

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**NUMUNE BOYUTU VE UYGULANAN MANYETİK AKI DAĞILIMININ Nd-Fe-B
VE Fe-B KATKILI Sm123 SÜPERİLETKENİNİN MANYETİK KUVVET
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat ABDİOĞLU

HAZİRAN 2011

TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**NUMUNE BOYUTU VE UYGULANAN MANYETİK AKI DAĞILIMININ Nd-Fe-B
VE Fe-B KATKILI Sm123 SÜPERİLETKENİNİN MANYETİK KUVVET
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Murat ABDİOĞLU

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (FİZİK)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20.05.2011
Tezin Savunma Tarihi : 16.06.2011**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK

TRABZON 2011

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalında

Murat ABDİOĞLU tarafından hazırlanan

**NUMUNE BOYUTU VE UYGULANAN MANYETİK AKI DAĞILIMININ Nd-Fe-B
VE Fe-B KATKILI Sm123 SÜPERİLETKENİNİN MANYETİK KUVVET
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 / 05 / 2011 gün ve 1407 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 16 / 06 / 2011 tarihinde yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ekrem YANMAZ

Üye : Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmada numune boyutu ve uygulanan manyetik akı dağılımının Nd-Fe-B ve Fe-B katkılı Sm123 süperiletkeninin kaldırma kuvvetine etkisi araştırıldı. Farklı katkı oranları ile Sm123 süperiletkeninin süperiletkenlik özellikleri geliştirilmeye çalışıldı.

Tez kapsamındaki çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında, SEM-EDX ölçümleri ise Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirildi. Ayrıca bu çalışma 2008.111.01.10 proje numarası ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir.

Tez çalışmamın her aşamasında değerli görüşlerini ve yardımlarını benden esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK' e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam sürecinde değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan, laboratuvarındaki her türlü olanakları kullanmama izin veren değerli hocam ve bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Ekrem YANMAZ' a teşekkür ederim. Çalışmalarım bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Süleyman BOLAT' a Şenol AKBULUT' a, Arş. Gör. Sezai KÜTÜK' e, Arş. Gör. Mehmet BAŞOĞLU' na, Arş. Gör. Fatih ERDEMİR' e, bölümdeki tüm hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlara teşekkür ederim.

Bu günlere gelmem için gerek maddi, gerek manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve sevgili nişanlım Özge ERDEM' e en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “NUMUNE BOYUTU VE UYGULANAN MANYETİK AKI DAĞILIMININ Nd-Fe-B VE Fe-B KATKILI Sm123 SÜPERİLETKENİNİN MANYETİK KUVVET ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç.Dr. Kemal ÖZTÜRK’ ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, 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.
16/06/2011



Murat ABDİOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri	3
1.2.1. Kritik Sıcaklık	3
1.2.2. Kritik Manyetik Alan.....	5
1.2.3. Kritik Akım	6
1.2.4. Nüfuz Derinliği.....	7
1.2.5. Meissner Olayı.....	9
1.3. I. ve II. Tip Süperiletkenler	12
1.4. Katkılı Süperiletkenlerin Özellikleri	13
1.5. Manyetik Kaldırma.....	15
1.5.1. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma.....	15
1.5.2. Manyetik Kaldırma Sistemleri	18
1.5.3. Sürtünmesiz Manyetik Yatak ve Manyetik Kaldırma	18
1.5.4. Aktif Elektromanyetik ve Pasif Süperiletken Yatak.....	21
1.5.4.1. Normal İletkenlerin Kullanıldığı Aktif Manyetik Yataklar.....	21
1.5.4.2. Pasif Süperiletken Yataklar	22
1.5.5. Manyetik Olarak Havalanmış Araçlar	24
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
2.1. $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ (Sm123) Bileşiğinin Hazırlanması.....	26
2.2. $\text{Sm}_2\text{BaCuO}_y$ (Sm211) Bileşiğinin Hazırlanması	29
2.3. Sm123 Bileşiğine Farklı Oranlarda Nd-Fe-B Manyetik Toz Katkılanması.....	30
2.4. $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ Bileşiğine Farklı Oranlarda Fe-B Manyetik Toz Katılması	30
2.5. Külçe Numunelerin Sinterleme ve Tavlama İşlemi	31

2.6.	Yapılan Ölçümler	32
2.6.1.	Diferansiyel Termal Analiz (DTA) Ölçümleri	32
2.6.2.	X-Işınımı Kırınımı (XRD) Ölçümleri	32
2.6.3.	Optik Mikroskop Ölçümleri	33
2.6.4.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümleri	33
2.6.5.	Düşük Sıcaklık Direnç Ölçümü	33
2.6.6.	Kaldırma Kuvveti Ölçümleri	34
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
3.1.	Giriş	36
3.2.	Yapısal Analiz	36
3.2.1.	DTA Analizi	36
3.2.2.	XRD Analizi	37
3.2.2.1.	Nd-Fe-B Katkılı Sm123 Süperiletken Numunelerin X-Işını Kırınım Desenleri....	37
3.2.2.2.	Fe-B Katkılı (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} Süperiletken Numunelerin X-Işını Kırınım Desenleri.....	38
3.2.3.	Optik Mikroskop Analizi.....	39
3.2.4.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	42
3.2.5.	Enerji Dağılımlı X-Işını Kırınımı (EDX) Analizi	44
3.3.	Fiziksel Analiz.....	46
3.3.1.	Sm123 Süperiletkeninin Direnç ve Kritik Geçiş Sıcaklığı Özellikleri.....	46
3.3.2.	Süperiletken Numunelerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri	47
3.3.2.1.	Nd-Fe-B Katkılı Sm123 Süperiletken Numunelerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri.....	48
3.3.2.2.	Fe-B Katkılı (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} Süperiletken Numunelerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri.....	49
3.3.2.3.	Mıknatıs ve Süperiletken Numune Boyutunun Kaldırma Kuvvetine Etkisi	51
4.	SONUÇLAR.....	55
5.	ÖNERİLER	57
6.	KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

NUMUNE BOYUTU VE UYGULANAN MANYETİK AKI DAĞILIMININ Nd-Fe-B
VE Fe-B KATKILI Sm123 SÜPERİLETKENİNİN MANYETİK KUVVET
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Murat ABDİOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kemal ÖZTÜRK
2011, 61 Sayfa

Bu çalışmada Sm123 süperiletkenine farklı miktarlarda Nd-Fe-B ve (Sm123)_{0,75}(Sm211)_{0,25} süperiletkenine farklı miktarlarda Fe-B tozları katılarak manyetik kaldırma ve çekme kuvvetinin iyileştirilmesi amaçlandı. Çalışmada MPMG (Melt-Powder-Melt-Growth) yöntemi kullanıldı. Numunelerin yapısal özellikleri diferansiyel termal analiz (DTA), X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını kırınımı (EDX) ve polarize optik mikroskop kullanılarak incelendi. Elektriksel özellikler PPMS (fiziksel özellikler ölçüm sistemi) kullanılarak R-T ve M-T ölçümleri ile; manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri ise kaldırma kuvveti ölçüm sistemi ile alanlı (FC) ve alansız (ZFC) soğutma rejimleri altında ölçülerek belirlendi.

Nd-Fe-B katkılı numunelerin manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerlerinin katkı miktarı ile azaldığı, Fe-B katkılı numunelerin ise katkı miktarı ile önce arttığı, daha fazla katkılarda ise azaldığı görüldü. Numune boyutunun manyetik kaldırma kuvveti üzerindeki etkisini gözlemek amacıyla üç farklı çapta Sm123 süperiletken numune üretildi. Üretilen farklı çaplı numunelerin ZFC rejimi altındaki manyetik kaldırma kuvvet değerleri karşılaştırıldığında, numune boyutu arttıkça manyetik kaldırma kuvvetinin de arttığı görüldü. Çalışmada ayrıca miknatis boyutunun da literatüre uygun olarak kaldırma kuvveti üzerinde etkili olduğu görüldü ve böylece bu konuda çalışacak araştırmacılara kaldırma kuvveti ile ilgili farklı seçenekler sunulmaya çalışıldı.

Anahtar Kelimeler: Sm123, Sm211 Katkısı, Manyetik Katkı, MPMG Yöntemi, Numune Boyutu, Miknatis Boyutu, Manyetik Kaldırma Kuvveti

Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF SAMPLE DIMENSION AND MAGNETIC FLUX DISTRIBUTION
ON THE MAGNETIC LEVITATION FORCE PROPERTIES OF Nd-Fe-B AND Fe-B
ADDED Sm123 SUPERCONDUCTOR

Murat ABDİOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program

Supervisor: Assoc. Prof. Kemal ÖZTÜRK
2011, 61 Pages

The aim of this study is to enhance the magnetic levitation force of Sm123 and $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ bulk samples by adding different amounts of Nd-Fe-B and Fe-B powders respectively. MPMG (Melt-Powder-Melt-Growth) method was used in this study. The structural properties of the samples were investigated by using differential thermal analysis (DTA), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), Energy dispersive X-ray analysis (EDX) and polarized optical microscope. The electrical properties were investigated by using PPMS (physical properties measurement system) by means of R-T and M-T measurements while the magnetic levitation force measurements were determined by using the magnetic levitation force measurements system. It was observed that, the magnetic levitation force values of Nd-Fe-B added samples decreased with increasing amount of magnetic impurity, while the magnetic levitation force values of Fe-B added samples first increased up to a saturation value after that decreased. To determine the effect of sample geometry on the magnetic levitation force, three Sm123 samples which have different radii were produced. When the magnetic levitation force values of produced samples under ZFC regime were compared, it was observed that magnetic levitation force increases with increasing of sample size. The effect of magnet size on the magnetic levitation force was also investigated. In this study, it was shown that the magnet size affects the magnetic levitation force as appropriate in literature.

Key Words: Sm123, Sm211 Adding, Magnetic Adding, MPMG Method, Sample Size, Magnet Size, Magnetic Levitation Force

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	(a) Metallerin öz direncinin sıcaklıkla değişimi, (b) süperiletkenin öz direncinin kritik sıcaklıkta sıfıra düşmesi (Rose ve Rhoderick, 1980).	4
Şekil 1.2.	Süperiletkenliğe geçiş kritik sıcaklıkları	5
Şekil 1.3.	Bir süperiletkende kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlılığı (Müler ve Ustinov, 1997).	6
Şekil 1.4.	Nb ₃ Sn ve Nb-Ti için süperiletken durum-normal durum geçişi (Moon, 2004). .	7
Şekil 1.5.	Manyetik akının süperiletken numunenin yüzeyinden içeri nüfuz etmesi (Rose ve Rhoderick, 1980).	8
Şekil 1.6.	Uygulanan manyetik alanın numuneden dışarılanması.....	9
Şekil 1.7.	İdeal bir iletkenin manyetik davranışı. (a)-(b) numune dışarıdan manyetik alan uygulanmadan soğutularak dirençsiz hale getirildi, (c) dirençsiz numuneye manyetik alan uygulandı, (d) manyetik alan kaldırıldı, (e)-(f) numune manyetik alan altında soğutuldu, (g) manyetik alan kaldırıldı (Rose ve Rhoderich, 1980).....	11
Şekil 1.8.	Süperiletkenin manyetik davranışı. (a)-(b) numune dışarıdan manyetik alan uygulanmadan soğutularak süperiletken hale getirildi, (c) süperiletken numuneye manyetik alan uygulandı, (d) manyetik alan kaldırıldı, (e)-(f) numune manyetik alan altında soğutuldu, (g) manyetik alan kaldırıldı (Rose ve Rhoderich, 1980).....	12
Şekil 1.9.	Süperiletkenlerin manyetizasyon eğrileri. (a) I. tip süperiletkenlerin manyetizasyon eğrisi, (b) II. tip süperiletkenlerin manyetizasyon eğrisi (Kittel, 2005).....	13
Şekil 1.10.	Bir mıknatıs, yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTS) üzerinde temas olmaksızın durmaktadır.....	15
Şekil 1.11.	ZFC rejiminde Sm-Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlılığı (Krabbes vd., 2006).	17
Şekil 1.12.	FC rejiminde Sm-Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlılığı (Krabbes vd., 2006).	17
Şekil 1.13.	İki geleneksel SY sistemi: (a) bilyeli yatak, (b) sıvı yatak (Moon, 2004).	19
Şekil 1.14.	Aktif kontrollü sürtünmesiz manyetik yatak (Moon, 2004).	20
Şekil 1.15.	Aktif kontrollü manyetik yatak (Moon, 2004).	22
Şekil 1.16.	Yüksek sıcaklık süperiletken radyal kılavuzlamalı manyetik yatak (Sung vd., 2003).	23
Şekil 1.17.	Pasif süperiletken manyetik yatak tipleri. EKMY, aksenal kılavuzlamalı manyetik yatak; RKMY, radyal kılavuzlamalı manyetik yatak (Moon, 2004)	23

Şekil 1.18. İki MK taşıma sistemi. (a) Elektromanyetik kaldırma (EMK) veya çekici yöntem. (b) Elektrodinamik kaldırma (EDK) veya itici yöntem (Moon, 2004)	25
Şekil 2.1. MPMG yöntemiyle hazırlanan külçe numuneler için ısıl işlem süreçleri	26
Şekil 2.2. Sm123 toz karışımının kalsinasyon işlemi şeması	27
Şekil 2.3. Kalsinasyon işleminden sonra elde edilen toz, Al ₂ O ₃ pota içerisinde	28
Şekil 2.4. Sm123 toz karışımının eritme ısıl işlem şeması	28
Şekil 2.5. Eritme işleminden sonra bakır plakaya dökülerek hızlı soğuması sağlanan Sm123 toz karışımı	29
Şekil 2.6. Sm211 toz karışımının kalsinasyon işlemi şeması	30
Şekil 2.7. Külçe numunelerin sinterleme ısıl işlem şeması	31
Şekil 2.8. Üretilen numunelerin tavlama ısıl işlem şeması	31
Şekil 2.9. Diferansiyel termal analiz (DTA) aletinin fotoğrafı	32
Şekil 2.10. Quantum Design PPMS sistemi	34
Şekil 2.11. Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm düzeneği (Çelik ve Öztürk, 2009)	35
Şekil 3.1. Eritme yöntemiyle üretilen Sm123 süperiletken numunenin başlangıç toz bileşiminden alınan DTA eğrisi	37
Şekil 3.2. Eritilmiş Sm123 süperiletken toz bileşiminden alınan DTA eğrisi	37
Şekil 3.3. Farklı Nd-Fe-B katkı oranlarında üretilen Sm123 numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	38
Şekil 3.4. Farklı Fe-B katkı oranlarında üretilen (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	39
Şekil 3.5. Katkısız numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı	40
Şekil 3.6. x=0,010 katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı	40
Şekil 3.7. x=0,015 katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı	41
Şekil 3.8. x=0,025 katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı	41
Şekil 3.9. x=0,050 katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı	42
Şekil 3.10. Fe-B manyetik tozuna ait SEM fotoğrafı	43
Şekil 3.11. Katkısız (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} numunesine ait SEM fotoğrafı	43
Şekil 3.12. x=0,025 Fe-B katkılı (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} numunesine ait SEM fotoğrafı	44
Şekil 3.13. Katkısız (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} numunesine ait EDX grafiği	45
Şekil 3.14. x=0,025 Fe-B katkılı (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} numunesine ait EDX grafiği	45
Şekil 3.15. Katkısız ve x=0,015 Nd-Fe-B katkılı Sm123 süperiletken numunelerin normalize dirençlerinin sıcaklığa göre değişimi	46
Şekil 3.16. Katkısız ve x=0,015 Nd-Fe-B katkılı Sm123 numunelerinin manyetizasyon değerlerinin sıcaklığa göre değişimi	47

Şekil 3.17. ZFC rejimi altında farklı Nd-Fe-B katkı oranlarındaki Sm123 süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi.....	48
Şekil 3. 18. FC rejimi altında farklı Nd-Fe-B katkı oranlarındaki Sm123 süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi.....	49
Şekil 3.19. ZFC rejimi altında farklı Fe-B katkı oranlarındaki (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi.....	50
Şekil 3.20. FC rejimi altında farklı Fe-B katkı oranlarındaki (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi.....	51
Şekil 3.21. Farklı boyutlardaki Sm123 numunelerinin ZFC rejimi altındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye göre değişimi.....	53
Şekil 3.22. KatkıSIZ Sm123 numunesinin farklı boyutlardaki mıknatıslarla ZFC rejimi altında ölçülen manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun düşey mesafeye göre değişimi	53
Şekil 3. 23. x=0,010 Fe-B katkılı (Sm123) _{0,75} (Sm211) _{0,25} numunesinin Farklı boyutlardaki mıknatıslarla ZFC rejimi altında ölçülen manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun düşey mesafeye göre değişimi	54

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Sm123 Başlangıç kompozisyonunun oluşturulmasında kullanılan tozlar ve bileşikteki miktarları.....	27
Tablo 2.2. Sm211 Başlangıç kompozisyonunun oluşturulmasında kullanılan tozlar ve bileşikteki miktarları.....	29
Tablo 3.1. Farklı Fe-B katkı oranlarındaki numunelerin örgü parametreleri.....	39
Tablo 3.2. Miknatis boyutları ve manyetik alan değerleri	51

SEMBOLLER DİZİNİ

a, b, c	: Örgü parametreleri
B	: Manyetik indüksiyon
E	: Elektrik alan
F_L	: Manyetik kaldırma kuvveti
H	: Manyetik alan
H_a	: Uygulanan manyetik alan
H_c	: Kritik manyetik alan
H_{c1}	: II. tip süperiletkenlerde alt kritik manyetik alan
H_{c2}	: II. tip süperiletkenlerde üst kritik manyetik alan
$H_c(0)$: Mutlak sıfır sıcaklığındaki üst kritik manyetik alan
J	: Akım yoğunluğu
J_c	: Kritik akım yoğunluğu
J_i	: İletim akımlarından kaynaklanan akım yoğunluğu
J_p	: Perdeleme akımlarından kaynaklanan akım yoğunluğu
m	: Manyetik moment
M	: Manyetizasyon
R	: Direnç
T	: Sıcaklık
T_c	: Kritik geçiş sıcaklığı
λ	: Nüfuz derinliği
ρ	: Özdirenç

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bazı metal ve alaşımlar, belirli bir sıcaklığın altına kadar soğutulduklarında elektriksel öz dirençlerinin aniden sıfıra düştüğü gözlenir. Süperiletkenlik olarak adlandırılan bu olay ilk defa H.K. Onnes tarafından bulundu. 1908 yılında helyumu sıvılaştırmayı başaran Onnes, çok geçmeden cıvanın sıvı helyum sıcaklığında (4,2 K) herhangi bir direnç göstermediğini gözledi (Onnes, 1911). Onnes, sıcaklığın düşmesiyle cıvanın direncinin beklendiği gibi düştüğünü fakat 4,2 K'de bu direncin aniden sıfıra düştüğünü gözledi. Metallerin elektriksel dirençlerinin mutlak sıfırda sıfıra gideceğinin bilindiği bu tarihe kadar, herhangi bir sonlu sıcaklıkta sıfır dirençli bir metalin var olabileceği bilinmiyordu. Bu tarih aynı zamanda düşük sıcaklık fizik araştırmalarına bir başlangıç oluşturmuş olup bu tarihten sonra süperiletkenliğe neden olan elektriksel ve manyetik özellikler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

İlk kez cıva elementinin Süperiletkenlik özelliği gösterdiğinin bulunmasından sonra çok geçmeden kurşun ve kalayın da benzer özelliklere sahip olduğu bulundu. En yüksek kritik geçiş sıcaklığına sahip olan element, Niyobyum (Nb)' dir (9,3 K).

Kritik sıcaklığın altında sıfır dirence sahip olmanın yanında, süperiletkenlerin çok ilgi çekici bir diğer özelliği de maruz kaldıkları manyetik akıyı dışarılamalarıdır. 1933 yılında W.H. Meissner ve R. Ochsenfeld, manyetik alan altında soğutulan bir süperiletkenin manyetik akıyı dışarıladığını ve bu malzemelerin H_c denilen kritik bir manyetik alandan daha büyük alanlarda süperiletkenlik özelliklerini kaybettiklerini gözlediler (Meissner ve Ochsenfeld, 1933). Bu olay Meissner olayı olarak bilinmektedir. Bu olayın açıklanması ise 1935 yılında London kardeşler tarafından yapılmıştır.

Normal hal ile süperiletken hal arasında bir ilişki olduğunu düşünen Ginzburg ve Landau, 1950 yılında süperiletkenliğin düzen parametrelerini tanımlayan makroskobik bir teori geliştirdiler ve London denklemlerini türettiler. Süperiletkenliğin doğasının anlaşılması için çeşitli çalışmaların yapıldığı bu yıllarda Fröhlich tarafından teorik olarak gözlenmiş olan bir olay da atomik kütle artmasıyla kritik sıcaklığın düşmesidir (Fröhlich, 1950). Bu olay, Maxwell tarafından yapılan deneysel çalışmalarla da aynı yıl doğrulandı (Maxwell, 1950). 1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından, BCS teorisi adı verilen mikroskobik bir teori geliştirildi. Bu teori, süperiletkenliğin doğasının

anlaşılmasına ışık tutması açısından son derece önemlidir. BCS teorisine göre süperiletkenlerde akan süper akımlar, Cooper çifti denilen bağlı elektronlarla taşınmaktadır (Bardeen vd., 1957). Süperiletkenlerin manyetik özellikleri ile ilgili çalışmalar yapan Bean, 1964 yılında süperiletkenleri karakterize eden kritik akım yoğunluğunun hesaplanabilmesi için alınganlık ve manyetizasyon eğrilerinden faydalanılabileceğini ileri sürdü (Bean, 1964). Bu tarihlerde süperiletkenlik alanında önemli bir gelişme de Brian D. Josephson tarafından 1962 yılında gerçekleştirildi. Josephson'a göre iki süperiletken malzeme arasına çok ince bir yalıtkan tabaka yerleştirildiğinde, bu süperiletkenler arasında bir elektron tünellemesi olabilmektedir. Bu düşünce 1973 yılında doğrulanmıştır.

1980'li yıllara kadar süperiletkenlikle ilgili önemli çalışmalar yapılmasına ve önemli gelişmeler kaydedilmesine rağmen; elde edilen süperiletken malzemelerin kritik sıcaklığın altına kadar soğutulabilmesi için sıvı helyuma ihtiyaç duyuluyordu. 1986 yılında Bednorz ve Müller'in La-Ba-Cu-O sisteminde 30 K değerinde bir kritik sıcaklık gözlemleri (Bednorz ve Müller, 1986) ile yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin temelleri atıldı ve daha yüksek sıcaklıklarda da süperiletkenliğin gözlenebilmesi için yapılan çalışmalar hız kazandı. Bednorz ve Müller'in çalışmasından sadece bir yıl sonra Alabama-Huntsville üniversitesinde araştırmacı Paul Chu ve grubu, Bednorz ve Müller'in çalışmasını daha da ileri götürdüler. Lantanyum yerine itriyum kullanan Chu ve grubu, günümüzde YBCO olarak isimlendirilen bileşikle 92 K geçiş sıcaklığını elde etmeyi başardılar. Bu, süperiletkenlik için sıvı helyuma bağıllığı ortadan kaldırması açısından son derece önemli bir çalışma oldu. Artık sıvı azot sıcaklığında (77 K) süperiletkenlikle ilgili çalışmalar yapılabilir hale geldi ve süperiletkenlikle ilgili çalışmalar bu sayede büyük bir ivme kazandı. Bu çalışmadan sonra aynı yıllarda $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ bileşiği ile 110 K, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ bileşiği ile 125 K ve $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ bileşiği ile 132 K geçiş sıcaklığına ulaşıldı (Maeda vd., 1988; Chu, 1988; Wu vd., 1987). Son yıllarda yeni bir süperiletken ailesi ortaya çıktı. Kamihara ve grubu, O^{2-} bölgesine F elementinin katılanması ile süperiletkenlik geçiş gösteren demir tabanlı dörtlü bileşikler ($\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$) buldular (Kamihara vd., 2008).

