

Nano Boyutta Kalay ve Sodyum Katkılı Bi-2212 Süperiletken Sisteminde Elektriksel Özelliklerin Matematiksel Formülasyonlarının Elde Edilmesi

Mehmet Ersin AYTEKİN^{1*}, Ali YÜCE², Berdan ÖZKURT³

¹Tarsus Üniversitesi Mersin Tarsus OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Anabilim Dalı, Mekatronik Bölümü, 33100, Mersin

²Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya

³Tarsus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 33400, Mersin

¹<https://orcid.org/0000-0003-0731-2034>

²<https://orcid.org/0000-0002-4642-6272>

³<https://orcid.org/0000-0002-7837-9773>

*Sorumlu yazar: mehmetaytekin@tarsus.edu.tr

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 14.09.2022

Kabul tarihi:20.03.2023

Online Yayınlanma: 04.12.2023

Anahtar Kelimeler:

Bi-2212

Süperiletkenlik geçiş sıcaklığı

Eğri uydurma

Özdirenç

Sunulan çalışmada, sodyum katkılı Bi-2212 süperiletken sisteminde stronsiyum sitelere nano boyutta kalay katkısının etkisi araştırılmıştır. Katı hal tepkime yöntemi kullanılarak üretilen süperiletken örnekler X-ışını kırınım analizi (XRD) ve özdirenç sıcaklık ölçümleri (ρ -T) ile karakterize edildi. Bunun yanında, özdirenç sıcaklık grafiğinden elde edilen veriler kullanılarak, nano boyutta kalay katkılama oranı ve süperiletkenlik geçiş sıcaklığı arasında teoriksel ilişki elde edildi. XRD ölçümü ile yapılan faz analizlerinde bazı safsızlık fazlarının oluşmasına rağmen tüm örneklerde temel faz yapısının Bi-2212 yüksek sıcaklık fazının olduğu tespit edildi. Özdirenç sıcaklık grafiğinden elde edilen bulgularda tüm örneklerin süperiletken davranış sergilediği gözlemlendi. Deneysel çalışma sonucunda, 0.05 oranında nano boyutta kalay katkısı içeren örnek diğer örnekler ile karşılaştırıldığında daha iyi süperiletkenlik özelliklere sahip olduğu belirlendi. Diğer taraftan, Matematiksel formülasyonların elde edilmesi işlemi Matlab ortamında eğri uydurma aracı kullanılarak gerçekleştirildi. Elde edilen matematiksel formülasyonlardan yararlanarak 0.682 oranında nano boyutta kalay katkısının optimum süperiletkenlik özelliklerini sağlayabileceği teoriksel olarak belirlendi.

Obtaining Mathematical Formulations of Electrical Properties in Nanosized Tin and Sodium Doped Bi-2212 Superconductor System

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 14.09.2022

Accepted: 20.03.2023

Published online: 04.12.2023

Keywords:

Bi-2212

Superconductivity transition

Temperature

Curve fitting

Resistivity

In the presented study, the effect of nano-sized tin doping on strontium sites in the sodium-doped Bi-2212 superconductor system was investigated. Superconducting samples produced using the solid-state reaction method were characterized by X-ray diffraction analysis (XRD) and resistivity temperature measurements (ρ -T). In addition, using the data obtained from the resistivity temperature graph, the theoretical relationship between the nanosized tin doping rate and the superconductivity transition temperature was obtained. Although some impurity phases were formed in the phase analyzes performed by XRD measurement, it was determined that the basic phase structure was Bi-2212 high temperature phase in all samples. In the findings obtained from the resistivity temperature graph, it was observed that all samples exhibited superconducting behavior. It was determined that the sample containing 0.05 nano size tin additive had better superconductivity properties compared to the other samples as a result of the experimental study. On the other hand, the mathematical formulations were obtained using the curve fitting tool in Matlab environment. Using the obtained mathematical formulations, it was theoretically determined that 0.682 nano-sized tin additives could provide optimum superconductivity properties.

To Cite: Aytekin ME., Yüce A., Özkurt B. Nano Boyutta Kalay ve Sodyum Katkılı Bi-2212 Süperiletken Sisteminde Elektriksel Özelliklerin Matematiksel Formülasyonlarının Elde Edilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(3): 1864-1877.

1. Giriş

Bilindiği gibi elektrik iletimi bakır kablolarla sağlanmaktadır. Bakır kabloların sahip olduğu iç dirençlerinden dolayı elektrik iletiminde kayıpların önlenmesi için elektrik enerjisi çok yüksek değerlere çıkarılmaktadır. Enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisi tüketicinin rahat bir şekilde kullanabilmesi için iletim kablolarında milyon volt değerlerine çıkartılarak üç fazlı alternatif (AC) gerilim olarak iletilmektedir. Enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisini bu değerlere başarılı bir şekilde çıkarabilmek ve aynı zamanda tüketicinin kullanabileceği değerlere indirebilmek için trafo sistemlerinin kullanılması gereklidir. Elektrik enerjisinin milyon volt gibi çok yüksek değerlerde iletilmesi ve iletim hatlarında birçok birleşenlerin kullanılması hem maliyeti arttırmaktadır hem de enerji verimliliğini azaltmaktadır. Elektrik iletiminde var olan bu problemler enerjinin kayıpsız iletimini sağlayan süperiletken malzemelerin kullanımı ile çözülebilir. Böylece iletim hatlarında sıfır dirence sahip süperiletkenlerin kullanılması ile elektrik enerjisinde kayıplar ortadan kaldırılacağı için gerilimin çok yüksek değerlere çıkarılması gerekmemektedir. Süperiletkenlerin elektrik iletiminde kablo ya da tel olarak kullanılması ile elektrik iletimi AC gerilim yerine DC gerilim olarak sağlanabilir. Böylece gerilim yükseltici ve düşürücü bileşenlerin maliyetleri de ortadan kalkar. Süperiletken malzemeler teknolojiye enerji aktarımında kullanılmasının yanında sahip olduğu manyetik özelliklerden dolayı yüksek alana sahip mıknatıslarda (Hao ve ark., 2020), tıpta yüksek manyetik alan görüntüleme cihazlarında (Dogruer ve ark., 2022), parçacık hızlandırıcılarda ve manyetik sensör (Statra ve ark., 2022) sistemlerinde de kullanılmaktadır.

