductor Science and Technology* [Internet]. 2020 Nov 10 [cited 2022 Jun 22];34(1):013001. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/abac1f>
19. Shen B, Chen Y, Li C, Wang S, Chen X. Superconducting fault current limiter (SFCL): Experiment and the simulation from finite-element method (FEM) to power/energy system software. *Energy*. 2021 Nov 1;234:121251.
20. Karpinski J, Meijertt GI, Schwert H, Molinski R, Kopnin E, Conder K, et al. High-pressure synthesis, crystal growth, phase diagrams, structural and magnetic properties of $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_n\text{O}_{2n+x}$, $\text{HgBa}_2\text{Can-1Cu}_n\text{O}_{2n+2+}$ and quasi-one-dimensional cuprates. *Superconductor Science and Technology* [Internet]. 1999 Sep 1 [cited 2022 Jun 24];12(9):R153. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/12/9/201>
21. Yuan SL, Li G, Jiang Y, Yamauchi H, Karppinen M. Application of high-pressure techniques: stabilization and oxidation-state control of novel superconductive and related multi-layered copper oxides. *Superconductor Science and Technology* [Internet]. 2000 Apr 1 [cited 2022 Jun 24];13(4):R33. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/13/4/202>
22. Takayama-Muromachi E. High-Pressure Synthesis of Homologous Series of High Critical Temperature (T_c) Superconductors. *Chemistry of Materials* [Internet]. 1998 [cited 2022 Jun 24];10(10):2686–98. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cm9802301>
23. High- Superconductors for Magnet and Energy Technology. *High- Superconductors for Magnet and Energy Technology*. 2001;
24. Özkurt B. Effects of Ni substitution in Bi-2212 superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [Internet]. 2012 Apr 5 [cited 2022 Jun 18];25(6):1775–9. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-012-1539-8>
25. Hamid NA, Abd-Shukor R. Effects of TiO_2 addition on the superconducting properties of Bi-Sr-Ca-Cu-O system. *Journal of Materials Science* 2000 35:9 [Internet]. 2000 [cited 2022 Jun 17];35(9):2325–9. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1004759801684>
26. Azhan H, Fariesha F, Khalida S. Effect of Heat Treatments and Zr Doped on Superconducting Properties of $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{\delta}$ Ceramics. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2010 24:1 [Internet]. 2010 Oct 8 [cited 2022 Jun 17];24(1):265–70. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-010-1011-6>
27. Yildirim G, Yucel E, Bal S, Dogruer M, Varilci A, Akdogan M, et al. Investigation of Structural and Superconducting Properties of Cr Added Bi-2212 Superconducting Ceramics. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2011 25:2 [Internet]. 2011

- Sep 7 [cited 2022 Jun 18];25(2):231–7. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-011-1284-4>
28. Bilgili O, Kocabaş K. Effect of Nb addition on magnetic, structural and superconducting properties of (Bi, Pb)-2223 superconductors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2014 Apr 28 [cited 2022 Jun 18];25(7):2889–97. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-014-1956-5>
 29. Onnes HK. The resistance of pure mercury at helium temperatures. *Comm Phys Lab Univ Leiden*, 12, 120 [Internet]. 1911 [cited 2022 Jun 8]; Available from: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10029970951/>
 30. Meissner W, Ochsenfeld R. Ein neuer effect bei eintritt der supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften* 21, 787 [Internet]. 1933 [cited 2022 Jun 8]; Available from: [http://www.w2agz.com/Library/Classic%20Papers%20in%20Superconductivity/Meissner%20&%20Oschfelder,%20Naturwissenschaften%2021,%20787%20\(1933\).pdf](http://www.w2agz.com/Library/Classic%20Papers%20in%20Superconductivity/Meissner%20&%20Oschfelder,%20Naturwissenschaften%2021,%20787%20(1933).pdf)
 31. Bardeen J, Cooper LN, Schrieffer JR. Microscopic theory of superconductivity [3]. *Physical Review*. 1957;106(1):162–4.
