

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



VANADYUM KATKILANMIŞ Bİ-2212 SÜPERİLETKEN
BİLEŞİKLERE AİT ELEKTRİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEMİH OKUR

BOLU, EYLÜL - 2019

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



VANADYUM KATKILANMIŞ Bİ-2212 SÜPERİLETKEN
BİLEŞİKLERE AİT ELEKTRİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BOLU, EYLÜL - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

SEMİH OKUR tarafından hazırlanan “VANADYUM KATKILANMIŞ Bİ-2212 SÜPERİLETKEN BİLEŞİKLERE AİT ELEKTRİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında 6.09.2019 tarihinde savunularak **Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

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

Üye
Prof. Dr. Vahdet UÇAR
Sakarya Üniversitesi

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

İmza


.....


.....


.....

Prof. Dr. Ömer ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü 
v.



Mehmet ve Fatma OKUR'a

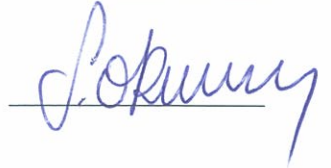
ETİK BEYAN

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

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

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

Semih OKUR



ÖZET

VANADYUM KATKILANMIŞ Bİ-2212 SÜPERİLETKEN BİLEŞİKLERE AİT ELEKTRİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEMİH OKUR

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. GÜRCAN YILDIRIM)

BOLU, EYLÜL - 2019

Bu tezde, Bi-2212 süperiletken kristal yapısına farklı oranlarda vanadyum katkılanmanın materyale ait elektrik özdirençleri, 90 K özdirençleri, kritik offset, onset geçiş sıcaklıkları, genişleme derece parametreleri, Fermi enerji seviyesi civarında bulunan aktif ve dinamik elektronik hal yoğunlukları, elektronik hal yoğunlukları, etkili ve güçlü elektron-fonon oluşum olasılıkları, aktif yapısal problemlerin değişimi, hibridizasyon mekanizmaları değişimleri, kristal yapı kaliteleri, süper elektronların düzen parametreleri, izole edilmiş tanecik içlerinin süperiletken faz geçişleri, kristal yapıdaki arayüzeyler arasındaki bağlantının iyileşmesi ve taşıyıcı konsantrasyonlarının değişimleri, mekanik özellikleri, yapısal problemlerin değişimleri, aktif kayma sistemlerinin oluşumları, mikrosertlik ölçüm sonuçları, kritik çatlak ilerlemeleri ve doygunluk limit bölgesinde belirlenmiştir. Deneysel verilere göre Bi-2212 kristal yapısına optimum vanadyum oranı $x=0,01$ olarak bulunmuştur.

Üretilen tüm $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ süperiletken materyaller onset sıcaklığı üstündeki herhangi bir sıcaklık değerinde, bütün numunelerin sıcaklıkla artan doğrusal bir özdirenç değişimi (gerçek/doğru metalik davranış) sergilemiştir. Kristal yapıda aşırı miktarda vanadyum atomu bulunması malzemelerin yapısal kusurlarını arttırmaktadır. Tüm bu değişimler malzemelerin sıcaklık-öz direnç değişimi ölçümleri ve bu ölçümlere dayalı teorik çıkarımlarla belirlenmiştir.

Materyallerin kritik offset, onset geçiş sıcaklıkları ve genişleme derece parametrelerinde görülmektedir. Bu bağlamda optimum katkılama oranında üretilen malzeme en yüksek kritik offset (84,66 K) ve onset kritik (85,02 K) değerini sergilemiştir. Diğer bir yandan, maksimum vanadyum katkılama oranında bu değerler sırası ile 71,46 K ve 42,74 K katkılanma oranı 0,3 olan numune örneği için bulunmuştur. Genişleme derece parametrelerine gelince, tüm materyallere ait hesaplanan değerler sırası ile 2,12 K saf numunesi, 0,36 K katkılanma oranı 0,01 olan numune örneği, 8,18 K katkılanma oranı 0,03 olan numune örneği malzemesi, 12,01 K katkılanma oranı 0,05 olan numune örneği, 15,08 K katkılanma oranı 0,07 olan numune malzemesi, 19,20 K katkılanma oranı 0,1 olan numunesi ve katkılanma oranı 0,3 olan numune malzemesi için 28,72 K olarak hesaplanmıştır. Taşıyıcı konsantrasyon sayısına gelince, katkılanma oranı 0,01 olan numune malzemesi 0,153041 değeri ile maksimum değer olarak bulunmuştur. Lakin, vanadyum miktarının artması ile bu değer katkılanma oranı 0,3 olan materyali için parabolik bir azalma ile 0,082417'e kadar düşmüştür.

Vickers sertlik ölçüm sonuçlarına gelince, sisteme optimum vanadyum katkılama oranı $x=0,01$ iken Bi-2212 materyallerin standart ISE (uygulanmış yüke karşı hem geri elastik hem de plastik deformasyonu aynı anda göstermesi) davranışlarında çok hızlı bir gelişme gözlemlenirken, bu kritik katkılama değerinin üzerinde ISE davranış ciddi bir şekilde azalır ve hatta maksimum katkılama oranında ($x=0,30$) ISE karakteristik özellik en dip noktasına ulaşır.

Ayrıca, Bi-2212 kristal örgüde vanadyumun optimum miktarda bulunması, çatlak yüzey enerjisinin azalması ve kritik kuvvet değerinin artması sonucunda, sistem içerisinde bulunan çatlak-başlatıcı kusurlar ve dislokasyonlara bağlı çatlakların yayılmasını engellediği bulunmuştur. Ancak, katkı miktarındaki artış Bi-2212 kristal sistemindeki kusurların, bozulmaların, kafes gerilmelerin, taneciklerin hatalı yönelimlerinin, çatlak üreten ve çatlak-başlatan kusurların, gerilme arttırıcılarının, çiftlenim sorunlarının ve tanecikler arası zayıf bağlantılar gibi yapısal problemlerdeki artışa neden olmuştur. Yani, optimum katkılama oranının üstünde Bi-2212 süperiletken kristallik kalitesi bozulur. Yani, vanadyum atomlarının kristal örgüde bulunması durumunda, materyallerin uygulanan test yükleri ile yapıda çatlak yönelimi ve geometrisi çok hızlı bir şekilde azalır, ve düşük kuvvetlerde bile çatlak kritik yayılma hızında aniden hareket etmeye başlar. Böylece, Bi-2212 kristal yapısını vanadyum atomları ile aşırı katkılama çatlakların ilerlemesini hızlandıran gerilme kaynaklı faz dönüşümüne neden olur. Tüm bu bulgular, Bi-2212 süperiletken materyallerin, mikrosertlik, Young's modülü, akma dayanımı, kırılma tokluğu, kırılma indeksi, süneklik ve elastik sertlik katsayısı karakteristik mekanik özellikleri ile desteklenmiştir. Kısaca, aşırı vanadyum katkılama kristal yapıda daha fazla sayıda çatlak ve daha serbest dislokasyon hareketlerine neden olur. Böylece, kritik gerilme, bükülme direnci, mekanik dayanım, plastik deformasyona karşı dayanıklılık ve sağlamlık gibi mekanik performans davranışlarını azaltması gibi temel karakteristik mekanik özellikler ciddi bir şekilde azalır.

$Bi_{2,0-x}V_xSr_{2,0}Ca_{1,1}Cu_{2,0}O_y$ perovskite süperiletken malzemelerin doymuluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini literatürde var olan Meyer Kanunu, Orantılı Numune Direnci Modeli, Modifiyeli Orantılı Numune Direnci Model, Elastik/Plastik Deformasyon, Hays Kendall ve Çentik-Kaynaklı Çatlak modelleri ile incelendi. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tüm modeller çalışılan materyallerin mekanik karakteristik özelliklerini incelemede başarılı olarak bulunmuştur. Ancak, doymuluk limit bölgesinde hesaplanan yükten bağımsız olarak hesaplanan mikrosertlik değerleri araştırmasına dayanarak, bu çalışmada kullanılan modeller arasında $Bi_{2,0-x}V_xSr_{2,0}Ca_{1,1}Cu_{2,0}O_y$ seramik süperiletkenlerin genel mekanik özelliklerini, mikrosertlik karakteristik özelliklerini ve yükten bağımsız mikrosertlik değerleri incelemede Çentik-Kaynaklı Çatlak model en başarılı model olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, karakteristik özellikler, evren ekonomisi için yeni ve uygulanabilir pazar alanlarında Bi-2212 süperiletkenlerinin kullanımı için optimum V ikamesi ile geliştirilebilir, böylece küresel enerji gereksinimleri için kalıcı ve radikal çözümler elde edilebilir.

ANAHTAR KELİMELER: Süperiletkenlik, diamanyetik, manyetik akı, Bi-tabanlı süperiletken, Vanadyum oksit; ρ -T; I-V; H_v

ABSTRACT

**EXAMINATION OF ELECTRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
BELONGING TO VANADIUM DOPED Bi-2212 SUPERCONDUCTING
COMPOUNDS
MSC THESIS
SEMİH OKUR
BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: DOÇ. DR. GÜRCAN YILDIRIM)**

BOLU, SEPTEMBER 2019

In this thesis, the electrical resistivity, 90 K resistivity, residual resistivity, residual resistivity ratios, real metallic behavior, critical offset, onset transition temperatures, expansion degree parameters, Fermi energy level of the material in the vicinity of Bi-2212 superconducting crystal structure. and dynamic electronic state densities, electronic state densities, effective and strong electron-phonon formation possibilities, change of active structural problems, changes in hybridization mechanisms, crystal structure qualities, order parameters of super electrons, superconducting phase transitions of isolated particles, connection between crystalline interfaces improvement and changes in carrier concentrations, mechanical properties, changes in structural problems, formation of active shear systems, microhardness measurement results, critical crack advances i and saturation were determined in the limit region. According to experimental data, optimum vanadium ratio to Bi-2212 crystal structure was found to be $x = 0.01$.

All produced $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ superconducting materials exhibited a linear resistivity change (true / true metallic behavior) of all samples increasing with temperature at any temperature above the onset temperature. Excess amount of vanadium atoms in the crystal structure increases the structural defects of the materials. All these changes were determined by the temperature-resistivity change measurements of the materials and theoretical inferences based on these measurements.

Critical offset, onset transition temperatures and expansion degree parameters of the materials. In this context, the material produced at the optimum doping ratio showed the highest critical offset (84.66 K) and onset critical (85.02 K). On the other hand, at maximum vanadium doping ratio, these values were found for the sample sample with a doping ratio of 71.46 K and 42.74 K, respectively. As for the expansion degree parameters, the calculated values of all materials are respectively 2.12 K pure sample, 0.36 K sample sample with a doping ratio of 0.01, 8.18 K sample sample with a doping ratio of 0.03, 12.01 K The sample sample with a doping ratio of 0.05 was calculated as 28.72 K for a sample material with a doping ratio of 0.10 and a sample doping ratio of 0.3 with a doping ratio of 0.10. As for the carrier concentration number, the sample material with the doping ratio of 0.01 was found to be the maximum value with a value of 0.153041. However, with the increase in the amount of vanadium, this value decreased to 0.082417 with a parabolic reduction for the material with a rate of addition of 0.3.

As for the Vickers hardness measurement results, while the optimum vanadium doping ratio $x = 0.01$, the Bi-2212 materials exhibited a very rapid improvement in the standard ISE (both back elastic and plastic deformation versus applied load) behaviors, but above this critical doping value. ISE behavior is severely reduced and even at the maximum doping rate ($x = 0.30$) the ISE characteristic reaches its lowest point.

In addition, it has been found that the optimum amount of vanadium in the Bi-2212 crystal lattice prevents the spread of cracks due to crack-initiator defects and dislocations within the system as a result of the decrease of crack surface energy and increase of critical force value. However, the increase in additive amount has led to an increase in structural problems, such as defects in the Bi-2212 crystal system, distortions, lattice stresses, faulty orientations of particles, crack producing and crack-initiating defects, strain enhancers, coupling problems and poor intergranular connections. That is, the Bi-2212 superconducting crystallinity quality deteriorates above the optimum doping ratio. That is, if the vanadium atoms are present in the crystal lattice, the fracture orientation and geometry of the materials are reduced very quickly with the applied test loads of the materials, and even at low forces the crack suddenly begins to move at critical propagation speed. Thus, excessive doping of the Bi-2212 crystal structure with vanadium atoms leads to stress-induced phase transformation that accelerates the progression of the cracks. All these findings are supported by the mechanical properties of Bi-2212 superconducting materials, microhardness, Young's modulus, yield strength, fracture toughness, brittleness index, ductility and elastic hardness coefficient. In short, excessive vanadium doping causes more cracks and more free dislocation movements in the crystal structure. Thus, the fundamental characteristic mechanical properties such as critical tensile, bending strength, mechanical strength, resistance to plastic deformation and durability, such as reduced mechanical performance behavior, are significantly reduced.

Meyer's Law, Proportional Specimen Resistance Model, Modified Proportional Specimen Resistance Model, Elastic / Plastic Deformation, Hays Kendall and Notch-Source, which are available in literature in terms of load-independent microhardness values in the saturation limit region of $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ models. According to the results obtained, all models were found to be successful in examining the mechanical characteristics of the studied materials. However, based on the research of microhardness values calculated independently of the load calculated in the saturation limit region, among the models used in this study, $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ ceramic superconductors' general mechanical properties, microhardness characteristic properties and load independent microhardness values were examined. The model has been identified as the most successful model.

As a result, the characteristic properties can be improved with optimum V substitution for the use of Bi-2212 superconductors in new and applicable market areas for the universe economy, thus providing permanent and radical solutions for global energy requirements.

KEYWORDS: Superconductivity, diamagnetic, magnetic flux, Bi-based superconductor, Vanadium oxide; ρ -T; I-V; H_v

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiii
TEŞEKKÜR	xiv
1.GİRİŞ	1
1.1.Süperiletkenlik	1
1.2.Süperiletkenlerin Özellikleri	6
1.2.1 Kritik Sıcaklık.....	7
1.2.2 Kritik Manyetik Alan.....	8
1.2.3 Kritik Akım Yoğunluğu.....	9
1.3 Vanadyum Elementi	9
2.SERTLİK VE SERTLİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	13
2.1.Sertlik	13
2.1.1. Çizme Yöntemi ile Sertlik Tespit Edilmesi	14
2.1.2. Sıçratma Yöntemi ile Sertlik Ölçümü.....	14
2.1.3. Shore Sertlik Ölçümü	14
2.1.4. Girinti (Penetrasyon) ile Sertlik Ölçümü	15
2.1.5. Brinell Sertlik Ölçüm Yöntemi.....	15
2.1.6. Rockwell Sertlik Ölçüm Yöntemi.....	16
2.1.7. Vickers Sertlik Ölçüm Yöntemi	17
2.1.8. Knoop Sertlik Ölçüm Yöntemi	18

3.MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	19
3.1. Süperiletken Malzeme Hazırlama Yöntemleri.....	19
3.1.1. Katı-Hal Tepkime Yöntemi	19
3.1.2. Eritme-Döküm Yöntemi	20
3.1.3. Çözelti-Jel yöntemi	20
3.1.4. Sol-Jel Yöntemi	21
3.1.5. Numunelerin Hazırlanması	21
4.BULGULAR VE TARTIŞMA	25
4.1 Sıcaklık-Öz Direnç Ölçüm Sonuçları	25
4.1.1 Bi-2212 kristal yapısına vanadyum katkısının elektrik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi	25
4.1.2 Bi-2212 kristal yapısına vanadyum katkısının süperiletken özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi	30
4.2 Vickers Sertlik Ölçüm Sonuçları	32
4.2.1. Bi-2212 süperiletken malzemesinin mekanik performans davranışlarının kristal yapıdaki farklı aktif kayma sistemlerine bağlı değişimi	33
4.2.2. Deneysel mikrosertlik ölçüm sonuçları ve uygulanan test yükleri arasındaki strateji	41
4.2.3. Gerçek mikrosertlik değerlerinin teorik modellerle incelenmesi	42
4.2.4. Meyer Kanununa (MK) Dayalı İnceleme	43
4.2.5. Üretilen Numunelerin Orantılı Numune Direnci Modele (ONDM) Dayalı Mekanik Karakteristiklerinin İncelenmesi	46
4.2.6. Modifiyeli Orantılı Numune Direnci Modeli (MONDM) İle Üretilen Numunelerin Mekanik Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi	50
4.2.7. Elastik/Plastik Deformasyon (EPD) Modeline Göre $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ seramik süperiletken Materyallerin Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	52
4.2.8. Çalışılan Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Hays Kendall (HK) Yaklaşım ile İncelenmesi	54
4.2.9. Üretilen Malzemelerin Çentik-Kaynaklı Çatlak (ÇKÇ) Model ile Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi	56
5.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
6. KAYNAKLAR	63
7.ÖZGEÇMİŞ.....	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Normal bir metalin mutlak sıcaklıkta sonlu özdirenç eğrisi ve bir süperiletken için kritik T_c sıcaklıkta sıfıra düşüşünü gösteren $T(K)$ sıcaklığına göre ρ özdirencinin değişimi.....	3
Şekil 1.2 Şematik olarak manyetik alanın dışarı atılışı üst tarafta Meissner olayı gösterilmektedir.....	3
Şekil 1.3 I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerin manyetik alan altındaki davranışı.....	5
Şekil 1.4 Süperiletken ve süperiletken olmayan iki malzeme için direncin sıcaklıkla değişimi	8
Şekil 2.1. Brinell Sertlik Ölçümünde Bilye Ucu.....	16
Şekil 2.2. Vickers Girinti Ucu ve Oluşan İz Şeklinin Görünümü	17
Şekil 3.1. Agat Havan	22
Şekil 3.2. Protherm-Model PTF 12/75/200 Fırın	22
Şekil 3.3. Hidrolik Pres	23
Şekil 3.4 Sıcaklık-Öz Direnç Değişim Ölçüm Sistemi	24
Şekil 3.5. Vickers Sertlik Ölçüm Cihazı	24
Şekil 3.6. Sıcaklık-Özdirenç Değişim Ölçümü	24
Şekil 4.1. Saf ve kristal yapısına farklı oranda vanadyum katkılanmış materyallerin sıcaklığa bağlı özdirenç değişimi	26
Şekil 4.2. $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ süperiletken seramik numunelerin mikrosertlik parametrelerinin uygulanan çentik test yüküne karşı değişimleri.....	35
Şekil 4.3. Tip II seramik kuprat katmanlı $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ perovskite süperiletken malzemelerin $\ln F'$ in $\ln d$ ile değişimi şekli.....	44
Şekil 4.4. Tez kapsamında çalışılan numunelerin çentik test yükünün (F/d) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d) ile değişimine ait grafikleri.....	47
Şekil 4.5. $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ seramik süperiletken malzemelerin çentik yükünün (F) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d) ile değişimine ait grafikleri.....	51
Şekil 4.6. Saf ve kritical örgüsüne vanadyum katkılı seramik materyallerin test yükünün ($F^{1/2}$) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d_p) ile değişimleri	53
Şekil 4.7. Vanadyum katkılı Bi-2212 süperiletken materyallerin uygulanan çentik test yükünün ($F^{1/2}$) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d^2) grafikleri.....	55
Şekil 4.8. $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ perovskite süperiletken malzemelerin mikrosertlik değerlerinin $\ln(Hv)$ çentik test yükü $\ln(F^{5/3}/d^3)$ ile değişimi.....	58

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

- Çizelge 4.1.** Dc Elektrik özdirenç sonuçları (T_c^{onset} , T_c^{offset} , ΔT_c , ρ_{300K} , ρ_{90K} , ρ_{res} , P_{hole} and RRR parametreleri) 29
- Çizelge 4.2.** Farklı uygulanan test yüklerinde $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ süperiletken seramik numunelerin mikrosertlik (H_v) ve Young's modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu (K_{IC}), kırılma indeksi (B), süneklik (D) ve elastik sertlik katsayısı (C_{11}) parametreleri. 38
- Çizelge 4.3.** $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ süperiletken numunelerin mikrosertlik ölçüm sonuçları ve uygulanan test yükleri arasındaki ilişkiler 42
- Çizelge 4.4.** Farklı modellerle hesaplanmış mikrosertlik parametreleri 45
- Çizelge 4.5.** Doygunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerinin modellerin hesaplamaları (H_{PSR} , H_{MPSR} , H_{EPD} , H_{HK} and H_{IIC} .) ile karşılaştırılması 49

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

H_v: Vicker's Mikrosertlik

VO: Vanadyum Oksit

I-V: Kritik Akım Yoğunluğu Grafiği

P-T: DC Özdirenç

K : Kelvin

M: Katının Ortalama İzotopik Kütlesi

T_c: Kritik Sıcaklık

H_c: Kritik Manyetik Alan

J_c: Krtik Akım Yoğunluğu

V₂O₅: Vanadyum Pentaoksit

OSHA: The Occupational Safety and Health Administration

°C: Celcius

E: Young's Modülü

Y: Akma Dayanımı

K_{ic}: Kırılma Tokluğu

B: Kırılma İndeksi

D: Süneklik

C₁₁: Elastik Sertlik Modülü

MK: Meyer Kanunu

ONDM: Orantılı Numune Direnci Modeli

MONDM: Modifiyeli Orantılı Numune Direnci

EPD: Elastik / Plastik Deformasyon

HK: Hays Kendall

ÇKÇ: Çentik-Kaynaklı Çatlak

TEŞEKKÜR

Bu tez ile ilgili yaptığım çalıőmalarım tamamı boyunca desteğini esirgemeyen, hoőgörölü ve mütevazi yaklaşımı, bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Gürcan Yıldırım'a teőekkürlerimi sunarım.

Tez yazım aşamasında işyeri arkadaşlarım ve işyeri amirlerim, yöneticilerim yüksek lisans çalıőmalarım konularında bana çok yardımcı oldular, hepsine minnettarım.

Son olarak, tez çalıőmam esnasında her zaman arkamda durarak desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen aileme minnettarım. Bu çalıőmalarım onlar olmadan mümkün olmazdı.

1.GİRİŞ

1.1.Süperiletkenlik

Süperiletkenlik, belirli maddelerin, doğru akımı hiçbir dirençle karşılaşmaksızın iletebilmek için, aşırı düşük sıcaklıklara soğutuldukları zaman gösterdikleri özelliklerdir. Başka bir deyişle, sıcaklığı belirli bir değerin altına düşürüldüğü zaman doğru akım altında elektriksel dirençleri sıfır olan malzemelere süperiletken denir. Direnç ne kadar büyükse, uygulanması gereken gerilim ve kaybolan enerji de o kadar büyük olur. Fakat bazı iletkenlerde malzeme, kritik sıcaklık denilen bir sıcaklığın altına kadar soğutulduğunda, akımı taşıyan elektronlar enerjilerini ısıya çevirme yeteneklerini kaybederler ve direnç sıfıra düşer. Bu durumda herhangi bir gerilim uygulamadan ve enerji kaybetmeden bir akım yaratmak mümkün hale gelir. Başka bir deyişle, ideal metalik bir yapıda madde kritik sıcaklığın altına soğutulduğunda, fonon etkisi ortadan kalkar ve elektronlar yapı içerisinde örgü ile hiçbir etkileşmeye girmeden rahatlıkla hareket ederler. Bu durumda yapının direnci, kritik sıcaklığın altına aniden sıfıra düşer. İşte kritik sıcaklığın altındaki bu malzemeye süperiletken madde denir. Bu bize, elektrik akımının sıradan iletkenlerde dirençten doğan ve ısı olarak yayılan enerji kaybını engelleme olasılığı verir ki bu yaklaşık %3 ile %10 arasında bir değerdir. Binlerce metal alaşımın da birbirlerinden farklı şartlarda süperiletken olabileceği anlaşılmasıyla birlikte, her geçen gün bu maddelere yenileri eklenmektedir. Bugün hala, insanların yaşayabilecekleri şartlarda ve sıcaklıklarda bilinen teknolojik uygulamalarda kullanılabilecek özelliklere sahip süperiletken bir madde bulunmuş değildir. Her şey bir yana, öncelikle böyle bir süperiletken madde, insanlık tarihinin en önemli sıkıntılarından biri olan enerji sorununu kendiliğinden çözecektir.