Süperiletkenliğin keşfinden bu güne kadar yapılan çalışmalar, süperiletkenlerin kritik sıcaklığını oda sıcaklığına çıkarabilmek üzerinde yoğunlaşmıştır. Tel şeklinde üretilen bir süperiletkenin oda sıcaklığında çalışabilmesi, bu telden geçecek olan akımın herhangi bir dirençle karşılaşmaması ve enerji kaybının sıfıra yakın olması anlamına gelmektedir. Meissner ve Ochsenfeld'in 1933 yılında süperiletkenlerin kendilerine uygulanan manyetik

akıyı dışarılamalarını keşfetmeleri ile süperiletkenler için farklı ve çok önemli bir kullanım alanı doğmuştur.

Günümüzde süperiletken temelli olmayan manyetik yataklar, manyetik olarak havalanmış trenler kullanılmaktadır. Bu sistemlerde asıl amaç, sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarını en aza indirmektir. Bununla birlikte bu sistemlerin karmaşık olmaları ile ilgili güvenilirlik sorunları, güç kaynağı, kontrol ünitesi ve elektronik devrelerde oluşabilecek hatalar gibi olumsuzlukları vardır. Süperiletken temelli olan sistemlerin ise herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç olmaması, daha düşük maliyet, daha düşük karmaşıklık ve dolayısı ile yüksek güvenirlige sahip olma gibi avantajları vardır. Bu nedenle günümüzde süperiletken temelli manyetik yataklar, manyetik olarak havalanmış trenler (MAGLEV trenleri) gibi araçlar geliştirilmeye çalışılmaktadır.

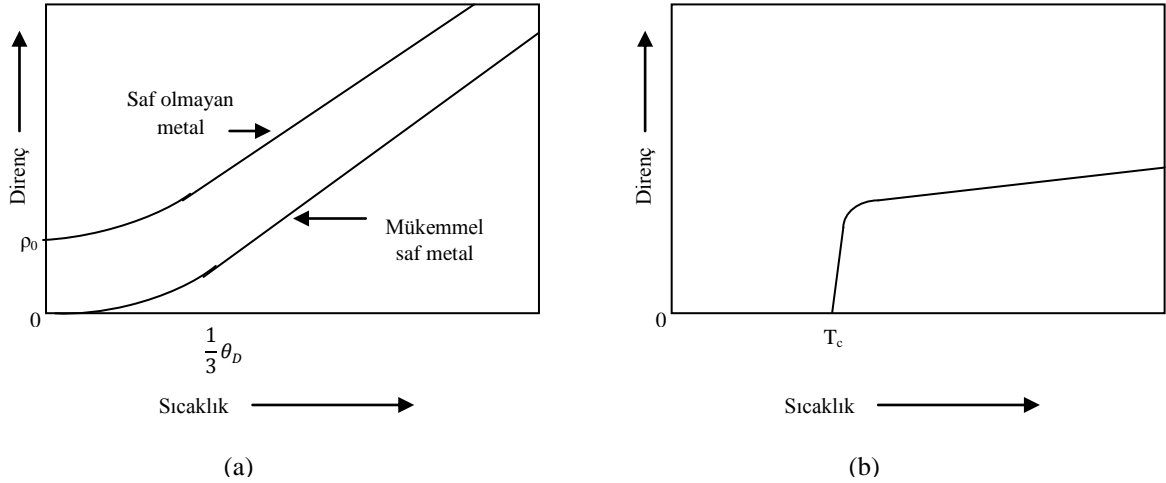
Bu çalışmanın amacı, farklı miktarlarda manyetik katkılar yaparak ve numune boyutunu değiştirerek manyetik kaldırma kuvvetini artırmak, böylece geliştirilmekte olan süperiletken temelli araçlara katkı sağlamaktır.

1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri

1.2.1. Kritik Sıcaklık

Metallerin ve alaşımlar soğutulduklarında elektriksel özdirençleri azalır. Bunu anlamak için bir iletkenin sahip olduğu direncin nereden kaynaklandığını anlamak gerekir. Bir iletkendeki akım, madde içinde serbestçe hareket eden elektronlar tarafından taşınır. Elektronlar dalga yapısına sahiptir ve madde içinde hareket eden bir elektron, aynı yönde ilerleyen bir düzlem dalga gibi davranır. Metaller, atomların düzenli bir örgü oluşturduğu kristal bir yapıya sahiptir. Düzlem dalgaların bir özelliği, ideal periyodik yapı içerisinde diğer yönlere saçılmadan geçebilmeleridir. Böylece bir elektron, mükemmel bir kristal içinden, momentumunda ve doğrultusunda bir değişim olmaksızın geçebilir. Yani; eğer mükemmel bir kristal içinden bir akım geçerse, bu akım herhangi bir dirençle karşılaşmaz. Bununla birlikte kristal örgüde, mutlak sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda, atomların titreşerek denge konumundan değişik miktarlarda yer değiştirmesinden ve kristal örgüde bulunan yabancı atomlarla kusurlardan kaynaklanan bozukluklar olabilmektedir. Termal titreşimler, safsızlıklar veya kusurlar, hareketli iletkenlik elektronlarının saçılmasına ve elektriksel dirence neden olurlar. Sıcaklık düşürüldüğünde atomların termal titreşimleri

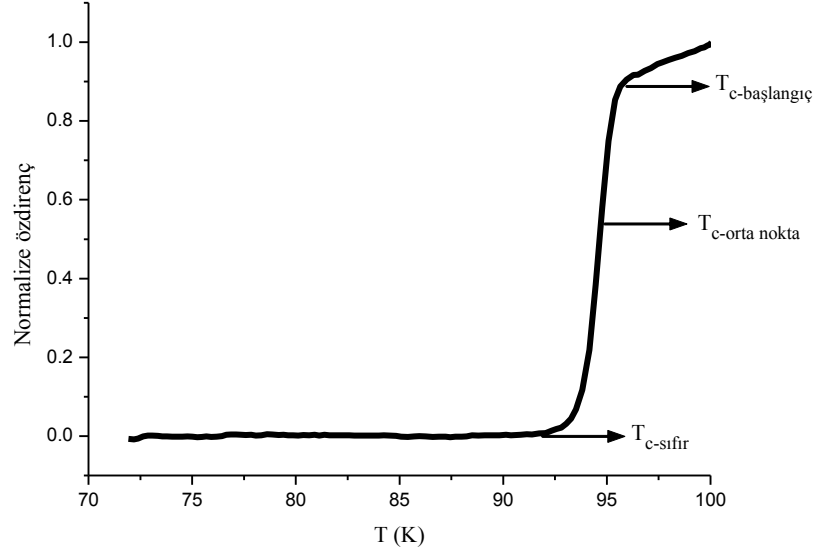
azalır ve böylece iletkenlik elektronları daha az saçılmaya uğratılır. Metallerin sıcaklığı, karakteristik Debye sıcaklığının üçte birine kadar azaltıldığında dirençteki azalma lineer olur. Bu sıcaklığın altında dirençteki azalma, sıcaklıktaki azalmadan daha yavaş olur (Şekil 1.1). Mükemmel saf bir metalde elektron hareketi sadece termal titreşimler tarafından engellenir ve sıcaklığın sıfıra düşürülmesiyle direnç sıfır olur. Sıfır direnç, mutlak sıfır sıcaklığına kadar düşmeyi gerektiren bir durumdur. Oysa süperiletkenlikte olay böyle değildir. Herhangi bir gerçek metal tamamen saf değildir ve bazı safsızlıklar içerir. Böylece elektronlar, örgü atomlarının termal titreşimlerine ek olarak safsızlıklar tarafından da saçılırlar. Bu saçılma sıcaklıktan hemen hemen bağımsızdır. Sonuç olarak en düşük sıcaklıkta bile bir artık direnç vardır. Bir metalin safsızlığı ne kadar çok ise bu artık direnç de o kadar fazla olur (Şekil 1.1 (a)). Bununla birlikte sıcaklığın düşürülmesi sırasında süperiletkenlerin gösterdikleri davranış farklıdır. Bu malzemeler soğutulduğunda elektriksel dirençleri bilindiği gibi azalır fakat belirli bir sıcaklıkta ve birkaç Kelvin sıcaklık aralığında elektriksel direnç aniden sıfıra düşer (Şekil 1.1 (b)). Süperiletken malzemenin bir karakteristiği olan bu sıcaklık kritik sıcaklık olarak adlandırılır. Kritik sıcaklığın altında süperiletken olan malzeme kritik sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda normal metal gibi davranır (Rose ve Rhoderick, 1980).



Şekil 1.1. (a) Metallerin öz direncinin sıcaklıkla değişimi, (b) süperiletkenin öz direncinin kritik sıcaklıkta sıfıra düşmesi (Rose ve Rhoderick, 1980).

Bir malzemenin normal-süperiletkenlik geçişi iki aşamada gerçekleşir. Taneli yapıdaki malzemelerde soğutma sırasında önce taneler süperiletken hale geçer. Bu durumun gerçekleştiği, yani malzemenin direncini kaybetmeye başladığı sıcaklığa

başlangıç kritik sıcaklığı ($T_{c\text{-başlangıç}}$) denir. Soğuma işlemi devam ederken tanelerin tamamen süperiletken hale geçtiği ve taneler arası etkileşimin başladığı sıcaklık, orta nokta kritik sıcaklık ($T_{c\text{-orta nokta}}$) olarak adlandırılır. Malzemenin tamamen süperiletken hale geçerek direncini kaybettiği sıcaklığa ise sıfır direnç kritik sıcaklığı ($T_{c\text{-sıfır}}$) denir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Süperiletkenliğe geçiş kritik sıcaklıkları

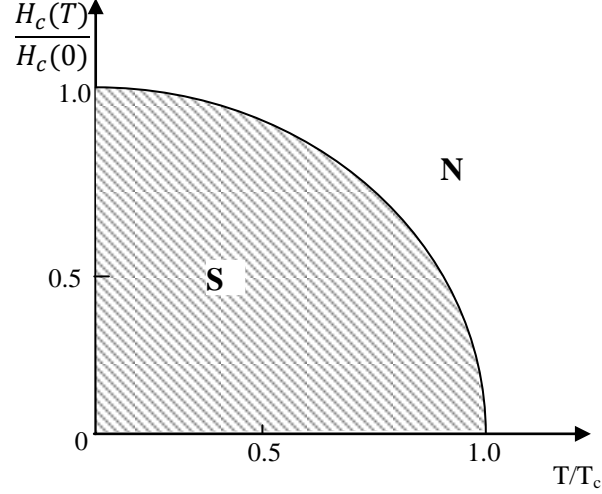
1.2.2. Kritik Manyetik Alan

Süperiletkenliğin ortadan kalkması için malzemenin kritik sıcaklığın üstüne kadar ısıtılmasının yanında, malzemeye yeterince büyük bir manyetik alan uygulanması da yeterlidir. Yani, bir süperiletken malzemenin süperiletkenlik özelliği gösterebilmesi için hem kritik sıcaklığın altına kadar soğutulmuş olmalı, hem de o malzemeye uygulanan manyetik alan, belirli bir değerin üstünde olmamalıdır. Süperiletkenliğin bozulduğu bu manyetik alan değerine kritik manyetik alan denir ve H_c ile gösterilir. Kritik manyetik alandan daha büyük alan altında kalan süperiletken malzeme normal hale döner. Kritik manyetik alan, sıcaklıkla değişir ve bu değişimin şu şekilde olduğu gözlenmiştir:

$$H_c(T) = H_c(0)[1 - (T/T_c)^2] \quad (1.1)$$

Mutlak sıfır sıcaklığında kritik manyetik alan değerinin maksimum ve kritik sıcaklıktaki kritik alan değerinin sıfır olacağı buradan görülmektedir. Bir süperiletken

malzemenin mutlak sıfırdaki kritik alan değerin belirlemek için belirli sıcaklıklardaki kritik alan değerleri bulunur, bu verilerden bir eğri çizilir ve elde edilen eğri 0 K' e uzatılır (ekstrapole edilir). Kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlılığı Şekil 1.3' de gösterilmiştir.

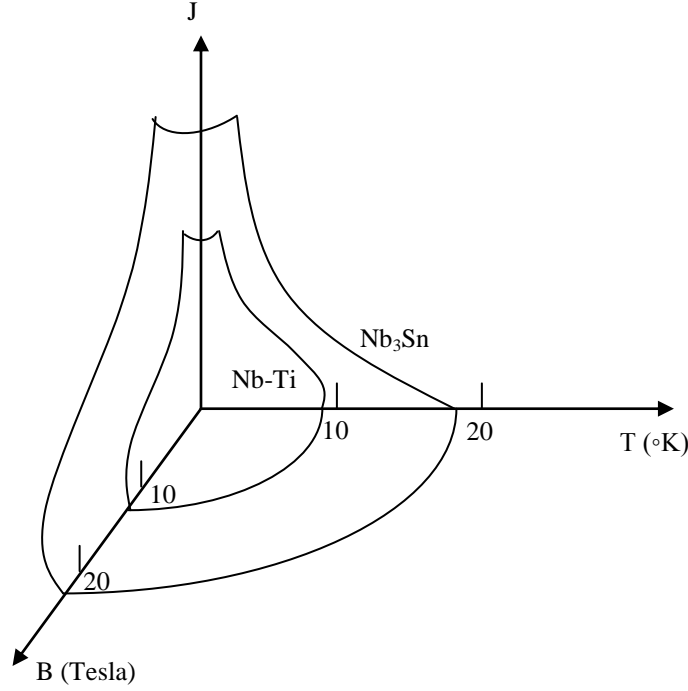


Şekil 1.3. Bir süperiletkende kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlılığı (Müler ve Ustinov, 1997).

1.2.3. Kritik Akım

Bir süperiletkenin yüzeyinden akan akıma genelde iki katkı vardır. Örnek olarak, bir süperiletken telden akım geçirildiğini düşünelim. Bu akım, yükleri telin içine ve dışına taşıdığı için transport (iletim) akımı olarak adlandırılır. Eğer bu teli bir manyetik alan içerisine koyarsak, metalin içerisindeki akı yoğunluğunu yok edecek şekilde perdeleyici akımlar dolaşır. Bu perdeleyici akımlar, iletim akımlarına katılırlar ve herhangi bir noktadaki akım yoğunluğu \vec{J} , iletim akımlarından kaynaklanan \vec{J}_i ve perdeleme akımlarından kaynaklanan \vec{J}_p akım yoğunluğunun $\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_p$ şeklinde bir toplamı olarak düşünülebilir (Rose ve Rhoderick, 1980). Süperiletken numuneye uygulanan manyetik alan çok büyük olduğunda süperiletkenlik ortadan kalkar. Bununla birlikte, iletim akımı da bir manyetik alan oluşturur. Böylece verilen bir alan ve sıcaklık değerinde akım için de bir limit değeri vardır. Bu değer üzerinde malzeme normal hale geçer. Bu özellikler Şekil 1.4' de gösterilmiştir. Kritik akım şiddeti numune geometrisine ve numunenin yapısal özelliklerine bağlıdır. Manyetik alan altında akım taşıyan tel şeklindeki bir süperiletken, eğer T, B ve J değerleri (T,B,J) uzayının çizdiği eğrilerin içinde bulunmazsa normal hale

geçer. Eğer bu üç değerden herhangi birisi bu eğrilerin dışında kalırsa malzeme dirençli olur (Moon, 2004).



Şekil 1.4. Nb₃Sn ve Nb-Ti için süperiletken durum-normal durum geçişi (Moon, 2004).

1.2.4. Nüfuz Derinliği

Süperiletkenler, içerilerinde bir manyetik alan olmasına izin vermezler. Uygulanan manyetik alanın numuneye girmesini engellemek için süperiletkenlerin yüzeyinde bir akım dolaşır ve bu akım sayesinde uygulanan manyetik alana karşı koyacak bir manyetik alan oluşturulur. Bununla birlikte, süperiletkenlerden geçen akımın tamamıyla yüzeyden aktığını düşünmek doğru olmaz. Akımın tamamen yüzeye hapsedilmesi, akım tabakasının herhangi bir kalınlığının olmaması ve bu da akım yoğunluğunun sonsuz olması anlamına gelir ki bu, fiziksel olarak imkânsızdır. Akımlar aslında kalınlığı çok az olan (farklı malzemeler için değişiklik göstermekle beraber 10^{-5} cm civarında) bir yüzey tabakasından akarlar. Çok ince gibi görünen bu tabaka süperiletkenin özelliklerini tanımlamada önemli bir yer tutar.

Süperiletken numune uygulanan bir manyetik alanın içindeyken, içerideki akıyı yok etmek için dolanan perdeleme akımları yüzey tabakasından akar. Az da olsa bu tabakanın

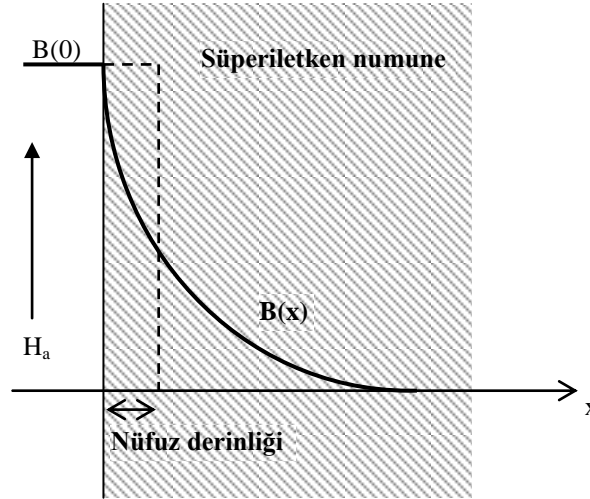
belirli bir kalınlığı olduğundan, akı yoğunluğu numunenin sınırında aniden sıfıra düşmez; perdeleme akımlarının aktığı tabakada yavaş yavaş sıfıra düşer. Bu nedenle, içinden perdeleme akımlarının aktığı bu derinliğe nüfuz derinliği denir.

Süperiletkenler ideal diamanyetik olarak bilinmelerine rağmen aslında manyetik akının numuneye az da olsa nüfuzu söz konusudur. Nüfuz derinliğini tanımlayabilmek için Şekil 1.5’ de gösterilen yarı-sonsuz bir tabakayı düşünelim. Numunenin yüzeyinde $B(0)$ değerinde olan manyetik akı yoğunluğu, numunenin sınırından x kadar uzaklıkta $B(x)$ değerine düşerse, nüfuz derinliğini şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\int_0^{\infty} B(x) dx = \lambda B(0) \quad (1.2)$$

London teoremine göre, nüfuz derinliğinden daha kalın numunelerde akı yoğunluğu numune içerisine girerken üstel olarak azalır (Rose ve Rhoderick, 1980).

$$B(x) = B(0) e^{-x/\lambda} \quad (1.3)$$



Şekil 1.5. Manyetik akının süperiletken numunenin yüzeyinden içeri nüfuz etmesi (Rose ve Rhoderick, 1980).

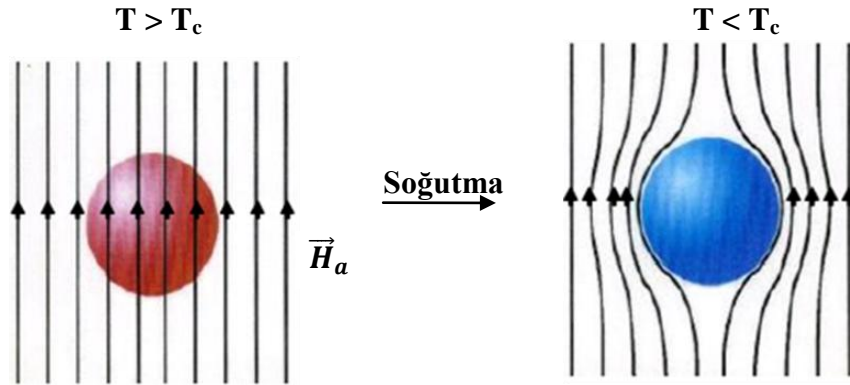
1.2.5. Meissner Olayı

Süperiletkenlerin karakteristik özelliklerinden biri de kendilerine uygulanan manyetik alanı dışarılamalarıdır. Bu durum, enine uygulanmış bir manyetik alan içindeki silindirik bir iletken için Şekil 1.6' da gösterilmiştir. Manyetik alan, kritik sıcaklık T_c 'nin üstündeki sıcaklıklarda iletkenin sınırından girer. T_c 'nin altında ve küçük manyetik alan değerlerinde, iletken yüzeyine yakın ince bir tabaka haricindeki yerlerde manyetik akı dışarılanacaktır. Manyetik alanın yeterince küçük değerleri için bu dışarılama bütünüyle gerçekleşir ve bu olaya Meissner olayı denir. Bu olay, süperiletkenin sınırına yakın yerlerde akan sürekli akım tarafından gerçekleştirilir. Manyetik akının bir malzemeden dışarılanması olayı diamanyetizma olarak bilinir. Bu malzemeler, negatif manyetik alınganlık sabitine sahiptir (Moon, 2004).

Süperiletkenlerin, kendilerine uygulanan manyetik alanı dışarıladıkları Maxwell denklemlerinden faydalanılarak kolayca gösterilebilir. Faraday' ın indüksiyon kanununa göre manyetik alanın zamanla değişimi bir elektrik alan indüklenmesine neden olur:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

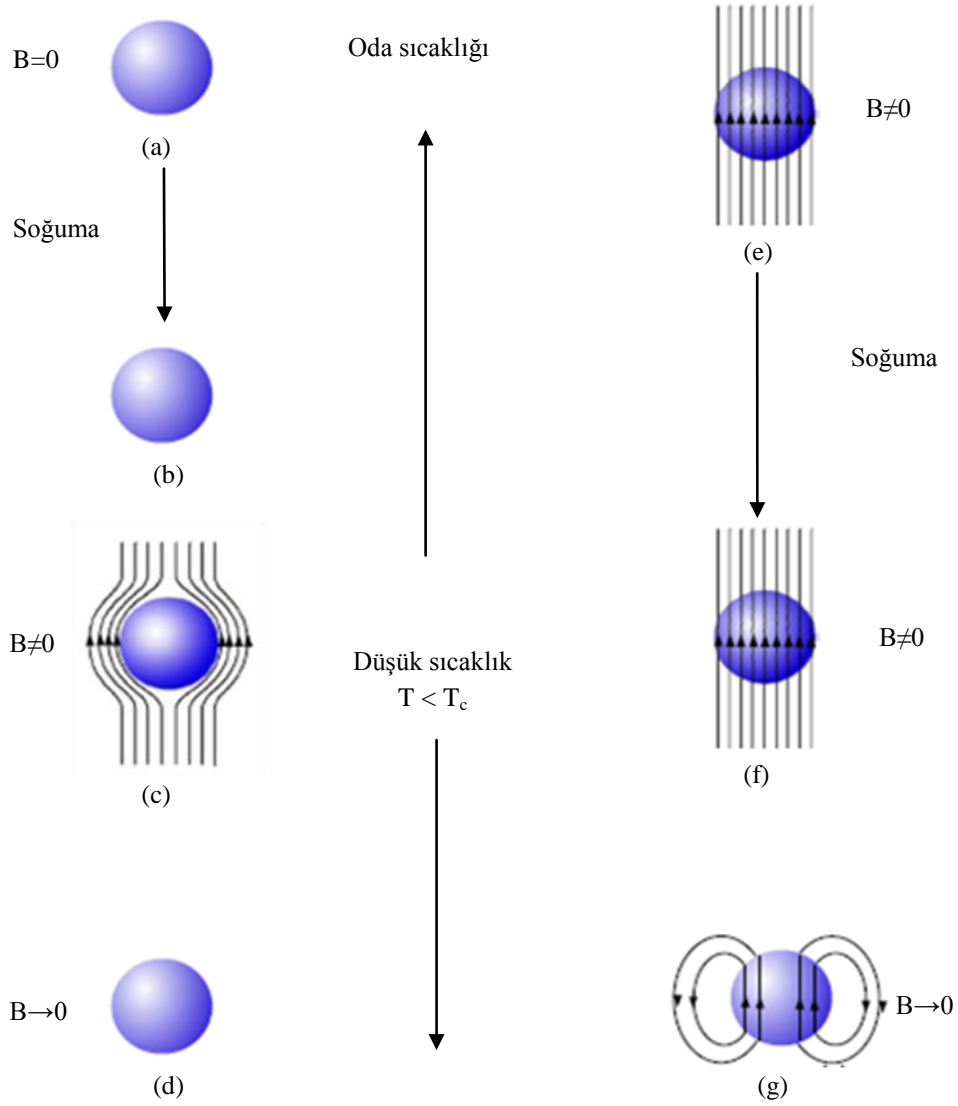
Elektrik alanı \vec{E} ' nin, öz direnç (ρ) ve akım yoğunluğu (\vec{J}) cinsinden ifade edildiği $\vec{E} = \rho \vec{J}$ eşitliğine göre öz direnç sıfır olduğunda elektrik alan da sıfır olacaktır. Elektrik alanın sıfır olması ise (1.4) eşitliğine göre $-\partial \vec{B} / \partial t = 0$ olacağını gösterir. Bu durumda, süperiletken numune içindeki manyetik indüksiyonun zamanda değişmeyeceği anlaşılır.



