



T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LEVİTASYON UYGULAMALARI İÇİN YBCO TEK KRİSTAL
SÜPERİLETKENLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Sait Barış GÜNER

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

RİZE 2017

**T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LEVİTASYON UYGULAMALARI İÇİN YBCO TEK KRİSTAL
SÜPERİLETKENLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

SAİT BARIŞ GÜNER

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. MURAT TOMAKİN

2. TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. ŞÜKRÜ ÇELİK

TEZ JÜRİLERİ

PROF. DR. KEMAL ÖZTÜRK

DOÇ. DR. ÖZGÜR ÖZTÜRK

YRD. DOÇ. DR. NİLÜFER AS

YRD. DOÇ. DR. BURCU SAVAŞKAN

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

RİZE-2017

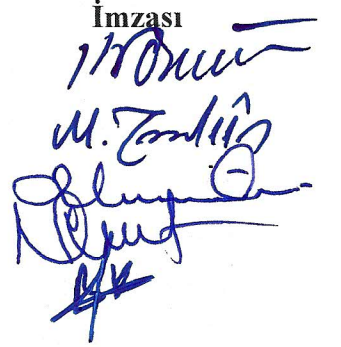
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LEVİTASYON UYGULAMALARI İÇİN YBCO TEK KRİSTAL
SÜPERİLETKENLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Doç. Dr. Murat TOMAKİN danışmanlığında, Sait Barış GÜNER tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14/04/2017 tarihinde Fizik Anabilim Dalı'nda DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı Adı Soyadı
Başkan :	Prof. Dr. Kemal ÖZTÜRK
Üye :	Doç. Dr. Murat TOMAKİN
Üye :	Doç. Dr. Özgür ÖZTÜRK
Üye :	Yrd. Doç. Dr. Nilüfer AS
Üye :	Yrd. Doç. Dr. Burcu SAVAŞKAN

İmzası



Doç. Dr. Ferhat KALAYCI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Levitasyon Uygulamaları için YBCO Tek Kristal Süperiletkenlerin Üretimi ve Karakterizasyonu için yapılan bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda "Doktora Tezi" olarak hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans ve Doktora döneminde danışmalığımyı yapan Doktora tez çalışmalarım kapsamında çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar etkin bilgi ve tecrübeleriyle yetişme ve gelişmeme de katkıda bulunan danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Şükrü ÇELİK'e ve Doç. Dr. Murat TOMAKİN'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım. Doktora eğitimim boyunca beni yönlendiren, deneysel çalışmalarımda yanımda olan ve fikirlerini benimle paylaşan Karadeniz Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Kemal ÖZTÜRK'e, İstanbul Gelişim Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Ekrem YANMAZ'a ve Ankara Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Ali GENCER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarımın deneysel aşamasında tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan ve bana sabırla yardımcı olan İngiltere Brunel Üniversitesi'nden Sayın Dr. Hari Babu NADENDLA'ya, İngiltere Cambridge Üniversitesi'nden Sayın Dr. Yunhua SHI'ye ve Güney Kore Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü'nden Sayın Prof. Chan-Joong Kim'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca, doktora tez çalışmam sırasında destek olan Sayın Arş. Gör. Dr. Erkan KIRIŞ'a ve Karadeniz Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Burcu SAVAŞKAN'a çalışmamı hızlandıran, yardımlarını esirgemeyen Japonya Shibaura Teknoloji Enstitüsü'nden Sayın Nakazato KENTA'ya teşekkür ederim. Tez çalışmalarımda ürettiğimiz örneklerin manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerini 110T622 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında oluşturulan Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sistemi'nde yapılmıştır.

Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen, bana moral-motivasyon veren ve benim başarılı olmamda büyük emekleri olan başta eşim Zeynep KARGIN GÜNER olmak üzere tüm aileme teşekkür etmeyi borç bilirim.

Sait Barış GÜNER

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Levitasyon Uygulamaları için YBCO Tek Kristal Süperiletkenlerin Üretimi ve Karakterizasyonu” başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 11/05/2017



Sait Barış GÜNER

***Uyarı:** Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.*

ÖZET

LEVİTASYON UYGULAMALARI İÇİN YBCO TEK KRİSTAL SÜPERİLETKENLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Sait Barış GÜNER

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışmanı: Doç. Dr. Murat TOMAKİN

Bu çalışmada Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyütme (TSMG) yöntemiyle (% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0,5 CeO₂ (YBCO) süperiletkenleri 13, 20, 32 ve 40 mm çaplarında üretildi. 40 mm çapındaki tek kristal YBCO süperiletkeni Türkiye’de üretilen en büyük tek kristaldir. 20 mm çapındaki Y20 örneğinin düşük sıcaklıklarda ($T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) dikey kuvvet (F_z) – dikey hareket (z), yatay kuvvet (F_x) – yatay hareket (x), dikey kuvvet (F_z) – zaman (t) ve dikey kuvvet (F_z) – sıcaklık (T) ölçümleri alansız soğutma (ZFC) ve alanlı soğutma (FC) rejimi altında yapıldı. Y20 örneğinin farklı bölgelerinden kesitler elde etmek için simetrik olarak kesildi. Çekirdeğin merkezinden 5 mm altındaki kesitin kritik sıcaklık değerinin, çekirdeğin merkezinden 3 mm ve sağından 4.5 mm uzaklıktaki kesitin kritik sıcaklık değerinden 0,2 K daha düşük olduğu görüldü. Çekirdeğin sağından 4.5 mm uzaklıktaki kesitin en yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip olduğu bulundu. Kritik akım yoğunluğunun numune sıcaklığı düştükçe arttığı gözlemlendi. YBCO tek kristal süperiletkeniyle aynı katkı oranlarında farklı çoklu kristal yapıda (çekirdekler arası mesafeleri (d) ve çekirdeklerin yapısı) YBCO süperiletkenleri TSMG yöntemiyle üretildi. Üretilen örneklerin çekirdekleri; $(100) // (100)$ olarak yerleştirilenlerin $d = 0, 1, 4, 12$ ve 16 mm ve $(100) // (010)$ olarak yerleştirilenlerin $d = 0, 4$ ve 12 mm olarak seçildi. Üretilen örneklerin $83, 80$ ve 77 K’de ZFC ve FC rejimi altında $F_z - z$ ölçümleri yapıldı ve d arttıkça manyetik kaldırma kuvvetinin düştüğü görüldü. $(100) // (100)$ yapıda olan örneklerin üst ve alt yüzeylerinden manyetik alan tuzaklaması ölçüldü ve d değeri arttıkça artık eriyik fazların artması manyetik alan tuzaklamasının azaldığı görüldü.

2017, 142 sayfa

Anahtar Kelimeler: YBCO Tek Kristal, TSMG Yöntemi, Çoklu Kristal YBCO, Manyetik Kaldırma Kuvveti, Tuzaklanan Alan.

ABSTRACT

THE FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF YBCO SINGLE CRYSTALS FOR LEVITATION APPLICATIONS

Sait Barış GÜNER

Recep Tayyip Erdoğan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat TOMAKİN

In this study, (% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0,5 CeO₂ (YBCO) superconductors with the diameters of 13, 20, 32 and 40 mm were fabricated by Top-Seeded-Melt-Growth (TSMG) method. The single crystal YBCO superconductor with a diameter of 40 mm is the largest single crystal produced in Turkey. Vertical force (F_z) - vertical movement (z), lateral force (F_x) - lateral movement (x), vertical force (x) at low temperatures ($T = 37, 47, 57, 67$ and 77 K) F_z - time (t) and vertical force (F_z) - temperature (T) measurements of YBCO single grain with a diameter of 20 mm were made under ZFC and FC regime. Y20 sample was cut symmetrically to obtain specimen at different positions. It was seen that the critical transition temperature value of the specimen 5 mm below from center of seed is 0,2 K lower than that of the specimen of below 3 mm and 4.5 mm right direction of seed. It was found that specimen 4.5 mm right direction of seed has the highest critical current density. It was observed that the critical current density increased as temperature of the sample decreased. Multi-seeded YBCO superconductors (with different seed distances (d) and structures) was fabricated as same as YBCO single grain compound by TSMG. The seed structure of fabricated multi-seeded samples were chosen $d = 0, 1, 4, 12$ and 16 mm for $(100) // (100)$ alignment and $d = 0, 4$ and 12 mm for $(100) // (010)$ alignment. F_z - z measurements of these samples were performed at 83, 80 and 77 K under the ZFC and FC regime and d value increases as magnetic levitation force decreases. Trapped field measurements on the top and bottom surfaces of the $(100) // (100)$ aligned samples were measured and as the value of d increases, the increase of the melt phase is seen to decrease the magnetic field trapping.

2017, 142 pages

Keywords: YBCO Single Crystal, TSMG Method, Multi-seeded Crystal YBCO, Magnetic Levitation Force, Trapped Field.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Süperiletkenlikle İlgili Tarihsel Gelişmeler.....	3
1.2. Süperiletkenlerin Bazı Temel Özellikleri	6
1.2.1. Sıfır Direnç ve Geçiş Sıcaklığı	6
1.2.2. Kritik Akım Yoğunluğu.....	7
1.2.3. Kritik Manyetik Alan.....	8
1.2.4. Meissner Etkisi.....	9
1.2.5. Sızma Derinliği (Penetration Depth = λ).....	10
1.2.6. Uyum Uzunluğu (Coherence Length = ξ)	11
1.2.7. I. ve II. Tip Süperiletkenlik.....	11
1.3. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri (HTSC).....	13
1.3.1. (RE)BCO Tek Kristalleri	13
1.3.1.1. REBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} (RE-123) Sisteminin Fiziksel Özellikleri	14
1.3.1.1.1. RE-123 Sisteminin Kristal Yapısı.....	14
1.3.1.1.2. (RE)BCO'nun Süperiletkenlik Özellikleri.....	17
1.4. (RE)BCO Malzemelerini Üretim Yöntemleri.....	18
1.4.1. MTG (Eritme-Yönlendirmeli-Büyüme).....	18
1.4.2. MPMG (Eritme-Toz-Eritme-Büyüme)	19
1.4.3. TSMG (Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyüme).....	20
1.4.4. OCMG (Oksijen-Kontrollü-Eritme-Büyüme)	21
1.4.5. IG (Süzme ve Büyüme)	23
1.5. Külçe (RE)BCO Süperiletkenlerin Uygulamaları	23

1.5.1.	Levitasyon ve Süspansiyon Sistemleri.....	24
1.5.1.1.	Manyetik Kaldırma Kuvveti Sistemleri	25
1.5.2.	Sabit Miknatıs Kullanılan Uygulamalar	26
1.6.	(RE)BCO Malzemeleriyle İlgili Literatür Özeti	26
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	34
2.1.	Süperiletken Malzemelerin Üretimi.....	34
2.1.1.	$Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ (10 $NdBa_2Cu_3O_7$:4 $Nd_4Ba_2Cu_2O_6$) Çekirdeğinin Üretimi	34
2.1.1.1.	$Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ Peletinin Hazırlanışı.....	34
2.1.1.2.	$Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ Çekirdeğinin Belirlenmesi	38
2.1.2.	YBCO Tek Kristal Süperiletken Malzemenin Üretimi.....	39
2.1.2.1.	$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123) ve Y_2BaCuO_6 (Y211) Kimyasal Tozların Hazırlanması	39
2.1.2.2.	((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO_2) (YBCO) Süperiletken Örneğinin Hazırlanışı.....	40
2.1.2.2.1.	YBCO Tek Kristal Süperiletken Kimyasal Tozunun Hazırlanışı	40
2.1.2.2.2.	YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletinin Hazırlanışı ve Sıcaklık Grafiğinin Uygulanması	41
2.1.2.2.3.	Diferansiyel Termal Analiz (DTA).....	44
2.1.2.2.3.1	YBCO Tek Kristal Süperiletkenin Peritektik Sıcaklığının Belirlenmesi.....	45
2.1.2.2.4.	Farklı Sıcaklıklarda Üretilen Y211 (Yeşil Faz) Kimyasal Tozunun Tek Kristal YBCO Süperiletkeninin Büyümesine Etkisi.....	47
2.1.2.2.5.	YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletinin Üst Sıcaklık (T_{max}) Değişimlerinin Büyümeye Etkisi.....	48
2.1.2.2.6.	YBCO Tek Kristal Süperiletkenin Sıcaklık Grafiğinin Belirlenmesi.....	50
2.1.2.2.7.	YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletinin Hazırlanışı	50
2.1.2.2.8.	YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletlerinin Oksijen İşlemi	52
2.1.2.3.	Çoklu Çekirdekli ((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO_2) (YBCO) Süperiletken Örneklerin Hazırlanışı	53
2.1.2.3.1.	Çoklu Çekirdeklerin (100) // (100) Yapıda Olduğu YBCO Süperiletken Peletlerinin Hazırlanışı ve Sıcaklık Grafiğinin Uygulanması.....	53
2.1.2.3.2.	Çoklu Çekirdeklerin (100) // (010) Yapıda Olduğu YBCO Süperiletken Peletlerinin Hazırlanışı ve Sıcaklık Grafiğinin Uygulanması.....	56
2.1.2.3.3.	YBCO Çoklu Kristal Süperiletken Peletlerinin Oksijen İşlemi.....	59
2.2.	XRD Ölçümleri.....	60
2.3.	Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sistemi	61

2.4.	Manyetizasyon Ölçümleri.....	62
2.5.	Tuzaklanan Manyetik Alan Ölçümleri.....	62
2.6.	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) Ölçümleri	64
2.7.	Enerji Dağılım Spektrometresi (Energy Dispersive Spectrometry) (EDS) ile İnceleme Ölçümleri.....	64
3.	BULGULAR.....	66
3.1.	XRD Ölçümleri.....	66
3.2.	Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçümleri	68
3.2.1.	Y20 Tek Kristal Süperiletken Örneğine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları	68
3.2.1.1.	Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) - Dikey Uzaklık (z) Ölçümleri	68
3.2.1.2.	Yanal Kuvvet (F_x) - Yanal Uzaklık (x) Ölçümleri.....	74
3.2.1.3.	Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) - Zaman (t) Ölçümleri.....	76
3.2.1.4.	Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) - Sıcaklık (T).....	78
3.2.2.	Çoklu Çekirdekli Süperiletken Örneklerine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları	79
3.2.2.1.	Çoklu Çekirdeklerin (100) // (100) Yapıda Olduğu Süperiletken Örneklerine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları.....	79
3.2.2.1.1.	Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) - Dikey Uzaklık (z) Ölçümleri.....	79
3.2.2.1.2.	Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) – Sıcaklık (T).....	93
3.2.2.2.	Çoklu Çekirdeklerin (100) // (010) Yapıda Olduğu Süperiletken Örneklerine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları.....	93
3.2.2.2.1.	Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) - Dikey Uzaklık (z) Ölçümleri.....	93
3.3.	Manyetizasyon Ölçümleri ve Kritik Manyetik Alan Hesaplamaları	108
3.3.1.	Manyetizasyon Ölçümleri.....	109
3.3.2.	Kritik Akım Yoğunluğu Hesaplamaları.....	111
3.3.3.	Manyetizasyon- Sıcaklık Ölçümleri	113
3.4.	Tuzaklanan Manyetik Alan Ölçümleri.....	113
3.5.	SEM Ölçümleri	118
3.6.	EDS Ölçümleri.....	122
4.	TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....	125
5.	ÖNERİLER.....	133
	KAYNAKLAR	134
	ÖZGEÇMİŞ	142

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	Süperiletkenlerin keşif tarihleri ve kritik geçiş sıcaklıkları.	5
Şekil 2.	Saf YBCO süperiletkenine ait direnç-sıcaklık eğrisi ve ΔT_c aralığı (Doğan, 2005)	7
Şekil 3.	Sıcaklık ile kritik manyetik alanın (a) I. tip süperiletkenlerde ve (b) II. tip süperiletkenlerdeki değişimi	9
Şekil 4.	Meissner etkisinin şematik gösterimi (Rose-Innes vd., 1978).....	10
Şekil 5.	I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler arasındaki farkların şematik gösterimi (Takizawa ve Murakami, 2005).....	12
Şekil 6.	YBCO'nun kristal yapısı. (a) Tetragonal ($\delta=1$), (b) Ortorombik ($\delta=0$) faz (Kartal, 2009).....	15
Şekil 7.	Y-123 sistemlerinde tetragonal ve ortorombik faz için sıcaklık-direnç değişimi grafiği (Hatano vd., 1987).....	16
Şekil 8.	YBCO sistemlerinde oksijen içeriğinin T_c üzerine etkisi (Cava vd., 1987)	16
Şekil 9.	Çeşitli sıcaklıklarda ve oksijen basıncında $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 'de hesaplanan oksijen içeriğiyle deneysel verilerin (açık kareler) karşılaştırılması. Kırık çizgiler, ortorombikten tetragonal geçişe kadar olan katı fazı göstermektedir.....	17
Şekil 10.	MTG yönteminin şematik gösterimi.....	19
Şekil 11.	TSMG yönteminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 12.	Üzerine çekirdek koyularak büyütülen tek kristal YBCO peletinin kristal yön çizgilerinin şematik gösterimi.....	21
Şekil 13.	1050 °C'de sinterlenen $Nd_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O$ örneğinin x katkı oranına göre T_c değişim grafiği.	22
Şekil 14.	IG yönteminin şematik gösterimi.....	23
Şekil 15.	Mekanik karıştırıcı.	35
Şekil 16.	Retsch marka RM200 model agat havanlı öğütücü.	35
Şekil 17.	Protherm marka kare fırın.....	36
Şekil 18.	Perkin-Elmer marka 13 mm çapında presleme aygıtı.....	36
Şekil 19.	Manuel hidrolik press	37

Şekil 20.	Nd _{1.8} Ba _{2.4} Cu _{3.4} O ₇ ait sinterleme işlem grafiği	37
Şekil 21.	Agad havanı	38
Şekil 22.	Nd _{1.8} Ba _{2.4} Cu _{3.4} O ₇ pelletinin kırılan parçaları (çekirdekler)	38
Şekil 23.	Hassas terazi.....	39
Şekil 24.	Y123, Y211 ve CeO ₂ 'nin karışmadan önceki görünümü	41
Şekil 25.	Retsch marka 32 mm çapında presleme aygıtı.	42
Şekil 26.	Nd _{1.8} Ba _{2.4} Cu _{3.4} O ₇ çekirdeğinin YBCO peleti üzerine koyulmuş hali.	42
Şekil 27.	Kare fırın içine konulan peletin görünümü.	43
Şekil 28.	EXSTAR SII TG/DTA 6300.	45
Şekil 29.	YBCO süperiletken bileşiği için DTA-Sıcaklık eğrisi.....	46
Şekil 30.	DTA analizinden peritektik sıcaklığın belirlenmesi.	46
Şekil 31.	Farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş Y211 tozunun kristal büyümedeki etkisi.	47
Şekil 32.	YBCO süperiletken peletinin T _{max} değişimlerinin büyümeye etkisinin şematik gösterimleri ve fotoğrafları.	49
Şekil 33.	YBCO süperiletken peletinin büyüme değişimlerinin şematik gösterimleri ve fotoğrafları.....	49
Şekil 34.	YBCO süperiletkenine ait sıcaklık grafiği.	50
Şekil 35.	a) 20 mm b) 32 mm ve c) 40 mm'lik YBCO tek kristal süperiletkenlerinin ısı işlem sonrası görüntüsü.....	51
Şekil 36.	32 mm'lik YBCO tek kristal süperiletkenin ısı işlem sonrası yön çizgilerinin görüntüsü.	51
Şekil 37.	13, 20, 32 ve 40 mm'lik çaplarındaki YBCO tek kristallerin üstten karşılaştırmalı.....	52
Şekil 38.	YBCO süperiletken peletine ait oksijen verme işlemi.	52
Şekil 39.	Nd _{1.8} Ba _{2.4} Cu _{3.4} O ₇ çekirdeklerinin YBCO peleti üzerine koyulmuş hali. İki çekirdek arasındaki mesafe (<i>d</i>) 12 mm'dir.	54
Şekil 40.	Çoklu çekirdekli YBCO süperiletken örneğinin şematik gösterimi.	54
Şekil 41.	YBCO süperiletkenine ait sıcaklık grafiği.	55

Şekil 42.	Çoklu çekirdekli yapıdaki ($d = 14$ mm) örneğin ısıtma işlemi sonrası görünümü	55
Şekil 43.	$d = 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12$ ve 16 mm için YBCO çoklu kristal örneklerinin üstten görünümü.	56
Şekil 44.	Çoklu çekirdekli YBCO süperiletken örneğinin şematik gösterimi.	57
Şekil 45.	Çoklu çekirdekli yapıdaki ($d = 12$ mm) örneğinin ısıtma işlemi sonrası üst yüzeyinin fotoğrafı.	58
Şekil 46.	Isıtma işlemi sonrası $d = 0, 1, 4$ ve 12 mm uzaklığındaki çoklu kristal yapıdaki YBCO süperiletkenlerin üst yüzeylerinin fotoğrafları.	58
Şekil 47.	$(100)/(100)$ ve $(010)/(010)$ örneklerinin karşılaştırmalı olarak kristallerin büyümesinin şematik görüntüsü ve üst yüzeylerinin fotoğrafları.	59
Şekil 48.	YBCO süperiletken peletine ait oksijen verme işlemi.	59
Şekil 49.	Rigaku SmartLab marka difraktometre	60
Şekil 50.	Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi.	61
Şekil 51.	Quantum Design PPMS sistemindeki titreşim örneklemeli manyetometre VSM (vibrating sample magnetometer) modülü	62
Şekil 52.	Tuzaklanan alan ölçüm sistemi (Cambridge Üniversitesi).	63
Şekil 53.	Tuzaklanan alan ölçüm sisteminin ana aparatı.	63
Şekil 54.	JEOL JSM 6610 marka taramalı elektron mikroskobu.	65
Şekil 55.	Y32 ve Y20 örneklerinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışını spektrumları.	66
Şekil 56.	MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışını spektrumları.	67
Şekil 57.	Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) ZFC rejimi altında dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	69
Şekil 58.	Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) ZFC rejimi altında karşılaştırmalı olarak dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	70
Şekil 59.	Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) FC rejimi altında dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	71
Şekil 60.	Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) FC rejimi altında karşılaştırmalı olarak dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	72

Şekil 61.	Y20 örneğine ait maksimum itici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla değişimi grafikleri.....	73
Şekil 62.	Y20 örneğine ait maksimum çekici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla değişimi grafikleri.....	73
Şekil 63.	Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda (T= 37, 47, 57, 67 ve 77 K) yanal kuvvet (F_x) - yatay mesafe (x) grafikleri.....	75
Şekil 64.	Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda (T= 37, 47, 57, 67 ve 77 K) karşılaştırmalı olarak yanal kuvvet (F_x) - yatay mesafe (x) grafikleri.	76
Şekil 65.	Farklı sıcaklıklarda (T= 37, 47, 57, 67 ve 77 K) Y20 örneğine ait kuvvet-zaman grafikleri.	77
Şekil 66.	Farklı sıcaklıklarda (T= 37, 47, 57, 67 ve 77 K) Y20 örneğine ait karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri.	78
Şekil 67.	Y20 örneğine ait kuvvet - sıcaklık grafiği	79
Şekil 68.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında T=83 K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	80
Şekil 69.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında T=83 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	81
Şekil 70.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında T=80 K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri	82
Şekil 71.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında T=80 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	83
Şekil 72.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında T=77 K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	84
Şekil 73.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında T=77 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	85
Şekil 74.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında T=83 K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	86
Şekil 75.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında T=83 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.	87
Şekil 76.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında T=80 K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri	88
Şekil 77.	MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında T=80 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri	89

- Şekil 78.** MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T=77\text{ K}$ 'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri 90
- Şekil 79.** MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T = 77\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri... 91
- Şekil 80.** Farklı sıcaklıklarda ($T=83, 80$ ve 77 K) ZFC rejimi altında çekirdekleri (a ve b düzlemleri) birbirine paralel olarak büyüyen YBCO örneklerinin maksimum itici kuvvet - çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri. . 92
- Şekil 81.** Farklı sıcaklıklarda ($T=83, 80$ ve 77 K) FC rejimi altında çekirdekleri (a ve b düzlemleri) birbirine paralel olarak büyüyen YBCO örneklerinin maksimum çekici kuvvet- çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri.92
- Şekil 82.** MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için kuvvet-sıcaklık değişimi grafiği 93
- Şekil 83.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 83\text{ K}$ 'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 94
- Şekil 84.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 83\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 95
- Şekil 85.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 80\text{ K}$ 'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 96
- Şekil 86.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 80\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z)-dikey mesafe (z) grafikleri..... 97
- Şekil 87.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 77\text{ K}$ 'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 98
- Şekil 88.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 77\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 99
- Şekil 89.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 83\text{ K}$ 'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 100
- Şekil 90.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 83\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 101
- Şekil 91.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 80\text{ K}$ 'de dikey kuvvet (F_z)-dikey mesafe (z) grafikleri..... 102
- Şekil 92.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 80\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 103
- Şekil 93.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 77\text{ K}$ 'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 104

- Şekil 94.** DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 77$ K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 105
- Şekil 95.** Farklı sıcaklıklarda ($T = 83, 80$ ve 77 K) maksimum itici kuvvet-çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri. 106
- Şekil 96.** Farklı sıcaklıklarda ($T = 83, 80$ ve 77 K) maksimum çekici kuvvet-çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri. 106
- Şekil 97.** MS-04 ve DS-04 örnekleri için ZFC rejimi altında $T= 83, 80$ ve 77 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 107
- Şekil 98.** MS-04 ve DS-04 örnekleri için FC rejimi altında $T= 83, 80$ ve 77 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri..... 108
- Şekil 99.** Y04 örneğinin farklı bölgelerden kesitlerinin şematik gösterimi 109
- Şekil 100.** 1tc, 1te, 4ta ve 4tc kesitlerinin 77 K'deki manyetizasyon-uygulanan manyetik alan ölçümleri..... 110
- Şekil 101.** 1te kesitinin $77, 67, 57, 47$ ve 37 K'deki manyetizasyon-uygulanan manyetik alan ölçümleri..... 111
- Şekil 102.** 1tc, 1te, 4ta ve 4tc kesitlerinin 77 K'deki kritik akım yoğunlukları. 112
- Şekil 103.** 1te kesitinin $77, 67, 57, 47$ ve 37 K'deki kritik akım yoğunlukları. 112
- Şekil 104.** 1te ve 4tc kesitlerinin normalize edilmiş manyetik moment-sıcaklık değişimi grafiği 113
- Şekil 105.** MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin üst yüzeylerinin eksenel doğrultuya 30×30 mm²'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında eksenel yöndeki manyetik alan grafiği..... 114
- Şekil 106.** MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin üst yüzeylerinin eksenel doğrultuya 30×30 mm²'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında eksenel yöndeki manyetik alan kontur grafiği. 115
- Şekil 107.** MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin alt yüzeylerinin eksenel doğrultuya 30×30 mm²'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında eksenel yöndeki manyetik alan grafiği..... 116
- Şekil 108.** MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin alt yüzeylerinin eksenel doğrultuya 30×30 mm²'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında eksenel yöndeki manyetik alan kontur grafiği. 117
- Şekil 109.** Farklı d mesafelerinde üretilen MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin alt ve üst yüzeylerinin maksimum tuzaklanan alan değerlerinin grafiği..... 118

Şekil 110. Y20 örneğinin çekirdek merkezinin yaklaşık 4 mm uzağından kesilen parçanın şematik gösterimi.	119
Şekil 111. Y20 örneğinin 500 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.....	119
Şekil 112. Y20 örneğinin 1500 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.....	120
Şekil 113. Y20 örneğinin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.....	120
Şekil 114. Y20 örneğinin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.....	121
Şekil 115. Y20 örneğinin 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.....	121
Şekil 116. Y20 örneğinin 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.....	122
Şekil 117. Y20 numunesinin a) SEM fotoğrafı, b) dikdörtgensel c) noktasal d) noktasal e) noktasal f) dairesel ve g) çizgisel EDS analizlerini ve elementel % olarak dağılımları.	123
Şekil 118. Y20 numunesinin (a) SEM fotoğrafı ve (b) fotoğrafın tamamının analizinin elementel % olarak dağılımları.	124

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.	Oksijen miktarı ve kritik sıcaklıklar arasındaki ilişki	14
Tablo 2.	RE-123 fazlarının iyonik yarıçapları ve peritektik sıcaklıkları (Murakami vd., 1996; Cardwell ve Ginley, 2003).....	15
Tablo 3.	Seçilen (RE)BCO sistemlerinin T_c değerleri.	17
Tablo 4.	Y123 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.....	40
Tablo 5.	Y211 hazırlamak için gerekli olan oksit tozların molekül ağırlıkları ve miktarları.....	40
Tablo 6.	30,15 gramlık ((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO ₂) süperiletken örneğinin bileşik ağırlıkları.....	41

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a, b, c	Kesitin Boyutları
<i>a, b, c</i>	Birim Hücre Örgü Parametreleri
<i>d</i>	Çekirdekler Arası Uzaklık
DS	Different Seed (Farklı Çekirdekli (Kristalli))
EDS	Energy Dispersive Spectrometry
FC	Field Cooling (Alanlı Soğutma)
F_x	Yatay Manyetik Kuvvet
F_z	Dikey Manyetik Kuvvet
H	Uygulanan Manyetik Alan
H_c	Kritik Manyetik Alan
J_c	Kritik Akım Yoğunluğu
M	Manyetizasyon
MS	Multi-seed (Çoklu Çekirdekli (Kristalli))
SEM	Scanning Electron Microscope
t	Zaman
T	Sıcaklık
T_c	Kritik Sıcaklık Değeri
$T_{c,onset}$	Kritik Sıcaklık Başlangıç Değeri
$T_{c,offset}$	Kritik Sıcaklık Bitiş Değeri
TSMG	Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyüme
V	Gerilim
x	Yanal Hareket
Y123	$YBa_2Cu_3O_7$
Y211	Y_2BaCuO_6
YBCO	((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO ₂)
z	Dikey Hareket
ZFC	Zero Field Cooling (Alansız Soğutma)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Süperiletkenlik alanı 1911 yılında Kamerlingh Onnes'in çok düşük sıcaklıklarda cıvanın elektrik direncini sıfır olduğunu keşfedilmesiyle başladı. Sonra, 1950'ler ve 1960'larda klasik düşük sıcaklık süperiletkenlerinin teorik açıklaması tamamen ortaya çıktı. Bununla birlikte, 1986'da yılında Bednorz ve Muller tarafından keşfedilen yüksek sıcaklık süperiletkenleri (HTS) adlı yeni bir süperiletken sınıf ortaya çıktı (Bednorz ve Muller, 1986). Yeni gelişmeler orijinal teori ile tatmin edici bir biçimde açıklanamadığı için, bu alana dünya çapında yeni bir ilgi uyandırdı. O zamandan beri yapılan çalışmalar, HTS ile ilişkili olguları açıklamak için yeni bir teori oluşturmak ve bu materyallerin uygulamalarının genel özelliklerini geliştirmek için yapıldı.

Katı HTS malzemeleri, (Hg-Tl) Ba-Ca-Cu-O, Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O ve (RE)BaCuO (burada RE = La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb ve Y gibi nadir toprak metallere) sistemleri gibi üç ana grupta bulunurlar. Bu malzemeler yüksek manyetik alan gerektiren “kalıcı mıknatıs” uygulamaları için önemli bir potansiyele sahiptir. Süperiletkenlerin (RE)BCO sınıfı, geniş bir sıcaklık aralığında en yüksek tersinmezlik alanı (yani, HTS malzemelerinin yararlı özelliklere sahip olduğu alanlar) sergiler. Bu nedenle yüksek akımlarda ve yüksek manyetik alanlarda uygulamalar için en umut verici malzemeler olarak düşünülür.

Tersinmezlik alanları ile bağlantılı kritik akım yoğunluğu J_c , (RE)BCO süperiletkenlerinin özünde bulunan bir özellik değildir, bu malzemelerin mikroyapıları ile ilgilidir. Malzemenin mikroyapı kontrolü yoluyla J_c 'nin iyileştirilmesi (RE)BCO katı malzemelerinin araştırılmasında temel bir hedefdir. (RE)BCO süperiletkenler iki boyutlu anizotropi gösterirler çünkü yük taşıyıcılar sadece ab düzlemi içeren CuO_2 düzleminde bulunur. Sinterlenmiş numunelerin J_c 'si azdır çünkü tane sınırları bu materyal formundaki akım akışına “zayıf bağlantılar” oluşturmaya eğilimlidir. Mikroyapı kontrolü yoluyla J_c 'yi iyileştirmenin en önemli yöntemlerinden biri olan “Üstten Çekirdeklenmiş Eritme Büyüme (TSMG) yöntemi”, oldukça yüksek yönlendirilmiş ve hizalanmış kristal yapıya sahip geniş YBCO süperiletken parçacıkları büyütme için

kullanılmaktadır. TSMG yönteminde, genellikle YBCO'ya kıyasla daha yüksek erime sıcaklığı ve benzer örgü yapısına sahip olarak Nd-Ba-Cu-O veya Sm-Ba-Cu-O süperiletken malzemeleri çekirdek olarak kullanılır. Eriyik işlemde geçirilmiş numunelerde elde edilen J_c değerleri 77 K'de yaklaşık $10^4 - 10^5$ A/cm² olabilir.

Eritme işlemi yapılmış (LRE)-Ba-Cu-O (LRE = Nd, Sm, Eu ve Gd gibi hafif nadir toprak elementleri), (LRE)BCO süperiletkenlerin, YBCO kadar yüksek J_c ve tersinmez alanlar sergilediği bilinmektedir. Özellikle, GdBCO ve YBCO gibi tekli tane sistemi, yakın zamanda büyük ilgi görmüştür. Bunun nedeni; Gadolonyum (Gd), (LRE)BCO ailesindeki Yttriyum (Y)'ye en yakın kimyasal elementtir. Gd(Y) / Ba yer değiştirmesi, NdBCO gibi sistemlerde olduğu kadar şiddetli değildir. Gd₂BaCuO₅ (Gd-211) ve Y₂BaCuO₅ (Y-211) gibi akı çivileme parçacıklarının şekli doğal olarak küre şeklinde ve boyutu küçüktür. Sonuç olarak, GdBCO ve YBCO daha kolay işlem kontrolü ile büyük sıkışmış alanları elde etme potansiyeline sahiptir.

Büyük (LRE)BCO tekli süperiletkenlerin akı tuzaklamanın korunması ve büyüme oranı gibi diğer üretme özelliklerini daha kolay uygulamak için çok daha basit bir üretme yönteminin bulunmaması nedeniyle araştırmalara halen devam edilmektedir. TSMG yöntemi iki farklı işlem olarak uygulanmaktadır. Bunlar “soğuk çekirdekleme” ve “sıcak çekirdekleme”dir. Bugüne kadar (LRE)BCO tekli tanelerini büyültmek için en iyi tekniklerden biri sıcak çekirdekleme yöntemi olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde, “kendi kendine çekirdeklenmiş” tanesinin büyümesi için hedef (RE)BCO bileşeni ile aynı bileşiminin kristal büyütülmesi kullanılmaktadır. Sıcak çekirdekleme yönteminde, peritektik sıcaklığın hemen üzerinde tutulan kısmen erimiş numunenin üst yüzeyine yerleştirilerek çekirdeğin erimesi engellenebilir. Sıcak çekirdekleme işlemi, az miktarda % 1 oksijen içeren azot (veya argon) atmosferi altında kontrollü yönelme ve iyi süperiletkenlik özelliklerine sahip çeşitli (LRE)BCO bileşimlerinin büyük tekli tanelerini büyültmek için kullanılmaktadır. Ne yazık ki bu teknik, işleme atmosferinin kontrol edilmesini ve yüksek sıcaklıkta çekirdeğin yerleştirilmesini sağlayan özel olarak tasarlanmış fırınları gerektirir. Bu işleme karmaşıklıklarının bir sonucu olarak, sıcak çekirdekleme yönteminin pratik olarak uygulanması zordur. Bu nedenle, herhangi bir (RE)BCO sistemini soğuk çekirdekleme yöntemi ile büyültmek kullanılabilecek en uygun kristal büyütme işlemlerinden biridir.

Soğuk çekirdekleme işlemi, fırın oda sıcaklığında olduğunda (yani, eritme işleminden önce hala soğuk olduğunda) RE(BCO) peletin üst yüzeyine bir çekirdek yerleştirmeyi içeren nispeten daha basit bir tekniktir. Çekirdek ve pelet düzenlemesi, başlangıçta çekirdeklenmiş bileşimin peritektik sıcaklığından çok daha yüksek bir sıcaklığa sahip olmak üzere, eritme işleminin tamamına tabidir. Bu nedenle, böyle bir çekirdeğin, tüm numune hazırlama işlemi sırasında (LRE)BCO'ya benzer bir örgü sabitiyle erimeyen bir durumu korumak için daha yüksek erime sıcaklığına sahip olması gerekmektedir. Soğuk çekirdekleme işleminde çekirdek tarafından görülen maksimum sıcaklık genellikle sıcak tohumlama işleminden daha yüksektir (Shi, 2009).

1.1.1. Süperiletkenlikle İlgili Tarihsel Gelişmeler

Düşük sıcaklık fiziğinin tarihi, 1908 yılında Hollandalı fizikçi H. Kamerlingh Onnes'in kaynama sıcaklığı 4.2 K (-268.8 °C) olan helyumu sıvılaştırması ile başlamıştır. Onnes 1911 yılında cıvanın elektriksel özelliklerini incelerken 4.15 K'de elektrik direncinin $3 \times 10^{-6} \Omega$ gibi çok küçük bir değer altına düştüğünü buldu (Onnes, 1911). Onnes cıvanın daha önce bilinen özelliklerinden farklı olarak yeni bir duruma geçtiğini anlamış ve bu yeni durumu "süperiletkenlik" olarak adlandırılmıştır. 1930'lara kadar en yüksek kritik sıcaklığa sahip element 9.2 K'de Nb (Niyobyum)'dir.

Süperiletkenlerin manyetik özelliklerinin anlaşılması, elektriksel özelliklerinin anlaşılması kadar zor ama ilgi çekicidir. 1933 yılında W. Hans Meissner ve Robert Ochsenfeld süperiletkenlerin manyetik özelliklerini incelediler ve manyetik alanda soğutulan bir süperiletkenin kritik sıcaklık altına inildiğinde, manyetik akıyı dışladığını buldular (Meissner ve Ochsenfeld, 1933).

Süperiletkenlik olayını teorik olarak açıklamak için de birçok çalışma yapıldı. Süperiletkenliğin asıl doğasını ve kökenini açıklayan ilk teori, 1957 yılında Amerikalı Fizikçiler John Bardeen, Leon N. Cooper ve J. Robert Schrieffer tarafından geliştirildi (Bardeen vd., 1957). Daha sonraları ise BCS Teorisi olarak bilinmeye başladı. Coulomb yasası gereği, elektronlar sahip oldukları negatif elektrik yükleri nedeniyle, birbirlerini iterler. BCS teorisi, elektron çiftlerinin Coulomb itmesinden daha güçlü bir kuvvet yardımıyla birbirlerini çekebileceği bir mekanizmadan bahsetmektedir. Elektronların

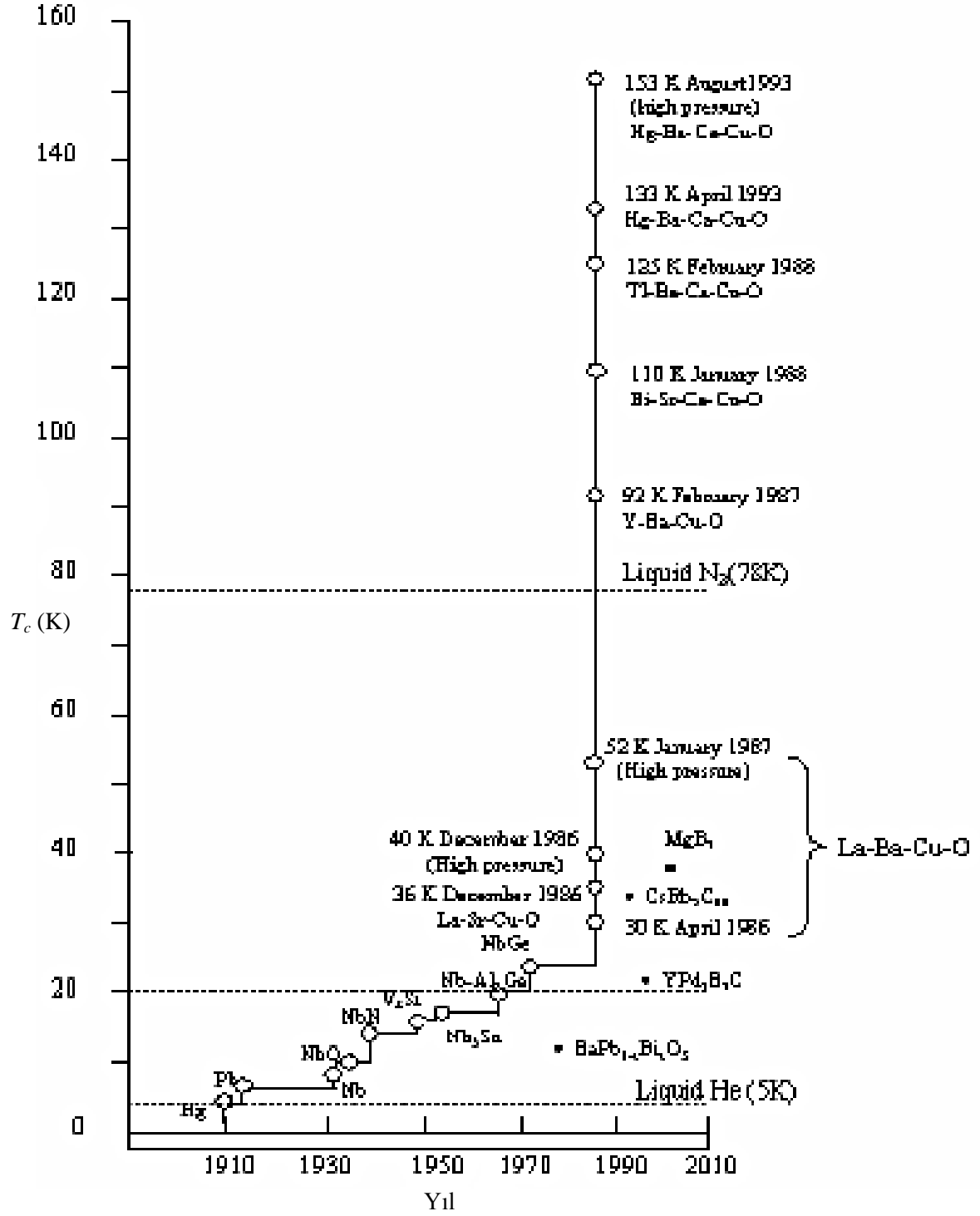
birbirlerini çekmesi fikri ilk bakışta çok ilginç görünse de, bunun nasıl olduğu sorusunun yanıtı kristal örgüdeki iyonlarla elektronlar arasındaki etkileşimde gizlidir. Bu teori, elektronları çiftler halinde biraraya getirip, örgü içindeki dirence neden olan engelleri geçmelerine dayanmaktadır. Bu elektron çiftlerine de “Cooper çiftleri” adı verilir. Cooper ve arkadaşlarına göre, elektriksel yükleri nedeniyle birbirlerini iten elektronlar, süperiletken içerisinde büyük bir çekim hissederler. Bu çekiciliğin sebebi ise fononlardır (Bağ, 2006).

1962 yılında Brian D. Josephson’un iki süperiletken malzeme arasında elektrik akımının oluşacağını ileri sürmesi bir başka önemli teorik gelişmeye sebep oldu (Josephson, 1962). Bu tünelleme olayı, günümüzde Josephson etkisi olarak bilinir ve en zayıf manyetik alanları bile duyabilme özelliğine sahip olabilen süperiletken kuantum girişim cihazı (SQUID) gibi elektronik aletlere uygulanabilmiştir.

1986 yılı süperiletkenler için dönüm noktasıdır. K. Alex Muller ve J. Georg Bednorz adlı iki bilim adamı tarafından La-Ba-Cu-O bileşiği sentezlenerek kritik sıcaklık değeri 30 K olan ilk seramik süperiletken malzeme yapılmıştır (Muller ve Bednorz, 1986). Bu çalışma bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutmuştur. Daha sonra Chu ve arkadaşları tarafından 1987 yılında La yerine Y elementi kullanılarak kritik geçiş sıcaklığı 92 K civarında olan $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ (Y123) seramik malzeme bulunmuştur (Chu, 1987). Bu bileşiğin önemi, geçiş sıcaklığının sıvı azotun kaynama sıcaklığı olan 77 K’den yüksek olmasıdır. Böylece soğutma işleminin kolaylığı ve ucuzluğu nedeniyle süperiletkenlik, teknolojik ve ticari uygulamalar açısından daha çekici hale gelmiştir. Bu çalışma ile birlikte dünyanın birçok yerinde araştırmacılar seramik malzemeler üzerine çalışmaya başladılar. Yapılan çalışmalar sonucunda sırası ile $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ (BSCCO) ile 110 K, $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (TBCCO) ile 125 K, $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ ile 138 K kritik geçiş sıcaklıklarına ulaşmışlardır.

Bilim adamları daha sonraki çalışmalarında oksitli süperiletkenlerin kritik geçiş sıcaklığını arttırmaya çalışmışlardır. 2001 yılında Akimitsu tarafından MgB_2 alaşımının $T_c = 40$ K’de süperiletken olduğunun açıklanması (Akimitsu, 2001) ile birlikte bilim dünyasında ilgi tekrar metal alaşımlar, özellikle de bor alaşımları üzerine yönelmiştir. Günümüzde de oda sıcaklığında süperiletken arayışları tüm dünyada büyük bir hızla

devam etmektedir. Farklı süperiletken ailelerin keşifleri ve kritik geçiş sıcaklıkları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Süperiletkenlerin keşif tarihleri ve kritik geçiş sıcaklıkları.

1.2. Süperiletkenlerin Bazı Temel Özellikleri

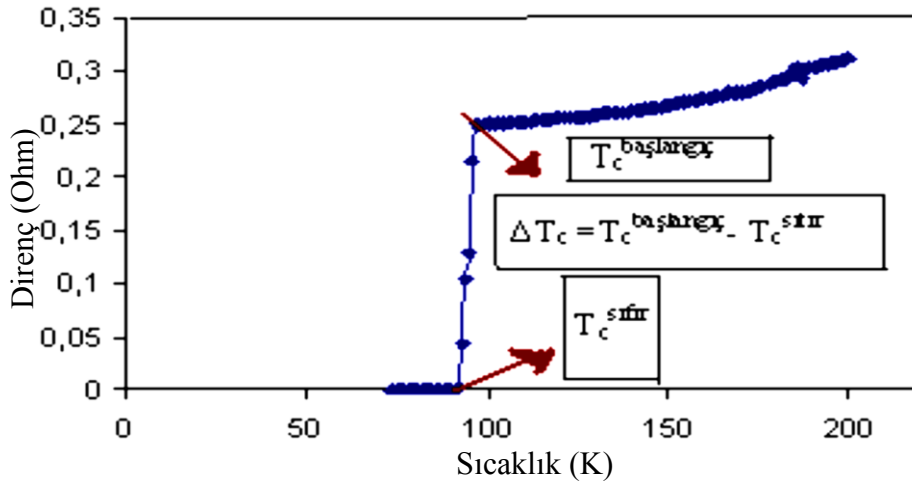
1.2.1. Sıfır Direnç ve Geçiş Sıcaklığı

Metaller ve alaşımlar soğutulduklarında elektriksel dirençleri düşer. Bir iletkende akım, metal içerisinde serbestçe hareket eden “iletim elektronları” tarafından taşınır. Elektronlar dalga doğasına sahiptir ve metal içinde ilerleyen bir elektron, aynı doğrultuda ilerleyen bir düzlem dalga tarafından temsil edilebilir. Böylece elektronlar, düzgün tekrarlanan örgülü kristal yapıya sahip bir metal içerisinde, toplam momentumları sıfır olacak şekilde serbestçe ilerleyebilirler. Kristal örgüde safsızlık atomları, ısısal titreşimler ve diğer kusurların rasgele yayılması kusursuz periyodikliği bozar. Bu nedenlerden dolayı iletkenlik elektronları bu ortamlarda ilerlerken elektriksel dirençleri artar. Sıcaklık düşürüldüğünde atomların ısısal titreşimleri azalır ve iletkenlik elektronları daha az sıklıkla saçılır. Ortalama serbest yolları artar (Yakıncı, 1992).

Süperiletkenlikte kritik sıcaklık (T_c), materyalin metalik özelliklerinin değişmeye başladığı en yüksek sıcaklığın başlangıcı olarak açıklanır. Kritik geçiş sıcaklığından sonra materyalin direnci sıfıra düşer. Şekil 2’de görüldüğü gibi eğrinin son noktası ($T_c^{sıfır} = T_{c,offset}$) ve başlangıç noktası ($T_c^{başlangıç} = T_{c,onset}$) arasındaki fark

$$\Delta T_c = T_c^{başlangıç} - T_c^{sıfır} \quad (1)$$

olarak hesaplanır (Denklem (1)). Bu aralığın geniş olması örneğin saf bir süperiletken olmadığı (II. tip süperiletken), aralığın dar olması ise örneğin saf, kaliteli, homojen ya da tek kristal yapıda olduğunu gösterir. Geçiş aralığı saf metallerde 10^{-3} - 10^{-5} K iken geçiş metalleri ve alaşımlarda ise ~ 0.1 K, seramik süperiletken oksitlerde ise 1-2 K’ lik bir genişliğe sahiptir (Doğan, 2005).



Şekil 2. Saf YBCO süperiletkenine ait direnç-sıcaklık eğrisi ve ΔT_c aralığı (Doğan, 2005).

1.2.2. Kritik Akım Yoğunluğu

Malzemelerde süperiletkenliğin kaybolmasına neden olan sadece kuvvetli bir manyetik alan değildir. Bunun yanısıra bir süperiletkende akım yoğunluğu (J_c), kritik akım değerini geçtiği zaman da süperiletkenlik ortadan kalkar. J_c 'nin değeri $T = T_c$ 'de sıfır değerinden 0 K'de maksimum J_c değerine kadar artma eğilimi gösterir. J_c değeri genelde deneysel ve yarı-teorik olmak üzere iki yöntemle bulunabilir. Bunlardan birincisi akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinden hesaplanabilen yöntem, diğeri ise kritik akım yoğunluğunun bulunmasında en çok kullanılan M-H histerisis eğrileridir. Histerisis eğrilerinden yararlanarak yarı-teorik akım yoğunluğunun hesaplanmasında kullanılan denklemler;

$$J_c = \frac{30\Delta M}{d} \quad (2)$$

$$J_c = \frac{20\Delta M}{\left(1 - \frac{a}{3b}\right)a.b.c} \quad (3)$$

Bean formülü olarak bilinirler (Bean, 1962). Burada $\Delta M = M_+ - M_-$ örneğin manyetizasyonu, a ve b örneğin boyutları ve d ise tanecik boyutlarıdır. Denklem (2)

genel olarak tanecik boyutlarına bağılı ölçümlerde, Denklem (3) ise örneğin boyutlarına göre hesaplamalar için kullanılır. Bu denklemler sonucunda ortaya çıkan değerler daha çok yarı teorik olarak kabul edilirler ve kritik akım yoğunluğunun hesaplanmasında en fazla kullanılan denklemler olarak bilinmektedirler. Özellikle tek kristal YBCO örneklerin manyetizasyon ölçümlerinden Denklem (2) kullanılarak kritik akım yoğunlukları hesaplanmaktadır. Ancak, J_c teorik olarak da London denklemlerinin uzantıları kullanılarak hesaplanabilmektedir (Doğan, 2005).

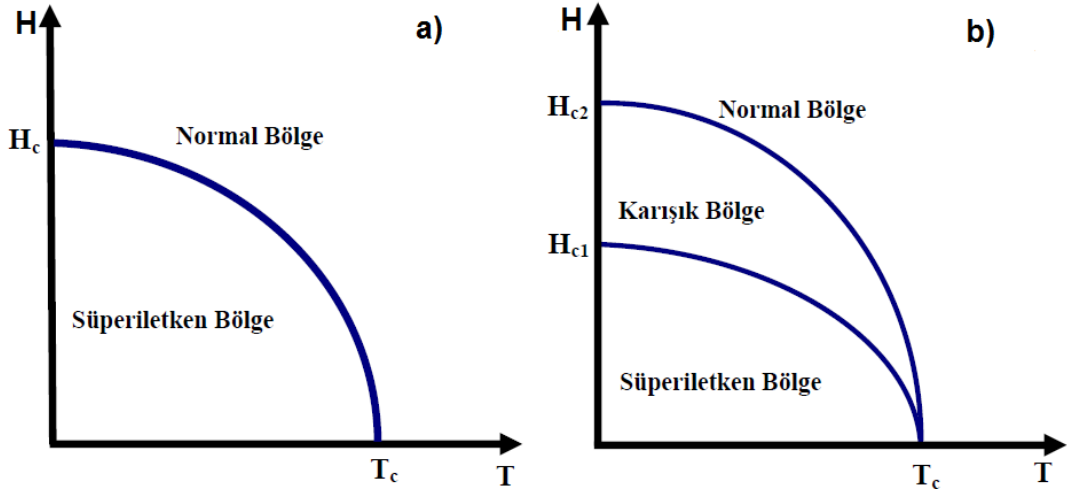
Kritik akım yoğunluğu (J_c), süperiletkenin direnç göstermeksizin taşıyabildiği maksimum akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Bir süperiletkende kritik akım yoğunluğunu belirleyen öğelerden biri, Cooper çiftlerinin bozulmasıdır. Bu durumda, bozulan çiftlerin yoğunluklarına bağılı olarak, numunede kısmen normal iletken davranış gözlenir. II. tip süperiletkenlerde bu çiftlerin bozulmasının yanısıra girdapların hareketi de kritik akım yoğunluğuna etki eder. Süperiletken numune, yapısal olarak taneler ile taneler arası zayıf bağlar veya taneler arası yalıtkan fazdan oluşabilir. Bu durumda taneler arasında meydana gelebilecek girdapların sınırlı hareketleri de akım yoğunluğunu kısıtlar (Düz, 2008).

