

**T.C.
İNÖNÜ NİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YBCO SÜPERİLETKENLERDE BOR ve TALYUM KATKILAMALARININ
SİNERLEME SICAKLIĞI İLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

ERKAN UÇAR

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

TEMMUZ 2019

Tezin Başlığı: YBCO Süperiletkenlerde Bor ve Talyum Katkılamalarının Sinterleme Sıcaklığı ile Değişiminin İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: Erkan UÇAR

Sınav Tarihi: 10.07.2019

Yukarıda adı geçen tez, jürimizce değerlendirilerek Fizik Ana Bilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mehmet Eyyuphan YAKINCI
İskendurun Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Ali BAYRI
İnönü Üniversitesi



Prof. Dr. Alev AYDINER
Karadeniz Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Mehmet Ali AKSAN
İnönü Üniversitesi



Doç. Dr. Ahmet EKİCİBİL
Çukurova Üniversitesi



Prof. Dr. Kazım TÜRK
Enstitü Müdür Vekili

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “YBCO Süperiletkenlerde Bor ve Talyum Katkılamalarının Sinterleme Sıcaklığı ile Değişiminin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Erkan UÇAR

ÖZET

Doktora Tezi

YBCO SÜPERİLETKENLERDE BOR ve TALYUM KATKILAMALARININ SİNTERLEME SICAKLIĞI İLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Erkan UÇAR İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı

123+xvii sayfa

2019

Danışman: Prof. Dr. M. Eyyuphan YAKINCI

Bu tez çalışmasında katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak 900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C’de ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak hızlarda saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiği, 1000 °C ve 1020 °C’de 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 0.5 ve 0.6 bor katkılı $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{B}_2\text{O}_3)_x$ bileşiği, 1000 ve 1020 °C’de 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 talyum katkılı $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{Tl}_2\text{O}_3)_x$ bileşiği hazırlanmıştır. Örneklerin hazırlanma sıcaklıklarının, bor ve talyum katkılarının bileşiğin yapısal, elektriksel ve manyetik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Örneklerin yapısal özelliklerinin (XRD ve SEM/EDS) incelenmesiyle süperiletken faz oluşumu incelemesi yapılmıştır. Süperiletkenliğin kritik değerleri elektriksel (MR-T) ve manyetik (M-T, M-H) ölçümlerle bulunmuştur ve bu yolla bor ve talyum katkılamanın ve üretim sıcaklıklarının süperiletkenlik kalitesi üzerinde etkisi araştırılmıştır. Ayrıca üst kritik alan, alt kritik alan, aktivasyon enerjisi ve çivileme (pinning) kuvvetleri hesaplanmış üretilen malzemelerin mühendislik uygulamalarına uygun olup olmadıkları incelenmiştir.

Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde daha iyi homojen fazın ve buna bağlı olarak daha iyi süperiletkenlik yapısının oluştuğu sıcaklık değeri 1000 °C ± 2 °C/dak olduğunda görülmüştür. Bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde en iyi yapılanmanın oluştuğu değer 0.05 bor katkılı 1000 °C ± 2 °C/dak sıcaklıkta olduğu görülmüştür. Talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde en iyi yapılanmanın oluştuğu değer 0.3 talyum katkılı 1000 °C ± 10 °C/dak sıcaklıkta olduğu görülmüştür.

Bor katkılama oranı arttıkça yapının homojenliği bozularak süperiletkenlik özelliğinin azaldığı görülmüştür. Bor katkılamanın 0.2’den sonra olduğu durumda örneklerde diamanyetik-paramanyetik faz geçişinin olduğu görülmüştür. Bor katkılamanın 0.3’den sonra olduğu durumda süperiletkenlikten normal faza geçiş olmuştur. Talyum katkılı örneklerde 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklıkta diamanyetik-paramanyetik faz geçişinin olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER: Süperiletkenlik, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, Katıhal Reaksiyon Yöntemi, katkılama.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE CHANGE OF BORON AND THALLIUM ADDITIVES IN YBCO SUPERCONDUCTORS WITH VARIOUS SINTERING TEMPERATURES

Erkan UÇAR
Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

123+xvii pages
2019

Supervisor: Prof. Dr. M. Eyyuphan YAKINCI

In this thesis, the pure $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductor at temperatures of 900 °C, 920 °C, 1000 °C and 1020 °C (± 2 °C/min, ± 5 °C/min and ± 10 °C/min), $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{B}_2\text{O}_3)_x$ ($x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ and 0.6) superconductor at temperatures of 1000 °C and 1020 °C (± 2 °C/min, ± 5 °C/min and ± 10 °C/min) and $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{Tl}_2\text{O}_3)_x$ ($x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$) superconductor at temperatures of 1000 °C and 1020 °C (± 2 °C/min and ± 10 °C/min) have been produced using the solid state reaction method. The temperatures of the preparation of the samples and boron and thallium additive have been investigated on effect of the structural, electrical and magnetic properties of the compound. Superconducting phase formation was investigated By examining the structural properties of the samples (XRD and SEM / EDS). Critical values of superconductivity were found by electrical (MR-T) and magnetic (M-T, M-H) measurements and the effects of boron and thallium doping and production temperatures on superconductivity quality were investigated. In addition, the upper critical area, the lower critical area, the activation energy and the pinning forces are calculated and whether the materials produced are suitable for engineering applications.

It has been found that the better homogeneous phase in the pure $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ compound and hence the better superconductivity structure is at a temperature of 1000 °C ± 2 °C/min. The value of the best structure in the boron-doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ compound was found to be at a temperature of 1000 °C ± 2 °C/min with boron doping of 0.05. The value of the best structuring in the thallium-doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ compound was found to be at a temperature of 1000 °C ± 10 °C/min with 0.3 thallium addition.

As the boron doping ratio increased, the homogeneity deteriorated and the superconductivity property decreased. In cases where the boron doping is after 0.2, the diamagnetic-paramagnetic phase transition is seen in the examples. If the boron doping is after 0.3, the normal conduction from superconductivity has occurred. In the case of thallium-added samples, the diamagnetic-paramagnetic phase transition was observed at 1020 °C ± 10 °C/min.

KEYWORDS: Superconductivity, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, The method of solid state reaction, doping.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemedi beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Eyyuphan YAKINCI' ya;

Doktora eğitimim ve çalışmalarım süresince, her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen İnönü Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyeleri Prof. Dr. Ali BAYRI ile Prof. Dr. M. Ali AKSAN'a ayrıca Fizik Bölümü öğretim üyelerine ve personeline, tüm çalışmalarım boyunca olumlu ve yapıcı öneriyle destek olan değerli meslektaşım aynı zamanda doktora arkadaşım Serdal GÜRSES'e

teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. BCS Teorisi.....	5
2.2. London Denklemleri ve Sızma Derinliği.....	7
2.3. Ginzburg-Landau Teorisi.....	9
2.4. Süperiletken Durumun Karakteristik Özellikleri.....	11
2.4.1. Meissner etkisi.....	11
2.4.2. I. tipve II. tip süperiletkenler.....	12
2.4.2. Kritik akım yoğunluğu.....	13
2.4.4. Vorteksli durum.....	15
2.5. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler (HTS).....	19
2.5.1. YBCO sisteminin kristal yapısı.....	24
2.5.2. YBCO sisteminin ortorombik ve tetragonal yapısı.....	25
2.5.3. YBCO süperiletkeninde anizotropi durumu.....	27
2.5.4. YBCO sisteminin manyetik alan-sıcaklık (H-T) faz diyagramı.....	28
2.6. YBCO Süperiletkenlere Yönelik Geçmişte Yapılan Çalışmalar.....	29
2.6.1. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(G)x$ süperiletkenler.....	29
2.6.2. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(Gd)x$ süperiletkenler.....	30
2.6.3. $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(CoFe_2O_4)_x$ ve $(Y_3Ba_5Cu_8O_{18\pm a})_{1-x}(CoFe_2O_4)_x$ süperiletkenler.....	31
2.6.4. $Y_{1-x}Ca_xBa_2(Cu_{0.98}Zn_{0.02})_3O_{7-\delta}$ süperiletkenler.....	32
2.6.5. $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}+Ag_x$ süperiletkenler.....	32
2.6.6. $Y_{1-x}Lu_xBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ süperiletkenler.....	34
2.6.7. $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}+(Cr_2O_3)_x$ süperiletkenler.....	35
2.6.8. $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_y$ süperiletkenler.....	36
2.6.9. $YBCO+Y_2O_3$ süperiletkenler.....	37
2.6.10. $YBa_2Cu_3O_{7-a}+BaH_2O_3$ süperiletkenler.....	38
2.6.11. $YBa_{2-x}Na_xCu_3O_{7-\delta}$ süperiletkenler.....	39
2.7. Süperiletkenlerin Kullanım Alanları.....	39
2.7.1. Süperiletken manyetik enerji depolama.....	40
2.7.2. HTS motorları ve jeneratörleri.....	41
2.7.3. HTS güç iletim kabloları.....	42
2.7.4. HTS transformatörleri.....	43
3. MATERYAL VE YÖNTEM	46

3.1.	Materyal.....	46
3.2.	Yöntem.....	46
3.2.1.	X ışınları kırınımı (XRD)	47
3.2.2.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını analizleri (EDS).....	47
3.2.3.	Manyetik alan altında elektriksel direnç ölçümleri.....	48
3.2.4.	Manyetik ölçümler (M-H, M-T) ve kritik akım yoğunluğu hesaplamaları.....	48
3.2.5.	Çivileme (pinning) kuvveti ve aktivasyon enerjisi hesaplamaları.....	48
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	50
4.1.	X Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri.....	50
4.2.	SEM ve EDS İncelemeleri.....	57
4.3.	Elektriksel Ölçümler (MR-T).....	66
4.4.	Manyetik Moment-Sıcaklık Ölçümleri (M-T).....	73
4.5.	Manyetik Alan-Manyetizasyon Ölçümleri (M-H).....	76
4.6.	Kritik Akım Yoğunluğu Hesaplamaları.....	82
4.7.	Aktivasyon Enerjisi Hesaplamaları.....	88
4.8.	Çivileme (Pinning) Kuvveti Hesaplamaları.....	98
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
5.1.	XRD Sonuçları.....	109
5.2.	SEM Sonuçları.....	110
5.3.	Elektriksel Ölçüm Sonuçları.....	111
5.4.	Manyetik Ölçüm Sonuçları.....	113
KAYNAKLAR.....		116
ÖZGEÇMİŞ.....		123