Şekil 1.6. Uygulanan manyetik alanın numuneden dışarılanması

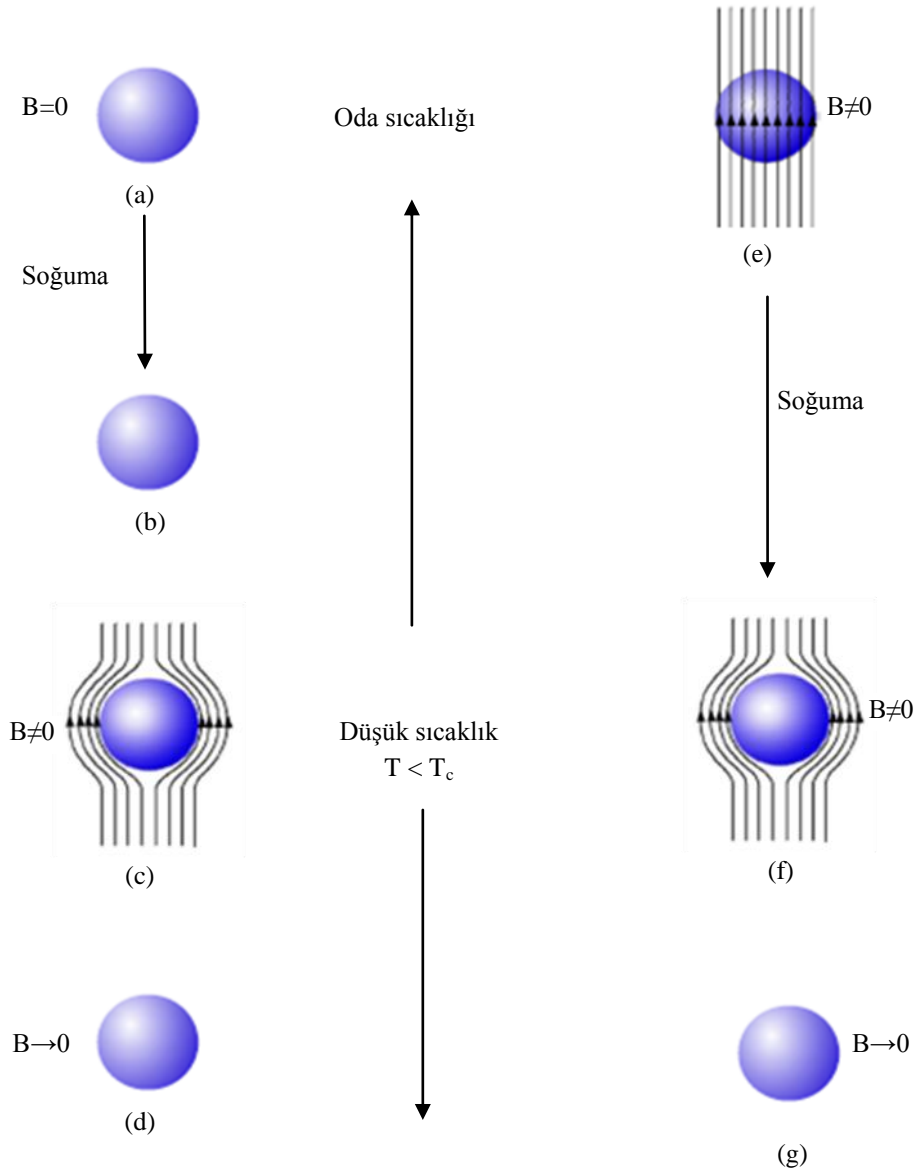
Meissner ve Ochsenfeld'in 1933 yılında süperiletkenlerin manyetik alanı dışarıladıklarını keşfetmelerine kadar, süperiletkenler ideal iletkenler olarak biliniyordu. Süperiletkenlerin kritik sıcaklığın altına kadar soğutulduklarında sıfıra çok yakın bir direnç göstermelerine karşın, bu malzemeleri ideal iletkenlerden ayıran çok belirgin bir fark vardır.

İdeal bir iletkeni manyetik alan uygulanmaksızın kritik sıcaklığın altına kadar soğutalım. Sonra numuneye manyetik alan uygulayalım. Manyetik alan ideal iletkenin yüzey tabakasına nüfuz ettiğinde, Lenz kanunu gereğince numune yüzeyinde, uygulanan manyetik alana karşı koyacak bir alan üretebilmek için bir akım oluşur. Bu akım tarafından oluşturulan alan, numune içerisindeki toplam manyetik alanın sıfır olmasını sağlar (Şekil 1.7 (a)-(d)). Şimdi ideal iletken numune normal halde iken manyetik alan uygulandığını düşünelim. Daha sonra numuneyi direnci sıfır olacak şekilde soğutalım. Direncin sıfır olması manyetizasyona bir etki yapmaz ve numune içindeki akı dağılımı değişmez kalır. Uygulanan manyetik alanın kaldırılmasıyla, numune içerisindeki manyetik alan değişimine karşı koymak için numune üzerinde sürekli akımlar oluşur ve bunun sonucunda da numune sürekli mıknatıslık kazanır (Şekil 1.7 (e)-(g)). Buradan görülür ki ideal bir iletkenin manyetizasyon durumu yalnızca dış koşullara değil, bu dış koşulların hangi sıra ile değiştirildiğine de bağlıdır.



Şekil 1.7. İdeal bir iletkenin manyetik davranışı. (a)-(b) numune dışarıdan manyetik alan uygulanmadan soğutularak dirençsiz hale getirildi, (c) dirençsiz numuneye manyetik alan uygulandı, (d) manyetik alan kaldırıldı, (e)-(f) numune manyetik alan altında soğutuldu, (g) manyetik alan kaldırıldı (Rose ve Rhoderich, 1980).

Meissner ve Ochsenfeld'in gözlediği Meissner olayı, süperiletkenlerde bu durumun çok farklı olduğunu göstermiştir. Bir süperiletken manyetik alan altında soğutulduğunda, içerideki akı yoğunluğunu yok edecek şekilde numune yüzeyinde sürekli akımlar oluşur. Bu durum, manyetik alanın numunenin soğutulmasından sonra uygulanmasıyla tamamen aynı şekilde gerçekleşir (Şekil 1.8). Süperiletkenlerin manyetizasyonu, uygulanan manyetik alanın ve sıcaklığın hangi sırayla uygulandığına değil, bunların gerçek değerlerine bağlıdır (Rose ve Rhoderick, 1980).

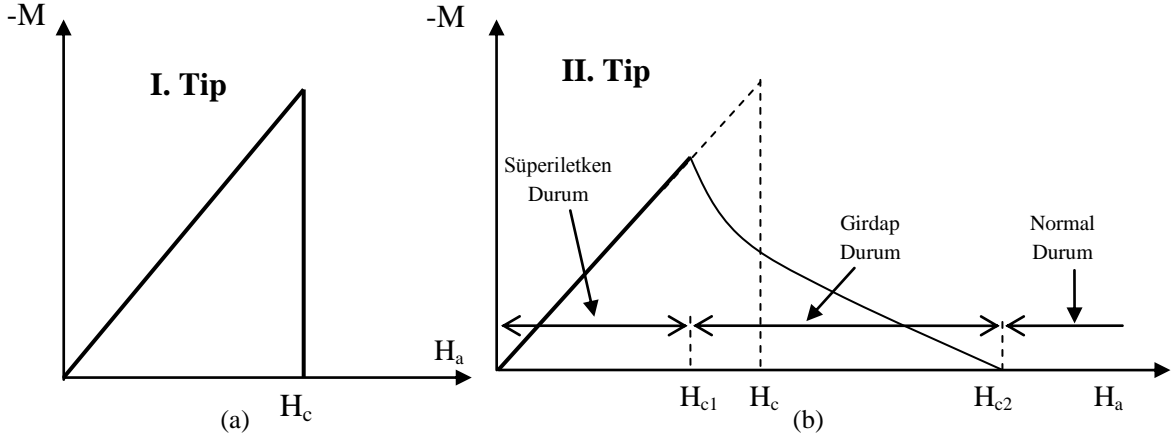


Şekil 1.8. Süperiletkenin manyetik davranışı. (a)-(b) numune dışarıdan manyetik alan uygulanmadan soğutularak süperiletken hale getirildi, (c) süperiletken numuneye manyetik alan uygulandı, (d) manyetik alan kaldırıldı, (e)-(f) numune manyetik alan altında soğutuldu, (g) manyetik alan kaldırıldı (Rose ve Rhoderich, 1980).

1.3. I. ve II. Tip Süperiletkenler

Süperiletkenler manyetik alan altında gösterdikleri davranışa göre I. tip ve II. tip olmak üzere iki guruba ayrılırlar. Nb dışındaki tüm süperiletkenlerin saf numuneleri I. tip davranış gösterirler ve onların süperiletkenlikleri, uygulanan düşük bir manyetik alan ile bozulur. Yani I. tip süperiletkenlerin kritik manyetik alan değerleri (H_c) oldukça düşüktür. II. tip süperiletkenler genellikle normal durumlarında yüksek elektriksel dirence sahip, yani

ortalama serbest yolları küçük olan alaşım veya geçiş metallere I. ve II. tip süperiletkenlerin manyetizasyon eğrileri farklıdır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Süperiletkenlerin manyetizasyon eğrileri. (a) I. tip süperiletkenlerin manyetizasyon eğrisi, (b) II. tip süperiletkenlerin manyetizasyon eğrisi (Kittel, 2005).

I. tip süperiletkenlerde H_c kritik alandan daha büyük değerlerde numune normal durumdadır ve manyetizasyon görülemeyecek kadar küçüktür. II. tip süperiletkenlerde H_c kritik alandan daha aşağıda bir H_{c1} alt kritik alan vardır. H_{c1} 'den daha düşük alan değerlerinde, ideal bir II. tip süperiletken, mükemmel diamanyet olarak davranır ve numune içerisine manyetik akı giremez. Uygulanan alan H_{c1} değerinden itibaren numune içine girmeye başlar. H_{c1} ile H_{c2} arasında kalan alan değerlerinde numunede öbekler halinde manyetik akı oluşur ve buna girdap durumu denir. II. tip süperiletkenlerde H_{c2} üst kritik alanına kadar süperiletkenlik devam eder. H_{c2} değerinden daha büyük alan değerlerinde numune, bazı yüzey etkileri hariç, tamamen normal haldedir. Belirli bir H_c değeri için manyetizasyon eğrisinin altında kalan alan I. tip ve II. tip süperiletkenler için aynı olur (Kittel, 2005).

1.4. Katkılı Süperiletkenlerin Özellikleri

YBCO süperiletkeni ile karşılaştırıldığında, $RE_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_{6+\delta}$ (RE: Nd, Sm, Gd, Yb) süperiletkenlerinin, manyetik alanda daha yüksek J_c , T_c ve tersinmezlik alan değerine sahip olduğu yapılan çalışmalarda gözlenmiştir. Özellikle NdBCO süperiletkeni 96 K'lik geçiş sıcaklığı ile REBCO bileşenleri arasında dikkat çekmektedir. Yapılan son

çalışmalarda, RE elementlerinin YBCO süperiletken yapısında Ba ile yer değiştirdiği (Gd/Ba ve Nd/Ba) ve değişim oranına bağlı olarak çivileme yoğunluğunun ve J_c ' nin arttığı bulunmuştur (Koshizuka vd., 2001).

Sm123 ve Gd123 süperiletkenleri, Y123'ten daha büyük süperiletkenlik geçiş sıcaklığına (T_c) ve 77 K' de daha büyük kritik akım yoğunluklarına sahiptir. Ayrıca Sawamura ve Morita'nın (Sawamura ve Morita, 2001; Sawamura ve Morita, 2002) yaptıkları çalışmalarda, Sm123 süperiletken Y123 daha büyük manyetik alan tuzaklama değerlerine sahip olduğu görüldü (Sm123 ve Y123 numuneleri için tuzaklanan alan değerleri sırasıyla 1.3 ve 1 T).

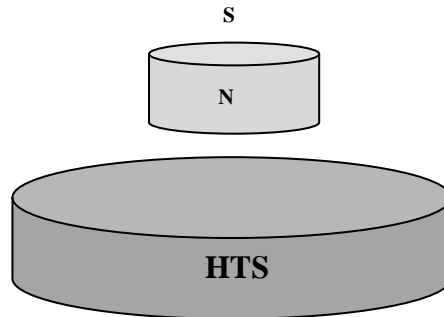
Literatürde yapılan bazı çalışmalarda, süperiletken bileşimlere yapılan nanometre-mikrometre ölçeğindeki manyetik toz katkısının, numune içerisinde akı çivileme (pinning centre) merkezleri olarak görev yaptığı belirtilmiştir. Bu çalışmalarda Fe-B ve Fe_2O_3 gibi manyetik tozların, Gd123 ve $(Bi_{1.6}Pb_{0.4})Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ gibi yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin akı çivileme ve kritik akım yoğunluğu özelliklerini iyileştirdiği rapor edilmiştir. (Xu vd., 2009; Lau vd., 2006). Fujimoto' nun yaptığı bir çalışmada YBCO süperiletkenine %0, %10 ve %20 oranlarında gümüş katılmış, katkı miktarının artmasıyla numunelerin bükülmeye karşı dayanıklılığının arttığı gözlenmiştir (Fujimoto, 2005). Eritme-büyütme (melt-textured) yöntemiyle hazırlanan Y123 bileşiğine Ag_2O katkısının, numunenin kritik akım yoğunluğu ve tersinmezlik çizgisi ve manyetik kaldırma kuvveti gibi süperiletkenlik parametrelerini artırdığı bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda kritik akım yoğunluğunun artmasının birinci nedeni, Ag_2O ilavesiyle numunedeki mikro çatlak yoğunluğunun azalması şeklinde açıklanmaktadır (Diko, 2001) . Hu ve arkadaşlarının (Sm, Eu, Gd) $Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ süperiletkeni üzerinde yaptıkları çalışmalarda BaO_2 katkısı ile malzemenin süperiletkenlik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir (Hu vd., 2004, Hu vd., 2004). Sm123 süperiletkenine nano ölçekli RE211 katkısının kritik akım yoğunluğunu ve akı çivileme merkezlerini artırdığını gösteren çalışmalar da literatürde bulunmaktadır (Chen vd., 2004, Feng vd., 2003). Y123 süperiletkeni üzerinde yapılan benzer bir çalışmada Y123 süperiletkenine nano ölçekte Y211 ve Y2411 fazları katılanmış, yapılan katkının kritik akım yoğunluğunu artırdığı gözlenmiştir (Babu vd., 2007). Sm123 süperiletkenine nanokristal Sm211 ve Nd422 katkısının yapıldığı bir çalışmada katkı miktarı ile kritik akım yoğunluğunun ve akı çivileme merkezlerinin arttığı, süperiletkenliğe geçişin daha keskin bir şekilde gözlemlendiği belirtilmiştir (Hsieh vd., 2004). Benzer bir çalışmada Nd123 süperiletkenine Nd422 katkısı yapılmış, katkının kritik sıcaklık üzerinde

belirgin bir etkisi olmamakla birlikte, geçiş aralığını artırdığı gözlenmiştir (Kaiser vd., 1998). Shlyk ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada YBCO süperiletkenine Ni ve Li katkısı yapılmış, her iki katkının da numunede tuzaklanan manyetik akıyı artırdığı fakat bu artışın Li katkısında daha fazla olduğu gözlenmiştir (Shlyk vd., 2003).

1.5. Manyetik Kaldırma

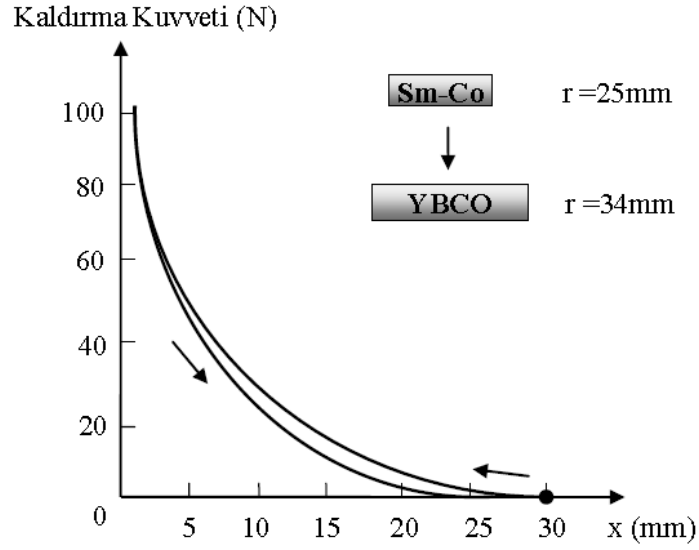
1.5.1. Süperiletkenlerde Manyetik Kaldırma

Manyetik kaldırma (MK), bir cismin herhangi bir fiziksel desteğe ihtiyaç duymaksızın havada kalması olayıdır. Yerçekimi kuvvetine karşı koyarak bir cismi havada tutabilme düşüncesi, çok eski tarihlerden beri var olmuştur. Süperiletkenlerin gösterdiği bu eşsiz olay sayesinde sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybı yok denecek kadar az olmaktadır. C.W.Chu ve arkadaşları tarafından $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Y123) bileşiğinin 93 K'de süperiletkenlik gösterdiğinin bulunması ve bu bileşiğin manyetik cisimleri havada tutması, 1987 yılından itibaren bilim insanlarının bu alanda yoğunlaşmalarını sağlamıştır (Şekil 1.10). Değişik araştırmacılar tarafından daha sonra üretilen Gd123, Sm123 ve Yb123 gibi süperiletkenlerin benzer özellikler göstermesi bu süperiletkenlerin, MK özelliğine bağlı olarak kayıpsız enerji kazanımları sağlayacak bazı araştırmaların başlamasını teşvik etmiştir. Bunlar arasında, süperiletkenlerin manyetik yatak, enerji depolayan dönen çark, güçlü süperiletken mıknatıs ve manyetik olarak havalanmış ulaşım araçları (Maglev trenleri) gibi büyük teknolojik enerji kazanımları sağlayacak temassız sistemlerin üretimi sayılabilir.

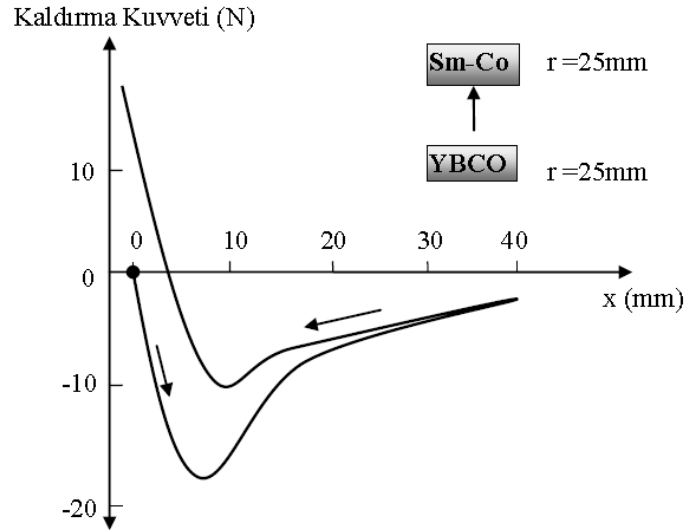


Şekil 1.10. Bir mıknatıs, yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTS) üzerinde temassızın durmaktadır

Bir süperiletken ile kalıcı mıknatıs (KM) arasındaki etkileşme kuvveti, manyetik alan ile süperiletken içinde indüklenen akım arasındaki etkileşmeden kaynaklanır. Bu kuvvet, süperiletkenin kritik akım yoğunluğu ve mıknatısın manyetizasyonu gibi iç özelliklere bağlı olmakla birlikte aynı zamanda mıknatıs ve süperiletkenin boyutlarına ve bunların birbirlerine göre konumlarına da bağlıdır (Ma vd., 2003). Manyetik kaldırma kuvveti (MKK), numune kalınlığına (Kütük vd., 2009, Sagar vd., 1997) ve numunenin yüzey alanına bağlıdır. Ancak, yüzey alanı MKK üzerinde kalınlıktan daha etkilidir (Yamachi vd., 2003). Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda, süperiletken ile mıknatıs arasındaki MKK' nın; mıknatıs sayısına, mıknatıs konfigürasyonuna ve mıknatıs boyutuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür (Yang vd., 2001, Yang vd., 2003). Bu çalışmalarda, süperiletken ve mıknatıs boyutu arttıkça, MKK' nın da arttığı ve mıknatıs boyutu süperiletken boyutuna eşit olduğunda, bu kuvvetin maksimum değerine ulaştığı tespit edilmiştir Chan, yaptığı bir çalışmada süperiletken numune boyutunun MKK üzerinde etkili olduğunu gözlemiştir (Chan, 2003). Süperiletken numunenin boyutunun artmasıyla numunede tuzaklanan manyetik alan şiddetinin de arttığı literatürde belirtilmiştir (Ikuta vd., 1998). MKK' yı etkileyen diğer bir etken de soğutma şartlarıdır. Süperiletken ile mıknatıs arasındaki manyetik kuvvetin, süperiletkenin manyetik alan altında (FC) ve alansız (ZFC) soğutma durumlarına da bağlı olarak değiştiğini gösteren birçok çalışma yapılmıştır (Hull ve Cansız, 1999). Yapılan çalışmalar sonucunda Yang ve arkadaşları, daha büyük kaldırma kuvvetinin (veya itici kuvvet) ZFC durumunda, daha fazla çekici kuvvetin ise FC durumunda sağlanacağını belirtmişlerdir (Yang vd., 2003, Moon, 2004). Kaldırma kuvvetini etkileyen diğer bir etken de süperiletken numunenin sıcaklığıdır. Süperiletken numunenin sıcaklığı geçiş sıcaklığından başlayarak azaltıldıkça MKK değerlerinin arttığı gözlenmiştir (Jiang vd., 2002). Manyetik kaldırma kuvveti, süperiletken numune ile mıknatıs arasındaki mesafeye göre değişiklik göstermektedir. Şekil 1.11' de ZFC rejiminde Sm-Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlılığı görülmektedir. Şekil 1.12' de ise FC rejimindeki durum görülmektedir.