Süperiletkenler sıfır direnç ve kuvvetli diamanyetik gibi eşsiz özelliklere sahip olduğu için endüstriyel ve teknolojik uygulamalar için umut verici malzemelerdir. Süperiletken aileler arasında Bi tabanlı yüksek sıcaklık süperiletken malzemeler $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+y}$ genel formülüne sahiptir ve formüldeki n (bakıroksit tabakaların sayısı) değerine göre üç farklı faz meydana gelir. Bu fazlar arasında $n = 2$ için Bi-2212 yüksek sıcaklık süperiletken fazı yaklaşık olarak 85 K geçiş sıcaklığına sahiptir ve diğer fazlar ile karşılaştırıldığında yüksek faz kararlılığı ve kolay sentezlenmesi gibi avantajlara sahiptir (Akkurt ve ark., 2021). Bakır oksit tabakalar arasında diğer tabakaların yerleşmesiyle oluşan BSCCO süperiletken malzemeler kuvvetli anizotropik yapı, oldukça düşük taşıyıcı yük yoğunluğu, düşük koherens uzunluğu ve geniş nüfuz derinliğine sahiptir (Zaloğlu ve ark., 2012). Bunun yanında, taneler arası zayıf bağlantıların oluşması, zayıf akı çivileme kapasitesi ve seramik doğasından dolayı kırılgan yapıya sahip olması bizmut tabanlı yüksek sıcaklık süperiletkenlerin teknolojik uygulamalarda kullanılmasını sınırlayan faktörlerdir. BSCCO süperiletken malzemelerin elektrikselsel ve manyetik özelliklerini iyileştirebilmek için birçok strateji geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlisi tanecikselsel özelliklerin geliştirilmesidir. Literatürde, LFZ (Laser Floating Zone; Sotelo ve ark., 2009), sıcak presleme (Oner ve ark., 2022) ve yüksek peletizasyon basıncı (Aytekin ve ark., 2016) gibi teknikler daha düzgün tane yapılarının oluşumunda son derece faydalı metotlar arasındadır. BSCCO süperiletken sisteminde süperiletkenlik mekanizmasını anlamak ve temel özellikleri geliştirmek için bir başka faydalı yöntem ise malzeme içerisine farklı iyonik yarıçapta metalik element katılma ya da

ekleme yöntemidir. Literatürden görülmektedir ki, Ag, Li, K, Nb, Sb ve Pb gibi elementleri içeren çalışmalarda BSCCO süperiletken sistemin temel özelliklerinde son derece önemli gelişmeler elde edilmiştir (Khalil., 2001; Sözeri ve ark., 2007; Kocabaş ve ark., 2008; Sotelo ve ark., 2009; Tagipour ve ark., 2010; Tran ve ark., 2019; Shalabay ve ark., 2021).

Nanoteknolojide meydana gelen gelişmeler ile nano boyutta birçok malzeme sentezlendi. İyi bilinmektedir ki, nano boyutta parçacıklar makro boyutta malzemeler ile karşılaştırıldığında yüzeylerinde daha yüksek oranda atom yerleşmiştir. Bu durum nano boyutta malzemelere eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikler sağlamaktadır (Yavuz ve ark., 2016). Bunun yanında, son yıllarda BSCCO sisteminin içerisine nano boyutta parçacıkların katılanması ya da eklenmesinde elde edilecek sonuçlar birçok araştırma grubu için merak konusu olmuştur. BSCCO sistemi içerisine uygun oranlarda nano boyutta parçacıklar girdiği zaman özellikle taneler arası boşluklara yerleşerek taneciksel özellikleri geliştirerek kritik akım yoğunluğu değerini arttırmaktadır (Öztornacı ve Özkurt, 2017).

II. tip süperiletken malzemeler H_{c1} ve H_{c2} kritik manyetik alan arasında değerlerde manyetik alana maruz kaldığında, manyetik akı malzeme içerisine kuantizeli olarak girmektedir. Manyetik akının malzeme içerisinde hareketi süperiletken bölgeler ile etkileşerek malzemenin taşıyabileceği kritik akım yoğunluğu değerini sert bir şekilde azaltabilmektedir. Malzeme içerisinde etkili çivileme merkezlerinin oluşturulması akı hareketlerinin engellenmesi için oldukça faydalı bir metottur (Özçelik ve ark., 2020). Literatürden iyi bilindiği gibi, yapı içerinden akı çivileme merkezleri malzeme içerisinde safsızlık fazlarının oluşturulması ve farklı iyonik yarıçapta elementlerin katılanması/eklenmesi ile oluşturulmaktadır (Özkurt, 2020). Akı çivileme merkezlerinin oluşturulması için bir başka metot ise malzeme içerisine koherens uzunluğuna yakın (1.6 nm) değerlerde (Reichle., 2022) nano malzemeler katılmaktır (Arani ve ark., 2019;). Literatürde, Co_3O_4 , Au, Sm_2O_3 , Al_2O_3 , ZrO_2 ve Ag gibi nano boyutlu parçacıkların BSCCO sistemine girmesi sonucu etkili çivileme merkezleri oluşturularak, kritik akım yoğunluğu değerinde önemli gelişmeler elde edilmiştir (Jannah ve ark., 2013; Baqiah ve ark., 2009; Öztornacı ve Özkurt, 2017; Ghattas ve ark., 2008; Sakhno ve ark., 2007; Oboudi ve Mustafa, 2016).

Laboratuvar çalışmalarında malzemelerin temini, sentezlenmesi ve karakterize edilmesi oldukça maliyet gerektiren süreçleri içermektedir. Yüksek maliyetler birçok araştırma grubu için çalışmaların gerçekleştirilmesinde problem oluşturmaktadır. Bunun yanında bazı laboratuvar çalışmaları ise insan sağlığına önemli ölçüde zarar veren süreçler içerebilmektedir. Bu durumlarda hem maliyeti azaltmak hem de insan sağlığına zarar verebilecek temastan kaçınmak için bilgisayar simülasyonları ya da modellemeler kullanılmaktadır. Böylece gerçek bir sistem ya da herhangi bir prototip üretilmeden düşük maliyetler ile araştırma ve geliştirme faaliyetlerine devam edilebilmektedir.