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Bir süperiletkende Meissner etkisinin şematik gösterimi.....	1
Şekil 1.2.	İdeal Perovskite Yapı.....	3
Şekil 2.1.	Bir süperiletkende Cooper çiftlerinin şematik gösterimi	5
Şekil 2.2.	Bir Cooper çiftinde elektron-elektron etkileşiminin şematik gösterimi	6
Şekil 2.3.	Fermi küresinin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.4.	Mükemmel iletkende manyetik alanın davranışı.....	11
Şekil 2.5.	Süperiletkenlerin manyetik davranışı.....	12
Şekil 2.6.	Kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlılığı: (a) I. tip süperiletkenler ve (b) II. tip süperiletkenler.....	12
Şekil 2.7.	a) Meissner etkisinin tam olduğu (ideal diyamanyetik) bir süperiletkende mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi.b) II.tip süperiletkenlerde mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi.....	13
Şekil 2.8.	Karışık durumda bir süperiletken için dış manyetik alan ve uygulanan akım aralığında vortekslere etki eden Lorentz kuvveti ve vorteks hareketi.....	14
Şekil 2.9.	Süperiletkende vorteks yapısının şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.10.	I. tipsüperiletkenlerde; a) Uygulanan manyetik alana ortalama manyetik akı yoğunluğunun b) ortalama manyetizasyonun bağlılığı ve II. tip süperiletkenlerde ; c) Uygulanan manyetik alana ortalama manyetik akı yoğunluğunun d)ortalama manyetizasyonun bağlılığı.....	16
Şekil 2.11.	Akı tuzak mekanizmasının şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.12.	Hole (boşluk) katkılı cupratların (külçe) faz diyagramı.....	21
Şekil 2.13.	Genel perovskit yapısının şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.14.	a) süperiletken ortorombik $YBa_2Cu_3O_7$ ve b) tetragonal $YBa_2Cu_3O_6$ 'nın birim hücresi.....	27
Şekil 2.15.	Yüksek sıcaklı süperiletkenlerde tersinmezlik çizgisi.....	29
Şekil 2.16.	a) $x = 0, 0.001, 0.002$ ve 0.003 ve b) $0.01, 0.02$ ve 0.03 oranlarında katkılanmış $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(G)_x$ 'nun elektriksel direnç-sıcaklık grafikleri.....	29
Şekil 2.17.	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(G)_x$ 'nun sıcaklığa bağlı J_c kritik akım yoğunluğunun grafiği.....	30
Şekil 2.18.	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(Gd)_x$ 'nun uygulanan manyetik alan-aktivasyon enerjisi grafiği.....	31
Şekil 2.19.	$x = 0.0, 0.2, 0.5$ oranlarında katkılanmış a) $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(CoFe_2O_4)_x$ b) $(Y_3Ba_5Cu_8O_{18\pm a})_{1-x}(CoFe_2O_4)_x$ malzemelerinin öz direnç-sıcaklık grafikleri.....	31
Şekil 2.20.	$Y_{1-x}Ca_xBa_2(Cu_{0.98}Zn_{0.02})_3O_{7-\delta}$ 'nun öz direnç-sıcaklık grafikleri...	32
Şekil 2.21.	Uygulanan farklı manyetik alanlarda YBCO + % Ag (0, 10, 15, 20) malzemelerinin sıcaklığa bağlı manyetik moment değişim grafikleri.....	33
Şekil 2.22.	920 °C, b) 930 °C, c) 940 °C sıcaklıklarda sinterlenerek hazırlanmış $Y_{1-x}Lu_xBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ ($x = 0.0, 0.5$) malzemelerinin sıcaklığa bağlı manyetik moment d) uygulanan alana bağlı kritik akım yoğunluğu değişim grafikleri.....	34
Şekil 2.23.	$x = 0.0, 0.023, 0.044, 0.061$ oranlarda hazırlanmış $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Cr_2O_3)_x$ numunelerinin XRD grafikleri.....	35
Şekil 2.24.	$YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_y$ süperiletkenler için elektrik direnci sıcaklığa bağlılığı.....	36

Şekil 2.25.	(YBCO) _{1-x} +(Y ₂ O ₃) _x ile mıknatıs arasında kaldırma kuvvetinin uzaklığa bağlılığı.....	37
Şekil 2.26.	% 0, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5 oranlarında hazırlanmış (YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}) _{1-x} +(BaH ₂ O ₃) _x malzemenin sıcaklık direnç grafikleri.....	37
Şekil 2.27.	Jc kritik geçiş akımının manyetik alana bağlılığı.....	38
Şekil 2.28.	Bir mıknatısla örnek arasındaki kaldırma kuvvetleri. Mıknatıs 25 mm çapında; mıknatısın manyetik alanı 0.5 T'dır.....	38
Şekil 2.29.	Albany, New York'ta süper iletken güç şebekesi.....	41
Şekil 2.30.	Bir mıknatısla çeşitli oranlarda eklenmiş Y ₂ O ₃ numuneleri arasında kaldırma kuvveti ve mıknatıs 15 mm çapında, yüzeyindeki manyetik alan büyüklüğü 0.5 T'dır.....	41
Şekil 2.31.	HTS güç iletim kablosu.....	42
Şekil 3.1.	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} numunelerinde kalsinasyon işlemini gösteren zaman-sıcaklık diyagramı.....	46
Şekil 3.2.	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} numunelerinin T = 900, 920, 1000, 1020 °C sıcaklıklarda sinterleme işlemini gösteren zaman-sıcaklık diyagramı.....	46
Şekil 4.1.	900 °C ve 920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiklerinin XRD grafiği.....	51
Şekil 4.2.	1000 °C ve 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiklerinin XRD grafiği.....	51
Şekil 4.3.	1000 °C ve 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiklerinin XRD grafiği.....	53
Şekil 4.4.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 ve 0.3 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin XRD grafiği.....	53
Şekil 4.5.	1000 °C ve 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiklerinin XRD grafiği.....	54
Şekil 4.6.	1000 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin XRD grafikleri.....	54
Şekil 4.7.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak hazırlanmış 0.05 ve 0.1 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin XRD grafikleri.....	56
Şekil 4.8.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak hazırlanmış 0.2 ve 0.3 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin XRD grafikleri.....	56
Şekil 4.9.	900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin SEM görüntüleri.....	58
Şekil 4.10.	920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiklerinin SEM görüntüleri.....	58
Şekil 4.11.	1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiklerinin SEM görüntüleri.....	59
Şekil 4.12.	1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiklerinin SEM görüntüleri.....	59
Şekil 4.13.	1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin SEM görüntüleri.....	60
Şekil 4.14.	1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin SEM görüntüleri.....	60
Şekil 4.15.	1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2	

	B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	61
Şekil 4.16.	1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	61
Şekil 4.17.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	62
Şekil 4.18.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	62
Şekil 4.19.	1000 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	63
Şekil 4.20.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	64
Şekil 4.21.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	64
Şekil 4.22.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	65
Şekil 4.23.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın SEM görüntüleri.....	65
Şekil 4.24.	900 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	69
Şekil 4.25.	920 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	69
Şekil 4.26.	1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	69
Şekil 4.27.	1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	70
Şekil 4.28.	1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	70
Şekil 4.29.	1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	70
Şekil 4.30.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	70
Şekil 4.31.	1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	71
Şekil 4.32.	1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	71
Şekil 4.33.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	71
Şekil 4.34.	1000 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	71
Şekil 4.35.	1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğın MR-T eğrileri.....	72
Şekil 4.36.	1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış	

	0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin MR-T eğrileri.....	72
Şekil 4.37.	1000 °C ±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin MR-T eğrileri.....	72
Şekil 4.38.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin MR-T eğrileri.....	72
Şekil 4.39.	a) 900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak b) 920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri.....	74
Şekil 4.40.	a) 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak b) 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri.....	74
Şekil 4.41.	a) 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak b) 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri.....	74
Şekil 4.42.	a) 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak b) 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri.....	75
Şekil 4.43.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a) 0.1 Tl b) 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri.....	75
Şekil 4.44.	1000 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-T eğrileri.....	75
Şekil 4.45.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a) 0.05 Tl b) 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri.....	76
Şekil 4.46.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a) 0.2 Tl b) 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri.....	76
Şekil 4.47.	900 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	78
Şekil 4.48.	920 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	79
Şekil 4.49.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	79
Şekil 4.50.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	79
Şekil 4.51.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	79
Şekil 4.52.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	80
Şekil 4.53.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M- H eğrileri...	80
Şekil 4.54.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	80
Şekil 4.55.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri.....	80
Şekil 4.56.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri...	81

Şekil 4.57.	1000 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin M-H eğrileri.....	81
Şekil 4.58.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin M-H eğrileri.....	81
Şekil 4.59.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin M-H eğrileri.....	81
Şekil 4.60.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin M-H eğrileri.....	82
Şekil 4.61.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin M-H eğrileri.....	82
Şekil 4.62.	900 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c eğrileri.....	85
Şekil 4.63.	920 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c eğrileri.....	85
Şekil 4.64.	1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c eğrileri.....	86
Şekil 4.65.	1020 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c eğrileri.....	86
Şekil 4.66.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	86
Şekil 4.67.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	86
Şekil 4.68.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	87
Şekil 4.69.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	87
Şekil 4.70.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	87
Şekil 4.71.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	87
Şekil 4.72.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	88
Şekil 4.73.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	88
Şekil 4.74.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin J _c -H eğrileri.....	88
Şekil 4.75.	900 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin ln(p/p ₀)-1/T eğrileri.....	91
Şekil 4.76.	920 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin ln(p/p ₀)-1/T eğrileri.....	91
Şekil 4.77.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin ln(p/p ₀)-1/T eğrileri.....	92
Şekil 4.78.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin ln(p/p ₀)-1/T eğrileri.....	92