 32. Dikici M. *Katıhal Fiziği*. 3rd ed. Ankara: Seckin Yayınları; 2013.
 33. Ginzburg VL, Andryushin EA. Superconductivity [Internet]. WORLD SCIENTIFIC; 2004 [cited 2022 Jun 9]. Available from: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/5580>
 34. Wang Y. *Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering*. Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering. 2013 Apr 16;1–444.
 35. Owens FJ, Poole CP. *The New Superconductors*. The New Superconductors. 2002;
 36. Ford PJ (Peter J, Saunders GA. The rise of the superconductors [Internet]. CRC Press; 2005 [cited 2022 Jun 24]. 239 p. Available from: <https://www.routledge.com/The-Rise-of-the-Superconductors/Ford-Saunders/p/book/9780748407729>
 37. Bednorz JG, Müller KA. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. 1986 Jun;64(2):189–93.
 38. Wu MK, Ashburn JR, Torng CJ, Hor PH, Meng RL, Gao L, et al. Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical Review Letters* [Internet]. 1987 Mar 2 [cited 2022 Jun 21];58(9):908. Available from: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.58.908>
 39. Maeda H, Tanaka Y, Fukutomi M, Asano T. A new High-T_c oxide superconductor without a rare earth element. *Japanese Journal of Applied Physics* [Internet]. 1988 Feb 1 [cited 2022 Jun 17];27(2A):L209–10. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.27.L209>
 40. Sheng ZZ, Hermann AM. Bulk superconductivity at 120 K in the Tl–Ca/Ba–Cu–O system. *Nature* 1988 332:6160 [Internet]. 1988 [cited 2022 Jun 21];332(6160):138–9. Available from: <https://www.nature.com/articles/332138a0>
 41. Schilling A, Cantoni M, Guo JD, Ott HR. Superconductivity above 130 K in the Hg–Ba–Ca–Cu–O system. *Nature* 1993 363:6424 [Internet]. 1993 [cited 2022 Jun 21];363(6424):56–8. Available from: <https://www.nature.com/articles/363056a0>
 42. Chu CW, Gao L, Chen F, Huang ZJ, Meng RL, Xue YY. Superconductivity above 150 K in HgBa₂Ca₂Cu₃O_{8+δ} at high pressures. *Nature* 1993 365:6444 [Internet]. 1993 [cited 2022 Jun 21];365(6444):323–5. Available from: <https://www.nature.com/articles/365323a0>

43. Maeda A, Hase M, Tsukada I, Noda K, Takebayashi S, Uchinokura K. Physical properties of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n=1,2,3$). *Physical Review B*. 1990;41(10):6418–34.
44. Mousavi Ghahfarokhi SE, Zargar Shoushtari M. Structural and physical properties of Cd-doped $\text{Bi}_{1.64}\text{Pb}_{0.36}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2-x}\text{Cd}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductor. *Physica B: Condensed Matter*. 2010 Nov 15;405(22):4643–9.
45. Torrance J, Tokura Y, LaPlaca S, communications TH... state, 1988 undefined. New class of high T_c structures: Intergrowth of multiple copper oxide perovskite-like layers with double sheets of BiO. Elsevier [Internet]. [cited 2022 Jun 20]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038109888909878>
46. Yıldırım G. Electrical and magnetic properties of Bi(Pb)SrCaCuO superconductor thin film produced by sputtering method. [Bolu]: Abant İzzet Baysal Üniversitesi ; 2012.
47. Buckles W, Hassenzahl W v. Superconducting magnetic energy storage. *IEEE Power Engineering Review*. 2000;20(5):16–20.
48. Ali MH, Wu B, Dougal RA. An overview of SMES applications in power and energy systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2010;1(1):38–47.
49. Gandolfi C, Chiumeo R, Raggini D, Faranda R, Morandi A, Ferdeghini C, et al. Study of a Universal Power SMES Compensator for LV Distribution Grid. 2018 110th AEIT International Annual Conference, AEIT 2018. 2018 Dec 14;
50. Sung BC, Park DK, Park JW, Ko TK. Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: Modeling, simulation, and experimental verification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(7):2412–9.