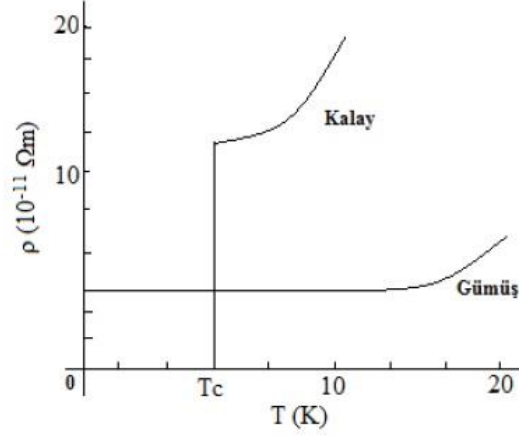
Elektronlar, kusursuz bir örgüye kıyasla, bir kristalde bulunan yapısal kusur veya kirlilik değişimlerinden dolayı saçılırlar. Ayrıca, normal hallerindeki örgü iyonlarının, katıda hareket eden ses dalgalarına benzer bir olayı meydana getiren titreşimleri bulunmaktadır. Bu dalgalara fonon denmektedir. Sıcaklık arttıkça örgüde daha çok fonon oluşmakla birlikte bu durumun sonucunda da, iletim elektronlarını

saçan ve daha fazla dirence sebep olan bir elektron-fonon etkileşmesi oluşmaktadır. Bu yüzden, sıcaklık azaldıkça metalin elektriksel direnci azalmaktadır. Ancak, kristal kusurlarından dolayı, mutlak sıfır civarında bile bir artık direnç beklenir. Bu nedenle, bazı katıların elektriksel direncinin yeterince düşük sıcaklıklarda tamamen yok olması, olağanüstü gibi görünmektedir.

Süperiletkenler içerisindeki elektronların davranışı ise oldukça farklıdır. Bu yapı içerisinde de safsızlıklar ve örgü kusurları vardır. Fakat iletken içerisindeki süper elektronlar karışık örgü içerisinde herhangi bir engelle maruz kalmadan hareket ederler. Çünkü herhangi bir şeyle çarpışmayacaklar ve herhangi bir sürtünme meydana gelmeyecek ve bunun sonucunda akım ve enerji, hiçbir kayba uğramadan iletilecektir.

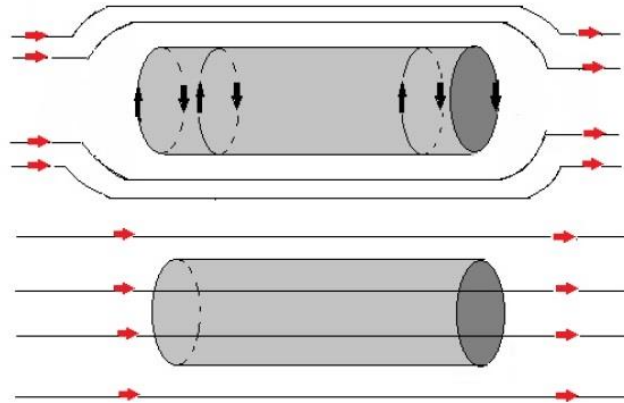
Süperiletken malzemeler içerisinde hareket eden elektronların neden herhangi bir engelle karşılaşmadıkları sorusu bilim insanlarını yıllarca meşgul etmiştir. Bir madde ısıtıldığında örgü titreşimleri artarken, soğutulduğunda bu titreşimler azalır. Önceki araştırmacılar, madde içerisindeki, atomik titreşimlerin, örgü içerisinde elektronların daha kolay geçmesine yardımcı olduklarına inanıyorlardı. Fakat bu durum sıcaklık arttığında direncin düşeceğinin bir göstergesiydi. Bu ve buna benzer basit fikirler süperiletkenliğin açıklanmasında yeterli olmamıştır. Süperiletkenlik durumu kolayca açıklanamayacak kadar karmaşık bir durumdur.

Süperiletkenlik ile ilgili yapılan ilk çalışmalar 1908 yılında H. Kamerling Onnesi'in, Leiden'de helyumu sıvılaştırması ile başlamıştır. Onnes 1911 yılında yaptığı çalışmalar sonucunda, katı cıvanın T_c krtitik sıcaklık denilen belirli bir sıcaklığın altında soğutulduğunda elektriksel direncinin ölçülemeyecek kadar küçük bir değere düştüğünü buldu (Onnes HK, 1911). Sıcaklık $T_c = 4.2 \text{ K}$ 'in altına düşereken, civa normal durumdan süperiletken bir duruma geçmiştir. O zamandan beri 30 K'e kadar yüksek kritik sıcaklıkların altında değer birçok element, bileşikler ve alaşımlar süperiletken olarak bilinmektedir. Fakat bütün maddeler süperiletken değildir. Şekil 1.1, süperiletken kalay ve süperiletken olmayan gümüş için çok düşük sıcaklıklarda öz direncin sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Bir süperiletkende akım, ölçülebilir bir azalma olmaksızın senelerce öyle akabilir.



Şekil 1.1 Normal bir metalin mutlak sıcaklıkta sonlu özdirenç eğrisi ve bir süperiletken için kritik T_c sıcaklıkta sıfıra düşüşünü gösteren $T(K)$ sıcaklığına göre özdirençinin değişimi (Meissner W, Ochsenfeld R, 1933).

1933 yılında Meissner ve Oschenfeld süperiletken bir maddeyi, bir manyetik alan etkisinde kritik sıcaklığın altına soğutulurken süperiletken maddenin iç kısmındaki tüm manyetik akıyı dışarı attığını buldular (Meisner W, Oschenfeld R, 1933). Manyetik alan madde kritik sıcaklığın altına soğutulduktan sonra uygulanırsa, yine manyetik akı süperiletkenden dışarı atılır (Şekil 1.2). Bu nedenle bir süper iletken maddenin tam bir diamagnet gibi davrandığını söyleyebiliriz. Meissner olayı Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



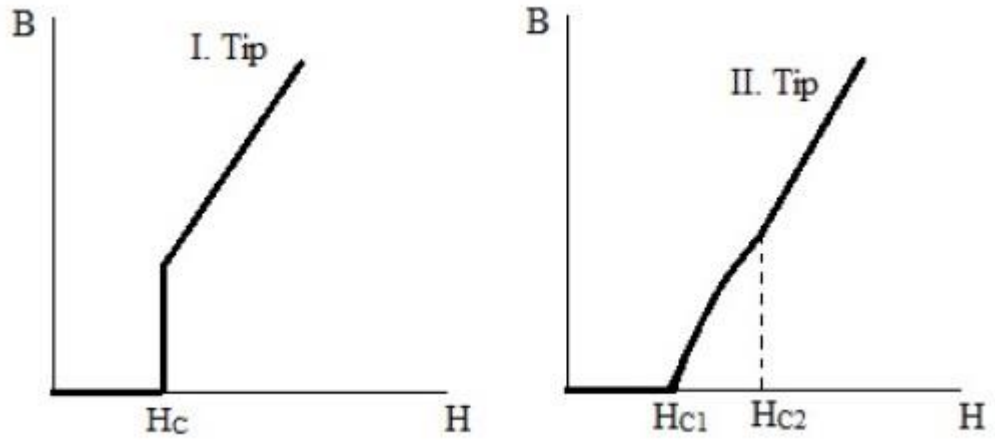
Şekil 1.2 Şematik olarak manyetik alanın dışarı atılışı üst tarafta Meissner olayı gösterilmektedir (Rose, 1978).

Lenz yasasına göre, manyetik akı bir devre içinde değiştiği zaman, devrede akıdaki değişime karşı koyacak yönde bir indirgenmiş akım meydana gelir. Diamanyetik bir atomdaki yörüngesel elektronlar dönme hareketlerini, dıştan uygulanan manyetik alana karşı koyacak şekilde bir net manyetik moment oluşturmak üzere düzenlerler. Bu şu şekilde açıklanabilir: Bir dış manyetik alan bir süperiletkenin içine nüfuz edemez, çünkü hareketleri bir atomdaki gibi engellenmemiş olan süperiletkendeki iletim elektronları hareketlerini, dış alana zıt yönde bir manyetik alan oluşturacak şekilde ayarlarlar. Bu durumda süperiletken madde tek bir diamanyetik atom gibi davranır. Böylecek süperiletkenlerin, manyetik akının dışarlanması ve akım akışına direncin bulunmayışı şeklindeki iki ana özelliği birbiriyle ilişkilendirilmiştir.

1950 yılında yapılan deneyler, aynı elementin farklı izotoplarından oluşmuş kristalin kritik sıcaklığının izotopik kütleyle bağlı olduğunu açıkladığı zaman, süperiletkenlik olayında örgü titreşiminin oynadığı önemli rol kanıtlanmış oldu. M , katının ortalama izotopik kütlesi olup, $M^{-1/2}T_c = \text{sabit}$ ile verilen bu bağımlılığa izotopik etkisi denir. Bu bağıntı, örgü titreşimleri olmadığında ($M \rightarrow \infty$ olduğunda) kritik sıcaklığın sıfıra gideceğini göstermektedir. Örgü titreşimlerinin önemi, süperiletkenlik olayından elektron-fonon etkileşmesinin sorumlu olduğu bir durumu önermektedir. Katının serbest parçacık modelinde, ihmal edilen bu elektron-fonon ve elektron-elektron etkileşmelerini artık bir tarafa bırakamayız. 1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer, bu etkileşimleri de içine alan BCS teorisi olarak da bilinen ayrıntılı bir mikroskobik teori ileri sürdüler (Bardeen J, Cooper LN, Schrieffer JR, 1957). BCS teorisi, mutlak sıfır civarındaki süperiletkenliği açıklamaya yöneliktir. Cooper, atomik örgü titreşimlerinin doğrudan bütün elektronların takım halinde çiftlenmesine neden olur ve kristal örgü içerisindeki engellerle herhangi bir temas girmeden aralarından geçmelerini sağlar. Bu elektronların oluşturduğu takımlara Cooper çiftleri adı verilmektedir. Cooper ve arkadaşları normalde bir elektronun diğer elektronu itmesi gerektiğini ve süperiletken içerisinde ezici bir çekiciliğin olması gerektiğini düşünüyorlardı. Bu ikilemin çözümü fononlarda bulundu. Teorilerine göre, süperiletken örgü içerisindeki pozitif yüklenmiş bir bölgeden negatif yüklü bir elektron geçtiğinde örgüde bir büzüşme meydana geliyordu. Elektron bu bölgeden çıkmadan ve örgü eski pozisyonuna gelmeden önce bu bölgeden geçen ikinci bir elektronun diğer elektron tarafından itilmesi beklenirken, bu pozitif etkileşimden dolayı elektronlar

birbirlerine bağlanırlar. BCS teorisinin öngörülleri deneysel sonuçlarla bir uyum içerisindedir.

Süperiletkenliğin birçok önemli uygulamaları vardır. Örneğin, mıknatıs sarımlarının içinde akan dirençsiz akımlardan doğan süperiletken elektromıknatısların, elektrik motorları ve jeneratörlerde kullanılması belirgin bir uygulamadır. Bu durumda küçük bir sorun ortaya çıkmaktadır. Sarım tellerinde süperiletkenliğe karşı koyacak şekilde manyetik alanlar oluşur. Bu olumsuzluk, II. tip süperiletken malzemeler kullanılarak giderilmiştir. Süperiletkenliği mekanizması açısından I. ve II. Tip süperiletkenler arasında bir fark yoktur. Her iki tür de sıfır manyetik alanda süperiletken-normal geçişi sırasında benzer ısıl özellikler gösterirler. Ancak, Meissner etkisi tümüyle farklıdır. I. tip iyi bir süperiletken manyetik alanı tamamen dışarı atar ve süperiletkenlik yok olduğu anda ise manyetik alan tümüyle dışarı atılır. H_{C1} 'den yukarıda alan kısmen dışarı atılır ama ortam hala süperiletkendir. Daha yüksek bir H_{C2} değerinde akı tümüyle sistem içerisine girer ve süperiletkenlik yok olur.



Şekil 1.3 I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerin manyetik alan altındaki davranışı (Bednorz, Müler, 1986).

1.2.Süperiletkenlerin Özellikleri

Elektronun keşfinin ortaya çıkardığı en önemli sonuçlardan birisi süperiletkenliğin bulunmasıdır. Süperiletkenliğin keşfi yüzyılımızın başlarında olmuştur. Danimarkalı fizikçi Kamerling Onnes 1908 yılında mutlak sıfırın birkaç derece üstündeki sıcaklıklarda cıvanın elektriksel direncini ölçerken 4,2 K’de direncin aniden sıfıra indiğini gözlemledi. Daha sonraları, bu mükemmel iletkenliğe keskin geçişin başka metal ve alaşımlarda da olduğu bulundu ve bu olguya süperiletkenlik adı verildi.

Bir metal, özelliklerine bağlı olarak değişen ve geçiş sıcaklığı adı verilen belli bir sıcaklıkta süperiletken hale gelir. Örneğin, Çinko için bu sıcaklık 0,88 K iken kurşun için 7,2 K’dir. Süperiletkenlik olgusu elektronların davranışıyla belirlenir: Süperiletken bir metalin kristal örgüsündeki serbest elektronların, civarlarındaki pozitif iyonlarla etkileşimleri örgüde kusurlara neden olur. Bunun sonucunda, normalde birbirlerini itmesi gereken elektronlar arasında dolaylı bir çekim kuvveti, dolayısıyla metal içinde elektron çiftleri oluşmaktadır. Cooper Çiftleri adı verilen bu elektron çiftlerinin saçılma ile birbirlerinden ayrılmaları zordur. Üstelik bu çiftlerin saçılmayı önleyici kuantum özellikleri de vardır. Bu çiftler süperiletkenliğin sorumlusudur. Çünkü metallerde elektriksel iletkenlik temelde saçılmaya bağlıdır; ne kadar az sayıda saçılma olursa metal elektriksel olarak o kadar iyi iletken hale gelir. Bunun yanı sıra süperiletkenler büyük miktarda akımda taşıyabilirler. Küçük süperiletken bobinli mıknatıslar çok fazla enerji tüketmeden güçlü manyetik alanlar yaratabilirler. Bu gibi mıknatıslar, manyetik alan sayesinde havada giden trenlerin yapımını sağlayabilmelerinin yanı sıra hızlandırıcı tünellerde ve nükleer manyetik rezonans tarayıcılarında parçacık saptırıcısı olarak kullanılabilirler.

Ayrıca elektrik üretiminde kullanılan senkron jeneratörlerde kullanımıyla üretimde verimin artmasını ve boyutların küçülmesini sağlayabilirler.

Bir süperiletken düşük sıcaklıklara soğutulduğunda iki farklı özellik gösterir.

1-) Madde içerisindeki elektrik akımı, madde yapısını oluşturan iyon örgüleriyle çarpışması sonucu engellenir. Bu olay, maddenin elektrik akımına karşı

gösterdiği direnci oluşturur. Aynı madde bir süperiletken durumuna getirildiğinde, maddeyi oluşturan bu iyon örgüsü, elektrik akımını engellemek yerine, ona destek olur. Bu sayede direnç sıfıra iner.

2-) Süperiletkenlerin doğru akıma hiç direnç göstermemelerinin yanında ayırt edici bir özellikleri daha vardır. Süperiletkenler, yakınlarında bulunan manyetik alanı dışlarlar.

1933'de iki Alman fizikçi Meissner ve Ochsenfeld, süperiletkenlerin manyetik alan çizgilerini ittiklerini ve içlerine sokmadıklarını gözlediler. Yani bir mıknatıs, kritik sıcaklığın altındaki bir süperiletkeni, sanki karşısında ters kutuplu bir mıknatıs varmış gibi iter. Bu olaya *Meissner Olayı* denir (Tokana K, 1988). Silindirik şeklindeki süperiletkenlerle yaptıkları bir seri deneyde, kritik sıcaklığın hemen altına gelince numunenin manyetik alan çizgilerini iterek tam olarak içlerinden kovduklarını ve süperiletken olduklarını göstermişlerdir. Malzemenin içinde olması süperiletkenlerin direncinin sıfır olması kadar doğal bir olgudur. Süperiletkenler ayrıca mükemmel bir diamagnettir.

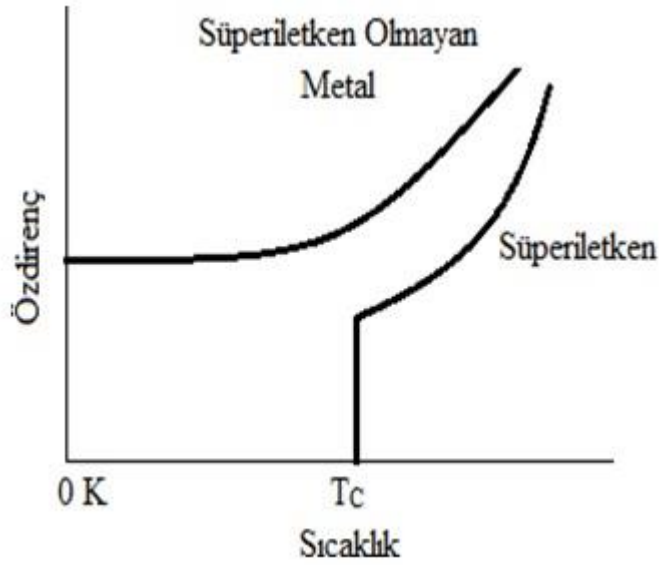
Süperiletkenlik hali çok önemli üç faktörden oluşmaktadır: kritik sıcaklık (T_c), kritik manyetik alan (H_c) ve kritik akım yoğunluğu (J_c). Süperiletken elementlere süperiletkenlik durumunda uygulanan bir manyetik alan (süperiletkenliğin kaybolduğu manyetik alan) değerine kritik manyetik alan (H_c) denir. Bu parametrelerin her biri diğer mevcut iki parametrenin durumuna da bağlıdır. Süperiletkenlik durumunun sürekliliği tüm bu parametrelerin, kritik değerlerinin altında kalmasıyla mümkündür ki bu da malzemeden malzemeye değişim gösterir. H_c ve J_c için en yüksek değer sıcaklığın 0 K'de, T_c için en yüksek değer ise H ve J 'nin sıfır olduğu noktada gerçekleşir.

1.2.1 Kritik Sıcaklık

Bir kısım element, alaşım ve bileşiklerin direnç ve manyetik ölçümlerindeki ani değişimlere karşılık gelen sıcaklık, kritik sıcaklık olup, süperiletkenlikle ilgili temel özelliklerden biridir. Süperiletken malzeme bu sıcaklık değerinin altına

soğutulduğunda malzemede direncin birdenbire sıfıra gittiği (Şekil 1.4) ve malzemenin tam bir diamagnet durumuna geçerek uygulanan manyetik alanı dışarıladığı görülür.

Bu nedenle kritik sıcaklık, direnç ölçümleriyle veya manyetik duyguluk ölçümleriyle belirlenebilmektedir.



Şekil 1.4 Süperiletken ve süperiletken olmayan iki malzeme için direncin sıcaklıkla değişimi (Tokana K, 1988)

1.2.2 Kritik Manyetik Alan

Bilindiği gibi manyetik alan altındaki davranışları ile ayırt edilebilen iki tip süperiletken vardır. Bunlar I. tip ve II. tip olarak adlandırılırlar. Süperiletkenlik özelliği gösteren Niyobyum ve Vanadyum haricinde tüm metalik elementler I. tip süperiletkendir, ve elementleri ve süperiletkenlik özelliği gösteren tüm alaşım ve bileşikler II. tip süperiletkendir. Bütün yüksek sıcaklık süperiletkenleri de II. tip süperiletken sınıfına girer ve tip metalik süperiletkenlerdeki süperiletkenlik mekanizmasında farklılık yoktur. Her ikisi de sıfır manyetik alanda süperiletken-normal geçişinde benzer özelliklere sahiptir. Fakat Meissner etkisi tamamen farklıdır.

1.2.3 Kritik Akım Yoğunluğu

Metallerde akım, iletim elektronları tarafından taşınırken süperiletkenlerde Cooper çiftleri tarafından taşınmaktadır. Metallerde akım taşınırken iletim elektronları dirençle karşılaşır. Direnç, iletim elektronlarının saçılmaları sonucu momentumlarının değişimi ile oluşur. Süperiletkenlerde ise direnç sıfırdır.

Cooper çiftindeki iki elektron birbirlerini saçılmaya uğratırlar ancak bu saçılmada her bir elektronun momentumu değişse de çiftin toplam momentumu sabit kalır. Süperiletkendeki çiftleri oluşturan elektronlar birbirlerini sürekli olarak saçılmaya uğratmalarına rağmen çiftin toplam momentumu değişmediği için bir direnç oluşmaz ve böylece akımda bir kayıp olmayacağı için akım değişmez. Akımın değişmesi için çiftin toplam momentumunun değişmesi gerekir. Çiftin toplam momentumunu değiştirmek (direnç oluşturmak) için çifte dışarıdan bir enerji verilmelidir. Bu enerji Cooper çiftindeki elektronların ayrışması için gerekli olan enerjidir. Bu enerjiyi elektron çiftine veren bir akım yoğunluğu vardır, bu akım yoğunluğuna kritik akım yoğunluğu denir. Kritik akım yoğunluğunun değeri üzerindeki akım yoğunluklarında Cooper çiftleri parçacıklara ayrılır ve bu parçacıklar normal elektron gibi davranırlar; uyarılabilirler, saçılabilirler ve akım taşıyabilirlerse direnç oluşturabilirler. Süperiletkenlikten sorumlu olan Cooper çiftleri kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda oluşur, üstündeki sıcaklıklarda ise ayrışarak dirence neden olur.

1.3 Vanadyum Elementi

Vanadyum çeşitli endüstri kollarında da kullanılan bir elementtir. Vanadyumpentoksit (V_2O_5) en yararlı bileşiği olup, boyaların sabitleştirilmesinde mordan olarak kullanılır. Ayrıca kimyada ve seramik imalinde katalizör olarak kullanılmaktadır. Vanadyum pentoksit, galyum ile karıştırılarak süper iletken magnetler yapılmaktadır.