1.2.3. Kritik Manyetik Alan

Süperiletkenliğin en önemli özelliklerinden biri de kritik manyetik alandır. Süperiletken bir madde, dış manyetik alana konulduğunda, uygulanan bu manyetik alana karşı koyar. Ancak bu alan, belli bir değerden daha yüksek olursa maddenin süperiletkenlik özelliği kaybolur. Bu kritik değere, “kritik manyetik alan” denir ve H_c ile gösterilir. II. tip süperiletkenlerde ise H_{c1} ve H_{c2} değerleri vardır. Kritik manyetik alan; sıcaklığa deneysel olarak;

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (4)$$

şeklinde bağılıdır ve Şekil 3’te gösterildiği gibi değişir.



Şekil 3. Sıcaklık ile kritik manyetik alanın (a) I. tip süperiletkenlerde ve (b) II. tip süperiletkenlerdeki değişimi.

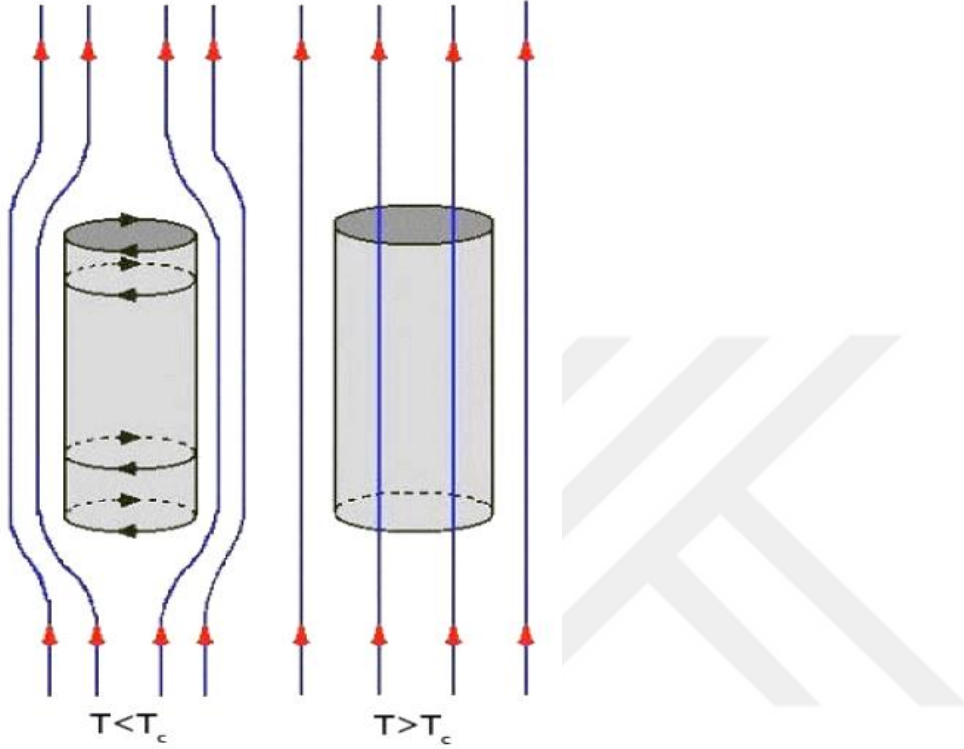
Burada; $H_c(0)$ mutlak sıfırdaki kritik manyetik alan olup, ekstrapolasyonla belirlenir. Her süperiletkenin kendisine özgü $H_c(0)$ değeri vardır. Denklem (4) kullanılarak herhangi bir sıcaklıktaki kritik alan değeri bulunabilir.

1.2.4. Meissner Etkisi

Süperiletken malzeme normal durumda manyetik özellik göstermez. Kritik geçiş sıcaklığının üzerindeki ($T > T_c$) sıcaklıkta manyetik alan malzeme içine nüfuz eder. Kritik sıcaklığın altındaki ($T < T_c$) süperiletken halde ise süperiletken malzeme uygulanan manyetik alanı (H) dışarılar (Şekil 4). Bu durum 1933 yılında iki Alman fizikçi Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld tarafından mükemmel diyamanyetizma veya Meissner etkisi olarak adlandırılmıştır. Bir manyetik alana, ters yönlü bir manyetik alanla karşılık veren malzemeler diyamanyetik olarak tanımlanır. Süperiletkenlerde bu nitelik en şiddetli biçimde gözlenir (Çelik, 2006).

Diamanyetik malzemeler, normal halde iken çekirdek etrafında dönen elektronların manyetik momentlerinin büyüklükleri eşit fakat yönleri ters olduğundan birbirlerini yok ederler ve atomun manyetik momenti sıfır olur. Diyamanyetik malzemeye dışardan manyetik alan uygulandığında ise elektronlar fazladan manyetik kuvvet altında kalırlar. Bu manyetik kuvvet elektronların merkezci ivmelerini de etkilemektedir. Manyetik momenti alana antiparalel elektronun hızı artarken, paralel olanınki ise azalır. Sonuç

olarak elektronların manyetik momentleri birbirlerini yok edemezler ve malzeme uygulanan manyetik alana zıt yönde bir manyetik dipol oluşturur (Serway ve Jewett, 2004).



Şekil 4. Meissner etkisinin şematik gösterimi (Rose-Innes vd., 1978).

1.2.5. Sızma Derinliği (Penetration Depth = λ)

Süperiletkenlerde belirli bir kritik manyetik alan değerinden sonra malzeme süperiletkenlik özelliğini kaybetmektedir. Bu kritik alan değerine kadar uygulanan manyetik alan numune içerisinde belirli bir derinliğe kadar üstel olarak azalarak ilerler. Sıcaklığa ve numunenin türüne bağlı olarak değişen (Doğan, 2005) ilerleme miktarına sızma derinliği (Penetration Depth, λ) denir. Sızma derinliği:

$$\lambda = (mc^2/4\pi n_s e^2)^{1/2} \quad (5)$$

verilir (Ashcroft ve Mermin, 1976). Burada m elektronun kütlesi, c ışık hızı ve n_s ise çiftlenmiş elektron yoğunluğudur. Yüksek sıcaklık süperiletkenler için sızma derinliği

1200-1400 Å arasında olduğu belirlenmiştir (Ates, 1998). YBCO'nun sızma derinliği $\lambda_{ab} \approx 140$ nm ve $\lambda_c \approx 600 - 1800$ nm civarındadır.

1.2.6. Uyum Uzunluğu (Coherence Length = ξ)

Uyum uzunluğu, süperiletkenliğin belirlenmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Süperiletkenliğin oluşabileceği en küçük boyut ya da Cooper çiftlerinin bir arada bulunabileceği mesafe olarak tanımlanır (Tinkham, 1982). Uyum uzunluğu aynı zamanda uygulanan manyetik alanla değişen enerji band aralığının, E_g , bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir. Uyum uzunluğu ile öz uyum uzunluğu arasındaki ilişki ise;

$$\xi \approx (\xi_0 \ell)^{1/2} \quad (6)$$

olarak verilir. Burada ℓ , Cooper çiftlerinin aldığı yoldur ve ξ_0 ise saf süperiletkendeki öz uyum uzunluk olup değeri BCS teorisine göre

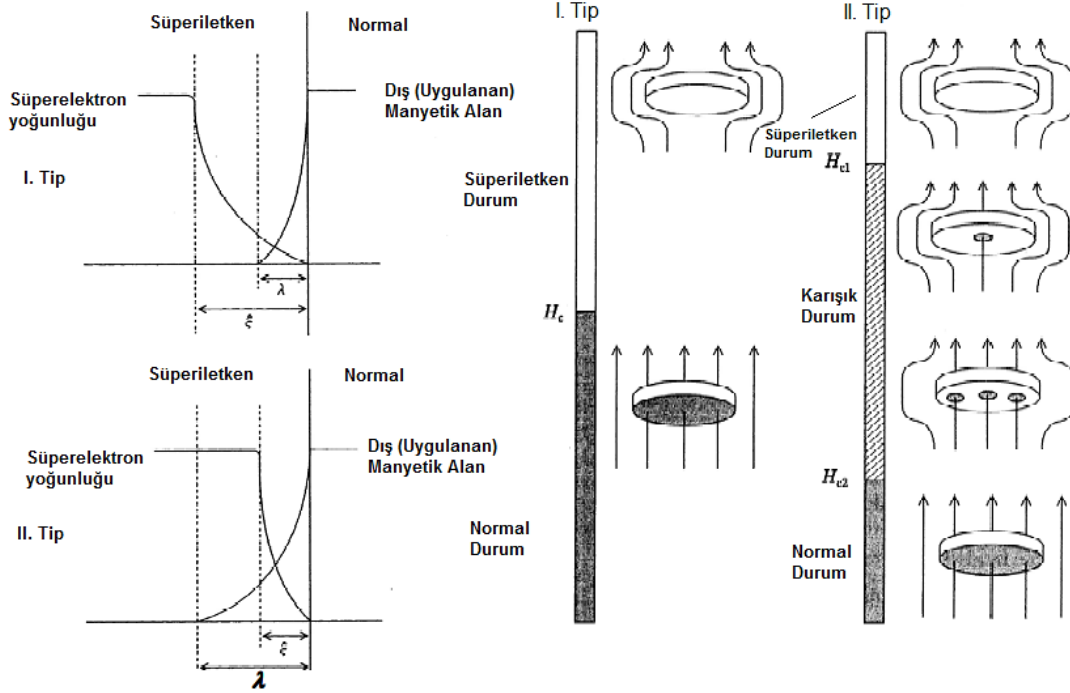
$$\xi_0 = 0.39 \hbar v_f / \pi E_g \quad (7)$$

olarak verilmektedir. Burada v_f Fermi enerjisindeki elektronların hızı, E_g ise BCS teorisinde, $E_g = [(h^2/2m)k_f q_0]$ olarak tanımlanır. BSCCO ve YBCO'nun uyum uzunluk değerleri sırasıyla 2.2 Å ve 4.2 Å olarak belirlenmiştir (Ates, 1988; Hidaka, 1988; Kittel, 1976). Yüksek sıcaklık süperiletkenlerdeki uyum uzunluk değeri metal ve metal alaşım süperiletkenler ile karşılaştırıldığında daha küçük olduğu görülmüştür.

1.2.7. I. ve II. Tip Süperiletkenlik

Süperiletkenler, süperiletken-normal ara yüzün yüzey enerjisine bağlı olarak iki sınıfa ayrılır. Yüzey enerjisi pozitifse, süperiletken I. Tip; yüzey enerjisi negatif ise, süperiletken II. Tip'dir. Rus bir bilim insanı olan Dr. Abrikosov, Ginzburg-Landau teorisini kullandı ve yüzey enerjisini inceleyerek II. Tip süperiletkenlerin varlığını öngördü. 1960'ların başından günümüze kadar keşfedilen tüm süperiletken bileşikler II.

Tip süperiletkenlerdir (Abrikosov, 2004). I. Tip süperiletkenler için, uyum uzunluğu (ξ), penetrasyon derinliği (λ)'nden daha uzundur. Öte yandan, II. Tip süperiletkenler için, uyum uzunluğu (ξ), penetrasyon derinliği (λ)'nden daha kısadır (Takizawa ve Murakami, 2005). Şekil 5, I. Tip ve II. Tip süperiletkenler arasındaki farkın şematik bir gösterimini sunmaktadır.



Şekil 5. I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler arasındaki farkların şematik gösterimi (Takizawa ve Murakami, 2005).

I. Tip süperiletkenlerde sadece bir tane kritik manyetik alan değeri (H_c) vardır (Şekil 4a). Bu alan değeri altında malzeme üzerindeki yüzey akımları sayesinde dış manyetik alan tamamen malzemenin içinden dışarılanır. Bu değer üstünde manyetik alan tamamen malzemenin içine nüfuz eder ve süperiletkenlik bozulur. I. Tip süperiletkenler kritik sıcaklığı 0 K'den 9.46 K'e kadar değişen; Be, Rh, W, Ir, Lu, Hf, Ru, Os, Mo, Zr, Cd, U, Ti, Zn, Ga, Al, Pa, Th, Re, Tl, In, Sn, Hg, Ta, Pb, Tc ve Nb gibi elementleri içermektedir.

II. Tip süperiletkenler, alt kritik alan değeri (H_{c1}) ve üst kritik alan değeri (H_{c2}) olmak üzere iki tane kritik alan değeri ile tanımlanır (Şekil 4b). Süperiletken malzeme H_{c1} değerine kadar I. Tip süperiletkenleri gibi davranır ve yüzey akımları manyetik alanın malzeme içine girmesine engel olur. Manyetik alan değeri H_{c1} değerinin üstüne

çıkıldığında, uygulanan manyetik alan kısmen malzeme içerisine girer. Artık malzeme içerisinde hem normal durum hemde süperiletken durum birlikte yer alır. Bu duruma karışık (mixed) durum adı verilir (Akkaş, 2006). Bazı metallerin, alaşımların ve oksitlerin süperiletkenleri tipik olarak II. Tip'dir. Bugüne kadar (Hg-Tl)BaCaCuO, BiPbSrCaSbCuO, (RE)BaCuO sistemleri, MgB₂ ve Nb₃Sn gibi ara metalleri içeren II. Tip süperiletken sistemleri bulunmuştur.

1.3. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri (HTSC)

HTSC'ler II. Tip süperiletkenlerdir. Bunlar oksit seramiklerdir ve T_c 'leri sıvı azotun sıcaklığından daha yüksektir. Buna ek olarak, HTSC'ler aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Bileşikler; bakır (Cu) da olmak üzere birçok elementten oluşur ve katmanlı bir CuO₂ yapısına sahiptir,
- Büyük bir iki boyutlu anizotropi içerebilir,
- Uyum uzunluğu (ξ) son derece kısadır (20 Å'dan daha azdır).

II. Tip süperiletkenlerle ilişkili akı sabitleme etkisi nedeniyle, tüm HTSC'ler potansiyel olarak yüksek J_c ve yüksek tersinmezlik alanlarına sahiptirler (Tersinmezlik alanı verilen bir sıcaklıkta malzemenin manyetik davranışının tersine çevrilebileceği alanı temsil eder bu nedenle hangi akı sabitleme alanlarının etkisiz hale geldiği hakkında bilgi verir). Külçe HTSC malzemeleri, çeşitli yüksek alanlı Daimi Mıknatıs uygulamaları için önemli bir potansiyele sahiptir. HTSC malzemeleri endüstriyel uygulama alanları için 3 başlık altında toplanır. Bunlar (Hg-Tl) Ba-Ca-Cu-O (TBCCO), Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) ve (RE)-Ba-Cu-O [(RE)BCO] sistemleridir.

1.3.1. (RE)BCO Tek Kristalleri

YBaCuO, (RE)BCO sistemi içinde, en basit ve en kolay üretebilen HTSC malzemesi olduğu için, yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Özellikle, YBCO'nun karakteristik özellikleri ve faz diyagramı kapsamlı olarak incelenmiş ve J_c 'yi iyileştirmek için çeşitli işlemler geliştirilmiştir. Özellikle YBCO tek kristal üretiminin (RE)BCO süperiletkenleri içindeki önemi aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

1.3.1.1. REBa₂Cu₃O_{7-δ} (RE-123) Sisteminin Fiziksel Özellikleri

1.3.1.1.1. RE-123 Sisteminin Kristal Yapısı

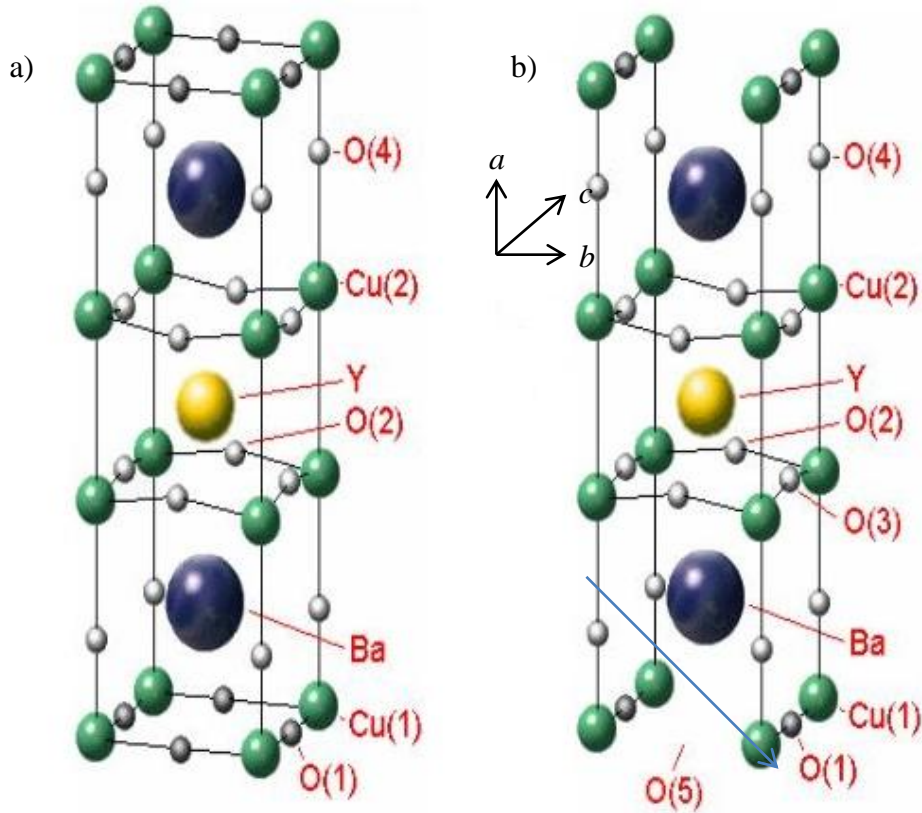
Kritik geçiş sıcaklığı sıvı azot kaynama noktasının üzerinde bulunan ilk yüksek sıcaklık süperiletkeni (HTSC) YBCO Wu ve arkadaşları tarafından 1987 yılında bulunmuştur (Wu vd., 1987). YBa₂Cu₃O_{7-δ} oksijen yetersizliğine sahip bir bileşiktir. δ değeri 0 ile 1 arasında iken süperiletken haldedir (Tablo 1). Y-123 sistemleri, süperiletkenlik özelliklerinde iki boyutlu anizotropi gösterir. Taşıyıcılar sadece YBCO kafesinin CuO₂ düzleminde yayılır ve evrensel olarak ab düzlemi olarak adlandırılır. YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiği $\delta > 0,6$ olduğunda süperiletken olmayan tetragonal fazdan (Şekil 6 (a)), oksijen verme işlemiyle birlikte $\delta < 0,6$ olduğunda süperiletken olan ortorombik (Şekil 6 (b)) bir faza dönüşür (Hatano vd., 1987). T_c, δ ile değişir çünkü, T_c'nin taşıyıcı konsantrasyonuna önemli ölçüde bağlı olduğu düşünülmektedir (Şekil 7) (Cava vd., 1987). Uygulamada δ 'deki azalma, akan oksijen gazında YBCO numunelerinin oksijenasyonu ile sağlanır (Şekil 8). Numunelere oksijen verilerek numunelerin fazları tetragonal fazdan ortorombik faza (süperiletken faza) geçer (Şekil 9). YBCO tek kristallerinin tetragonal fazdan ortorombik faza geçebilmesi için 450 °C'de 200 saat boyunca oksijen verilmesi gerekmektedir (Shiohara vd., 1997). YBCO sistemindeki Y, (RE)BCO bileşiklerinde RE = La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb ve Lu elementleriyle yer değiştirirse, (RE)BCO sistemi YBCO ile aynı kristal yapısını korur ancak kafes parametrelerinde küçük değişiklikler meydana gelir. (RE)BCO süper iletkenlerinin peritektik sıcaklığı iyonik yarıçap azaldığında artmaktadır. Tablo 2 çeşitli RE-123 fazlarının iyonik yarıçapını ve peritektik sıcaklığını göstermektedir.

Tablo 1. Oksijen miktarı ve kritik sıcaklıklar arasındaki ilişki.

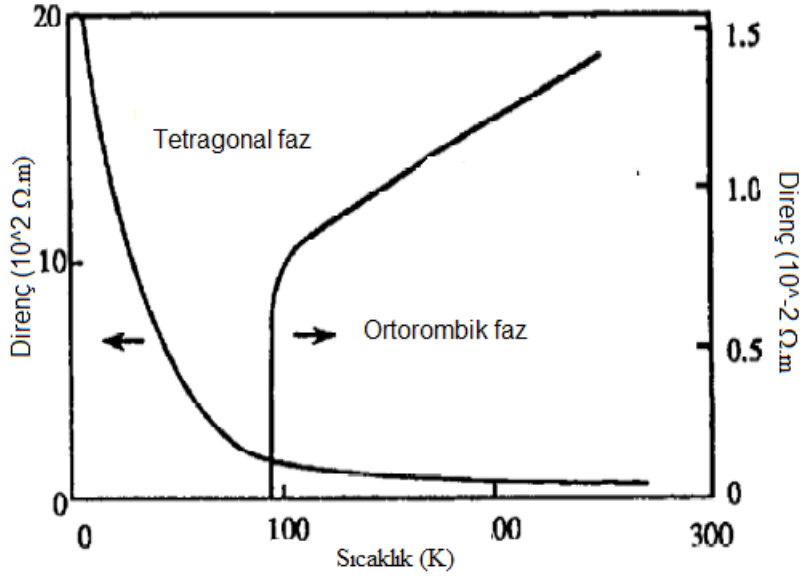
Kompozisyon	δ -değeri	Geçiş Sıcaklığı
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	0	~ 92 K
YBa ₂ Cu ₃ O _{6,75}	0.25	~ 60 K
YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5}	0.5	~ 25 K
YBa ₂ Cu ₃ O ₆	1	Süperiletken değil

Tablo 2. RE-123 fazlarının iyonik yarıçapları ve peritektik sıcaklıkları (Murakami vd., 1996; Cardwell ve Ginley, 2003).

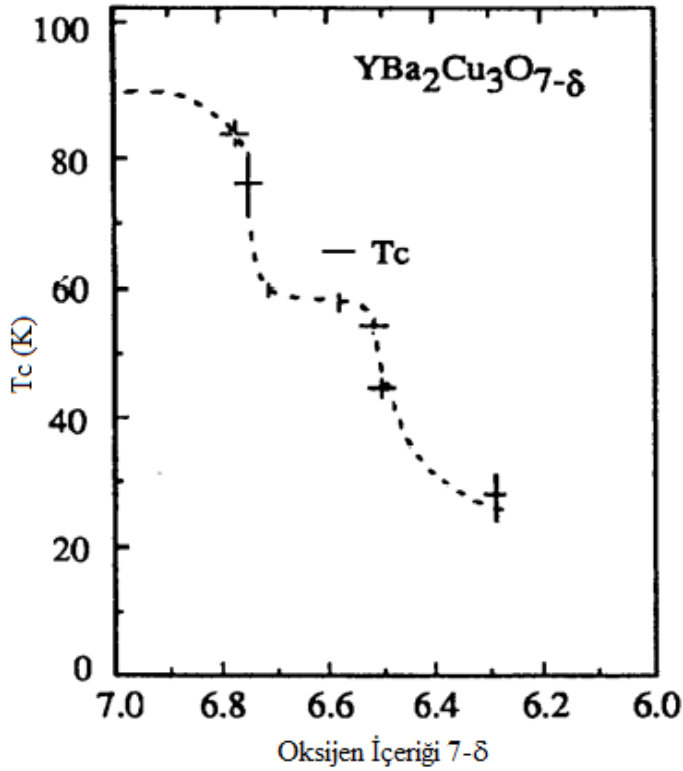
RE Elementleri	İyonik Yarıçap (Å)	Peritektik Sıcaklık (°C)
Lu	0.977	880
Yb	0.985	900
Tm	0.994	960
Er	1.004	980
Ho	1.015	990
Y	1.019	1000
Dy	1.027	1010
Gd	1.053	1030
Eu	1.066	1050
Sm	1.079	1060
Nd	1.109	1090
La	1.160	1090



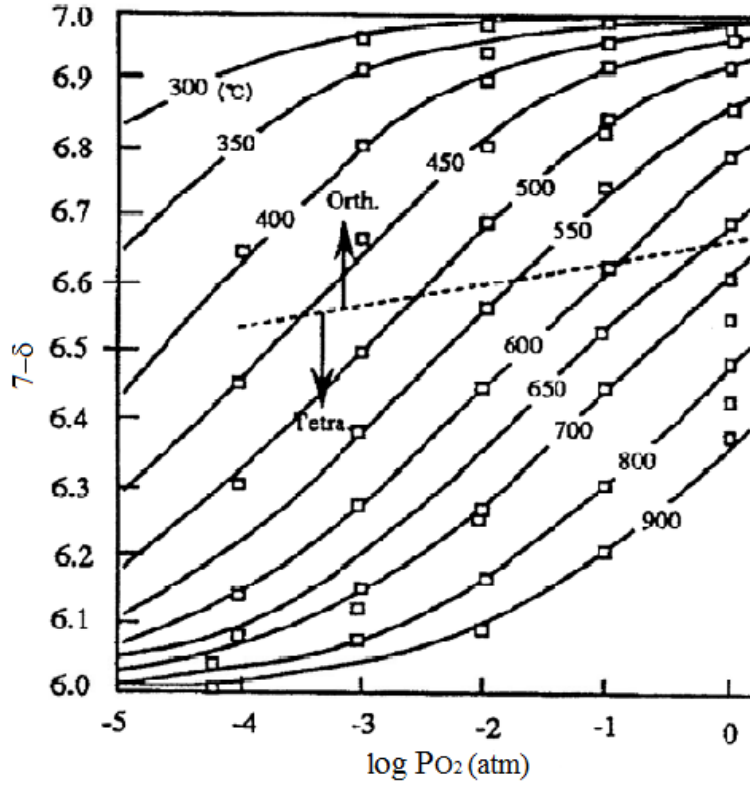
Şekil 6. YBCO'nun kristal yapısı. (a) Tetragonal ($\delta=1$), (b) Ortorombik ($\delta=0$) faz (Kartal, 2009).



Şekil 7. Y-123 sistemlerinde tetragonal ve ortorombik faz için sıcaklık-direnç değişimi grafiği (Hatano vd., 1987).



Şekil 8. YBCO sistemlerinde oksijen içeriğinin T_c üzerine etkisi (Cava vd., 1987).



Şekil 9. Çeşitli sıcaklıklarda ve oksijen basıncında $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'de hesaplanan oksijen içeriğiyle deneysel verilerin (açık kareler) karşılaştırılması. Kırık çizgiler, ortorombikten tetragonal geçişe kadar olan katı fazı göstermektedir.

1.3.1.1.2. (RE)BCO'nun Süperiletkenlik Özellikleri

Tablo 3 seçilen (RE)BCO sistemlerinin T_c değerlerini göstermektedir. T_c 'nin değeri RE elementlerinin iyonik yarıçapı arttıkça artar. YBCO'nun T_c değeri 92 K'dir ve NdBCO'nun T_c değeri 96 K'e kadar yüksek olabilir.

Tablo 3. Seçilen (RE)BCO sistemlerinin T_c değerleri.

(RE)BCO	T_c (K)
NdBa ₂ Cu ₃ O ₇	96
SmBa ₂ Cu ₃ O ₇	94
GdBa ₂ Cu ₃ O ₇	93
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
TmBa ₂ Cu ₃ O ₇	90
YbBa ₂ Cu ₃ O ₇	89

Kritik sıcaklık, T_c , (RE)BCO malzemelerindeki en önemli süperiletkenlik özelliği değildir. Kritik akım yoğunluğu, J_c , belirli bir üretim sıcaklığında endüstriyel uygulamalar için tartışmasız en önemli parametredir. Genellikle mühendislik uygulamaları için J_c değerinin 10^4 ile 10^5 A/cm² aralığında olması gerekmektedir. J_c , süperiletken malzemelerin kendine özgü bir özelliği olmayıp, numunenin mikroyapısına ve üretim tekniğine bağlıdır.

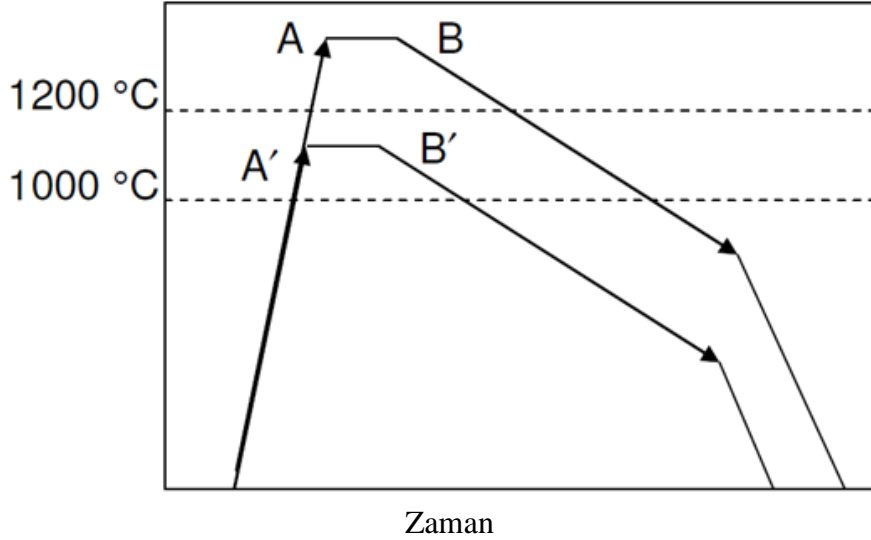
(RE)BCO süperiletkenleri, istenen sitokiyometriye uygun olarak hazırlanan toz peletinin başlangıçta peritektik sıcaklığın altındaki sıcaklıkta sinterleme işlemi ile üretilmektedir. Yakın zamanda yapılan çalışmalar doğrultusunda (RE)BCO süperiletkenlerinin kristal olarak büyümeleri ve farklı yöntemler yardımıyla süperiletkenlik özelliklerinin geliştirilmesine çalışılmaktadır. Geliştirilen üretim yöntemleri ile (RE)BCO örneklerinin kritik akım yoğunluğunun kayda değer biçimde arttığı gözlemlendi. Bu yöntemler üretim kontrolü ve mikroyapının kontrolü olmak üzere iki kontrol elemanı esasına dayanır. Özellikle de bu üretim yöntemleriyle kritik akım yoğunluğu değeri teknolojik uygulamalar için gerekli olan 10^4 ile 10^5 A/cm² değerine çıktığı bilinmektedir (Li vd., 2015a).

1.4. (RE)BCO Malzemelerini Üretim Yöntemleri

1.4.1. MTG (Eritme-Yönlendirmeli-Büyüme)

Eritme-yönlendirilmeli-büyüme (MTG) yöntemini ilk olarak Jin ve arkadaşları tarafından 1988 yılında kullanılmışlardır (Jin vd., 1988). Salama ve arkadaşları ise 1989 yılında yönelmiş çoklu tanecikli örnek üreterek bu yöntemi geliştirmişlerdir (Salama vd., 1989). Bu yöntem, Şekil 10'da gösterildiği gibi, iki peritektik reaksiyonların ikisinden biri ile ($Y_2BaCuO_5 + \text{Eriyik Faz (L)} \rightarrow 2YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 1000 °C'de ya da $Y_2O_3 + L \rightarrow Y_2BaCuO_5$) ısı gradyanı içinde yavaş soğutma, ardından peritektik sıcaklığının üzerinde karışık oksitten oluşan YBCO pellet içermektedir. Daha sonra geliştirilen MTG işlemine numune içinde gözenek oluşumunu azaltmak için peritektik sıcaklık (T_p) üzerinde sabit tutma süresi dahil edilmiştir. Bu yöntem, tane büyümesine yardımcı olmak ve nispeten temiz tanecik sınırlarını oluşturmak için yavaş soğutmadan faydalanır. YBCO tanecik büyümesi için tercih edilen yön a - b düzlemdir böylece,

tanecikler bu doğrultuda sıralanabilir. Endüstriyel uygulamalar için çok küçük olan 1 T manyetik alan altında tipik MTG numunelerinin taşıma J_c değerleri 2000-4000 A/cm²'dir.



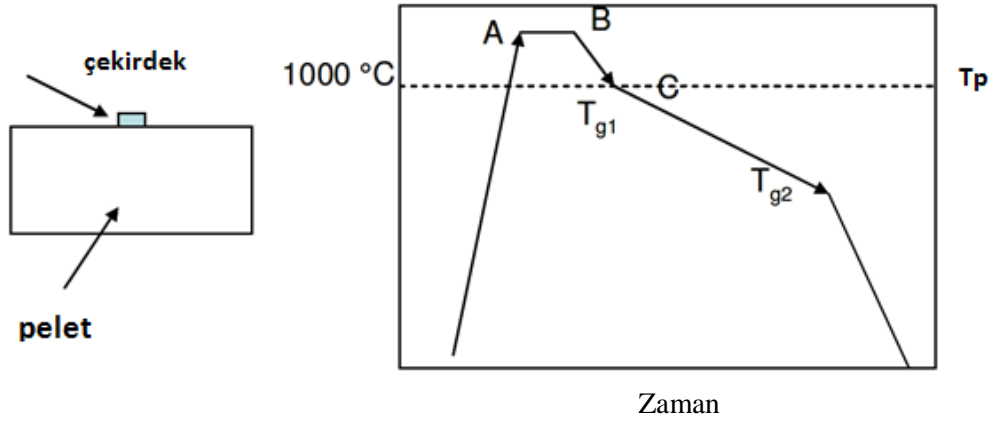
Şekil 10. MTG yönteminin şematik gösterimi.

1.4.2. MPMG (Eritme-Toz-Eritme-Büyüme)

Eritme işlemlerinin amacı numunenin mikro yapıları kontrol edilerek J_c değerinin geliştirilebileceğinin gözlenmesidir. 1989 yılında Murakami tarafından MTG süreci geliştirilerek MPMG (Eritme-Toz-Eritme-Büyütme) ya da QMP (Bastırılabilir-Eritme-Büyütme) üretim yöntemlerini geliştirmişlerdir (Murakami vd., 1989). Bu yöntem, sinterlenmiş bir örneğin ya da $Y_2O_3 + L$ bölgesinde YBCO faz diyagramındaki kalsine edilen tozların karışımının ısıtılmasını ve sonrasında soğuk bakır plakalar kullanılarak söndürülmesini içerir. Söndürülen numuneler, homojen olarak ince bir toz haline gelene kadar öğütülür ve iyice karıştırılır. Preslenip pelet haline gelen örnek hızlıca Y-211 + L bölgesine ısıtılır ve 0.5-5 °C/saat hızla soğutulur. Bu yöntem sayesinde iri Y_2O_3 taneleri arındırılabilir ve onların bozulması (MTG işleminde olduğu gibi pelet $Y_2O_3 + L$ bölgesine ısıtıldığı zaman) önlenir. Bu nedenle Y-211 parçacıkları numune içinde homojen olarak dağılabilir.

1.4.3. TSMG (Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyüme)

Çoğu teknolojik uygulamalar için, büyük boyutlara sahip kullanılabilir şekillerde üretilen düzgün yönlendirilmiş tek kristal süperiletkenlere ihtiyaç vardır. Çoğunlukla MTG ve MPMG yöntemiyle üretilen örnekler büyük boyutlarda olmalarına rağmen çoklu kristal yapıdadır. Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyütme yöntemi, tane yönlendirme kontrolünü sağlamak için tek yönlü büyüme ve MPG yöntemini birleştirir. Bu yöntem ilk defa 1991 yılında Japonya’da Sawano tarafından tek kristal tamamen yönlendirilerek büyültmeyi gerçekleştirmiştir (Sawano vd., 1991). TSMG adımları şematik olarak Şekil 11’de gösterilmiştir.



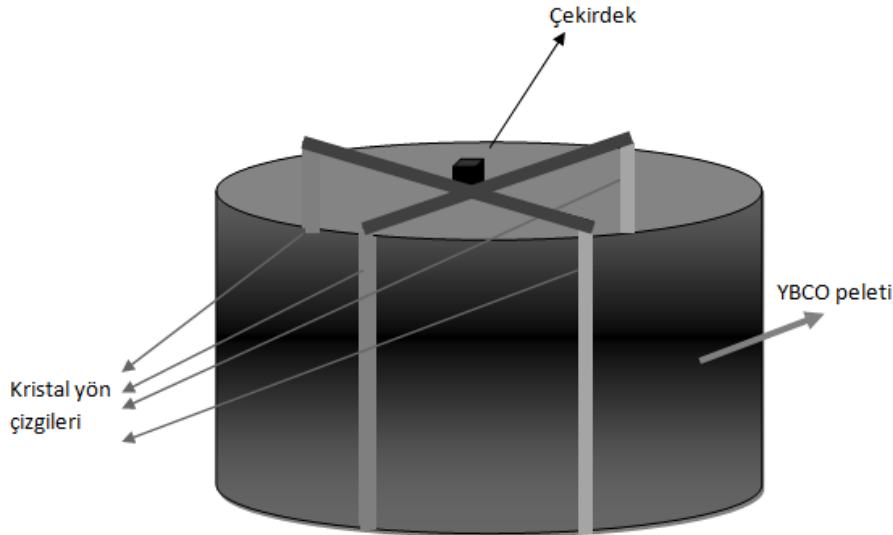
Şekil 11. TSMG yönteminin şematik gösterimi.

TSMG işleminde tane boyutunu artırmak ve tane yönünü kontrol etmek için; tek kristalin $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Sm-123) ya da $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Nd-123)’in parlak yüzeyi (tek kristal heterojen tane çekirdeklenme yerini biçimlendirmek için) preslenmiş peletin üst yüzeyi üzerine yerleştirilir. Çekirdek, kristalin a - b düzlemi pelet üst yüzeyine paralel olmalıdır. Nd-123 ve Sm-123, her ikisi de Y-123’ten daha yüksek bir ayrışma sıcaklığına sahiptir ve Y-123 fazının kısmi erime bölgesinde de çözünmez. TSMG işleminin termal profili Şekil 11’de görülmektedir. Genellikle Y-123’ün T_p ’si T_{g1} ’den birkaç derece büyük ve T_{g2} ise, T_{g1} ’den genellikle 25-45 °C daha düşüktür. T_{g1} ’den T_{g2} ’ye doğru soğuma hızı, numunenin boyutuna ve büyüme oranına göre 0,1–1 °C/saat arasında ayarlanabilir. Bu yöntemi kullanarak, örneklerin çapı 60 mm’ye kadar tek taneler (yani Y-211’in bir dağılımını içeren tek kristal Y-123) biçiminde büyütülebilir. Bu nedenle, zayıf bağlar önemli ölçüde azalır ve J_c geliştirilebilir. Bu yöntemin uygulanması nispeten kolaydır, başlangıç düzeni, bir hava atmosferinde oda

sıcaklığında uygulanabilir ve ayrıca özel fırınların kullanımına gerek duyulmayabilir. Bu yöntemde en dikkat edilmesi gereken durumlardan biri de kullanılan fırının içindeki sıcaklık gradyantının soğuma ve bekleme zamanlarındaki değişim aralığıdır.

Sıcak çekirdeklenme yöntemi (LRE)BCO tek taneler işlemleri için ilk olarak Japonya'da çalışılmıştır (Endo vd., 1996a). Sıcak çekirdeklenme işlemi, uygun bir fırında yaklaşık peritektik sıcaklığında pelet yüzeyi üzerine çekirdek yerleştirilmesini kapsar. Böylece çekirdek, bekleme süresi sırasında daha yüksek sıcaklıkta erimez. Bu yöntem, özel olarak tasarlanmış bir fırın gerektirir. Genel olarak en önemli nokta pelet yüzeyi üzerine yüksek sıcaklıkta çekirdeğin yerleştirilmesidir. Ancak, bu yöntem (sıcak çekirdeklenme) büyük ölçekli üretim süreci için tercih edilebilir bir yöntem değildir.

TSMG yöntemiyle üretilen kaliteli tek kristal örneklerde kristal yön çizgileri kristalin peletin tamamında büyüdüğünü göstermektedir. Uygun ısıl işlemde üretilen tek kristal YBCO peleti üzerindeki kristal yön çizgilerinin şematik gösterimi Şekil 12'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

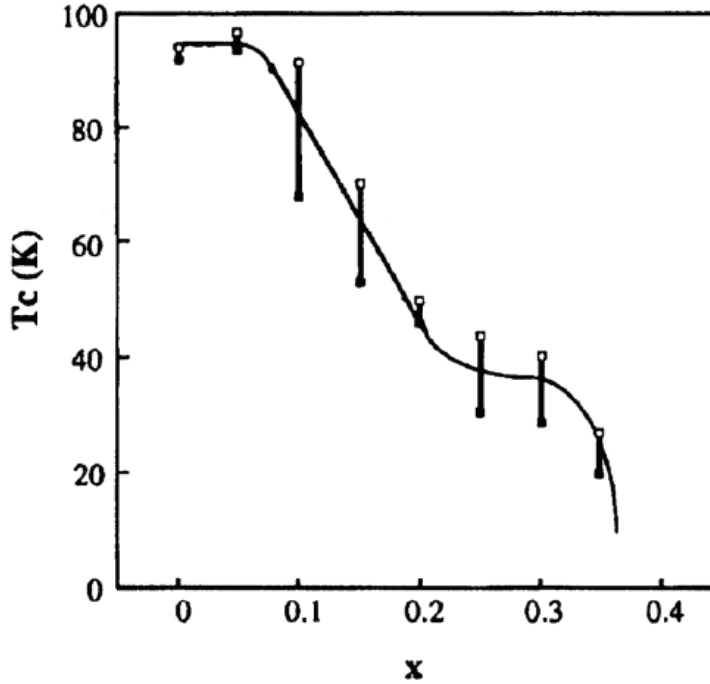


Şekil 12. Üzerine çekirdek koyularak büyütülen tek kristal YBCO peletinin kristal yön çizgilerinin şematik gösterimi.

1.4.4. OCMG (Oksijen-Kontrollü-Eritme-Büyüme)

Y-123 sistemi sadece sitokiyometriğe uygun oranlarda oluşur. LRE-123 (LRE: La, Nd, Sm, Eu, Gd) sistemleri ise LRE-Ba katı çözelti formunda oluşurlar. (LRE)BCO

süperiletkenleri hava ortamında üretildiğinde, LRE elemanlarının iyonik yarıçapları Ba ile karşılaştırılabilir olduğundan, LRE ile Ba üzerinde yer değişimi sonucunda $\text{LRE}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_y$ tipi katı çözelti oluşturulur. Bu bileşiklerde x katkısı arttığı zaman, süperiletken geçiş sıcaklığı (T_c) azalır. NdBCO sistemleri için x katkı oranına bağlı olarak T_c 'nin değişimi Şekil 13'te verilmiştir.

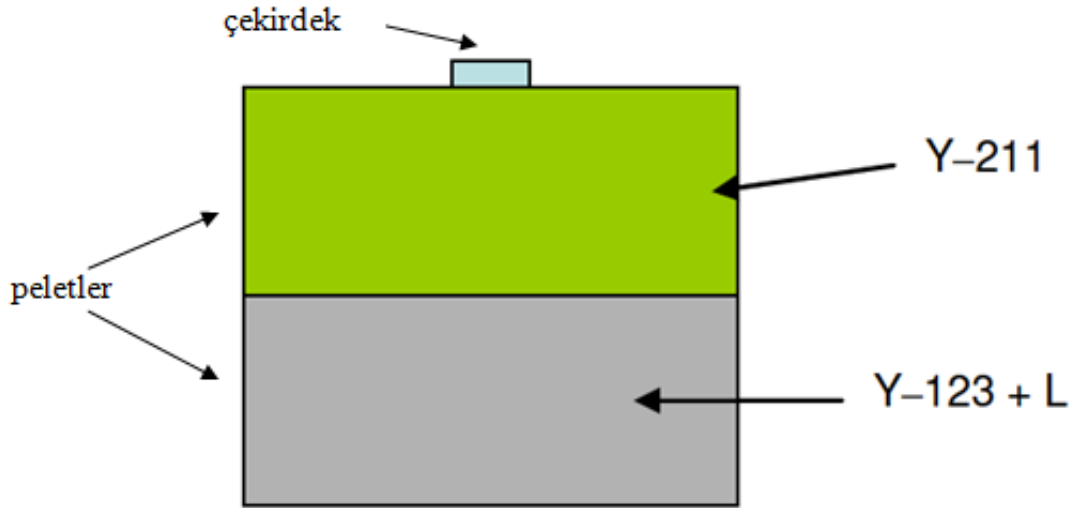


Şekil 13. 1050 °C'de sinterlenen $\text{Nd}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}$ örneğinin x katkı oranına göre T_c değişim grafiği.

OCMG (Oksijen-Kontrollü-Eritme-Büyüme) yöntemi ilk olarak Yoo ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. OCMG sürecinde azaltılmış oksijen atmosferi kullanarak, Nd-Ba-Cu-O süperiletkenlerinde yüksek T_c ile keskin bir süperiletken geçişi bulmuşlardır (Yoo vd., 1994). Azaltılmış O_2 atmosferi altında Nd/Ba yer değişimini engeller böylece OCMG yöntemi kullanılarak NdBCO peletin T_c değeri geliştirilebilir. Bu azaltılmış O_2 atmosferi altında artan RE katkısı, RE-123'in ayrışma ya da katılaşma sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır (Chen vd., 1994). Bu teknik, daha sonra büyük RE(BCO) tek kristali büyültmek için (TSMG yönteminde kullanılan) sıcak çekirdeklenme yöntemiyle birleştirilmiştir. Ancak bu yöntemin kullanılabilirliği açısından özellikle de büyük tek kristal üretmek için özel dizayn edilmiş fırın gerekmektedir.

1.4.5. IG (Süzme ve Büyüme)

Süzme ve büyüme (IG) yöntemi 1994 yılında Y. L. Chen tarafından bulunmuş daha sonra ise diğer araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu teknik ayrıntılı olarak Şekil 14'te gösterilmektedir. YBCO tek kristal aşamasında iken Y-211 pelleti işlem sırasında sıvı olacak bölgenin (genellikle Y-123 + $Ba_3Cu_5O_8$) üzerine konulur. Tüm düzenek TSMG yönteminde olduğu gibi ısıtılır. IG yönteminde sıvı faz Y-211 içine süzülür ve çekirdeğin etkisi altında tek kristal olarak büyümeye başlar. IG yöntemiyle üretilen Y-123 peletinde Y-211 parçacıkları küçük ve homojen olarak dağılırlar. Ayrıca uygun eritme yöntemiyle üretilen YBCO'nun delik yoğunlukları diğer yöntemlerle üretilen örneklerle oranla önemli ölçüde küçüktür (Babu ve Rajasekharan, 1999; Babu vd., 2000).



Şekil 14. IG yönteminin şematik gösterimi.

1.5. Külçe (RE)BCO Süperiletkenlerin Uygulamaları

Külçe tek kristal süperiletkenler, II. Tip süperiletkenlerin elektromanyetik indüksiyonuna dayanan mühendislik uygulamaları için önemli bir potansiyele sahiptir. Örneğin, itici ve çekici kuvvetlerin bir kombinasyonu, havadaki bir nesneyi askıya alabilir veya havaya uçurabilir. Öte yandan, külçe süperiletkenler, yarı sabit mıknatıslı tip uygulamalarda manyetik alanların ana kaynağı olarak da kullanılabilir (Murakami, 2000).

1.5.1. Levitasyon ve Süspansiyon Sistemleri

MPMG yöntemiyle üretilen sıvı azotta soğutulan YBCO külçe süperiletken ile Fe-Nd-B mıknatıs arasındaki itici kuvvet (Meissner etkisi) 200 kg'lık bir kütleyi taşıyabilir. Burada oluşan itici kuvvet kritik sıcaklığın altında soğutulan süperiletken içinde mıknatıs tarafından oluşan Lenz yasasıyla açıklanan manyetik itici kuvvettir. Manyetik olarak kaldırılan bir tren veya manyetik levha havada tek bir parkurun üstünde askıya alınabilir ve manyetizmanın itici ve çekici güçleri kullanılarak itilebilir. Bir Maglev sisteminde görülen tek sürtünme, ray ile araç arasındaki fiziksel temasın olmaması nedeniyle taşıma ve hava arasında kalan sürtünmedir. Sonuç olarak manyetik trenler, yeteri kadar enerji tüketimi ve düşük gürültü seviyeleri ile çok yüksek hızlarda seyahat amacıyla kullanılabilirler. Maglev sistemler, geleneksel demiryolu taşımacılığında çok daha pratik ve hızı 650 km/saat'e kadar çalışabilen sistemler olarak önerilmektedir. Tuzaklanmış manyetik alanlı mıknatıslar geleneksel NbTi pisto bobinlerinin yerini almaya başlamıştır ve bunlar şu anda Japonya'da manyetik kaldırma kuvveti sistemi olarak kullanılan havada sürtünmesiz olarak hareket edebilen trenlerde kullanılmaktadır (Yoo vd., 1998).

Sabit mıknatıslı rotora sahip bir stator olarak kullanılan, külçe (RE)BCO'ya sahip olan bir süperiletken yatak, basit bir motora benzeyen cihazdır. Motor ve stator arasındaki çekici ve itici kuvvetler, statorun asılı kalmasına neden olur. Böylece serbestçe dönebilirler. SmBCO'nun yüksek J_c ve daha düşük sürüklenme hızı nedeniyle manyetik yatak olarak kullanımı için YBCO'dan çok daha üstün olduğu bulunmuştur (Otani ve Murakami, 2000). Bir başka uygulamada, enerji depolama sistemlerinde kullanılan havada dönen tekerlek sistemi için bir manyetik yatak oluşturmaktadır. Süperiletken yataklar, ideal koşullar altında sürtünmeye sahip olmadığından uzun süreler boyunca dönme kinetik enerjisi depolamak mümkündür. Havada uçan tekerleklerin kullanıldığı enerji depolama sistemlerinin diğer bir avantajı ise, enerjisini hızlı bir şekilde (yüksek güç desteğiyle) verebilmesidir. Boeing şirketi, Almanya'daki Elektrikli Makineler Enstitüsü ve Japonya'daki ISTEK, havada uçan tekerleklerin kullanıldığı enerji depolama sistemlerini kullanarak bir prototip jeneratör geliştirdiler ve toplamda 10 kw.sa enerjiyi ürettiler (Day vd., 2002; Siems vd., 2004; Matsunaga vd., 2002)

1.5.1.1. Manyetik Kaldırma Kuvveti Sistemleri

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfinden sonra yüksek kaldırma kuvvetine sahip YBCO ($YBa_2Cu_3O_7$) külçe süperiletkenlerinin; manyetik yataklar (Hull vd., 2005), jeneratörler (Ma vd., 2005), motorlar (Gapalek vd., 1994) ve manyetik kaldırma kuvvetli taşıma sistemleri (Wang vd., 2003) gibi pek çok teknolojik uygulamalarında birçok bilim adamı çalışmaktadır. Özellikle tek kristal süperiletken örnekler teknolojik uygulamalarda tercih edilmektedir. Çünkü tek kristal süperiletken örneğin manyetik kaldırma kuvveti diğer yöntemlerle üretilen süperiletken örneklerden yaklaşık 50 kat daha fazladır (Park vd., 2009).

Kaldırma kuvveti tek boyutta düşünülürse $F_z = (m(dB/dz))$, $m = Mv$ ve $M = AJ_c r$ şeklinde verilir. Burada; m , süperiletkenin toplam manyetik moment; dB/dz , dış alan tarafından üretilen manyetik alanın aksenal yöndeki değişim oranını; M , birim hacimdeki manyetizasyon; A , örnek geometrisine bağlı bir sabit; J_c , süperiletkenin kritik akım yoğunluğu; r ise perdeleme akım ilmeğinin yarıçapıdır. Görüldüğü gibi dB/dz , J_c ve r ne kadar büyük olursa kaldırma kuvveti de o kadar büyük olur. Büyük J_c ve r değerleri de örnek içerisindeki akı çivileme merkezlerinin güçlü olmasına bağlıdır (Sanchez ve Navau, 1996).

Kritik akım yoğunluğu ve magnetin manyetik alan dağılımı dışında kaldırma kuvvetini etkileyen birçok parametre vardır. Bunlardan bazıları; tanecik yarıçapı, tanecik yönelimi (Yang vd., 2003), örneğin kalınlığı, süperiletken-magnet arasındaki mesafe (Yang, vd., 2002), soğutma mesafesi (Murakami vd., 1990), sabit mıknatısın süperiletkene göre bağlı hareket hızı (Zhou vd., 2009), sabit mıknatısın boyutları ve cinsidir (Liu vd., 2008). Kaldırma kuvveti ölçümü sırasında mıknatıs ile süperiletken malzeme arasındaki mesafe azaldıkça kaldırma kuvveti artar (Çelik, 2009). Süperiletken örneğin kalınlığı arttıkça kaldırma kuvveti de artmaktadır (Yamachi, N., vd., 2003) ve süperiletken örneğin sıcaklığı düştükçe manyetik kaldırma kuvvetinin arttığı da bulundu (Nariki vd., 2005a; Erdem vd., 2014).