51. Barzegar-Bafrooei MR, Foroud AA, Ashkezari JD, Niasati M. On the advance of SFCL: a comprehensive review. *IET Generation, Transmission & Distribution* [Internet]. 2019 Sep 1 [cited 2022 Jun 20];13(17):3745–59. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-gtd.2018.6842>
52. Snitchler G, Gamble B, King C, Winn P. 10 MW class superconductor wind turbine generators. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011 Jun;21(3 PART 2):1089–92.
53. Noe M. Superconducting power applications and their potential to increase energy efficiency. In: *Symposium on Superconducting Devices for Wind Energy*. Barcelona; 2011.
54. Hull JR. Applications of high-temperature superconductors in power technology. *Reports on Progress in Physics* [Internet]. 2003 Oct 7 [cited 2022 Jun 21];66(11):1865. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/66/11/R01>
55. Kalsi SS. *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*. Piscataway, NJ: IEEE Press; 2011.
56. Maqsood A, Khaliq M, Maqsood M. Role of barium addition on the properties of bismuth-based superconductors. *Journal of Materials Science* 1992 27:19 [Internet]. 1992 [cited 2022 Jun 17];27(19):5330–4. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02403839>
57. Sýkorová LD, Smrčková O, Jakeš V. Effect of doping on properties of Bi-based superconductors. *physica status solidi (c)* [Internet]. 2004 May 1 [cited 2022 Jun 17];1(7):1952–6. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pssc.200304466>
58. Iqbal MJ, Mehmood R. Synthesis and characterization of antimony-doped Bi-based superconducting materials. *Materials Science and Engineering: B*. 2006 Nov 25;135(2):166–71.

59. Biju A, Guruswamy P, Syamaprasad U. Influence of Pb on structural and superconducting properties of rare earth modified Bi₂Sr₂CaCu₂O_y. *Physica C: Superconductivity*. 2007 Nov 1;466(1–2):23–8.
60. Terzioğlu C, Oztürk O, Belenli I. The effect of Au diffusion on some physical properties of Bi_{1.8}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu₃O_y superconductors. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009 Mar 5;471(1–2):142–6.
61. Sasakura H, Akagi Y, Tsukui S, Adachi M. Effect of Boron Substitution for Bi on Superconductivity of the Bi-2212 Phase in the Bi-Sr-Ca-Cu-O System. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2009 23:4 [Internet]. 2009 Oct 28 [cited 2022 Jun 17];23(4):437–41. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-009-0594-2>
62. Sarun PM, Shabna R, Vinu S, Biju A, Syamaprasad U. Highly enhanced superconducting properties of Bi-2212 by Y and Pb co-doping. *Physica B: Condensed Matter*. 2009 May 1;404(8–11):1602–6.
63. Vinu S, Sarun PM, Shabna R, Biju A, Syamaprasad U. Microstructure and transport properties of Bi_{1.6}Pb_{0.5}Sr_{2–x}Lu_xCa_{1.1}Cu_{2.1}O_{8+δ} superconductor. *Materials Chemistry and Physics*. 2010 Jan 15;119(1–2):135–9.
64. Özkurt B. A Significant Enhancement in J_c Values Through Excessive Na Doping in Bi₂Sr₂Ca₁Cu_{2–x}Na_xO_y Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [Internet]. 2015 May 1 [cited 2022 Jun 18];28(5):1501–6. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-014-2942-0>
65. Çam EK, Kocabaş K. Effects of Sb substitution on structural and superconducting properties of Bi in Bi_{1.75–x}Pb_{0.25}Sb_xSr₂Ca₂Cu₃O_y superconductor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2016 Aug 1 [cited 2022 Jun 18];27(8):8670–81. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-016-4888-4>
66. Gün E, Özkurt B, Özçelik B, Madre MA, Sotelo A, Diez JC. Physical, electrical and magnetic properties of Cr doped Bi₂Sr₂Ca₁Cu_{2–x}Cr_xO_y (Bi-2212) superconductors prepared by laser floating zone technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2017 Sep 1 [cited 2022 Jun 18];28(17):13120–5. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-017-7145-6>
67. Safran S, Kılıç A, Oztürk O. Effect of re-pelletization on structural, mechanical and superconducting properties of BSCCO superconductors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2017 Jan 1 [cited 2022 Jun 19];28(2):1799–803. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-016-5728-2>
68. Fallah-Arani H, Baghshahi S, Sedghi A, Stornaiuolo D, Tafuri F, Riahi-Noori N. Enhancement in superconducting properties of Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈₊₀ (Bi-2212) by means of boron oxide additive. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2018 May 15;548:31–9.