Vanadyum, motor yataklarında, oto akslarında ve diğer otomobil aksamalarında kullanılan özel alaşımların yapımında çok kullanılır. Çelik imalatında vanadyum vazgeçilmez bir elementtir. Yine uçakların önemli parçalarının yapımında demirle karıştırılarak elde edilen özel çelik imalatında da vanadyum kullanılmaktadır. Diğer

yandan lastik, plastik, seramik ve diğ er kimya endüstrisi alanlarında da sıkça kullanılmaktadır.

Vanadyum çevreye doğal kaynaklardan, özellikle fosil yakıtların yanmasıyla yayılır. Havada, suda ve toprakta uzun süre kalır. Çünkü suda iyi çözünmez. Düşük düzeylerde bitkilerde bulunur. İnsanlara vanadyum, havadan, sudan ve topraktan düşük düzeylerde geçer. Özellikle vanadyum fuel oil ve kömür yakan endüstriyel tesislerden atmosfere vanadium oksitler yayılır. Çevredeki insanlar solunum yoluyla havadan ve besin zinciri ile yiyeceklerden vanadyum alırlar.

OSHA (The Occupational Safety and Health Administration) iş yerlerindeki vanadyum pentaoksit tozları için $0,05 \text{ mg m}^{-3}$, vanadyum pentaoksit duman için $0,1 \text{ mg m}^{-3}$ sınırlarını günlük 8 saat, haftalık 40 saat çalışma için sınır değeri olarak vermektedir. ACGIH (The American Conference of Governmental Industrial Hygienists) kuruluğu da vanadyum pentaoksit için $0,05 \text{ mg m}^{-3}$ derişim sınırını önermektedir. NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health) sağık ve yaş am için 35 mg m^{-3} vanadyumu tehlike sınırı olarak önermektedir.

Birçok yüzey suları $3 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 'den daha az vanadyum içerir. Bununla birlikte, ABD'deki Colorado'da nehrinde (muhtemelen vanadyum atıklarından) $0,2$ 'den $49,2 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 'ye kadar değışme göstermektedir. Çin'deki Yangtze nehrinde $0,24-64,5 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ vanadyum olduğu bildirilmektedir. Japonyadaki bazı mineral sularda $14,8-16,4 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$, nehir sularında ise $17,7-48,8 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ vanadyum bulunmaktadır (Costigan, 2001).

Birçok gıda maddesinde de vanadyum bulunmaktadır. Ağırlıkça yaş patatest e $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ vanadyum bulunduğu belirtilirken pek çok meyve ve sebzelerde $1-6 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ arasında değışmektedir. Hububat çeşitlerinde, deniz ürünlerinde, et ve günlük yiyeceklerde $0,011-0,093 \text{ mg kg}^{-1}$ vanadyum bulunur. Karabiber ve dereotu tohumlarında sırasıyla $0,431$ ve $0,987 \text{ mg kg}^{-1}$ vanadyum içermektedir.

Vanadyum çözeltilerinde oksijen anyonları ve oksijen katyonları şeklinde bulunmaktadır. Doğal sularda vanadyum (V) ve vanadyum (IV) oksidasyon basamağında bulunur. Vanadyum (V) asidik çözeltilerde VO_2^+ bazik çözeltilerde ise VO_4^{3-} (ortovanadata) ve VO_3^- (metavanadat) formalarında bulunur. Buna karşılık

vanadyum (IV), VO^{2+} (vanadil) formunda bulunur. vanadyum (V) ve vanadyum (IV) farklı besleyici ve toksik özelliklere sahiptirler. vanadyum (V), vanadyum (IV)'den daha toksiktir.

Bir geçiş metali olan vanadyumun 5, 4, 3, 2, 1 ve -1 gibi farklı yükseltgenme basamağına sahiptir. Geçiş metallereinden olan (elektronları en dış yörüngesi d orbitalinde bulunan) bu elementin atom numarası yirmi üçtür ve geçiş metallerein tüm özelliklerini (sert, yüksek yoğunluk, iyi ısı iletkenliği ve yüksek erime-kaynama sıcaklığı) kusursuz sergilemesinden dolayı, paslanmaz çelik üretiminde yapı malzemesi olarak yerini alır. Ayrıca, sünek yapı doğası ile bu malzeme çelik yüzeylerinin titanyum kaplanması işleminde bağlayıcı element olarak görev yapar.

Vanadyumun oksijen elementi ile yaptığı ikili bileşikler: VO, V_2O_3 , VO_2 ve V_2O_5 'dir. Bu bileşiklerden ilki (VO) uzun ömürlü, elektronik olarak nötr reaktif bir kimyasaldır. Zayıf V-V metalik bağ içerir bu kimyasal malzeme bozuk NaCl kristal yapısını sergiler. Bant teorisine göre, t_{2g} yörüngesindeki elektron delokalizasyon ve kısmen dolu iletim bantlarıyla elektriği iyi iletir (Greenwood NN, Earnshaw AA, 1997). İkinci bileşiğe geldiğimiz zaman (V_2O_3), atomları dizilişleri uzayda alüminyum oksit kristal yapısını sergileyen bu malzeme hidrojen ve karbon monoksit varlığında V_2O_5 bileşiğinin indirgenmesi ile üretilen siyah renkli bir kimyasaldır, (Brauer G, 1963). Kritik sıcaklığı 160 K olan anti ferromanyetik bir malzemedir ve aynı sıcaklıkta iletkenliği bir anda metalden yalıtkanlığa geçer (Page EM, Wass SA, 1994). Hava ile temasında, diğer oksit bileşiğinden olan, lacivert renkli V_2O_4 (VO_2) bileşiğine döner. Amfoter grubunda (asitlere karşı baz, bazlara karşı asit gibi davranma) yer alan bu kimyasal V_2O_3 ve V_2O_5 bileşiklerin redoks tepkimelerinden oluşur (Greenwood NN, Earnshaw AA, 1984). VO_2 bileşiği bozuk rutil yapısında kristalleşir (vanadyum atomlarının çiftleri arasında metal-metal bağların normal yapıya göre kısılması). Son oksit bileşiği olan V_2O_5 kahverengi/sarı renklidir ve oldukça fazla yükseltgenme durumuna sahiptir. Yani, bu malzemeler hem amfoter hem de yükseltgenme özelliği gösterir.

Bu yüzden, vanadyum tabanlı alaşımlar içinde V_2O_5 en önemli bileşiğidir ve endüstriyel katalizör olarak geniş bir yelpazede kullanılır (Bauer G, Güther V, Hess H, Otto A, Roidl O, Roller H, Sattelberger S, 2005). Ayrıca, seramik (kontakt)

yapımında ve sülfürik asit üretiminde katalizör olarak kullanılan vanadyum pentoksit bileşiğinin boya sabitleyici olarak da kullanımı mevcuttur. Hatta süperiletken miknatısların yapımında, çok dayanıklı ve uzun ömürlü alaşımların eldesinde de kullanımı olması yüzünden teknolojik alanda en fazla kullanılan vanadyum bileşiğidir. Aynı zamanda, çoğu canlıda bulunan bu nadir metal, bazı enzimlerin etkin bölgesinde aktif bölge olarak görev yapar.

Vanadyum oksit malzemeleri, ince film teknolojisinde elektrokromik (optik geçirgenliğin uygulanan dış potansiyel ile değişmesi) özellikleriyle kendine geniş yer bulmaktadır (termokromizm, fotokromizm ve elektrokromizm gibi çeşitli tiplerde renklenme özelliklerinden dolayı). Zaten, vanadyum dioksit kimyasalları bilinen en eski termokromik malzemedir. Bu oksitlerden, V_2O_5 ise hem katodik hem de anodik olarak renklenebilen elektrokromik malzemedir. Yıllardır, gelişmiş elektrokimyasal özelliği bu malzemenin üzerine çalışılmasını yoğunlaştırmıştır. Özet olarak, V_2O_5 elektrokromik cihazlarda, termokromik cihazlarda, güneş pillerinin pencerelerinde, yüksek kapasiteli lityum pillerinin elektrotlarında, elektronik ve optik anahtarlama cihazlarında sıkça kullanılmaktadır (Türhan İ, Tepehan GG, 2009).

Bu çalışmada vanadyum oksit bileşiklerini ikinci tip süperiletken malzemeleri içlerine farklı oranlarda katkılararak oluşturulan yeni sistemlerin elektriksel, yapısal, sertlik, süperiletken ve akı çivileme özelliklerinin geliştirilmesi sağlanacak ve elde edilen tüm deneysel veriler gerek teorik gerekse istatistiksel yaklaşımlarla açıklanılmaya çalışılacaktır. Projenin temel hedefi de negatif/uygun olmayan özellikleri düzeltilen cuprat süperiletkenler, geniş çaplı olarak teknoloji, endüstri ve mühendislik alanlarında kullanımına uygun hale getirilmesidir.

2.SERTLİK VE SERTLİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

2.1.Sertlik

Sertlik malzemenin mekanik özelliklerinden biridir. Katıların bileşimiyle ve yapısıyla yakından ilişkilidir. Bir maddenin sertliği sert bir cisimle çizilerek ya da kesilerek bulunabileceği gibi genellikle numuneye az zarar vermesi ve pratik olması yüzünden iz bırakma yöntemi kullanılmaktadır. Sertlik bağıl bir terimdir. Sertlik derecesini hesaplayabilmek için sertliği bilinen referans bir madde (sertleştirilmiş çelik, tungsten karbür, elmas) kullanılır. Sertlik deneyinde belli bir kuvvet etkisinde sert bir girinti (elmas piramit, vb.) ucu maddenin üzerine kalıcı bir iz bırakır. Burada malzemenin sertliğini hesaplayabilmek için uyguladığımız yük ile girintinin malzeme üzerinde bıraktığı girinti boyutu arasında ilişki kurulur (Cevizci EB, 2013).

Bir maddenin sertliğini bilerek biz malzemenin diğer özellikleri hakkında da yorum yapabiliriz. Mesela, bir malzemenin işlenebilirliği ile sertliği arasında bir ilişki söz konusudur. Genel olarak sertlik ve işlenebilirlik arasında ters bir ilişki vardır. Yani sert malzemelerin işlenmesi zordur (Askeland, 2010). Mikrosertlik sürekli ölçülen mekaniksel karakteristik değildir, yapısal özelliklerin bir araştırma biçimi olarak da gelişmektedir. Bu sebeple bu deneyler bir maddeyi sınıflandırmada önemli yere sahiptir (Giannakopoulos AE, Sures S, 1999).

Sertlik ölçümü hangi sertlik testinin hangi malzemeye kullanılacağına bağlıdır. Ölçümler sonucunda çeşitli sertlik değerlerinden bahsedilebilir. Bu birimler birbirlerine dönüştürülemezler. Malzemelerin seçilmesinde, üretim sırasında üretimin kontrolünde, homojenlik gerektiren işlerde sertlik önemli bir yere sahiptir. Sertlik testleri diğer yapılan testlerle kıyaslandıklarında hem numune üzerinde çok fazla tahribat yaratmaz hem de daha ucuzdur. Deney sonuçlarının doğru bir şekilde karşılaştırılıp yorumlanması için aynı koşullar altında elde etmiş olduğumuz sonuçlara bakmamız gerekmektedir. Sertlik deneyleri tahribatsız oldukları için malzeme elden çıkmadan malzemenin diğer özellikleri hakkında da bilgi sahibi olabiliriz. Endüstriyel sektör bakımından ele aldığımızda sertlik malzemenin ana özellikleri hakkında bize

bilgi sunmazken, yapılması basit ve tahribatsız bir deney olmasından ötürü, malzemenin üretim kalitesinin tespit edilmesinde ve ısıl işlemin belli basamaklarında malzeme kontrolünde, kabul deneylerinde kullanılır

Sertlik ölçme yöntemlerini üç gruba ayırabiliriz.

2.1.1. Çizme Yöntemi ile Sertlik Tespit Edilmesi

Bu yöntemde çeşitli minareler kullanılır. Bu minareler birbirlerini çizme kabiliyetlerine göre belli bir sıraya konulup çizelge haline getirilmişlerdir ve bu çizelgeyi “Mohs sertlik” çizelgesi olarak isimlendirmişlerdir. Bu çizelge oluşturulurken 10 adet mineral sertlik derecelerine göre sıraya konulmuşlardır. En düşük sertliğe sahip olanın değeri 1, en sert olanın mineralin sertlik derecesi 10 olarak kabul edilmiştir

2.1.2. Sıçratma Yöntemi ile Sertlik Ölçümü

Sıçratma yöntemindeki sistemde silindirik, elmastan yapılmış uçlu bir çekiç ya da çelik bilye daha önce belirlenmiş olan bir değerdeki yükseklikten test yapılacak numune üzerine düşürülür. Çekiç ya da bilye numune üzerine düştükten sonra geri zıplama meydana gelir. Buradaki zıplama yüksekliği elastik sertliğin bir ölçüsüdür. Yumuşak malzemelerde bu ölçü (sınır) düşüktür. Bundan dolayı, daha çok enerji absorbe eder ve geri zıplama sonucundaki yükseklik daha azdır. Tespit edilen sertlik derecesi ile lastikler ve plastiklerin sertlikleri, metallerde ise esneklik karşılaştırması yapılır.

2.1.3. Shore Sertlik Ölçümü

Shore sertliğinin tespiti yapılırken 20 g'lık bilye, bir boru içerisinden sertliğini ölçmek istediğimiz malzeme üzerine düşürülür. Buradaki enerjinin bir kısmı malzeme üzerinde meydana gelen şekil değişimi sırasında harcanır. Yumuşak malzemelerde

bilyenin malzeme üzerinde bıraktığı iz büyükken sert malzemelerde küçüktür. Geriye kalan bir miktar enerjiyle de bilyede yukarıya doğru sıçrama yaptırır. Bu sıçramanın yüksekliği numunemizin sertliğini ifade eder.

2.1.4. Girinti (Penetrasyon) ile Sertlik Ölçümü

Penetrasyon yönteminde sertlik, numune üzerine batırılan sert bir cisme karşı göstermiş olduğu mukavemet olarak tanımlanır. Bu yöntemde sertlik ölçerken numune yüzeyine bir uç batırılır. Bu uç genellikle küre, piramit ve koni şeklindedir. Aynı zamanda kullanmış olduğumuz ucun sertliği ölçülecek malzemeden daha sert olmalıdır. Sertleştirilmiş çelik, volfram karbür, elmas vb. malzemeler sertlik tayini için kullanılan uçlara örnektirler. Girinti deneylerinde özel durumlar dışında genellikle batırılacak yük, batıcı uç belirlenen hızda numune yüzeyine dik gelecek şekilde batırılır. Daha sonra gene belirlenen sürede batmış şekilde bekledikten sonra uç numunenin yüzeyinden kaldırılır. Batmadaki derinlik ve batma kesit alanı göz önüne alınarak sertlik değeri hesaplanır (Smith, 2001). Kullanılan batıcı ucun şekline, uygulanan yükü ve deney sonucu oluşan izin ölçülüp değerlendirilmesi yöntemine göre sertlik ölçme yöntemleri farklılık göstermektedir.

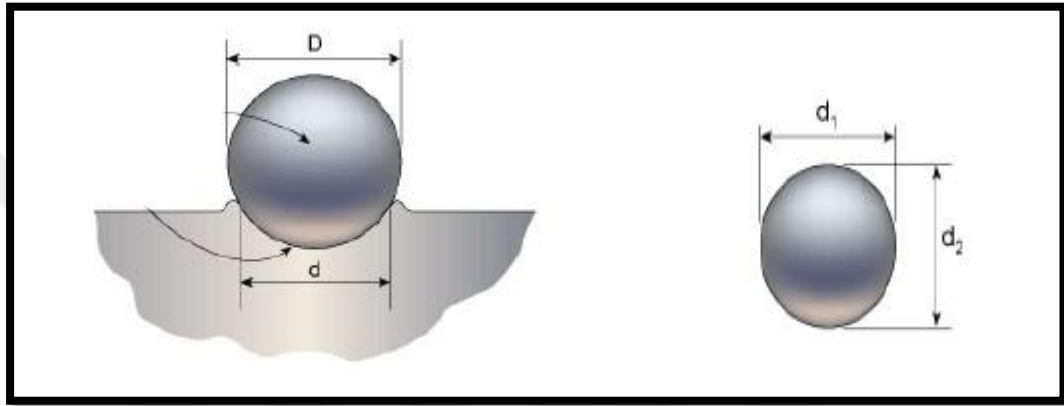
2.1.5. Brinell Sertlik Ölçüm Yöntemi

Brinell sertlik deneyi, metallerin sertliğini ölçmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu ölçümde sertleştirilmiş çelikten yapılmış bilye batıcı uç olarak kullanılır. Şekil 2.1’de Brinell girinti ucu görülmektedir. Standart bilye çapı 2,5 mm, 5 mm veya 10 mm olarak malzemenin sertliğine ve malzeme kalınlığına göre seçilmektedir. Uygulanacak yük seçimi de yapılırken aynı şekilde malzeme sertliğine ve malzeme kalınlığına bakılmaktadır. İşlem gerçekleştirilirken uygun çapta seçilmiş bilye belirlenen yükte malzemenin yüzeyine batırılır. Önceden belirlemiş olduğumuz süre kadar beklenir. Daha sonra bilye kaldırılır ve malzeme üzerinde bilyenin bırakmış olduğu izin çapı ölçülür. Denklem yardımıyla BSN değeri hesaplanır.

Brinell sertlik değeri (BSN)

$$BSN = \frac{F}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Denklemdede F uygulanan yükü (kgf), D bilyenin çapını (mm) ve d izin çapını (mm) göstermektedir. Sonuç olarak Brinell sertliğin birimi kgf/ mm² cinsinden hesaplanmış olur.



şekil 2.1. Brinell Sertlik lmnde Bilye Ucu (Cevizci, 2013)

2.1.6. Rockwell Sertlik lm Yöntemi

Brinell sertlik ölçümlerinde numunede oluşan iz büyüktür. Oluşan iz büyük olduğu içinde daha duyarlı sertlik ölçümü yapılmış olur. Brinell sertlik ölçümünde malzeme yüzeyinde oluşan işleme kaynaklı hatalardan da etkilenmez. Brinell sertlik ölçümünde deney yaptığımız numuneye (parçaya) zarar verdiği için ve yavaş olduğu için Rockwell sertlik ölçüme metodu Brinell sertlik ölçüme metodundan daha çok kullanılır.

Rockwell sertlik skalaları batıcı uç (elmas koni, 1/16 in ve 1/8 in çaplı elik bilye) eşitlerine ve uygulanan yüklere göre çeşitlilik göstermektedir. Batıcı uçlar değiştikçe sonuçlarda farklılık göstermektedir. Rockwell sertliği verilirken skalanın da belirtilmesinin sebebi budur. Rockwell sertlik aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Gr M, Yalçın H, 2006).

Rockwell Sertlik= k-500t

Bu denklemde t mm cinsinden uç izi derinliğini, k değeri ise sabit bir sayıdır.

2.1.7. Vickers Sertlik Ölçüm Yöntemi

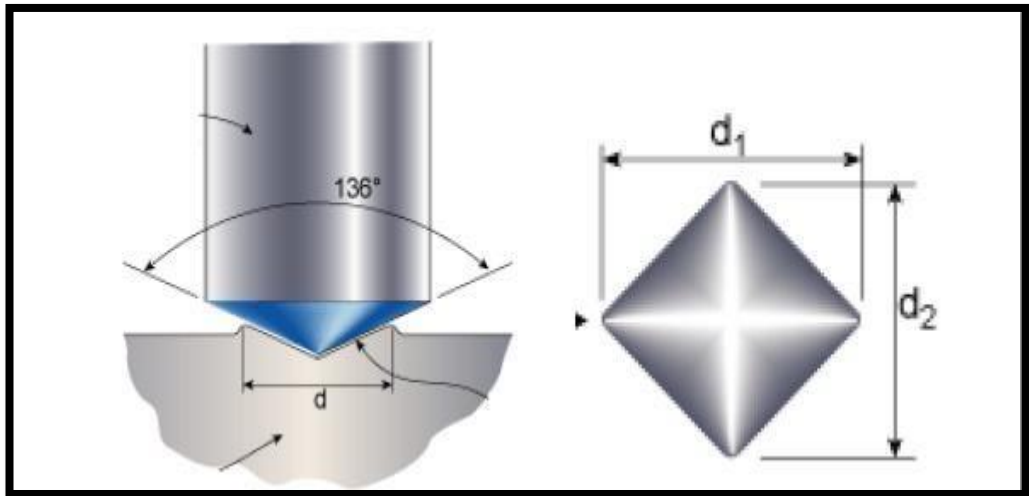
136 derece tepe açılı elmas bir kare piramidin malzeme cinsine göre seçilen bir F yükü ile belirlenmiş bir süre bastırılması sonucunda oluşan izin köşegenlerinin uzunluklarının ölçülmesiyle bulunur. Yapılan deney sonucunda batırılan ucun malzeme üzerinde bıraktığı dikdörtgen şeklindeki iz Şekil 2.2' deki gibidir.

Vickers sertlik değeri (H_V);

$$H_V = 1,8544 F/d^2 \text{ (GPa)}$$

denklemleriyle hesaplanır. Denklemlerde; P uygulanan yükü ifade eder, d ise ($d=(d_1+d_2)/2$) izin ortalama köşegen uzunluğunu bulmamıza yardımcı olur.

Vickers sertlik ölçme yöntemi diğer ölçüm yöntemlerine göre uzun zaman almasına rağmen en duyarlı sertlik ölçme yöntemlerinden birisidir. Kullanılan batıcı uç göz önüne alındığında da nano ve mikro boyutlardaki sertlikleri ölçme bakımından kullanışlıdır (Aymak E, 2007).



Şekil 2.2. Vickers Girinti Ucu ve Oluşan İz Şeklinin Görünümü (Cevizci, 2013)

2.1.8. Knoop Sertlik Ölçüm Yöntemi

Bir malzemenin mikro sertliği Knoop batma deneyi ile ölçülebilir. İnce malzemelerin ölçümünde Vickers sertlik ölçüm yöntemi yerine olarak Knoop sertlik ölçüm yöntemi de kullanılabilir. Burada Vickers sertlik testinden farkı batıcının geometrisinin farklı olması ve skalaların farklı olmasıdır. Knopp sertlik ölçümünde batıcı uç eşkenar dörtgen tabanlı piramit şeklindedir ve zıt yüzeylerindeki iki çifti arasındaki açı eşit değildir. Bu açılar 172°, 30° ve 130°'dir. Burada bir boyutu diğer boyutunun yaklaşık 7 katı olan iz oluşur. Malzemenin sertliği iz derinliğine bakılarak tespit edilir. Burada Vickers sertlik deneyine göre uygulanan kuvvetler daha düşüktür. Cam, seramik gibi gevrek malzemelerin sertliğinin test edilmesini yardımcı olur. Sertlik değeri hesaplanırken uygulanan yükün ucun batıp temas ettiği yüzey alanına oranıdır (Baradan B, 2009).

$$H_K = (14,229 F)/(L^2)$$

Eşitliğiyle Knoop sertlik değeri bulunur. Burada izdeki uzun köşegen L değerini verir.