Şekil 1.11. ZFC rejiminde Sm-Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağılılığı (Krabbes vd., 2006).



Şekil 1.12. FC rejiminde Sm-Co mıknatıs ile YBCO disk arasındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağılılığı (Krabbes vd., 2006).

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, süperiletkenlerde kaldırma ve çekme kuvvetini artırabilmek için numune ve mıknatıs boyutları ile soğutma şartlarının uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Süperiletken ile mıknatıs arasında oluşan kaldırma kuvveti

(F_L), süperiletkende oluşan manyetik momentle doğru orantılı olup bir boyutta bu kuvvet,

$$F_L = m(dH/dz) \quad (1.5)$$

$$m = MV \text{ ve } M = AJ_c r \quad (1.6)$$

ifadeleri ile verilir (Murakami vd., 1991) . Burada m , süperiletkenin manyetik momentini; dH/dz , dış manyetik kaynak (mıknatıs) tarafından oluşturulan alan değişimini; M , birim hacimdeki manyetizasyonu; V , numune hacmini; A , numune geometrisine bağlı bir sabiti; J_c , süperiletkenin kritik akım yoğunluğunu ve r , uygulanan dış manyetik alanı dışarılamak için süperiletkende oluşan koruyucu akım halkasının yarıçapını gösterir. Son ifade, süperiletkenin teknolojik uygulanabilirliğinde gerekli olan büyük kaldırma kuvveti için büyük r , J_c ve dH/dz değerlerine sahip olunması gerektiğini belirtir (Yang vd., 2001

1.5.2. Manyetik Kaldırma Sistemleri

Manyetik kaldırma için iki alt sistem gereklidir:

- i) Manyetik alanı oluşturan sistem
- ii) Manyetik akıyı şekillendirmek veya tuzaklamak için gerekli olan bir sistem.

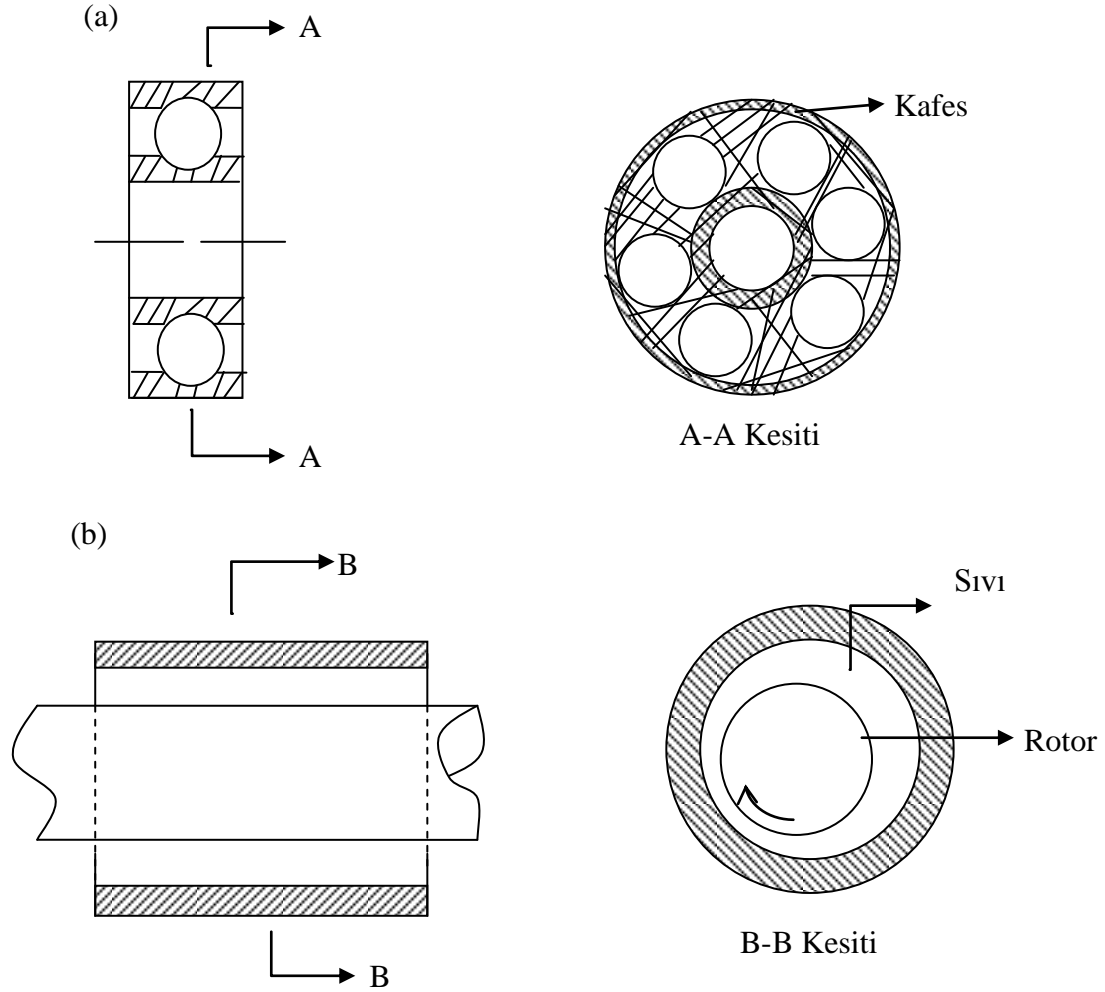
Elektromanyetik kaldırma durumunda, bir bobine sarılı telden geçen akımlar esas alanı oluştururken ferromanyetik bobin tutucu ve ferromanyetik taban bir çeşit manyetik çevrim oluştururlar. Girdap akımlarının oluşturduğu kaldırmada ise bir iletken üzerinde hareket eden süperiletkin bobin vardır. Buradaki alan bir KM, süperiletkin bobin veya normal iletken bobin tarafından oluşturulur. KM ve iletkenin göreceli hareketleri, iletkenin içindeki girdap akımlarından kaynaklanan bir alan-şekillendirme sistemi oluşturur (Moon, 2004).

1.5.3. Sürtünmesiz Manyetik Yatak ve Manyetik Kaldırma

Sürtünmesiz manyetik yataklar (SMY) göreceli harekete imkân verirler. Uzun yıllardır insanlar iki katı cismin birbirlerine göre hareketi sırasında sürtünme ve ısınma gibi kayıpların oluşmasını engellemek için çeşitli yollar aramaktadırlar. Manyetik olmayan

geleneksel sürtünmesiz yatak (SY) sistemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Şekil 1.13 (a), (b)):

- i) Dönen parçalar; bilye ve silindirler
- ii) Sıvı temelli sistemler; hidrostatik ve hidrodinamik
- iii) Gaz temelli sistemler; aerostatik ve aerodinamik



Şekil 1.13. İki geleneksel SY sistemi: (a) bilyeli yatak, (b) sıvı yatak (Moon, 2004).

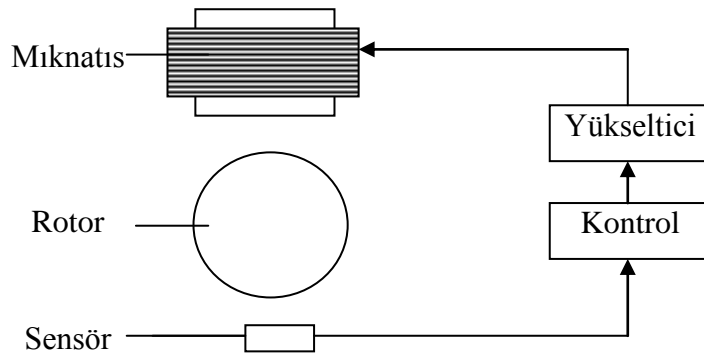
Süperiletken temelli olmayan geleneksel SMY sistemleri aşağıdaki elemanları içerir (Şekil 1.14):

- Kalıcı mıknatıs
- Aktif kontrollü elektromıknatıs
- Ferrofluid sistemler
- Elektrik alanı kaynakları

- Yukarıdaki sistemlerden birkaçına dayanan hibrit yapılar

Yeni HTS temelli süperiletken SMY sistemleri, yukarıdaki sistemlerin yerini almaktadır. Doğrusal ve döngüsel SMY' ler, aşağıda listelenen geniş bir teknolojik uygulama alanını kapsamaktadır:

- Jiroskoplar (denge çarkları)
 - Yüksek hızlı makine araçları
 - Enerji depolayan dönen çarklar
 - Uzay gemileri için açısal momentum çarkları
 - Optik ve kızılötesi aygıtlar için dönen tarayıcılar
 - Yüksek hızlı optik kapaklar
 - Uzay gemisi motorları için SMY' ler
 - Yer altı gaz boruları için pompalar
 - Tekstil üretimi için yüksek hızlı iğneler
 - Bilgisayar disk depolama aygıtları
 - Temiz oda veya vakum ortamında çalışma sistemlerinde doğrusal taşıyıcı paletler
- (Moon, 2004).



Şekil 1.14. Aktif kontrollü sürtünmesiz manyetik yatak (Moon, 2004).

1.5.4. Aktif Elektromanyetik ve Pasif Süperiletken Yatak

1.5.4.1. Normal İletkenlerin Kullanıldığı Aktif Manyetik Yataklar

Süperiletken temelli manyetik kaldırma sistemlerinin faydalarını anlamak için, var olan manyetik yatak teknolojileri incelenmelidir. Günümüzde kullanılan aktif manyetik yataklar şu şekilde listelenebilir:

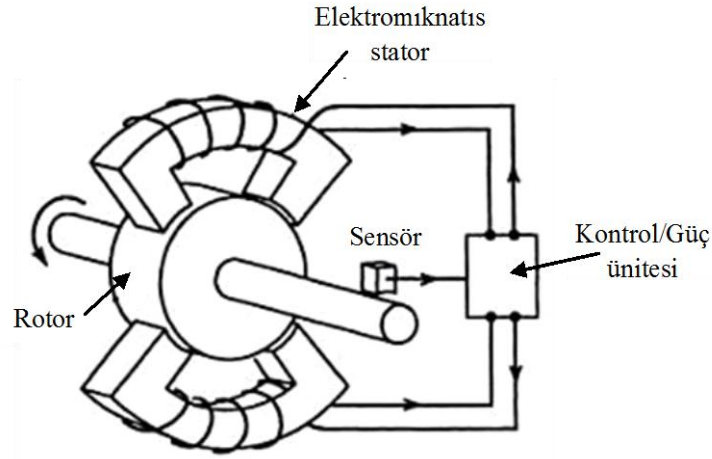
- Yüksek hızlı makine araçları
- Turbomoleküler pompalar
- Doğalgaz iletimi için santrifüj kompresörler
- Yüksek hızlı matbaalar

Gelişme halinde olan uygulamalar arasında, elektrikli otomobil sistemleri için enerji depolama çarkları ve jet uçaklarında kullanılan gelişmiş gaz türbinli motorlar için manyetik yataklar yer almaktadır.

Tipik bir manyetik yatak (Şekil 1. 15) aşağıdaki sistemlerden oluşur:

- Ferromanyetik rotor
- İçinde iletken sarmallar olan çok yuvalı stator
- İki kanattaki şaftın konumunu ölçmek için konuma duyarlı mesafe ölçer
- Elektronik analog veya dijital kontrol devresi
- Stator sarmallarındaki akımı beslemek için güç kaynağı
- Manyetik çevrim yollarını sağlamak için silisyum-demir veya kobalt-vanadyum çelik.

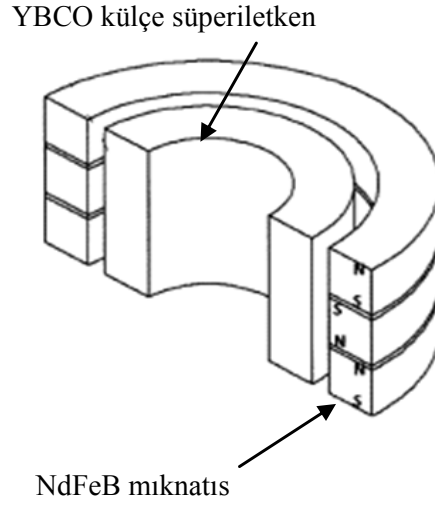
Aktif manyetik yatakların tipik çalışma boşluğu 0.5 mm mertebesindedir. Çalışma sıcaklığı 60 K' den 100°C' ye kadar değişmektedir. Bununla birlikte, gaz türbinli motorlarda kullanılabilir olması için çalışma sıcaklığını 300°C yakınlarına çıkarmaya yönelik gelişmeler devam etmektedir (Moon, 2004).



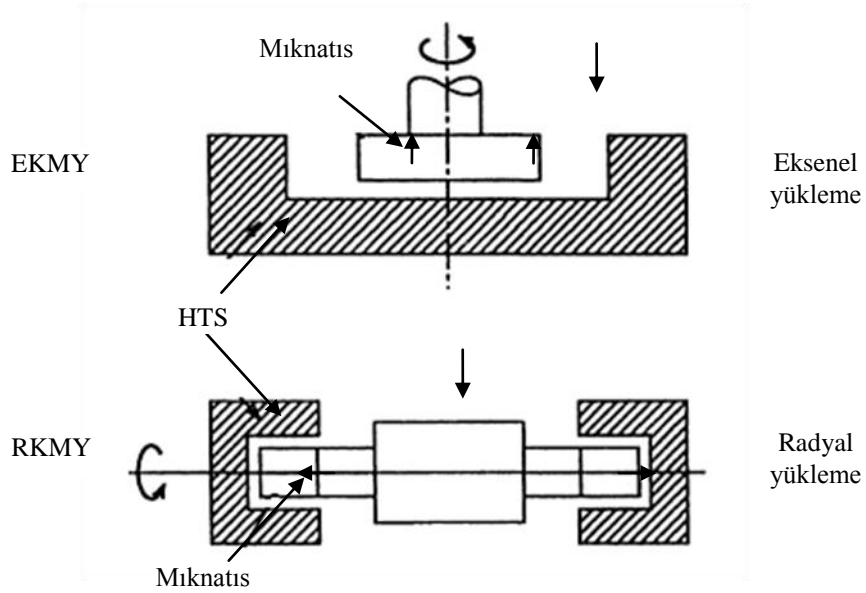
Şekil 1.15. Aktif kontrollü manyetik yatak (Moon, 2004).

1.5.4.2. Pasif Süperiletken Yataklar

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin kullanıldığı basit bir sürtünmesiz yatak sistemi için, genel düzende süperiletken sabit bir şekilde dururken, mıknatıs onun üzerinde temas olmaksızın dönmektedir. Bunun asıl nedeni, süperiletkenin sıvı azot içerisinde soğutulmaya elverişli olmasıdır. Eğer SMY vakum ortamında çalıştırılırsa manyetik kaldırma bileşeni için tek ısı transferi, Stefan kanunu ile belirlenen radyasyon yolu ile olur ve kayıplar düşük sıcaklıklarda çok az olur. İki temel SMY tipi, aksel kılavuzlamalı manyetik yatak (EKMY) ve radyal kılavuzlamalı manyetik yatak (RKMY) tir. EKMY’ da ana yük kuvveti dönme eksenine doğrultusunda, RKMY’ de ise yük kuvveti dönme eksenine dik doğrultudadır. Tipik bir KM/HTS RKMY düzeni, sonlandırıcı olarak yerleştirilmiş olan KM disklerle birlikte dönen bir şaft ve şaftın her iki ucundaki KM’ leri kısmen veya tamamen saran HTS tarafından desteklenen şafttan oluşur (Hull, 2000). RKMY’ nin şematik yapısı Şekil 1.16’ da gösterilmiştir. Şekil 1.17’ de ise aksel kılavuzlamalı ve radyal kılavuzlamalı manyetik yataklar gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Yüksek sıcaklık süperiletken radyal kılavuzlamalı manyetik yatak (Sung vd., 2003).



Şekil 1.17. Pasif süperiletken manyetik yatak tipleri. EKMY, eksenel kılavuzlamalı manyetik yatak; RKMY, radyal kılavuzlamalı manyetik yatak (Moon, 2004).

Aktif manyetik yatak ile pasif süperiletken yatak arasındaki avantaj ve dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Moon, 2004):

Aktif manyetik yatak:

Avantajlar:

- Yüksek manyetik sertlik
- Çevresel değişikliklere uyarlanabilir kontrol ünitesi

- Alan kaçaklarının az olması
- Kanıtlanmış endüstriyel uygulamalar

Dezavantajlar:

- Yüksek maliyet
- Karmaşık olması ile ilgili güvenilirlik sorunları
- Küçük çalışma boşlukları
- Güç kaynağı, kontrol ünitesi ve elektronik devrelerde oluşabilecek hatalar

Pasif süperiletken yatak:

Avantajlar:

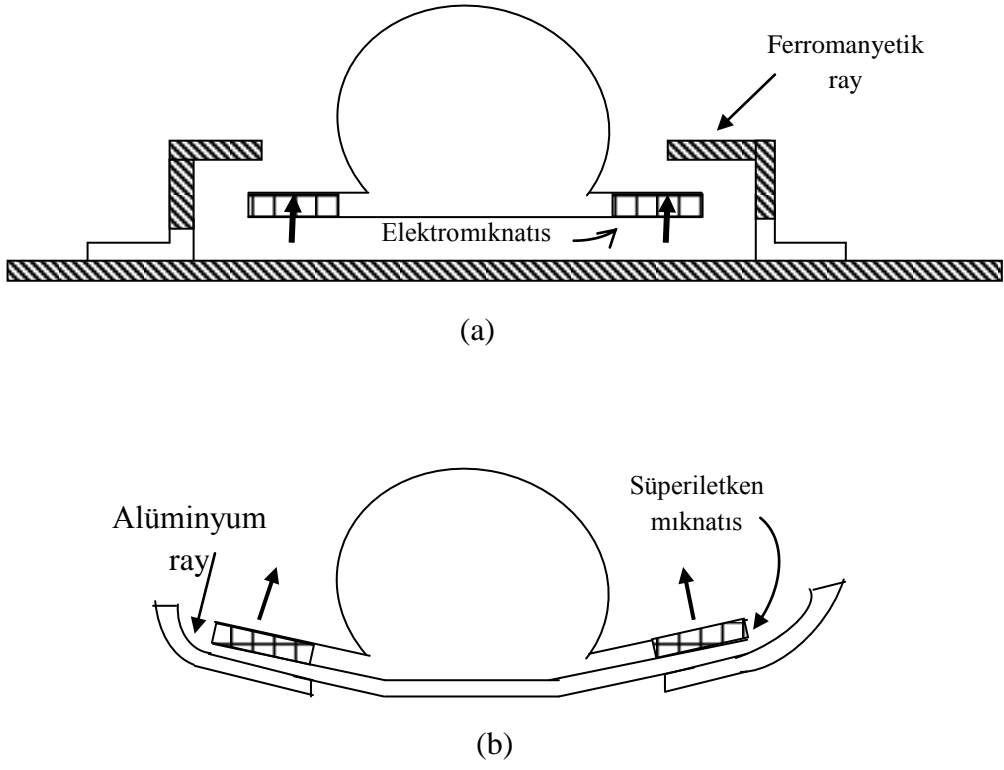
- Herhangi bir elektronik devreye veya güç kaynağına ihtiyaç yoktur, pasiftir
- Potansiyel olarak yüksek güvenilirliğe sahiptir (düşük karmaşıklık)
- Potansiyel olarak daha düşük sistem ağırlığı
- Büyük veya küçük çalışma boşluğu
- Daha düşük maliyet

Dezavantajlar:

- Kriyojenik sıcaklıklara ihtiyaç duyması
- Daha düşük manyetik sertlik
- Manyetik alan kaçakları
- Uygulamada kanıtlanmamış bir teknoloji olması

1.5.5. Manyetik Olarak Havalanmış Araçlar

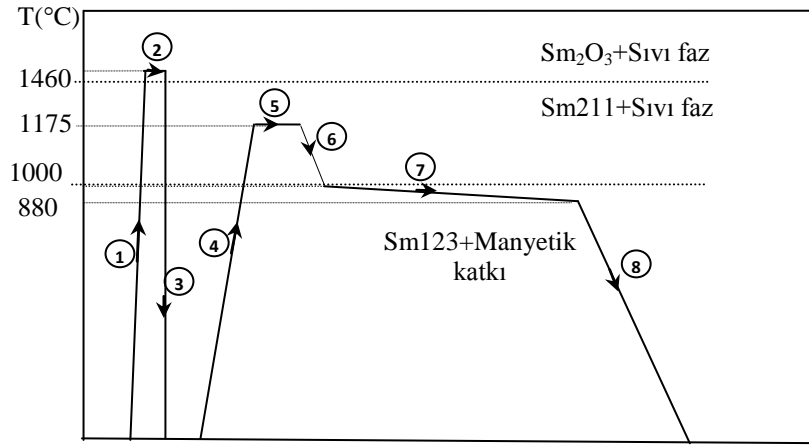
Manyetik olarak havalanmış araçlarda iki ana yöntem vardır. Birincisi, Şekil 1.18 (a)' da görülen elektromanyetik kaldırma (EMK) veya çekici kaldırmadır. Bu sistemde aracın ferromanyetik raylarda havada kalmasını sağlayacak süperiletken olmayan elektromıknatıslar kullanılır. İkinci yöntem elektrodinamik kaldırma (EDK) veya itici kaldırma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.18 (b)). Bu ikinci yöntemde araç üzerinde çok sayıda süperiletken mıknatıs kullanılır. Bu mıknatıslar sayesinde aracın altında yer alan iletken rayda girdap akımları oluşur. Araç hareket ettiğinde oluşan kaldırma, yüksek hızlarda bir asimptotik limite ulaşır.



Şekil 1.18. İki MK taşıma sistemi. (a) Elektromanyetik kaldırma (EMK) veya çekici yöntem. (b) Elektrodinamik kaldırma (EDK) veya itici yöntem (Moon, 2004).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

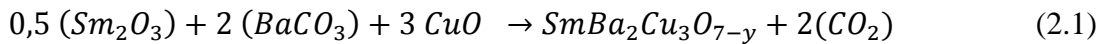
Çalışmada külçe süperiletken numunelerin üretilmesi için Eritme-Toz haline getirme-Eritme-Büyütme (Melt-Powder-Melt-Growth (MPMG)) yöntemi kullanıldı. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni, numunenin mikro-yapı kontrolüne imkân vermesidir. Bu yöntem ile yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde mevcut taneler arası zayıf bağlantı sorununu azaltmak ve süperiletkenin kritik akım ve kaldırma kuvveti özelliklerini iyileştirecek akı çivileme (pinning) merkezleri sayısını arttırmak amaçlanmıştır. MPMG yöntemi ile üretilen külçe numunelere, Şekil 2.1' de verilen ısıl işlemler uygulandı.