Şekil 4.102.	1000 °C±2, ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin U ₀ /k _B (K)- H(T) eğrileri.....	98
Şekil 4.103.	900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	101
Şekil 4.104.	920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	102
Şekil 4.105.	1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	102
Şekil 4.106.	1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	102
Şekil 4.107.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	102
Şekil 4.108.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	103
Şekil 4.109.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	103
Şekil 4.110.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	103
Şekil 4.111.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	103
Şekil 4.112.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	104
Şekil 4.113.	1000 °C±2, 1000 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	104
Şekil 4.114.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	104
Şekil 4.115.	1000 °C±2, 1000 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	104
Şekil 4.116.	1000 °C±2, 1000 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin H _{c2} (T)-T _c (K) eğrileri.....	105
Şekil 4.117.	900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri.....	105
Şekil 4.118.	920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri.....	105
Şekil 4.119.	1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri.....	105
Şekil 4.120.	1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak sıcaklık artışında hazırlanmış saf YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri.....	106
Şekil 4.121.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri...	106
Şekil 4.122.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri...	106
Şekil 4.123.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri.....	106
Şekil 4.124.	1000 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} bileşiğinin F _p (N/m ³)-H(T) eğrileri.....	107
Şekil 4.125.	1020 °C±2, ±5 ve ±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış	

	0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)\text{-H(T)}$ eğrileri.....	107
Şekil 4.126.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)\text{-H(T)}$ eğrileri.....	107
Şekil 4.127.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)\text{-H(T)}$ eğrileri.....	107
Şekil 4.128.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)\text{-H(T)}$ eğrileri.....	108
Şekil 4.129.	1000 °C±2, 1000 °C±10 ve 1020 °C±10 °C/dak sıcaklık artışında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)\text{-H(T)}$ eğrileri.....	108



ÇİZELGELER DİZİNİ

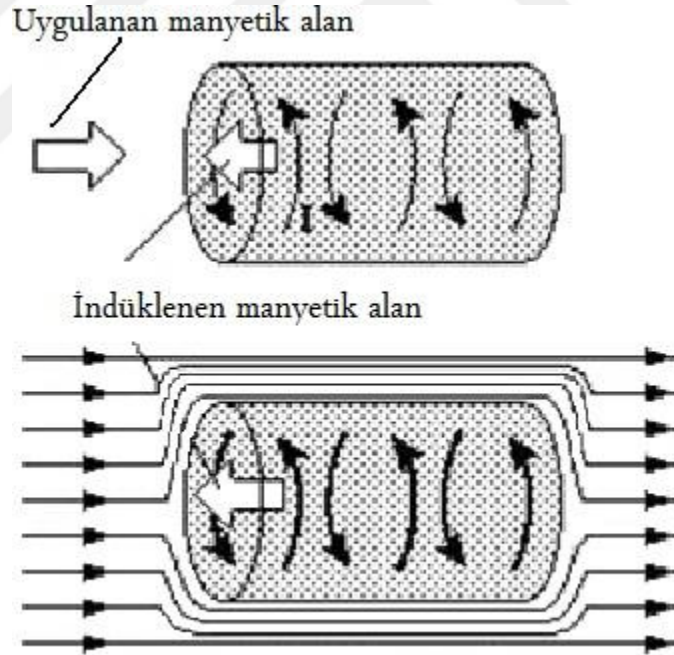
Çizelge 2.1.	HTS malzemelerin bazı karakteristik büyüklükleri.....	22
Çizelge 2.2.	Demir arsenik süperiletkenlerin kritik sıcaklıkları.....	23
Çizelge 2.3.	YBCO için kristal yapıları, örgü parametreleri, farklı yapıları ve T_c kritik sıcaklıkları.....	25
Çizelge 2.4.	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(Gd)_x$ malzemelerin aktivasyon (Vorteks bağlanma) enerjisi.....	30
Çizelge 2.5.	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}+Ag_x$ malzemelerin AC değerlerinde T_p sıcaklık değerleri.....	32
Çizelge 2.6.	Süperiletken $Y_{1-x}Lu_xBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ ($x = 0.0, 0.5$) malzemelerinin boyutları, T_c kritik sıcaklıkları, J_c kritik akım yoğunlukları.....	34
Çizelge 2.7.	$(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Cr_2O_3)_x$ için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik dereceleri ve oksijen miktarları.....	35
Çizelge 2.8.	$YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_y$ malzemeleri için kritik sıcaklıkları, c örgü parametreleri, süperiletkenlik parametreleri ve öz dirençleri.....	36
Çizelge 2.9.	HTS uygulamalarına örnekler.....	40
Çizelge 4.1.	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik dereceleri ve oksijen miktarları.....	50
Çizelge 4.2.	$(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(B_2O_3)_x$ için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik dereceleri ve oksijen miktarları.....	52
Çizelge 4.3.	$(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Tl_2O_3)_x$ için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik dereceleri ve oksijen miktarları.....	55
Çizelge 4.4.	$YBa_2Cu_{3-x}O_{7-\delta}$ malzemeleri için kritik sıcaklıkları ve dirençleri...	66
Çizelge 4.5.	$(YBa_2Cu_{3-x}O_{7-\delta})_{1-x}(B_2O_3)_x$ malzemeleri için kritik sıcaklıkları ve dirençleri.....	67
Çizelge 4.6.	$(YBa_2Cu_{3-x}O_{7-\delta})_{1-x}(Tl_2O_3)_x$ malzemeleri için kritik sıcaklıkları ve dirençleri.....	68
Çizelge 4.7.	Saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin kritik akım yoğunluğu.....	84
Çizelge 4.8.	B katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin kritik akım yoğunluğu.....	85
Çizelge 4.9.	Tl katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin kritik akım yoğunluğu.....	86
Çizelge 4.10.	Saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin aktivasyon enerjisi.....	90
Çizelge 4.11.	B katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin aktivasyon enerjisi.....	91
Çizelge 4.12.	Tl katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin aktivasyon enerjisi.....	91
Çizelge 4.13.	Saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin çivileme kuvveti.....	100
Çizelge 4.14.	B katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin çivileme kuvveti.....	100
Çizelge 4.15.	Tl katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerin çivileme kuvveti.....	102

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

H	Dış manyetik alan
ΔT	Sıcaklık geçiş bölgesi
ξ	Eşyuyum uzunluğu
ξ_0	Özgün eşyuyum uzunluğu
H_c	Kritik manyetik alan
J_c	Kritik akım yoğunluğu
T_c	Kritik sıcaklık
μ_0	Boşlukta manyetik geçirgenlik
λ	Sızma derinliği
λ_L	London sızma derinliği
Δ	Enerji aralığı
ρ	Özdirenç
H_{c1}	II. tip süperiletkenlerde alt kritik manyetik alan
H_{c2}	II. tip süperiletkenlerde üst kritik manyetik alan
B	Manyetik indüksiyon
κ	Ginzburg-Landau Parametresi
x	Katkı miktarı
E	Elektrik alan
ρ_0	Oda sıcaklığında özdirenç
M	Manyetizasyon
n_s	Süperiletken elektron yoğunluğu
n_n	Normal iletken elektron yoğunluğu
F_p	Çivileme (pinning) kuvveti
l	Elektronun ortalama serbest yolu
Φ	Kuantumlu manyetik akı
J	Akım yoğunluğu
HTS	Yüksek sıcaklık süperiletkenleri
LM	London modeli
GL	Ginzburg ve Landau modeli
TAFF	Sıcaklığa bağlı vorteks hareketi

1. GİRİŞ

H. Kamerling Onnes, sıvılaştırdığı helyumu kullanarak çeşitli metallerin öz dirençlerini incelemiştir. Cıvanın süperiletken duruma geçtiği ilk kez 1911'de Kamerlingh Onnes tarafından keşfedilmiştir [1]. Süperiletkenliğin özelliklerinden bir tanesi direncinin belli bir sıcaklığın altında aniden sıfıra düşmesidir. Numunenin süperiletken durumdan normal duruma geçtiği alan değerine “kritik manyetik alan (H_c)” sıcaklık değerine “kritik sıcaklık (T_c)” denir [2]. Süperiletkenlik keşfedildikten sonraki 22 yıl boyunca süperiletkenin sadece mükemmel iletken olduğuna yani sıfır dirence sahip bir metal olduğuna inanılmıştır [3]. Oysa hem teorik hem de deneysel çalışmalar çok daha fazla detayı ortaya çıkarmıştır. Walter Meissner ve doktora öğrencisi Robert Oschenfeld, 1933 yılında geçiş sıcaklığının altında soğutulan bir kürenin manyetik alanı dışlayacak şekilde manyetizasyon oluşturduğunu gözlediler,. Bu mükemmel diamanyetik olay Meissner Etkisi olarak adlandırılmıştır (Şekil 1.1) [4].



Şekil 1.1. Bir süperiletkende Meissner etkisinin şematik gösterimi [4]

Diamanyetik malzemelerde, uygulanan manyetik alanın dışlanması uygulanan alana karşı manyetik moment oluşturan elektron hareketinden kaynaklanır. Bununla birlikte, bir süperiletkende, mükemmel diamanyetizma içinden akan süperakımdan kaynaklanmaktadır. Uygulanan alan, kritik manyetik alandan küçük olduğunda,

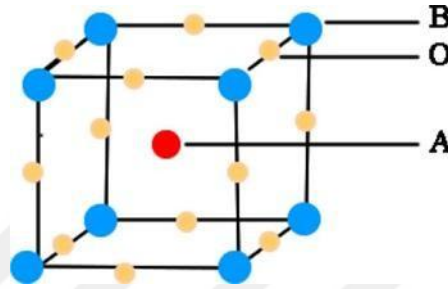
süperakım (J_c) bir iç manyetik alan oluşturur. Bunula birlikte uygulanan alan, sıcaklık ve uygulanan akım kritik değerlerini aşarsa, süperiletkenlik yok olur ve normal duruma dönülür [5,6].