1.5.2. Sabit Miknatıs Kullanılan Uygulamalar

(RE)BCO'nun büyük tek kristalleri, düşük sıcaklıkta birkaç tesla manyetik alanı tutabilir ve kalıcı miknatıslar olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, kalıcı miknatısların kullanıldığı çeşitli güç aygıtları, süperiletken yarı-kalıcı miknatıslar veya tuzaklanmış manyetik alan miknatıslarıyla değiştirilebilir.

Genel olarak, büyük taneli (RE)BCO süperiletkenleri, mühendislik uygulamaları için önemli potansiyele sahiptir. Yüksek performanslı manyetik yataklar ve süperiletken uçan tekerlekli enerji depolama sistemleri günümüzde inşa edilmeye çalışılmakta ve bu konuda alan testleri uygulanmaya başlamıştır. Büyük bir tanecikli külçe süperiletken, aynı zamanda sıvı azot sıcaklığında çalıştırılabilen manyetik olarak havalandırılmış bir tren de dahil olmak üzere birçok yüksek manyetik alanda kullanılabilen ve bu malzemeler kuvvetli yarı-kalıcı miknatıs olarak da işlev görmektedir. Günümüzde büyük boyutlarda üretilen yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip (RE)BCO tek kristal süperiletkenleri teknolojik endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

1.6. (RE)BCO Malzemeleriyle İlgili Literatür Özeti

1988 yılında Moon ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada tasarladıkları sistem ile ilk defa YBCO numunesinin sıvı azot sıcaklığında yatay ve dikey yönlerde kaldırma kuvvetini hesapladılar (Moon vd., 1988).

Brandt 1990 yılında yaptığı çalışmada manyetizasyon eğrileri yardımıyla dikey yönde histerik manyetik kaldırma kuvvetini tanımladı. Ayrıca farklı boyutlardaki miknatısın süperiletken ile paralel ya da dikey konumda olmasıyla ilgili yeni bir model uyguladı (Brandt, 1990).

Lehndorff ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, eritme yöntemiyle üretilen YBCO süperiletkeni tasarladıkları düzenek yardımıyla sıvı azot sıcaklığında dikey harekete dikey yönde manyetik kaldırma kuvveti ölçümü yaptılar. Bu ölçüm sonucunda, yüksek manyetik kaldırma kuvveti elde etmek için miknatısın çapının süperiletken örnek çapıyla aynı ya da daha küçük olması gerektiğini buldular (Lehndorff vd., 1995).

Sanchez ve Navau yaptıkları çalışmada silindirik süperiletken örnek ile silindirik mıknatıs arasındaki dikey harekete dikey yönde manyetik kaldırma kuvvetini yaptıkları modelleme ile hesapladılar (Sanchez ve Navau, 1996).

Muralidhar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Nd-Sm-Eu (BCO) süperiletkeninin DTA grafiği analizi yardımıyla peritektik sıcaklığı belirlemişlerdir (Muralidhar vd., 1997).

Yang ve arkadaşları tarafından 1998 yılında yapılan çalışmada MgO tek kristali kullanarak Y123 tozuna kütlece farklı oranlarda Y_2O_3 ve kütlece % 1 PtO_2 oranında karıştırılarak farklı oranlarda süperiletken örnekler (20 mm çapında ve 12 mm kalınlığında) ürettir ve bu örneklerin sıvı azot sıcaklığında 15.6 mm çapında ve 18 mm kalınlığında mıknatıs kullanarak manyetik kaldırma kuvvetini ölçtüler. Bu çalışmanın sonucunda kütlece % 10 Y_2O_3 örneğine ait dikey yönde manyetik kaldırma kuvvetinin diğer örneklerden daha fazla manyetik kaldırma kuvvetine sahip olduğunu buldular (Yang vd., 1998a).

1998 yılında Yang ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise Y123: Y_2O_3 : PtO_2 90.5:8.5:1 oranında hazırladıkları süperiletken peletin üst tarafına konulan $Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ çekirdeğinin c-eksenine normal veya paralel olacak şekilde 20 mm çapında 12 mm kalınlığında iki tek kristal süperiletken hazırladılar. Bu iki örneğin sıvı azot sıcaklığında dikey harekete dikey yönde manyetik kaldırma kuvvetini ölçtüler. Çalışmanın sonucunda pelletin üstüne c-eksenine normal olarak üretilen tek kristal örneğe ait manyetik kaldırma kuvvetinin diğer örnekten daha fazla olduğunu buldular (Yang vd., 1998b).

1998 yılında Jee ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, TSMG yöntemiyle $Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ ($Nd_{1.8}$) tek kristali kullanılarak ve farklı sürelerde bekletilerek üretilen Y_{211} - CeO_2 katkılı $Y_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ (1 mol YBCO ve 0.4 mol Y_{211}) süperiletken örneklerin yapısal ve elektriksel özelliklerini incelediler. Bu inceleme sonucunda 35 saat sabit sıcaklıkta bekletilen örneğin sıvı azot sıcaklığında en yüksek manyetik kaldırma kuvvetine sahip olduğu anlaşılmıştır (Jee vd., 1998).

1999 yılında Kim ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Sm1.8 (Sm1.8Ba2.4Cu3.4O7) tek kristal çekirdek farklı üç YBCO örneğine uygulandı. Bu çalışmanın sonucunda alt ve üs tarafında Sm1.8 tek kristal çekirdek konan YBCO (çevresi Yb₂O₃ tabakalanmış) pelletin diğer pelletlerden daha yüksek kaldırma kuvvetine sahip olduğunu buldular (Kim vd., 1999).

Nariki ve arkadaşları tarafından 2005 yılında yapılan çalışmada ise 20 mm çapındaki YBCO tek kristalinin sıvı azot sıcaklığında (77 K'de) alan tuzaklamasını 2 T olarak ölçtüler (Nariki vd., 2005b).

Kim ve arkadaşları tarafından 2000 yılında yapılan çalışmada Sm1.8 (Sm1.8Ba2.4Cu3.4O7) tek kristal çekirdekleri kullanılarak farklı yapılarda tek kristal Y1.8 (Y1.8Ba2.4Cu3.4O7) örnekler 3 cm×3 cm×2 cm boyutlarında üretilmiş ve sıvı azot sıcaklığında manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda en iyi tek kristal örneğin manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sonucu 44 N'dir (Kim vd., 2000a).

Kim ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada farklı miktarlarda (1-5) çekirdekleri YBCO süperiletkenin üzerinde koydular ve farklı yapılarda tek kristal YBCO örneklerini ürettiler. Bu örneklerin sıvı azot sıcaklığında dikey harekete dikey yönde manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinde ise, 3 çekirdekli (çekirdekler üçgen şeklinde konulan) süperiletken örneğin diğer örnekler arasında en iyi süperiletken özelliklere sahip olduğunu buldular (Kim vd., 2000a).

Hinai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ürettikleri YBCO ve GdBCO tek kristal süperiletken malzemeler için üst sıcaklık (T_{max}) değişimini incelediler. YBCO süperiletkenin T_{max} aralığının GdBCO süperiletkeninden daha geniş olduğunu buldular (Hinai vd., 2001).

Van der Laan ve arkadaşları 2001 yılında Oksit-Toz-Tüp yöntemi kullanarak ürettikleri BSCOO-2223 süperiletken örneğin kritik akım yoğunluğunun örneğin soğutma sıcaklığına göre değişimlerini incelediler. İnceleme sonucunda kritik akım yoğunluğunun numune sıcaklığıyla ters orantılı olduğunu buldular. Numune sıcaklığı

düştükçe numunenin kritik akım değeri hızlı bir şekilde artmaktadır (Van der Laan vd., 2001).

2001 yılında Kim ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada iki ve daha fazla çekirdekli yapıda ürettikleri YBCO süperiletkeninin sıvı azot sıcaklığında manyetik kaldırma kuvveti ölçümünü yaptılar. Bu ölçüm sonucunda üç çekirdekli YBCO süperiletkeninin diğer örneklerle kıyasla daha yüksek kaldırma kuvvetine sahip olduğunu buldular (Kim vd., 2001).

2001 yılında Gruss ve arkadaşları, 26 mm çaplı Zn-Ag katkılı YBCO diskinde tuzaklanan alanı 24 K'de 16 T olarak rapor ettiler (Gruss vd., 2001).

2001 yılında, Nariki ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada MTG yöntemiyle üretilen Gd₂₁₁-Ag katkılı Gd₁₂₃ süperiletken örneklerinin mekaniksel özelliklerini incelediler (Nariki vd., 2001a). Bu inceleme sonucunda gümüş katkısının kritik akım yoğunluğunu artırdığını belirlediler.

Tomita ve Murakami 2003 yılında yaptıkları çalışmada 2 adet YBCO tek kristali karbon fiber ile kapladılar ve reçine ile yapıştırdılar. Yaptıkları bu malzemenin alan tuzaklamasını düşük sıcaklıkta (29 K'de) ölçtüler. Bu çalışma düşük sıcaklıklarda yapılan ilk çalışmadır. Ölçüm sonucunda ise alan tuzaklamasını 17.24 T olarak buldular (Tomita ve Murakami, 2003).

2003 yılında Yang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kütlece 90.5:8.5:1 YBCO:Y₂O₃:PtO₂ süperiletkinini 30 mm çapında 12 mm kalınlığında Nd₁₂₃ çekirdek yardımıyla (TSMG yöntemi kullanılarak) tek kristal süperiletken olarak ürettiler. Üretilen örneğin sıvı azot sıcaklığında farklı alanlı soğutma mesafelerinde dikey harekete dikey yönde manyetik kaldırma kuvvetini ölçtüler. Ölçüm sonucunda maksimum itici kuvveti 74 N ve maksimum çekici kuvveti 30.6 N olarak buldular (Yang vd., 2003).

Muralidhar tarafından yapılan 2004 yılındaki çalışmada (Nd_{0.33}Eu_{0.33}Gd_{0.33})Ba₂Cu₃O_y karışımına farklı nano boyutlarda (200-70 nm) % 30 oranında Gd₂₁₁ eklediler. 70 nm'den daha küçük boyutta eklenen tozla üretilen

süperiletken örneğin sıvı azot sıcaklığında kritik akım yoğunluğunun diğer örneklerden yüksek bir değere sahip olduğunu buldular (Muralidhar vd., 2004).

Latha ve arkadaşları 2004 yılında yaptıkları çalışmada, Nd123 çekirdeği kullanarak DyBCO süperiletken tek kristali TSMG yöntemini kullanarak ürettirler. Ürettikleri örneği çekirdekten 2.5 mm uzaklıkta eşit oranda olacak şekilde 3 parçaya kestiler. Kestikleri örneğin kritik akım yoğunluğunu ölçtüler ve en yüksek J_c değerini, çekirdeğe en uzak noktadaki (7.5 mm uzaklıkta) kesitte buldular (Latha vd., 2004).

2005 yılında, Xu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, $Gd_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_{7-\delta}$ ($x = -0.1, 0, 0.05, 0.1, 0.15$ ve 0.2) örneklerinin yapısal özelliklerini incelediler. Kristallenme oranının Gd zenginliğiyle düştüğünü gördüler (Xu vd., 2005).

Nariki ve arkadaşları tarafından 2005 yılında yapılan çalışmada GdBCO süperiletken örneklerinin farklı sıcaklıklarda (sıvı Ar, O₂ ve N₂ sıcaklığında) Nd-Fe-B mıknatısı üzerindeki etkisini incelendi. Yapılan incelemeler sonucunda ölçüm sıcaklığı ile manyetik kaldırma kuvvetinin ters orantılı olduğunu bulundu (Nariki vd., 2005).

Nadendla ve arkadaşları, ilk defa Mg katkılı NdBCO (NdBa₂Cu₃O₇) üretken çekirdek ürettirler. Çekirdeğin peritektik sıcaklığı NdBCO çekirdeğinden daha yüksektir. Bu nedenle, SmBa₂Cu₃O₇ (SmBCO) ve GdBa₂Cu₃O₇ (GdBCO) gibi yüksek peritektik sıcaklığa sahip süperiletken malzemeler üzerinde kullanılmaktadır (Nadendla vd., 2005).

Shi ve arkadaşları Mg-NdBCO üretken çekirdeği kullanarak GdBCO süperiletken örneğine farklı miktarlarda BaO₂ ekleyerek TSMG yönteminde ürettirler. Ürettikleri malzemenin tek kristal GdBCO süperiletkeninde kritik akım yoğunluğunu 7.2×10^4 A/cm olarak buldular (Shi vd., 2007).

Zhou ve arkadaşları tarafından yapılan 2007 yılındaki çalışmada Y123:Y211 100:30 karışımına kütlece % 0.5 oranında CeO₂ katkılayarak 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığında olan pellet hazırladılar. Bu pelletin üzerine Sm123 çekirdek koyup tek kristal ürettirler. Ürettikleri tek kristali yukarıdan aşağıya doğru eşit miktarda 4 silindirik parçaya böldüler ve bu parçaların sıvı azot sıcaklığında dikey harekete dikey yönde

manyetik kaldırma kuvvetini ölçtüler. Ölçüm sonucunda yukardan aşağıya ikinci örneğin manyetik kaldırma kuvvetini diğer örneklerden daha yüksek olduğunu buldular (Zhou vd., 2007).

2009 yılında Zhang ve arkadaşları, TSMG yöntemini kullanarak farklı oranlarda Fe-Gd₂₄₁₁ (Gd₂Ba₄Cu₁O₁) katkılı Gd₁₂₃ süperiletken örneklerinin yapısal ve elektriksel özelliklerini incelediler. Çalışmanın sonucunda Gd₂₄₁₁ katkısı olmayan örneklerin katkılı örneklere göre daha fazla alan tuzaklama potansiyeline sahip olduğunu belirlediler. (Zhang vd., 2009).

2009 yılında yapılan çalışmada Park ve arkadaşları, TSMG yöntemi kullanılarak Y₂O₃-CeO₂ katkılı Y_{1.8} süperiletken örnekleri 30 mm×30 mm×15 mm boyutlarında preslenmiş ve dışına Y₂O₃:Yb₂O₃ karışımını farklı oranlarda kabuk yapıştırılarak ürettiler. Örneklerin sıvı azot sıcaklığında dikey harekete dikey yönde manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda Y₂O₃:Yb₂O₃ kabuk oranı 3:1 olan tek kristal süperiletken örneğin manyetik kaldırma kuvvetinin 225 N olduğu bulunmuştur (Park vd., 2009).

Cardwell ve arkadaşları tarafından NdBCO-MgO çekirdeği kullanarak yapılan çalışmada % 75 Gd₁₂₃ + % 25 Gd-211 + % 10 Ag₂O + % 0.1 Pt farklı oranlarda BaO₂ katarak ürettikleri tek kristallerde BaO₂'nin uygun oranını % 1 olarak buldular (Cardwell vd., 2009).

Xu ve arkadaşları MTG yöntemi kullanılarak Gd₁₂₃ süperiletkenine farklı oranlarda manyetik tozlar ekleyerek süperiletken numuneler ürettiler. Eklenen manyetik tozla kritik akım yoğunluklarının arttığını gözlediler (Xu vd., 2010).

Diko ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada TSMG yöntemi kullanılarak Y₁₂₃:Y₂O₃ 4:1 oranındaki karışıma kütlece % 0.5 oranında CeO₂ ve farklı katkı oranında Ag₂O katkılayarak ürettiler. Ag₂O katkısının tek kristalin kritik akım yoğunluğunu arttırdığı sonucuna vardılar (Diko vd., 2010).

Li ve arkadaşları tarafından IG (Infiltration and Growth) yöntemi kullanılarak üretilen Gd123 örneğinin farklı bölgelerinde SEM görüntülerini incelediler. İnceleme sonucunda süperiletken örneğin merkezindeki SEM görüntüsünün diğer bölgelere kıyasla daha yoğun olduğunu gördüler (Li vd., 2011).

TSIG metodu kullanılarak Gd123- BaCuO₂-CuO, Gd211-BaCuO₂-CuO ve Gd₂O₃-BaCuO₂-CuO üretilen süperiletken örneklerin kaldırma kuvvetleri incelendiğinde, Gd211-BaCuO₂-CuO süperiletken örneğinin kaldırma kuvvetinin diğer örneklerden daha yüksek olduğu belirlendi (Yang vd., 2011).

Volochova ve arkadaşları tarafından Y123:Y₂O₃ 1:0.25 oranındaki karışıma kütlece % 1 oranında CeO₂ eklediler ve DTA analizi yardımıyla peritektik (Y123 ve Y211'in erime) sıcaklığı 1010 °C ve T_{max} sıcaklığını 1040 °C olarak belirlediler (Volochova vd., 2012).

Jiang ve arkadaşları tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, yeni bir manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi tasarlamışlardır. YBCO örneğinin kuvvet-zaman ölçümü yapılmış ve örnek 100 saniye bekletilmiştir. Örneğin manyetik kaldırma kuvvetinin 128.5 N'dan 117.5 N'a düştüğü gözlemler (Jiang vd., 2012).

Camacho ve Sosa yaptıkları çalışmada, farklı geometriye sahip (silindirik, koni, dikdörtgenler prizması, halka ve küre) mıknatısların dikey yönde manyetik alanı (Bz) hesapladılar (Camacho ve Sosa, 2013).

2013 yılında Sawh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 20 mm çapındaki GdBCO tek kristalinin sıvı azot sıcaklığında (77 K'de) alan tuzaklamasını 3 T olarak buldular (Sawh vd., 2013).

Durrel ve arkadaşları tarafından % 15 Ag katkılı GdBCO tek kristal süperiletkeninde (26 mm çapında) sıvı azot sıcaklığında manyetik alan tuzaklamasını 0.8 T olarak buldular (Shi vd., 2010). 2014 yılında yaptıkları çalışmada ise aynı örneğin manyetik alan tuzaklaması ölçümlerini 26 K'de 17.6 T olarak buldular. Bu

değer bugüne kadar manyetik alan tuzaklaması ölçümlerinde bulunan en yüksek değerdir ve Guinness rekorlarına girmiştir (Durrel vd., 2014).

Yang ve arkadaşları, TSIG yöntemiyle Gd_2O_3 ve Gd211 katkılı GdBCO tek kristalinin sıvı azot sıcaklığında dikey harekete dikey yönde manyetik kaldırma kuvvetini ölçtüler. Gd_2O_3 katkısı yapılan örneğin kaldırma kuvvetini Gd211 katkısı yapılandırından daha yüksek olduğunu buldular (Yang vd., 2014).

Chen ve arkadaşları tarafından tasarlanan sistem ile sıvı azot sıcaklığında üç boyutlu olarak manyetik kaldırma kuvveti ölçülmektedir. Bu çalışmada Chen ve arkadaşları, sıvı azot sıcaklığında TSIG yöntemiyle üretilen YBCO örneğini z ekseninde hareket ettirerek F_x , F_y ve F_z 'yi ölçtüler (Chen vd., 2014).

Li ve arkadaşları tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, Gd123:Gd211 1:0.4 oranındaki karışıma kütlece % 10 oranında Ag_2O + % 0.5 Pt ve farklı oranlarda $BaTiO_3$, TiO_2 ve BaO_2 ekleyerek 20 mm çapında tek kristal ürettirler. Çalışma sonucunda $BaTiO_3$ katkısının kritik akım yoğunluğunu iyileştirdiğini buldular (Li vd., 2014).

2014 yılında Volochova ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Y123:Y₂O₃ 1:0.25 oranındaki karışıma kütlece % 1 oranında CeO_2 eklediler ve ürettikleri tozu pellet haline getirdiler. Pelletin altına farklı malzemelerden yaptıkları karışımı (Y123, Yb₂O₃, Y₂O₃, Y211) koydular. Çalışma sonucunda en yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip örneğin altlık karışımının Yb₂O₃: Y₂O₃ 60:40 oranına ait olduğunu buldular (Volochova vd., 2014).

Thoma ve arkadaşları tarafından yapılan 2015 yılındaki çalışmada, Y123 ve Y211 tozlarından oluşturdukları tek kristaller ısıtma işlem öncesinde ve sonrasındaki kütle farkını incelediler. Bu inceleme sonucunda tek kristali ikili soğutma da 0.9 ve 0.3 °C/sa uygulayarak incelediler ve kütle kaybının en az % 4.2 olduğunu buldular (Thoma vd., 2015).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

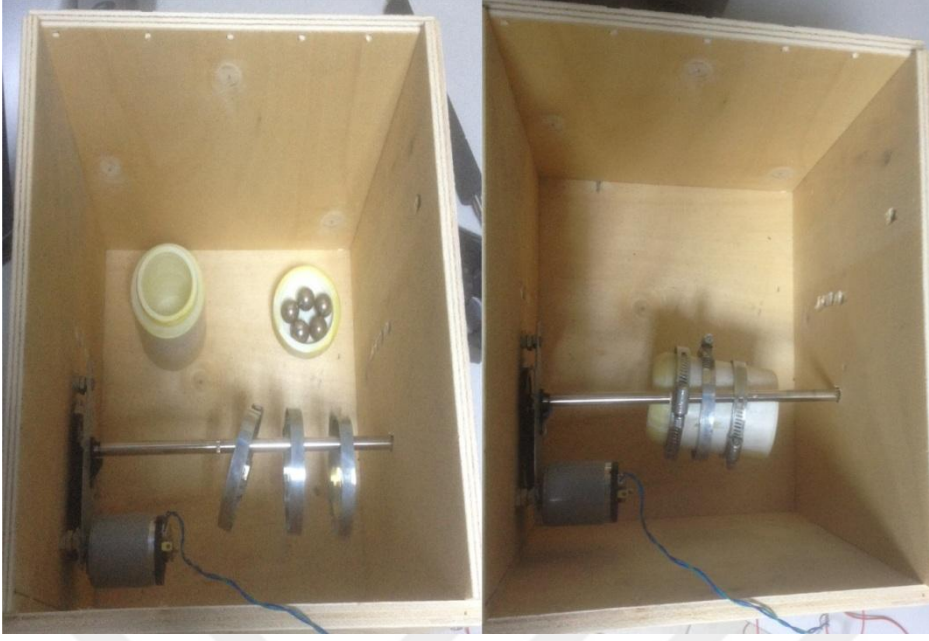
2.1. Süperiletken Malzemelerin Üretimi

Doktora tezi kapsamında üretilecek olan süperiletken tek kristal ve çoklu kristal yapıdaki malzemeler TSMG yöntemiyle üretildi. İlk olarak TSMG yönteminin temelini oluşturan ve bu yöntemde kullanılacak olan $10\text{Nd}_{123}:4\text{Nd}_{422}$ ($10\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7:4\text{Nd}_4\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_6$) çekirdeği üretildi. Çekirdek üretimi ve YBCO tek kristal süperiletken örneklerin üretimine yönelik çalışmalar aşağıda yer alan aşamalarda ayrıntılı olarak anlatıldı.

2.1.1. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ ($10\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7:4\text{Nd}_4\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_6$) Çekirdeğinin Üretimi

2.1.1.1. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ Peletinin Hazırlanışı

Nd_2O_3 , BaCO_3 ve CuO oksit tozları farklı sitokiyometrik oranlarda karıştırılarak $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Nd123) ve $\text{Nd}_4\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_6$ (Nd422) kimyasal tozları hazırlanmıştır. Nd123 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 20 saat ve Nd422 $930\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 10 saat bekletilerek Protherm marka kare fırında kalsine (ısıl işlem) edildi (Şekil 17). Kalsine edilen Nd123 ve Nd422 tozlarından uygun sitokiyometrik oranlarda alınarak $10\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7:4\text{Nd}_4\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_6$ ($\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$) karışımı oluşturuldu. Oluşan karışım 30 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda kestamidden yapılmış şişe yardımıyla karıştırıldıktan sonra (Şekil 15), Retsch marka RM200 model öğütücü yardımıyla 30 dakika boyunca homojen olarak öğütüldü (Şekil 16). Öğütülen toz manuel hidrolik pres yardımıyla 1.5 tonda 13 mm pelet halinde basıldı (Şekil 18 ve Şekil 19). Hazırlanan pelet üzerine MgO tek kristali konularak kare fırın içine konuldu ve Şekil 20'de gösterilen ısıl işlem uygulandı.



Şekil 15. Mekanik karıştırıcı.



Şekil 16. Retsch marka RM200 model agat havanlı öğütücü.



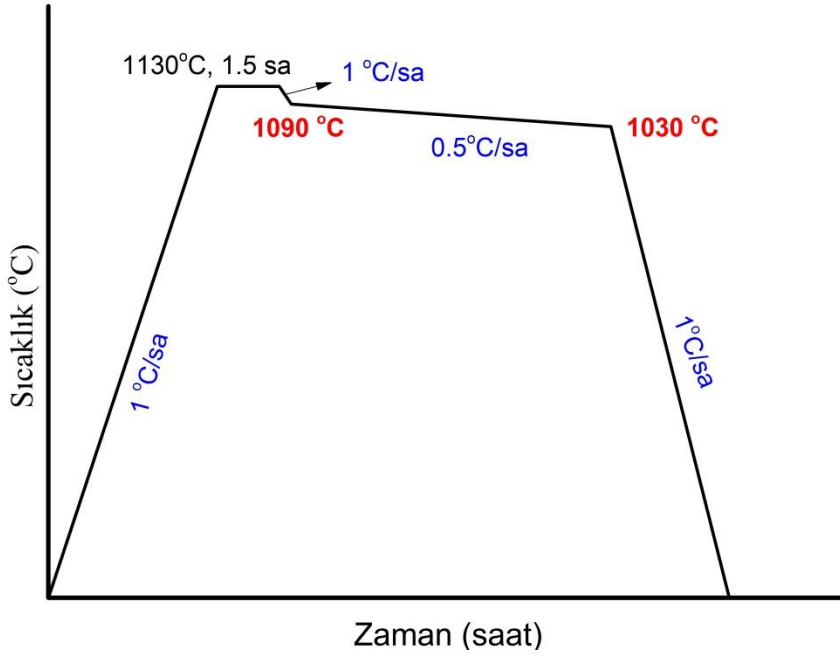
Şekil 17. Protherm marka kare fırın.



Şekil 18. Perkin-Elmer marka 13 mm çapında presleme aygıtı.



Şekil 19. Manuel hidrolük press.



Şekil 20. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ ait sinterleme işlem grafiği.

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

Pelet halinde kare fırından çıkan $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ çoklu kristali agad havan (Şekil 21) içinde Şekil 22’de gösterildiği gibi kırıldı. Kırılan parçaların bir kısmı tek kristal, bir kısmı ise çoklu kristal yapıdadır. Burada en önemli nokta kristalin yüzeyinin ayna gibi tek yönde parlamasıdır. Ayna gibi tek yönde parlayan parçalar ileriki aşamalarda TSMG yönteminde kullanılacak olan çekirdeklerdir.



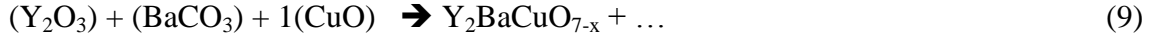
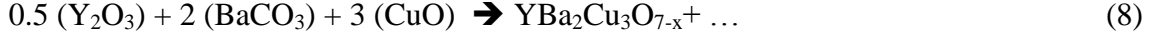
Şekil 21. Agad havanı.



Şekil 22. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ pelletinin kırılan parçaları (çekirdekler).

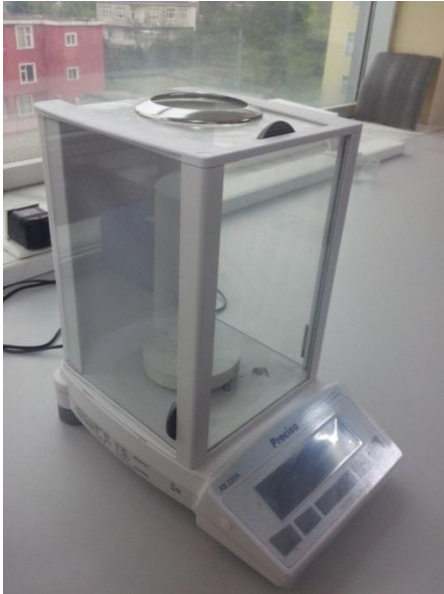
2.1.2. YBCO Tek Kristal Süperiletken Malzemenin Üretimi

2.1.2.1. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123) ve Y_2BaCuO_6 (Y211) Kimyasal Tozların Hazırlanması



Denklem (8) yardımıyla hazırlanan Y123 kimyasal tozu 930 °C’de 20 saat ve Denklem (9) yardımıyla hazırlanan Y211 kimyasal tozu 900 °C’de 10 saat kare fırında bekletilerek kalsine edildi.

Tablo 4 ve Tablo 5’te verilen miktarlarda Y_2O_3 , $BaCO_3$ ve CuO tozları dijital hassas terazi (Şekil 23) ile tartıldı. Bu ölçüm işlemindeki hata ± 0.1 miligramdır. Uygun sitokiyometrik oranda tartılan Y_2O_3 , $BaCO_3$ ve CuO oksit tozları, ayrı ayrı Y123 ve Y211 karışımları 30 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda (Şekil 15) karıştırıldı ve daha sonra mekanik öğütücüde 30 dakika boyunca homojen olarak öğütüldü (Şekil 16).



Şekil 23. Hassas terazi.

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

Bileşik	Saflık Derecesi(%)	Molekül Ağırlığı	Bileşik Ağırlığı(gr)
Y ₂ O ₃	99.999	225.81	45.3886
BaCO ₃	99.8	197.371	158.672
CuO	99.8	79.54	95.9392
		Toplam	300.0000

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

Bileşik	Saflık Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı	Bileşik Ağırlığı (gr)
Y ₂ O ₃	99.999	225.81	44.9185
BaCO ₃	99.8	197.371	39.2572
CuO	99.8	79.54	15.8243
		Toplam	100

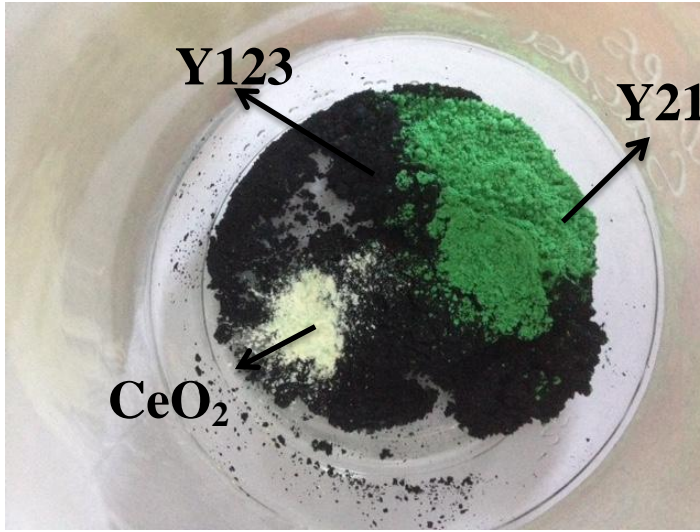
2.1.2.2. ((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO₂) (YBCO) Süperiletken Örneğinin Hazırlanışı

2.1.2.2.1. YBCO Tek Kristal Süperiletken Kimyasal Tozunun Hazırlanışı

Tablo 6’da 30.15 gramlık (% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO₂ (YBCO) süperiletken örneğine ait Y123, Y211 ve CeO₂’ye ait karışım ağırlıkları yer almaktadır. Şekil 24’te görülen Y123, Y211 ve CeO₂ kimyasal tozları 30 dakika boyunca cam şişede karıştırıldı ve mekanik öğütücü yardımıyla 30 dakika boyunca homojen olarak öğütüldü.

Tablo 6. 30,15 gramlık ((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO₂) süperiletken örneğinin bileşik ağırlıkları.

Bileşik	Karışım Ağırlığı (gr)
Y123	22.5
Y211	7.5
CeO ₂	0.15
Toplam	30.15



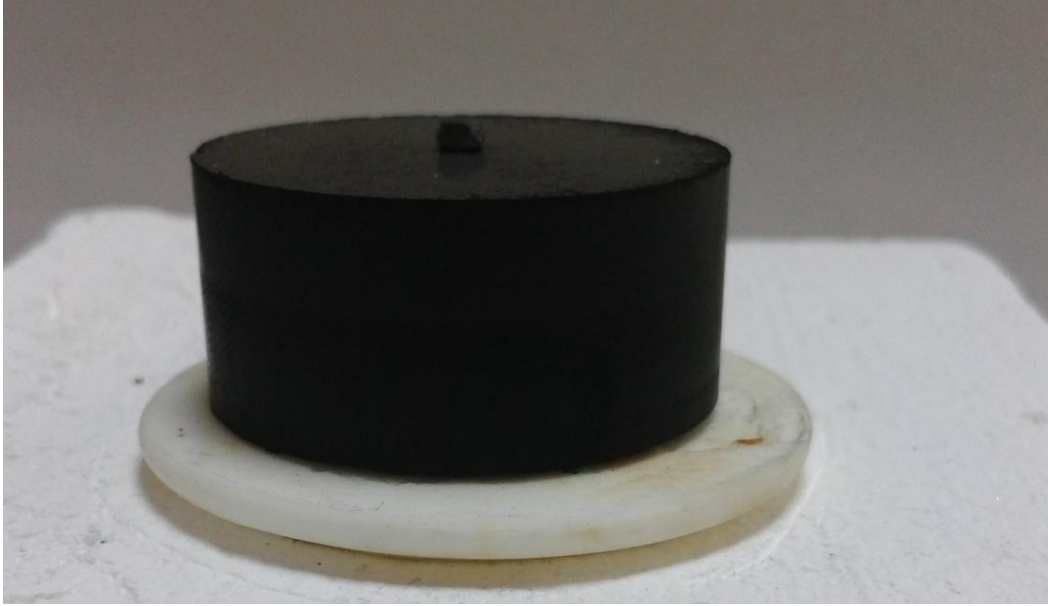
Şekil 24. Y123, Y211 ve CeO₂'nin karışmadan önceki görünümü.

2.1.2.2.2. YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletinin Hazırlanışı ve Sıcaklık Grafiğinin Uygulanması

30.15 gramlık YBCO süperiletken kimyasal tozu 32 mm pelet kabına konuldu (Şekil 25) ve hidrolik pres yardımıyla 1.5 ton basınçla pelet haline getirildi. Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O₇ çekirdeği YBCO peletinin üzerine ve merkezine konuldu (Şekil 26'da Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O₇ çekirdeğinin pelet üzerine koyulmuş hali gösterilmiştir.). Kare fırın içine konulan pelet Şekil 27'de görülmektedir.



Şekil 25. Retsch marka 32 mm çapında presleme aygıtı.



Şekil 26. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ çekirdeğinin YBCO peleti üzerine koyulmuş hali.



Şekil 27. Kare fırın içine konulan peletin görünümü.

2.1.2.2.3. Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

DTA analizinde numunenin ve termal olarak inert olan bir referans maddesinin içine birer diferansiyel termoçift daldırılır ve sıcaklık ölçümü bu sistemle gerçekleştirilir. Örneğin ve referans maddesinin sıcaklıkları eşit durumdayken net voltaj çıkışı sıfır olur. Bu iki maddenin sıcaklıkları farklıyken sistemin voltaj farkı doğrudan sıcaklık farkının ölçüsüdür. Bu sıcaklık farkının zamana veya maddelerden birinin sıcaklığına karşı değişimini gösteren grafik DTA termografiğini oluşturur. Sıcaklığın sebep olduğu fiziksel veya kimyasal değişim, sıcaklığın zamanın bir fonksiyonu olduğu eğride bir maksimum oluşturur. Bu maksimumdan yararlanarak sıcaklık ve dönüşüm hızı hakkında yorum yapılabilir. Bir DTA termografiğın ordinatında sıcaklık farkı, apsiste ise zaman veya sıcaklık yer alır (Toğrul, 1995).

Eğer, fırın, örnek ve referans madde içindeki ısı akışı aynı ise, sıcaklık farkı sıfırdır ve kaydedici cihaz ana hattı çizer. Eğer, örnekte ısı değişimi olursa, örnek içindeki sıcaklık dağılımı inert maddeninkinden farklı olur ve sıcaklık değişimleri ana hattan sapmalar halinde kaydedilir. Bu sapmanın yönü örnek ile inert madde arasındaki sıcaklık farkı dağılımına bağlıdır ve termal adımların yapısını gösterir. Endotermik adımlar negatif, ekzotermik adımlar ise pozitif sıcaklık farkına neden olur (Yorulmaz, 2005).

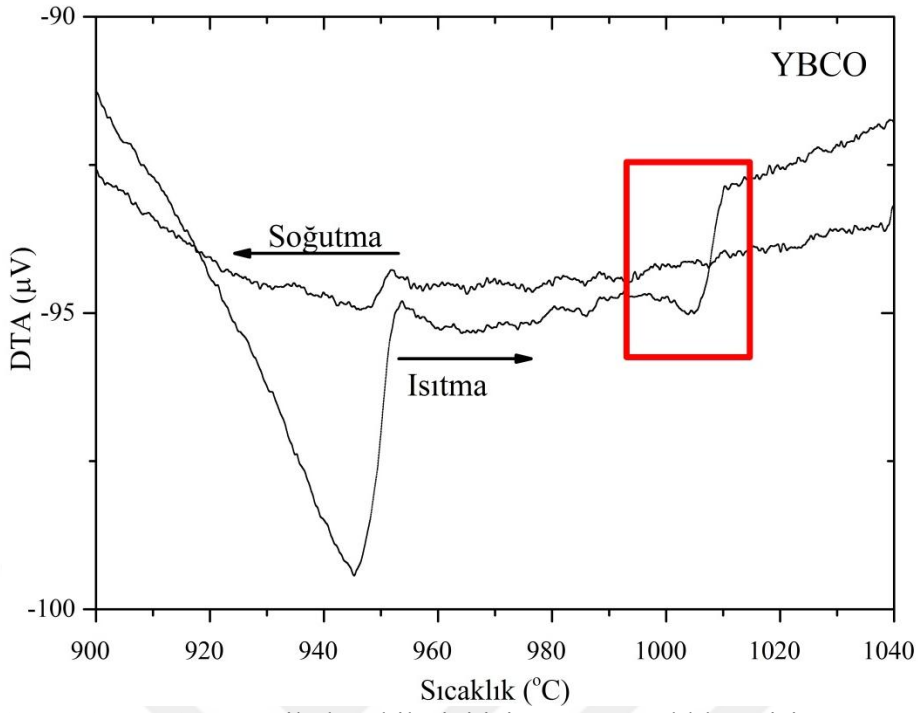
Örneklerin kalsinasyon ve peritektik sıcaklıklarının (kristalin büyümeye başlama sıcaklığı) (T_p) belirlenmesinde Şekil 28'de gösterilen EXSTAR SII TG/DTA 6300 cihazı kullanıldı. Bir Pt-PtRh % 13 termo-çiftle birbirine bağlanan iki küçük potadan birine sıcaklığı ölçülecek örnek diğerine ise erime sıcaklığı yüksek bir referans malzemesi yerleştirildi. Erime sıcaklığının yüksek olmasından dolayı referans malzemesi olarak Al_2O_3 ($2030^\circ C$) tozu kullanıldı. Fırın oda sıcaklığından $5^\circ C/dk$ hızla $1100^\circ C$ sıcaklığa kadar ısıtıldı. Ölçüm süresince tozun sıcaklığı (T) ve örnek ile referans tozu sıcaklıkları farkı ΔT voltaj cinsinden ölçüldü ve bir bilgisayar yardımıyla sıcaklığın fonksiyonu olarak çizildi.



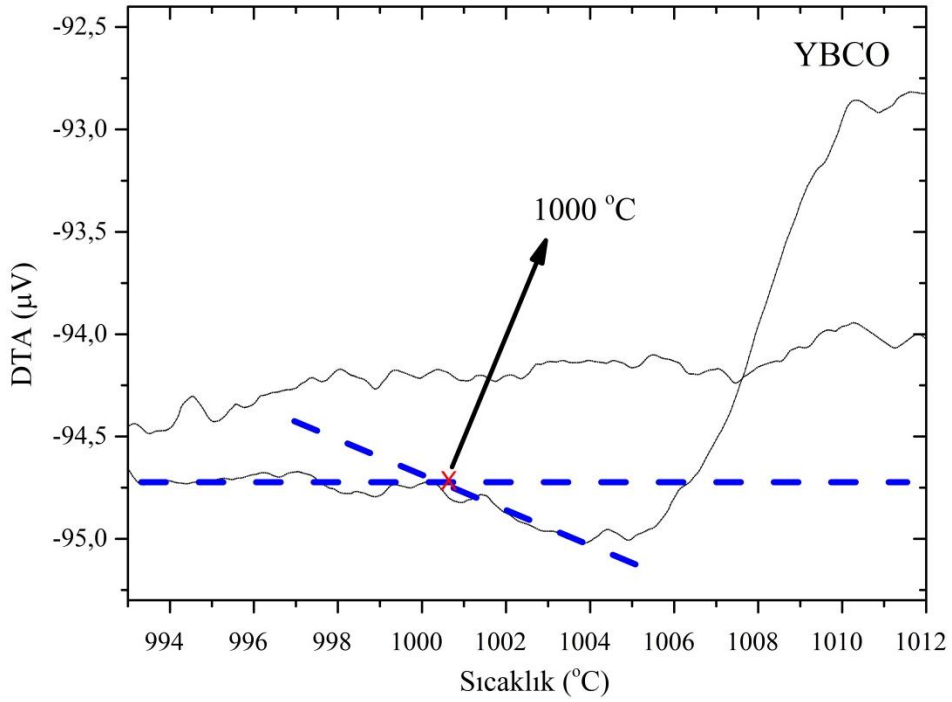
Şekil 28. EXSTAR SII TG/DTA 6300.

2.1.2.2.3.1 YBCO Tek Kristal Süperiletkenin Peritektik Sıcaklığının Belirlenmesi

Literatür incelemesi sonucunda YBCO süperiletkeninin peritektik sıcaklığının (kristalin büyümeye başlama sıcaklığı) (T_p) 1000 ile 1010 °C'de olduğunu belirledik (Cardwell, 1998). Bu sıcaklık aralığının sebebi ise; peritektik sıcaklığın kullanılan fırına göre değişmesidir. Çünkü her fırının kendine özgü ısı gradyanı bulunmaktadır. Peritektik sıcaklığı belirlemede kullanılan en etkili yol DTA analizidir (Muralidhar vd., 1997). YBCO karışımının DTA analizi Şekil 29'da görülmektedir. Şekil 30 yardımıyla YBCO karışımının peritektik sıcaklığını 1000 °C olarak belirlendi.



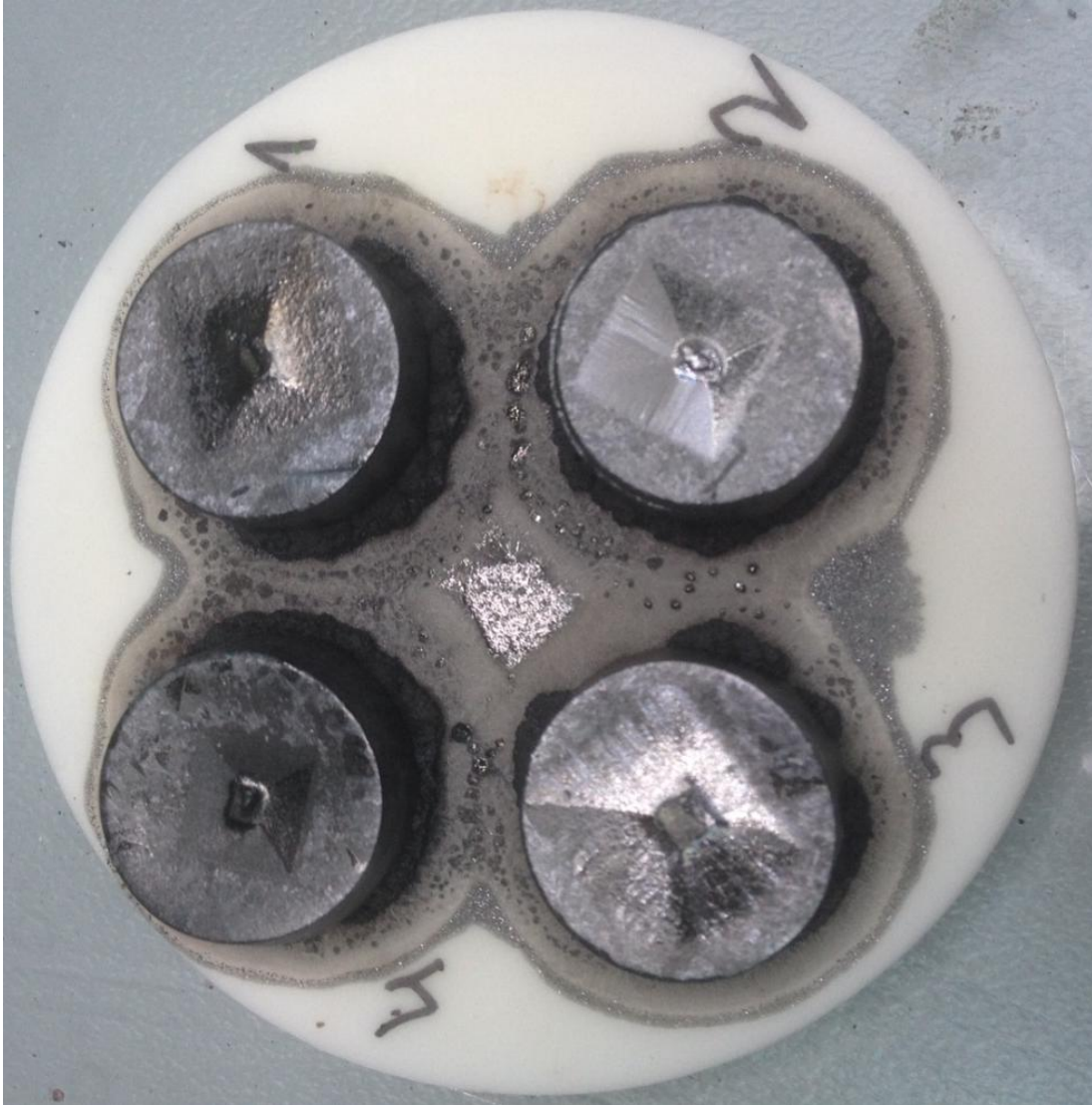
Şekil 29. YBCO süperiletken bileşiği için DTA-Sıcaklık eğrisi.



Şekil 30. DTA analizinden peritektik sıcaklığın belirlenmesi.

2.1.2.2.4. Farklı Sıcaklıklarda Üretilen Y211 (Yeşil Faz) Kimyasal Tozunun Tek Kristal YBCO Süperiletkeninin Büyümesine Etkisi

Y211 kimyasal tozları, aynı sürede farklı sıcaklıklarda (1000, 950, 900 ve 880 °C'de) kalsine edildiler. Kalsine edilen farklı Y211 tozları aynı oranda ((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO) karıştırıldı ve aynı sürede öğütüldü. Öğütülen toz, 1.5 ton pres uygulayarak pelet haline getirildi. Şekil 34'teki ısı diyagramı uygulandı. Fırından çıkan peletler 1000, 950, 900 ve 880 °C sıcaklıklarına göre sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 numaralı örnek olarak adlandırıldılar.

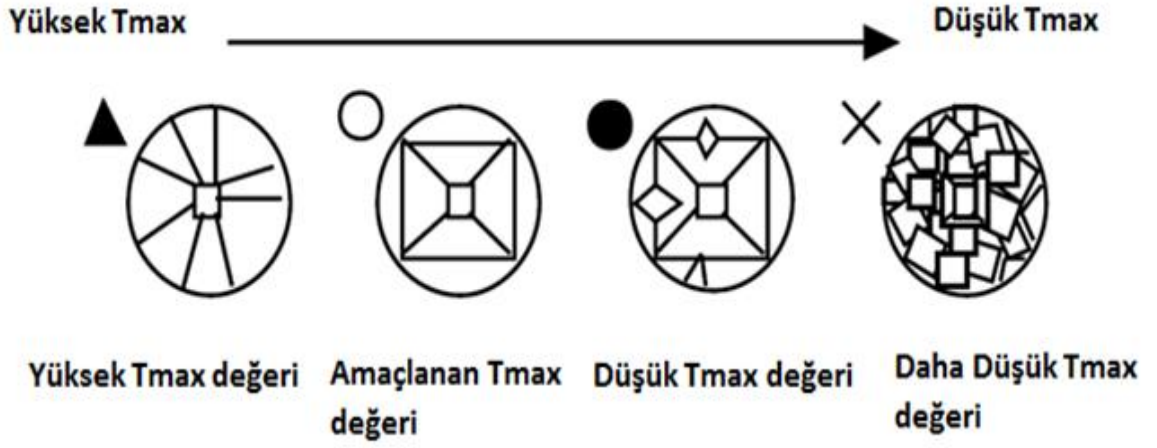


Şekil 31. Farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş Y211 tozunun kristal büyümedeki etkisi.

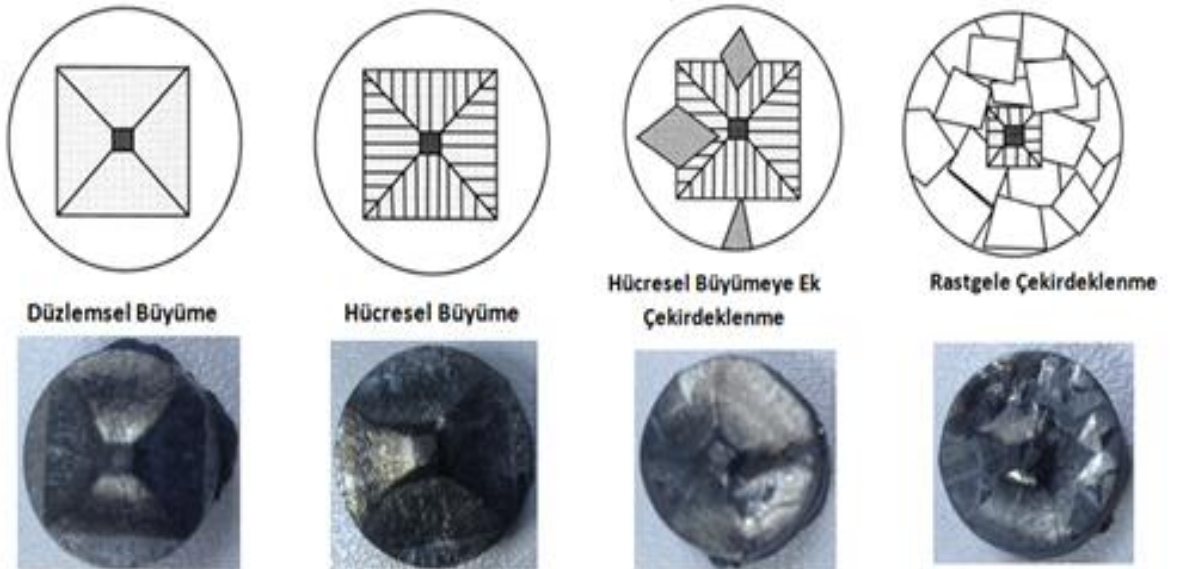
2.1.2.2.5. YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletinin Üst Sıcaklık (T_{max}) Değişimlerinin Büyüme Etkisi

YBCO süperiletkeni için T_{max} değerinin artışı ve azalışı kristalin büyümesini doğrudan doğruya etkilemektedir. T_{max} değeri aşırı yüksek olduğunda örnek (tek kristal) üzerindeki çekirdek erir ve süperiletken malzeme çoklu kristal yapı gösterir (Şekil 32). T_{max} değeri aşırı düşük olması durumunda ise rastgele çekirdeklenme olur. Uygun T_{max} değerinde ise tek kristal hücrel büyüme gösterir. T_{max} değeri uygun değer; birkaç derece altında olursa hücrel büyüme ek çekirdeklenme (Şekil 33) birkaç derece üstünde olursa düzlemsel büyüme gösterir (Jee vd., 1998).

T_{g1} değeri peritektik sıcaklığa yakın olan sıcaklık değeridir. T_{g2} ise T_{g1} değerinin yaklaşık 35 °C altında olan sıcaklık değeridir. Tek kristali büyütmek için gerekli olan soğutma hızı ise 0-0.1 °C/sa aralığında değişmektedir. Bizim fırınımız (Şekil 17) için uygun çaplarda büyümenin gerçekleşmesini sağlayan soğutma hızı 0.3 °C/sa'tir. Soğutma hızı ise kristalin içindeki Y123 ve Y211 parçacıklarının birleşmesini ve büyümesini sağlamaktadır. Uygun ölçülerdeki CeO₂ katkısı ise Y123 ve Y211 eriyik fazların akmasını engellemekte ve kristalin büyümesine olumlu anlamda destek olmaktadır.



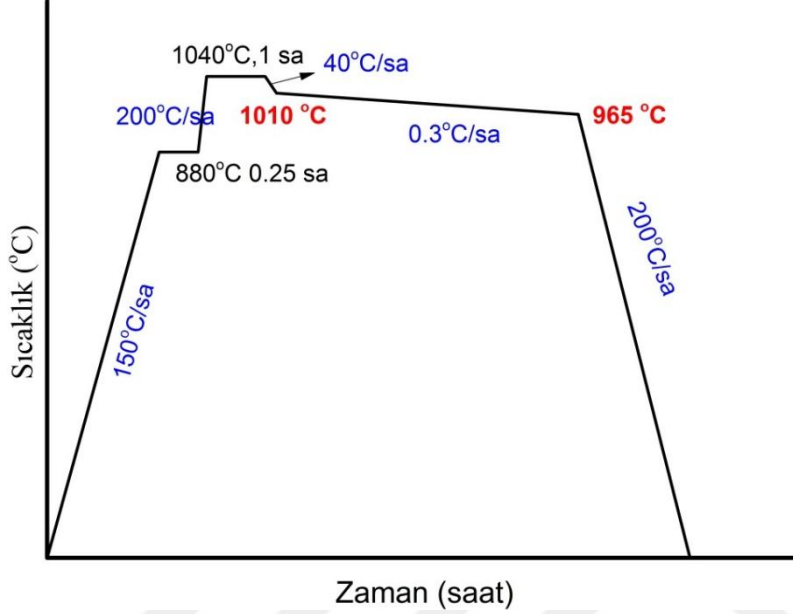
Şekil 32. YBCO süperiletken peletinin T_{max} değişimlerinin büyüme etkisinin şematik gösterimleri ve fotoğrafları.