Nano boyutta kalay elementinin optik geçirgenlik, mekaniksel sertlik ve düşük direnç gibi özelliklere sahip olmalarının yanında 850-860⁰ arasında sinterlenen BSCCO sistemine kıyasla 1630 °C' lik yüksek erime sıcaklığına sahiptir (Ali ve ark., 2013). Bunun yanında nano boyutta kalay kristal

yapısında oksijen eksikliğinin olması (Chen ve ark., 2012) Bi-2212 sistemine girdiği zaman akı çivileme özelliklerini geliştirebilmesinin yanında hole konsantrasyonu değerini de geliştirebilir. Diğer taraftan, alkali metaller en dış kabuğunda bir elektrona sahiptir ve bu durum onları oldukça reaktif yapıda olmalarını sağlar. Daha kararlı hale gelmeleri için valans elektronlarını kaybetmeyi tercih edebilirler. Böylece alkali elementler BSCCO sistemine katkılандığı zaman sisteme fazladan elektron vererek sistemin hol konsantrasyonu değerini arttırabilir (Bilgili ve ark., 2008). Özkurt tarafından gerçekleştirilen çalışmada Bi-2212 süperiletken sisteminde bakır sitelere farklı oranlarda sodyum elementi katkılanmıştır. Elde edilen bulgularda 0.25 oranında sodyum elementi içeren örneğin süperiletkenlik özelliklerinde önemli gelişmeler elde edilmiştir (Özkurt, 2013). Daha önceki çalışmamızda bakır sitelere 0.25 oranında sodyum katkılı Bi-2212 süperiletken sisteminde stronsiyum sitelere farklı oranlarda nano boyutta kalay elementi katkılандı. $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1, 0.20$) başlangıç kompozisyonunda süperiletken örnekler katı hal tepkime yöntemi ile hazırlandı ve X-ışını kırınım ölçümleri taramalı elektron mikroskobu ölçümleri özdirenç sıcaklık ve manyetizasyon ölçümleri ile karakterize edildi (Aytekin ve Özkurt, 2019). Analiz çalışmaları sonucu elde edilen bulgularda $x = 0.05$ oranında nano boyutta kalay içeren örnekte Bi-2212 yüksek sıcaklık faz yoğunluğunun ve şiddetinin artması, taneler arası kuvvetli bağların oluşumu ve akı çivileme özelliklerinin gelişmesi ile en iyi süperiletkenlik özellikleri elde edilmiştir. Sunulan çalışmada ise özdirenç sıcaklık ölçümlerinden elde edilen bulgular ile $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ süperiletken yapısı için yaklaşık matematiksel formülasyonlar elde edilerek özdirenç, süperiletkenlik geçiş sıcaklığı ve nano boyutta kalay katkılama değerleri arasında ilişki araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1, 0.20$) başlangıç kompozisyonunda süperiletken örnekler %99 saflıkta Bi_2O_3 (Panreac, 98+ %), SrCO_3 (Panreac, 98+%), CaCO_3 (Panreac, 98.5+%), Na_2CO_3 (Panreac, 98.5+%), CuO (Panreac, 97+ %) ve SnO_2 (Abo Swiss, 98.5+%) öncü tozlar katı hal tepkime yöntemi kullanılarak üretildi. İlk olarak öncü tozlar uygun oranlarda tartıldı ve agat havanda karıştırıldı. Öğütme işleminden sonra toz halindeki örnekler saf su ve nitrik asit çözeltisi içerisine katılarak manyetik karıştırıcıda homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırıldı. Çözeltinin rengi açık maviye döndükten sonra sıvının buharlaştırılma işlemine geçildi ve siyah renkte tozlar elde edilene kadar sıvı buharlaştırıldı. Elde edilen tozlarda kurutma işlemini tamamen gerçekleştirebilmek için 350°C 'de ısıtma işlemi uygulandı. Tozlar kurutulduktan sonra oluşabilecek topaklanmayı engellemek için agat havanda elde öğütüldü. Öğütme aşamasından sonra toz halinde örnekleri 2.9 cm çapında pelet haline dönüştürebilmek için oda sıcaklığında 375 MPa basınç uygulanarak presleme işlemi tamamlandı. Tablet halindeki örneklere ilk ısıtma işlemi (kalsinasyon) uygulanması için örnekler kül fırına konuldu. Örnekler üzerine 750°C sıcaklık 12 saat boyunca uygulanarak ilk kalsinasyon işlemi tamamlandı. Tablet halindeki örnekler tekrar öğütüldü, preslendi ve süperiletken fazların oluşumunu başlatmak için 820°C ısıtma işlemi 12 saat boyunca

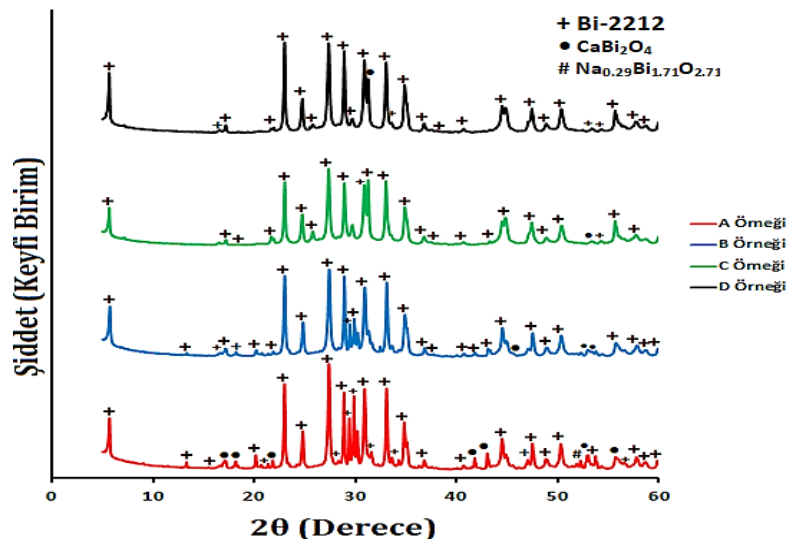
uygulanarak kalsine edildi. Öğütme, presleme ve kalsinasyon işlemleri iki kez daha gerçekleştirildi. Son olarak örneklerde karışımı oluşturan atomlar arasındaki bağları kuvvetlendirmek, polikristalleri oluşturmak ve yapı içerisindeki kristal hataları en aza indirebilmek için hazırlanan tabletlerin sinterlenmesi aşamasına geçildi. Örnekler tekrar öğütüldü ve 375 MPa basınç altında preslendi. Tablet haline gelen örnekler 850 °C ısıtma işlemi 120 saat boyunca uygulanarak sinterlendi ve örnekler karakterizasyon işlemine hazır hale geldi.

