



# Kalay katkısının $Ba_2Ca_3Cu_{6-x}Sn_xO_y$ süperiletken seramiğin manyetik kaldırma ve manyetik sertlik performansına etkisi

## Effect of tin dopant to magnetic levitation and magnetic stiffness performance of $Ba_2Ca_3Cu_{6-x}Sn_xO_y$ superconducting ceramics

Şahin Ünlüer<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bor Meslek Yüksekokulu, 51240, Niğde Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, katı hal reaksiyon yöntemiyle üretilen kalay katkılı  $Ba_2Ca_3Cu_{6-x}Sn_xO_y$  ( $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ) nominal kompozisyona sahip yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) seramik numunelerin, manyetik akı kapasitesi üzerinde kalay katkısının etkileri araştırıldı. Süperiletken örnekler için manyetik kaldırma kuvvetini (MLF) ölçmek için 300 mT değerinde sabit mıknatıs (PM) kullanıldı. MLF ölçümleri sıfır alan soğutma (ZFC), alan altında soğutma (FC) koşullarında, tek boyutta, düşey uzaklığa bağlı statik ölçüm şeklinde alındı. ZFC'de Maksimum MLF değeri,  $F_z=63$  mN ile Sn20 örneğinde ölçüldü. ZFC'de kalay katkısının, tüm örneklerde çekici kuvveti düşürüp itici kuvveti baskın hale getirmesiyle akı yakalama kapasitesini zayıflattığı görüldü. ZFC'de MLF ölçümlerinden manyetik sertlik (stiffness) hesaplanarak kalay katkısının etkisi ortaya kondu. Ayrıca FC koşulunda 3 döngü üzerinden MLF ölçümleri alındı. MLF eğrilerinin belirtilen koşullarda önemli histeretik davranış sergilediği görüldü. HTS'lerin duyarlık gösterdiği bölgenin 0-30 mm aralığı olduğu belirlendi. Döngüsel MLF ölçümlerindeki aşağı yönlü kaymalar Bean'in Kritik Durum Modeline atfedildi.

**Anahtar kelimeler:** Manyetik Kaldırma, Manyetik Sertlik, BaCaCuO, Alan Altında Soğutma (FC), Alan Sız Soğutma (ZFC)

### 1 Giriş

H.K. Onnes, süperiletkenliği ilk kez 1911 yılında oda sıcaklığındaki saf cıvayı yaklaşık 4 K' e kadar soğutma neticesinde keşfetmiştir [1]. Bu sonuç ile malzemenin soğutulma işleminin süperiletkenlik açısından birinci derecede öneme sahip olduğu görüldü. Daha sonra Meissner [2], süperiletkenlerde manyetik alanın dışarılandığını keşfetmesi (Meissner Etkisi) ile süperiletkenlik açısından ikinci derece öneme sahip olan malzemenin manyetik geçişinin tanımlanmasını sağlamıştır. Yüksek sıcaklık süper iletkenleri (HTS), günümüz yüksek teknolojisinde, enerji depolama [3-5], manyetik kaldırma özelliğinden dolayı manyetik süspansiyon [6,7], havada giden araçlar (MagLev) [8-12], yüksek hızlı manyetik yataklar [13,14]

### Abstract

In this study, the effects of tin doping on the magnetic flux capacity of tin-doped  $Ba_2Ca_3Cu_{6-x}Sn_xO_y$  ( $x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ) nominal composition high temperature superconducting (HTS) ceramic samples produced by solid state reaction method were investigated. A permanent magnet (PM) of 300 mT was used to measure the magnetic levitation force (MLF) of the superconducting samples. MLF measurements were taken in zero field cooling (ZFC) and field cooling (FC) conditions as static measurements in one dimension, depending on the vertical distance. Maximum MLF value at ZFC was measured in Sn20 sample with  $F_z=63$  mN. Tin doping in ZFC was seen to weaken the flux trapping capacity by reducing the attractive force and dominating the repulsive force in all samples. The effect of tin doping was revealed by calculating the magnetic stiffness from MLF measurements in the ZFC condition. Also, MLF measurements were taken over 3 loops in FC condition. It was observed that MLF curves exhibited significant hysteretic behavior under the specified conditions. It was determined that the region where HTSs showed sensitivity was in the 0-30 mm range. Downward shifts in the cyclic MLF measurements were attributed to Bean's Critical State Model.

**Keywords:** Magnetic Levitation, Magnetic Stiffness, BaCaCuO, Field Cooled (FC), Zero Field Cooled (ZFC)

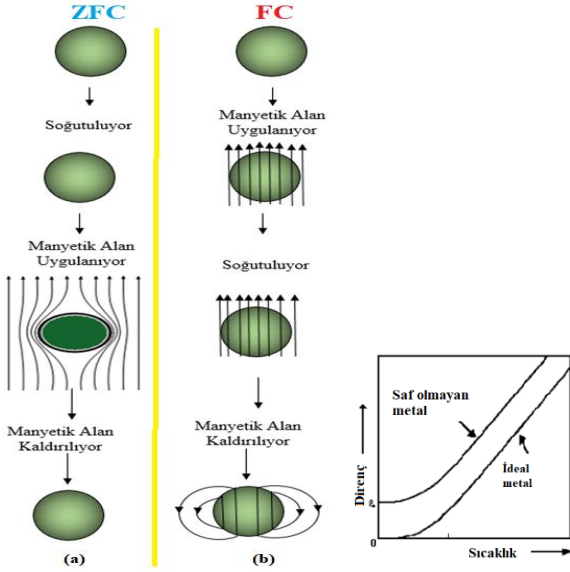
gibi ilgi çekici uygulama alanlarına sahiptir. Manyetik kaldırma kavramı, mükemmel diyamanyetik özelliğe sahip bir süperiletkenden veya süperiletken içerisinde, Meissner etkisinden kaynaklanan hapsolmuş manyetik akı ile açıklanmaktadır [15]. Meissner Etkisi ideal iletken ile süperiletkenin farklılıklarını ortaya koyan alan sız soğutma (ZFC) ve alan altında soğutma (FC) şeklinde iki farklı soğutma işlemi içerir. Bu iki farklı işlem ideal iletken için Şekil 1 ve süperiletken için Şekil 2 de şematik olarak verilmektedir. Şekil 1 de ideal iletkenin soğutulma ve manyetik alanın uygulanma sırasına göre farklı davranış sergilediği görülmektedir. Soğutulan ideal iletken uygulanan dış manyetik alanı dışarılar. Manyetik alanın kalkmasıyla iletken içerisindeki manyetik alan sıfır olur. İletken, oda sıcaklığında manyetik alanın uygulanmasıyla içerisine

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sunluer@ohu.edu.tr (Ş. Ünlüer)

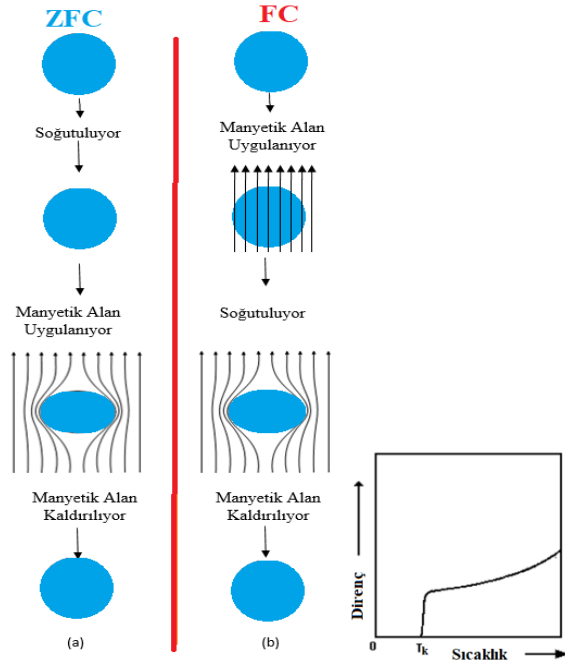
Geliş / Received: 22.05.2024 Kabul / Accepted: 05.06.2024 Yayımlanma / Published: 15.07.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1488012

manyetik alanı hapsedir. İletken soğutulduğunda içerisinde manyetik alan etkisini sürdürür. Manyetik alan kaldırıldığında içerisinde manyetik alan kaybolmaz.