Şekil 2.1. MPMG yöntemiyle hazırlanan külçe numuneler için ısıl işlem süreçleri

2.1. SmBa₂Cu₃O_{7-y} (Sm123) Bileşiğinin Hazırlanması

SmBa₂Cu₃O_{7-y} bileşiğinin hazırlanması için Tablo 2.1 de saflık dereceleri, molekül ağırlıkları ve bileşikteki miktarları verilen Sm₂O₃, BaCO₃ ve CuO tozları

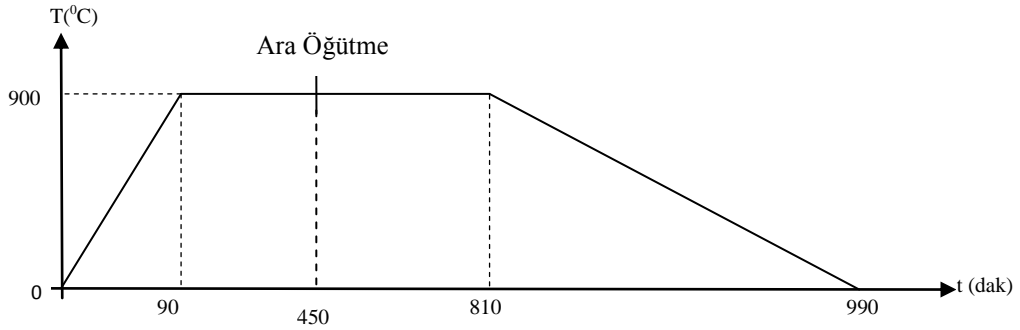


tepkimesine göre hesaplanarak toplam karışım 70 gram olacak şekilde tartıldı. Tartılan tozlar, homojen karışımın sağlanabilmesi amacıyla agat havanda bir saat boyunca elle öğütüldü.

Tablo 2.1. Sm123 Başlangıç kompozisyonunun oluşturulmasında kullanılan tozlar ve bileşikteki miktarları

Tozun Adı	Sembolü	Saflik derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (gr/mol)	Bileşikteki Miktarı (gr)
Samaryum Oksit	Sm_2O_3	99,99	348,7	15,1114
Baryum Karbonat	BaCO_3	99,999	197,35	34,2058
Bakır Oksit	CuO	99,99	79,54	20,6822

Öğütme işleminden sonra toz karışım alümina (Al_2O_3) pota içerisine konularak kalsinasyon işlemi için Euroterm 808 kontrol ünitesi Lenton marka kare fırın içerisine yerleştirildi. Daha önce alınan Diferansiyel Termal Analiz (DTA) verilerinden yararlanılarak toza Şekil 2.2’ de verilen ısıl işlem iki kez uygulandı. İkinci ısıl işlem sırasında ara öğütme işlemi yapıldı ve böylece karışımın homojenliği artırılmaya çalışıldı.



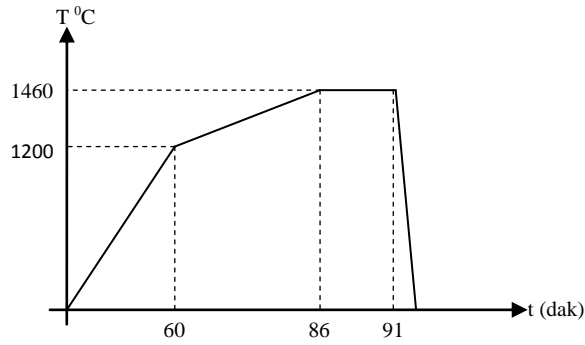
Şekil 2.2. Sm123 toz karışımının kalsinasyon işlemi şeması

Kalsinasyon işleminden sonra yeşil renkli karışım haline gelen toz (Şekil 2.3), agat havanda 20 dakika elle öğütüldü. Kalsine edilmiş toz, platin potaya koyularak Şekil 2.4’ deki gibi 1460°C sıcaklıkta eritme işlemine tabi tutuldu. 1460°C sıcaklıkta 5 dakika beklendikten sonra fırından alınan toz, bakır bir levhaya dökülerek üzerine başka bir bakır plaka ile vuruldu. Bu şekilde tozun hızlı soğuması sağlandı. Bu işlemin amacı yüksek sıcaklıkta oluşan $\text{Sm}_2\text{O}_3+\text{L}$ (L: Sıvı faz) yapısını elde edip, uzun süreli öğütmeden sonra, numune içerisinde doğal akı çivileme merkezi olarak görev yapacak Sm211 normal fazının

mikro-yapı kontrolünü sağlamaktır. Eritme ve hızlı soğutma işleminden sonra küçük plakalar haline gelen tozlar (Şekil 2.5), agatta 10 dakika elle karıştırıldıktan sonra 40 dakika boyunca Retsch markalı öğütme makinesinde öğütüldü. Hazırlanan tozdan 3 gram tartıldı. 13 mm çaplı kalıba koyulan bu toz, Perkin-Elmer marka presleme aletinde 340 MPa basınç altında 20 saniye beklenerek tablet haline getirildi.



Şekil 2.3. Kalsinasyon işleminden sonra elde edilen toz, Al_2O_3 pota içerisinde



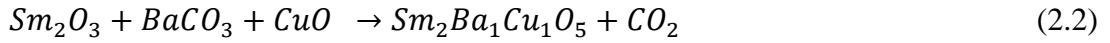
Şekil 2.4. Sm123 toz karışımının eritme ısıl işlem şeması



Şekil 2.5. Eritme işleminden sonra bakır plakaya dökülerek hızlı soğuması sağlanan Sm123 toz karışımı

2.2. Sm_2BaCuO_y (Sm211) Bileşiğinin Hazırlanması

Sm211 bileşiğinin hazırlanması için Tablo 2.2’ de saflık dereceleri, molekül ağırlıkları ve bileşikteki miktarları verilen Sm_2O_3 , $BaCO_3$ ve CuO tozları

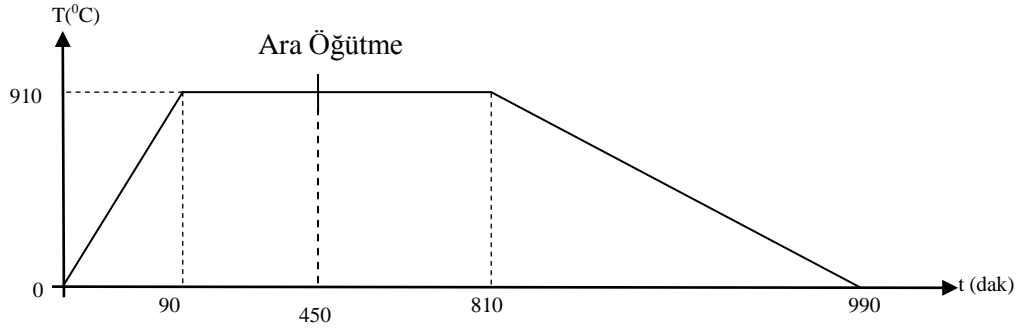


tepkimesine göre hesaplanarak toplam karışım 8 gram olacak şekilde tartıldı. Tartılan tozlar, homojen karışımın sağlanabilmesi amacıyla agat havanda bir saat boyunca elle öğütüldü.

Tablo 2.2. Sm211 Başlangıç kompozisyonunun oluşturulmasında kullanılan tozlar ve bileşikteki miktarları

Tozun Adı	Sembolü	Saflık derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (gr/mol)	Bileşikteki Miktarı (gr)
Samaryum Oksit	Sm_2O_3	99,99	348,7	4,45914
Baryum Karbonat	$BaCO_3$	99,999	197,35	2,5237
Bakır Oksit	CuO	99,999	79,54	1,01716

Öğütme işleminden sonra toz karışım alümina (Al_2O_3) pota içerisine konularak kalsinasyon işlemi için Euroterm 808 kontrol ünitesi Lenton marka kare fırın içerisine yerleştirildi. Daha önce alınan Diferansiyel Termal Analiz (DTA) verilerinden yararlanılarak, toza Şekil 2.6' da verilen ısıl işlem $910^{\circ}C$ ve $920^{\circ}C$ ' de birer kez uygulandı. İkinci ısıl işlem sırasında ara öğütme işlemi yapıldı ve böylece karışımın homojenliği artırılmaya çalışıldı.



Şekil 2.6. Sm211 toz karışımının kalsinasyon işlemi şeması

2.3. Sm123 Bileşiğine Farklı Oranlarda Nd-Fe-B Manyetik Toz Katkılanması

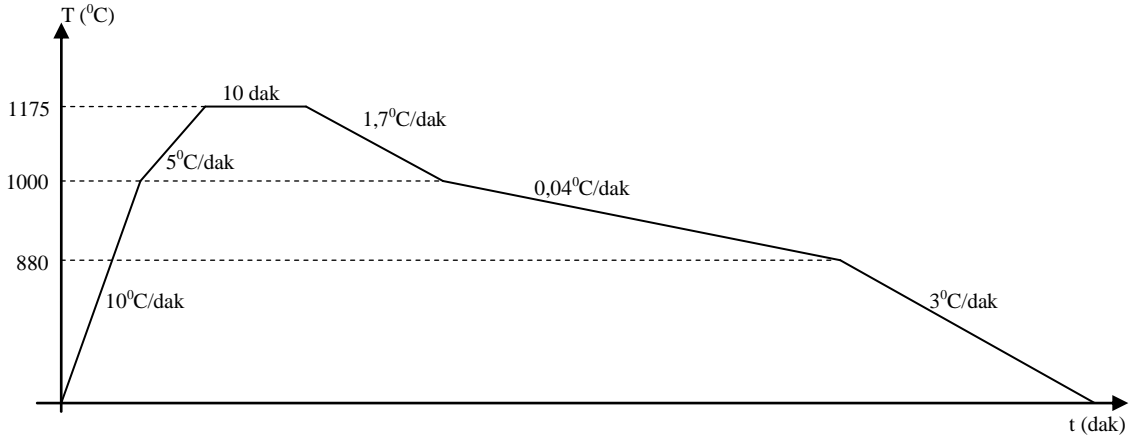
$Nd_{15}Fe_{77}B_8$ manyetik tozu, $x=0,000$, $x=0,015$, $x=0,030$, $x=0,050$, $x=0,080$, $x=0,12$ yüzde oranlarında tartılarak her biri 3 gramlık Sm123 tozuna eklendi. Elde edilen karışımlar agat havanda 20 dakika boyunca elle karıştırılıp 340 MPa basınç altında 20 saniye beklenerek tabletler haline getirildi.

2.4. $(Sm123)_{0,75}(Sm211)_{0,25}$ Bileşiğine Farklı Oranlarda Fe-B Manyetik Toz Katılması

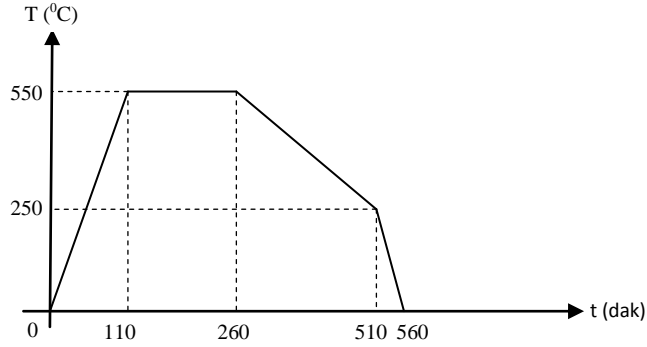
Bileşiği oluşturmak üzere göre 4 gram olarak hazırlanacak her bir numune için 3,15 gr Sm123 ve 0,85 gr Sm211 tozları tartıldı. Bu tozlara sırasıyla $x=0,000$, $x=0,010$, $x=0,015$, $x=0,025$ ve $x=0,050$ yüzde ağırlık oranlarında Fe-B tozu katılarak agat havanda elle 10 dakika karıştırıldı. Karıştırılan tozlar 340 MPa basınç altında 20 saniye beklenerek tabletler haline getirildi.

2.5. Külçe Numunelerin Sinterleme ve Tavlama İşlemi

Yukarıda belirtildiği gibi tabletler haline getirilen külçe numuneler, platin altlığa koyularak Lenton marka fırına yerleştirildi. Numunelerin her birine DTA verilerinden yararlanılarak Şekil 2.7’ de gösterilen ısı işlem uygulandı. Kristal büyütme işleminden sonra her bir numune şekil 2.8’ deki ısı işlemde görüldüğü gibi 550°C’de 150 dakika süreyle oksijen gazı akışı altında tavlandı.



Şekil 2.7. Külçe numunelerin sinterleme ısı işlem şeması

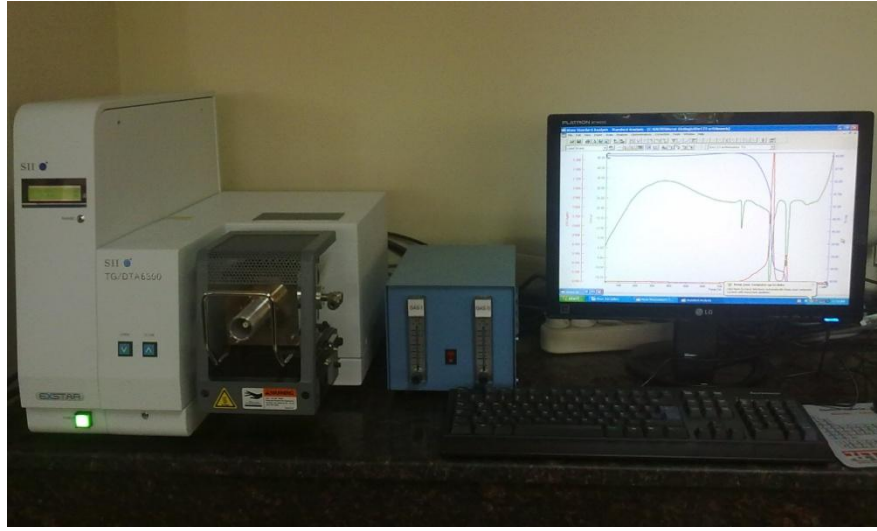


Şekil 2.8. Üretilen numunelerin tavlama ısı işlem şeması

2.6. Yapılan Ölçümler

2.6.1. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) Ölçümleri

Numunelerin kalsinasyon, erime, tavlama ve sinterleme sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla şekil 2.9' da gösterilen Exstar SII marka DTA cihazı kullanıldı. Cihazda bulunan iki tane platin potanın birine DTA ölçümü alınacak toz koyuldu. Diğer potaya herhangi bir referans tozu koyulmadı. Ölçüm, 20°C - 1300°C arasında 10°C/dak fırın çıkış hızı ile ve her 0,5 saniyede bir veri alınarak gerçekleştirildi.



Şekil 2.9. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) aletinin fotoğrafı

2.6.2. X-Işınımı Kırınımı (XRD) Ölçümleri

Üretilen numunelerin X-ışını kırınım desenlerinin elde edilmesi için Rigaku D/Max-III difraktometresinde CuK_α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, 40 kV, 30 mA) ışını kullanıldı. Tüm ölçümler, oda sıcaklığında $20^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ aralığında 3°/dak. tarama hızında 0.02° lik örnekleme aralığında alındı. Ölçüm yapılmadan önce numunelerin yüzeyleri her defasında parlatıldı ve alkolle temizlendi.

2.6.3. Optik Mikroskop Ölçümleri

Üretilen numunelerin yüzey mikroyapıları, polarize ışıklı bir optik mikroskop kullanılarak incelendi. Nikon ECLIPSE ME600 polarize optik mikroskopta 10X büyütme ve fotoğraf makinesinin (3,2) dijital büyütme özelliğinden faydalanılarak optik mikroyapı çekimleri yapıldı.

2.6.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümleri

Numunelerin ve Fe-B tozunun SEM fotoğrafları Zeiss markalı Evo LS10 model taramalı elektron mikroskobu yardımı ile çekildi. Aynı cihaza monte edilmiş olan 1,23 eV enerji üretebilen Bruker markalı EDX ünitesi ile numunelerin elektron dağılımlı X-ışını analizleri yapıldı.

2.6.5. Düşük Sıcaklık Direnç Ölçümü

Üretilen süperiletken numunelerin direnç ve manyetizasyon ölçümlerinde “Quantum Design PPMS” sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, yapılacak ölçümle ilgili parça (modül) değiştirilerek çeşitli ölçüm sistemlerine dönüştürülebilmektedir. Fiziksel özellik ölçüm sistemi (PPMS); manyetik alan akım kaynağı, sıvı azot ceketli helyum tankı ve tüm bu bileşenleri hassas bir şekilde kontrol edebilen Quantum Design Model 6000 ana kontrolcüsünden meydana gelmektedir. Ana kontrolcü; sıcaklık kontrolcüsü (1,9 K – 400 K) ile manyetik alan kontrolcüsünü (-7 T – 7 T) içermekte olup, bilgisayar tarafından CAN (açık network protokolü) veri iletişim kartı yardımıyla tamamen kontrol edilebilmektedir.

DC direnç modülü “Model 6000 PPMS” kontrolcüsüne direnç köprüsü eklenerek, direnç ölçüm sistemine dönüştürülmektedir. Bu köprü, dört nokta direnç ölçüm yöntemiyle veri alabilen birbirinden bağımsız dört kanal içermektedir. Program üç kanalı aynı anda kontrol edebilmektedir. Böylece, direnç ölçümlerinde aynı anda 3 farklı numunenin (kanalın) direnci ölçülebilmektedir. Direnç ölçümünde gerekli olan akım, sistemdeki akım kaynağı tarafından 5 nA ile 5 mA aralığında istenilen değerde uygulanmakta olup sistemin voltaj okuma hassasiyeti ise 20 nV’ tur.

Direnç ölçümleri sıfır manyetik alan altında yapıldı. Ölçüm yapılan numunelerin boyutları yaklaşık olarak $2,5 \times 4,5 \times 12 \text{ mm}^3$ olup ölçüm işlemi dört nokta yöntemiyle yapıldı.



Şekil 2.10. Quantum Design PPMS sistemi

2.6.6. Kaldırma Kuvveti Ölçümleri

Üretilen süperiletken numunelerin kaldırma kuvveti ölçümleri, sıvı azot sıcaklığında (77K), alanlı (FC) ve alansız soğutma altında (ZFC) yapıldı. Ölçümlerin yapıldığı düzenek Şekil 2.11' de görülmektedir. Mıknatıs ile süperiletken numune arasındaki mesafe adım motoru kullanılarak değiştirildi. Kaldırma kuvveti verileri, mıknatıs-süperiletken numune arasındaki düşey mesafeye bağlı olarak alındı. Bütün ölçümler sürekli olarak bilgisayar kontrollü yapıldı.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

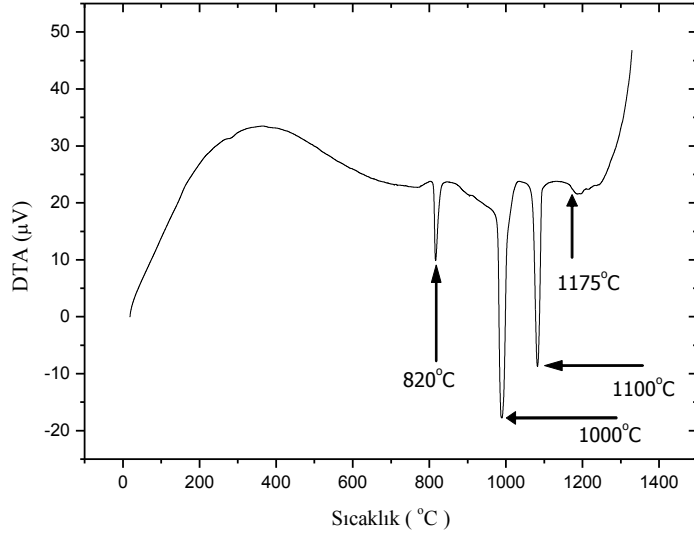
3.1. Giriş

Bu çalışmada eritme yöntemiyle üretilen külçe Sm123 ve (Sm123)_{0,75}(Sm211)_{0,25} numunelerine farklı oranlarda manyetik toz katkısı yapıldı. Katkı oranlarına bağlı olarak alanlı (FC) ve alansız (ZFC) soğutma şartları altında numunelerin manyetik kaldırma ve çekme kuvvetleri araştırıldı. Çalışmada ayrıca farklı boyutlarda numuneler üretilerek numune boyutunun, farklı boyutlarda mıknatıs kullanılarak da manyetik akı dağılımının kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendi. Üretilen numunelerin yapısal özellikleri X-Işını kırınım analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri ve optik mikroskop ölçümleriyle; elektriksel özellikleri PPMS sistemi kullanılarak, kaldırma kuvveti özellikleri de kaldırma kuvveti ölçüm sistemiyle incelendi.

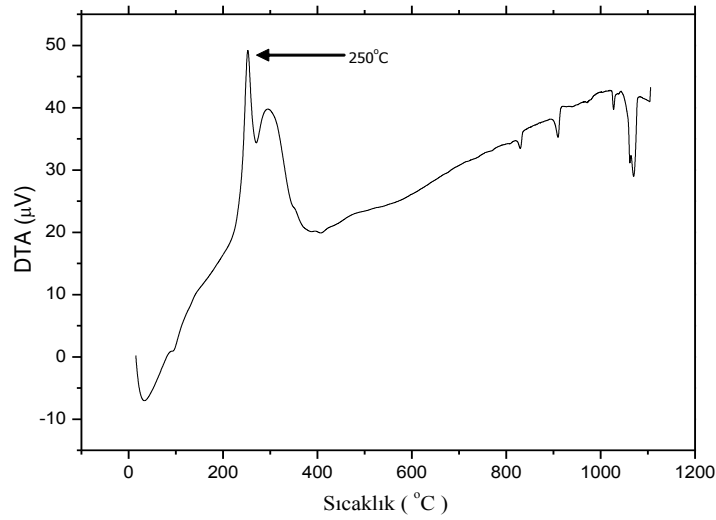
3.2. Yapısal Analiz

3.2.1. DTA Analizi

Üretilen numunelere uygulanan ısı işlemler (kalsinasyon, sinterleme ve tavlama), başlangıç toz karışımından (Şekil 3.1) ve eritilmiş tozdan (Şekil 3.2) alınan DTA verileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Şekillere bakıldığında her iki toz da 800°C -1100°C civarında pikler vermiştir. Bu pikler, ısı işlem sırasında oluşan ikili ve üçlü fazlara karşılık gelmektedir. Tozların erime sıcaklığının 1100°C civarında olduğu da şekillerden görülmektedir. Literatürden de bilindiği gibi Sm123 malzemesi 1060°C' den itibaren Sm211+ L (L: sıvı faz) fazına ayrılmaya başlar. Buradan, Sm123 süperiletkeni için kristal büyütme işleminin bu sıcaklık civarında olması gerektiği anlaşılmaktadır (Murakami vd., 1997). Numunelere yapılan katkı oranına göre erime sıcaklığı az da olsa değişiklik göstermektedir. Bu nedenle tüm numuneler için ortak bir sinterleme sıcaklığı belirlenmiştir. Oksijen salma sıcaklıkları ise 250°C – 500°C arasında olduğu için, numunelerin oksijende tavlınması 500°C de 4 saat bekletildikten sonra yine oksijen ortamında 2°C/dak hızla 250°C' ye soğutulularak her numuneye eşit oranlarda uygulandı.



