

Stronsiyum Sitelere Farklı Oranda Nano Boyutta Zn Katkılı Bi-2212 Süperiletkenlerin Diamanyetik Özelliklerinde Gelişim

Mehmet Ersin AYTEKİN^{1*}

¹Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 33100, Mersin

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

*Sorumlu yazar: mehmetaytekin@tarsus.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 26.08.2025

Kabul tarihi: 19.10.2025

Online Yayınlanma: 16.03.2026

Anahtar Kelimeler:

Bi₂Sr_{2-x}Zn_xCa₁Cu₂O_y

Zn nanoparçacıkları

M-H

Jc

ÖZ

Sunulan çalışmada, Bi-2212 süperiletken seramiklerde stronsiyum bölgelere nano boyutta Zn (<100 nm) katkısının etkisi araştırılmıştır. Bi₂Sr_{2-x}Zn_xCa₁Cu₂O_y (x = 0,00; 0,0125; 0,0250; 0,050; 0,075 ve 0,1) başlangıç kompozisyonunda seramik süperiletken örnekler katı hal tepkime yöntemi ile üretildi. Bi-2212 süperiletkenlere nano boyutta Zn parçacıklarının stronsiyum sitelere katkısı daha önce denenmemiş özgün çalışmadır. X-ışını ile gerçekleştirilen faz analizlerinde, ikincil fazların oluşumuna rağmen tüm örneklerde Bi-2212 süperiletken fazının temel faz olduğu tespit edildi. Morfolojik yapı analizlerinde tüm örneklerde Bi-2212 süperiletken fazının karakteristik özelliği olan plaka benzeri tanelerin varlığı gözlemlendi. Stronsiyum sitelere nano boyutta Zn parçacıklarının katkılanması ile tane davranışlarında farklılaşmalar tespit edildi. Diğer örnekler ile karşılaştırıldığında, x = 0,1 oranında nano boyutta Zn içeren örnek daha geniş ebatta plaka benzeri tanelerden oluşmaktadır. Seramik örneklerin özdirenç sıcaklık ölçümleri sonucunda, tüm örneklerde onset sıcaklığı üzerinde metalik davranış gözlemlendi. Diğer örnekler ile karşılaştırıldığında geniş ebatta tanelerin oluşumu ve süperiletken fazların gelişimi ile x = 0,1 oranında Zn katkısı içeren örnek en yüksek süperiletkenlik geçiş sıcaklığına sahiptir. Manyetizasyon ölçümü sonuçlarında, tüm örneklerde Bi-2212 süperiletken malzemelerin karakteristik davranışı olan kapalı döngü histerezis davranışı gözlemlendi. Diamanyetik özelliklerin geliştiğinin göstergesi olarak en geniş histerezis alanı x = 0,1 katkılı örnekte gözlemlendi. Süperiletken örneklerin akım yoğunluğu (Jc) değerleri Bean's kritik akım yoğunluğu modelinden teoriksel olarak hesaplanmıştır. x = 0,1 oranında nano boyutta Zn içeren örnekte, morfolojik yapıda ve akı çivileme performanslarının gelişmesi sonucu 65,55 X 10⁵ A/cm² Jc değeri elde edildi.

Development of Diamagnetic Properties of Bi-2212 Superconductors with Different Amounts of Nano-Sized Zn Substituted in Strontium Sites

Research Article

Article History:

Received: 26.08.2025

Accepted: 19.10.2025

Published online: 16.03.2026

Keywords:

Bi₂Sr_{2-x}Zn_xCa₁Cu₂O_y

Zn nanoparticles

M-H

Jc

ABSTRACT

This study investigated the effect of substituting nano-sized zinc (Zn) (<100 nm) for strontium in Bi-2212 superconducting ceramics. Ceramic superconductor samples with initial compositions of Bi₂Sr_{2-x}Zn_xCa₁Cu₂O_y (x = 0,00; 0,0125; 0,0250; 0,050; 0,075 and 0,1) were produced using the solid-state reaction method. Substituting nano-sized zinc particles for strontium sites in Bi-2212 superconductors is a novel research study that has never been attempted before. Despite the occurrence of secondary phases, X-ray phase studies revealed that the Bi-2212 superconducting phase was the main phase in all samples. All of the samples had plate-like grains, which are a defining characteristic of the Bi-2212 superconductor structure, according to the

morphological structure analyses. Differences in grain behavior were detected with the substituting of Zn nanoparticles. The sample with nano-sized Zn at $x = 0,1$ has more larger, plate-like grains in comparison with the other samples. As a result of resistivity temperature measurements of ceramic samples, it was observed that all samples exhibited metallic behavior above the onset temperature. Compared to other samples, the sample containing Zn substituting at $x = 0.1$ has the highest superconductivity transition temperature due to the formation of large-sized grains and the development of superconducting phases. All samples exhibited closed-loop hysteresis behavior, which is a feature of Bi-2212 superconductor materials, according to the magnetization measurements. The highest hysteresis field occurred in the sample with $x = 0,1$ substitution, suggesting the development of diamagnetic characteristics. Bean's critical current density model was applied to theoretically calculate the current density (J_c) values of the superconducting samples. In the sample containing nano-sized Zn at $x = 0,1$, a J_c value of 65.55×10^5 A/cm² was obtained as a result of the improvement in morphological structure and flux pinning performance.

To Cite: Aytekin ME. Stronsiyum Sitelere Farklı Oranda Nano Boyutta Zn Katkılı Bi-2212 Süperiletkenlerin Diamanyetik Özelliklerinde Gelişim. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(2): 836-856.

1. Giriş

Süperiletken malzemeler sıfır direnç ve kuvvetli diamanyetik gibi eşsiz özelliklere sahip olması ile endüstriyel ve teknolojik uygulamalar için umut verici malzemelerdir. Süperiletken malzemeler metal bazlı sistem, bakır oksitler (kupratlar) ve demir bazlı süperiletkenler olarak üç gruba ayrılabilir (Hosono ve ark., 2018; Nurbaisyatul ve ark., 2021). Kuprat süperiletkenler içerisinde bizmut tabanlı yüksek sıcaklık süperiletken aileler yüksek termodinamik kararlılık, insan sağlığına zararlı öncü malzeme içermemesi, sentezlenme prosesinin kolay olması ve sıvı nitrojen sıcaklıklarında süperiletkenlik geçiş sıcaklığının (T_c) olması gibi avantajlara sahiptir (Sotelo ve ark., 2014; Aytekin, 2024). Süperiletken aileler arasında Bi tabanlı yüksek sıcaklık süperiletken malzemeler $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+y}$ genel formülüne sahiptir ve formüldeki bakır oksit tabakaların sayısını ifade eden n değerine göre üç farklı faz ($n = 1$ için Bi-2201 fazı; $n = 2$ için Bi-2212 fazı ve $n = 3$ için Bi-2223 fazı) meydana gelir (Özçelik ve ark., 2015; Yang ve ark., 2023). Yaklaşık olarak 85 K süperiletkenlik geçiş sıcaklığı (T_c) ile Bi-2212 yüksek sıcaklık süperiletken fazı diğer fazlar ile karşılaştırıldığında yüksek faz kararlılığı ve kolay sentezlenmesi gibi avantajlara sahiptir (Yıldırım ve ark., 2012; Sedky ve Al-Battal, 2013). Bi-2212 süperiletken malzemeler nükleer manyetik rezonans (NMR) (Larbalestier ve ark., 2014; Hao ve ark., 2024), hızlandırıcı mıknatıslar (Shen ve ark., 2022; Rochester ve ark., 2022), nükleer füzyon cihazları (Yang ve ark., 2021; Zhang ve ark., 2022) ve enerji depolama cihazları (Zhang ve ark., 2024) gibi yüksek alan uygulamaları için tercih edilen bir malzemedir. Ancak, hem elektrik iletiminde hem de manyetik alan uygulamalarında gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını tam olarak karşılayabilmek için J_c kapasitelerinin daha da iyileştirilmesi gerekmektedir. Diğer bir taraftan, 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 sınırlandıran faktörlerdir.

Bi tabanlı süperiletken malzemelere yapılan katkılama işlemleri, temel kristal yapının kalitesi, yüzey morfolojisi ve geçiş sıcaklığı gibi karakteristik özellikler üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Kurtul ve ark., 2025). Literatürden iyi bilindiği gibi, sistem içerisine farklı iyonik yarıçapa sahip element katkılanması veya eklenmesi taşıyıcı konsantrasyonunda değişikliklere sebep olarak T_c değerlerini geliştirebilir (Awad ve ark., 2012; Aytekin ve Akyol, 2024). Dahası nano boyutta parçacıklar, yapı içerisine girdiklerinde hem taneler arasına yerleşerek taneler arası bağlantıları geliştirir hem de akı çivileme merkezi gibi davranarak kritik akım yoğunluğu (J_c) performansı arttırabilir (Pham ve ark., 2024; Saghafi ve ark., 2024).

Agail ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ süperiletken sistemine %0,02 nano boyutlu kalay eklendiğinde numunedeki kritik akım yoğunluğu değerinde önemli artışlar olduğu bildirilmiştir (Agail ve Abd-Shukor, 2014). Azman ve arkadaşları tarafından 30 nm ve 0,002 oranında Co nanoparçacıkları içeren seramik süperiletken örnekte morfolojik yapıda ve akı çivileme performanslarında meydana gelen gelişmeler ile J_c değerinde önemli gelişmeler elde edilmiştir (Azman ve ark., 2014).

