



Sn-Ba-Cu-O seramiklerin manyetik kaldırma ve manyetik sertlik performansının ZnO katkılmasına bağlı gelişimi

Development of magnetic levitation and magnetic hardness performance of Sn-Ba-Cu-O ceramics due to ZnO doping

Selva Büyükakkaş^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Farklı oranlarda Cu/Zn katkılanarak katı-hal tepkime yöntemiyle sentezlenen $\text{Sn}_2\text{Ba}(\text{Cu}_{2-x}\text{Zn}_x)_2\text{O}_y$ seramiklerin yapısal özellikleri önceki çalışmamızda incelendi. Bu çalışmada, 470 mT yüzey manyetik alan şiddetine sahip kalıcı mıknatıs kullanılarak manyetik kaldırma kuvveti (MLF) ölçümleri gerçekleştirildi. Mıknatıs ile seramik malzeme arasındaki kuvvet ölçümünde, statik olarak düşey eksenindeki mesafenin fonksiyonu olarak önemli histerezis davranış gözlemlendi. Sıfır alan soğutması (ZFC) ve alan soğutması (FC) şartlarında, katkılamanın kuvvet ölçümleri ve manyetik sertlik hesaplamalarına etkisine odaklanıldı. ZFC'de katkı artışıyla kuvvetin azalması, tane sınırlarındaki zayıf bağlar, çatlaklar ve tane boyutu küçülmesi ile açıklandı. ZFC'de kuvvet eğrilerinden, manyetik sertlik hesaplamaları yapıldı. FC'de katkının artması ile etkili olması gereken kaldırma kuvveti, akı yakalama merkezlerinin ortaya çıkması ile yerini çekici kuvvete bıraktı. Ayrıca, FC'de 3 döngülü kuvvet eğrilerinden, numunelerin duyarlı olduğu aralık 0-35 mm olarak belirlendi. Katkılama manyetik sertlik değerlerinde azalmaya neden oldu. FC'de, kuvvet eğrileri bütünsel değerlendirildiğinde, katkının maksimum itici ve çekici kuvveti artırdığı ve itici kuvvetin maksimum 0.7 mN'a, çekici kuvvetin ise maksimum 3.25 mN'a ulaştığı görüldü.

Anahtar kelimeler: Manyetik kaldırma kuvveti, Manyetik sertlik, Sn-Ba-Cu-O, Alan altında soğutma (FC), Alansız soğutma (ZFC)

1 Giriş

Malzeme içerisinde akımın fark edilebilir bir enerji kaybı olmadan gerçekleşmesi olarak bilinen süperiletkenlik, yirminci yüzyılın en büyük bilimsel keşiflerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu olayın keşfinden sonra, her bir malzemeye özgü süperiletken geçiş sıcaklığı olan kritik sıcaklığın (T_c) altında soğutma ile elektrik direncin aniden sıfıra düşmesi olayı vuku bulmuştur [1].

Sıfır dirence ve mükemmel diamanyetizmaya sahip süperiletken malzemeler 1911 yılında H.K. Onnes tarafından keşfedilmiştir. Meissner ve Ochsenfeld 1933'de, yaptıkları çalışmayla T_c kritik sıcaklığının altında Sn ve Pb'un

Abstract

The structural properties of $\text{Sn}_2\text{Ba}(\text{Cu}_{2-x}\text{Zn}_x)_2\text{O}_y$ ceramics synthesized by solid-state reaction method with different Cu/Zn doping ratios were investigated in our previous study. In this study, magnetic levitation force (MLF) measurements were performed using a permanent magnet with a surface magnetic field strength of 470 mT. In the force measurement between the magnet and the ceramic material, significant hysteresis behavior was observed statically as a function of the distance in the vertical axis. We focused on the effect of doping on force measurements and magnetic stiffness calculations under zero field cooling (ZFC) and field cooling (FC) conditions. The decrease of force with increasing doping in ZFC is explained by weak bonds at grain boundaries, cracks and grain size reduction. Magnetic stiffness calculations were made from the force curves in ZFC. The levitation force, which should be effective with the increase in doping in FC, was replaced by an attractive force with the emerge of flux trapping centers. In addition, from the 3-cycle force curves in FC, the range in which the samples are sensitive was determined as 0-35 mm. The doping caused a decrease in magnetic stiffness values. In FC, when the force curves were evaluated holistically, it was seen that the doping increased the maximum repulsive and attractive force and the repulsive force reached a maximum of 0.7 mN and the attractive force reached a maximum of 3.25 mN.

Keywords: Magnetic levitation force, Magnetic stiffness, Sn-Ba-Cu-O, Field cooled (FC), Zero field cooled (ZFC)

manyetik alan içerisinde, mükemmel iletken gibi davranmadıklarını keşfetmişlerdir [2, 3]. Süperiletkenliğin keşfinden 1986 yılına kadar geçen zamanda geçiş sıcaklığı ile ilgili araştırmalar oldukça azdır. 1986 yılında Bednorz ve Müller tarafından yüksek sıcaklık süperiletken seramiklerin (HTSC) keşfi ile birlikte maliyetinin büyük ölçüde düşmesi neredeyse her alanda uygulanabilirliği ve bu konu üzerine yapılan çalışmaların günbegün artmasına sebep olmuştur [4].

Bir mıknatısın süperiletken üzerinde havalanması evrensel olarak gözlemlenen ve süperiletken uygulamalar için dikkat çekici özelliklerden biridir [5]. Tek kristalli YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) süperiletkenler,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sakkaş@ohu.edu.tr (S. Büyükakkaş)

Geliş / Received: 01.06.2025 Kabul / Accepted: 28.06.2025 Yayınlanma / Published: 15.07.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1711432

yüksek kritik sıcaklıkları, güçlü akı tuzaklama kapasiteleri, yüksek manyetik kaldırma kuvvetleri ve kararlı süspansiyon özellikleri sayesinde, günümüzde dünya genelinde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu üstün manyetik özellikleri sayesinde, YBCO süperiletkenler; yüksek alanlı sabit mıknatıslar, manyetik yataklar, volan sistemleri, elektrik motorları, jeneratörler, maglev (manyetik levitasyon) sistemleri ve havada asılı ulaşım teknolojileri gibi pek çok ileri mühendislik uygulamasında büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, süperiletken volan enerji depolama sistemleri, yüksek devirli rotorlar için sürtünmesiz yatak çözümleri, güç elektroniği devreleri ve kompozit malzeme tasarımları da bu teknolojinin öne çıkan kullanım alanları arasında yer almaktadır. Yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) teknolojisi, özellikle rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte, süperiletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemleri ve volan teknolojileri aracılığıyla, akıllı şebekeler üzerinden çeşitli endüstriyel uygulamalara entegre edilebilecek önemli bir enerji depolama çözümü sunmaktadır [6, 7].

Bu tür uygulamaların temelinde yer alan manyetik kaldırma olgusu, süperiletkenlerin mükemmel diamanyetik davranışları ve Meissner etkisi ile ilişkilidir. Bu durum, süperiletken malzeme içerisinde manyetik akının hapsolması yoluyla fiziksel olarak açıklanmaktadır [8].