Şekil 3.1. Eritme yöntemiyle üretilen Sm123 süperiletken numunenin başlangıç toz bileşiminden alınan DTA eğrisi



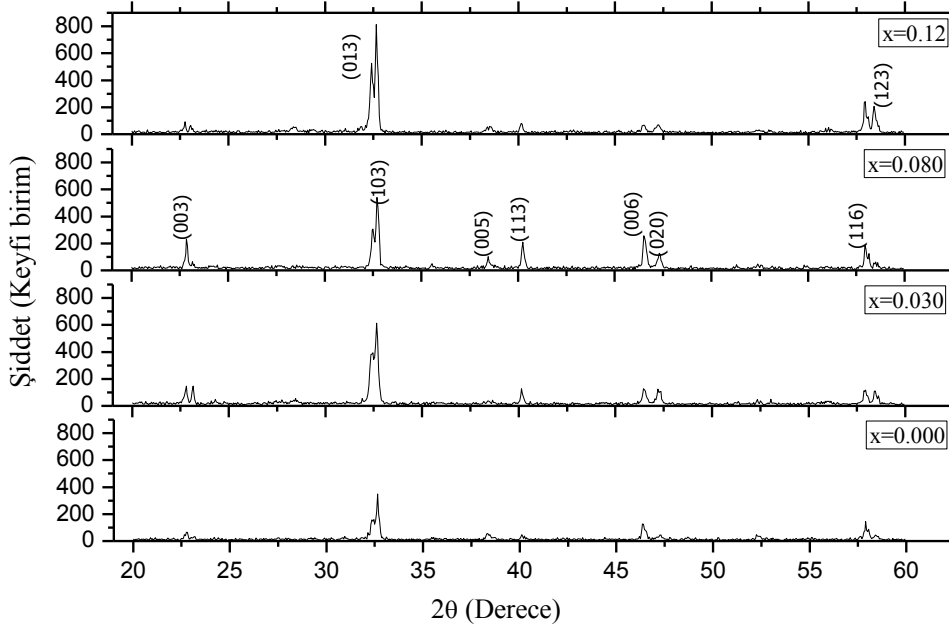
Şekil 3.2. Eritilmiş Sm123 süperiletken toz bileşiminden alınan DTA eğrisi

3.2.2. XRD Analizi

3.2.2.1. Nd-Fe-B Katkılı Sm123 Süperiletken Numunelerin X-Işını Kırınım Desenleri

Farklı yüzde ağırlık oranlarında Nd-Fe-B katkı Sm123 süperiletken numunelerden alınan X-ışını kırınım desenleri Şekil 3.3' de görülmektedir. XRD spektrumlarında ortorombik Sm123 yapısına ait (003), (013), (103), (113), (005), (006), (116) ve (213)

karakteristik pikleri görüldü. Şekilde manyetik katkı oranı arttıkça (103) ve (006) ortorombik faza ait pik şiddetinin önce arttığı, sonra azaldığı görülmektedir. Bu durum, manyetik katkıının, numunenin kristalleşme oranını belli oranda etkilediğini göstermektedir.



Şekil 3. 3. Farklı Nd-Fe-B katkı oranlarında üretilen Sm123 numunelerinin X-ışını kırınım desenleri

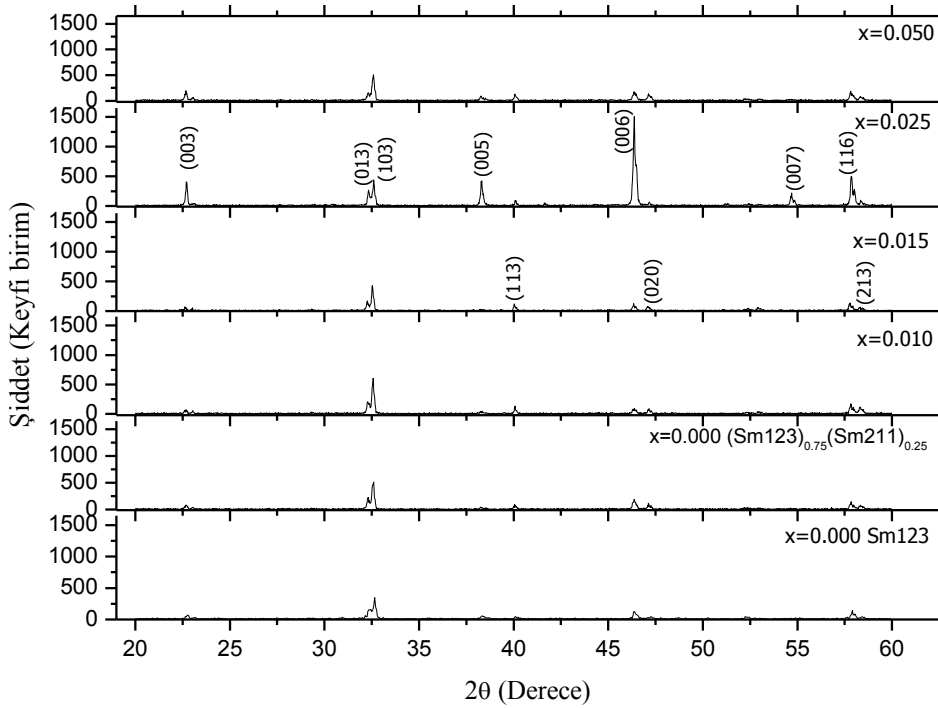
3.2.2.2. Fe-B Katkılı $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ Süperiletken Numunelerin X-ışını Kırınım Desenleri

Farklı yüzde ağırlık oranlarında Fe-B katkılı $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ süperiletken numunelerden ve Sm123 numunesinden alınan X-ışını kırınım desenleri Şekil 3.4' de görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi numunelerin XRD spektrumlarında ortorombik Sm123 yapısına ait (003), (013), (103), (113), (005), (006), (007), (116) ve (213) karakteristik pikleri görüldü. $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ numunelerine ait (003), (005), (006), (007) ve (116) pik şiddetlerinin $x=0,025$ katkılı numune için maksimum olduğu gözlemlendi. Ayrıca şekilde Sm211 katkılı $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ numunelerinin pik şiddetlerinin Sm123 numunesinden büyük olduğu görüldü. Bu artışın nedeninin, yüksek sıcaklıkta yapı içinde sinterleme esnasında Sm211' den çözünüp $880\text{ }^{\circ}\text{C} - 1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ de oluşan Sm123 olduğu düşünülmektedir. $x=0,050$ katkılı numuneye ait pik şiddetlerindeki azalma, yüksek orandaki manyetik katkı ile yabancı fazların arttığını ve kristalleşme oranının azaldığını göstermektedir. Genelde (00 l) pik şiddetlerinin diğer piklere oranla daha büyük olması, kristal yöneliminin c

ekseni boyunca olduğunu gösterir (Chow vd., 1998, Jee vd., 2001, Yang vd., 1998). Tablo 3.1’ de farklı Fe-B katkı oranlarındaki numunelerin kristal örgü parametreleri görülmektedir. Tablodan, tüm numunelerin ortorombik yapıda olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1. Farklı Fe-B katkı oranlarındaki numunelerin örgü parametreleri

Parametreler Katkı oranı	a (Å)	b (Å)	c (Å)
x=0,000	3,8500	3,9145	11,7373
x=0,010	3,8518	3,9201	11,7367
x=0,015	3,8587	3,9194	11,7448
x=0,025	3,8507	3,9044	11,7371
x=0,050	3,8550	3,9155	11,7379

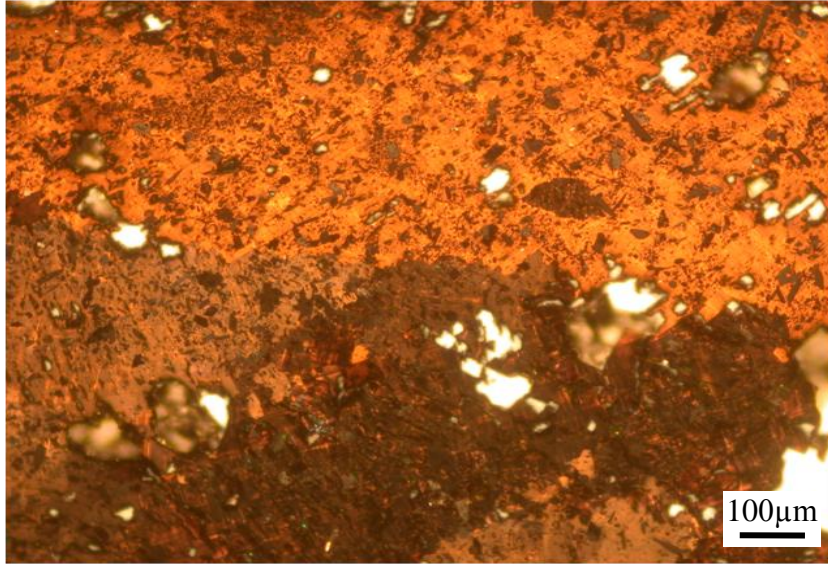


Şekil 3.4. Farklı Fe-B katkı oranlarında üretilen $(\text{Sm123})_{0.75}(\text{Sm211})_{0.25}$ numunelerinin X-ışını kırınım desenleri

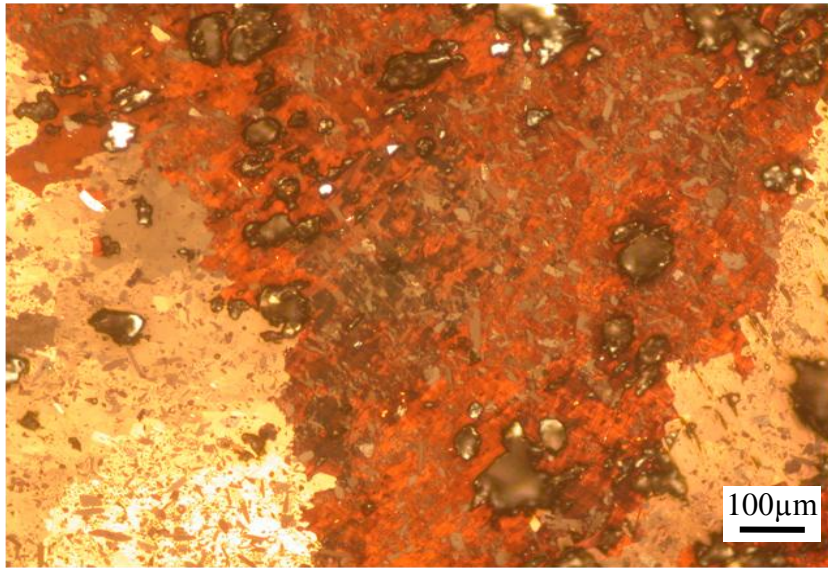
3.2.3. Optik Mikroskop Analizi

Şekil 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9’ da farklı Fe-B katkı oranlarına sahip $(\text{Sm123})_{0.75}(\text{Sm211})_{0.25}$ numunelerinin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Optik fotoğrafların incelenmesinden, farklı yönelimde ve farklı tane boyutuna

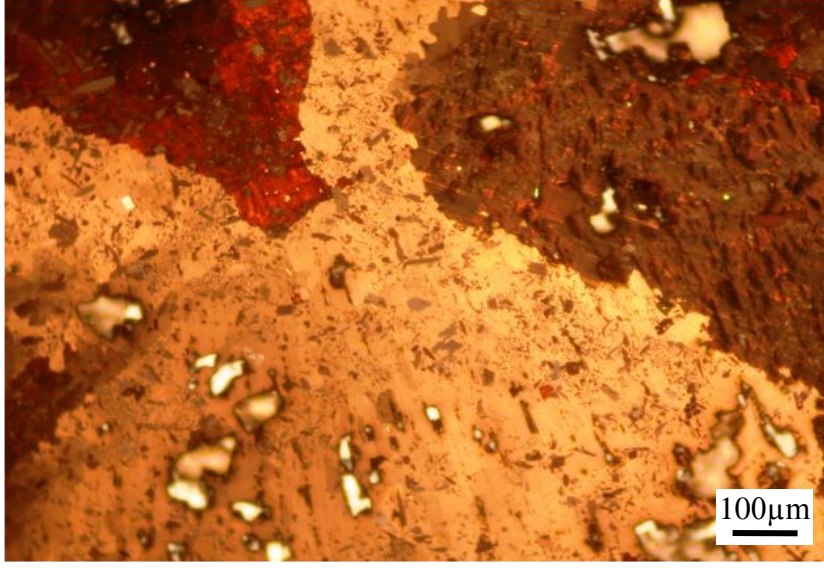
sahip süperiletken kristallerinin oluştuğu görülmektedir. Şekillere bakıldığında numunelerde yer yer boşlukların olduğu görülmektedir. Bu boşlukların, yumuşak bir yapıya sahip olan ve parlatma sırasında dökülmüş olabilecek $BaCuO_2$ fazına ait bölgeler olduğu düşünülmektedir. $x=0,015$ ve $x=0,025$ katkılı numunelerde taneler arası temasın diğer numunelere kıyasla daha iyi ve temiz olduğu görülmektedir. Ayrıca numunelerde yer alan boşlukların bu iki numunede daha az olduğu da görülmektedir. Numunelerdeki boşluk miktarının azalması, külçe ve süperiletkenlik özelliklerinin iyileştiğini gösterir.



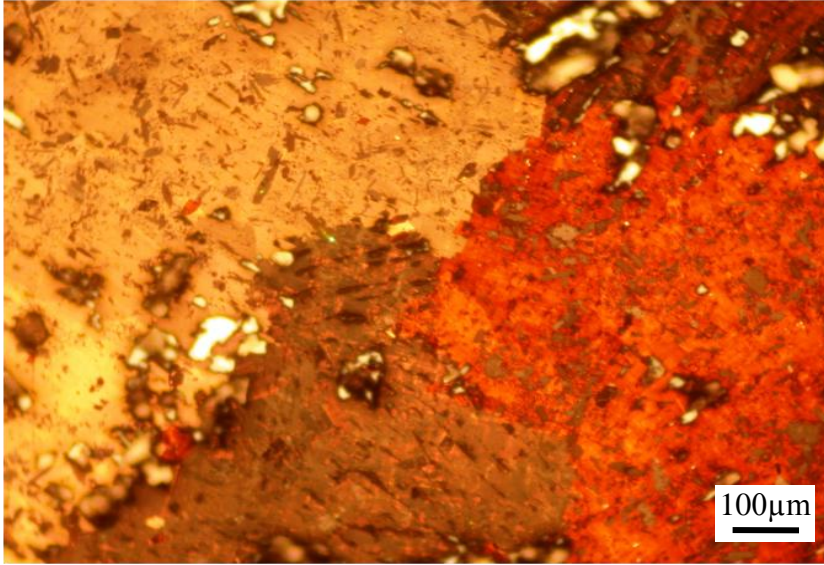
Şekil 3.5. Katkısız numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı



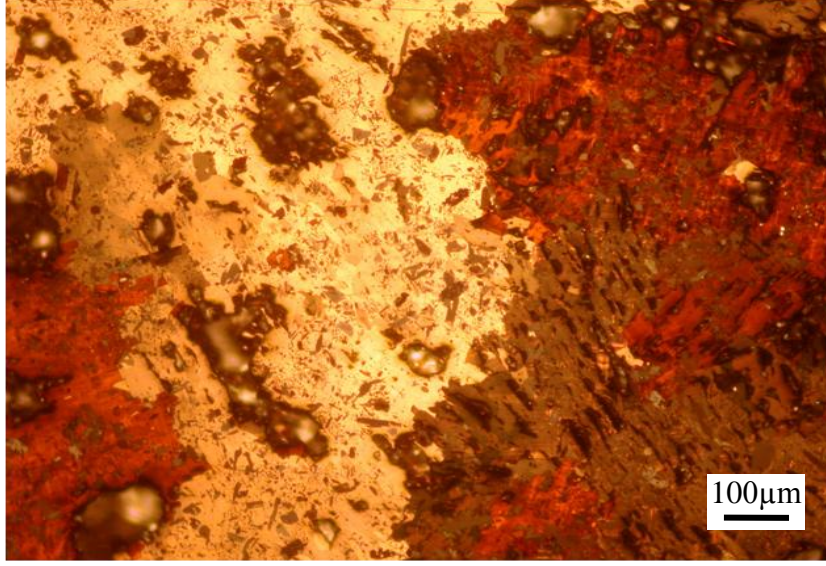
Şekil 3.6. $x=0,010$ katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı



Şekil 3.7. $x=0,015$ katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı



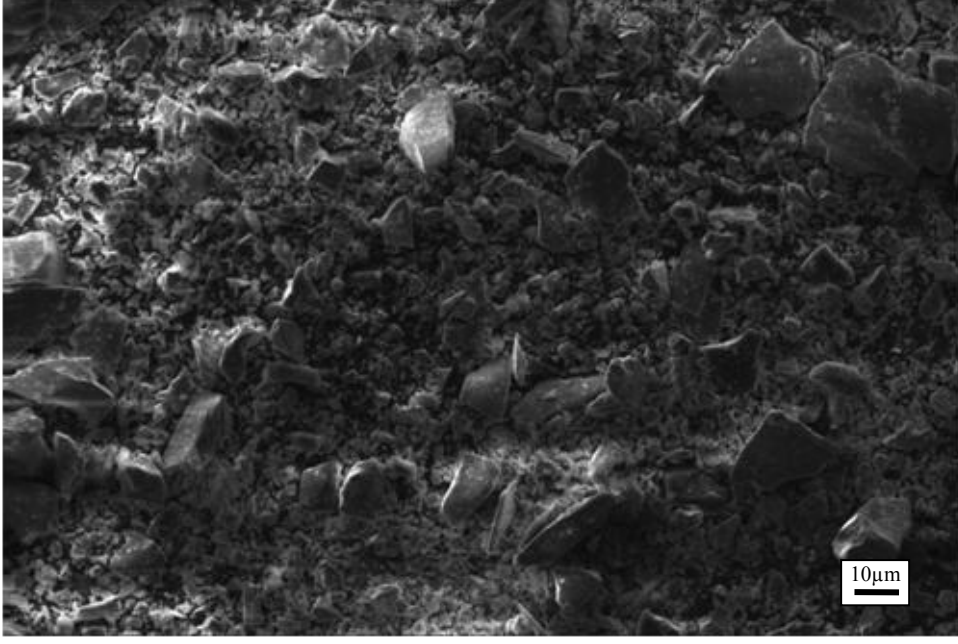
Şekil 3.8. $x=0,025$ katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı



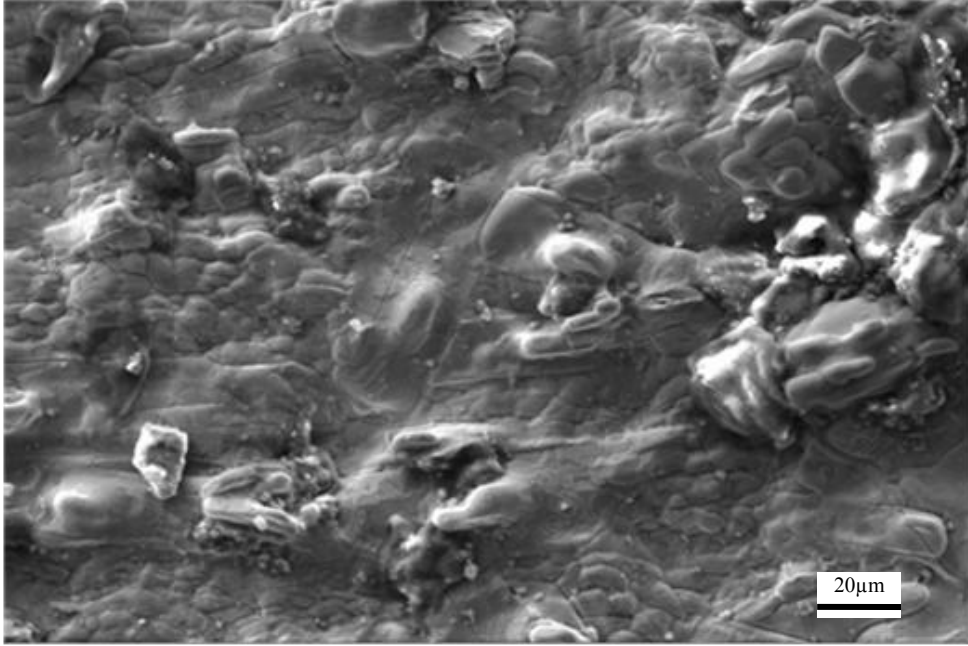
Şekil 3.9. $x=0,050$ katkılı numunenin polarize optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafı

3.2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

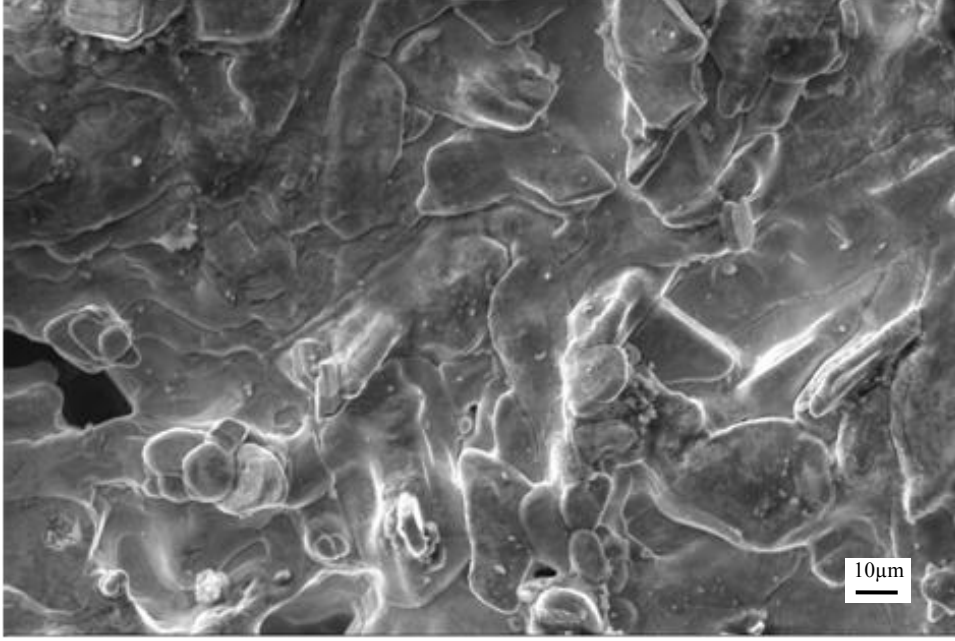
$x=0,000$ ve $x=0,025$ Fe-B katkılı $(Sm_{123})_{0,75}(Sm_{211})_{0,25}$ numunelerinin ve Fe-B tozunun mikroyapı incelemesi, SEM ölçümleri ile yapıldı. Şekil 3.10' da Fe-B manyetik tozuna ait SEM fotoğrafı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi Fe-B manyetik tozunun tane boyutu, 5–10 μm arasında değişmektedir. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12, sırasıyla katkısız ve $x=0,025$ katkılı numunelerin SEM fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 3.11 ile Şekil 3.12 karşılaştırıldığında katkılı numunenin tane boyutlarının daha büyük numunenin daha yoğun bir yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 3.10. Fe-B manyetik tozuna ait SEM fotoğrafı



