



Bi-2212 Seramiklerinin Vickers Sertlik Testlerinden Çıkarılan Bazı Mekanik Özellikler Üzerine Barium Katkısının Etkisi

Effect of Barium Addition on Some Mechanical Properties Deduced from Vickers Hardness Tests of Bi-2212 Ceramics

Ali Mercan¹ , Tahsin Turgay² , Muhammed Öz^{3*} , Gürcan Yıldırım⁴ 

¹ Department of Civil Engineering, Bolu Abant İzzet Baysal University, 14200 Bolu, Turkey

² Department of Architecture, Sakarya University, 54130 Sakarya, Turkey

³ Department of Chemistry and Chemical Processing Technology, Bolu Abant İzzet Baysal University, 14900 Gerede Bolu, Turkey

⁴ Department of Mechanical Engineering, Bolu Abant İzzet Baysal University, 14200 Bolu, Turkey

Başvuru/Received: 06/10/2023 **Kabul/Accepted:** 11/11/2023 **Çevrimiçi Basım/Published Online:** 31/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2024

Öz

Bu çalışmada $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ (Bi-2212) süperiletken malzemesinin kristal matrisine farklı miktarlarda ($0.0 \leq x \leq 0.1$ arasında değişen) baryum iyonu katkılayıp üretilen yeni Bi-2212 materyallerin temel mekanik performans özelliklerinin (mikro sertlik (Hv), elastik modülü, sertlik kayma modülü, kırılma indeksi, akma dayanımı, elastik sertlik katsayısı, kırılma tokluğu, süneklik, esneklik ve dayanıklılık) değişimleri 0,245N-2,940 N uygulanan yük aralığında mikroindentasyon Vickers sertlik (H_v) testleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, kristal yapıya Ba/Bi kısmi yer değiştirme ile Bi-2212 seramik sistemin çatlak ilerlemesine karşı direnç, dayanıklı tetragonal faz, mekanik verim ve mekanik karakteristik özelliklerin değişimi belirlenmiştir. Deneysel ve teorik bulgulara göre, Bi-2212 süperiletken kristal yapının genel mekanik performansı Ba/Bi yer değiştirme miktarı $x=0,01$ 'e kadar önemli miktarda artarken bu yer değiştirme oranından sonra sistematik bir azalma gözlemlenmiştir. Bu bağlamda optimum düzeyde katılan baryum kristal yapıdaki dislokasyon hareketlerini kısıtladığı ve dislokasyon çevresindeki kafes şekil değişimine neden olduğu bulunmuştur. Dahası, optimum miktar materyal kristal kalitesinin ve taneler arasındaki bağlantının iyileşmesine neden olmuştur. Mekanik karakteristik davranışlarına incelendiğinde, tüm materyallerin tipi çentik boyut etkisi (ÇBE) karakterini sunduğu ve optimum yer değiştirme durumunda ÇBE karakteristiğinde ciddi bir gelişme olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Bi-2212 kristal sistem, Ba/Bi yer değiştirme, Kayma sistemleri, H_v , ÇBE”

Abstract

In this study, the variations of the basic mechanical performance properties (microhardness (Hv), elastic modulus, hardness shear modulus, brittleness index, yield strength, elastic hardness coefficient, fracture toughness, ductility, flexibility and durability) of new $\text{Bi}_{2.1-x}\text{Ba}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ (Bi-2212) superconducting materials produced by doping different amounts (ranging from $0.0 \leq x \leq 0.1$) of barium ions into the crystal matrix of Bi-2212 superconducting material were investigated in detail by microindentation Vickers hardness (H_v) tests in the applied load range 0.245N-2.940 N. In addition, the change of resistance to crack propagation, durable tetragonal phase, mechanical efficiency and mechanical characteristics of the Bi-2212 ceramic system with Ba/Bi partial substitution in the crystal structure was determined. According to experimental and theoretical findings, the overall mechanical performance of the Bi-2212 superconducting crystal structure increased significantly up to the Ba/Bi replacement level of $x=0.01$, while a systematic reduction was observed after this substitution ratio. Furthermore, the optimum presence of barium in the crystal lattice led to the formation of new slip systems within the structure, new bond formations between atoms, reduction of stress regions on the surface and rise at strength and fracture toughness. Besides, the optimum level resulted in improved material crystal quality and intergranular bonding. When the mechanical characteristic behavior was examined, it was found that all materials presented the typical indentation size effect (ISE) characteristic and there was a significant improvement in ISE characteristic at the optimum replacement ratio.

Key Words

“Bi-2212 crystalline system, Ba/Bi replacement, Slip systems, H_v , ISE”

