

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MOTOR VE LİNEER LEVİTASYON UYGULAMALARI İÇİN MANYETİK YATAK ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali YILMAZ

AĞUSTOS
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MOTOR VE LİNEER LEVİTASYON UYGULAMALARI İÇİN MANYETİK YATAK
ÜRETİMİ**

Ali YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ENERJİ SİSTEMLERİ YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 / 07 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 08 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Burcu SAVAŞKAN

İkinci Danışmanı : Prof. Dr. Ufuk Kemal ÖZTÜRK

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Motor Ve Lineer Levitasyon Uygulamaları İçin Manyetik Yatak Üretimi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası FYL-2024-11109’dur.

Bu çalışma TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında destek almıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Burcu SAVAŞKAN ve Prof. Dr. Ufuk Kemal ÖZTÜRK’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Sait Barış GÜNER’e teşekkür ederim.

COMSOL Multiphysics programında sayısal modelleme konusunda desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Murat ABDİOĞLU ve Dr. Oğuzhan UZUN’a teşekkür ederim.

Laboratuvarda beraber paylaştığımız ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşım doktora öğrencisi Babe Cheikh ABDERRAHMANE’e teşekkür ederim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Havva YILMAZ ve babam Hasan YILMAZ’a, teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ali Yılmaz

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

YÜKSEK Lisans Tezi olarak sunduğum “Motor Ve Lineer Levitasyon Uygulamaları İçin Manyetik Yatak Üretimi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Burcu Savaşkan ve Prof. Dr. Ufuk Kemal ÖZTÜRK’ ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/08/2025

Ali YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Kritik Sıcaklık (T_c)	2
1.2. Kritik Akım Yoğunluğu (J_c).....	3
1.3. Kritik Manyetik Alan (H_c).....	3
1.4. Meissner Etkisi	4
1.5. I.Tip ve II.Tip Süperiletkenler.....	6
1.5.1. I. Tip ve II. Tip İdeal Süperiletkenlerde Mıknatıslanma.....	7
1.5.2. İdeal Olmayan II. Tip Süperiletkenlerde Mıknatıslanma.....	8
1.6. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri	9
1.6.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerinin Keşfi	9
1.6.2. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ’nın Kristal Yapısı ve Genel Özellikleri	10
1.7. Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyütme (TSMG) Üretim Tekniği	12
1.7.1. Çekirdeğin YBCO Üzerindeki Etkileri	13
1.7.2. TSMG Yönteminde Y211 Katkısının Y123’e Etkileri	14
1.7.3. Üst Sıcaklık (T_{max}) Değerinin YBCO Tek Kristal Oluşumu Üzerindeki Etkisi.....	14
1.8. Süperiletken Soğutma Uygulamaları.....	15
1.9. Süperiletken Külçelerin Kullanım Alanları.....	16
1.9.1. Süperiletken Elektrik Makineleri	17
1.9.2. Külçe Süperiletkenlerin Manyetik Yatak Olarak Enerji Depolamada Kullanım Alanları	18
1.10. Manyetik Olarak Havalanmış Ulaşım Araçları (Maglev)	19
1.10.1. Manyetik Yatak Çeşitleri	21
1.10.2. Aktif Manyetik Yataklar	21
1.10.3. Pasif Manyetik Yataklar.....	22

1.11. Süperiletken Manyetik Askılama Mekanizması.....	24
1.12. H formülasyonu Yöntemiyle Simülasyon	26
1.13. Literatür Özeti	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	38
2.1. $Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ (Nd123) Çekirdek Üretimi	38
2.1.1. $Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ (Nd422) Üretimi	39
2.1.2. $Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ Çekirdeği Üretimi	40
2.1.3. Uygun $Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ Çekirdeğinin Belirlenmesi	41
2.2. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123) Karışımının Hazırlanması	42
2.3. Y_2BaCuO_5 (Y211) Karışımının Hazırlanması	43
2.4. YBCO bileşiğinin Oluşturulması ve Peletlenmesi	44
2.5. Manyetik Yatak İçin Kesme ve Zımparalama İşlemi.....	46
2.6. YBCO Örneklerinin Oksijen Altında Tavlama Süreci.....	47
2.7. Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sistemleri.....	48
2.7.1. Üç Eksenli Düşey Diziliimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi	48
2.7.2. Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi.....	51
2.8. XRD Ölçümleri	53
2.9. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Ölçümleri	54
2.10. H-formülasyonu ile Sayısal modelleme	54
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	57
3.1. Düşey Manyetik ve Yatay (Kılavuzlayıcı) Kuvvet Değişimi Sonuçları	57
3.1.1. Düşük Sıcaklık Cryostat Ölçüm Sisteminde Düşey Manyetik Kuvvet ve Yatay (Kılavuzlayıcı) Kuvvet Değişimi Sonuçları.....	57
3.1.2. Üç Eksenli Düşey Diziliimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi Manyetik Kaldırma ve Kılavuzlayıcı Kuvvet Sonuçları.....	61
3.2. Yapısal Analizler.....	77
3.2.1. X-Işını Kırınım Analizi (XRD).....	77
3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi	78
4. SONUÇLAR.....	82
5. ÖNERİLER.....	84
6. KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MOTOR VE LİNEER LEVİTASYON UYGULAMALARI İÇİN MANYETİK YATAK ÜRETİMİ

Ali YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Burcu SAVASKAN
2025, 91 Sayfa

Bu çalışmada silindirik ve kare YBCO numuneleri TSMG yöntemiyle üretilmiştir. YBCO üretimi için $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ çekirdek, Y123 ve Y211 tozları (Y123 %75, Y211 %25) üretilmiştir. Toplam karışımına CeO_2 ağırlıkça %0.5 oranında eklenerek oluşan toz karışım ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Süperiletken manyetik yatak üretimi için; 20 mm çapında silindir ve $27 \times 27 \text{ mm}^2$ boyutlarında büyük kare YBCO örnekler üretilmiştir. Silindirik örnekler kenarları şekillendirilerek $13.5 \times 13.5 \text{ mm}^2$ boyutunda küçük kare örnekler elde edilmiştir. Küçük kare örnekler birleştirilerek $13.5 \times 27 \text{ mm}^2$ boyutunda dikdörtgen şeklinde süperiletken manyetik yatak, dört küçük kareler birleştirilerek $27 \times 27 \text{ mm}^2$ boyutunda kare şeklinde manyetik yatak oluşturulmuştur. Tüm örneklerin, ZFC ve FC soğutma koşullarında 77 K sıcaklığında düşey manyetik kuvvet (F_z) – düşey hareket (z), yatay manyetik kuvvet (F_x) – yatay hareket (x) ölçülmüştür. COMSOL Multiphysics 6.0 kullanılarak H-formülasyonuna dayalı iki boyutlu sayısal model oluşturulmuştur. Yapılan iki boyutlu sayısal model deneysel sonuçlarla %97 oranına kadar uyushmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Süperiletkenlik, YBCO, Düşey Manyetik Kuvvet, Yatay Manyetik Kuvvet, Manyetik Yatak

Master Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF MAGNETIC BEARINGS FOR MOTOR AND LINEAR LEVITATION APPLICATIONS

Ali YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Energy System Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Burcu SAVASKAN
2025, 91 Pages

In this study, cylindrical and square YBCO samples were produced by the TSMG method. For YBCO production, $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ seed, Y123 and Y211 powders (Y123 75%, Y211 25%) were produced. CeO_2 was added to the total mixture at a rate of 0.5% by weight and the resulting powder mixture was subjected to heat treatment. For the production of superconducting magnetic bearings; 20 mm diameter cylinders and $27 \times 27 \text{ mm}^2$ large square YBCO samples were produced. The edges of the cylindrical samples were shaped to obtain small square samples of $13.5 \times 13.5 \text{ mm}^2$. A rectangular superconducting magnetic bearing of $13.5 \times 27 \text{ mm}^2$ was formed by combining the small square samples, and a square magnetic bearing of $27 \times 27 \text{ mm}^2$ was formed by combining four small squares. Vertical magnetic force (F_z) – vertical motion (z) and horizontal magnetic force (F_x) – horizontal motion (x) were measured for all samples under ZFC and FC cooling conditions at 77 K. A two-dimensional numerical model based on the H-formulation was created using COMSOL Multiphysics 6.0. The two-dimensional numerical model agrees with the experimental results by 97%.

Key Words: Superconductivity, YBCO, Vertical Magnetic Force, Horizontal Magnetic Force, Magnetic Bearing

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kritik sıcaklığa göre süperiletkenlerin sınıflandırılması (Xing, 2022).....	2
Şekil 2. Normal iletkenle süperiletkenin sıcaklığa bağlı direnç değişim grafiği (URL-4).	3
Şekil 3. Bir süperiletkenin kritik manyetik alanın sıcaklıkla değişimini gösteren faz diyagramı (Seeber, 1998).....	4
Şekil 4. Kritik parametrelerin arasındaki ilişki (Batur, 2023).	4
Şekil 5. (a) Kritik sıcaklık üzerindeki davranışı, (b) Kritik sıcaklık altındaki süperiletkenin manyetik alanı dışarılanması (Meissner etkisi) (Kittel, 1996).....	5
Şekil 6. (a) I. tip Süperiletkenlerin faz, (b) II. Tip süperiletkenlerin faz diyagramı (Karaahmet, 2023).....	6
Şekil 7. Normal bölgeler ve onların etrafında dolanan süper akım (Vorteks) girdaplarını gösteren karışık hal. Yüzeyde oluşan akım(perdeleme) Meissner etkisini göstermektedir (Rose ve Rhoderick, 1980).....	7
Şekil 8. I. Tip süperiletkenlerde uygulanan dış manyetik alanla (a) manyetik akı yoğunluğunun, (b) manyetizasyonun değişimi (Karaahmet, 2023).....	8
Şekil 9. İdeal II. Tip süperiletkenler için, (a) Akı yoğunluğunun, (b) Mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi (Rose ve Rhoderick, 1980).	8
Şekil 10. Tersinmez II. tip süperiletkenler için, a) Akı yoğunluğunun, b) Mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi (Rose ve Rhoderick, 1980).	9
Şekil 11. Ortorombik $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ bileşiğinin kristal yapısı (Batur, 2023).....	11
Şekil 12. “Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyüme” TSMG yönteminin şematik gösterimi.	12
Şekil 13. Üzerine çekirdek koyularak büyütülen tek çekirdekli YBCO peletin kristal yön çizgilerinin şematik gösterimi.	13
Şekil 14. YBCO süperiletken peletin T_{max} değerinin büyümeye etkisinin şematik gösterimleri ve örnekleri (Güner, 2017).....	15
Şekil 15. (a) Alanlı soğutma (FC) uygulaması, (b) Alansız soğutma (ZFC) uygulaması (Karaahmet, 2023).....	15
Şekil 16. (a) Külçe YBCO kullanılan elektromanyetik fırlatıcı (Başaran vd., 2021), (b) Külçe süperiletken kullanılan gemi motoru (Durrell vd., 2018).....	17

Şekil 17.	(a) 2019 yılında Hannover Fuarı'nda maketi sunulan Airbus için tasarlanan hibrit süperiletken ASuMED motor, (b) ASuMED motoru için krojenik soğutucu çevriminin şematik gösterimi (URL-3; Grilli vd., 2020).....	18
Şekil 18.	(a)10 kWh'lik volanın kiremit şeklindeki YBCO külçe süperiletkeninin bir parçası, (b) Aynı süperiletken volanın dış görüşü (Ichihara vd., 2005).....	19
Şekil 19.	Süperiletken Maglev treninin sistemlerin basitleştirilmiş gösterimi (Kircher vd., 2018).	20
Şekil 20.	(a) Bir külçe süperiletken üzerinde dengeli bir şekilde havada duran kalıcı mıknatıs (Hull, 2000), (b) Çin'de bir Maglev tren prototipi (Cheng vd., 2021).	21
Şekil 21.	Aktif manyetik yatakların temel bileşenleri (Moon, 2004).	22
Şekil 22.	Süperiletken manyetik taşıyıcı (SMB) konfigürasyonları; (a) Silindirik (içi boş silindir süperiletken, (b) Düzlemsel (disk süperiletken) (Patel, 2013).	23
Şekil 23.	(a) Siemens tarafından geliştirilen HTS jeneratörü, yatay eksenli silindirik SMB, (b) Rotor ağırlığının çoğunu taşıyan PM-PM yatağı (üst) ile kullanılan dikey eksenli silindirik SMB (altta) (Patel, 2013).	23
Şekil 24.	YBCO süperiletkeninin mıknatısla etkileşim durumundayken uzaklığa bağlı olarak kaldırma kuvvetinin değişimi (Ömür, 2015).	25
Şekil 25.	Brezilya'da Maglev araçları için geliştirilen "MagLevCobra" olarak adlandırılan ilk prototip (Sotelo vd., 2013).	27
Şekil 26.	Isıl işlem sonrası $d = 0, 1, 4$ ve 12 mm uzaklığındaki çift çekirdekli YBCO süperiletkenlerin üst yüzeylerinin fotoğrafları (Güner, 2017).	30
Şekil 27.	Tang ve arkadaşlarının geliştirdiği manyetik yatak (Tang vd., 2023).	31
Şekil 28.	Yeni Halbach diziliminin manyetik alan dağılımı (Houbart vd., 2023).	33
Şekil 29.	(a) En başarılı dizilime ait manyetik akı profili, (b) Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemine ait tasarım (Başaran vd., 2021).	34
Şekil 30.	9 adet kare YBCO düzeneği manyetik alan konsantrasyonunun gösterimi (a) tek katman, (b) çift katmanlı düzenek (Douine vd., 2013).	36
Şekil 31.	(a) Bölünmemiş, (b) 2'ye bölünmüş, (c) 3'e bölünmüş, (d) 4'e bölünmüş numunelerin kesilme şekilleri (Yang vd., 2002).	37
Şekil 32.	Nd123 üretim sıcaklık grafiği.	39
Şekil 33.	Nd422 üretim süreci grafiği.	40
Şekil 34.	(a) Retsch marka RM200 model agat havanlı öğütücü karıştırılması, (b) karışımın 20kPa ton basınç altında preslenmesi süreci, (c) Çekirdek peletinin üstüne MgO yerleştirilmiş çekirdek karışımı.	41
Şekil 35.	$\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ çekirdeğinin fırındaki ısıtma işlemi.	41

Şekil 36.	(a) MgO üstüne yerleştirilmiş çekirdek karışımının fırından çıkmış hali, (b) Agad havanla çekirdek peletinin parçalanması (c) Çekirdek seçimi.	42
Şekil 37.	Y123 üretim aşamaları.....	43
Şekil 38.	Y211'nin sıcaklık işlem grafiği.	44
Şekil 39.	(a) Belirtilen miktarlarda hazırlanmış YBCO karışımı, (b) Fırına girmeden önceki son hali.	45
Şekil 40.	(a) Protherm marka kare fırın, (b) YBCO süperiletkenine ait sıcaklık grafiği.....	45
Şekil 41.	(a) Kare kalıp kullanılarak peletlenmesi, (b) Kare şeklinde peletlenmiş YBCO karışımının üzerine çekirdek konulması.....	46
Şekil 42.	Silindir YBCO örneklerinin kesilmeden önceki ve sonraki hali.	46
Şekil 43.	Tüm numuneler ve süperiletken manyetik yataklar boyutları ve görünüşleri.....	47
Şekil 44.	(a) Tavlama işlemi yapılan Protherm marka tüp fırın, (b) YBCO oksijende tavlama süreci grafiği.	48
Şekil 45.	Farklı boyut ve manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslardan oluşan manyetik ray PMG (Ozturk vd., 2015).	49
Şekil 46.	FUTEK MTA400 üç eksenli yük hücresi.	49
Şekil 47.	(a) PMG yolunun şematik gösterimi, (b) Üst yüzeyin 5mm üstünde manyetik alan dağılımı.	50
Şekil 48.	(a) PMG ölçüm sistemi düşey manyetik kuvvet ölçüm sisteminin şematik gösterimi, (b) PMG ölçüm yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet ölçüm sisteminin şematik gösterimi.	51
Şekil 49.	(a) Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi fotoğrafı, (b) Manyetik kaldırma kuvveti deney geometrisi (Celik, 2016).....	52
Şekil 50.	(a) PM yolunun şematik gösterimi, (b) Üst yüzeyin 5 mm üzerinde mıknatısın manyetik akı yoğunluğu.	52
Şekil 51.	Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi (PM), (a) Düşey manyetik kuvvet (b) Yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet sistemi şematik gösterimi.....	53
Şekil 52.	JEOL JSM 6610 marka taramalı elektron mikroskobu.	54
Şekil 53.	Kombine HTS'nin 2B geometrisi ve mesh'i.	56
Şekil 54.	COMSOL sayısal modellemenin arayüzü ve parametreleri.	56
Şekil 55.	K1-K2-K3-K4 numunelerinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PM yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	58
Şekil 56.	K1-K2-K3-K4 numunelerinin 77 K de 1.5 mm soğutma yüksekliğinde PM yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	59

Şekil 57.	K1-K2-K3-K4 numunelerinin 77 K de 1.5 mm soğutma yüksekliğinde PM yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi.	60
Şekil 58.	(a) K3 numunesinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde; (a) PMG yolu ile arasındaki numunenin düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi, (b) PM yolu ile numune arasındaki yatay mesafeye (z) karşı yatay manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	62
Şekil 59.	K3 numunesinin 77 K de 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasında yatay mesafeye (x) karşı yatay kılavuzlayıcı manyetik kuvvet (F_x) değişimi.	63
Şekil 60.	BK-1 numunesinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	64
Şekil 61.	BK-1 numunesinin 77 K de 25 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	65
Şekil 62.	BK-1 numunesinin 77 K de 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	66
Şekil 63.	(a) BK-1 numunesinin 77 K de, (a) 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi, (b) 10 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi.	67
Şekil 64.	BK-2 numunesinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	68
Şekil 65.	Dikdörtgen manyetik yatağının 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	69
Şekil 66.	Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 77 K de 25 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	70
Şekil 67.	Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 77 K de 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvvet (F_z) değişimi.	71
Şekil 68.	Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 77 K de PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay(kılavuzlayıcı) kuvvet (F_x) değişimi (a) CH= 5 mm (b) CH= 10 mm.	72
Şekil 69.	Kare manyetik yatağının (KMY) 50 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC rejimi altında) 77 K sıcaklıkta ölçülmüş PMG yolu ile örnek arasında düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvvet (F_z) değişimi.	74
Şekil 70.	Kare manyetik yatağının (KMY) 5 mm soğutma yüksekliğinde (FC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile örnek arasında düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.	75

Şekil 71.	Kare manyetik yatağının (KMY) 77 K de PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay kaldırma kuvveti (F_x) grafiği değişimi (a) CH= 5mm (b) CH= 10 mm.	76
Şekil 72.	BK-1 örneğinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışını spektrumları.	78
Şekil 73.	BK-1 örneğinin 500 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	79
Şekil 74.	BK-1 örneğinin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	80
Şekil 75.	BK-1 örneğinin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	80
Şekil 76.	BK-1 örneğinin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	81
Şekil 77.	BK-1 örneğinin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	81



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Nd123 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.....	38
Tablo 2. Nd422 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.....	39
Tablo 3. Çekirdek hazırlamak için gerekli olan oksit tozların miktarları.	40
Tablo 4. Y123 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.....	42
Tablo 5. Y211 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.....	43
Tablo 6. YBCO hazırlamak için gerekli olan oksit tozların miktarları.....	44
Tablo 7. PMG altında ölçülmüş numunelerin düşey ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet sonuçları.	77
Tablo 8. Sayısal düşey ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet sonuçları.	77

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a, b, c	: Kesitin Boyutları
B	: Manyetik akı yoğunluğu
$B_{\perp}$	: Toplam manyetik akı yoğunluğunun dik bileşeni
$B_{\parallel}$	: Toplam manyetik akı yoğunluğunun paralel bileşeni
B_{irr}	: Geri dönülmez manyetik alan (irreversibility field)
CH	: Soğutma yüksekliği (cooling height)
E	: Elektrik alanı
FC	: Alan altında soğutma (FC; Field Cooling)
F_p	: Akı pinleme kuvveti (pinning force)
F_x	: Yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet
F_z	: Düşey manyetik kuvvet
H	: Dış manyetik alan
H_{c1}	: Alt manyetik alan
H_{c2}	: Üst manyetik alan
H_{ext}	: Mıknatıs dizisinin (PMG) ürettiği dış alan
H_{self}	: Süperiletkenin indüklediği öz alan
HTS	: Yüksek sıcaklık süperiletkeni
I_c	: Kritik akım yoğunluğu
J	: Akım yoğunluğu
$J_c(B)$	: Manyetik alana bağlı kritik akım yoğunluğu
kWh	: Kilovat-saat
K_{xx}	: Yatay yönde manyetik sertlik
K_{zz}	: Dikey yönde manyetik sertlik
M	: Ortamdaki mıknatıslanma
PM	: Kalıcı mıknatıs (Permanent magnet)
PMG	: Kalıcı mıknatıs kılavuz yolu (permanent magnet guideway)
REBCO	: Nadir Toprak Elementi
SEM	: Scanning Electron Microscope
SMB	: Süperiletken manyetik taşıyıcı

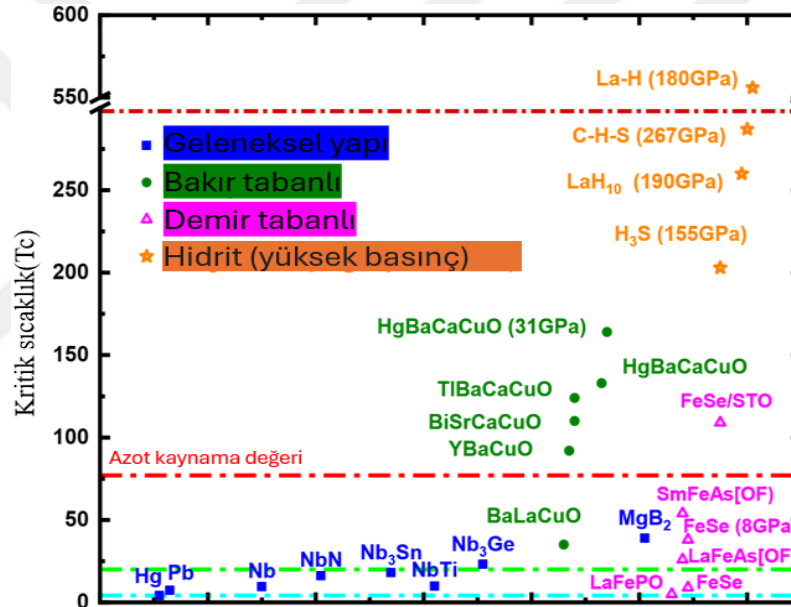
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
T_c	: Kritik sıcaklık
T_{max}	: En yüksek ısıtım işlem sıcaklığı
TSMG	: Üstten Çekirdeklenmiş Eritme Büyüme tekniği
x	: Yatay Hareket
Y123	: $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
Y211	: Y_2BaCuO_5
YBCO	: İttriyum Baryum Bakır Oksit
z	: Düşey Hareket
ZFC	: Alansız (ZFC; Zero Field Cooling) soğutma
ξ	: Koherans uzunluğu
ρ_{air}	: Havanın özdirenci
ρ_{sc}	: Süperiletkenin özdirenci
μ_0	: Geçirgenlik sabiti
χ	: Manyetik alınganlık

1. GENEL BİLGİLER

21. yy.'ın büyük sorunu olan sera salınımı ve karbon kaynaklı enerji kullanımının yüksek olması, insanlığı küresel ısınmayla karşı karşıya bırakmıştır. İnsanlık olumsuz gidişi yavaşlatmak veya durdurmak için sürekli yeni yöntemler geliştirmektedir. Bu konuda daha yenilikçi yaklaşımlar aranmaktadır. Mevcut teknolojik cihazların üzerinde yeni malzemeler denenmektedir. Bu çalışmalardan bazıları süperiletken kablo, süperiletken jeneratör, süperiletken motor, Maglev uygulamaları ve süperiletken elektromanyetik fırlatıcılardır. Süperiletken tercih edilmesinin temel nedeni doğru akıma karşı neredeyse sıfır direnç göstermesi ve mevcut elektromanyetik kaynakların çok üstünde elektromanyetik kuvvete sahip olmasıdır.

Süperiletkenliğin keşfi 1908'de Hollanda'nın Leiden Üniversitesinde Heike Kammerling Onnes'in kaynama sıcaklığı 4.2 K olan helyumu sıvılaştırması ile başlamıştır. Ardından Onnes ölçüm yaparken süperiletken bir malzemenin belirli bir sıcaklığın altına soğutulduğunda elektriksel direncinin aniden ölçülemeyecek kadar küçük bir değere düştüğünü gözlemledi. Fenomen olayı "Süperiletkenlik" olarak adlandırılmıştır. Süperiletken malzemelerin çok düşük sıcaklığa ihtiyaç duymasına rağmen elektrik uygulamaları için büyük potansiyele sahip olması birçok bilim insanını bu alanda çalışmaya teşvik etti. En temel sorun, kritik sıcaklığın çok düşük değere sahip olmasıydı. Bu sorunu çözmek için bilim insanları araştırmaya ve geliştirmeye bir asırdan beri devam etmektedir. Süperiletkenliğin keşfinden itibaren yeni süperiletken malzemeler keşfedildi ve süperiletkenliğin doğası hakkında yeni teoriler ortaya çıktı. 1986 yılına kadar süperiletkenlerin kritik sıcaklığı (T_c) hala 30 K sıcaklığının altındaydı. 1986'da Bednorz ve Müller'in çalışmaları sonucu, LaBaCuO seramik bileşiğinin 30 K'de süperiletken olduğu keşfedildi. O zamana kadarki en yüksek kritik sıcaklığın Kupratlar olarak adlandırılan bakır tabanlı süperiletkenler olmasıyla bakır oksitli bileşikler üzerine bilim insanları araştırmalarını yoğunlaştırdılar. 1987 yılında Wu ve arkadaşları, Y-Ba-Cu-O bileşiğinin 93 K'de süperiletkenlik gösterdiğini bilim camiasına duyurdu. Bu çalışma süperiletkenliğin gelişimi açısından önemliydi. Çünkü sıvı hidrojen ile soğutulan süperiletkenler artık sıvı azotla daha ucuz bir şekilde soğutulabilecektir. Zamanla yüksek sıcaklık süperiletkenler ailesine yeni bileşikler katıldı. Bunlar; $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ ($T_c = 110$ K), $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$

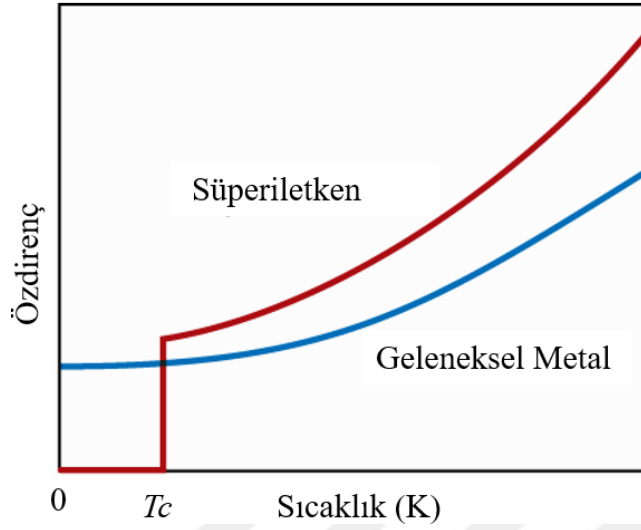
($T_c = 124$ K) ve Hg-Ba-Ca-Cu-O ($T_c = 133$ K ama eğer 31 GPa basınç uygulanırsa $T_c = 164$ K'e yükselmektedir). 2001 yılında, ultra yüksek basınç altında hibrit süperiletkenlerin üzerinde çalışan bilim insanları, Bardeen–Cooper–Schrieffer (BCS) teorisinden etkilenerek hidrojeninin bileşikleri üzerine araştırmaya yoğunlaştılar. 2015 yılında ilk buluşlar gelmeye başladı. H_3S 'nin 155 GPa basınç altında, 203 K sıcaklığında süperiletken olduğu bulundu. Ardından birkaç yıl sonra LaH_{10} malzemesinin 190 GPa basınç altında, 260 K sıcaklığında süperiletkenlik gösterdiği bulundu. Günümüze geldiğimizde 2020 yılında oda sıcaklığında yüksek basınçta altında sırasıyla 287 K ve 550 K sıcaklığında C-H-S ve La-H bileşiklerinde süperiletkenlik keşfedildi. Böylece, süperiletkenliğin keşfinden 110 yıl sonra oda sıcaklığında süperiletkenlik gözlemlendi (Xing, 2022).



Şekil 1. Kritik sıcaklığa göre süperiletkenlerin sınıflandırılması (Xing, 2022).

1.1. Kritik Sıcaklık (T_c)

Süperiletkenlerin kendilerine özgü bir kritik sıcaklık (T_c) değeri vardır. Normal iletkenlerin sıcaklıkla orantılı olarak direnci azalırken süperiletken malzemeler T_c değerine geldiğinde aniden direnç neredeyse sıfır değerine düşmektedir. Süperiletken özelliği gösteren her bir bileşik veya element dışarıdan etki uygulanmadığı (dış manyetik alan veya akım üzerinden geçirilmesi) sürece süperiletken fazdadır.



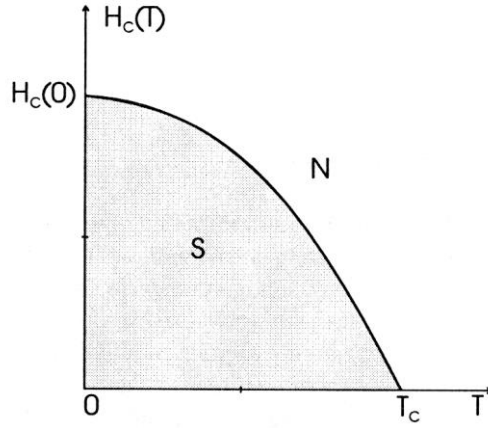
Şekil 2. Normal iletkenle süperiletkenin sıcaklığa bağlı direnç değişim grafiği (URL-4).

1.2. Kritik Akım Yoğunluğu (J_c)

Süperiletken malzeme, süperiletken duruma geçtiğinde direnç kaybı olmadan DC akım taşıyabilmektedir. Dirençsiz taşıyabileceği maksimum akım miktarını ifade eden değere kritik akım (I_c) adı verilir ve 0 K'de sıcaklık değerine maksimum ulaşır. I_c 'nin kesit alanına bölünmesiyle kritik akım yoğunluğu (J_c) elde edilir.

1.3. Kritik Manyetik Alan (H_c)

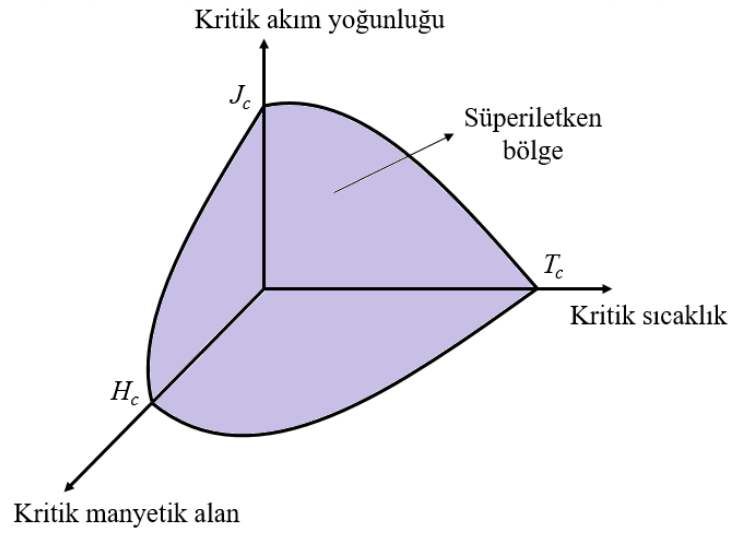
Süperiletken malzemelerin bir özelliği de kritik manyetik alandır. Süperiletken malzemelerin diğer özellikleri gibi 0 K sıcaklık değerinde maksimum manyetik alan değerine sahiptir. Bu değer şunu anlatır: I. Tip süperiletken için malzemenin süperiletken durumda iken etrafındaki manyetik alanı dışlar. O andaki sıcaklıkta H_c değerinin üzerinde olursa süperiletken malzemelerin süperiletken özelliğini kaybeder (Şekil 3). Eğer numunenin üzerinden akım geçerse malzeme üzerinde manyetik alan oluşur. Bu oluşan manyetik alan H_c değerini aştığında süperiletkenlik ortadan kalkar (Serway, 1996).



Şekil 3. Bir süperiletkenin kritik manyetik alanın sıcaklıkla değişimini gösteren faz diyagramı (Seeber, 1998).

$$H_c(T) = H_c(0) \times [1 - (T/T_c)^2] \quad (1)$$

Yukarıda anlatılan üç kritik özellik arasında ilişki Şekil 4’de gösterilmektedir. Taralı alan içinde kalan bölgeye süperiletkenlik alanı denilmektedir.

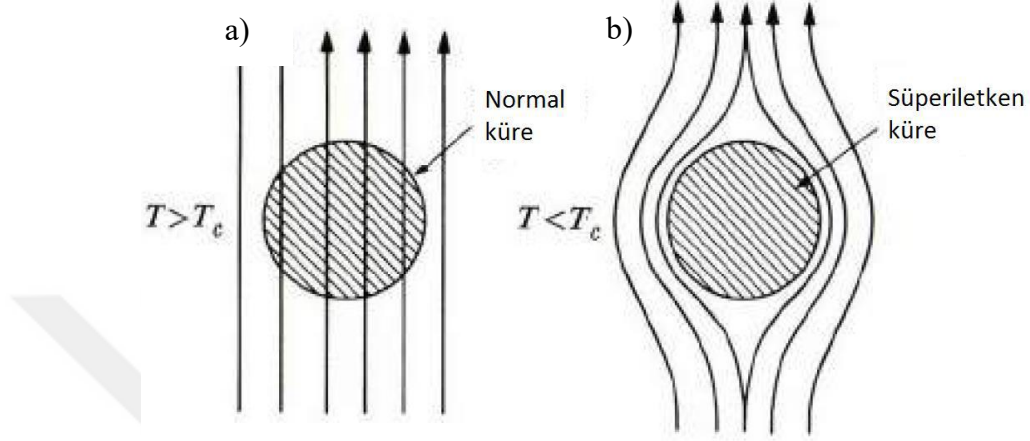


Şekil 4. Kritik parametrelerin arasındaki ilişki (Batur, 2023).

1.4. Meissner Etkisi

1933 yılında yapılan deneyde, bir süperiletken malzemenin manyetik akıyı tamamen dışarıladığı gözlemlendi. Bu olay Meissner Etkisi (Mükemmel Diyamanyetizma) olarak

adlandırıldı. Deneyde süperiletken malzemenin soğutulurken kritik sıcaklığının altına inildiğinde manyetik akının dışarılandığı gözlemlendi. Aynı zamanda bu olayın tersinir olduğu görüldü. Sıcaklık, T_c değerinin üzerine çıkıldığında malzemenin içine yeniden manyetik akı nüfus etmeye başladığı görüldü.



Şekil 5. (a) Kritik sıcaklık üzerindeki davranış, (b) Kritik sıcaklık altındaki süperiletkenin manyetik alanı dışarılanması (Meissner etkisi) (Kittel, 1996).

Madde içindeki manyetik akı yoğunluğu:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H} \quad (2)$$

ile verilir. Burada $\mathbf{H}$ dış manyetik alan, $\mathbf{M}$ ortamdaki mıknatıslanma ve χ manyetik alınganlıktır. Süperiletken halde $\mathbf{B} = 0$ olduğunda

$$\mathbf{M} = -\mathbf{H} \quad (3)$$

olur. Bu mıknatıslanmanın $\mathbf{H}$ 'ya eşit ve zıt yönlü olduğu anlamına gelir. Bu nedenle ortam diyamanyetiktir ve alınganlık

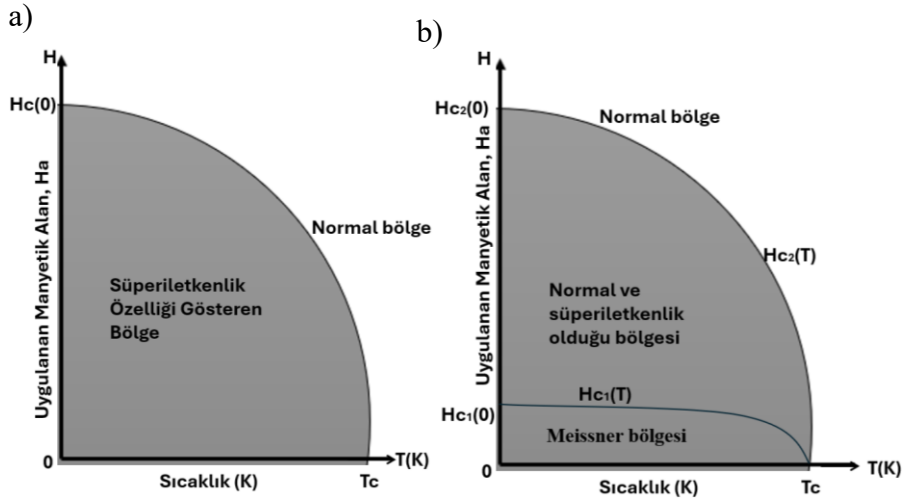
$$\chi = -1 \quad (4)$$

olur. Mıknatıslanmanın dış alan yoğunluğunu iptal etmesi (kaldırması, nötrleştirilmesi) durumu "Mükemmel diyamanyetizma" olarak adlandırılır.

1.5. I.Tip ve II.Tip Süperiletkenler

I. tip süperiletkenler, süperiletkenlik özellikleri bakımından temel ve en sade yapıya sahip olan süperiletken grubudur. I. tip süperiletkenler kritik sıcaklığının (T_c) değerinin altına soğutulduğunda tam Meissner etkisi gösterir bu yüzden tam diyamanyetik özellik gösterir. Dışarıdan kritik manyetik alan (H_c) değerinde manyetik alan uygulandığında süperiletkenlik özelliğini kaybederler. Şekil 6'da sıcaklık kritik manyetik alan faz diyagramı görülmektedir. Genellikle elementlerden oluşmaktadır ve çok düşük kritik sıcaklığa sahiptirler.