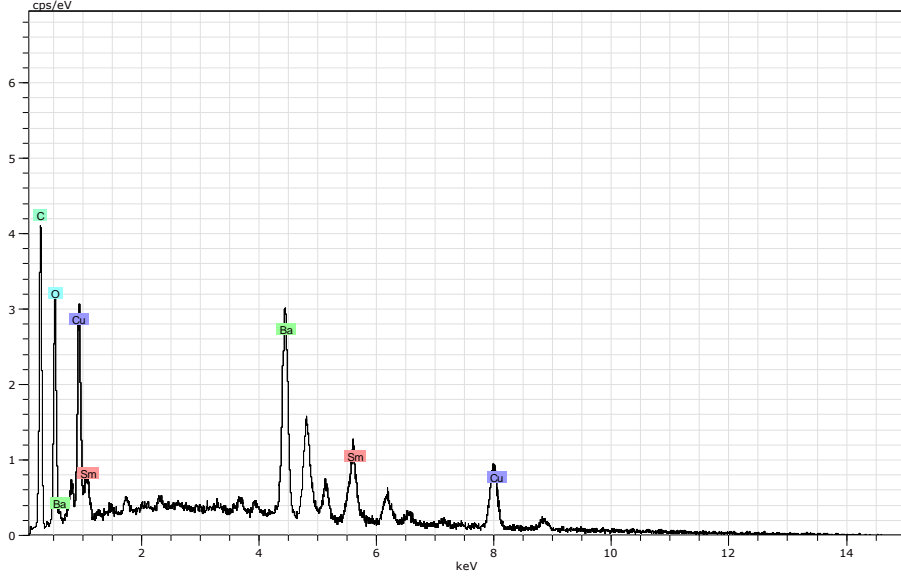
Şekil 3.11. Katkısız $(\text{Sm123})_{0.75}(\text{Sm211})_{0.25}$ numunesine ait SEM fotoğrafı



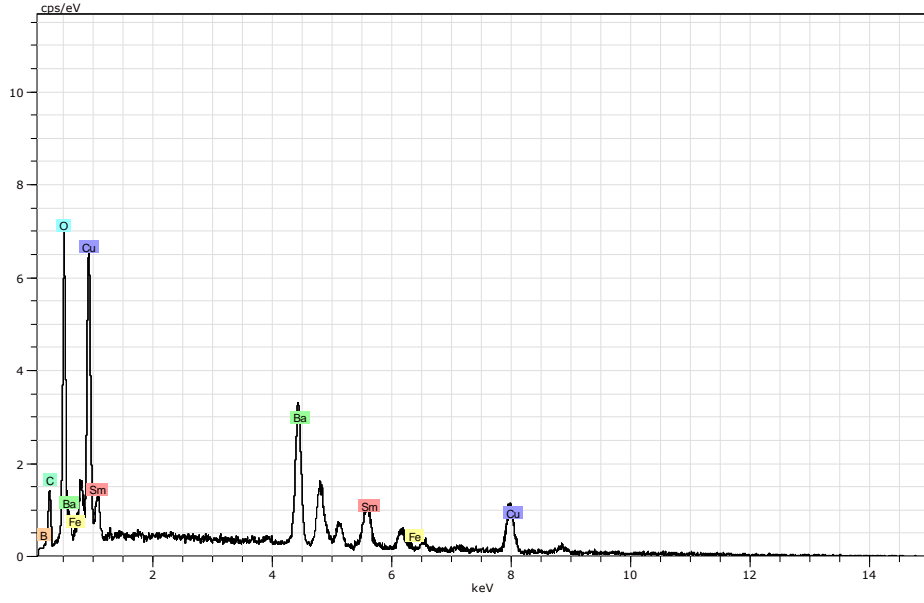
Şekil 3. 12. $x=0,025$ Fe-B katkılı $(Sm_{123})_{0,75}(Sm_{211})_{0,25}$ numunesine ait SEM fotoğrafı

3.2.5. Enerji Dağılımlı X-Işını Kırınımı (EDX) Analizi

Katkısız ve $x=0,025$ Fe-B katkılı $(Sm_{123})_{0,75}(Sm_{211})_{0,25}$ numunelerinin tanelerinden alınan EDX ölçümleri sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14' de gösterilmiştir. Bu şekillerden, Fe-B manyetik toz katkısı arttıkça Sm oranı aynı kalmakla birlikte oksijen oranının arttığı, karbon oranının azaldığı görülmektedir. Bu duruma Fe-B katkısı ile numunenin oksijene olan duyarlılığının artmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.13. Katkısız $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ numunesine ait EDX grafiği

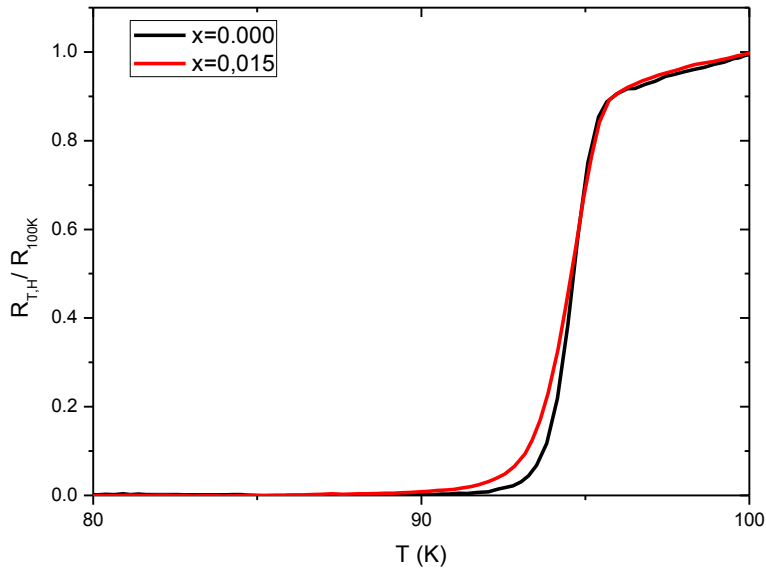


Şekil 3.14. $x=0,025$ Fe-B katkılı $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ numunesine ait EDX grafiği

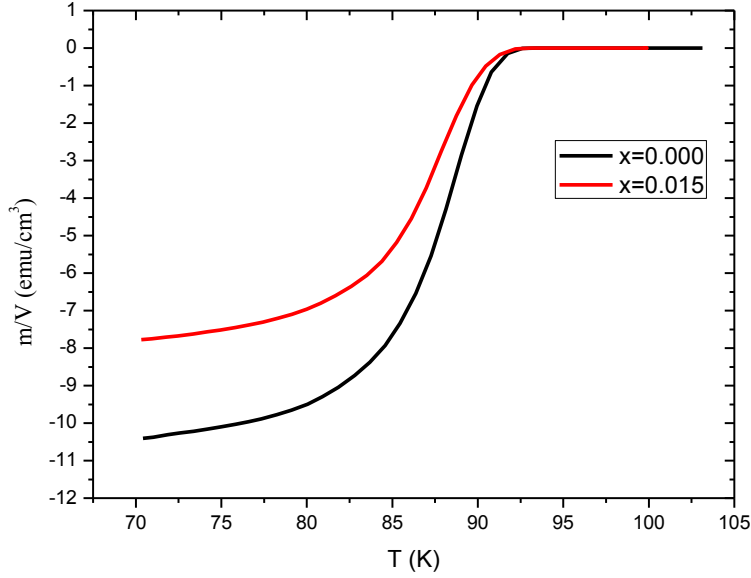
3.3. Fiziksel Analiz

3.3.1. Sm123 Süperiletkeninin Direnç ve Kritik Geçiş Sıcaklığı Özellikleri

Katkı miktarının numunelerin geçiş sıcaklığı ve direnç özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla $x=0,000$ ve $x=0,015$ oranında Nd-Fe-B katkılı numunenin direnç ölçümü yapıldı. Direnç ölçümü manyetik alan uygulanmadan yapıldı. Direncin sıcaklıkla değişiminin gösterildiği grafikler $T=100$ K deki direnç değerine normalize edilerek çizildi. Şekil 3.15’ de, katkı miktarına bağlı olarak direncin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi $x=0,015$ katkılı numunenin direnci, katkısız numunenin direncinden bir miktar daha fazladır. Süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı $T_{c-sifir}$ değerinin, katkılı numunede 90 K ve katkısız numunede 92 K olduğu görüldü. Süperiletkene manyetik katkı yaptıkça süperiletken kritik geçiş sıcaklık değerinin azaldığı bilinen bir gerçektir. Bu duruma, CuO düzlemlerindeki taşıyıcı yoğunluğunun katkı ile azalmasının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalarda Y123 ve Gd123 gibi yüksek sıcaklık süperiletkenlerine yapılan metalik katkıların, numune içerisindeki normal bölge yoğunluğunu arttırdığı böylece süperiletkenin elektriksel özelliğinin bastırıldığı, bunun da kritik geçiş sıcaklığını azalttığı belirtilmiştir (Zhou vd., 2006; Ruckman vd., 1990). Katkılı numunenin kritik sıcaklığının daha düşük olduğu Şekil 3.16’ daki manyetizasyon-sıcaklık grafiğinden de görülmektedir.



Şekil 3.15. Katkısız ve $x=0,015$ Nd-Fe-B katkılı Sm123 süperiletken numunelerin normalize dirençlerinin sıcaklığa göre değişimi



Şekil 3.16. Katkısız ve $x=0,015$ Nd-Fe-B katkıli Sm123 numunelerinin manyetizasyon değerlerinin sıcaklığa göre değişimi

3.3.2. Süperiletken Numunelerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, süperiletkenlerde kaldırma ve çekme kuvvetini artırabilmek için numune ve mıknatıs boyutları ile soğutma şartlarının uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Süperiletken ile mıknatıs arasında oluşan kaldırma kuvveti (F_L), süperiletken içerisinde oluşan manyetik momentle doğru orantılı olup bir boyutta bu kuvvet,

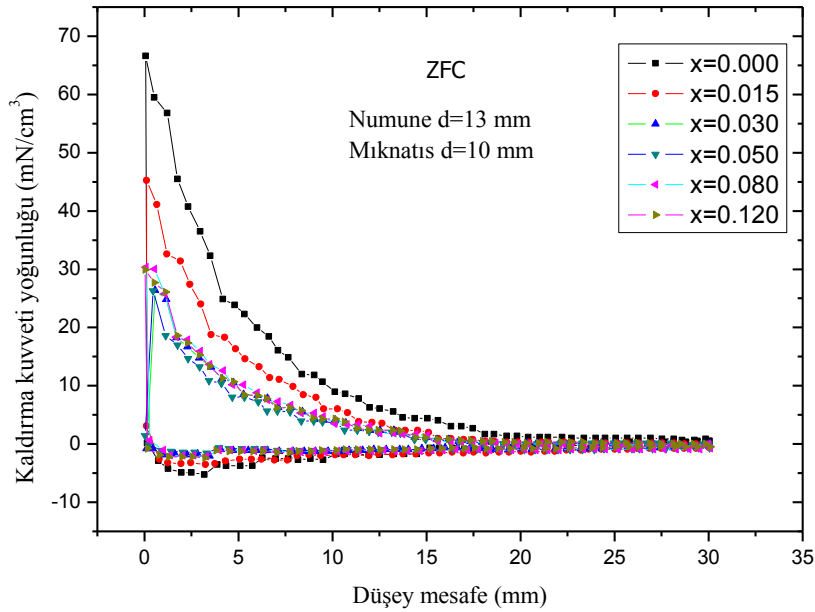
$$F = m(dH/dz) \quad (3.1)$$

$$m = MV \text{ ve } M = AJ_c r \quad (3.2)$$

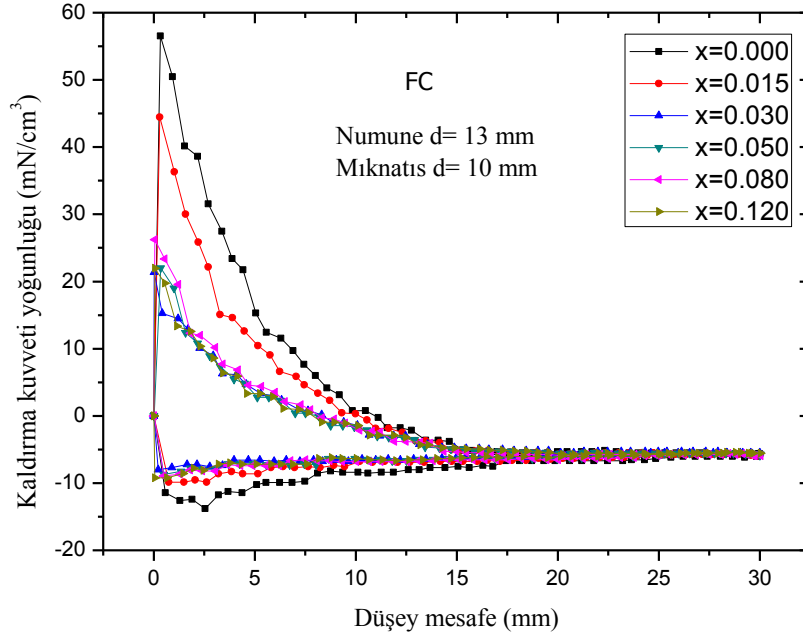
ifadeleri ile verilir (Murakami vd., 1991). Burada m , süperiletkenin manyetik momentini; dH/dz , dış manyetik kaynak (mıknatıs) tarafından oluşturulan alan değişimini; M , birim hacimdeki manyetizasyonu; V , numune hacmini; A , numune geometrisine bağlı bir sabiti; J_c , süperiletkenin kritik akım yoğunluğunu ve r , uygulanan dış manyetik alanı dışarılamak için süperiletkende oluşan koruyucu akım halkasının yarıçapını gösterir. Bu ifadeler, süperiletkenlerin teknolojik uygulanabilirliğinde gerekli olan büyük kaldırma kuvveti için büyük r , J_c ve dH/dz değerlerine sahip olmamız gerektiğini gösterir (Yang vd., 2002; Yang vd., 2003). Yapılan çalışmada da bu amacı gerçekleştirmek için manyetik toz katkısının, mıknatıs boyutunun ve süperiletken numune boyutunun Sm123 ve $(Sm123)_{0,75}(Sm211)_{0,25}$ süperiletkenlerinin manyetik kaldırma ve çekme kuvvetine etkisi araştırılmıştır.

3.3.2.1. Nd-Fe-B Katkılı Sm123 Süperiletken Numunelerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri

Şekil 3.17’ de MPMG yöntemiyle üretilen 13 mm çaplı Sm123 numunelerine yapılan farklı katkı oranları için kaldırma kuvveti yoğunluğunun alansız soğutma (ZFC) rejimi altında düşey mesafeye göre değişimi gösterilmiştir. Şekilde x katkı oranının artmasıyla manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Şekil 3.18’ de, katkı miktarının manyetik kaldırma ve çekme kuvvetine etkisinin alanlı soğutma (FC) rejimi altında düşey mesafeye göre değişimi gösterilmiştir. Her iki şekilden de görüleceği gibi katkı oranı arttıkça manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerleri azalmaktadır. Bu duruma, katkı maddesindeki Nd elementinin ısı işlem sırasında kolayca oksitlenmesinin ve bu oksitlenmenin numunenin yapısal özelliklerini olumsuz yönde değiştirmesine neden olduğu düşünülmektedir. Katkı ile süperiletken tane içine girmeyen Nd elementi, numune içerisinde aşırı oksitlenme ile mikro gerilme bölgelerinin ve buna bağlı olarak mikro çatlaklarının oluşmasına neden olmakta ve bu durum, süperiletken numune içerisinde akım süreksizliğine ve düşük manyetizasyon değerine neden olmaktadır.



Şekil 3.17. ZFC rejimi altında farklı Nd-Fe-B katkı oranlarındaki Sm123 süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi



Şekil 3. 18. FC rejimi altında farklı Nd-Fe-B katkı oranlarındaki Sm123 süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi

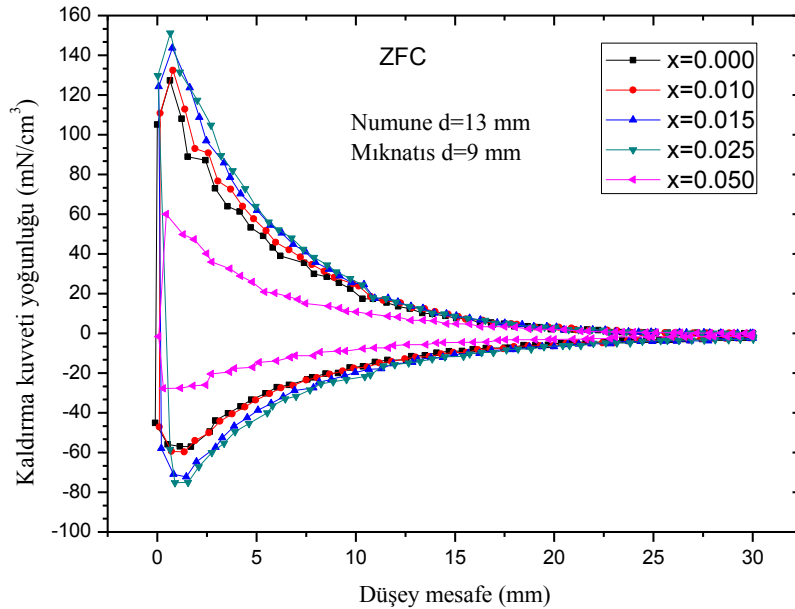
3.3.2.2. Fe-B Katkılı $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ Süperiletken Numunelerin Manyetik Kaldırma Kuvveti Özellikleri

Nd-F-B katkısının olumsuz sonuç vermesi ve bu olumsuzluğun Nd elementinden kaynaklandığının düşünülmesi nedeniyle 13 mm çaplı numunelere farklı oranlarda Fe-B katkısı yapıldı. Ayrıca Sm123 bileşiğine molar olarak %25 oranında Sm211 katkısı yapıldı. RE211 katkısının süperiletken taneler arası teması artırdığı, kristalleşme oranını iyileştirdiği ve düşük katkı oranlarının akı çivileme merkezi olarak görev yaptığı, böylece üretilen süperiletken numunelerin yapısal ve süperiletken özelliklerini artırdığı literatürde gözlenmiştir (Öztürk, K., 2009).

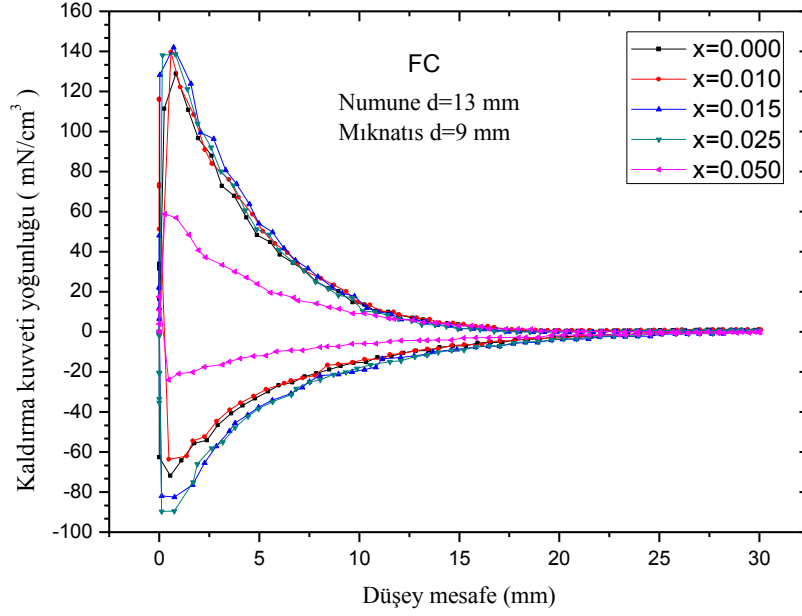
Farklı Fe-B katkı oranları için kaldırma kuvveti yoğunluğunun ZFC rejimi altında düşey mesafeye göre değişimi Şekil 3.19' da, FC altındaki değişim ise Şekil 3.20' de gösterilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi katkı oranının $x=0,025$ değerine kadar artmasıyla kaldırma ve çekme kuvveti değerleri artmakta, daha büyük katkıda ise bu değerler azalmaktadır. Şekil 3.19' da görülen manyetik kaldırma kuvveti değerlerinin genel olarak Şekil 3.17' den büyük olması, $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ bileşimine bağlı olarak Sm211 katkısı ile süperiletken numunenin pinning ve süperiletkenlik özelliklerinin iyileştiğini gösterir. Ayrıca Fe-B manyetik toz katkısı ile $x=0,025$ katkı değerine kadar manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerlerinin artması, süperiletken numune içinde akı çivileme merkezleri olarak görev yapan

normal bölge yoğunluğunun arttığına işaret eder. $x=0,050$ gibi yüksek manyetik katkı oranında manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerlerinin azalması ise numune içerisindeki normal bölge yoğunluğunun aşırı artarak süperiletkenliği bastırması ve böylece numunenin manyetizasyon özelliğini azaltmasıyla açıklanabilir. Ayrıca aşırı manyetik katkının HTS süperiletkenlerde T_c ' yi azalttığı ve böylece numune içerisinde düşük T_c bölgeleri oluşturduğu bilinen bir gerçektir.

FC ve ZFC rejimleri altında alınan ölçümlere bakıldığında literatüre uygun olarak ZFC rejiminde kaldırma kuvvetinin, FC rejiminde ise çekme kuvvetinin büyük olduğu görülmektedir. ZFC durumunda, mıknatıs süperiletkene doğru yaklaştırıldığında, manyetik akı çizgilerinin büyük yoğunluğu, numunenin demanyetizasyonu ve güçlü akı çivilemesinden dolayı dışarılanır. Bu nedenle manyetik alan numune içine giremez ve böylece numunede tuzaklanan manyetik alan çok az olur. Bu durum, numune mıknatısa yaklaştırılırken kaldırma kuvvetinin yüksek, uzaklaştırılırken ise çekme kuvvetinin düşük olmasına neden olur. Fakat FC durumunda, soğutma sırasında numune ile mıknatıs arasındaki mesafe çok az olduğundan, tuzaklanan manyetik alan ZFC durumunda tuzaklanandan daha fazla olur. Bunun sonucu olarak, FC durumundaki çekme kuvveti, ZFC durumundaki çekme kuvvetinden daha büyük olur (Yang vd., 2003).



Şekil 3.19. ZFC rejimi altında farklı Fe-B katkı oranlarındaki $(\text{Sm}_{123})_{0,75}(\text{Sm}_{211})_{0,25}$ süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi



Şekil 3.20. FC rejimi altında farklı Fe-B katkı oranlarındaki $(\text{Sm123})_{0,75}(\text{Sm211})_{0,25}$ süperiletken numunelerin kaldırma kuvvet yoğunluğunun mesafeye göre değişimi

3.3.2.3. Mıknatıs ve Süperiletken Numune Boyutunun Kaldırma Kuvvetine Etkisi

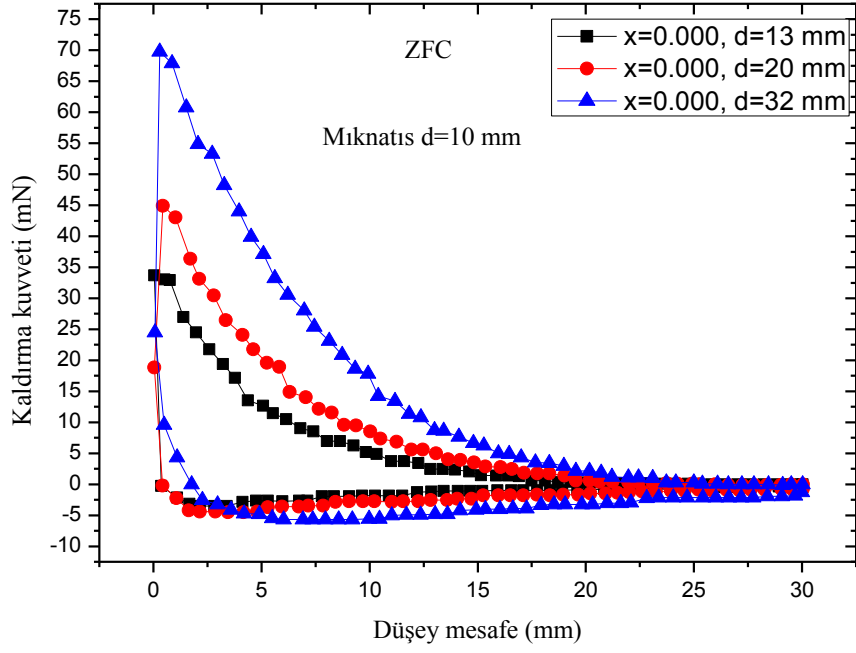
Sm123 süperiletkeninde numune boyutunun kaldırma kuvveti üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla $d=13$ mm, 20 mm ve 32 mm çaplı ve 6 mm yükseklikli üç farklı numune üretildi. Manyetik alan dağılımının Sm123 süperiletkeni üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla üç farklı mıknatıs kullanıldı. Bu amaçla kullanılan mıknatısların boyutları ve yüzeylerindeki manyetik alan şiddeti değerleri Tablo 3.2’ de görülmektedir.