Şekil 33. YBCO süperiletken peletinin büyüme değişimlerinin şematik gösterimleri ve fotoğrafları.

2.1.2.2.6. YBCO Tek Kristal Süperiletkenin Sıcaklık Grafiğinin Belirlenmesi

Farklı T_{max} , T_{g1} , T_{g2} ve soğutma değerleri denendi ve YBCO süperiletken peletini büyütmek için uygun olan T_{max} , T_{g1} , T_{g2} değerleri sırasıyla 1040, 1010 ve 965 °C olarak bulundu. Şekil 34'te ise kristalin büyümesi için gerekli olan sıcaklık grafiği verilmiştir.



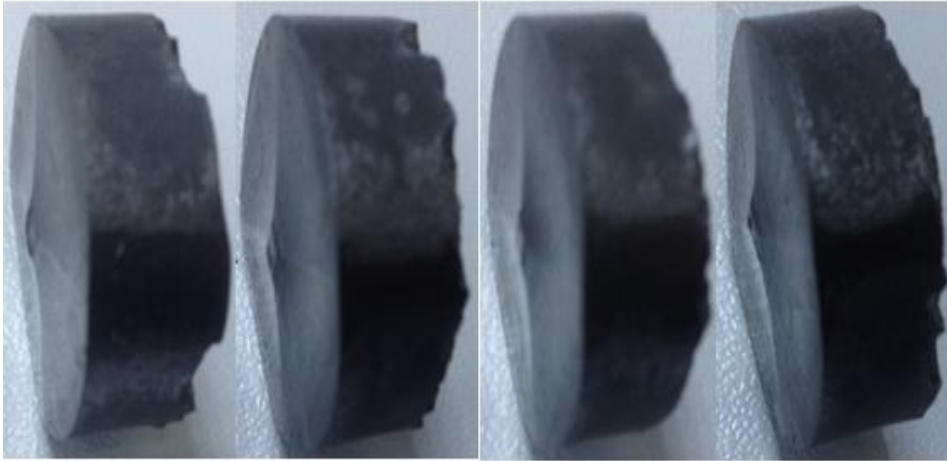
Şekil 34. YBCO süperiletkenine ait sıcaklık grafiği.

2.1.2.2.7. YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletinin Hazırlanışı

32 mm çapında YBCO tek kristali kare fırının içine konularak uygulanan Şekil 34'te görüsterilen ısıl işlem süreci uygulandı. 20, 32 ve 40 mm çaplarındaki YBCO tek kristal süperiletken örneklerin ısıl işlem sonrası fotoğrafları Şekil 35'te görülmektedir. Şekil 36'da ise 32 mm'lik YBCO tek kristale ait olan kristal yön çizgilerinin görünümü verilmiştir. 13, 20, 32 ve 40 mm çaplarındaki YBCO tek kristallerin üstten karşılaştırmalı görünümü Şekil 37'de verilmiştir. Ayrıca 20, 32 ve 40 mm çaplarındaki tek kristal YBCO süperiletkenler ise sırasıyla Y20, Y32 ve Y40 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 35. a) 20 mm b) 32 mm ve c) 40 mm'lik YBCO tek kristal süperiletkenlerinin ısıtım işlem sonrası görüntüsü.



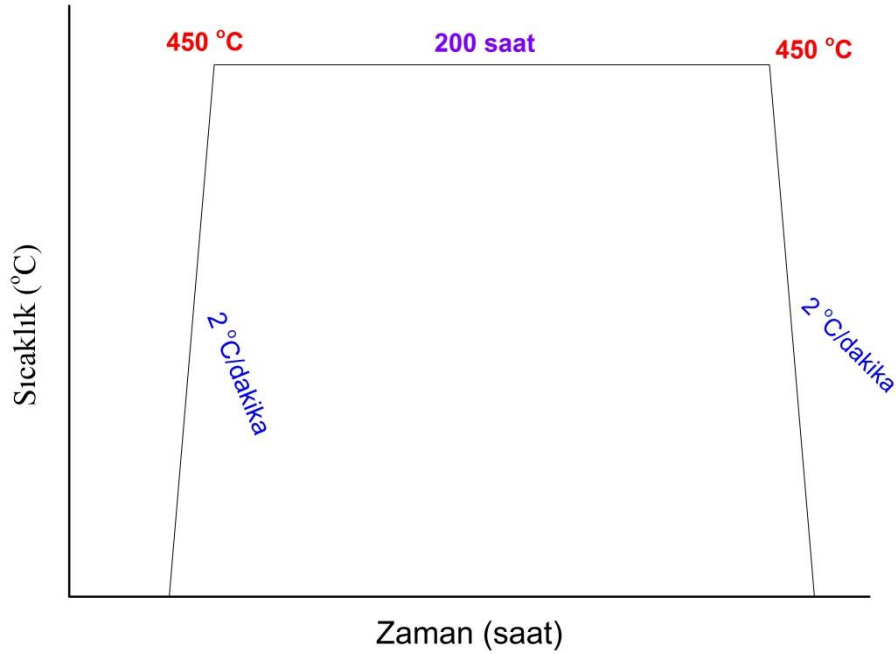
Şekil 36. 32 mm'lik YBCO tek kristal süperiletkeninin ısıtım işlem sonrası yön çizgilerinin görüntüsü.



Şekil 37. 13, 20, 32 ve 40 mm'lik çaplarındaki YBCO tek kristallerin üstten karşılaştırılması.

2.1.2.2.8. YBCO Tek Kristal Süperiletken Peletlerinin Oksijen İşlemi

Şekil 38'de YBCO süperiletken peletlerine oksijen verme işlemi için uygulanan süreç gösterilmiştir. 450 °C'de 200 saat boyunca sürekli oksijen akışı sağlanarak gerçekleştirildi. Oksijen verildikten sonra örneklerin sıvı azot sıcaklığında Meissner etkisi incelendi ve tek kristal süperiletken örneklerin yüksek manyetik kaldırma kuvvetine sahip olduğu görüldü.



Şekil 38. YBCO süperiletken peletine ait oksijen verme işlemi.

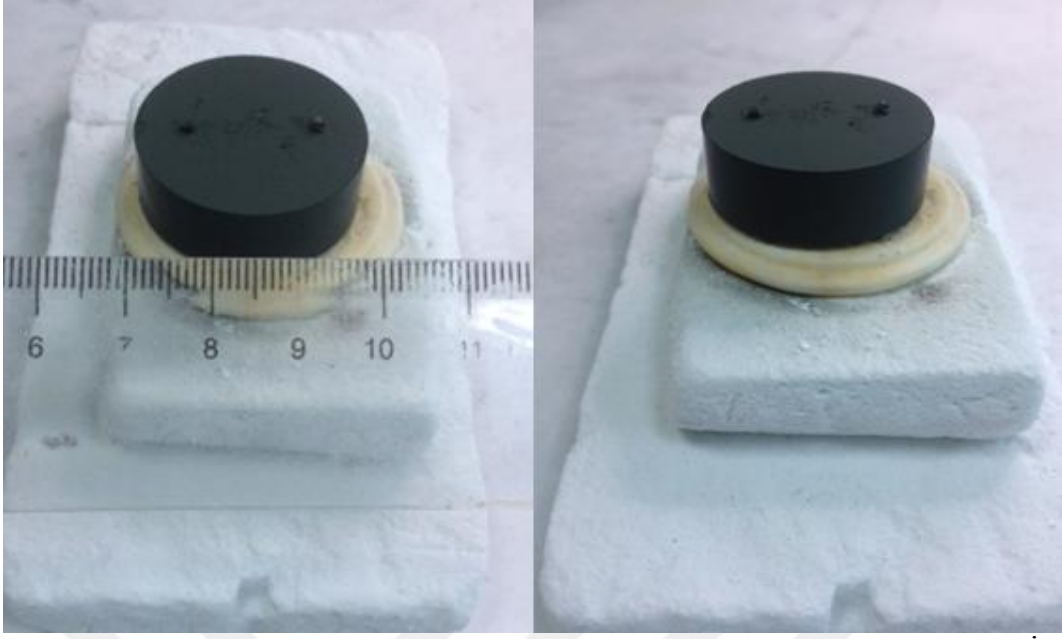
2.1.2.3. Çoklu Çekirdekli ((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO₂) (YBCO) Süperiletken Örneklerin Hazırlanışı

Çoklu kristal yapıda süperiletken malzemeleri üretmek için, YBCO tek kristalinde kullandığımız Y123 ve Y211 kimyasal tozlarını kullandık. Uygulanan karışım miktarını, YBCO tek kristali üretmede kullandığımız karışım gibi((% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO₂ oranda) seçtik. Karışım tozunu cam şişede 30 dakika boyunca homojen olarak karıştırdık ve mekanik karıştırıcıda 30 dakika boyunca öğüttük.

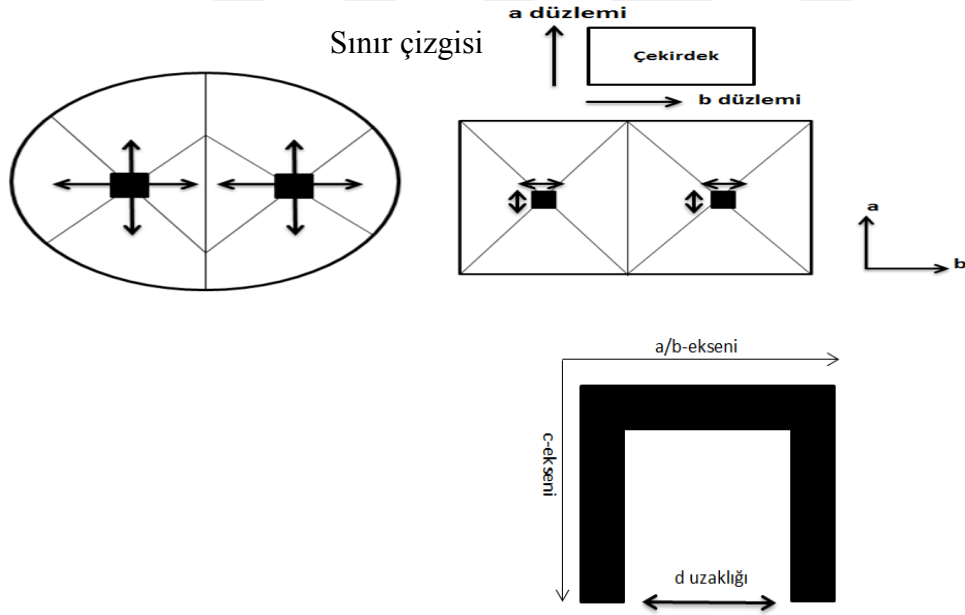
2.1.2.3.1. Çoklu Çekirdeklerin (100) // (100) Yapıda Olduğu YBCO Süperiletken Peletlerinin Hazırlanışı ve Sıcaklık Grafiğinin Uygulanması

30.15 gramlık YBCO süperiletken kimyasal tozu 32 mm pelet kabına konuldu ve 1.5 ton basınçla pelet haline getirildi. Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O₇ çekirdekleri YBCO peletinin üzerine ve merkezine konuldu (Şekil 39). Sol tarafa konulan çekirdeğin *a* düzlemiyle sağ taraftaki çekirdeğin *a* düzlemi ve soldaki çekirdeğin *b* düzlemiyle sağdaki çekirdeğin *b* düzlemi paralel olarak Şekil 40'daki gibi konulmuştur. Bu şekilde çalışmalarımıza devam ederek iki çekirdek arasındaki mesafeyi (*d*) değiştirdik. Bu mesafeler *d* = 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12 ve 16 mm şeklindedir. Farklı mesafelerde çoklu kristalleri ise uzaklığına göre sırasıyla *d* = 0, 1, 4, 12 ve 16 mm için MS00, MS01, MS04, MS12 ve MS16 adlandırılmıştır. Burada örneklerin adlandırılmasının MS ile başlamasının sebebi Multi-Seed (Çoklu Çekirdek (Kristal)) anlamından kaynaklanmaktadır.

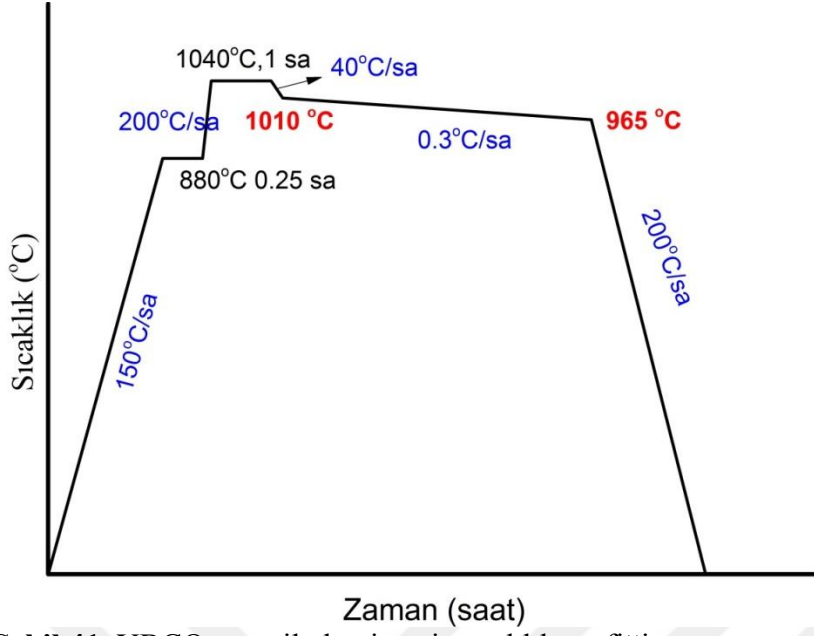
Farklı T_{max}, T_{g1}, T_{g2} ve soğutma hız değerleri denendi ve YBCO süperiletken peletini büyütmek için uygun olan sıcaklık değerleri bulundu. 32 mm çapında çoklu kristal yapıdaki YBCO süperiletkeni fırının içine konuldu. Isıl işlem uygulandı (Şekil 34). Şekil 42, çoklu çekirdekli yapıdaki (*d* = 12 mm) örneğinin ısıl işlem sonrası görünümüdür. Şekil 43'te ısıl işlem sonrası *d* = 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12 ve 16 mm uzaklığındaki çoklu kristal yapıdaki YBCO süperiletkenlerin üstten görünümü verilmiştir.



Şekil 39. $\text{Nd}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_7$ çekirdeklerinin YBCO peleti üzerine konulmuş hali. İki çekirdek arasındaki mesafe (d) 12 mm'dir.



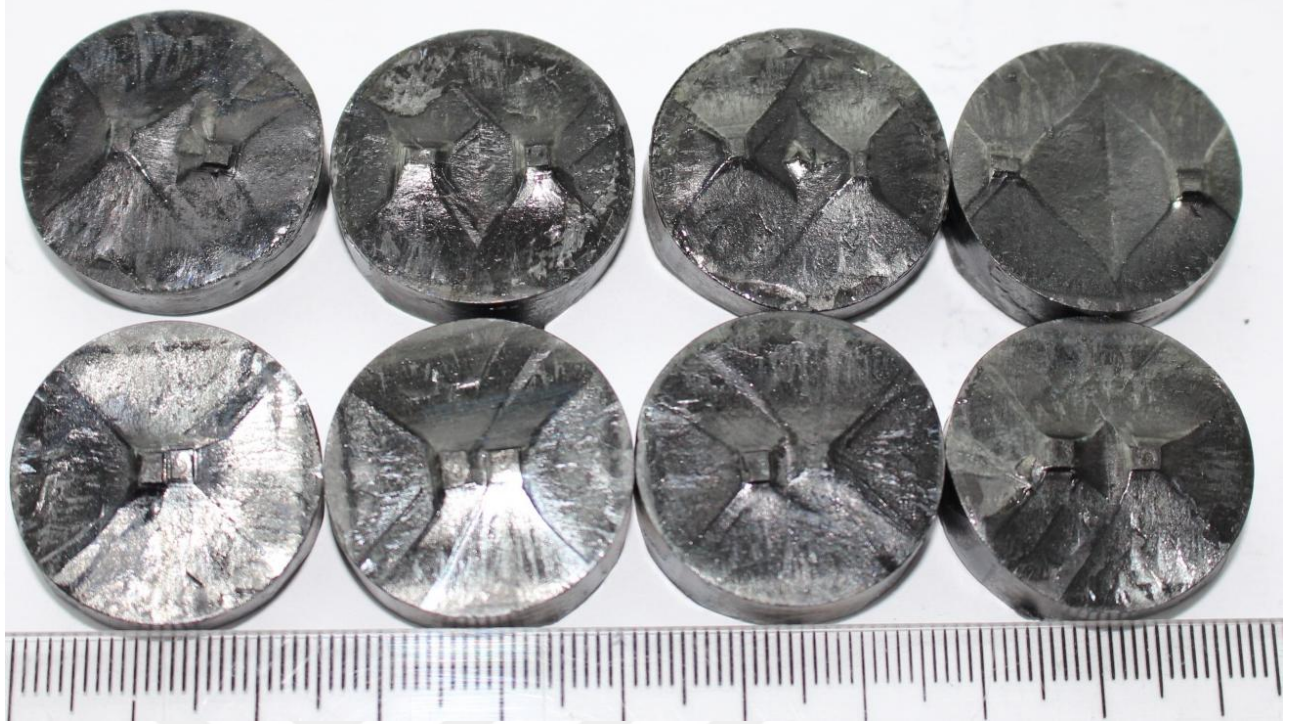
Şekil 40. Çoklu çekirdekli YBCO süperiletken örneğinin şematik gösterimi.



Şekil 41. YBCO süperiletkenine ait sıcaklık grafiği.



Şekil 42. Çoklu çekirdekli yapıdaki ($d = 14$ mm) örneğin ısıl işlem sonrası görünümü.



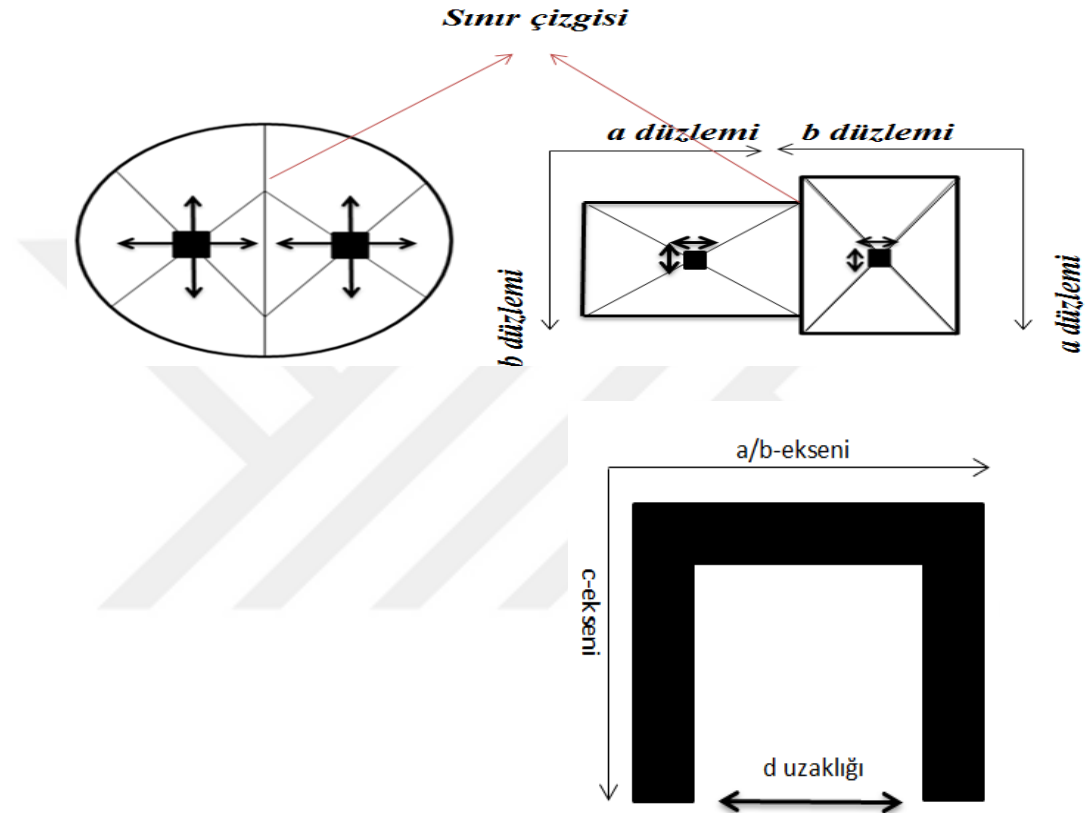
Şekil 43. $d = 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12$ ve 16 mm için YBCO çoklu kristal örneklerinin üstten görünümü.

2.1.2.3.2. Çoklu Çekirdeklerin (100) // (010) Yapıda Olduğu YBCO Süperiletken Peletlerinin Hazırlanışı ve Sıcaklık Grafiğinin Uygulanması

30.15 gramlık YBCO süperiletken kimyasal tozu 32 mm pelet kabına konuldu ve 1.5 ton basınçla pelet haline getirildi. $Nd_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_7$ çekirdekleri YBCO peletinin üzerine ve merkezine konuldu (Şekil 39). Peletin sol tarafına konulan çekirdeğin a düzlemiyle sağ taraftaki çekirdeğin b düzlemi ve soldaki çekirdeğin b düzlemiyle sağdaki çekirdeğin a düzlemi paralel olarak Şekil 40'daki gibi konulmuştur. Bu şekilde çalışmalarımıza devam ederek iki çekirdek arasındaki mesafeyi (d) değiştirdik. Bu mesafeler $d = 0, 4$ ve 12 mm şeklindedir. Farklı mesafelerde çoklu kristalleri ise uzaklığına göre sırasıyla $d = 0, 4$ ve 12 mm için DS00, DS01, DS04 ve DS12 adlandırılmıştır. Burada örneklerin adlandırılmasının DS ile başlamasının sebebi Different Seed (Farklı Çekirdek (Kristal)) anlamından kaynaklanmaktadır.

Farklı T_{max} , T_{g1} , T_{g2} ve soğutma hızları değerleri denenmiş ve YBCO süperiletken peletini büyütmek için uygun olan sıcaklık değerleri YBCO tek kristali büyüme sürecinde bulunmuştu. 32 mm çapında çoklu kristal yapıdaki YBCO süperiletkeni kare fırının (Şekil 17) içine konuldu ve uygulanan ısı işlem Şekil 34'te görülmektedir. Şekil

45, çoklu çekirdekli yapıdaki DS12 ($d = 12$ mm) örneğinin ısıtım sonrası görünümüdür. Şekil 46'da ısıtım sonrası $d = 0, 1, 4$ ve 12 mm uzaklığındaki çoklu kristal yapıdaki YBCO süperiletkenlerin üstten görünümü verilmiştir. Ayrıca MS-12 ve DS-12 örneklerinin karşılaştırmalı olarak üstten şematik görüntüsü ve fotoğrafları verilmiştir.



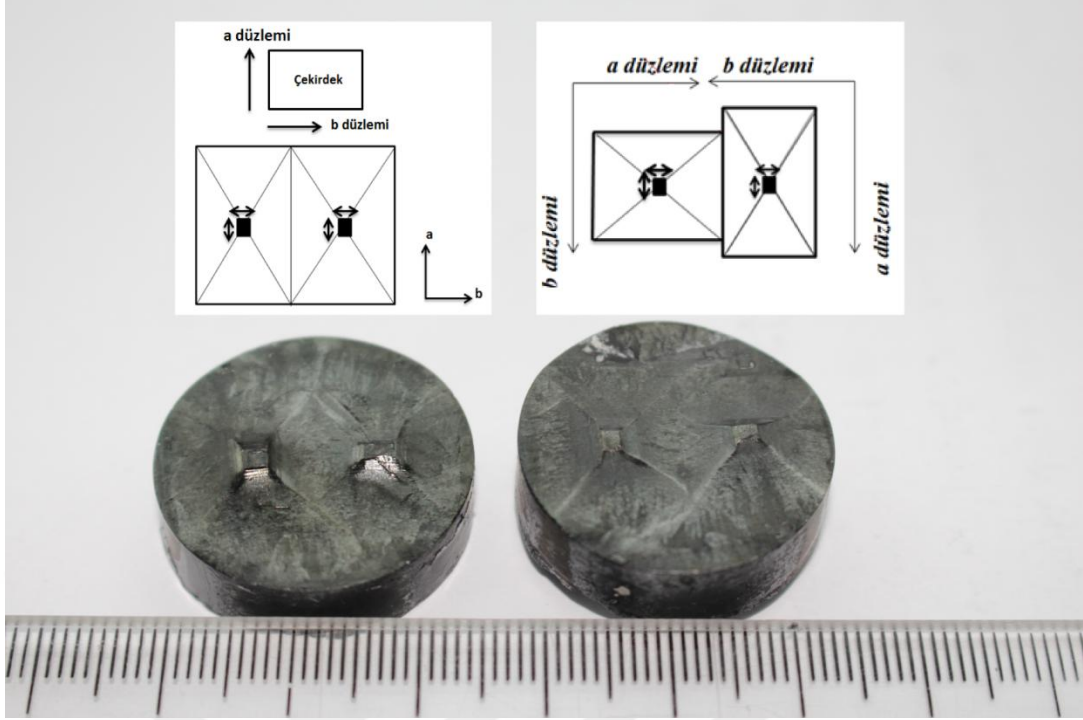
Şekil 44. Çoklu çekirdekli YBCO süperiletken örneğinin şematik gösterimi.



Şekil 45. Çoklu çekirdekli yapıdaki ($d=12$ mm) örneğinin ısıtım sonrası üst yüzünün fotoğrafı.



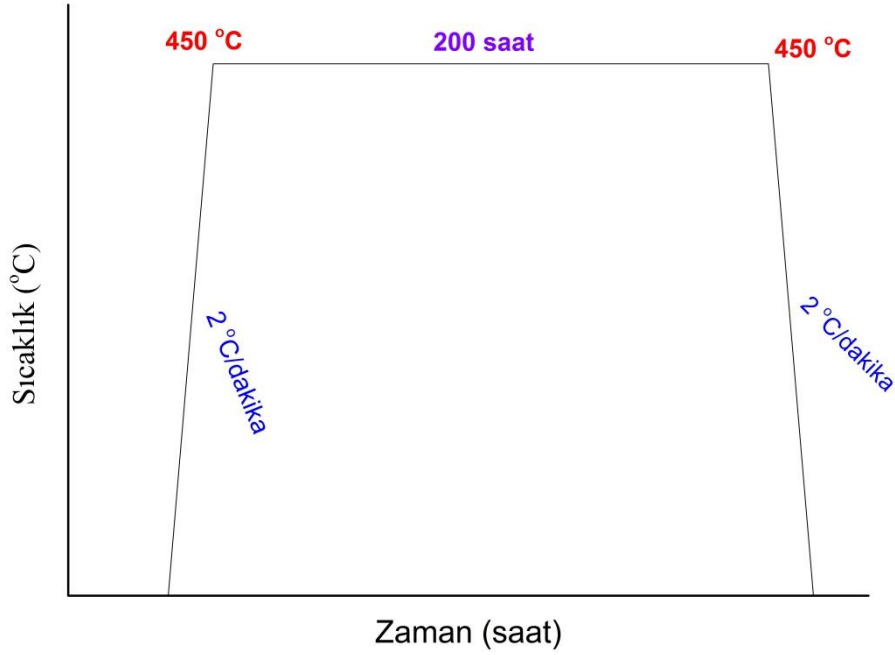
Şekil 46. Isıtım sonrası $d=0, 1, 4$ ve 12 mm uzaklığındaki çoklu kristal yapıdaki YBCO süperiletkenlerin üst yüzeylerinin fotoğrafları.



Şekil 47. $(100)//(100)$ ve $(010)//(010)$ örneklerinin karşılaştırmalı olarak kristallerin büyümesinin şematik görüntüsü ve üst yüzeylerinin fotoğrafları.

2.1.2.3.3. YBCO Çoklu Kristal Süperiletken Peletlerinin Oksijen İşlemi

Şekil 48’da YBCO çoklu süperiletken peletlerine oksijen verme grafiği verilmiştir.



Şekil 48. YBCO süperiletken peletine ait oksijen verme işlemi.

2.2. XRD Ölçümleri

X-ışını toz kırınım desenlerinden elde edilen veriler kristal fazların belirlenmesinde oldukça kullanışlıdır. X-ışını kırınım desenleri ölçümleri ile malzemenin kristal yapısı, örgü tipi, örgü parametreleri gibi yapısal bilgilerine ulaşılır. Toz kırınım metodu; üç boyutlu hkl bilgisini tek boyutlu $d(h,k,l)$ bilgisine indirger (Tan vd., 1990).

Üretilen numunelerin x-ışını kırınım analizleri, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan, Şekil 49'da gösterilen Rigaku SmartLab marka difraktometre ile $\text{CuK}\alpha$ ışını kullanılarak, 0.02° adımlarla $2\theta = 20 - 60^\circ$, 40 kV / 30 mA çalışma şartlarında yapıldı.



Şekil 49. Rigaku SmartLab marka difraktometre

2.3. Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sistemi

Tek kristal ve çoklu kristal yapıdaki YBCO süperiletken malzemelerin manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fizik Bölümü, Katıhal Fiziği Süperiletkenlik Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sisteminde ise; Vakum odası, Edwards marka nEXT400D model turbo moleküler pompa, Varian marka DS302 model rotary pompa, Lakeshore marka 336 model sıcaklık kontrolcüsü, Micos marka 3 boyutta hareket edebilen hareket sistemi, kryostat kafası, 3 adet yük sensörü ve helyum kompressörü ve kapalı devre su soğutma sistemi yer almaktadır. Sistemde örnekler, sabit örnek tutucu ve 3 boyutta (x-y-z koordinatlarında) hareket edebilen numune çapıyla orantılı olan silindirik mıknatıs ile 20-300 K arasında ölçülmektedir. (Şekil 50). Bununla birlikte kuvvet-sıcaklık ve kuvvet-zaman ölçümleri de yapılmaktadır.



Şekil 50. Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi.

2.4. Manyetizasyon Ölçümleri

Süperiletken örneklerin manyetizasyon ölçümleri, $T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K sıcaklıklarında $H_{maks} = 9$ T manyetik alan aralığında İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Merkezinde bulunan Quantum Design PPMS sistemindeki titreşim örnekleme manyetometre VSM (vibrating sample magnetometer) modülü kullanılarak yapıldı (Şekil 51). Algılama bobini titreşim frekansı 40 Hz ve titreşim genliği ise 2 mm'dir. Ölçümlerde $0 \rightarrow +H_{maks} \rightarrow -H_{maks} \rightarrow +H_{maks}$ döngüsü uygulandı. Manyetik alan yokken soğutulmuş (ZFC: zero field cooling) örneklere, manyetik alan zamana göre sabit hızda değiştirilirken 100 Gauss aralıklarda gradiometre yardımıyla manyetizasyon ölçümleri yapıldı. Manyetizasyon ölçümlerinden örneklerin ilgili sıcaklıklarda manyetik alana göre kritik akım yoğunlukları hesaplandı.



Şekil 51. Quantum Design PPMS sistemindeki titreşim örnekleme manyetometre VSM (vibrating sample magnetometer) modülü.

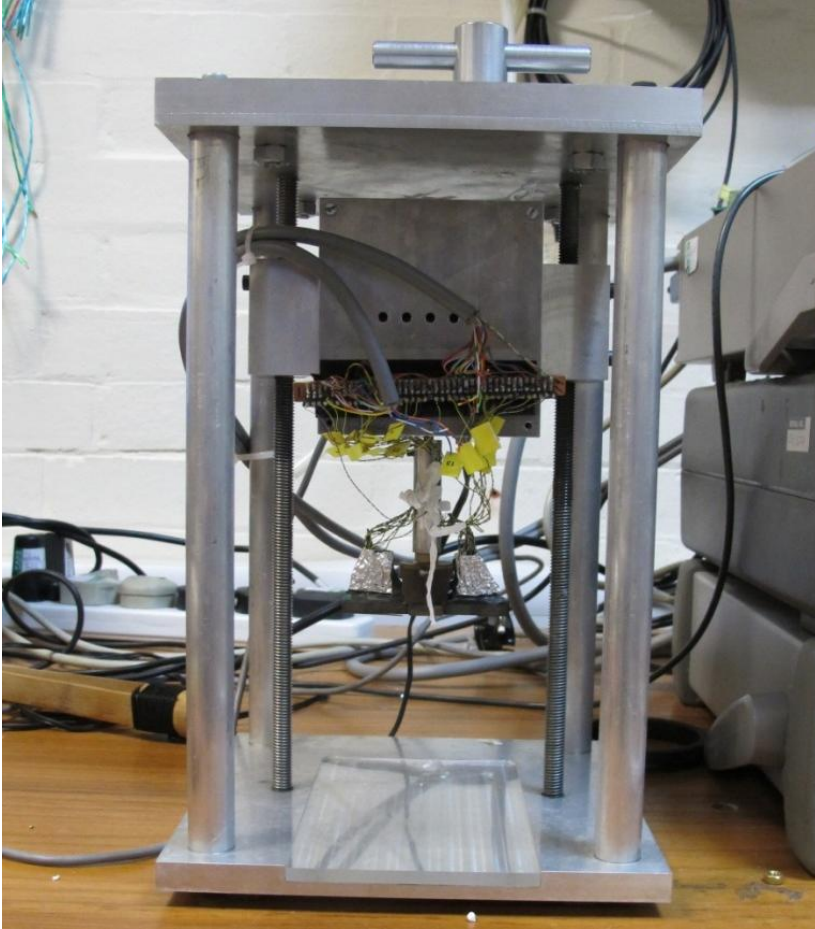
2.5. Tuzaklanan Manyetik Alan Ölçümleri

RE-Ba-Cu-O formundaki büyük tanecikli yüksek sıcaklık süperiletkenleri (burada RE nadir toprak elementidir) düşük sıcaklıklarda yüksek tesla değerlerinde manyetik alanlarını yakalayabilir ve bu nedenle daimi mıknatıs uygulamaları için kullanılabilirler. Tuzaklanan alanın büyüklüğü kritik akım yoğunluğu ve süperiletkenin hacmi ile orantılıdır. Bu tür malzemeler için çeşitli potansiyel mühendislik uygulamaları ortaya

çıkmiş ve bazıları son zamanlarda ticarileştirilmiştir. İngiltere Cambridge Üniversitesi Süperiletkenlik Araştırma Grubu Laboratuvarlarında bulunan tuzaklanan alan ölçüm sistemi Şekil 52 ve ayrıntılı olarak Şekil 53'te gösterilmiştir.



Şekil 52. Tuzaklanan alan ölçüm sistemi (Cambridge Üniversitesi).



Şekil 53. Tuzaklanan alan ölçüm sisteminin ana aparatı.

2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) Ölçümleri

Taramalı elektron mikroskobu ile görüntü elde edilmesi, yüksek gerilim altında hızlandırılmış elektronların malzeme yüzeyine çarptırılıp, yansıyan ışınların dedektör tarafından algılanması prensibine dayanır. Yansıyan elektronlar ve buna bağlı olarak ortaya çıkan x-ışınları kullanılarak yüzeyin topografisi elde edilir. Böylece, örneklerin yüzey yapıları, içerdikleri fazlar ve taneciklerin yapı içerisindeki düzeni hakkında bilgi edinilebilir.

SEM ve EDS analiz görüntüleri, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan ve Şekil 54'te gösterilen JEOL JSM 6610 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak 20 kV çalışma voltajında, 500, 1500, 3000, 5000, 10000 ve 15000 kat büyütme ile alındı.

2.7. Enerji Dağılım Spektrometresi (Energy Dispersive Spectrometry) (EDS) ile İnceleme Ölçümleri

Elektron mikroskobundan gönderilen elektron demetinin numune yüzeyindeki atomlar ile etkileşmesi sonucunda farklı dalga boyunda x-ışınları oluşur. X-ışınları her element üzerinden farklı dalga boyunda ve açıda saçılırlar. Bu x-ışınları dedektöre ulaşır ve bir bilgisayar yazılımı tarafından işlenerek analizler yapılır (Kartal, 2009). Üretilen numunenin SEM fotoğrafları üzerinde farklı noktalardan, çizgisel, dikdörtgensel ve fotoğrafın tamamının analizleri % olarak atomik dağılımları belirlendi. EDS analizlerinde, JEOL JSM 6610 marka taramalı elektron mikroskobuna ilave edilmiş bir dedektör kullanıldı (Şekil 54).

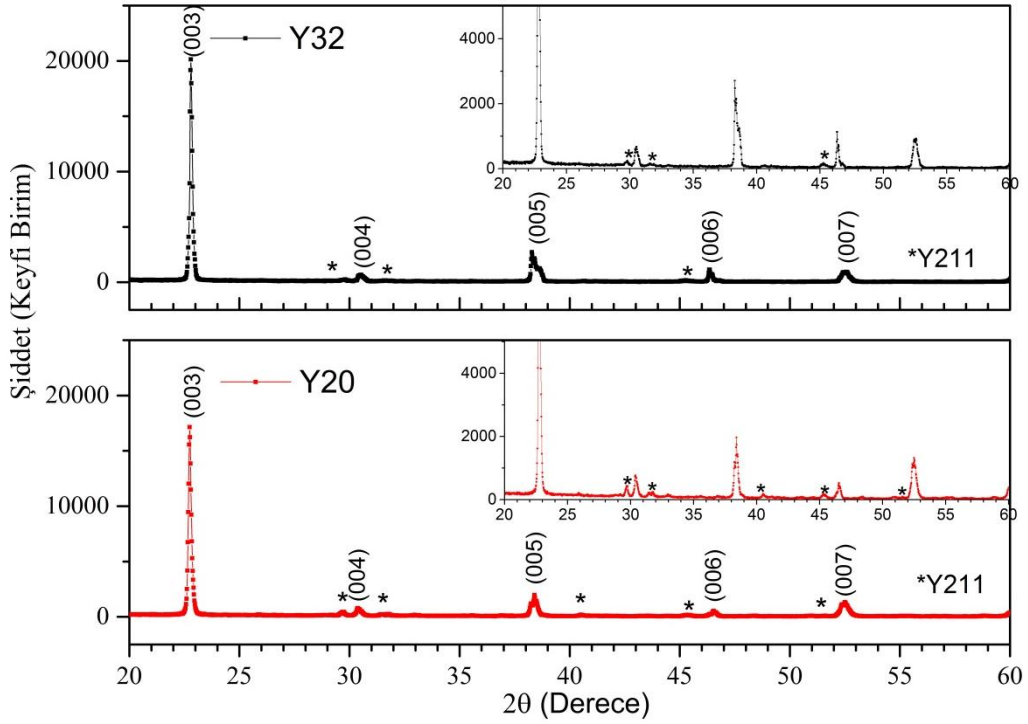


Şekil 54. JEOL JSM 6610 marka taramalı elektron mikroskobu

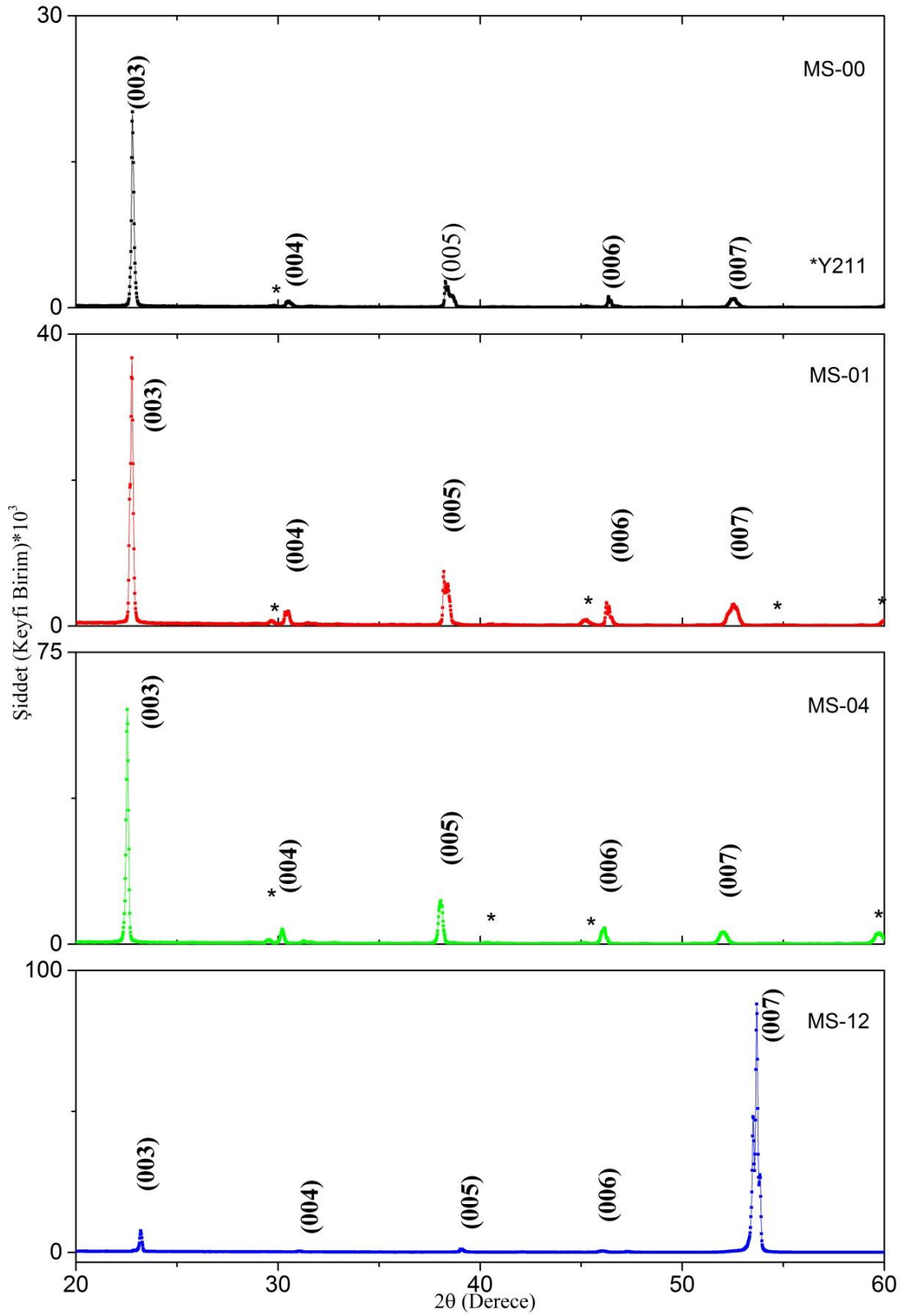
3. BULGULAR

3.1. XRD Ölçümleri

Şekil 55'te Y20 ve Y32 örneklerinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışınları kırınım deseni görülmektedir. MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışını spektrumları ise Şekil 56'da görülmektedir.



Şekil 55. Y32 ve Y20 örneklerinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışını spektrumları.



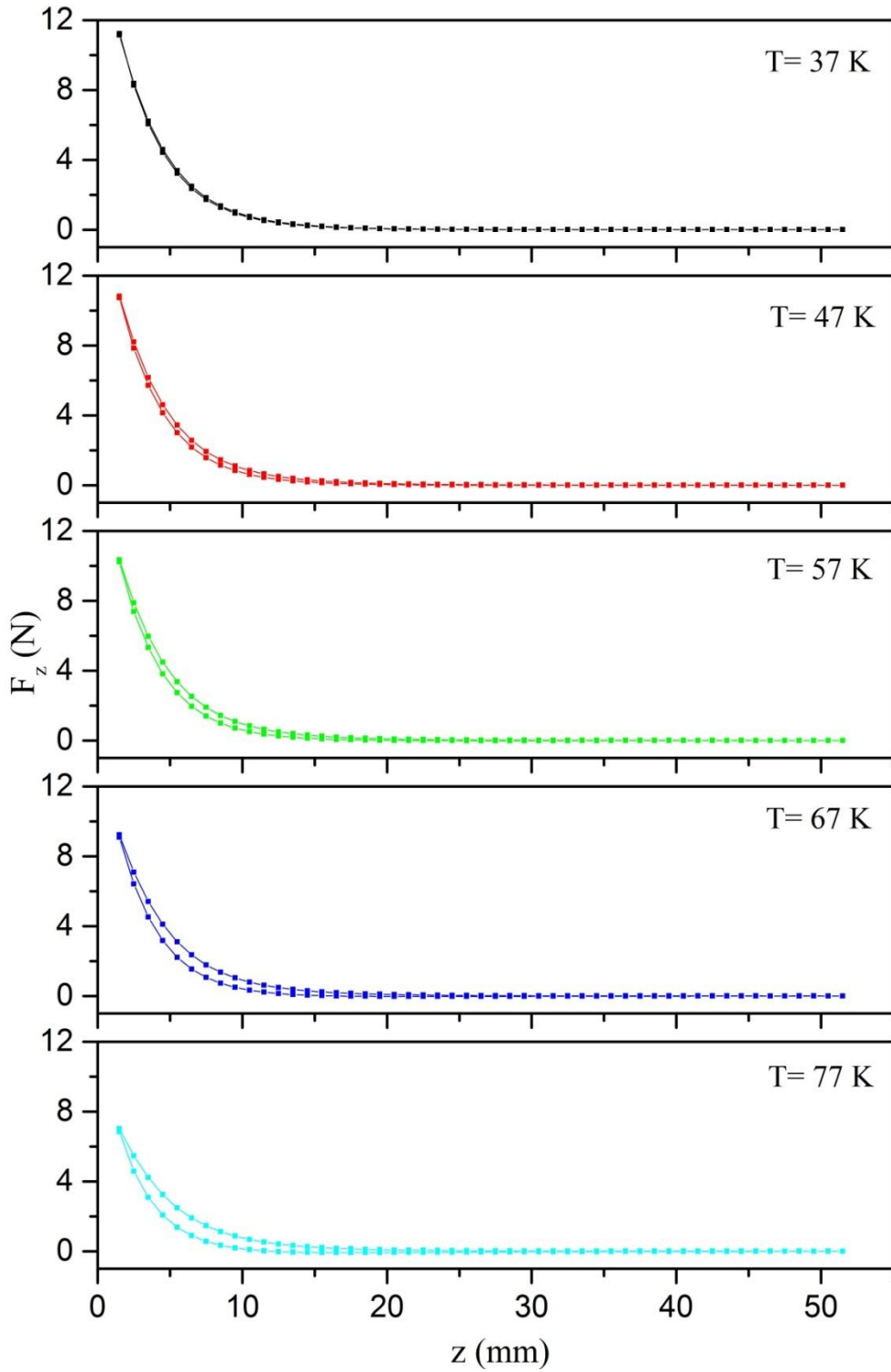
Şekil 56. MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin $2\theta = 20-60^\circ$ arası x-ışını spektrumları.

3.2. Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçümleri

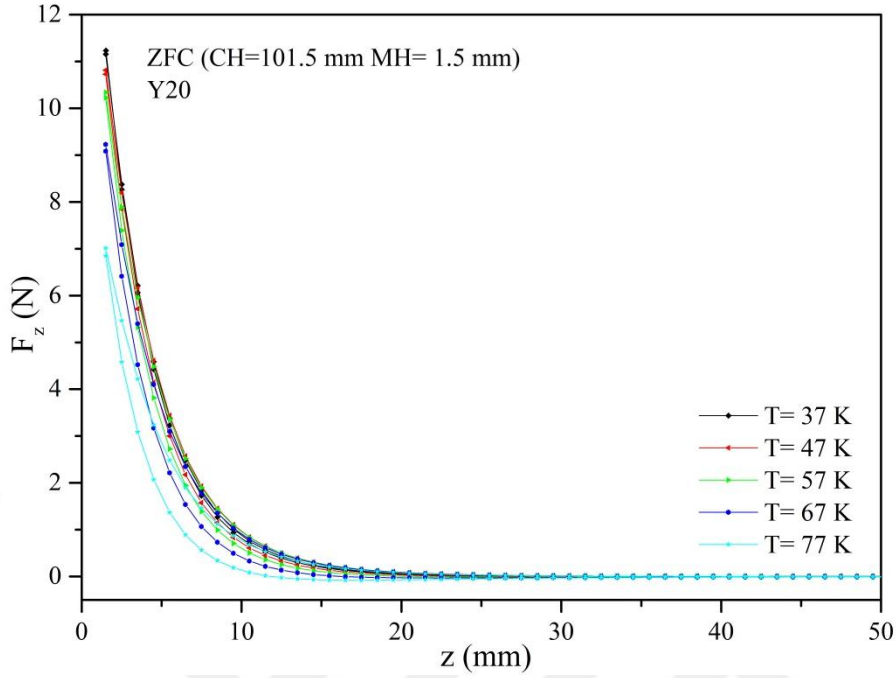
3.2.1. Y20 Tek Kristal Süperiletken Örneğine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları

3.2.1.1. Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) - Dikey Uzaklık (z) Ölçümleri

F_z - z ölçümleri, silindirik Nd-Fe-B mıknatıs (ϕ : 19.7 mm h: 9.8 mm Manyetik Alan: 0.5 T) üst yüzey merkeziyle süperiletken alt yüzey merkezi arası mesafe $z = 50$ mm'de süperiletken örnek soğutuldu. Bu durum ZFC rejim (alansız soğutma) olarak adlandırılır. Bu mesafede mıknatısın süperiletken örnek üzerindeki etkisinin hemen hemen olmadığı düşünüldü. ZFC rejimi altında yapılan ölçümlerde Meissner etkisinden dolayı, manyetik itici kuvvet manyetik çekici kuvvete göre daha yüksek ölçülmektedir. F_z - z ölçümleri ZFC rejimi sonrasında yapıldı. ZFC rejimi altında F_z - z ölçümünde: 1) Süperiletken örnek $z = -50$ mm (z : mıknatıs ile süperiletken örnek arasındaki mesafe) soğutuldu, 2) istenilen soğutma sıcaklıklarında mıknatıs $z = 0 \rightarrow -50$ mm $\rightarrow 0$ mm döngüsü olacak şekilde harekete başladı. Y20 örneği için $T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K sıcaklıklarında manyetik kaldırma kuvvetinin dikey harekete göre değişim grafikleri ayrıntılı olarak Şekil 57'de ve karşılaştırmalı olarak Şekil 58'de gösterilmektedir.