Şekil 1. İdeal iletken için ZFC ve FC etkisinde soğutma işlemi



Şekil 2. Süperiletken için ZFC ve FC etkisinde soğutma işlemi [16]

Şekil 2.'de Süperiletken malzemenin her iki durumda da manyetik alanı dışarıladığı görülmektedir. Dışarlanmanın nedeni süperiletken üzerinde yüzey akımlarının oluşmasıdır. Yüzey akımları PM kaynaklı dış alana karşı bir tepki alanı oluşturur. Böylelikle manyetik alan dışarılanmış olur. Meissner etkisi altında ideal iletkenlikten daha çok süperiletkenliği ifade eder [17].

HTS'ler ve PM'ler arasındaki MLF, temel süperiletkenlik mekanizmalarını anlamak ve geliştirmek için pek çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır [18-20]. MLF'nin teorik hesaplamalarının temeli Bean'ın kritik durum modeline dayanır [21]. Sonrasında Johansen vd. [22], deneysel sonuçların uyumunun gerçekçi olması için Bean'ın teorisini genişlettiler. Bean Modeli deneysel MLF ölçümlerini açıklamak için de ayrıca uygulanmıştır [6]. MLF ölçümleri HTS ile PM arasındaki uzaklığa bağlı olarak alınır. Süperiletkenlere ait kritik akım ve mıknatıslanma gibi bazı karakteristik özellikleri belirlemek için bir, iki veya üç boyutlu tasarlanmış çeşitli MLF ölçüm sistemleri kullanılmıştır [23-28]. HTS-PM arasındaki etkileşim kuvveti yerçekiminin tersi yönünde belirlediğinden, HTS veya PM'nin ağırlığını dengeleyen bu tür etkileşimin en yaygın ölçüm sistemi düşey olanıdır [29]. MLF ölçümleri üzerine birçok araştırma grubu tarafından çalışmalar gerçekleştirilmiştir [21,30-32]. MLF ölçümlerini etkileyen, soğutma sıcaklığı [33], numunenin mıknatısa yaklaşma hızı [34], kritik akım yoğunluğu, tane boyutu [35], tane yönelimi [36-38], numune kalınlığı [17,39], mıknatısların düzeni ve boyutları [31,40] gibi birçok parametre vardır. Savaşkan vd [41], MgB<sub>2</sub> süper iletkeni üzerinde FC ve ZFC koşullarında 33 K ve 37 K'de havaya yükselme çalışmaları gerçekleştirdi. ZFC koşulunda 33K sıcaklıkta en yüksek kaldırma değerini 28,76 N ölçtüler. HTS'lerin uygulandığı kaldırma sisteminde HTS'lerin manyetik sertliğine ilişkin ilk çalışmalar Moon vd. [42,43] tarafından yapılmıştır. Moon vd. [39] manyetik sertliğin aslında, küçük çevrimler boyunca kuvvet eğrileri üzerinde ölçülen teğet doğrusunun eğimini alarak ana döngüdeki herhangi bir nokta için ortalama sertlik olduğunu vurgulamışlardır. HTS-PM arasındaki uzaklığa bağlı dikey veya yanal kuvvetlerin türevi alınarak manyetik sertliğe ait birçok teorik çalışma ortaya konmuştur [44-48]. HTS-Maglev sistemlerinde araç gövdesinin durumu dış koşullar nedeniyle düşey doğrultuda sıkça değişeceğinden sistemin düşey doğrultuda değerlendirilmesi, performansının da bu yönde incelenmesi oldukça önemlidir [49]. Bunu dikkate alarak FC ve ZFC koşullarında 77 K'de (sıvı azot soğutma etkisinde), farklı HTS-PM konfigürasyonlarında, düşey doğrultuda MLF ölçümleri ve manyetik sertlik hesaplamaları gerçekleştirildi. HTS numunelerin ZFC ve FC etkisinde PM ye duyarlı olduğu aralık belirlendi. Deneysel MLF verilerinin fit edilmesiyle teorik uyumluluk ortaya kondu. Bu çalışmada ortaya çıkan sonuçların, günümüzde oldukça öneme sahip HTS-Maglev sistemlerinin teknolojik uygulamalarına faydalı olacağı düşünülmektedir.

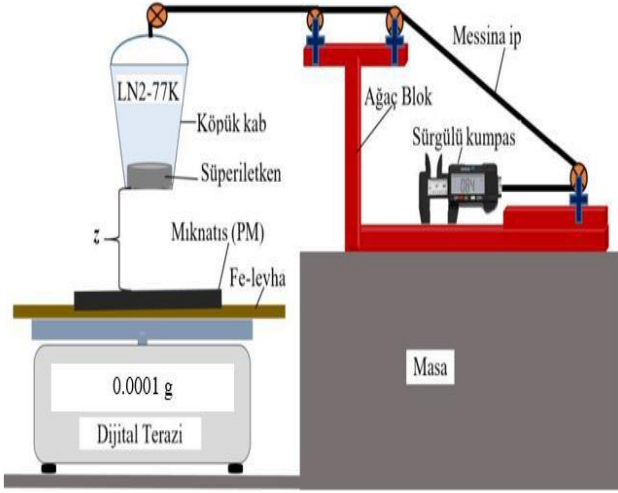
## 2 Materyal ve metod

Önceki çalışmada Ba<sub>2</sub>Ca<sub>3</sub>Cu<sub>6-x</sub>Sn<sub>x</sub>O<sub>y</sub> (x = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0) nominal kompozisyona sahip HTS seramiklerin katı hal reaksiyon yöntemiyle üretimi gerçekleştirildi. Kalay katkısına bağlı olarak, SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 şeklinde kodlanan HTS'lerin yapısal özellikleri detaylı şekilde ortaya konuldu. Malzeme hakkında gerekli bilgiye kaynak [50] den ulaşılır.

### 2.1 Ölçüm sistemi

SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 şeklinde kodlanan HTS malzemelerinin her birini, 300 mT değerindeki kalıcı

mıknatıs etkisinde bırakarak aralarındaki düşey mesafeye bağlı olarak bir dizi kaldırma kuvveti ölçümü alındı. Ölçümler için Şekil 3'deki deney düzeneği kullanıldı.



Şekil 3. Süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki manyetik kaldırma kuvveti ölçüm düzeneği [51]

MLF ölçüm sistemi, ana yapıya monte edilmiş 0.01 mm hassasiyetli dijital kumpas ile düşey doğrultuda hareket eden asansör sistemi, etrafı alüminyum folyo ile sarılmış içerisinde sıvı nitrojen taşıyan köpük izolasyon kabı, kap içerisinde HTS numunesi ile 0.1 mg hassasiyete sahip dijital terazi ve üzerindeki PM'den oluşmaktadır. Düzenek manuel ölçüm alınan bir sistem olup her bir ölçümde HTS numunesi, ölçüm boyunca 77 K sıcaklıkta soğutulması için sıvı nitrojende tutulmaktadır.