Bu çalışma kapsamında üretilen örnekler $x = 0.0, 0.05, 0.1$ ve 0.2 nano boyutta stronsiyum katkılama oranı ile sırasıyla A Örneği, B Örneği, C Örneği ve D Örneği olarak isimlendirildi.

Süperiletken iletken örnekler içerisinde meydana gelen fazları gözlemleyebilmek için X-Işını kırınım ölçümleri gerçekleştirildi. X-Işını ölçümleri $2^\circ/\text{dakika}$ tarama hızında $2\theta = 3^\circ - 60^\circ$ tarama aralığında X-Işını Kırınım cihazında gerçekleştirildi. Örneklerin süperiletkenlik T_c^{onset} ve T_c^{offset} geçiş sıcaklıklarının tespit edilebilmesi için yaklaşık olarak 2 K sıcaklıklara ulaşabilen kapalı döngü Helyum sisteminden oluşan Cryogenic Limited PPMS cihazı (Physical Property Measurement System - Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi) kullanıldı. Bu ölçüm sonuçlarından her bir örnek için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak özdirenç değerleri elde edilmiştir. Farklı katkılama değerlerine sahip örnekler için elde edilen özdirenç sıcaklık verileri kullanılarak, $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ süperiletken sistemi için katkılama oranı ve süperiletkenlik geçiş sıcaklığı arasında matematiksel formülasyon geliştirilmiştir. Bu işlem Matlab ortamında eğri uydurma aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1’de tüm örneklere ait X-Işını kırınım ölçüm sonuçları sergilenmektedir. Tüm örneklere ait XRD grafiğinde + sembolü Bi-2212 yüksek sıcaklık fazını simgelerken, ● ile Bi_2CaO_4 safsızlık fazı ve # ile $\text{Na}_{0.9}\text{Bi}_{1.71}\text{O}_{2.71}$ safsızlık fazı simgelenmektedir.

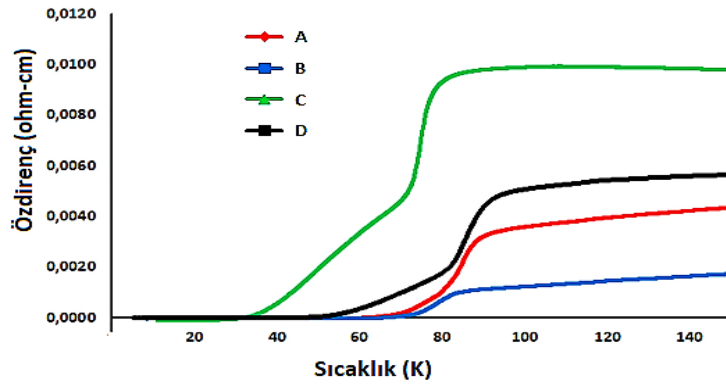


Şekil 1. A, B, C ve D Örnekleri için X-Işını Kırınım Ölçüm Sonuçları

Literatürden iyi bilindiği gibi bizmut tabanlı yüksek sıcaklık süperiletken malzemelerin X-ışını ölçüm sonuçlarında $2\theta \approx 5.7^\circ; 24.8^\circ; 29.1^\circ; 31.24^\circ$ ve 45.04° gibi noktalarda Bi-2212 süperiletken fazının gözlemlenmesi ve bu noktalarda oluşan fazların şiddet ve keskinliklerinde artış gözlemlenmesi malzemede iyi bir kristalleşmenin meydana geldiğinin göstergesidir (Cavdar ve ark., 2012). Şekil 1’de tüm örneklere ait X-ışını kırınım ölçümlerine bakıldığında zaman karakteristik piklerin tüm örneklerde oluştuğu görülmektedir. Ayrıca bazı safsızlık fazlarının oluşmasının yanında tüm örneklerde temel faz yapısı Bi-2212 yüksek sıcaklık fazıdır.

Yapı içerisinde 0.05 oranında nano boyutta SnO_2 içeren B örneğinde toplam fazlar içerisinde Bi-2212 faz yoğunluğunun yüksek olduğu Şekil 1’de görülmektedir (Aytekin ve Özkurt, 2019). Diğer taraftan, yapı içerisinde nano boyutta SnO_2 içermeyen A örneğinde $2\theta \approx 17.905^\circ; 18.187^\circ; 41.78^\circ$ ve 43.02° de gözlemlenen Bi_2CaO_4 safsızlık fazları ve $2\theta \approx 52.225^\circ$ de gözlemlenen $\text{Na}_{0.29}\text{Bi}_{1.71}\text{O}_{2.71}$ safsızlık fazı B örneğinde Bi-2212 süperiletken fazına dönüşmüştür. Diğer örnekler ile karşılaştırıldığında B örneğinde yüksek oranda Bi-2212 süperiletken fazların oluşumu ve bazı noktalarda safsızlık fazlarının Bi-2212 süperiletken fazına dönüşmesi daha iyi süperiletken özelliklerin gözlemlenmesine işaret etmektedir.

Bu çalışma kapsamında $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1, 0.20$) başlangıç kompozisyonunda katı hal tepkime yöntemi kullanılarak üretilen süperiletken örneklerin öz direnç sıcaklık grafiği Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. A, B, C ve D Örneklerine ait öz direnç sıcaklık grafiği

Bizmut tabanlı yüksek sıcaklık süperiletken sisteminde süperiletken faza geçişin başladığı sıcaklık değeri T_c^{onset} sıcaklık değeridir ve bu değer malzeme içerisindeki süperiletken fazların sayısına bağlıdır (Akça ve ark., 2013). Süperiletken faz geçişinin tamamlandığı ve malzemenin tamamen süperiletken davranış sergilediği sıcaklık değeri ise T_c^{offset} sıcaklık değeridir ve malzeme içerisinde var olan süperiletken fazların birbirleriyle bağlantıları ile ilişkilidir (Siregar ve ark., 2021). Şekil 2’de örneklere ait öz direnç sıcaklık grafiğine bakıldığında tüm örneklerde T_c^{onset} değerlerine kadar metalik davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum bizmut tabanlı süperiletkenlerin karakteristik davranışıdır.