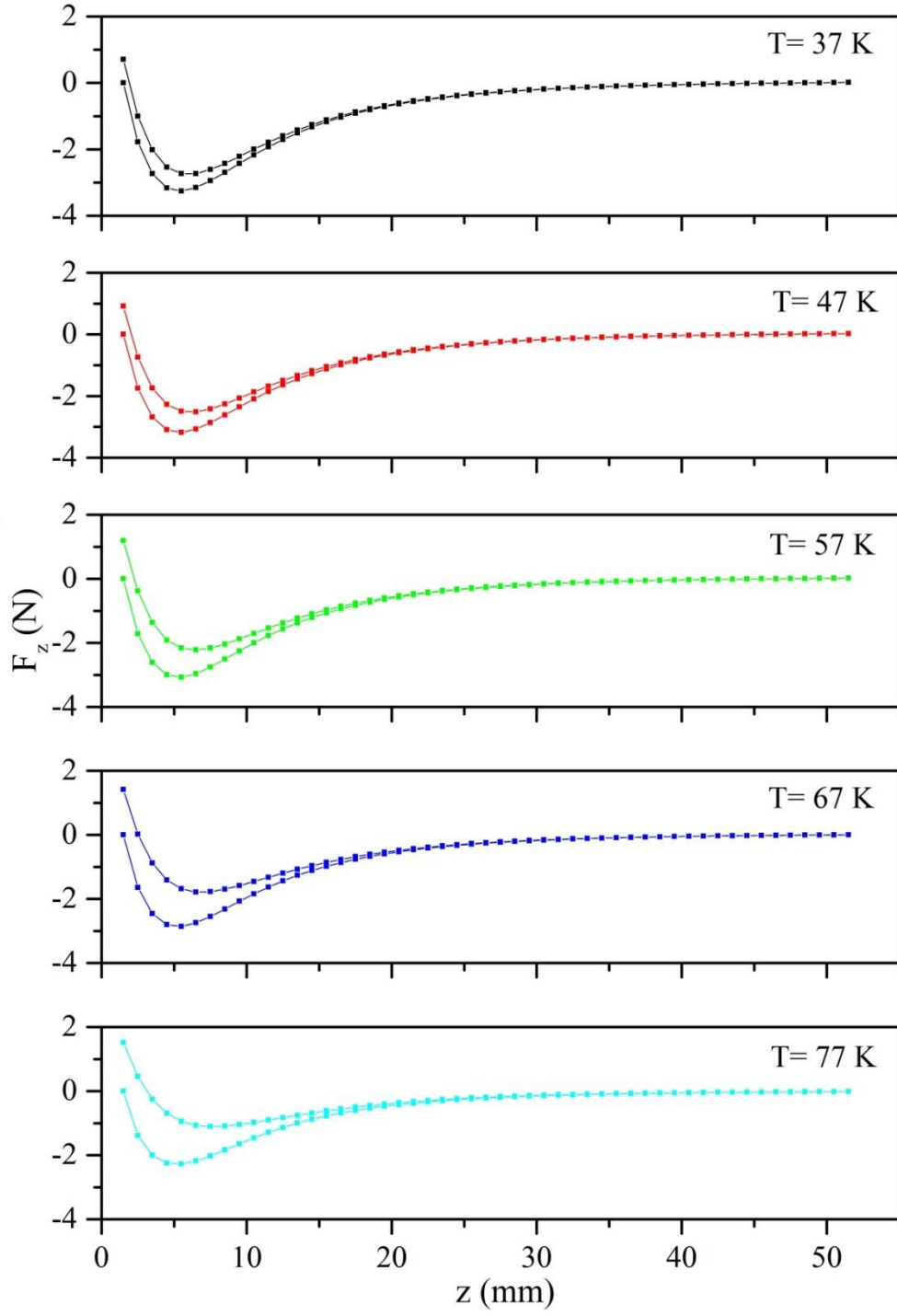


Şekil 57. Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T=37, 47, 57, 67$ ve 77 K) ZFC rejimi altında dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

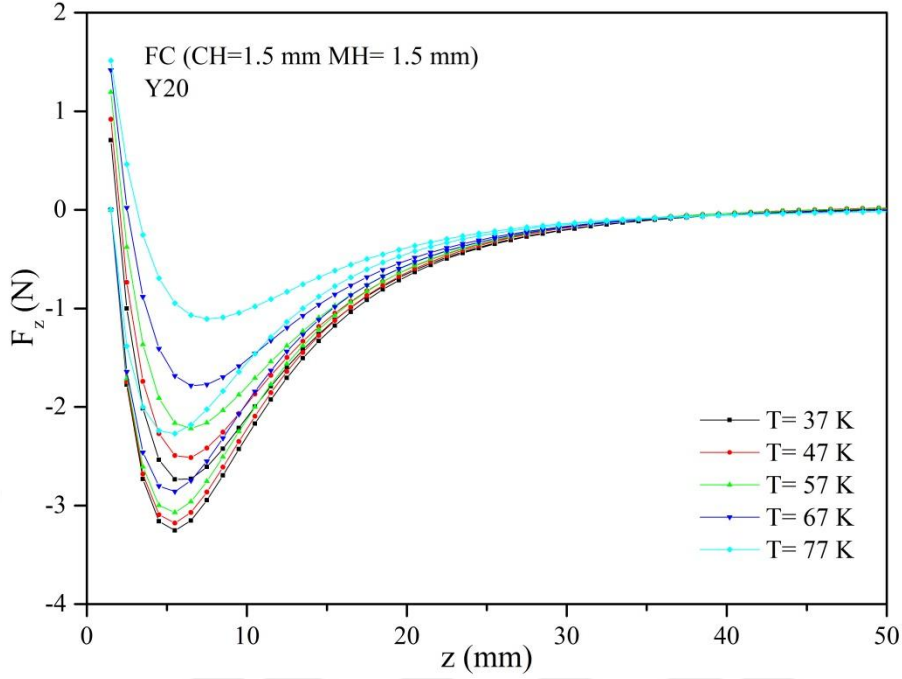


Şekil 58. Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda (T= 37, 47, 57, 67 ve 77 K) ZFC rejimi altında karşılaştırmalı olarak dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

Süperiletken örnek - mıknatıs arası mesafe $z = 1.5$ mm iken; normal halden süperiletken hale geçerken örnek mıknatısın manyetik alanına maruz kalarak soğutulmasına FC rejimi (alanlı soğutma) olarak adlandırılmaktadır. Mıknatıs eksenel yönde manyetize olduğu için mıknatıs süperiletken örneğe maksimum manyetik alan uygulamaktadır. FC rejimi altında yapılan ölçümlerde akı çivileme merkezlerinden dolayı, manyetik çekici kuvvet manyetik itici kuvvete göre daha yüksek ölçülmektedir. F_z -z ölçümleri FC rejimi sonrasında yapıldı. FC rejimi altında F_z -z ölçümünde: 1) Süperiletken örnek $z = 1.5$ mm'de soğutuldu. 2) istenilen soğutma sıcaklıklarında mıknatıs şu şekilde harekete başladı: $z = 1.5 \rightarrow -50$ mm $\rightarrow 1.5$ mm. Y20 örneği için FC rejiminde ölçülen $T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K sıcaklıklarında F_z -z sonuçları ayrıntılı Şekil 59'da ve karşılaştırmalı olarak Şekil 60'ta gösterilmektedir.

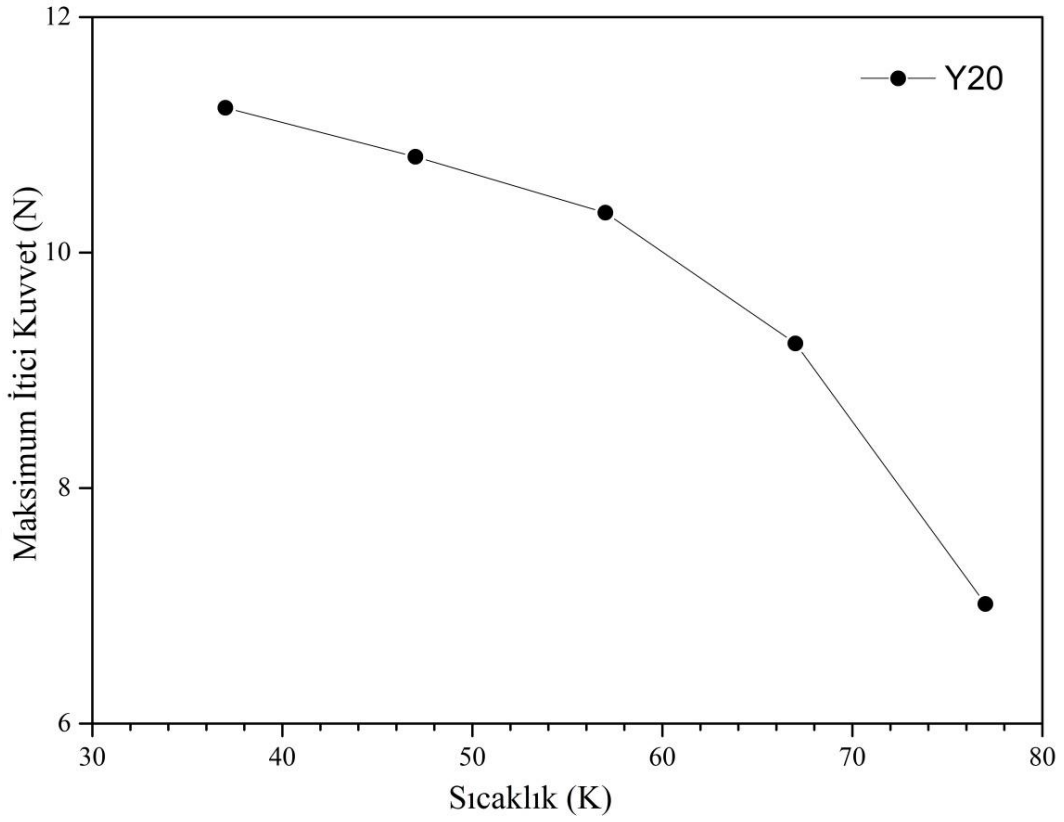


Şekil 59. Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T=37, 47, 57, 67$ ve 77 K) FC rejimi altında dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

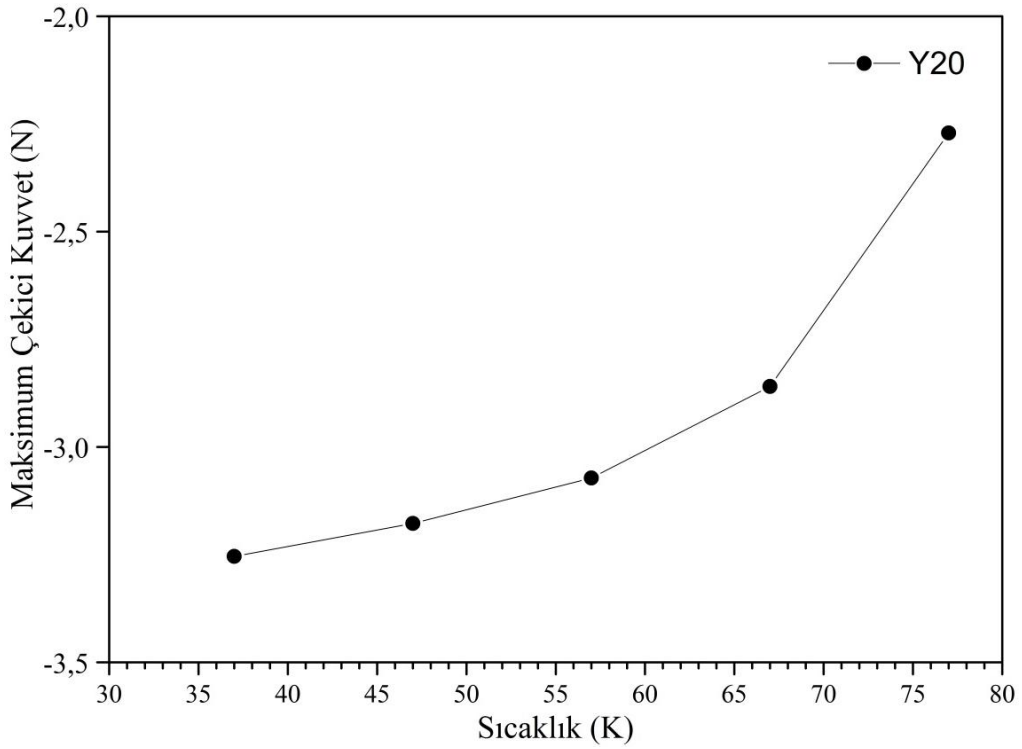


Şekil 60. Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda (T= 37, 47, 57, 67 ve 77 K) FC rejimi altında karşılaştırmalı olarak dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

Y20 örneğine ait maksimum itici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri ise Şekil 61’de ve maksimum çekici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri ise Şekil 62’de gösterilmiştir.



Şekil 61. Y20 örneğine ait maksimum itici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla değişimi grafikleri.

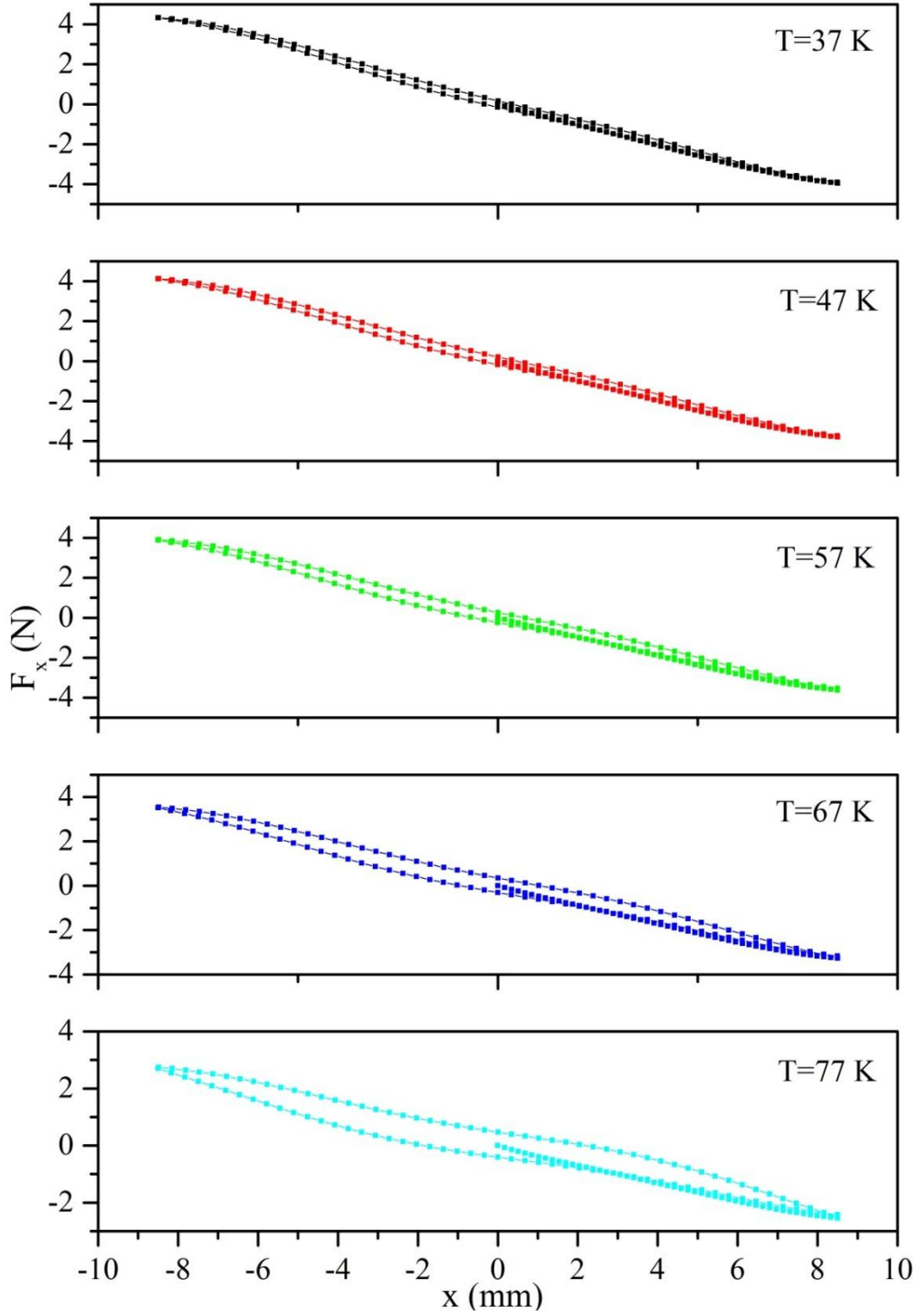


Şekil 62. Y20 örneğine ait maksimum çekici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla değişimi grafikleri.

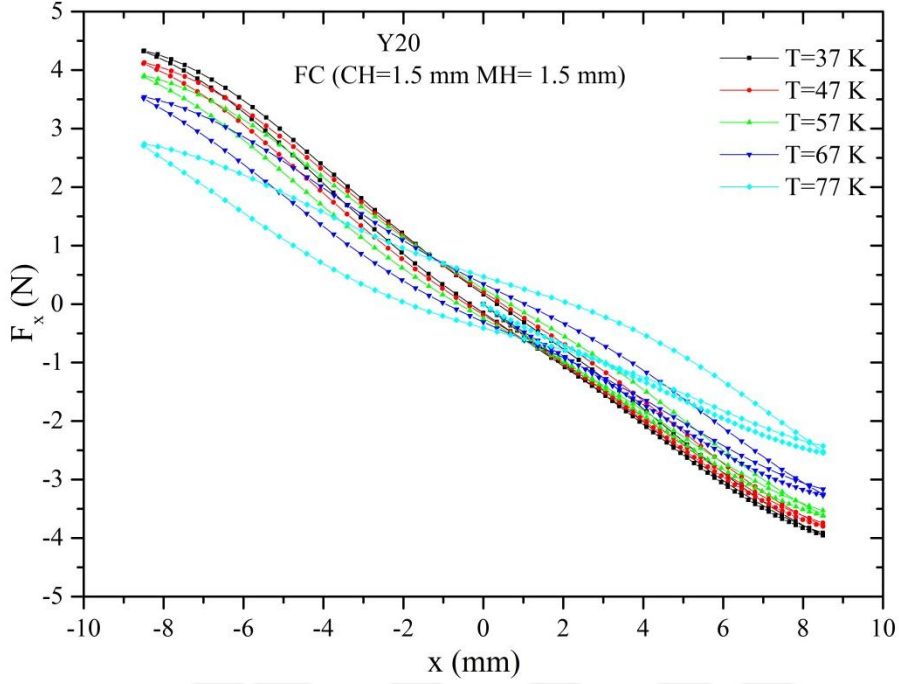
3.2.1.2. Yanal Kuvvet (F_x) - Yanal Uzaklık (x) Ölçümleri

Şekil 63'te Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda (37, 47, 57, 67 ve 77 K) yanal kuvvet (F_x) - yanal uzaklık (x) ölçümleri, Şekil 64'te ise karşılaştırmalı F_x -x olarak verilmiştir. Süperiletken örneğin çapı tavlama işleminden sonra 16 mm olmuştur. Bu yüzden yanal kuvvet ölçümleri istenilen soğutma sıcaklıklarında FC rejimi altında şu şekilde yapıldı: $x = 0 \text{ mm} \rightarrow +8.5 \text{ mm} \rightarrow -8.5 \text{ mm} \rightarrow 0 \text{ mm} \rightarrow +8.5 \text{ mm}$ ($z = 1.5 \text{ mm}$).





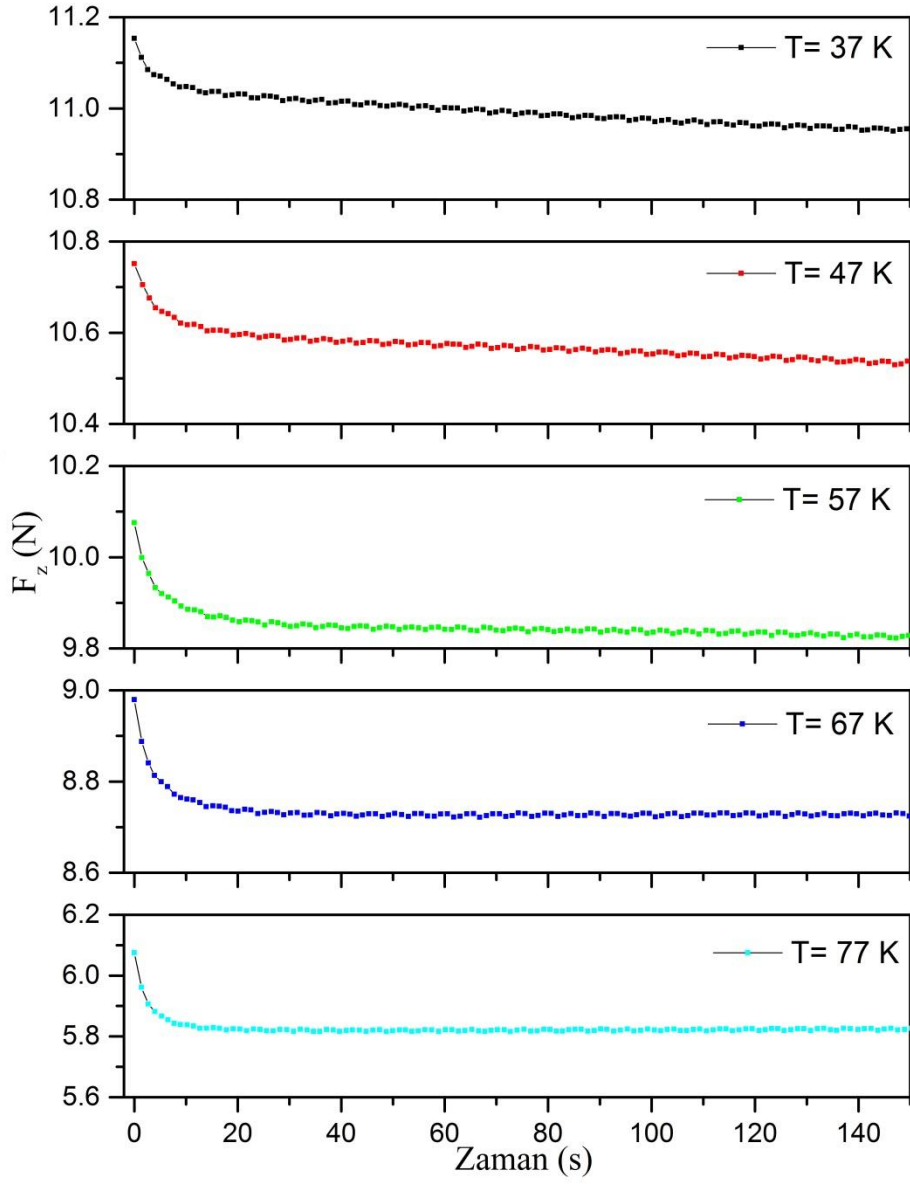
Şekil 63. Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T= 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) yanıl kuvvet (F_x) - yatay mesafe (x) grafikleri.



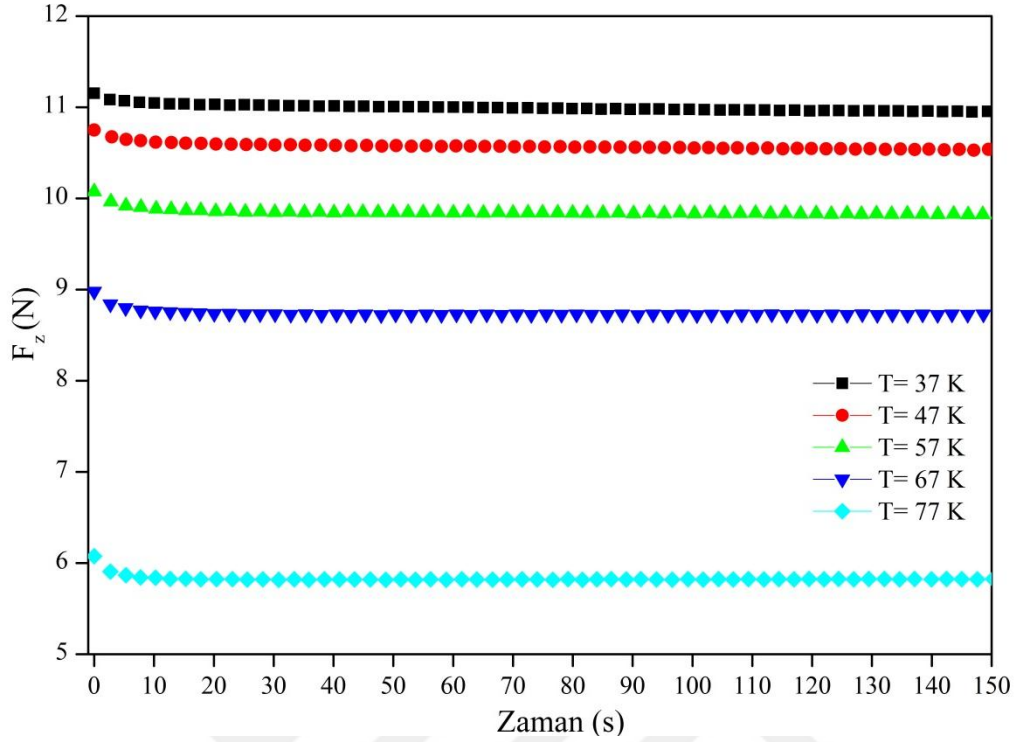
Şekil 64. Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T= 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) karşılaştırmalı olarak yanal kuvvet (F_x) - yatay mesafe (x) grafikleri.

3.2.1.3. Dikey Kaldırma Kuvveti (F_z) - Zaman (t) Ölçümleri

Y20 örneğine ait farklı sıcaklıklarda ($T = 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) ZFC rejimi altında dikey kaldırma kuvveti (F_z) – zaman (t) değişimi grafikleri ayrı ayrı Şekil 65’te ve karşılaştırmalı olarak Şekil 66’da verilmiştir. ZFC rejimi altında F_z - t ölçümünde: 1) Süperiletken örnek $z = -50$ mm’de soğutuldu, 2) mıknatıs $z = 1.5$ mm’ye geldiğinde istenilen soğutma sıcaklıklarında örnek 150 saniye bu konumda ($z = 1.5$ mm) bekletildi. Süperiletken örneğin F_z - t ölçümleri yapıldı.



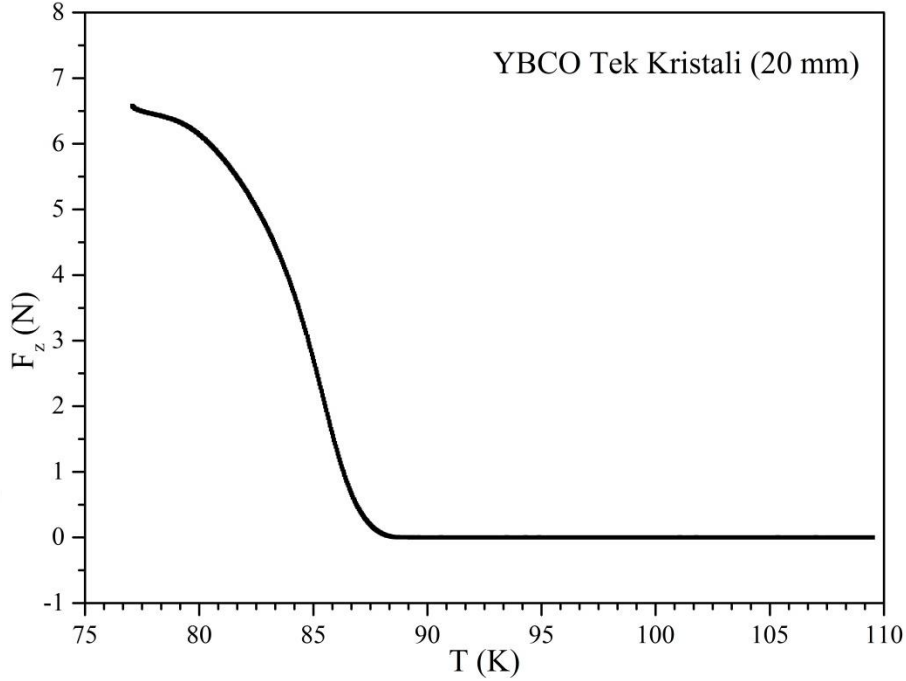
Şekil 65. Farklı sıcaklıklarda ($T= 37, 47, 57, 67$ ve 77 K) Y20 örneğine ait kuvvet-zaman grafikleri.



Şekil 66. Farklı sıcaklıklarda (T= 37, 47, 57, 67 ve 77 K) Y20 örneğine ait karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri.

3.2.1.4. Dikey Kaldırma Kuvveti (Fz) - Sıcaklık (T)

Şekil 67’de Y20 örneğine ait dikey kaldırma kuvveti-sıcaklık değişimi grafiği verilmiştir. ZFC rejimi altında Fz–T ölçümünde: 1) süperiletken örnek z = -50 mm’de soğutuldu, 2) mıknatıs z = 1.5 mm’ye geldi ve örnek 77 K’den 110 K’e ısıtıldı. Isıtılmaya başlayan süperiletken örneğin 77–110 K aralığında Fz – T ölçümleri yapıldı.



Şekil 67. Y20 örneğine ait kuvvet - sıcaklık grafiği.

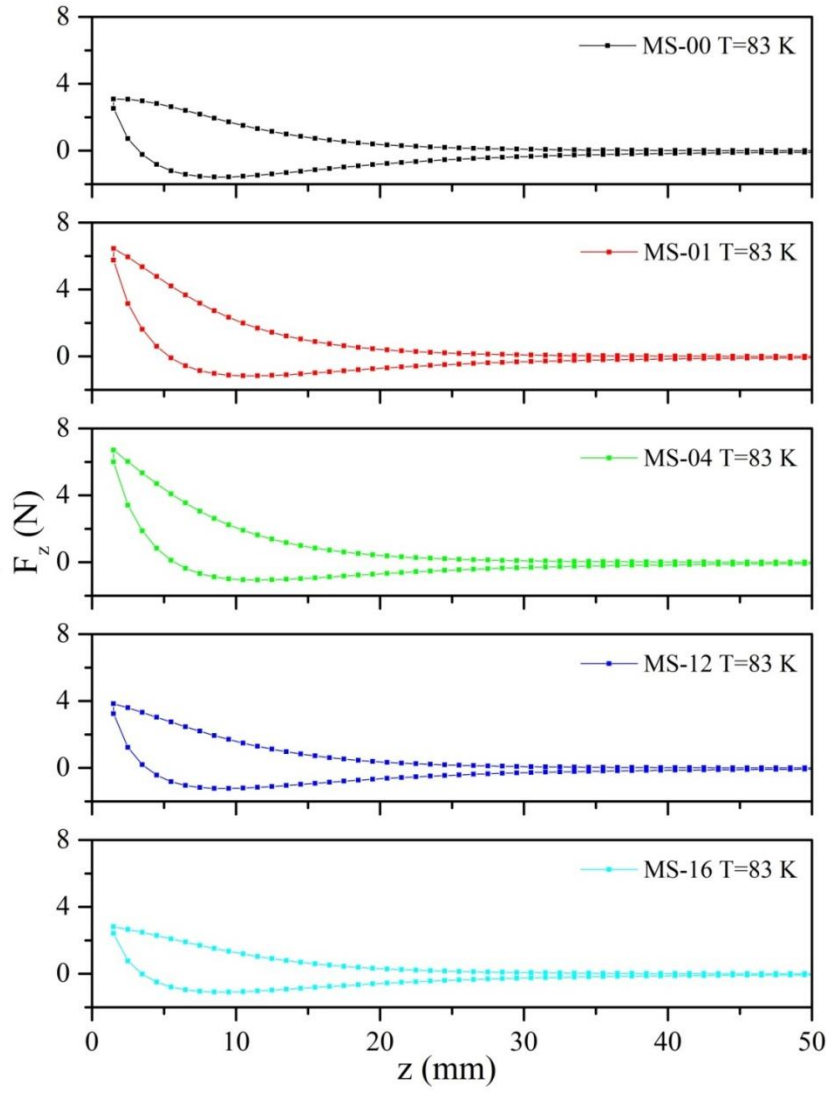
3.2.2. Çoklu Çekirdekli Süperiletken Örneklerine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları

Çoklu çekirdekli süperiletken örneklerine ait manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinde silindirik Nd-Fe-B mıknatıs (ϕ : 26.8 mm h: 12.8 mm Manyetik Alan: 0.5 T) kullanılmıştır.

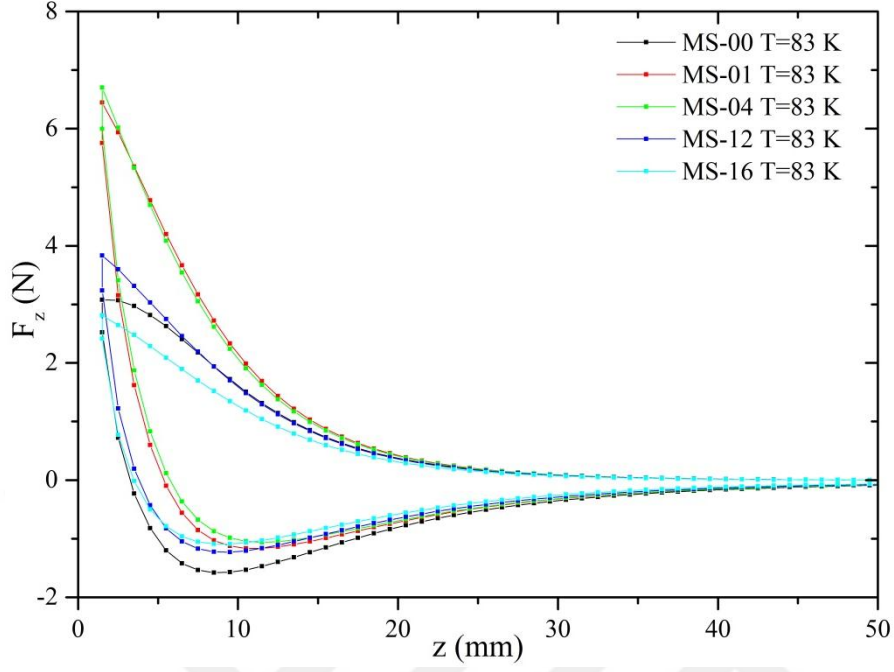
3.2.2.1. Çoklu Çekirdeklerin (100) // (100) Yapıda Olduğu Süperiletken Örneklerine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları

3.2.2.1.1. Dikey Kaldırma Kuvveti (Fz) - Dikey Uzaklık (z) Ölçümleri

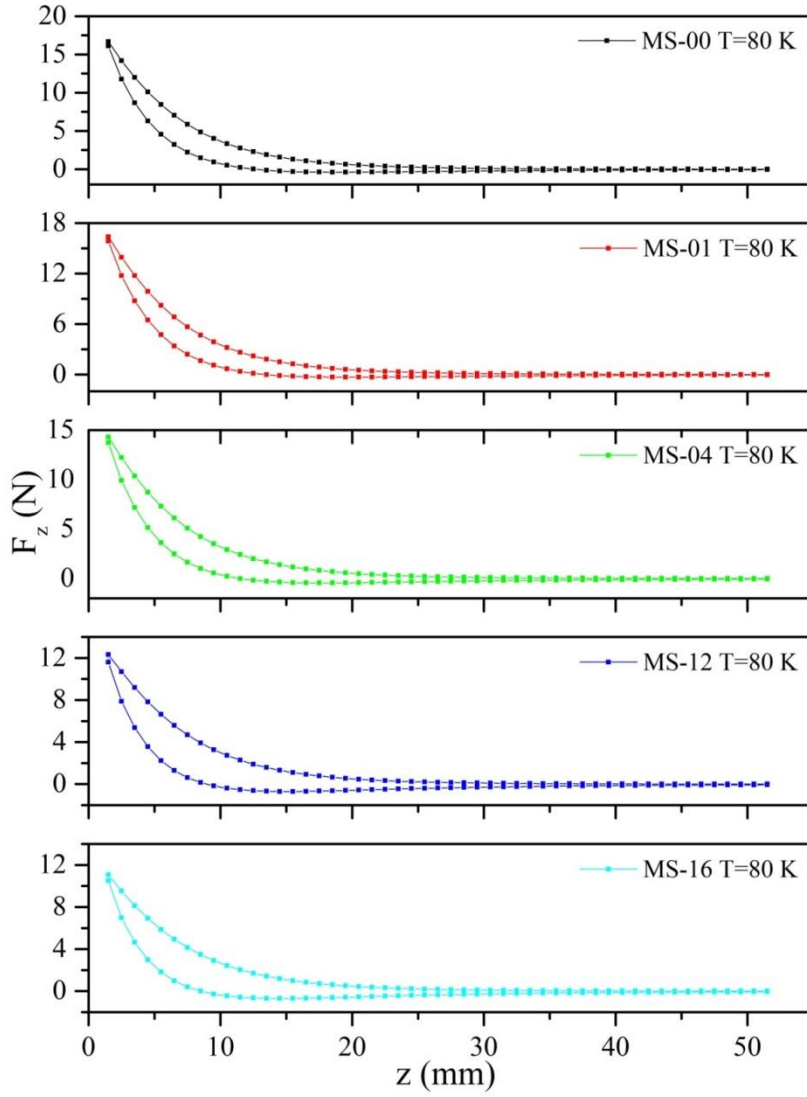
Fz-z ölçümleri ZFC ve FC rejimi sonrasında yapıldı. ZFC rejimi altında MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için; T = 83, 80 ve 77 K sıcaklıklarında manyetik kaldırma kuvvetinin dikey harekete göre değişim grafikleri sırasıyla, Şekil 68, Şekil 70 ve Şekil 72'de, karşılaştırmalı grafikleri ise sırasıyla Şekil 69, Şekil 71 ve Şekil 73'te gösterilmektedir.



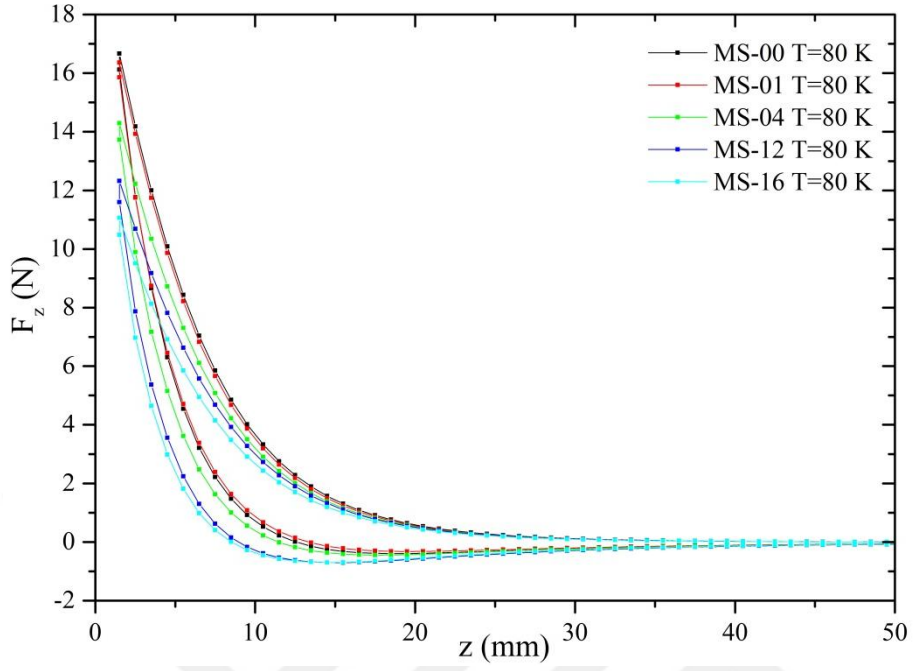
Şekil 68. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında $T=83$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



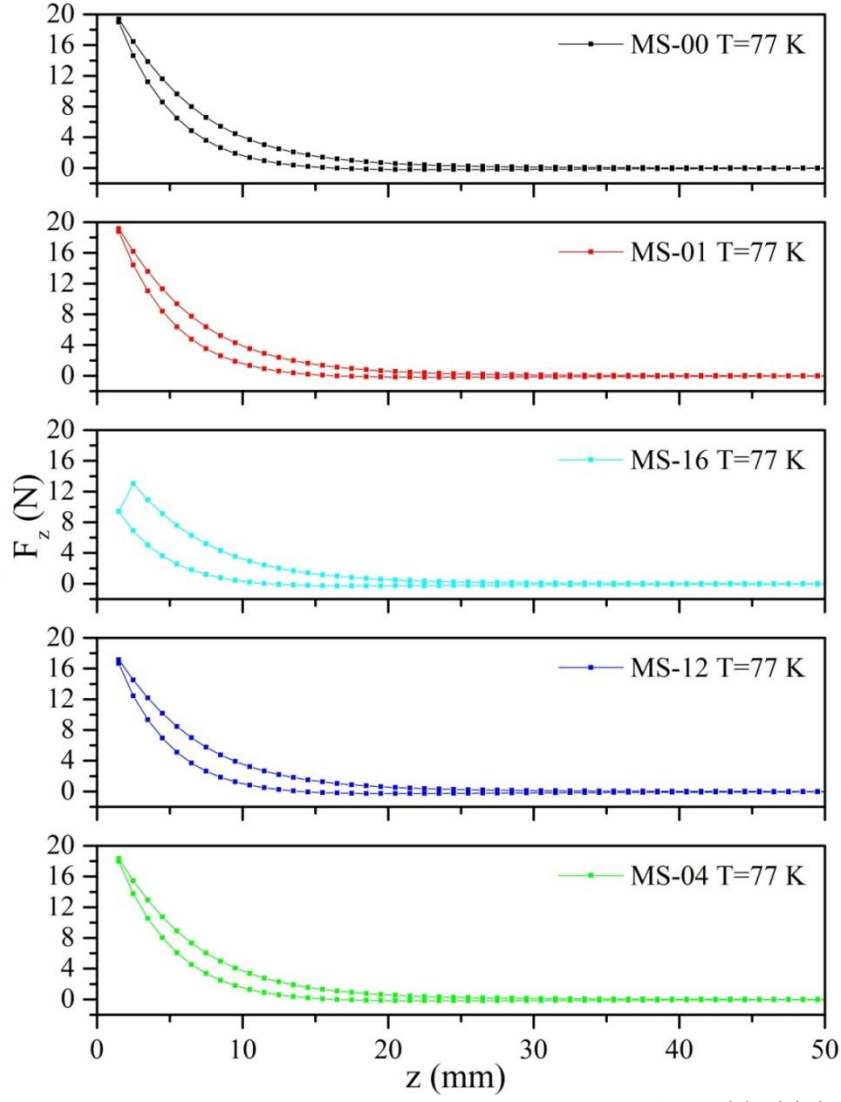
Şekil 69. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında $T=83\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



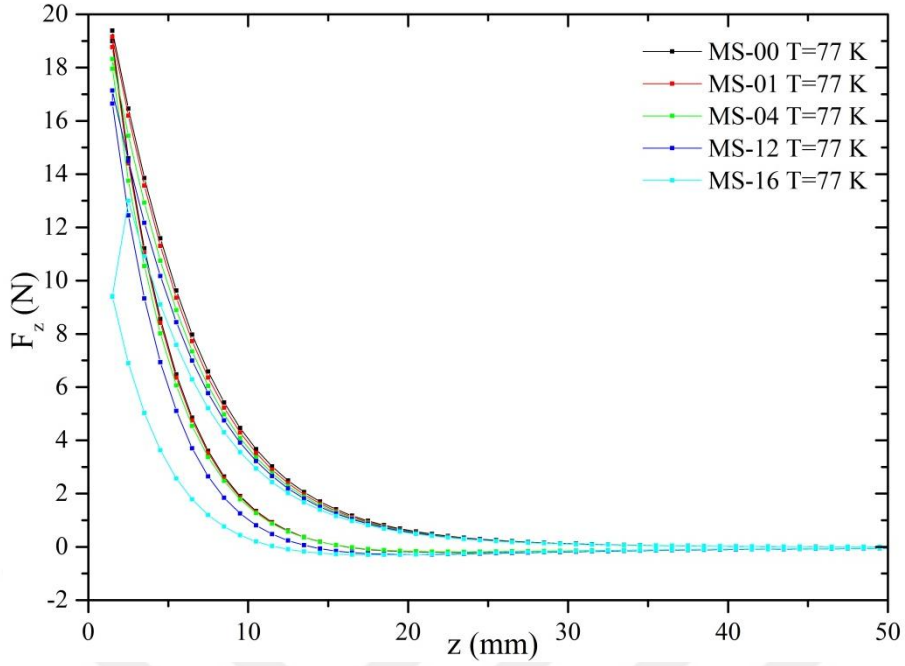
Şekil 70. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında $T=80$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



Şekil 71. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında $T=80$ K’de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

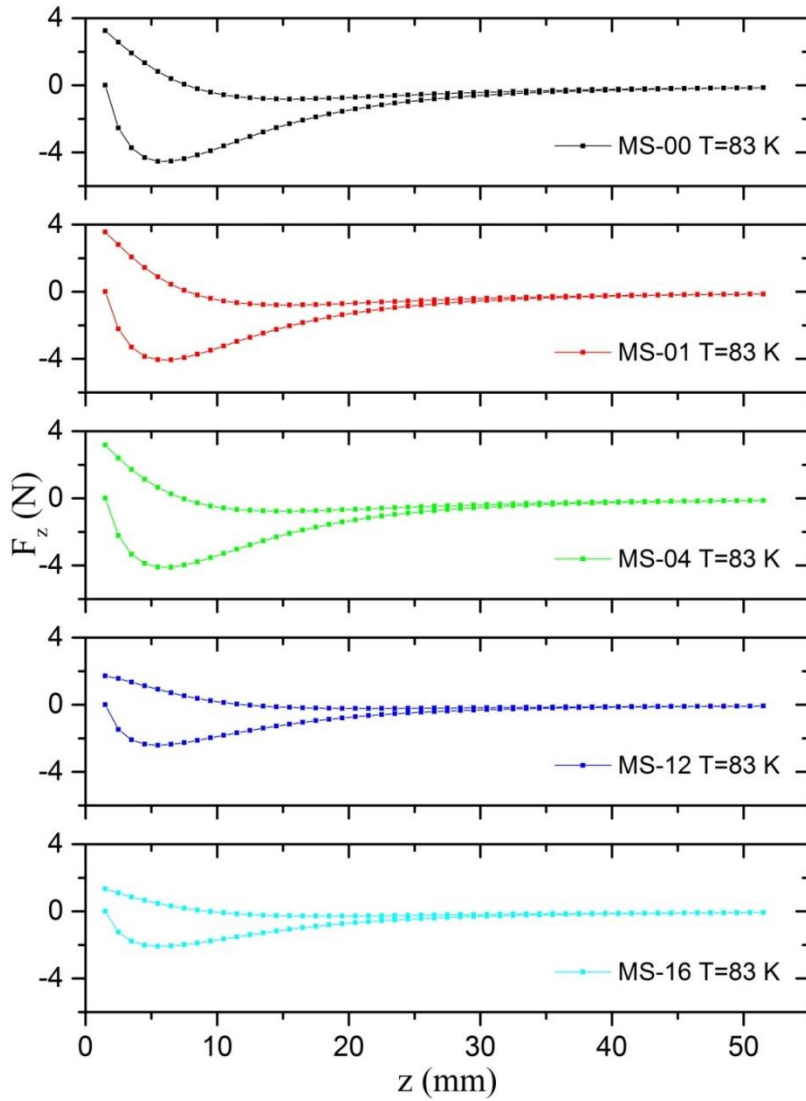


Şekil 72. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında $T=77$ K’de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

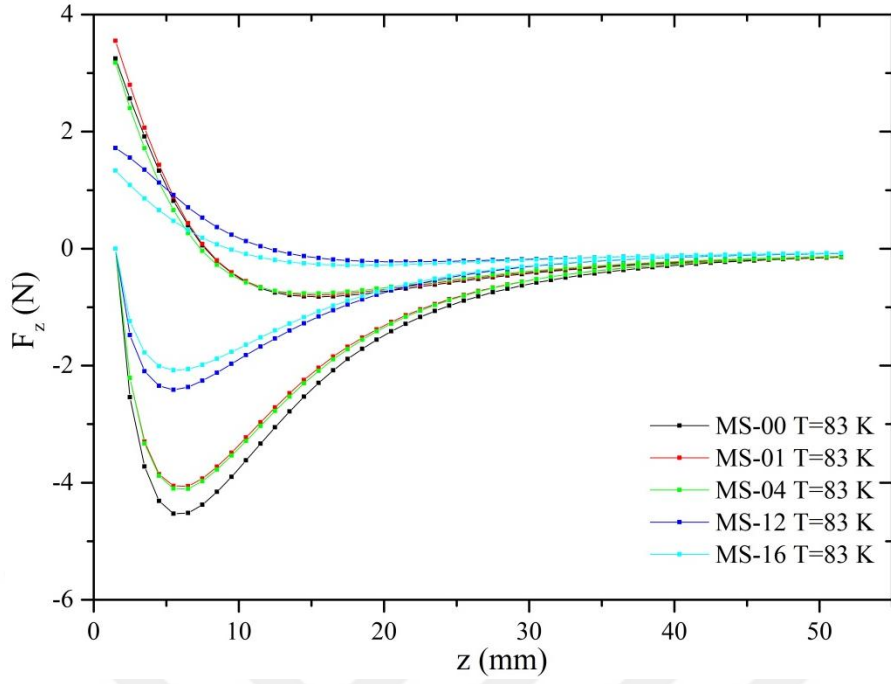


Şekil 73. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için ZFC rejimi altında $T=77$ K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

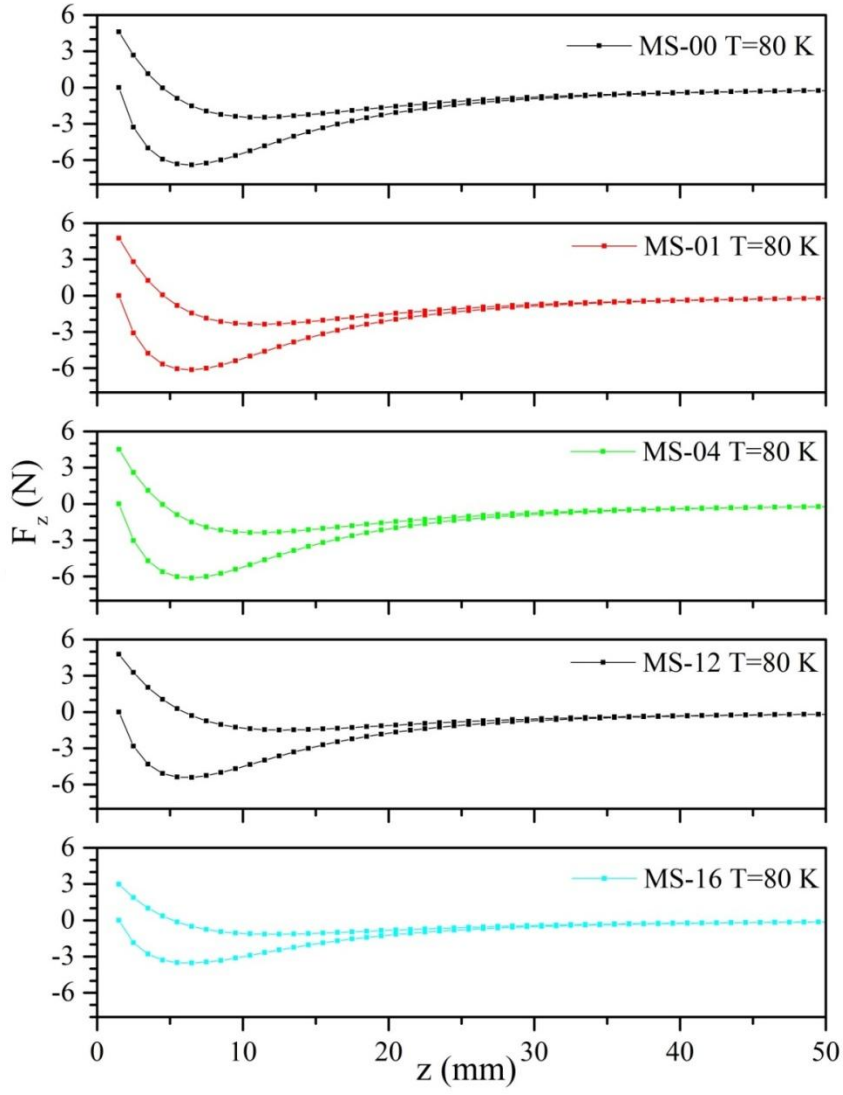
FC rejimi altında MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için; $T = 83$, 80 ve 77 K sıcaklıklarında manyetik kaldırma kuvvetinin dikey harekete göre değişim grafikleri sırasıyla, Şekil 74, Şekil 76 ve Şekil 78'de karşılaştırmalı grafikleri ise sırasıyla ve Şekil 75, Şekil 77 ve Şekil 79'da gösterilmektedir.