1955 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafında BCS teori bulunmuş ve süperiletkenliğin olabileceği maksimum sıcaklığın yaklaşık 30 K (-243.15 °C) olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, BCS teorisi, 30 K üzerinde T_c ye sahip II. tip süperiletkenleri tam olarak açıklamakta yetersizdir. 1972'de Bardeen, Cooper ve Schrieffer süperiletkenlik üzerine ilk mikroskobik teorik çalışmalarından dolayı Nobel Fizik ödülünü almışlardır [7]. 1957 yılında Abrikosov süperiletkenlerin davranışlarını I. tip ve II. tip olarak iki kategoriye ayırdı. Bu çalışma, 2003 yılında Fizik dalında Nobel Ödülü aldı [8]. Georg Bednorz ve Alex Müller 1986'da $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{3-y}$ HTS sisteminin süperiletken olduğunu keşfettiler. Süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı (T_c) 35 K ve daha fazla olan Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler (HTS) bulunmuştur. Bu çalışmalarından dolayı J. Georg Bednorz ve Alex Müllere, 1987 yılında Nobel Fizik ödülü verilmiştir [9]. HTS süperiletkenler CuO_2 katmanının bulunduğu süperiletken malzemelerdir. 1987 yılında Paul C. W. Chu ve M. K. Wu azotun kaynama sıcaklığından yüksek 90 K kritik sıcaklığa sahip perovskite $YBa_2Cu_3O_7$ süperiletkeni keşfettiler [10]. 1988 yılında kritik sıcaklığı 105 K olan $BiSrCaCu_2O_x$ (BSCCO) ve bu yılın sonlarında kritik sıcaklığı 127 K olan $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (TBCCO-2223) süperiletkenleri keşfedildi [11,12]. 1993 yılında $HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$ süperiletkende kritik sıcaklığın 135 K olduğu bulundu [13]. 1994 yılında $(Hg_{0.8}Tl_{0.2})Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$ süperiletkende kritik sıcaklığın 138 K olduğu bulundu [14-16]. 2001 yılında T_c sıcaklığı 39 K olan MgB_2 süperiletkeni keşfedildi [17]. Demir bazlı süperiletkenlerden; 2006 yılında T_c 'si yaklaşık 4 K olan $LaOFeP$, 2008 yılında T_c 'si 26 K olan $LaOFeAs$ süperiletkenleri keşfedildi [18,19]. Araştırmacılar ve bilim insanları süperiletkenlik sınırlarını daha yüksek bir seviyeye çekmeye çalışmaktadırlar ve BCS teorisi ile açıklanamayan yüksek sıcaklık süperiletkenliğin mekanizmasını açıklamak için kapsamlı bir teorinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar yapmaya devam etmektedirler.

Süperiletkenler manyetik alandaki davranışlarına göre iki gruba ayrılabilir. Yüzey enerjisinin negatif olması durumunda manyetik akının süperiletken yüzeylere daha iyi sızmasından dolayı mıknatıslanma enerjisi azalacaktır. Bu sıra dışı davranışı ilk olarak A. A. Abrikosov bulmuştur ve bu numuneleri normal davranış gösteren

süperiletkenlerden ayırt etmek için II. tip süperiletken olarak adlandırmıştır [3]. II. tip süperiletkenler için H_{c1} ve H_{c2} olmak üzere iki kritik manyetik alan değeri tanımlanır. $H > H_{c2}$ değerleri için süperiletkenlik tamamen ortadan kalkar. $H_{c1} < H < H_{c2}$ aralığı ise karışık duruma ya da vorteks durumuna karşılık gelir.

HTS'ler perovskite olarak adlandırılan bir kristal yapıya sahiptir. Perovskite hücre ABO_3 genel formülü ile ifade edilir. Formüldeki A, B iki metal atomu ve O ise oksijen atomudur (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. İdeal Perovskite Yapı [20]

HTS'lerden biri olan $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, ABO_3 stokiyometresinde perovskit yapısına sahiptir [21]. İdeal perovskite yapıda A ve B atomları metalik katyonlar ve O atomu ise metalik olmayan anyondur. A, B katyonuna göre daha büyüktür. B katyonu kübik yapının köşelerinde üç boyutlu BO_6 oktahedral dizi oluşturur.

Perovskite yapı AO ve BO_2 düzlemlerinde meydana gelmiştir. c-eksenine dik olarak uzanan BO_2 'dir. Sonraki düzlem AO düzlemidir. Perovskite yapısı $(BO_2)(AO)(BO_2)(AO)(BO_2)$ şeklinde bir zinciri takip eder

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ kristal yapısı üç katlı, oksijen eksik perovskite yapısında oluşur. Büyük olan baryum ve itriyum atomları A konumlarına ve daha küçük olan bakır atomları ise B konumlarına yerleşir. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ yapısının düzlemsel dizilimi $(Y)(CuO_2)(BaO)(CuO_x)(BaO)(CuO_2)$ şeklindedir.

YBCO süperiletkenleri, çok çeşitli fiziksel olaylar gösterir ve hala gizemini korumaktadır [22]. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ yeterince düşük sıcaklıklarda vorteksin olmadığı mükemmel diyamanyetizmaya sahip bir Meisner fazı ve yüksek sıcaklıkta karışık (vorteks örgü) fazı oluşturur [23]. Vortekslerin etrafındaki akımla dışarıda uygulanan akım arasındaki etkileşme vortekslerin hareketine neden olabilir. Vorteksli yapıya sahip YBCO süperiletkenlerde akı çizgilerinin hareketi ile süperiletken içerisinde bir

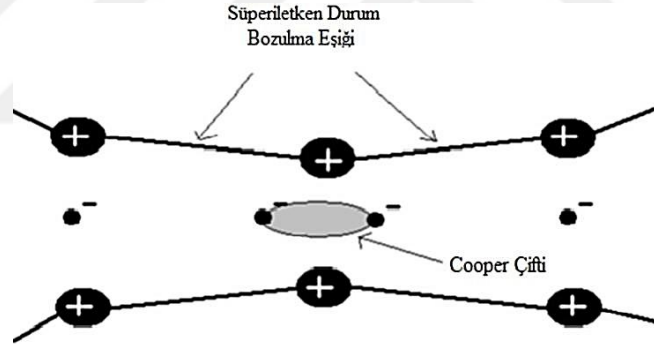
direnç oluşur. Karışık haldeki süperiletkende yeterince büyük bir akım, vortekslerin akıma dik olarak hareketlerine neden olabilir. Bu hareket, vorteksin zamanla değişimi anlamına gelir ve madde içinde direnç meydana getirir [24]. Katkılar yaparak vorteksleri bir yere bağlamak ve hareketlerini engellemek dolayısıyla karışık bir haldeki bir süperiletken için sıfır direnç oluşturmak mümkün olabilir.

Bu tez çalışmasında farklı oranlarda bor ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ süperiletkenlerini çeşitli sıcaklıklarda ve ısınma hızlarında sinterleyerek en iyi elektriksel ve manyetik özelliği yakalamak amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında çeşitli sıcaklıkta üretilen saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ süperiletkenlerin yapısal, elektriksel ve manyetik özellikleri incelenerek karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada üretilen numunelerin üst kritik alanları, alt kritik alanları, aktivasyon enerjileri, kritik akım yoğunlukları (J_c) ve çivileme (pinning) kuvvetleri hesaplanarak numunelerin süperiletkenlik kalitesine üretim sıcaklık değerinin büyüklüğü ve sıcaklık artış-azalış hızının etkisi, bor katkı oranının etkisi ve talyum katkı oranının etkisi araştırılmıştır. Bor katkı oranının azalmasına ve talyum katkı oranının artmasına bağlı olarak süperiletkenlik kalitesinde artış olmaktadır. Bu nedenle bor ve talyum katkılamanın numunede yapısal, elektriksel ve manyetik ne tür değişimler oluşturduğunu araştırmak süperiletkenlikte belli bir öneme sahiptir. Fakat yeterli çalışmalar bulunmamaktadır. Bu çalışmada bor ve talyum katkılarının sinterleme sıcaklığı ile Meissner etkisi, kritik akım yoğunluğu, aktivasyon enerjisi ve vorteks çivileme merkezi oluşumuna etkisini araştırarak çalışılan numunelerin teknolojik tercih edilebilirliğini arttırmak hedeflenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. BCS Teorisi

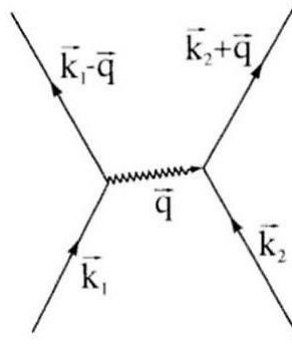
1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından ileri sürülen BCS teorisi, süperiletkenlik için verilen mikroskobik kuantum teorisinin temelidir. BCS teorisi, elektron çiftlerinin örgü ile etkileşimleri yoluyla birbirini çekebildiğini göstermiştir. BCS teorisine göre, elektron çiftleri ters spin ve momentumlu elektronlardan bir tanesinin elektron- fonon etkileşimi ile meydana gelir. Elektron fonon etkileşimi, bir elektron bir kristal örgü içinden geçmeye başladığında başlar ve elektrostatik kuvvetinin bir sonucu olarak kristal örgü deforme olur. Deforme olmuş örgü, daha büyük pozitif alan oluşturur. Bu nedenle, ikinci bir elektron deforme olmuş örgüye yaklaşır ve bunun sonucu iki elektron arasında çekici bir etkileşim olur. Bu elektron çifti Cooper çifti olarak adlandırılır, Elektronlar birbirine yaklaştığında enerjilerin minimum yapmak için birbirlerini iterler ve elektron çifti durumunu korurlar (Şekil 2.1). Elektron çiftleri birbirine bağlı olarak örgü içinde hareket ederler [25].