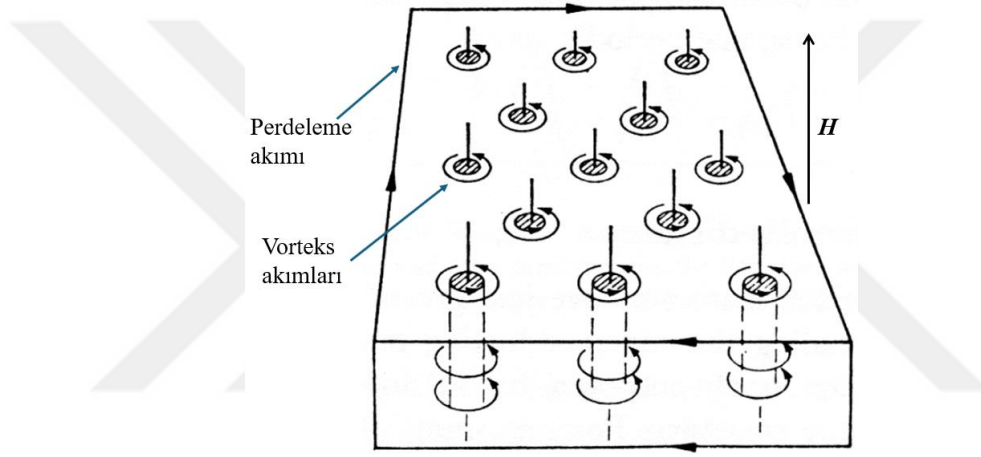
Süperiletkenleri sınıflandırırken bir sınıf daha vardır. Bu sınıfın adı II. tip süperiletkenlerdir. II. tip süperiletkenler, I. tip süperiletkenlerin özelliklerini H_{c1} noktasına kadar aynı şekilde gösterirler. Manyetik akı, süperiletkenin bünyesine nüfuz etmez. H_{c1} ile H_{c2} değeri arasındaki bölgede ise kısmi manyetik akı nüfuzu söz konusudur. Fakat süperiletkenlik devam etmektedir. H_{c2} üzerine çıkıldığında süperiletken normal faza geçiş yaparak süperiletkenliğini kaybetmektedir (Terzioğlu, 2015).



Şekil 6. (a) I. tip Süperiletkenlerin faz, (b) II. Tip süperiletkenlerin faz diyagramı (Karaahmet, 2023).

Süperiletkenin H_{c1} ile H_{c2} arasındaki bölgede hem normal hem de süperiletken özellik gösterdiği durum karışık durum olarak adlandırılır. H_{c1} değerinden H_{c2} değerine doğru

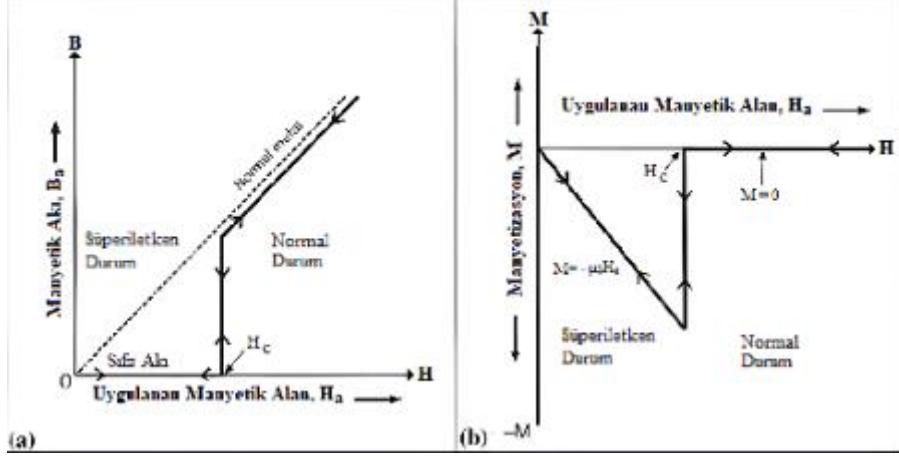
giderken süperiletkenlik kritik özelliklerinin değerleri azalmaktadır. Bunun sebebi ise malzemenin içinde süperiletken olmayan bölgeler oluşmasıdır. İdeal durumda olmayan II. tip süperiletkenler karışık durumda iken, çevreden süperiletkeni etkileyen harici manyetik alan kaynağına paralel olan silindir şeklinde normal bölgeler oluşur (Şekil 7). Bu bölgeler, vorteks bölgeleri noktaları olarak adlandırılır. Vorteks bölgelerinin süperiletkenin etrafında girdap akımı oluşur. Aynı zamanda malzemenin en dış alanında dolanan bu etkinin tersi yönünde perdeleme akımı vardır. Bu akım dışarıdan gelen manyetik alanın etkisini yok ederek süperiletkenin etrafında döner yani Meissner etkisini oluşturur. Süperiletkene H_{c2} değerinin üzerinde manyetik etki uygulanırsa süperiletkenlik özelliğini kaybeder.



Şekil 7. Normal bölgeler ve onların etrafında dolanan süper akım (Vorteks) girdaplarını gösteren karışık hal. Yüzeyde oluşan akım(perdeleme) Meissner etkisini göstermektedir (Rose ve Rhoderick, 1980).

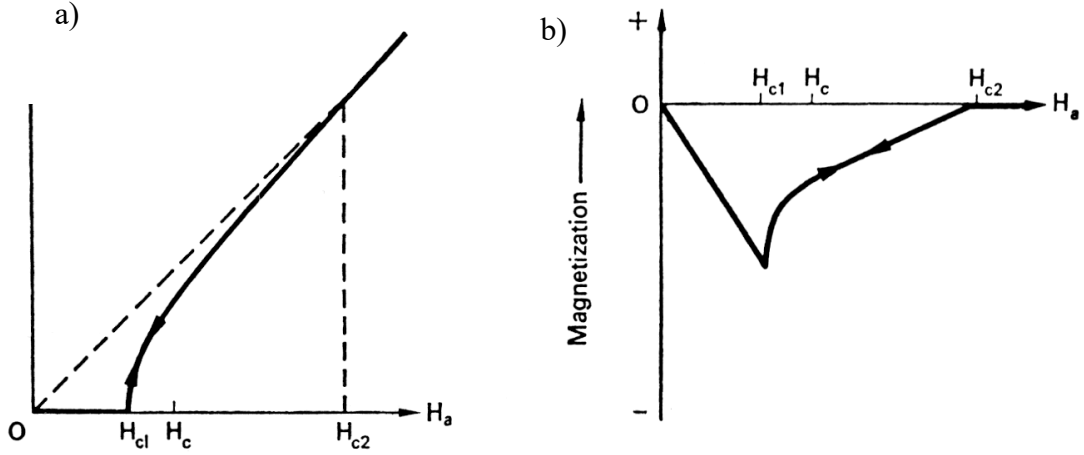
1.5.1. I. Tip ve II. Tip İdeal Süperiletkenlerde Mıknatıslanma

I.tip süperiletken, H_{c1} değeri altında aynı ideal I. tip süperiletken gibi davranır yani Meissner etkisi göstererek dışarıdan gelen manyetik alanın tersi yönünde manyetik alan oluşturur. Mıknatıslanma $-H'$ a eşit olur yani mıknatıslanma görünmez. I. tip süperiletkenlere ait manyetik alanla manyetik akının ve manyetizasyonun değişimleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. I. Tip süperiletkenlerde uygulanan dış manyetik alanla (a) manyetik akı yoğunluğunun, (b) manyetizasyonun değişimi (Karahmet, 2023).

İdeal II. tip süperiletkenlerde ise dışarıdan uygulanan manyetik alan H_{c1} değerinin üzerinde manyetik kuvvete maruz kaldığında karışık bölgelerde girdaplar oluşur. İçeri giren manyetik alandan dolayı içerideki mükemmel diyamanyetizma bozulmaya başlar. Bundan dolayı mıknatıslanma görünmeye başlar.

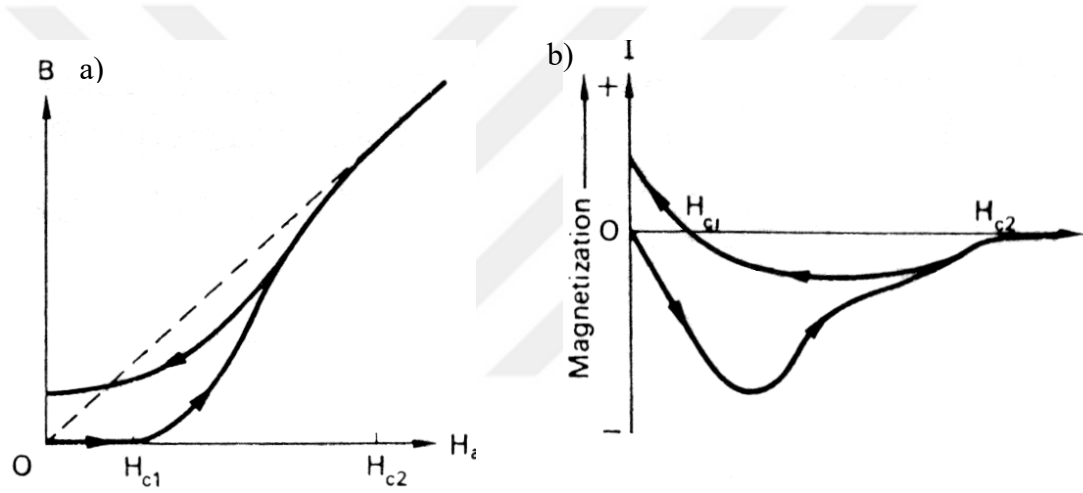


Şekil 9. İdeal II. Tip süperiletkenler için, (a) Akı yoğunluğunun, (b) Mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi (Rose ve Rhoderick, 1980).

1.5.2. İdeal Olmayan II. Tip Süperiletkenlerde Mıknatıslanma

Süperiletken malzemeler üretilirken tamamen saf olmaması, boşluklar, dislokasyonlar ve tane sınırları gibi kusurlardan dolayı malzemede tersinmezlik oluşur. Süperiletken

malzeme karışık durumda iken vorteks bölgelerine sahiptir. Vorteks bölgelerinin malzemedeki kusurlarla etkileşimi sonucunda vorteksler yerinde tutunur. Vortekslerin hareket edememesi olayı ‘akı çivilenmesi’ olarak adlandırılır. Dış manyetik alan tam tersi yönde uygulandığında ise akı çivilenmesi yüzünden vorteksler aynı şekilde hareket edemezler. Hareketin aynı şekilde gerçekleşmemesi olayına ise tersinmezlik olarak adlandırılır. Vorteks noktaları süperiletkende kalıcı mıknatıslanma oluşmasını sağlar. Dış manyetik alan azaldığında vorteks noktaları değişime karşı direnç gösterir. Direnç, histerisiz olayının oluşmasını sağlar ve büyük histerisiz genişlik istenmeyen bir durumdur. Kalıcı mıknatıslanmanın etkisinden kurtulmak için vorteks noktalarının hareket ettirilmesi gerekir. Bunun için pinning kuvveti (F_p) uygulanması gerekir.



Şekil 10. Tersinmez II. tip süperiletkenler için, a) Akı yoğunluğunun, b) Mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi (Rose ve Rhoderick, 1980).

1.6. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

1.6.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerinin Keşfi

1986 yılında Bednorz ve Müller tarafından “LBCO” (Lantan-Baryum-Bakır-Oksit) bileşiğinde, 35 K’de süperiletken özellik keşfedildi. Bu buluş ile 1987’de Nobel fizik ödülü kazandılar. Çalışmada heyecan verici ve oldukça da şaşırtıcı olan, T_c kritik sıcaklık değerinin artışıydı. Bu buluş yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin (HTS) çağının başladığı anlamına geliyordu. Diğer büyük bir gelişme ise, 92 K civarında “123” malzeme sınıfından $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) süperiletkeninin, ABD, Japonya ve Çin’de neredeyse aynı anda

keşfedilmesidir. 1993 yılında ise en yüksek kritik sıcaklık değerine sahip yüksek sıcaklık süperiletkeni HBCCO (HgBaCaCuO) bileşiği keşfedilmiştir ve 166 K'e kadar ulaşabilen yüksek bir T_c değerine sahiptir (Yavuz, 2015). Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin neredeyse tamamına yakını bakır oksit tabakaları içermektedir. Bakır oksit tabakalar süperiletkenlik özelliklerinin belirlenmesinde son derece önemlidir. Çoğu yüksek sıcaklık süperiletkeni sıvı azotla soğutulabildiği için teknolojik alanlarda ve birçok mühendislik uygulanmasında geleneksel (düşük sıcaklık) süperiletkenlere göre daha fazla kullanım alanları vardır.

1.6.2. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 'nin Kristal Yapısı ve Genel Özellikleri

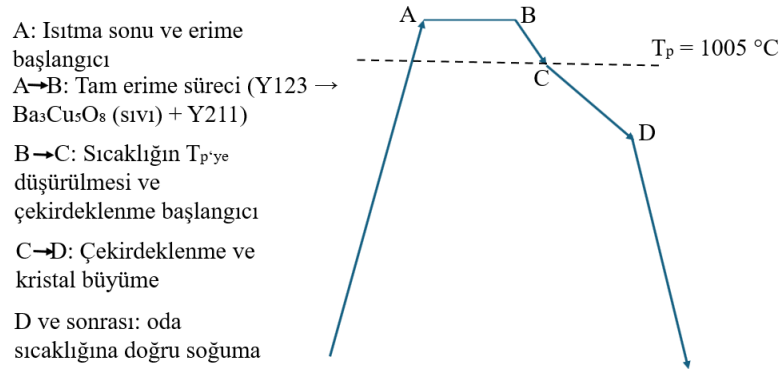
İletken uygulamaları için kullanılabilen çeşitli süperiletken bileşiklerden, biri olan nadir toprak baryum kuprat fazı, $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (RE'nin nadir toprak olduğu REBCO), geniş bir uygulama yelpazesi için manyetik alanlarda yüksek akım yoğunluklarına ulaşmak için en büyük potansiyele sahiptir. Malzeme bilimciler ve mühendisler düşük maliyetli yüksek performanslı süperiletkenler üretmek için çalışmaktadır. Süperiletkenler farklı özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri, sahip oldukları kritik sıcaklık (T_c) değerlerine göre sınıflandırılır. Bu gruba ait bileşiklerden biri, $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (RE'nin nadir toprak elementi ya da itriyum) olarak gösterilen ve (RE)BCO şeklinde gösterilen süperiletkendir. YBCO bileşiğinin özellikleri oksijen miktarına bağlı olarak süperiletken özelliğini $0 \leq x \leq 0,65$ olduğunda gösterir. YBCO'nun kristal yapısı oldukça anizotropiktir. Bu durum anizotropik süperiletkenliğe ve termal özelliklere yol açar. Eritme işleminden sonra süperiletken olmayan tetragonal yapı oluşur. YBCO süperiletkeninin ortorombik fazı tekrardan elde edilebilmesi için oksijende tavlama gerekir. Oksijen ortamında tavlama süresi ve sıcaklığı; kritik sıcaklık (T_c), kritik akım yoğunluğu (J_c) ve tuzaklanana manyetik alanı (B_{trapp}) etkiler. YBCO bileşiğinin genellikle 1005 °C'de yapısı bozulmaya başlar. 1005 °C'de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (Y123) süperiletken fazı; Y_2BaCuO_5 (Y211) (süperiletken olmayan katı faz) ve $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ (sıvı faz) fazlarına dönüşür. Y123 tersinir olmadığı için tekrar soğutulduğunda Y123 fazı oluşturulabilir ama tam gerçekleşmez. Y123 fazının içinde katılmış Ba-Cu-O sıvı fazı ($\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$) elde edilir. YBCO oluşturulurken Y123 fazına, %25 oranında Y211 fazının eklenmesi akı sabitleme özelliğinin artmasına katkı sağlar (Namburi, 2021). Manyetik akı hareketi direnç göstererek YBCO'nun kritik akım yoğunluğu ve tuzaklanan alanı artırır. Y211'nin varlığı çatlakları doldurarak kırılma tokluğu ve eğilme

YBCO malzemesinin mikro yapısı; J_c , tuzaklanan alan ve mekanik dayanıklılıkla ilişkilidir. Mikro yapıdaki çatlaklar, gözenekler ve diğer faz kalıntıları YBCO külçesinin kalitesini etkilemektedir. Örneğin mekanik mukavemet kuvvetinin düşük olması düşük sıcaklıklarda tuzaklanan alanı azaltmaktadır ve istenmeyen bir durumdur. Mekanik özellikleri geliştirmek için bazı tekniklerden bazıları; karışıma Ag elementi katkısı, polimer kaplama ve diğer kompozit malzemelerdir (Baumann, 2023). YBCO bileşenlerinin tane boyutu, yüksek J_c değerini korumak için mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır hatta şu ana kadar üretilen en popüler külçe ürün olan YBCO'nun en yüksek J_c performansını büyük tek çekirdekli geometrisi ile elde edilmiştir. Son otuz yıldır süperiletkenlerin endüstriyel uygulamalarının geliştirilmesi için büyük boyutlu ve tek çekirdekli (RE)BCO külçe malzemelerin üretimi zorunlu olarak düşünülmektedir. (RE)BCO külçelerinin manyetik alan tuzaklama ve manyetik kaldırma kabiliyeti; J_c 'nin büyüklüğü ve homojenliğine ayrıca süperiletken akımın akabileceği uzunluğa bağlıdır. Bu nedenle literatürde (RE)BCO

külçelerinin üretimiyle ilgili yapılan pek çok çalışma, akı çivileme performansının geliştirilmesine ve TSMG yöntemi ile büyütülecek maksimum domain boyutunun arttırılmasına yöneliktir. Yüksek B_{irr} , J_c ve T_c 'nin avantajları nedeniyle günümüzde YBCO külçe süperiletken mıknatıslar en yaygın kullanılan süperiletken malzeme olsa da zaman alıcı, zahmetli ve pahalı üretim süreci sahiptir. Düşük ısı iletkenliği ve kırılkan seramik yapısı gibi bazı sınırlamalara da sahiptir. Yüksek kritik akım yoğunluğu ulaşılması hedeflenen bir ölçüt olup malzemenin yapısal özellikleri dolayısıyla üretim yöntemiyle ilişkilidir.

1.7. Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyütme (TSMG) Üretim Tekniği

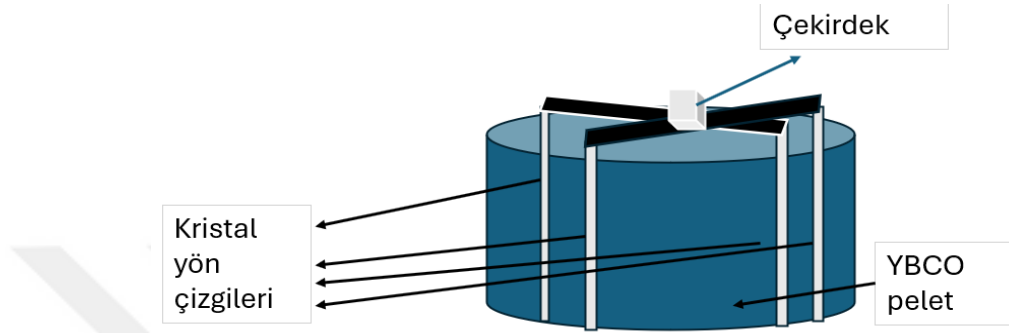
“Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyütme” (TSMG) yöntemi ilk defa 1991 yılında Japonya’da Sawano tarafından başarıyla denenmiştir (Sawano vd., 1991). TSMG yöntemi; tane yönlendirme kontrolünü sağlamak için tek yönlü büyüme ve MPG (Eritme-Toz-Büyütme) yöntemlerinin birleşimidir. Bu yöntemde sinterleme öncesinde (RE)BCO külçesi üzerine örgü parametreleri benzer, daha yüksek erime noktasına sahip Nd-Ba-Cu-O veya Sm-Ba-Cu-O süperiletken malzemeleri YBCO peletinin üzerine çekirdek yerleştirilir.



Şekil 12. “Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyütme” TSMG yönteminin şematik gösterimi.

TSMG yöntemi ile üretilen tek ve çok çekirdekli yapıda (RE)BCO süperiletken külçeler, yüksek tersinmezlik alanı (H_{irr}), 90 K üzerindeki kritik sıcaklıkları (T_c), yüksek manyetik alan tuzaklama (B_t) kabiliyeti, yüksek kritik akım yoğunluğu (J_c) ve manyetik alan altında makul sayılabilecek J_c bozulması nedeniyle uygulamalar için tercih edilen malzemelerdir. Bu özellikler TSMG yöntemi ile üretilmiş (RE)BCO külçelerinin; süperiletken mıknatıs olarak tercih edilmesinin ana nedenidir ve yeni nesil endüstriyel

uygulamaları için önemli potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Sawano vd., 1991; Durell vd., 2014 ve Naito vd., 2012). TSMG yöntemiyle üretilen kaliteli tek çekirdekli örneklerde kristal yön çizgileri bulunur ve bu çizgiler kristalin, peletinin tamamında büyüdüğünü gösterir. Tek kristal YBCO peleti üzerindeki kristal yön çizgilerinin şematik gösterimi Şekil 13’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 13. Üzerine çekirdek koyularak büyütülen tek çekirdekli YBCO peletin kristal yön çizgilerinin şematik gösterimi.

1.7.1. Çekirdeğin YBCO Üzerindeki Etkileri

Çekirdek (seed) özellikleri, YBCO peletinin erime süreciyle tek çekirdek mi yoksa çok çekirdekli olmasında karar vericidir. Aynı zamanda çekirdeğin büyük veya küçük olması tek tane büyüme süresini etkilemektedir. Ne kadar büyük çekirdek seçilirse süreç kısalmaktadır. Ancak büyük çekirdeğin sahip olduğu mikro kusurlar malzemeyi olumsuz etkileyebilir. Bu yüzden olabildiğince küçük ve kusursuz yapıda çekirdek seçilmesi gerekmektedir. Çekirdekten beklenen bazı özellikler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Büyütülen YBCO karışımından daha yüksek bir erime sıcaklığına sahip olmalıdır.
- Üretilen malzeme ile benzer kristal yapıya sahip olması gerekir.
- Erime sürecinde faz kararlılığı göstermelidir (Namburi, 2021).

Malzemedeki gözenekliliğin ana kaynağı, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Y123) fazının peritektik ayrışması sırasında oksijen ortaya çıkmasıdır. Hatta örnekte bulunan kimyasallarla etkileşerek CO_2 oluşabilmektedir. Mikro yapıdaki bu gözeneklilik hem mekanik hem de süperiletken özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için pelete yapay delikler eklenmesiyle ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Yapay deliklerin bir avantajı da soğuma sürecinin hızlanması ve homojenliğin artmasıdır (Zmorayová vd., 2023). Başka bir çalışmada ise, sıkıştırma boşluklarının boyutu genellikle 1-10 μm arasında iken, oksijen

boşlukları genellikle 50-250 μm aralığındadır. Oksijenin peletten uzaklaşırken oluşturduğu boşluklar akı merkezi oluşturmamaya kadar büyük olmasından dolayı malzemenin iç hacminde boşluklar oluşturur ve bu durum kritik akım yoğunluğunun azalmasına neden olur. (Baumann, 2023).

1.7.2. TMSG Yönteminde Y211 Katkısının Y123'e Etkileri

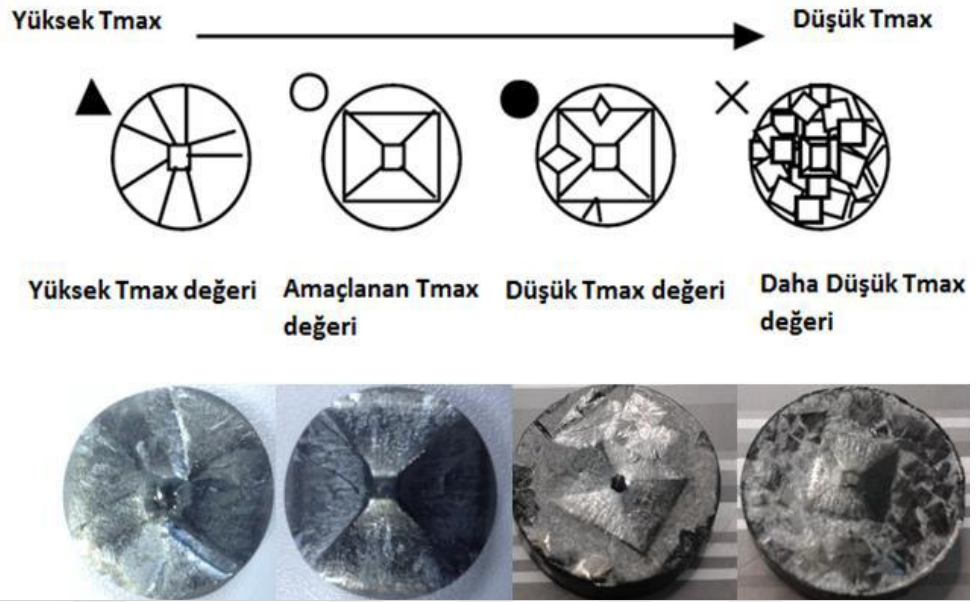
TMSG yönteminde Y211 kullanımının nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Büyüme ön cephesinde daha yüksek bir (RE: rare earth) konsantrasyonu sağlayarak büyümeyi hızını ayarlamak.
- Öncü erime aşamasında akışkan fazı beraber tutarak dışarı akışını azaltmak.
- Akı çivileme merkezleri oluşturmak ve akım yoğunluğunu arttırmaktır.

Y211'nin boyutunu ve karışımını daha eşit dağıtmak için genellikle Pt ve CeO_2 kullanılmaktadır (Namburi, 2021). Bu çalışmada %0,5 oranında CeO_2 kullanılmıştır.

1.7.3. Üst Sıcaklık (T_{max}) Değerinin YBCO Tek Kristal Oluşumu Üzerindeki Etkisi

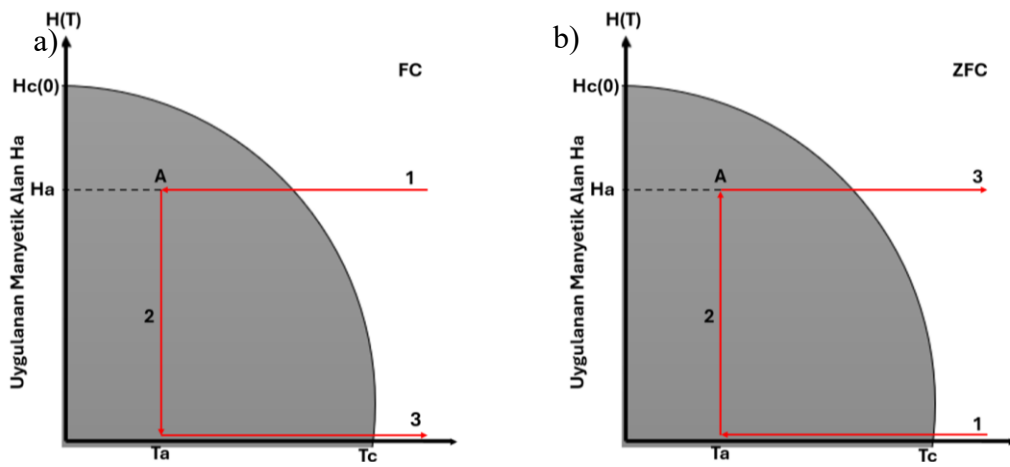
YBCO süperiletkeni için T_{max} değeri, kristalin oluşumunu etkilemektedir. Aşırı yüksek olduğunda örnek üzerindeki çekirdek erir ve malzeme çoklu kristal yapı gösterir. Aşırı düşük olması durumunda ise rastgele çekirdeklenme olur (Şekil 14). T_{max} değeri uygun değerin; birkaç derece altında olursa hücrel büyüme ek çekirdeklenme, birkaç derece üstünde olursa düzlemsel büyüme gösterir (Jee vd., 1998). Uygun T_{max} değerinde ise tek kristal hücrel büyüme gösterir.



Şekil 14. YBCO süperiletken peletinin T_{max} değerinin büyümeye etkisinin şematik gösterimleri ve örnekleri (Güner, 2017).

1.8. Süperiletken Soğutma Uygulamaları

Süperiletkenlerin soğutma işlemini iki grup altında toplayabiliriz: (i) Alan altında soğutma (FC; Field Cooling) ve (ii) Alansız (ZFC; Zero Field Cooling) soğutma. Soğutma uygulamalarının birbirinden farkı, süperiletken soğutulmadan önce dışarıdan manyetik alan etkisinde olup olmamasıdır. Soğutma uygulamalarının birbirlerine göre üstünlükleri vardır. Şekil 15’de FC ve ZFC soğutma uygulamasına ait işlem basamakları gösterilmektedir.



Şekil 15. (a) Alanlı soğutma (FC) uygulaması, (b) Alansız soğutma (ZFC) uygulaması (Karaahmet, 2023).

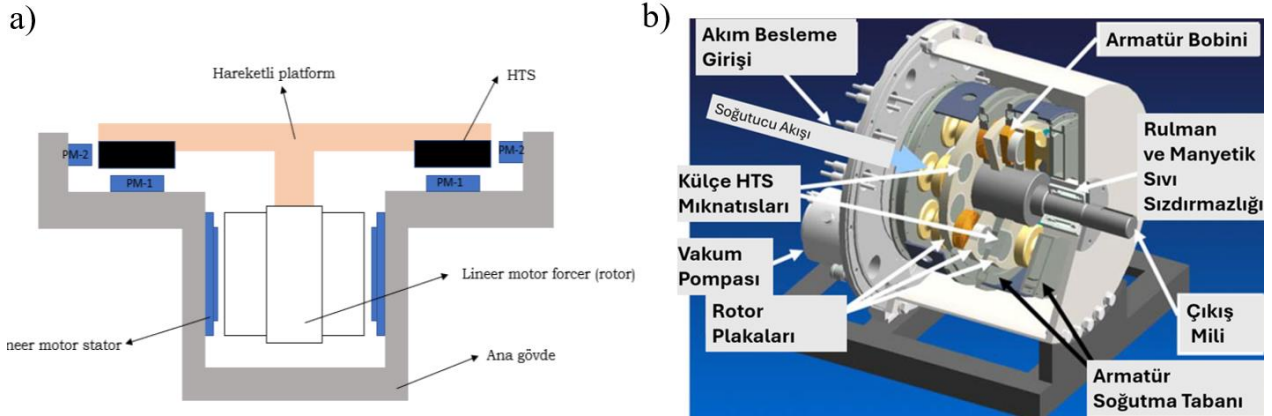
Alanlı soğutma uygulamasında (FC) manyetik alan içinde süperiletken malzeme kritik sıcaklığının altında soğutulur (işlem 1). Ardından manyetik alan azaltılır (İşlem 2). Süperiletken kendi durumunu muhafaza etmek isteyeceğinden manyetik akı tuzaklamış olur. Durumun daha iyi anlaşılabilmesi için mıknatıs gibi davrandığı düşünülebilir. Alanlı soğutma uygulaması sonucunda uygulanan manyetik alan kuvveti kadar manyetik alan süperiletkende depolanır. İstenildiği takdirde süperiletken kritik sıcaklığının üzerine çıkartılarak normal haline geri döndürülebilir (işlem 3). FC rejiminde, akı çivileme merkezleri sayesinde manyetik akı süperiletken içerisinde tuzaklanır. Akı tuzaklama etkisiyle, soğutulma yüksekliğinde düşey ekseninde hem uzaklaşırken hem de yaklaşırken düşey manyetik kuvvet daha çekici olur (Savaşkan vd., 2016). Çekici kuvvet, alanlı soğutma uygulamasında alansız (ZFC) soğutma uygulamasından daha güçlüyken, itici kuvvette ise tam tersi durum görülmektedir. Alanlı soğutma işlemi daha yüksek bir soğutma yüksekliğinde (CH; Cooling height) gerçekleşirse, daha az manyetik alan hapsolür. Bunun sonucunda daha fazla kaldırma kuvveti elde edilmektedir (Yu vd., 2020).

Sıfır alanlı soğutma uygulamasında ise (ZFC) ise manyetik alan yok iken süperiletken kritik sıcaklığının altına soğutulur (işlem 1). Ardından manyetik alana maruz bırakılır. Bunun sonucunda süperiletken uygulanan manyetik alan kuvvetinin yarısı kadar manyetik alan içinde tuzaklar (işlem 2). Süperiletkenin sıcaklığı, kritik sıcaklığın üstüne çıkartılarak süperiletkenlik durumu ortadan kalkar. Sıfır alanlı soğutma uygulamasında yapılan deneylerde akı dışarlama etkisiyle, itici kuvvet çekici kuvvete göre yüksek ölçülmektedir (Savaşkan vd., 2015).

1.9. Süperiletken Külçelerin Kullanım Alanları

Süperiletken malzemelerin üstün özellikleri; Sıfır elektriksel özdirenç, mükemmel diyamanyetizma ve yüksek manyetik alan depolayabilme kabiliyetidir (Güner, 2017). Süperiletken elektrik motorlar kısmen veya tamamen süperiletken malzeme kullanılarak tasarlanabilir (Durrell vd., 2018). Süperiletkenlerin enerji alanındaki bazı uygulamaları; süperiletken makineleri, Maglev trenleri, süperiletken elektromanyetik fırlatıcılar ve süperiletken volanlardır. Sağlık alanında süperiletken manyetik yataklar karıştırıcı olarak da kullanılabilmektedir böylece karışım daha steril olur (Koyama vd., 2006). Yüksek sıcaklık süperiletkenler külçeler NMR ve MRI uygulamalarında sıvı helyum kullanılmadan makul

derecede ölçüm çözünürlüğü elde edilir. 5.5 saatlik çekim süresiyle çok net 3D görüntü elde edilmiştir (Nakamura vd., 2015).



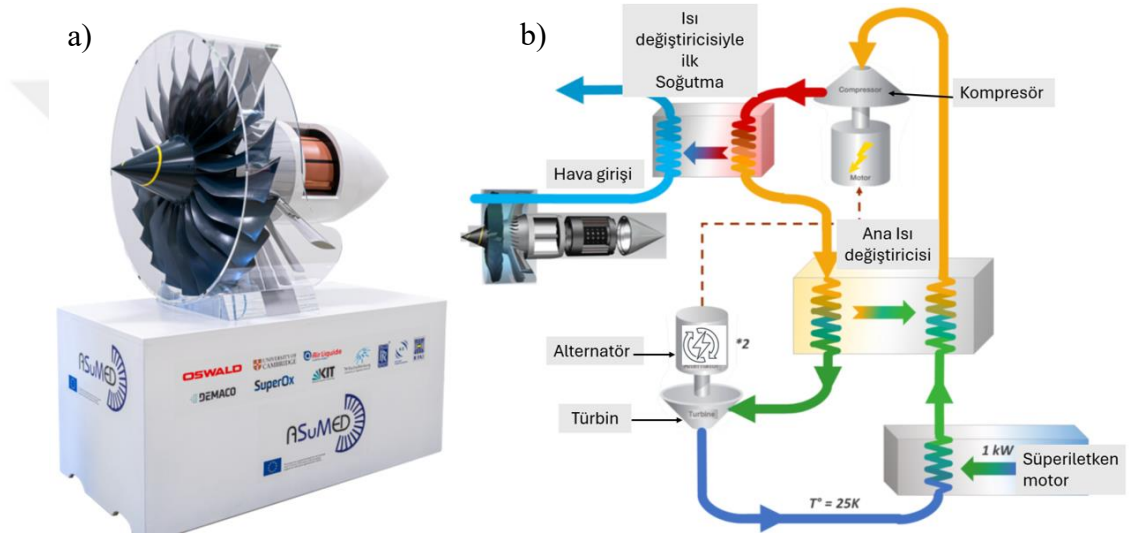
Şekil 16. (a) Külçe YBCO kullanılan elektromanyetik fırlatıcı (Başaran vd., 2021),
(b) Külçe süperiletken kullanılan gemi motoru (Durrell vd., 2018).

1.9.1. Süperiletken Elektrik Makineleri

Süperiletken malzemeler yüksek manyetik alan tuzaklayabildiği için daha yüksek tork sağlarken aynı zamanda daha küçük motorlarda geleneksel elektrik makinelerinin görevini yapabilirler (Haran vd., 2017). Buna ek olarak verimleri geleneksel makinelere göre daha yüksektir. Direnç kayıpları azaldığı için daha düşük ısı üretimi vardır. Bakır kablo miktarının azaltılmasıyla eddy akımları ve histerisiz kayıplarında azalma olur. Süperiletken sargılar kullanımıyla ağırlıklarında %35-50 arasında azalma olmaktadır. Bobin sargılarında bakır kablolar yerine süperiletken kablolar kullanılarak düşük dirençte yüksek akım taşınır. Akım taşıma kapasiteleri normal kablolarla oranla 150 kat fazladır. Bu da manyetik kuvvetin artmasıyla sonuçlanır. Motorun gücü manyetik kuvvetle (B^2) ilişkilidir (Bäcker, 2011). Yüksek verimlilik, düşük gürültü, mekanik uygunluk ve bakım maliyetlerinin azalması önemli avantajlardır. Günümüzde denizaltı kruvazör, savaş gemisi gibi düşük alan yüksek güç gerektiren yerlerde kullanımıyla ilgili birçok ülkede çalışmalar vardır.

Geleneksel elektrik motorunda mekanik sürtünme, kablolarda direnç ve ferromanyetik kısımlarda enerji kayıpları sahiptir. Süperiletken motorlar rotoru veya statoru süperiletken malzeme ile tasarlanabilmektedir. Bobin sargılarında süperiletken kablolar kullanılarak yüksek akım taşınırken düşük hacim ve ağırlıkta yüksek manyetik akı tuzaklanabilmektedir.