3.MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Süperiletken Malzeme Hazırlama Yöntemleri

3.1.1. Katı-Hal Tepkime Yöntemi

Bu yöntem kolay olması ve ucuzluğundan dolayı süperiletken malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır (Yazıcı, 2010). Katı-hal tepkime yönteminde asıl amaç malzeme üretirken başlangıçtaki maddelerimizi homojen bir şekilde karıştırmak ve sonrasında ısıl işlem uygulayarak istediğimiz ürünleri elde etmektir. Bu yöntemde istenilen sonuçların elde edilebilmesi için kullanılacak olan maddelerin saflığı şarttır. İlk başta süperiletken yapısında olacak tozlar hassas terazilerde tartılır (Battal Ö, 2015). Daha sonra önceden belirlemiş olduğumuz oranlarda tozlar karıştırılır. Bizim için çok önemli olan homojenliği elde edebilmek için tozların iyi bir şekilde öğütülüp istenen boyutlara getirilmesi gerekir.

Gerekli olan süre boyunca toz öğütüldükten sonra ilk ısıl işlem olan kalsinasyona geçilir. Kalsinasyonda amaç toz karışımına önceki basamakları uygularken girmiş veya girmiş olabilecek yabancı maddelerin, istenmeyen ve üretilen üründe kusurlara sebep olabilecek gazların sıcaklıkla birlikte üründen ayrılmasını sağlamaktır. Bu aşamada belli bir oranda homojenliğe de katkı sağlanır. Fırına karışım konmadan önce istenen sıcaklık ayarlanır. Daha sonra toz fırının potasına konulur. Belli sürede belli sıcaklıkta beklenir. İşlem bittikten sonra karışımımız fırından alınır ağatta tekrar öğütülür. Bu öğütme işlemi ara öğütme olarak da isimlendirilir. Bundan sonraki ısıl işlem sinterlemedir. Fakat bu işleme geçmeden önce toza istenen şekli vermek ve gerekli olan bağ kuvvetini elde edebilmek için presleme yapılır. Yaklaşık 3 dakika boyunca gerekli olan 6 ton arasında basınç uygulanarak tozlar istenilen şekillere getirilir. Şekil verme işleminden sonra sinterleme işlemine geçilebilir. Geçiş sıcaklığını yükseltmek, istenmeyen örgü kusurlarını, yapıda istenmeyen çeşitli gazları ortadan kaldırmak, istenilen süperiletken fazı elde etmek, atomlar arasındaki bağları kuvvetlendirmek için erime sıcaklığına yakın bir değere ayarlanmış fırında sinterleme

işlemi gerçekleştirilir. Belirli süre fırında bekletildikten sonra numune oda sıcaklığına yavaşça soğutulur. Yavaş soğutma sebebi soğuma sırasında numunemizin iç kısmında meydana gelebilecek iç gerilmeleri önlemektir. Kalsinasyon işleminde sıcaklık BSCCO ile TBCCO tip süperiletken malzeme türlerinde yaklaşık 750-850 °C civarlarına YBCO tür süperiletkenlerde ise 850-950 °C gibi yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu yöntemdeki süreler sıcaklık değerleri üretilmek istenen süperiletken malzemenin türüne göre değişmektedir (Yazıcı D, 2010).

3.1.2. Eritme-Döküm Yöntemi

Bu yöntemde amaç yüksek sıcaklık fırınlarında yüksek sıcaklığa dayanıklı olan potalarda yaklaşık 1000-1200°C de belli oranlardaki tozları eriterek atomsal olarak homojen karışım sağlamaktır. Katı-hal yönteminde olduğu gibi ilk başta belli oranlardaki tozlar agat yardımıyla karıştırılıp istenen boyutta toz hale getirilir. Öğütülmüş tozlar ilk önce kalsinasyon işlemi görürler. Bu işlem sonunda tozlar yüksek sıcaklığa dayanıklı (örneğin platin) pota içinde, yüksek sıcaklık fırınında yavaş yavaş sıcaklığı artırılarak 1000-1200°C sıcaklıklarına getirilir ve daha önce belirlenmiş bir süre bu sıcaklıkta bekletilir. Erimiş numuneyle yaklaşık aynı sıcaklıkta olacak şekilde başka bir fırında ısıtılmış kalıplara erimiş numune dökülür. Yaklaşık olarak aynı sıcaklık değerinin yakalanmak istenmesinin sebebi sıcaklık farkından kaynaklı gerilmeleri ve çatlama önleme çabasıdır. Daha sonra son aşama olan tavlama işlemi gerçekleştirilir ve süperiletken malzeme hazırlanmış olur.

3.1.3. Çözelti-Jel yöntemi

Bu yöntem süperiletken hazırlama yöntemi olarak yeni yeni kullanılmaya başlanmıştır. Yöntem uygulanırken üretilmek istenen malzemenin miktarı kadar, amonyum nitrat malzemeyle karıştırılır. Daha sonra bir beher içinde 180 ile 200°C dolaylarındaki bir sıcaklıkta sıvı hale gelinceye kadar karıştırılır. Karıştırmanın süresi sıvı mürekkep mavisi rengini alıncaya kadardır. Bu süreçte zehirli gaz çıkışları mevcuttur. Isıtma ile birlikte istenmeyen nitrat, amonyum ve atık su uzaklaştırılarak

koyu renkli çökelti elde edilir. Sonraki süreçte bu çökelti öğütülür. Öğütülerek toz haline gelen numuneye kalsinasyon işlemi uygulanır. Kalsine edilmiş tozlar öğütülür ve diğer yöntemlerde de yapıldığı gibi preslenir. Preslenen numune ısıtma işlemlere (tavlama) maruz bırakılır. Tavlama işleminden sonra süperiletken malzeme elde edilir.

3.1.4. Sol-Jel Yöntemi

Bu yöntemde sıvı fazdan katı faza yani Sol'den jel'e geçiş sağlanır. Burada başlangıç tozları bir çözücü yardımıyla çözündürülür. Bu işlemde iki adet tepkime gerçekleşir. Bunlar hidroliz ve polimerleşmedir. Bu tepkimeler sayesinde başlangıç tozları koloid yapıya sahip sol'e dönüşür. Koloidal yapı heterojendir. Çözülmüş olan tanecikler çözücünden ayrılmazlar. Bu yapı daha sonra normal fırınlarında kurutulurlar. Burada jel kıvamını alır. Bir sonraki aşamada yüksek sıcaklık fırınının yardımıyla yakılarak kül formuna dönüşürler. Daha sonra diğer yöntemlerde uygulandığı şekilde agatta toz haline getirilir, ilk kalsinasyon uygulanır, tekrar havan veya agatta dövme işlemi gerçekleştirilir ve preslenerek tablet haline gelir. Tablet formundaki numune erime sıcaklığının altında belli bir süre ısıtılarak (sinterleme) süperiletken malzeme elde edilir.

3.1.5. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında çalışılan malzemeler standart katı hal reaksiyon metodu ile üretilmiştir. Herhangi bir kimyasal firmadan temin edilen yüksek saflıktaki Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO ve V_2O_3 kimyasal tozlar elektronik tartıyla istenilen stokiometrik oranda (örneğin: $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ ve molar $0,00 \leq x \leq 0,30$ oranlarında) Bi-2212 bileşiğini oluşturmak için seramik kroze kap içerisinde toplanmış ve 9 saat boyunca daha homojen bir karışım elde etmek amaçlı öğütücüde karıştırılmıştır. Bu prosesin hemen ardından, karışımdaki homojen olarak dağılan kimyasalların daha küçük parçacıklara sahip olabilmesi için (taneler arasındaki temas yüzeyini arttırıp daha kolay bağ yapma) yaklaşık 30 dakika boyunca havanda ezilmiştir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Agat Havan

Elde edilen bu son karışım kül fırında (daha önce saf Bi-2212 süperiletken materyali üretimi için elde edilen en uygun kalsinasyon sıcaklık ve süre olmasından ötürü) 800 °C de 36 saat boyunca ısıtılma tabi tutulmuşlardır (Şekil 3.2. : Isıl işlemlerin yapıldığı fırın).



Şekil 3.2. Protherm-Model PTF 12/75/200 Fırın

Isıl işlem boyunca fırının ısınma ve soğuma oranı 5 °C/dk olarak ayarlanmıştır (en iyi kristal yapı, en yüksek kritik geçiş sıcaklığı ve kritik akım yoğunluğuna sahip Bi-2212 malzeme üretiminde kullanılan ısınma ve soğuma değeridir). Daha sonra fırından alınan tozlar 5 dakika boyunca 300 MPa basınç altında dikdörtgen prizma şeklinde (1,5x0,5x0,2 cm³) kalıplara basılarak (Şekil 3.3), son şekilleri verilmiştir. Elde edilen parçalar (külçeler) tekrar kül fırına koyulup, 850 °C sıcaklıkta 36 saat sürede tavlama işlemi gerçekleştirilerek, tüm (saf ve farklı oranlarda vanadyum katkılı) numunelere optimum Bi-2212 süperiletkenlik fazı verilmiştir. Üretilen tüm yeni örneklerin karakteristik özellikleri sıcaklık-öz direnç değişimi (Şekil 3.4), kritik akım yoğunluğu, kütle yoğunluğu, toz X-ışını kırınım (Şekil 3.5) ve Vickers sertlik ölçüm (Şekil 3.6) deneyleri ile belirlenmiştir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar doğrultusunda Bi-2212 kristal yapısında optimum vanadyum atomu katkılama oranı belirlenip, üretilen yeni sistemlerin teknolojiye, endüstriye ve mühendislik alanlarına uygulanabilirliği tezin bulgular ve tartışma bölümünde detaylı olarak tartışılmıştır.



Şekil 3.3. Hidrolik Pres



Şekil 3.4 Sıcaklık-Öz Direnç Değişim Ölçüm Sistemi



Şekil 3.5. Vickers Sertlik Ölçüm Cihazı



Şekil 3.6. Sıcaklık-Özdirenç Değişim Ölçümü

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada optimum Bi-2212 süperiletkenlik fazına, en yüksek kritik sıcaklığına, kritik akım yoğunluğuna, ideal eğilme mukavemet değerine, mekanik performansına ve mekanik dayanıklılığına sahip olan Bi-tabanlı süperiletken malzeme üretimi için en ideal ortam koşulları için farklı tavlama süreleri (24 saat, 36 saat ve 48 saat) ve sıcaklıkları (840 °C, 850 °C ve 860 °C) denenmiştir. En ideal tavlama koşulları 850 °C’de 36 saatlik tavlama süresi olarak belirlenmiştir. Daha sonra farklı molar ($0,00 \leq x \leq 0,30$) oranlarda vanadyum katkılanarak tip II seramik kuprat katmanlı $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ perovskite süperiletken malzemeler (katkılanma oranlarına göre V-1; $x=0,01$ katkılanma oranı olan numune, V-2; $x=0,03$ katkılanma oranı olan numune, V-3; $x=0,05$ katkılanma oranı olan numune, V-4; $x=0,07$ katkılanma oranı olan numune, V-5; $x=0,1$ katkılanma oranı olan numune, V-6; $x=0,3$ katkılanma oranı olan numune) üretilmiştir. Tezin bu kısmında sırası ile bu materyallerin özellikleri sıcaklık-öz direnç, kritik akım yoğunluğu, Vickers sertlik ve kütle yoğunluğu değişimleri şekiller ve çizelgeler ile birlikte verilecektir.

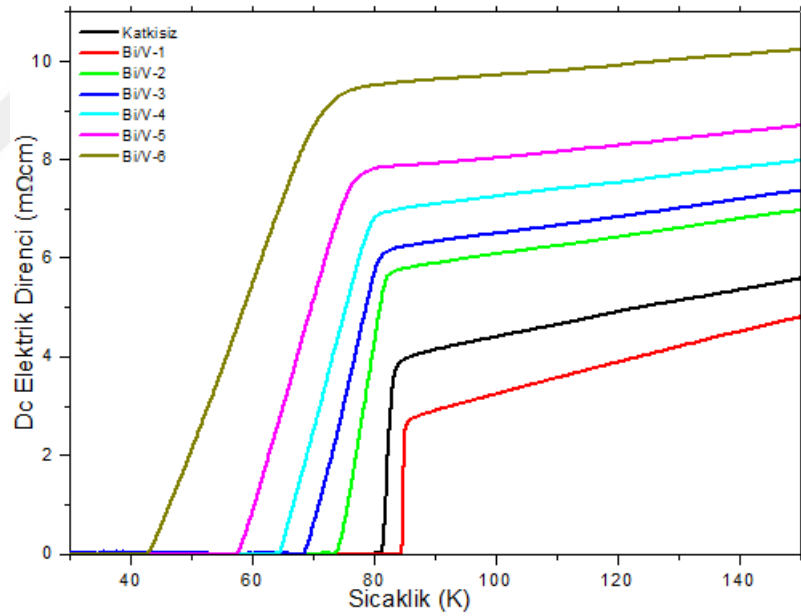
4.1 Sıcaklık-Öz Direnç Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmadaki sıcaklığa bağlı dc elektrik özdirenç değişiminden elde edilen verileri üretilen numunlerin elektrik ve süperiletken özelliklerine etkileri olmak üzere 2 temel kısımda inceleyeceğiz.

4.1.1 Bi-2212 kristal yapısına vanadyum katkılmasının elektrik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi

Tip II seramik kuprat katmanlı $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ perovskite süperiletken malzemelerin 35–150 K sıcaklık bölgesindeki dc elektrik özdirenç değişimi Şekil 4.1’de detaylı olarak verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere Bi-2212 süperiletkenin krital yapısına vanadyum katkılanması malzemelerin elektrik özdirenç

eğrilerinde ciddi değişimlere neden olmaktadır. Bu eğriler kristal yapısına farklı oranlarda vanadium katkılanmış seramik numunelerin kritik offset (T_c^{offset}) ve onset (T_c^{onset}) geçiş sıcaklıkları, genişleme derecesi ($\Delta T_c = T_c^{onset} - T_c^{offset}$) parametresi, oda sıcaklığı özdirenç değerleri (ρ_{300K}), 90 K özdirenç değeri (ρ_{90K}), artık özdirenç (ρ_{res}) ve artık özdirenç oranları (RRR) gibi önemli elektrik ve süperiletkenlik özellikleri üzerine etkilerini incelemeye olanak sağlamıştır. Detaylı incelemeye başlamadan önce, katkılama oranı en düşük seviyede iken ($x=0,01$), Bi-2212 süperiletken malzeme en iyi elektrik ve süperiletkenlik özelliklerini sergilediği ve bu kritik değerden sonra yukarıda bahsi geçen tüm temel karakteristik özelliklerin kötüleşmeye başladığı yorumu yapılır. Hatta katkılama değeri artması ile bu özellikler de kademeli olarak kötüleşmeye gözlenirken, maksimum katkılama oranında ($x=0,03$) Bi-2212 seramik malzeme en iletkenlik ve süperiletkenlik değerlerine sahip olur.



Şekil 4.1. Saf ve kristal yapısına farklı oranda vanadyum katkılanmış materyallerin sıcaklığa bağlı özdirenç değişimi

Elde edilen grafikleri detaylandırırsak, üretilen tüm $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ perovskite süperiletken malzemeler onset (süperiletkenlik geçiş) sıcaklığı üstündeki herhangi bir sıcaklık değerinde, bütün numunelerin sıcaklıkla artan doğrusal bir özdirenç değişimi ($dp/dt > 0$) sergilemelerinden dolayı (sıvı model tarafından tanımlanan) gerçek/doğru metalik davranış sergiler (Saritekin NK, Pakdil M,

Bekiroğlu E, Yildirim G, 2016, Abdeen W, Marahba S, Awad R, Abou Aly AI, Ibrahim IH, Matar M, 2016). Bunun nedeni, materyallerin elektronik yapısındaki Fermi enerji seviyesi civarında bulunan aktif ve dinamik elektronik hal yoğunluklarının logaritmik olarak artmasındandır. Bu çalışmada katkılama oranı $x=0,01$ iken gerek öz direncin sıcaklığa bağlılığı gerek gerçek metalik özellik iyileşme göstermektedir. Ancak, bu kritik değerden sonra tüm katkılama oranlarında bu bağlılık ve metalik özellik sürekli olarak azalma göstermektedir. Bu bağlamda, Bi-2212 kristal yapısına optimum vanadyum atomlarının bulunması homojen ve süperiletken bölgelerde daha fazla etkili ve güçlü elektron-fonon oluşum olasılığına yardımcı olur. Ve böylelikle, Bi-2212 süperiletken materyalin elektriksel ve süper iletken özelliklerinde ciddi bir artış gözlemlenir. Ayrıca, metalik karakteristik davranışındaki iyileşme aktif Cu-O₂ sıralı katmanlarındaki yapısal problemlerin azalması, kristal yapıdaki arayüzeyler arasındaki bağlantının iyileşmesi ve taşıyıcı konsantrasyonlarının artması ile doğrudan ilişkilidir (Allen PB, Pickett WE, Krakauer H, 1988). Ayrıca, Bi-2212 kristal yapısında fazla miktarda bulunan vanadyum atomları ise kalıcı yapısal problemlere neden olmaktadır (Anderson PW, 1991, Turkoz MB, Nezir S, Terzioglu C, Varilci A, Yildirim G, 2013, Martin S, Gurvitch M, Rice CE, Hebard AF, Gammel PL, Fleming RM, Fiory AT, 2010). Yukarıda tanımlanan elektrik ve süperiletkenlik parametrelerin numerik değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgeden ilk olarak oda sıcaklığı öz direncin değişim değerleri incelendiğinde, saf numunenin 9,24 mΩcm gibi bir öz direnç değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer, katkılama oranı en düşük iken ($x=0,01$) 8,84 mΩcm’e düşmektedir. Ancak, katkılama oranı artması ile V-2, V-3, V-4, V-5 ve V-6 malzemelerinin öz dirençleri sırasıyla 9,52 mΩcm, 9,90 mΩcm, 10,21 mΩcm, 10,62 mΩcm ve 11,61 mΩcm olarak bulunmuştur. Burada, Bi-2212 kristal yapıda optimum vanadyum atomu bulunması durumunda materyalde daha fazla süperiletken bölgeler oluşumuna, daha çok taşıyıcı konsantrasyon bulunmasına, daha etkili ve güçlü elektron-fonon oluşum olasılığına ve yapısal problemlerin azalmasına neden olmaktadır (Shabna R, Sarun PM, Vinu S, Syamaprasad U, 2010). Bu katkı oranının üstünde, mekaiizma tamamen tersine dönmektedir.

Diğer elektriksel bulgulara (ρ_{res} , ρ_{90K} ve RRR) gelindiğinde, ilk parametre (artık öz direnç) aşağıdaki verilen Matthiessen kuralı ile belirlenir (Newns DM, Pattnaik PC, Tsuesi CC, 1991)

$$\rho(T) = \rho_{res} + \rho_i(T)$$

Bu kuralda, bir malzemenin herhangi bir sıcaklıktaki özdirenci, artık ve sıcaklığa bağlı özdirenci olmak üzere iki ana kısımdan oluşur. İlk değer (artık özdirenç), sıcaklıktan doğrudan bağımsızdır ve bu değerler sıcaklığa bağlı özdirenç eğrilerinin üstünden ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilir. İşte bu yüzden, artık özdirenç parametresi materyallerin kristal yapı kalitesi ve kristal yapı içerisindeki bölgeler arası metalik bağlantılarla ilişkilidir (Zalaoglu Y, Yildirim G, Buyukuslu H, Saritekin NK, Varilci A, Terzioglu C, Gorur O, 2015). Bu çalışmada, saf numunenin ρ_{res} değeri 1,80 m Ω cm olarak ölçülmüştür. Optimum katkılama bölgesinde (x=0,01) bu değer 0,08 m Ω cm olarak bulunurken, katkı oranının artması ile değer 8,65 m Ω cm'ye (V-6 için) kadar artmaktadır.

Çizelge 4.1. Dc Elektrik öz direnç sonuçları (T_c^{onset} , T_c^{offset} , ΔT_c , ρ_{300K} , ρ_{90K} , ρ_{res} , P_{hole} and RRR parametreleri)

Numuneler	ρ_{300K} (m Ω cm)	ρ_{res} (m Ω cm)	RRR (ρ_{300K}/ρ_{90K})	ρ_{90K} (m Ω cm)	T_c^{offset} (K)	T_c^{onset} (K)	ΔT_c (K)	P_{hole}	ρ (g/cm ³)	P (%)
V-0	9,24	1,80	2,23	4,15	81,12	83,24	2,12	0,136492	5,87	6,825397
V-1	8,84	0,08	3,05	2,90	84,66	85,02	0,36	0,153041	5,97	5,238095
V-2	9,52	4,05	1,62	5,89	73,67	81,85	8,18	0,119829	5,84	7,301587
V-3	9,90	4,75	1,56	6,35	68,57	80,58	12,01	0,111625	5,81	7,777778
V-4	10,21	5,66	1,44	7,11	64,24	79,32	15,08	0,105623	5,77	8,412698
V-5	10,62	7,04	1,34	7,92	57,39	76,59	19,2	0,09729	5,73	9,047619
V-6	11,61	8,65	1,20	9,62	42,74	71,46	28,72	0,082417	5,66	10,15873

Deneyisel sonuçların bulgulara dayanarak, optimum vanadyum konsantrasyon seviyesinin varlığında yukarıda verilen temel özelliklerin önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varmak doğru olacaktır.

Ayrıca, ikinci önemli parametre (90 K özdirenç, ρ_{90K}), bize Bi-2212 süperiletken kristal sisteminin aktif Cu-O₂ sıralı katmanlarındaki safsızlık saçılması ve kafes çarpıklığı hakkında bilgi verir. Çizelge 4.1’de elde edilen deneysel sonuçlara bakıldığı zaman, ρ_{90K} değerleri ρ_{res} bulguları ile paralel ($x=0,01$ için azalan, sonra artan bir eğilim) bir sonuç sergiler. Bu bağlamda, en kaliteli örnek olarak düşünülecek olan V-1 materyali 90 K sıcaklıkta 2,90 m Ω cm’luk bir özdirenç sergilerken, en fazla kristal problemlere sahip olan V-6 örneği en yüksek (9,62 m Ω cm) ρ_{90K} değeri sergilemiştir.

Önemli elektriksel parametrelerden olan artık özdirenç oran (RRR) değerleri, üretilen numunelerin oda sıcaklığı ve 90 K sıcaklıktaki öz dirençleri arasındaki oranlarıdır (ρ_{300K}/ρ_{90K}) (Ekin J, 2006). Hazırlanan örneklerin RRR değerleri Çizelge 4.1’de sayılsa olarak verilmiştir. Çizelgedan açıkça görüleceği üzere, saf numunenin RRR değeri 2,23 olarak bulunurken, bu değer ilk başta katkılama oranı $x=0,01$ için 3,05’e çıkmıştır. $x=0,01$ katkılama oranından sonra bu değer sürekli azalarak, maksimum katkılama oranında ($x=0,30$) 1,20 olarak tespit edilmiştir. Bu deneysel bulgular, üretilen tüm materyaller arasında V-1 seramik kuprat katmanlı perovskite süperiletken numunesi en yüksek kaliteli kristal yapıya sahip olduğu bulunmuştur. Özetlenecek olursa, Bi-2212 süperiletken kristal yapısına $x=0,01$ molar vanadyum katkılanması durumunda, yeni oluşacak kristal yapı en iyi elektrik özelliği sergiler.