Şekil 2.1. Bir süperiletkende Cooper çiftlerinin şematik gösterimi [26]

Cooper çiftleri termal enerji veya manyetik enerji ile birbirinden ayrılabilir. Birinci durum, kritik bir sıcaklık T_c 'nin varlığını belirtirken, ikinci durum kritik bir manyetik alan olan H_c 'nin varlığını göstermektedir. Bir elementin izotopu kullanıldığında yani atom ağırlığı değiştirildiğinde de kritik sıcaklığı değişir. Atom ağırlığı arttığında frekansı düşeceği için kritik sıcaklığı düşer [27].

$\vec{k}_1$ durumundaki elektron fonon yayar, $\vec{k}_2$ durumundaki elektron fonon alır (Şekil 2.2). Fonon aracılığı ile elektronlar birbirini çekmektedir [28].

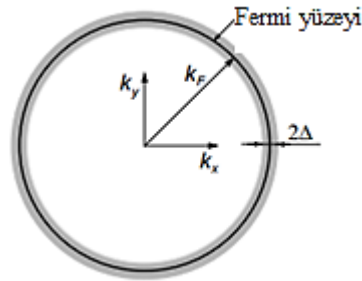


Şekil 2.2. Bir Cooper çiftinde elektron-elektron etkileşiminin şematik gösterimi [28]

Elektronların spini 1/2 iken, bir araya geldiklerinde spinleri tam sayıya dönüşerek bozon gibi davranırlar ve Pauli dışlama ilkesine uymazlar. Sonuç olarak Cooper çiftleri aynı enerji durumunda bulunurlar. Fermi yüzeyi çevresinde ince bir tabaka boyunca yer alan durumları işgal eden elektronlar karşılıklı etkileşime girebilir (Şekil 2.3). Bu tabakanın kalınlığı 2Δ Debye enerjisiyle aşağıdaki gibi verilir;

$$\Delta = \frac{\hbar\omega_c}{\sinh[1/N(0)V]} \approx \hbar\omega_c e^{-1/N(0)V} \quad (2.1)$$

ile hesaplanır. Burada ω_c Debye frekansı (kesme frekansı). $N(0)$ T=0 K sıcaklıkta Fermi yüzeyinde durum yoğunluğu. V Cooper çiftlerine neden olan elektronlar arasında çekici bir potansiyeldir. Cooper çifti elektronları, enerji boşluğu altındaki Fermi denizinin kenarında bulunur. BCS teorisi T=0 K'de Cooper çiftleri için $2\Delta(0)=3.5k_B T_c$ değerini öngörmüştür [29]. Fermi küresinin yüzeyinden itibaren 2Δ aralığında kalan elektronlar süperiletkenliği oluşturabilir (Şekil 2.3) [30].



Şekil 2.3. Fermi küresinin şematik gösterimi [31]

BCS teorisinin diğer bir önemli özelliği, koherens (eşuyum) uzunluğudur (ξ_0), ξ_0 II. tip süperiletkende oluşan vorteksin yarıçapı olarak tanımlandığı gibi uyum

uzunluğu elektron çiftindeki elektronların birlikte kalabildiği uzunluk olarak da tanımlanmaktadır. Fakat uyum uzunluğunun elektron çiftindeki iki elektron arasındaki mesafeye eşit olması I. tip süperiletkenlerde sıcaklık sıfıra eşit olduğunda meydana gelir. Ayrıca uyum uzunluğu süperiletkenliğin meydana gelebileceği ve yok olabileceği en küçük boyut olarak da bilinir [31,32]. Uyum uzunluğu numunedeki serbest elektronların aldıkları ortalama serbest yol ile de bağlantılıdır. Uyum uzunluğu ile elektronların ortalama serbest yolu arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilir:

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{\xi_0} + \frac{1}{l} \quad (2.2)$$

Denklemden, sıcaklık sıfıra eşit olduğu durumdaki uyum uzunluğudur, l ise elektronun ortalama serbest yoludur. ($\xi_0 \gg l$) durumundaki saf metallere safsızlıklar katılarak koherens uzunluk azaltılabilir. ($l \gg \xi_0$) durumundaki saf olmayan metallerde, BCS teorisi sınırlı hale gelir. Saf bir süperiletken için uyum uzunluğunun sıcaklığa bağlılığı,

$$\xi \approx \frac{\xi_0}{\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir ve BCS teorisi ile açıklanır [32].

2.2. London Denklemleri ve Sızma Derinliği

1955 yılında Fritz ve Hans London kardeşler süperiletkenlerde elektromanyetik özellikleri açıklayan bir teori geliştirdiler. Süperiletkenlerde oluşan akımın manyetik akıyı dışlamasını hesapladılar. London denklemleri süperiletkenlerin elektromanyetik özelliklerini açıklamak için Maxwell denklemlerinden elde edildi. Fermi küresinin yüzeyinden itibaren 2Δ aralığında kalan elektronlar süperiletkenliği oluşturabilir [33,34]. Maxwell denklemlerinden elde edilen 1. London denklemi:

$$\frac{\partial J_c}{\partial t} = \frac{n_s e^2}{m} E_{eff} \quad (2.4)$$

ile verilmektedir. Maxwell denklemlerinden elde edilen 2. London denklemi:

$$\nabla \times J_c = \frac{n_s e^2}{m} B \quad (2.5)$$

şeklindedir. Bu denklem, Ohm yasasının süperakım eşdeğeri olarak bilinir; bu süperakımın elektrik alan yerine manyetik alanın bir fonksiyonu olduğunu gösterir. $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_c$ Amper yasası eşitliği olan denklem (2.5)'de $\mathbf{J}_c$ yerine kullanılırsa

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \mathbf{B} \quad (2.6)$$

elde edilir. μ_0 boşluğun manyetik geçirgenlik sabitidir. $\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B}$ ve $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ eşitliği kullanıldığında

$$\nabla^2 \mathbf{B} = -\frac{\mathbf{B}}{\lambda^2} \quad (2.7)$$

elde edilir. Buradan London sızma derinliği

$$\lambda = \left(m^* / \mu_0 n_s e^2 \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

bulunur. Bu sonuç süperiletkenin yüzeyinde manyetik alanın $(e^{-x/\lambda})$ üstel olarak azaldığını gösterir. Burada Fermi küresinin yüzeyinden itibaren 2λ aralığında kalan elektronlar süperiletkenliği oluşturabilir [35,36].

Bir süperiletken numuneye bir manyetik alan uygulandığında belli yüzey katmanından manyetik alanın numune içerisine girmesini engelleyen yüzey akımları meydana gelir. Bu nedenle akı yoğunluğu numunenin yüzeyinde aniden sıfır olmaz; perdeleme akımlarının oluşturduğu bölge boyunca sıfıra azalır. Akının sıfıra düşene kadar numuneye girdiği mesafeye “sızma derinliği” denir. Sızma derinliğinden çok daha kalın numunede manyetik akı yoğunluğu denklem (2.8)'de gösterildiği gibi üstel olarak sıfıra azalmaktadır.

$$B(x) = B(0) e^{-x/\lambda} \quad (2.9)$$

Denklemdaki $B(x)$ numune içinde x kadarlık bir mesafedeki manyetik akı değeridir ve $B(0)$ ise numunenin yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu, değeri manyetik alanın numuneye sızdığı mesafe ve λ ise sızma derinliğidir. Ancak basit hesaplamalarda uygulanan manyetik alanın $B(0)$ akı yoğunluğunun λ mesafesine kadar sabit kaldığı ve o mesafede aniden sıfıra düştüğü varsayılır. Manyetik alanın numuneye sızması, özellikle ince film veya toz süperiletkenlerle çalışırken önem kazanır. Çünkü numunenin kalınlığı λ mertebesinde veya bu değerden küçükse.

uygulanan alan numunenin tamamına nüfuz eder ve manyetik akı tam olarak dışlanmaz. Sızma derinliği numunenin boyutuna göre çok küçük kaldığında ise numune mükemmel diamanyetizma özelliği göstermektedir [37].

Sıcaklık T_c sıcaklığına yaklaştığı zaman uygulanan alan madde içine daha fazla nüfuz eder ve tüm numuneyi kaplayarak süperiletken durumu ortadan kaldırıp numunenin normal duruma geçmesine neden olmaktadır [38].

Katmanlı yapıda oluşan CuO_2 süperiletkenlerde London sızma derinliği izotropik olmayabilir. HTS'lerde $\lambda \sim 1200 - 4000 \text{ \AA}$ arasındadır.

2.3. Ginzburg-Landau Teorisi

London teorisi I. tip süperiletkenlerde Meissner etkisi için iyi bir açıklama sağlar. Fakat numune içinde süperiletken ve normal bölge olduğunda II. tip süperiletkenlerde vorteksleri ve I. tip süperiletkenlerde ara durumu açıklamada başarısız olur. Bu nedenle başka bir süperiletkenlik teorisi 1950'de Ginzburg ve Landau tarafından geliştirilmiştir. Ginzburg-Landau teorisinde, karmaşık bir dalga fonksiyonu ψ süperiletkenlik parametresi olarak tanımlanmaktadır. Faz geçişini temel alan Ginzburg-Landau teorisi vorteks durumu ve vortekslerin oluştuğu karışık durumu açıklamaktadır. Süperiletken durumda serbest enerji yoğunluğu [39]:

$$f = \alpha|\psi|^2 + \frac{1}{2}\beta|\psi|^4 + \frac{1}{2m}|(-i\hbar\nabla - 2eA)\psi|^2 + \int \vec{H} \cdot d\vec{B} \quad (2.10)$$

denklem (2.10) daki son terim dış manyetik alana bağlı serbest enerji yoğunluğunu. üçüncü terim manyetik alan ve kinetik enerjiye bağlı serbest enerji yoğunluğunu tanımlar. n_s süperelektron yoğunluğunu belirlemek için $|\psi|^2$ dalga fonksiyonu kullanılır. $\psi = 0$ olduğu zaman normal durumun serbest enerji yoğunluğu $\int \vec{H} \cdot d\vec{B}$ olur.