1. Giriş

Enerji tüketimi gereksinimleri küresel nüfus artış oranına paralel olarak hızla artmaktadır. Böylece içeriği enerji üretimi/korunması/tüketimi gibi konuları olan yeni disiplinler ortaya çıkmaktadır. Her çıkan yeni disiplinin temel amacı artan enerji talebine doğru zamanda doğru ve hızlı cevap vermektir. Bu disiplinler arasında enerji üretim ve tüketim ile ilgilenen ve temel olarak enerji verimliliği üstüne çalışılan bilim enerji yönetimidir. Bu bağlamda en fazla enerji kayıplarının yaşandığı ve bu yüzden enerji yönetiminin kapsamı alanında bulunan en önemli sektör hiç şüphesiz malzemeye dayalı olan birimlerdir. Hal böyle olunca, birçok araştırmacı özellikle opto-elektronik, fotoaktif, elektrik ve elektronik alanlarda yüksek akım ve manyetik alan taşıyan malzemelerin geliştirilmesi üzerine çalışma yapmaktadır. Bu bağlamda, Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes tarafından civa elementinin süperiletkenlik özelliğinin keşfi (Onnes, 1911) ile bu olgu (yüksek akımı dirençsiz taşıyan sistem) bilim adamlarının ilgisini aşırı derecede çekmiştir. O tarihten bu yana süperiletken malzemeler her alanda (özellikle enerji sektöründe) kendine fazlaca yer bulmaktadır. Ancak, keşfinin ilk yıllarında süperiletkenlik üzerine çalışmalar 1930'lu yıllara kadar kayda değer bir gelişme olmadığından rutin bir şekilde gitmiştir (Onnes, 1912). 1933 yılında Meissner ve Ochsenfeld tarafından keşfedilen Meissner etkisi "süperiletken materyaller, diyamanyetik özelliğinden dolayı, sahip oldukları kritik geçiş sıcaklığı altında bir sıcaklığa kadar manyetik alanda soğutulduğunda manyetik akıyı dışarlama" tekrar bilim dünyasının gözünü bu alana çevirmesine neden oldu (Meissner&Ochsenfeld, 1933). Süperiletken malzemelerin manyetik akı dışlayıp dışlamamasına özelliklerine göre, I. tip (yumuşak) süperiletkenler ve II. tip (sert, kuprat) süperiletkenler olmak üzere iki temel sınıfa ayrılır. Bunlardan, II. tip yüksek sıcaklık kuprat süperiletkenleri I. Tipler süperiletkenlere göre daha büyük kritik sıcaklık ve akım taşımaktadır. Bilim insanları 1934 yılında I. Tip süperiletkenlerin mekanizmaları için farklı modeller geliştirerek, bu tip malzemelerin manyetik alan altında neden böyle davrandığını anlamaya çalışmışlardır. Yıl 1950'ye gelindiğinde, Ginzburg-Landau'un fenomenolojik (makroskopik) teori süperiletkenliği açıklamada büyük bir başarıya imza atmıştır. 1957 yılında ise süperiletkenlik olgusu bir grup araştırmacı (John Bardeen, Leon N. Cooper ve J. Robert Schrieffer) tarafından kuantum teorisi ile açıklanmıştır (Bardeen vd., 1957). Teoride, aralarında bir tür çekici etkileşme bulunan bağlı durumdaki iki elektron tek bir sistem oluşturacak şekilde çiftleneceği ön görülmüştür. Elektron-elektron (fononun yapıştırıcı özelliği ile açıklanan) etkileşmesinden kaynaklanan bu elektronlara Cooper çiftleri (eşit fakat zıt moment ve spinlere sahip) denilmiştir. 1962 yılında Josephson Junction (elektronun kuantum tünellemesine dayalı sistem), süperiletken materyallerin önünü teknoloji için açmıştır. Yüksek sıcaklıkta süperiletkenlik ve yüksek akım çekmesi II. tip yüksek sıcaklık kuprat süperiletkenleri, I. Tipler süperiletkenlere göre kendilerine teknoloji alanında daha çok yer bulmuşlardır. Hatta bu tip materyallerin yüksek manyetik alan uygulamalarına karşı göstermiş oldukları direnç, bilim adamlarını bu malzemeler üzerine çalışmasında itici güç oluşturmuştur. 1980'lerin ortalarında ise bilim adamları II. tip yüksek sıcaklık süperiletken seramik ailesinden (Re)BCO sistemlerini keşfetmiştir. Bu nadir toprak metali içeren süperiletken ailesi üzerine çok çalışılmış ve itriyum elementi ile hazırlanan yeni YBCO sistemin (1986–1987) geçiş sıcaklık değerinin 92 K olarak bulunması (sıvı nitrojen sıcaklığının üstünde) bilim insanlarının süperiletkenlik olgusuna bakışını ikinci kez önemli bir ölçüde çekmiştir. Bu geçiş sıcaklık değeri materyalin çalışabilmesi için soğutma işlemini 10 kat daha ucuza mal etmenin (sıvı helyum yerine sıvı nitrojen kullanılması 10 kat daha ucuz olması) yolunu açmıştır. Daha sonra bakır-oksit Bi-tabanlı, Tl-tabanlı ve Hg tabanlı sistemlerde süperiletkenlik çalışılmıştır. Bu kuprat grubundan, 20. yüzyılın sonlarında Maeda ve arkadaşları (Maeda vd. 1988) tarafından keşfedilen Bi-tabanlı materyaller uygulanabilirlik açısından endüstriyel uygulamalarda en fazla tercih edilenler arasında olmuştur. En fazla kullanım alanları içerisinde, manyetik bobin, kablo ve şerit yapma, daimi mıknatıslar, nükleer manyetik rezonans, manyetik rezonans görüntüleme, parçacık hızlandırıcılar, nükleer birleşme, enerji depolama cihazları, motor ve jeneratörler, manyetik ayırma, manyetik levitasyon treni, transformatörler ve akım sınırlama cihazları bulunmaktadır (Hermann&Yakhmi, 1994; Chen vd., 2002; Andryushin&Ginzburg, 2004; Hyun vd., 2007; Hannachi vd., 2019; Slimani vd., 2019; Yousefi vd., 2021; Orhan vd., 2022; Chen vd., 2022; Doğruer vd., 2022). Bi-tabanlı materyaller, oluşturdukları kimyasal bileşen veya birim hücredeki Cu–O₂ tabaka sayısına göre 3 farklı süperiletken faza sahiptirler. Bu fazların, süperiletken geçiş sıcaklıkları Bi–2201 (çok düşük faz) 20 K, Bi–2212 (düşük faz) 85 K ve Bi–2223 (yüksek faz) 110 K olarak belirtilmektedir (Ghahfarokhi&Shoushtari, 2010; Zalaoglu vd., 2021; Akkurt vd., 2021). Bu ailenin bireyleri arasında düşük faz olarak nitelendirilen Bi–2212 gerek morfoloji ve yapısal gerek yük taşıyıcı yoğunluğu gerekse elektrik ve süperiletkenlik özelliği bakımından diğerler iki faza göre daha üstün özelliklere sahiptir (Sarkar vd., 1989; Rhee vd., 1989; Yıldırım vd., 2012). Ancak, II. tip süperiletken materyallerin özünde var olan büyük boşluklu ve tabakalı kristal yapısı, anizotropik doğası, yük taşıyıcı yoğunluğu problemi, aşırı küçük uyum uzunluğu, oldukça büyük nüfuz derinliği, süperiletken tanecikler arası zayıf etkileşimlerin varlığı, gevreklik ve yapısal bozukluklar bu malzemelerin günümüz teknoloji, endüstri, mühendislik ve sürdürülebilir enerji alanında kullanımını engelleyen faktörler arasında yer almaktadır. Bu olumsuz sorunların çözülmesiyle II. tip süperiletken kuprat materyallerin tüm uygulama alanlarda daha etkin kullanımının önünü açılacaktır. Yapılan bilimsel araştırmalar sonucunda kuprat ailesinin elektrik, termal, termodinamik, kristal yapı kalitesi, tanecikler arası bağlantılar, akı çivileme, yüzey morfoloji ve süperiletken özelliklerin arttığı gözlemlenirken, elastik modülü, rijitlik, kırılma tokluğu, akma mukavemeti, kırılma endeksi, eğilme dayanımı ve elastik sertlik katsayısı gibi mekanik performans ve karakterizasyonunda büyük bir iyileşme olmadığı bulunmuştur. Hatta çoğu çaba ters etki yaparak bu tip malzemelerin hem elektrik ve süperiletken özelliğine ciddi zararlar vermiş hem de kırılma dayanımını arttırmış, malzemeleri daha da gevrek hale sokmuştur. Diğer bir deyişle, çalışılan süperiletken malzemenin üzerine uygulanan kuvvete karşı gösterdiği mukavemetin azalmasına ve materyalde deformasyon oluşmasına neden olmuştur. Özellikle seramik materyallerde, üretim proseslerinden kaynaklanan iç hataların varlığı ve tane sınırları dislokasyonların hızlıca artmasında önemli faktörler arasındadır. Bi-tabanlı süperiletkenlerin sert, gevrek ancak kırılma mukavemetinin büyük olması, kristal yapısındaki çok sayıda tanenin farklı yönelmeler ile dislokasyon kayma doğrultusunun taneden taneye değiştiğinden dolayıdır. Yani, malzemenin kristal örgüsünde çok sayıda aktif kayma sistemi vardır ve herhangi bir kuvvet uygulamasında birden fazla düzlem ailesinde kayma gerçekleşir. Materyalin dayanımı artar. Bu yüzden doğru malzeme hazırlama ve

katılama ile malzemenin uygulanan kuvvete karşı dayanımı ileri derecede artırılabilir. Böylece, temel kristal matristeki dislokasyonları harekete geçirmek için gerekli gerilme daha büyümüş olur. Bu bağlamda, optimum düzeyde katılama dislokasyonların tane sınırlarını geçmesini engellediği gibi dislokasyonların tane sınırlarına yığılmasını sağlar ve kristal yapıda oluşan gerilme yığılmasını azaltır. Bu bağlam yapılan bu çalışma ile Bi-2212 seramik malzemesinin temel matrisine farklı miktarlarda baryum iyonu katılarak materyalin genel mekanik özelliklerini geliştirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda temel mekanik özellikleri gelişen Bi-2212 malzemesinin ekonomik ömrünün artması ile özellikle potansiyel mühendislik, elektro-optik ve büyük ölçekli ve enerjiye dayalı endüstriyel uygulama alanlarında kendine daha fazla kullanım alanı bulabilecektir.