4.1.2 Bi-2212 kristal yapısına vanadyum katkılamının süperiletken özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi

Bu kısımda Bi-2212 süperiletken kristal yapısına farklı molar oranlarda vanadyum katkılamının malzemelerin süperiletkenlik üzerine etkilerin belirlenip, tartışılacaktır. Bu bağlamda, bu Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1 kullanılarak, vanadyum atomlarının katkılanması ile çalışılan materyallerin kritik offset (T_c^{offset}) ve onset (T_c^{onset}) geçiş sıcaklıkları ve genişleme derece ($\Delta T_c = T_c^{onset} - T_c^{offset}$) parametrelerinin

nasıl değiştiği yorumlanacaktır. Bilindiği üzere, T_c^{offset} parametresi direct olarak etkili ve güçlü elektron-fonon oluşum olasılığına ve kristal yapıda süperiletken bölge(ler) bulunmasına bağlıdır. Bu nedenle sıcaklık değeri yalnızca süperiletkenliğin başlangıcını değil, aynı zamanda izole edilmiş tanecik içlerinin süperiletken faza geçişini gösterir (Li M, Zhang Y, Li Y, Qi Y, 2010). Yine, bu parameter bize kristal sistemdeki farklı süperiletken faz oranlarını ve tanecikler arası bileşen özelliklerini gösterir (Xu X, Kim JH, Dou SX, Choi S, Lee JH, Park HW, Rindfleish M, Tomsic M, 2009). Böyle, bir malzeme T_c^{offset} sıcaklığı altında iken kristal yapıda bir anda süperiletken homojen bölgeler oluşmaya başlar ve materyal süperiletken özellik gösterir. Bunun yanında, T_c^{onset} değerleri ise super elektronların düzen parameteresinin, hibridizasyon mekanizmasının, metastabilite (Cu-3d ve O-2p dalga fonksiyonlarının üst üste binmesi ve elektronik hal yoğunluklarının lokalizasyonu) durumunun ve elektron-fonon oluşum olasılığının, aktif Cu-O₂ sıralı katmanlarındaki taşıyıcı konsantrasyonlarının belirlenmesinde kullanılır (Ianculescu A, 2006, Awad R, Abou-Aly AI, Abdel Gawad MMH, Eldeen IG, 2012). Bu iki temel karakteristik parametrelerin arasındaki ilişki de malzemelerin teknolojik uygulama alanlarında ne derece etkili olduğunu gösterir. Şekil 4.1'den de anlaşılacağı üzere Bi-2212 süperiletken kristal yapısına vanadium atomu katılmasında yukarıda bahsi geçen tüm özellikleri ciddi şekilde etkilemiştir. Numerik değerlere gelecek olursak, Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere saf Bi-2212 süperiletken numunesinin T_c^{offset} değeri 81,12 K olarak bulunmuşken, bu değer katılama oranı x=0,01 için 84,66 K'e (çalışmada elde edilen en yüksek değer) çıktığı gözlemlenmiştir. Lakin, katılama değeri bu kritik değer üstüne çıktığı zaman ölçülen T_c^{offset} değerleri sürekli olarak düşmüştür. Bu bağlamda, V-2 için 73,67 K, V-3 için 68,57 K, V-4 için 64,24 K, V-5 için 57,39 K ve V-6 materyali için 42,74 K olarak belirlenmiştir. Benzer olarak T_c^{onset} değerlerine bakacak olursak, optimum katılama oranında V-1 numunesi 85,02 K olarak bulunurken, maksimum katılama oranında V-6 numunesi 71,46 K T_c^{onset} değeri sergilemişlerdir. Saf numunenin T_c^{onset} değeri ise 83,24 K olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ışığında, tüm materyallere ait hesaplanan ΔT_c parametreleri sırası ile 2,12 K saf numunesi, 0,36 K V-1 örneği, 8,18 K V-2 malzemesi, 12,01 K V-3 materyeli, 15,08 K V-4 malzemesi, 19,20 K V-5 numunesi ve V-6 malzemesi için 28,72 K olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, Bi-2212 süperiletken kritikal yapısına vanadyum katkılanması ile malzemelerin bakır iyonlarının taşıyıcı konsantrasyonu değişimi oranını aşağıdaki verilen formül ile hesapladık (Saritekin NK, Pakdil M, Yildirim G, Oz M, Turgay T, 2016):

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

denklemden, T_c^{max} değeri Bi-2212 süperiletken fazı için 85 K olarak alınırken, T_c^{offset} parametreleri Çizelge 4.1'den alınmıştır. Elde edilen tüm değerler Çizelge 4.1'de detaylı olarak verilmiştir. Bu Çizelgeden gözlemlendiği üzere Bi-2212 kristal yapısındaki taşıyıcı konsantrasyon sayısı vanadyum katkı miktarına göre parabolik olarak değişmektedir. Bu bağlamda en büyük taşıyıcı konsantrasyon sayısı 0,153041 olarak V-1 malzemesi için bulunmuştur. Lakin, vanadyum miktarının artması ile bu değer V-6 materyali için parabolik bir azalma ile 0,082417'e kadar düşmüştür. Bu değişim optimum katkılama değerinde ($x=0,01$) süperiletken özellikler artarken, neden Bi-2212 kristal yapısı aşırı vanadyum katkılanmasında tüm elektrik ve süperiletken karakteristik özelliğinin düşmesini göstermektedir.

4.2 Vickers Sertlik Ölçüm Sonuçları

Tezin bu kısmında kristal yapısına vanadyum katkılı Bi-2212 süperiletken materyallerin mekanik özelliklerinin değişimi SHIMADZU HVM-2 model sertlik ölçüm cihazı ile incelenmiştir. Diğer bir deyişle vanadyum atomlarının tip II seramik kuprat katmanlı $Bi_{2.0}Sr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ perovskite süperiletken malzemelerin potansiyel uygulama alanlarındaki kullanımının ne derece etkileneceğini normal atmosferik basınç koşullarında 0,245 N ila 2,940 N arasında değişen kuvvetler altında Vickers sertlik ölçümleri ile inceledik. Bu bağlamda elde edilen sonuçların yorumlanması bize şu 3 temel problemi detaylı olarak incelememize yardımcı oldu: (I) temel matrise vanadyum katkılanmasının kritikal yapı içerisinde var olan aktif kayma sistemlerinin oluşumu ve malzemelerin mekanik davranışları arasında temel bağlantılar kurulması; (II) deneysel mikrosertlik ölçüm sonuçları ve uygulanan test yükleri (0,245 N-2,940 N) arasında güçlü bir ilişki kurulması ve katkılama mekanizmasının kritik

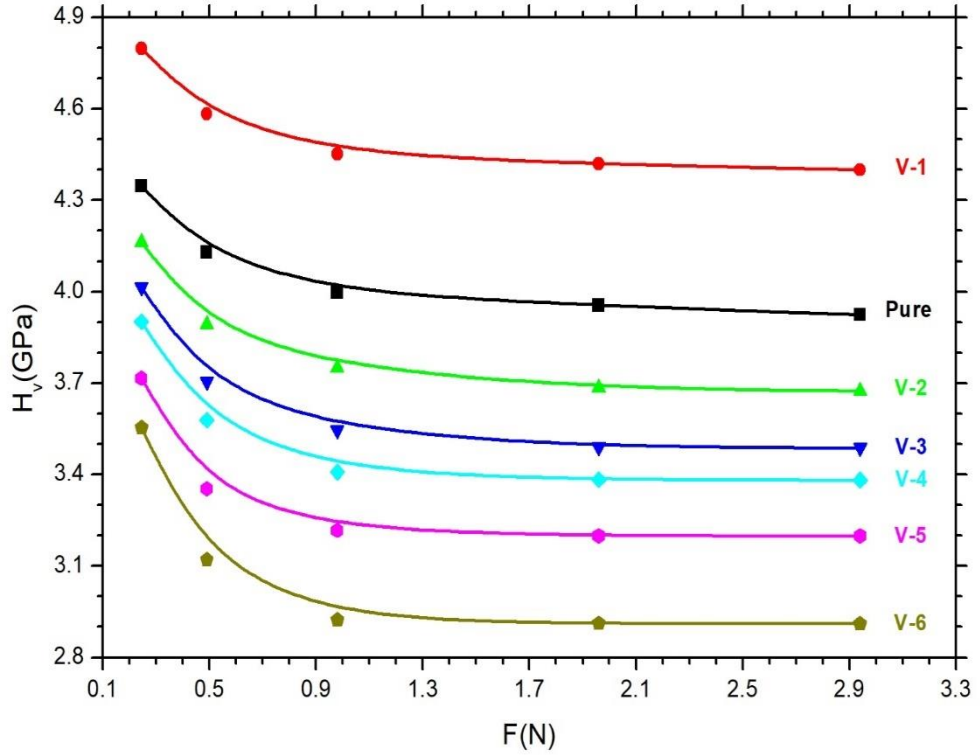
çatlak ilerlemesi üzerine etkilerinin belirlenmesi ve (III) doyunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerinin incelenmesi.

4.2.1. Bi-2212 süperiletken malzemesinin mekanik performans davranışlarının kristal yapıdaki farklı aktif kayma sistemlerine bağlı değişimi

Bir malzemenin uygulanan yük ve yüke-bağlı materyalde oluşan deformasyon arasında temel bağlantı kuran mekanik performans özellikleri temel matristeki çok sayıda oluşan kristal yapı problemleri (kusur, çatlak ve dislokasyon hareketleri) ile ilgilidir. Bu yüzden, kristal örgüdeki problemler malzemenin kalitesini, yani malzemelerin ülke ekonomisi için yeni ve uygulanabilir pazar alanlarındaki kullanım alanlarını, doğrudan olarak etkileyen niceliklerdir. Yukarıda bahsi geçen kusur, çatlak ve dislokasyon hareket problemleri tüm malzemelerin kristal matrislerinde katılma, plastik şekil değiştirme ve ısıl gerilmelere neden olan hızlı soğutma gibi prosesler boyunca kendiliğinden oluşur. Bir malzemeye plastik deformasyona neden olan bir kuvvetin uygulandığı zaman, defromasyon enerjisinin çok çok büyük bir kısmı (bu değer yaklaşık 95%'tir) materyal içerisinde ısı olarak açığa çıkarken, geri kalan küçük kısım da (5%) depo edilir. Bu depo edilen enejinin büyük kısmı, yukarıda bahsi geçen kusurların, çatlakların ve dislokasyonların şekil değiştirmesine neden olduğu bilinmektedir (Guner SB, Zalaoglu Y, Turgay T, Ozyurt O, Ulgen AT, Dogruer M, Yildirim G, 2019). Çok iyi bilindiği üzere, kristal örgüdeki dislokasyonlar kristallografik atom düzlemi ve kristallografik doğrultularında farklı hareket ederler (Dogruer M, Yildirim G, Yucel E, Terzioglu C, 2012). Bu bağlamda, dislokasyonların tercih ettiği kayma düzlemi (atomsal yoğunluğun en fazla olduğu düzlem) ve kayma doğrultusuna (atomların en sık dizildiği veya doğrusal atom yoğunluğu en çok olan doğrultu) kayma sistemi denilmektedir. Plastik deformasyonun kayma sistemlerine bağlılığı düşünüldüğü zaman bir malzeme ne kadar fazla aktif kayma sistemine sahipse malzeme o kadar sünek davranış sergiler. Tersine, kristal örgüsünde ne kadar az aktif kayma sistemi varsa katı örneğimiz o kadar gevrekler. Bu çalışmada kullanılan Bi-2212 süperiletken seramik malzemelere gelecek olursak, materyaller kristal yapısında çok az sayıda aktif kayma sistemi olmasından dolayı kırılma bir doğaya sahiptirler. Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlara bakacak olursak, Bi-2212 süperiletken materyallerin mekanik performans davranışları hem yeni kayma doğrultusu hem de

yeni kayma düzlemi içeren yeni kayma sistemlerinin artmasına bağlı olarak en düşük ($x=0,01$) vanadyum katkı oranında iyileşirken, bu katkılama değerinden sonra çalışılan materyallerin genel mekanik performans özelliklerinde ciddi azalma gözwe çarpmaktadır. İlk katkılamada mekanik performans artışın temel nedeni, Bi-2212 temel matriste bulunan vanadyum atomları kristalde gözlemlenen kusur, çatlak ve dislokasyon hareketlerini yavaşlatması veya yön değiştirmelerine sebep olmalarından dolayıdır. Yani, Bi-2212 kristal örgüdeki optimum vanadyum atomu yapı içerisindeki dislokasyonları farklı yönlerdeki dislokasyon hareketleri ile etkileştirir. Bu yüzden Bi-2212 süperiletken kristal matriste vanadyum atomları varlığı, yapıda var olan kusur, çatlak ve dislokasyon ilerlemesine karşı direnç artırır. Dolayısı ile materyalin mekanik mukavemetini, kritik gerilme değerini, sertliğini ve uygulanan kuvvete karşı dayanıklılığı (tetragonal fazın dayanıklılığını) ciddi oranda artırır. Aynı zamanda, elde edilen deneysel sonuçlar, deformasyon testleri boyunca süperiletken tanecikeler üzerine geometrik kısıtlamalar gelmesi nedeniyle, Bi-2212 süperiletken yapısına optimum düzeyde katılan vanadyum atomların kristal sistemdeki kaymaları başlatmak için daha gerekli olan gerilmenin artmasına neden olduğunu doğrulamaktadır. Başka bir deyişle, kristal sistemde bulunan optimum vanadyum atomları, süperiletken tanecikleri uygun şekilde yönlendirerek üzey artık sıkıştırma gerilmelerini baskılar ve optimum katkılama yapılan $\text{Bi}_{2,0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2,0}\text{Ca}_{1,1}\text{Cu}_{2,0}\text{O}_y$ perovskite süperiletken malzemeler yorulmaya karşı daha dirençli olurlar. Bu durum da malzemelerin potansiyel uygulama alanlarını artırır.

Çalışılan materyallerin 0,245 N ila 2,940 N arasında uygulanan test yükleri ile Vickers mikrosertlik sonuçlarının değişimi Şekil 4.2’de detaylı olarak verilmiştir. Şekilden açıkça görüleceği üzere Bi-2212 kristal örgüdeki vanadyum safsızlık atomları malzemenin genel mekanik performans özelliklerini değiştirirken, tüm üretilen örnekler farklı değerlerde olmak şartı ile tipik çentik boyut etki (ISE) özelliğini sergilerler. Şöyleki, sisteme vanadyum katkılama oranı $x=0,01$ iken materyallerin standart ISE davranışlarında çok hız bir gelişme gözlemlenirken, bu kritik katkılama değerinin üzerinde ISE davranışciddi bir şekilde azalır ve hatta maksimum katkılama oranında ($x=0,03$) ISE karakteristik özellik en dip noktasına ulaşır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ süperiletken seramik numunelerin mikrosertlik parametrelerinin uygulanan çentik test yüküne karşı değişimleri

Bu bağlamda, Bi-2212 kristal örgüde vanadyumun optimum miktarda bulunması, çatlak yüzey enerjisinin azalması ve kritik kuvvet değerinin artması sonucunda, sistem içerisinde bulunan çatlak-başlatıcı kusurlar ve dislokasyonlara bağlı çatlakların yayılmasını engeller. Ancak, katkı miktarındaki artış ise Bi-2212 kristal sistemindeki kusurların, bozulmaların, kafes gerilmelerin, taneciklerin hatalı yönelimlerinin, çatlak üreten ve çatlak-başlatan kusurların, gerilme artırıcılarının, çiftlenim sorunlarının ve tanecikler arası zayıf bağlantılar gibi yapısal problemlerdeki hızlı artış gibi nedenlerden dolayı direkt olarak ciddi bir şekilde kristallik kalitesini bozar. Böylece, uygulanan test yükleri ile çatlak yönelimi ve geometrisi çok hızlı şekilde azalır, ve düşük kuvvetlerde bile çatlak kritik yayılma hızında aniden hareket etmeye başlar. Yani, Bi-2212 kristal yapısını vanadyum atomları ile aşırı katkılama çatlakların ilerlemesini hızlandıran gerilme kaynaklı faz dönüşümüne neden olur.

Bi-2212 süperiletken yapısına vanadyum katkılamanın mikrosertlik (H_v) ve Young's modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu (K_{IC}), kırılma indeksi (B), süneklik (D) ve elastik sertlik katsayısı (C_{11}) gibi temel karakteristik mekanik

özellikleri üzerine etkileri 0,245 N- 2,940 N farklı test yüklerinde incelenmiştir. Bu kapsamda aşağıdaki 7 formül verilmiştir:

$$H_V = 1854.4 \left(\frac{F}{d^2} \right)$$

$$E = 81.9635 H_V$$

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

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

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

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

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

Denklemlerden elde edilen tüm numerik sonuçlar Çizelge 4.2’de detaylı olarak verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere yapılan tüm hesaplamalar hem kristal örgüdeki vanadyum miktarına hem de uygulanan çentik test yüküne dramatik olarak şekilde bağlı oluşu bulunmuştur. Ayrıca, aynı uygulama yükü altında mikrosertlik (H_V), Young’s modülü (E), akma dayanımı (Y) parametreleri katkılama miktarı $x=0,01$ olduğu zaman en yüksek değerleri sergilediği bulunmuştur.

Diğer bir yandan, katkılama oranı arttıkça bahsi geçen değerler ciddi bir şekilde azalığı gözlemlenmiştir. Numerik değerler olarak, 0,245 N uygulama test yükünde saf numunen H_V değeri 4,346 GPa olarak bulunurken, V-1 materyali için bu değer 4,799 GPa (maksimum değer) olarak hesaplanmıştır. Daha sonra katkılama miktarlarının artması ile H_V parametresi V-2, V-3, V-4, V-5 ve V-6 malzemeleri için sırası ile 4,162 GPa, 4,014 GPa, 3,902 GPa, 3,716 GPa ve 3,554 GPa olarak hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, uygulanan kuvvetin artması ile her numuneye ait olan H_V değerleri kademeli olarak azalmıştır. Bu davranış tipik ISE davranışın doğasından kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, tez için hazırlanan numuneler için en düşük H_V değeri 2,940 N’luk çentik test yükünde V-6 malzemesi için 2,910 GPa olarak bulunmuştur. Hazırlanan numunelerin Young’s modülü (E) değerlerinde de benzer bir değişim söz konusudur. Şöyle ki, Bi-2212 süperiletken kristal yapısına optimum vanadyum ($x=0,01$ oranı için) katkılanması ile 0,245 N uygulama test yükünde en yüksek E değeri (393,303 GPa) bulunmuştur. Ayrıca, en küçük elastik modülü V-6 malzemesi için 2,940 N’luk çentik

test yükünde 238,591 GPa olarak bulunmuştur. İlâveten, üretilen materyallerin akma dayanımları (Y) da benzer bir değişim trendi sergiledi. Şöyleki, maksimum Y değeri V-1 örneği için 0,245 N uygulama test yükünde 1,600 GPa olarak hesaplanırken, minimum Y değeri (0,969 GPa) 2,940 N çentik yükünde V-6 malzemesi için elde edilmiştir. Tüm bulunan bu sonuçlara dayanarak, optimum ($x=0,01$) vanadyum katkılı Bi-2212 süperiletken materyal uygulanan test yüküne en az hassas (en az yanıt veren) olan materyal olarak kaydedilirken, V-6 materyali oldukça düşük test yüküne bile (hızlı dislokasyon oluşumu) en hassas cevap veren malzeme olarak bulunmuştur.



Çizelge 4.2. Farklı uygulanan test yüklerinde $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ süperiletken seramik numunelerin mikrosertlik (H_v) ve Young's modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu (K_{IC}), kırılgenlik indeksi (B), süneklik (D) ve elastik sertlik katsayısı (C_{11}) parametreleri.

Numunele r	F (N)	d(μm)	H_v (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	K_{IC} ($\text{MPam}^{1/2}$)	C_{11} (GPa) ^{7/4}	B ($\text{m}^{-1/2}$)	D ($\times 10^{-3}$)($\text{m}^{1/2}$)
<i>Saf</i>	0,245	323,311	4,346	356,245	1,449	8,092	13,0835	537,132	1,862
	0,490	469,120	4,129	338,418	1,376	7,887	11,9593	523,520	1,910
	0,980	674,374	3,996	327,528	1,332	7,759	11,2940	515,028	1,942
	1,960	958,625	3,955	324,177	1,318	7,719	11,0926	512,387	1,952
	2,940	1178,649	3,924	321,664	1,308	7,689	10,9425	510,397	1,959
<i>V-I</i>	0,245	307,703	4,799	393,303	1,600	7,977	15,5574	601,525	1,662
	0,490	445,236	4,584	375,699	1,528	7,797	14,3594	587,909	1,701
	0,980	638,860	4,453	364,955	1,484	7,684	13,6484	579,442	1,726
	1,960	906,900	4,419	362,211	1,473	7,655	13,4693	577,259	1,732
	2,940	1113,195	4,400	360,603	1,467	7,638	13,3649	575,976	1,736

Çizelge devamı

	0,245	330,396	4,162	341,130	1,387	8,560	12,1275	486,208	2,057
	0,490	483,142	3,893	319,058	1,298	8,279	10,7879	470,216	2,127
V-2	0,980	696,100	3,750	307,402	1,250	8,126	10,1076	461,547	2,167
	1,960	993,387	3,683	301,886	1,228	8,053	9,7924	457,387	2,186
	2,940	1218,166	3,674	301,133	1,225	8,043	9,7497	456,816	2,189
	0,245	336,439	4,014	328,986	1,338	8,634	11,3822	464,877	2,151
	0,490	495,217	3,705	303,689	1,235	8,296	9,8950	446,646	2,239
V-3	0,980	716,015	3,545	290,540	1,182	8,114	9,1575	436,870	2,289
	1,960	1020,401	3,491	286,113	1,164	8,052	8,9147	433,530	2,307
	2,940	1250,299	3,488	285,853	1,163	8,048	8,9005	433,333	2,308
	0,245	341,241	3,902	319,793	1,301	8,315	10,8314	469,230	2,131
	0,490	503,908	3,578	293,304	1,193	7,963	9,3104	449,377	2,225
V-4	0,980	730,219	3,408	279,347	1,136	7,771	8,5490	438,555	2,280
	1,960	1036,556	3,383	277,265	1,128	7,742	8,4378	436,917	2,289

Çizelge devamı

	2,940	1269,695	3,382	277,187	1,127	7,741	8,4337	436,856	2,289
	0,245	349,643	3,716	304,607	1,239	7,944	9,9474	467,794	2,138
	0,490	520,525	3,354	274,876	1,118	7,547	8,3110	444,379	2,250
V-5	0,980	751,591	3,217	263,686	1,072	7,392	7,7280	435,239	2,298
	1,960	1065,943	3,199	262,188	1,066	7,371	7,6513	434,001	2,304
	2,940	1305,617	3,198	262,144	1,066	7,370	7,6491	433,965	2,304
	0,245	357,545	3,554	291,292	1,185	8,793	9,1990	404,197	2,474
	0,490	539,578	3,121	255,806	1,040	8,240	7,3284	378,778	2,640
V-6	0,980	788,519	2,923	239,566	0,974	7,974	6,5337	366,557	2,728
	1,960	1117,339	2,911	238,622	0,970	7,958	6,4887	365,834	2,733
	2,940	1368,544	2,910	238,591	0,969	7,958	6,4872	365,810	2,734

Bu mekanizma da kusur, çatlak ve dislokasyon yayılımlarının hızlanmasına neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca, Bi-2212 kristal yapısına vanadyum katkılanmanın çalışılan malzemelerin doğrudan yükten bağımsız (orijinal veya doğru) mikrosertlik değerleri ile ilişkili olan plato (doygunluk) limit bölgelerine etkilerini incelenmiştir. Mikrosertlik değerlerinin verildiği şekillere bakacak olursak, çalışılan her malzemenin mikrosertlik paramtereleri 2 N gibi bir test yüküne kadar ciddi bir azalma gözlemlenirken, bu değerden sonra Vickers sertlik değerleri kendi doygunluk limit bölgelerine gelir ve bu noktadan sonra, yapısal problemlerdeki ciddi artışlar yüzünden, nerede ise sabit olarak devam eder. Yine şekilden görüleceği üzere, kristal yapısına maksimum vanadyum katkılanmış (V-6) numune kendisinin doygunluk limit bölgesine, diğer numunelerle karşılaştırılması durumunda, daha düşük uygulanan kuvvette ulaşır. Bu durum kuşkusuz aşırı vanadyum katkılama sadece çatlak-başlatan kusurlarını, gerilme arttırıcılarını ve çatlak yüzey enerjisini arttırmakla kalmaz, bunun yanı sıra Bi-2212 temel matrisinin kritik gerilme, bükülme direnci, mekanik dayanım, plastik deformasyona karşı dayanıklılık ve sağlamlık gibi mekanik performans davranışlarını azaltması ile ilgilidir. Tam tersine, ey yüksek mekanik perormansları ile kristal yapısına optimum vanadyum katkılanmış (V-1) numune doygunluk limit bölgesinde en büyük orijinal mikrosertlik değerlerini sunar.