Süperiletken durumda serbest enerji yoğunluğunun ψ serbest enerji düzen parametresine ve A vektör potansiyeline göre türevini alarak elde edilecek enerji minimize edilirse sırasıyla 1. ve 2. Ginzburg-Landau denklemleri (GL-1 ve GL-2) elde edilir:

$$\left[\alpha + \beta|\psi|^2 + \frac{1}{2m}(-i\hbar\nabla - 2eA)^2 \right] \psi = 0 \quad (2.11)$$

$$\vec{j} = \frac{he}{m^*i}(\psi^*\nabla\psi - \psi\nabla\psi^*) - \frac{4e^2}{m^*}|\psi|^2 A \quad (2.12)$$

(2.11) denklemi zamandan bağımsız Schrodinger denklemine benzemektedir. Uygulanan manyetik alana bağlı olarak düzen parametresini (ψ) belirler. (2.12) denklemi ise süper akım yoğunluğunu vermektedir. Süperiletken durumda $\psi = \psi_\infty$ yaklaşımı yapıldığında, yani düzen parametresi yavaş değiştiğinde GL-2 denkleminde

$$j = -\frac{4e^2}{m^*} |\psi|^2 A \quad (2.13)$$

eşitliği elde edilir. Eğer $n_s = |\psi_\infty|^2$ ve $e^* = 2e$ uygulanırsa, bu sonuç London teorisindeki sızma derinliğine benzer olur ve aşağıdaki gibi yazılır [39]:

$$\lambda = \left(\frac{m^*}{\mu_0 e^{*2} |\psi_\infty|^2} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

Manyetik alan yokluğunda süperiletken içinde akım yoktur, o halde GL-2 denklemi sıfır olur ve GL-1 denklemi;

$$\alpha \psi + \beta |\psi|^2 \psi = 0 \quad (2.15)$$

elde edilir. Denklemin iki çözümü vardır: 1. çözüm: $\psi = 0$, $T \geq T_c$ için normal duruma karşılık gelir. $\psi \neq 0$, $T \leq T_c$ $|\psi|^2 = -\frac{\alpha}{\beta}$ süperiletken duruma karşılık gelir. α kritik sıcaklık T_c civarında sıcaklığa lineer olarak bağlı bir parametredir:

$$\alpha(T) = \alpha_0 \left[\left(\frac{T}{T_c} \right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

β zamandan bağımsız. α ve $\beta = \beta_0$ pozitif olmalarından dolayı $\alpha(T)$ T_c kritik sıcaklığın altında negatif olur. $|\psi|^2 = n_s^* = -\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha_0}{\beta} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right) \right]$, ikinci derece faz geçiştir. İki önemli karakteristik uzunluk için şu sonuçlar elde edilir:

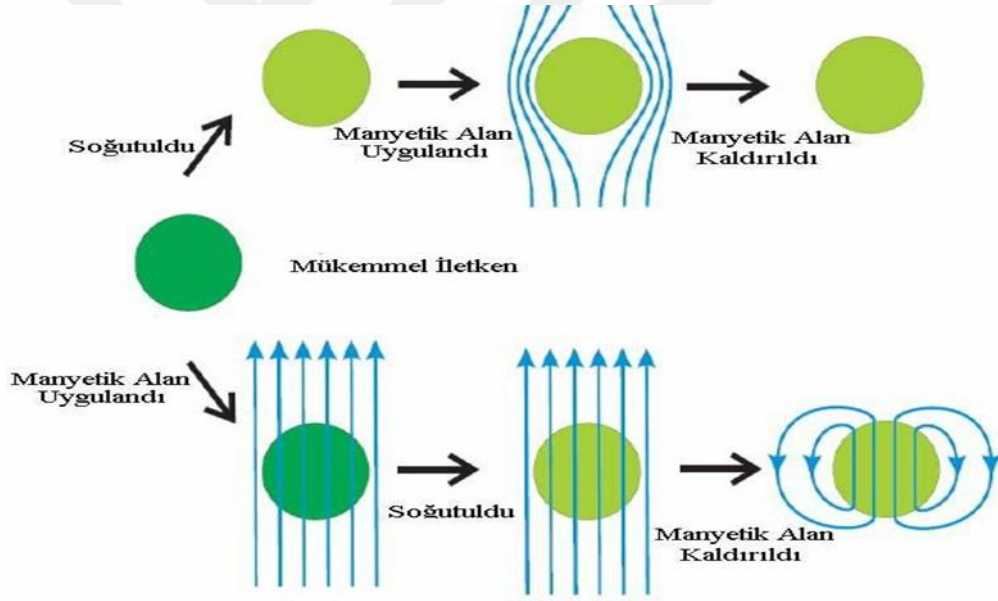
$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m^*|\alpha|}} \quad \lambda = \sqrt{\frac{m^*}{\mu_0 e^{*2} |\psi_\infty|^2}} \quad \kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (2.17)$$

denklemden ξ eş uyum uzunluğu, ψ süperiletkenlik parametresinin karakteristik uzunluğudur. κ Ginzburg-Landau parametresine göre süperiletkenler ikiye ayrılırlar, I. tip süperiletken ise $\kappa < 1/\sqrt{2}$ ve II. tip süperiletken ise $\kappa > 1/\sqrt{2}$ şeklindedir [40].

2.4. Süperiletkenlik Durumun Karakteristik Özellikleri

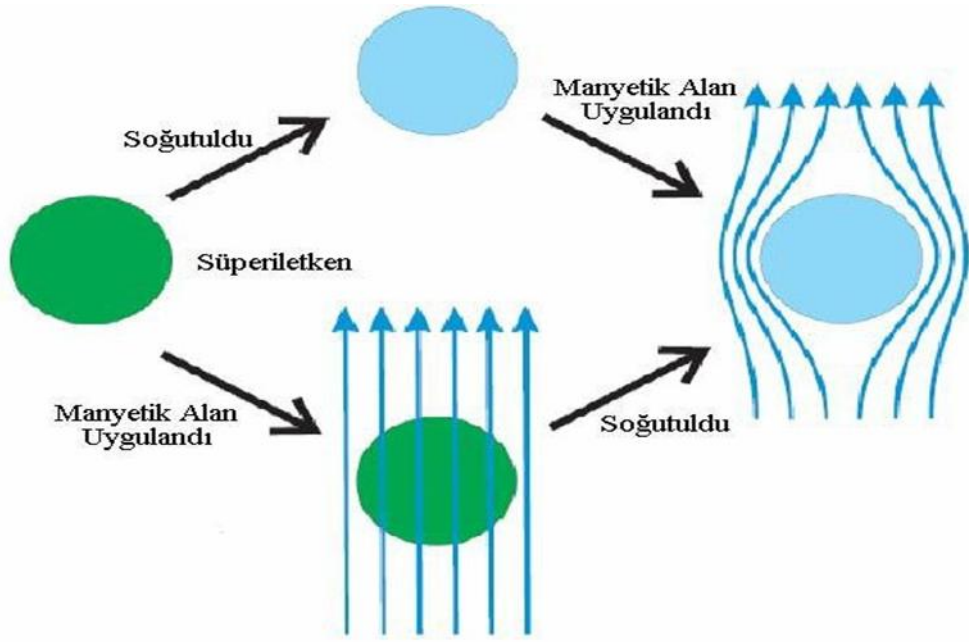
2.4.1. Meissner etkisi

1933’de Meissner ve Ochsenfeld manyetik alan içinde T_c sıcaklığının altına soğutulan Sn ve Pb’un beklediklerinden farklı olarak, mükemmel iletken gibi davranmadıklarını buldular. Mükemmel iletkenlerin, şekil 2.4’de görüldüğü gibi soğutulma ve manyetik alan uygulama sıralamasına göre davranışı değişmektedir. Mükemmel iletken soğutulduktan sonra manyetik alan uygulandığında manyetik alanı dışlar ve daha sonra alan kaldırıldığında da numune içerisindeki manyetik alan sıfır olur. Soğutulmadan önce numune üzerine manyetik alan uygulandığında manyetik alan numune içerisine girer ve numune soğutulduğunda mükemmel iletken içerisinde artık manyetik alan kalır. Bu durumda manyetik alan kaldırıldığında ise mükemmel iletken içerisindeki manyetik alan değişmez [33,41].



Şekil 2.4. Mükemmel iletkende manyetik alanın davranışı [41]

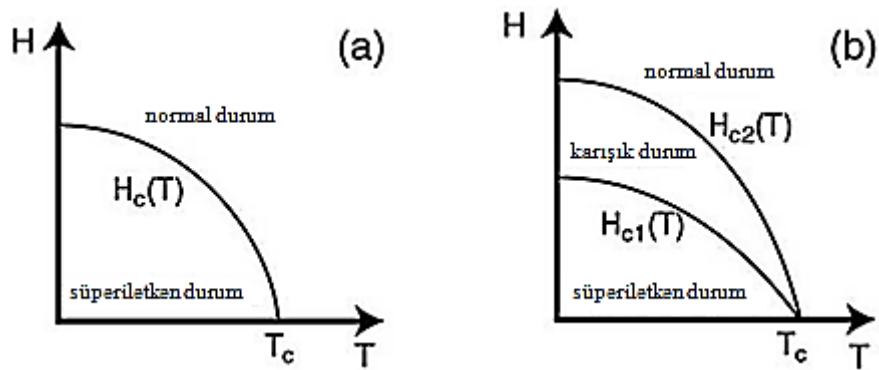
Mükemmel iletkenden farklı olarak manyetik alana karşı süperiletken farklı tepki vermektedir. Bir süperiletken belli kritik sıcaklık ve manyetik alan değerlerinin altında numunenin yüzeyinde oluşan akımdan dolayı içerisine manyetik alanın girmesine izin vermemektedir (Şekil 2.5). Süperiletken içerisinde manyetik alanın bulunmadığı bu duruma Meissner etkisi denir.