69. de Vera FI, Bardolaza H, Arcilla C, Sarmago R. Effect of In₂O₃ on the grain connectivity and superconducting behavior of Bi₂Sr_{2–x}In_xCaCu₂O_{8+d}. *SN Applied Sciences* [Internet]. 2019 Jan 1 [cited 2022 Jun 18];1(1):1–8. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-018-0109-5>
70. Shalaby MS, Hamed MH, Yousif NM, Hashem HM. The impact of the addition of Bi₂Te₃ nanoparticles on the structural and the magnetic properties of the Bi-2223 high-T_c superconductor. *Ceramics International*. 2021 Sep 15;47(18):25236–48.
71. Dogruer M, Aksoy C, Yildirim G, Oztürk O, Terzioğlu C. Influence of Sr/Nd partial replacement on fundamental properties of Bi-2223 superconducting system. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2021 Mar 1 [cited 2022 Jun 19];32(6):7073–89. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-021-05417-4>

72. Cheng Y, Beresford R. Growth of AlN/SiC/AlN quantum wells on Si(111) by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters* [Internet]. 2012 Jun 8 [cited 2022 Jun 21];100(23):232112. Available from: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4728119>
73. Zhu Y, Zhou Y. Preparation of pure ZnO nanoparticles by a simple solid-state reaction method. *Applied Physics A* 2008 92:2 [Internet]. 2008 May 22 [cited 2022 Jun 21];92(2):275–8. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-008-4533-z>
74. Ikesue A, Furusato I, Kamata K. Fabrication of Polycrystal line, Transparent YAG Ceramics by a Solid-State Reaction Method. *Journal of the American Ceramic Society* [Internet]. 1995 Jan 1 [cited 2022 Jun 21];78(1):225–8. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08389.x>
75. Augis JA, Bennett JE. Calculation of the Avrami parameters for heterogeneous solid state reactions using a modification of the Kissinger method. *Journal of thermal analysis* 1978 13:2 [Internet]. 1978 Apr [cited 2022 Jun 21];13(2):283–92. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01912301>
76. Terzioğlu R. The structural and mechanical properties of Gd and Nd substituted double layered LaCaMnO₇ ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019 Aug 15;797:1173–80.
77. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research* [Internet]. 1992 Jun [cited 2022 Jun 27];7(6):1564–83. Available from: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/abs/an-improved-technique-for-determining-hardness-and-elastic-modulus-using-load-and-displacement-sensing-indentation-experiments/A53D45298E14F73B86495BBC056E16DC>
78. Zeng K, Chiu CH. An analysis of load–penetration curves from instrumented indentation. *Acta Materialia*. 2001 Oct 9;49(17):3539–51.
79. Gayathri V, Sathyanarayana A, Amaladass E. Evolution of superconducting properties of coexistent Bi-2212 and Bi-2223 phases in BSCCO. 2021 [cited 2022 Jun 23]; Available from: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/57467>
80. Aftabi A, Mozaffari M. Fluctuation induced conductivity and pseudogap state studies of Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} superconductor added with ZnO nanoparticles. *Scientific Reports* 2021 11:1 [Internet]. 2021 Feb 22 [cited 2022 Jun 23];11(1):1–15. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-83218-9>
81. Holesinger TG, Miao H, Meinesz M, Huang Y, Parrell J, Kennison JA, et al. Analysis of high I_c and J_c Bi-2212 conductors with dilute second phase additions. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011 Jun;21(3 PART 3):2791–4.
82. Sedky A, Salah A. Fluctuation, Diamagnetic Transition, and FTIR Spectra of La Substituting Ca in (Bi,Pb):2223 Superconductor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2020 Dec 1;33(12):3705–15.
83. 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 Mar 30;699:247–55.