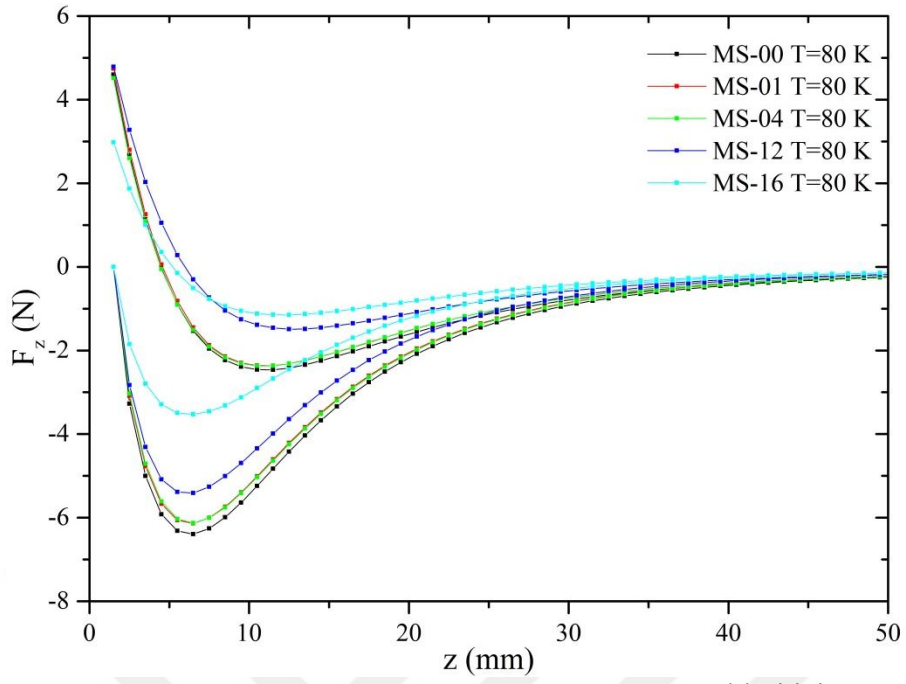
Şekil 74. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T=83$ K’de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



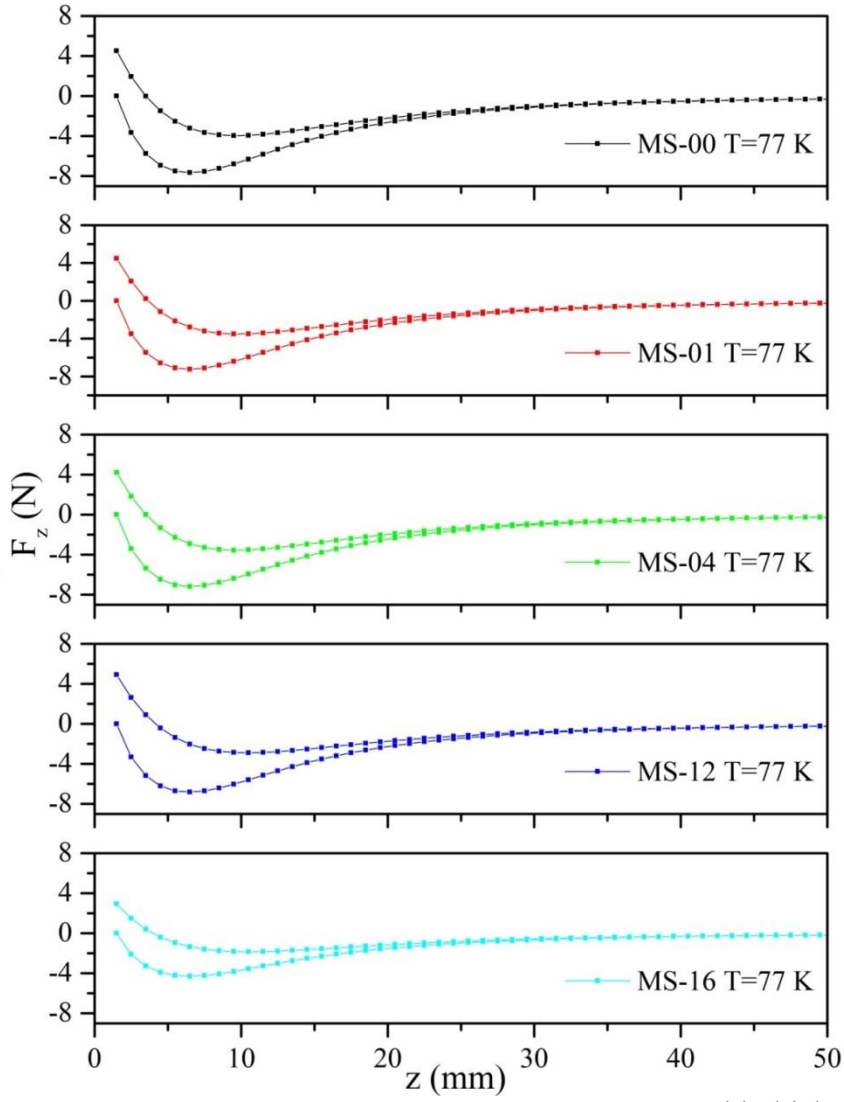
Şekil 75. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T=83\text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



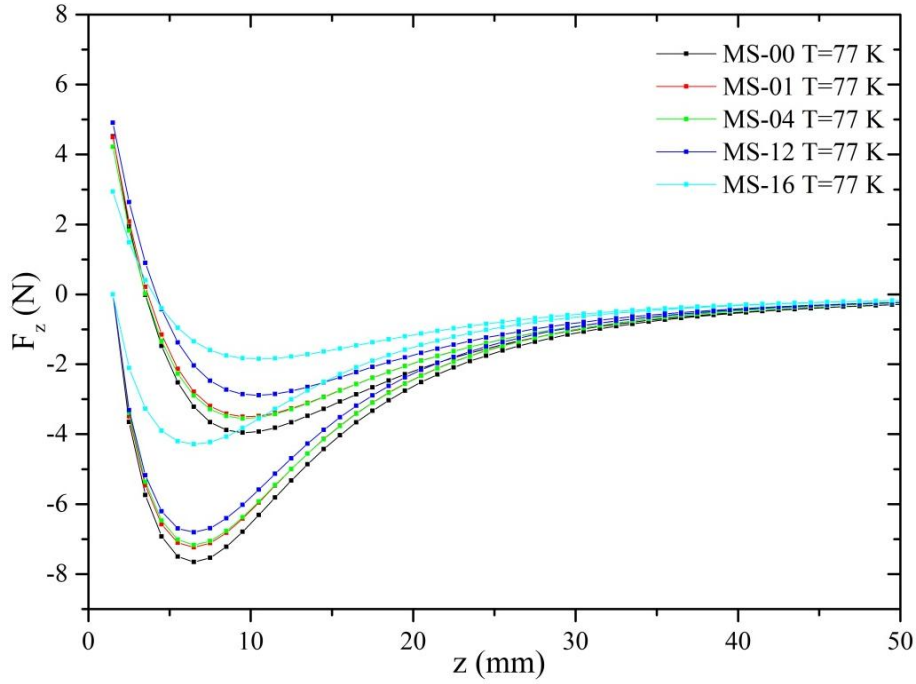
Şekil 76. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T=80$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



Şekil 77. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T=80$ K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

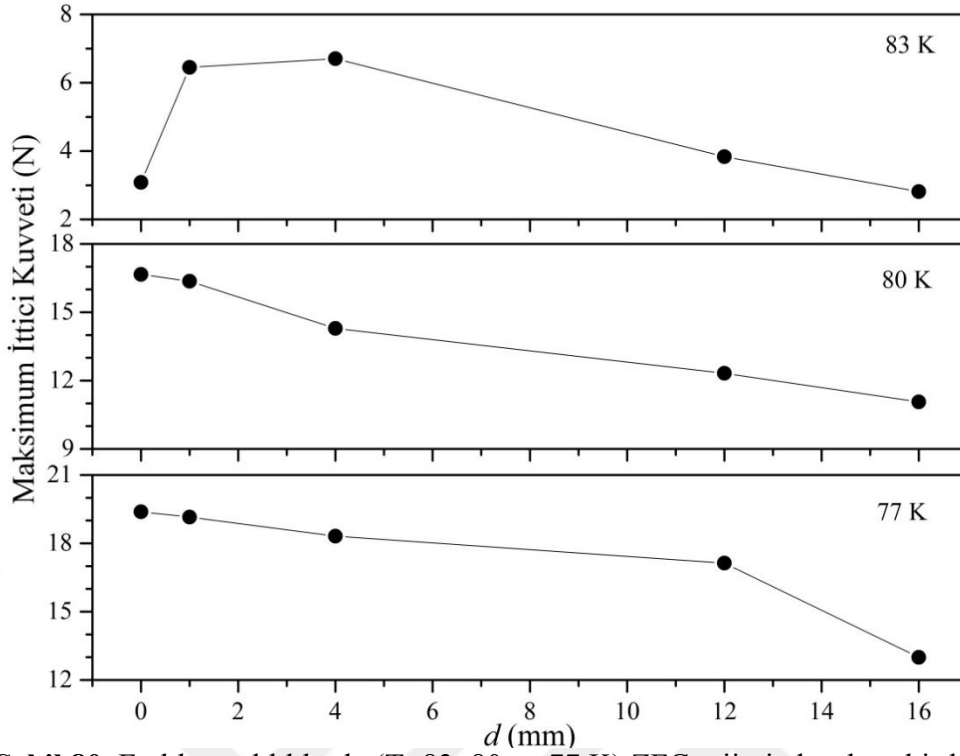


Şekil 78. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T=77$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

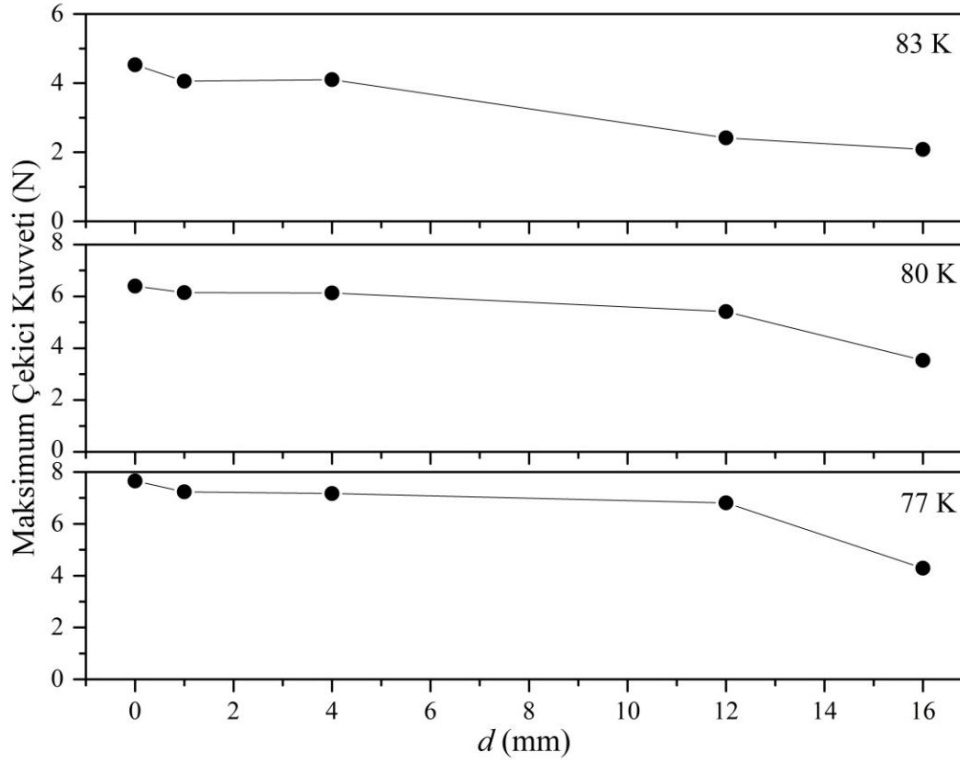


Şekil 79. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için FC rejimi altında $T = 77$ K’de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için $T = 83, 80$ ve 77 K sıcaklıklarında maksimum itici ve maksimum çekici kuvvetin d mesafesine göre değişim grafikleri sırasıyla Şekil 80 ve Şekil 81’de gösterilmektedir.



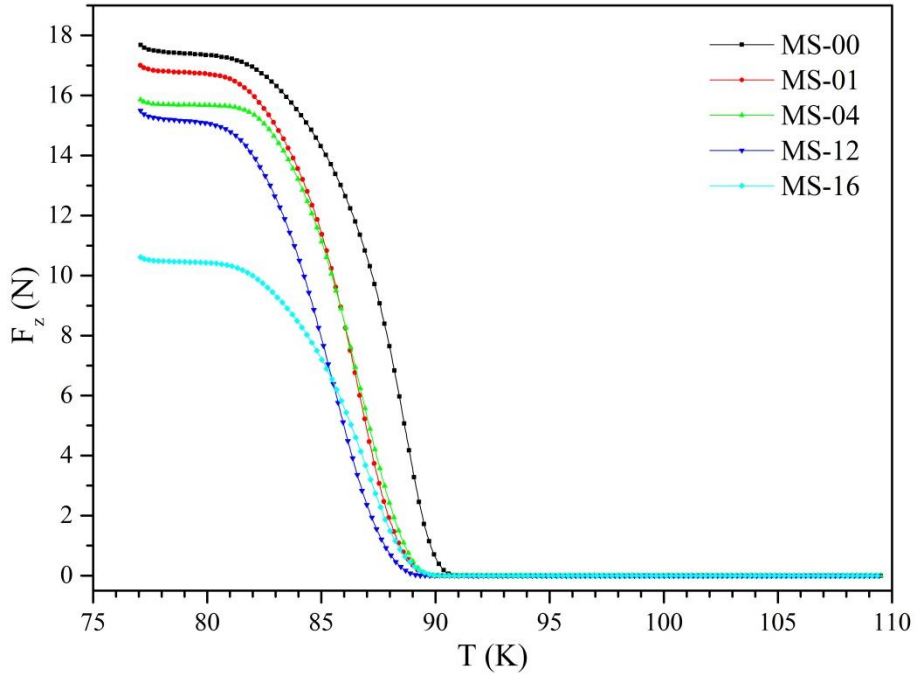
Şekil 80. Farklı sıcaklıklarda ($T=83, 80$ ve 77 K) ZFC rejimi altında çekirdekleri (a ve b düzlemleri) birbirine paralel olarak büyüyen YBCO örneklerinin maksimum itici kuvvet - çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri.



Şekil 81. Farklı sıcaklıklarda ($T=83, 80$ ve 77 K) FC rejimi altında çekirdekleri (a ve b düzlemleri) birbirine paralel olarak büyüyen YBCO örneklerinin maksimum çekici kuvvet- çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri.

3.2.2.1.2. Dikey Kaldırma Kuvveti (Fz) – Sıcaklık (T)

Şekil 82’de MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için kuvvet-sıcaklık değişimi grafiği verilmiştir. Dikey kaldırma kuvveti (Fz) – sıcaklık (T) grafiklerinden örneklerin geçiş sıcaklıklarınının 87 - 91 K aralığında olduğu görüldü. Ancak bu geçiş sıcaklığı numunenin kritik geçiş sıcaklığını değil ortalama geçiş sıcaklığını verir.

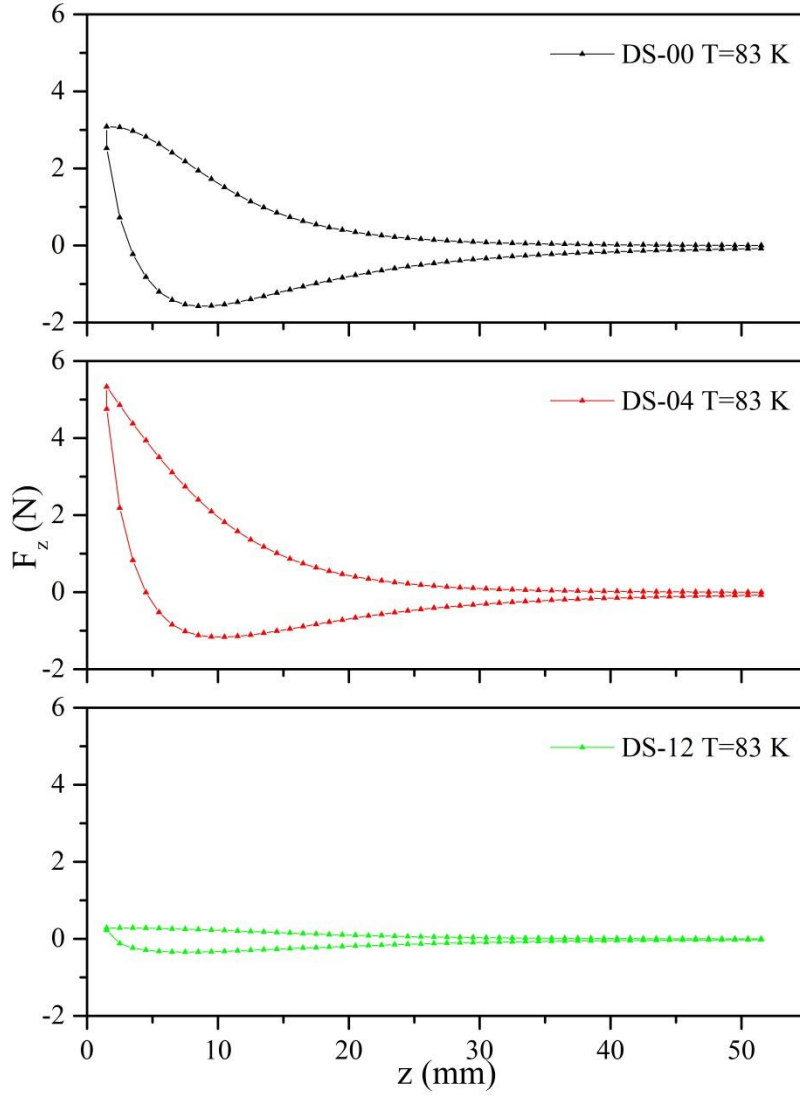


Şekil 82. MS-00, MS-01, MS-04, MS-12 ve MS-16 örnekleri için kuvvet-sıcaklık değişimi grafiği.

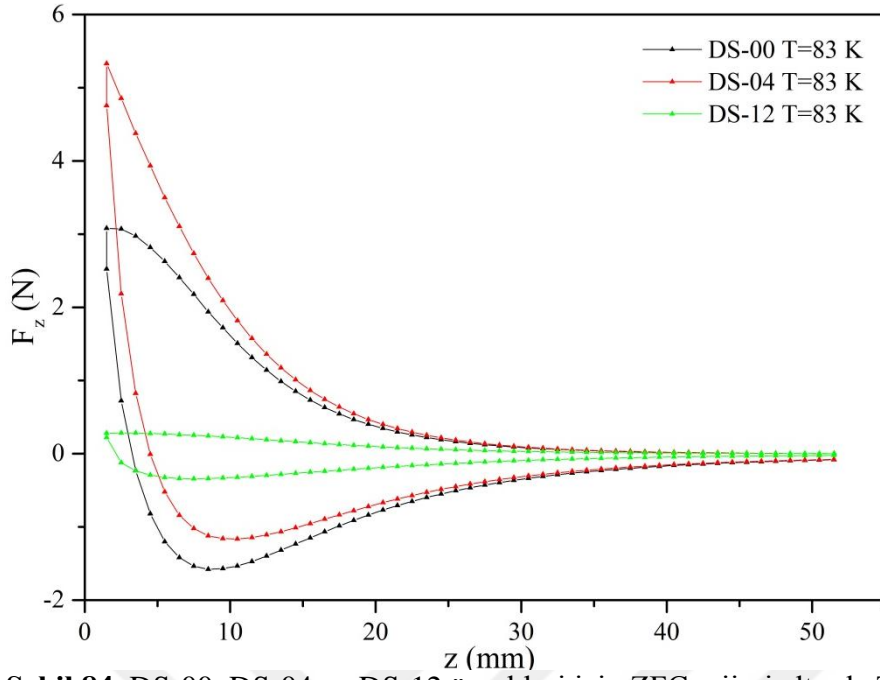
3.2.2.2. Çoklu Çekirdeklerin (100) // (010) Yapıda Olduğu Süperiletken Örneklerine Ait Manyetik Kaldırma Kuvveti Sonuçları

3.2.2.2.1. Dikey Kaldırma Kuvveti (Fz) - Dikey Uzaklık (z) Ölçümleri

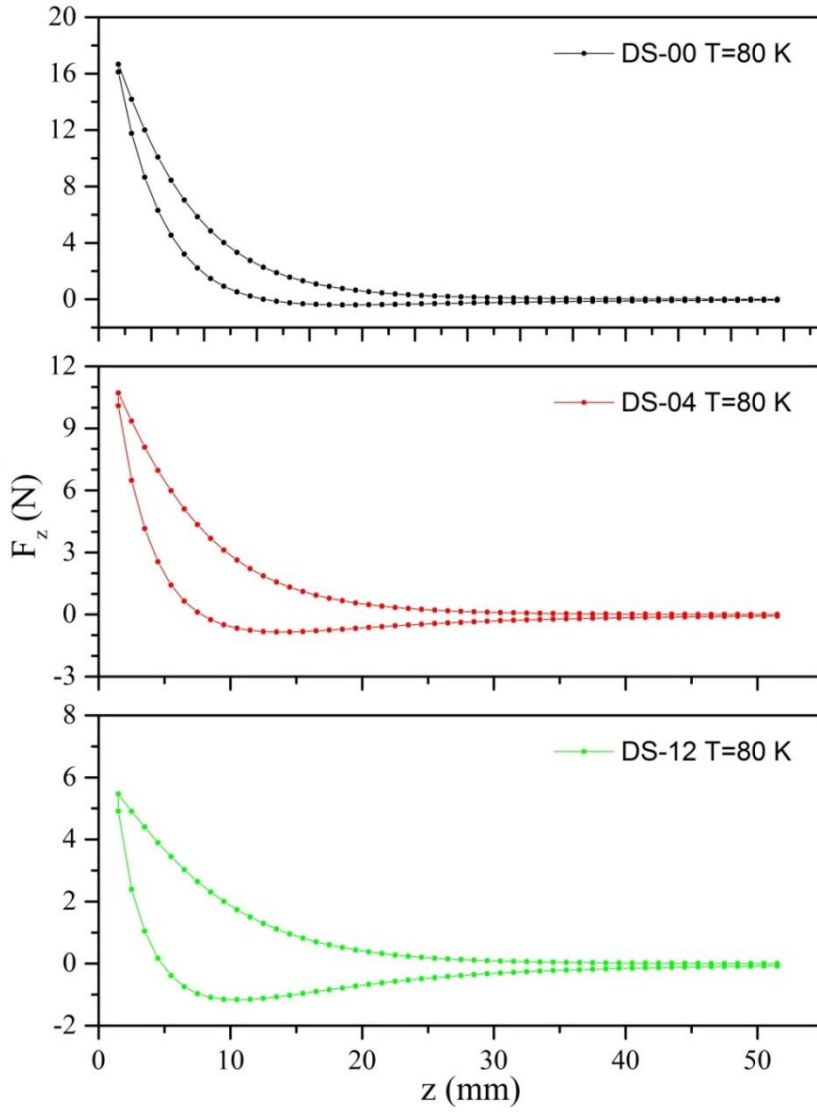
F_z - z ölçümleri ZFC ve FC rejimlerinde yapıldı. ZFC rejimi altında DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için $T = 83, 80$ ve 77 K sıcaklıklarında manyetik kaldırma kuvvetinin dikey harekete göre değişim grafikleri sırasıyla Şekil 83, Şekil 85 ve Şekil 87’de, karşılaştırmalı olarak ise Şekil 84, Şekil 86 ve Şekil 88’de gösterilmektedir.



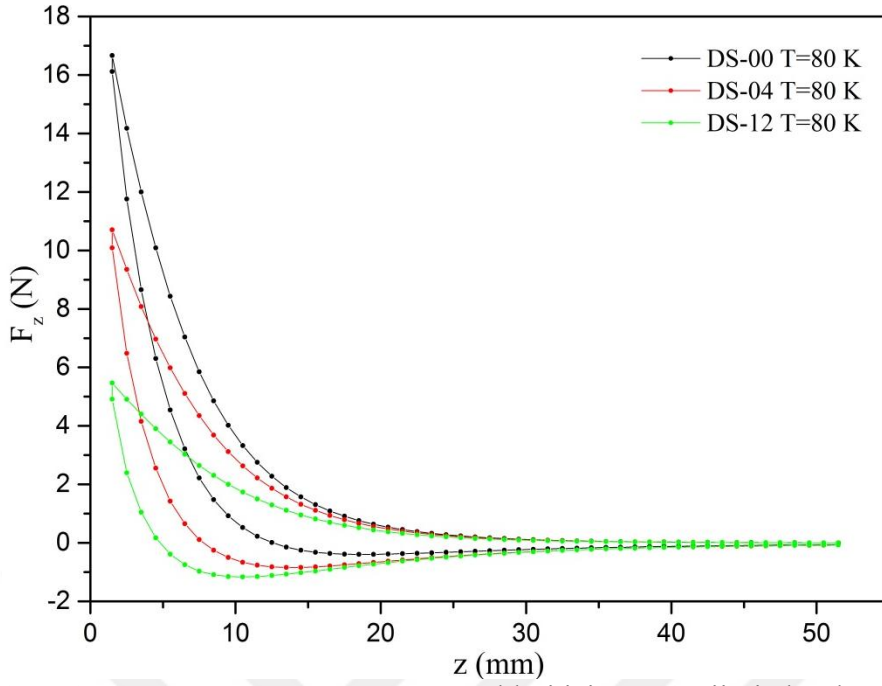
Şekil 83. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 83$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



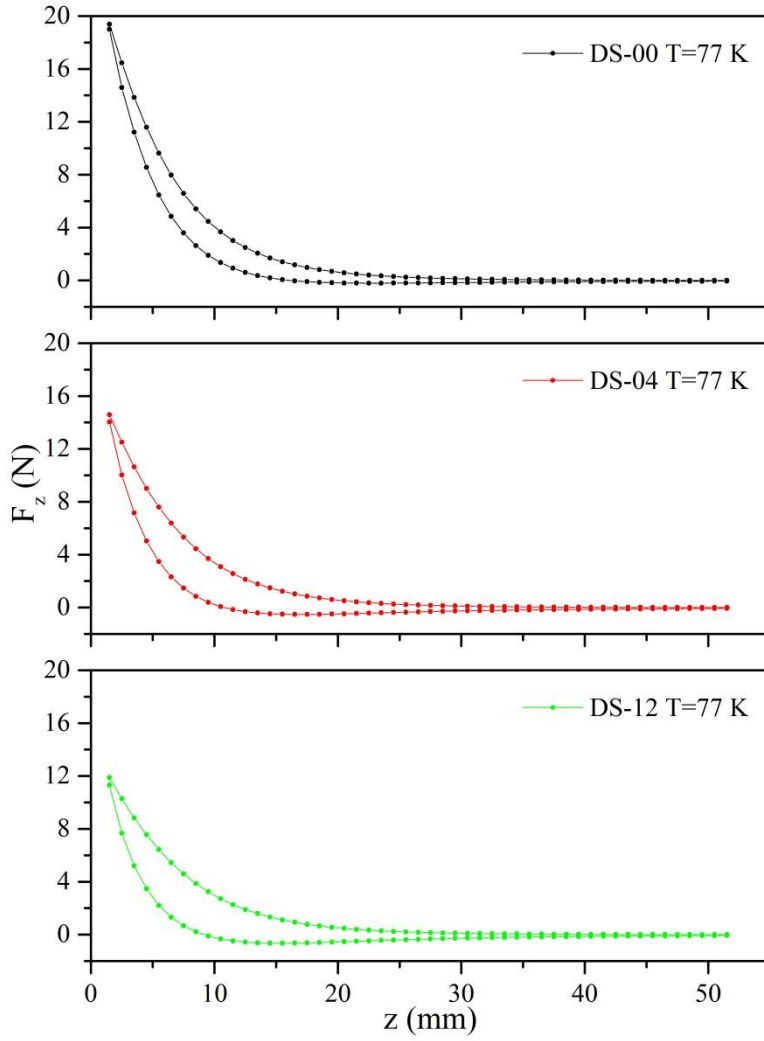
Şekil 84. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 83$ K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



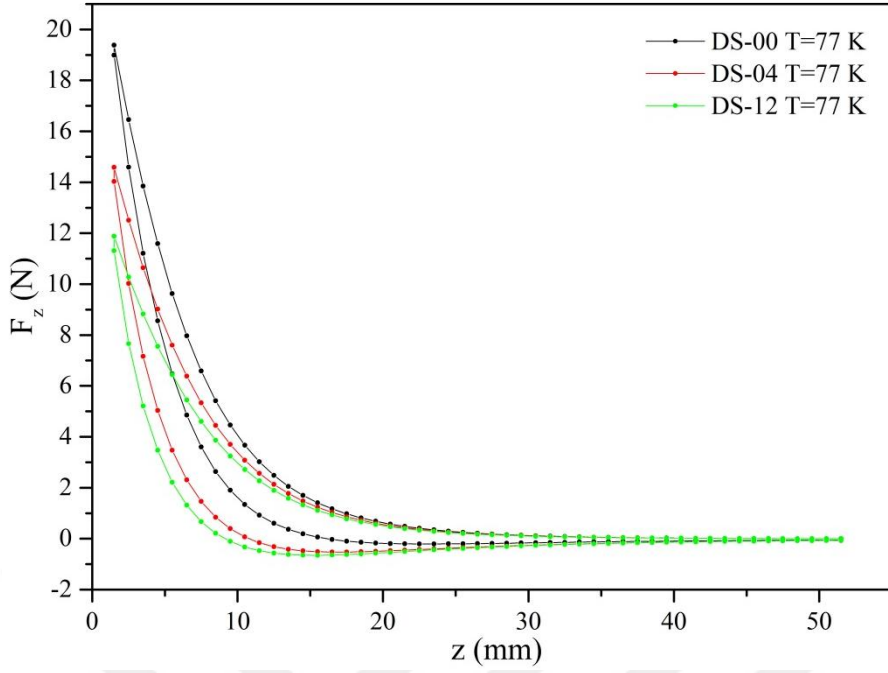
Şekil 85. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 80$ K’de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



Şekil 86. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 80$ K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z)-dikey mesafe (z) grafikleri.

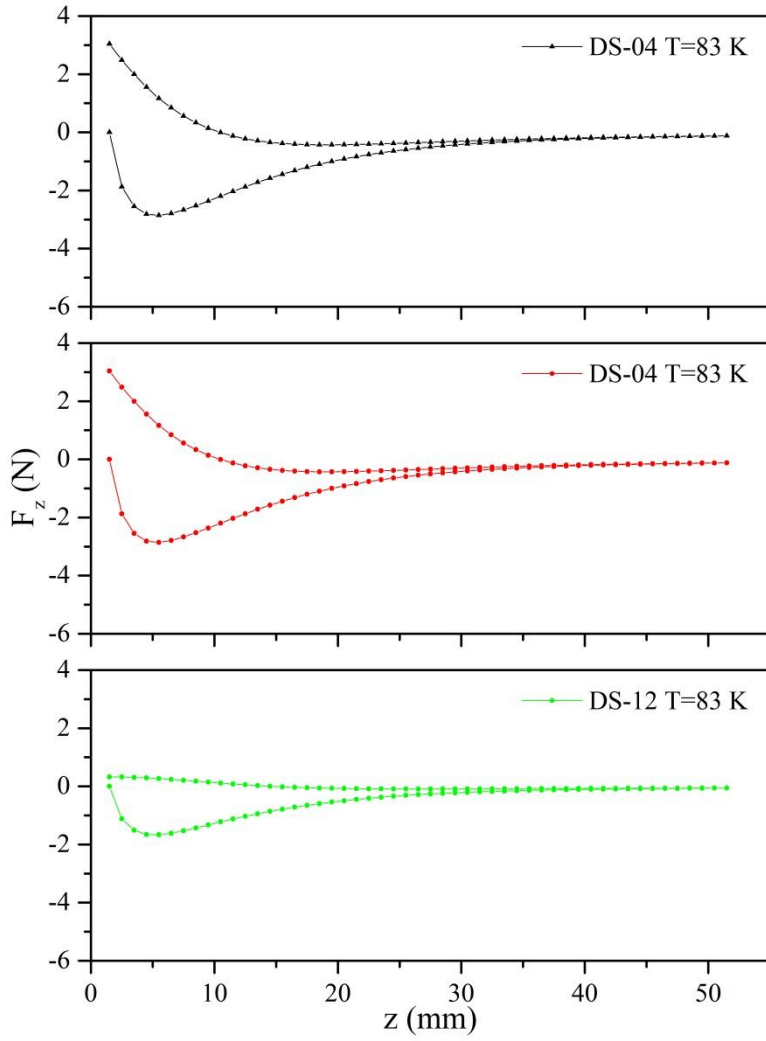


Şekil 87. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 77$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

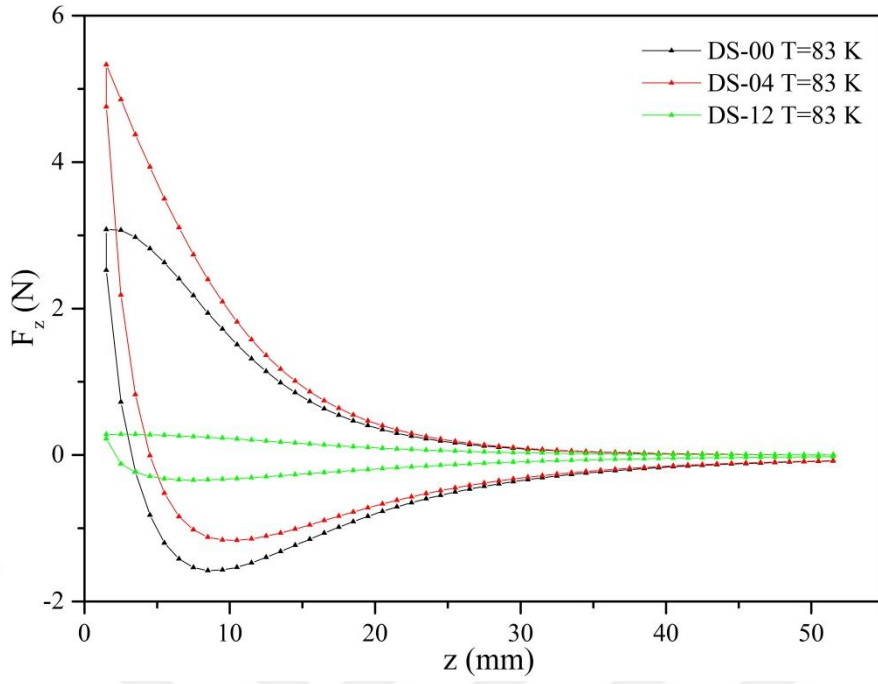


Şekil 88. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için ZFC rejimi altında $T = 77$ K’de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

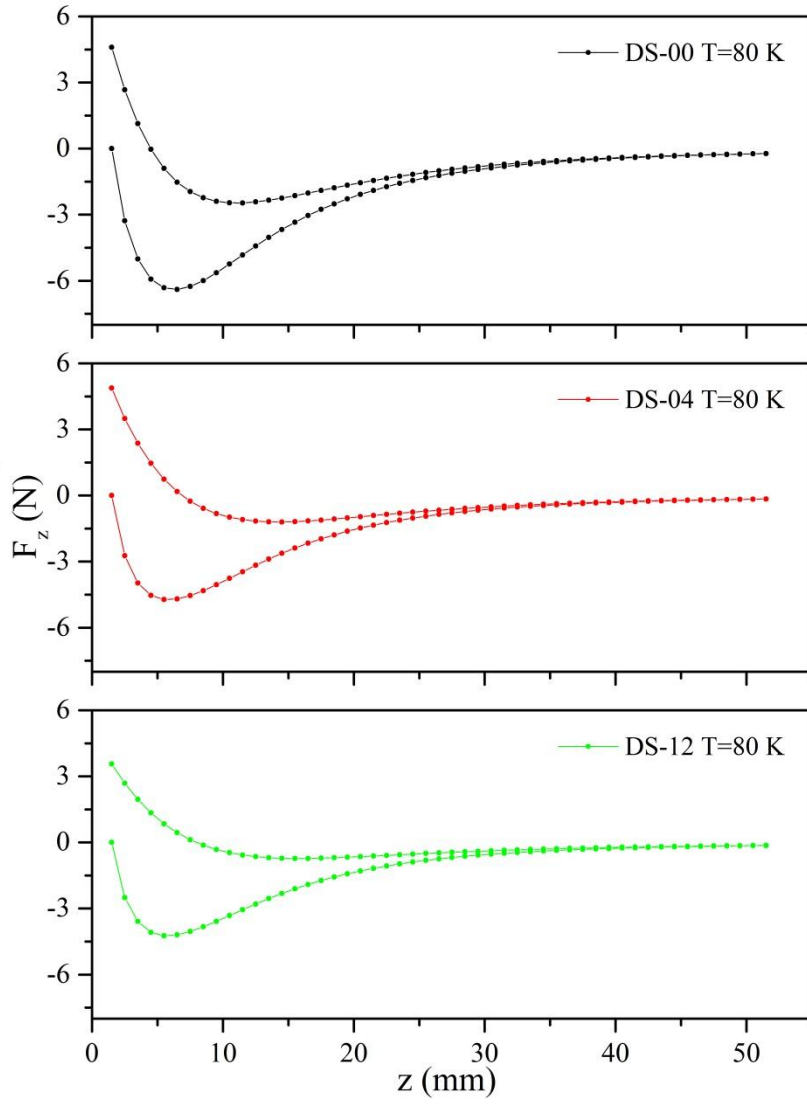
FC rejimi altında DS00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için $T = 83, 80$ ve 77 K sıcaklıklarında manyetik kaldırma kuvvetinin dikey harekete göre değişim grafikleri sırasıyla Şekil 89, Şekil 91 ve Şekil 93’te, karşılaştırmalı olarak Şekil 90, Şekil 92 ve Şekil 94’te gösterilmektedir.



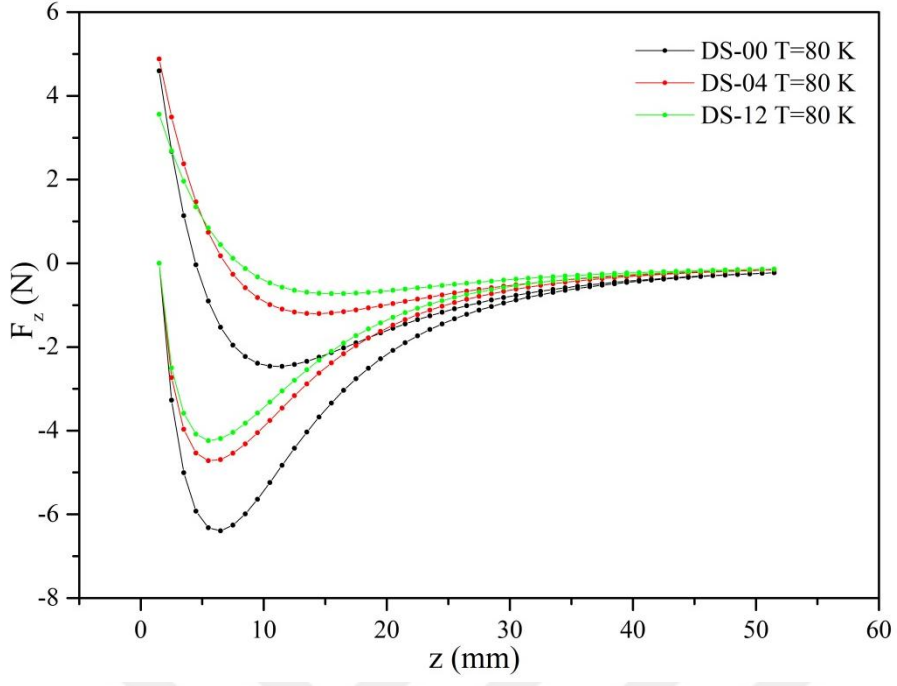
Şekil 89. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 83$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



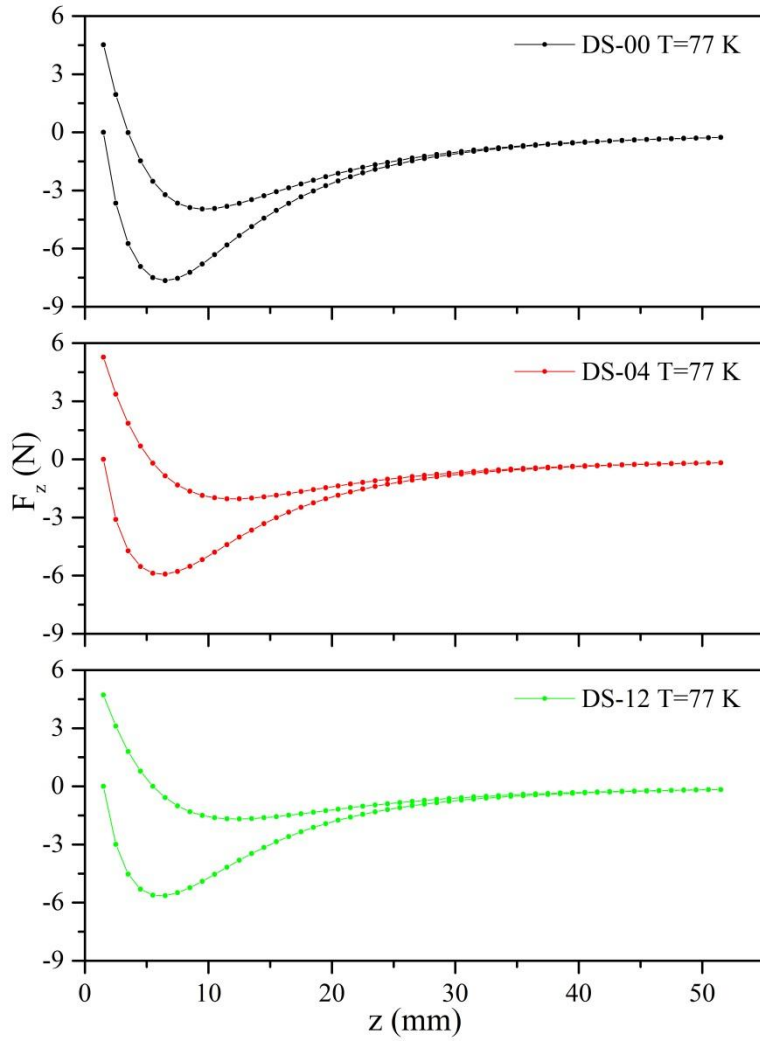
Şekil 90. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 83 \text{ K}$ 'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.



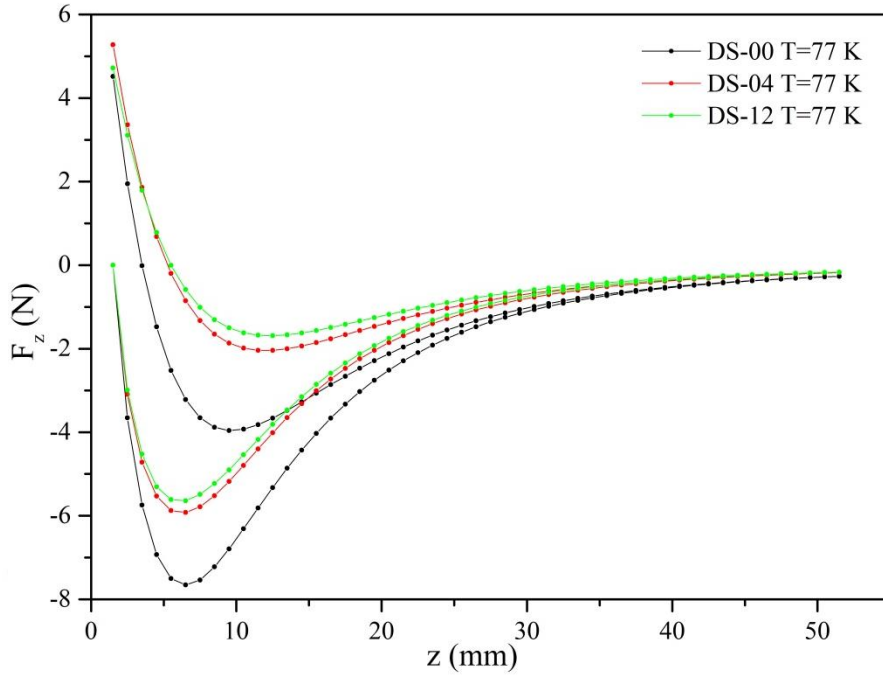
Şekil 91. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 80$ K'de dikey kuvvet (F_z)-dikey mesafe (z) grafikleri.



Şekil 92. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 80$ K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

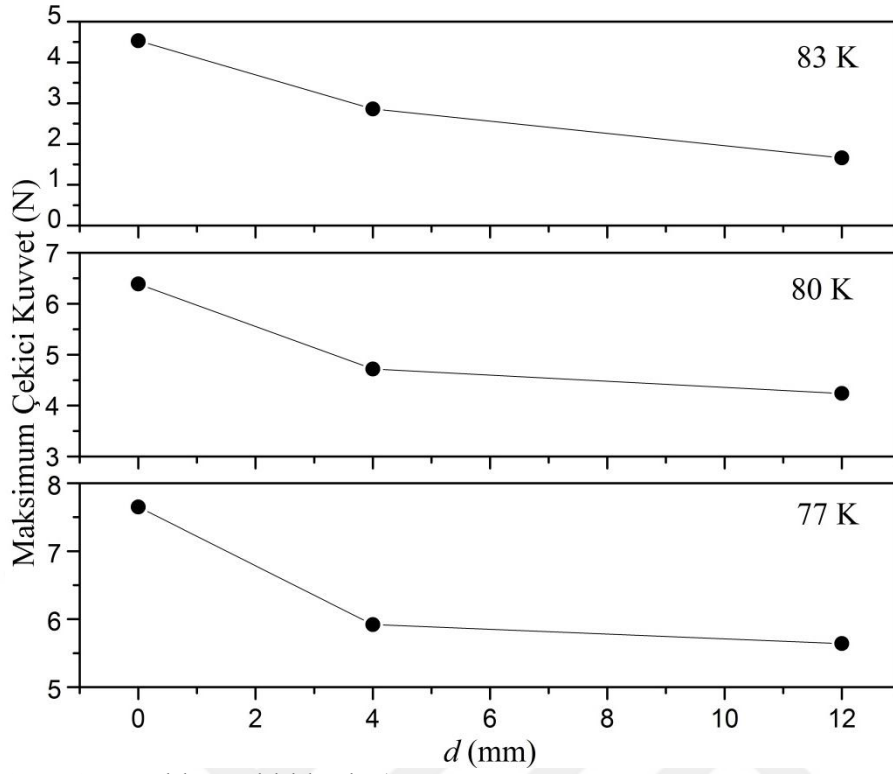


Şekil 93. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 77$ K'de dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

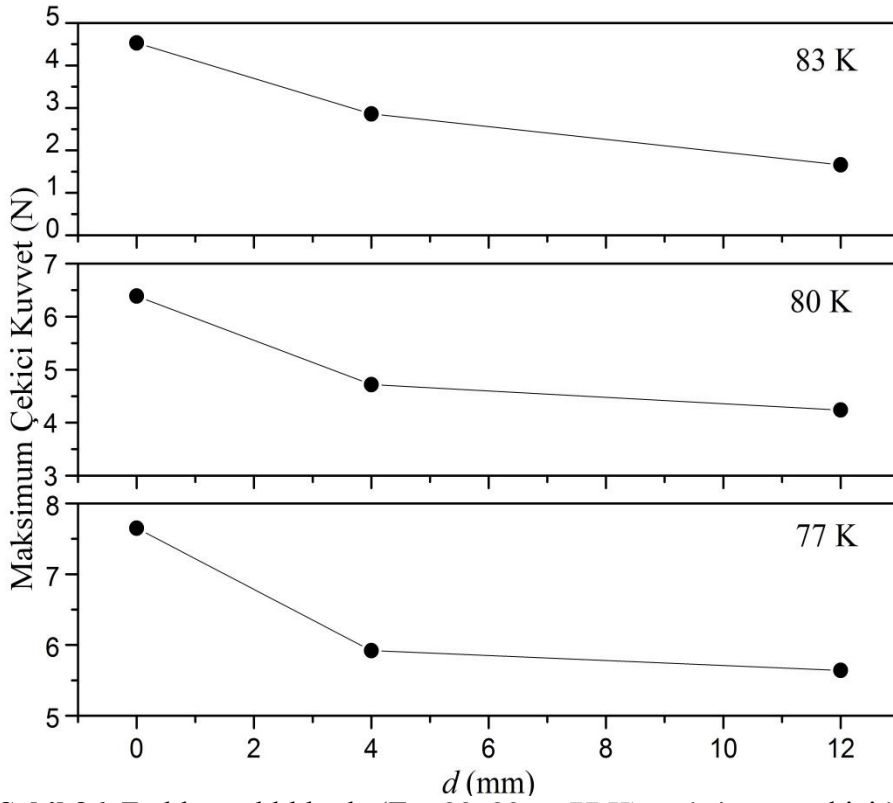


Şekil 94. DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için FC rejimi altında $T = 77$ K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri.

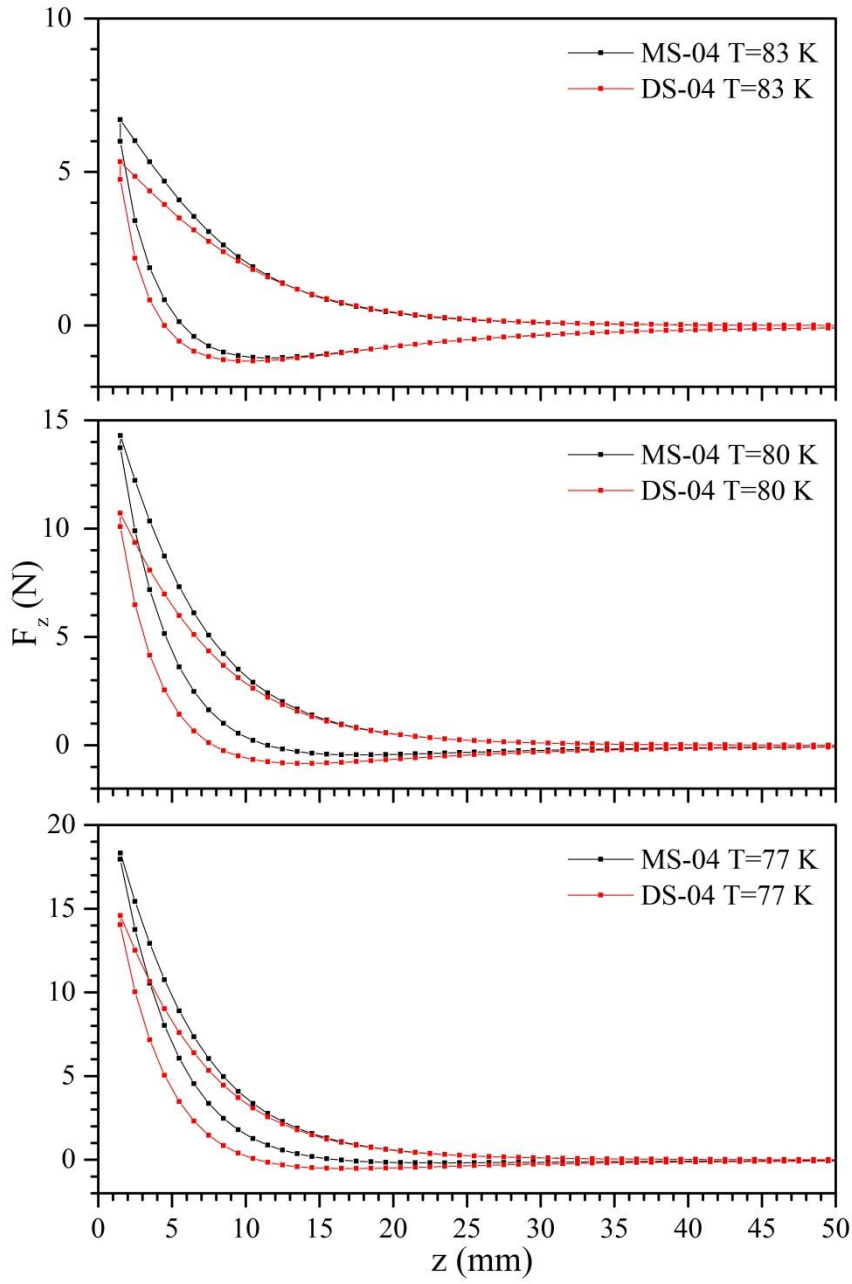
DS-00, DS-04 ve DS-12 örnekleri için $T = 83, 80$ ve 77 K ölçüm sıcaklıklarında maksimum itici ve maksimum çekici kuvvetin d mesafesine göre değişim grafikleri sırasıyla Şekil 95 ve Şekil 96'da gösterilmektedir. Ayrıca MS-04 ve DS-04 örnekleri için ayrıntılı olarak $T = 83, 80$ ve 77 K ölçüm sıcaklıklarında ZFC rejimi altında karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri sırasıyla Şekil 97 ve Şekil 98'de gösterilmektedir.



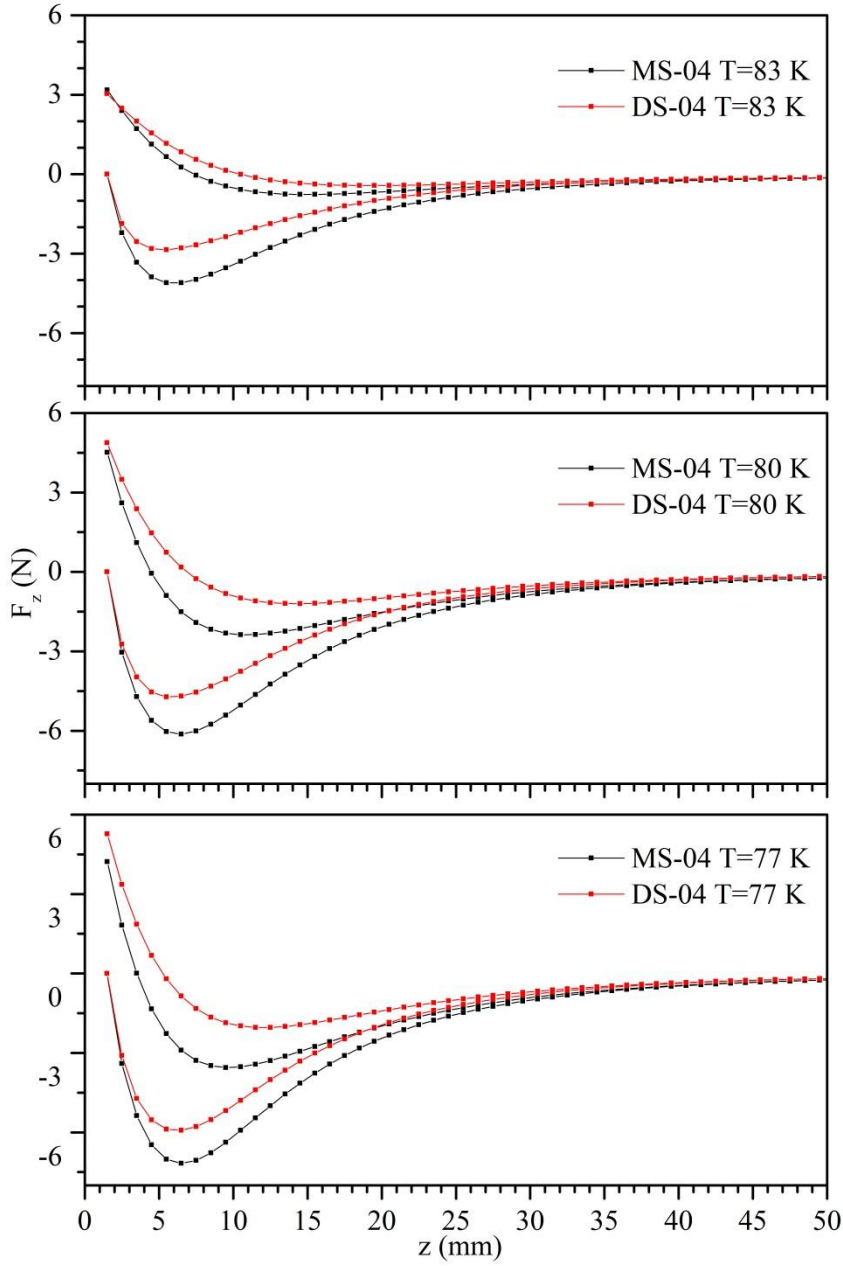
Şekil 95. Farklı sıcaklıklarda ($T = 83, 80$ ve 77 K) maksimum itici kuvvet- çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri.