2. Deneysel Yöntemler

Bu çalışmada, Bi-2212 süperiletken sistemindeki Bi^{3+} iyonlarının Ba^{2+} iyonlarıyla yer değiştirmesi ile oluşan seramik malzemenin mekanik performans davranışları üzerindeki etkisi, mikrosertlik ölçümleri kullanılarak hassas bir şekilde araştırılıp baryum atomlarının mekanik performans ve karakterizasyon üzerine etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Üretim prosesine gelince, çalışılacak Bi-2212 süperiletken malzeme hazırlamada kullanılacak yüksek saflıktaki kimyasallar (BaCO_3 , Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 ve CuO) Ankara'da Alfa Aeser kimyasalları satan özel bir firmadan temin edilmiştir. Stokimetric $\text{Bi}_{2.1-x}\text{Ba}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ oranda materyal oluşturmak için yüksek saflıktaki kimyasallar (%99 \leq), belirlenen miktarlarda hassas bir tartı ile tartılmıştır. Hemen akabinde, 6 saat boyunca homojen bir karışım elde etmek amaçlı elektronik öğütücüde karıştırılmıştır. Elde edilen homojen karışımdaki kimyasallar daha küçük parçacıklara sahip ve aralarında kurulacak bağların güçlü olabilmesi için havanda yaklaşık olarak 45 dakika öğütülmüştür. Homojen ve en uygun parçacık büyüklüğüne sahip karışım kül fırında 800 °C de 24 saat boyunca ısı işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlem boyunca ısınma ve soğuma oranı kristal yapısına zarar vermemek adına 5 °C/dk olarak belirlenmiştir. Daha sonra fırından alınan tozlar dikdörtgen prizma şeklinde (15 x 5 x 2 mm) sıkıştırılarak tekrar fırına koyulup 840 °C'de 24 saat boyunca (bu tavlama değerleri Bi-2212 materyalinin en yüksek süperiletkenlik faza sahip olması için gerekli sürelerdir) ısı işleme tabi tutulmuştur. Fırından alınan ve kristal yapısına farklı molar oranda katılan ($x = 0,00, 0,01, 0,03, 0,05, 0,07, 0,10$ ve $0,03$) çalışma boyunca saf, Ba-1, Ba-2, Ba-3, Ba-4, Ba-5 ve Ba-6 olarak isimlendirilecektir. Üretilen numunelerin sertlik deney testleri normal atmosferik basınç koşullarında SHIMADZU HVM-2 model dijital test cihazı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle $\text{Bi}_{2.1-x}\text{Ba}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ materyallerin yüzeyleri dijital test cihazına dikey pozisyonda statik olarak yerleştirilmiştir. Deneyler 0,245 N ila 2,940 N aralığındaki farklı basma yükleri altında 10 s'lik periyotlar boyunca gerçekleştirilmiştir. 5 farklı yerden ölçüm alınıp, ortalama girinti köşegen uzunluklarını bulunmuştur. Hesaplanan ortalama köşegen uzunluklarına göre, $H_V = 1854.4 \left(\frac{F}{d^2}\right)$ denklemi kullanılarak numunelere ait mikro sertlik değerleri bulunmuştur. Elde edilen H_V sonuçları ile üretilen numunelere ait diğer temel mekanik performans parametreleri, elastik (Young's) modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu (K_{IC}), elastik sertlik katsayısı (C_{11}), kırılma indeksi (B), süneklik (D), kayma modülü (G) ve rezilyans (U_T) parametreleri bulunmuştur. Ayrıca, uygulanan kuvvete karşı değişen mikro sertlik değerleri, Bi-2212 kristal kafesindeki Ba safsızlıkları için Bi^{3+} parçacıklarının kısmi ikamesinin mekanik karakteristik doğaları üzerindeki rolüne belirlemede kullanılmıştır. Böylece, yüzey enerji değerine bağlı materyallerin standart girinti boyutu etkisi, ÇBE ve ters girinti boyutu etkisi, TÇBE durumu tartışılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

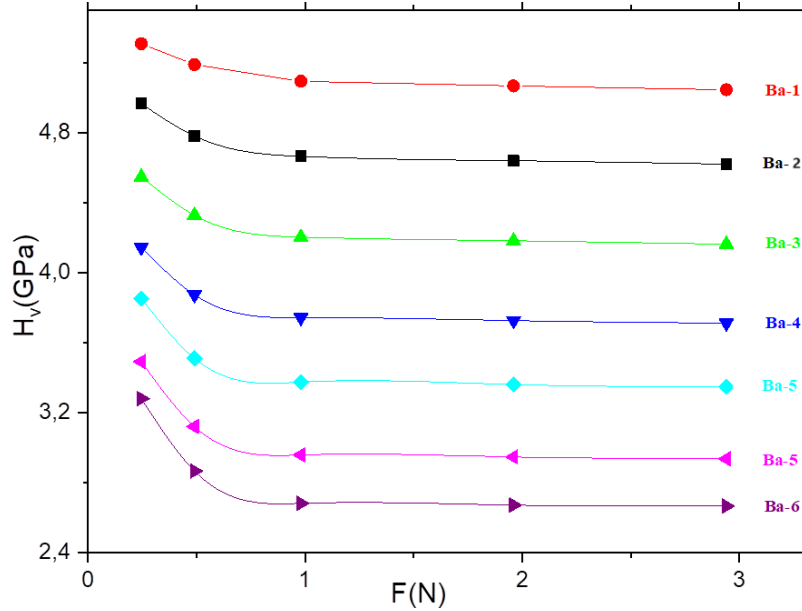
Bilindiği gibi tip-II yüksek sıcaklık süperiletkenleri, kristal yapılarında uygulanan test yükleri altında sınırlı sayıda mevcut veya çalışabilir aktif kayma sistemlerinin (kayma yönleri ve düzlemleri içeren) bulunması nedeniyle düşük mekanik özelliklere sahiptir. Bu yüzden seramik materyaller yüksek kırılma özelliği sergilerler (Abdeen vd., 2016). Seramik bileşikler üzerinde gerçekleştirilen akademik çalışmalar, mikrosertlik, mekanik dayanıklılık, kırılma tokluğu, rijitlik, elastiklik, kritik stres, kayma rijitlik modülü, elastiklik/kayma modülleri, süneklik, çekme/akma/esneme mukavemetleri, kırılma indeksi gibi temel mekanik performans miktarlarının iyileştirilmesi ile ilgilidir ve bu konuda birçok bilim insanı tarafından yıllardır önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bilindiği gibi, malzemelerin genel mekanik özellikleri süperiletken matristeki kristal yapının (mikroskobik yapısal sorunlar, çatlak başlatan kusurlar, örgü gerilim alanları, safsızlık saçılımları, kusurlar, gerilim artırıcılar, çatlaklar, geri kazanılamaz gerilim konsantrasyon bölgeleri, kalıcı geri dönüşümsüz deformasyonlar, bağlama sorunları, amplifikasyon bölgeleri ve dislokasyon yayılımları) ile ilişkilidir ve malzemede deformasyon ile uygulanan yük arasındaki bağlantıyı kurar. Bu bağlamda, çalışmaların temel odak noktaları, mikro-boşluk/tane birleşmeleri, safsızlık kalıntıları, tane hizalaması dağılımları, bozukluklar, tane yanlış yönlendirmeleri, gözeneklilik, çarpıklıklar, iç ve mikroskobik çatlaklar, yüzey çatlaklarını başlatan kusurlar, gerilim artırma bölgeleri, kısmi erime bölgeleri, örgü gerilmeleri, tane bağlama ve kristal yapısındaki etkileşim sorunlarını ortadan kaldırmaktır. Bu makalede, Bi-2212 kristal örgüde farklı molar oranda Ba/Bi yer değiştirmesinin genel mekanik özellikler üzerine etkileri 0.245 N-2.940 N aralığında Vickers mikrosertlik deneyleri ile belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Şekil. 1' de detaylı olarak verilmiştir.