Şekil 2.5. Süperiletkenlerin manyetik davranışı [41]

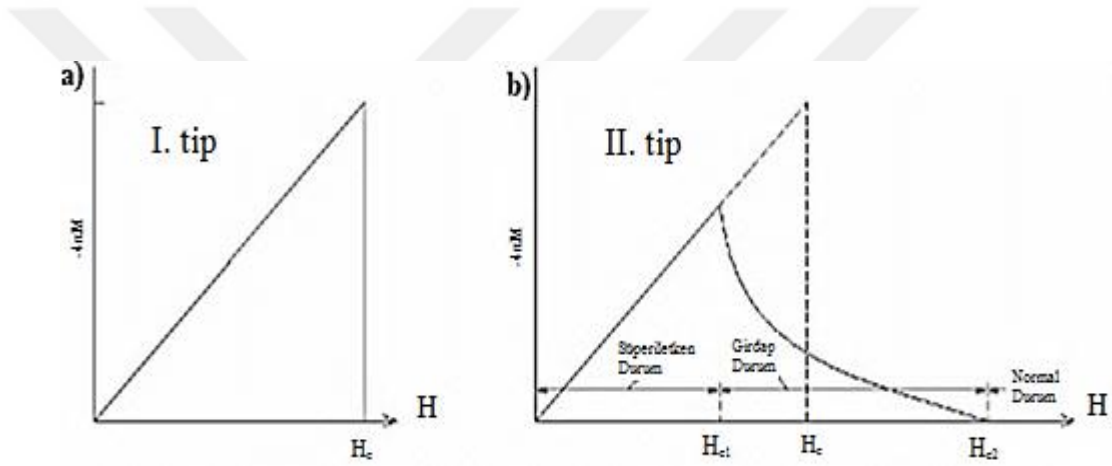
2.4.2. Tip-1 ve tip-2 süperiletkenler

Metal elementleri $\xi \gg \lambda$ olan I. tip süperiletkenlerdir ve düşük kritik sıcaklık ve manyetik alana sahip olduklarından endüstride kullanmak zordur [42-44]. I. tip süperiletkenler H_c kritik manyetik alan ve T_c kritik sıcaklık altında Meissner etkisi ve sıfır direnç gösterirler. H_c kritik manyetik alan veya T_c kritik sıcaklık aşıldığında I. tip süperiletkenler aniden normal faza döner. I. tip süperiletkenlerde Meissner durumunda elektriksel direnç sıfırdır oysa normal durumda sıfır değildir. Genellikle I. tip süperiletkenler sadece birkaç yüz Gauss kritik manyetik alana sahiptir (Şekil 2.6.a, Şekil 2.7.a).



Şekil.2.6. Kritik manyetik alanın sıcaklığa bağlılığı: (a) I. tip süperiletkenler ve (b) II. tip süperiletkenler [46]

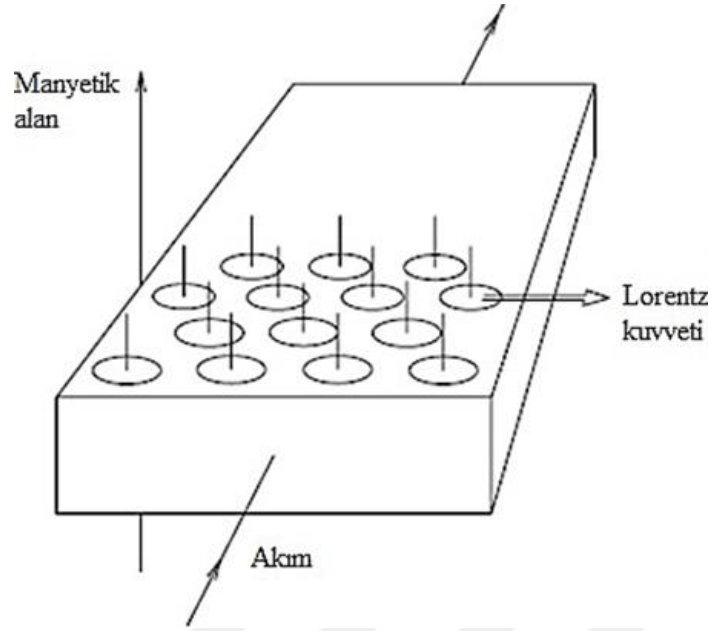
II. tip süperiletkenler sızma derinliği, koherens (eşuyum) uzunluğundan büyük ($\lambda \gg \xi$) olan süperiletkenlerdir [44]. II. tip süperiletkenler H_{c1} ve H_{c2} kritik manyetik alanlarına sahipler. II. tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alan arttırıldığında manyetik moment H_{c1} alt kritik alana kadar artar ve bu durum Meissner duruma karşılık gelir. Uygulanan alan H_{c1} alt kritik manyetik alandan H_{c2} üst kritik alana kadar arttırıldığında, süperiletken içerisine sızan vorteks artarak manyetik momenti azaltır ve bu durum süperiletkende vortekslerin olduğu karışık durum olarak adlandırılır. Uygulanan alan H_{c2} 'de büyük olduğunda numuneye uygulanan alanın tamamı nüfuz ederek normal faza döner. II. tip süperiletkenlerde hem Meissner durumda hem de karışık durumda elektriksel direnç sıfırdır (Şekil 2.6.b, Şekil 2.7.b) [45,46].



Şekil 2.7. a)Meissner etkisinin tam oluştuğu (ideal diyamanyetik) bir süperiletkende mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi, b) II. tip süperiletkenlerde mıknatıslanmanın uygulanan manyetik alanla değişimi [41]

2.4.3. Kritik akım yoğunluğu (J_c)

Kritik akım yoğunluğu (J_c), süperiletken bir numunenin kayba uğramadan taşıyabileceği en büyük akımdır. Karışık durumda süperiletken içerisinde vorteksler bulunur. Süperiletkene dışarıda bir j akımı uygulandığında, vorteksler Lorentz kuvvetinin etkisinde kalarak hareket etmeye başlar ($\mathbf{F}_L = \mathbf{V} \times \mathbf{B}$). Vortekslerin hareketinden dolayı elektriksel kayıp ortaya çıkar. Vorteksler hareket ettiğinde, süperiletken içinde bir elektrik alan meydana gelir. Bunun sonucu Ohmik kayıp gerçekleşir. Böylece süperiletkenliğin önemli bir özelliği olan kayıpsız elektriksel akım iletim durumu kaybolur (Şekil 2.8) [47,48].



Şekil 2.8. Karışık durumda bir süperiletken için dış manyetik alan ve uygulanan akım ile vortekslere etki eden Lorentz kuvveti ve vorteks hareketi [47,48]

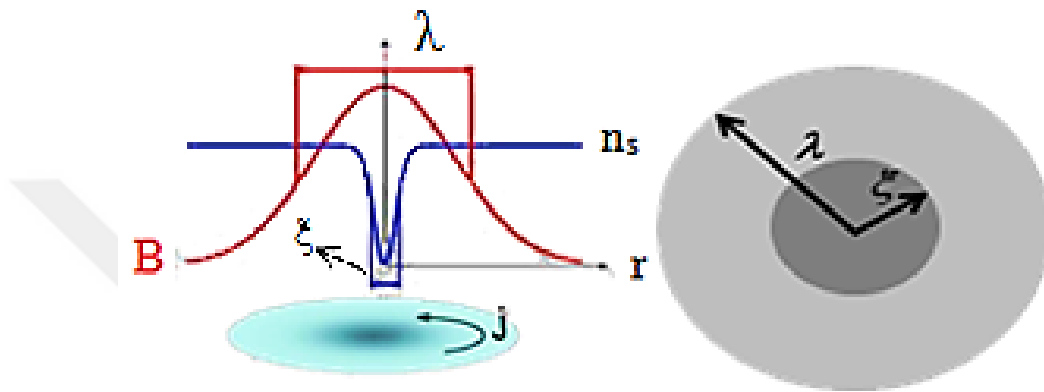
Bu özelliği korumak için, vorteksler çivilenme merkezleri tarafından hızları sıfır olacak şekilde tutulmak zorundadır. Vorteksleri çivilenme merkezlerinde tutan kuvvete çivilenme kuvveti (F_p) adı verilir. Bu kuvvet, sistemi Lorentz kuvvetinden koruyarak vortekslerin hareketini ve bunun sonucunda meydana gelen kayıplı durumu engeller. Eğer Lorentz kuvveti çivileme kuvvetine eşit veya büyük olursa, vorteksler hareket etmeye başlar.

Süperiletkenlerde çivileme merkezleri, numune içinde yapısal kusurlardan dolayı yerel olarak düzen parametresinin azalması ya da yok olması ile oluşmaktadır. Bu nedenle, vorteks bir çivileme merkezi ile karşılaştığında enerjisini azaltabilir. Bu sonuca göre, karışık durumda bulunan bir süperiletken numunede hiç kusur olmadığında numunenin sahip olacağı kritik akım yoğunluğu sıfır olacaktır, ($J_c=0$). Çivileme merkezlerinin süperiletken yapıda etkili olabilmesi için boyutları eş uyum uzunluğu (ξ) aralığında olmalıdır. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerde görülen tipik çivileme merkezleri; çatlaklar, ikiz düzlemler, süperiletken olmayan fazlar, tanecik sınırları, yığılma hataları, kaymalar ve oksijen boşlukları olarak kabul edilirler [49].

Süperiletkenlerde kritik akım yoğunluğu, klasik süperiletkenlerde olduğu gibi uygulanan manyetik alana ve sıcaklığa bağlıdır. Manyetik alanın ve sıcaklığın artırılması kritik akım yoğunluğunu azaltmaktadır. Ayrıca HTS'ler eş yönsüz oldukları için, kritik akım yoğunluğu kristalografik eksene göre değişir [49].