### 2.1.1 Ölçüm yöntemi

Silindirik yapıli tablet numunelerin merkez normal çizgisi, tüm test durumlarında PM'nin manyetik alanının ( $B_z$ ) düşey bileşeninin tepe çizgisi boyunca tutulur. Çalışmada hem FC hem de ZFC koşullarında bu dikkate alınmıştır. HTS ile PM arasındaki ölçümler mümkün olan en küçük yaklaşma mesafesinden maksimum 60 mm'ye kadar periyodik olarak gerçekleştirildi. Ölçümler Şekil 3.'deki düzenek kullanılarak manuel olarak alındı. Ölçüm yönteminde aşağıdaki adımlar izlendi:

- Düzeneğin kurulumu tamamlandıktan sonra kumpas ve dijital terazinin kalibrasyonu yapıldı.
- HTS, PM den 60 mm yukarda bulunan alüminyum folyo ile yalıtılmış köpük kaba yerleştirildikten hemen sonra kap sıvı nitrojen ile doldurulup ZFC'ye tabi tutuldu.
- Termal dengelenmeden sonra, 60 mm'den başlayarak 1 mm'ye (yaklaşma işlemi) kadar periyodik ölçümler alındı. Ölçülen MLF değerlerinin doğruluğu için mesafe azaldıkça her adımda yaklaşık 10 saniye bekleyerek gevşeme süresi dikkate alındı. Dönüşte aynı işlemlere (uzaklaşma işlemi) 1 mm başlangıç mesafesi dikkate alınarak 60 mm'ye kadar devam edildi.
- FC koşulu altında yalıtımlı köpük kap, mümkün olan minimum mesafeye (~1 mm) kadar kalıcı mıknatısa

yaklaştırıldı. Bu esnada HTS numune kabına konularak manyetik dengenin kurulması için kısa bir süre bekledikten sonra numune kabı sıvı nitrojen ile dolduruldu. FC 'deki soğutmada HTS yaklaşık 10-15 dakika boyunca manyetik dengelenme için kalıcı mıknatısın etkisi altında tutuldu. HTS, 1 mm'lik başlangıç mesafesinden başlayarak 35 mm'ye kadar periyodik olarak PM'den uzaklaştırıldı. Her periyotta okunan MLF verileri kayıt altına alındı. Sonra 35 mm mesafeden dönüş başladı. Dönüşte de mesafe azaldıkça her periyot için MLF değerleri kaydedildi. Yaklaşma döngüsü ~1 mm'ye kadar devam etti.

- FC durumunda düşey uzaklaşma ve yaklaşma döngüsüne, HTS deki akı tuzaklarının daha etkin biçimde görülmesi adına, ekstradan iki döngü daha eklenerek işlem 3 döngüyle tamamlanmış oldu.

### 3 Bulgular ve tartışma

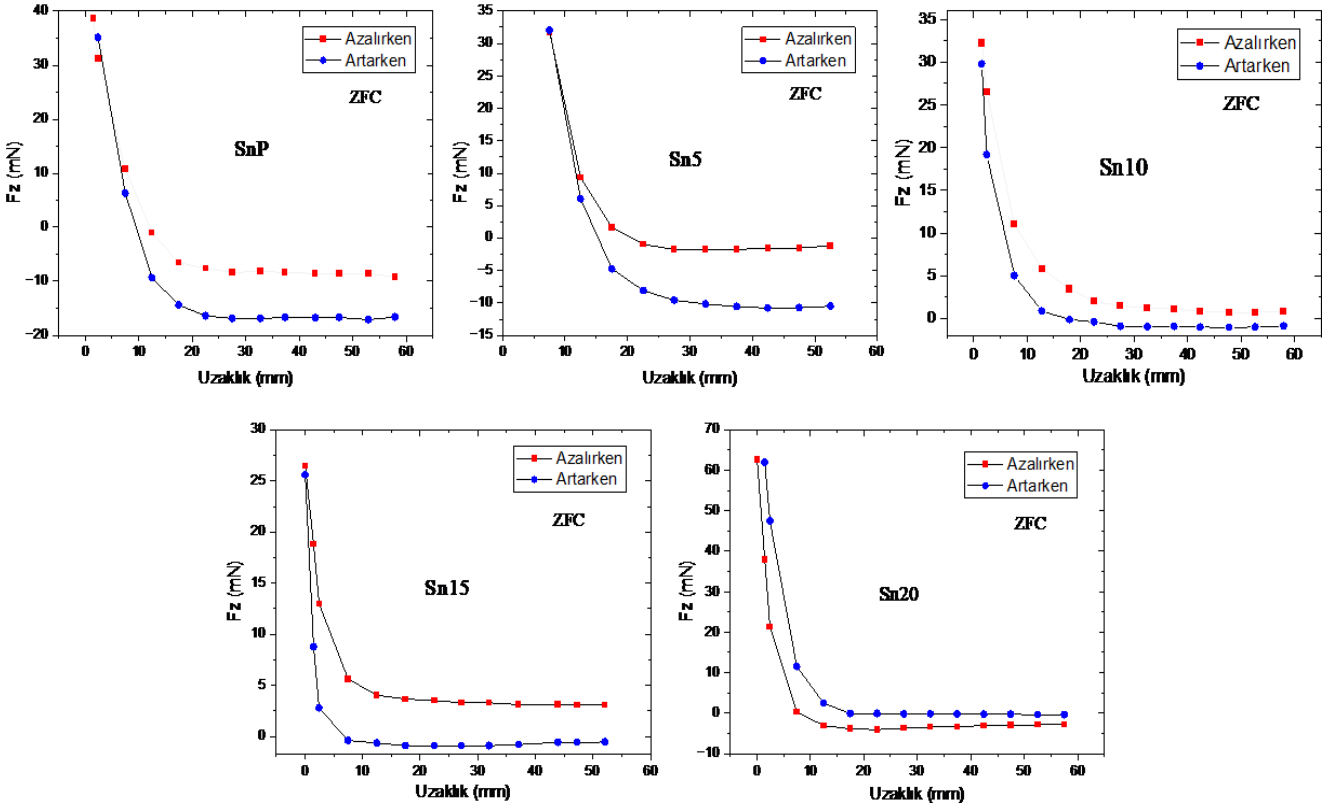
MLF'nin uzaklığa bağlı değişimi Moon [52] tarafından ortaya konmuştur. MLF,  $F = \int_{v_0}^v (m \cdot \nabla) H \cdot dV$  biçiminde verilir. Bu eşitlik  $F = m \frac{dH}{dx}$ ,  $m = MV$ ,  $M = AJ_c r$  şeklinde tek boyuta indirgenir.

Burada  $m$  süperiletkenin manyetik momenti,  $M$  birim hacme düşen mıknatıslanma,  $V$  toplam hacim,  $dH/dx$  PM'nin oluşturduğu manyetik alan gradyenti,  $J_c$  HTS'nin kritik akım yoğunluğu,  $A$  HTS'nin geometrisine bağlı bir sabit ve  $r$ , HTS numunenin oluşturduğu diyamanyetik akım halkasının yarıçapıdır. Süperiletken ailesinden olan YBCO numunelerinde büyük yarıçaplı tek kristaller elde edilir ve numunede oluşan güçlü akı tuzaklama merkezleri sayesinde büyük değerlere sahip  $J_c$  elde edilir [53,54]. MLF, PM'ye çok duyarlı olmasına rağmen PM'lerin şekline ve dizilişlerine bağlı manyetik alan gradyanı ( $dH/dx$ ) ve mıknatıslanma ( $M$ )'deki değişimler üzerine yapılan araştırmalar yeterli değildir [55, 56].

Sertlik, sistemin kendisine bir kuvvet uygulandığında sistemin geometrisinde herhangi bir değişiklik olmadan bu etkiye yanıt verme yeteneğidir. Sertliğin performansa etkisi deformasyon oluşturduğundan Maglev sistem tasarımının kusursuz olması çok önemlidir. Çünkü Maglev sistemi, temassız askıda kalma prensibine dayanan bir PM ve bir kılavuz süperiletkenden oluşur [52].

Mekanik sistemlerde elastik sertlik sabit iken HTS-PM arasındaki manyetik sertlik değişkendir. Aslında 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 tanımlanır. Burada  $k_{zx}$ ,  $k_{xx}$  ve  $k_{zz}$ , sırasıyla çapraz, yatay ve düşey manyetik sertlik şeklinde adlandırılmaktadır. Çapraz  $k_{zx}$  manyetik sertliği, yatay  $x$  yönündeki yer değiştirmenin düşey  $z$  yönündeki kuvvette bir değişime yol açtığını ifade eder.

Süperiletken numunenin merkez normali ilk soğuma ve hareket süreci boyunca kalıcı mıknatısın merkez normali ile aynı eksen üzerinde olmalıdır. HTS PM'ye göre dikey olarak hareket ettiğinde,  $x$  ve  $y$  yönlerindeki  $F_x$  ve  $F_y$  yanıl manyetik kuvvetleri hemen hemen sıfıra eşit olduğundan dikey manyetik sertlik spesifik sertlik olarak kabul edilir.