84. Dissanayake MAK, Samarappuli SHSP, Tennakone K, Ileperuma OA, Karunasingha ND. Effect of Ni substitution on T_c in the (Bi,Pb)□Sr□Ca□Cu□O system. *Materials Research Bulletin*. 1990 Dec 1;25(12):1487–93.
85. Memon A, Tanner DB. Effect of Metal Substitution in BSCCO Ceramic Superconductors. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* 2004 25:10 [Internet]. 2004 Oct

- [cited 2022 Jun 23];25(10):1423–30. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:IJIM.0000047434.37438.c3>
86. Celebi S, Malik AI, Inanir F, Halim SA. ac losses in Ni-doped $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2(\text{Ca}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_\delta$ ceramic superconductors. *Superconductor Science and Technology* [Internet]. 2004 Jul 26 [cited 2022 Jun 23];17(10):1121. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/17/10/005>
 87. Dogruer M, Yildirim G, Terzioğlu C. Evolution of electrical, superconducting, crystallinity and structural features with aliovalent Nd/Sr replacement in Bi-2223 ceramics. *Materials Chemistry and Physics* [Internet]. 2022 Sep 1 [cited 2022 Jun 23];288:126350. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0254058422006563>
 88. Slater JC. Atomic Radii in Crystals. *The Journal of Chemical Physics* [Internet]. 2004 Jul 2 [cited 2022 Jun 23];41(10):3199. Available from: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1725697>
 89. Kaya S, Yilmaz E, Karacali H, Cetinkaya AO, Aktag A. Samarium oxide thin films deposited by reactive sputtering: Effects of sputtering power and substrate temperature on microstructure, morphology and electrical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015 May 1;33:42–8.
 90. Loudhaief N, ben Salem M, Zouaoui M. Synthesis and characterization of Eu- and La-doped CuS nanoparticles and their effects on the electrical properties of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_\delta$ superconductor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2022 Jun 23];32(1):453–72. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-020-04793-7>
 91. Coşkun A, Akça G, Taşarkuyu E, Battal, Ekicibil A. Structural, Magnetic, and Electrical Properties of $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ Superconductor Prepared by Different Techniques. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [Internet]. 2020 Nov 1 [cited 2022 Jun 23];33(11):3377–93. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-020-05618-8>
 92. Ozturk O, Asikuzun E, Kaya S, Coskunyurek M, Yildirim G, Yilmazlar M, et al. Physical properties and diffusion-coefficient calculation of iron diffused Bi-2223 system. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [Internet]. 2012 Oct 9 [cited 2022 Jun 23];25(7):2481–7. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-012-1673-3>
 93. 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 [Internet]. 2022 Mar 29 [cited 2022 Jun 23];1–9. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-022-06222-8>
 94. Ulgen AT, Erdem U, Zalaoglu Y, Turgay T, Yildirim G. Effect of vanadium addition on fundamental electrical quantities of Bi-2223 crystal structure and semi-empirical model on structural disorders-defects. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2020 Aug 1 [cited 2022 Jun 23];31(16):13765–77. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-020-03936-0>
 95. Asghari R, Naghshara H, Arsalan LÇ, Sedghi H. Comparing the Effects of Nb, Pb, Y, and La Replacement on the Structural, Electrical, and Magnetic Characteristics of Bi-Based Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [Internet]. 2018 Dec 1 [cited 2022 Aug 16];31(12):3889–98. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-018-4692-x>
 96. Fallah-Arani H, Sedghi A, Baghshahi S, tehrani F shahbaz, Moakhar RS, Riahi-Noori N, et al. Bi-2223 superconductor ceramics added with cubic-shaped TiO_2 nanoparticles: Structural, microstructural, magnetic, and vortex pinning studies. *Journal of Alloys and Compounds* [Internet]. 2022 Apr;900:163201. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838821046119>

97. el Ghouch N, Al-Oweini R, Awad R. Preparation and physical properties of $(\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ superconductors impregnated with mangano(II)undecatungstosilicate nanomaterials. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* [Internet]. 2019 Dec 1 [cited 2022 Aug 16];125(12):1–11. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-019-3076-9>
98. Turkoz MB, Zalaoglu Y, Turgay T, Ozturk O, Akkurt B, Yildirim G. 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 Dec 1;45(17):21183–92.