Birçok araştırmacı tarafından süperiletkenliğin temel mekanizmalarının anlaşılması ve geliştirilmesi amacıyla HTS malzemeler ile kalıcı mıknatıslar arasındaki manyetik kuvvet etkileşimi detaylı bir şekilde incelenmiştir [9,10]. Manyetik kuvvet hesaplamaları genellikle Bean'ın kritik durum modeline [11] dayanmaktadır. Daha sonra Johansen vd, teorik sonuçların deneysel verilerle uyumunu ortaya çıkarmak için Bean modelini genişletmişlerdir [12]. Bean modeli, aynı zamanda manyetik kaldırma kuvvetinin deneysel ölçümlerini açıklama konusunda da başarıyla uygulanmıştır [13].

Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri, yüksek sıcaklık süperiletken malzeme ile kalıcı mıknatıs arasındaki düşey mesafenin değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Kritik akım yoğunluğu ve mıknatıslanma gibi karakteristik özelliklerin belirlenmesine yönelik süperiletken çalışmaları kapsamında, bir, iki veya üç boyutlu olarak tasarlanmış kaldırma kuvveti ölçüm sistemlerinden yararlanılmaktadır [14–17].

Süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki kuvvet yerçekiminin tersi yönde belirlendiğinden, en yaygın kullanılan ölçüm sistemi süperiletken veya kalıcı mıknatısın ağırlığını dengeleyen düşey mesafenin değiştiği ölçüm sistemidir [18].

Kuvvet ölçümlerini etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır. Bunlar arasında numune kalınlığı [19,20] ile mıknatısların boyutları ve düzeni [21,22], kritik akım yoğunluğu, tane boyutu [23], soğutma sıcaklığı [24], tane yönelimi [25, 26], numunenin mıknatısa yaklaşma hızı [27] yer almaktadır. Savaşkan vd [28], MgB_2 süperiletkeni üzerinde, 33 K ve 37 K sıcaklıklarda alan soğutmalı ve sıfır alan soğutmalı şartlarında manyetik kaldırma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sıfır alan soğutmalı durumda ve 33 K sıcaklıkta, en yüksek kuvveti değeri 28.76 N olarak

ölçülmüştür. Süperiletkenlerin kullanıldığı kaldırma sistemlerinde manyetik sertlik davranışına ilişkin ilk çalışmalar ise Moon vd tarafından gerçekleştirilmiştir [29].

Dış çevre koşullarının etkisiyle araç gövdesinin düşey eksenindeki konumunda meydana gelen değişkenlikler, Maglev sistemlerinin kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olduğundan, sistem performansının düşey doğrultuda detaylı bir şekilde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır [30]. Bunu dikkate alarak 77 K sıvı azot sıcaklığında alanlı ve alansız soğutmalı şartlarda, farklı yüksek sıcaklık süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki düşey doğrultuda manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri ve manyetik sertlik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Süperiletkenlerin sıfır alan ve alan soğutma şartları etkisinde kalıcı mıknatısa duyarlı olduğu aralık belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen manyetik kaldırma kuvveti verilerinin fit edilmesi sonucunda, sistemin teorik beklentilerle uyumlu davrandığı ortaya konmuştur. Elde edilen bulguların, günümüzde yüksek öneme sahip olan yüksek sıcaklık süperiletken tabanlı Maglev sistemlerinin teknolojik uygulamalarına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

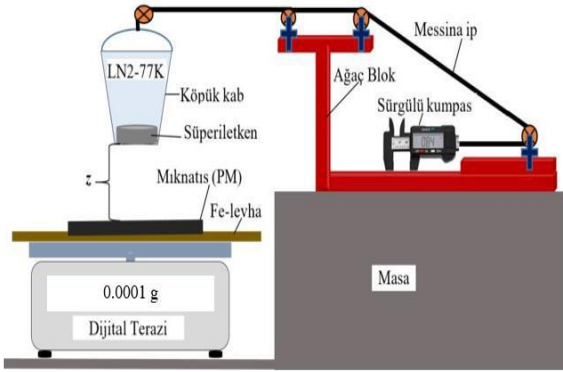
2 Materyal ve yöntem

$Sr_{1-x}Ba_x(Cu_{1-x}Zn_x)_2O_y$ ($x = 0.0, 0.4, 0.8, 1.0$) nominal kompozisyona sahip yüksek sıcaklık seramikler katı-hal reaksiyon yöntemiyle sentezlenmiştir. Zn katkılanması yapılmak suretiyle S0, S4, S8, S10 şeklinde etiketleme yapılan seramik malzemelerin yapısal özellikleri katkıya bağlı olarak incelenmiştir. Yapısal analizler sonucunda, saf ve katkılanmış numunelerde kristalografik parametreler, ortalama kristalit boyutu, faz dönüşümü ve tane yapıları belirlenmiştir. Saf numune küçük taneli, sürekli gözenekli bir yapıya sahipken, katkılanmış numunelerde tanelerin büyüdüğü ve gözenekliliğin azaldığı gözlenmiştir. S0 numunesindeki birincil ortorombik 1212 fazı, S10 numunesinde en yoğun tetragonal 211 fazına dönüşmüştür. Buradan Zn katkısının ortorombik 1212 fazının yapısını bozduğu ve tetragonal 211 fazının gelişimi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Cu yerine Zn katkılanması, kafes parametrelerinde monoton olmayan bir değişime neden olmuştur. ZnO katkı maddesindeki artışla kristal hacminde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bu durum, Zn ve Cu elementlerinin benzer iyonik yarıçapları ve değerlik durumlarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, ortorombik ve tetragonal fazlarda kristal hacimler arasında önemli bir fark olmamakla birlikte, tetragonal fazın kristal hacminin ortorombik faza göre biraz daha büyük olduğu belirlenmiştir. Önceki çalışmada belirtildiği gibi ZnO katkısıyla ortorombik fazdan tetragonal faza geçiş % 15 civarında görülmüştür [31]. Bu da süperiletkenlerde oldukça düşük faz dönüşümü anlamına gelir. Levitasyon ölçümlerinde de bu düşük faz dönüşümünün etkisi görülmüştür.

2.1 Deneysel düzenek

Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri, Şekil 1.'deki deneysel düzenek kullanılarak, S0, S4, S8 ve S10 şeklinde etiketlenen seramik malzemelerin her biri için, 470 mT değerindeki kalıcı mıknatıs etkisinde statik olarak Şekil 2.'

de görüldüğü gibi düşey ekseninde değişen mesafeye bağlı olarak ele alınmıştır.



Şekil 1. Süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki manyetik kaldırma kuvveti ölçüm düzeneği [32]



Şekil 2. Sıvı azot ile soğutulmuş süperiletkenin kalıcı mıknatısa uyguladığı manyetik kaldırma kuvveti [27, 33]

Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm düzeneği kalıcı mıknatıs, 0.001 g hassasiyetli dijital terazi, ana yapıya monte edilmiş 0.01 mm hassasiyetli dijital kumpasla hareket ettirilen asansör sistemi ve sıvı azot, seramik numuneyi taşıyan çevresi alüminyum folyo kaplı köpük yalıtım kabından oluşmaktadır. Deneysel düzeneğin kurulumundan sonra, dijital terazi ve kumpas ayarlaması yapılmıştır. Manuel olarak ölçüm yapılan sistemde her bir malzeme 77 K sıvı azot sıcaklığında soğutulmuştur.