Şekil 4. Alansız soğutma altında SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 süperiletkenlerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin uzaklığa bağlı değişimi

HTS düşey olarak hareket ettiğinde, MLF ve düşey manyetik sertlik HTS'nin soğuma geçmişinden etkilendiğinden, ZFC ve FC koşulları altında düşey manyetik sertlik ( $k_{zz}$ ) ile yer değiştirme (z) arasındaki ilişki değerlendirilmelidir. Bu çalışmada, ZFC koşulunu dikkate alarak düşey manyetik sertlik değerlendirmesi yapıldı.

### 3.1 Alansız soğutma durumunda manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri

Külçe yapıları bir süperiletken açısından MLF'yi etkileyen parametreler; numune boyutu, tane yönelimi, tane yarıçapı, kritik akım yoğunluğu, soğutma sıcaklığı ve soğutma yöntemi iken, PM açısından MLF'yi etkileyen faktörler ise manyetik alan dağılımı ve manyetik akı yoğunluğu ile yakından ilişkilidir. Aslında MLF'yi doğuran iki ana unsur HTS ve PM olmasına rağmen HTS ve PM çifti için ortak tek bir kaldırma kuvveti ölçülür. MLF ölçümündeki temel prensip, HTS ile PM arasında mesafeyi artırarak (uzaklaşma) ve azaltarak (yaklaşma) aralarındaki itici ve çekici kuvvetlerin belirlenmesidir [57]. ZFC koşulunda HTS ile PM arasındaki maksimum itme kuvveti sıfıra en yakın uzaklıkta gözlenir. HTS'de sıkışan manyetik alan ile PM arasında oluşan manyetik gerilim nedeniyle mesafe arttıkça çekici bir kuvvet oluşur. Akı çivileme merkezlerinin sayısındaki artış HTS'de sıkışan manyetik alanın artışına neden olurken, HTS'de oluşan zayıf bağlar ve çatlaklar MLF'de azalmaya neden olur [58].

Nominal kompozisyonu  $Ba_2Ca_3Cu_{6-x}Sn_xO_y$  olan HTS seramik malzemelerin mesafeye bağlı MLF ölçümleri 77

K'de sıvı nitrojen ortamında hem ZFC hem de FC koşullarında alındı. Ayrıca MLF ölçümleri PM'ye yaklaşırken ve PM'den uzaklaşırken diye iki şekilde alındı. HTS'nin PM'ye yaklaşabildiği en yakın mesafe 1 mm, ölçüm sisteminde izin verilen en uzak mesafe ise 110 mm'dir. MLF ölçümlerinde 300 mT değerinde PM kullanıldı. Üretilen HTS'lerin tamamında ZFC koşulunda histeretik davranış görüldü.

Şekil 4, ilki saf ve diğerleri farklı oranda kalay katkılanması yapılarak üretilen toplam 5 adet HTS numunenin ZFC koşulunda mesafe azalırken (yaklaşma) ve artarken (uzaklaşma) ölçülen MLF eğrilerini göstermektedir. Mesafe 30 mm'ye düşene kadar MLF'de bir değişiklik görülmezken, 30-1 mm'lik bölgede belirgin bir değişiklik görüldü. En büyük MLF, Sn20 örneğinde  $F_z = 62.55$  mN olarak ölçüldü. Tüm örnekler incelendiğinde katkılanmanın negatif değerlere uzanan çekici kuvveti düşürdüğü ve itici kuvvetin baskın hale geldiğini göstermektedir. Katkılama arttıkça MLF'ye ait yaklaşma ile uzaklaşma eğrisi arasında oluşan bölgenin büyüklüğünde bir azalma görülmektedir. Bu azalma, HTS numunesindeki akı çivileme merkezlerinin sayısındaki veya çapındaki azalmadan kaynaklı zayıf akı yakalamasını akla getirir.

Shlyk vd. [59] eritme-büyütme yöntemiyle farklı oranlarda Li ve Ni katkılayarak üretilen YBCO süperiletkeninde 77K'de ZFC durumunda MLF'leri araştırdı. Saf, Ni ve Li katkılı YBCO HTS'lerin manyetik kaldırma kuvveti değerlerini sırasıyla 45 N, 60 N ve 53 N şeklinde kaydetmişlerdir.

Wang vd. [60] üstün tohumlama yöntemi kullanarak nominal kompozisyonu ( $\text{Sm}_2\text{O}_3 + 1.2\text{BaCuO}_2$ ) + x olan 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığında SmBCO süper iletkenini üretmişlerdir. Kaldırma kuvveti ölçümlerinde 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 ve 1.6 Tesla değerlerine sahip PM'ler kullanmışlar ve FC altında x = 0.5 örneğinde 1.2 Tesla dış alan etkisinde en yüksek MLF değerini 87 N olarak rapor etmişlerdir.

**Tablo 1.** SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 malzemesi için mesafe azalırken elde edilen en iyi  $F_0$ ,  $a$ ,  $b$  ve  $r^2$  değerleri

Malzeme	$F = F_0 + ae^{-bz}$				$r^2$
	$F_{\text{mak}}$ (mN)	$F_0$ (mN)	$a$ (mN)	$b$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	
SnP	38.65	-8.9131	60.0823	0.1586	0.9983
Sn5	31.70	-1.7288	182.764	0.2263	0.9993
Sn10	32.22	0.9964	40.0679	0.1747	0.9989
Sn15	26.46	3.3015	23.7030	0.3223	0.9968
Sn20	62.55	-3.3857	67.8642	0.3733	0.9976

**Tablo 2.** SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 malzemesi için mesafe artarken elde edilen en iyi  $F_0$ ,  $a$ ,  $b$  ve  $r^2$  değerleri

Malzeme	$F = F_0 + ae^{-bz}$				$r^2$
	$F_{\text{mak}}$ (mN)	$F_0$ (mN)	$a$ (mN)	$b$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	
SnP	35.07	-17.1954	80.6763	0.1748	0.9973
Sn5	32.08	-10.6641	179.205	0.1910	0.9997
Sn10	29.80	-0.7475	46.2240	0.3019	0.9938
Sn15	25.60	-0.7440	27.4247	0.7465	0.9984
Sn20	61.85	-0.3145	94.3313	0.2755	0.9998

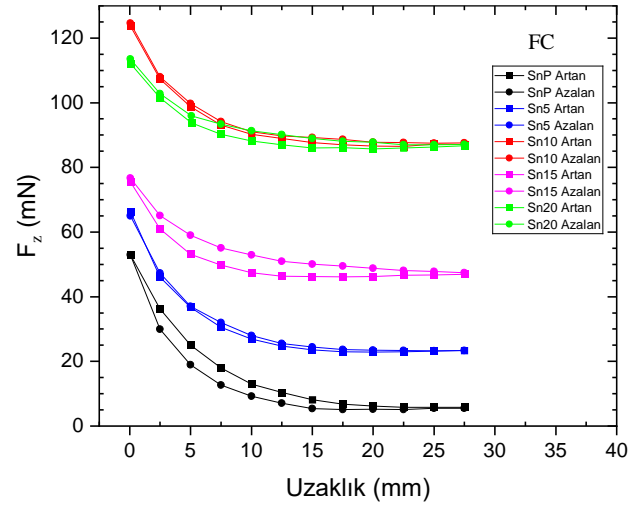
Her bir HTS'nin PM'ye yaklaşma ve uzaklaşma durumunda elde edilen deneysel MLF eğrilerinin, Moon'un [61] Taylor serisi açılımından elde ettiği  $F = F_0 + ae^{-bz}$  manyetik kuvvet denklemine fit edilmesiyle hesaplanan en iyi  $F_0$ ,  $a$ ,  $b$  ve  $r^2$  parametreleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmektedir. Burada  $a$  ve  $b$  fit parametreleridir.  $F_0$  ise z'nin sıfır olduğu durumdaki kuvvet büyüklüğüdür. Hem yaklaşma hem de uzaklaşma verileri dikkate alındığında  $r^2$  korelasyon katsayısının oldukça iyi olduğu görülür. Bu sonuç deneysel eğrilerin, teorik denklemden elde edilen eğrilerle oldukça uyumlu olduğunu ortaya koyar.