3.1. Vickers Sertlik Ölçümü Sonuçları

Bir malzemenin mekanik performans davranışları (uygulanan bir yüke tepki ile deformasyon arasındaki temel bağların kurulması) kristal yapısındaki çok sayıda kusur, çatlak ve dislokasyonun hareketleriyle belirlenir. Örgüdeki hareketler, malzemelerin uygulamadaki kullanımlar için numune kalitesini doğrudan etkilemektedir. Kusurlar, çatlaklar ve çıkıklar, katılama, plastik deformasyon ve termal gerilmelere neden olan hızlı soğuma gibi işlemler sırasında tüm malzemede doğal olarak ortaya çıkmaktadır. Malzemelerde plastik deformasyona yol açan bir kuvvet uygulandığında, deformasyon enerjisinin yaklaşık %95'i ısı olarak malzeme içerisinde dağılır. Geri kalan enerjinin büyük kısmı, çarpıklıkların, kusurların ve çatlakların oluşumlarına karşılık gelen gerilim enerjisi

olarak depolanmaktadır (Callister&Rethwisch, 2013). İyi bilindiği üzere, kristal yapıdaki dislokasyonlar, atomların kristalografik düzlemleri boyunca ve kristalografik yönlere farklı zorluk derecelerinde hareket etmektedir. Bu bakımdan, dislokasyonların hareketi, mevcut kayma düzlemlerde belirli kayma yönlerini tercih ederler. Kayma düzlemi ve kayma yönlerinin birleşimine kayma sistemi denilmektedir. İlki, atomlarla en yakından dolu olan yönlere atfedilir ve yön için en yüksek doğrusal yoğunluk çizgisidir. Benzer şekilde, ikincisi en yoğun atom paketine sahip düzlemdir ve en büyük atomal yoğunluk bu düzlemlerde görülmektedir. Diğer bir deyişle, bir malzeme ne kadar çok kayma sistemine sahipse, kristal yapısında olası çeşitli sistemlerin varlığından dolayı sergilediği plastik deformasyon o kadar fazla olmaktadır. Böylece, az sayıda aktif kayma sistemine sahip seramik malzemeler oldukça kırılabilir bir yapıya sahip olmaktadır. Mevcut çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlara göre (Şekil 1), Bi-2212 kristal sisteminin mekanik performans davranışları, Ba/Bi kısmi ikame seviyesinin $x=0,01$ değerine kadar artmasıyla iyileşmiştir. Hem yeni kayma yönleri hem de kayma düzlemleri içeren yeni kayma sistemlerinin oluşturulması, dislokasyonların, kusurların ve çatlakların hareketliliğini yönlendirmeye veya azaltmaya neden olmuştur. Yani kristal kafesteki optimum Ba empürite iyonlarının, farklı yönlerdeki (gerilme alanları ve ilgili kuvvetler olarak hareket eden) dislokasyonları birbiriyle etkileşime sokmasına bağlanmaktadır. Bu nedenle, kristal yapıda optimum Ba safsızlığının varlığı, çatlak ilerlemesine karşı artan direnç nedeniyle Bi-2212 numunelerin mekanik mukavemetinin, kritik stres değerinin, sertliğinin ve dayanıklılığının (dayanıklı tetragonal faz ile ilgili) arttığını göstermektedir.

Aynı zamanda, deneysel sonuçlar, Bi-2212 kristal yapısına eklenen optimum Ba safsızlığının deformasyon testleri boyunca süperiletken tanelere uygulanan geometrik kısıtlamalar nedeniyle kaymaları başlatmak için gerekli olan çok daha büyük gerilmelere neden olduğunu doğrulamaktadır. Başka bir deyişle, optimum Ba safsızlık atomları, süperiletken tanelerin uygun şekilde yönlendirilmesine neden olarak sistemde oluşacak yüzey artık sıkıştırma gerilmelerini azaltır. Bi-2212 malzemesinin yorulma nedeniyle mukavemetinde düşmesine karşı direncin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 1. Üretilen $Bi_{2,1-x}Ba_xSr_{2,0}Ca_{1,1}Cu_{2,0}O_y$ süperiletken materyallerin Vickers (H_v) sertlik değerlerinin uygulanan girinti test yüküne göre değişimi.

Bunun yanı sıra, iyileştirilmiş mekanik dayanıklılığın temel nedenlerinden biri de Bi-2212 kristal örgü optimum baryum iyonlarının matristeki çatlakların ilerlemesinin önünde bir bariyer bölgesi olarak durmasıdır. Ayrıca, optimum baryum iyonlarının kristal yapıya nüfuz etmesi, materyalin deformasyon derecesini dramatik bir şekilde artırır. Bu nedenle çatlak büyüme boyutu ve kritik çatlak hızı değeri de mukavemetin artması ile artar.

Ayrıca, Şekil. 1, optimum baryum iyonu ile hazırlanan Bi-2212 materyali uygulanan her yük değerinde örgüdeki çatlakların ve dislokasyonların yayılıp kritik çatlak boyutuna gelmesi için en yüksek direnci sergilediği bulunmuştur. Bu bağlamda Ba-1 numunesinin kristal matrisinde bulunan çatlaklarının terminal hızı ulaştırması için en büyük yük değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Böylece Ba-1 numunesi uygulanan test yükü altında çatlakların ve dislokasyonların yayılmasına karşı en dirençli test numunesi olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, kristal örgüde optimum baryum iyonu varlığı Bi-2212 sisteminde güçlü kimyasal bağ oluşumuna ve taneler arası etkileşimin iyileştirilmesine neden olmuştur. Yani, çatlakları ve dislokasyonlar, kristal yapıda taneler arası bölgeler yerine transkristalin (tane içi) bölgeler boyunca yayılmıştır. İşte tam da bu yüzden, Bi-2212 kristal örgüye optimum baryum iyonlarının nüfuz etmesi, malzemelerin temel mekanik performans parametrelerini önemli ölçüde artırmıştır. Sonuç olarak, kayma sistemlerinin artması ile temel mekanik performans davranışları arasında güçlü bir bağlantı ortaya konulmuştur.

Numunelere ait diğer mekanik özelliklerin (elastik modülü (E), akma dayanımı (Y), kırılma tokluğu (K_{IC}), elastik sertlik katsayısı (C_{11}), kırılma indeksi (B) ve süneklik (D)) numerik değerleri aşağıdaki formüller vasıtasıyla hesaplanmış (Parinov, 2007) [21] ve elde edilen numerik değerler Çizelge 1’de detaylı olarak verilmiştir.

$$E = 81.9635H_v \quad (1)$$

$$Y \approx \frac{H_v}{3} \quad (2)$$

$$K_{IC} = \sqrt{2E\alpha} \quad (\alpha \text{ yüzey enerjisi ile ilgili bir parametredir}) \quad (3)$$

$$B = \frac{H_v}{K_{IC}} \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{B} \quad (5)$$