2.2 Deneysel yöntem

Alanlı soğutma ve alansız soğutma şartları altında silindirik yapılı seramik malzemelerin merkez normal çizgisi tüm deney boyunca kalıcı mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın düşey bileşeninin tepe çizgisi ile aynı düzlemde olacak şekilde ayarlanmıştır. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri, seramik malzeme ile kalıcı mıknatıs arasındaki mümkün olan en küçük yaklaşma mesafesi olan 2.5 mm'den maksimum 55 mm'ye kadar periyodik olarak gerçekleştirilmiştir.

Alansız soğutma şartında, kalıcı mıknatıstan 55 mm düşey mesafede bulunan seramik malzeme alüminyum folyo ile yalıtılmış sıvı azot dolu köpük kabın içerisine konulmuştur. Kaldırma kuvveti ölçümleri, ısı dengeye

ulaştıktan sonra, yaklaşma süreci boyunca 55 mm'den 1 mm'ye ve uzaklaşma süreci boyunca 1 mm'den 55 mm'ye kadar periyodik ölçümler alınmak suretiyle yaklaşık 10 s'lik gevşeme süresi boyunca bekleyerek yapılmıştır.

Alanlı soğutma şartı altında, alüminyum folyo ile ısıca yalıtılmış köpük kabı olası en minimum mesafeye (~2.5 mm) kadar kalıcı mıknatısa yaklaştırılmıştır. Seramik malzeme kabın içerisine konulmuş ve manyetik dengeye gelmesi için bir süre bekletilmiştir. Köpük kabı sıvı azotla doldurulmuş ve 10-15 dk boyunca manyetik dengelenmenin sağlanması için seramik malzeme kalıcı mıknatısın etkisinde bırakılmıştır. Saf ve katkılı malzemeler sistemin el verdiği en yakın mesafe olan 2.5 mm'den başlayarak 55 mm'ye kadar periyodik olarak manyetik alandan uzaklaştırılmıştır. Her bir ölçüm manuel olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler periyodik bir şekilde yaklaşma süreci boyunca 2.5 mm'ye kadar devam etmiştir.

Alanlı soğutma şartları altında seramik malzemelerin akı tuzaklarının daha belirgin bir biçimde incelenebilmesi için düşey yaklaşma ve uzaklaşma döngüsüne iki döngü daha eklenerek 3 döngülü çalışma yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Manyetik kaldırma kuvveti, bir süperiletkenin üretim yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Özellikle eriyik büyütme yöntemiyle üretilen süperiletkenlerde bu kuvvet oldukça yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, 77 K sıcaklığında ölçülen tek taneli süperiletkenlerin oluşturduğu kaldırma kuvveti, kullanılan kalıcı mıknatısın boyutuna bağlı olarak yaklaşık 50–150 N arasında değişmektedir [34, 35]. Bu değerler, süperiletkenler ile mıknatısların birlikte kullanılması durumunda birkaç tonluk yüklerin havaya kaldırılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Süperiletkenlerin ürettiği kaldırma kuvveti $F = m \frac{dH}{dx}$, $m = MV$, $M = AJ_c r$ ile verilmektedir [36]. M birim hacim başına mıknatıslanma, J_c yüksek sıcaklık süperiletkenin kritik akım yoğunluğu, m süperiletkenin manyetik momenti, $\frac{dH}{dx}$ kalıcı mıknatısın oluşturduğu manyetik alan gradyenti, A , süperiletkenin geometrisine bağlı bir sabit ve r süperiletken numunenin oluşturduğu diamanyetik akım halkasının yarıçapıdır. Manyetik kaldırma kuvveti J_c akım yoğunluğu ve süperiletkenin tane boyutu (r) ile orantılıdır. J_c ve r 'ye ek olarak, süperiletkenin boyutu, ölçüm için kullanılan mıknatısın manyetik gücü ve süperiletkenler için soğutma yöntemi gibi diğer deneysel parametreler de manyetik kaldırma kuvvetini etkiler [37, 38]. Bu bağlamda, süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki etkileşimi hem teorik hem de deneysel olarak inceleyen çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir [28, 39-41].

3.1 Alansız soğutma altında Sn-Ba-Cu-O sisteminin manyetik kaldırma kuvveti özellikleri

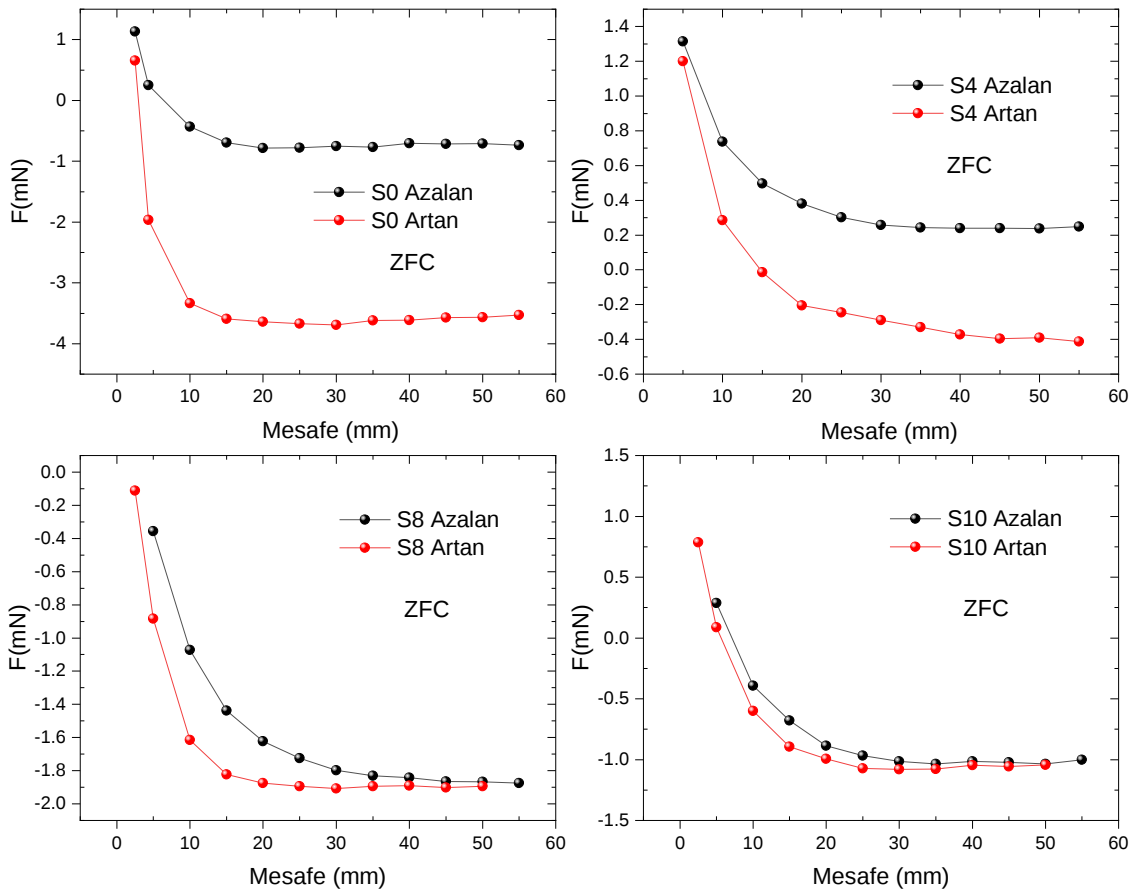
Süperiletken kaynaklı olarak numune boyutu, tane yönelimi, tane yarıçapı, kritik akım yoğunluğu, soğutma sıcaklığı ve soğutma yöntemi gibi faktörler manyetik kaldırma kuvvetini etkiler. Kalıcı mıknatısın manyetik kaldırma kuvvetine etkisi ise manyetik alan dağılımı ve manyetik akı yoğunluğu gibi faktörlere bağlıdır. Kaldırma