### 3.2 Alan altında soğutma durumunda manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri

Süperiletkenler FC koşulunda soğutulduğunda dış manyetik alan süperiletken içine hapsolür. Hapsolan manyetik alan negatif işaretli çekici kuvvet etkisi doğurur. FC koşulundaki süperiletken, sahip olduğu mükemmel diyamanyetik özelliğinden dolayı çekici kuvvetin yanında eş zamanlı olarak itici bir manyetik etkiye de sahiptir. Bundan dolayı, FC koşulundaki süperiletken PM'yi hem iter hem de çeker. Manyetik alanın süperiletkende hapsoldüğünü doğrulamanın en basit yolu süperiletken yakınına bir demir malzemenin getirilmesi olacaktır.

Şekil 5'de saf SnP ve katkılanmış Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 süperiletkenlerinin FC şartlarında manyetik kaldırma

kuvvetinin uzaklığa bağlı PM'ye yaklaşma ve uzaklaşma eğrileri verilmektedir. Şekil 5'den süperiletkenin MLF'ye duyarlı olduğu bölgenin, dramatik değişimin gözlemlendiği 0-25 mm aralığı olduğu görülür. Bu yüzden ölçümlerimizde 30 mm mesafenin üzerine çıkmadık. MLF eğrileri bir bütünlük içerisinde incelenirse, katkılanmanın maksimum ve minimum itici kuvvet değerini artırdığı görülür. Bu değer maksimumunda 120 mN'a kadar, minimumunda ise 90 mN'a kadar çıkmıştır. Maksimum MLF değeri en düşük 53 mN ile saf SnP numunesinde ölçülmüştür. Minimum MLF değeri de 5mN olarak SnP numunesinden elde edilmiştir. Dikkat edilirse minimum MLF'nin hiçbir numunede negatif değerlere ulaşmadığı görülmüştür. Bu da süperiletkenin PM üzerindeki itici etkisinin çekici kuvvet etkisine göre daha baskın olduğu anlamına gelir. Ayrıca süperiletken içerisindeki çekim olan çekici kuvvet etkisinin katkıyla azaldığı da söylenebilir. Çekici kuvvetin zayıflığı süperiletken içerisinde yeterli akı tuzaklama merkezlerinin oluşmadığı sonucunu doğurur.  $F_z$ -uzaklık eğrilerinde yaklaşma ve uzaklaşma eğrisi arasındaki aralığın akı tuzaklamasının bir ölçüsü olduğu ve buradan tüm numunelerin FC koşulunda histeretik davranış gösterdiği söylenir.

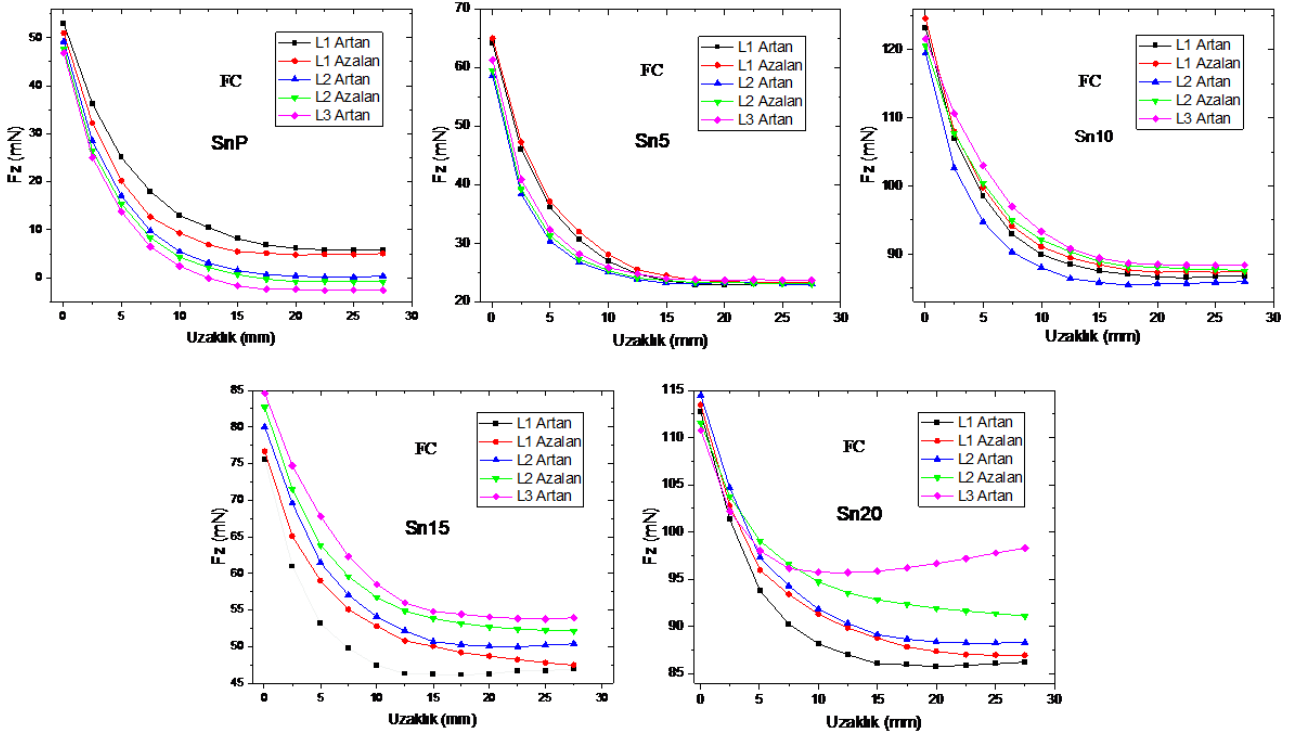


**Şekil 5.** Alan altında soğutma durumunda SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 süperiletkenlerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin uzaklığa bağlı değişimi

Liu vd [62] eritme-büyütme yöntemini kullanarak farklı çap ve kalınlıklarda YBCO süperiletken üretmişlerdir. FC ve ZFC koşullarında 3 farklı PM kullanarak MLF ölçümleri almışlardır. FC koşulu altında Maksimum MLF değerlerini 87/51 ve 81/49 N olarak ölçmüşlerdir.

Literatürde, FC koşulunda HTS-PM arasındaki MLF'nin, düşük soğutma yüksekliğinde çekici kuvvet davranışı gösterdiği [26,63,64] verilmiştir. Ölçümlerde bu durum dikkate alınarak FC koşulu altında sistemin mümkün kıldığı minimum soğutma yüksekliği kullanıldı.

Savaşkan vd. [41] 18 mm çap ve 5 mm kalınlığındaki MgB<sub>2</sub> süper iletkeni için FC koşulunda 33 ve 37 K'de 0.64 Tesla PM etkisinde MLF ölçümleri almışlardır. FC



Şekil 6. FC koşulunda SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 süperiletkenlerine ait 3 loop (döngü) üzerinden alınan manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri

koşulunda soğutma mesafesi 10, 20 ve 77 mm'dir. En yüksek MLF değerini 33 K sıcaklıkta ve 77 mm soğutma mesafesinde 28.5 N olarak rapor etmişlerdir.

Karaca [65], sol-jel yöntemiyle ürettiği nominal bileşimi  $Bi_{1.84}Pb_{0.34}Sr_{1.91}Ca_{2.03}Cu_{3.06}O_{10}$  olan Bi-2223 ve Bi-2212 süperiletkenlerinin ZFC koşulunda 77 K'de MLF ölçümlerini almıştır. En yüksek MLF değerinin 0.15 Tesla PM etkisinde  $1.5 \times 10^{-5}$  N olduğunu bildirmiştir.