4.2.2. Deneysel mikrosertlik ölçüm sonuçları ve uygulanan test yükleri arasındaki strateji

Tezin bu kısmında, $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ numunelerin deneysel verileri doğrultusunda mikrosertlik ölçüm sonuçları ve uygulanan test yükleri arasındaki bağlantıyı gözler önüne sereceğiz. Bu amaç için, uygulanan test yükü ile mikrosertlik değerlerinin değişimine tasvir edecek dördüncü dereceden uygun ($R^2=1$ olması için) denklemler bulacağız. Numunelere ait dördüncü dereceden denklemler Çizelge 4.2’de numerik olarak detaylandırılmıştır. Çizelge 4.3’ten de açıkça görüldüğü gibi çıkarılan denklemlerin dördüncü dereceden (x^4 ’lü) terimi tamamen katkılanan vanadyum oranına bağlıdır ve x^4 ’lü terim optimum katkılama ($x=0,01$) oranında 0,1249’dan 0,1220’ye düşerken, katkılama oranının artması durumunda x^4 ’lü terim V-2, V-3, V-4, V-5 ve V-6 numuneleri için sırası ile 0,1872, 2075, 0,2103, 0,2902 ve 0,3038 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ süperiletken numunelerin mikrosertlik ölçüm sonuçları ve uygulanan test yükleri arasındaki ilişkiler

Materials	Fitting relations for the pure and Vanadium substituted Bi-site Bi-2212 compounds
Saf	$y = 0,1249 x^4 - 0,8573 x^3 + 2,0468 x^2 - 2,0595 x + 4,7403$
V-1	$y = 0,1220 x^4 - 0,8390 x^3 + 2,0112 x^2 - 2,0292 x + 5,1869$
V-2	$y = 0,1872 x^4 - 1,2419 x^3 + 2,8370 x^2 - 2,7038 x + 4,6717$
V-3	$y = 0,2075 x^4 - 1,4047 x^3 + 3,2357 x^2 - 3,0942 x + 4,5976$
V-4	$y = 0,2103 x^4 - 1,4057 x^3 + 3,2968 x^2 - 3,1974 x + 4,5070$
V-5	$y = 0,2902 x^4 - 1,9167 x^3 + 4,3127 x^2 - 3,9091 x + 4,4424$
V-6	$y = 0,3038 x^4 - 2,0418 x^3 + 4,7175 x^2 - 4,4436 x + 4,3884$

Bu değişim, aşırı vanadyum katkılama daha fazla sayıda çatlak ve daha serbet (rahat hareket eden) dislokasyon hareketlerine neden olur. Böylece, kritik gerilme, bükülme direnci, mekanik dayanım, plastik deformasyona karşı dayanıklılık ve sağlamlık gibi mekanik performans davranışlarını azaltması gibi temel karakteristik mekanik özellikler ciddi bir şekilde azalır. Diğer bir deyişle, Bi-2212 süperiletken kristal yapının aşırı vanadyum katkılanması yeni geometrik dislokasyonların ve dislokasyon artma bölgelerinin (dislokasyon birikim noktaları artar) oluşumuna neden olur.

4.2.3. Gerçek mikrosertlik değerlerinin teorik modellerle incelenmesi

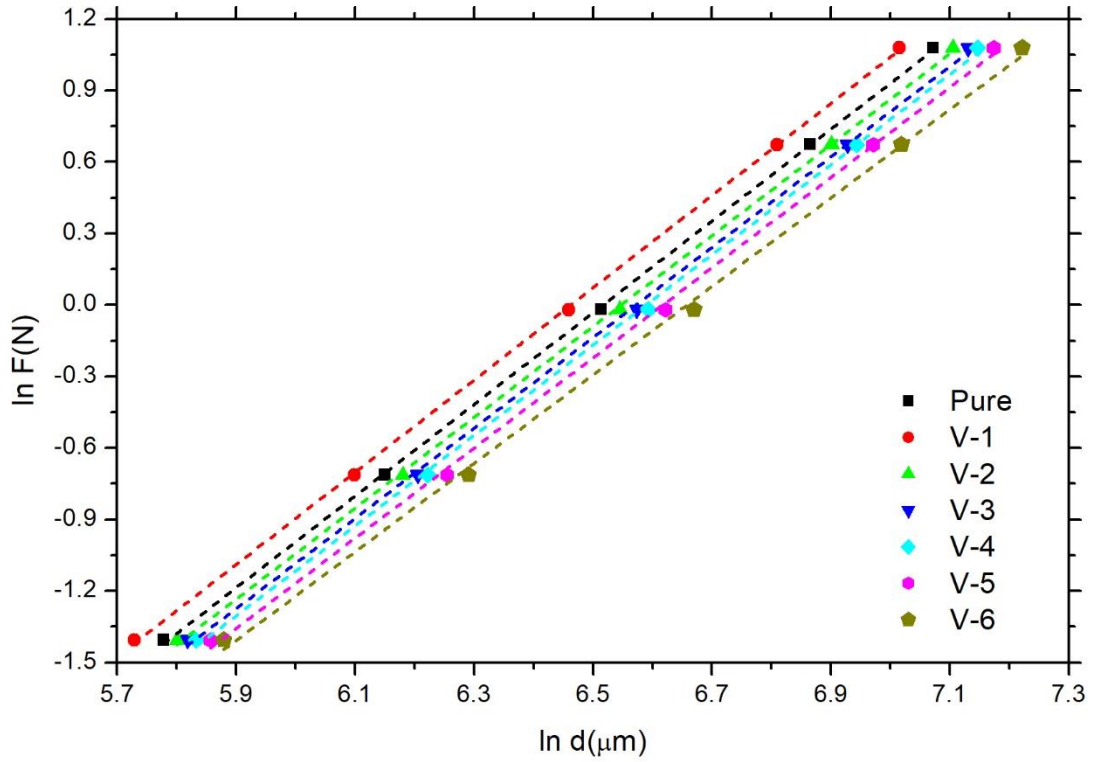
Bu kısımda, Tip II seramik kuprat katmanlı $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ perovskite süperiletken malzemelerin doygunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini literatürdeki Meyer Kanunu (MK), Orantılı Numune Direnci Modeli (ONDM), Modifiyeli Orantılı Numune Direnci Modeli (MONDM), Elastik/Plastik Deformasyon (EPD), Hays Kendall (HK) ve Çentik-Kaynaklı Çatlak (ÇKÇ) gibi 6 farklı teorik modeller ile incelendi.

4.2.4. Meyer Kanununa (MK) Dayalı İnceleme

Çalışmada kullanılan teorik modellerden ilki olan Meyer kanu materyallerin yüke bağımlı ve yükten bağımsız mikrosertlik özelliklerini incelmede kullanılan modellerden birisidir. Bu metot çalışılan malzemenin temel mekanik karakteristik özelliğini (ISE veya RISE) incelemeye kusursuz çalışmaktadır. Materyallerin mekanik karakterizesi uygulanan çentik test yükü (F) ve ortalama girinti köşegen uzunluğu (d^n) arasındaki ilişkiye dayalı Meyer sayısı (n) ile belirlenir. Aşağıda formülasyonu görülmektedir (Callister Jr WD, Rethwisch DG, 2013).

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

Bu denklemde n Meyer sayısını gösterirken A_{Meyer} sabiti de standart mikrosertlik değerini gösterir. Literatürde n değeri için 3 farklı skala vardır. Bu skalanın temelini $n=2$ oluşturur. Şöyleki, eğer bir malzemenin n değeri, ekstrapolasyon yöntemi ile, 2'den ($n > 2$) büyük ise bu tarz materyaller alışılmamış ters çentik boyut etkisi (RISE) davranışını sergiler. $n < 2$ durumunda ise bu tarz malzemeler tipik çentik boyut etkisi (ISE) doğasına sahiptirler ve mikrosertlik değerleri uygulanan yük ile azalır. Eğer Meyer sayısı tam 2 ($n=2$) olarak hesaplanırsa, mikrosertlik değerleri uygulanan yükten tamamen bağımsızdır (Ling HC, Yan MF, 2009). Bu çalışmada hazırlanan tüm malzemelere ait n değerleri Şekil 4.3'de verilen $\ln F$ 'in $\ln d$ ile değişen grafiklerden elde edilmiştir. Tüm materyallerin ekstrapolasyon yöntemi ile hesaplanan n değerleri ve $x=0$ noktasında y eksenini kesen nokta olarak hesaplanan A_{Meyer} sayıları Şekil 4.3'de detaylı olarak verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere bulunan n değerleri kristal yapıdaki vanadyum miktarına ciddi olarak bağımlı olduğu bulunmuştur. Hesaplanan tüm n değerleri 2'den küçük olarak bulunmuştur.



Şekil 4.3. Tip II seramik kuprat katmanlı $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ perovskite süperiletken malzemelerin $\ln F$ 'in $\ln d$ ile değişimi şekli

Bu bağlamda çalışılan tüm numuneler standart ISE davranışını sergilemektedir (Mohammed NH, Abou-Aly AI, İbrahim İH, Awad R, Rekaby M, 2009). Bu yüzden hem katkısız malzeme hem de vanadyum katkılı tüm numuneler kristal yapılar aynı anda hem geri dönüşümlü (elastik) hem de geri alınamaz (plastik) deformasyonu sergiler. Yani uygulanan kuvvetlerin materyal üzerinden kaldırılması durumunda sistemin hızlıca toparlanması gerçekleşir. Çizelge 4.4'den açıkça görüldüğü üzere, n katsayısı saf numune için 1,924 olarak hesaplanırken, optimum katkılanmış numune için 1,934 olarak bulunmuştur. Bu kritik katkılama değerinden sonra n değerinde hızlı bir düşüş olmuş ve en küçük değer olarak 1,856 V-6 malzemesi için hesaplanmıştır. Bundan çıkarılacak temel sonuç, Bi-2212 süperiletken yapılarının sergilemiş olduğu standart ISE karakteristik doğası optimum katkılama oranında artarken, bu değer üstünde azalmakta ve hatta $x=0,30$ için ISE davranış en düşük seviyeye düşmüştür. MK teorik model bize optimum katkılamada neden genel mekanik özelliklerin düzeldiğini açıkça göstermektedir. Bu bağlamda, Bi-2212 süperiletken kristal yapısında vanadyum miktarındaki artış uygulanan test yüküne karşı olan hassasiyet derecesini arttırmaktadır.

Çizelge 4.4. Farklı modellerle hesaplanmış mikrosertlik parametreleri

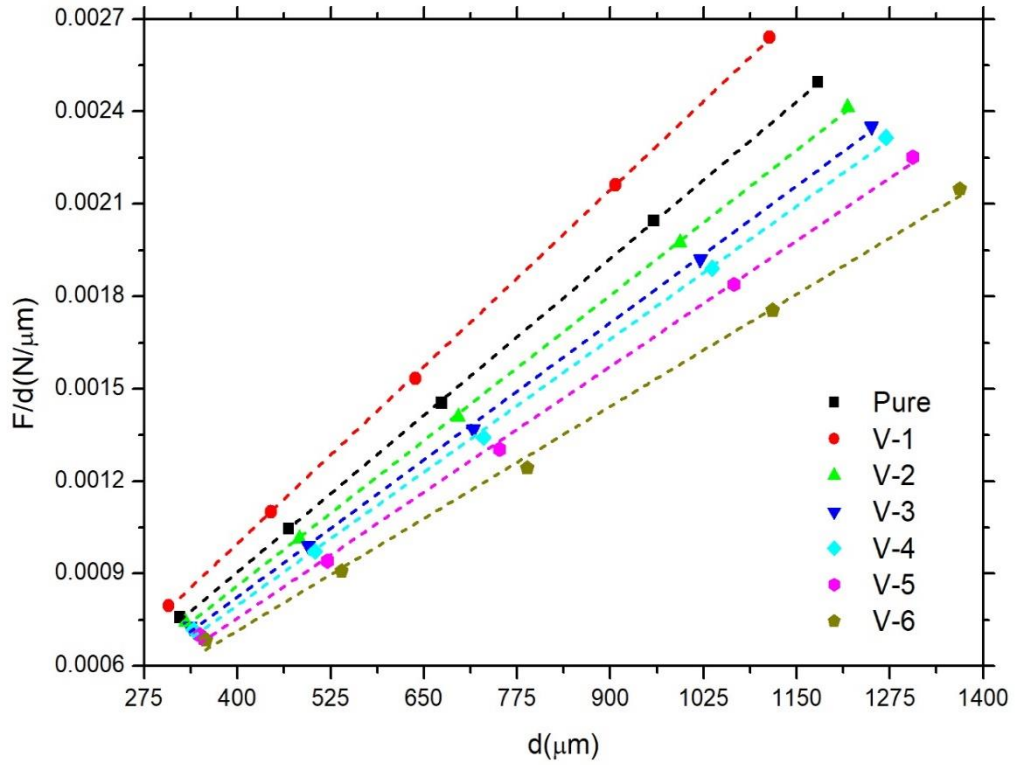
Samples	Meyer's Law		PSR Model		MPSR Model			EPD Model		HK Model		IIC Model	
	$A_{MEYER} \times 10^{-6}$ (N/ μm^2)	n	$\alpha \times 10^{-4}$ (N/ μm)	$\beta \times 10^{-6}$ (N/ μm^2)	$W \times 10^{-2}$ (N)	$A_{0MPSR} \times 10^{-5}$ (N/ μm)	$A_{1PSR} \times 10^{-6}$ (N/ μm^2)	$d_c \times 10^{-1}$ (μm)	$A_{2EPD} \times 10^{-2}$ (N ^{1/2} / μm)	$W \times 10^{-1}$ (N)	$A_{3HK} \times 10^{-6}$ (N/ μm^2)	$K \times 10^{-3}$ (N ^{(3-5m)/3} / $\mu\text{m}^{(2-3m)}$)	m
Saf	3,596	1,924	0,919	2,035	1,853	2,683	2,081	0,309	0,143	0,271	2,099	5,488	-0,338
V-1	3,719	1,934	0,809	2,294	2,520	-1,157	2,363	0,258	0,152	0,217	2,355	24,943	-0,268
V-2	3,801	1,906	1,074	1,885	3,868	-2,292	1,973	0,372	0,137	0,311	1,959	0,590	-0,447
V-3	3,897	1,895	1,133	1,779	5,532	-6,935	1,900	0,402	0,134	0,320	1,857	0,265	-0,483
V-4	3,803	1,894	1,081	1,726	6,831	-11,468	1,871	0,389	0,132	0,291	1,802	0,674	-0,433
V-5	3,656	1,892	1,036	1,632	7,328	-13,006	1,782	0,382	0,128	0,276	1,705	1,958	-0,375
V-6	4,286	1,856	1,327	1,456	9,807	-16,976	1,642	0,508	0,121	0,362	1,546	13,751	-0,271

4.2.5. Üretilen Numunelerin Orantılı Numune Direnci Modele (ONDM) Dayalı Mekanik Karakteristiklerinin İncelemesi

1993 yılında Li ve Bradt tarafından önerilen Orantılı Numune Direnci Modele (ONDM) teorik yaklaşım modeli kristal yapısına farklı molar oranlarda vanadyum katkılanmış tip II seramik kuprat katmanlı $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ perovskite süperiletken malzemelerin yüke bağımlı ve yükten bağımsız mikrosertlik özelliklerini incelmede kullanılan modellerden ikincisi olarak karşımıza çıkmaktadır (Dogruer M, Yildirim G, Ozturk O, Belenli I, Terzioglu C, 2013). Hesaplama modülünde, örnek yüzelerindeki yapısal problemler boyunca enerji dağılımını hesaba katılır. Bu yüzden model, hesaplamalarında bir malzemeye ait genel mekanik karakteristik özellikler (ISE ve RISE) arasında yüzey enerji bağlantısı kurar ve bu enerji değeri de metodun formülüne otomatik olarak girer. Bu yüzden, model hesabı iki temel kısımdan oluşmaktadır: (I) yüzey enerji değeri (α ile gösterilir) ve (II) mikrosertlik (β ile kısaltılır) değeridir (Li H, Bradt RC, 1993, Michels BD, Frischat GH 1982). α ile gösterilen değer çalışılan materyalin genel mekanik özelliklerini göstermektedir. Bu değer pozitif olması çalışılan numunenin tipik ISE doğasını sergilediğini gösterirken negatif değerler çalışılan örneğin RISE özelliğini sergilediğini göstermektedir. Bu çalışmada hazırlanan $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ seramik süperiletken malzemelerin yüzey enerji değerleri aşağıda verilen denklemden bulunabilir.

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

Çalışılan numunelere ait uygulanan çentik test yükünün (F/d) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d) ile değişimine ait grafikler Şekil 4.4'te detaylı olarak verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere kristal yapısına vanadyum katkılama Bi-2212 süperiletken yapıların mekanik mukavemetinin, kritik gerilme değerinin, kritik gerilme değerinin, uygulanan kuvvete karşı dayanıklılığının (tetragonal faz dayanıklılığı) ve materyal sağlamlılığının değişimine bağlı olarak ONDM model grafiklerinin ciddi şekilde değişmesine neden olmuştur. Yani, vanadyum katkılama açıkça Bi-2212 süperiletken matrisinin kristal yapı problemlerinin artmasına veya azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.4. Tez kapsamında çalışılan numunelerin çentik test yükünün (F/d) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d) ile değişimine ait grafikleri

Çalışılan tüm numunelere ait α ve β sabitlelerinin numerik değerleri Şekil 4.4’de detaylıca verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere çalışma kapsamında üretilen tüm numunelerin α değerleri pozitif olarak bulunmuştur. Yani, tüm materyaller standart ISE davranışını sergilemektedir. Bu yüzden hem saf malzeme hem de vanadyum katkılı tüm numuneler kristal yapılar aynı anda hem geri dönüşümlü (elastik) hem de geri alınamaz (plastik) deformasyonu sergiler. Böylece, uygulanan kuvvetlerin materyal üzerinden kaldırılması durumunda sistemlerin hızlıca toparlanması gerçekleşir. Daha detaylı olarak bakacak olursak, saf numunenin α katsayısı $0,919 \times 10^{-4} \text{ N}/\mu\text{m}$ olarak hesaplanırken, bu değer sisteme $x=0,01$ mol oranında vanadyum katkılması durumunda $0,809 \times 10^{-4} \text{ N}/\mu\text{m}$ ’ye düşmektedir. Ancak, bu katkılama oranından sonra α bir anda $1,074 \times 10^{-4} \text{ N}/\mu\text{m}$ (V-1 örneği için) değerine yükselmiştir. Katkılama oranının artması ile de α parametresinde düzenli bir artış olduğu tespi edilmiştir. Bu bağlamda en fazla katkı oranında α sabiti $1,327 \times 10^{-4} \text{ N}/\mu\text{m}$ değerine kadar yükselmektedir. Mikrosertlik özellikleri ile ilişkili β katsayısına gelindiğinde, saf numune için bu değer $2,035 \times 10^{-6} \text{ N}/\mu\text{m}^2$ olarak hesaplanırken, optimum katkılama oranında bu değer $2,294 \times 10^{-6} \text{ N}/\mu\text{m}^2$ olarak bulunmuştur. Bu kritik katkılama değerinden ($x=0,01$) sonra β katsayısı katkılama oranına paralel bir düşüş

sergilemiştir. Böylece en düşük β katsayısı $1,456 \times 10^{-6} \text{ N}/\mu\text{m}^2$ (V-6 örneği için) olarak hesaplanmıştır. Her iki katsayının değişim trendleri (optimum değerde minimum α ve maksimum β ; maksimum katkılama değerinde maksimum α ve minimum β) optimum katkılama oranında Bi-2212 süperiletken numunelerin mekanik mukavemetinin, kritik gerilme değerinin, kritik gerilme değerinin, uygulanan kuvvete karşı dayanıklılığının (tetragonal faz dayanıklılığı) ve materyal sağlamlılığının ciddi şekilde artmış olduğunu göstermiştir. Tersine maksimum katkılama oranında yukarıda bahsi geçen tüm mekanik karakteristik özelliklerin dramatik bir şekilde azaldığını göstermektedir.

Ayrıca, bu modeli kullanarak $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ seramik süperiletken malzemelerin doyunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini aşağıda verilen formulu kullanarak inceledik.

$$H_{PSR} = 1854.4\beta$$

Tüm numuneler için hesaplanan değerler Çizelge 4.5.'de detaylı olarak verilmiştir. Çizelge 4.5'den da açıkça görüldüğü üzere numunelerin ONDM model ile doyunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerleri gerçek değerlerden çok daha küçük olarak kalmıştır. Bu yüzden bu model çalışılan süperiletken malzemelerinin genel mekanik özelliklerini, mikrosertlik karakteristik özelliklerini belirlemede başarılı olurken plato limit bölgesinde doğru mikrosertlik değerlerini belirlemede başarısız kalmıştır.