kuvvetini oluşturan iki ana unsur süperiletken ve kalıcı mıknatıs olmasına rağmen, ortaya ortak tek bir kaldırma kuvveti çıkar. İtici ve çekici kuvvetlerin oluşması, manyetik kaldırma kuvveti ölçümünde süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki düşey mesafenin artırılması (uzaklaşma) ve azaltılması (yaklaşma) ile mümkündür [37]. Süperiletkenlerin manyetik kaldırma kuvveti süperiletkenlerin soğutma yöntemine bağlıdır. Hiçbir dış manyetik alanın olmadığı alansız soğutma altında süperiletken mükemmel diamanyetik duruma sahiptir. Süperiletkenler mıknatısın manyetik alanını iterler [42]. Alansız soğutma şartında süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki en büyük itici kuvvet sıfıra en yakın mesafede ortaya çıkar. Çekici kuvvet, süperiletkendeki tuzaklanan manyetik alan ile kalıcı mıknatıs arasında oluşan manyetik etkileşim nedeniyle mesafenin artışıyla gerçekleşir. Malzemenin yapısında üretimden kaynaklı oluşan çatlaklar ve zayıf bağlar manyetik kaldırma kuvvetinde azalmaya neden olurken, akı çivileme merkezlerinin sayısındaki artış süperiletken içerisinde sabitlenen manyetik alanın artışına sebep olur [43].

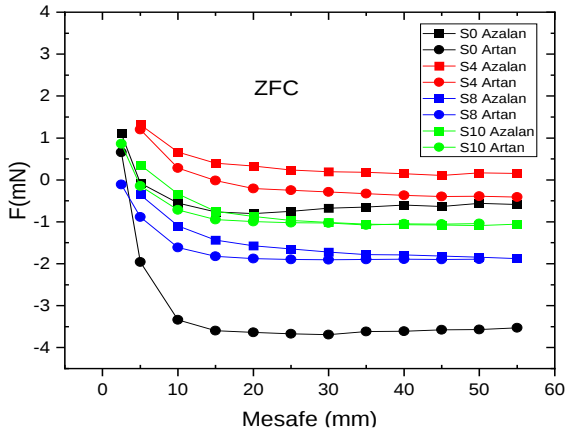
Sn-Ba-Cu-O seramik sistemlerin düşey eksende mesafeye bağlı kuvvet ölçümleri 77 K sıvı azot ortamında hem alansız hem de alanlı soğutma şartlarında kalıcı mıknatısa yaklaşma ve uzaklaşma durumunda ölçüldü. Seramik malzemenin kalıcı mıknatısla arasındaki en uzak mesafe 55 mm iken, birbirine yaklaştığı imkânların elverdiği

en yakın mesafe 2,5 mm idi. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinde kullanılan disk şeklindeki Nd-B-Fe kalıcı mıknatıs 470 mT değerindeydi. Merkez normal ekseninde simetrik ve homojen bir manyetik alanın oluşması için, kalıcı mıknatıs silindirik disk şeklinde seçilmiştir. Alansız soğutma şartı altında, seramik malzemelerin hepsi histerezis davranış göstermiştir.

Şekil 3, saf ve farklı oranlarda çinko ile katkılanarak üretilen seramik malzemelere ait alansız soğutma şartlarında mesafenin azalması ve artması durumlarındaki manyetik kaldırma kuvveti ölçüm eğrilerini tek tek gösterirken, Şekil 4 toplu olarak tüm numunelerin kaldırma kuvvetinin mesafeye göre değişimini göstermektedir. Yaklaşık 35 mm mesafeye kadar kuvvet de bir değişim gözlenmezken, 35-2.5 mm'lik bölgede belirgin bir değişim görülmüştür. En büyük kaldırma kuvvet değeri (F_{mak}) S0 malzemesinde deneysel eğrinin fit edilmesiyle Tablo 1. de verildiği gibi $F_z = 11.5387$ mN olarak hesaplanmıştır. Tüm numunelere ait kuvvet eğrileri incelendiğinde katkılamanın çekici kuvveti azalttığı ve itici kuvveti artırdığı ortaya konmuştur. Katkı oranının artışı, kaldırma kuvvetine ait yaklaşma ve uzaklaşma eğrileri arasındaki bölgenin büyüklüğünde bir azalma ile sonuçlanmıştır. Bu durum, süperiletken içerisindeki akı sabitleme merkezlerinin sayısındaki azalış veya bu merkezlerin çapındaki küçülmeden kaynaklanan zayıf akı tuzaklamasını düşündürür.



Şekil 3. Alansız soğutma altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi



Şekil 4. Alanlı soğutma durumunda S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi

Seramik malzemelerin kalıcı mıknatıs yaklaşma ve uzaklaşması durumunda elde edilen deneysel manyetik kaldırma kuvveti mesafe eğrilerinin, $F = F_0 + ae^{bz}$ denkleminde fit edilmesiyle elde edilen parametreler Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmektedir. F , manyetik kuvvetin konuma bağlı değişimini göstermektedir. F_0 , kuvvetin $z=0$ noktasındaki değeri değildir, $z \rightarrow \infty$ giderken kuvvetin yaklaştığı sabit değeri temsil eder. $e^{bz} \rightarrow 0$ olduğunda $F \rightarrow F_0$ olur. a genlik katsayısı, manyetik kuvvetin büyüklüğünü belirler. b üstel değişim katsayısı ise kuvvetin z konumuna göre ne kadar hızlı değiştiğini gösterir. $b > 0$ ise kuvvet üstel olarak artar, $b < 0$ ise üstel olarak azalır. r^2 korelasyon değerlerine bakacak olursak, hem yaklaşma hem de uzaklaşma verilerinde sonucun oldukça iyi olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 1. Mesafe artarken S0, S4, S8, S10 seramikleri için elde edilen en iyi F_{mak} , F_0 , a , b ve r^2 değerleri