$$C_{11} = H_v^{7/4} \quad (6)$$

Çizelgeden görüleceği üzere, hesaplanan tüm değerlerin, uygulanan yük ve konsantrasyon seviyesine duyarlı bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir. Daha detaylı olarak, uygulanan yükün artması ile mikrosertlik değerlerinde bir azalma görülmektedir. Bu davranışın nedeni üretilen tüm numunelerin tipik çentik boyut etkisi (ÇBE) sergilemesindedir. Benzer olarak, Young modülü ve akma dayanımı değerlerinde de benzer bir davranış (uygulanan yük ile azalma) gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen mikrosertlik değerleri, kristal yapıda baryum iyonlarının bizmut iyonları ile molar değişim oranının $x=0,01$ ’e kadar artması ile ciddi bir artış bulunmuştur. Benzer şekilde $x=0,01$ katkı oranında akma dayanımı ve Young’s modülü değerlerinin herhangi bir uygulanan kuvvet altında maksimum değerlerde olduğu görülmektedir. Buna karşın, katkı oranı bu değerden arttırdıkça Vickers mikrosertlik, akma dayanımı ve Young’s modülü değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, tane büyüklüğündeki değişim ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Dahası, kırılma tokluğu ve kırılma indeksi özelliklerinin tüm numuneler için (yüzey enerji değerlerine bağlı olarak) pozitif olduğu belirlenmiştir. Çizelge 1’deki numerik değerlere bakacak olursak 0,245 N uygulama test yükünde saf numunen H_v değeri 4,966 GPa olarak bulunurken, Ba-1 materyali için bu değer 5,308 GPa (maksimum değer) olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, aynı yük altında katkı miktarlarının artması ile H_v parametresi Ba-2, Ba-3, Ba-4, Ba-5 ve Ba-6 malzemeleri için sırası ile 0,4547 GPa, 0,4144 GPa, 0,3853 GPa, 0,3491 GPa ve 0,3280 GPa olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan uygulanan yükler ve sertlik değerleri değişimi incelendiğinde yük miktarı arttıkça elde edilen sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum (uygulanan test yükünün artması ile mikrosertlik değerlerinin azalması) bize üretilen tüm malzemelerin standart ÇBE davranış gösterdiğini söylemektedir. Uygulanan yük altında materyale ait mikrosertlik değişimleri literatürdeki çalışmalar ile uyumludur (Erdem vd., 2021). Çizelge 1’de 0,2666 GPa değeri Ba-6 numunesinde 2,940 N yük altında en düşük mikrosertlik değeri olarak hesaplanmıştır. Buna karşın 2,940 N uygulanan yükte 0,5045 GPa değeri ise en büyük Vickers sertlik değeri olarak Ba-1 numunesi için kaydedilmiştir.

Elastisite modül değerlerine gelince yine Bi-2212 süperiletken kristal yapısında Ba/Bi atomlarının yer değiştirilmesi ile bu değerler ciddi değişimler göstermektedir. Bu bağlamda, molar katkı oranı $x=0,01$ için 0,245 N uygulanan kuvvette Ba-1 numunesi 43,5096 GPa ile en büyük değere sahipken uygulanan test yükünün artması ile bu numunenin Young’s modülü değeri 0,5045 GPa değerine doğru düşmektedir (2,940 N yük altında). Uygulanan ara kuvvet değerlerinde ortalama elastisite modül değerleri gözlenmiştir. Diğer yandan, saf numune için maksimum ve minimum elastik modülü değerleri 40,7023 GPa (0,245 N kuvvette)-37,8668 GPa (2,940 N yük altında) bulunmuştur. Ba-6 süperiletken numunesi ise uygulanan kuvvetler arasında en küçük Young’s modülü değerleri sergilemiştir. 0,245 N test yükü altında 26,8814 GPa ve 2,940 N kuvvette 21,8475 GPa olarak bulunmuştur. Bi-2212 süperiletken kristal yapısında Ba/Bi yer değiştirmesinin akma dayanımını üzerine etkilerine gelindiğinde üretilen tüm materyaller elastik modülüne benzer bir durum sergilemiştir. Bu bağlamda, en büyük akma dayanımı (Y) değeri 0,245 N test yükünde 0,1770 GPa olarak Ba-1 numunesinde elde edilirken en küçük akma dayanımı değeri 0,1093 GPa ile Ba-6 örneğinde görülmektedir. Benzer olarak diğer üretilen numuneler ise bu iki değer arasında akma dayanımı sergilemişlerdir. Uygulanan test yükünün artması ile elde edilen akma dayanımı değerlerinde ciddi bir düşüş kaydedilmiştir. Bu bağlamda en küçük değer 0,0889 GPa olarak 2,940 N uygulanan yük altında Ba-6 materyali için belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar göz önünde bulundurularak deney sırasında uygulanan test yüküne en hassas olan numunenin Ba-6 süperiletken numunesi olduğu saptanırken uygulanan test yüküne karşı en az hassasiyette olan materyal ise Ba-1 olarak belirlenmiştir. Diğer numuneler uygulanan test yüküne karşı bu iki materyal arasında tepki vermiştir. Abenden vd. (2016) yaptığı çalışmada benzer sonuçlar elde etmiştir (Abdeen vd., 2016).

Çizelge 1. $\text{Bi}_{2.1-x}\text{Ba}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ süperiletken materyallerin mekanik performans değerlerinin Ba/Bi yer değiştirme miktarı ile değişimi

Numuneler	F (N)	H_v (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	Kıc (kPam ^{1/2})	C_{11} (GPa) ^{3/4}	B (m ^{-1/2})	D (m ^{1/2})
Saf	0,245	0,4966	40,7023	0,5517	0,4212	0,2938	1,1790	0,8482
	0,490	0,4781	39,1871	0,5313	0,4133	0,2749	1,1568	0,8645
	0,980	0,4665	38,2325	0,5183	0,4083	0,2633	1,1427	0,8751
	1,960	0,4639	38,0268	0,5157	0,4073	0,2608	1,1390	0,8780
	2,940	0,4620	37,8668	0,5133	0,4064	0,2589	1,1369	0,8796
Ba-1	0,245	0,5308	43,5096	0,5900	0,3858	0,3301	1,3758	0,7268
	0,490	0,5189	42,5317	0,5767	0,3814	0,3172	1,3606	0,7350
	0,980	0,5094	41,7481	0,5660	0,3779	0,3072	1,3480	0,7418
	1,960	0,5067	41,5318	0,5630	0,3769	0,3043	1,3442	0,7439
	2,940	0,5045	41,3532	0,5607	0,3760	0,3020	1,3418	0,7453
Ba-2	0,245	0,4547	37,2659	0,5053	0,4266	0,2518	1,0659	0,9382
	0,490	0,4328	35,4747	0,4810	0,4162	0,2309	1,0400	0,9615
	0,980	0,4202	34,4451	0,4670	0,4101	0,2193	1,0245	0,9761
	1,960	0,4182	34,2744	0,4647	0,4089	0,2175	1,0228	0,9777
	2,940	0,4163	34,1210	0,4627	0,4079	0,2158	1,0205	0,9799
Ba-3	0,245	0,4144	33,9673	0,4603	0,4313	0,2140	0,9607	1,0409
	0,490	0,3873	31,7436	0,4303	0,4171	0,1901	0,9285	1,0770
	0,980	0,3743	30,6782	0,4160	0,4101	0,1791	0,9126	1,0958
	1,960	0,3726	30,5417	0,4140	0,4092	0,1777	0,9106	1,0982
	2,940	0,3712	30,4237	0,4123	0,4083	0,1765	0,9092	1,0998
Ba-4	0,245	0,3853	31,5807	0,4280	0,4481	0,1884	0,8599	1,1630
	0,490	0,3510	28,7662	0,3900	0,4279	0,1601	0,8204	1,2190
	0,980	0,3375	27,6603	0,3750	0,4193	0,1494	0,8049	1,2424
	1,960	0,3360	27,4424	0,3720	0,4177	0,1483	0,8043	1,2433
	2,940	0,3348	27,5429	0,3733	0,4187	0,1474	0,7996	1,2506
Ba-5	0,245	0,3491	28,6117	0,3880	0,4588	0,1585	0,7608	1,3144
	0,490	0,3120	25,5733	0,3467	0,4339	0,1302	0,7191	1,3906
	0,980	0,2958	24,2460	0,3287	0,4225	0,1186	0,7002	1,4283
	1,960	0,2947	24,1507	0,3273	0,4215	0,1179	0,6991	1,4304
	2,940	0,2936	24,0628	0,3263	0,4209	0,1171	0,6976	1,4336
Ba-6	0,245	0,3280	26,8814	0,3643	0,4734	0,1422	0,6929	1,4433
	0,490	0,2866	23,4909	0,3183	0,4427	0,1123	0,6474	1,5447
	0,980	0,2682	21,9811	0,2980	0,4282	0,1000	0,6264	1,5965
	1,960	0,2672	21,8972	0,2970	0,4272	0,0993	0,6254	1,5989
	2,940	0,2666	21,8475	0,2963	0,4269	0,0989	0,6245	1,6013