99. Li M, Zhang Y, Li Y, Qi Y. 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-Crystalline Solids*. 2010 Nov 1;356(50–51):2831–5.
100. Turkoz M, Oz M, Turgay T, ... GYT and R, 2020 undefined. Evaluation of magneto-resistivity performances and flux pinning centers with vanadium addition in Bi-2223 main matrix. *gecekitapligi.com* [Internet]. [cited 2022 Jun 27]; Available from: https://www.gecekitapligi.com/Webkontrol/uploads/Fck/sicence_3.pdf#page=145
101. Zalaoglu Y, Erdem U, Bolat FC, Akkurt B, Turgay T, Yildirim G. 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* [Internet]. 2021 Jul 1 [cited 2022 Jun 27];32(14):19846–58. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-021-06509-x>
102. Turgay T, Yildirim G. 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* [Internet]. 2019 Mar 8 [cited 2022 Jun 27];30(8):7314–23. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-019-01044-2>
103. Awad R, Abou-Aly AI, Abdel Gawad MMH, G-Eldeen I. The influence of SnO_2 nanoparticles addition on the vickers microhardness of (Bi, Pb)-2223 superconducting phase. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [Internet]. 2012 May 5 [cited 2022 Jun 27];25(4):739–45. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-011-1334-y>
104. Saritekin NK, Pakdil M, Yildirim G, Oz M, Turgay T. 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* [Internet]. 2016 Jan 1 [cited 2022 Jun 27];27(1):956–65. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-015-3839-9>
105. Salama K, Selvamanickam V, Gao L, Sun K. High current density in bulk $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ superconductor. *Applied Physics Letters* [Internet]. 1998 Aug 19 [cited 2022 Jun 27];54(23):2352. Available from: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.101525>
106. Shabna R, Sarun PM, Vinu S, Syamaprasad U. Charge carrier localization and metal to insulator transition in cerium substituted (Bi,Pb)-2212 superconductor. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010 Mar 18;493(1–2):11–6.
107. Newns DM, Pattnaik PC, Tsuei CC. Role of Van Hove singularity in high-temperature superconductors: Mean field. *Physical Review B* [Internet]. 1991 Feb 1 [cited 2022 Jun 27];43(4):3075. Available from: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.43.3075>
108. Akkurt B, Erdem U, Zalaoglu Y, Ulgen AT, Turgay T, Yildirim G. Evaluation of crystallographic and electrical-superconducting features of Bi-2223 advanced ceramics with vanadium addition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [Internet]. 2021 Feb 1 [cited 2022 Jun 27];32(4):5035–49. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-021-05238-5>

109. Eskes H, Sawatzky GA. Tendency towards Local Spin Compensation of Holes in the High-Tc Copper Compounds. *Physical Review Letters* [Internet]. 1988 Sep 19 [cited 2022 Jun 27];61(12):1415. Available from: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.61.1415>
110. Hannachi E, Almessiere MA, Slimani Y, Baykal A, ben Azzouz F. AC susceptibility investigation of YBCO superconductor added by carbon nanotubes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020 Jan 5;812.
111. Ghazanfari N, Kiliç A, Özcan Ş, Sözeri H, Özkan H, Gencer A. Preparation of Nano-Scale Magnetite Fe₃O₄ and its Effects on the Bulk Bi-2223 Superconductors. *AIP Conference Proceedings* [Internet]. 2007 Aug 23 [cited 2022 Aug 18];929(1):133. Available from: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2776702>
112. Wei K, Abd-Shukor R. Superconducting and Transport Properties of (Bi-Pb)-Sr-Ca-Cu-O with Nano-Cr₂O₃ Additions. *Journal of Electronic Materials* 2007 36:12 [Internet]. 2007 Sep 19 [cited 2022 Aug 18];36(12):1648–51. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-007-0287-1>
113. Slimani Y, Hannachi E, Ekicibil A, Almessiere MA, ben Azzouz F. Investigation of the impact of nano-sized wires and particles TiO₂ on Y-123 superconductor performance. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019 Apr 15;781:664–73.
114. Bean CP. Magnetization of hard superconductors. *Physical Review Letters*. 1962;8(6):250–3.