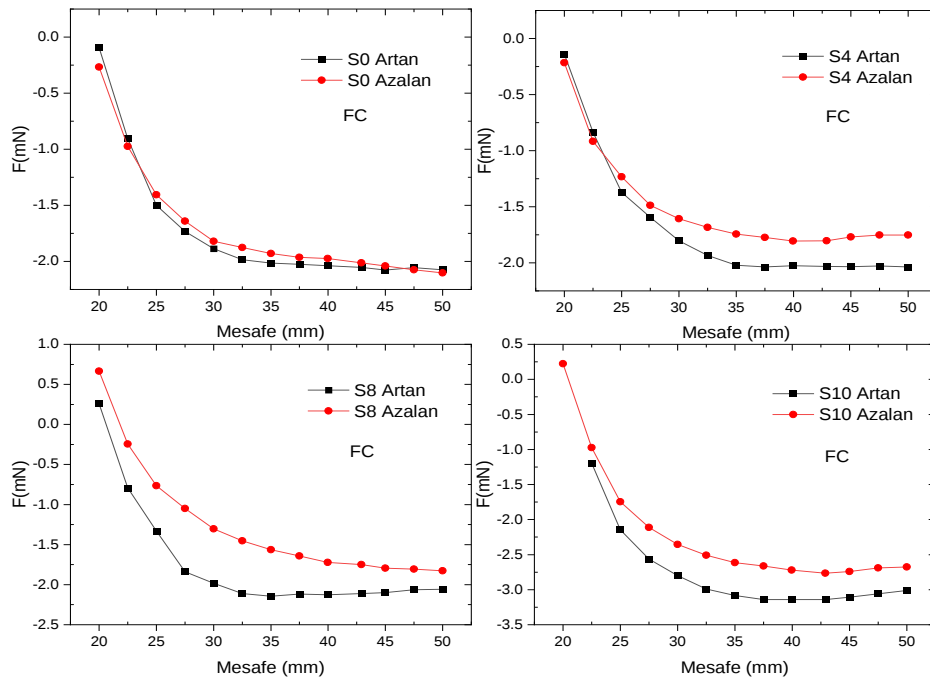
Malzeme	$F = F_0 + ae^{bz}$				
	F_{mak} (mN)	F_0 (mN)	a (mN)	(mm^{-1})	r^2
S0	11.5387	-3.5963	15.1350	-0.5089	0.9970
S4	2.9971	-0.3671	3.3642	-0.1551	0.9940
S8	1.3483	-1.9021	3.2504	-0.2366	0.9996
S10	1.8895	-1.0685	2.9580	-0.1869	0.9992

Tablo 2. Mesafe azalırken S0, S4, S8, S10 seramikleri için elde edilen en iyi F_{mak} , F_0 , a , b ve r^2 değerleri

Malzeme	$F = F_0 + ae^{bz}$				
	F_{mak} (mN)	F_0 (mN)	a (mN)	(mm^{-1})	r^2
S0	2.6829	-1.1255	3.8084	-0.1777	0.9975
S4	2.4511	0.2386	2.2125	-0.1451	0.9989
S8	1.7509	-1.8516	3.6025	-0.1550	0.9985
S10	1.9151	-1.0344	2.9495	-0.1304	0.9995

3.2 Alanlı soğutma altında Sn-Ba-Cu-O sisteminin manyetik kaldırma kuvveti özellikleri

Alanlı soğutma şartında, kalıcı mıknatıs süperiletkenin altına veya üstüne yerleştirilir ve süperiletken soğutulur. Alanlı soğutma altında, süperiletkenler mıknatısların manyetik alanını yakalar, mükemmel diamanyetizmaya sahip olmalarından dolayı mıknatısları sadece itmekle kalmaz, aynı zamanda mıknatısları çekerler. Alanlı soğutma altında süperiletken kalıcı mıknatısı hem iter hem de çeker [42]. Manyetik alanın süperiletken içerisinde hapsediğini doğrulamanın en basit yolu süperiletken yakınına bir demir malzemenin getirilmesi olacaktır.

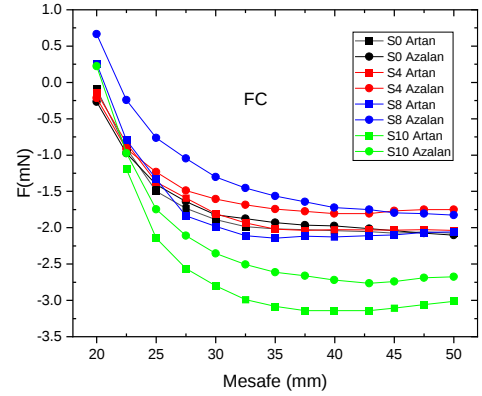


Şekil 5. Alanlı soğutma altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi

Şekil 5’de saf S0, katkılanmış S4, S8 ve S10 seramiklerine ait alan soğutma altında kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı eğrileri mıknaşıya yaklaşma ve uzaklaşma durumları için tek tek verilirken, Şekil 6 toplu olarak tüm numunelerin kaldırma kuvvetinin mesafeye göre değişimini göstermektedir. Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, süperiletkenin manyetik etkileşime karşı duyarlı olduğu bölgenin 0–35 mm mesafe aralığında yer aldığı ve bu aralıkta dikkate değer bir değişimin gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, deneysel ölçümlerimizde 35 mm’nin üzerindeki mesafeler dikkate alınmamıştır. Manyetik kaldırma kuvveti eğrileri bütünsel olarak değerlendirildiğinde, katkılanmanın hem maksimum itici kuvveti hem de maksimum çekici kuvveti artırdığı görülmüştür. İtici kuvvet maksimum 0.7 mN’a, çekici kuvvet ise maksimum 3.25 mN’a ulaşmıştır.