100 nm boyutlara sahip Zn parçacıkları Bi-2212 sisteminde 0,0125; 0,0250; 0,050; 0,075 ve 0,1 katkı oranları ile stronsiyum bölgelerine katkılanmamıştır. Bu bölgeye yapılacak nano boyutta Zn parçacıkları akı çivileme merkezi gibi davranarak J_c üzerinde önemli faydalar sağlayabilir. Bunun yanında, Zn nano parçacıkları taneler arası boşluklara yerleşip morfolojik yapıyı geliştirerek J_c değerinin artmasına katkıda bulunabilir. Sunulan çalışmada ise $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ başlangıç kompozisyonuna sahip seramik süperiletkenlerde stronsiyum tabakalara farklı oranlarda ($x = 0,0125; 0,0250; 0,050; 0,075$ ve $0,1$) nano boyutta Zn katkısı yapılmıştır. Katı hal tepkime yöntemi ile üretilen seramik örneklerde nano boyutta Zn katkısının faz oluşumu, morfolojik yapısı, elektriksel ve manyetik özellikler üzerine etkisi sırasıyla XRD, SEM, R-T ve M-H ölçümleri ile gerçekleştirildi.

2. Materyal ve Metot

$\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ ($x = 0,00; 0,0125; 0,0250; 0,050; 0,075$ ve $0,1$) yapısında seramik örnekler katı hal tepkime yöntemi ile üretilmiştir. İlk olarak $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ stokiyometrik oranını sağlamak için yüksek saflığa sahip Bi_2O_3 (Thermo, 99 %), SrCO_3 (Thermo, 99 %), CaCO_3 (Thermo, 99 %), CuO (Thermo, 99 %), NaCO_3 (Thermo, 99 %) ve ZnO (Thermo, 98.5+%) öncü tozları uygun oranda tartıldı. Yüksek saflıkta öncü tozların karışımında homojenliği sağlamak için agat havanda elde öğütüldü. Öğütme işleminden sonra, homojen tozlar üzerine 375 MPa basınç altında pres uygulanarak 2,9 cm çapında pelet haline getirildi. Pelet haline gelen örneklere 720°C ısıtma işlemi 12 saat boyunca uygulanarak ilk kalsinasyon işlemi gerçekleştirildi. Kalsinasyon işleminden sonra pelet halinde örnekler agat havanda öğütüldü ve 375 MPa basınç altında preslendi. Daha sonra, Bi-2212 yüksek sıcaklık fazlarının oluşumunu başlatmak için 820°C ısıtma işlemi 12 saat boyunca uygulandı. Öğütme, presleme ve kalsinasyon işlemlerini içeren bu süreç iki kez daha tekrarlandı. BSCCO süperiletken sisteminde Bi-2212

süperiletken fazının oluşumunun tamamlanması ve safsızlık fazlarının minimum seviyeye indirilebilmesi için malzemenin uzun süreçler boyunca sinterlenmesi gerekmektedir. Öğütme ve 375 MPa basınç altında presleme işleminden sonra örnekler 850°C 120 saat sinterleme işlemi uygulandı. Bu aşamadan sonra karakterizasyon işlemlerine geçildi.

Örnekler nano boyutta Zn katkı oranlarına göre A Örneği ($x = 0,00$), B Örneği ($x = 0,0125$), C Örneği ($x = 0,025$), D Örneği ($x = 0,5$), E Örneği ($x = 0,075$) ve F Örneği ($x = 0,1$) olarak isimlendirildi.

Kapalı devre bir He sisteminde yaklaşık 2 K'lık kriyojenik sıcaklıklara ulaşabilen bir Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi (PPMS) (5-150 K) kullanılarak özdirenç ve manyetik incelemeler gerçekleştirildi. Numunelerde bulunan fazları belirlemek için X-ışını toz kırınımı analizleri, $2\theta = 3^\circ - 60^\circ$ aralığında sabit tarama hızına ($2^\circ/\text{dak}$) sahip bir Rigaku MiniFlex X-ışını Difraktometresi kullanılarak gerçekleştirildi. Seramik numunelerin granüler yapısı, bir Quanta 650 Alan Emisyonu (SEM) kullanılarak incelendi.

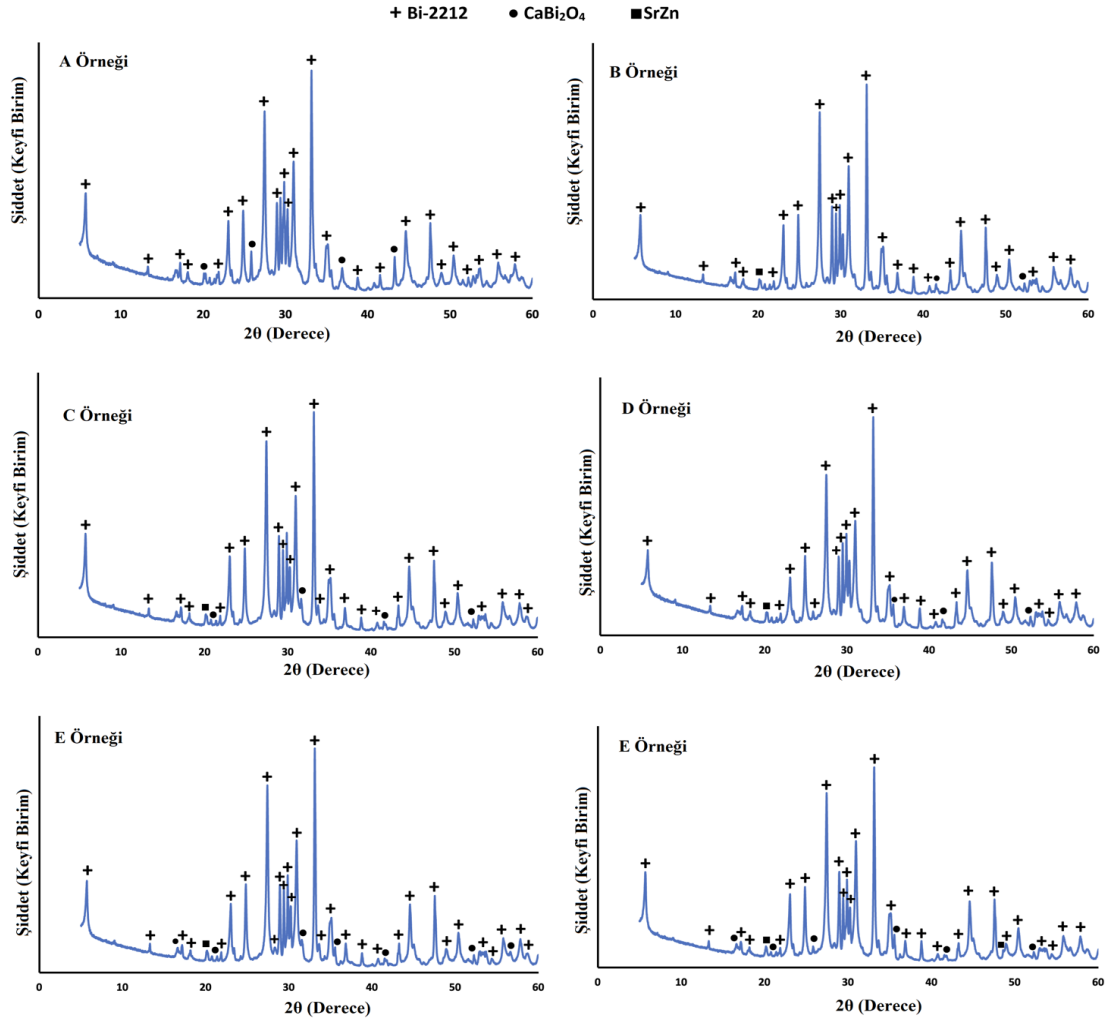
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. X-Işını Kırınım (XRD) Ölçümü Bulguları

Örneklerde oluşan fazların tespit edilmesi için X-ışını kırınım ölçümleri gerçekleştirildi. Farklı oranlarda nano boyutta Zn katkılı örnekler için X-ışını kırınım ölçümleri Şekil 1'de gösterilmektedir.

X-ışını kırınım ölçümü sonuçlarında, tüm örneklerde Bi-2212 (JCPDS NO: 98-006-7428) süperiletken fazı temel faz yapısı olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, ikincil faz yapısı olarak sırasıyla CaBi_2O_4 (JCPDS NO: 01-082-1982) ve SrZn (JCPDS NO: 98-065-2893) safsızlık fazları da oluşmaktadır.

Seramik süperiletken sistemlerde düşük oranda safsızlık fazı ve yüksek şiddette karakteristik pikler iyi bir kristalleşme sürecinin oluşumunu işaret edebilmektedir (Ozturk ve ark., 2013). Bunun yanında, süperiletken sistemi içerisinde nano parçacıkların varlığı ve belirli oranlarda safsızlık fazlarının oluşumu akı çivileme mekanizmalarını geliştirerek J_c performanslarını arttırabilmektedir (Shalaby ve ark., 2025). Yapı içerisinde Zn nano parçacığı içermeyen örnekte Bi-2212 süperiletken fazının optimum yoğunlukta ve şiddette sahip piklerin oluşumu görülmektedir. Farklı oranlarda nano boyutta Zn içeren örneklerde oluşan fazların pozisyon ve şiddetlerinde önemli değişimler gözlemlenirse de safsızlık fazların sayısında bir miktar değişim gözlemlendi. B örneğinde, $2\theta \approx 25,89^\circ; 37,00^\circ$ gibi noktalarda safsızlık fazı Bi-2212 süperiletken fazına dönüşmüştür. Diğer taraftan, B Örneği'nde $2\theta \approx 22,95^\circ; 24,88^\circ$ ve $27,26^\circ$ gibi noktalarda Bi-2212 yüksek sıcaklık fazların şiddetinde artış görüldü. Erdem ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Ho^{3+} katkılı Bi-2212 süperiletken sisteminde faz yapısında gelişmeler ile süperiletkenlik geçiş sıcaklığında artış elde edilmiştir (Erdem, 2021). Bunun yanında C örneğinin faz yapısında önemli değişimler gözlemlenirse de süperiletkenlik özelliklerinde zayıflamaya işaret edebilen pik şiddetlerinde azalma meydana gelmektedir. D örneğinde süperiletken fazlarda gelişimi işaret eden, $2\theta \approx 25,98^\circ$ noktasında düşük şiddetli de olsa Bi-2212 faz oluşumu gözlemlenmektedir. Ancak D örneğinde, süperiletken fazların şiddet olarak A ve B örnekleri ile karşılaştırıldığında düşük seviyede kalmaktadır.