Aynı güçteki geleneksel motorlara oranla %70 oranında küçük ve %99 verimliliği sahip olması nedeniyle havacılıkta çekici görünme sebebidir. Horizon 2020 programı kapsamında geliştirilen ASuMED (Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator) hibrit süperiletken motor, rotorunda yaklaşık 1-2 T manyetik alan elde etmektedir (Şekil 17). ASuMED motor yapılan denemelerde hedeflenen güç hedefini aşarak 6900 devir/dakika hıza, 20,9 kW/kg güç yoğunluğu ve 1,05 MW güç üretmiştir (URL-3; Grilli vd., 2020).

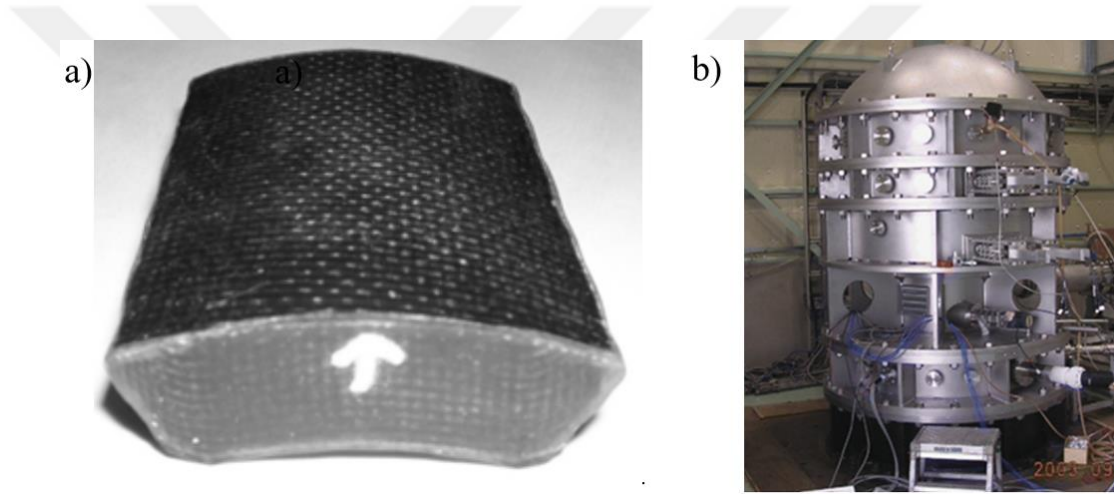


Şekil 17. (a) 2019 yılında Hannover Fuarı'nda maketi sunulan Airbus için tasarlanan hibrit süperiletken ASuMED motor, (b) ASuMED motoru için krojenik soğutucu çevriminin şematik gösterimi (URL-3; Grilli vd., 2020).

1.9.2. Külçe Süperiletkenlerin Manyetik Yatak Olarak Enerji Depolamada Kullanım Alanları

Süperiletken manyetik yatakların uygulamalarından biri olan süperiletken volan uygulamalarında manyetik kaldırma özelliği sayesinde rotorla stator teması kesilerek dengeli, güvenilir şekilde dönme hareketi gerçekleştirilebilir (Viznichenko vd., 2008). Rotorun güvenli dönüşü için yüksek manyetik alan kuvveti, yüksek manyetik alan tuzaklama özelliği ve işletme koşulları için nispeten ucuz süperiletken malzemeler gerekmektedir. YBCO bileşiği tüm süperiletkenler içerisinde en uygun tercihlerden biridir. Volanın dönüşü esnasında dönüş hızı ve atalet momentine bağlı olarak mekanik enerji depolanmaktadır.

Sisteme depolanan enerji motor-jeneratör bileşeniyle yavaşlatılarak enerjisini sisteme aktarır. Aynı şekilde enerji depolarken ise elektrik motoru ile tekrardan dönüş hızını arttırarak enerji depolamaktadır (Yıldız, 2019; Emeksiz, 2022). Verimlilikleri %90 seviyesindedir. Süperiletken külçe, kalın ve ince film kullanılması volan sistemlerinin ağırlığını ve hacmini %30–50 oranında azaltabilir. Sistem boşta iken geleneksel volan uygulamalarında enerjisinin saatte %1'ini kaybederken süperiletken manyetik yatak yapısına sahip tasarımlarda enerjisinin saatte %0,001-%0,1' ini kaybetmektedir (URL-1). 2011 yılında 10 kWh kapasiteli ve 15.000 rpm devirde dönen külçe YBCO süperiletken volan tasarlanmıştır (Şekil 18). 2,24 kWh'lik enerji depolaması sonucu elde edilmiştir (Ichihara vd., 2005).

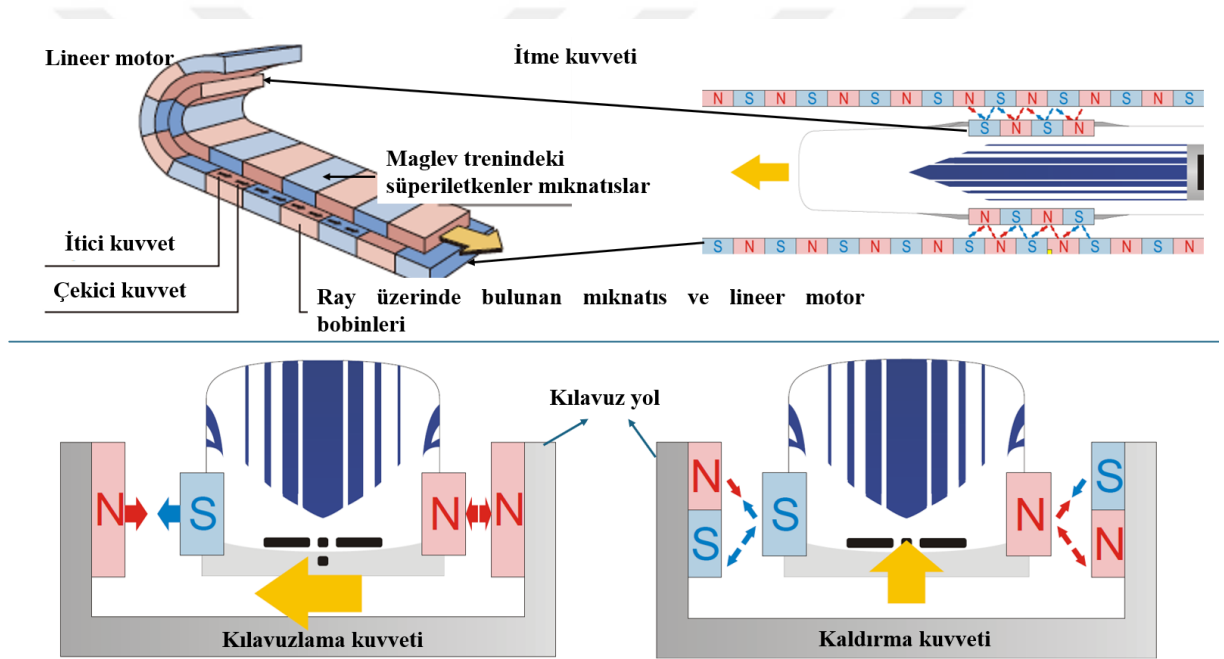


Şekil 18. (a)10 kWh'lik volanın kiremit şeklindeki YBCO külçe süperiletkeninin bir parçası, (b) Aynı süperiletken volanın dış görünüşü (Ichihara vd., 2005).

1.10. Manyetik Olarak Havalanmış Ulaşım Araçları (Maglev)

Manyetik olarak kaldırma (levitasyon) terimi, cisimlerin manyetik kuvvet yardımıyla yerçekimine karşı herhangi bir fiziksel bağlantı olmadan dengede olmasıdır (Karaahmet, 2023). Maglev sistemleri ulaşım alanında Maglev trenlerinde, volan sistemlerinde ve elektrik makinelerinde rotorun serbest dönüş hareketi sağlanması gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Daha iyi anlaşılması için en yaygın uygulama olan Maglev trenlerinden bahsedebiliriz. Maglev trenleri belli bir hıza ulaştıktan sonra aynı uçak gibi tekerleklerini kendine çekerek havalanır. O andan itibaren tren sadece manyetik kaldırma özelliği ile

hareket etmektedir. Maglev treninde süperiletken mıknatıslar dönüşümlü olarak N ve S kutuplarına ayarlanır. Maglev trenlerinin kendine özgü tren yolu vardır ve kılavuz yolu diye adlandırılır. Bu kılavuz yolu merkezi kontrol sistemi tarafından elektrik akımının frekansı değiştirilerek işletilir. Kılavuz yolunda tahrik bobinleri trene itme kuvveti sağlarken, kılavuzlama bobinleri ise treni kılavuz yolunun merkezinde tutmaya çalışır (Şekil 19). Eğer tren kılavuz yolundan uzaklaşırsa kılavuz yolundaki elektromıknatısların süperiletkenlerle etkileşiminden dolayı trenin uzaklaştığı taraf çekici kuvvet, yaklaştığı tarafta itici kuvvet uygulanır. Süperiletkenler ayrıca raylar ile etkileşimi sonucu trenin gövdesini yerin 10 cm üzerinde tutar.



Şekil 19. Süperiletken Maglev treninin sistemlerin basitleştirilmiş gösterimi (Kircher vd., 2018).

Maglev treni havalandığında sadece hava sürtünmesine maruz kalır. Bu nedenle manyetik trenler, sınırlı enerji tüketimi ve düşük gürültü seviyeleri ile çok yüksek hızlarda (yaklaşık 650 km/sa) seyahat amacıyla kullanılabilirler (Şekil 20 (c)).



Şekil 20. (a) Bir külçe süperiletken üzerinde dengeli bir şekilde havada duran kalıcı mıknatıs (Hull, 2000), (b) Çin’de bir Maglev tren prototipi (Cheng vd., 2021).

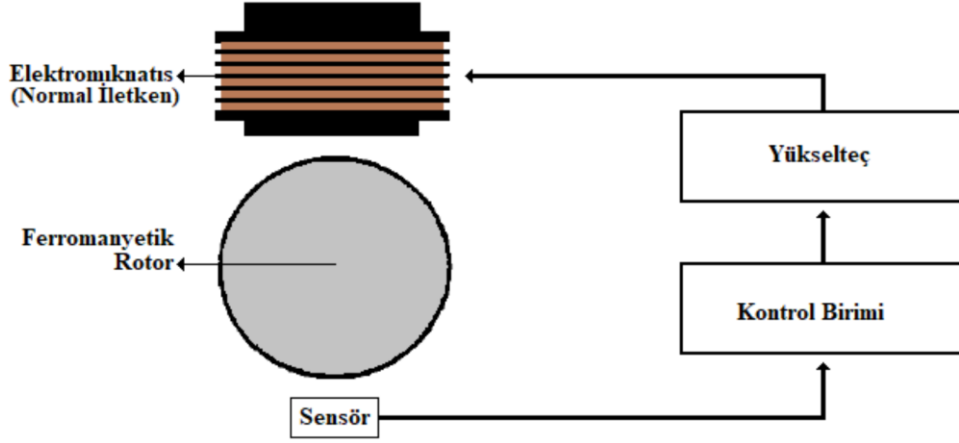
Günümüzde küresel Maglev tren pazarı daha hızlı, daha verimli ve çevre dostu seyahat biçimlerine olan talebin yönlendirdiği küresel ulaşım sektöründe hızla büyüyen bir sektördür. 2024 yılında Maglev pazar büyüklüğü 2.17 milyar dolar iken teknolojik yenilikler, çevresel faydalar, yüksek hızlı ulaşım ve hükümet yatırımları ile 2031 yılına kadar pazarın 3.13 milyar dolara çıkması beklenmektedir (URL-2).

1.10.1. Manyetik Yatak Çeşitleri

Manyetik yataklar, manyetik kuvvet etkisiyle hareketli bir parçanın temassız bir şekilde hareket edebilmesini sağlamak için tasarlanmış sistemlerdir. Manyetik yatakların sürtünme etkisini minimize etmesi, yüksek hızlara imkân vermesi, malzemelerin aşınmasını engelleyerek uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Manyetik yatak sistemleri ikiye ayrılır; Aktif manyetik yataklar ve pasif manyetik yataklardır.

1.10.2. Aktif Manyetik Yataklar

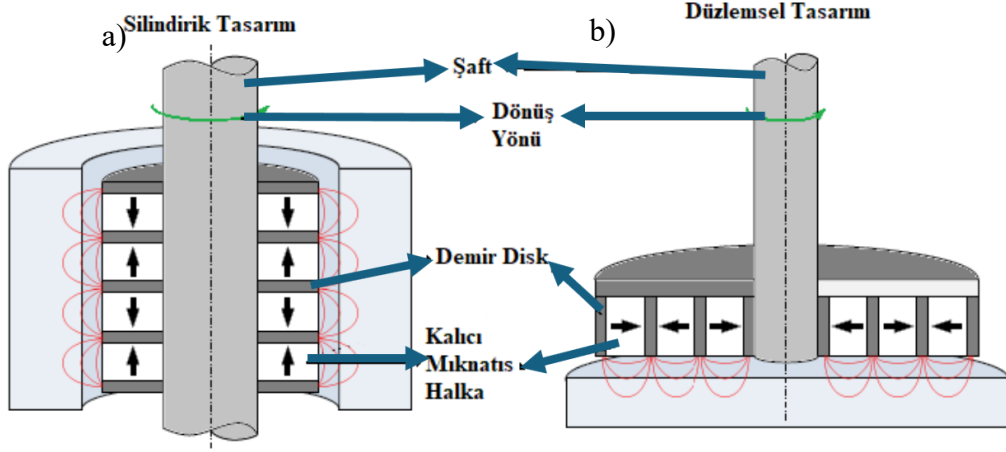
Aktif manyetik yataklar genellikle hareket veya dönüş elde edilebilmesi için ferromanyetik malzemeden yapılmış rotor bileşeni, manyetik alan üretmek için elektromıknatıs, manyetik devre yolu, konum sensörü, statoru beslemek için güç kaynağı ve geri bildirim kontrol sistemlerinden oluşan düzenektir. İstenilen şartlara göre tasarlanabilmesi, düşük manyetik kaçış özelliği ile endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır ama kontrol edilmesi için kullanılan elektronik sistemler maliyetin artmasına ve sistem güvenilirliğinin düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 21. Aktif manyetik yatakların temel bileşenleri (Moon, 2004).

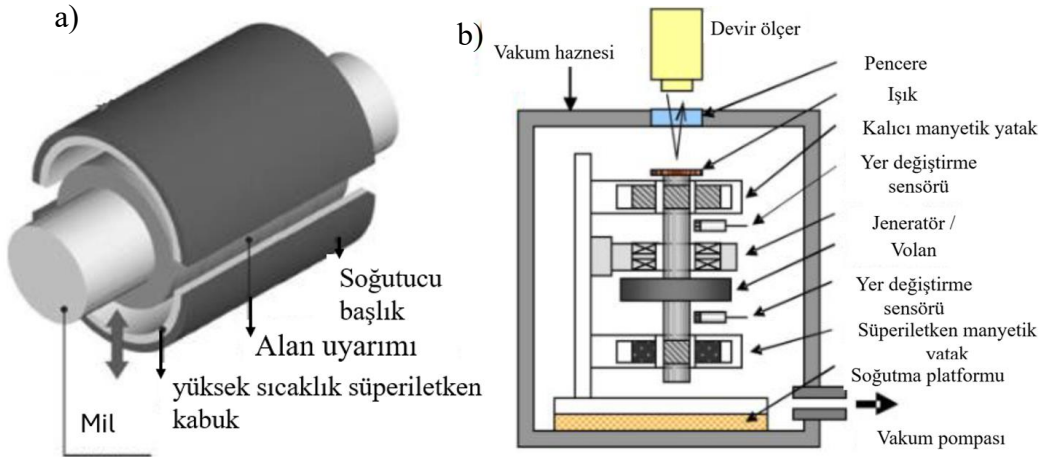
1.10.3. Pasif Manyetik Yataklar

Pasif manyetik sistemler 1950-1960 yılları arasında Kaliforniya'daki bir laboratuvarında ilk deneysel çalışmalar başlamıştır. Pasif manyetik yataklar özünde kalıcı mıknatıs ile süperiletken malzeme arasında oluşan manyetik levitasyon olayıyla oluşmaktadır. Bu olayın esası süperiletken şartlarda II. tip süperiletkenin içindeki normal bölgelerde akı çivileme merkezleri oluşup manyetik alan kaynağı ile manyetize olup aralarında çekme-itme kuvvetlerine karşı denge oluşmaktadır. Diğer ekseninde ise ilerleme serbestliğine sahiptir. Aynı zamanda Maglev trenlerinin çalışma prensibidir. Hatta serbest bir şekilde dönüş sağlayabilmesi özelliği ile süperiletken volan uygulamalarının temel çalışma prensibidir. Pasif manyetik sistemlerde, herhangi elektronik sisteme gereksinim olmaması maliyet ve güvenilirlik açısından üstünlük sağlamaktadır. Dezavantajları ise işletmesi için kriyojenik sisteme gereksinim duyması, görece daha düşük manyetik alan kuvvet sabiti ve manyetik kaçaklara sahip olmasıdır. Kendi aralarında silindirik ve düzlemsel olmak üzere iki çeşit süperiletken manyetik taşıyıcı sistem vardır (Şekil 22).



Şekil 22. Süperiletken manyetik taşıyıcı (SMB) konfigürasyonları; (a) Silindirik (içi boş silindir süperiletken, (b) Düzlemsel (disk süperiletken) (Patel, 2013).

Taşıyıcılar bir süperiletken külçe (genellikle YBCO veya GdBCO) yüzeyinde yüksek manyetik alan gradyanı oluşturacak şekilde düzenlenmiş kalıcı mıknatıslardan oluşur. Kalıcı mıknatıslar (PM) genellikle rotor üzerinde süperiletkenler ise soğutma kolaylığı için genellikle stator üzerindedir. Bu konfigürasyonlara dayalı olarak SMB prototipi modellemesi ve geliştirilmesi için birçok araştırma yapılmaktadır. İlk araştırmalarda özellikle düzlemsel taşıyıcılar kullanılırken son zamanlarda silindirik geometriye odaklanılmıştır.



Şekil 23. (a) Siemens tarafından geliştirilen HTS jeneratörü, yatay eksenli silindirik SMB, (b) Rotor ağırlığının çoğunu taşıyan PM-PM yatağı (üst) ile kullanılan dikey eksenli silindirik SMB (altta) (Patel, 2013).

Şekil 23’de son on beş yılda geliştirilen iki tane süperiletken manyetik taşıyıcı sistem örneği görülmektedir. Örnek olarak konfigürasyon, boyut ve performans açısından çeşitliliği göstermektedir. Neredeyse tüm sistemlerde, stabilite sağlamak ya da yükü büyük ölçüde desteklemek için PM-PM yatakları kullanılmıştır ve rotor, kayıpları en aza indirmek için genellikle vakumlanır.

1.11. Süperiletken Manyetik Askılama Mekanizması

Süperiletken Maglev sistemlerinin manyetik kaldırma kuvveti, süperiletkenin sahip olduğu manyetik moment miktarına ve sistemin manyetik alan gradyanına bağlı olup şu şekilde ifade edilebilir (Karaahmet, 2023):

Manyetik kaldırma kuvveti bir boyutta:

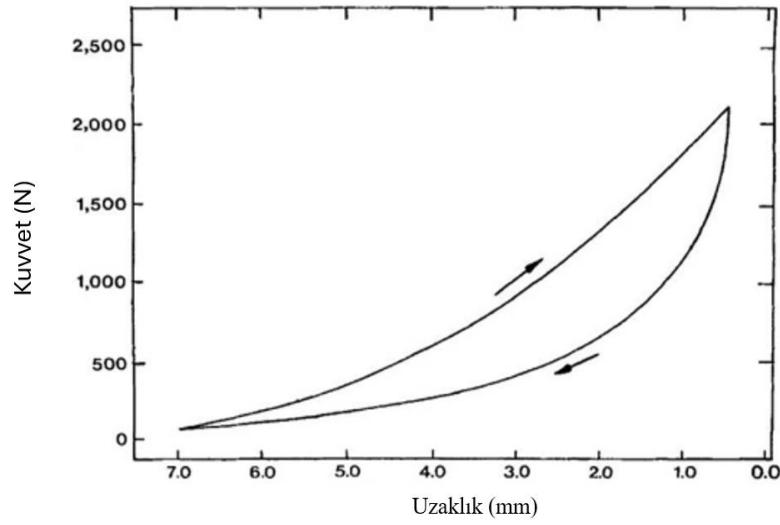
$$F = m (dH/dz), m = M V \quad M = A J_c r \quad (5)$$

Burada m , süperiletkenin manyetik momentini, dH/dz mıknatıs tarafından oluşturulan alan değişimini, M birim hacimdeki manyetizasyonu, V örnek hacmini, A örnek geometrisine bağlı bir sabiti, J_c süperiletkenin akım yoğunluğunu, yarıçapı (r) uygulanan manyetik alanı dışarlamak için süperiletkende oluşan akım halkasının yarıçapını gösterir. Endüstriyel uygulamalar için r , J_c ve dH/dz değerlerini geliştirilmektedir.

Herhangi mıknatıs, süperiletkenin üzerinde soğutulmasıyla, kaldırma-çekme kuvveti etkileşen nesnelerin uzaklıkları arasında üstel bir ilişki görülür:

$$F = F_0 e^{-az} \quad (6)$$

z : nesnelerin yüzeyleri arasındaki mesafedir.



Şekil 24. YBCO süperiletkeninin mıknatısla etkileşim durumundayken uzaklığa bağlı olarak kaldırma kuvvetinin değişimi (Ömür, 2015).

Yatay manyetik (guidance) kuvvet, Maglev araçlarında kılavuzlayıcı kuvvettir ve yatay dengeyi sağlar. Maglev sistemlerinin teknolojik uygulanabilirliğinin istenen düzeye getirilmesi için düşey manyetik kuvvetinin (F_z) yanında, kılavuzlama kuvvetinin’de (F_x) artırılması gerekmektedir. Bir levitasyon sistemi soğutulduğu noktadan konumunun değiştirilmesi durumunda kendini ilk konumuna geri getirmeli ve kararlı şekilde kendi durumunu muhafaza etmesi gerekmektedir. Manyetik sertlik terimi herhangi mekanik sistemde olduğu gibi küçük bir yer değiştirmeye nasıl değiştiğini gösteren bir ifadedir. Manyetik sertlik birim referans noktasından yer değişimiyle maruz kaldığı manyetik kuvvet değişimidir. Başka bir ifadeyle hareket doğrultusuyla aynı ekseninde dış bir kuvvetin etkisinde bulunan bir cisim için manyetik kuvvet sabiti ifadesi şu şekilde verilebilir (Moon, 2004):

$$\frac{K_{zz}}{L} = \frac{-\partial F_z / L}{\partial z} \quad (7)$$

Dikey kuvvetteki manyetik sertlik olarak tanımlanır. Benzer şekilde manyetik sertlik yatay pozisyonda değişimi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{K_{xx}}{L} = \frac{-\partial F_x / L}{\partial x} \quad (8)$$

Denklem 8’de K_{xx}/L ifadesi pozitifse sistem kararlı demektir çünkü yer değişimine karşı kuvvet geri çekici yöndedir. Süperiletkenler, alanlı soğutma uygulamasında (FC) 0.1 m ve 0.05 m mesafede soğutulduğunda yatay manyetik kararlılık pozitifdir. Yani süperiletken yanlara kaydıgında sistem onu tekrar denge konumuna çeker. Bunun nedeni ise tuzaklanmış akı bölgelerinin soğutulduğu andaki eski duruma geçme isteğidir. Alansız soğutma uygulamasında (ZFC), daha yüksek soğutma yüksekliği tercih edildiğinde levitasyon kuvveti artarken yatay kararlılık azalmaktadır. Manyetik akı süperiletkene yaklaşırken süperiletkene girmektedir ve oluşan akı dağılımı yatay kararlılığa aynı ölçüde katkı sağlamaz. Süperiletken alanlı soğutma uygulamasında levitasyon kuvveti azaldığı halde diğer soğutma uygulamasına göre yatay kararlılık artar (Ömür, 2015).

1.12. H formülasyonu Yöntemiyle Simülasyon

Süperiletkenlerdeki kritik durum, manyetik akı dağılımı, kritik akım yoğunluğu ve manyetik kuvvet gibi parametrelerin hesaplanması genellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanan ticari yazılımlarla gerçekleştirilir. Süperiletkenlerdeki kritik durum ve buna bağlı olarak manyetik akı dağılımı, kritik akım yoğunluğu ve manyetik kuvvet hesaplamaları genellikle sayısal hesaplama yöntemlerinden olan “*Sonlu Elemanlar Yöntemi*” kullanan ticari paket programları ile modellenenir. Süperiletkenlerin farklı sistemlerdeki performansı sayısal modelleme teknikleri kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Sayısal modellemede birleştirilmiş külçe YBCO yapılar çözümlenebilmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemleri (SEM’ler), elektromanyetik davranışla ilgili kısmi diferansiyel denklemleri (PDE’ler), özellikle Maxwell denklemlerini çözmek için gerekli olan güçlü sayısal tekniklerdir. Bu yöntemler, H, A ve ϕ gibi kullanılan formülasyona göre değişiklik gösterir (Ruiz-Alonso vd., 2004; Zhang vd., 2016).

1.13. Literatür Özeti

77 K’de yapılan deneylerde 20 mm çapındaki (RE)BCO süperiletken külçe örneklerde 2 T (Sawh vd., 2019), 65 mm çapındaki külçe örneklerde ise 3 T (Nariki vd., 2012) tuzaklanan manyetik alan değerleri elde edilmiştir. Bu tuzaklanan alan değerleri geleneksel Nd-Fe-B tabanlı kalıcı mıknatıslarınkinden oldukça büyüktür. Düşük sıcaklıklarda (RE)BCO külçe süperiletkenlerin tuzakladığı manyetik alan değerleri ilk kez 2003 yılında

Japonya’da Tomita ve Murakami tarafından ölçülmüştür. 29 K sıcaklığında karbon fiber ile kaplanmış ve reçine emdirilmiş olup, 26 mm çapında ve 15 mm kalınlığında iki külçe YBCO tek kristali arasında, 17.2 T’lık bir tuzaklanan alan ölçülmüştür (Tomita vd., 2003). 2010 yılında Cambridge Üniversitesi’nde yapılan bir çalışmada Shi ve arkadaşları, %15 Ag katkılı 26 mm çapında (Gd)BCO tek kristal süperiletkeninde sıvı azot sıcaklığında yani 77K tuzaklanan manyetik alan değerini 0.8 T buldular (Shi vd., 2010). Aynı grup 4 yıl sonra yaptıkları deneyle tuzaklanan manyetik alan ölçümlerinde, 26 K de 17.6 T değerini ölçerek Guinness rekorlar kitabına girmeyi başardılar (Durell vd., 2014). İlerleyen zamanlarda yine Cambridge Üniversitesi’nden Patel ve arkadaşları, iki yüksek sıcaklık süperiletken şerit yığını arasında 8 K de 17.7 T tuzaklanan manyetik alan ile Durell ve grubunun rekorunu geçmeyi başardılar (Patel vd., 2018).



Şekil 25. Brezilya’da Maglev araçları için geliştirilen "MagLevCobra" olarak adlandırılan ilk prototip (Sotelo vd., 2013).

Brezilya’da geliştirilen “MagLev Cobra” olarak adlandırılan bir Maglev prototipi ve Şekil 25(b)’ de bu prototipte kullanılan dikdörtgen prizma şeklinde ve boyutları $64 \times 13 \times 2 \text{ mm}^3$ olan (RE)BCO külçe süperiletkenleri görülmektedir. Hem Maglev uygulamalarında hem de süperiletken manyetik yataklarda büyük boyutlu dikdörtgen prizma şeklinde, tek ve çok kristal yapıda (RE)BCO külçeler kullanılmaktadır. Ancak süperiletken külçelerin dikdörtgen prizma şeklinde üretimi oldukça zor ve uzmanlık gerektiren bir konu olduğundan, genellikle araştırma grupları tarafından, başta Almanya olmak üzere yabancı ülkelerden ticari olarak satın alınmaktadır.

Manyetik kaldırma sistemlerinin gelişimi, düşük sıcaklık süperiletken tellerin, transistorların ve çip tabanlı elektronik kontrol teknolojilerinin gelişiminin doğal sonucu

olarak, 1960'lı yılların sonunda başladı. İlk insan taşıyan Maglev test aracı 2000 yılında Çin'de başarıyla üretildikten sonra, 2004 yılında Rusya ve Almanya'da HTS Maglev test araçları üretildi (Wang vd., 2002; Schultz vd., 2005 ve Del Valle vd., 2007).

Namburi ve arkadaşlarının 2016 yılındaki çalışmasında. TSMG tekniğinin yüksek manyetik alan içeren uygulamalar için başarılı olduğunu kabul etmesine rağmen ısı işleminden sonra örnek hacimde azalma, gözenekli yapı gibi sorunları optimize etmek için SIG yöntemini geliştirmiştir (Namburi vd., 2016).

Duman ve arkadaşlarının 2023 yılındaki yaptığı çalışmada, %20 oranında gümüş katkı numunenin Y211 tozunun farklı oranlarda (%20, 25 ve 30) katkılanması ile YBCO örnekleri TSMG ve MPMG üretim yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. En iyi tuzaklanmış alanın TSMG yöntemi ile üretilen %25 oranında Y211 katkı örnekte elde edilmiştir. Aynı zamanda gümüş lehim malzemesinin eklenmesinin saf haldeki YBCO'ya kıyasla T_c 'yi 40 K'e kadar düşürdüğü görülmüştür (Duman vd., 2023).

Erdem ve Türköz'ün 2020 yılındaki çalışmasında YBCO örneğine, Baryum (Ba) yerine %0,005 ve %0,1 Lityum (Li) oranında katkı yapılmıştır. Yapılan elektriksel ölçümlerde, Li katkısının kritik geçiş sıcaklığını düşürdüğü gözlenmiştir. Katkısız haldeki YBCO örneği 55 A/cm^2 kritik akım yoğunluğuna sahipken, %0.005 Li katkı örneğin 53 A/cm^2 , %0,1 Li katkı örneğin ise 7 A/cm^2 değerine düştüğü bulunmuştur (Erdem ve Türköz, 2020).

Erciyas'ın 2022 yılındaki çalışmasında Comsol programı kullanılarak 10 MW gücünde rüzgar türbini tasarımı yapmıştır. Çalışmasında yeni bir metot geliştirerek elektromanyetik, termal ve mekanik analizi yapmıştır. Türbin verimini %96 oranı bulunmuş bunun yanı sıra bobinlerin üzerindeki stres yükünü hesaplanmıştır. Gelecekte yapılacak yeni tasarımlar için önerilerde bulunmuştur (Erciyas, 2022).

Siamaki ve arkadaşlarının 2022 yılındaki çalışmasında, süperiletken manyetik yatağın sürtünme kayıpları olmamasına rağmen neden yavaşladığını anlamak için bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneğinde süperiletken önce döndürülmüş, ardından herhangi temas yüzeyi olmayan ortamda dönüş davranışı gözlemlenmiştir. Deneyde dönüş yaparken manyetik alanın homojen olmayan etkisinden dolayı histerisiz etkisi gözlemlenmiştir. Bu etki dönen nesnenin yavaşlamasına sebep olduğunu gözlemlenmiştir (Siamaki vd., 2020).

Baumann ve arkadaşlarının 2023 yılındaki bir çalışmada birçok sayıda ve farklı şekillerde YBCO süperiletken üretilmiştir. Çalışmada YBCO numunelerinin yarı çapı ile

hacmi oranlanmıştır. Tohumdan uzaklaştıkça numunenin J_c miktarının artması beklenirken biraz azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin gözeneklilik gibi faktörlerden kaynaklandığını anlaşılmıştır. Numunede oluşan boşlukların sebebinin peletlenme yaparken ve numunenin fırında iken oksijenin reaksiyona girmesinden kaynaklanmaktadır. Oksijenin boyutunun büyük olması pinning merkezi olamayacak kadar büyük boşluklar yaratmaktadır. Pinning merkezlerinin sayısındaki azalmaya bağlı olarak kritik akım yoğunluğu da düştüğü sonucuna varılmıştır (Baumann vd., 2023).

Namburi ve arkadaşlarının 2021 yılındaki çalışmasında YBCO süperiletkenin 77 K'de teorik olarak 10^8 A/cm² kritik akım yoğunluğuna sahiptir. Deneysel uygulamalarda ise üzerine çıkılmaktadır bunun sebebi ise süperiletken içindeki manyetik akış hareketidir (Namburi vd., 2021).

Altıntaş'ın 2022 yılındaki yüksek lisans çalışmasında, tohum ve Y123 ve Y211 tozlarıyla TSMG yöntemi kullanarak YBCO üretmiştir ve CeO₂ katkısının kaldırma kuvveti üzerindeki etkisini araştırmıştır. CeO₂ katkı oranları sırasıyla; %0, %0.25, %0.5, %0.75 ve %1'dir. Levitasyon kuvveti itme-çekme özellikleri bakımından en iyi numunenin %0.5 oranına sahip CeO₂'dir (Altıntaş, 2022).

Karaahmet'in 2023 yılındaki doktora çalışmasında, süperiletkenlerin çok yüzeyli manyetik kaldırma ve kılavuzlama yeteneklerinin birim maliyetinin hesaplanması için düzenek tasarlamıştır. Bu düzeneği için oluşturmak için Comsol Multiphysics 3.5a paket sonlu elemanlar programı kullanılmış ve en iyi model simülasyonla belirlenmiştir. Düzenek için 3 çekirdekli süperiletkenler ve kalıcı mıknatıslar satın alınmış ve kriyostat kapları, PMG kalıp üretilmiştir. 3 farklı kriyostat tasarımı oluşturularak 8 farklı kombinasyon tasarlanmıştır. Deneyde belirli yükseklikte manyetik kaldırma ve gevşeme ölçümleri yapılmıştır. Ardından deneyde elde edilen sonuçları, düzenek için ayrılan paraya bölerek birim kuvvet başına en iyi ölçüm değerlerini hesaplanmıştır. 3HTS-3PM kombinasyonunun tüm yüksekliklerde en yüksek manyetik kaldırma kuvveti elde edilmiştir. 1HTS-PM kombinasyonunun en düşük kaldırma kuvveti gösterdiği göstermiştir. 1000 km'lik bir ray sistemi için en iyi tercihin 3HTS-3PM kombinasyonu olduğu çalışmada ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda çok yüzeyli tasarımların daha iyi bir tercih olduğu vurgulamaktadır (Karaahmet, 2023).

Güner'in 2017 yılındaki çalışmasında TSMG ile tek çekirdekli ve çok çekirdekli silindirik YBCO numuneler üretilmiştir Tek çekirdekli YBCO örnekleri 13, 20, 32 ve 40 mm çaplarında üretilen silindirik YBCO örneklerinin manyetik kaldırma performansları

incelenmiştir. Ölçüm sıcaklık azaldıkça kaldırma kuvveti grafiğinin eğiminin keskinleşme görülmüştür. 20 mm çapında tek kristal YBCO örneği 77 K değerinde ZFC şartlarında maksimum itici kuvvet 7.02 N ve maksimum itici kuvvetin hacmine oranı ise 4.99×10^{-3} N/mm³ elde edilmiştir. Ardından çift çekirdekli YBCO örnekleri (Şekil 26) üretilmiş ve çekirdekler arasındaki mesafenin ve çekirdeklerin paralel olup olmamasına göre manyetik kaldırma kuvveti üzerine etkileri incelenmiştir. Çekirdekler arasındaki mesafe arttıkça manyetik kaldırma kuvvetinin düştüğü gözlemlenmiştir (Güner, 2017).



Şekil 26. Isıl işlem sonrası $d = 0, 1, 4$ ve 12 mm uzaklığındaki çift çekirdekli YBCO süperiletkenlerin üst yüzeylerinin fotoğrafları (Güner, 2017).

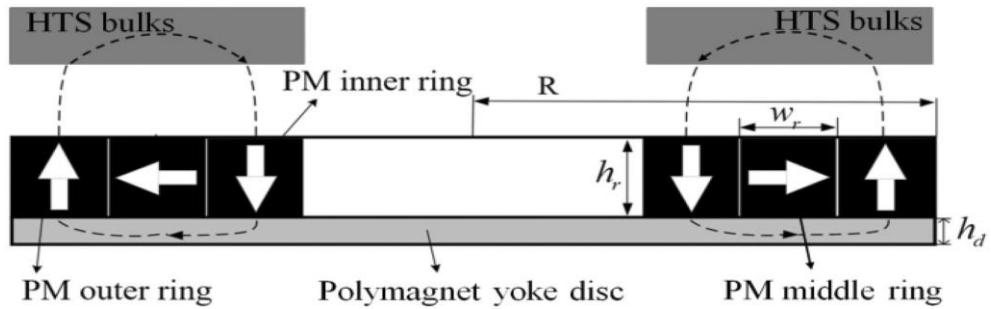
Öztürk ve arkadaşlarının 2020 yılındaki çalışmasında, çok yüzeyli PM-HTS düzeneğinde önce yerleşim yerleri simüle edilmiş, ardından 5 mm, 25 mm ve 75 mm soğutma yüksekliğinde 1 adet PM-1 adet HTS, 3 adet PM-1 adet HTS ve 3 adet PM-3 adet HTS düzeneği tasarlanmıştır. Çalışmanın amacı aynı kılavuzlama değerine sahip daha yüksek kaldırma kuvveti elde edilmesidir. Çalışmada literatürde benzer çalışmaların aksine PM sayısı düşürülerek HTS sayısı artırılmıştır. Çok yüzeyli yerleşim sayesinde hem kılavuzlama hem de levitasyon kuvveti değerlerinde artış elde edildiği görülmüştür. Deney sonucunda çoklu yüzeyli dizilimin tek yüzeyli diziliminden yanal kılavuzlama kuvveti 3 kat, levitasyon kuvvetinin ise biraz daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. 1000 km ray için aynı kuvvette çok yüzeyli dizilimi levitasyon verimliliğini %43.2 oranında artırırken maliyeti %42 oranında düşürdüğü hesaplamıştır (Ozturk vd., 2020).