Öz direnç sıcaklık ölçüm sonuçlarından elde edilen T_c^{onset} , T_c^{offset} ve ΔT_c değerleri Tablo 1’de gösterilmektedir. 150 K sıcaklıkta öz direnç sonuçları ise Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. A, B, C ve D Örneklerine ait süperiletken geçiş sıcaklığı değerleri

Örnekler	T_c^{onset} (K)	T_c^{offset} (K)	ΔT_c (K)
A	89,08	61,4	27,68
B	84,6	66,3	18,3
C	82,8	35,8	47
D	92,6	50,2	42,4

Tablo 2. A, B, C ve D Örneklerine ait özdirenç değerleri

Örnekler	150 K'de
	Özdirenç (ρ) Değeri (mohm-cm)
A Örneği	4,1
B Örneği	1,75
C Örneği	9,8
D Örneği	5,69

Tablo 1'de diğer örnekler ile karşılaştırıldığında en yüksek T_c^{onset} değeri D örneğinde gözlemlenmiştir. Ancak X-ışını analizlerinde de gözlemlendiği gibi, D örneğinde Bi-2212 süperiletken faz yoğunluğunun azalması örneklerin T_c^{offset} değerinin oldukça düşük olmasına neden olmuştur. Diğer taraftan B örneğinde Bi-2212 fazının yoğunluğunda artış gözlemlenmesi ile beraber safsızlık fazlarında azalmalar sonucu daha iyi kristal yapı oluşumu gerçekleşmiştir. Bu durumda B örneğinde diğer örnekler ile karşılaştırıldığında daha düşük özdirenç ve daha yüksek T_c^{offset} değeri gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1,75}\text{Na}_{0,25}\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1, 0.20$) seramik süperiletken örnekleri katı hal tepkime yöntemi ile üretilmiş ve deneysel çalışmaları tamamlanmıştır. Bu işlemler sunulan çalışmamızın birinci aşamasıdır. İkinci aşamasında ise deneysel sonuçlardan elde edilen süperiletkenlik geçiş sıcaklığı değerleri ve oda sıcaklığındaki özdirenç değerlerinin katkı miktarına bağlı olarak değişimini belirleyen matematiksel bir formül sunulmuştur.

4. $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1,75}\text{Na}_{0,25}\text{O}_y$ Süperiletken Sisteminin Elektriksel Özelliklerinin Matematiksel Formülasyonlarının Belirlenmesi

Çalışmanın üçüncü bölümünde sunulan deneysel verilerden elde edilen bulgular ışığında süperiletkenlik özelliklerin geliştirilebildiği anlaşılmaktadır. Bu özelliklerin deneysel çalışmalardan bağımsız olarak belirlenmesine olanak sağlanması için deneysel verilerden yararlanılarak matematiksel formülasyonlar geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. İyi bilindiği gibi, bir malzemenin süperiletkenlik performansı araştırılırken malzemenin T_c^{onset} ve T_c^{offset} değerleri önemli bilgiler

sunmaktadır. Tablo 1’de farklı oranlarda nano boyutta kalay katkıli Bi-2212 süperiletkenlerin malzemelerine ait T_c^{onset} ve T_c^{offset} değerleri verilmiştir. Bu değerler Matlab ortamında eğri uydurma aracı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizde katkılama-sıcaklık verilerinin belirli bir periyotta seyrettiği gözlenmiştir. Böylece, Tablo 1 verilerinden elde edilen T_c^{onset} ve T_c^{offset} parametrelerinin katkılama miktarına bağlı matematiksel formülasyonlar sırasıyla (1) ve (2)’de verilmiştir.

$$T_{c,onset} = 97.09 - 7.847 \cos(11.13x) - 11.75 \sin(11.13x) \quad (1)$$

$$T_{c,offset} = 45.97 + 15.43 \cos(28.82x) + 18.49 \sin(28.82x) \quad (2)$$

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirdiğimiz matematiksel formülasyonlar ile $Bi_2Sr_{2-x}Sn_xCa_1Cu_{1.75}Na_{0.25}O_y$ süperiletken sistemi için nano boyutta katkılama oranına bağlı olarak T_c^{onset} ve T_c^{offset} değerleri başarılı bir şekilde teoriksel olarak tespit edilebilmektedir. Denklemlerden elde edilen veriler ile deneysel olarak önceden elde edilmiş veriler Tablo 3’de sunulmuştur.

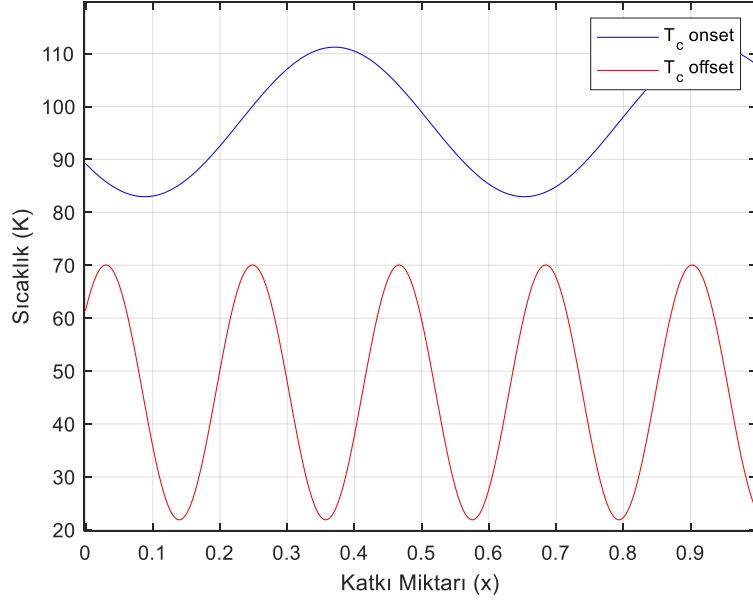
Tablo 3. A, B, C ve D Örneklerine ait süperiletken geçiş sıcaklığı değerlerinin matematiksel formülasyon sonuçları ile karşılaştırılması