Şekil 1. X-Işını (XRD) ölçümü sonuçları

Yakıncı ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, nikel katkılı Bi-2212 süperiletken sisteminde, artan katkılama ile yüksek sıcaklık süperiletken faz yoğunluğunda ve pik şiddetlerinde azalma meydana gelmesi sonucu süperiletkenlik özelliklerinin kötüleştiği bildirilmiştir (Yakıncı ve ark., 2013). Çördük ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Bi-2223 seramik süperiletken malzemelerde magnezyum oksit eklemesi ile faz yapısının bozulması ve süperiletken taneler arasında çok fazla tane sınırlarının meydana gelmesi sonucu süperiletkenlik geçiş sıcaklığı azalmıştır (Çördük ve ark., 2017). E örneğinde faz yapısında önemli değişimler gözlemlenmese de Bi-2212 fazının $2\theta \approx 27,52^\circ$ ve $33,00^\circ$ gibi karakteristik noktalarında faz şiddetlerinde artış gözlemlenmiştir. F örneğinde karakteristik piklerin şiddetlerinde artış eğilimi devam etmektedir. X-ışını kırınım desenlerinde faz şiddetlerinin değişmesi literatürde olduğu gibi süperiletkenlik özelliklerin de değişimine işaret edebilir. Özellikle süperiletken fazlardan safsızlık fazlara dönüşüm ve pik şiddetlerinde azalma süperiletken geçiş sıcaklıkları üzerinde negatif etki gösterebilir. Bunun yanında, süperiletken malzemelerin faz yapısında elde edilen gelişmeler süperiletkenlik özelliklerinde iyileşmeler sağlayabilir.

Tablo 1. Seramik örneklerin kristal yapı parametreleri

Örnek	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Grain Size (nm)
A Örneği	3,820	3,820	31,197	31,086
B Örneği	3,815	3,815	30,626	37,575
C Örneği	3,810	3,810	30,351	35,749
D Örneği	3,802	3,802	30,351	33,818
E Örneği	3,832	3,832	31,341	35,649
F Örneği	3,815	3,815	30,630	34,961

Örneklerin kafes parametre değerleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Tablo 1’den görüldüğü gibi, seramik örnekler tetragonal kristal yapıya sahiptir. Literatürde Bi-2212 süperiletken sistemine uygun kafes parametre değerleri elde edilmektedir (Aytekin ve ark., 2015; Özkurt ve Aytekin, 2018). BSCCO sisteminde a örgü parametre değeri CuO₂ düzlemlerindeki Cu-O bağ uzunluğu ile ilişkilidir ve a örgü parametresindeki değişiklikler bakır oksit düzlemlerinin bağ uzunluğunu etkilemektedir. (Satyavathi ve ark., 1995). Ayrıca BSCCO süperiletken sistemlerinin kristal yapısında BiO₂ katmanları arasındaki zayıf bağlantı nedeniyle kafes parametresi c kolaylıkla değişebilmektedir. Bi-O düzlemlerindeki yükler arasındaki elektrostatik kuvvetlerdeki değişim, kafes parametresindeki değişiklikleri açıklamaktadır. Özellikle yapıya farklı atomik yarıçaplara sahip elementler katıldığında elektrostatik kuvvetlerdeki en ufak bir değişiklik Bi-O katman uzunluklarında değişikliklere neden olabilmektedir (Suhaimi ve ark., 2025). Diğer taraftan, Bizmut bazlı yüksek sıcaklık süperiletken sisteminde Bi-O katmanları arasındaki bağ uzunluğunun ölçüsü olan c örgü parametre değerindeki azalmalar oksijen stokiometrisi ile ilişkilidir. BSCCO sisteminde yüksek oranda elektron katkılanması oksijenin yüksek oranda girişine yol açabilir. Bu durumda pozitif yüklerin azalmasıyla Bi-O katmanları arasındaki itme kuvveti azalmaktadır. Böylece SrO-BiO-BiO-SrO sandviç yapısının küçülmesine ve kafes parametresi c'nin azalmasına neden olur. Tablo 1’de örgü parametrelerindeki değişim nano boyutta Zn parçacıkların katkı oranlarının değişmesi ile Bi-O katmanlar arasında bağ uzunlukların değişimi sonucu c örgü parametrelerinde farklılaşma elde edildi.

Debye-Scherrer denkleminde göre bir kristalin ortalama boyutu şu şekilde tanımlanır (Cullity ve Smoluchowski, 1957):
$$\frac{\kappa\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (1)$$

burada λ x-ışını dalga boyudur (CuK α =1,5406 Å), κ kristalit şekil faktörüdür (0,94), β gözlenen tepe açısı θ 'de yarı maksimumdaki tepe tam genişliğidir (radyan cinsinden). Debye-Scherrer denkleminde hesaplanan kristal ortalama boyutu Tablo 1’de sunulmuştur. A, B, C, D, E ve F örnekleri için Debye-Scherrer denklemi ile hesaplanan tane kalınlığı değerleri sırasıyla yaklaşık 31,086; 37,575; 35,749; 33,818; 35,649 ve 34,961 nm olarak hesaplandı. Seramik süperiletken malzemelerde J_c performanslarının korunması ya da daha yüksek değerlere ulaşabilmesi için akı çivileme merkezlerinin gelişmesi kadar plaka benzeri tanelerin ebatlarının artması ve düzgün dağılıma sahip tanelerin oluşumu da önemlidir. Özellikle nano boyutta parçacıklar taneler arasına yerleşerek taneler arası boşlukları azaltabilir ve taneler arası bağlantıları geliştirebilir. Debye-Scherrer denklemi hesaplamaları sonucunda $x = 0,0125$ oranında nano boyutta Zn parçacıkları içeren B örneğinde daha yüksek değer elde edilmiştir. Nano boyutta Zn katkısı ile granüler yapıda değişimler Debye-Scherrer denklemi yoluyla teoriksel

olarak belirlenmiştir. Ancak morfolojik yapıda tane davranışları görüntüleme hassasiyeti yüksek olan elektron mikroskobu ile belirlenebilir.

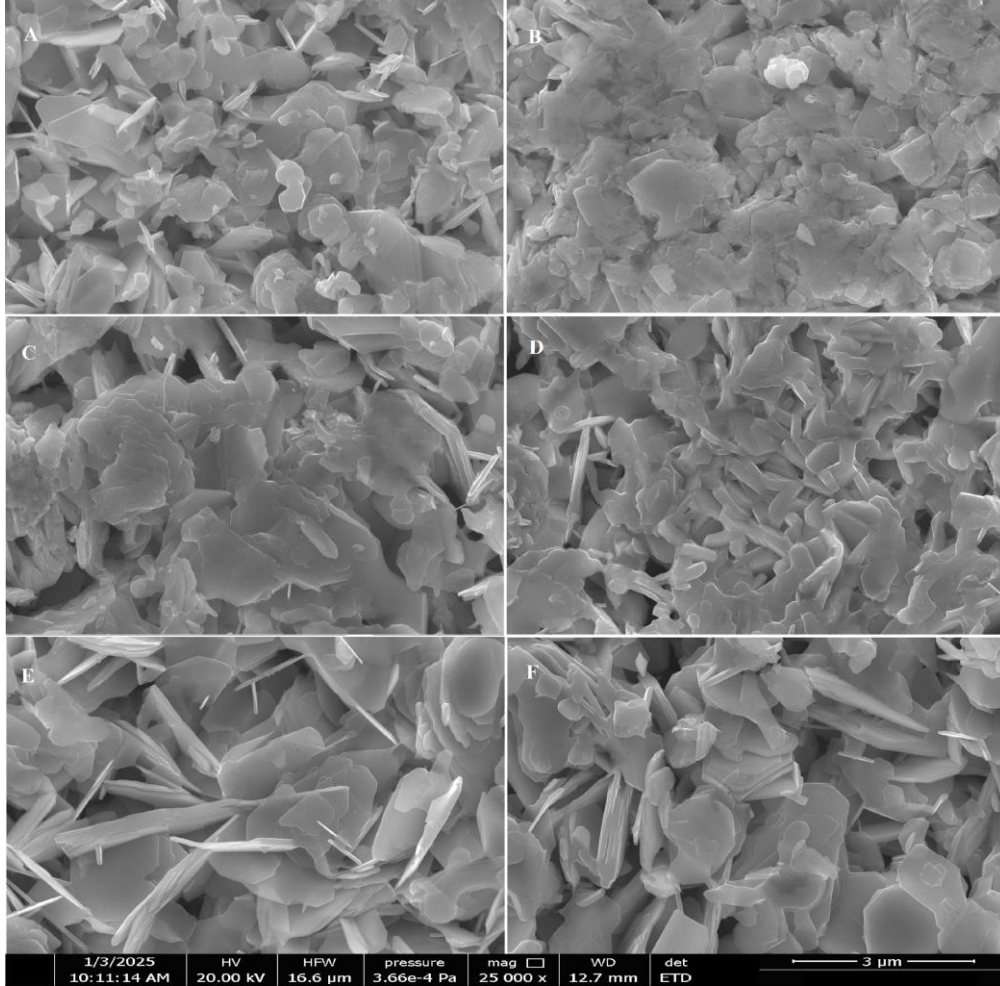
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümü Sonuçları

Örneklerin faz yapıları X-ışını kırınım ölçümlerinde belirlendi. Hem morfolojik yapı hem de faz yapısı taramalı elektron mikroskobu ile de analiz edilebilir. Morfolojik yapıda tanelerin şekil ve ebatları malzeme içerisinde fazların karakteristik dağılımı hakkında bilgiler sunabilmektedir. Örneklerde farklı oranlarda nano boyutta Zn katkısının tane oluşumları üzerine etkisini inceleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümü yapıldı. Örneklerin SEM ölçümü sonuçları Şekil 2’de gösterilmektedir.