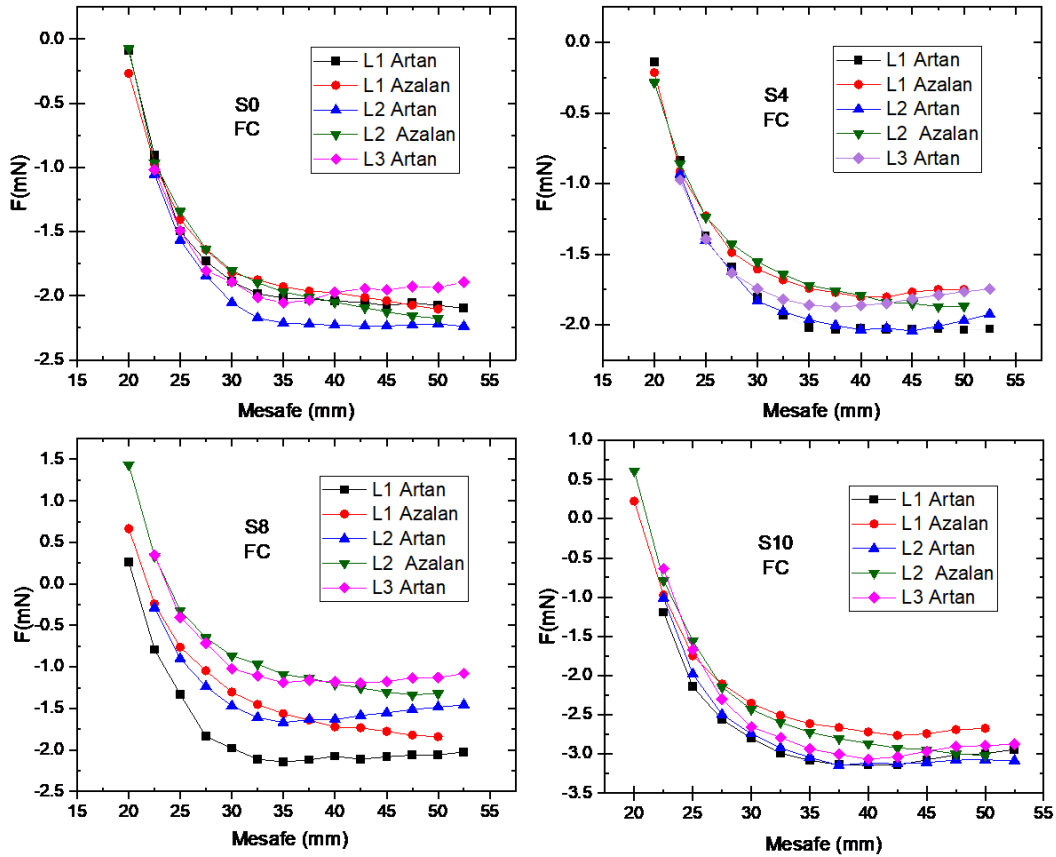
Eğriler dikkatli incelendiğinde, bütün örnekler için kuvvetin pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir.

Baskın olan çekici kuvvet süperiletken içerisinde yeterli akı yakalama kapasitesinin oldukça güçlü olduğunun göstergesidir. Alanlı soğutma altında manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlı eğrileri için yaklaşma ve uzaklaşma eğrisi arasındaki karın bölgesi akı yakalama kapasitesinin bir ölçüsüdür. Bu da literatürde histerezis davranış olarak bilinir.

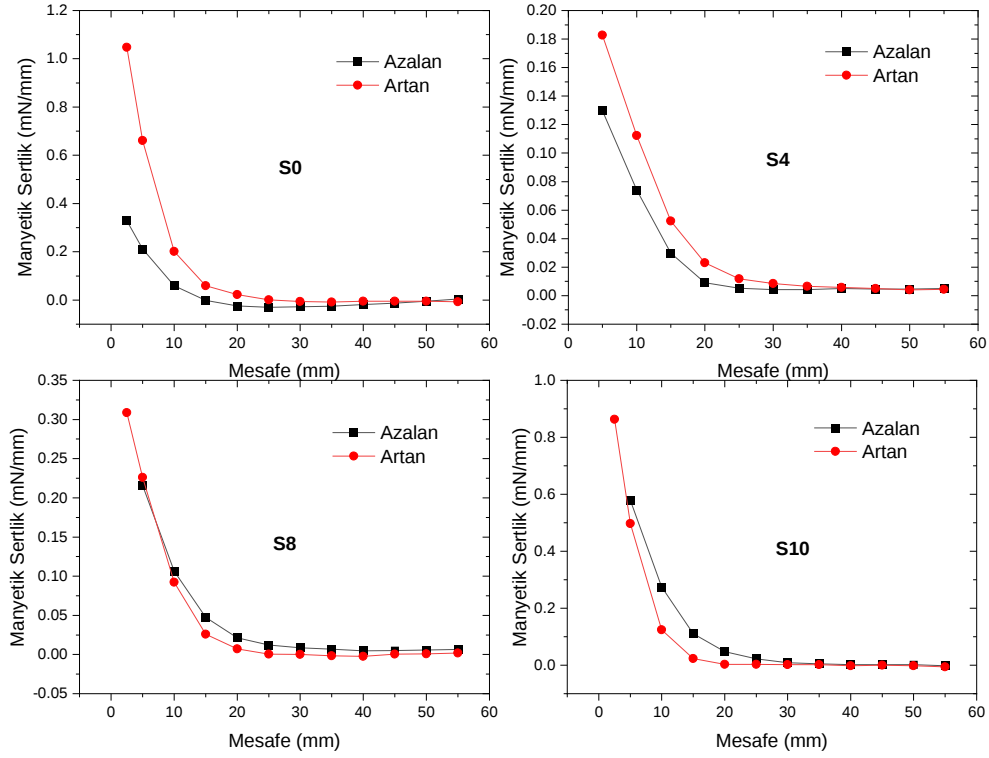


Şekil 6. Alanlı soğutma altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi

Şekil 7’de alanlı soğutma şartında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerinin L1-L2-L3 şeklinde 3 döngü üzerinden alınan manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi görülmektedir. Her bir numune için kaldırma kuvveti kendi arasında bağımsız incelendiğinde, katkının artışıyla L1’den L3’e çekici kuvvetin azaldığı görülür. Bu da akı yakalama kapasitesinin döngüler ilerledikçe azaldığı anlamına gelir. Bean’ın Kritik Durum Modeli bu kaymaları tam manasıyla açıklar.



Şekil 7. Alanlı soğutma altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerinin 3 döngü üzerinden kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi



Şekil 8. S0, S4, S8 ve S10 seramikleri için manyetik sertliğin mesafeye bağlı değişimi

En büyük çekici kuvvet S10 numunesinde 3.20 mN olarak ölçülmüştür. Buradan yola çıkarak, yüksek sıcaklık seramiklerde yapılan katkının artışı L1'den L3'e giderken en büyük kaldırma kuvvetinin çekici yönde artışına sebep olmaktadır.

3.3 Manyetik sertlik hesaplamaları

Süperiletken numuneler ile kalıcı mıknatıslar arasındaki sistemlerde mekanik yay benzeri bir kuvvet, manyetik itme veya çekimden kaynaklanır. Bu sistemlerde ortaya çıkan manyetik sertlik olarak isimlendirilen manyetik yay sabitinin değeri değişkendir. Çünkü süperiletken kalıcı mıknatıs sisteminde manyetik kuvvetin mesafeye göre türevi olan manyetik sertlik, konuma ve diğer koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Eğer üç boyutlu dinamik bir kuvvet ölçümü yapılmış olsaydı bu durumda manyetik sertlik; $k_{zz} = -\frac{\partial F_z}{\partial z}$, $k_{xx} = -\frac{\partial F_x}{\partial x}$, $k_{zx} = -\frac{\partial F_z}{\partial x}$ şeklinde ifade edilmiş olacaktı [44]. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümünü tek boyutta statik olarak yaptığımız bu çalışmada kuvvetin mesafeye bağlı türevini alarak manyetik sertlik hesaplamalarını gerçekleştirdik.