Ayrıca, Çizelge 1’de $\text{Bi}_{2.1-x}\text{Ba}_x\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{1.1}\text{Cu}_{2.0}\text{O}_y$ süperiletken materyallerin kırılma indeksi (B) ve süneklik (D) değerleri verilmiştir. Ba-1 örneği (optimum baryum iyonu ile hazırlanan) uygulanan her yükte en yüksek B değeri sergilerken Ba-6 numunesi de en düşük kırılma indeksi değeri sergilemiştir. Bu bağlamda, 0,245 N test yükünde Ba-1 süperiletken materyali 1,3758 m^{-1/2} kırılma indeksi değeri sergilerken, test yükü maksimum değerine ulaştığında B değeri 1,3418 m^{-1/2} olarak bulunmuştur. 1,3758 m^{-1/2} değeri elde edilen değerler arasında maksimum kırılma indeksi değeri olarak bulunmuştur. Tersine en küçük B değeri (0,6245 m^{-1/2}) ise Ba-6 süperiletken materyali için 2,940 N uygulanan yük altında kayda geçmiştir. Ayrıca, üretilen numunelerin süneklik (D) değerlerinin Ba/Bi yer değiştirme oranına göre değerlendirilmesine gelindiğinde, saf numune 0,245 N test yükü altında 0,8482 m^{1/2} değer sergilerken, kuvvetin artması ile numunenin süneklik değeri artmakta ve 2,940 N test yükü altında bu değer 0,8796 m^{1/2} olarak hesaplanmıştır. Optimum baryum katkılı numuneye gelince, 0,245 N test yükünde süneklik parametresi 0,7268 m^{1/2} ile üretilen tüm numuneler için en düşük değer olarak kayda geçmiştir. Bunun yanı sıra, uygulanan yük artması ile Ba-1 numunesinin süneklik değeri giderek artmakta ve 2,940 N uygulanan yük altında 0,7453 m^{1/2} olarak bulunmuştur. Kristal örgüsünde en fazla baryum bulunan materyale gelindiğinde, süneklik değeri uygulanan 0,245 N-2,940 N yük altında 1,4433-1,6013 m^{1/2} olarak bulunmuştur. Tüm numuneler arasında 1,6013 m^{1/2} süneklik değeri en düşük değer olarak bulunmuştur. Bu bağlamda, Ba-6 materyalinin en küçük mekanik mukavemet sergilediği bulunmuştur. Benzer sonuçlar literatürde de bulunmaktadır (Turkoz vd., 2019; Erdem vd., 2021).

Ayrıca, Şekil 1’den elde edilen verilerle malzemeye katılan Ba ile bunun malzemenin plato (doğunluk) bölgesine etkisi saptanmıştır. Çizelge 1 incelendiğinde her numunede Vickers sertlik değeri plato bölgesine ulaşması nedeniyle belirli bir değere kadar

hızlı bir düşüş göstermiştir. Uygulanan kuvvetteki artış devam ettiğinde kristal yapı içerisinde bulunan kusurlarda ve yukarıda belirtilen problemlerde ciddi artışlar meydana gelmektedir. Bu durumun sonucunda materyallerin mikrosertlik değerleri uygulanan belli bir değerdeki kuvvetin artması ile neredeyse sabit olarak devam eder. Maksimum baryum empürite katkılı Ba-6 numune, doyumluk bölgesine diğer katkılı numunelere göre daha az yük değerlerinde ve hızlıca ulaşır. Bu durum, Ba atomu katkı yüzdesi arttıkça mekanik dayanım, mukavemet, plastik deformasyon direnci gibi mekanik özelliklerde azalmaya yol açmaktadır. Zaten Çizelge 1 de bu bulgular (kırılma tokluğu, elastik sertlik katsayısı, kırılma indeksi ve süneklik) yer almaktadır. Aksine optimum Ba katkılı Ba-1 numunesinde, materyal üzerinde yüksek bir kuvvet uygulandığı zaman mikrosertliğin uygulanan kuvvetle değişimi grafiğinde plato bölgesi ortaya çıkar, yani plato bölgesine daha geç ulaşır. Bu bağlam, uygulanan yüke en duyarlı ve en hızlı cevap veren numunemiz en çok baryum katkılanmış Ba-6 olurken, en az duyarlı olan materyal Ba-1 olarak gözlenmiştir.

Tüm bu veriler ışığında, optimum Ba safsızlığının varlığının hem çatlak yüzey enerjisindeki azalmanın hem de kritik streteki iyileşmenin bir sonucu olarak çatlak başlatan kusurlar ve dislokasyonlar üzerine kurulu dislokasyonların yayılmasını azaltmıştır. Öte yandan, aşırı Ba yabancı safsızlığı, kusurlar, bozukluklar, bozulmalar, kafes gerilmeleri, tane yanlış yönlendirmeleri, çatlak üreten her yerde mevcut kusurlar gibi yapısal problemlerdeki hızlı artış nedeniyle kristallik kalitesini önemli ölçüde düşürmektedir.

Şekil 1'de hazırlanan tüm numuneler için 0,245 N'den 2,940 N'ye değişen yükler uygulandığında kuvvet değeri arttıkça mikro sertlik değerinin azaldığı görülmektedir. Çentik Boyutu Etkisi (ÇBE) davranışı, uygulanan yük değerlerinin artmasıyla malzemedeki çatlamların meydana gelmesi, taneler arasındaki zayıf bağlar, gözeneklilik, yapıda bozulmaların olması, tanelerin yönelmelerinde değişmelerin olması sonucu malzemenin sertlik değerlerinin azalmasıyla ifade edilmektedir. Kısaca ÇBE davranışında uygulanan yük arttıkça ölçülen mikrosertlik değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Yukarıda belirtilen sertliğin azalmasına yol açan durumlar numunenin elastik şekil değişim özelliğinin kaybolmasına yol açmaktadır. Artık sadece plastik deformasyon görünmektedir. ÇBE davranışının aksine uygulanan test yükün artmasıyla mikrosertlik değerlerinde arttığı ters çentik boyut etkisi (TÇBE) davranışı olarak bilinen durum söz konusudur.

Şekil 1 detaylı olarak incelendiğinde Ba katkısı $x=0,01$ olan Ba-1 numunesinde girinti boyutu etkisi faktörü ciddi bir iyileşme gösterirken baryum empürite katkısında $x=0,01$ değerinin üzerine çıkıldıkça girinti (çentik) boyutu etkisi davranışında önemli bir azalış meydana gelmiştir. En yüksek katkı oranına sahip Ba-6 numunesinde ise ÇBE davranışı en kötü halini alır. Yine Şekil 1'de görüldüğü üzere Ba-1 numunesinde taneler arasında bulunan iletkenlik ve gerçekleşen kristallenmenin kaliteli olması sebebiyle Vickers sertlik deneyleri sonucunda elde edilen değerler 0,245 N'den 2,940 N'ye değişen bütün yüklerde diğer Ba katkılanmış numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında, Şekil 1'de Ba-1 numunesinin optimum Ba katkısını sahip olduğu görülmektedir. Bütün numuneler ÇBE davranış sergilemektedirler. Düşük oranda Ba katkılı numunelerde H_v (Vickers mikrosertlik) sonuçlarının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Malzemedeki Ba katkı oranı optimum düzeyin üzerine çıktıkça malzeme içerisinde yukarıda belirtilen kusurlarda hızlı artış meydana gelir. Bu artış sonucunda malzemenin kristal yapısının kalitesinde düşüş görülür. Sonuç olarak çok düşük yüklerde bile oluşan çatlak kritik hıza ulaşır ve aktif hale geçtiği bulunmuştur.