Yıldız'ın 2019'daki doktora çalışmasında, Donmuş görüntü modeli (DGM) ve amper yaklaşımını dikdörtgen geometri üzerinde uygulayarak literatüre bu konuda katkı sağlamıştır. Çalışmasında temassız sürüş mekanizmasına sahip Evershed tipi süperiletken

manyetik yatak tasarlamıştır. Düşey ve yanal kuvvetleri ön plana alacak şekilde Amper akımı yaklaşımını kullanarak teorik hesaplama yapmış ardından uygulama gerçekleştirilerek teorik hesaplaması ile karşılaştırılmıştır. 5 mm mesafede 140 N maksimum kaldırma kuvveti elde edilmiştir (Yıldizer, 2019).

Pardo ve arkadaşlarının 2019 yılındaki çalışmasında, süperiletken kabloların yatılım şekillerinin enerji kaybı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kabloların uçlarının bağlanmış yalıtılmış, tamamen yalıtılmış ve hiç yalıtılmamış durumunu AC kayıplarının hangi durumunda daha çok olduğu incelenmiştir. Sistem helyum gazı ile soğutulmuştur. Süperiletken bantların boydan boya yalıtılmış olanla, tamamen yalıtılmış bantta göre daha az enerji iletim kaybı bulunmuştur. İletim hatlarında endüktansı azaltmak için, sargılarda genellikle çok bantlı iletkenler kullanılır. Bu düzen şeklinde yerleştirilen bantlar da yüzeyine paralel manyetik alan bileşeni sonucunda endüktif etki oluşmuştur. Kaybı azaltmanın bir yolu da, bantları ROEBEL karmaşık tel konfigürasyonlarında belli mesafe aralıklarla kablolar kendi aralarında yer değiştirmektir (Pardo vd., 2019).

Tang ve arkadaşlarının 2023 yılındaki çalışmasında süperiletken volan uygulamaları için yeni bir tasarım geliştirilmiştir (Şekil 27). Tasarımda statorun üzerine eşit aralıklarla dizilmiş 8 silindir tane süperiletken yerleştirilmiştir. Rotor silindir şeklinde Halbach dizilimine sahip yerleştirilmiş mıknatıslardan oluşmaktadır. Bunun yanı sıra diski sabitlemek ve manyetik kaçakları azaltmak için polymagnet yoke diski eklenmiştir. Ardından simülasyon programında diskin kalınlığı, süperiletken ile mıknatıs arasındaki mesafe, sistemin mıknatıslarının kalınlıkları değiştirilerek 2 farklı programda simüle edilmiştir (Tang vd., 2023).



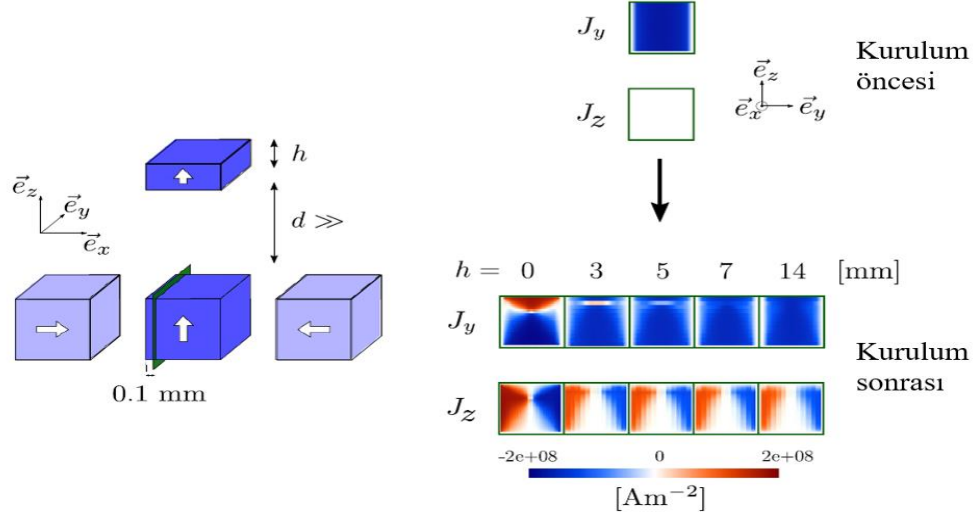
Şekil 27. Tang ve arkadaşlarının geliştirdiği manyetik yatak (Tang vd., 2023).

Manyetik diskin kalınlığının manyetik alan kaçışında etkisinin az olduğu fark edilmiştir. Sıfır alanlı soğutma ve alanlı soğutma koşullarında ölçüm yapılmıştır.

Mıknatısların alan dağılımı ve yoğunluğu deneysel olarak 2, 4, 6, 8 ve 12 mm’de ölçülmüş ve COMSOL Multiphysics kullanılarak programında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbirleriyle uyuşmakta ve oluşan farkın montaj hatalarından kaynaklandığı düşünülmüştür. 5 mm soğutma yüksekliğinde sıfır alanlı şartlarda soğutmanın aksenel kuvvet yoğunluğu: 7.24 N/cm^2 , Alanlı soğutmada ise 5.94 N/cm^2 olduğu bulunmuştur. Bu yapı, geleneksel yapıya göre %33 daha az mıknatıs kullanılarak %17 daha fazla kuvvet elde etmektedir (Tang vd., 2023).

Cardwell ve arkadaşlarının 2023 yılında basılan kitabında, yüksek performanslı ekonomik iletken oluşturmanın bazı problemlerinden bahsetmektedir. Yüksek açılı tane sınırları yüksek akım taşımayı sınırlar bunun sebebi sınır bölgelerinden elektron çiftlerinin oluşabilmesi için elektronların koherans (ζ) uzunluğundan yakın uzaklığında olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için ince film teknolojisi ile düşük açılı tane sınırları oluşturmayı önermektedir. Manyetik girdapların güçlü bir şekilde sabitlenmesi için nano mühendislikten yararlanarak yapısal kusurlar eklenmesi ve kusurların yerleşim yerleri tasarlanması gerektiğini bahsetmektedir. Alternatif akım uygulamalardan kaynaklanan histerisiz kayıplarını azaltmak için iletken filamentlerin düzenlenmesi ve manyetik olmayan alt tabakalar kullanılması gerektiğinden bahsetmektedir. Mevcut piyasadaki üretilen ürünlerin 77 K’de, $>50 \text{ \$/kA.m}$ maliyeti seviyesindedir ve maliyetlerin 5 kat azalması önemini vurgulamaktadır (Cardwell vd., 2023).

Houbart ve arkadaşlarının 2023 yılında yaptığı çalışmasında Halbach dizilimine sahip kalıcı mıknatıslar yerine süperiletkenlerin manyetik akı yönleri Halbach dizilimi benzeyecek şekilde düzenlenerek külçe ve istiflenmiş bant süperiletkenlerden oluşan düzenek kurulmaktadır (Şekil 28). Düzenekte soğutulmuş süperiletkenlerin birbirleriyle etkileşimi sonucunda manyetik alan kaybını geri kazanılması hedeflenmektedir. Deney sonucunda külçe süperiletkenlerde %5, bant şeklindeki süperiletkende ise %11’lik manyetik alan kazanımı elde edilmektedir. 17.6 T’lık akı tuzaklanması rekorunu bu yöntem kullanılarak daha da yükseltilebileceği düşünülmektedir (Houbart vd., 2023).



Şekil 28. Yeni Halbach diziliminin manyetik alan dağılımı (Houbart vd., 2023).

Yu ve arkadaşlarının 2019 yılındaki çalışmasında, süperiletkenlerin kaldırma kuvvetinin üzerindeki kalınlık parametresi etkisi araştırılmıştır. Süperiletkenin kalınlığı azaldıkça, z eksenı boyunca daha fazla akım simetrik indüklenirken levitasyon kuvveti azalmaktadır bunun yanı sıra alt ve üst bölgelerindeki temas alanın azalması, kalınlık doğrultusundaki akım akışının azaltılmaktadır. Aynı çap uzunluğuna sahip farklı oranlarda yüksekliği azaltılan süperiletkenlerin kaldırma kuvvetleri incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarının doğrusal olmamasından dolayı kullanılan malzemenin miktarı ile kaldırma kuvveti arasında bir ilişki kurulmuştur. 1/5 yüksekliği oranında olan numunenin daha maliyet kaldırma kuvveti oranı açısından efektif olduğu bulunmuştur (Yu vd., 2020).

Rodriguez ve arkadaşlarının 2020 yılındaki çalışmasında, radyal şekilde PM-HTS den oluşan deney düzeneği tasarlanmıştır. Deneyde süperiletkenin farklı sıcaklık ortamında titreşim etkisi incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda ve tekrarlı yapılan deneyler sonucunda titreşimin sıcaklıkla etkisinin çok az olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında soğutucu olarak kriyojenik soğutucu kullanımı, sıvı azotla soğutulması kıyaslanınca dönüş karakteristiğinin farklı olduğu görülmüş bunun sebebinin ise sıvı azotun buharından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Rodriguez vd., 2020).

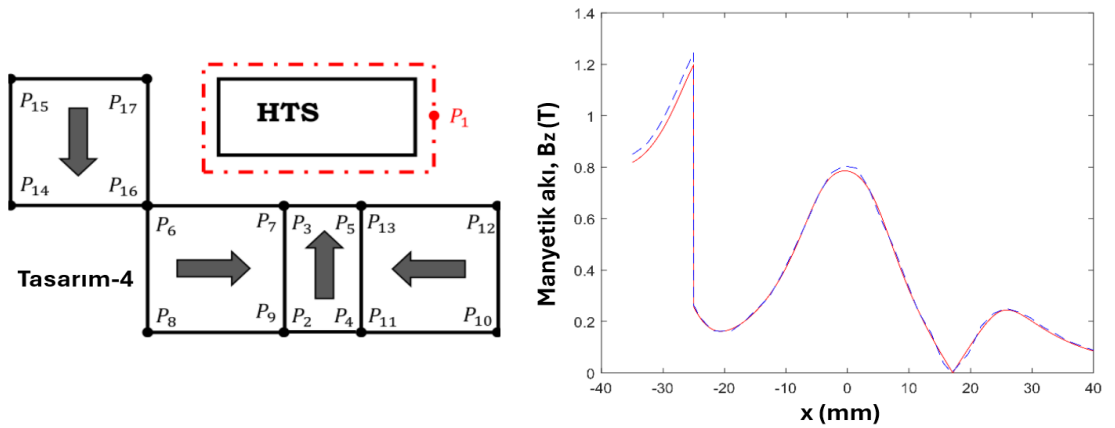
Güner ve arkadaşlarının 2017 yaptığı çalışmada TSMG tekniği kullanarak süperiletken YBCO numune üretmiştir. Ölçüm sisteminde 77, 67, 57, 47 ve 37 K değerlerinde alanlı soğutma, alansız soğutma ve yanal ölçümleri yapmıştır. Alansız soğutma ölçümünde 77 K'den 37 K sıcaklık değerine doğru ölçüm yaparken süperiletkenin kaldırma kuvveti 7.02 N'dan 11.23 N'a yükselmektedir. Sıcaklık düştüğünde yanal kuvvet değerleri benzer şekilde

2.74 N dan 4.33 N'a artmaktadır. Bunun sebebi ise sıcaklık düştükçe kritik akım yoğunluğu artarak Meissner etkisinin artmaktadır. Alanlı soğutma (FC) ölçümüne bakıldığında aynı şekilde içinde hapsolan manyetik akı ve çekim etkisi artmaktadır (Guner vd., 2017).

Abulaiti ve arkadaşlarının 2024 yılındaki çalışmasında, NdBCO çekirdeği yerine GdBCO çekirdek kullanarak tek kristal YBCO örneği üretmiştir. Çalışmasında numunelerin çekirdek boyutları sırasıyla S1 örneğinde $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, S2 örneğinde $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ve S3 örneğinde $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 'dir. S3, S1 örneğiyle kıyaslayınca sırasıyla kaldırma kuvvetinin 25.9 N'dan 35.2 N'a arttığı gözlenmiştir. Aynı şekilde tuzaklanan manyetik alanında aynı şekilde 0,24 T'dan 0,30 T değerine arttığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar NdBCO çekirdeğiyle üretilen tek kristal örneklerle rekabet edebilecek durumdadır. Bu yöntemle büyük çekirdek kullanılarak c ekseninde büyük YBCO numuneler üretme imkânı sağlanmaktadır (Abulaiti vd., 2024).

Yang ve arkadaşlarının 2021 yılındaki çalışmasında, yanal sertliğin, mıknatısın yüzey alanıyla tutarlı bir ilişkisi olmadığını bulmuştur. Yanal sertlik bazen artmaktadır bazen azalmaktadır. Yer değiştirme miktarına ve mıknatısın gücüne göre farklılık göstermektedir. Mıknatısında süperiletkenle yakınlığı ve süperiletkenin malzemenin iç yapısında oluşan pinning etkileriyle birlikte belirlenir (Yang vd., 2021).

Başaran ve arkadaşlarının 2021 yılındaki çalışmasında, çok yüzeyli manyetik yatak düzenekleri tasarlanmıştır. Süperiletkene iki farklı yüzeyden mıknatıslarla etkileşimiyle hem kaldırma hem de yanal kuvvetinde artış gözlenmiştir. Şekil 29'da sunulan tasarımda çalışmadaki diğer yerleşim düzenine sahip tasarımlarla kıyaslanınca %11 oranına kadar levitasyon kuvveti artışı elde edilmiştir (Başaran vd., 2021).



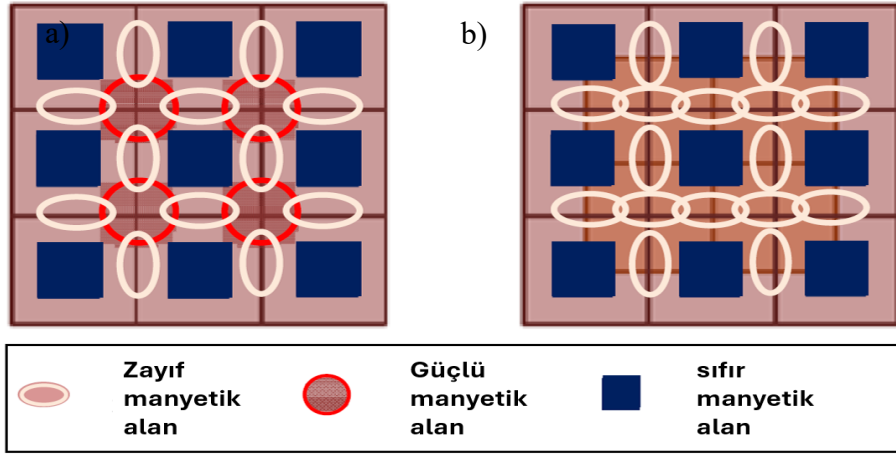
Şekil 29. (a) En başarılı dizilime ait manyetik akı profili, (b) Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemine ait tasarım (Başaran vd., 2021).

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle geleneksel PMG veya Halbach PMG kullanılmaktadır. Geleneksel PMG zıt yönlü mıknatısların arasına demir ve çelik eklenerek oluşturulur. Halbach PMG diziliminde ise 5 mıknatıs farklı yönlerde yerleştirilerek manyetik akı yoğunlaştırılabilir (Deng vd., 2008). Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle iki tip PMG kullanılmaktadır: “Geleneksel PMG” olarak adlandırılır ve zıt yönlü iki mıknatıs ve mıknatıslar arasındaki manyetik akıyı yoğunlaştırmak için kullanılan demir veya çelikten oluşur. Literatürdeki çalışmalarda Halbach diziliminin geleneksel PMG’den 2-3 kat daha fazla olduğu bilinmektedir.

Alqadi ve arkadaşlarının 2007 yılındaki yaptığı çalışmada, süperiletkenle farklı şekil ve boyutlarda mıknatısların etkileşimi hakkında veriler toplanmıştır. Çalışmada mıknatısın yüzey alanının en etkili faktör olduğunu bulunmuş bunun yanı sıra mıknatısların kalınlıklarının da etkili olduğunu gözlemlenmiştir. Mıknatısın kalınlık boyutunun kaldırma kuvveti üzerinde daha sınırlı katkı sağladığı gözlenmiştir. Mıknatısın kalınlığı çok arttığında süperiletkende doygunluk görülemeye başlayıp kaldırma kuvveti artmadığı gözlenmiştir (Alqadi vd., 2007).

Chan’ın 2002 yılında yaptığı çalışmada, aynı yarıçapa sahip farklı kalınlıklardaki YBCO örnekleri ile büyük bir mıknatıs etkileşiminin kaldırma kuvveti üzerine etkisi incelenmiştir. YBCO örneğinin, kalınlık boyutunun arttıkça kaldırma kuvvetinin de arttığı ancak bir noktada doygunluğa ulaştığı gözlenmiştir. En iki kaldırma kuvveti sonucuna, süperiletken yarıçapın mıknatısının kalınlığının iki katı olduğunda ulaşılmıştır (Chan, 2003).

Douine ve arkadaşlarının 2013 yılındaki çalışmasında, motorlarda kullanılması için manyetik kalkan tasarlamıştır (Şekil 30). Manyetik kalkanın rotor bölümünde manyetik akının yoğunlaşması etkisi incelenmiştir. Farklı boyutlarda kare YBCO peletlerinden büyük kare pelet oluşturulup manyetik akı kaçıışı hesaplanmıştır. Ardından bir katman daha eklenerek manyetik akı kaçıışı daha da azaltmıştır. Deneysel uygulamanın yanı sıra simülasyonla modellemiştir. Böylece deneyle modelin verilerinin örtüştüğünü gözlemlemiştir. Ek katmanlı yapının en iyi koruma sağladığı gözlenmiştir (Douine vd., 2013).



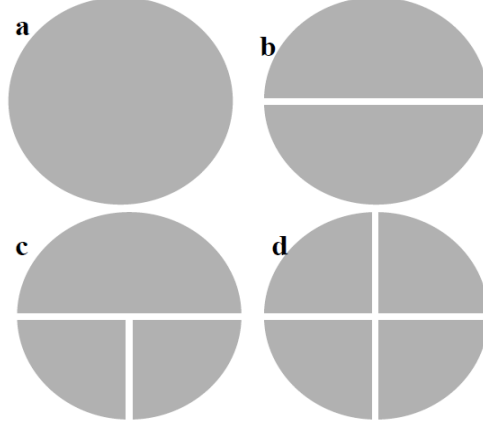
Şekil 30. 9 adet kare YBCO düzeneği manyetik alan konsantrasyonunun gösterimi (a) tek katman, (b) çift katmanlı düzeneğ (Douine vd., 2013).

Yamagishi ve arkadaşlarının 2019'daki çalışmasında, 30 mm çapında, 10 mm yüksekliğinde silindir şeklindeki Gd-Ba-Cu-O örneklerin kaldırma kuvveti ölçülmüştür. Ardından 30 mm çapında, 10 mm yüksekliğinde örnek kesilerek 4 tane $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ süperiletken örnek elde edilmiştir. Silindir şeklindeki süperiletkenler kullanılarak $30 \times 30 \times 10 \text{ mm}^3$ boyutlarında manyetik yatak tasarlanmıştır. Ardından hiç kesilmemiş silindir şeklindeki örnek ile kesilip manyetik yatak yapılan örneklerin 5 mm soğutma yüksekliğinde manyetik kaldırma kuvvetleri kıyaslanmıştır. Manyetik yata k kullanılarak, hiç kesilmemiş olan silindir süperiletken örneğe kıyasla %67 oranında daha fazla kaldırma kuvveti elde edilmiştir (Yamagishi vd., 2019).

Choi ve arkadaşlarının 2008 yılındaki çalışmasında, MSMG (Multi-Seeded Melt Growth) yöntemiyle $3 \times 3 \times 2 \text{ cm}^3$ hacmine sahip tek çekirdek ve çok çekirdekli kare YBCO örnekler üretilmiştir. Tek çekirdekli YBCO örneğinin ZFC şartlarında kaldırma kuvveti 48.3 N, dört çekirdekli YBCO örneğinde ise 33.9 N elde edilmiştir. Çok çekirdekli yapının tane sınırlarında zayıf bağlantıya neden olduğu, zayıf bağlantının akım akışını kesintiye uğratarak manyetik kaldırma kuvvetini azalttığı gözlenmiştir (Choi vd., 2008).

Yang ve arkadaşlarının 2002'deki çalışmasında, tane sınırlarının kaldırma kuvvetine etkisi incelenmiştir. 30 mm çapında tek çekirdekli YBCO silindir örnekler üretilmiştir. Ardından örnek Şekil 31'de görüldüğü gibi 2'ye, 3'e ve 4'e bölmüştür. En baştaki tek çekirdek bölünmemiş ve bölünen numuneler birleştirilerek ZFC soğutma durumunda kaldırma kuvvetleri ölçülmüştür. En büyük kaldırma kuvveti bölünmemiş örnekte 67.5 N, En düşük kaldırma kuvveti ise 4'e bölünen örnekte 28.15 N' dur. Levitasyon kuvvetinin ortalama tane yarıçapıyla doğru, tane sınırı uzunluğuyla ters orantılı ilişkisi olduğu

bulunmuştur. Bunu açıklamak için formül geliştirmiştir. Hem simülasyonda hem de uygulama sonuçlarıyla örtüştüğü görülmüştür (Yang vd., 2002).



Şekil 31. (a) Bölünmemiş, (b) 2'ye bölünmüş, (c) 3'e bölünmüş, (d) 4'e bölünmüş numunelerin kesilme şekilleri (Yang vd., 2002).

Yanxing ve arkadaşlarının 2022 yılındaki çalışmasında, süperiletkenin çekirdeğinin mıknatısa bakacak şekilde levitasyon ölçümünün yapılması durumunda hem yatay hem de dikey yönde manyetik kuvvetin arttığı gözlenmiştir. Cheng ve arkadaşlarının çalışmasında ise manyetik histerisiz genişliğinin daraldığını da eklemiştir. (Yanxing vd., 2022; Cheng vd., 2022).

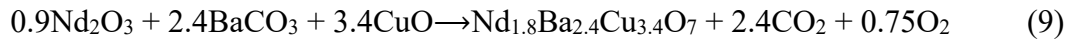
Savaşkan ve arkadaşlarının 2020 yılındaki çalışmasında, TSMG yöntemiyle 25 mm çapında, 7 mm yüksekliğinde silindir şeklinde tek çekirdekli ve çift çekirdekli YBCO örnekler üretilmiştir. Çift çekirdekli örneklerde, çekirdek arasındaki mesafe 1 mm, 8 mm ve 16 mm'dir. Çekirdekler arası mesafesi arttığında kaldırma kuvvetinin azaldığı gözlenmiştir. Zayıf bağlanmış tane sınırlarının kaldırma kuvvetini azalttığı sonucu elde edilmiştir (Savaşkan vd., 2020).

Zhou ve arkadaşlarının 2009 yılındaki çalışmasında, farklı soğutma yüksekliklerinde ve farklı mıknatıstan uzaklaşma hızlarında hem lateral hem de kaldırma kuvveti ölçümleri gerçekleştirmiştir. Soğutma yüksekliği arttığında, kaldırma kuvveti mıknatıstan uzaklaşma hızının artmasıyla genellikle artmıştır. Lateral kuvvette ise daha yüksek soğutma yüksekliğinde, mıknatıstan uzaklaşma hızı daha belirgin hale gelerek farklı histerik etki yaratmıştır (Zhou vd., 2009).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O₇ (Nd123) Çekirdek Üretimi

Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O₇ (Nd123) üretimi için gerekli bileşiklerin molekül ağırlıkları denklem 9'daki stokiometrik oranlara göre hesaplanarak Tablo 1'de verilmiştir.

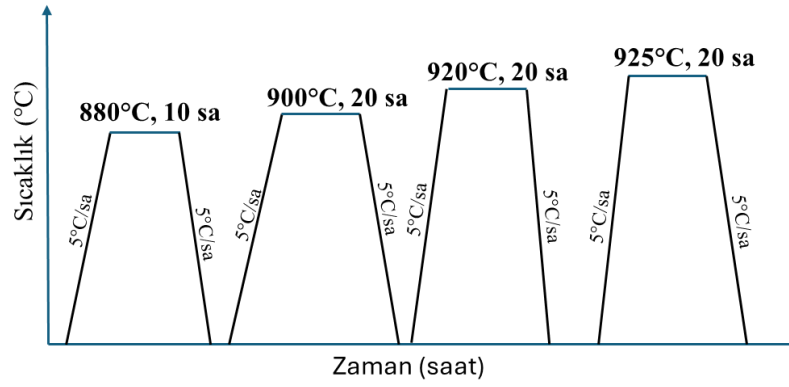


Nd₂O₃, BaCO₃ ve CuO oksit tozları, Tablo 1'de verilen stokiometrik oranda karıştırılarak, NdBa₂Cu₃O₇ (Nd123) kimyasal tozu hazırlanmıştır.

Tablo 1. Nd123 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.

Karışım	Üretici firma ve Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı	Bileşik Ağırlığı (g)
Nd ₂ O ₃	Alfa Aesar 99.99	336.48	16.79
BaCO ₃	Abcr 99.8	197.35	39.39
CuO	Alfa Aesar 99.99	79.55	23.82
Toplam			80

Nd123 karışımı elde etmek için, özellikleri ve miktarları Tablo 1'de verilen Nd₂O₃, BaCO₃ ve CuO tozları homojen toz karışımı elde etmek için Retsch marka RM200 model öğütücüde 20 dakika karıştırılır. Karışım, 880 °C'de 10 saat boyunca kalsine edilir. Fırından alınarak öğütülür. Daha sonra aynı işlemler tekrarlanarak 900 °C'de 20 saat ve 925 °C'de 20 saat kalsinasyon işlemi yapılır (Şekil 32).



Şekil 32. Nd123 üretim sıcaklık grafiği.

2.1.1. Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O₇ (Nd422) Üretimi

Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O₇ (Nd422) üretimi için gerekli bileşiklerin molekül ağırlıkları denklem 10'daki stokiometrik oranlara göre hesaplanarak Tablo 2'de verilmiştir.

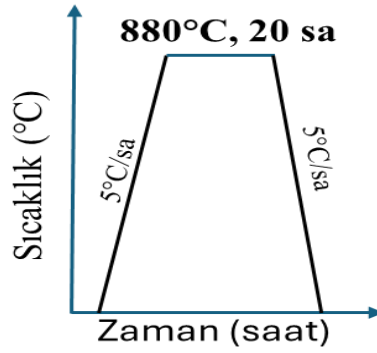


Özellikleri ve miktarları Tablo 2'de verilen Nd₂O₃, BaCO₃ ve CuO tozları homojen toz karışımı elde etmek için Retsch marka RM200 model öğütücüde 20 dakika karıştırılır. Karışım, 880 °C'de 20 saat boyunca kalsine edilir.

Tablo 2. Nd422 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.

Karışım	Üretici firma ve Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı	Bileşik Ağırlığı (g)
Nd ₂ O ₃	Alfa Aesar 99.99	336.48	10.97
BaCO ₃	Abcr 99.8	197.35	6.44
CuO	Alfa Aesar 99.99	79.55	2.59
Toplam			20.00

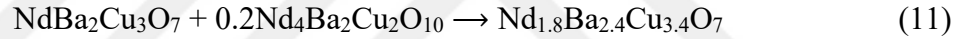
Nd422 Homojen toz karışımı hazırlandıktan sonra Şekil 33'de ısı işleme tabi tutulur.



Şekil 33. Nd422 üretim süreci grafiği.

2.1.2. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ Çekirdeği Üretimi

$\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ üretilmesi için gerekli bileşiklerin denklem 11’de stokiyometrik oranlara göre hesaplanarak Tablo 3’de verilmiştir.

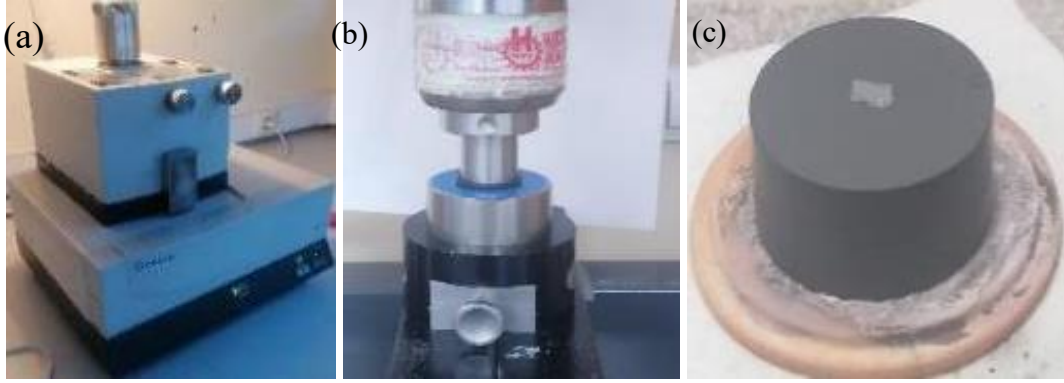


Nd123 ve Nd422 tozları denklem 11 kullanılarak Tablo 3 elde edilir. Tablo 3’de verilen miktarlarda tartılır ve homojen toz karışımı elde etmek için Retsch marka RM200 model öğütücüde 20 dakika karıştırılır (Şekil 34(a)). Elde edilen homojen toz karışımı 32 mm çaplı silindirik kalıba dökülür ve 20kPa basınç altında preslenir (Şekil 34(b)).

Tablo 3. Çekirdek hazırlamak için gerekli olan oksit tozların miktarları.

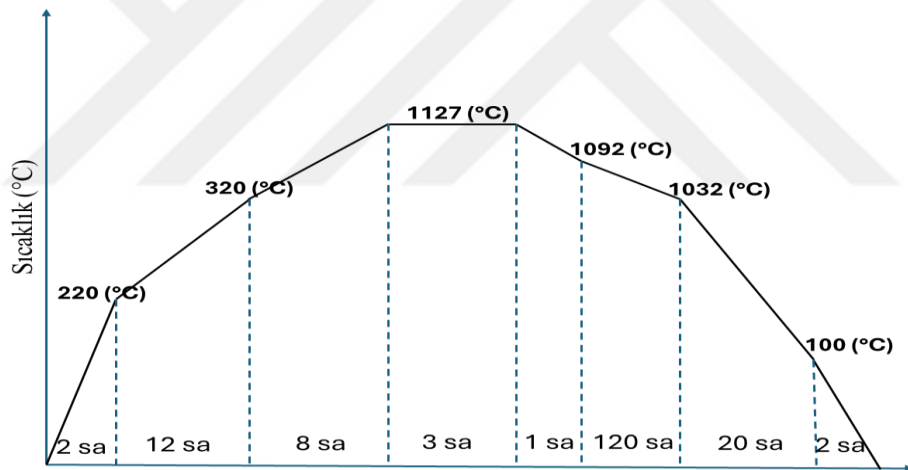
Karışım	Bileşik Ağırlığı (g)
Nd123	19.39
Nd422	11.81
Toplam	31.2

Kalıptan çıkarılan peletin üzerine parlak yüzeyi numuneye gelecek şekilde MgO yerleştirilir (Şekil 34 (c)). Üzerinde MgO yerleştirilen pelet, ilk ısıtım işlemi için Protherm marka kare fırın içine yerleştirilir. Isıtım işlemi grafiği Şekil 35’de görülmektedir.



Şekil 34. (a) Retsch marka RM200 model agat havanlı öğütücü karıştırılması, (b) karışımın 20kPa ton basınç altında preslenmesi süreci, (c) Çekirdek peletinin üstüne MgO yerleştirilmiş çekirdek karışımı.

$\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ üretmek için hazırlanmış homojen toz karışımı Şekil 35’de ısıtma işlemine tabi tutulur.

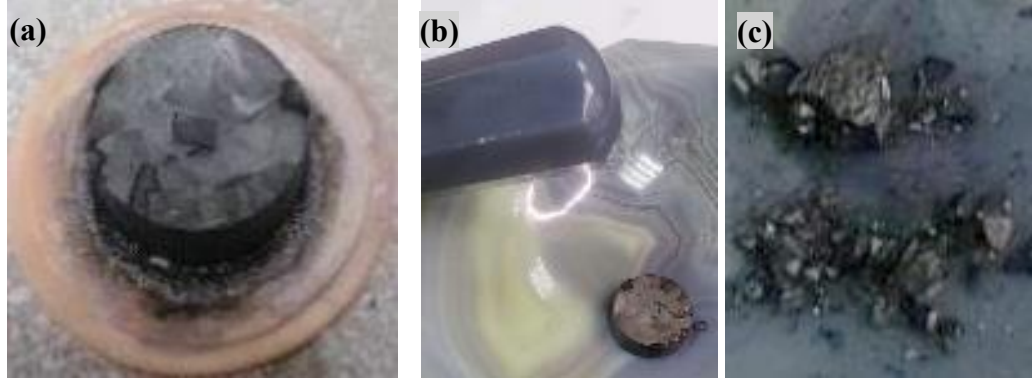


Şekil 35. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ çekirdeğinin fırındaki ısıtma işlemi.

2.1.3. Uygun $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ Çekirdeğinin Belirlenmesi

Isıl işlem bittikten sonra fırından çıkan malzeme çoklu kristal halinde görünmektedir (Şekil 36(a)). Bu pelet agad havanda Şekil 36(b)’de görüldüğü gibi kırılır ve parçalanır. Farklı yapıda ve görünümde olan bu küçük parçalardan tek kristal yapıda olan parça seçilir. Seçilen çekirdeğin bir yüzeyinin ayna gibi parlaması gerekmektedir. Kare şeklinde üretilcek numunelerde çekirdeğinin kenarlarının olabildiğince birbirine paralel olması

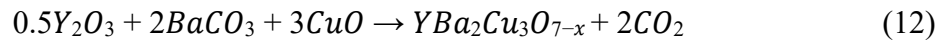
gerekmektedir. Gerekirse yan keski ile dokunuşlar yapılarak kesme işlemi yapılabilir (Güner, 2017).



Şekil 36. (a) MgO üstüne yerleştirilmiş çekirdek karışımının fırından çıkmış hali, (b) Agad havanla çekirdek peletinin parçalanması (c) Çekirdek seçimi.

2.2. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123) Karışımının Hazırlanması

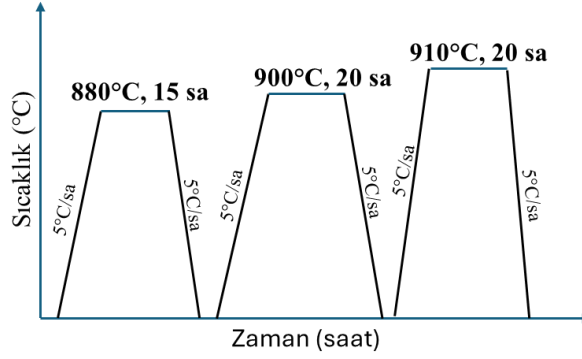
Y123 karışımı elde etmek için, denklem 12 kullanılarak Tablo 4 elde edilir. Özellikleri ve miktarları Tablo 4’de verilen Y_2O_3 , $BaCO_3$ ve CuO tozları, homojen toz karışımı elde etmek için Retsch marka RM200 model öğütücüde 20 dakika karıştırılır. Homojen karışım $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 15 saat boyunca kalsine edilir. Fırından çıkan örnek tekrar öğütülür. Ardından aynı işlemler tekrarlanarak $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 20 saat ve $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 20 saat olacak şekilde kalsinasyon işlemi yapılır.



Tablo 4. Y123 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.

Karışım	Üretici firma ve Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı	Bileşik Ağırlığı (g)
Y_2O_3	Alfa Aesar 99.99	225.88	35.56
$BaCO_3$	Abcr 99.8	197.37	124.30
CuO	Abcr 99.7	79.54	75.15
Toplam			235.01

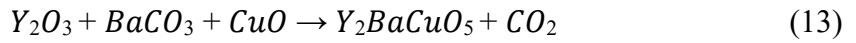
Homojen Y123 karışımı Protherm marka kare fırına yerleştirilir. Isıl işlem aşamaları Şekil 37’de görülmektedir.



Şekil 37. Y123 üretim aşamaları.

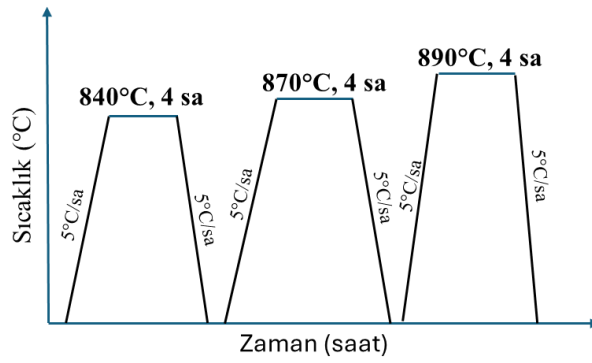
2.3. Y₂BaCuO₅ (Y211) Karışımının Hazırlanması

Y211 karışımı elde etmek için, denklem 13 kullanılarak Tablo 5 elde edilir. Özellikleri ve miktarları Tablo 5’de verilen Y₂O₃, BaCO₃ ve CuO tozları homojen toz karışımı elde etmek için Retsch marka RM200 model öğütücüde 20 dakika karıştırılır. Homojen karışım 840 °C’de 4 saat boyunca kalsine edilir. Fırından çıkan örnek tekrar öğütülür. Ardından aynı işlemler tekrarlanarak 870 °C 4 saat ve 890 °C 4 saat olacak şekilde kalsinasyon işlemi yapılır. Homojen Y123 karışımı Protherm marka kare fırında Şekil 38’deki gibi ısıtma işlemi sokulur.



Tablo 5. Y211 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.

Karışım	Üretici firma ve Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı	Bileşik Ağırlığı(gr)
Y ₂ O ₃	Alfa Aesar 99.99	225.88	20.21
BaCO ₃	Abcr 99.8	197.37	17.67
CuO	Abcr 99.7	79.54	7.12
Toplam			45



Şekil 38. Y211'nin sıcaklık işlem grafiği.