Bi-2212 yüksek sıcaklık süperiletken fazının karakteristik tane davranışı olan plaka benzeri taneler tüm numunelerde gözlemlendi (Özkurt, 2015; Tran ve ark., 2025). Dahası tüm örneklerde katı hal tepkime yöntemi ile üretilen örneklerde gözlenebilen birbirlerinden tane sınırları ile ayrılmış rastgele yönelimli taneler oluşmuştu. Diğer taraftan, morfolojik yapı analizlerinde tanelerin kontrast durumu da süperiletken fazlar hakkında bilgi verebilir. Literatürden iyi bilindiği gibi, BSCCO seramik süperiletken malzemelerin yüzey morfolojisinde gri kontrast bölgelerinin oluşumu Bi-2212 süperiletken faz yapısını gösterirken, koyu gri bölgeler bizmut içermeyen safsızlık fazlarının oluşumunu göstermektedir (Mora ve ark., 2013; Leninkov ve ark., 2013). X-ışını kırınım ölçümleri ile uyumlu olarak tüm örneklerde, Bi-2212 süperiletken fazının morfolojik yapıda karakteristik davranışı olan gri kontrasta sahip plaka benzeri tane yapıları gözlemlenmiştir.

SEM ölçüm sonuçlarında, A örneğinde küçük ebatta taneler ve taneler arasında boşluklu yapılar meydana gelmektedir. $x = 0,0125$ oranında Zn parçacıkları içeren B örneğinde, bazı bölgelerde boşluklu yapının azaldığı gözlemlendi. Ancak B örneğinde rastgele yönelimli taneler ve yüksek sayıda tane sınırları oluşumu da gözlemlenebilmektedir. Özellikle yüksek tane sınırları elektriksel özellikleri negatif yönde etkileyebilmektedir. Cevizci ve arkadaşları çalışmalarında nano boyutta Sb_2O_3 'nin eklenmesinin taneler arası bağlantıyı iyileştirdiğini açıklamışlardır (Cevizci ve Kocabaş, 2023). Diğer taraftan, C örneğinde de geniş ebatlı taneler oluşsa da bazı bölgelerde taneler arasında boşluklar ve geniş açılar meydana gelmiştir. $x = 0,50$ oranında nano boyutta Zn içeren D örneğinde tane ebatlarında küçülmeler gözlemlendi. E örneğinde tane boyutlarında gelişmeler gözlemlenmesinin yanında taneler arasında boşluklar ve açılar meydana gelmiştir. Özkurt tarafından yapılan çalışmada Y_2O_3 katkısının artması morfolojik yapıda bozulmalara sebep olarak J_c değerinde azalma rapor edildi (Özkurt, 2013). F örneğinde geniş ebatta plaka benzeri tane oluşumları aralarında boşluklar oluşturacak şekilde meydana gelmektedir. Morfolojik yapıda geniş ebatta tanelerin arasında boşluklu yapıların oluşumu elektriksel özellikleri zayıflatacağı beklenilse de nano boyutta parçacıkların akı çivileme merkezi gibi davranması ile J_c değerlerini arttırabilir.

Örneklerde faz oluşumu ve morfolojik yapı analizlerinde Bi-2212 fazının genel davranışları belirlenmiştir. Ancak öz direnç-sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilerek faz yapısının ve morfolojik yapının süperiletkenlik karakteristiği üzerine etkileri belirlenebilir.



Şekil 2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümü sonuçları

3.3. Öz direnç Sıcaklık Ölçümü Sonuçları

Stronsiyum sitelere farklı oranlarda nano boyutta Zn parçacıkları katkısıyla katı katı hal tepkime yöntemi ile üretilen seramik örneklerde faz yapısında ve morfolojik yapıda bazı değişimler tespit edildi. Bu değişimlerin süperiletkenlik özelliklere etkilerini belirlemek için öz direnç-sıcaklık ölçümleri (R-T) gerçekleştirildi. Farklı oranlarda nano boyutta Zn parçacıkları içeren seramik örneklerin öz direnç sıcaklık grafiği Şekil 3’de gösterilmektedir.

Bakır oksit tabakalı süperiletken örneklerde, T_c^{onset} süperiletkenlik geçiş sıcaklığı değeri süperiletken fazların oluşumu ile ilişkilidir (Güner ve ark., 2019). T_c^{offset} geçiş sıcaklığı ise süperiletken fazlar arasında bağların kalitesini işaret eder (Saritekin ve ark., 2016). Bunun yanında, T_c^{onset} ve T_c^{offset} arasında fark olan ΔT_c değeri ise süperiletken örnekte homojenliğin ölçüsü olabilmektedir (Al Habeeb ve ark., 2021).

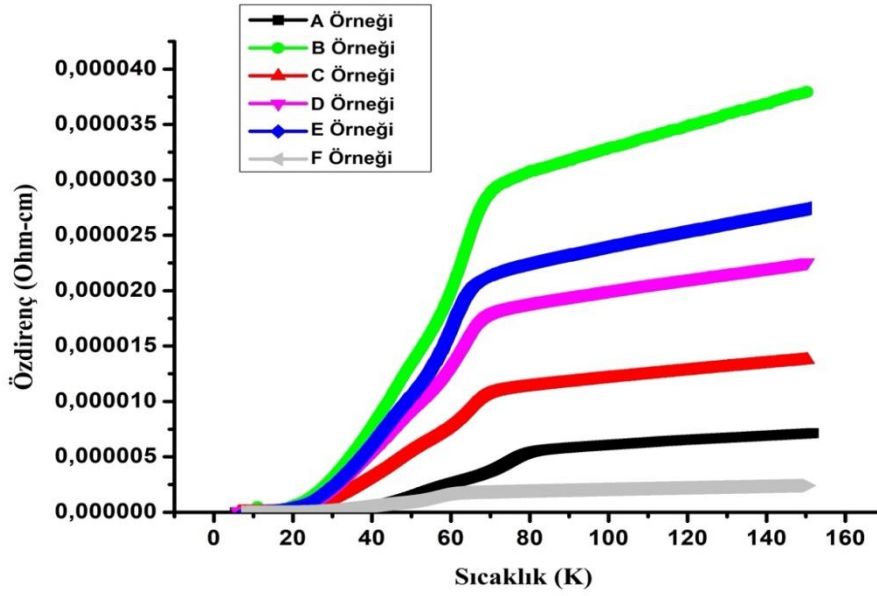
Seramik BSCCO süperiletken sisteminde geniş ebatta plaka benzeri taneler arasında kuvvetli bağların oluşumu ve süperiletken fazlar arasında bağların kalitesi geçiş sıcaklığını etkileyen parametrelerdir. BSCCO süperiletken malzeme araştırmacıları süperiletkenlik özelliklerde gelişmeler için morfolojik kusurları azaltmak için yöntemler geliştirmişlerdir. Malzeme hazırlama süreçleri sırasında yüksek basınçlar uygulama, sıcak presleme ve nano malzeme katkılama bu yöntemler arasındadır (Caillard ve ark., 2000; Aytekin ve ark. 2015; Qiu ve ark., 2023). Özellikle nano malzemelerin taneler arası boşluklara yerleşmesi ve taneler arası bağlantıları kuvvetlendirmesi süperiletkenlik geçiş sıcaklığı üzerinde literatürde başarılı sonuçlar vermiştir (Öztürk ve Safran, 2018). Aşağıda verilen tabloda geliştirme metodu ve süperiletkenlik geçiş sıcaklığında artış verilmiştir.

Tablo 2 Literatürde yer alan taneciksel yapının gelişmesine bağlı T_c değerinde artışlar (Yavuz ve ark., 2016; Öner ve ark., 2022; Ramírez ve ark., 2023)

Tablo 2. Literatürde T_c üzerine etki eden çalışmalar

Yöntem	İşlem Öncesi T_c (K)	İşlem Sonrası T_c (K)
Sıcak Presleme	85,6	96,6
Yüksek Basınç Uygulama	109, 9	111,6
Nano Malzeme Katkılama	108,5	109,9

Tablo 2’de süperiletkenlik geçiş sıcaklığı değerlerinde karşılaştırmalar göz önüne alındığında, morfolojik yapıda iyileştirmelere dayalı yöntemler T_c üzerinde önemli sonuçlar vermektedir. Öner ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada sıcak pres uygulanarak üretilen seramik örnekte daha az tane sınırları ve geniş ebatta taneler elde edilmiştir (Öner ve ark., 2022). Ramirez ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yüksek peletizasyon basıncı uygulanması ile düzgün dağılımlı taneler, daha az tane sınırları ve taneler arası kuvvetli bağların oluşması süperiletkenlik geçiş sıcaklığı gelişmiştir (Ramírez ve ark., 2023). Yavuz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, nano boyutta 0.05 SnO₂ katkılı örnekte morfolojik yapıda daha az tane sınırları ve taneler arası bağlantıların gelişmesi ile süperiletkenlik geçiş sıcaklığı artmıştır (Yavuz ve ark., 2016). Görülmektedir ki taneler arası kuvvetli bağlar ve daha az tane sınırlarının oluşumu süperiletkenlik geçiş sıcaklığını arttırmaktadır.