Örnekler	Deneysel Veriler			Matematiksel Formülasyon Verileri		
	T_c^{onset} (K)	T_c^{offset} (K)	ΔT_c (K)	T_c^{onset} (K)	T_c^{offset} (K)	ΔT_c (K)
A	89,08	61,4	27,68	89,24	61,4	27,84
B	84,6	66,3	18,3	84,22	66,3	17,92
C	82,8	35,8	47	83,08	35,8	47,28
D	92,6	50,2	42,4	92,55	50,19	42,36

Tablo 3’de elde edilen bulgulardan görüldüğü gibi matematiksel formüllerden elde edilen süperiletken geçiş sıcaklık verileri deneysel veriler ile başarılı bir şekilde örtüşmektedir. Diğer taraftan gerçekleştirdiğimiz matematiksel formül yaklaşımları ile deneysel çalışmalarda üretimi yapılmamış $x=0.25, 0.7, 0.9$ ve 1.0 nano boyutta katkı değerleri için süperiletken geçiş sıcaklık verileri ise (1) ve (2) denklemleri kullanılarak Tablo 4’deki gibi tespit edilmiştir.

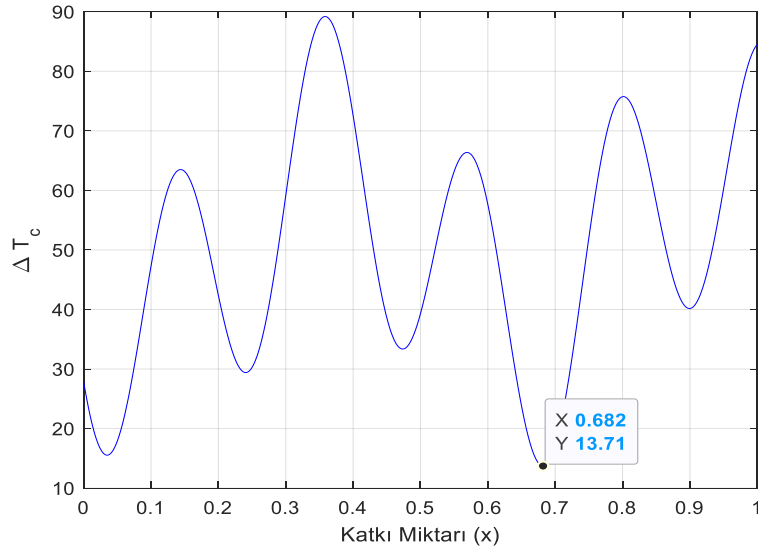
Tablo 4. Teoriksel olarak elde edilen katkı oranlarında süperiletken geçiş sıcaklığı değerleri

Katkı Miktarı	Matematiksel Formülasyon Verileri		
	T_c^{onset} (K)	T_c^{offset} (K)	ΔT_c (K)
0.25	100,30	70,03	30,27
0.70	84,87	67,66	17,21
0.90	110,16	69,99	40,17
1.00	107,68	23,18	84,5



Şekil 3. Farklı katkı oranlarında T_c^{onset} ve T_c^{offset} sıcaklık eğrileri

Süperiletken geçiş sıcaklıkları olan T_c^{onset} ve T_c^{offset} parametrelerinin katkı miktarı (x)'na bağlı eğrileri (1) ve (2) denklemleri kullanılarak Şekil 3'de çizdirilmiştir. Şekil 3'ten yararlanarak hangi katkı miktarında hangi geçiş sıcaklıkları meydana geldiği elde edilebilmektedir. Deneysel çalışmada $x = 0.0, 0.05, 0.1$ ve 0.2 miktarları için nano boyutta stronsiyum katkılması yapılmıştır. Elde edilen yaklaşık formül ile farklı katkı miktarları için sıcaklık geçiş verileri izlenebilmektedir. Bu amaçla, Şekil 3'te katkı miktarının $[0-1]$ aralığındaki değişimine karşı sıcaklık geçiş değerleri incelenmiştir. Bu grafik sayesinde yüksek değerde süperiletkenlik geçiş sıcaklığına sahip örneğin katkı miktarlarını belirlemek mümkün olabilecektir. Bu sayede yüksek katkı miktarları yerine daha düşük katkı seviyelerinde de daha başarılı noktalar tespit edilebilir.



Şekil 4. Katkı miktarına göre ΔT_c değeri değişim eğrisi

Denklem (1) ve (2) kullanılarak [0,1] aralığındaki katkı miktarına göre hesaplanan T_c^{onset} ve T_c^{offset} sıcaklık değerleri arasındaki fark olan ΔT_c verilerinin katkı miktarına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Literatürden iyi bilindiği gibi ΔT_c değeri süperiletken malzemenin iyi bir faz oluşumuna sahip olduğunun göstergesidir (Dogruer ve ark., 2022; Abbas ve ark., 2022). Bu nedenle ΔT_c değerini de yorumlamak son derece önemlidir. Tablo 1'de (Aytekin ve Özkurt, 2019)'un deneysel çalışmalarında $\Delta T_c = 18.3$ K değeri ile B örneğinin ($x = 0.05$) diğer örneklere göre daha iyi faz yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışma sonucunda katkı miktarına bağlı elde edilen ve Şekil 4'te verilen eğri ile minimum ΔT_c değerine karşılık gelen optimum katkılama miktarlarının belirlenmesi mümkün olabilir. Grafik üzerinde görüldüğü gibi $x = 0.682$ değerinde katılama ile $\Delta T_c = 13.71$ K olarak en düşük seviyesindedir. Bu çalışma kapsamında elde ettiğimiz formülden çalışılan süperiletken yapı için $x = 0.682$ katkılama oranında optimum süperiletkenlik oluşturabildiği görülmektedir. Diğer taraftan, bu katkı değeri dışında grafik üzerinde kalan diğer minimum seviyelerde denenebilir. Bu sayede rastgele katkı miktarı denemekten kaçınılarak malzeme üretimi ve karakterizasyonu için hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilebilir.