Saf ve katkılı numunelerin manyetik sertliğinin mesafeye bağlı değişimini gösteren Şekil 8 incelendiğinde, seramik numunelerin hepsinde katkı artışıyla maksimum sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, seramik malzemelerin tamamına ait grafikler incelendiğinde, 0-35 mm aralığı, seramik malzemenin mıknatısa karşı en yüksek duyarlılığı gösterdiği manyetik sertlik bölgesi olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgenin dışına çıkıldıkça sistemin mıknatısa cevabı zayıflar, manyetik sertlik değeri düşer. Bu sonuç Maglev sistemlerinde optimum çalışma mesafesinin bu aralıkta tutulmasının gerekliliğini gösterir. Bu veri malzeme

geliştirme, geometri tasarımı, soğutma sistemlerinin konumlandırılması gibi birçok tasarım parametresi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu bölge içindeki çalışma, daha az enerji kaybı ve daha kararlı süspansiyon sağlar.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada daha önceki çalışmamızda CuO yerine farklı oranlarda nano boyutta ZnO katkılanarak katı-hal tepkime yöntemiyle sentezlenen $\text{Sn}_2\text{Ba}(\text{Cu}_{2-x}\text{Zn}_x)_2\text{O}_y$ ($x=0.0, 0.4, 0.8, 1.0$) seramik malzemesinin manyetik kaldırma kuvveti özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, 470 mT yüzey alanına sahip Nd-B-Fe kalıcı mıknatıs kullanılmış, numunelerin alansız soğutma ve alan altında soğutma şartlarında kaldırma kuvveti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, alansız soğutma şartı altında elde edilen veriler kullanılarak manyetik sertlik hesaplamaları yapılmıştır. Alansız soğutma şartı altında, seramik malzemelerin hepsi histerezis davranış göstermiştir.

Tüm numunelerin manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye göre değişim grafiğinden, yaklaşık 35 mm mesafeye kadar kaldırma kuvvetinde bir değişim gözlenmezken, 35-2.5 mm'lik bölgede belirgin bir değişim görülmüştür. En büyük manyetik kaldırma kuvvet değeri (F_{mak}) S0 malzemesinde deneysel eğrinin fit edilmesiyle $F_z = 11.5387$ mN olarak hesaplanmıştır. Tüm numunelere ait kaldırma kuvveti eğrileri incelendiğinde katkılamanın çekici kuvveti azalttığı ve itici kuvveti artırdığı ortaya konmuştur. Katkı oranının artışı, manyetik kaldırma kuvvetine ait yaklaşma ve uzaklaşma eğrileri arasındaki bölgenin büyüklüğünde bir azalma ile sonuçlanmıştır. Bu durum, süperiletken içerisindeki akı sabitleme merkezlerinin sayısındaki azalış veya bu merkezlerin çapındaki

küçülmeden kaynaklanan zayıf akı tuzaklamasını düşündürür.

Alanlı soğutma altında, kuvvet eğrileri bütünsel olarak değerlendirildiğinde, katkılamanın hem maksimum itici kuvveti hem de maksimum çekici kuvveti artırdığı görülmüştür. İtici kuvvet maksimum 0.7 mN'a, çekici kuvvet ise maksimum 3.25 mN'a ulaşmıştır. Bütün örnekler için kaldırma kuvvet değerlerinin pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum seramik numunelerin kalıcı mıknatıs üzerinde hem itici hem de çekici etkisinin varlığını gösterir. Ancak baskın olan çekici kuvvetin katkıyla artmış olduğu açıktır.

Alansız soğutma altında deneysel olarak elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye göre grafiklerinden yararlanarak, teorik fit yöntemiyle bulduğumuz sonuçlar $r^2 = 0.9995$ uyumlulukla yapılmış olup F_0 , a ve b parametreleri elde edilmiştir.

Her bir numune için kaldırma kuvveti kendi arasında bağımsız incelendiğinde, katkının artışıyla L1'den L3'e çekici kuvvetin azaldığı görülmüştür. Bu da akı yakalama kapasitesinin döngüler ilerledikçe azaldığı anlamına gelir. Bean'ın Kritik Durum Modeli bu kaymaları tam manasıyla açıklar.

Elde edilen sonuçlar, ZnO katkı oranının süperiletken seramiklerin manyetik özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve ZnO'nun kritik manyetik parametreler üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] I. A. Parinov, Microstructure and properties of high-temperature superconductors, Springer Berlin Heidelberg, Second Edition (2013).
- [2] H. K. Onnes, The resistance of pure mercury at helium temperatures. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 12, 1. 1911
- [3] W. Meissner, and R. Ochsenfeld, Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit Naturwissenschaften 21, 787, 1933.
- [4] J. G. Bednorz and K. A. Müller, Possible high T_c superconductivity in the La-Ba-Cu-O system. Zeitschrift für Physik B-Condensed Matter, 64, 189-193, 1986. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01303701>.
- [5] J. Unsworth, J. Du, B. J. Crosby, J. C. Macfarlane, Magnetic levitation force measurement on high T_c superconducting ceramic/polymer composites, IEEE Transactions on Magnetics 29, 108-112, 1993. <https://doi.org/10.1109/20.195554>
- [6] W. M. Yang, L. Zhou, Y. Feng, P. X. Zhang, M. Z. Wu, W. Gawalek, and P. Gornert, The effect of excess Y_2O_3 addition on the levitation force of melt processed YBCO Bulk Superconductors. Physica C: Superconductivity, 305, 269-274, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(98\)00339-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(98)00339-6)
- [7] G. Z. Li, W. M. Yang, X. F. Cheng, X. D. Guo, J. Fan, A modified TSIG technique for simplifying the fabrication process of single-domain GdBCO bulks with a new kind of liquid source. Journal of Materials Science, 44, 6423-6426 2009. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3887-8>
- [8] I. G. Chen, J. C. Hsu, G. Janm, C. C. Kuo, H. J. Liu, M. K. Wu, Magnetic levitation force of single grained YBCO materials. Chinese Journal of Physics. 36(2), 420-4278, 1998. <https://doi.org/10.1002/chin.199843296>
- [9] B. Zheng, J. Zheng, D. He, Y. Ren, Z. Deng, Magnetic characteristics of permanent magnet guideways at low temperature and its effect on the levitation force of bulk YBaCuO superconductors. JALCOM. 656, 77-81, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.116>
- [10] Z. M. Zhao, J. M. Xu, X. Y. Yuan, C. P. Zhang, Levitation force of melt-textured YBCO superconductors under non-quasi-static situation. Physica C. 549, 154-159, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.03.011>
- [11] C. P. Bean, Magnetization of hard superconductors. Phys. Rev. Lett. 8, 250-253, 1962. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.8.250>
- [12] T. H. Johansen, Z. J. Yang, H. Bratsberg, G. Helgesen, A. T. Skjeltorp, Lateral force on a magnet placed above a planar YBaCuOx superconductor. Appl. Phys. Lett. 58, 179-181, 1991. <https://doi.org/10.1063/1.104965>
- [13] J. C. Wei and T. J. Yang, Theoretical calculation of magnetic force for Type-II superconductor in a levitated magnetic field. Chin. J. Phys, 34, 1344-1351, 1996.
- [14] X-Y Zhang, Y-H Zhou, J. Zhou, Three-dimensional measurements of forces between magnet and superconductor in a levitation system. Physica C: Superconductivity. 467, 125-129, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.09.010>
- [15] S. L. Chen, W. M. Yang, J. W. Li, X. C. Yuan, J. Ma, M. Wang, A new 3D levitation force measuring device for REBCO bulk superconductors. Physica C: Superconductivity. 496, 39-43, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.07.004>
- [16] R. Parthasarathy, V. Seshubai, Significant correlations between levitation-suspension forces and critical current densities in bulk YBCO/Ag composite superconductors fabricated by infiltration and growth processing technique. J Supercond Nov Magn 29, 1439-1447, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3431-4>
- [17] B. Savaskan, E. Taylan Koparan, S. Celik, K. Ozturk, E. Yanmaz, Investigation on the levitation force behaviour of malic acid added bulk MgB_2 superconductors. Physica C: Superconductivity. 502, 63-69, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.04.032>
- [18] R. J. Adler, W. W. Anderson, Force between a superconductor and a permanent magnet due to trapped flux. J. Appl. Phys 68, 695-700, 1990. <https://doi.org/10.1063/1.346800>
- [19] A. Cansız, Force, Stiffness and hysteresis losses in high temperature superconducting bearings. PhD Thesis,