Şekil 3. Tüm seramik örneklerin R-T grafiği

İyi bilindiği gibi, düzgün bir kristallenme sürecinin gerçekleşmesi homojen faz yapısının oluşumuna ve süperiletkenlik özelliklerin gelişmesini sağlayabilir (Aytekin, 2024). İkincil fazlar kristal yapıda kusurlara yol açarak süperiletkenlik fazları arasında bariyer oluşturabilir. Bu da süperiletkenlik analizlerinde onset sıcaklıktan offset sıcaklıklara geçiş bölgelerinde uzamalara ve dalgalanmalara yol açabilmektedir.

Şekil 3’de grafiğe bakıldığında, nano boyutta Zn parçacıkları içermeyen örnekte offset sıcaklıktan onset sıcaklığa geçiş normal şekilde gerçekleşmektedir. Ancak $x = 0,1$ oranına kadar artan nano Zn parçacık katkısı ile grafikte dalgalanmalar ve geçişlerin uzaması meydana gelmektedir. $x = 0,1$ oranına kadar Zn nano parçacıkları Cooper çift oluşumlarına zarar vermesi ile T_c değerleri azalmıştır. Bunun yanında, $x = 0,1$ oranında Zn parçacığı içeren örnekte düzgün ve homojen bir geçiş gözlemlenmiştir.

Tablo 3’de seramik örneklerin süperilekten geçiş sıcaklıkları ve 150 K sıcaklıkta özdirenç değerleri verilmektedir.

Tablo 3. Seramik örneklerin elektriksel sonuçları

Örnek	$T_c^{onset} (K)$	$T_c^{offset} (K)$	$\Delta T_c (K)$	R (ohm-cm 150 K)
A Örneği	80,44	42,27	38,17	0,00027
B Örneği	71,08	38,29	32,79	0,00038
C Örneği	69,37	38,46	30,91	0,00137
D Örneği	68,87	36,27	32,60	0,00250
E Örneği	65,12	31,05	34,07	0,00052
F Örneği	63,42	48,00	15,42	0,00004

Tablo 3’de görüldüğü gibi, A, B, C, D, E ve F Örneklerinin T_c^{onset} sıcaklık değerleri sırasıyla 80,44; 71,08; 69,37; 68,87; 65,12; 63,42 K olarak tespit edildi. Bunun yanında T_c^{offset} değerleri ise sırasıyla 42,27; 38,29; 38,46; 36,27; 31,05 ve 48,00 K olarak tespit edildi. A örneğinde faz oluşumu ve mikro yapısal özellikler oluşumuna bağlı olarak normal süperiletkenlik geçiş sıcaklık değerleri elde edildi. Ancak yapı

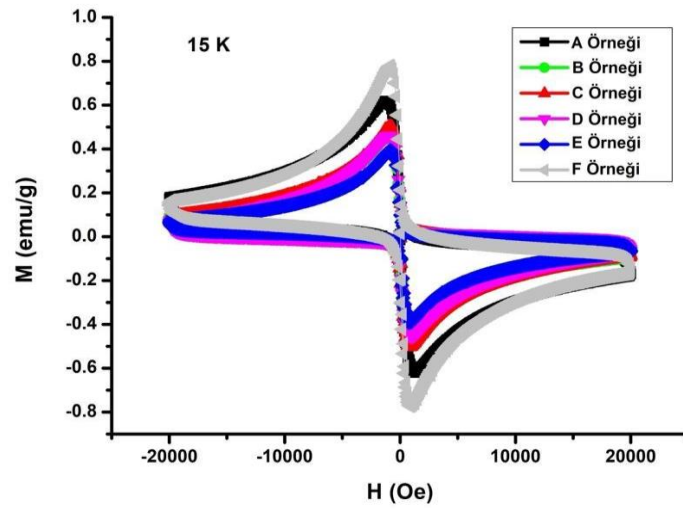
içerisine düşük oranlarda ($x < 0,1$) Zn nano parçacıklarının katkısı, sistem içerisinde ikincil fazların oluşumu ve mikro yapıda homojenliğin bozulmasına yol açmıştır. Böylece düşük katkı içeren örneklerde T_c değerleri giderek azalmaktadır. Özellikle ikincil fazların süperiletken bölgeler arasına yerleşmesi ve bu bölgelerde Cooper çiftlerinin oluşumunu ve hareketini engelleyecek bariyer oluşturmaları süperiletkenlik geçiş sıcaklığını negatif yönde etkileyebilir. Seramik süperiletken malzemelerin X-ışını ölçümlerinde bazı durumlarda faz şiddetlerinde artış görülmesine rağmen, süperiletken fazlar arasında zayıf bağların oluşması süperiletkenlik geçiş sıcaklığı performansını zayıflatabilmektedir. Zelati ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 0.5 oranında Eu_2O_3 eklenen BSCCO seramik örnekte süperiletken taneler arası bağlantıların gelişmesi ve optimum hol konsantrasyonu elde edilmesi süperiletkenlik geçiş sıcaklığında artış meydana gelmiştir (Zelati ve ark., 2014). Jannah ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, 0.01 oranında nano boyutta kobalt katkılı örnekte Bi-2223 fazının gelişmesi ile süperiletkenlik geçiş sıcaklığında artış elde edilmiştir (Jannah ve ark., 2013). Literatürden görüldüğü gibi, nano parçacıklar sistem içerisine katıldıklarında faz oluşumunu destekleyebilir ve taneler arası bağlantıları geliştirebilir. Yapılan nano malzeme içeren çalışmalarda faz oluşumu, morfolojik yapı ve hol konsantrasyonu gibi özelliklerde gelişmeler sonucu malzemede süperiletkenlik geçiş sıcaklığında artış elde edilebilmektedir. $x = 0,1$ oranında nano boyutta Zn parçacıkları mikro yapı analizlerinde açıklandığı gibi plaka benzeri tanelerin genişlemesine katkıda bulunmuştur. Aynı zamanda faz analizlerinde bazı bölgelerde safsızlıkların süperiletken fazına dönmesi ile faz yapısının da geliştiği açıklanmıştır. Literatürde nano boyutta parçacıklarının faz ve mikro yapıdaki olumlu etkisine $x = 0.1$ oranında Zn nano parçacık katkılı örnekte rastlanmaktadır. Bu gelişmeler ile çiftlenim mekanizmalarının desteklenmesi ile onset sıcaklığında gelişmeler sağlanmıştır.

Tablo 3’de örneklerin ΔT_c değerleri de görülmektedir. Homojen yapının bir göstergesi olan ΔT_c değeri diğer örnekler ile karşılaştırıldığında en düşük değer F örneğinde tespit edildi. Bu da ölçüm sonuçları ile uyumlu olarak örneklerdeki homojenliğin arttığını desteklemektedir.

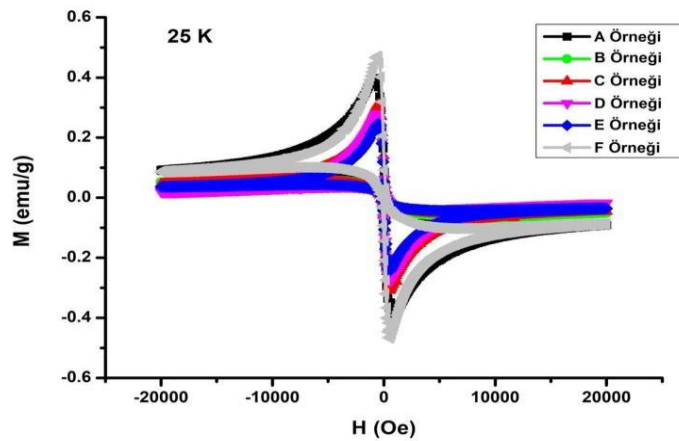
Süperiletkenlerin teknolojik uygulamalar için önemli bir geliştirme parametresi de oda sıcaklığında veya oda sıcaklığına yakın bölgelerde özdirenç performansdır. Özdirenç sıcaklıkları malzeme içerisinde metalik bağlantıların gelişimi, elektron-fonon etkileşimleri, taneler arası sıkı bağlantılar ve faz homojenliği gibi parametreler son derece bağımlıdır (Turkoz ve ark., 2013; Yıldırım ve ark., 2017). Gürsul tarafından yapılan çalışmada 0.1 oranında lityum katkılı Bi-2212 süperiletken örnekte süperiletken taneler arasında kuvvetli bağların oluşumu, yapısal kusurların azalması ve boşluklu yapının azalması sonucu özdirenç değeri azalmıştır (Gürsul, 2023). Düzgün dağılımlı tanelerin varlığı, geniş ebatta plaka benzeri tanelerin oluşumu ve plaka benzeri tanelerin birbirleri ile kuvvetli teması sonucunda $x = 0,1$ katkılı örnekte 150 K sıcaklıkta 0,00004 ohm-cm olarak en düşük direnç değeri olarak elde edildi. Diğer örnekler ile karşılaştırıldığında en iyi elektriksel özellikler F örneğinde elde edilmiştir.

3.4. Manyetizasyon Ölçümü Sonuçları

Farklı oranlarda nano boyutlu Zn içeren seramik örneklerin manyetik özelliklerini karakterize etmek amacıyla, 15 K ve 25 K iki farklı sıcaklıkta, ± 20000 Oe manyetik alan altında gerçekleştirilen M-H ölçümleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Bi-2212 yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin karakteristik davranışı olan kapalı devre histerezis oluşumu her iki grafikte de görülmektedir (Öner ve ark., 2022; Qiu ve ark., 2023). Ancak 25 K'da gerçekleştirilen M-H ölçümünde, histerezis davranışı korunmasına rağmen grafik alanı azalmaktadır. BSCCO süperiletkenlerde artan sıcaklık ve manyetik alan ile vorteks durumunda akı çizgilerinin süperiletken bölgeler ile etkileşimin artması sonucu histerezis alanının daralması da karakteristik özelliğidir.