Çizelge 4.5. Doygunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerinin modellerin hesaplamaları (H_{PSR} , H_{MPSR} , H_{EPD} , H_{HK} and H_{IIC} .) ile karşılaştırılması

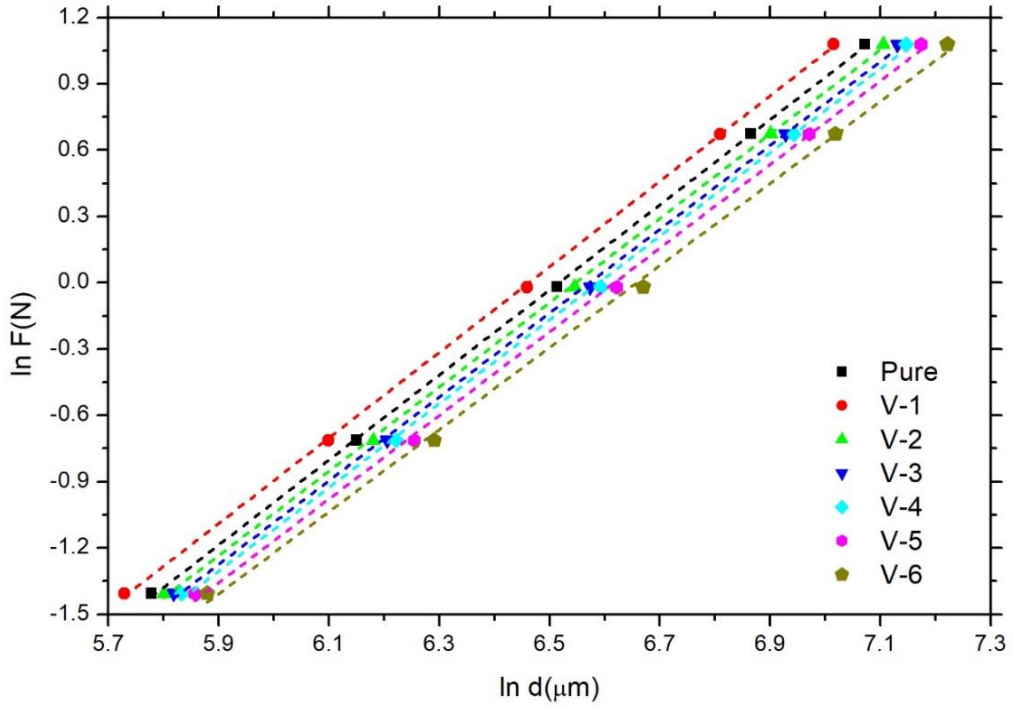
Samples	H_{PSR} (GPa)	H_{MPSR} (GPa)	H_{EPD} (GPa)	H_{HK} (GPa)	H_{IIC} (GPa)	H_v (GPa)
Saf	3,774	3,859	3,792	3,892	4,077	4,346-3,924
V-1	4,254	4,382	4,284	4,367	4,516	4,799-4,400
V-2	3,496	3,659	3,481	3,633	3,854	4,162-3,674
V-3	3,299	3,523	3,330	3,444	3,642	4,014-3,488
V-4	3,201	3,470	3,231	3,342	3,529	3,902-3,382
V-5	3,026	3,305	3,038	3,162	3,358	3,716-3,198
V-6	2,700	3,045	2,715	2,867	3,088	3,554-2,911

4.2.6. Modifiyeli Orantılı Numune Direnci Modeli (MONDM) İle Üretilen Numunelerin Mekanik Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi

Bir malzemenin genel mekanik özelliklerinin, mikrosertlik karakteristik özelliklerinin ve plato limit bölgesindeki yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini incelemeye kullanılabilecek bir diğer teorik yaklaşım da Modifiyeli Orantılı Numune Direnci Modeli (MONDM)'dir. ONDM modelin hesaplanmasında materyal yüzeyinde girinti köşegen uzunluğu izi ile ilişkin minimum çentik test yükü (W_{MPSR}) terim ile modifiye edilmesine dayanır. Bu parametre yardımı ile çalışılacak olan örneğin mekanik karakteristik özellikleri otomatik olarak belirlenebilir. ONDM model kısaca aşağıdaki gibi formülüze edilebilir.

$$F = W_{MPSR} + A_{0MPSR}d + A_{1MPSR}d^2$$

Yukarıdaki denklemde A_{0MPSR} and A_{1MPSR} sabitleri birim hacimin plastik deformasyonuna bağlı enerji kayıp parametresidir. Çalışılan tüm numunelere ait uygulanan çentik test yükünün (F) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d) ile değişimine ait grafikler Şekil 4.5'te detaylı olarak verilmiştir. Şekildeki MONDM modeline ait eğrilerinin üstünden ekstrapolasyon yöntemi ile numunelerin 3 (W_{MPSR} , A_{0MPSR} and A_{1MPSR}) parametresinin numerik değerleri bulunup Çizelge 4.5 içerisinde toplanmıştır.



Şekil 4.5. $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ seramik süperiletken malzemelerin çentik yükünün (F) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d) ile değişimine ait grafikleri

Numerik değerlere geçmeden önce, Şekil 4.5'i detaylı olarak incelersek Bi_{2212} süperiletken kristal yapısına $x=0,01$ mol oranında vanadyum katkılanması ile materyallerin sergilediği ISE karakteristik davranışı gelişirken, bu kritik değer üstünde materyallerin karakteristik ISE davranışları azalmıştır. Hatta, maksimum katkılama oranında ($x=0,30$) ISE doğaları minimum değerine düşmüştür. Daha açık bir ifade ile MONDM model hem katkısız örnek hem de vanadyum katkılı tüm malzemeler kristal yapılar aynı anda hem geri dönüşümlü (elastik) hem de geri alınamaz (plastik) deformasyonu sergilediğini gösterir. Bu bağlamda, uygulanan kuvvetlerin materyal üzerinden kaldırılması durumunda sistemlerin hızlıca toparlanması gerçekleşir. Yani, MONDM modelinin çalışılan materyallerin mikrosertlik karakteristik özelliklerinin incelenmesinde başarılı olduğu bulunmuştur. Tüm bu tartışılan değerler çalışılan numuneler için hesaplanan minimum çentik test yükü (W_{MPSR}) değerleri ile de doğrulanmıştır. Şöyle ki, bir materyal MONDM modelinde hesaplanan W_{MPSR} değerine göre mekanik karakteristik özellik (ISE veya RISE) gösterir. Eğer W_{MPSR} değeri pozitif ise üretilen numune karakteristik ISE davranışını sergilerken, değer negatif olması malzemenin RISE özelliği sergilediğini gösterir. MONDM teorik metodun A_{1MPSR} değerlerine gelindiğinde $\text{Bi}_{2.0-}$

$x\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ seramik süperiletken malzemelerin A_{IMPSR} sabiti katkılama $x=0,01$ olduğu zaman $2,081 \times 10^{-6} \text{ N}/\mu\text{m}^2$ (saf numune için) değerinden $2,363 \times 10^{-6} \text{ N}/\mu\text{m}^2$ değerine artış gösterirken, bu kritik katkılama değerinden sonra parametre sürekli olarak azalma eğilimindedir. Hatta katkılama oranı maksimum olduğu durumda ($x=0,30$) A_{IMPSR} parametresi $1,642 \times 10^{-6} \text{ N}/\mu\text{m}^2$ değerine kadar düşmüştür. Diğer bir deyişle, optimum Bi-2212 kristal örgüye optimum vanadyum katkılama Bi-2212 malzemesinin mekanik mukavemetini, kritik gerilme değerini, sertliğini ve uygulanan kuvvete karşı dayanıklılığı (tetragonal fazın dayanıklılığını) dramatik olarak artırır. Sonuç olarak, kristal sistemine optimum vanadyum katkılı Bi-2212 malzemeler, yapılarındaki kusur, çatlak ve dislokasyona karşı artan dirençleri ile, uygulanan yüke ve yorulmaya karşı daha dirençli olurlar.

Ayriyeten, MONDM modeli bize kristal örgüsüne vanadyum katkılanmış Bi-2212 süperiletken materyallerin doyunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini araştırma şansı verir. Şöyleki,

$$H_{MPSR} = 1854.4 A_{IMPSR}$$

Hesaplanmış olan tüm değerler Şekil 4.5 içerisinde gösterilmiştir. Çizelge 4.5'den de görüleceği üzere tüm numunelerin doyunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerleri gerçek değerlerden daha küçük olarak hesaplanmıştır. Her ne kadar ONDM modele göre yakın sonuçlar verse de genel olarak bakılacak olursa, hesaplanan değerler olması gereken değerden çok uzaktır. Bu model çalışılan malzemelerinin genel mekanik özelliklerini, mikrosertlik karakteristik özelliklerini belirlemede başarılı olurken plato limit bölgesinde doğru mikrosertlik değerlerini belirlemede başarısız olmuştur.

4.2.7. Elastik/Plastik Deformasyon (EPD) Modeline Göre Bi_{2.0}-

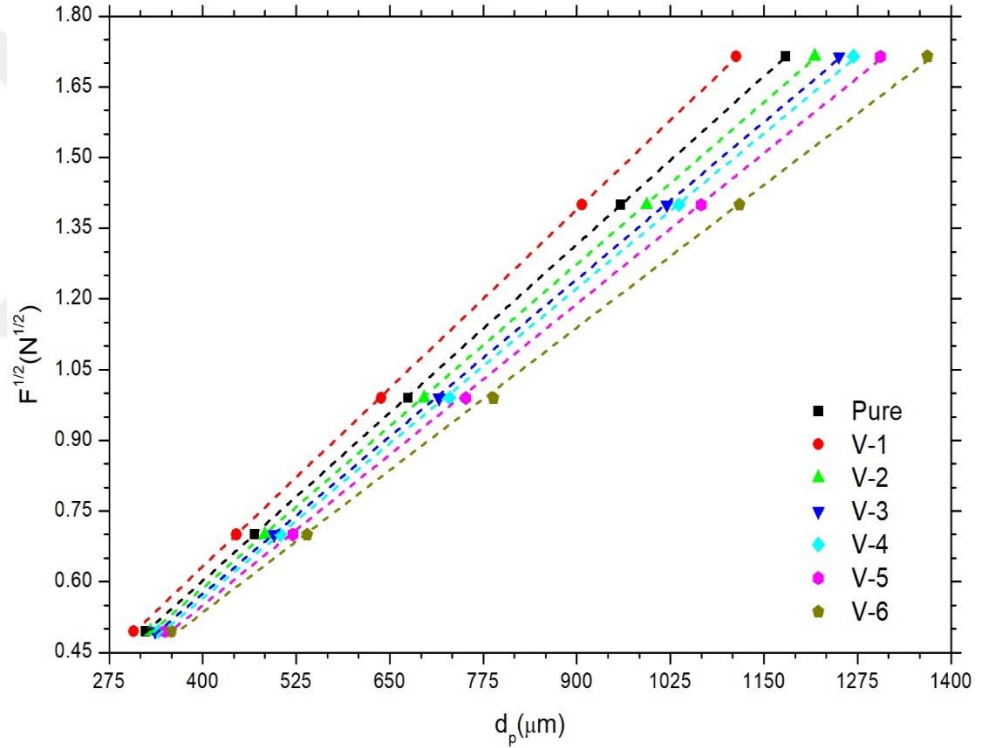
$x\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ seramik süperiletken Materyallerin Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Çalışmamızın dördüncü teorik modelini Elastik/Plastik Deformasyon (EPD) yaklaşımı oluşturmaktadır ve model yardımı ile malzemenin genel mekanik özelliklerinin, mikrosertlik karakteristik özelliklerinin ve plato limit bölgesindeki

gerçek mikrosertlik değerlerini incelemeye kullanılır. Modelde elastik toparlanma ve çentik köşegen uzunluğu arasında güçlü bir bağ vardır. Bu yüzden, hesaplama modülünde plastik deformasyonu içeren yeni bir doğrulama terimi vardır ve formulu aşağıdaki gibidir (Fröhlich F, Grau P, Grellman W, 1977).

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

Denklemden A_{2EPD} ve d_e katsayıları Şekil 4.6’te verilen uygulanan çentik test yükünün ($F^{1/2}$) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d_p) ile değişimine ait eğrilerinin üstünden ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilip tüm bu değerler Şekil 4.6 ‘da numerik olarak verilmiştir.



Şekil 4.6. Saf ve krital örgüsüne vanadyum katkılı seramik materyallerin test yükünün ($F^{1/2}$) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d_p) ile değişimleri

Şekilden de görüldüğü üzere d_e değerleri hazırlanan tüm numuneler için pozitif değerlerde bulunmuştur. Bu bağlamda her bir numune tipik ISE davranışı sergilemektedir. Diğer modellerde de çıkarılan sonuç gibi, üretilen tüm malzemeler kristal yapılar aynı anda hem geri dönüşümlü (elastik) hem de geri alınamaz (plastik) deformasyonu sergilediğini bulunup, materyal üzerine uygulanan kuvvetin kaldırılması ile sistemlerin hızlıca toparlanması gerçekleşmesi elde edilebilir. Numerik

olarak bakacak olursak, saf numunenin d_e katsayısı 0,0309 μm olarak bulunurken, bu değer V-1 numunesi için 0,0258 μm değerine kadar düşmüş olup, vanadyum katkılama değeri arttıkça d_e sabitinde sürekli artış gözlemlenmiştir. Bu bağlamda V-6 örneği en büyük (0,0508 μm) d_e sabitine sahiptir. Değerin $x=0,01$ katkılama oranında azalması, numune üstüne uygulanan kuvvetin malzemeye (malzemenin uygulanan yüke karşı mukavemetinin artmasından dolayı) daha az zarar vermesi olarak atfedilir. Yani, çalışılan malzemeler arasında V-1 numunesinin en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu gözlenmektedir. Tersine, vanadyum katkılama miktarının artması ise Bi-2212 materyalinin mekanik mukavemetine, kritik gerilme değerine, sertliğine ve uygulanan kuvvete karşı dayanıklılığına (tetragonal fazın dayanıklılığını) zarar vermiştir.

Yine bu model vasıtası ile üretilen tüm numunelerin doygunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini aşağıda verilen denklemle inceledik.

$$H_{EPD} = 1854.4A_{2EPD}$$

Elde edilen tüm hesaplamalar Şekil 4.7'de detaylı olarak verilmiştir. Çizelge 4.5'den anlaşılacağı üzere doygunluk limit bölgesinde hesaplanan yükten bağımsız mikrosertlik değerleri olması gereken değerlerden çok daha küçük olarak bulunmuştur. Bu bağlamda EPD teorik model materyallerin genel mekanik özelliklerini, mikrosertlik karakteristik özelliklerini belirlemede başarılı olurken plato limit bölgesinde doğru mikrosertlik değerlerini belirlemede başarısız olmuştur.

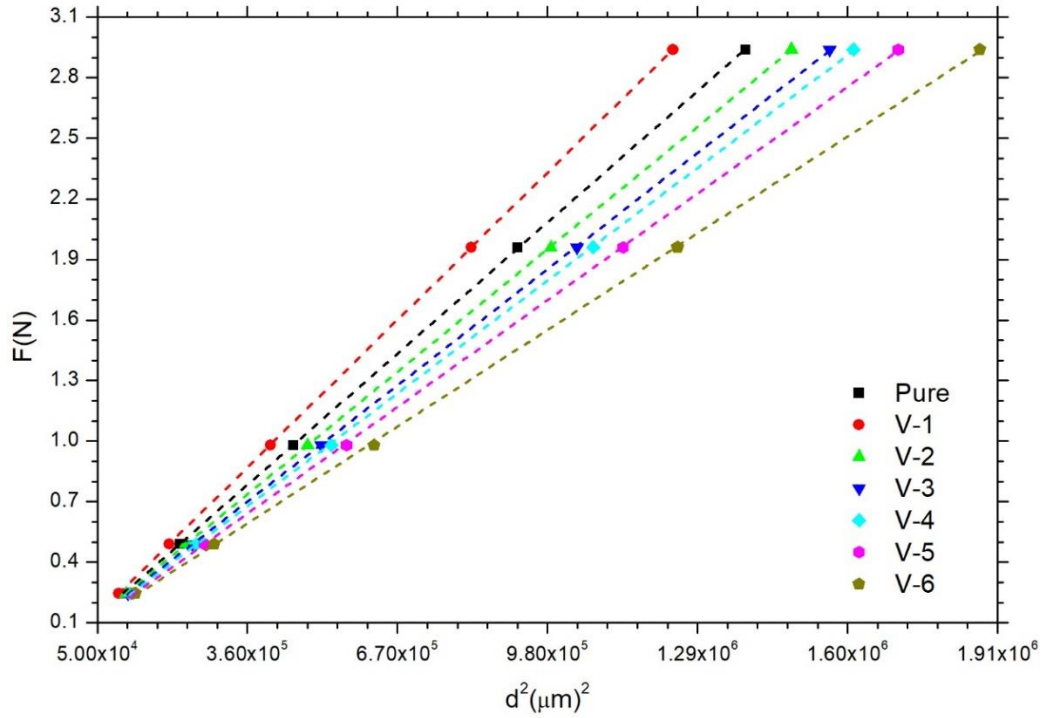
4.2.8. Çalışılan Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Hays Kendall (HK) Yaklaşım ile İncelenmesi

Genelde literatürde katı materyallerin genel mekanik özelliklerinin, mikrosertlik karakteristik özelliklerinin ve plato limit bölgesindeki yükten bağımsız mikrosertlik değerlerinin tanımlanmasında kullanılan modeldendir. Hays Kendall (HK) hesaplama modülü, yüzeye uygulanan kritik bir test yük (W olarak kısaltılır) sonucu yüzeyde oluşan elastik ve plastik deformasyon ile ilgili bir sabit içerir (Ozkurt B, 2014).

Daha başka bir ifade ile model uygulanan çentik test yükü ve plastik deformasyon arasında bağ kuran etkili yük terimi içerir ve bu yükün değeri $F_{eff} = F - W$ olarak ifade edilir. Sonuç olarak, HK modelin formülizasyonu aşağıdaki gibi verilir.

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

Yukarıdaki verilen denklemde, çalışılan numunelere ait A_{3HK} katsayıları Şekil 4.7’te gösterilen uygulanan çentik test yükünün ($F^{1/2}$) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d^2) grafiklerden ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 4.7’de numerik olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, tüm kritik test yükler (W) pozitif olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. Vanadyum katkılı Bi-2212 süperiletken materyallerin uygulanan çentik test yükünün ($F^{1/2}$) ortalama girinti köşegen uzunluğu (d^2) grafikleri

Diğer modellerde olduğu gibi üretilen tüm $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ seramik süperiletken malzemeler standart ISE davranışı göstermektedir. Bu bağlamda, üretilen tüm malzemeler kristal yapılar geri dönüşümlü ve geri alınamaz deformasyonu aynı anda sergiler. Yani, çalışılan materyaller üzerine uygulanan test yükünün kaldırılması ile sistemlerin hızlıca toparlandığı gözlemlenir. W parametresinin sayısal değerlerine

göz atacak olursak saf numune 0,0271 N olarak bulunurken, bu değer optimum katkılama oranında 0,217 N olarak hesaplanmıştır. Bi-2212 süperiletken kristal yapısında daha fazla vanadyum atomu bulunması ile W parametresinde ciddi bir yükselme gözlenmektedir. Bu bağlamda maksimum katkılama yapılan numunenin W değeri 0,0362 N olarak bulunmuştur. Bu değişimlerin temel sebebi, optimum katkılama oranında Bi-2212 materyalinin en yüksek mekanik özelliklere sahip olmasından kaynaklanırken, vanadyum katkılama miktarının artması ise çalışılan örneklerin mekanik mukavemetine, kritik gerilme değerine, sertliğine ve uygulanan kuvvete karşı dayanıklılığına zarar vermiştir. Diğer modeller gibi HK teorik yaklaşımı tez kapsamında çalışılan tüm numunelerin doyunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini incelememize olanak sağlamıştır. Şöyle ki,

$$H_{HK} = 1854.4A_{3HK}$$

Formüle göre elde edilen tüm H_{HK} değerleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bu değerler doğrultusunda doyunluk limit bölgesinde hesaplanan yükten bağımsız mikrosertlik değerleri gerçek değerlerine (diğer modellerin hesaplarına kıyasla) yakın çıkmıştır. Bu bağlamda, HK modeli tez kapsamında üretilen $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ seramik süperiletken materyallerin genel mekanik özelliklerini, mikrosertlik karakteristik özelliklerini belirlemede tamamen başarılıdır. Ancak, doyunluk limit bölgesinde hesaplanan yükten bağımsız mikrosertlik değerlerine belirlemede aynı başarıyı sergilememiştir. Herşeye rağmen, diğer modellere göre üstün olmasından dolayı, HK teorik yaklaşımı yükten bağımsız mikrosertlik değerleri incelemesinde kullanılabilir.

4.2.9. Üretilen Malzemelerin Çentik-Kaynaklı Çatlak (ÇKÇ) Model ile Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, $Bi_{2.0-x}V_xSr_{2.0}Ca_{1.1}Cu_{2.0}O_y$ seramik süperiletken materyallerin genel mekanik özelliklerinin, mikrosertlik karakteristik özelliklerinin ve plato limit bölgesindeki yükten bağımsız mikrosertlik değerlerinin tanımlanmasında son model olarak Çentik-Kaynaklı Çatlak (ÇKÇ) yaklaşımı kullanılacaktır. Model dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar,

- i- Çentik sürtünmesi,
- ii- Elastik deformasyon,
- iii- Plastik deformasyon ve
- iv- Çatlak mekanizmasıdır (Tarkanian ML, Neumann JP, Raymond L, 1973, Hays C, Kendall EG, 1973, Akkurt B, Yildirim G, 2016, Li H, Bradt RC, 1996, Dogruer M, Gorur O, Karaboga F, Yildirim G, Terzioglu C, 2013, Sangwal K, 2000).