Diğer bir matematiksel formülasyon ile katkı miktarına bağlı olarak 150 K sıcaklıkta malzemelerimizin öz direnç değerleri teoriksel olarak belirlenmiştir. Bu formülasyon ile deneysel olarak hesaplanmış farklı oranlarda nano boyutta kalay katkısı içeren A, B, C ve D örneklerinin eğimleri (3) denklemi kullanılarak, (4)'te görüldüğü gibi hesaplandı. Denklem (3)'te ifade edilen 150K'daki deneysel olarak elde edilmiş öz direnç (ρ) değerleri Tablo 3'ten alınmıştır (Aytekin ve Özkurt, 2019). Bu veriler ışığında hesaplanan eğim değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

$$m = \frac{\rho}{\Delta T_c} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} m_A &= \frac{4.1 \times 10^{-3}}{27.68} = 0.1481 \times 10^{-3} \\ m_B &= \frac{1.75 \times 10^{-3}}{18.3} = 0.0956 \times 10^{-3} \\ m_C &= \frac{9.8 \times 10^{-3}}{47} = 0.2085 \times 10^{-3} \\ m_D &= \frac{5.69 \times 10^{-3}}{42.4} = 0.1342 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (4)$$

Tablo 5. A, B, C ve D Örneklerine ait eğim değerleri

Örnek	m (Eğim)
A Örneği (0,00)	0,1481 x 10 ⁻³
B Örneği (0,05)	0,0956 x 10 ⁻³
C Örneği (0,10)	0,2085 x 10 ⁻³
D Örneği (0,20)	0,1342 x 10 ⁻³

Katkı-eğim eğrisinin matematiksel fonksiyonu Matlab ortamında eğri uydurma aracıyla (5) elde edilmiştir. Denklem (5)'te verilen model kullanılarak katkı miktarına göre özdirenç-sıcaklık eğrisinin eğimi hesaplanabilmektedir. Süperiletken geçiş sıcaklıkları olan T_c^{onset} ve T_c^{offset} değerleri de sırasıyla denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Böylece T_c^{onset} sıcaklık değerindeki özdirenci denklem (6) gibi hesaplayabiliriz. Burada ρ özdirenci belirtmektedir.

$$m = [0.1748 - 0.02666 \cos(32.31x) - 0.08043 \sin(32.31x)] 10^{-3} \quad (5)$$

$$\rho = m \Delta T_c \quad (6)$$

Örnek olarak $x = 0.682$ katkı için T_c^{onset} sıcaklık değerine karşılık gelen özdirenci hesaplayalım; Bu katkı değeri için T_c^{onset} , T_c^{offset} , ΔT_c ve m değerleri (7) denkleminde görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} T_{c,onset} &= 83.6053^\circ K \\ T_{c,offset} &= 69.8575^\circ K \\ \Delta T_c &= 13.7478^\circ K \\ m &= 0.2050 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (7)$$

Denklem (6) kullanılarak $x = 0.682$ katkı değeri için özdirenç (8) gibi bulunur.

$$\rho = m \Delta T_c = 0.2050 \times 10^{-3} \times 13.7478 = 2.8182 \text{ mohm.cm} \quad (8)$$

Seçilen katkı miktarı $x = 0.682$ için süperiletken geçiş sıcaklıklarının farkı $13.7478^\circ K$ gibi oldukça iyi bir değerdir. Bu katkılama sonucunda özdirenç 2.8182 mohm.cm olarak hesaplanmıştır. Bu değer süperiletken bir malzeme için kabul edilebilir olarak düşünülmektedir.

5. Sonuç

$\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1, 0.20$) seramik süperiletken örnekleri katı hal tepkime yöntemi ile üretilmiş ve X-ışını kırınım ölçümleri ve özdirenç sıcaklık (ρ -T) ölçümleri ile deneysel olarak karakterize edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgularda $x = 0.05$ oranında nano boyutta kalay içeren B örneği yüksek oranda Bi-2212 yüksek sıcaklık süperiletken faz yapısına sahip olması ve 66.3 K T_c^{offset} değerine sahip olması ile en iyi süperiletkenlik özellikleri sergilemiştir. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmadan elde edilen süperiletkenlik sıcaklık geçiş verileri (T_c^{onset} , T_c^{offset} ve ΔT_c) ve sıcaklık-özdirenç eğrilerinin eğimlerinin matematiksel formülasyonları çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında farklı oranda nano boyutta kalay katkılı malzemelerin süperiletkenlik geçiş sıcaklığı değerleri (T_c^{onset} ve T_c^{offset}) ve sıcaklık-özdirenç eğrilerinin eğimlerinin denklemleri elde edildi. Elde edilen yaklaşık formüller ile farklı katkılama miktarlarında T_c^{onset} , T_c^{offset} , ΔT_c değerleri

ve T_c^{onset} sıcaklık değerine karşılık gelen öz direnç değerleri oldukça başarılı bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgularda $x = 0.682$ katkı değeri daha yüksek süperiletkenlik geçiş sıcaklık değerlerini öngörmekte ve $\rho = 0.1966$ mohm.cm öz direnç değeri ile oldukça iyi performansla sahip süperiletkenlik özelliklerini temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında araştırmacılar elde edilen formüller ile $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ sisteminde farklı katkı miktarlarında süperiletkenlik davranışlarını öngörebilecektir. Böylece daha iyi süperiletkenlik davranış için optimum değerde katkı miktarının belirlenmesi mümkün olmaktadır. Sonuç olarak katkı miktarının tespit edilebilmesi laboratuvarında gereksiz zaman ve iş gücü kayıplarını en aza indirilebilecektir. Ayrıca katkı malzemesinin daha az miktarlarda kullanılması sağlanabilecektir. Gelecek çalışmalarda daha fazla deneysel veri toplandığında daha doğru tahminlerin elde edilebileceği modeller geliştirilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Tüm yazarlar makaleye eşit oranda katkıda bulunmuştur.

Kaynakça

- Abbas S., Basma H., Awad R., Matar M. Tailoring the physical properties of (Bi, Pb)-2212 superconductor by the addition of $\text{Cd}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{O}$ nanoparticles. *Journal of Low Temperature Physics* 2022; 208(3): 271-288.
- Akça G., Ekicibil A., Kiymaç K. Influence of lithium-holmium co-doped on structural and electrical properties of BSCCO superconductor. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 2013; 15(3-4): 229-234.
- Akkurt B., Erdem U., Zalaoglu Y., Ulgen AT., Turgay T., Yildirim G. Evaluation of crystallographic and electrical-superconducting features of Bi-2223 advanced ceramics with vanadium addition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2021; 32(4): 5035-5049.
- Aytekin ME., Özkurt B. The influence of nano-sized SnO_2 doping on physical and magnetic properties of the $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}(\text{SnO}_2)_x\text{Ca}_1\text{Cu}_{1.75}\text{Na}_{0.25}\text{O}_y$ superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2020; 33: 965-970.
- Baqiah H., Halim SA., Adam MI., Chen SK., Ravandi SSH., Faisal MAM., Hanif M. The effect of magnetic nanoparticle addition on the superconducting properties $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ superconductors. *Solid State Science and Technology* 2009; 17(1): 81-88.
- Bilgili O., Selamet Y., Kocabaş K. Effects of Li substitution in Bi-2223 superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2008; 21: 439-449.