Şekil 4. Farklı oranlarda nano boyutta Zn katkılı seramik süperiletkenlerin 15 K sıcaklıkta gerçekleştirilen M-H grafiği



Şekil 5. Farklı oranlarda nano boyutta Zn katkılı seramik süperiletkenlerin 25 K sıcaklıkta gerçekleştirilen M-H grafiği

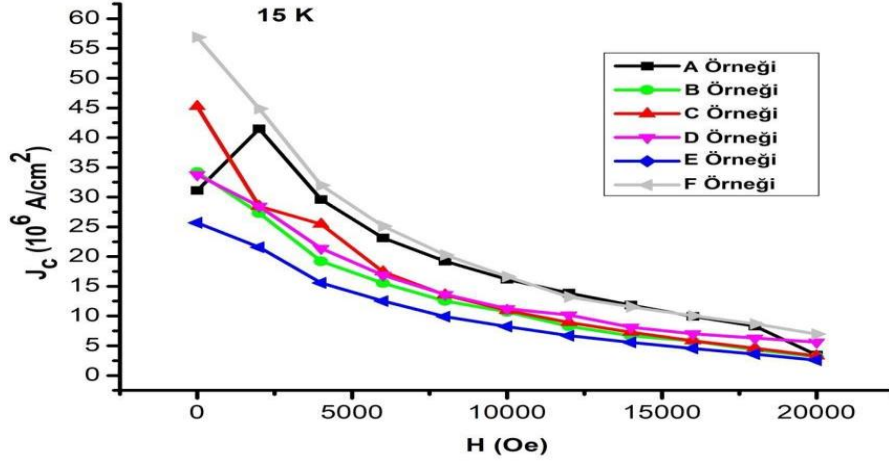
II. tip seramik süperiletken malzemelerde manyetik akı ve süperiletken bölgelerin etkileşiminin azaltılması ile malzemede manyetik performans geliştirilebilmektedir. Seramik süperiletken malzemelerde manyetik kapasitelerinin (H_c) gelişmiş olması yüksek manyetik alan altında süperiletkenlik performansın sürdürülmesi önemlidir. Yüksek manyetik alana dayanımı arttırmak için fiziksel ve morfolojik özelliklerinin geliştirilmesi kadar akı çivileme performanslarının da yüksek olması gereklidir (Matsumoto ve ark., 2004; Zouaoui ve ark., 2023).

Seramik süperiletken malzemelerde histerezis alanın geometrisi ve genişliği, düzgün dağılımlı ve birbiriyle kuvvetli bağlı geniş ebatta plaka benzeri tanelerin oluşumuna bağlıdır (Salamati ve Kameli, 2004; Aytekin ve Akyol, 2024). Bunun yanında histerezis eğrilerinden kalıntı mıknatıslanma (M_R) değeri hakkında önemli bilgiler elde edilebilir. Güçlü akı sabitleme merkezlerinin oluşumu ile seramik süperiletkenlerin manyetik performanslarının gelişiminin göstergesi olarak yüksek değerlerde M_R sonuçları elde edilebilir. Seramik süperiletkenlerde morfolojik yapıda sıkı yapıda plaka benzeri tanelerin oluşumu kadar akı çivileme merkezlerinin oluşumu manyetizasyon özelliklerin gelişimini işaret etmektedir (Albis ve ark., 2010).

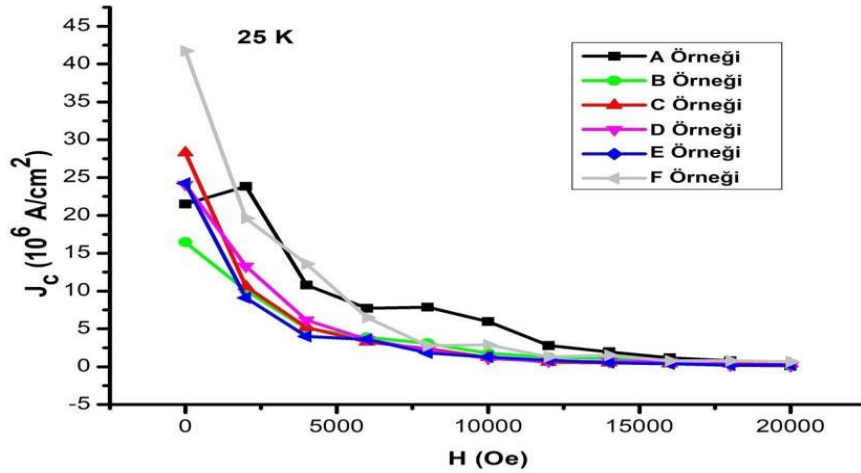
M-H ölçüm sonuçlarında, X-ışını kırınım ölçümü sonuçları ve morfolojik analizleri ile uyumlu olarak, A örneğinde düzgün geometride histerezis grafiği elde edilmiştir. $x = 0,0125$ oranında nano boyutta Zn içeren örnekte tane sınırlarının artması ve bu oranda Zn nano parçacıklarının akı çivileme merkezi gibi davranamaması sonucunda histerezis alan daralmıştır. C örneğinde tane sınırlarında azalmalar meydana gelmesi ve $x = 0,025$ oranında nano boyutta Zn parçacıklarının akı çivileme merkezi oluşumuna katkıda bulunması ile histerezis alanında bir miktar artış meydana gelmiştir. Ancak C örneğinin histerezis alanı katkısız örnek ile karşılaştırıldığında daha azdır. D örneğinde $x = 0,05$ oranında Zn nano partikülleri diamanyetik özellikleri geliştirecek etkiyi oluşturmamıştır. E örneğinde de morfolojik yapıda düzensizliğin devam etmesi ve akı çivileme özelliklerin zayıf olması sebebiyle benzer davranış devam etmektedir. Pham ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Bi-2223 süperiletken FePd nano parçacıklarının malzemelerin akı sabitleme özelliklerini geliştirmesine bağlı olarak mıknatıslanma performansının geliştirdiği rapor edilmiştir (Pham ve ark., 2024). F örneğinde morfolojik yapıda geniş ebatta tanelerin oluşması ve tane sınırlarında azalması sonucunda manyetik performansın geliştiğinin göstergesi olarak histerezis alan genişlemiştir. $x = 0.1$ değerinde nano boyutta Zn parçacıklarının akı çivileme merkezi gibi davranabilmeleri de manyetik performansın gelişmesine katkı da bulunmuştur. Dahası, morfolojik gelişmelerin yanında akı çivileme performansının geliştiğinin göstergesi olarak M_R değerinde de artışlar gözlemlenmiştir. Literatürde nano parçacıkların morfolojik ve manyetizasyon performanslarını geliştirebilme etkisi $x = 0.1$ oranında Zn nano parçacıklarında da gerçekleşmiştir. Seramik örneklerde J_c değerleri Bean's kritik akım yoğunluğu modelinden manyetizasyon sonuçlarından teorik olarak hesaplanmıştır (Bean, 1962).

$$J_c = 30 (\Delta M/d) \quad (2)$$

Santimetrekare başına amper cinsinden ifade edilen taneler arası mıknatıslanma akım yoğunluğu J_c ile gösterilir. $\Delta M = M^+ - M^-$ manyetizasyonu ifade eder. d ise örneğin kalınlığıdır. Seramik örneklerin 15 K ve 25 K sıcaklıkta manyetizasyon sonuçlarına bağlı olarak hesaplanan J_c grafikleri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 6. Farklı oranlarda nano boyutta Zn katkılı seramik süperiletkenlerin 15 sıcaklıkta hesaplanan J_c grafiği



Şekil 7. Farklı oranlarda nano boyutta Zn katkılı seramik süperiletkenlerin 25 K sıcaklıkta hesaplanan J_c grafiği

Seramik süperiletkenler morfolojik yapıda plaka benzeri tanelerin düzgün dağılımı ve taneler arasında kuvvetli bağlantılar oluşturması J_c performansını geliştirebilir (de Vera ve ark., 2019; Tran ve ark., 2025). Bunun yanında yapay akı çivileme merkezlerinin oluşması da yüksek değerlerde manyetik alan

bölgelerinde J_c performansının korunmasını sağlamaktadır (Dahiya ve ark., 2021; Shahbazi ve ark., 2022).