3.2. Mikrosertlik Bulguları ile Uygulanan Test Yükleri Arasındaki İlişki

Daha önceki tartışmalara dayalı olarak, mikrosertlik sonuçlarının uygulanan test yükleri ile değişimi arasında güçlü bir bağlantı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, farklı baryum katkılama oranlarında hazırlanan Bi-2212 materyallerin mikrosertlik parametrelerinin uygulanan yük bağımlılığını belirtmek için en yüksek R^2 ilişki değerlerinden elde edilen üçüncü derece formüllerden hesaplanan uygun denklemleri elde edildi. Her bir örnek için türetilen denklemler Çizelge 2'de detaylı olarak verilmiştir.

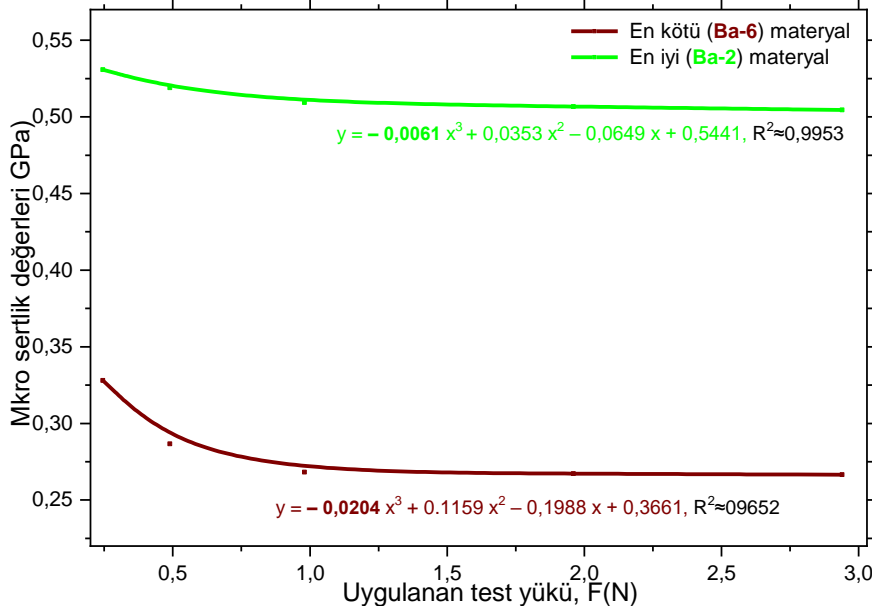
Çizelge 2 Tüm $Bi_{2,1-x}Ba_xSr_{2,0}Ca_{1,1}Cu_{2,0}O_y$ materyallerin mikro indentasyon sertlik parametrelerinin uygulanan test yüklerine bağımlılığı

<i>Numuneler</i>	<i>*Ba/Bi yer değiştirmiş numunelerin sertli değerlerine göre denklemleri</i>
Saf	$y = -0,0092 x^3 + 0,0530 x^2 - 0,0947 x + 0,5154$
Ba-1	$y = -0,0061 x^3 + 0,0353 x^2 - 0,0649 x + 0,5441$
Ba-2	$y = -0,0110 x^3 + 0,0631 x^2 - 0,1108 x + 0,4765$
Ba-3	$y = -0,0133 x^3 + 0,0758 x^2 - 0,1313 x + 0,4398$
Ba-4	$y = -0,0164 x^3 + 0,0932 x^2 - 0,1594 x + 0,4155$
Ba-5	$y = -0,0182 x^3 + 0,1035 x^2 - 0,1773 x + 0,3830$
Ba-6	$y = -0,0204 x^3 + 0,1159 x^2 - 0,1988 x + 0,3661$

*Numunelerin uyum parametreleri en yüksek korelasyon değerleri olarak belirlenmiştir.

Eksi işareti, tüm $Bi_{2,1-x}Ba_xSr_{2,0}Ca_{1,1}Cu_{2,0}O_y$ materyallerin tipik İSE özelliğinden kaynaklanmıştır. Tablodan görüleceği üzere, tüm örnekler için mikrosertlik sonuçlarının uygulanan test yüklerine çok güçlü bir bağımlılığı (x^3 teriminin katsayısı) olduğu açıktır. Kristal örgüde baryum katkı oranı artması ile x^3 teriminin katsayısı öncelikle düşmüş, ancak daha sonra katsayıda ciddi bir artış gözlenmiştir. Bu bağlamda, özellikle kristal yapısında en yüksek baryum iyonu barındıran materyal, en yüksek x^3 katsayısı ile (0,0204) uygulanan dış kuvvete karşı en fazla duyarlılık (bağımlılık) sergileyen numune olarak bulunmuştur. Buna karşın, en küçük katsayı değeri olan

0,0061'e sahip Ba-2 örneği, uygulanan test yüküne karşı en az duyarlılığı sergilemiştir (Şekil 2). Başka bir deyişle, Ba-2 malzemesi uygulanan test yükleri altında çatlak büyüme boyutunu ve çatlak hızını daha iyi kontrol etmiştir. Tam tersine, daha düzensiz bir kristal yapıya sahip ve daha düşük kristallik kalitesine sahip Ba-6 malzemesi, sistemin içinde bile daha düşük bir uygulanan test yükü altında bile kalıcı kristal yapı sorunlarının, yeni çatlak başlatıcı kusurların ve geri dönüşü olmayan gerilme yoğunlaşma bölgelerinin oluşumu nedeniyle uygulanan test yüklerine en duyarlı olanı sunmuştur. Kristal yapıya eklenen kirlilik ile bu değişimlerin gözlemlendiği literatürde de not edilmiştir (Erdem vd., 2021). Aynı zamanda, x^3 teriminin katsayısı, optimum baryum iyon katkısının materyal yüzeyinde kalıcı sıkışma gerilimi bölgelerinin veya yeni kristal yapı sorunlarının (boşluk ve çatlaklar/dislokasyonlar arasındaki etkileşimi tetikleyen) oluşumuna yol açtığını göstermiştir. Bu nedenle, çatlaklar/dislokasyonlar kristal örgüdeki bazı gerilme alanı bölgelerini iptal etmek için genel gerilme enerjisini azaltmaktadır. Sonuç olarak, kayma direnci çok daha büyük olur ve çatlakların ve dislokasyonların mümkün olduğunca sınırlanır (Turkoz vd., 2019).



Şekil 2. En yüksek ve en düşük mekanik performans sergileyen Ba-1 ve Ba-6 materyallerin uygulanan test yüklerine duyarlılığı

4. Sonuçlar

Bu çalışma Bi-2212 kristal yapısında farklı mol oranlarında ($0,0 \leq x \leq 0,1$) bismut ve baryum değişimine dayanan yeni Bi-2212 sistemlerin Vickers sertlik testleriyle temel mekanik performans parametrelerinin ve dayanıklı tetragonal fazın değişimini üzerine odaklanmaktadır. 0,245N-2,940 N uygulanan yük aralığında elde edilen mikrosertlik değerlerinden, yeni üretilen Bi-2212 malzemelerinin elastik modülü, sertlik kayma modülü, kırılma indeksi, akma dayanımı, elastik sertlik katsayısı, kırılma tokluğu, süneklik, esneklik ve mekanik dayanıklılığı detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, tüm mekanik performans değerlerinin ciddi şekilde değiştiğini bulunmuştur. Baryum iyonlarının optimum katkı seviyesinde ($x=0,01$) olduğunda Bi-2212 kristal yapısı en yüksek mekanik performans parametrelerini ve dayanıklı tetragonal fazı sergilediği belirlenmiştir. Bi-2212 kristal sisteminin mekanik performans davranışları, Ba/Bi kısmi ikame seviyesinin $x=0,01$ 'e kadar artmasıyla iyileştiği bulunmuştur. Bunun sebebi, yeni kayma yönleri ve düzlemleri içeren kayma sistemlerinin olması, dislokasyonların, kusurların ve çatlakların hareketliliğini yönlendirmeye veya azaltmaya yardımcı olmuştur. Bu çalışmada optimum Ba konsantrasyon seviyesi ($x=0,01$ olduğunda) Bi-2212 süperiletken seramiklerin uygulama alanları için malzeme kalitesini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Böylece, elde edilen sonuçlar Bi-tabanlı süperiletken malzemenin enerji teknolojisi, endüstri, büyük ölçekli mühendislik, gelecek ve ticari uygulamaları için, baryum elementinin uygun oranda kullanımının önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Referanslar