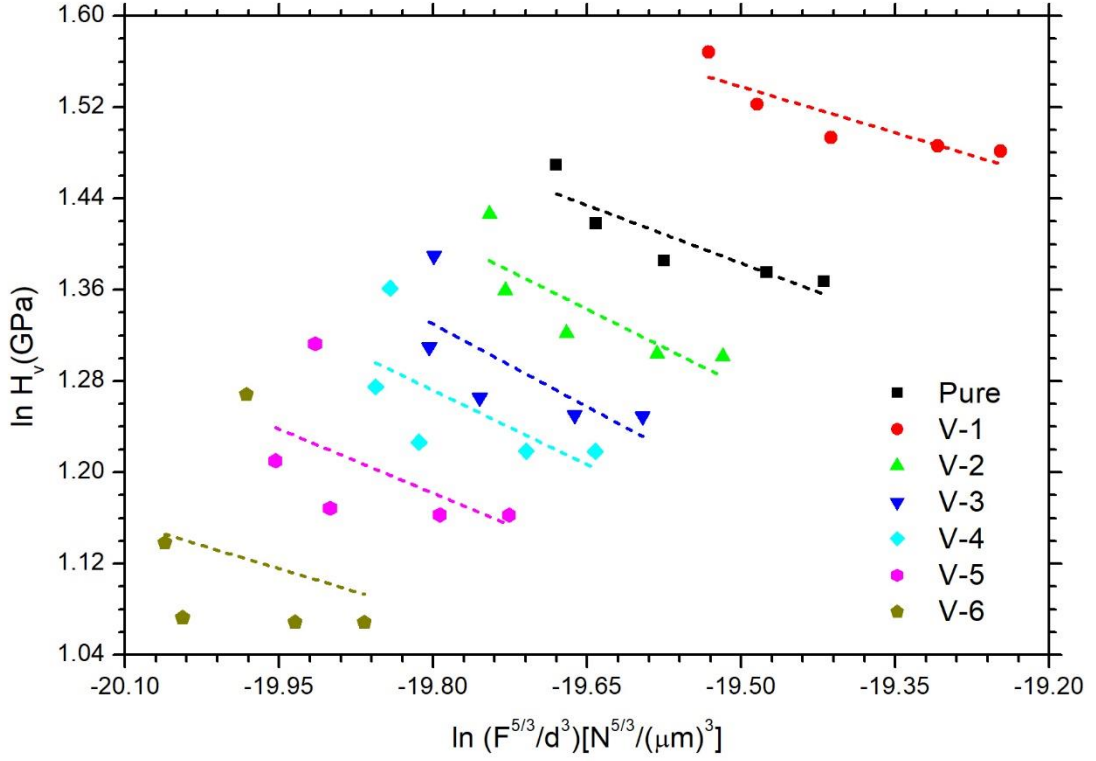
Tüm bu bileşenler girinti köşegen uzunluğunda bırakılan ize karşı yapılan dirençtir. İşte tüm bu bileşenler malzemenin temel mekanik karakteristik özelliğini (ISE veya RISE) incelemede kullanılır. Bu bağlamda model yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini aşağıdaki denkleme göre hesaplar.

$$H_{IC} = \lambda_1 K_1 (F/d^2) + K_2 (F^{5/3}/d^3)$$

Burada, λ_1 kullanılan malzemenin tipine bağlı bir sabittir. K_1 çentik geometrisi ile alakaslı bir parametredir. K_2 ise uygulanan çentik test yükünden kaynaklı olan bir sabittir. İdeal kusursuz plastikler için $\lambda_1=1$ 'dir. λ_1 1'e eşit olduğu zaman, denklemin sağ taraftaki $K_2 (F^{5/3}/d^3)$ terimi 0'a gider. Böylece, ukarıda bahsi geçen eşitliğin sadece sağ taraftaki ilk termi $K_1 (F/d^2)$ kalır. Diğer bir yanda, eğer malzeme kusursuz kırılğan yapıda ise $\lambda_1=0$ olur, ve denklemin sağ tarafındaki eşitlikte sadece $K_2 (F^{5/3}/d^3)$ terimi kalır. Bu çalışmada da kullanılan malzemelerin seramik, yani kusursuz kırılğan, malzeme olduğu düşünülürse denklemdaki eşitliğin sağ tarafı $K_2 (F^{5/3}/d^3)$ indirgenir. Böylece eşitlik,

$$H_{IC} = K \left(\frac{F^{5/3}}{d^3} \right)^m$$

halini alır. Formülde k ve m sabitleri yükten bağımsız mikrosertlik değerleridir, ve mikrosertlik değerlerinin $\ln(Hv)$ çentik test yükü $\ln(F^{5/3}/d^3)$ ile değişimini gösteren grafiklerinden ekstrapolasyon yöntemi ile elde edilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ perovskite süperiletken malzemelerin mikrosertlik değerlerinin $\ln(H_v)$ çentik test yükü $\ln(F^{5/3}/d^3)$ ile değişimi

Tez kapsamında üretilen tüm numunelere ait k ve m katsayıları nümerik olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir. Burada, kritik bir m değeri vardır ($m=0,6$). Eğer bu katsayı $0,6$ 'dan küçük ise ($m < 0,6$) bu tarz malzemeler tipik çentik boyut etkisi (ISE) doğasına sahiptirler ve mikrosertlik değerleri uygulanan yük ile azalan bir yol izler. Tersine, bu katsayı $0,6$ 'dan büyük ise ($m > 0,6$) bu tarz materyaller alışılmamış ters çentik boyut etkisi (RISE) davranışını sergiler. Bu bağlamda, çizgede hesaplanan m değerlerine göz atacak olursak, çalışılan tüm tip II seramik kuprat katmanlı $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ perovskite süperiletken malzemelerin m değerleri $0,6$ 'dan küçük ($m < 0,6$) olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda üretilen tüm numuneler tipik ISE davranışının sergilemişlerdir. Daha önce de söylendiği üzere, bu model de aynı bulguyu savunur. Şöyle ki, çalışma kapsamında üretilmiş bütün malzemeler kristal yapıları uygulanan yüke karşı hem geri elastik hem de plastik deformasyonu aynı anda gösterir, ve uygulanan çentik test yükü materyal üzerinden kaldırılması durumunda sistemlerin hızlıca toparlanması gerçekleşir. Diğer modellerde olduğu gibi, ÇKÇ model ile de numunelerin doygunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini inceledik. Bulunan tüm $H_{ÇKÇ}$ değerlerini Çizelge 4.5'te gösterdik. Çizelgedeki

sonuçlara dayanarak, doygunluk limit bölgesinde hesaplanan yükten bağımsız olarak hesaplanan mikrosertlik değerleri gerçek değerlerle uyumlu olduğu bulunmuştur. Böylece bu çalışmada kullanılan modeller arasında $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ seramik süperiletkenlerin genel mekanik özelliklerini, mikrosertlik karakteristik özelliklerini ve yükten bağımsız mikrosertlik değerleri incelemede K model en başarılı model olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, karakteristik özellikler, evren ekonomisi için yeni ve uygulanabilir pazar alanlarında Bi-2212 süperiletkenlerinin kullanımını için optimum Bi / V ikamesi ile geliştirilebilir, böylece küresel enerji gereksinimleri için kalıcı ve radikal çözümler elde edilebilir.



5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, Bi-2212 süperiletken kristal yapısına farklı oranlarda vanadyum katkılamanın materyale ait elektrik özdirençleri, 90 K özdirençleri, artık özdirençleri, artık özdirenç oranları, gerçek metalik davranışları, kritik offset, onset geçiş sıcaklıkları, genişleme derece parametreleri, Fermi enerji seviyesi civarında bulunan aktif ve dinamik elektronik hal yoğunlukları, elektronik hal yoğunlukları, etkili ve güçlü elektron-fonon oluşum olasılıkları, aktif yapısal problemlerin değişimi, hibridizasyon mekanizmaları değişimleri, kristal yapı kaliteleri, süper elektronların düzen parametreleri, izole edilmiş tanecik içlerinin süperiletken faz geçişleri, kristal yapıdaki arayüzeyler arasındaki bağlantının iyileşmesi ve taşıyıcı konsantrasyonlarının değişleri, mekanik özellikleri, yapısal problemlerin değişimleri, aktif kayma sistemlerinin oluşumları, mikrosertlik ölçüm sonuçları, kritik çatlak ilerlemeleri ve doygunluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerleri gibi genel karakteristik özelliklerini üzerine etkileri sıcaklık-öz direnç değişimi, kritik akım yoğunluğu, kütle yoğunluğu, toz X-ışını kırınım ve Vickers sertlik ölçüm deneyleri ile belirlenmiştir. Deneysel verilere göre Bi-2212 kristal yapısına optimum vanadyum oranı $x=0,01$ olarak bulunmuştur. Daha açık olarak;

Üretilen tüm $\text{Bi}_{2,0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2,0}\text{Ca}_{1,1}\text{Cu}_{2,0}\text{O}_y$ süperiletken materyaller onset sıcaklığı üstündeki herhangi bir sıcaklık değerinde, bütün numunelerin sıcaklıkla artan doğrusal bir özdirenç değişimi (gerçek/doğru metalik davranış) sergilemiştir. Yani, materyallerin elektronik yapısındaki Fermi enerji seviyesi civarında bulunan aktif ve dinamik elektronik hal yoğunluklarının logaritmik olarak davranmasındandır. Bu bağlamda, optimum katkılama oranı durumunda, üretilen materyaller kristal yapısında homojen ve süperiletken bölgelerde daha fazla etkili ve güçlü elektron-fonon oluşumundan dolayı optimum metalik davranış sergilemektedir. Bu kritik değerden sonra tüm katkılama oranlarında, materyallerin aktif Cu-O₂ sıralı katmanlarındaki yapısal problemlerin artması, kristal yapıdaki arayüzeyler arasındaki bağlantının kötüleşmesi ve taşıyıcı konsantrasyonlarının azalması nedeni ile bu bağıllık ve metalik özellik sürekli olarak azalma göstermektedir. Diğer bir deyişle, kristal yapıda aşırı miktarda vanadyum atomu bulunması malzemelerin yapısal kusurlarını arttırmaktadır.

Tüm bu değişmeler malzemelerin sıcaklık-öz direnç değişimi ölçümleri ve bu ölçümlere dayalı teorik çıkarımlarla belirlenmiştir.

Benzer bir değişim, materyallerin kritik offset, onset geçiş sıcaklıkları ve genişleme derece parametrelerinde görülmektedir. Bu bağlamda optimum katkılama oranında üretilen malzeme en yüksek kritik offset (84,66 K) ve onset kritik (85,02 K) değerini sergilemiştir. Diğer bir yandan, maksimum vanadyum katkılama oranında bu değerler sırası ile 71,46 K ve 42,74 K V-6 örneği için bulunmuştur. Genişleme derece parametrelerine gelince, tüm materyallere ait hesaplanan değerler sırası ile 2,12 K saf numunesi, 0,36 K V-1 örneği, 8,18 K V-2 malzemesi, 12,01 K V-3 materyeli, 15,08 K V-4 malzemesi, 19,20 K V-5 numunesi ve V-6 malzemesi için 28,72 K olarak hesaplanmıştır. Taşıyıcı konsantrasyon sayısına gelince, V-1 malzemesi 0,153041 değeri ile maksimum değer olarak bulunmuştur. Lakin, vanadyum miktarının artması ile bu değer V-6 materyeli için parabolik bir azalma ile 0,082417'e kadar düşmüştür.

Vickers sertlik ölçüm sonuçlarına gelince, sisteme optimum vanadyum katkılama oranı $x=0,01$ iken Bi-2212 materyallerin standart ISE (uygulanan yüke karşı hem geri elastik hem de plastik deformasyonu aynı anda göstermesi) davranışlarında çok hız bir gelişme gözlemlenirken, bu kritik katkılama değerinin üzerinde ISE davranış ciddi bir şekilde azalır ve hatta maksimum katkılama oranında ($x=0,30$) ISE karakteristik özellik en dip noktasına ulaşır.

Ayrıca, Bi-2212 kristal örgüde vanadyumun optimum miktarda bulunması, çatlak yüzey enerjisinin azalması ve kritik kuvvet değerinin artması sonucunda, sistem içerisinde bulunan çatlak-başlatıcı kusurlar ve dislokasyonlara bağlı çatlakların yayılmasını engellediği bulunmuştur. Ancak, katkı miktarındaki artış Bi-2212 kristal sistemindeki kusurların, bozulmaların, kafes gerilmelerin, taneciklerin hatalı yönelimlerinin, çatlak üreten ve çatlak-başlatan kusurların, gerilme arttırıcılarının, çiftlenim sorunlarının ve tanecikler arası zayıf bağlantılar gibi yapısal problemlerdeki artışa neden olmuştur. Yani, optimum katkılama oranının üstünde Bi-2212 süperiletken kristallik kalitesi bozulur. Yani, vanadyum atomlarının kristal örgüde bulunması durumunda, materyallerin uygulanan test yükleri ile yapıda çatlak yönelimi ve geometrisi çok hızlı bir şekilde azalır, ve düşük kuvvetlerde bile çatlak kritik yayılma hızında aniden hareket etmeye başlar. Böylece, Bi-2212 kristal yapısını

vanadyum atomları ile aşırı katkılama çatlakların ilerlemesini hızlandıran gerilme kaynaklı faz dönüşümüne neden olur. Tüm bu bulgular, Bi-2212 süperiletken materyallerin, mikrosertlik, Young's modülü, akma dayanımı, kırılma tokluğu, kırılma indeksi, süneklik ve elastik sertlik katsayısı karakteristik mekanik özellikleri ile desteklenmiştir. Kısaca, aşırı vanadyum katkılama kristal yapıda daha fazla sayıda çatlak ve daha serbest dislokasyon hareketlerine neden olur. Böylece, kritik gerilme, bükülme direnci, mekanik dayanım, plastik deformasyona karşı dayanıklılık ve sağlamlık gibi mekanik performans davranışlarını azaltması gibi temel karakteristik mekanik özellikler ciddi bir şekilde azalır. Diğer bir deyişle, Bi-2212 süperiletken kristal yapının aşırı vanadyum katkılanması yeni geometrik dislokasyonların ve dislokasyon artma bölgelerinin (dislokasyon birikim noktaları artar) oluşumuna neden olur.

Son olarak, $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ perovskite süperiletken malzemelerin doyumluk limit bölgesinde yükten bağımsız mikrosertlik değerlerini literatürde var olan Meyer Kanunu, Orantılı Numune Direnci Modeli, Modifiyeli Orantılı Numune Direnci Model, Elastik/Plastik Deformasyon, Hays Kendall ve Çentik-Kaynaklı Çatlak modelleri ile incelendi. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tüm modeller çalışılan materyallerin mekanik karakteristik özelliklerini incelemede başarılı olarak bulunmuştur. Ancak, doyumluk limit bölgesinde hesaplanan yükten bağımsız olarak hesaplanan mikrosertlik değerleri araştırmasına dayanarak, bu çalışmada kullanılan modeller arasında $\text{Bi}_{2.0-x}\text{V}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ seramik süperiletkenlerin genel mekanik özelliklerini, mikrosertlik karakteristik özelliklerini ve yükten bağımsız mikrosertlik değerleri incelemede Çentik-Kaynaklı Çatlak model en başarılı model olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, karakteristik özellikler, evren ekonomisi için yeni ve uygulanabilir pazar alanlarında Bi-2212 süperiletkenlerinin kullanımı için optimum V ikamesi ile geliştirilebilir, böylece küresel enerji gereksinimleri için kalıcı ve radikal çözümler elde edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdeen W, Marahba S, Awad R, Abou Aly AI, Ibrahim IH, Matar M, (2016) “Electrical and mechanical properties of (Bi, Pb)-2223 substituted by holmium, J. Advanced Ceramics”, 5: 54–69.
- Akkurt B, Yildirim G, (2016) “Change of mechanical performance and characterization with replacement of Ca by Gd nanoparticles in Bi-2212 system and suppression of durable tetragonal phase by”, Gd, J. Mater. Sci: Mater. El. 27: 13034–13043. DOI: 10.1007/s10854-016-5444-y.
- Allen PB, Pickett WE, Krakauer H, (1988) Anisotropic normal-state transport-properties predicted and analyzed for high- T_c oxide superconductors, *Phy. Rev. B* 37: 7482–7490.
- Anderson PW, (1991) Hall effect in the two-dimensional Luttinger liquid, *Phys. Rev. Lett*, 67: 2092.
- Awad R, Abou-Aly AI, Abdel Gawad MMH, G-Eldeen I, (2012) “The influence of SnO₂ nano-particles addition on the vickers microhardness of (Bi, Pb)-2223 superconducting phase”, *J. Supercond. Nov. Magn.* 25: 739–745.
- Aymak E (2007) MgB₂ Süperiletkeninin Gerçek Sertlik Değerinin Dinamik Mikrosertlik Tekniğiyle İncelenmesi; Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; Tokat.
- Baradan B, (2009) İnşaat mühendisleri için malzeme bilgisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bardeen, J, Cooper, LN, Schrieffer, J R, (1957) *Phys. Rev.*, 108: 1175.
- Battal Ö, (2015) Üretim Tekniklerinin Bizmut Tabanlı Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi; Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- Brauer G, Güther V, Hess H, Otto A, Roidl O, Roller H, Sattelberger S, (2005) “Vanadium and Vanadium Compounds in Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry”, Wiley-VCH, Winheim.
- Brauer G, (1963) “Handbook of Preparative Inorganic Chemistry”, 2nd Ed. Edited by Academic Pres.
- Callister WD, Rethwisch DG, (2013) “Materials Science and Engineering”, An Introduction, 9th ed., Wiley Binder Version, USA.

- Cevizci EB, (2013) Ag Katkılı Bi-2223 Süperiletken Seramiklerin Mekanik Özelliklerinin Saptanması; Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Dogruer M, Yildirim G, Ozturk O, Belenli I, Terzioglu C, (2013) Variation of mechanical properties of Cr doped Bi-2212 superconductors, *J. Supercond. Nov. Magn.* 26: 2949. DOI: 10.1007/s10948-013-2113-8.
- Dogruer M, Gorur O, Karaboga F, Yildirim G, Terzioglu C, (2013) Zr diffusion coefficient and activation energy calculations based on EDXRF measurement and evaluation of mechanical characteristics of YBa₂Cu₃O_{7-x} bulk superconducting ceramics diffused with Zr nanoparticles, *Powder Technol.* 246: 553–560. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.06.018.
- Dogruer M, Yildirim G, Yucel E, Terzioglu C, (2012) “Role of diffusion-annealing temperature on the microstructural and superconducting properties of Cu-doped MgB₂ superconductors”, *J. Mater. Sci: Mater. El.* 23: 1965–1970.
- Ekin J, (2006) “Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing”, Oxford University Press, New York.
- Fröhlich F, Grau P, Grellmann W, (1977) Performance and analysis of recording microhardness tests *Phys. Stat. Sol. A* 42, 79. DOI:10.1002/pssa.2210420106.
- Giannakopoulos AE, Suresh S (1999) ”Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation”, *Scripta materialia*, 40 (10): 1191-1198.
- Greenwood NN, Earnshaw A, (1984) *Chemistry of the Elements*. Oxford: Pergamon Press.
- Greenwood NN, Earnshaw A, (1997) *Chemistry of the Elements* (2nd ed.) Butterworthb Heinemann.
- Guner SB, Zalaoglu Y, Turgay T, Ozyurt O, Ulgen AT, Dogruer M, Yildirim G, (20019) A detailed research for determination of Bi/Ga partial substitution effect in Bi-2212 superconducting matrix on crucial characteristic features, *J. Alloy. Compd.* 772: 388–398.
- Gürü M, Yalçın H (2006) *Malzeme Bilgisi*, 2. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Hays C, Kendall EG, (1973) *Metallography* 6: 275–366.
- Ianculescu A, Gartner M, Despax B, Bley V, Lebey T, Gavrilă R, Modreanu M, (2006) “Optical characterization and microstructure of BaTiO₃ thin films obtained by RF-magnetron sputtering”, *Appl. Surf. Sci.* 253: 344–348.
- Ling HC, Yan MF, (1988) Microhardness measurements on dopant modified superconducting YBa₂Cu₃O₇ ceramics, *J. Appl. Phys.* 64: 1307. DOI: 10.1063/1.341851.

- Li H, Bradt RC, (1993) The microhardness indentation load/size effect in rutile and cassiterite single crystals, *J. Mater. Sci.* 28: 917-926. DOI: 10.1007/BF00400874.
- Li H, Bradt RC, (1996) The effect of indentation-induced cracking on the apparent microhardness, *J. Mater. Sci.* 31: 1065–1070. DOI: 10.1007/BF00352908.
- Li M, Zhang Y, Li Y, Qi Y, (2010) Granular superconductivity in polycrystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\gamma}$ by homovalent La substitution on Bi sites, *J. Non-Cryst. Solids* 356: 2831–2835.
- Martin S, Gurvitch M, Rice CE, Hebard AF, Gammel PL, Fleming RM, Fiory AT, (1989) Nonlinear temperature-dependence of the normal-state resistivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_{8\gamma}$ films, *Phys. Rev. B* 39 9611–9613.
- Meissner W, Oschenfeld R, (1933) Upper Critical Fields Of High- T_c Superconducting Y-Ba-Cu-O. *Nature*, 132: 931-935.
- Michels BD., Frischat GH, (1982) “Microhardness of chalcogenide glasses of the system Se-Ge-As”, *J. Mater. Sci.* 17: 329–334. DOI: 10.1007/BF00591466.
- Mohammed NH, Abou-Aly AI, Ibrahim IH, Awad R, Rekaby M, (2009) Mechanical properties of $(\text{Cu}_{0.5}\text{Tl}_{0.5})_{1223}$ added by nano-SnO₂, *J. Alloy. Compd.* 486: 733–737. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.07.034.
- Newns DM, Pattnaik PC, Tsuei CC, (1991) Role of vanhove singularity in high-temperature superconductors - Mean field, *Phys. Rev. B* 43: 3075–3084.
- Onnes HK, (1911) Superconductivity and Magnetism. *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 119-120.
- Ozkurt B, (2014) “The Influence of Na addition on the mechanical properties of Bi-2212 superconductors”, *J. Supercond. Nov. Magn.* 27: 2407–2414.
- Page EM, Wass SA, (1994) “Vanadium: Inorganic and Coordination chemistry, *Encyclopedia of Inorganic Chemistry*”, John Wiley & Sons.
- Sangwal K, (2000) On the reverse indentation size effect and microhardness measurement of solids, *Mat. Chem. Phys.* 63: 145–152. DOI: 10.1016/S0254-0584(99)00216-3.
- Saritekin NK, Pakdil M, Bekiroglu E, Yildirim G, (2016) Examination of effective nucleation centers for flux pinning of vortices and optimum diffusion annealing temperature for Au-diffusion-doped Bi-2212 polycrystalline compound *J. Alloy. Compd.* 688: 637–646.
- Saritekin NK, Pakdil M, Yildirim G, Oz M, Turgay T, (2016) Decrement in metastability with Zr nanoparticles inserted in Bi-2223 superconducting system and working principle of hybridization mechanism, *J. Mater. Sci: Mater. El.* 27 956–965.

- Shabna R, Sarun PM, Vinu S, Syamaprasad U, (2010) “Charge carrier localization and metal to insulator transition in cerium substituted (Bi,Pb)-2212 superconductor”, J. Alloy. Compd. 493: 11–16.
- Tarkanian ML, Neumann JP, Raymond L, (1973) “The Science of hardness testing and its research application, American Society for Metals”, Metal Park, Ohio.
- Tokana, K, (1988) “Properties of Pb-Doped Bi-Sr-Ca-Cu-O Superconductors”, Appl. Phys. Lett., 53, 14: 1329-1331.
- Turkoz MB, Nezir S, Terzioglu C, Varilci A, Yildirim G, (2013) Investigation of Lu effect on $YBa_2Cu_3O_{7-\gamma}$ superconducting compounds, J. Mater. Sci: Mater. El. 24: 896–905.
- Türhan İ, Tepehan GG, (2009) İTÜ Dergisi / C Fen Bilimleri 7 (1), 27-37.
- Xu X, Kim JH, Dou SX, Choi S, Lee JH, Park HW, Rindfleish M, Tomsic M, (2009) “A correlation between transport current density and grain connectivity in MgB_2/Fe wire made from ball-milled boron”, J. Appl. Phys. 105: 103913.
- Yazıcı D, (2010) Tek Fazlı BSCCO Süperiletken Malzeme Üretimi ve Malzemenin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması; Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Zalaoglu Y, Yildirim G, Buyukuslu H, Saritekin NK, Varilci A, Terzioglu C, Gorur O, (2015) “Important defects on pinning of 2D pancake vortices in highly anisotropic Bi-2212 superconducting matrix with homovalent Bi/La substitution”, J. Alloy. Compd. 631: 111–119.

7.ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: SEMİH OKUR

Doğum Yeri ve Tarihi: KEÇİÖREN – 04.05.1991

Lisans Üniversite: ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

Y. Lisans Üniversite: BİRÜNİ ÜNİVERSİTESİ (TEZSİZ Y.L.)

Elektronik posta: smhokur@hotmail.com

İletişim Adresi: Çamlıca Mah. Şehit Yüksel Gül Sk. No:12/4 Tepebaşı /
Eskişehir

Yayın Listesi: -

Ödüller: -