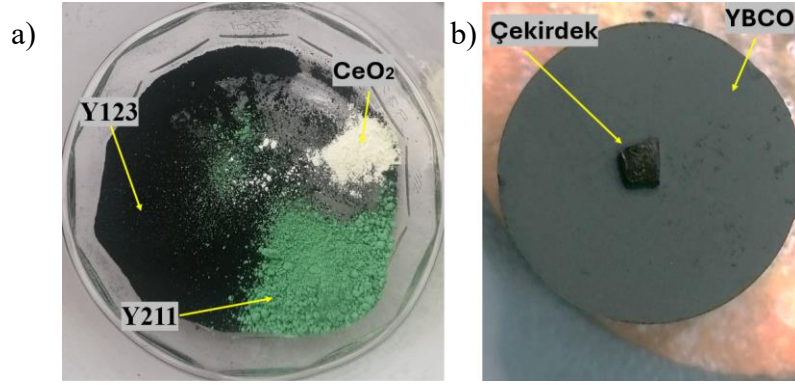
2.4. YBCO bileşiğinin Oluşturulması ve Peletlenmesi

Denklem 12 kullanılarak hazırlanan Y123 kimyasal tozu, Şekil 37'de gösterildiği gibi kalsine edildikten sonra karışımın %75'ini oluşturacak şekilde hazırlanır. Denklem 13 yardımıyla elde edilen Y211 kimyasal tozu Şekil 38'deki gibi kalsine edilerek karışımın %25'ini oluşturacak şekilde hazırlanır. Ardından bu karışıma toplam kütlesi miktarının %0.5'i oranında CeO_2 ilave edilmesiyle, Tablo 6'da verilen YBCO numunesi karışımı elde edilir.

Tablo 6. YBCO hazırlamak için gerekli olan oksit tozların miktarları.

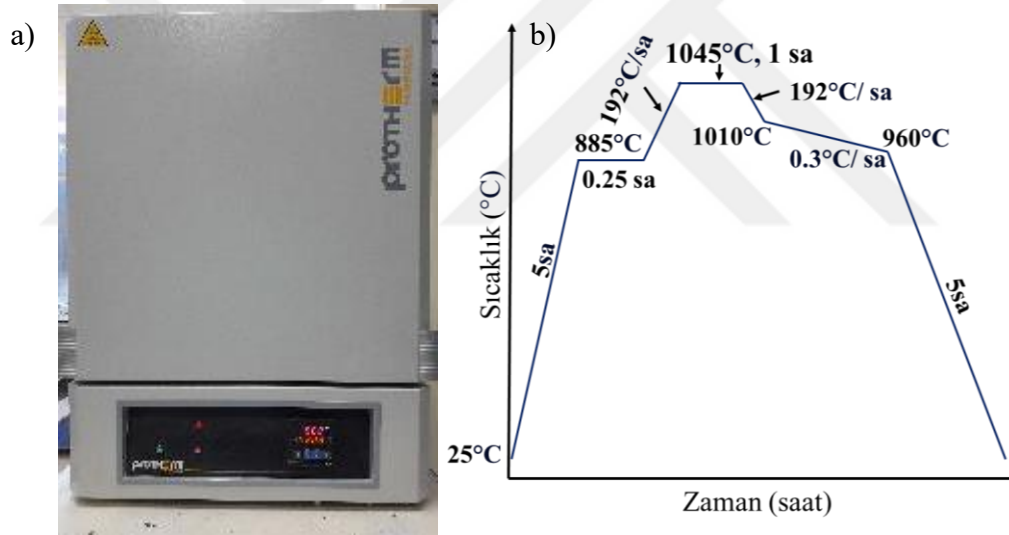
Karışım	Bileşik Ağırlığı (g)
Y123	22.5
Y211	7.5
CeO_2	0.15
Toplam	30.15

YBCO karışımı elde etmek için, miktarları Tablo 6'da verilen Y123, Y211 ve CeO_2 tozları, homojen toz karışımı elde etmek için Retsch marka RM200 model öğütücüde 30 dakika karıştırılır (Şekil 39(a)). 10 gram kütleli homojen YBCO toz karışımı 20 mm çaplı silindir pelette dökülür. Ardından 20kPa ton basınç altında preslenir. Üzerine seçilen çekirdek parlak yüzeyi YBCO peletine gelecek konulur. Şekil 39'da silindirik bir YBCO numunesi karışımı hazırlanması süreçleri görülmektedir.



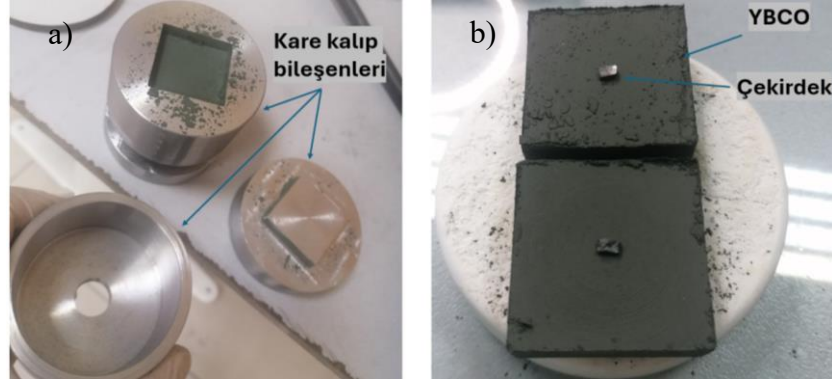
Şekil 39. (a) Belirtilen miktarlarda hazırlanmış YBCO karışımı, (b) Fırına girmeden önceki son hali.

Şekil 39 (b)'de üstüne çekirdek konulmuş YBCO peleti Protherm marka kare fırına yerleştirilir ve Şekil 40'daki ısıtma işlemi tabi tutulur.



Şekil 40. (a) Protherm marka kare fırın, (b) YBCO süperiletkenine ait sıcaklık grafiği.

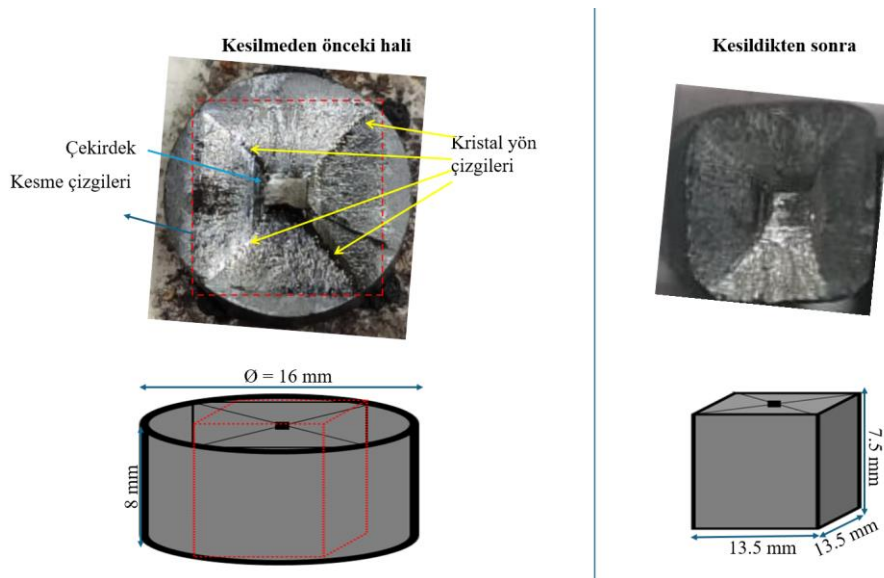
Kare prizma şeklindeki YBCO üretimi için yukarıda bahsedilen karışım hazırlanır. 40 g ağırlığında 32 mm kenar uzunluğuna sahip kare kalıba konulur (Şekil 41). Şekil 40'daki ısıtma işlemi tabi tutulur.



Şekil 41. (a) Kare kalıp kullanılarak peletlenmesi, (b) Kare şeklinde peletlenmiş YBCO karışımının üzerine çekirdek konulması.

2.5. Manyetik Yatak İçin Kesme ve Zımparalama İşlemi

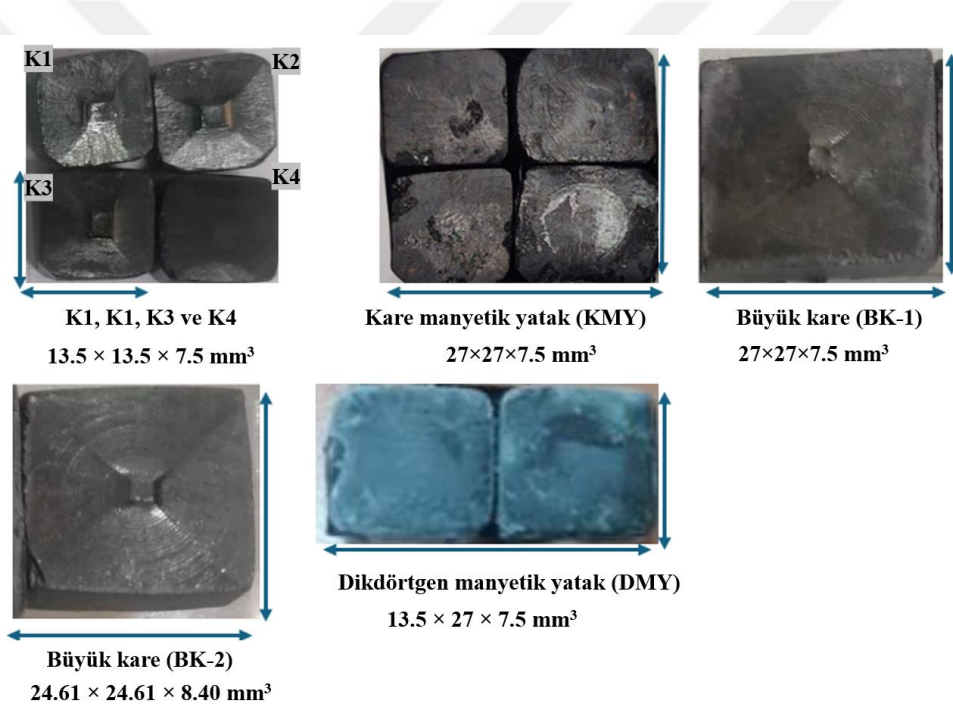
20 mm çapında silindir YBCO numuneler ısıtılma işlemi sonunda yaklaşık 16 mm çapında olmaktadır. 32 mm'lik kare kalıp ile üretilen örnekler ise fırından çıktığında yaklaşık 27 mm boyutlarında olmaktadır. Silindir şeklinde numuneler büyüme çizgilerinin kare şekli oluşturacak şekilde kesilmiştir (Şekil 42). Ardından zımpara kâğıdı kullanılarak kenarları ve yükseklikleri zımparalanmıştır. Elde edilen dört küçük kare örnekler K1, K2, K3 ve K4 olarak adlandırılmıştır. Her bir numune yaklaşık olarak $13.5 \times 13.5 \times 7.5 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahiptir.



Şekil 42. Silindir YBCO örneklerinin kesilmeden önceki ve sonraki hali.

Büyük kare numuneler kare kalıp kullanılarak üretilmiştir. BK-1 ve BK-2 olarak adlandırılmıştır. BK-1 numunesi zımpara kâğıdı kullanılarak $27 \times 27 \times 7.5 \text{ mm}^3$ boyutlarına düşürülmüştür. BK-2 numunesi ise büyüme çizgileri kare şekli elde edilecek şekilde kesilip ardından zımparalanarak $24.61 \times 24.61 \times 8.40 \text{ mm}^3$ boyutları elde edilmiştir.

K2 ve K3 numuneleri birleştirilerek $27 \times 13.5 \times 7.5 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip dikdörtgen manyetik yatak (DMY) oluşturulmuştur. K1, K2, K3 ve K4 örnekleri birleştirilerek $27 \times 27 \times 7.45 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip kare manyetik yatak (KMY) oluşturulmuştur. Tezde kullanılan tüm numuneler ve örneklerin birleştirilmesiyle oluşturulan manyetik yatakların fotoğrafı Şekil 43'te görülmektedir.



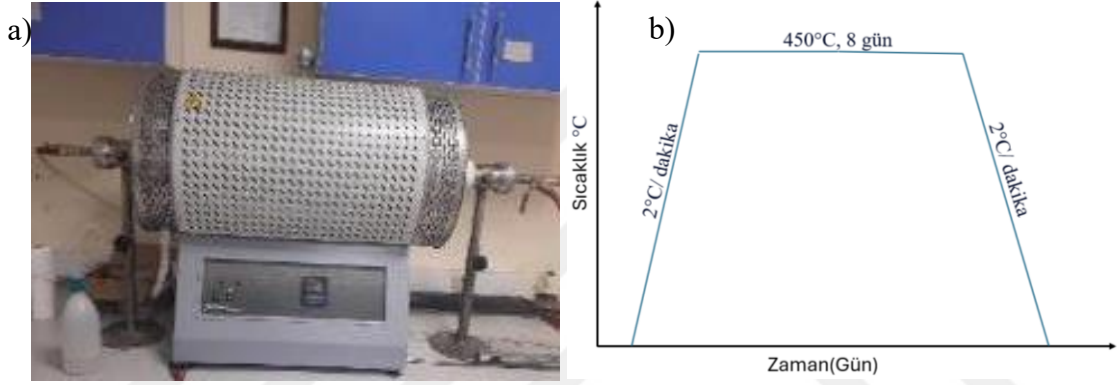
Şekil 43. Tüm numuneler ve süperiletken manyetik yataklar boyutları ve görünüşleri.

2.6. YBCO Örneklerinin Oksijen Altında Tavlanma Süreci

YBCO süperiletkeni ısıtılma işlemi sonrası fırından çıktığı zaman süperiletken olmayan tetragonal yapıdadır. Oksijen içeriği düşüktür ve süperiletken ortorombik yapıya geçmesi için oksijen altında tavlama işlemi gerekir. Tavlama işlemi süperiletkenin yapısına oksijen girmesi olarak düşünülebilir. Hatta YBCO'nun geçiş sıcaklığı da tavlama süreciyle ilişkilidir. Oksijen miktarının artmasıyla geçiş sıcaklığı artar (Batur, 2023). YBCO tavlama

işleminde a ekseni boyunca Cu-O-Cu zincirleri oluşur. Bu sayede YBCO'nun kritik sıcaklık (T_c) değeri düşmekte, kritik akım yoğunluğu ve manyetik alan tuzaklama kapasitesi artmaktadır (Baumann, 2023). YBCO'nun tavlama sürecinde örnek içindeki çatlakların varlığı oksijenlenme kalitesini değiştirmektedir (Diko vd., 2008). Çatlak oluşumu YBCO'nun yapısının içine daha etkili O_2 'nin difüze olmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada küçük kare silindir şeklindeki YBCO örnekler önce kesilmiş ardından zımparalanmıştır. Bu sayede tavlama kalitesi de artırılmıştır. Şekil 44'de YBCO örneklerinin tavlama süreci gösterilmiştir. Oksijen altında tavlama süreci, 450°C 'de 8 gün boyunca sürekli oksijen akışı sağlanarak gerçekleştirildi.



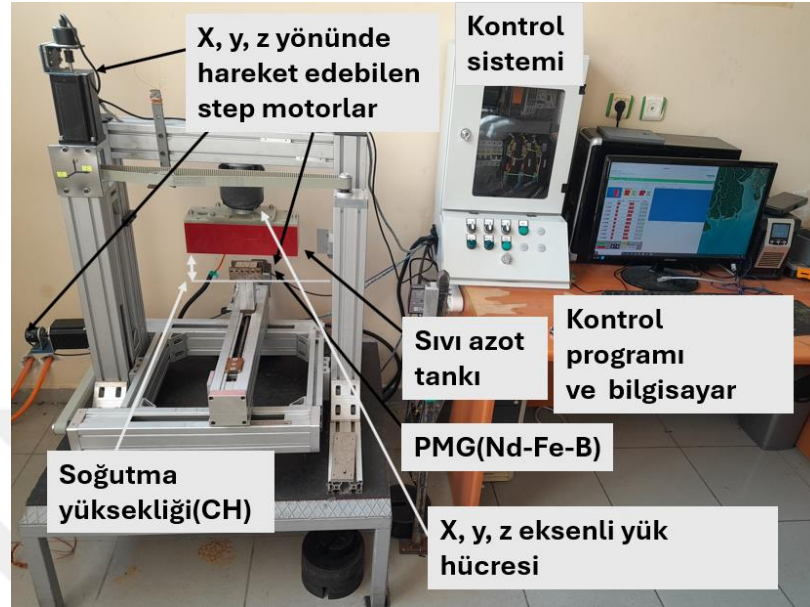
Şekil 44. (a) Tavlama işlemi yapılan Protherm marka tüp fırın, (b) YBCO oksijende tavlama süreci grafiği.

2.7. Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sistemleri

2.7.1. Üç Eksenli Düşey Dizimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi

Üretilen YBCO numuneleri ve bu numunelerin birleştirilmesiyle oluşan manyetik yatakların düşey ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet ölçümleri, 2014 yılında Tübitak 1001 proje desteği ile tasarlanan “Üç Eksenli Düşey Dizimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sisteminde” Karedeniz Teknik Üniversitesi’ndeki Fizik Bölümü’nde yapılmıştır (Şekil 45). Bu sistemde düşey manyetik kuvvet ve çekme kuvveti; manyetik akı dağılımına ve soğutma şartlarına (ZFC ve FC) bağlı olarak ayrıntılı olarak sistemde incelenmiştir. Üç Eksenli Düşey Dizimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi x, y ve z yönlerinde hareket edebilmektedir. Hareketi sağlamak için step motorlara ve triger kayışına sahiptir, aynı zamanda farklı

şekillerde PMG (Permanent Magnetic Guideway) kalıcı mıknatıs kılavuzlayıcı yol yapısına göre tasarlanabilme esnekliğine sahiptir.



Şekil 45. Farklı boyut ve manyetik alan yönelimlerine sahip mıknatıslardan oluşan manyetik ray PMG (Ozturk vd., 2015).

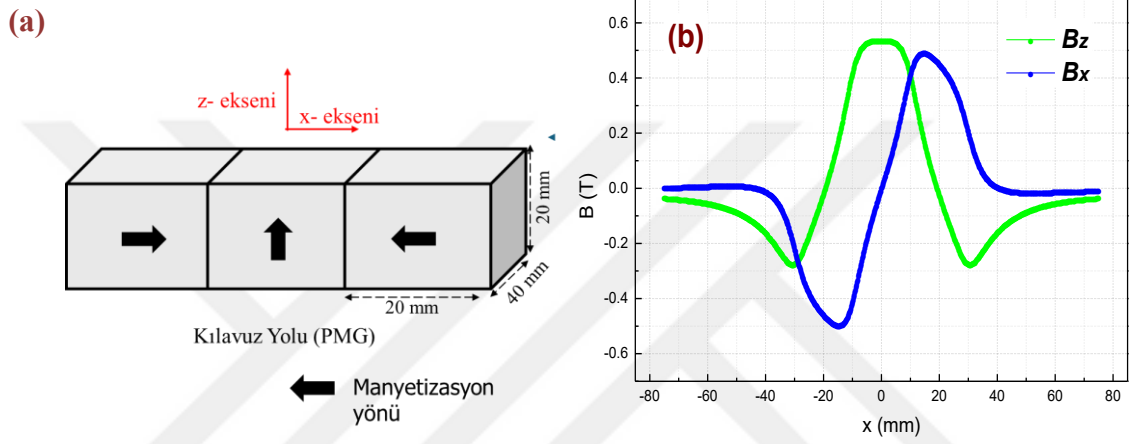
Kuvvet verileri FUTEK MTA400 yük hücresi sayesinde elde edilmektedir. Yük hücresi x, y ve z eksenindeki kuvvetleri sırasıyla 1100 N, 1100 N ve 2200 N'a kadar yük hücresinin hassasiyeti ise sırasıyla 0.5 N, 0.5 N ve 1 N hassasiyetle ölçebilmektedir.



Şekil 46. FUTEK MTA400 üç eksenli yük hücresi.

Sistemin daha hassas konum verileri elde edilebilmesi için lazer sensörleri sisteme entegre edilmiştir. Yük hücresinden elde edilen verilerin konuma ve zamana bağlı olarak bilgisayara aktarılması için DAQ (Data Acquisition) kart, sisteme entegre edilmiştir. Konuma ve zamana bağlı kuvvet verilerinin hassas bir şekilde alınabilmesi ve sistemin

mekanik olarak kontrol edilmesi için LabVIEW program dilinde yazılmış bir program kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan kalıcı mıknatıs kılavuz yolu (permanent magnetic guideway, PMG) yerleşiminde 3 adet kalıcı mıknatıs MAGNET Expert Ltd şirketinde üretilmiş olup, $40 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ boyutlarında 0.5 T manyetik alan değerine sahip Nd-Fe-B mıknatısı kullanılmıştır. Mıknatıslar, manyetik alan yönleri Şekil 47(a)'da gösterilen şekilde bir araya getirilerek oluşturulan PMG kılavuzlayıcı yolunun manyetik alan dağılımı Şekil 47(b)'de görülmektedir.



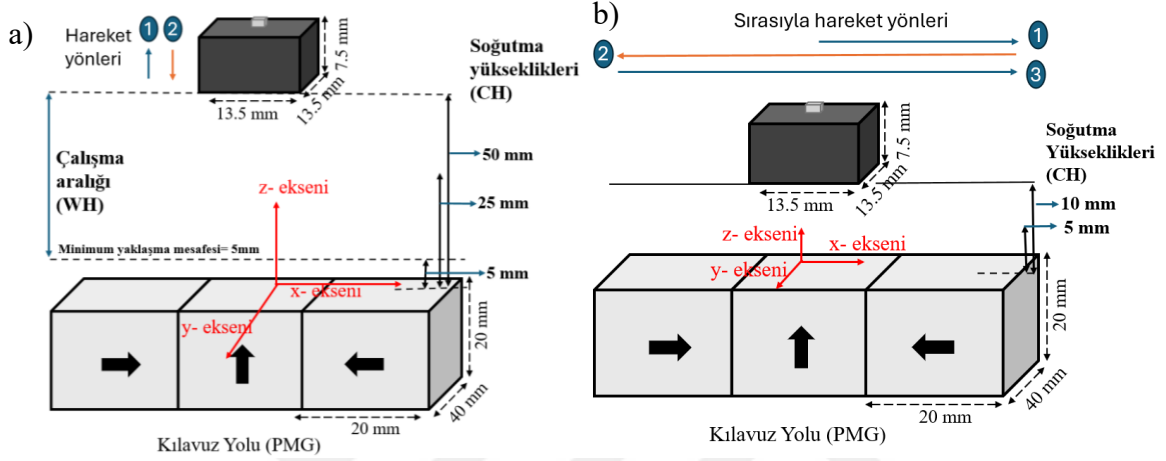
Şekil 47. (a) PMG yolunun şematik gösterimi, (b) Üst yüzeyin 5mm üstünde manyetik alan dağılımı.

Üç Eksenli Düşey Dizimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sisteminde düşey manyetik kuvvet ölçümleri alanlı soğutma (FC, Field-cooling) ve alansız soğutma (ZFC, zero field cooling) durumlarında gerçekleştirilir.

Alansız soğutma (ZFC) ölçümleri gerçekleştirilirken YBCO örnekleri, PMG'den yeterince uzak bir mesafede $CH = 50 \text{ mm}$ ve 25 mm soğutma yüksekliğinde sıvı azotla 77 K sıcaklığına soğutulur. Bu mesafede mıknatısın süperiletken örnek üzerinde manyetik alan etkisinin olmadığı varsayılır. Şekil 48(a)'da görüldüğü gibi süperiletken tamamen soğuduğunda, soğutma yüksekliği konumundan çalışma aralığının üst noktasına ($z = 50 \text{ mm}$) getirilir. Ardından düşey manyetik kuvvet verileri kaydedilmeye başlanarak üst çalışma noktasından, 2 yönünde alt çalışma noktası ($z = 5 \text{ mm}$) kadar yaklaştırılır. Hemen sonra 1 yönünde üst çalışma noktasına geri döner.

Süperiletken örneklerin akı tuzaklama kapasitesinin belirlenmesi amacıyla yapılan alanlı soğutma (FC) işleminde, mıknatıs ile süperiletken arasındaki mesafe $z = 5 \text{ mm}$ iken sıvı azot kullanılarak örnek 77 K 'e soğutulur. Soğutma yüksekliği konumundan çalışma

aralığının üst noktasına ($z = 50$ mm) getirilir. Ardından düşey manyetik kuvvet verileri kaydedilmeye başlanarak üst çalışma noktasından, 2 yönünde alt çalışma noktası ($z = 5$ mm) kadar yaklaştırılır. Hemen sonra 1 yönünde üst çalışma noktasına geri döner. ZFC şartlarında düşey manyetik kuvvet (pozitif) daha güçlü iken FC ölçümde manyetik akı daha yoğun tuzaklandığı için kaldırma kuvvetleri daha çekici (negatif) olur.



Şekil 48. (a) PMG ölçüm sistemi düşey manyetik kuvvet ölçüm sisteminin şematik gösterimi, (b) PMG ölçüm yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

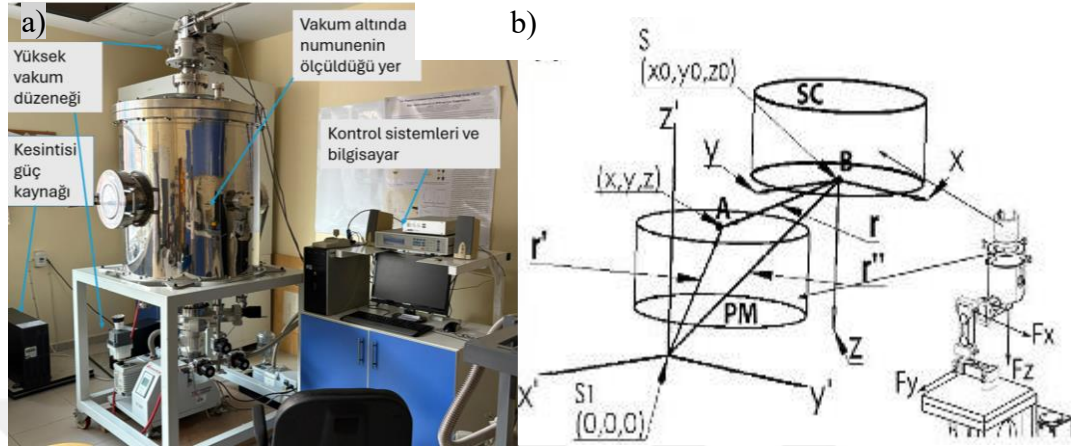
Kılavuzlama (lateral) kuvveti ölçümlerinde süperiletken örnek ile PMG yolu arasındaki mesafe $z = 5$ mm ve 10 mm iken örnek 77 K'e soğutulur. Ardından $x = 0$ mm $\rightarrow$ +8 mm $\rightarrow$ -8 mm $\rightarrow$ 0 mm $\rightarrow$ +8 mm konumlarına Şekil 48'(b) deki gibi hareket ettirilerek getirilir.

2.7.2. Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi

Üretilen yaklaşık $13.5 \times 13.5 \times 7.5$ mm³ boyutlarında kare YBCO numunelerinin düşey manyetik kuvvet ve yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet ölçümleri TÜBİTAK tarafından desteklenen 110T622 numaralı proje ile tasarlanan, 2013/13638 patent numaralı "Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi" kullanılarak Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Süperiletkenlik Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır (Şekil 49).

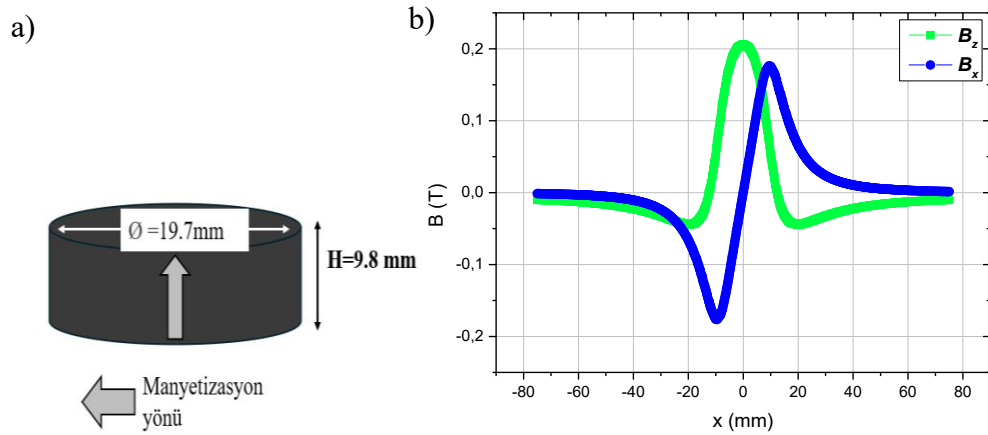
Manyetik Kaldırma Kuvvet ölçümü için içten dışı örnek tutucuya yerleştirilen örnek özel yapıştırıcıyla yapıştırılıp, sonrasında Cryostat içinde bulunan yuvasına takılır. Cryostat kapatılarak, vakuma alma işlemi yapılır. Ardından kapalı devre soğutma sistemiyle soğutma

işlemi gerçekleştirilir (Şekil 49). Alanlı soğutma ve alansız soğutma uygulaması süreçlerinde özel bir program tarafından ölçüm süreçleri yönetilir (Celik, 2016).



Şekil 49. (a) Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi fotoğrafı, (b) Manyetik kaldırma kuvveti deney geometrisi (Celik, 2016).

Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemin de silindir şeklinde Nd-Fe-B mıknatısı ($\phi = 19.7$ mm, $h = 9.8$ mm) kullanılmaktadır. Şekil 50 (a)'da mıknatısın yönü ve fiziksel boyutları görülmektedir. Kullanılan silindirik mıknatıs yatay ve düşey ölçüm sonuçlarını etkilemektedir. Şekil 50 (b)'de B_z düşey ekseninde manyetik akı yoğunluğu, B_x ise yatay ekseninde manyetik akı yoğunluğunu göstermektedir.

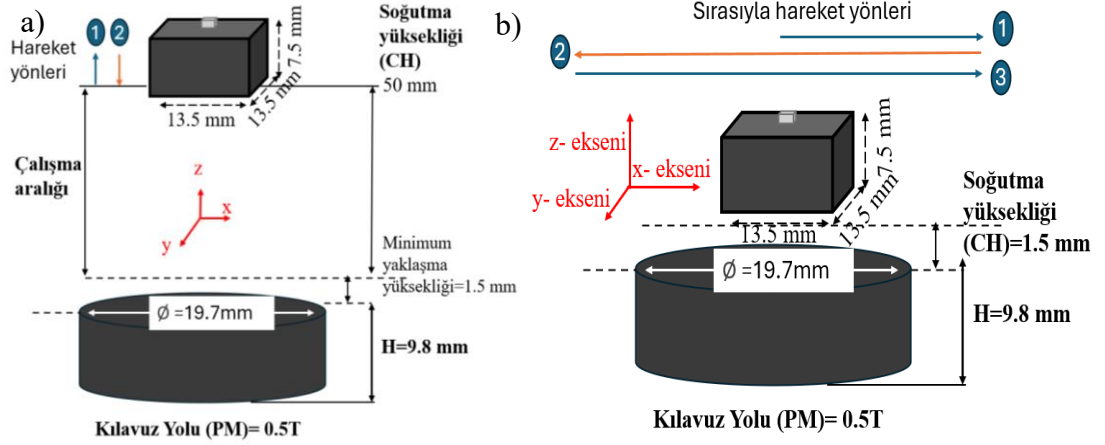


Şekil 50. (a) PM yolunun şematik gösterimi, (b) Üst yüzeyin 5 mm üzerinde mıknatısın manyetik akı yoğunluğu.

Alansız soğutma (ZFC) ölçümünde: YBCO örneği Şekil 51(a)'da görüldüğü gibi $z = 50$ mm konumuna getirilir ve 77 K sıcaklığında soğutulur. Ardından 2 yönünde numune, 50 mm'den 1.5 mm'ye kadar yaklaştırılır. Hemen ardından 1 yönünde hareket devam ederek 50 mm konumuna getirilir. Süperiletken örnek mıknatıs arası mesafe $z = 1.5$ mm'de iken, normal halden süperiletken hale geçerken mıknatısın manyetik alanı altında soğutulur.

Alanlı soğutma (FC) ölçümünde; YBCO örneği $z = 1.5$ mm konumunda 77 K sıcaklığında soğutulur. Ardından 50 mm konumuna getirilir. Düşey manyetik kuvvet (F_z) yükseklik konumu kaydedilmeye başlanarak 2 yönünde numune 50 mm'den 1.5 mm'ye kadar yaklaştırılır. Hemen ardından 1 yönünde hareket devam ederek 50 mm konumuna getirilir.

Yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet ölçümünde; YBCO örneği ile mıknatıs arası mesafe $z = 1.5$ mm iken 77 K de FC rejimi altında soğutulur. Ardından $x = 0$ mm $\rightarrow +7$ mm $\rightarrow -7$ mm $\rightarrow 0$ mm $\rightarrow +7$ mm konumlarına x eksenı boyunca hareket ettirilerek getirilir (Şekil 51(b)).



Şekil 51. Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi (PM), (a) Düşey manyetik kuvvet (b) Yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet sistemi şematik gösterimi.

2.8. XRD Ölçümleri

Karadeniz Teknik Üniversitesin'de bulunan PANalytical X-Pert3 Powder cihazı ile gerçekleştirilen X-Işını Kırınımı (XRD) yöntemi, her malzemenin kendine özgü kristal yapısına bağlı olarak X-ışınlarını belirli bir desen içerisinde kırmasına dayanır. Cihazın

ölçüm aralığı 5-140° derece olup çalışma parametreleri ise 45 kV ve 40 mA özelliklerine sahiptir.

2.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümleri

SEM ölçümü malzemelerin topografi, morfoloji, şekil, boyut ve bileşim hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Cihazda ölçüm yapılabilmesi için iletken malzeme olması gerekir. Eğer numune yeterince iletken değilse altın kaplanır. Cihazın çalışma prensibi şöyledir; elektron demeti ile 15kV gerilim üretilir. Görüntü elde edilmek istenen bölgeye odaklanılır. Ardından o bölgede gezdirilir. Malzemeden gelen elektron etkileşimi verileri toplanır ve bilgisayarda işlenir. Böylece bilgisayarda 3D görüntü elde edilebilir. SEM görüntülemeleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 52’te gösterilen JEOL JSM 6610 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 52. JEOL JSM 6610 marka taramalı elektron mikroskobu.

2.10. H-formülasyonu ile Sayısal modelleme

H-formülasyonu, manyetik alan yoğunluğu H , akım yoğunluğu J ve elektrik alanı E arasında kritik bir bağlantı kuran kurucu E-J ilişkisini kullanarak Amper yasasını ve Faraday yasasını birleştirir. Bu yöntem, bir malzeme içindeki elektrik ve manyetik alanlar arasındaki karmaşık eşleşmeyi analiz etmek için kapsamlı bir çerçeve sunar. Burada, her bir alt alanın farklı özellikleri vardır: hava direnci $\rho_{air} = 1 \Omega \cdot m$ seçilir. Süperiletkenin öz direnci ρ_{sc} , elektrik alanı ile akım yoğunluğu arasındaki doğrusal olmayan bir kuvvet yasası oluşur.

$$\rho_{sc}(|J|, B) = \frac{E_c}{J_c(B)} \left| \frac{J}{J_c(B)} \right|^{n-1} \quad (14)$$

Burada $E_c = 1 \times 10^{-4}$ V/m kritik elektrik alanı, $n = 21$ akı sürüklenmesini, $J_c(B)$ ise manyetik alana bağlı kritik akım yoğunluğu, $J_c(B)$ ifadesi, manyetik alanın yüzeye paralel ($B_{\parallel}$) ve dik ($B_{\perp}$) bileşenlerine bağlıdır:

$$J_c(B_{\parallel}, B_{\perp}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{k^2 B_{\parallel}^2 + B_{\perp}^2}}{B_0} \right)^{\beta}} \quad (15)$$

Denklem 16'deki parametre değerleri $J_{c0} = 2.5 \times 10^8$ A/m², $B_0 = 0.0525$ T, $k = 0.256$, $\beta=0.58$ 'dir. H-formülasyonunun temel denklemi yeniden şöyle yazılabilir.

$$\nabla \times (\rho \nabla \times H) = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (16)$$

Süperiletkenin kesitine dik bir akım akan 2B modelde, H_y , E_x , E_z , J_x ve J_z bileşenlerinin tümü sıfır seçilir. 2D modelde, yalnızca H_x , H_z ve E_y dikkate alınır. Sonuç olarak, çözülmesi gereken iki denklemle elde edilir.