Tablo 3.2. Mıknatıs boyutları ve manyetik alan değerleri

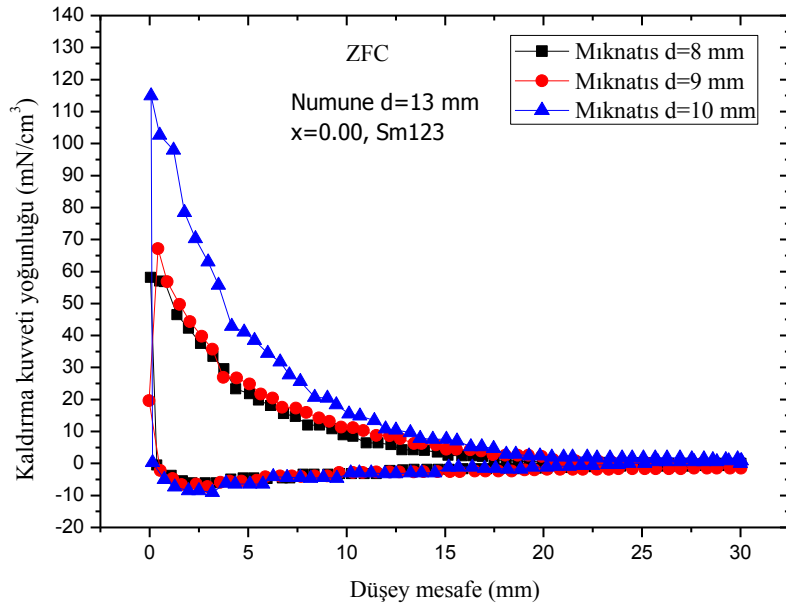
Çap (mm)	Yükseklik (mm)	Manyetik alan (Tesla)
8	12	0,48
9	25	0,59
10	10	0,55

Şekil 3.21’ de, farklı boyuttaki üç numunenin ($x=0,000$; Sm123) ZFC rejimi altındaki manyetik kaldırma kuvvet grafiği görülmektedir. Grafikten görüldüğü gibi, Sm123 süperiletken numunesinin çapı arttıkça kaldırma kuvvetinde büyük bir artış olmaktadır. Şekil 3.22’ de $d=13$ mm çaplı, katkısız Sm123 numunesinin farklı boyut ve manyetik alan şiddeti

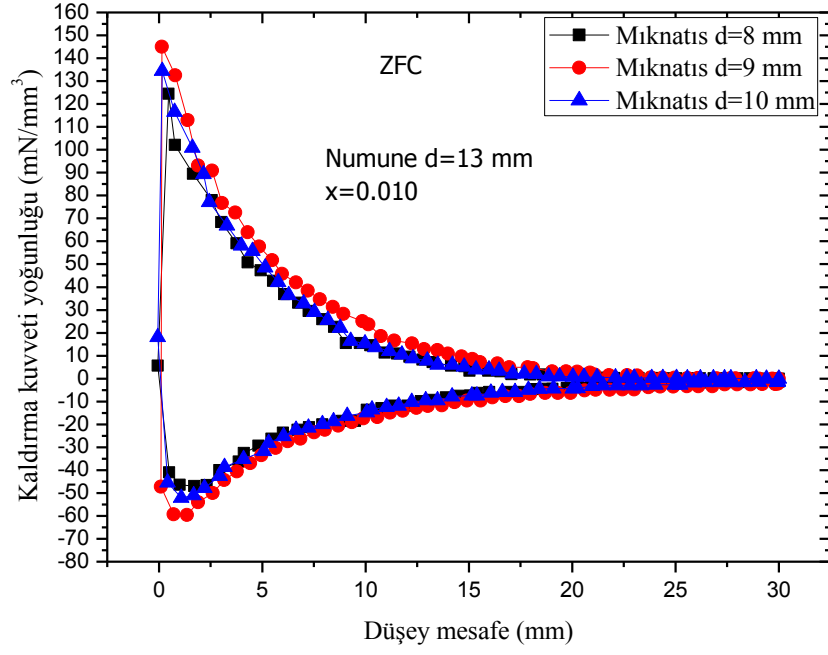
değerine sahip üç farklı mıknatis kullanılarak ZFC rejimi altında ölçülen manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun düşey mesafeye göre değişimi gösterilmektedir. Şekilde, aynı numunenin farklı manyetik alan altındaki kaldırma kuvveti davranışını doğru bir şekilde karşılaştırmak için F_L birim hacimdeki kuvvet olarak hesaplanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi mıknatis çapı arttıkça manyetik kaldırma kuvvet değeri de artmaktadır. $d=9$ mm, $h=25$ mm boyutlu mıknatisla $d=10$ mm, $h=10$ mm boyutlu mıknatisi karşılaştırdığımızda yüzeyindeki manyetik alan değeri daha az olmasına rağmen, $d=10$ mm, $h=10$ mm boyutlu mıknatis kullanıldığında manyetik kaldırma kuvveti belirgin bir şekilde artmaktadır. Bu durum mıknatis çapının, numune üzerindeki manyetik akı dağılımında ve dolayısı ile manyetik kaldırma kuvvetinde, manyetik alan şiddeti kadar etkili olduğunu gösterir. Ayrıca mıknatis boyutunun süperiletken numune boyutuna yaklaşması ile de kaldırma kuvveti değerlerinde bir artış olduğu Şekil 3.22' de görülmektedir. Buradan, mıknatis çapı ile numune çapının eşit olması durumunda kaldırma kuvvetinin maksimum değerde olacağı anlaşılmaktadır. Bu durum, süperiletkende indüklenen perdeleme akımlarından kaynaklanmaktadır (Yang vd., 2003). Şekil 3.23, $x=0,010$ Fe-B katkılı $(Sm123)_{0,75}(Sm211)_{0,25}$ numunesinin farklı boyutlardaki mıknatislerle ZFC rejimi altında ölçülen manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun düşey mesafeye göre değişimini vermektedir. Bu şekilde, manyetik katkı yaptıkça maksimum kaldırma ve çekme kuvveti değerinin mıknatisin boyutuna değil, manyetik alan şiddetine bağlı olduğu görülmektedir. Bu duruma, manyetik katkı ile numunedeki akı çivileme merkez yoğunluğunun artmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.21. Farklı boyutlardaki Sm123 numunelerinin ZFC rejimi altındaki manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye göre değişimi



Şekil 3.22. Katkısız Sm123 numunesinin farklı boyutlardaki mıknatıslarla ZFC rejimi altında ölçülen manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun düşey mesafeye göre değişimi



Şekil 3. 23. $x=0,010$ Fe-B katkılı $(\text{Sm}123)_{0,75}(\text{Sm}211)_{0,25}$ numunesinin farklı boyutlardaki mıknatıslarla ZFC rejimi altında ölçülen manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun düşey mesafeye göre değişimi

4. SONUÇLAR

Numune boyutu, mıknatıs boyutu, manyetik toz katkısı ve soğutma şartlarının Sm123 süperiletkeninin manyetik kaldırma ve çekme kuvvetine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada MPMG yöntemi kullanıldı. Üretilen numunelerin yapısal analizleri DTA, XRD, SEM-EDX ve polarize optik mikroskop yardımıyla; fiziksel analizleri ise direnç ölçümü ve manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri ile belirlendi. Deneysel ölçüm verilerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. X-ışını kırınımı desenlerinde (003), (005), (006), (007) ve (116) piklerinin şiddetlerinin $x=0,025$ Fe-B katkılı numune için maksimum değerde olduğu gözlemlendi. Bu artışın nedeninin, yüksek sıcaklıkta yapı içinde sinterleme esnasında Sm211' den çözünüp $880-1000^{\circ}\text{C}$ de oluşan Sm123 süperiletken fazının olduğu düşünülmektedir. $x=0,050$ katkılı numuneye ait pik şiddetlerindeki azalma, yabancı fazların arttığını ve ortorombik fazdan uzaklaşıldığını göstermektedir. (00 l) pik şiddetlerinin diğer piklere oranla daha büyük olduğu da XRD desenlerinden gözlemlendi. Bu durum, süperiletken numunelerin yönelmesinin ağırlıklı olarak c eksenine boyunca olduğunu göstermektedir.
2. Optik fotoğrafların incelenmesinden, süperiletken kristallerinin oluştuğu ve tane boyutları ile yönelimlerinin farklı olduğu gözlemlendi. Numunelerde boşluklu bir yapının olduğu görüldü. Bu boşlukların, yumuşak bir yapıya sahip olan ve parlatma sırasında dökülmüş olabilecek BaCuO₂ fazına ait bölgeler olduğu düşünülmektedir. $x=0,015$ ve $x=0,025$ katkılı numunelerde taneler arası temasın diğer numunelere kıyasla daha iyi ve temiz olduğu ve numunelerde yer alan boşlukların bu iki numunede daha az olduğu görüldü. Numunelerdeki boşluk miktarının azalması, numunenin külçe ve süperiletkenlik özelliklerinin iyileştiğini gösterir.
3. Direnç-sıcaklık ölçümünde, katkılı numunenin direncinin katkısız numuneden fazla olduğu ve $T_{c-sıfır}$ değerinin katkılı numunede daha düşük olduğu gözlemlendi. Bu duruma, CuO düzlemlerindeki taşıyıcı yoğunluğunun katkı ile azalmasının neden olduğu düşünülmektedir.
4. Nd-Fe-B katkılı numunelerin manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri incelendiğinde, FC ve ZFC durumlarında katkı miktarı ile manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerlerinin azaldığı gözlemlendi. Bu duruma, katkı maddesindeki Nd elementinin ısı

işlem sırasında kolayca oksitlenmesinin ve bu oksitlenmenin numunenin yapısal özelliklerini olumsuz yönde değiştirmesinin neden olduğu düşünülmektedir.

5. Fe-B katkılı numunelerin manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri incelendiğinde, manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerlerinin belirli bir katkı miktarına kadar ($x=0,025$) arttığı, daha sonra azaldığı gözlemlendi. $x=0,025$ katkı değerine kadar manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerlerinin artması, süperiletken numune içinde akı çivileme merkezleri olarak görev yapan normal bölge yoğunluğunun arttığına işaret eder. $x=0,050$ gibi yüksek manyetik katkı oranında manyetik kaldırma ve çekme kuvveti değerlerinin azalması ise numune içerisindeki normal bölge yoğunluğunun aşırı artarak süperiletkenliği bastırması ve böylece numunenin manyetizasyon özelliğini azaltmasıyla açıklanabilir.
6. Mıknatıs boyutunun manyetik kaldırma kuvveti üzerinde etkili olduğu gözlemlendi. Mıknatıs çapı arttıkça manyetik kaldırma kuvvet değerlerinde artış olduğu gözlemlendi. Mıknatıs boyutunun süperiletken numune boyutuna yaklaşması ile kaldırma kuvveti değerlerinde bir artış olduğu gözlemlendi ve buradan, mıknatıs çapı ile numune çapının eşit olması durumunda kaldırma kuvvetinin maksimum değerde olacağı sonucuna ulaşıldı.
7. Farklı boyutlarda üretilen örneklerin manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri karşılaştırıldığında, numune çapının artmasıyla kaldırma kuvvetinin de arttığı gözlemlendi.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada manyetik toz katkısının, soğutma şartlarının, miknatis ve numune boyutunun Sm123 süperiletkeninin manyetik kaldırma kuvvetine etkisi araştırıldı. Çalışmada incelenen numuneler MPMG yöntemi ile 13 mm ve 20 mm çaplarında ve 340 MPa basınç altında tabletler üretildi. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda top seeding gibi farklı yöntemlerle ve farklı basınçlar altında numuneler üretilerek bunların manyetik kaldırma kuvveti, kritik akım yoğunluğu ve tuzaklanan alan değerleri araştırılabilir. Farklı boyutlarda ve farklı miktarlarda manyetik toz katkısı yapılarak bu katkının manyetik kaldırma kuvvetine etkisi araştırılabilir. Katkı malzemesi olarak daha farklı manyetik tozlar kullanılabilir. Farklı manyetik alan dağılımı altında manyetik kaldırma kuvveti özellikleri incelenebilir. Ayrıca üretilen numunelerin boyutları artırılarak manyetik kaldırma kuvveti artırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Babu, N.H., Iida, K. and Cardwell, D. A., 2007. Flux pinning in melt-processed nanocomposite single-grain superconductors, Supercond. Sci. Technol. 20, 141–146.
- Bardeen, J., Cooper, L.N. and Schrieffer, J., 1957. Theory of Superconductivity, Phys. Rev., 108, 1175-1204.
- Bean, C.P., 1964. Magnetization of high-field superconductors, Rev. Mod. Phys., 31.
- Bednorz, J.G. and Müller, K.A., 1986. Possible High T_c Superconductivity in The Ba-La-Cu-O system, Z. Phys. B, Condensed Matter, 64, 189-193.
- Celik, S. and Ozturk, K., 2009. Semiempirical equation of the levitation-force density for $(\text{Sm}_{123})_{1-x}(\text{Yb}_{211})_x$ superconducting samples, Physica Status Solidi A 206, 724-730.
- Chan, W.C., 2003. The effect of sample geometry on magnetic levitation force for a disk-shape YBCO superconductor, Physica C, 390, 27-30.
- Chen, S.Y., Chen, I.G., Liao, Y.G. and Wu, M.K., 2004. Effect of different nano scale $\text{RE}_2\text{BaCuO}_5$ additions on the formation of compositional fluctuation in Sm-Ba-Cu-O superconducting bulk materials, J. Mater. Res., 20, 2, 482-488.
- Chow, J.C.L., Lettow, J.S., Wailo, Cardwell, D.A., Leung, H.T. and Shi, Y.H., 1998. $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ seed fabrication for seeded peritectic solidification of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, Journal of Materials Science 33, 133-137.
- Chu, C.W., Bechtold, J., Gao, L., Hor, P.H., Huang, Z.J., Meng, R.L., Sun, Y.Y., Wang, Y.O. and Hue, Y.Y., 1988. Three Phases in BiSrCaCuO Thin Films Synthesized by the Multilayer Deposition Method. Physical Rev. Lett., 60, 10, 941-946.
- Diko, P., Fuchs, G. and Krabbes, G., 2001. Influence of silver addition on cracking in melt-grown YBCO, Physica C, 363, 60-66.
- Feng, Y., Pradhan, A.K., Zhao, Y., Chen, S.K., Wu, Y., Zhang, C.P., Yan, G., Yau, J.K.F., Zhou, L. and Koshizuka, N., 2003. Improved flux pinning in PMP $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, Physica C, 385, 363-367.
- Fröhlich. H., 1950. Theory of the Superconducting State. I. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature, Physical Review, 79, 5, 845-856.
- Fujimoto, H., 2005. Superconducting and Mechanical Properties of RE-Ba-Cu-O/Ag Bulk Superconductors, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, 15, 2, 3098-3101.
- Hsieh, P.C., Chen, S.Y., Chen, I.G. and Wu, M.K., 2004. Flux pinning at high magnetic field in melt-processed $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ with nanocrystalline $\text{Sm}_{211}/\text{Nd}_{422}$ additives, Supercond. Sci. Technol., 18, 111-118.
- Hu, A., Sakai, N., Zhou, H., Murakami, M. and Hirabayashi, I., 2004. Processing of high-performance $(\text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bulk superconductors with BaO_2 addition, Physica C, 412-414, 571-574.

- Hu, A., Zhou, H., Nariki, S., Murakami, M. and Hirabayashi, I., 2004. Effect of BaO₂ addition on superconducting properties of melt-processed (Sm, Eu, Gd) Ba₂Cu₃O_{7-δ} superconductors, Supercond. Sci. Technol., 17, 545-548.
- Hull, J.R. and Cansiz, A., 1999. Vertical and Lateral Forces between a Permanent Magnet and a High-Temperature Superconductor, J. Applied Physics, 86, 6396.
- Hull, J.R., 2000. Superconducting bearings, Supercond. Sci. Technol, 13, R1-R15.
- Ikuta, H., Mase, A., Yanagi, Y., Yoshikawa, M., Itoh, Y., Oka, T. and Mizutani, U., 1998. Melt-processed Sm-Ba-Cu-O superconductors trapping strong magnetic field, Supercond. Sci. Technol., 11, 1345-1347.
- Jiang, H., Wang, J., Wang, S., Ren, Z., Zhu, M., Wang, X. and Shen, X., 2002. The magnetic levitation performance of YBaCuO bulk at different temperature , Physica C, 378-381, 869-872.
- Jee, Y.A., Li, M., Ma, B., Maroni, V.A., Fisher, B.L. and Balachandran, U., 2001. Comparison of texture development and superconducting properties of YBCO thin films prepared by TFA and PLD processes, Physica C, 356, 297-307.
- Kaiser, A.W., Hennig, W. and Bornemann, H.J., 1998. Properties of melt textured Sm/Nd-Ba-Cu composites, Physica C, 299, 185-190.
- Kamihara, Y., Watanabe T., Masahiro H. M. and Hideo H. H., 2008. Iron-Based Layered Superconductor La[O_{1-x}F_x]FeAs (x = 0.05-0.12) with T_c = 26 K, J. Am. Chem. Soc., 130, 11, 3296-3297.
- Kittel, C., 2005. Introduction to Solid State Physics, John Wiley & Sons, Inc.
- Koshizuka, N., Pradhan, A.K., Shibata, S., Feng, Y., Machi, T. and Nakao, K., 2001. Magnetic and Magneto-Transport Properties of NdBaCuO Single Crystal with Varying Nd/Ba Substitution and Oxygen Content, Physica C, 364-365, 320-325.
- Lau, K.T., Yahya, S.Y. and Abd-Shukor, R., 2006. Enhanced flux pinning in Ag-sheathed Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O superconductors tapes with addition of magnetic nanorod γ-Fe₂O₃, J. Appl. Phys. 99, 123904.
- Ma, K.B., Postrekhin, Y.V. and Chu, W.K., 2003. Superconductor and magnet levitation devices, Rev. Sci. Instrum, 74, 12, 4989-5017.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutumi, M. and Asano, T., 1988. A New High-T_c Oxide Superconductor without a Rare Earth Element. J. Appl. Phys., 27, 209-210.
- Maxwell, E., 1950. Isotope Effect in the Superconductivity of Mercury, Physical Review, 78, 477.
- Meissner, W. and Ochsenfeld, R., 1933. Superconductivity, Nature, 132, 931-935.

- Moon, F.C., 2004, *Superconducting Levitation*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Murakami, M., Oyama, T., Fujimoto, H., Gotoh, S., Yamaguchi, K., Shiohara, Y., Koshizuoka, N., and Tanaka, S., 1991. Melt Processing of Bulk High Tc Superconductors and Their Application, IEEE Trans. On Magnet, 27, 1479.
- Onnes, H.K., 1911, Superconductivity and Magnetism, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 119-120.
- Ozturk, K., Celik, S. and Cansiz, A., 2009. Determination of levitation force and pinning properties of $(\text{Sm}_{123})_{1-x}(\text{Yb}_{211})_x$ bulk superconductor depending on Yb211 doping ratio, Physica Status Solidi A, 206, 2569-2575.
- Rose-Innes, A.C. and Rhoderick, E.H., 1980. *Introduction to Superconductivity*, Second Press, Pergamon Press Ltd., England.
- Ruckman, M.W. and Hepp, A. F., 1990. 3rd Ann. Conf. Supercond. and Applications, ed H.S. Kwok, Y.H. Kao and D.T. Shaw (New York: Plenum Press).
- Sagar, S., Lahiri, K., Shi, D. and Yang, J.Z., 1997. Effect of Sample Geometry on Levitation Force in Seeded-Melt-Grown Single-Domain $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, 7, 2.
- Sawamura, M. and Morita, M., 2001. A hybrid Sm -type bulk magnet combining Sm -Ba-Cu-O and Y-Ba-Cu-O superconductors, Physica C, 357-360, 892-895.
- Sawamura, M. and Morita, M., 2002. The magnetic levitation forces for single-grain of Y-Ba-Cu-O and LRE-Ba-Cu-O/Ag with LRE =N Sm,Gd, Superconductor Science and Technology, 15, 774-777.
- Shlyk, L., Krabbes, G. and Fuchs, G., 2003. Trapped field and levitation force in melt-textured YBCO doped with Ni and Li, Physica C, 390, 325-329.
- Sung, T.H., Han, Y.H., Lee, J.S., Han, S.C., Jeong, N.H., Oh, K.S., Park, B.S. and Oh, J.M., 2003. Effect of a Passive Magnetic Damper in a Flywheel System With a Hybrid Superconductor Bearing Set, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, 13, 2.
- Wu, M.K., Ashburn, J.R., Tomg, C.J., Hor, P.H., Meng, R.L., Huang, Z.J., Wang, Y.Q. ve Chu, C.W., 1987. Superconductivity at 93K in a New Mixed Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure, Physical Rev. Lett., 58, 908-910.
- Xu, Y., Izumi, M., Zhang, Y.F. and Kimura, Y., 2009. Enhancement of critical current density in Gd123 bulk superconductor doped with magnetic powder, Physica C, 469, 1215.
- Yang, W.M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P.X., Chen, S., Wu, M.Z., Zhang, C.P., Wang, J.R., Du, Z.H., Wang, F.Y., Yu, Z.M., Wu, X.Z., Gawalek and W., Gornert, P., 1998. The

- grain-alignment and its effect on the levitation force of melt processed YBCO single-domained bulk superconductors, Physica C, 307, 271-276.
- Yang, W.M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P.X., Wang, J.R., Zhang, C.P., Yu, Z.M., Tang, X.D. and Wei, W., 2001. The effect of magnet configurations on the levitation force of melt processed YBCO bulk superconductors, Physica C, 354, 5-12.
- Yang, W.M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P.X., Nicolsky, R. and Andrade Jr, R., 2003. The characterization of levitation force and attractive force of single-domain YBCO bulk under different field cooling process, Physica C, 398, 141-146.
- Yang, W.M., Chao, X.X., Bian, X.B., Liu, P., Feng, Y., Zhang, P.X. and Zhou, L., 2003. The effect of magnet size on the levitation force and attractive force of single-domain YBCO bulk superconductors, Superconductor Science and Technology, 16, 789-792.
- Zhou, Y.X., Scruggs, S. and Salama, K., 2006. Effect of ionic doping on superconducting properties of melt textured $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{M}_x)_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}$ or Ga) large grain, Superconductor Science and Technology, 19, 556-561.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Kadıköy’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Gebze’de tamamladı. 2003 yılında öğrenime başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Öğretmenliği bölümünden 2008 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2009 yılı Mart ayında Bayburt Üniversitesi Bayburt Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu görevine devam eden Murat ABDİOĞLU iyi derecede İngilizce bilmektedir.