- Cavdar S., Deniz E., Koralay H., Ozturk O., Erdem M., Gunen A. The effect of PbSe addition on the mechanical properties of Bi-2212 superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2012; 25(7): 2297-2307.
- Chen W., Zhou, Q., Wan F., Gao, T. Gas sensing properties and mechanism of nano-SnO₂-based sensor for hydrogen and carbon monoxide. *Journal of Nanomaterials* 2012; 1-1.
- Dogruer M., Yildirim G., Terzioğlu C. Effect of Nd/Sr partial replacement on characteristic Bi-2223 phase and related fundamental superconducting parameters. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2022; 1-11.
- Fallah-Arani H., Baghshahi S., Sedghi A., Riahi-Noori N. Enhancement in the performance of BSCCO (Bi-2223) superconductor with functionalized TiO₂ nanorod additive. *Ceramics International* 2019; 45(17): 21878-21886.
- Ghattas A., Annabi M. Zouaoui M., Azzouz FB., Salem MB. Flux pinning by Al-based nano particles embedded in polycrystalline (Bi,Pb)-2223 superconductors. *Physica C: Superconductivity and its applications* 2008; 468(1): 31-38.
- Jannah AN., Abd-Shukur R., Abdullah H. Effect of Co₃O₄ nanoparticles addition on (Bi, Pb)-2223 superconductor. *International Scholarly and Scientific Research Innovation* 2013; 7(3): 299-302.
- Khalil SM. Enhancement of superconducting and mechanical properties in BSCCO with Pb additions. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 2001; 62(3): 457-466.
- Oboudi SF., Mustafa MQ. Synthesis and characterization of Ag nanoparticles addition on BPSCCO superconducting thin films. *Advances in Nanoparticles* 2016; 5(1): 75-82.
- Öner B., Özkurt P., Madre MA., Özkurt B., Sotelo A. Enhanced superconducting properties in Bi₂Sr₂Ca₁Cu_{1.75}Na_{0.25}O_y ceramics prepared by hot-pressing under different pressures and temperatures. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2022; 1-8.
- Özçelik B., Ergin I., Madre MA., Sotelo A. Effect of rubidium substitution on the physical and superconducting properties of textured high-T_c BSCCO samples. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2020; 33: 1285-1292.
- Özkurt B. Effect of annealing conditions on the superconducting properties of nano-sized metallic Au-added Bi_{1.8}Sr₂Au_{0.2}Ca_{1.1}Cu_{2.1}O_y (Bi-2212) ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2020; 31(14): 11448-11456.
- Özkurt B. Enhancement in superconducting transition temperature and J_c values in Na-doped Bi₂Sr₂Ca₁Cu_{2-x}Na_xO_y superconductors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2013; 24: 2426-2431.
- Öztornacı U., Özkurt B. The effect of nano-sized metallic Au addition on structural and magnetic properties Of Bi_{1.8}Sr₂Au_xCa_{1.1}Cu_{2.1}O_y (Bi-2212) ceramics. *Ceramics International*. 2017; 43(5): 4545-4550.

- Reichl LE. Signatures of electron entanglement in a NSNSN BSCCO nanowire. *Physica B: Condensed Matter* 2022; 628: 413598.
- Sakhno OV., Goldenberg LM., Stumpe J., Smirnova TN. Surface modified ZrO₂ and TiO₂ nanoparticles embedded in organic photopolymers for highly effective and UV-stable volume holograms. *Nanotechnology* 2007; 18(10): 105704.
- Shalaby MS., Hamed MH., Yousif NM., Hashem HM. The impact of the addition of Bi₂Te₃ nanoparticles on the structural and the magnetic properties of the Bi-2223 high-Tc superconductor. *Ceramics International* 2021; 47(18): 25236-25248.
- Siregar DRD., Yudianto SD., Chandra SA., Lubis EFR., Humaidi S., Darsono N. Improvement of the superconducting properties of carbon addition on Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} prepared through the two-step sintering process. *Journal of Metals, Materials and Minerals* 2021; 31(4): 76-81.
- Sotelo A., Madre MA., Rasekh S., Diez JC., Angurel LA. Floating zone Ag doped (Bi_{1.6}Pb_{0.4})Sr₂CaCu₂O_{8+δ} textured rods. *Advances in Applied Ceramics* 2009; 108(5): 285-289.
- Sözeri H., Ghazanfari N., Özkan H., Kilic A. Enhancement in the high-Tc phase of BSCCO superconductors by Nb addition. *Superconductor Science and Technology* 2007; 20(6): 522.
- Statra Y., Fawaz S., Menana H., Douine B. Experimental electromagnetic characterization of high temperature superconductors coils located in proximity to electromagnetically active materials. *Fluid Dynamic and Material Process* 2022; 18(5): 1529-1537.
- Taghipour J., Abbasi H., Sedghi H. The effect of Sb substitution on properties of Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr_{2-x}Sb_xCa₂Cu₃O_y superconductors. *Physica B: Condensed Matter* 2010; 405(5): 1349-1352.
- Tran DH., Pham AT., Le TM., Anh DT., Phan YT., Man NK., Kang, WN. Enhanced flux pinning properties in Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr_{2-x}K_xCa₂Cu₃O_{10+δ} compounds. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2019; 30(9): 8233-8238.
- Yavuz Ş., Bilgili Ö., Kocabaş K. Effects of superconducting parameters of SnO₂ nanoparticles addition on (Bi, Pb)-2223 phase. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2016; 27(5): 4526-4533.
- Yildirim G., Bal S., Yucel E., Dogruer M., Akdogan M., Varilci A., Terzioğlu C. Effect of Mn addition on structural and superconducting properties of (Bi, Pb)-2223 superconducting ceramics. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2012; 25(2): 381-390.