Seramik süperiletken örneklerde farklı oranlarda nano boyutta Zn katkısı ile morfolojik ve faz yapısında değişimler ile farklı J_c davranışları gözlemlenmektedir. A örneğinde, düzgün geometride histerezis alanının oluşması ile optimum J_c değeri elde edilmiştir. B örneğinde tane sınırlarının oldukça fazla olması, homojen yapının zayıflaması ve $x = 0,0125$ oranında nano boyutta Zn parçacıklarının akı çivileme merkezi oluşumuna katkı sunamamasından dolayı J_c değeri azalmıştır. Suhaimi ve arkadaşları nano boyutta Eu katkılı Bi,Pb-2223 süperiletkenlerde, Eu nanopartiküllerinin çivileme performansını arttırarak J_c değerinin artmasını rapor etmişlerdir (Suhaimi ve ark., 2025). C örneğinde, tane ebatlarında artış ve tane yöneliminde düzenin oluşmasına bağlı olarak, B örneği ile karşılaştırıldığında J_c değerinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. $x = 0,0250$ oranında nano boyutta Zn katkılı C örneğinde, hem morfolojik hem de akı çivileme özelliklerinde ki gelişme katkısız örnek ile karşılaştırılınca J_c değerini arttırmak için yetersiz kalmıştır. Buna ek olarak, $x = 0,05$ oranında nano boyutta Zn katkılı D örneğinde, plaka benzeri taneler arasında geniş açılar ve boşluklu yapının oluşması, tane sınırlarının artması, bazı bölgelerde tane ebatlarının küçülmesi ve akı çivileme performansının zayıf kalması gibi etkilerden J_c değerinde azalma meydana gelmiştir. E örneğinde plaka benzeri tane ebatları genişlemesine rağmen aralarında geniş açılar meydana gelmesi ve akı çivileme merkezlerinin yeterli miktarda oluşmaması ile J_c değerinde azalma eğilimi devam etmektedir. Pham ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, 0.04 oranında Ti nano parçacıklarının akı çivileme performansını geliştirmesi sonucunda J_c değerlerinde artış meydana geldiği rapor edilmiştir (Pham ve ark, 2022). Literatürden görüldüğü gibi nano parçacıkların taneler arası boşluklara yerleşmesi ve akı çivileme merkezi gibi davranması J_c değerleri üzerinde faydalı etkileridir. F örneğinde, granüler yapının gelişmesi ve $x = 0,1$ oranında Zn nano parçacıklarının akı çivileme merkezi gibi davranabilmesi ile J_c değerlerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Literatürde nano parçacıklarının seramik süperiletkenlere faydalı etkileri $x = 0.1$ oranında Zn parçacıklarında da görülmektedir.

4. Sonuçlar

Sunulan çalışmada $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ seramik yapıda süperiletken sisteminde stronsiyum sitelere farklı oranlarda nano boyutta Zn ($x = 0,00; 0,0125; 0,0250; 0,050; 0,075$ ve $0,1$) katkılanmıştır. $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Zn}_x\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ başlangıç kompozisyonunda katı hal tepkime yöntemi ile üretilen seramik örneklerde faz yapısında, morfolojik yapıda, elektriksel özellikler ve manyetik özelliklerde değişimler sırasıyla X-Işını kırınım ölçümü, taramalı elektron mikroskobu ölçümü, R-T (özdirenç ölçümü) ve manyetizasyon ölçümleri (M-H) ile açıklandı. X-ışını analizlerinde tüm örneklerde bazı minör safsızlık fazlarının oluşumuna rağmen, Bi-2212 süperiletkenlik fazı temel faz olduğu tespit edildi. Stronsiyum sitelere nano boyutta Zn katkısı faz oluşumunda önemli değişim etkisi oluşturmamasına rağmen, örneklerde pik şiddetlerinde farklılaşma gösterdi. Morfolojik yapı analizlerinde tüm örneklerde X-ışını ölçüm sonuçları ile uyumlu olarak, Bi-2212 süperiletken yapısının karakteristiği olarak plaka benzeri tanelerin oluşumu gözlemlenmiştir. $x = 0,1$ oranında Zn nanoparçacıkları içeren örnekte geniş ebatta ve düzgün dağılımlı plaka benzeri tane oluşumları

gözlemlendi. Örneklerin öz direnç sıcaklık ölçümlerinde tüm örnekler onset sıcaklığı üzerinde metalik davranış sergilemektedir. Geniş ebatta plaka benzeri tanelerin oluşumu ile $x = 0,1$ oranında Zn nano parçacık katkılı örnekte en iyi elektriksel özellikler elde edilmiştir. Manyetik karakterizasyonda geniş ebatta plaka benzeri tanelerin varlığı ve taneler arasında kuvvetli bağların oluşumu ile en geniş histerezis alanı diamanyetik özelliklerin geliştiğinin göstergesi olarak $x = 0,1$ oranında nano boyutta Zn içeren örnekte elde edildi. $x = 0,1$ oranında nano boyutta Zn parçacıklarının akı çivileme özelliklerini geliştirmesi sonucu 25 K sıcaklıkta ve 20000 Oe manyetik alan altında $65,55 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ J_c değeri elde edildi. Çalışmada tercih edilen katkı malzemesinin boyutu, miktarları ve sistem içerisinde katkılандığı bölge daha önce denenmemiş ve sonuçları literatüre aktarılmamış bir çalışmadır. Literatürde yaklaşık olarak $2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ kritik akım yoğunluğu sonuçları göz önüne alındığında, elde edilen $65,55 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ J_c değerinde önemli bir gelişme elde edilmiştir. Bu sonuçlar farklı boyutta ve oranda nano malzemelerin Bi-2212 süperiletkenler üzerinde etkilerinin daha da araştırılması gerektiğini ön plana çıkarmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacının Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar, %100 oranında makaleye katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Agail A., Abd-Shukor R. Effect of nano-size SnO_2 addition on (Bi, Pb)-Sr-Ca-Cu-O superconductor. Solid State Science and Technology 2014; 22(1): 2.
- Al Habeeb MQ., Oboudi S., Wenlong W., Julian S. Effect of adding Ag nanoparticles onto magnetic and structural properties of BSCCO superconducting compound. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing 2021; 1: 012024.
- Albiss B., Obaidat I., Gharaibeh M., Ghamlouche H., Obeidat S. Impact of addition of magnetic nanoparticles on vortex pinning and microstructure properties of Bi-Sr-Ca-Cu-O superconductor. Solid State Communications 2010; 150(33-34): 1542-1547.
- Awad R., Abou-Aly A., Abdel Gawad M., G-Eldeen I. The influence of SnO_2 nano-particles addition on the vickers microhardness of (Bi, Pb)-2223 superconducting phase. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 2012; 25: 739-745.
- Aytekin ME. Change in physical, electrical and magnetic properties of Bi-2212 superconducting Materials Co-substituted with nano-sized zinc and sodium. Transactions on Electrical and Electronic Materials 2024; 25: 779–791.
- Aytekin ME. The role of post-annealing process on the physical, electrical and magnetic properties of nano-sized tin substituted Bi-2212 superconducting ceramics. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 2024; 35(28): 1854.

- Aytekin ME., Akyol M. Effect of nano-sized europium substitution on strontium sites on diamagnetic properties in BiPb-2223 superconductor system. *Journal of NanoScience in Advanced Materials* 2024; 3(1): 8-14.
- Aytekin ME., Özkurt B., Sugözü İ. Physical, magnetic and mechanical properties of Bi-2212 superconductors prepared by high pelletization pressure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2015; 26(3): 1799-1805.
- Aytekin ME., Özkurt B., Sugözü İ. Physical, magnetic and mechanical properties of Bi-2212 superconductors prepared by high pelletization pressure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2015; 26: 1799-1805.
- Azman NJ., Abdullah H., Abd-Shukor R. Transport critical current density of $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ceramic superconductor with different nanosized Co_3O_4 addition. *Advances in Condensed Matter Physics* 2014; 1: 498747.
- Bean CP. Magnetization of hard superconductors. *Physical Review Letters* 1962; 8(6): 250.
- Caillard R., Garnier V., Desgardin G. Sinter-forging conditions, texture and transport properties of Bi-2212 superconductors. *Physica C* 2000; 340(2–3): 101–111.
- Cevizci E., Kocabas K. Comparative investigation of magnetic and mechanical properties of nano- Sb_2O_3 and nano- Y_2O_3 addition on bismuth-based superconducting materials. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2023; 34(7): 657.
- Cullity BD., Smoluchowski R. Elements of X-ray diffraction. *Physics Today* 1957; 10(3): 50.
- Çördük T., Bilgili Ö., Kocabaş K. Investigation of effects of MgO nanoparticles addition on the superconducting properties of Bi-2223 superconductors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2017; 28(19): 14689-14695.
- Dahiya M., Kumar R., Kumar D., Jha AK., Khare N. Flux pinning characteristics of YBCO: NaNbO_3 by introducing artificial pinning centers with different morphology. *Ceramics International* 2021; 47(24): 34189-34198.
- de Vera FI., Bardolaza H., Arcilla C., Sarmago R. Effect of In_2O_3 on the grain connectivity and superconducting behavior of $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{In}_x\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$, *SN Applied Sciences* 2019; 1(1): 96.
- Erdem U. Homovalent Ho/Bi substitution effect on characteristic properties of Bi-2212 superconducting ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2021; 32(24): 28587-28604.
- Guner S., Zalaoglu Y., Turgay T., Ozyurt O., Ulgen A., Dogruer M., Yildirim G. A detailed research for determination of Bi/Ga partial substitution effect in Bi-2212 superconducting matrix on crucial characteristic features. *Journal of Alloys and Compounds* 2019; 772: 388-398.
- Gürsul M. Vital variation in superconducting performances of Bi-2212 through lithium substitution. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2023; 34(5): 451.
- Hao Q., Xu X., Jiao G., Yao K., Liu G., Li C. Impact of hot isostatic pressing on the microstructure and current-carrying capacity of Bi-2212 wires. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2024; 35(11): 746.