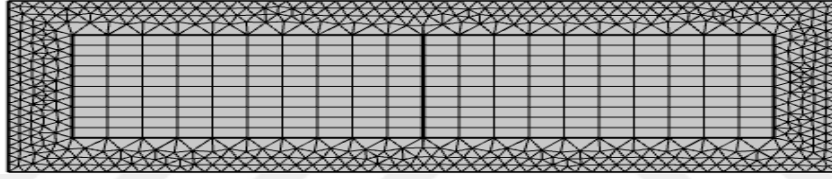
$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial E_y}{\partial z} = 0, \quad \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} - \frac{\partial E_y}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

Simülasyon alanının sınırlarında toplam manyetik alan (H_x ve H_z), iki bileşenin toplamından oluşur: süperiletkenin indüklediği öz alan (H_{self}) ve kalıcı mıknatıs dizisinin (PMG) ürettiği dış alan (H_{ext}). Öncelikle, süperiletken malzeme yerine hava özellikleri

atanarak statik bir simülasyon yapılır. Böylece PMG'den gelen manyetik alanın süperiletkenin içine girmesi sağlanır. Bu aşamanın sonucu, daha sonra süperiletken özelliklerin tanımlandığı dinamik simülasyona başlangıç koşulu olarak kullanılır. Simülasyon ayarlarında, değişkenler 10^7 ile ölçeklendirilmiş, çözücü için bağıl tolerans 10^{-2} ve mutlak tolerans 10^{-3} seçilmiştir. Son olarak, birim uzunluk başına kaldırma kuvveti, her seferinde için şu integral ile hesaplanır:

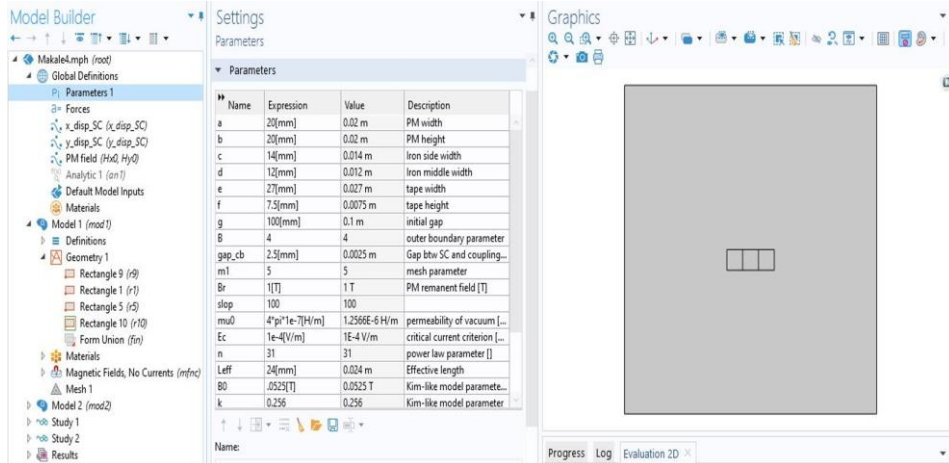
$$F = \int (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dS \quad (18)$$

Birleştirilmiş yüksek sıcak süperiletkenin 2D geometrisi ve mesh yapısı Şekil 53'de gösterilmiştir.



Şekil 53. Kombine HTS'nin 2B geometrisi ve mesh'i.

Bu çalışmada, PMG ile süperiletkenin yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet değerini hesaplamak için Şekil 54'de gösterilen COMSOL 6.0 arayüzünde sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 54. COMSOL sayısal modellemenin arayüzü ve parametreleri.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Düşey Manyetik ve Yatay (Kılavuzlayıcı) Kuvvet Değişimi Sonuçları

“Düşük Sıcaklık Cryostat” ve “Üç Eksenli Düşey Dizilimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi” kullanılarak üretilen süperiletken YBCO numuneleri ve bu numunelerin birleşmesi ile oluşturulan manyetik yatakların düşey manyetik kuvvet ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvetleri 77 K sıcaklığında ZFC ve FC soğutma rejimlerinde ölçülmüştür. K3 numunesi, BK-1 ve dikdörtgen manyetik yatağı (DMY) için COMSOL Multiphysics 6.0 paket programı kullanılarak düşey manyetik kuvvet ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvetler için sayısal olarak modellenmiş. Sayısal modellemeler ile deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Tüm grafikler OriginPro 9.0 programında çizilmiştir.

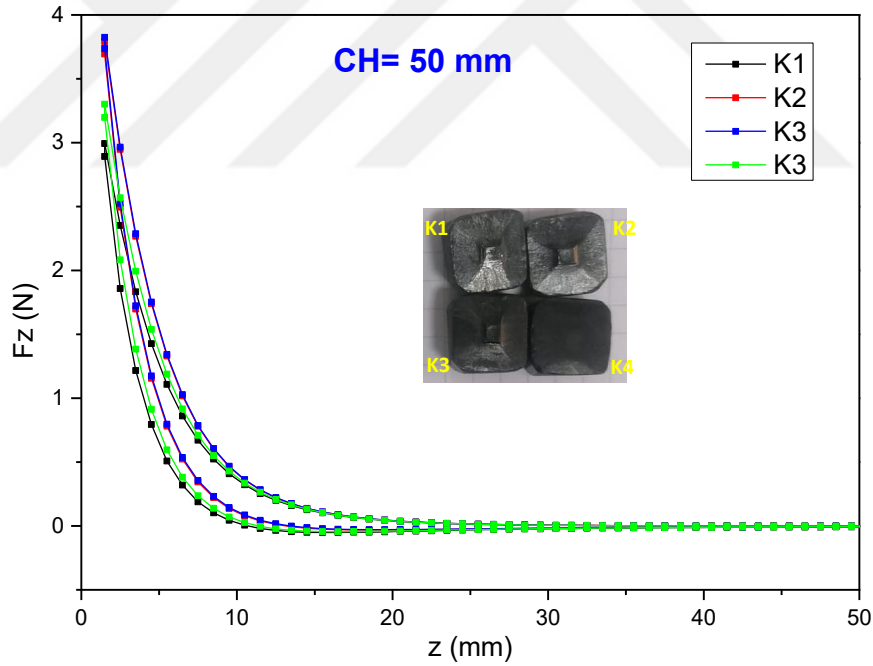
3.1.1. Düşük Sıcaklık Cryostat Ölçüm Sisteminde Düşey Manyetik Kuvvet ve Yatay (Kılavuzlayıcı) Kuvvet Değişimi Sonuçları

K1, K2, K3 ve K4 olarak adlandırdığımız YBCO külçe örneklerinin ($13.5 \times 13.5 \times 7.5$ mm³), 50 mm soğutma yüksekliğinde (Alansız soğutma (ZFC)) 77 K sıcaklıkta ölçülmüş PM yolu (tek bir mıknatıs) ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi Şekil 55’de görülmektedir. Grafikten numune ile mıknatıs arasındaki uzaklık azaldıkça düşey manyetik kuvvetin eksponansiyel olarak arttığı gözlenmektedir. Ayrıca Meissner etkisinin bir sonucu olarak düşey manyetik kuvvetin (pozitif) etkisi çekici manyetik kuvvet (negatif) etkisine oranla çok daha fazladır.

Süperiletkenin mıknatısa (PM) en yakın konumunda maksimum düşey manyetik kuvveti ($F_{z,max}$) elde edilir. 50 mm soğutma yüksekliğinde K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin maksimum düşey manyetik kuvveti ($F_{z,max}$) deneysel olarak sırasıyla; 3.0, 3.81, 3.8 ve 3.35 N olarak ölçülmüştür. Manyetik kaldırma kuvveti; kritik akım yoğunluğu, akım halkasının yarıçapı (r), manyetik moment değeri, tane yönelimine, çatlak yoğunluğuna ve akı çivileme merkezi sayısına bağlıdır (Deng vd., 2012a; Deng vd., 2012b).

Aynı şartlarda ve boyutlarda üretilen YBCO numunelerinin düşey manyetik kuvvet sonuçları arasındaki farkın nedenlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Tozların karışımı sırasında karışımın farklı bölgelerinde farklı oranlarda tozların yoğunlaşması malzeme içinde homojen olmayan bir dağılıma neden olmuş olabilir.
- Her bir numune peletlenirken 20kPa altında preslenir ancak küçük basınç farklılıkları oluşabilmektedir. Bu nedenle örneğin içinde farklı oranlarda hava sıkışabilmektedir. Isıl işlem sırasında peletten kaçmaya çalışırken farklı boyutlarda boşluklar oluşturabilmektedir.
- Çalışmada kullanılan çekirdekler ticari olarak satın alınmamış ve üretilmiştir. Çekirdek seçiminde olabildiğince aynı boyutta ve kusursuz olmasına dikkat edilmiş olsa da elbette küçük farklılıklar mevcuttur. Çekirdeğin içindeki mikroyapı kusurlarını gözle fark etmek mümkün değildir bu nedenle yeterince düzgün büyüme gerçekleşemeyebilir.

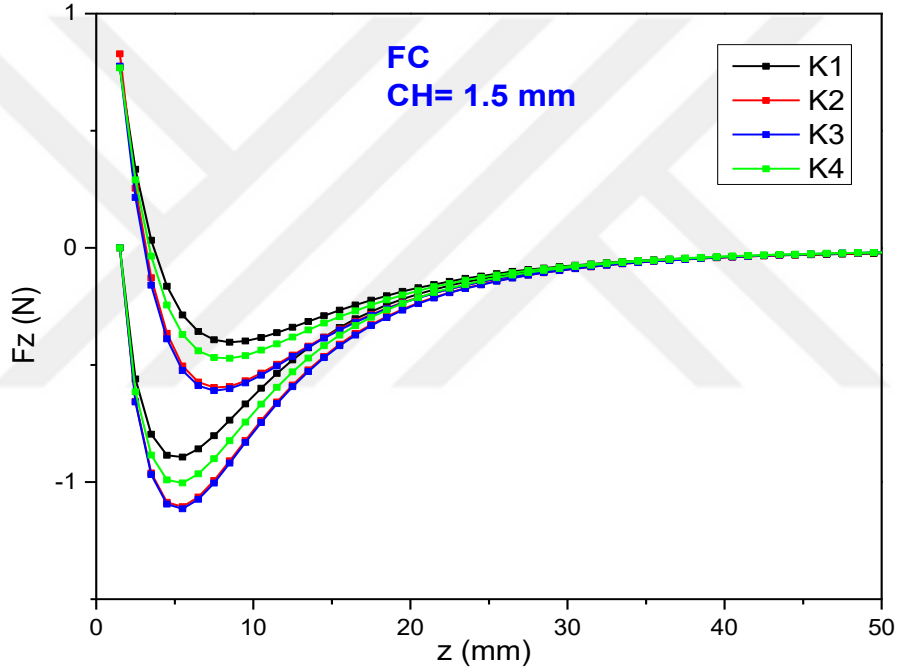


Şekil 55. K1-K2-K3-K4 numunelerinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PM yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

K1, K2, K3 ve K4 olarak adlandırdığımız YBCO külçe numunelerinin ($13.5 \times 13.5 \times 7.5$ mm³), 1.5 mm soğutma yüksekliğinde (FC) 77 K sıcaklıkta ölçülmüş PM yolu (tek bir mıknatıs) ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi Şekil 56'da görülmektedir. Alanlı soğutma (FC) soğutma rejiminde manyetik akının bir

kısmı numune içerisinde tuzaklandığından çekici manyetik (negatif değer) kuvvet oluşur. Şekil 53 ve Şekil 54 kıyaslandığında çekici kuvvet FC rejiminde Alansız soğutma (ZFC)da daha güçlüyken, düşey manyetik kuvvet ZFC rejiminde Alanlı soğutma (FC) da çok daha güçlüdür.

1.5 mm soğutma yüksekliğinde, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin düşey manyetik kuvvet ($F_{z,max}$) değerleri sırasıyla 0.77, 0.82, 0.77 ve 0.76 N olarak ölçülmüştür. En yüksek maksimum çekme kuvvete sahip olan K3 numunesi deneysel olarak -1.01 N değeri ölçülmüştür. En yüksek çekici kuvvet ZFC ölçümünde olduğu gibi K3 örneğinde elde edilmiştir.



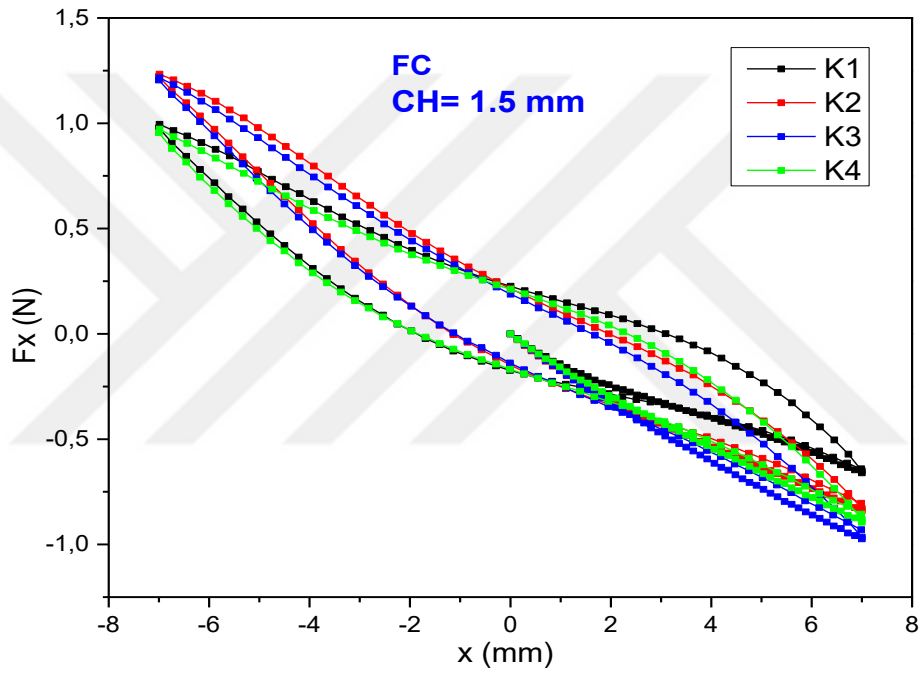
Şekil 56. K1-K2-K3-K4 numunelerinin 77 K de 1.5 mm soğutma yüksekliğinde PM yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

Yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet (F_x), Maglev araçlarında kılavuzlayıcı kuvvettir ve levitasyon uygulamalarında yatay dengelemeyi sağlamaktadır. Maglev trenlerinin teknolojik uygulamaları için düşey manyetik kuvvetinin yanında, yatay (kılavuzlama) kuvveti de artırılması gerekmektedir. Yatay (kılavuzlayıcı) maksimum manyetik kuvvet ($F_{x,max}$), Maglev araçlarında kılavuzlayıcı kuvvettir ve yatay dengelemeyi sağlar.

K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin ($13.5 \times 13.5 \times 7.5 \text{ mm}^3$), 1.5 mm soğutma yüksekliğinde (FC rejimi altında) 77 K sıcaklıkta ölçülmüş PM yolu (tek bir mıknatıs) ile

numune arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi Şekil 57’de gösterilmektedir.

1.5 mm soğutma yüksekliğinde, K1, K2, K3 ve K4 örneklerinin maksimum yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet ($F_{x,max}$) sırasıyla deneysel olarak 0.99, 1.23, 1.21 ve 0.97 N olarak ölçülmüştür. Yüksek düşey manyetik kuvvet gösteren örnekler aynı şekilde güçlü yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet de göstermektedir. Malzemenin iç yapısı düşey manyetik kuvveti ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet için önemli olduğunu destekleyen bir sonuçtur (Yang vd., 2021).



Şekil 57. K1-K2-K3-K4 numunelerinin 77 K de 1.5 mm soğutma yüksekliğinde PM yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi.

Şekil 55, Şekil 56 ve Şekil 57 incelendiğinde K3 numunesinin dört örnek içinde en yüksek manyetik düşey ve yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet sonucuna sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle K3 örneğinin üç mıknatıs kullanılarak oluşturulan PMG (Kalıcı mıknatıs kılavuz yolu (Permanent Magnet Guideway) üzerindeki manyetik kuvvet performansı “Üç Eksenli Düşey Dizimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi” kullanılarak araştırılmıştır.

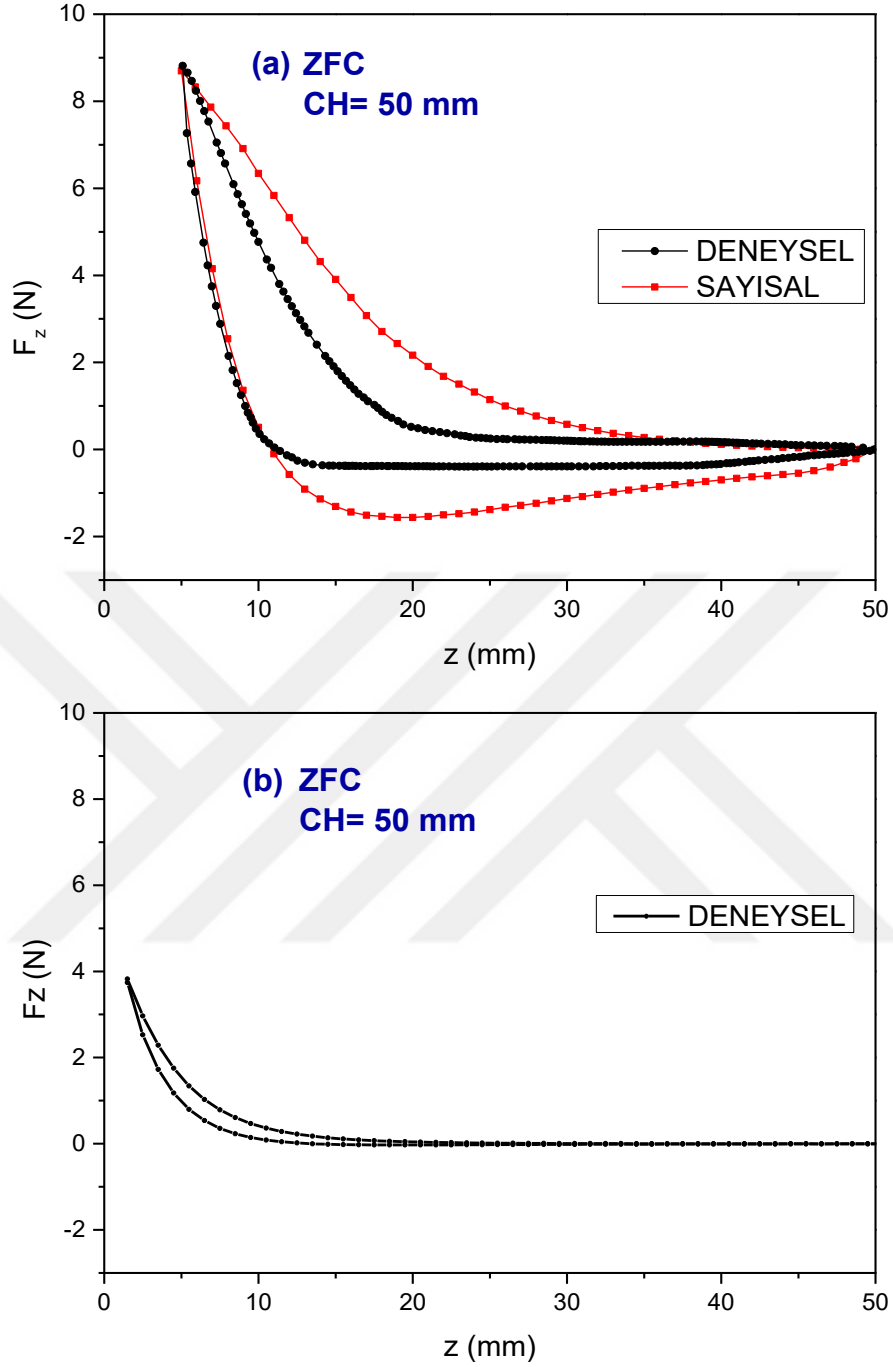
3.1.2. Üç Eksenli Düşey Dizilimli Manyetik Kuvvet Ölçüm Sistemi Manyetik Kaldırma ve Kılavuzlayıcı Kuvvet Sonuçları

K3 numunesinin ($13.5 \times 13.5 \times 7.5 \text{ mm}^3$) 50 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC rejimi altında) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi Şekil 58’de gösterilmektedir. Uzaklık azaldıkça düşey manyetik kuvvetinin eksponansiyel olarak arttığı gözlenmektedir.

50 mm soğutma yüksekliğinde, maksimum düşey manyetik kuvvet ($F_{z,max}$) deneysel olarak 8.69 N olarak ölçülmüş ve sayısal modelleme olarak 8.81 N olarak hesaplanmıştır. Maksimum düşey manyetik kuvvet mıknatıs ve numune arasındaki mesafe 5 mm olduğunda alınmıştır. Sayısal modelleme ile deneysel ölçüm %98 oranında uyuşmaktadır. Bu durum, sayısal modellemenin başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak histerik genişliği sayısal modellemeyle tam uyuşmamaktadır. Sayısal modelleme ile deneysel ölçüm sonucu arasındaki farkın; tek kristal malzeme özellikleri, ölçüm sistemindeki hassasiyet ve modellemekten kaynaklı bazı hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 58 (b)’de K3 numunesinin PM etkisindeyken 50 mm soğutma yüksekliğinde maksimum düşey manyetik kuvvet 3.81 N olarak ölçülmüştür. ZFC rejiminde, kalıcı mıknatıs kılavuz yolu (PMG) üzerinde oluşan maksimum düşey manyetik kuvveti, kalıcı mıknatıs (PM)’e göre 2.31 kat fazla olduğu ve daha geniş bir histerisize sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, geleneksel PMG’nin tek bir mıknatıstan (PM) daha fazla manyetik akı yoğunluğuna sahip olması ve üst manyetik alan yoğunluğu değerinin daha geniş alanda etki göstermektedir. Öztürk ve arkadaşları, 3 çekirdeğe sahip YBCO örneğini 75 mm soğutma yüksekliğinde bir kalıcı mıknatıs (PM) üzerinde ve Şekil 48(b)’ye benzer dizilime sahip PMG üzerinde ölçmüştür. Düşey manyetik kuvveti PM yapı ile PMG dizilime sahip yapı arasında 1.94 kat daha fazla düşey kuvveti elde edilmiştir. Düşey manyetik kuvvet artışının tutarlılığını destekleyen bir sonuçtur (Ozturk vd., 2020).

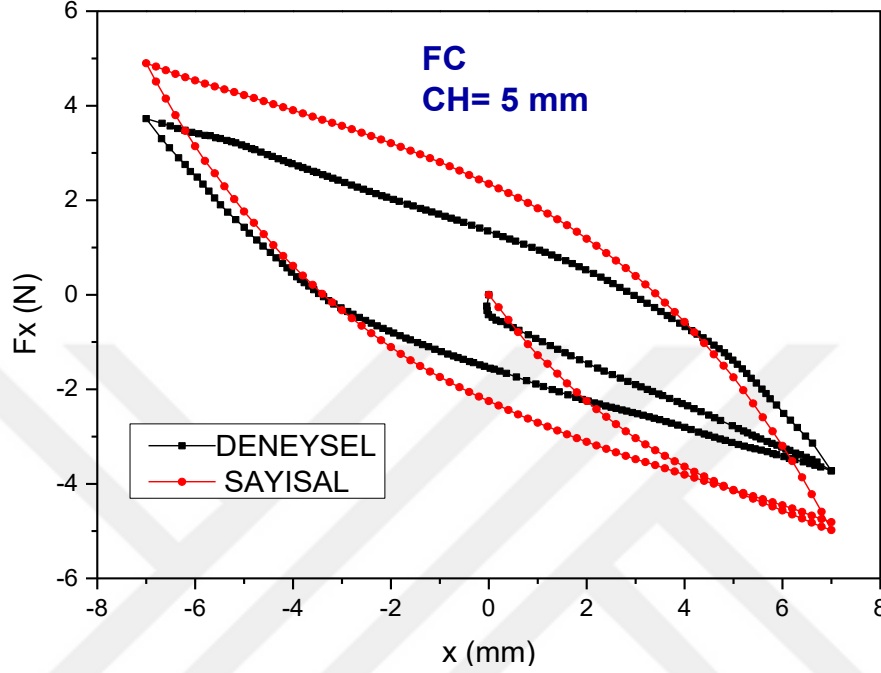
Düşey manyetik kuvvetinin en belirgin özelliği, süperiletken örnek ve kalıcı mıknatıs arasındaki uzaklık değişirken düşey kuvveti değişiminin histerisiz bir davranış sergilemesidir. Histeriz kelimesi Yunancada “*hysteresis*” kelimesinden türemiştir. Geride kalmak veya daha sonra gelmek anlamına gelmektedir. Histerisiz genişliğinin dar olması, süperiletken numune içinde akı çivileme merkezlerinin daha az hareket ettiğini göstermektedir. Tek bir PM durumunda, akı çivileme bölgeleri daha zayıf akı girişleri ve çıkışlarına sebep olmaktadır.



Şekil 58. (a) K3 numunesinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde; (a) PMG yolu ile arasındaki numunenin düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi, (b) PM yolu ile numune arasındaki yatay mesafeye (z) karşı yatay manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

K3 numunesinin, 5 mm soğutma yüksekliğinde (FC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet (F_x) değişimi Şekil 59’de gösterilmektedir. Maksimum yatay (kılavuz) manyetik kuvvet ($F_{x,max}$) sayısal olarak 4.9 N, deneysel olarak 3.72 N olarak ölçülmüştür. Deneysel ölçüm sonucu ile sayısal

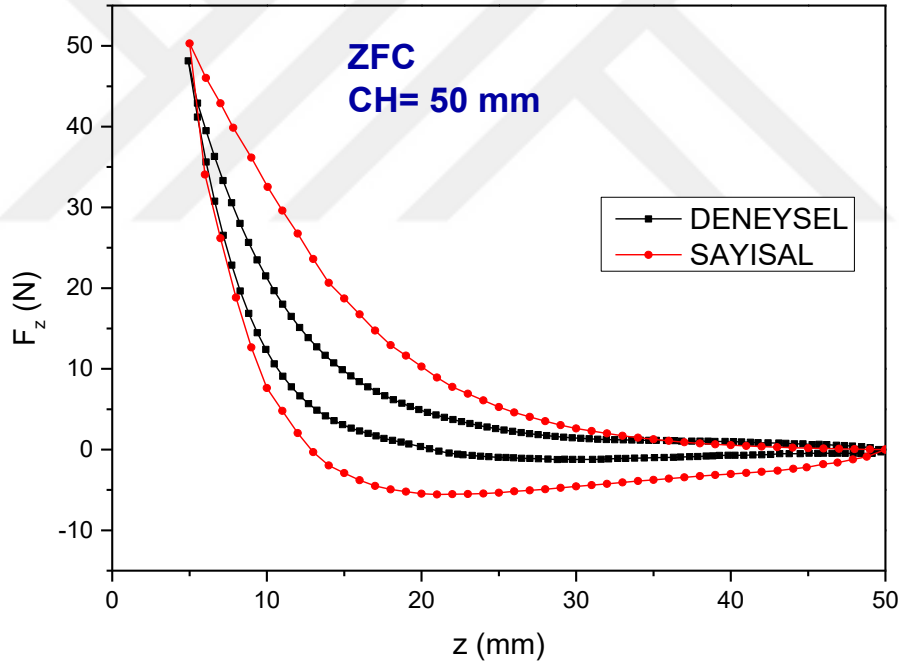
modelleme sonucunun tam olarak örtüşmediği görülmektedir. Ancak, deney sonucunda elde edilen histerisiz genişlikle, numerik modellemeye ait histerisiz genişlik nispeten uyuşmaktadır.



Şekil 59. K3 numunesinin 77 K de 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasında yatay mesafeye (x) karşı yatay kılavuzlayıcı manyetik kuvvet (F_x) değişimi.

BK-1 numunesinin ($27 \times 27 \times 7.5 \text{ mm}^3$) 50 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi Şekil 60’de gösterilmektedir. Şekil 60’de PMG yolu ile örnek arasındaki uzaklık azaldıkça düşey manyetik kuvvetinin eksponansiyel olarak arttığı ve uzaklık minimum (5 mm) olduğunda düşey manyetik kuvvetin maksimuma ulaştığı görülmektedir. Maksimum düşey kuvveti ($F_{z,max}$) sırasıyla sayısal ve deneysel olarak 50.3 ve 48.2 N olarak ölçülmüştür. Sayısal modelleme sonucunun, deneysel ölçümden %4 oranında daha fazla çıktığı görülmektedir. Bu sonuç, sayısal modellemenin maksimum düşey manyetik kuvvet hesaplamada başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak histerisiz genişliği sayısal modelleme ile tam uyuşmamaktadır. Süperiletkenlerde güçlü akı pinlenmesi, yani akı merkezlerinin sabit kalması dışarıdan zıt yönde manyetik akı değişimine direnci arttırdığı için yüksek histerisiz alana sebep olur. Bunun yanı sıra yüksek düşey manyetik kuvveti ve yüksek enerji kayıplarına sebep olmaktadır. YBCO örneğin düşük akı çivilemesi yani zayıf akı merkezlerine sahip olması daha dar histerisiz genişlik, düşük düşey manyetik kuvveti ve

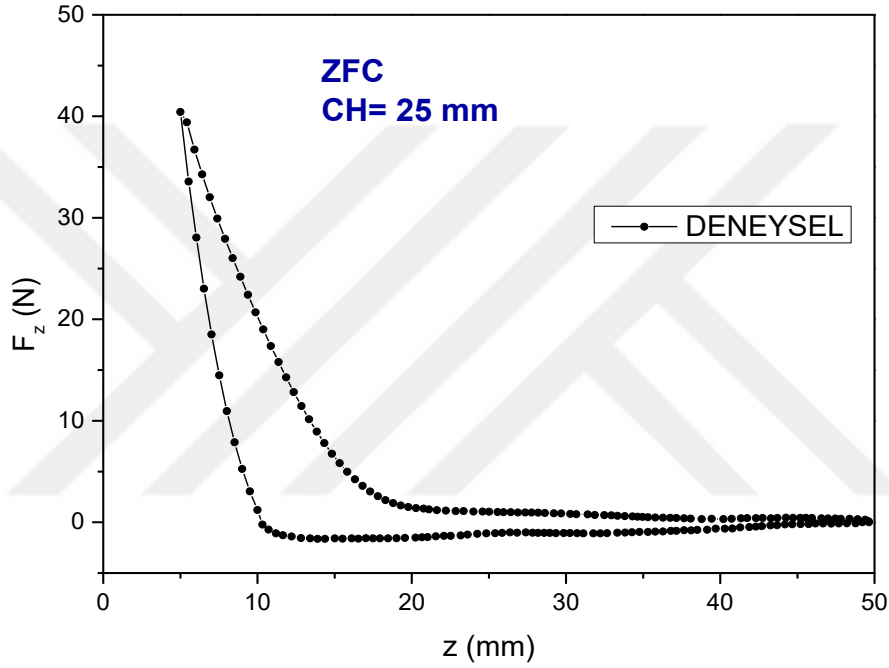
düşük enerji kayıplarına neden olur (Sjöström, 2001). Tek kristal YBCO örneğinde ise akı çivileme merkezleri daha etkin ve düzenli olarak malzeme içinde yayılmaktadır. Bu sayede yüksek akı çivileme, yüksek kaldırma kuvveti, yüksek manyetik kararlılık ve daha dar histerisiz genişliği elde edilir. Süperiletken daha fazla soğutulduğunda ise süper elektronların yoğunluğu artar ve girme derinliği de azalır. Pinlerin, hareket enerjisi azalarak pinleme daha kolaylaşmakta buna bağlı olarak histerisiz genişlik azalır. Dirençsiz taşıyabileceği akım miktarı arttığı için kritik akım yoğunluğu (J_c) artmaktadır. Yüzeyde daha fazla akım yoğunlaştığı için Meissner etkisi artmakta böylece daha fazla levitasyon kuvveti oluşmaktadır. İdeal genişlikte histerisiz alan ve yüksek düşey manyetik kuvvet, daha kararlı Maglev ve levitasyon uygulamaları için önemlidir. Motor gibi alternatif akıma maruz kalan sistemlerde geniş histerisiz alan istenmeyen bir özelliktir ve enerji kaybına sebep olmaktadır (Yıldız, 2019).



Şekil 60. BK-1 numunesinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

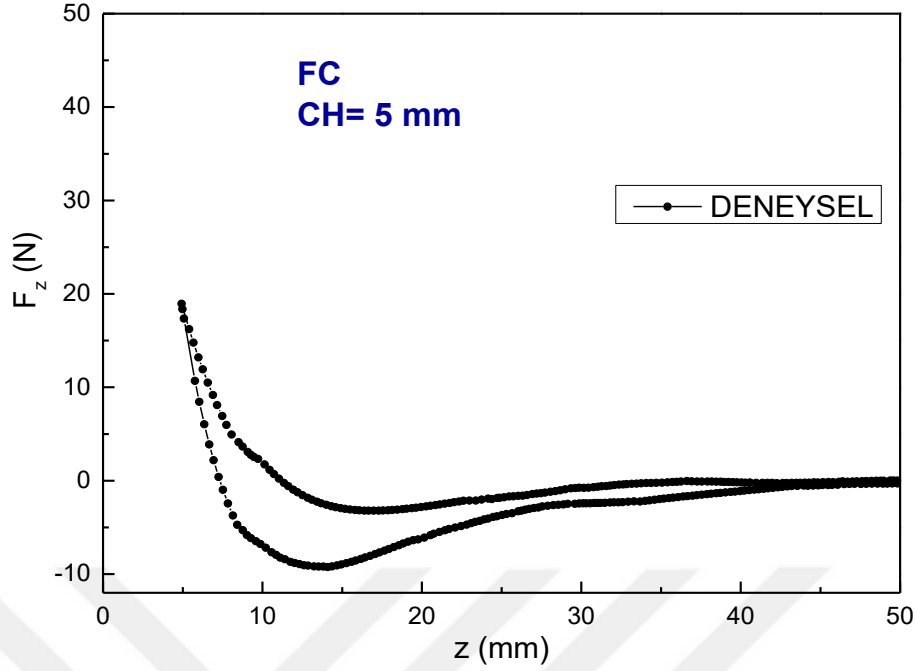
BK-1 numunesinin, 25 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvveti (F_z) değişimi Şekil 61'da görülmektedir. Maksimum düşey manyetik kuvveti ($F_{z,max}$) deneysel olarak 40.4 N olarak ölçülmüştür. Şekil 60'deki deneysel ölçümle kıyaslanınca soğutma yüksekliğinin azalmasıyla birlikte YBCO üzerinde indüklenen akım miktarı yani Meissner etkisi azalmış

ve dolayısıyla düşey manyetik kuvvet de azalmıştır. Mıknatısa daha yakın soğutulduğu için daha yüksek Kalıcı Mıknatıs Kılavuz Yolu (PMG)'den kaynaklı manyetik alana maruz kalmıştır. Örnek BK-1 hareket ederken daha yoğun akı çivilenmesi etkisiyle, süperiletken içinde daha fazla akı hapsolmuş bu yüzden histerisiz genişlik artmasıyla sonuçlanmıştır. Akı pinlerinde histerisiz etki enerji kaybına sebep olmaktadır ama çok düşük histerisiz genişliği manyetik kararlılığı düşürmektedir. Manyetik yataklarda dengeli kararlı dönüş sağladığı için makul histerisiz genişliği Maglev sistemleri ve manyetik yataklar için istenilen bir özelliktir.



Şekil 61. BK-1 numunesinin 77 K de 25 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

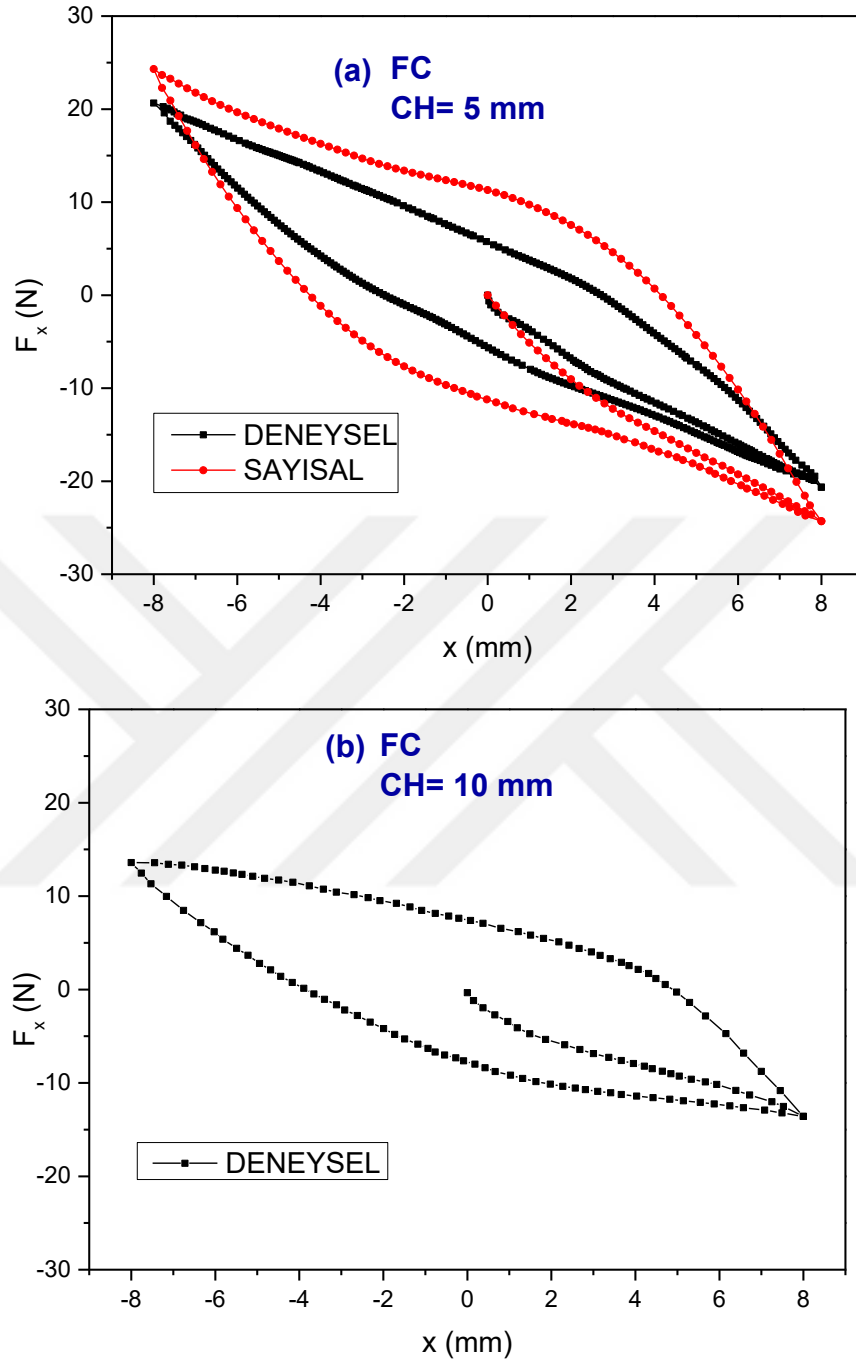
BK-1 numunesinin, 5 mm soğutma yüksekliğinde (FC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi Şekil 62'de gösterilmektedir. 5 mm soğutma yüksekliğinde maksimum düşey manyetik kuvvet 18.94 N, maksimum çekme kuvveti ise deneysel olarak -9.2 N olarak ölçülmüştür.