- Illinois Institute of Technology, Chicago, 3. (1999) <https://books.google.com.tr/books?id=c-eBNwAACAAJ>
- [20] P. Z. Chang, F. vC. Moon, J. R. Hull, T. M. Mulcahy, Levitation force and magnetic stiffness in bulk high-temperature superconductors. *J. Appl. Phys.* 67, 4358-4360, 1990. <https://doi.org/10.1063/1.344927>
- [21] J. S. Choi, S. D. Park, B. H. Jun, Y. H. Han, N. H. Jeong, B. G. Kim, J. M. Sohn, C. J. Kim, Levitation force and trapped magnetic field of multi-grain YBCO bulk superconductors. *Physica C.* 468, 1473-1476, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.200>
- [22] P. Benzi, E. Bottizzo, N. Rizzi, Oxygen determination from cell dimensions in YBCO superconductors. *J. Cryst. Growth* 269, 625-629, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.05.082>
- [23] I. B. Bobylev, E. G. Gerasimov, N. A. Zyuzeva, Improvement of critical parameters of YBa₂Cu₃O_{6.9} by low temperature treatment in the presence of water vapors. *Cryogenics.* 72, 36-43, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.08.003>
- [24] I-G Chen, J-C Hsu, G. Janm, C-C Kuo, H-J Liu, M.K. Wu, Magnetic levitation force of single grained YBCO materials. *Chinese Journal of Physics.* 36, 420-427, 1998.
- [25] K. Brodt, H. Fuess, E.F. Paulus, W. Assmus, J. Kowalewski, Untwinned single crystals of the high-temperature superconductor YBa₂Cu₃O_{7-δ}. *Acta Crystallogr C.* 46, 354-358, 1990. <https://doi.org/10.1107/S0108270189006803>
- [26] V. Calzona, M. R. Cimberle, C. Ferdeghini, M. Putti, A. S. Siri, AC susceptibility and magnetization of high-*tc* superconductors: critical state model for the intergranular region. *Physica C.* 157, 425-430, 1989. [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(89\)90266-9](https://doi.org/10.1016/0921-4534(89)90266-9)
- [27] F. P. Dahl, Kamerlingh Onnes and the Discovery of Superconductivity: The Leyden Years. 1911-1919, University of California Press. *Historical Studies in the Physical Sciences.* 15, 1-37, 1984. <https://doi.org/10.2307/27757541>
- [28] B. Savaskan, M. Abdioglu, K. Ozturk, Determination of magnetic levitation force properties of bulk MgB₂ for different permanent magnetic guideways in different cooling heights. *Journal of Alloys and Compounds.* 834, 155167, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155167>
- [29] F. C. Moon, K. C. Weng, P. Z. Chang, Dynamic magnetic forces in superconducting ceramics. *J. Appl. Phys.* 66, 5643, 1989. <https://doi.org/10.1063/1.343677>
- [30] Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff, A. Shaulov, Magnetic relaxation in high-temperature superconductors. *Rev. Mod. Phys.* 68, 911-949, 1996. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.911>
- [31] S. Büyükakkaş, Ş. Ünlüer, Effects on structural properties of doping zinc into Sn₂Ba(Cu₂₂xZnx)₂Oy ceramics, *Indian Journal of Physics*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12648-025-03551-x>
- [32] İ. Karaca, N. Şimşek, S. Özen, M. T. Güler, Infiltration effects on (RE) 123 superconductors. *Chinese Journal of Physics.* 59, 556-566, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2019.03.016>
- [33] M. T. Güler, Nano bor katkısının yüksek sıcaklık süperiletken seramiklere etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Niğde, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [34] K. M. Kim, S. D. Park, S. H. Jun, T. K. Ko, C. J. Kim Simple die pressing for making artificial holes in single-grain Gd_{1.5}Ba₂Cu₃O_{7-y} superconductors. *Supercond Sci Technol.*, 25:105016, 2012. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/10/1-5016>
- [35] W. M. Yang, X. X. Chao, X. B. Bian, P. Liu, Y. Feng, P. X. Zhang, L. Zhou, The effect of magnet size on the levitation forces and attractive force of single-domain YBCO bulk superconductor. *Supercond Sci Technol* 16:789 (2003) <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/16/7/308>
- [36] M. Murakami, T. Oyama, H. Fujimoto, T. Taguchi, S. Gotoh, Y. Shiohara, N. Koshizuka, S. Tanaka, Large levitation force due to flux pinning in YBaCuO superconductors fabricated by melt-powder-melt-growth process. *Jpn J. Appl Phys* 29(11):L1991, 1990.
- [37] F. C. Moon, Superconducting Levitation, 2nd edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.
- [38] W. M. Yang, L. Zhou, Y. Feng, P. X. Zhang, J. R. Wang, C. P. Zhang, Z. M. Yu, X. D. Tang, W. Wei, The effect of magnet configurations on the levitation force of melt processed YBCO bulk superconductors, *Physica C* 354, 5-12, 2001.
- [39] S. B. Guner, S. Celik, M. Tomakin, The investigation of magnetic levitation performances of single grain YBCO at different temperatures, *Journal of Alloys and Compounds* 0925-8388, 30572-8, 2017.
- [40] Y-N Wang, W-M Yang, P-T Yang, C-Y Zhang, J-L Chen, L-J Zhang, L.Chen, Influence of trapped field on the levitation force of SmBCO bulk superconductor, *Physica C: Sup. and its App.* 542, 28-33, 2017.
- [41] İ. Karaca, Characterization of a cylindrical superconductor disk prepared by the wet technique with microstructure analysis and levitation force measurements using a permanent magnet, *Chinese Journal Of Physics* 47, 5, (2008)
- [42] Kim, C-J., Superconductor Levitation Concepts and Experiments, Springer, Singapore, 2019.
- [43] M. Murakami, Melt Processed High-Temperature Superconductors. World Scientific, Singapore, 1992. 9789814335898_fmatter (worldscientific.com).
- [44] O. Ozogul, Calculation of Levitation Force Using a Critical-State Model. *J. Supercond. Nov. Magn.*, 25, 221-225, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10948-011-1281-7>.