Güner vd. [66] üsten tohumlama yöntemiyle Nd123 tohumu kullanarak 20 mm çapında ve 8 mm kalınlığında YBCO süperiletkeni ürettiler. ZFC ve FC koşullarında sıcaklığa bağlı MLF ölçümleri almışlardır. ZFC koşulunda en düşük ve en yüksek MLF değerlerinin 77 K'de 7.02 N ve 37 K'de 11.23 N, FC koşulunda ise en küçük MLF 37 K'de 4.33 N, en büyük MLF 77 K'de 2.74 N olduğunu belirtmişlerdir.

Abdioğlu vd. [67] 45 mm çapında ve 15 mm kalınlığında YBCO süperiletkeninden 0.50, 0.53 ve 0.55 T değerlerine sahip PM'lerin etkisi altında FC ve ZFC koşullarında MLF ölçümleri almışlardır. ZFC koşulunda en büyük MLF 420 N, en küçük MLF 240 N ve FC koşulunda en büyük MLF değerini 5 mm soğutma mesafesinde 105 N, 20 mm soğutma mesafesinde 325 N olarak bildirmişlerdir.

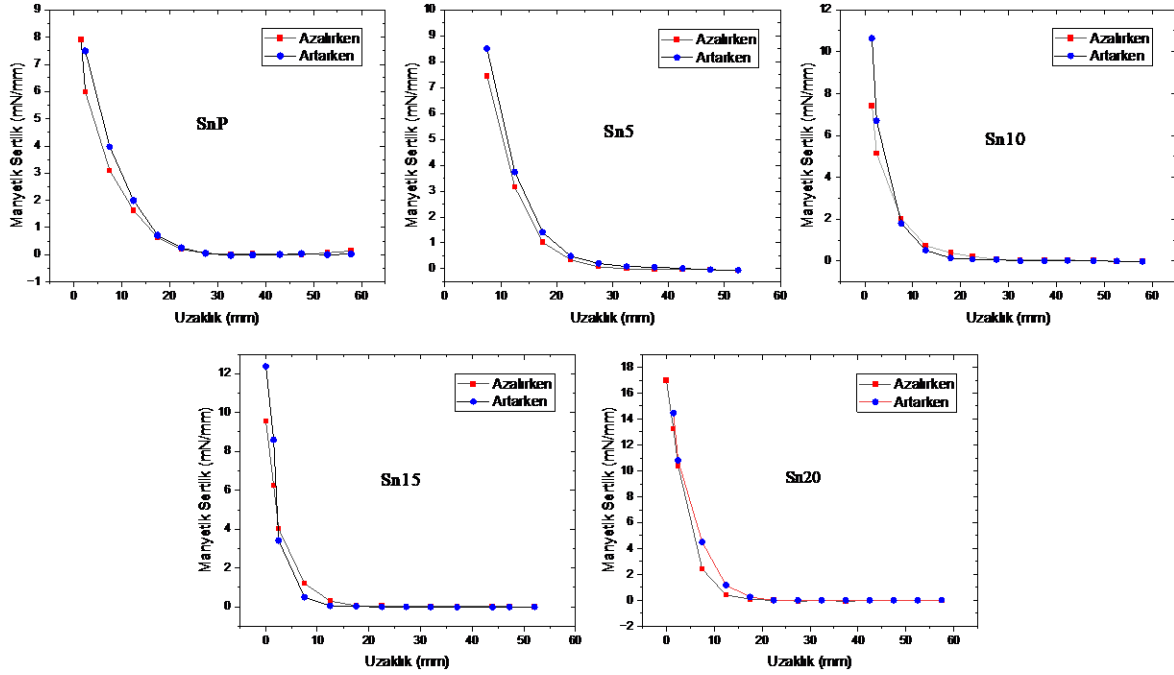
Şekil 6'da FC koşulunda SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 süperiletkenlerine ait 3 loop (L1-L2-L3 döngüsü) üzerinden alınan MLF ölçümleri verilmektedir. MLF eğrileri her bir HTS numunesi kendi içinde bağımsız düşünerek incelenirse, saf SnP numunesinin katkılı numunelerden farklı davranış sergilediği görülür. SnP' de looplar ilerledikçe minimum itme kuvvetinde bir azalma görülmektedir. Bu durum aslında HTS içerisindeki mücadelenin çekici kuvvet lehine kaydığı,

akı tuzaklama merkezlerinin artışının bir sonucudur. Bu kaymalar Bean'in Kritik Durum Modeli ile açıklanabilir. Katkılı numunelerde ise aksine looplar ilerledikçe minimum itme kuvvetinde artış görülmektedir. Bu da HTS içerisinde itici kuvvet lehine bir durumun ifadesidir. Minimum MLF değerinin en yüksek Sn20 numunesinde 98 mN olduğu görülmektedir. Sonuç olarak HTS bileşiklerine yapılan katkının artışı ilerleyen looplarda minimum MLF değerlerinin de itici yönde artışına sebep olmaktadır. Döngüsel çalışma (loop) bize, daha önce de ifade ettiğimiz gibi, katkılamanın HTS'ler içerisinde oluşan akı yakalama merkezlerini olumsuz yönde etkilediğini doğrular niteliktedir.

### 3.3 Manyetik sertlik hesaplamaları

Mekanik bir kütle yay sisteminde yayın elastik sertliği  $k$  sabit bir değere sahip iken HTS ile PM arasındaki manyetik etkileşimden kaynaklanan, HTS'nin manyetik sertlik değeri değişkenlik gösterir. Bu yüzden 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 edilir. Burada manyetik sertliğin birimi N/mm alınmıştır. Manyetik sertlik hesaplamaları, MLF'nin statik ve dinamik ölçümlerine dayanarak iki şekilde yapılmaktadır [52]. Bu çalışmada statik MLF ölçümleri aldığımızdan manyetik sertlik hesapları statik yapılmış oldu. Düşey manyetik sertlik değerleri, düşey yönlü (z yönlü) deneysel MLF eğrilerinin düşey yönde (z yönünde) mesafeye bağlı türevi alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen manyetik sertlik değerleri incelendiğinde, ZFC koşullarında düşey sertlik grafiğinde



Şekil 7. SnP, Sn5, Sn10, Sn15 ve Sn20 süperiletkenleri için manyetik sertliğin uzaklığa bağlı değişimi

yaklaşma eğrisi ile uzaklaşma eğrisi hiçbir zaman çakışmaz, histeretik davranış gösterir. İki eğri arasındaki bu küçük fark, HTS'de tuzaklanan akıdan kaynaklanmaktadır.

Şekil 7, saf SnP, katkılı Sn5, S10, Sn15 ve Sn20 numunelerin mesafeye bağlı sertlik eğrilerini göstermektedir. Şekil 7 incelendiğinde, HTS'lerin tamamında katkı artışıyla maksimum sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, üretimi yapılan HTS'lerin tamamında, duyarlık gösterdiği manyetik sertlik bölgesinin (PM ye verilen tepkinin) 0-30 mm aralığında olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç Maglev uygulamalarında süperiletken seçiminde önemli bir kriterdir.