Şekil 62. BK-1 numunesinin 77 K de 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

Yatay manyetik kuvvet (F_x), Maglev araçlarında kılavuzlayıcı kuvvettir ve kaldırma uygulamalarında yatay dengelenmeyi sağlar. Maglev sistemlerinin teknolojik uygulamaları için manyetik kaldırma kuvvetinin yanında, kılavuzlama kuvvetinin de artırılması gerekmektedir. Kılavuzlayıcı kuvvet Maglev trenlerinde ve manyetik yataklarda sağa sola savrulmalarında ortaya çıkmaktadır. Büyük ve dengeli kılavuzlayıcı kuvvet istenen bir özelliktir.

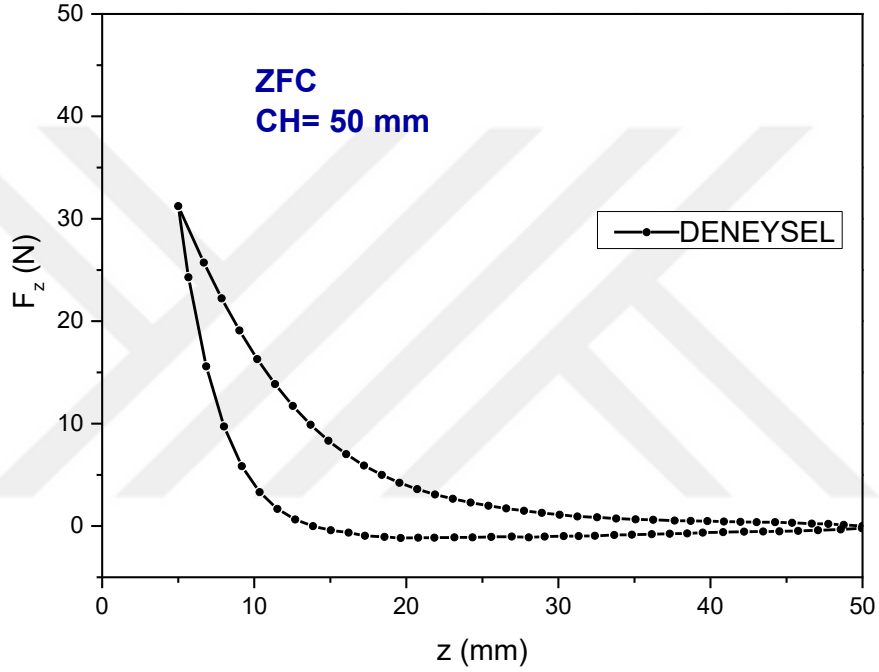
BK-1 numunesinin, 5 ve 10 mm soğutma yüksekliğinde (FC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet (F_x) değişimi Şekil 63’de görülmektedir. CH = 5 mm de maksimum yatay (kılavuzlayıcı) kuvvetler ($F_{x,max}$) sırasıyla sayısal ve deneysel olarak 24.3 ve 20.3 N olarak bulunmuştur. Sayısal modelin, deneysel ölçüm değerinden %19 oranında daha yüksek ve histerisiz aralığının daha geniş olduğu görülmektedir. Düşey manyetik kuvvetine benzer şekilde yüksek yatay kuvvette de geniş histerisiz alan elde edilmiştir. 10 mm soğutma yüksekliğinde deneysel olarak 13.6 N olarak ölçülmüştür. Soğutma yüksekliği 5 mm’den 10 mm’ye arttığında yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvetin azaldığı görülmektedir. Çünkü süperiletken PMG etkisinden uzaklaşır ve daha az manyetik alanla etkileşime girmektedir. Akı çivileme merkezlerinde az manyetik akı tuzaklanır ve böylece süperiletkenin yatay harekete (x) karşı gösterdiği yatay manyetik kuvvet (F_z) azalmaktadır.



Şekil 63. (a) BK-1 numunesinin 77 K de, (a) 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi, (b) 10 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi.

BK-2 numunesinin ($24.6 \times 24.6 \times 8.4 \text{ mm}^3$) 50 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi Şekil 64’de gösterilmektedir. PMG yolu ile örnek arasındaki uzaklık azaldıkça

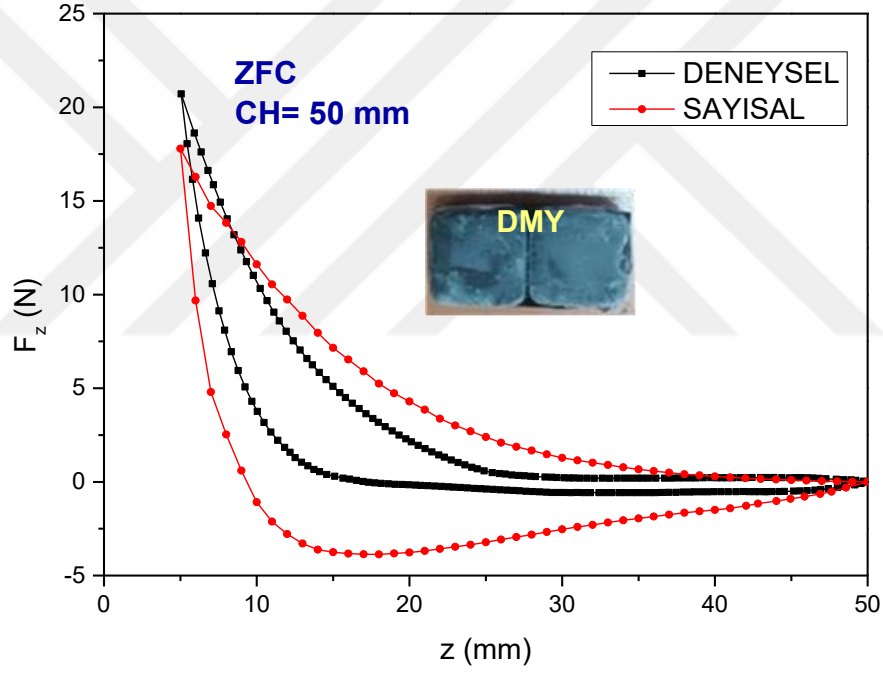
düşey manyetik kuvvetinin eksponansiyel olarak arttığı gözlenmektedir. 50 mm soğutma yüksekliğinde, maksimum düşey manyetik kuvveti deneysel olarak 31.2 N ölçülmüştür. BK-2 numunesinin çekirdeğinin büyüme açısı düzgün olmadığından büyüme çizgilerine göre yeniden kenarları kesilmiştir. Bu nedenle hacmi, BK-1 numunesinin hacminin yaklaşık %93 erişmektedir. BK-2 numunesi, BK-1 numunesinin düşey manyetik kuvvetinin %64'üne ulaşmaktadır. Alqadi çalışmasında bahsedilen kalınlık parametresinin yüzey alanından daha az düşey manyetik kuvvetine katkısıyla sağladığı sonucuyla uyumludur (Alqadi vd., 2007).



Şekil 64. BK-2 numunesinin 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

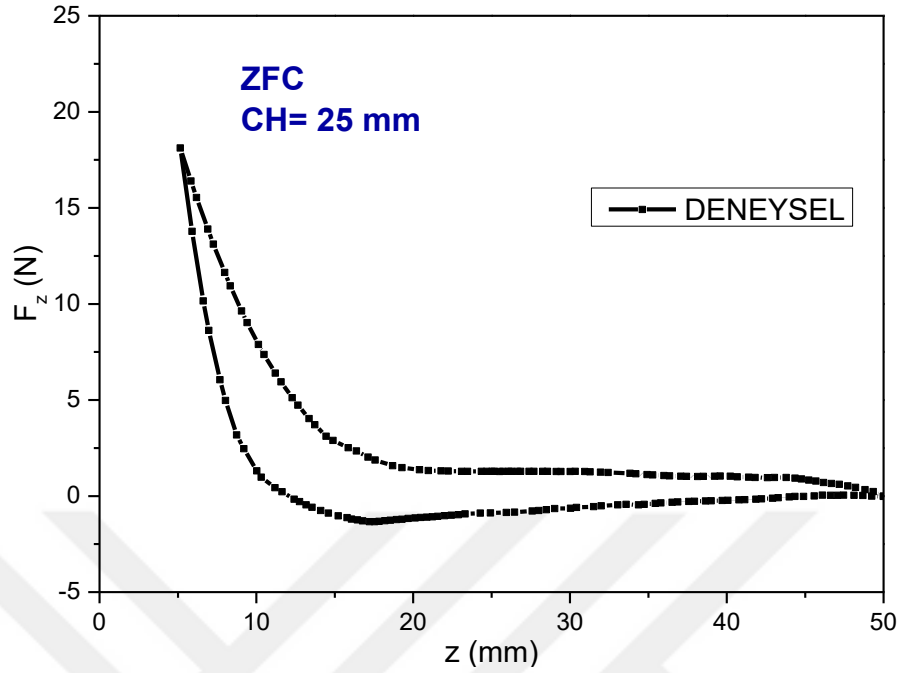
Dikdörtgen manyetik yatak (DMY), 50 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC), 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvvet (F_z) değişimi Şekil 65'de görülmektedir. Maximum düşey manyetik kuvvet sayısal olarak 17.8 N olarak hesaplanmış ve deneysel olarak 20.7 N ölçülmüştür. Deneysel ölçümde, sayısalardan %16 daha fazla düşey manyetik kuvvet elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde sayısal göre daha dar histerisiz genişlik elde edilmiştir. Tek kristal YBCO örneğinde benzer davranış sergileyerek yüksek akı pinlenme gösterirken, düzenli pinlenme akı sürüklenmesi sınırladığı için yüksek düşey manyetik kuvveti, yüksek manyetik kararlılık ve dar histerisiz aralık elde edildiği görülmektedir. Dikdörtgen manyetik yatak (DMY), K3 örneği ile kıyaslandığında 50 mm soğutma yüksekliğinde yaklaşık 2.4 kat fazla düşey manyetik kuvvet elde edilmiştir.

Birbirlerine temas halindeki YBCO numuneleri arasında elektromanyetik etkileşimden düşey manyetik kuvvet artışı elde edilmiştir. Birleştirilmiş süperiletkenlerde (K2 ve K3) onu oluşturan her bir süperiletkene kıyasla üzerinde dolanan akım etkisiyle toplam akım miktarı artmıştır. Cheng ve arkadaşlarının çalışmasında, Dikdörtgen manyetik yatağına (DMY) benzer bir sayısal modelleme yapılmıştır. Tek dikdörtgen, uzunluk yönünde ikiye bölünmüş birbirleri temas eden ama üzerinden süper akım dolanmayan numunenin düşey manyetik kuvveti kıyaslamıştır. Bunun sonucunda numunelerin üst yüzeyinden beraber şekilde akım dolanmasının %15.36 oranında düşey manyetik kuvvetine katkısı olduğu hesaplanmıştır. Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) manyetik yatağıyla Cheng'in çalışmasında benzer düşey manyetik kuvveti artışı görülmektedir (Cheng vd., 2021).



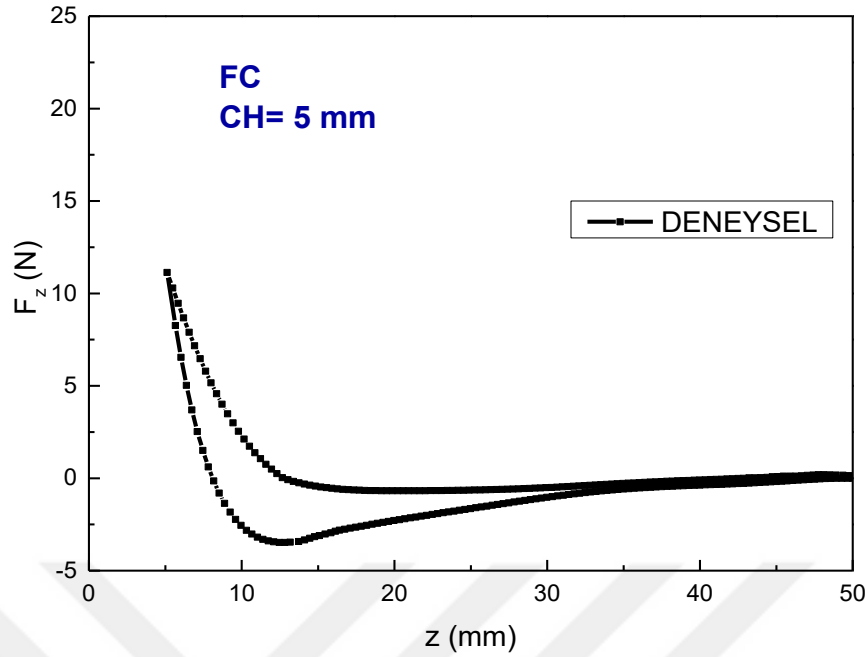
Şekil 65. Dikdörtgen manyetik yatağının 77 K de 50 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

Dikdörtgen manyetik yatak (DMY), 25 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) grafiği Şekil 66'de görülmektedir. Maksimum kaldırma kuvveti deneysel olarak 18.1 N olarak ölçülmüştür. Tek kristal yapının özelliği olan düzenli çivileme akı sürüklenmesini sınırladığı için yüksek kaldırma kuvveti, yüksek manyetik kararlılık ve dar histerisiz genişliğe sahiptir.



Şekil 66. Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 77 K de 25 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

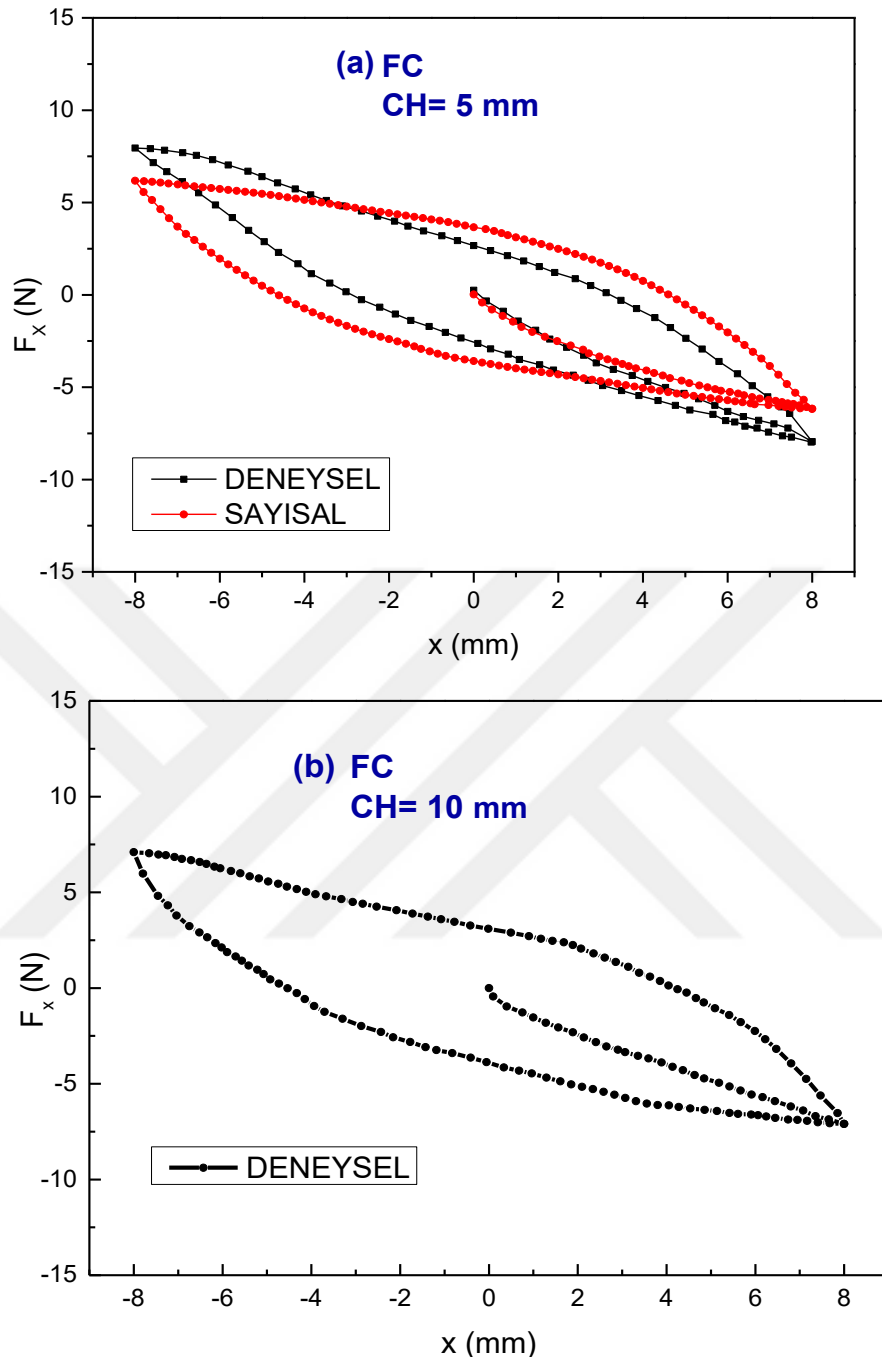
Dikdörtgen manyetik yatak (DMY), 5 mm soğutma yüksekliğinde (FC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvveti (F_z) değişimi Şekil 67’de görülmektedir. Maksimum düşey kuvveti ($F_{z,max}$) deneysel olarak 11.1 N ölçülmüştür. Maksimum çekici kuvvet ise deneysel olarak -3.47 N ölçülmüştür. Soğutma yüksekliği azaldıkça çekici kuvvetin ve histerisiz özelliklerin daha belirgin olduğu görülmektedir.



Şekil 67. Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 77 K de 5 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvvet (F_z) değişimi.

Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) (a) 5 mm soğutma yüksekliğinde (FC) PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay kuvvet (F_x) değişimi, (b) 10 mm soğutma yüksekliğinde PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay manyetik kuvvet (F_x) değişimi Şekil 68’da görülmektedir. 5 mm soğutma yüksekliğinde maksimum yatay kuvvetler sırasıyla sayısal ve deneysel olarak 6.18 ve 7.94 N olarak bulunmuştur. Sayısal hesaplardan daha yüksek sonuç elde edilmesinde dikdörtgen manyetik yatak (DMY) oluşturan örnekler arasında süper akım dolanarak yatay manyetik kuvveti arttırmaktadır. Histerisiz genişlik incelendiğinde büyük oranda benzerlik göstermektedir. Sayısal deneysel ölçüm sonucu arasında küçük farklar olması normaldir çünkü kuvvet azaldığı için ölçüm hatası belirginleşmektedir.

10 mm soğutma yüksekliğinde, maksimum yatay manyetik kuvvet deneysel olarak 7.1 N ölçülmüştür. Soğutma yüksekliği 5 mm’den 10 mm’ye arttığında yatay kuvvet azalmaktadır. Çünkü süperiletken PMG etkisinden uzaklaşır ve daha az manyetik alanla etkileşime girer. Akı çivileme merkezlerinde daha az manyetik akı hapsolür ve süperiletkenin yatay değişimde harekete gösterdiği yanıtın kuvveti de azalmış olur.

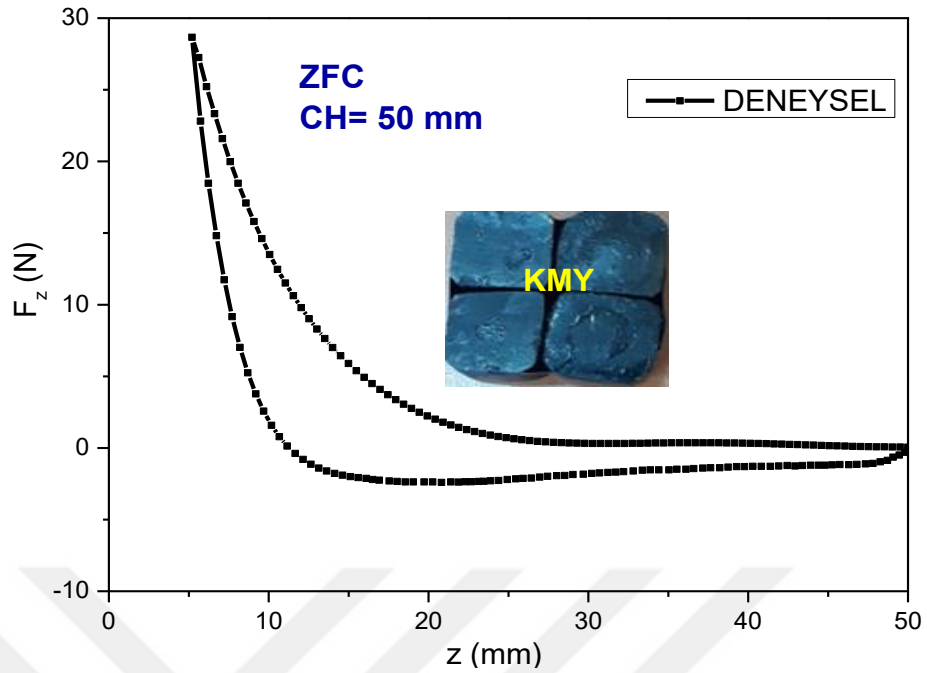


Şekil 68. Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 77 K de PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay(kılavuzlayıcı) kuvvet (F_x) değişimi (a) CH= 5 mm (b) CH= 10 mm.

Kare manyetik yatağının (KMY) ($27 \times 27 \times 7.5 \text{ mm}^3$) 50 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvveti (F_z) değişimi Şekil 69’de görülmektedir. Maksimum düşey manyetik kuvvet deneysel olarak 28.7 N ölçülmüştür. Kare manyetik yatağı (KMY), BK-1 örneğine kıyasla düşey manyetik

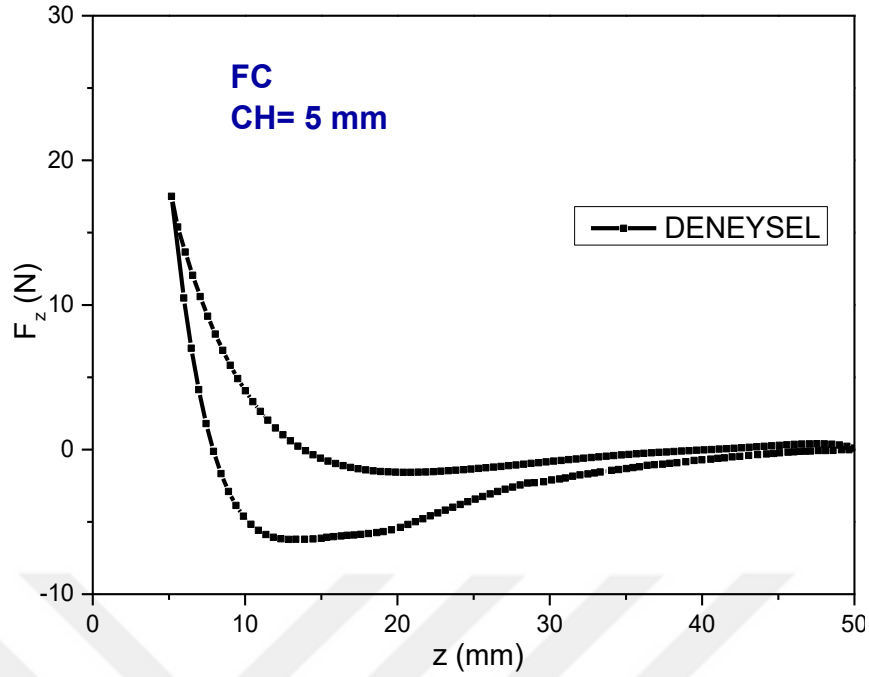
kuvvetinin %59.5 oranında erişmektedir. Kare manyetik yatağında (KMY) düşey manyetik kuvvetinin düşük olmasının sebebi, yatağı oluşturan numuneler arasındaki boşlukların PMG'nin en tepe noktasıyla çakışmasıdır. Kare manyetik yatağının (KMY) daha az manyetik akıyla etkileştiği için manyetik yatağın üzerinde daha az Meissner etkisi oluşmuştur bu nedenle kaldırma kuvveti azalmıştır. Eğer farklı manyetik akı dağılımıyla sahip PMG ile ölçüm yapılırsa BK-1 numunesine daha yakın düşey manyetik kuvveti elde edilebilir. Kare manyetik yatağı (KMY) histerisiz genişliği daha geniş olduğu görülmektedir. Choi ve arkadaşları $30 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip tek çekirdek ve 4 çekirdekli YBCO kare numuneleri ZFC koşullarında $40 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$ boyutlarında 0.33 T kalıcı mıknatısla düşey manyetik kuvvet ölçümleri sırasıyla 48.3 N ve 33.9 N elde etmiştir. Düşey kuvvetinin tek kristal yapıya göre düşük olması çok çekirdekli kare YBCO'nun zayıf bağlantı sınırlarının akım akışını kesintiye uğratmasından kaynaklanmaktadır. Savaşkan ve arkadaşlarının çift çekirdekli YBCO örneklerinde çekirdekler arası mesafenin düşey kuvvetine etkisini araştırdıkları çalışmada, çekirdekler arasındaki mesafe her 1 mm uzaklaştığında yaklaşık %2.1 düşey manyetik kuvveti azaldığı görülmektedir. Kare manyetik yatağı (KMY) çekirdekleri arasında mesafe 17.5 mm uzaklığına sahiptir. Eğer BK-1 numunesi çok çekirdekli üretilseydi, bu verilere göre düşey kuvveti tekrardan hesaplandığında 50 mm soğutma yüksekliğinde 30.45 N elde edilmesi beklenebilirdi. Elde ettiğimiz sonuç; birleştirilmiş manyetik yatakların, aynı boyuttaki çok çekirdekli YBCO örneğiyle düşey manyetik kuvvet olarak rekabet edebileceğini göstermektedir. Her iki çalışmada kare manyetik yatağı (KMY) çok çekirdekli benzer boyutta YBCO örnekleriyle rekabet edebileceğini göstermektedir (Choi vd., 2008; Savaskan vd., 2020).

Abdioğlu ve arkadaşlarının çalışmasında, $65 \times 33 \times 13 \text{ mm}$ boyutunda 3 çekirdekli YBCO örneğinin farklı PMG diziliminde düşey kuvveti etkisini incelemiştir. Yatay düzlemde 3'e bölmüştür. YBCO yapı Şekil 47(a)'ya benzer dizilime sahip PMG ile 55 mm soğutma yüksekliğinde kaldırma kuvveti 171 N elde edilmiştir. Kesilmiş YBCO örnekleri yan yana dizilerek kaldırma kuvvetleri tekrar ölçüldüğünde ise yaklaşık 90 N elde edilmiştir. Yeni bir PMG diziliminde ise kesilmiş örnekler yan yana dizilerek düşey kuvveti ölçüldüğünde ise yaklaşık 175 N düşey kuvveti elde edilmiştir. Bu çalışma yeniden PMG diziliminin tasarlandığında KYM manyetik yatağının BK-1 örneğiyle düşey manyetik kuvveti açısından rekabet edebileceğini göstermektedir. (Abdioğlu vd., 2015).



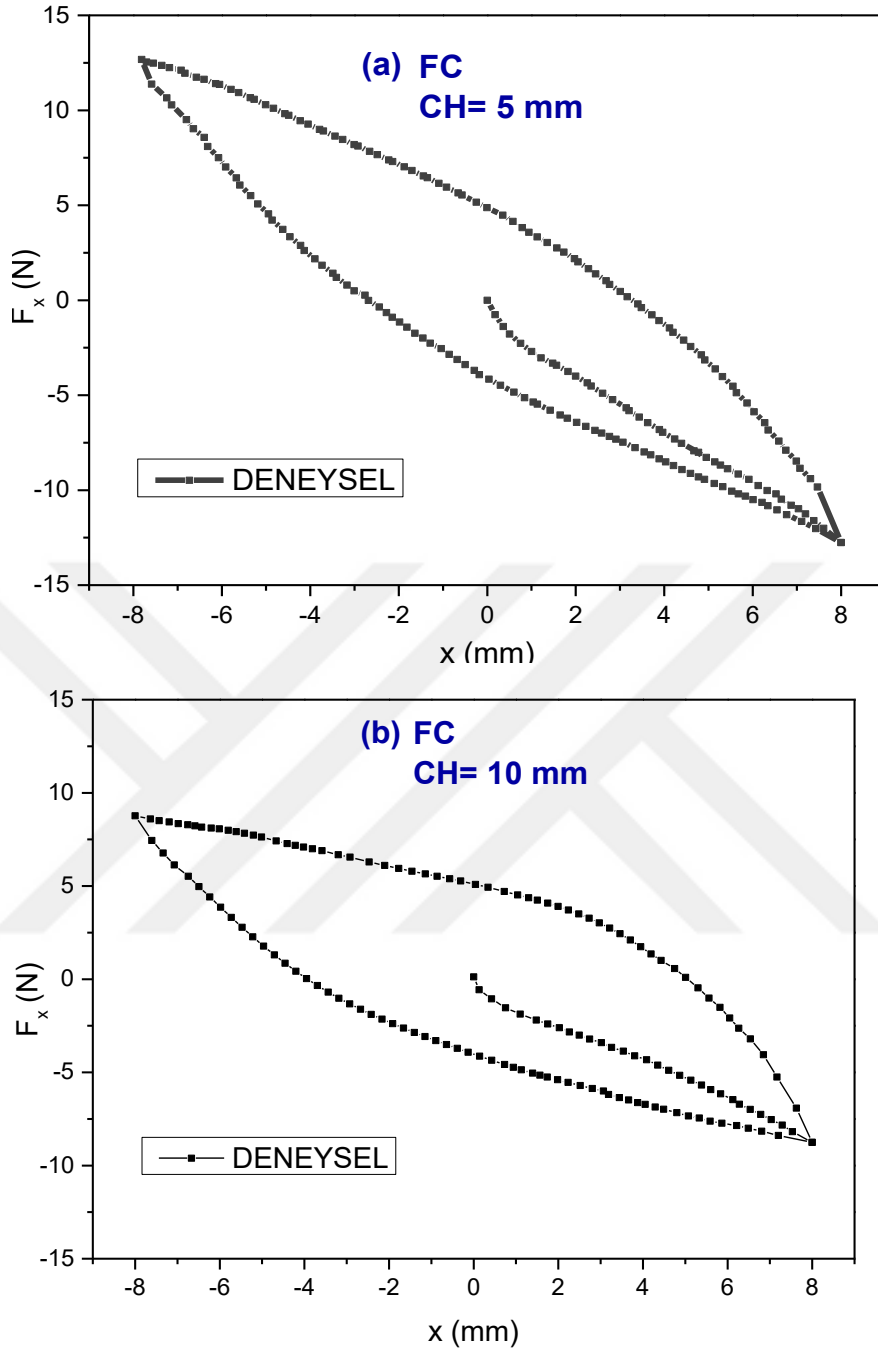
Şekil 69. Kare manyetik yatağının (KMY) 50 mm soğutma yüksekliğinde (ZFC rejimi altında) 77 K sıcaklıkta ölçülmüş PMG yolu ile örnek arasında düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvvet (F_z) değişimi.

Kare manyetik yatağının (KMY) 5 mm soğutma yüksekliğinde (Alanlı soğutma (FC)) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki düşey mesafeye (z) karşı düşey kuvveti (F_z) değişimi Şekil 70’de görülmektedir. Maksimum düşey ve çekici kuvvetler deneysel olarak sırasıyla 17.5 ve -6.21 N ölçülmüştür. Akı pinlerinin soğutma rejiminden dolayı güçlü pinning etkisi göstermektedir. Pinning kuvvetinin artışıyla birlikte histerisiz etkisinin de arttığı gözlenmektedir. MAGLEV ve levitasyon uygulamaları için istenilen özelliktir. 5 mm soğutma yüksekliğinde düşey manyetik kuvvetleri kıyaslandığında, KMY manyetik yatağı, yaklaşık kendisi ile aynı boyuta sahip BK-1 örneğinin %92’sine ulaşmaktadır. Kare manyetik yatağının (KMY), numunelerinin birbirine temas yüzeyleri yeterince düzgün olmadığından dolanan akımı sınırlanmaktadır. 5 mm soğutma yüksekliğinde ise her bir örneğe daha iyi manyetik alan nüfus ettiği için daha fazla süper akım oluşup düşey kuvvetine katkı sağlamıştır. Bu durum BK-1 ile KMY yatağının düşey manyetik kuvvet yakınlığı açıklanabilir (Oztürk vd., 2020). Buradan çıkarılacak sonuç şudur: 5 mm alanlı soğutma (FC) koşullarında birleştirilmiş manyetik yataklar oldukça başarılıdır. Aynı zamanda yerleştirilme kullanılacak yere göre şekil verilebilme esnekliği ve üretim kolaylığından dolayı avantajlıdır.



Şekil 70. Kare manyetik yatağının (KMY) 5 mm soğutma yüksekliğinde (FC) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile örnek arasında düşey mesafeye (z) karşı düşey manyetik kuvvet (F_z) değişimi.

Kare manyetik yatağının (KMY) (a) 5 mm ve (b) 10 mm soğutma yüksekliğinde (Alanlı soğutma (FC)) 77 K sıcaklıkta PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvveti (F_x) değişimi Şekil 71’de görülmektedir. 5 mm ve 10 mm soğutma yüksekliğindeki maksimum düşey manyetik kuvvetler deneysel olarak sırasıyla 12.67 ve 8.76 N ölçülmüştür. Soğutma yüksekliği 10 mm’den 5 mm’ye düşürüldüğünde yatay manyetik kuvvet artmaktadır. Çünkü PMG’nin manyetik alanı süperiletken örnek içine daha fazla nüfus etmektedir. Akı çivileme merkezlerinde daha fazla manyetik akı hapsolür. Bu sayede yatay kuvvette artış sağlanmıştır.



Şekil 71. Kare manyetik yatağının (KMY) 77 K de PMG yolu ile arasındaki yatay mesafeye (x) karşı yatay kaldırma kuvveti (F_x) grafiği değişimi (a) CH= 5mm (b) CH= 10 mm.

PMG altında ölçülmüş K3, BK-1, BK-2, dikdörtgen manyetik yatak (DGM) ve kare manyetik yatak (KMY) numuneleri ve manyetik yataklarının düşey ve yatay (kılavuz) manyetik kuvvet ölçüm sonuçları Tablo 7’de altında verilmektedir. BK-1 numunesinin Alqadi’nin çalışmasına benzer şekilde büyük yüzey alanına sahip olan numunelerin

manyetik alanla daha başarılı etkileşim göstererek tüm ölçüm yöntemlerinde en iyi performans gösterdiği açıkça görülmektedir (Alqadi vd., 2007). COMSOL Multiphysics 6.0 kullanılarak sayısal olarak modellenen numunelerin manyetik yataklarının düşey ve yatay (kılavuz) manyetik kuvvet ölçüm sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 8 incelendiğinde deneysel ölçüm sonuçları ile sayısal modelle sonuçlarının tutarlı ve benzer olduğu görülmektedir. Kare manyetik yatak (KMY) 2 boyutlu sayısal modelli zor ve karmaşık olduğu için modellenememiştir.

Tablo 7. PMG altında ölçülmüş numunelerin düşey ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet sonuçları.

Soğutma yüksekliği (CH)	Fz (N)			Fx (N)	
	5 mm	25 mm	50 mm	5 mm	10 mm
K3	X	X	8.81	3.72	X
BK-1	18.94	40.42	48.14	20.31	13.58
BK-2	X	X	31.23	X	X
DMY	11.13	18.11	20.70	7.94	7.10
KMY	17.50	X	28.66	12.67	8.76

Tablo 8. Sayısal düşey ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvet sonuçları.

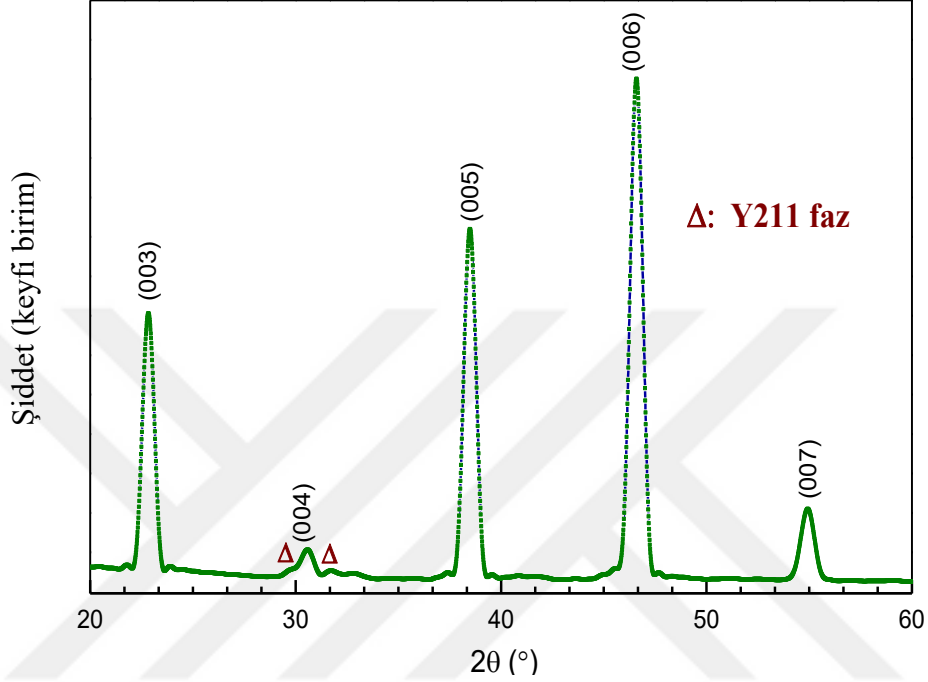
Soğutma yüksekliği (CH)	Fz (N)			Fx (N)	
	5 mm	25 mm	50 mm	5 mm	10 mm
K-3	X	X	8.69	4.9	X
BK-1	X	X	50.30	24.31	X
DMY	X	X	17.78	6.18	X

3.2. Yapısal Analizler

3.2.1. X-Işını Kırınım Analizi (XRD)

Karadeniz Teknik Üniversitesin’de PANalytical X-Pert3 Powder cihazı kullanılarak BK-1 numunesi ait XRD grafiği elde edilmiştir. Yaklaşık 30°’de Y211 fazına ait küçük piklerin bulunduğunu görülmektedir. BK-1 numunesinin XRD grafiğine bakıldığında baskın (00ℓ) pikleri yani yaklaşık 23°, 39°, 46° ve 55°’de net görülmektedir (Şekil 72). Bu değerler numunelerin c-eksenine yönelmiş olduğunu göstermektedir. Tezdeki XRD grafiği Çakır ve

arkadaşlarının çalışmasındaki XRD grafikleriyle benzemektedir. Bu yönelim yüksek sıcaklıkta süperiletkenlerin kritik akım taşıma kapasitesinin (J_c) yüksek olmasını sağlayan bir faktördür (Çakır vd., 2019).