- Abdeen, W., Marahba, S., Awad, R., Abou Aly, A. I., Ibrahim, I. H., & Matar, M. (2016). Electrical and mechanical properties of (Bi, Pb)-2223 substituted by holmium. *Journal of Advanced Ceramics*, 5, 54-69. doi.org/10.1007/s40145-015-0173-x
- Akkurt, B., Erdem, U., Zalaoglu, Y., Ulgen, A. T., Turgay, T., & Yildirim, G. (2021). Evaluation of crystallographic and electrical-superconducting features of Bi-2223 advanced ceramics with vanadium addition, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 32, 5035–5049.
- Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (1957). Theory of superconductivity. *Physical review*, 108(5), 1175. doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175

Callister Jr, W. D. (2007). *Materials science and engineering an introduction*.

- Chen, M., Paul, W., Lakner, M., Donzel, L., Hoidis, M., Unternaehrer, P., Weder, R & Mendik, M. (2002). 6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor. *Physica C: Superconductivity*, 372, 1657-1663. doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01096-1
- Chen, X., Gou, H., Chen, Y., Jiang, S., Zhang, M., Pang, Z., & Shen, B. (2022). Superconducting fault current limiter (SFCL) for a power electronic circuit: experiment and numerical modelling. *Superconductor Science and Technology*, 35(4), 045010. doi.org/10.1088/1361-6668/ac5504
- Dogruer, M., Yildirim, G., & Terzioglu, C. (2022). Evolution of electrical, superconducting, crystallinity and structural features with aliovalent Nd/Sr replacement in Bi-2223 ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 288, 126350. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126350
- Erdem, U., Akkurt, B., Ulgen, A. T., Zalaoglu, Y., Turgay, T., & Yildirim, G. (2021) Effect of annealing ambient conditions on crack formation mechanisms of bulk Bi-2212 ceramic systems, *J. Asian Ceram. Soc.* 9, 1214-1227.
- Ghahfarokhi, S. M., & Shoushtari, M. Z. (2010). Structural and physical properties of Cd-doped Bi_{1-x}Pb_xSr₂Ca_{2-y}Cu₃O_y superconductor. *Physica B: Condensed Matter*, 405(22), 4643-4649. doi.org/10.1016/j.physb.2010.08.053
- Ginzburg, V. L., & Andryushin, E. A. (2004). *Superconductivity (Revised Edition)*. World Scientific.
- Hannachi, E., Slimani, Y., Ekicibil, A. H. M. E. T., Manikandan, A., & Azzouz, F. B. (2019). Magneto-resistivity and magnetization investigations of YBCO superconductor added by nano-wires and nano-particles of titanium oxide. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 8805-8813. doi.org/10.1007/s10854-019-01205-3
- Hermann, A.M. Yakhmi, J.V. (1994). *Thallium-Based High-Temperature Superconductors*. Marcel Dekker.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M., & Asano, T. (1988). A new high-T_c oxide superconductor without a rare earth element. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27(2A), L209. doi.org/10.1143/JJAP.27.L209
- Meissner, W., & Ochsenfeld, R. (1933). Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*, 21(44), 787-788.
- Oh, S. Y., Kim, H. R., Jeong, Y. H., Hyun, O. B., & Kim, C. J. (2007). Joining of Bi-2212 high-T_c superconductors and metals using indium solders. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 463, 464-467. doi.org/10.1016/j.physc.2007.05.040
- Onnes, H. K. (1911). Further experiments with liquid helium. C. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperatures etc. IV. The resistance of pure mercury at helium temperatures. In *KNAW, Proceedings (Vol. 13, pp. 1910-1911)*.
- Onnes, H. K. (1912). Further experiments with Liquid Helium G. On the electrical resistance of Pure Metals etc. VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears. *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences*, 14, 818-821.
- Orhan, E., Kara, E., Kaya, Ş., Doğan, M. U., Terzioğlu, R., Yildirim, G., & Terzioğlu, C. (2022). Refinement of some basic features of Zr surface-layered Bi-2223 superconductor with diffusion annealing temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(26), 20696-20712. doi.org/10.1007/s10854-022-08880-9
- Parinov, I. A. (2013). *Microstructure and properties of high-temperature superconductors*. Springer Science & Business Media.
- Rhee, C. K., Kim, C. J., Lee, H. G., Kuk, I. H., Lee, J. M., Chang, I. S., ... & Won, D. Y. (1989). Effects of Pb content on the formation of the high-T_c phase in the (Bi, Pb)-Sr-Ca-Cu-O system. *Japanese journal of applied physics*, 28(7A), L1137. doi.org/10.1143/JJAP.28.L1137
- Sarkar, A. K., Maartense, I., Peterson, T. L., & Kumar, B. (1989). Preparation and characterization of superconducting phases in the Bi (Pb)-Sr-Ca-Cu-O system. *Journal of Applied Physics*, 66(8), 3717-3722. doi.org/10.1063/1.344056
- Slimani, Y., Almessiere, M. A., Hannachi, E., Baykal, A., Manikandan, A., Mumtaz, M., & Azzouz, F. B. (2019). Influence of WO₃ nanowires on structural, morphological and flux pinning ability of YBa₂Cu₃O_y superconductor. *Ceramics International*, 45(2), 2621-2628. doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.201
- Turkoz, M. B., Zalaoglu, Y., Turgay, T., Ozturk, O., & Yildirim, G. (2019). Effect of homovalent Bi/Ga substitution on propagations of flaws, dislocations and crack in Bi-2212 superconducting ceramics: Evaluation of new operable slip systems with substitution. *Ceramics International*, 45(17), 22912-22919. doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.334

Turkoz, M. B., Zalaoglu, Y., Turgay, T., Ozturk, O., Akkurt, B., & Yildirim, G. (2019). Evaluation of key mechanical design properties and mechanical characteristic features of advanced Bi-2212 ceramic materials with homovalent Bi/Ga partial replacement: Combination of experimental and theoretical approaches. *Ceramics International*, 45(17), 21183-21192.

Yildirim, G., Varilci, A., Akdogan, M., & Terzioglu, C. (2012). Role of annealing time and temperature on structural and superconducting properties of (Bi, Pb)-2223 thin films produced by sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 23, 928-935. doi.org/10.1007/s10854-011-0522-7

Yousefi, S. R., Ghanbari, M., Amiri, O., Marzhoseyni, Z., Mehdizadeh, P., Hajizadeh-Oghaz, M., & Salavati-Niasari, M. (2021). Dy₂BaCuO₅/Ba₄DyCu₃O₉. 09 S-scheme heterojunction nanocomposite with enhanced photocatalytic and antibacterial activities. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(7), 2952-2965. doi.org/10.1111/jace.17696

Zalaoglu, Y., Erdem, U., Bolat, F. C., Akkurt, B., Turgay, T., & Yildirim, G. (2021). Improvement in fundamental electronic properties of Bi-2212 electroceramics with trivalent Bi/Tm substitution: a combined experimental and empirical model approach. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1-13.