#### 4 Sonuçlar

Önceki çalışmada üretimi yapılmış olan  $Ba_2Ca_3Cu_{6-x}Sn_xO_y$  nominal kompozisyona sahip HTS seramiklerin, bu çalışmada ZFC ve FC şartlarında deneysel MLF ölçümleri ve ZFC de manyetik sertlik hesaplamaları yapıldı. ZFC de HTS' nin 30-1 mm aralığında duyarlı olduğu belirlendi. Maksimum MLF değeri, Sn20 örneğinde  $F_z = 63$  mN olarak ölçüldü. ZFC' de kalay katkılamanın tüm örneklerde çekici kuvveti düşürdüğü ve itici kuvveti baskın hale getirdiği sonucuna varıldı. Katkı artışıyla MLF' ye ait yaklaşma-uzaklaşma eğrileri arasındaki bölgenin büyüklüğünde görülen azalmanın HTS numunesindeki akı çivileme merkezlerinin sayısındaki veya çapındaki azalmandan kaynaklı zayıf akı yakalaması olduğu çıkarımı yapıldı. Deneysel MLF eğrilerinin teorik fiti neticesinde  $r^2 = 0.99$  uyumlulukta a, b parametreleri belirlendi. FC' de HTS' lerin MLF' ye duyarlı olduğu bölgenin 0.25 mm aralığı olduğu belirlendi. Kalay katkısının, HTS'nin itici kuvvet değerini maksimumda 120 mN' a ve minimumda 90 mN' a kadar artırdığı gözlemlendi. Maksimum MLF değeri en düşük 55 mN ile saf SnP numunesinde, minimum MLF değeri ise

5mN olarak SnP numunesinden elde edilmiştir. Çoğunlukla numunelerde minimum MLF'nin itici etkisi gözlemlendi, nadir de olsa çekici kuvvet etkisi de gözlemlendi ki bu süperiletkenin PM üzerindeki itici etkisinin çekici kuvvet etkisine göre daha baskın olduğu ile ifade edildi. Bu baskınlık, literatürde olduğu gibi süperiletken içerisinde yeterli akı tuzaklama merkezlerinin oluşmadığı sonucu çıkarıldı. Tüm numunelerin histeretik davranış gösterdiği sonucuna varıldı. 3 loop (L1-L2-L3 döngüsü) üzerinden alınan MLF ölçümlerinden yola çıkılarak saf SnP numunesinin katkılı numunelerden farklı davranış gösterdiği ortaya konuldu. SnP'de loopların ilerleyişiyle minimum itme kuvvetindeki azalmanın; HTS içerisindeki mücadelenin çekici kuvvet lehine kayışına ve akı tuzaklama merkezleri sayısında artışa neden olduğu tespit edildi. Bu kaymalar, Bean'in Kritik Durum Modeli ile açıklandı. Katkılı numunelerde oluşan tersi durum ise, HTS içerisinde itici kuvvet lehine bir oluşum göstergesi olduğu anlaşıldı. ZFC' de HTS'lerin tamamında katkı artışıyla maksimum sertlik hesaplamalarındaki değerlerin arttığı sonucuna ulaşıldı. HTS'lerin tamamında, numunelerin duyarlık gösterdiği manyetik sertlik bölgesinin 0-30 mm aralığı olduğu belirlendi. Maglev uygulamalarında süperiletkeni belirlemek için önemli bir kriter olan bu sonucun literatüre katkı sağlayacağı öngörülebilir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** % 15

#### Kaynaklar

- [1] H. K. Onnes, The Resistance of Pure Mercury at Helium Temperatures. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 12, 1. 1911

- [2] W. Meissner, and R. Ochsenfeld, Ein neuer Effect bei Eintritt der Supraleitfähigkeit Naturwissenschaften 21, 787, 1933.
- [3] K. Nagashima, H. Seino, N. Sakai and M. Murakami, Superconducting magnetic bearing for a flywheel energy storage system using superconducting coils and bulk superconductors. *Physica C: Superconductivity*, 469, 1244-1249, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2009.05.245>.
- [4] Y. H. Han, B. J. Park, S. Y. Jung and S. C. Han, Study of superconductor bearings for a 35 kWh superconductor flywheel energy storage system. *Physica C: Superconductivity*, 483, 156-161, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.08.002>.
- [5] Y. Arai, H. Seino, K. Yoshizawa and K. Nagashima, Development of superconducting magnetic bearing with superconducting coil and bulk superconductor for flywheel energy storage system. *Physica C: Superconductivity*, 494, 250-254, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.04.039>.
- [6] 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. <https://www.airitilibrary.com/Article/Detail?DocID=05779073-199612-201211270040-201211270040-1344-1351>.
- [7] M. Wang, X. Yang, X. Wang, X. Wang, M. Zhang and D. Hao, Comparison of  $Y_2Ba_4CuBiO_y$  Nanoparticles with  $CeO_2$  Doping on the Levitation Force of Single Domain YBCO Bulk Superconductor by TSiG Process. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 6, 90-98, (2018). <https://doi.org/10.4236/msce.2018.61010>.
- [8] R. L. Byer, R. F. Begley and G. R. Stewart, Superconducting, Magnetically Levitated Merry-Go-Round. *Am J Phys* 42, 111-125, 1974. <https://doi.org/10.1119/1.1987626>.
- [9] J. S. Wang, S. Y. Wang, Y. W. Zeng, H. Y. Huang, F. Luo, Z. Xu, Q. X. Tang, G. Lin, C. F. Zhang, Z. Y. Ren, G. Zhao, D. Zhu, S. O. Wang, H. Jiang, M. Zhu, C. Deng, P. Hu, C. Y. Li, F. Liu, J. Lian, X. Wang, L. Wang, X. Shen and X. Dong, The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world. *Physica C*, 378-381, 809-814, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)01548-4](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01548-4).
- [10] W. Yang, Y. X. Liu, Z. Chen, Y. Wen., Duan and M. Qiu, Levitation characteristics of a high-temperature superconducting maglev system for launching space vehicles. *Physica C: Superconductivity*, 455, 13-18, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.01.025>.
- [11] Z. G. Deng, J. Zheng, J. Zhang, J. S. Wang, S. Y. Wang, Y. Zhang and L. Liu, Studies on the levitation height decay of the high temperature superconducting Maglev vehicle. *Physica C: Superconductivity*, 463-465, 1293-1296, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.02.050>.
- [12] Z. Deng, J. Zheng, J. Li, G. Ma, Y. Lu, Y. Zhang, S. Wang and J. Wang, Superconducting bulk magnet for maglev vehicle: Stable levitation performance above permanent magnet guideway. *Materials Science and Engineering B*, 151, 117-121, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.03.011>.
- [13] Y. H. Han, J. R. Hull, S. C. Han, N. H. Jeong, T. H. Sung and No Kwangsoo, Design and characteristics of a superconductor bearing. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15, 2249-2252, 2005. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.849623>.
- [14] A. Cansiz and I. Yildizer, The design considerations for a superconducting magnetic bearing system. *Cryogenics*. 63, 180-185, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.06.006>.
- [15] I. G. Chen, J. C. Hsu, G. Janm, C. C. Kuo, H. J. Liu and 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>.
- [16] A.C. Rose-Innes and E.H. Rhoderick, "Introduction to Superconductivity", 2nd edition, *Pergamon Press Ltd.*, England, 1980.
- [17] A. Cansiz, 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=ceBNwAACAj>.
- [18] J. S. Choi, S. D. Park, B. H. Jun, Y. H. Han, N. H. Jeong, B. G. Kim, J. M. Sohn and 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>.
- [19] B. Zheng, J. Zheng, D. He, Y. Ren and 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>.
- [20] Z. M. Zhao, J. M. Xu, X. Y. Yuan and 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>.
- [21] C. P. Bean, Magnetization of Hard Superconductors. *Phys. Rev. Lett.*, 8, 250-253, 1962. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.8.250>.
- [22] T. H. Johansen, Z. J. Yang, H. Bratsberg, G. Helgesen and A. T. Skjeltorp, Lateral force on a magnet placed above a planar  $YBa_2Cu_3O_x$  superconductor. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 179-181, 1991. <https://doi.org/10.1063/1.104965>.
- [23] X-Y Zhang, Y-H Zhou and J. Zhou, Three-dimensional measurements of forces between magnet and superconductor in a levitation system. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 467, 125-129, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.09.010>.
- [24] S. Wang, J. Wang, C. Deng, Y. Lu, Y. Zeng, H. Song, H. Huang, H. Jing, Y. Huang, J. Zheng, X. Wang and Y. Zhang, An Update High-Temperature Superconducting Maglev Measurement System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17, 2067-