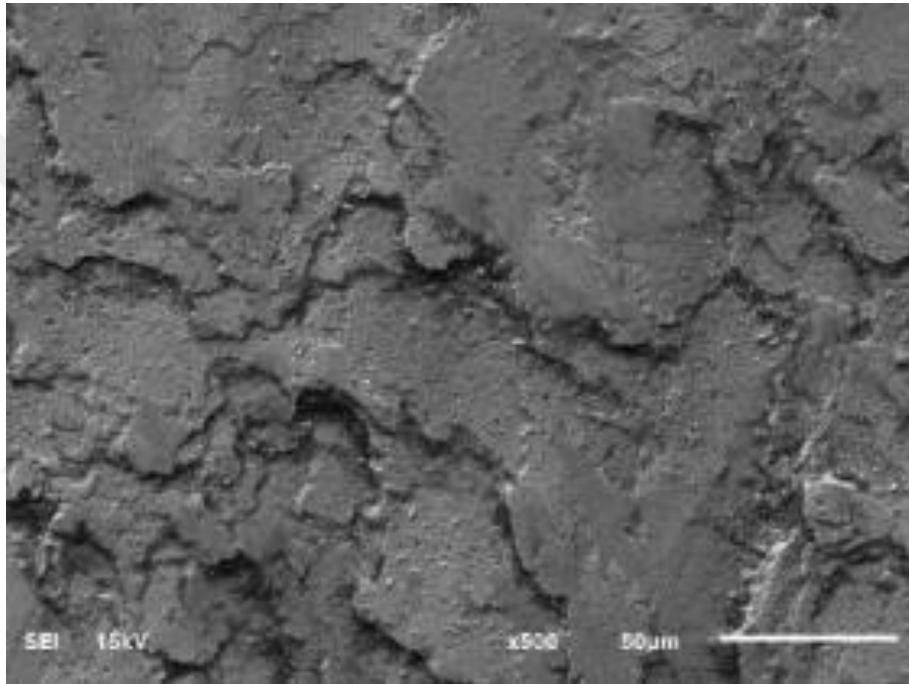


Şekil 72. BK-1 örneğinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışını spektrumları.

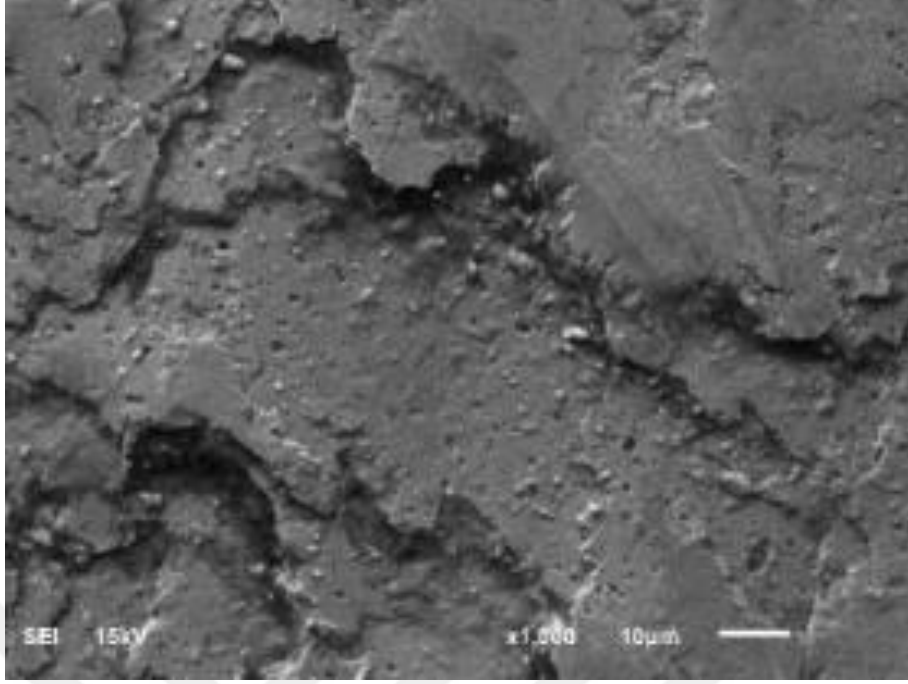
3.2.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi

Şekil 73, Şekil 74, Şekil 75, Şekil 76 ve Şekil 77’deki incelendiğinde katkısız olarak üretilmiş tek çekirdek BK-1 numunesine ait SEM görüntüleri görülmektedir. Numunesinin üst yüzeyinden alınmış 500X, 1000X, 3000X ve 5000X büyütülerek elde edilmiştir. Görüntüler, numunenin yüzey morfolojisi, faz dağılımı ve olası mikroyapısal kusurlar hakkında bilgi vermektedir. Şekil 73, Şekil 74, Şekil 75, Şekil 76 ve Şekil 77 incelendiğinde katkısız olarak üretilmiş tek çekirdek BK-1 numunesine ait SEM görüntüleri görünmektedir. Numunesinin üst yüzeyinden alınmış 500X, 1000X, 3000X ve 5000X büyütülerek elde edilmiştir. Görüntüler, örneğin yüzey morfolojisi, faz dağılımı ve olası mikroyapısal kusurlar hakkında bilgi vermektedir. Güner ve arkadaşlarının 2017’deki makalesindeki SEM görüntüleri incelenerek yorumlanmıştır. Yüzeyin genel olarak yoğun ve çatlaklardan arındırılmış olduğu görülmektedir. Gri tonlarında gözlemlenen bölgeler, süperiletken faz

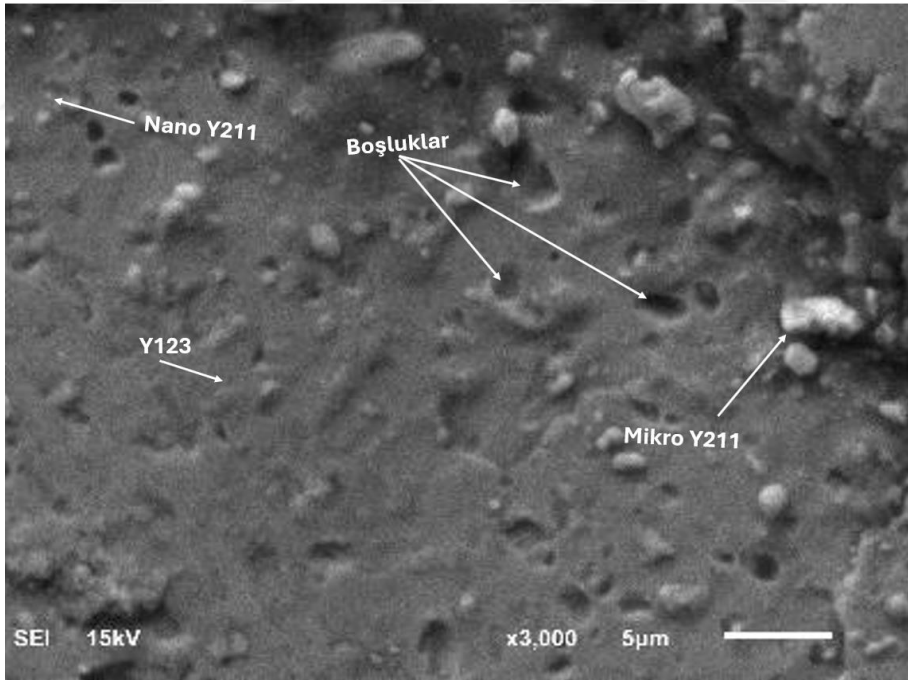
olan Y123 fazını göstermektedir. Daha beyaz renkli yerlerde ise nano ve mikro boyutta Y211 fazları göstermektedir. Nano boyutta Y211 fazların Bazı bölgelerde mikro boyutlu gözenek yapılarının bulunduğu da gözlemlenmiştir (Güner vd., 2017). Nano boyutta Y211 fazı pinnig noktalarının oluşturmaktadır. Dolayısıyla kaldırma kuvvetini arttıran etkiye sahiptir (Li vd., 2015). 3000X büyütme miktarında alınan Şekil 75’de boşluk miktarı çok seyrekken Şekil 76’de ise boşluklar daha yoğun görünmemektedir. Bunun BK-1 numunesinin üst yüzünün zımparalanmasından kaynaklanmaktadır.



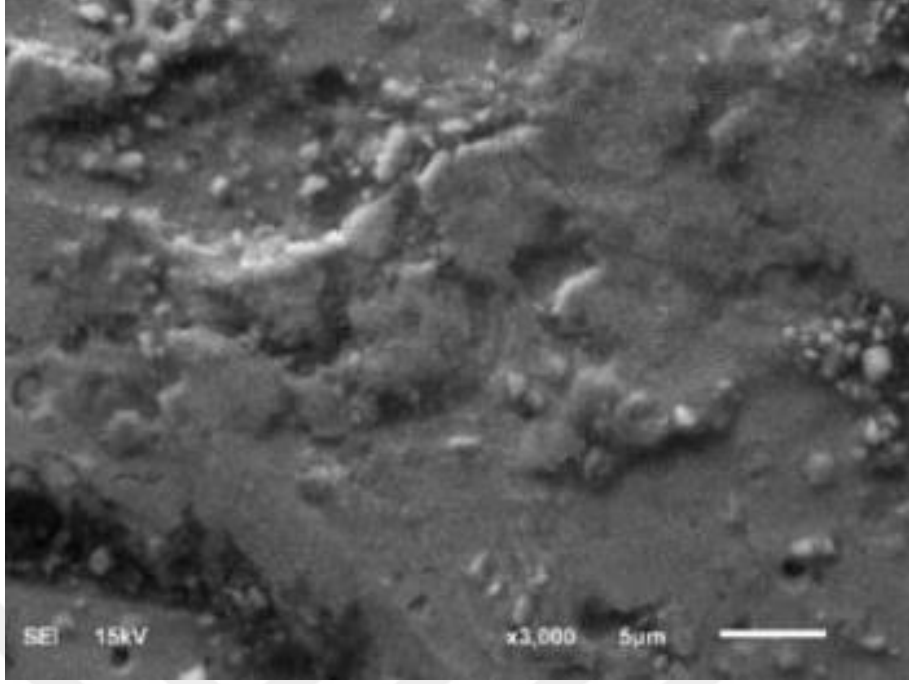
Şekil 73. BK-1 örneğinin 500 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



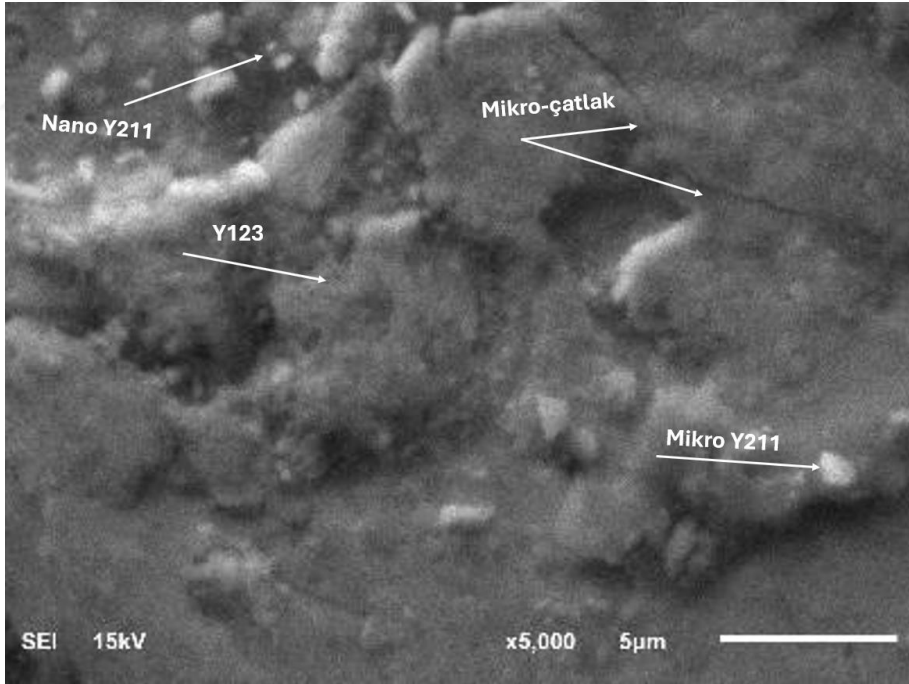
Şekil 74. BK-1 örneğinin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 75. BK-1 örneğinin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 76. BK-1 örneğinin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 77. BK-1 örneğinin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4. SONUÇLAR

Silindirik ve kare (BK-1 ve BK-2) şeklinde YBCO numuneler TSMG yöntemi ile üretilmiştir. Silindirik YBCO numuneleri kesilerek ve zımparalanarak küçük kare numuneler (K1-K2-K3 ve K4) elde edilmiştir. Küçük kare numuneler birleştirilerek kare manyetik yatak (KMY) ve dikdörtgen manyetik yatak (DGM) elde edilmiştir. Büyük kareler, küçük kareler, kare manyetik yatak (KMY) ve dikdörtgen manyetik (DGM) yatakların farklı soğutma yüksekliklerinde ZFC ve FC soğutma şartlarında düşey ve yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvetleri 77 K sıcaklığında ölçülmüştür. Ardından yapısal analizler ve COMSOL Multiphysics 6.0 kullanılarak H formülasyonu ile 2 boyutlu sayısal modelleme yapılmıştır. Çıkan önemli bazı sonuçlar sırasıyla maddeler halinde aşağıda verilmiştir:

1. YBCO örnekler incelendiğinde, içlerinde boşluklar ve küçük miktarda polikristaller görülmüştür.
2. K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin 50 mm soğutma yüksekliğinde PM yolu ile maksimum düşey manyetik kuvveti ($F_{z,max}$) deneysel olarak sırasıyla; 3.00, 3.81, 3.80 ve 3.35 N olarak ölçülmüştür.
3. 1.5 mm soğutma yüksekliğinde, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin PM yolu ile maksimum yatay (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvetleri ($F_{x,max}$) sırasıyla deneysel olarak 0.99, 1.23, 1.21 ve 0.97 N olarak ölçülmüştür.
4. Soğutma yüksekliği (CH) düştükçe düşey manyetik kuvvet azalmıştır.
5. Soğutma yüksekliği azaldıkça dikdörtgen manyetik yatağının (DMY) düşey manyetik kuvveti BK-1 numunesine yaklaşmaktadır.
6. K3 numunesinin ZFC rejiminde, kalıcı mıknatıs kılavuz yolu (PMG) üzerinde oluşan maksimum düşey manyetik kuvveti, kalıcı mıknatıs (PM)'e göre 2.31 kat fazla olduğu ve daha geniş bir histerisize sahip olduğu görülmüştür.
7. K3 (en başarılı küçük kare), BK-1 (en başarılı büyük kare), BK-2, dikdörtgen manyetik yatak (DMY) ve kare manyetik yatak (KMY) 50 mm soğutma yüksekliğinde ZFC rejimi altında PMG yolu ile maksimum düşey manyetik kuvvetleri deneysel olarak sırasıyla 8.81, 48.14, 31.23, 20.70, 28.66 N elde edilmiştir.

8. K3, BK-1, dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 50 mm soğutma yüksekliğinde 2 boyutlu sayısal modelin ZFC rejimi altında maksimum düşey manyetik kuvveti sayısal olarak sırasıyla 8.69, 50.30 ve 17.79 N elde edilmiştir. Sayısal modeller deneysel sonuçlarla en yüksek %97 oranında uyum göstermiştir.
9. BK-1, dikdörtgen manyetik yatak (DMY) ve kare manyetik yatak (KMY) 5 mm soğutma yüksekliğinde ZFC rejimi altında düşey manyetik kuvvet deneysel olarak sırasıyla 18.94, 11.13 ve 17.50 N elde edilmiştir.
10. K-3, BK-1, dikdörtgen manyetik yatak (DMY) ve kare manyetik yatağın (KMY) 5 mm soğutma yüksekliğinde FC rejimi altında maksimum yatay (kılavuzlayıcı) kuvveti deneysel olarak sırasıyla 3.72, 20.31, 7.94, 12.67 N elde edilmiştir.
11. K3, BK-1, dikdörtgen manyetik yatak (DMY) 5 mm soğutma yüksekliğinde 2 boyutlu sayısal modeli FC rejimi altında maksimum yatay (kılavuzlayıcı) kuvvet sırasıyla 4.9, 24.31 ve 6.18 N elde edilmiştir.
12. Dikdörtgen manyetik yatak (DMY) manyetik yatağı oluşturan örneklerin üzerinden süper akım dolaşmıştır.
13. Kare manyetik yatağında (KMY) onu oluşturan (K-1, K-2, K-3 ve K4) temas yüzeyleri arasında manyetik akı kaçıışı olmuştur.
14. BK-1 numunesinin $2\theta=20-60^\circ$ arası x-ışınları kırınım desenleri incelenmiştir. XRD kırınım deseninde $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yapısına ait (003), (004), (005), (006), (007) pikleri ile Y211 fazına ait düşük şiddetli pikler görüldü. Bu değerler numunelerin c-eksenine yönelmiş olduğunu göstermektedir.

5. ÖNERİLER

1. Kare manyetik yatağı (KMY) oluşturan K1, K2, K3 ve K4 manyetik yatağının birbirine temas edip akım dolanmakta ve kaldırma kuvveti artmaktadır. Örneklerin arasına yalıtkan malzeme koyup numuneler arasında dolanan akımın etkisi bulunabilir.
2. BK-1 örneğinin yüksekliğini 0.5, 0.33 ve 0.25 oranında azaltılarak kütle miktarı ile düşey manyetik kuvvet arasındaki en iyi oran bulunabilir. Ardından ideal kalınlıkta daha büyük boyutlu yeni bir manyetik yatak tasarlanabilir.
3. Kare manyetik yatağı (KMY) için yeni bir PMG dizilimi kullanılarak ölçümler tekrarlanabilir.
4. Kare manyetik yatağının (KMY), 3 boyutlu sayısal modellemesi yapılabilir.
5. Karıştırma sürecinin uzatılması, pres yapıldıktan sonra lazerle yapay delikler oluşturularak YBCO'nun içindeki boşluklar azaltılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdioglu, M., Ozturk, K., Gedikli, H., Ekici, M., & Cansiz, A. (2015). Levitation and guidance force efficiencies of bulk YBCO for different permanent magnetic guideways. *Journal of Alloys and Compounds*, 630, 260–265.
- Abulaiti, A., Jia-Wei, L., Sen-Lin, C. & diğeri. (2024). A practical processing method for fabrication of single-domain YBCO superconductors using large-sized GdBCO seed crystals. *J Mater Sci: Mater Electron* **35**, 995.
- Alqadi, M. K., Al-Khateeb, H. M., Alzoubi, F. Y., & Ayoub, N. Y. (2007). Effects of magnet size and geometry on magnetic levitation force. *Chinese Physics Letters*, 24(9), 2664–2666.
- Altıntaş, Ç. (2022). Üstten Tohumlama Yöntemi İle Ybco Süperiletken Üretimi Ve Karakterizasyonu. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Bäcker, M. (2011). Energy and superconductors- Applications of high-temperature-superconductors. *Zeitschrift Fur Kristallographie*, 226(4), 343–351.
- Batur, K. (2023). Mgo Altlık Üzerinde Ybco ve Ndbco Çift Katmanlı İnce Film Çekirdek Kullanarak Üstten Aşılama-Eritme-Büyütme [Top Seeded-Melt-Growth (Tsmg)] Yöntemi İle Üretilen Eklenmiş Ybco Külçe Süperiletkeni. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Baumann, J. (2023). The microstructure, mechanical and superconducting properties of (RE)BCO bulk single grains. University of Cambridge., Institute of Physics, Doktora Tezi, Cambridge.
- Baumann, J., Shi, Y., Weerakonda, D., Durrell, J. H., & Cardwell, D. A. (2023). Understanding the porosity and its effects on the superconducting properties of YBCO single grains. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(4), 1542–1547.
- Bhagurkar, A. G., Yamamoto, A., Wang, L., Xia, M., Dennis, A. R., Durrell, J. H., & Cardwell, D. A. (2018). High Trapped Fields in C-doped MgB₂ Bulk Superconductors Fabricated by Infiltration and Growth Process. *Scientific Reports*, 8(1).
- C. Emeksiz & B. Kara, (2022). Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi, *IJMSIT*, c. 6(2), 134-142.
- Cardwell, D., Larbalestier, D., & Braginski, A. (2023). Handbook of superconductivity processing and cryogenics (Vol. 2, 2nd ed.). Taylor & Francis Group.
- Celik, S. (2016). Design of magnetic levitation force measurement system at any low temperatures from 20K to room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 662, 546–556.

- Chan, W. C. (2003). The effect of sample geometry on magnetic levitation force for a disk-shape YBCO superconductor. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 390(1), 27–30. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)02803-4](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)02803-4)
- Cheng, Y., Zheng, J., Huang, H., & Deng, Z. (2021). A reconstructed three-dimensional HTS bulk electromagnetic model considering J c spatial inhomogeneity and its implementation in a bulks' combination system. *Superconductor Science and Technology*, 34(12).
- Cheng, Y., Zheng, J., Huang, H., Bao, Y., Chen, N., & Deng, Z. (2022). Levitation Characteristics of High-Temperature Superconducting Bulks of Different Orientations and Arrays. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(6).
- Choi, J. S., Park, S. D., Jun, B. H., Han, Y. H., Jeong, N. H., Kim, B. G., & Kim, C. J. (2008). Levitation force and trapped magnetic field of multi-grain YBCO bulk superconductors. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 468(15–20), 1473–1476.
- Çakır, B., Öztürk, K., Güner, S. B., Çelik, & Aydinler, A. (2019). Magnetic properties of the welded joined TSMG Y123+x wt% Y211 (x=20 and 30) bulk superconductors. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 557, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.12.005>.
- Dadhich, A. (2021). Electromagnetic and Electrothermal modeling of superconductors for large scale applications. Slovak University Of Technology., Institute of Electrical Engineering, Doktora Tezi, Bratislava.
- Del Valle, N., Sanchez, A., Pardo, E., Navau, C., & Chen, D. X. (2007). Enhanced stability by field cooling in superconducting levitation with translational symmetry. *Applied Physics Letters*, 91(11).
- Deng, Z., Izumi, M., Miki, M., Tsuzuki, K., Felder, B., Liu, W., & Werfel, F. N. (2012a). Trapped flux and levitation properties of multiseeded YBCO bulks for HTS magnetic device applications-part II: Practical and achievable performance. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(2).
- Deng, Z., Tsuzuki, K., Miki, M., Felder, B., Hara, S. & Izumi, M., (2012b). Relaxation properties of the trapped flux of bulk High-Temperature Superconductors at different magnetization levels, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 25, 331-38.
- Deng, Z., Wang, J., Zheng, J., Jing, H., Lu, Y., Ma, G., & Wang, S. (2008). High-efficiency and low-cost permanent magnet guideway consideration for high-Tc superconducting maglev vehicle practical application. *Superconductor Science and Technology*, 21(11).
- Diko, P., Kaňuchov, M., Chaud, X., Odier, P., Granados, X., & Obradors, X. (2008). Oxygenation mechanism of TSMG YBCO bulk superconductor. *Journal of Physics: Conference Series*, 97(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/97/1/012160>.

- Douine, B., Male, G., Lubin, T., Mezani, S., Leveque, J., & Berger, K. (2014). Improvement of YBCO superconductor magnetic shielding by using multiple bulks. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. Springer New York LLC.
- Duman, Ş., Çakır, B., Başoğlu, M., Küçükömeroğlu, T., & Aydın, A. (2023). The effect of fabrication method on physical properties of different Y211 and 20% Ag2O added YBCO sample. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(15).
- Durrell, J. H., Ainslie, M. D., Zhou, D., Vanderbemden, P., Bradshaw, T., Speller, S., & Cardwell, D. A. (2018). Bulk superconductors: A roadmap to applications. *Superconductor Science and Technology*, 31(10).
- Durrell, J. H., Dennis, A. R., Jaroszynski, J., Ainslie, M. D., Palmer, K. G. B., Shi, Y. H., & Cardwell, D. A. (2014). A trapped field of 17.6 T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with shrink-fit steel. *Superconductor Science and Technology*, 27(8).
- Erciyas, A. (2022). Süperiletken Rüzgar Türbini Jeneratörlerinin Elektromanyetik Termal Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Erdem, Ü., & Türköz, M. B. (2020). Investigation of the Electrical and Structural Effects of Li Dopping on YBCO Ceramic Superconducting Materials Prepared with Nitrate Compounds. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 210–216.
- Fossheim, K. & Sudbo A., (2004). *Superconductivity Physics and Applications*, John Wiley.
- Grilli, F., Benkel, T., Hänisch, J., Lao, M., Reis, T., Berberich, E., ... Dadhich, A. (2020). Superconducting motors for aircraft propulsion: The Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1590). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1590/1/012051>
- Guner, S. B., Celik, S., & Tomakin, M. (2017). The investigation of magnetic levitation performances of single grain YBCO at different temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 705, 247–252.
- Güner, S. B., (2017). Levitasyon Uygulamaları İçin YBCO Tek Kristal Süperiletkenlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. R.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Rize.
- Halbach, K. (1985). Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings (invited). *Journal of Applied Physics*, 57(8), 3605–3608.
- Haran, K. S., Kalsi, S., Arndt, T., Karmaker, H., Badcock, R., Buckley, B., & Stautner, E. W. (2017). High power density superconducting rotating machines - Development status and technology roadmap. *Superconductor Science and Technology*. Institute of Physics Publishing.
- Houbart, M., Fagnard, J. F., Dular, J., Dennis, A. R., Namburi, D. K., Durrell, J. H., & Vanderbemden, P. (2023). How to overcome the demagnetization of superconducting Halbach arrays?. *Superconductor Science and Technology*, 36(11).

- Hull, J. R. (2000). Superconducting bearings. *Superconductor Science and Technology*, 13(2), R1–R15. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/2/201>
- Ichihara, T., Matsunaga, K., Kita, M., Hirabayashi, I., Isono, M., Hirose, M. & Koshizuka, N. (2005). Application of superconducting magnetic bearings to a 10 kWh-class flywheel energy storage system. In *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (Vol. 15, pp. 2245–2248).
- Jee, Y. A., Hong, G. W., Sung, T. Y., & Kim, C. J. (1998). *Physica C*, 304, 255–264.
- Karaahmet, Z. (2023). Süperiletken Maglev Araçların Statik Kuvvet Parametrelerinin Deneysel ve Nümerik Olarak Çok Yüzeyle (Multisurface) Hts-Pmg Etkileşimi Kullanılarak İyileştirilmesi. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Kircher, R., Klühspies, J., Palka, R., Fritz, E., Eiler, K., & Witt, M. (2018). Electromagnetic fields related to high speed transportation systems. *Transportation Systems and Technology*, 4(2), 152–166. <https://doi.org/10.17816/transsyst201842152-166>
- Kittel, C. (1996). *Katıhal fiziğine giriş*. Bilgitek Yayıncılık.
- Koyama, F., Akiyama, S., & Murakami, M. (2006). Developments of Superconducting Mixers for Medical Applications. *Superconductor Science and Technology*, 19, 572–574.
- Li, G. Z., Dong, L., & Deng, X. Y. (2015). A Novel Top-Seeded Infiltration Growth Technique for Fabricating Y-Ba-Cu-O Single-Grain Superconductor Nano-Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(9), 2707–2709.
- Moon, F.C. (2004). *Superconducting Levitation*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim.
- Naito, T., Sasaki, T., & Fujishiro, H. (2012). Trapped magnetic field and vortex pinning properties of MgB₂ superconducting bulk fabricated by a capsule method. *Superconductor Science and Technology*, 25(9).
- Nakamura, T., Tamada, D., Yanagi, Y., Itoh, Y., Nemoto, T., Utumi, H., & Kose, K. (2015). Development of a superconducting bulk magnet for NMR and MRI. *Journal of Magnetic Resonance*, 259, 68–75.
- Namburi, D. K., Shi, Y., & Cardwell, D. A. (2021). The processing and properties of bulk (RE)BCO high temperature superconductors: Current status and future perspectives. *Superconductor Science and Technology*. IOP Publishing Ltd.
- Namburi, D. K., Shi, Y., Palmer, K. G., Dennis, A. R., Durrell, J. H., & Cardwell, D. A. (2016). Control of Y-211 content in bulk YBCO superconductors fabricated by a buffer-aided, top seeded infiltration and growth melt process.
- Nariki, S., Sakai, N., & Murakami, M. (2005). Melt-processed Gd-Ba-Cu-O superconductor with trapped field of 3 T at 77 K. In *Superconductor Science and Technology* (Vol. 18).

- Ozturk, K., Abdioglu, M., & Karaahmet, Z. (2020). Magnetic force and stiffness performances of Maglev system based on multi-surface arrangements with three-seeded bulk YBaCuO superconductors. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 578. 12.
- Ozturk, K., Abdioglu, M., Sahin, E., Celik, S., Gedikli, H., & Savaskan, B. (2015). The effect of magnetic field distribution and pole array on the vertical levitation force properties of HTS Maglev systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(4).
- Ömür N. (2015). Enerji Depolamada Kullanılan Süperiletken Manyetik Yatakların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Pardo, E., Grilli, F., Liu, Y., Wolftadler, S., & Reis, T. (2019). AC Loss Modeling in Superconducting Coils and Motors with Parallel Tapes as Conductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5).
- Patel, A., (2013). Pulsed Field Magnetization of Composite Superconducting Bulks for Magnetic Bearing Application. University of Cambridge., Queen's Collage, Department of Materials Science and Metallurgy, Doktora Tezi, Cambridge.
- Patel, A., Baskys, A., Mitchell-Williams, T., McCaul, A., Coniglio, W., Hanisch, J., & Glowacki, B. A. (2018). A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape. *Superconductor Science and Technology*, 31(9).
- Rodriguez, E., Costa, F., ve Stephan, R. (2020). Vibration analysis of a superconducting magnetic bearing under different temperatures. In *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* (Vol. 63, pp. 119–131). IOS Press.
- Rose-Innes, A. C. ve Rhoderick, E. H., (1978). *Introduction to Superconductivity*, 2. Edition, Pergamon Press Ltd., England.
- Ruiz-Alonso, D., Coombs, T., & Campbell, A. M. (2004). Computer modelling of high-temperature superconductors using an A-V formulation. In *Superconductor Science and Technology* (Vol. 17). <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/5/042>
- Savaskan, B., Guner, S. B., Yamamoto, A., & Ozturk, K. (2020). Trapped magnetic field and levitation force properties of multi-seeded YBCO superconductors with different seed distance. *Journal of Alloys and Compounds*, 829.
- Savaskan, B., Koparan, E. T., Guner, S. B., Celik, S., & Yanmaz, E., (2016). The size effect on the magnetic levitation force of MgB2 bulk superconductors. *CRYOGENICS*, cilt.80, 108-114.
- Savaşkan, B., Koparan, E. T., Güner, S. B., Çelik, Öztürk, K., & Yanmaz, E. (2015). Effect of C4H6O5 Adding on the Critical Current Density and Lateral Levitation Force of Bulk MgB2.
- Sawano, K., Morita, M., Tanaka, M., Sasaki, T., Kimura, K., Takebayashi, S., & Miyamoto, K. (1991). High magnetic flux trapping by melt-grown ybacuo superconductors. *Japanese Journal of Applied Physics*, 30(7), L1157–L1159.

- Sawh, R. P., Weinstein, R., Carpenter, K., Parks, D., & Davey, K. (2013). Production run of 2 cm diameter YBCO trapped field magnets with surface field of 2 T at 77 K. *Superconductor Science and Technology*, 26(10).
- Schultz, L., De Haas, O., Verges, P., Beyer, C., Röhlig, S., Olsen, H., & Funk, U. (2005). Superconductively levitated transport system-the SupraTrans project. In *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (Vol. 15, pp. 2301–2305).
- Seeber, B., (1998). *Handbook of Superconductivity*, Volume 1, Institute of Physics Publishing, Bristol, U.K.
- Serway, R. A. (1996). *Fen ve Mühendislik için Fizik, Cilt 3: Modern Fizik*, 3. Baskıdan çeviri, Ankara: Palme Yayıncılık.
- Shi, Y. H., Nadendla H. B., Lida, K., Yeoh, W. K., Dennis, A. R., Pathak, S. K., & Cardwell, D. A. (2010). *Physica C*, 470, 685–688.
- Siamaki, M., Storey, J. G., Wiesehofer, L., & Badcock, R. A. (2022). Design, Build, and Evaluation of an AC Loss Measurement Rig for High-Speed Superconducting Bearings. *Energies*, 15(4).
- Sjöström, M. (2001). Hysteresis modelling of high temperature superconductors. École Polytechnique Fédérale de Lausanne., Communication Systems Department, Doktora tezi, Lozan.
- Sotelo, G. G., de Andrade, R., Dias, D. H. N., Ferreira, A. C., Costa, F., Machado, O. J., & Stephan, R. M. (2013). Tests With One Module of the Brazilian Maglev-Cobra Vehicle. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3), 3601204–3601204.
- Tang, W., Xiao, L., Ai, L., Miao, S., Wang, D., Han, R., & Fan, Z. (2023). A Novel Axial High-Temperature Superconducting Magnetic Bearing with Simple Structure and Large Suspension Force. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 33(4).
- Terzioğlu, R. & Çavuş, T. F. (2015). Enerji verimliliği ve süperiletken malzemeler. VI. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu ve Fuarı, Sakarya, Türkiye.
- Tomita, M., & Murakami, M. (2003). High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K. *Nature*, 421(6922), 517–520.
- URL-1. (2024, Aralık 04). Enerji depolama teknolojileri: https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2021/12/ENERJİ-DEPOLAMA_TEKNOLOJİLERİ.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2025, Temmuz 22). <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-maglev-train-market> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2025, Temmuz 23). <https://cordis.europa.eu/project/id/723119> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2025, Ağustos 18). <https://cesur.ankara.edu.tr/superiletkenlik-hakkinda/temel-ozellikler/> adresinden alınmıştır.

- Viznichenko, R., Velichko, A. V., Hong, Z., & Coombs, T. A. (2008). Advantage of superconducting bearing in a commercial flywheel system. *Journal of Physics: Conference Series*, 97(1).
- Wang, J., Wang, S., Zeng, Y., Huang, H., Luo, F., Xu, Z., Tang, Q., Lin, G., Zhang, C., Ren, Z., Zhao, G., Zhu, D., Wang, S., Jiang, H., Zhu, M., Deng, C., Hu, P., Li, C., Liu, F., Lian, J., Wang, X., Wang, L., Shen, X., & Dong, X., (2002). “The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world”, *Physica C*, 378-381, 5 pp.
- Xing, Y. (2022). Densification of MgB₂ superconducting cryomagnets: Synthesis and physical properties studies. Shibaura Institute of Technology., Doktora tezi, Tokyo.
- Yamagishi, K. (2019). Optimum design of integrated magnetic bearing using multiple HTS bulk units. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5).
- Yang, W. M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P. X., Zhang, C. P., Yu, Z. M., & Tang, X. D. (2002). The effect of grain-domain-size on levitation force of melt growth processing YBCO bulk superconductors. In *Brazilian Journal of Physics* (Vol. 32, pp. 763–767). Sociedade Brasileira de Fisica.
- Yang, Y., & Wu, Y. Y. (2021). Lateral magnetic stiffness under different parameters in a high-temperature superconductor levitation system. *Chinese Physics B*, 30(7).
- Yavuz, Ş. (2015). (Bi, Pb)-2223 Süperiletken Seramiklerin Yapısal Özellikleri Üzerine Nano-SnO₂ Parçacıklarının Etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Yıldız, İ. (2019). Volan ve Manyetik Tren Uygulamaları İçin Süperiletken Kaldırma Sistemlerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Yu, Z., Feng, W., Gu, Z., & Wen, C. (2020). Dynamic Electromagnetic Behaviors of High-Temperature Superconductor Levitation System Based on YBCO Material from 3D Perspective. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 33(3), 609–624.
- Zhang, H., Zhang, M., & Yuan, W. (2017). An efficient 3D finite element method model based on the T-A formulation for superconducting coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 30(2). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/30/2/024005>
- Zhou, J., Zhang, X. Y., & Zhou, Y. H. (2009). Influences of cooling height and lateral moving speed on the levitation characteristics of YBaCuO bulks. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 469(5–6), 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2009.01.012>
- Zmorayová, K., Diko, P., Volochová, D., Antal, V., Hlášek, T., Plecháček, V., & Antončík, F. (2023). Complex microstructural analysis of YBCO single-grain bulks with artificial holes: Effect on superconducting properties. *Ceramics International*, 49(13), 22177–22186.

ÖZGEÇMİŞ

Ali YILMAZ, Liseyi Trabzon Mesleki Teknik Anadolu Lisesi- Elektrik Elektronik Teknolojisi/Haberleşme Sistemleri alanında 2016 yılında tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesinde, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde başladı. 2020 yılında bu bölümden mezun oldu. Ertesi yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2024 yılında TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Lisansüstü Bursu ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından Lisansüstü Tez Projesi (BAP06) kazanmıştır. En son olarak da Yurt dışına lisansüstü öğrenim görmek üzere gönderilecek öğrencileri seçme ve yerleştirme (YLSY) bursunu kazandı.