Şekil 96. Farklı sıcaklıklarda ($T = 83, 80$ ve 77 K) maksimum çekici kuvvet- çekirdekler arası mesafe (d) değişimi grafikleri.



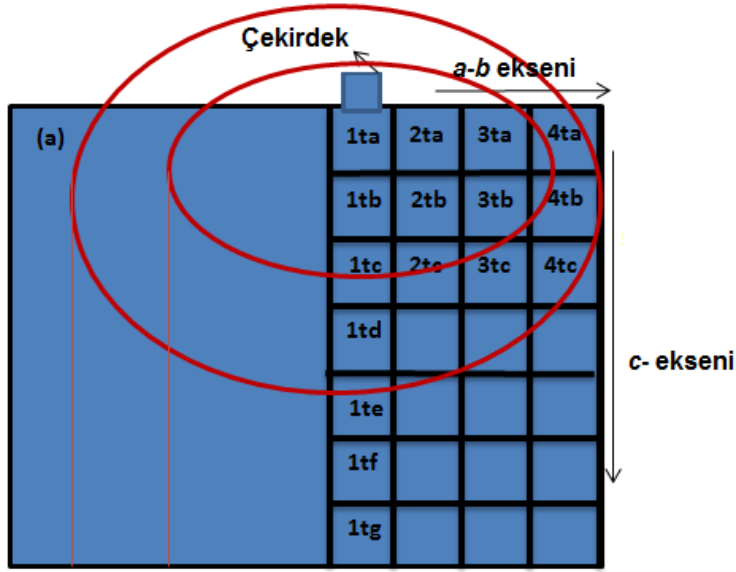
Şekil 97. MS-04 ve DS-04 örnekleri için ZFC rejimi altında $T= 83, 80$ ve 77 K'de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri



Şekil 98. MS-04 ve DS-04 örnekleri için FC rejimi altında T= 83, 80 ve 77 K’de karşılaştırmalı dikey kuvvet (F_z) - dikey mesafe (z) grafikleri

3.3. Manyetizasyon Ölçümleri ve Kritik Manyetik Alan Hesaplamaları

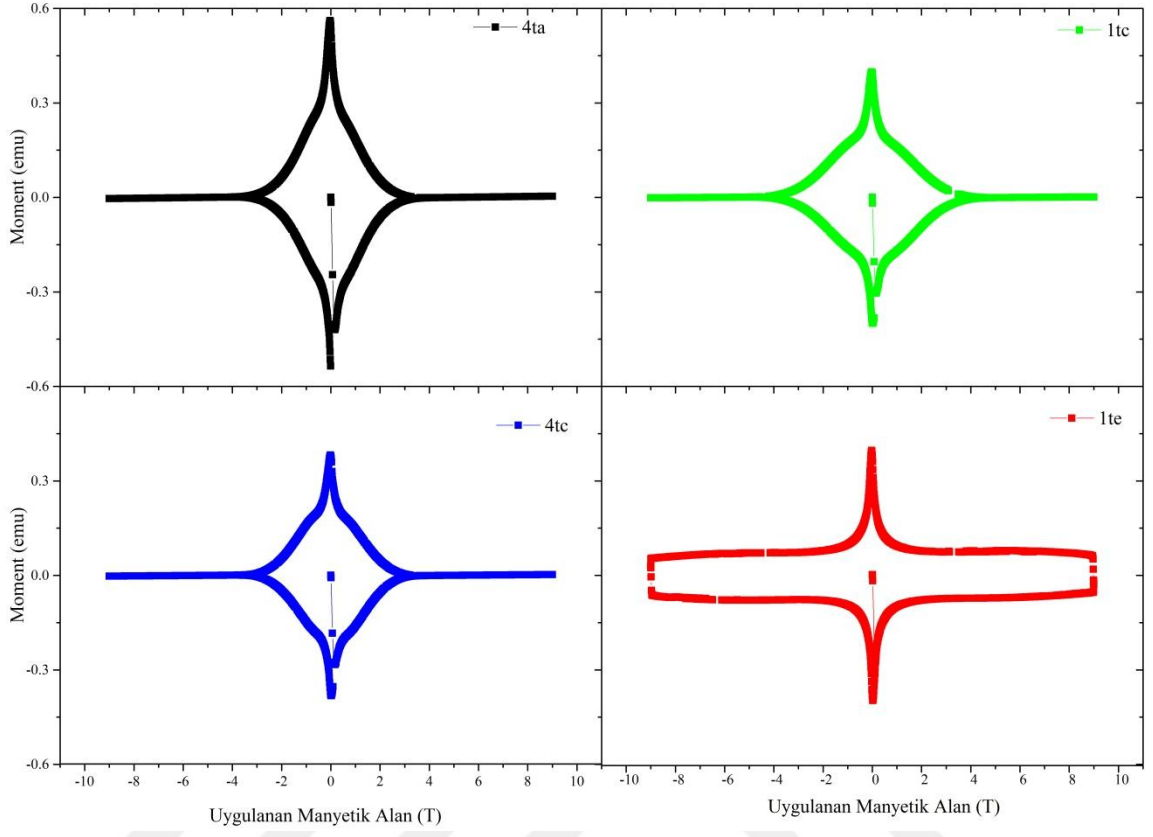
Y20 örneğinin farklı bölgelerinden (yerleirnden) kesilen $\sim 1.50 \text{ mm} \times 1.50 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$ 'lik kesitlerin VSM sistemi kullanılarak $T = 77 \text{ K}$ sıcaklığında Manyetizasyon (M) – Uygulanan manyetik alan (H) ölçümleri sonuçları Şekil 99’da görülmektedir. Seçilen bir kesitin (1te) farklı sıcaklıklarda (37, 47, 57, 67 ve 77 K’de) M-H ölçümleri yapılmıştır.



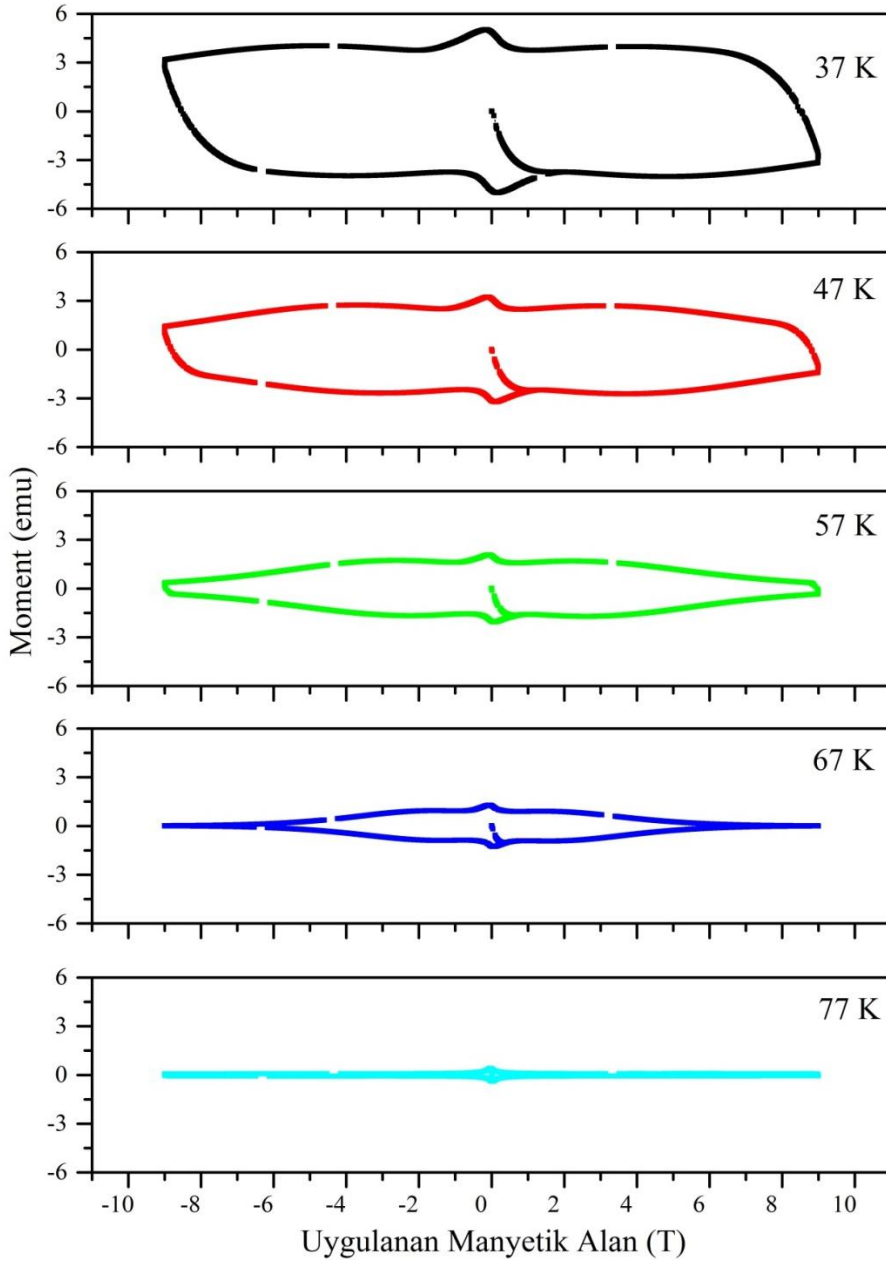
Şekil 99. Y04 örneğinin farklı bölgelerden kesitlerinin şematik gösterimi

3.3.1. Manyetizasyon Ölçümleri

1tc, 1te, 4ta ve 4tc kesitlerinin 77 K'deki manyetizasyon-manyetik alan ölçümleri karşılaştırmalı olarak Şekil 100'de gösterilmiştir. 1te kesitinin farklı sıcaklıklardaki (77, 67, 57, 47 ve 37 K) manyetizasyon-manyetik alan ölçümleri de karşılaştırmalı olarak Şekil 101'de verilmiştir.



Şekil 100. 1tc, 1te, 4ta ve 4tc kesitlerinin 77 K'deki manyetizasyon-uygulanan manyetik alan ölçümleri

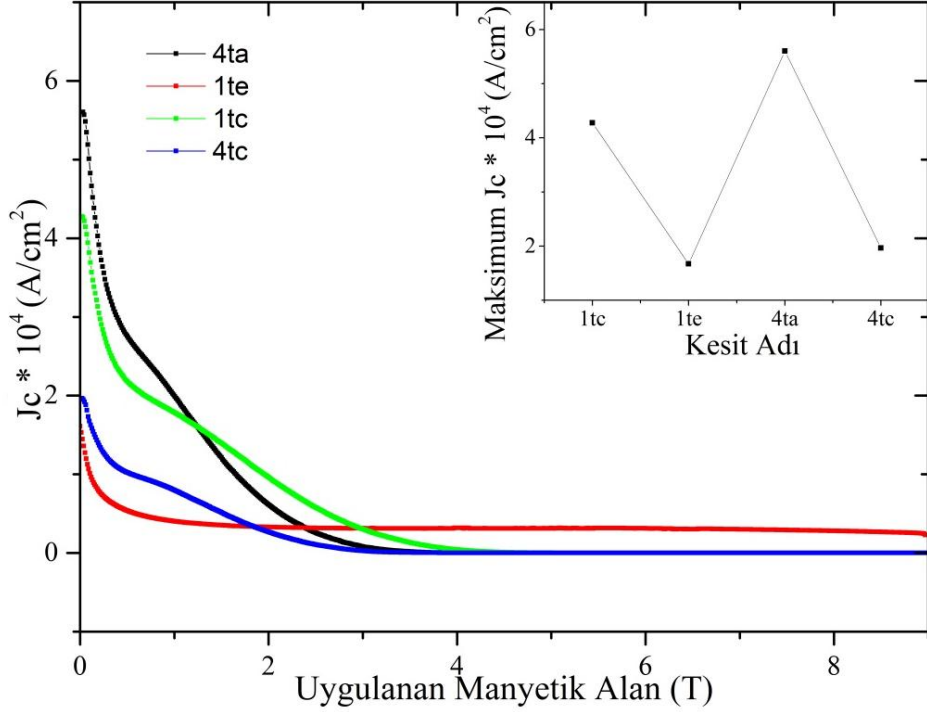


Şekil 101. 1te kesitinin 77, 67, 57, 47 ve 37 K'deki manyetizasyon-uygulanan manyetik alan ölçümleri.

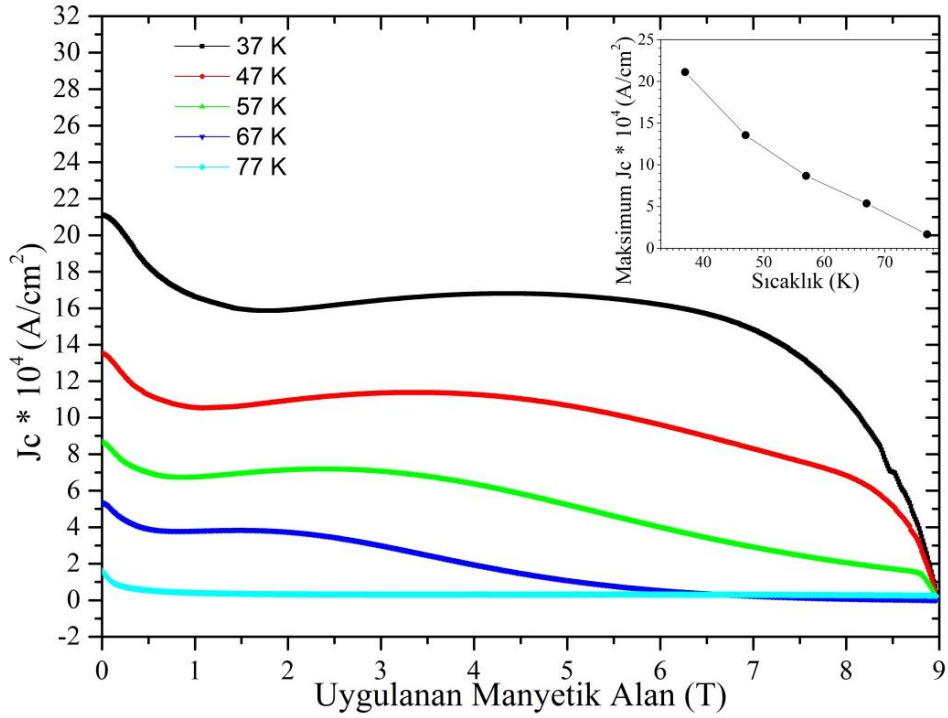
3.3.2. Kritik Akım Yoğunluğu Hesaplamaları

Şekil 100 ve Şekil 101 grafikleri analizinden M_+ ve M_- noktalarını bulduk. Bean'in kritik durum modeli (Bean,1964) olan $J_c = \frac{20(M_+ - M_-)}{a(1 - \frac{a}{3b})abc}$ formülü kullanılarak farklı bölgelerinden kesilen Y20 örneğinin farklı kesitleri (1tc, 1te, 4ta ve 4tc) 77 K'deki ve 1te kesitinin ise farklı sıcaklıklardaki (77, 67, 57, 47 ve 37 K) kritik akım yoğunlukları

hesaplandı. 1tc, 1te, 4ta ve 4tc kesitlerinin 77 K'deki ve 1te kesitinin 77, 67, 57, 47 ve 37 K'deki kritik akım yoğunlukları sırasıyla Şekil 102 ve Şekil 103'te gösterilmiştir.



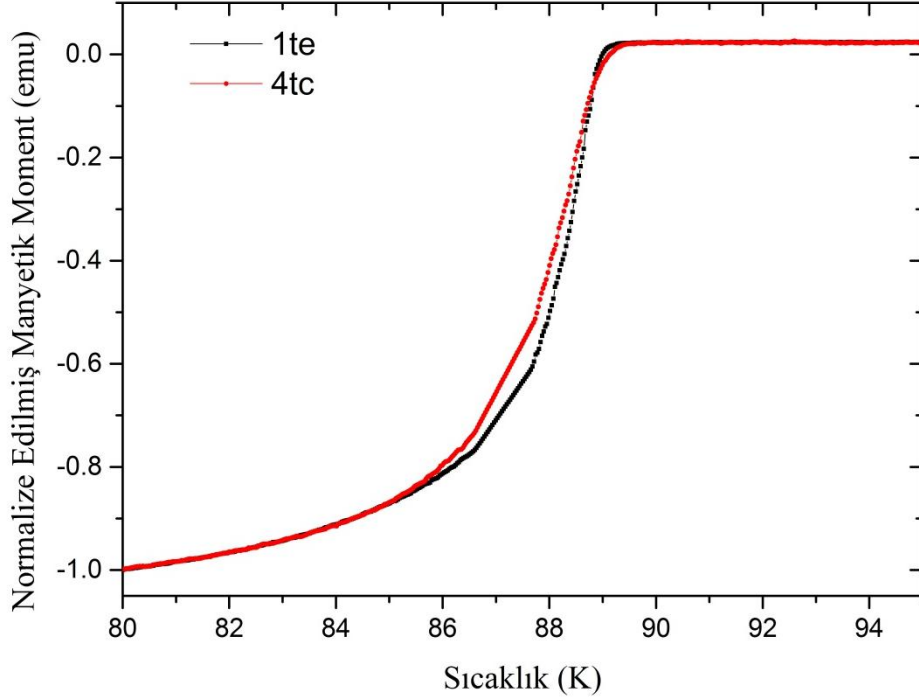
Şekil 102. 1tc, 1te, 4ta ve 4tc kesitlerinin 77 K'deki kritik akım yoğunlukları.



Şekil 103. 1te kesitinin 77, 67, 57, 47 ve 37 K'deki kritik akım yoğunlukları.

3.3.3. Manyetizasyon- Sıcaklık Ölçümleri

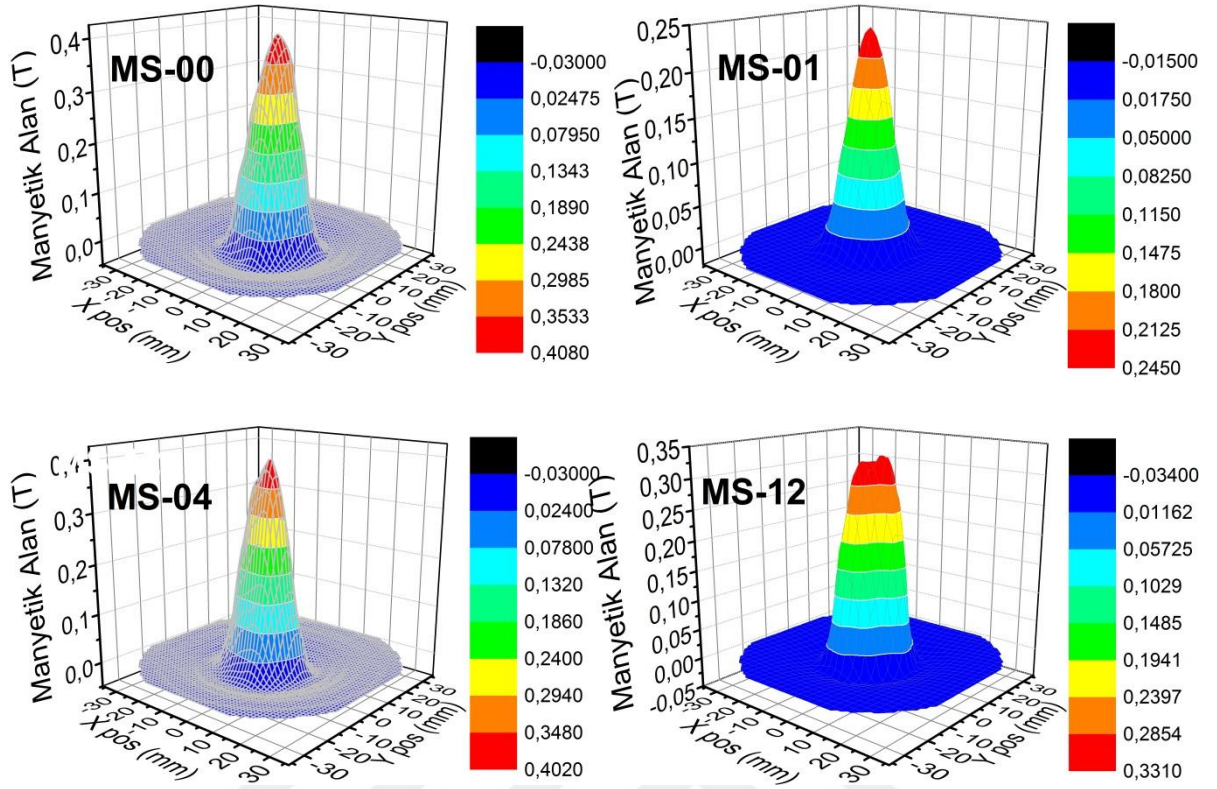
Şekil 99'da gösterilen farklı bölgelerinden kesilen Y20 örneğinin 4tc ve 1te kesitlerinin VSM sisteminde 80 – 95 K aralığındaki manyetizasyon – sıcaklık (M – T) ölçümlerinin normalize edilmiş sonuçları Şekil 104'te gösterilmiştir.



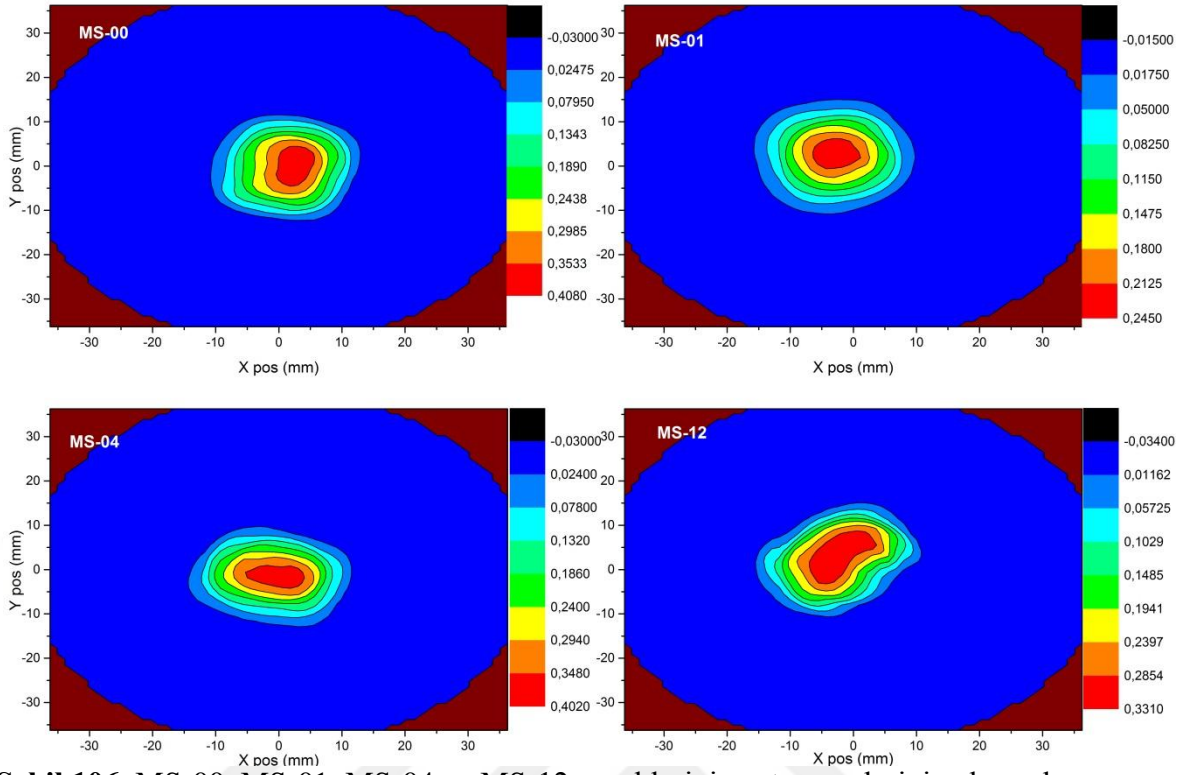
Şekil 104. 1te ve 4tc kesitlerinin normalize edilmiş manyetik moment-sıcaklık değişimi grafiği.

3.4. Tuzaklanan Manyetik Alan Ölçümleri

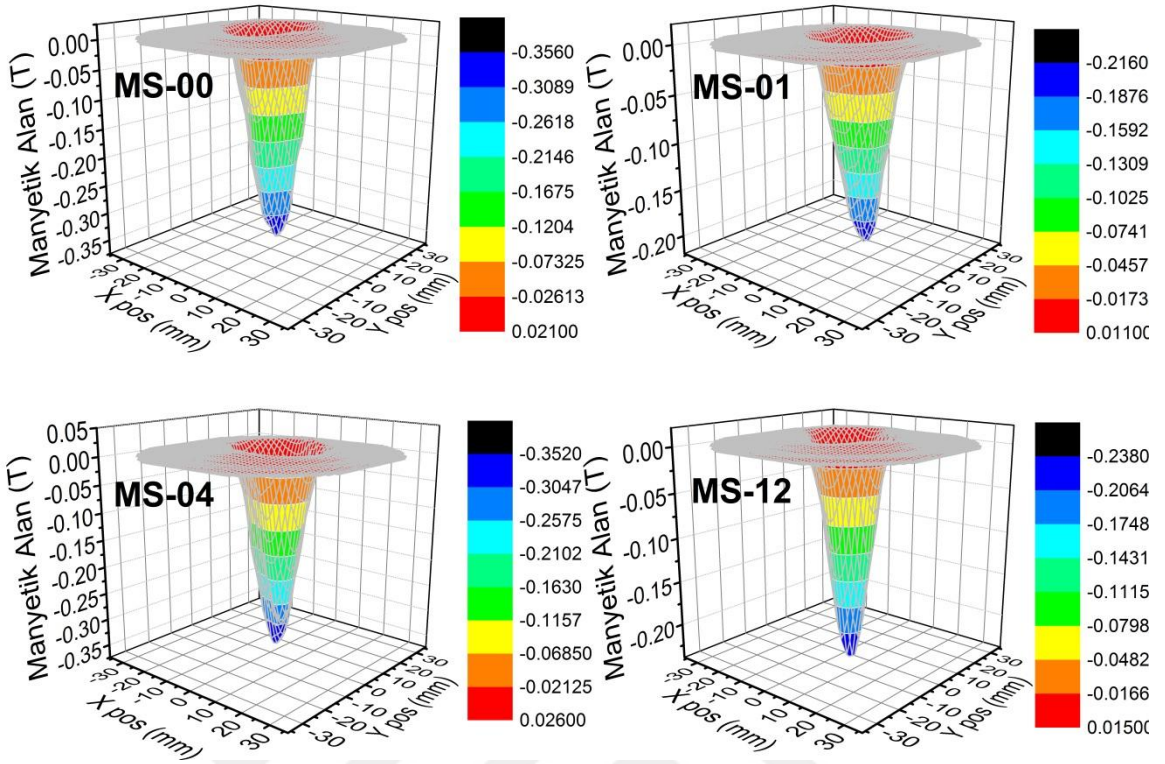
MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin üstleri zımparalandı ve parlak hale getirildi. Örneklerin yükseklikleri aynıdır. Örneklerin üst ve alt yüzeylerin manyetik alan tuzaklama ölçümleri yapıldı (Şekil 52). Ölçüm grafikleri karşılaştırmalı üst için XY pozisyon-H (Manyetik Alan) grafiği ve XY pozisyon – H kontur grafiği olarak sırasıyla Şekil 105 ve Şekil 106'da verilmiştir. Ölçüm grafikleri karşılaştırmalı alt yüzey için XY pozisyon-H (Manyetik Alan) grafiği ve XY pozisyon - H kontur grafiği olarak sırasıyla Şekil 107 ve Şekil 108'de verilmiştir. MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin alt ve üst yüzeylerinin maksimum tuzaklanan alanı değerleri Şekil 109'da verilmiştir.



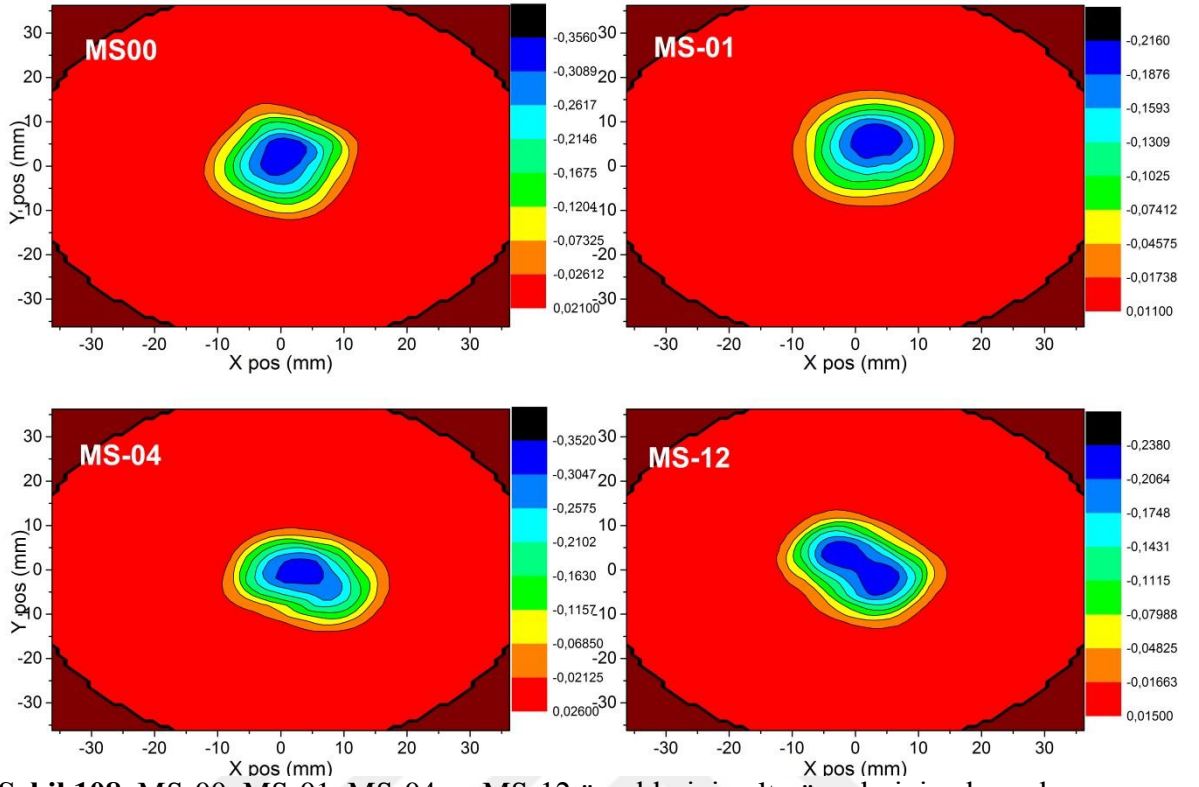
Şekil 105. MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin üst yüzeylerinin aksnel doğrultuya 30 x 30 mm²'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında aksnel yöndeki manyetik alan grafiği.



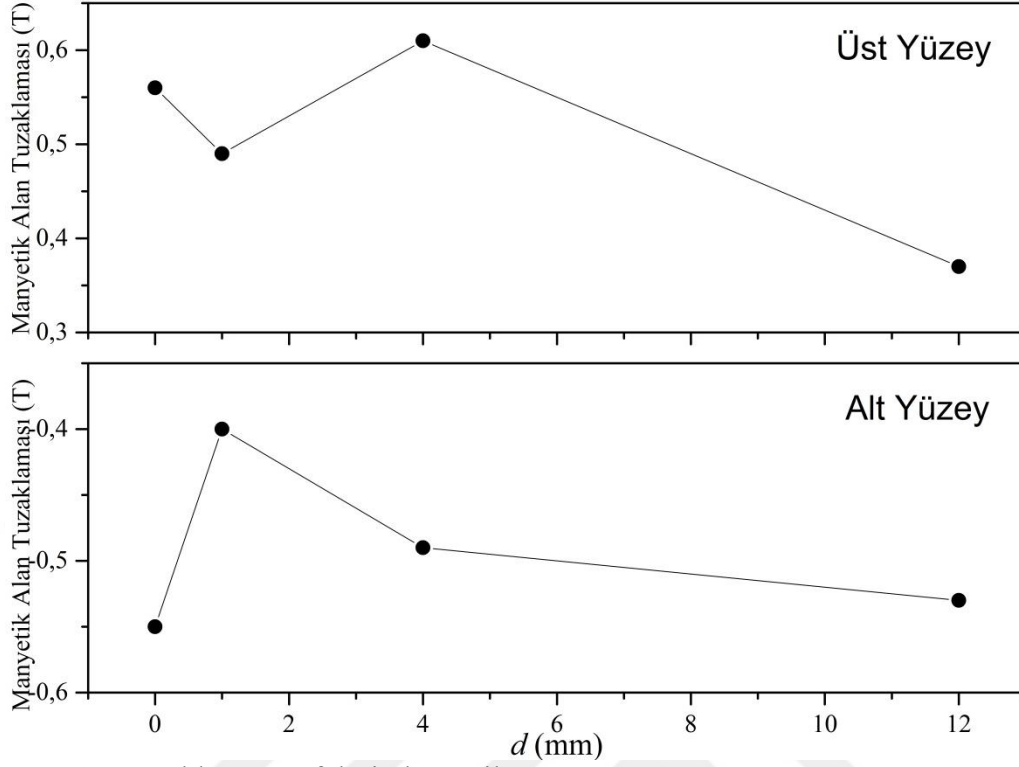
Şekil 106. MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin üst yüzeylerinin aksel doğrultuya $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında aksel yöndeki manyetik alan kontur grafiği.



Şekil 107. MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin alt yüzeylerinin aksel doğrultuya 30 x 30 mm²'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında aksel yöndeki manyetik alan grafiği.



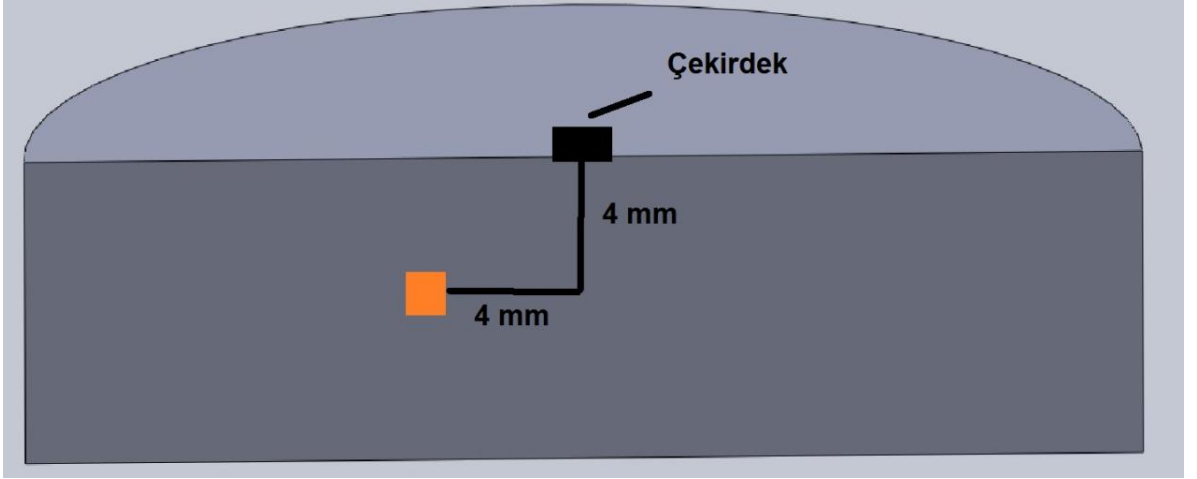
Şekil 108. MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin alt yüzeylerinin aksel doğrultuya $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 'lik (+x - +y ve -x - -y yönlerinde) dik düzlem alanında aksel yöndeki manyetik alan kontur grafiği.



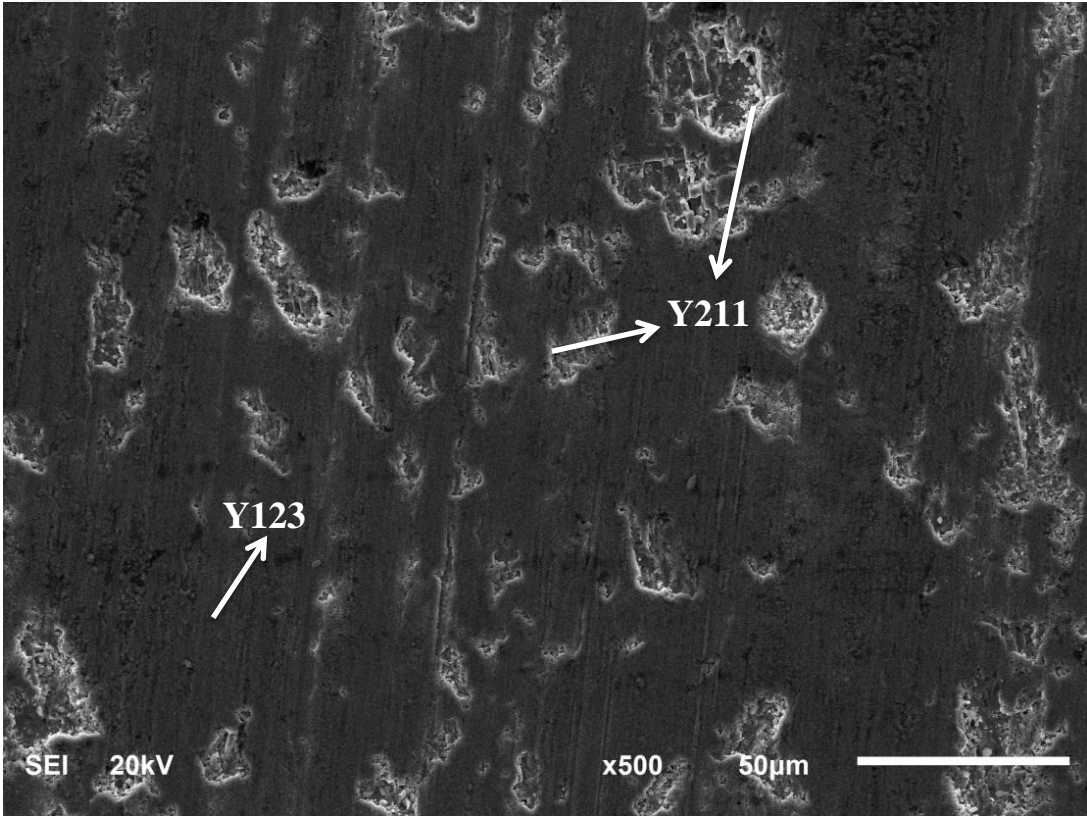
Şekil 109. Farklı d mesafelerinde üretilen MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örneklerinin alt ve üst yüzeylerinin maksimum tuzaklanan alan değerlerinin grafiği.

3.5. SEM Ölçümleri

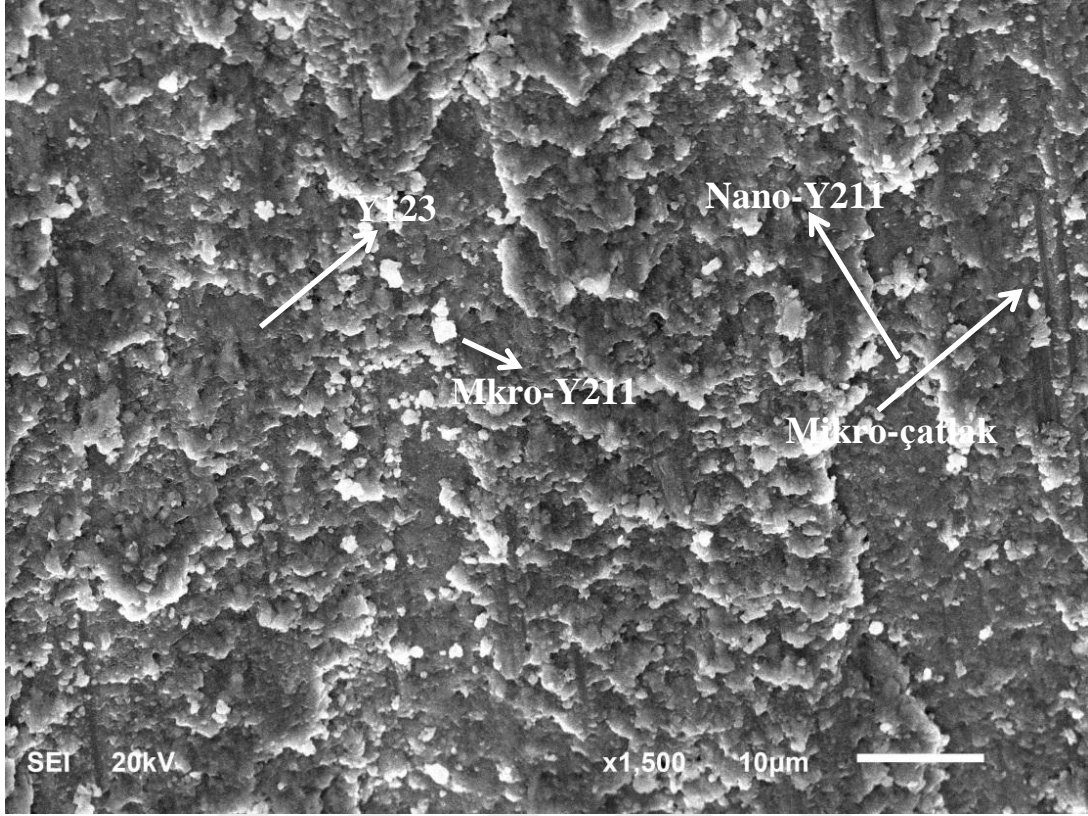
Y20 örneğinin çekirdek merkezinin yaklaşık 4 mm uzağından kesilen parçanın (Şekil 110) taramalı elektron mikroskobu ile 500, 1500, 3000, 5000, 10000 ve 15000 büyültme sonucu elde edilmiş fotoğrafları sırasıyla Şekil 111, Şekil 112, Şekil 113, Şekil 114, Şekil 115 ve Şekil 116'da gösterilmektedir.



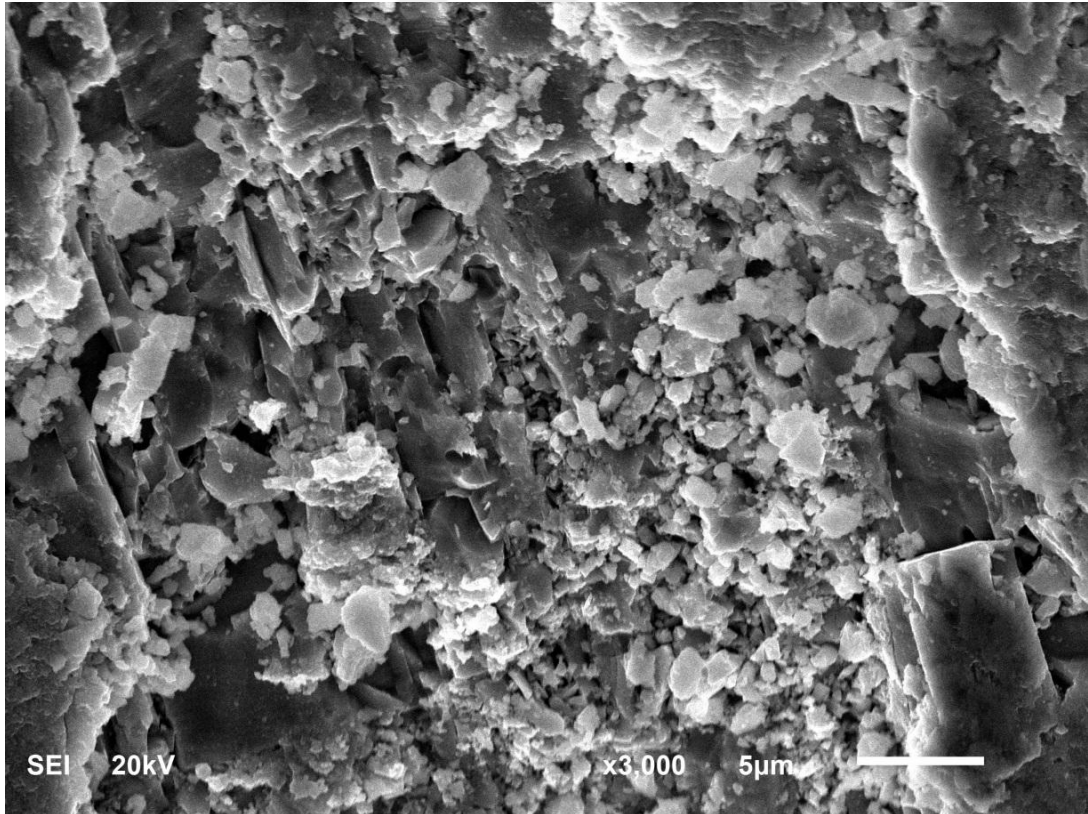
Şekil 110. Y20 örneğinin çekirdek merkezinin yaklaşık 4 mm uzağından kesilen parçanın şematik gösterimi.



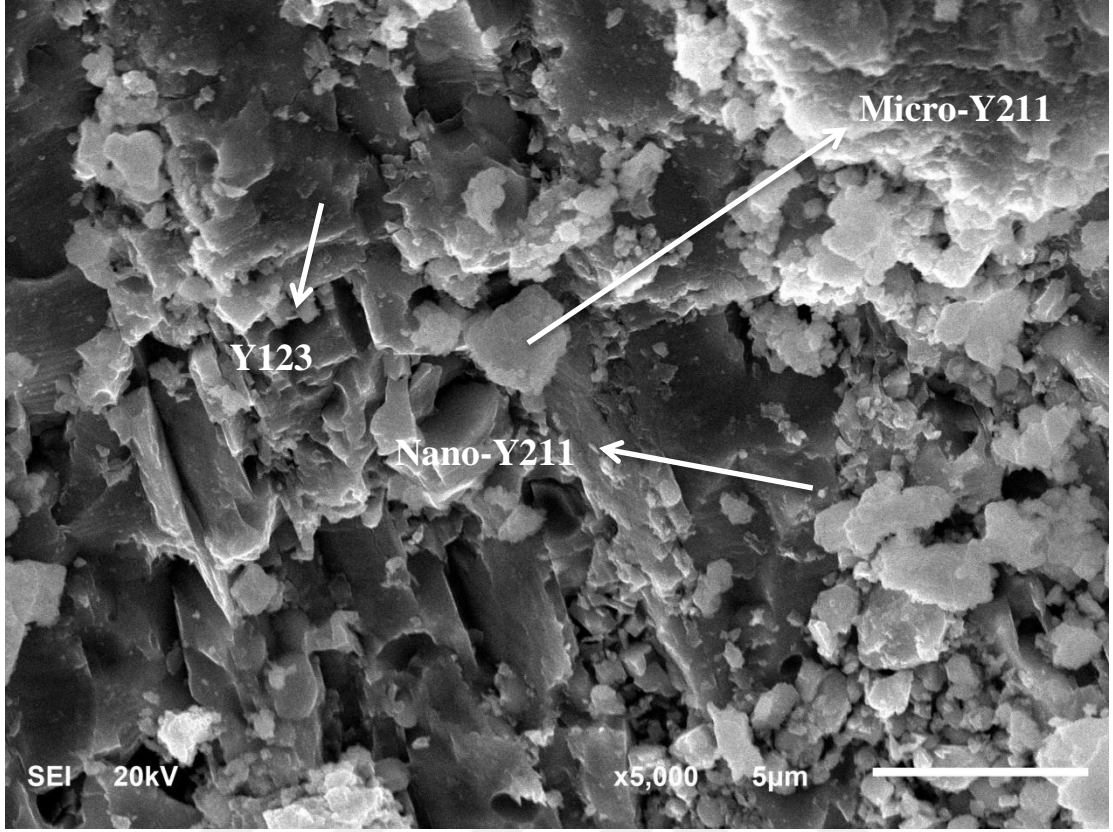
Şekil 111. Y20 örneğinin 500 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.



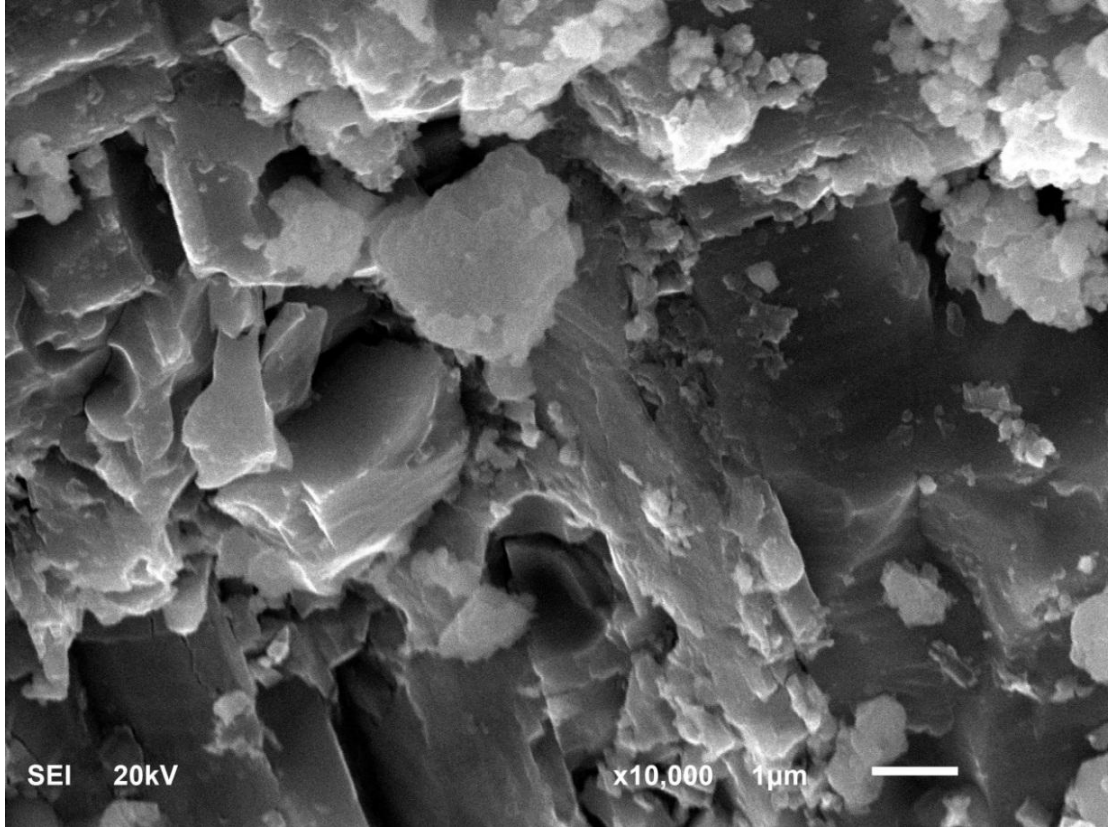
Şekil 112. Y20 örneğinin 1500 kez büyültülmüş SEM görüntüleri.



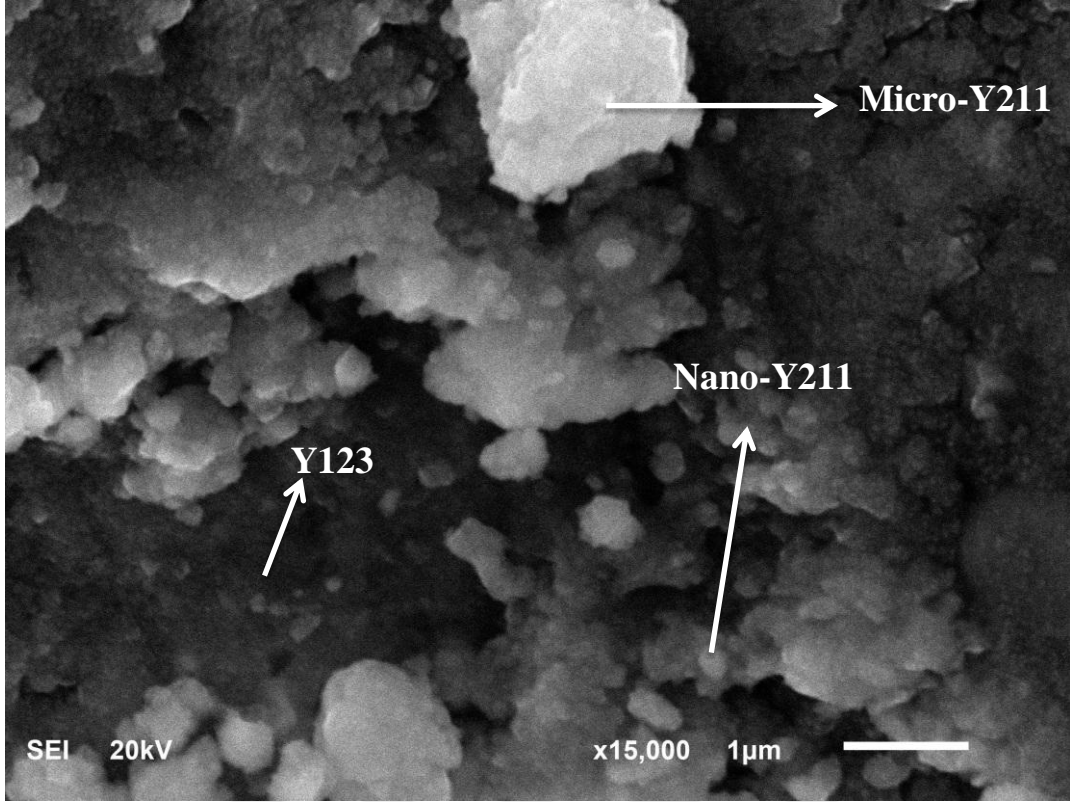
Şekil 113. Y20 örneğinin 3000 kez büyültülmüş SEM görüntüleri.