- Hosono H., Yamamoto A., Hiramatsu H., Ma Y. Recent advances in iron-based superconductors toward applications. *Materials Today*, 2018; 21(3): 278-302.
- Jannah AN., Abd-Shukor R., Abdullah H. Effect of Co₃O₄ nanoparticles addition on (Bi, Pb)-2223 superconductor. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2013; 75: 367-370.
- Kurtul G., Ulgen A., Armagan O., Turkoz M. Erdem Ü., Yildirim G. Role of dysprosium substitution on microscopy architecture, structural stability, and crack propagation mechanism in Bi-2212 engineering ceramics. *Physica Scripta* 2025; 100(2): 025932.
- Larbalestier DC., Jiang J., Trociewitz U., Kametani F., Scheuerlein C., Dalban-Canassy M., Matras M., Chen P., Craig N., Lee P. Isotropic round-wire multifilament cuprate superconductor for generation of magnetic fields above 30 T. *Nature Materials* 2014; 13(4): 375-381.
- Laser textured Bi-2212 in planar geometries. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2013; 13: 3188.
- Lennikov V., Özkurt B., Angurel LA., Sotelo A., Özçelik B., de La Fuente GF. Microstructure and transport properties of Bi-2212 prepared by CO₂ laser line scanning. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2013; 26(4): 947-952.
- Martínez Ramírez I., Díaz Valdeés E., Mejía García C., Santoyo Salazar J., Conde Gallardo A., Guillén Cervantes Á. Effect of compaction pressure on the of superconductor Bi-2212 in bulk. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2023; 36: 25–32.
- Matsumoto K., Horide T., Osamura K., Mukaida M., Yoshida Y., Ichinose A., Horii S. Enhancement of critical current density of YBCO films by introduction of artificial pinning centers due to the distributed nano-scaled Y₂O₃ islands on substrates. *Physica C: Superconductivity* 2005; 412: 1267-1271.
- Mora M., Diez JC., López-Gascón CI., Martinez E., de la Fuente GF. Generation of magnetic fields above 30 T. *Nature Materials* 2014; 13(4): 375-381.
- Nurbaisyatul E., Azhan H., Ibrahim N., Saipuddin S. Structural and superconducting properties of low-density Bi (Pb)-2223 superconductor: Effect of Eu₂O₃ nanoparticles addition. *Cryogenics* 2021; 119: 103353.
- Ozturk O., Yildirim G., Asikuzun E., Coskunyurek M., Yilmazlar M., Kilic A. Change of formation velocity of Bi-2212 superconducting phase with annealing ambient. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2013; 24: 4643.
- Öner B., Özkurt P., Madre M., 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; 35(7): 1831-1838.
- Özçelik B., Gürsul M., Sotelo A., Madre M. Improvement of superconducting properties in Na-doped BSCCO superconductor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2015; 26(1): 441-447.

- Özkurt B. A significant enhancement in J_c values through excessive Na doping in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_{2-x}\text{Na}_x\text{O}_y$ superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2015; 28: 1501-1506.
- Özkurt B. The effects of yttrium substitution in Bi-2223 superconductors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2013; 24(2): 758-763.
- Özkurt B., Aytakin ME. The effect of different dwell times in the ball milling process on the superconducting properties of $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_2\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.1}\text{O}_y$ (Bi-2212) ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2018; 29(5): 3920-3926.
- Öztürk H., Safran S. Effects of carbon-encapsulated nano boron addition on superconducting parameters of BSCCO. *Journal of Alloys and Compounds* 2018; 731: 831-838.
- Pham AT., Le T., Nguyen HL., Nguyen HN., Nguyen TB., Pham PV., Nguyen KM., Dang TBH., Pham NT., Kieu XT. Effect of FePd nanoparticle addition on the superconductivity of $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ compounds. *Ceramics International* 2024; 50(9): 16425-16434.
- Pham AT., Le T., Nguyen HL., Nguyen HN., Nguyen TB., Pham PV., Tran DH. Effect of FePd nanoparticle addition on the superconductivity of $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ compounds. *Ceramics International* 2024; 50(9): 16425-16434.
- Pham AT., Tran DT., Vu LH. Chu NT., Thien ND., Nam NH., Tran DH. Effects of TiO_2 nanoparticle addition on the flux pinning properties of the $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ceramics. *Ceramics International* 2022; 48(14): 20996-21004.
- Qiu LP., Zhang YR., Gao SL., Zheng QH., Zhang TT., Cheng GT., Long YZ. Fabrication and magnetic properties of SiO_2 nanoparticles-doped BSCCO superconducting nanofibers by solution blow spinning. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 2023; 608: 1354251.
- Qiu LP., Zhang YR., Gao SL., Zheng QH., Zhang TT., Cheng GT., Cao SZ., Hang WP., Ramakrishna SY., Long Z. Fabrication and magnetic properties of SiO_2 nanoparticles-doped BSCCO superconducting nanofibers by solution blow spinning. *Physica C: Superconductivity and Its Applications* 2023; 608: 1354251.
- Rochester J., Myers C., Shen T., Majoros M., Collings E., Sumption M. Flux creep in a Bi-2212 Rutherford cable for particle accelerator applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2022; 32(4): 1-5.
- Saghafi M., Shams G., Soltani Z. The influence of Sm_2O_3 nanoparticles adding on some superconducting properties of $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ceramics. *Physica C: Superconductivity and Its Applications* 2024; 624: 1354566.
- Salamati H., Kameli P. The effect of Bi-2212 phase on the weak link behavior of Bi-2223 superconductors. *Physica C: Superconductivity* 2004; 403(1-2): 60-66.
- Saritekin N., Pakdil M., Yildirim G., Oz M., Turgay T. Decrement in metastability with Zr nanoparticles inserted in Bi-2223 superconducting system and working principle of hybridization mechanism. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2016; 27(1): 27956-27965.

- Satyavathi S., Muralidhar M., Nandakishore K., Babu VH., Pena O., Sergent M., Beniere F. Effect of annealing on the superconducting properties of $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Cu}_2\text{O}_y$ ($0.0 \leq x \leq 1.0$) system. *Applied Superconductivity* 1995; 3(4): 187-195.
- Sedky A., Al-Battat W. Effect of Y substitution at Ca site on structural and superconducting properties of Bi: 2212 superconductor. *Physica B: Condensed Matter* 2013; 410: 227-232.
- Shahbazi M., Hao Y., Patel D., Liang H., Yamauchi Y., Hossain M. Biomass-derived carbon doping to enhance the current carrying capacity and flux pinning of an isotopic MgB_2 superconductor. *Journal of Magnesium and Alloys* 2022; 10(7): 1868-1877.
- Shalaby MS., Noun M., Yousef NM., Maksoud MA., Abdelhaleem S. Influence of Ba substitution on phase formation, RBS analysis, critical current density and flux pinning dynamics in Y-BSCCO superconducting materials *Cryogenics* 2025; 150: 104129.
- Shen T., Garcia Fajardo L., Myers C., Hafalia Jr A., Rudeiros Fernández JL., Arbelaez D., Brouwer L., Caspi S., Ferracin P., Gourlay S. Design, fabrication, and characterization of a high-field high-temperature superconducting Bi-2212 accelerator dipole magnet. *Physical Review Accelerators and Beams* 2022; 25(12): 122401.
- Sotelo A., Rasekh S., Constantinescu G., Amaveda H., Torres M., Madre M., Diez J. Effect of Pb doping on the electrical properties of textured Bi-2212 superconductors. *Journal of the European Ceramic Society* 2014; 34(12): 2977-2982.
- Suhaimi NE., Hashim A., Razali WAW., Ibrahim N., Saipuddin SF. Superconducting and microstructure properties of Eu_2O_3 nanoparticles substitution in low density Bi (Pb)-2223 superconductor. *Journal of Alloys and Compounds* 2025; 1012: 178448.
- Tran DH., Pham AT., Binh NT., Anh DTK., Nam NH., Hong NT., Cuong LV., Pham PV., Huy NQ., Huong TT. Superconductivity in $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ceramics with cobalt ferrite (CoFe_2O_4) nanoparticle addition. *Ceramics International* 2025; 51(12): 16134-16142.
- Turkoz MB., Nezir S., Terzioğlu C., Varilci A., Yildirim G. Investigation of Lu effect on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting compounds. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2013; 24(3): 896-905.
- Yakinci ME., Madre MA., Ozabaci M., Sotelo A. Structural and superconducting properties of magnetically doped Bi-2212 textured rods grown by laser floating zone (LFZ) technique. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2013; 26(4): 1135-1141.
- Yang D., Yu M., Ma H., Zhang Z., Wang M., Liu S., Jin H., Gao P., Zhou C., Liu F. Performance of first Bi-2212 cable with pre-over pressure and over pressure heat treatment. *Superconductor Science and Technology* 2021; 35(1): 015007.
- Yang J., Duan R., Wang Q., Shang W., Guo Q., Chen Y., Dai Y., Sun B., Qi Y. An insight into microstructure and structure stability of Ni-doped Bi2212 ceramics. *Ceramics International* 2023; 49(24): 40174-40182.

- 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. Determination of optimum diffusion annealing temperature for Au surface-layered Bi-2212 ceramics and dependence of transition temperatures on disorders. *Journal of Alloys and Compounds* 2017; 699: 247-255.
- Yildirim G., Yucel E., Bal S., Dogruer M., Varilci A., Akdogan M., Terzioglu C., Zalaoglu, Y. Investigation of structural and superconducting properties of Cr added Bi-2212 superconducting ceramics. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2012; 25(2): 231-237.
- Zelati A., Amirabadizadeh A., Kompany A., Salamati H., Sonier J. Effect of Eu₂O₃ nanoparticles addition on structural and superconducting properties of BSCCO. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 2014; 27(6): 1369-1379.
- Zhang Z., Fang Z., Zhou M., Yang D., Yu M., Jin H., Zhu H., Chi Z., Hao Q., Li C. The first CICC-type Bi-2212 insert coil for high-field applications up to 20 T. *Superconductor Science and Technology* 2024; 37(12): 12LT01.
- Zhang ZC., Yang DS., Zhou HS., Qin, JG., Luo GN. Degradation mechanism of the superconducting performance of a Bi2212 cable under magnetic fields. *Superconductor Science and Technology* 2022; 35(3): 035004.
- Zouaoui M., Ben Salem M., Slimani Y., Aldosari HS., Ben Azzouz, F. Role of zirconia nanoparticles on microstructure, excess conductivity and pinning mechanism of BSCCO superconductor ceramics. *Applied Physics A* 2023; 129(7): 511.