- 2070, 2007. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.899257>.
- [25] S. L. Chen, W. M. Yang, J. W. Li, X. C. Yuan, J. Ma and M. Wang, A new 3D levitation force measuring device for REBCO bulk superconductors. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 496, 39-43, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.07.004>.
- [26] B. Savaskan, E. T. Koparan, S. Celik, K. Ozturk and E. Yanmaz, Investigation on the levitation force behaviour of malic acid added bulk MgB<sub>2</sub> superconductors. *Physica C: Superconductivity*, 502, 63-69, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.04.032>.
- [27] R. Parthasarathy and 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>.
- [28] M. Abdioglu, U. K. Ozturk, S. B. Guner, M. Ozturk, H. Mollahasanoglu and E. Yanmaz, Enhancing magnetic levitation and guidance force and weight efficiency of high-temperature superconducting maglev systems by using sliced bulk YBCO. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 20, 3323-3823, 2023. <https://doi.org/10.1111/ijac.14463>.
- [29] R. J. Adler and 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>.
- [30] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, Theory of Superconductivity. *Physical Review*, 108, 1175-1204, 1957. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175>.
- [31] J. G. Bednorz and K. A. Muller, Possible High Tc Superconductivity in the La-Ba-CuO System. *Zeitschrift für Physik B-Condensed Matter*, 64, 189-193, 1986. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01303701>.
- [32] P. Benzi, E. Bottizzo and 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>.
- [33] 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. *Chin. J. Phys.*, 36, 420-427, (1998). [Magnetic Levitation Force of Single Grained YBCO Materials | Airiti Library 華藝線上圖書館](https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.200).
- [34] 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>.
- [35] I. B. Bobylev, E. G. Gerasimov, N. A. Zyuzeva, Improvement of critical parameters of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub> 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>.
- [36] K. Brodt, H. Fuess, E. F. Paulus, W. Assmus and J. Kowalewski, Untwinned single crystals of the high-temperature superconductor YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>. *Acta Crystallographica C*, 46, 354-358, 1990. <https://doi.org/10.1107/S0108270189006803>.
- [37] G. Calestani and C. Rizzoli, Crystal structure of the YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> superconductor by single-crystal X-ray diffraction. *Nature*, 328, 606-607, 1987. <https://doi.org/10.1038/328606a0>.
- [38] V. Calzona, M. R. Cimberle, C. Ferdeghini, M. Putti and 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).
- [39] P. Z. Chang, F. C. Moon, J. R. Hull and 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>.
- [40] J. S. Choi, S. D. Park, B. H. Jun, Y. H. Han, N. H. Jeong, B. G. Kim, J. M. Sohn and 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>.
- [41] B. Savaskan, M. Abdioglu and K. Ozturk, Determination of magnetic levitation force properties of bulk MgB<sub>2</sub> 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>.
- [42] F. C. Moon, M. M. Yanoviak and R. Ware, Hysteretic levitation forces in superconducting ceramics. *Appl. Phys. Lett.*, 52, 1534-1536, 1988. <https://doi.org/10.1063/1.99700>.
- [43] F. C. Moon, K. C. Weng and P. Z. Chang, Dynamic magnetic forces in superconducting ceramics. *J. Appl. Phys.*, 66, 5643-5645, 1989. <https://doi.org/10.1063/1.343677>.
- [44] N. D. Valle, A. Sanchez, E. Pardo, C. Navau and D. X. Chen, Enhanced stability by field cooling in superconducting levitation with translational symmetry. *Appl. Phys. Lett.*, 91, 112507, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2785169>.
- [45] Y. Yang and X. J. Zheng, Method for solution of the interaction between superconductor and permanent magnet. *J. Appl. Phys.*, 101, 113922, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2745082>.
- [46] A. Sanchez, N. Del-Valle, C. Navau and D. X. Chen, Critical-current density analysis of force and stability in maglev systems. *J. Appl. Phys.*, 105, 023906, 2009. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3054922>.
- [47] Y. Y. Lu, B. J. Lu and S. Y. Wang, The Relationship of Magnetic Stiffness Between Single and Multiple YBCO Superconductors over Permanent Magnet Guideway. *J. Low Temp. Phys.*, 164, 279-286, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10909-011-0379-4>.
- [48] 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>.

- [49] Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff and A. Shaulov, Magnetic relaxation in high-temperature superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 68, 911-949, 1996. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.911>.
- [50] Ş. Ünlüer, İ. Karaca and N. Şimşek, Refinement of the Low-temperature phase with nano SnO doping in Ba-Ca-Cu-O ceramics. *Journal of Molecular Structure*, 1226, 129408, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129408>
- [51] İ. Karaca, N. Şimşek, S. Özen and 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>.
- [52] F. C. Moon, *Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.
- [53] M. Murakami, *Melt Processed High-Temperature Superconductors*. World Scientific, Singapore, 1992. [9789814335898\\_fmatter \(worldscientific.com\)](https://doi.org/10.1002/9789814335898_fmatter).
- [54] J. Baumann, M. Lojka, A. Dennis, Y. Shi, J. H. Durrell, T. Hlášek and D. A. Cardwell, Statistical evaluation of the mechanical and flux trapping properties of standard and thin-wall EuBCO(Ag) bulk superconductors. *Journal of the American Ceramic Society*, 107, 2609-2617, 2023. <https://doi.org/10.1111/jace.19601>
- [55] W. M. Yang, L. Zhou, Y. Feng, P. X. Zhang, J. R. Wang, C. P. Zhang, Z. M. Yu, X. D. Tang and W. Wei, The effect of magnet configurations on the levitation force of melt processed YBCO bulk superconductors. *Physica C*, 354, 5-12, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(01\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(01)00014-4).
- [56] K. Nagashima, T. Otani and M. Murakami, Magnetic interaction between permanent magnets and bulk superconductors. *Physica C*, 328, 137-144, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(99\)00567-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(99)00567-5).
- [57] W. M. Yang, L. Zhou, Y. Feng, P. X. Zhang, R. de Andrade, Jr R. de Andrade, The characterization of levitation force and attractive force of single-domain YBCO bulk under different field cooling process. *Physica C*, 398, 141-146, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(03\)01276-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(03)01276-0).
- [58] M. Murakami, Novel application of high Tc bulk superconductors. *Appl. Supercond.*, 1, 1157-1173, 1993. [https://doi.org/10.1016/0964-1807\(93\)90424-Z](https://doi.org/10.1016/0964-1807(93)90424-Z).
- [59] L. Shlyk, G. Krabbes and G. Fuchs, Trapped field and levitation force in melt-textured YBCO doped with Ni and Li. *Physica C*, 390, 325-329, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(03\)00737-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(03)00737-8).
- [60] Y-N Wang, W-M Yang, P-T Yang, C-Y Zhang, J-L Chen, L-J Zhang and L. Chen, Influence of trapped field on the levitation force of SmBCO bulk superconductor. *Physica C Sup. and its App.*, 542, 28-33, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2017.09.004>.
- [61] F. C. Moon, *Superconducting Levitation*, 2nd edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.
- [62] W. Liu, S. Y. Wang, H. Jing, J. Zheng, M. Jiang and J. S. Wang, Levitation performance of YBCO bulk in different applied magnetic fields. *Physica C*, 468, 974-977, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.04.013>.
- [63] E. Perini, G. Giunchi, M. Geri and A. Morandi, Experimental and numerical investigation of the levitation force between bulk permanent magnet and MgB<sub>2</sub> disk. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19, 2124 - 2128, 2009. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2019141>.
- [64] O. Erdem, M. Abdioglu, S. B. Guner, S. Celik and T. Kucukomeroglu, Improvement in levitation force performance of bulk MgB<sub>2</sub> superconductors through coronene powder adding. *J. Alloy. Comp.*, 727, 1213-1220, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.242>.
- [65] 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, 690-696, 2009. <http://PSROC.phys.ntu.edu.tw/cjp>.
- [66] S. B. Guner, S. Celik and M. Tomakin, The Investigation of Magnetic Levitation Performances of Single Grain YBCO at Different Temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 705, 247-252, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.134>.
- [67] M. Abdioglu, K. Ozturk, H. Gedikli, M. Ekici and A. Cansiz, Levitation and guidance force efficiencies of bulk YBCO for different permanent magnetic guideways. *Journal of Alloys and Compounds*, 630, 260-265, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.044>.