Şekil 114. Y20 örneğinin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.



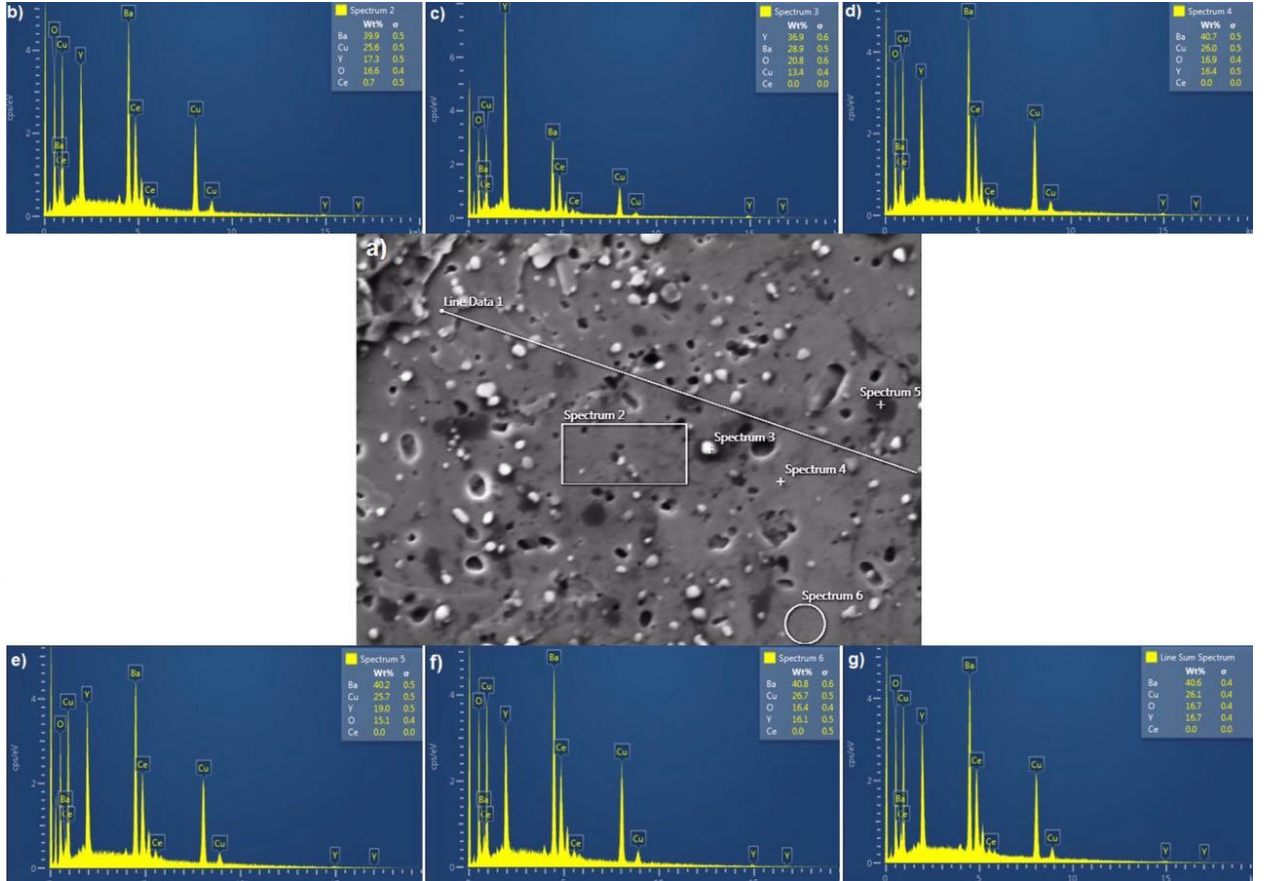
Şekil 115. Y20 örneğinin 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.



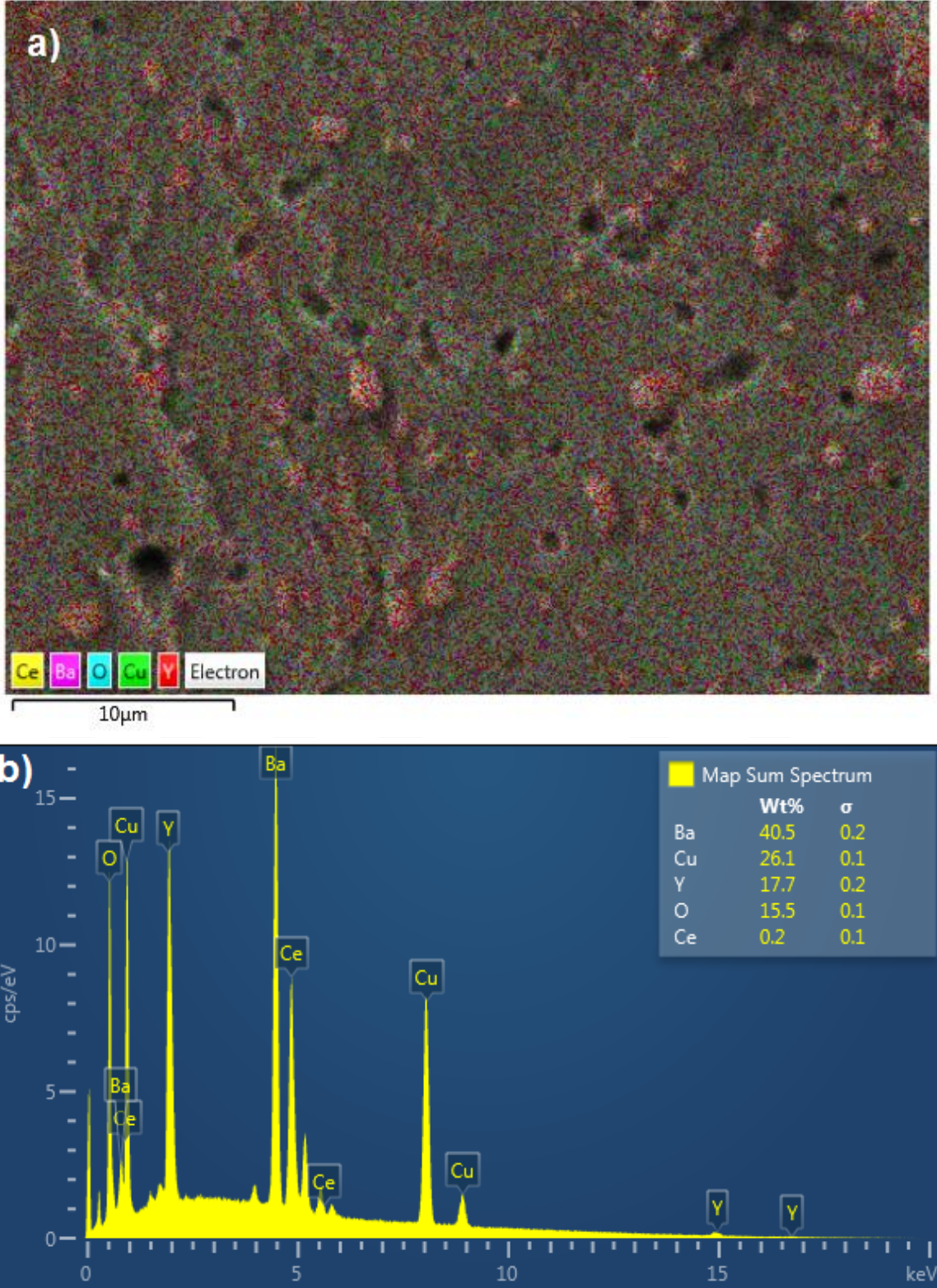
Şekil 116. Y20 örneğinin 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri.

3.6. EDS Ölçümleri

TSMG yöntemiyle üretilen Y20 isimli tek kristal YBCO numunesinin farklı noktalarından, çizgisel, dikdörtgensel, dairesel EDS analizleri sırasıyla ve SEM fotoğrafının tamamının analizlerini elementel % olarak dağılımları sırasıyla Şekil 117 ve Şekil 118’de görülmektedir. Buna göre, katkısız YBCO bileşiğinde Y, Ba, Cu ve O elementleri, grafikte keskin pikler göstermektedir. Diğer isimsiz pikler ise nikel yapıdaki numune tutucu kaptan kaynaklanmaktadır.



Şekil 117. Y20 numunesinin a) SEM fotoğrafı, b) dikdörtgenel c) noktasal d) noktasal e) noktasal f) dairesel ve g) çizgisel EDS analizlerini ve elementel % olarak dağılımları.



Şekil 118. Y₂O numunesinin (a) SEM fotoğrafı ve (b) fotoğrafın tamamının analizinin elementel % olarak dağılımları.

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

TSMG yönteminde kullanılan süperiletkenin tek kristal olarak büyümesi için öncelikle peritektik sıcaklığını belirlemek gerekmektedir. Peritektik sıcaklık örneğin tamamen sıvı + katı karışımdan, katı hale dönmeye başladığı sıcaklıktır. Her karışım farklı peritektik sıcaklığına sahip olmaktadır. Bu sıcaklığı belirlemede en etkili yol ise DTA analizidir (Muralidhar vd., 1997). Bu nedenle DTA analizi sonucunda (% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO₂ (YBCO) karışımının peritektik sıcaklığını 1000 °C olarak belirledik.

TSMG yönteminde tek kristal büyürken birçok parametre etkili olmaktadır. Bunların en önemlilerinden biri de kristalin büyürken çıktığı maksimum sıcaklık değeri olan “T_{max}” değeridir. Eğer T_{max} değeri aşırı yüksek olursa üzerindeki çekirdek erir ve süperiletken malzeme çoklu kristal yapı gösterir. T_{max} değeri aşırı düşük olması halinde ise rastgele çekirdeklenme olur. Uygun T_{max} değerinde ise hücrel büyüme gösterir. Jee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, T_{max} değeri uygun değer; birkaç derece altında olursa hücrel büyümeye ek çekirdeklenme birkaç derece üstünde olursa ise düzlemsel büyüme gösterdiğini buldular (Jee vd., 1998). Bu sonuçlar T_{max} değişimini incelediğimiz çalışmayla uyumludur. Bu nedenle çalışmada T_{max} olarak 1040 °C seçildi.

Y211 tozu 1050, 1000, 950 ve 900 °C sıcaklıklarında aynı sürelerde kalsine edildi. Kristal büyüme incelemesi sonucunda, en iyi büyüme için optimum sıcaklık değerini 900 °C olarak belirledik. Bu inceleme sonucunda tek kristal ve çoklu kristal YBCO süperiletken örneklerin üretiminde 900 °C’de kalsine edilen Y211 tozu kullanılması sonucunda tüm örneklerde kristalin tamamen büyüdüğü gözlemlendi.

T_{max}, T_{g1}, T_{g2} ve soğutma hızı denemeleri sonucunda tek kristal büyütme de etkili en iyi değerler bulundu. Bulunan bu değerler sırasıyla 1040, 1010 ve 965 °C ve 0.3 °C/sa’tir.

TSMG yöntemiyle üretilen kaliteli tek kristal örneklerde kristal yön çizgileri bulunmaktadır ve bu çizgiler kristalin peletin tamamında büyüdüğünü göstermektedir. Y20 ve Y32 örneklerinin resimlerine bakıldığında iki örneğinde tek kristal olarak

tamamen büyüdüğü gözlemlendi. Ayrıca Y32 örnekte kristal yön çizgilerinin görülmesi kristalin büyümesinin tamamlandığını ve kristalin optimum özelliklere sahip olduğunu gösterdi.

Düzlemleri paralel ve paralel olmayan çekirdeklerin farklı uzaklıklarda yerleştirildiği peletler üzerinde (MS-00, MS-01, MS-04, MS-12, DS00, DS04 ve DS12) kristal büyüme denedik ve bu konuda başarılı olduk. Bu örneklerin fotoğrafları incelendiğinde, iki çekirdek kullanılarak büyüyen kristallerin çekirdek uzaklıklarına ve düzlem yapılarına göre değişimi belirgin bir biçimde görülmektedir.

İki çekirdekli yapıda (çekirdekleri paralel olan ve paralel olmayan) ve farklı çekirdek uzaklıklarında ($d= 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12$ ve 16 mm) YBCO süperiletkenlerinin üretimini gerçekleştirdik. Ürettiğimiz örneklerin fotoğrafları, Kim ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmayla benzerlik göstermektedir (Kim vd., 2000b).

Y20 ve Y32 örneklerinin $2\theta=20-60^\circ$ arası x-ışınları kırınım desenleri incelenmiştir. XRD kırınım deseninde $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yapısına ait (003), (004), (005), (006), (007) pikleri ile Y211 fazına ait düşük şiddetli pikler görüldü. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yapısına ait piklerin şiddeti, Y211 fazına ait piklerin şiddetinden kayda değer bir biçimde yüksektir. Bu nedenle, ürettiğimiz süperiletken örnek başarılı bir tek kristal YBCO süperiletkenidir. Elde ettiğimiz sonuç Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmayla örtüşmektedir (Li vd., 2015a).

İki çekirdekli yapıda ve farklı çekirdek uzaklıklarında büyüyen YBCO süperiletkenlerinden MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 isimli örneklerin XRD analizleri sonucunda $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yapısına ait (003), (004), (005), (006), (007) pikleri ve Y211 fazına ait düşük şiddetli pikler görüldü. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yapısına ait piklerin şiddeti Y211 fazına ait piklerin şiddetinden kayda değer bir biçimde yüksek olduğu için ürettiğimiz iki çekirdekli örneklerin Y20 ve Y32 olarak isimlendirilen örneklerle benzer özellikte olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca yaptığımız bu çalışma Kim ve arkadaşlarının iki ve daha fazla çekirdekli yapıdaki YBCO süperiletkeninin XRD analizlerinden ettikleri sonuçlarla da uyumludur (Kim vd., 2001).

Y20 örneği için ZFC rejim altında T = 37, 47, 57, 67 ve 77 K sıcaklıklarında maksimum manyetik kaldırma (itici) kuvveti değerleri sırasıyla 11.23, 10.81, 10.34, 9.23 ve 7.02 N olarak bulundu. Öte yandan Y20 örneği için FC rejim altında T = 37, 47, 57, 67 ve 77 K sıcaklıklarında maksimum çekici kuvvet değerleri sırasıyla 3.25, 3.18, 3.07, 2.86 ve 2.27 N olarak bulundu. Bu sonuçlardan 77 K'deki itici ve çekici kuvvet yoğunlukları sırasıyla 4.99×10^{-3} N/mm³ ve 1.16×10^{-3} N/mm³ olarak hesaplandı. Elde ettiğimiz sonuçlar, Park ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın (YBCO tek kristalin boyutları: 50×50×22 mm³, sıvı azot sıcaklığında (77 K); itici kuvveti: 225 N, çekici kuvveti: 108 N, itici ve çekici kaldırma kuvveti yoğunlukları: 4.09×10^{-3} ve 1.96×10^{-3} N/mm³) sonuçları ile örtüşmektedir (Park vd., 2009).

Y20 örneği için FC rejim altında T = 37, 47, 57, 67 ve 77 K sıcaklıklarında maksimum yanal kuvvetleri ise sırasıyla 37, 47, 57, 67 ve 77 K'de 4.33, 4.11, 3.89, 3.54 ve 2.74 N olarak belirledik.

Y20 örneği için ZFC rejim altında T = 37, 47, 57, 67 ve 77 K sıcaklıklarında F-zaman ölçümleri yapıldı. Ölçüm sonuçlarından, sıcaklık azaldıkça kuvvet- zaman grafiğinin eğiminin arttığı görüldü. Bu sonuç Jiang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmayla uyumludur (Jiang vd., 2012).

Y20 örneği için ZFC rejim altında 77 – 100 K arasında manyetik kaldırma kuvvetinin sıcaklıkla değişim ölçümleri incelendi. Bu grafiklerden Y20 örneğinin geçiş sıcaklığının 88-90 K aralığında olduğu görüldü. Elde edilen geçiş sıcaklığı, numunenin ortalama geçiş sıcaklığını vermektedir. (Jiang vd., 2012).

Üretilen iki çekirdekli yapıdaki örneklerden çekirdekleri paralel olarak ve paralel olmayarak yerleştirilenlerden en iyi olanlar seçildi (MS00, MS01, MS04, MS12 ve MS16- DS00, DS04 ve DS12) ve manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri yapıldı.

ZFC rejim altında MS00, MS01, MS04, MS12 ve MS16 örnekleri için maksimum manyetik kaldırma (itici) kuvvet değerleri sırasıyla; T = 83 K'de 3.08, 6.45, 6.70, 3.83 ve 2.81 N, T=80 K'de 16.66, 16.36, 14.29, 12.32 ve 11.06 N ve T= 77'K de 19.38, 19.16, 18.32, 17.13 ve 13.00 N olarak bulundu.

FC rejim altında MS00, MS01, MS04, MS12 ve MS16 örnekleri için maksimum çekici kuvvet değerleri sırasıyla; T = 83 K'de 4.53, 4.068, 4.10, 2.41 ve 2.08, T=80 K'de 6.40, 6.14, 6.13, 5.41 ve 3.53 N ve T= 77'K de 7.65, 7.24, 7.17, 6.81 ve 4.29 N olarak bulundu.

ZFC rejim altında DS00, DS04 ve DS12 örnekleri için maksimum manyetik kaldırma (itici) kuvvet değerleri sırasıyla; T = 83 K'de 5.33, 3.08 ve 0.28 N, T=80 K'de 16.66, 10.71 ve 5.47 N ve T= 77 K'de 19.38, 14.59 ve 11.88 N olarak bulundu.

FC rejim altında DS00, DS04 ve DS12 örnekleri için maksimum çekici kuvvet değerleri sırasıyla; T = 83 K'de 4.53, 2.86 ve 1.66 N, T=80 K'de 6.39, 4.72 ve 4.24 N ve T= 77'K de 7.65, 5.92 ve 5.64 N olarak bulundu.

20 mm ve 32 mm çaplarındaki tek kristal örneklerin sıvı azot sıcaklığında (77 K) manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinden alınan maksimum itici ve çekici kuvvet değerlerinin örnek hacmine oranından itici ve çekici kuvvet yoğunlukları hesaplandı. Bu sonuçlar Y32 ve Y20 örnekleri için sırasıyla; itici kuvvet 4.99×10^{-3} N/mm³ ve 4.44×10^{-3} çekici kuvvet için ve 1.16×10^{-3} N/mm³ hesaplandı. Buna göre farklı çaplarda (20 ve 32 mm) ürettiğimiz örneklerin manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları birbirine çok yakındır. Bu sonuçta ürettiğimiz örneklerin literatürdeki değerlerle uyumlu olduğunu göstermektedir (Park vd., 2009).

Ölçüm grafiklerinden d , çekirdek mesafesi, artışının manyetik alan tuzaklamasındaki görünümüleri görülmektedir. Buna göre MS-00, MS-01, MS-04 ve MS-12 örnekleri için tuzaklanan alan üst yüzey ölçümlerinden sırasıyla 0.56, 0.49, 0.61 ve 0.37 T ve alt yüzey ölçümlerinden ise sırasıyla -0.55, -0.40, -0.49 ve -0.53 T elde edilmiştir.

Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri incelendiğinde; pelet üzerine yerleştirilen çekirdeklerin düzleminin paralel ya da paralel olmaması manyetik kaldırma kuvveti değerini doğrudan etkilemektedir. Burada pelet üzerine yerleştirilen çekirdeklerin düzleminin paralel olması sol taraftaki çekirdeğin (100) düzleminin sağ taraftaki çekirdeğin (100) düzlemiyle paralel olması ((100) // (100)) anlamına gelmektedir. Öte

yandan, pelet üzerine yerleştirilen çekirdeklerin düzlemlerinden sadece tek düzlemin paralel olması sol taraftaki çekirdeğin (100) düzleminin sağ taraftaki çekirdeğin (001) düzlemiyle paralel olması ($(100) // (010)$) anlamına gelmektedir. Çekirdek düzlemlerinin bu şekilde olması manyetik kaldırma kuvvetini de doğrudan etkilemektedir. Çünkü manyetik kaldırma kuvvetine etkileyen parametrelerden biri de kritik akım yoğunluğudur. Kritik akım yoğunluğu da Y123 kristali içindeki kristalografik (aynı ya da farklı düzlemlerin yapısal) yönelimine bağlıdır. Kritik akım yoğunluğunun Y123 kristalinin üst (100) düzlemi ($a - b$ düzlemi) boyunca değeri, üst (001) düzlemi (c - eksen) boyunca değerinden daha yüksektir. Çekirdeklerin düzlemleri ($100) // (100)$ şeklinde olan iki Y123 kristali de c -eksenine dik büyümüştür. Ancak çekirdeklerin düzlemleri ($100) // (010)$ şeklinde olan iki Y123 kristalinden; kristallerden biri (100) c -eksenine dik olarak büyürken diğeri (001) c -eksenine paralel olarak büyümüştür. Sonuç olarak çekirdeklerin düzlemleri ($100) // (100)$ şeklinde olan (c -eksenine dik olarak büyüyen) örneklerin (MS04 ve MS12) manyetik kaldırma kuvveti değeri çekirdeklerin düzlemleri ($100) // (010)$ şeklinde olan (c -eksenine dik ve paralel olarak büyüyen) örneklerden (DS04 ve DS12) daha yüksektir (Kim vd., 2001).

Y123 pelet üzerine yerleştirilen çekirdeklerin ($(100) // (100)$ ve ($100) // (010)$) aralarındaki mesafenin (d) değişiminin manyetik kaldırma kuvveti ve tuzaklanan alan üzerindeki etkisi incelenmiştir. d mesafesinin artması örnekte büyüyen iki kristal arasında yer alan sınır bağlantı yerlerine (eklemlerine) yakın olan yerlerde “artık eriyik fazların” oluşmasına sebep olmaktadır. Artık eriyik oluşturan fazların varlığı sonucunda, iki tane katı-sıvı ara yüzü sınır eklemlerine dâhil edilir. Tanecik eklemlerinde artık eriyik oluşturma fazlarının varlığının, iki Y123 tanesinin zayıf bağlantısının başlıca nedeni olduğu söylenebilir, bu da tanecik eklemlerinde manyetik kaldırma kuvveti ve tuzaklanan alan azalmasına neden olur. İki çekirdek çok yakın yerleştirildiğinde erime fazının çok az olduğu düşünülmektedir. Daha küçük d değerinde, eriyik fazın iki Y123 tanesi arasındaki boşluk alanına sıkışma olasılığı düşüktür. Bunun nedeni, büyüme aşamasının başlangıcında, iki Y123 tanesinin eriyik fazların sıkışmadan önce birbirlerine çarpmasıdır. Buna karşılık, örneklerin daha büyük d değerlerinde ara boşluklarında daha fazla eriyik fazlar sıkışır. d değeri daha büyük olduğunda, iki büyüyen Y123 tanesinin birbirine çarpması uzun zaman almaktadır. Eriyik faz, düzgün ve düzenli olarak tabana doğru iki Y123 tanesinin büyümesiyle

yapılan uzun ve dar boşlukta kolaylıkla sıkışabilir. Erime kompozisyonu Y123 bağlantı çizgisi üzerinde bulunuyorsa, aralık boşluğuna sıkışan eriyik faz giderilebilir. Sıkışan eriyik faz Y211 parçacıkları ile temas ettiği sürece Y123 fazı içinde katılacaktır. Bununla birlikte, bileşim Y123 eklem çizgisinde genellikle stokiometriğe uygun olmayan ya da çeşitli nedenlerden ötürü Y211 parçacıklarından izole edilmiştir. Örneğin, baryum taşıyan bileşikler Y211 parçacıklarını arıtmak (örneğin erimesini engellemek) için Y123 tozuna PtO₂ veya CeO eklenir. Ürettiğimiz iki çekirdekli örneklerde ise artık eriyik oluşturma fazları, CeO ilavesiyle birlikte kristaller de bu fazların daha az olduğu anlaşılabilir. Stokiyometrik olmayan eriyik bir Y123, kristal olarak büyüyemez ve dolayısıyla boşluk alanında BaCuO ve CuO formunda kalır (Aselage, 1994; Kim vd., 1995; Kim, 1996; Miletich vd.,1993).

Sonuç olarak çekirdekler arasındaki mesafenin artmasından kaynaklı kristalin büyüme sınır bölgelerine yakın artık eriyik fazların varlığı nedeniyle sınır eklemlerinde manyetik özelliklerin düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca bulgular kısmında belirttiğimiz grafiklerden manyetik kaldırma kuvvet (maksimum itici ve çekici kuvvet) değerlerinin ve (üretilen örneğin üst ve alt yüzeyin) tuzaklanan alan ölçüm değerlerinin çekirdekler arası mesafe (*d*) arttıkça düşüş gösterdiği görülmüştür. Elde ettiğimiz sonuçlar, YBCO süperiletkenine çoklu Sm123 çekirdekleriyle Kim ve arkadaşlarının yaptığı çalışmayla uyum göstermektedir (Kim vd., 2000).

Y20 örneğinin kesit ölçüleri 1.5×1.5×1 mm³ boyutlarında olacak şekilde kesildi ve 80 – 95 K aralığında manyetik moment – sıcaklık (M - T) (4tc ve 1te kesitleri için) ve 77 K’de manyetizasyon - uygulanan manyetik alan (M - H) (1tc 1te, 4ta ve 4tc kesitleri için) olacak şekilde ölçümleri yapıldı. Ayrıca ölçülen kesitlerden 1te örneğinin 37, 47, 57, 67 ve 77 K’de M – H ölçümleri yapıldı.

Manyetizasyon - uygulanan manyetik alan eğrilerinden Bean’in kritik modeli kullanılarak her bir kesit için ve 1te örneğinin 37, 47, 57, 67 ve 77 K’de kritik akım yoğunlukları hesaplandı. 1tc, 1te, 4ta ve 4tc kesitleri için 77 K’de kritik akım yoğunlukları sırasıyla 4.3×10⁴, 1.7×10⁴, 5.6×10⁴ ve 2.0×10⁴ A/cm² olarak bulundu. Elde ettiğimiz sonuçlar Pathak ve arkadaşlarının yaptığı farklı kesitler alınan tek kristal YBCO örneğinin kritik akım yoğunluğu değerleriyle uyum göstermektedir (Pathak vd.,

2009). Y20 tek kristal süperiletkeninin merkezinden uzakta farklı bölgelerindeki kritik akım yoğunluğu sonuçlarının nedeni; Y211 konsantrasyonunun (itme / sıçrama fenomeni olarak adlandırılan) çekirdeğin kristaline olan uzaklığı arttıkça arttığı kabul edilir (Endo vd., 1996b).

Kristalin çekirdeğe uzak olan üst tarafındaki (4ta-1tc) kritik akım yoğunluğu değeri (5.6×10^4 ve 4.3×10^4 A/cm²) alt tarafındaki (4tc-1te) kritik akım yoğunluğu değerinden daha fazladır (2.0×10^4 ve 1.7×10^4 A/cm²). 1te örneğinin 37, 47, 57, 67 ve 77 K'de kritik akım yoğunlukları 21.1×10^4 , 13.6×10^4 , 8.7×10^4 , 5.40×10^4 ve 1.7×10^4 A/cm² olarak bulundu. Kritik akım yoğunlukları manyetik kaldırma kuvvetini etkileyen ana parametrelerden biridir (Murakami, 1992). Numunenin kritik akım yoğunluğu numunenin soğuma sıcaklığıyla ters orantılıdır. Numune sıcaklığı düştükçe kritik akım yoğunluğu yükselmektedir (Van der Laan vd., 2001). Bu sonuçlarda Y20 örneğinin düşük sıcaklıklardaki (37, 47, 57, 67 ve 77 K'de) manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sonuçlarıyla kritik akım yoğunluğu ölçüm sonuçları örtüşmektedir.

Manyetik moment – sıcaklık ölçümleri yapılan 4tc ve 1te örnekleri incelendiğinde; 4tc numunesinin başlangıç geçiş kritik sıcaklığı yaklaşık 89.3 K, 1te örneğinin ise biraz daha düşük bir kritik sıcaklık değeri yaklaşık 89.1 K olarak ölçüldü. YBCO örneğinde T_c 'nin bu farklılığa yetersiz oksijen verme sürecinin sebep olduğu düşünülmektedir (Li vd., 2015b). Öte yandan manyetik kaldırma kuvvet – sıcaklık ölçümlerinde Y20 örneğinin ortalama geçiş sıcaklığı 88-90 K aralığında olduğu tespit edildi. Bu sonuçta Y20 örneğinden farklı kesitlerin kritik geçiş sıcaklık değişimiyle uyumludur.

YBCO kristalinin çekirdeğinden 4 mm uzaklıkta üst ve alt yüzeyinden alınan kesitin SEM ve EDS analizleri ile örneğin kristal (mikro-) yapısı hakkında bilgi edinildi. SEM analizinde düşük büyütme yapılan YBCO tek kristalinde, Y123 matrisinde hem mikro-Y211 parçacıkları hem de nano-Y211 parçacıkları gözlemlendi. Mikro-Y211 parçacıklarının boyutları esas olarak 3 µm'den daha azdır. Ayrıca mikro-çatlaklar yine düşük büyütme yapılan YBCO tek kristalinde gözlemlendi. YBCO örneği için mikro-çatlak da oksijenasyon ve eritme-yönlendirme işlemleri sırasında elde edilmiş olabilir (Pathak vd., 2009). Yüksek büyütme yapılan YBCO örneğinde ise, nano-Y211 parçacıklarının boyutu birkaç nanometreden yaklaşık yüz nanometreye kadar artmış olabilir ve bu

sonuç daha iyi YBCO tek kristal külçe performansı için daha etkili akı çivileme merkezleri olarak görev yapmasını sağlayabilir (Li vd., 2015a). (% 75 Y123 ve % 25 Y211) + % 0.5 CeO süperiletken örneğin noktasal, çizgisel, dairesel, dikdörtgensel ve tamamının EDS analizlerinden ise örnek içindeki tüm elementlerin kütlece % oranları belirlenmiştir. Bu analizler yardımıyla örnek içindeki elementlerin farklı bölgelerindeki (Y123 yapısı içinde mikro-Y-211 ve nano-Y211 parçacıkları içindeki) elementel oranlar ayrıntılı olarak belirlendi. YBCO tek kristal süperiletken örneğinin içinde Y, Ba, Cu, O ve Ce elementleri sırasıyla % 17.7, % 40.5, % 26.1, % 15.5 ve % 0.2 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar YBCO tek kristal süperiletkeninde Y, Ba, Cu, O ve Ce elementlerinin olduğunu göstermektedir.



5. ÖNERİLER

Doktora Tezi kapsamında Üstten-Çekirdeklenmiş-Eritme-Büyüme (TSMG) Yöntemiyle süperiletken örnekler üretildi. YBCO tozu tampon yapılarak TSMG veya Üstten - Tohumlamalı - Süzme – Büyütme (TSIG) yöntemiyle örnekler üretilip onların manyetik kaldırma kuvveti incelenebilir.

Bu çalışmada tek tip mıknatista ölçümler yapıldı. Üretilen aynı süperiletken örneklerin manyetik kaldırma kuvvetleri farklı mıknatıslar kullanılarak örnek boyutlarına göre optimum mıknatıs boyutları belirlenebilir.

Doktora Tezi kapsamında ikili çekirdeklenmiş örnekler üretildi. Literatürde yer alan çalışmalara göre üçlü çekirdekli süperiletken örneklerin sıvı azot sıcaklığında manyetik kaldırma kuvveti oldukça yüksektir. 3 veya daha fazla çekirdek ile çoklu kristal yapıda süperiletken örnekler üretilip onların düşük sıcaklıkta manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri incelenebilir.

Doktora tezinde çekirdeklerin düzlemleri $(100) // (010)$ ve $(100) // (100)$ olacak şekilde süperiletken örnekler üretildi. Literatürde yer alan çalışmalara göre $(110) // (110)$ yapıdaki süperiletken örneklerin sıvı azot sıcaklığında manyetik kaldırma kuvveti oldukça yüksektir. Bu örneklerden üretilip tüm örneklerin düşük sıcaklıkta manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri incelenebilir.

Literatürde çoklu kristal yapıda üretilen örneklerin düşük sıcaklıkta tuzaklanan manyetik alan ölçümleriyle ilgili çalışma bulunmamaktadır. Üretilen $(100) // (010)$, $(110) // (110)$ ve $(100) // (100)$ çoklu kristal yapıda üretilen örneklerin düşük sıcaklıklarda tuzaklanan manyetik alan ölçümleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abrikosov, A.A., 2004.** Noble lecture: Type II superconductors and vortex lattice. Rev. Mod. Phys. 76, 975.
- Akimitsu, J., 2001.** Phys. Rev. Lett., 86, 4656.
- Akkaş, A., 2006.** Eritilmiş - Soğutulmuş Üstüniletken YBCO Örneklerinin Yapısal ve Elektriksel Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 81s., 6-8.
- Aselage, T.L., 1994.** Physica C, 233, 292.
- Ashcroft, N.W. and Mermin, N.G., 1976.** Solid state Physics, Holt, Rinehart.
- Babu N.H. and Rajasekharan, T., 1999.** Infiltration-Growth processing of NdBa₂Cu₃O_{7-δ} superconductor, J. Am. Ceram. Soc., 82, 2978.
- Babu, N.H., Kambara, M., Smith, P.J., Cardwell, D.A. and Shi, Y., 2000.** Fabrication of large single-grain Y-Ba-Cu-O through infiltration and seeded growth processing, J. Mater. Res., 15, 1235.
- Bağ, Ö., 2006.** Sezyum Katkılı Yttriyum (1) Bariyum (2-x) M (x) Bakır (3) Oksijen (7) Süperiletkenlerinin Bazı Fiziksel ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 60 s., 18-19.
- Bardeen, J., Cooper, L.N. and Schrieffer, J.R., 1957.** Phys. Rev., 108, 1175.
- Bean, C.P., 1962.** Magnetizasyon of hard superconductors. Phys. Rev. Lett., 8.
- Bean, C.P., 1964.** Rev. Mod. Phys., 36, 31-39.
- Bednorz, J.G. ve Muller, K.A., 1986.** Phys. B, 64, 189.
- Brandt, E.H., 1990.** Rigid levitation and suspension of hightemperature superconductors by magnets. American Journal of Physics, 58, 43.
- Camacho, J.M. and Sosa, V., 2013.** Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. Revista Mexicana de Fisica E, 59, 8-17.
- Cardwell, D., 1998.** Materials Science and Engineering, B53, 1- 10.
- Cardwell, D.A. and Ginley, D.S., 2003.** Handbook of Superconducting Materials. IoP Publishing, s. 333.
- Cardwell, D.A., Shi, Y., Nadendla, H.B. and Iida, K., 2009.** Fabrication of high performance Gd-Ba-Cu-O single grains in air using a practical melt processing technique. Physica C, 469, 1146-1152.

- Cava, R.J., Batlogg, B., Chen, C.H., Rietman, E.A., Zahurak, S.M. and Werder, D., 1987.** Oxygen stoichiometry, superconductivity and normal-state properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$. *Nature*, 329, 423.
- Chen, S.L., Yang, W.M., Li, J.W., Yuan, X.C., Ma, J. and Wang, M., 2014.** A new 3D levitation force measuring device for REBCO bulk superconductors. *Physica C*, 496, 39–43.
- Chen, Y.L., Chan, H.M., Harmer, M.P., Tort, V.R., Sengupta, S. and Shi, D., 1994.** A new method for net-shape forming of large, single-domain $\text{YBa}_2\text{CuO}_{6+d}$, *Physica C*, 234, 232
- Chu, C.W., Hor, P.H., Meng, R.L., Gao, L. and Huang, Z.J., 1987.** *Science*, 235, 567.
- Çelik, Ş., 2006.** $(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_{x/2}\text{Gd}_{x/2})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ve $\text{Yb}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Süperiletkenlerinin Yapısal ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. K.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 166 s., 6-8.
- Çelik, Ş. and Öztürk, K., 2009.** Semiempirical equation of the levitation-force density for $(\text{Sm}_{123})_{1-x}(\text{Yb}_{123})_x$ superconducting samples. *Phys. Status Solidi A*, 4, 724-730.
- Day, A.C., Strasik, M., McCrary, K.E., Johnson, P.E., Gabrys, J.W., Schindler, J.R., Hawkins, R.A., Carlson, D.L., Higgins, M.D. and Hull, J.R., 2002.** Design and testing of the HTS bearing for a 10 kWh flywheel system. *Supercond. Sci. Technol.*, 15, 838.
- Diko, P., Antal, V., Kanuchová, M., Jirsa, M., Jurek, K., 2010.** Behavior of silver substitution in single-grain TSMG YBCO bulk superconductor. *Physica C*, 470, 155–158.
- Doğan N., 2005.** YBCO(123) Sisteminin Co/Mo Katkılı Film Üretimi Ve Genel Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 70 s., 5-7.
- Durrell, J.H., Dennis, A.R., Jaroszynski, J., Ainslie, M.D., Palmer, K.G.B., Shi, Y., Campbell, A.M., Hull, J., Strasik, M., Hellstrom E.E. and Cardwell, D.A., 2014.** *Supercond. Sci. Technol.*, 27, 082001.
- Düz, I., 2008.** $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Süperiletkenlerinin Yapısal Özellikleri Üzerine Basıncın Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 95s., 9-10.
- Endo, A., Chauhan, H.S., Nakamura, Y. and Shiohara, Y., 1996a.** Relationship between growth rate and undercooling in Pt-added $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, *Journal of Materials Research*, 11, 1114.
- Endo, A., Chauhan, H.S. and Shiohara, Y., 1996b.** Entrapment of Y_2BaCuO_5 particles in melt-textured $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ crystals and its effect on J_c . *Physica C*, 273, 107.

- Erdem, O., Ozturk, K., Guner, S.B., Celik, S. and Yanmaz, E., 2014.** Effects of Initial Cooling Conditions and Measurement Heights on the Levitation Performance of Bulk MgB₂ Superconductor at Different Measurement Temperatures. *J Low Temp Phys.*, 177, 28–39.
- Gapalek, W., Habisreuthe, T., Strasser, T., Wu, M., Litzkendorf, D., Fischer, K., Gornert, P., Gladum, A., Stoye, P., Verges, P., Ilushin, K.V. and Kovalev, L.K., 1994.** Remanent induction and levitation force of melt textured YBCO. *Appl. Supercond.*, 2, 465.
- Gruss, S., Fuchs, G., Krabbes, G., Verges, P., Stover, G., Muller, K.H., Fink, J. and Schultz, L., 2001.** Superconducting bulk magnets: very high trapped fields and cracking. *Appl. Phys. Lett.*, 79, 1–3.
- Hatano, T., Matsushita, A., Nakamura, K., Sakka, Y., Matusmoto, T. and Ogawa, K., 1987.** *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26, L721.
- Hidaka Y., 1988.** *J. Jpn. Appl. Phys.*, 27, L538.
- Hinai, H., Nariki, S., Ogasawa, K., Sakai, N., Murakami, M. and Otsuka, M., 2001.** Cold seeded melt growth of RE-Ba-Cu-O superconductor (RE=Gd,Y). *Physica C*, 357-360, 706-708.
- Hull, J.R., Hanany, S., Matsumura, T., Johnson, B. and Jones, T., 2005.** *Supercond. Sci. Technol.*, 18, S1.
- Jiang, D.H., Ma, G.T., Lin, Q.X., Xu, Y.Y., Wang, S.Y. and Wang, J.S., 2012.** Levitation-force investigation of high-temperature superconducting maglev system under different variations of the vertical displacement. *J. Supercond. Nov. Magn.*, 25, 25–30.
- Jin, S., Tiefel, T.H., Sherwood, R.C., Davis, M.E., v. Dover, R.B., Kammlott, G.W., Fastnatht, R.A. and Keith, H.D., 1988.** High critical currents in Y-BaCu-O superconductors, *Appl. Phys. Lett.*, 52, 2074.
- Josephson, B.D., 1962.** *Phys. Letters*, 1, 251.
- Kartal, M., 2009.** Yttrium (1) Baryum (2-X) M (X) Bakır (3) Oksijen (7-Y) (M = Lityum, Sezyum Ve Bor) Süperiletken Bileşiğinin Bazı Fiziksel ve Yapısal Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 114s., 37, 60.
- Kim, C.J., Hong, G.Y. and Oh, H.Y., 2001.** Multi-seed melt growth processed YBCO superconductors. *Physica C*, 357-360, 635-641.
- Kim, C.J., Jee, Y.A., Kwon, S.C., Sung, T.Y. and Hong, G.Y., 1999.** Control of YBCO growth at the compactsubstrate interface by bottom seeding and Yb₂O₃ coating in seeded melt-growth processed YBCO oxides using a MgO substrate. *Physica C*, 315, 263–270.

- Kim, C.J., Kim, H.J., Jee, Y.A., Hong, G.W., Joo, J.H., Han, S.C., Han, Y.H., Sung, T.H. and Kim S.J., 2000a.** *Physica C*, 338, 205–212.
- Kim, C.J., Kim, K.B., Kook, I.H. and Hong, G.W., 1995.** *Physica C*, 255, 95.
- Kim, C.J., Kim, K.B., Park, H.W., Sung, T.H., Kuk, I.H. and Hong, G.W., 1996.** *Supercond. Sci. Technol.*, 9, 76.
- Kim, C.J., Kim, H.J., Joo, J.H., Hong, G.W., Han, S.C., Han, Y.H., Sung, T.H. and Kim, S.J., 2000b.** Effects of the seed distance on the characteristics of the (100)/(100) junctions of top-seeded melt growth processed YBCO superconductors using two seeds. *Physica C*, 336, 233–238.
- Kittel C., 1976.** *Introduction to solid state physics.* John Wiley and Sons, United States.
- Latha, B., Ikuta, H. and Mizutani, U., 2004.** Enhancement of critical currents and trapped fields of melt textured ZnO doped Dy–Ba–Cu–O bulk superconductors. *Physica C*, 412–414, 566–570.
- Lehndorff, B., Kiirschner, H.G., Liicke, B. and Piel, H., 1995.** Levitation-force measurements and field mapping of melt-processed YBa₂Cu₃O_{7-x} ceramics. *Physica C*, 247, 280-288.
- Li, B., Zhou, D., Xu, K., Tsuzuki, K., Zhang, J. and Izumi, M., 2014.** Flux pinning behaviors of a textured Gd–Ba–Cu–O superconductor mediated by the addition of BaTiO₃, TiO₂ and BaO₂. *Physica C*, 496, 28–34.
- Li, G.Z., Deng, X.Y. and Dong, L., 2015a.** Facile fabrication of nano-composited YBaCuO single-grain superconductor using raw metallic oxides. *Materials Chemistry and Physics*, 167, 14-17.
- Li, G.Z., Wang, M. and Yang, W.M., 2015b.** Enhanced superconducting properties in infiltration processed Y-Ba-Cu-O single-grain superconductor with nano-sized pinning centers. *Journal of Alloys and Compounds*, 649, 559-563.
- Li, G.Z., Yang, W.M., Liang, W. and Li, J.W., 2011.** *Materials Letters*, 65, 304–306.
- Liu, W., Wang, S.Y., Jing, H., Zheng, J., Jiang, M. and Wang, J.S., 2008.** Levitation performance of YBCO bulk in different applied magnetic fields. *Physica C*, 468, 974–976.
- Ma, K.B., Postrekhin, Y.V. and Chu, W.K. 2003.** *Rev. Sci. Instrum.*, 74, 4989, 2.
- Matsunaga, K., Tomita, M., Yamachi, N., Iida, K., Yoshioka, J. and Murakami, M., 2002.** YBCO bulk of the superconducting bearing for a 10 kWh flywheel. *Supercond. Sci. Technol.*, 15, 842.
- Meissner, W. and Ochsenfeld, R., 1933.** *Naturwissenschaften*, 21, 787.
- Miletich, R., Murakami, M., Preisinger, A. and Weber, H.W., 1993.** *Physica C*, 209, 415.

- Moon, F.C., Yanoviak, M.M. and Ware, R., 1988.** Hysteretic levitation forces in superconducting ceramics. *Applied Physics Letters*, 52, 1534.
- Murakami, M., 1992.** *Melt Processed High-Temperature Superconductors*. World Scientific, Singapore.
- Murakami, M., 2000.** Progress in applications of bulk high temperature. *Superconductor Science and Technology*, Volume 13, Number 5.
- Murakami, M., Morita, M., Doi, K. and Miyamoto, K., 1989.** *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28, 185.
- Murakami, M., Oyama, T., Fujimoto, H., Taguchi, T., Gotoh, S., Shiohara, Y., Koshizuka, N. and Tanaka, S., 1990.** Large levitation force due to flux pinning in YBaCuO superconductors fabricated by melt-powder-melt-growth process, Japan. *J. Appl. Phys.*, 29, L1991.
- Murakami, M., Sakai, N., Higuchi T. and Yoo, S.I., 1996.** Melt-processed light rare earth element-Ba-Cu-O, *Supercond. Sci. Technol.*, 9, 1015
- Muralidhar, M., Chauhan, H.S., T., Kamada, K., Segawa, K. and Murakami, M., 1997.** *Supercond. Sci. Technol.*, 10, 663–670.
- Muralidhar, M., Sakai, N., Jirsa, M., Murakami, M. and Koshizuka, N., 2004.** Magnetic levitation in liquid oxygen and its applications. *Physica C*, 412–414, 739–743.
- Nadendla, H.B., Yunhua, S., Kazumasa, I. and Cardwell, D.A., 2005.** A practical route for the fabrication of large single-crystal (RE)–Ba–Cu–O superconductors. *Nature Materials*, 4, 476 - 480.
- Nariki, S., Fujikura, M., Sakai, N., Hirabayashi, I. and Murakami, M., 2005a.** *Physica C*, 426–431, 654–659.
- Nariki, S., Sakai, N. and Murakami, M., 2005b.** *Supercond. Sci. Technol.*, 18, S126–S130.
- Nariki, S., Sakai, N., Tomita, M. and Murakami, M., 2001.** *Physica C*, 357-360, 811-813. 28
- Onnes, H.K., 1911.** *Leiden Comm*, 124, 120.
- Otani T. and Murakami, M., 2000.** Performance of Sm–Ba–Cu–O bulk superconductors for a magnetic bearing, *Supercond. Sci. Technol.*, 13, 866.
- Park, S.D., Jun, B.H., Park, B.J., Jung, S.Y., Seong, B.S. and Kim, C.J., 2009.** *Physica C*, 469, 1161–1164.
- Pathak, S.K., Yeoh, W.K., Babu, N.H., Shi, Y., Iida, K., Strasik, M. and Cardwell, D.A., 2009.** Fabrication of high performance Y-123/Y-24Nb1/Ag single grain composites. *Physica C*, 469, 1173–117.

- Salama, K., Selvamanicham, V., Gao, L. and Sun, K., 1989.** High current density in bulk YBa₂Cu₃O_x superconductor, Appl. Phys. Lett., 54, 2352.
- Sanchez, A. and Navau, C., 1996.** Vertical force, magnetic stiffness and damping for levitating type-II superconductors. Physica C, 268, 46-52
- Sawano, K., Morota, M., Tanaka, M., Sasaki, T., Kimura, K. and Takebayashi, S., 1991.** High magnetic flux trapping by melt-grown YBaCuO superconductors. Japanese Journal of Applied Physics, 30, L1157.
- Sawh, R.P., Weinstein, R., Carpenter, K., Parks, D. and Davey, K., 2013.** Production run of 2 cm diameter YBCO trapped field magnets with surface field of 2 T at 77 K. Supercond. Sci. Technol., 26, 105014.
- Serway, R.A. and Jewett, J.W., 2004.** Physics, Thomson Brooks, 6. Baskı, 30, 952s.
- Shi, Y., 2009.** Doktora Tezi, Cambridge Üniversitesi, Cambridge, İngiltere, 152 s., 33-37.
- Shi, Y., Nadendla, H.B., Kazumasa, I. and Cardwell, D.A., 2007.** Properties of GdBCO bulk superconductors melt-processed in air using a Mg-doped Nd–Ba–Cu–O generic seed crystal. Supercond. Sci. Technol., 20, 38.
- Shi, Y., Nadendla, H.B., Iida, K., Yeoh, W.K., Dennis, A.R., Pathak, S.K. and Cardwell, D.A., 2010.** Physica C, 470, 685–688.
- Shiohara, Y. and Endo, A., 1997.** Crystal growth of bulk high-T_c superconducting oxide materials. Materials Science and Engineering, R19, 1.
- Siems, S.O., Canders, W.R., Walter, H. and Bock, J., 2004.** Superconducting magnetic bearings for a 2 MW/10 kWh class energy storage flywheel system. Supercond. Sci. Technol., 17, S229.
- Takizawa, T., and Murakami, M., 2005.** Critical currents in superconductors, Fuzambo.
- Thoma, M., Shi, Y., Dennis, T., Durrell, J., Cardwell, D., 2015.** Effect of Y-211 particle size on the growth of single grain Y–Ba–Cu–O bulk superconductors. Journal of Crystal Growth, 412, 31–39.
- Tinkham, M., 1982.** Introduction to Superconductivity. Pergoman Press, Oxford, New.
- Toğrul, T., 1995.** İstrümental Analiz. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, 101-117.
- Tomita, M. and Murakami, M., 2003.** High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K. Nature, 421, 517-520.
- Van der Laan, D.C., Van Eck, H.J.N., Ten Haken, B., Schwartz, J. and Ten Kate, H.H.J., 2001.** Temperature and magnetic field dependence of the critical current of Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x tape conductors., IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 1, 3345.

- Volochova, D., Diko, P., Radusovska, M., Antal, V., Piovarci, S., Zmorayova, K. and Sefcikova, M., 2012.** Growth of Y123 bulk crystals in Y1.5Ba2Cu3Ox system with CeO2 addition. *Journal of Crystal Growth*, 353, 31–34.
- Volochova, D., Jurek, K., Radusovska, M., Piovarci, S., Antal, V., Kovac, J., Jirsa, M. and Diko, P., 2014.** Contamination of YBCO bulk superconductors by samarium and ytterbium. *Physica C*, 496, 14–17.
- Wang, S., Wang, J., Wang, X., Ren, Z., Zeng, Y., Deng, C. and Jiang, H., 2003.** The man-loading high-temperature superconducting Maglev test vehicle. *IEEE Trans. Appl. Ind.*, 13, 2134.
- Wu, M.K., Ashburn, J.R., Torng, C.J., Hor, P.H., Meng, R.L., Gao, L., Huang, Z.J., Wang, Y.Q. and Chu, C.W., 1987.** Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical Review Letters*, 58, 908.
- Xu, C., Hu, A., Sakai, N., Izumi M. and Hirabayashi, I., 2005.** *Physica C*, 417, 77–84.
- Xu, Y., Tsuzuki, K., Hara, S., Zhang, Y., Kimura, Y. and Izumi, M., 2010.** *Physica C*, 470, 1219–1223.
- Yakinci, M.E., 1992.** Thick Film Glass Ceramic Superconductors Fabrication. Phd Thesis. University of Warwick, İngiltere.
- Yamachi, N., Nishikawa, T., Sakai, N., Sawa, K. and Murakami, M., 2003.** Levitation forces of bulk superconductors in varying field. *Physica C*, 392-396, 579-584.
- Yang, W., M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P., X., Nicolsky, R. and De 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., Li G.Z., Chao X.X., Li J.W., Guo F.X., Chen, S.L. and Ma, J., 2011.** *Physica C*, 471, 850–853.
- Yang, W.M., Zhi, X., Chen, S.L., Wang, M., Li, J.W., Ma, J. and Chao, X.X., 2014.** Fabrication of single domain GdBCO bulk superconductors by a new modified TSIG technique. *Physica C*, 496, 1–4.
- 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, W. and 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., Wu, M.Z., Zhang, C.P., Wang, J.R., Du, Z.H., Wang, F.Y., Yu, Z.M., Wu, X.Z., Gawalek, W. and Gornert, P., 1998.** The effect of excess Y2O3 addition on the levitation force of melt processed YBCO bulk superconductors. *Physica C*, 305, 269–274.

- Yoo, S.I., Higuchi T., Sakai N., Fujimoto H. and Murakami M., 1998.** RE-Ba-Cu- O for high functional superconducting permanent. Materials Science and Engineering, B53 203.
- Yoo, S.I., Sakai, N., Takaichi, H., Higuchi, T. and Murakami, M., 1994.** Melt processing for obtaining GdBa₂Cu₃O_y superconductors with high T_c and large J_c. Appl. Phys. Lett., 65, 633.
- Yorulmaz, E., 2005.** Schiff Bazlarının Termal Yöntemlerle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 118s.
- Zhang, Y., Izumi, M., Kimura, Y., Xu Y., 2009.** Physica C, 469, 1169–1172.
- Zhou, J., Zhang, X.Y. and Zhou, Y.H., 2009.** Influences of cooling height and lateral moving speed on the levitation characteristics of YBaCuO bulks. Physica C, 469, 207–210.
- Zhou, K., Xu, K., Wu, X. and Pan, P., 2007.** The homogeneity of levitation force in single domain YBCO bulk. Physica C, 466, 196–200.

ÖZGEÇMİŞ

9 Şubat 1986 yılında İstanbul'un Fatih ilçesinde doğdu. İlk ve ortaokulu Uludağ İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini de Bursa Cumhuriyet Lisesi'nde tamamladı. 2004'te Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nü kazandı. 2009 bahar yarıyılında fizik bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Ekim 2009'da Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Genel Fizik Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2012 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı yüksek lisans programından mezun oldu. Ağustos 2012'de Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başladı. Halen aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.