2.4.4. Vorteksli durum

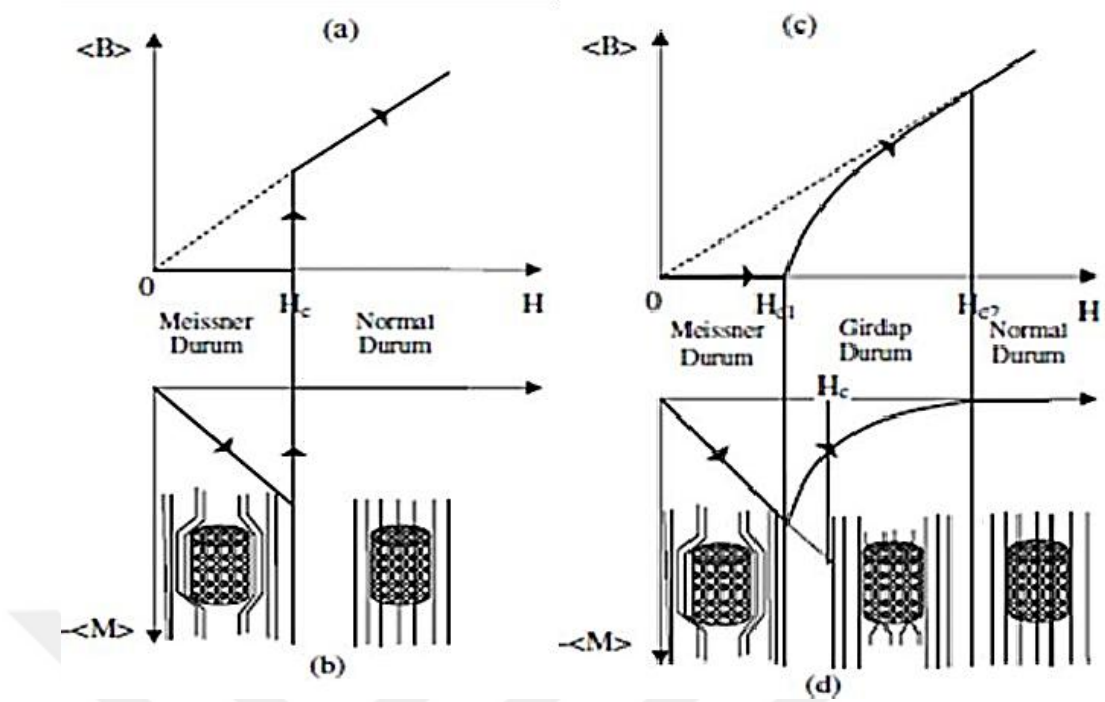
II. tip süperiletkende karışık durumda görünen bir vorteksin yapısı Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Bu vorteksin içinde dolaşan bir akım vardır. Süperiletken düzen parametresi girdabın çekirdeğinde bastırılmakta ve manyetik alan numunenin içine şekildeki gibi nüfuz etmektedir. Bastırılmış düzen parametresinin uzunluğu ξ koharens (eşuyum) uzunluğu ile verilir. Vorteksin merkezinden uzaklaştıkça azalan manyetik alanın uzunluğu λ sızma derinliği ile verilir [8].



Şekil 2.9. Süperiletkende vorteks yapısının şematik gösterimi [50]

1950’li yıllara kadar kuantumlanmanın sadece mikroskopik olduğu düşünülürken London süperiletkenin temelde bir kuantum olayı olduğunu göz önüne alarak kuantumlanmanın makroskopik olduğunu ileri sürmüştür. Çünkü süperiletkendeki her elektron çiftinin hareketi diğerinin hareketine bağlıdır. Metal bir halkada kalıcı bir süperiletken akımın dolaştığı düşünüldüğünde, bu akımın davranışı bir atomun orbitalindeki bir elektronun hareketine benzemektedir. Kuantum teorisine göre böyle bir elektronun durumunu tanımlayan nicelikler kesikli değerler alır (kuantum sayıları n, l, m). Atomda mikroskopik boyutta olan kuantumlanma olayı süperiletkende makroskopik boyutta olmaktadır. Böylece süperiletken bir halkadaki akımın sürekli değer almayacağı yani kesikli olduğu gösterilmiştir [51].

I. tip süperiletkenlerde uygulanan alan H_c kritik alana kadar arttırıldığında numune dışındaki manyetik moment lineer olarak artar ve H_c kritik alanda aniden sıfırlanır. (Şekil 2.10.a,b). II. tip süperiletkenlerde ise uygulanan alan H_{c1} kritik alana kadar arttırıldığında numune dışındaki manyetik moment lineer olarak artar ve H_{c1} 'den sonar azalarak H_{c2} 'de sıfır olur (Şekil 2.10.c,d).



Şekil 2.10. I. tip süperiletkenlerde; a) ortalama manyetik akı yoğunluğunun b) ortalama manyetizasyonunun ve II. tip süperiletkenlerde ; c) ortalama manyetik akı yoğunluğunun d) ortalama manyetizasyonunun uygulanan manyetik alana bağlılığı [51].

Normal durumda, uygulanan alan manyetik geçirgenliğe bağlı olarak bir iç alan oluşturur;

$$\mathbf{B}_{\text{uygulanan}} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}_{i\check{c}} \quad (2.18)$$

Süperiletken durumda ise uygulanan alan manyetik geçirgenliğe bağlı olarak bir iç alan ve manyetizasyon oluşturur [33];

$$\mathbf{B}_{i\check{c}} = \mu \cdot \mathbf{H}_{i\check{c}} = \mu_0 (\mathbf{H}_{i\check{c}} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H}_{i\check{c}} \left(1 + \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}_{i\check{c}}}\right) \quad (2.19)$$

Süperiletkende Meissner olayının olduğu durumda iç manyetik alan numuneden tamamen dışlanarak manyetizasyon oluşur [52];

$$\mathbf{B}_{i\check{c}} = 0 \quad (2.20)$$

$$\mathbf{H}_{i\check{c}} + \mathbf{M} = 0 \quad (2.21)$$

$$\mathbf{H}_{i\check{c}} = -\mathbf{M} \quad (2.22)$$

$$0 \leq \mathbf{B}_{\text{uygulanan}} \leq \mathbf{B}_{c1} \text{ durumunda,}$$

$$\mathbf{H}_{i\zeta} = -\mathbf{M} = \frac{-\mathbf{B}_{uygulanan}}{\mu_0} \quad (2.23)$$

Süperiletkende vorteks oluştuğu durumda iç manyetik alanın bir kısmı numuneden dışlanıp manyetizasyonu, bir kısmı da manyetik akı yoğunluğu yani vorteksleri oluşturur [52];

$$B_{c1} \leq B_{uygulanan} \leq B_{c2}$$

$$\mathbf{B}_{i\zeta} = \mu \cdot \mathbf{H}_{i\zeta} = \mu_0 (\mathbf{H}_{i\zeta} + \mathbf{M}) \quad (2.24)$$

$$\mu_0 \mathbf{M} = -(\mathbf{B}_{uygulanan} - \mathbf{B}_{i\zeta}) \quad (2.25)$$

Her bir vorteksin manyetik akısı, bulunduğu alan üzerinde manyetik alanının integrali alınarak bulunur.

$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \Phi_0 \quad (2.26)$$

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.0678 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2 \quad (2.27)$$

Φ_0 akı kuantumu R_H direncinin Hall etki kuantumu ile ilişkilidir.

$$R_H = h/e^2 = \frac{2\Phi_0}{e} = 25.813 \, \Omega \quad (2.28)$$

Bir Cooper çiftin yükü $2e$ olduğu bulunduğu için bazı süperiletken araştırmacıları direncin kuantumu olarak $R_0 = h/4e^2 = \frac{\Phi_0}{2e} = 6.813 \, \Omega$ değerini kullanırlar [52].

İki vorteks arasında birim uzunluk başına F/L itme kuvveti, bir vorteksin $\mathbf{J}_1$ akım yoğunluğu ile diğer vorteksin $\mathbf{B}_2$ manyetik alanı arasında ki $\mathbf{F} = \mathbf{J}_1 \times \mathbf{B}_2$ Lorentz etkileşmesinden ortaya çıkar:

$$\frac{\mathbf{F}}{L} = \int \mathbf{J}_1 \times \mathbf{B}_2 r_2 dr_2 d\theta_2 \quad (2.29)$$

Vortekslerin birbirinden oldukça uzak olduğunu varsayarsak ($d \gg \lambda$), aşağıdaki yaklaşım yapılabilir.

$$\frac{\mathbf{F}}{L} \sim \mathbf{J}_1(d) \times \int \mathbf{B}_2 r_2 dr_2 d\theta_2 \quad (2.30)$$

Uygulanan alan düşük kritik alandan çok büyük olduğunda ($B_{uyg} \gg B_{c1}$) yakın komşu vorteksler üst üste binerler yani λ sızma derinliğinden çok daha yakın olurlar ve yukarıdaki denklem kullanılamaz [52].

Bir vorteksi harekete geçirmek için gerekli Lorentz kuvveti en az çivileme kuvvetine eşit olmalıdır ve bu hareketlilik için gerekli olan birim uzunluk başına kuvvetin (F_p) sıcaklığa bağlı olduğu bulunmuştur.

$$F_p(T) = F_{p0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right) \right]^n \quad (2.31)$$

F_{p0} ; $10^{-12} - 4 \times 10^{-4}$ N/m ve n ; 1.5 – 3.5 arasında değerler alırlar.

Dik alan içinde ince filmde akım yoğunluğu ve manyetik indüksiyon, film kalınlığı boyunca homojen değildir. Ortalama kalınlık üzerinde akım yoğunluğu yaklaşık olarak $1/d$ ile orantılı olarak film kalınlığının artmasıyla azalır. Bir ince filmde aşağıdaki durumlarda manyetik gevşeme daha yavaş olur:

1. Hacimsel bağlanmanın yokluğunda yani yüzey bağlanmasının etkin olduğu durumda,
2. Hacimsel bağlanmanın olduğu durumda, komşu kusurlar arasındaki mesafe ile kalınlık arasındaki oran $d/a \sim 1$ eşliğinde ve üzerinde.

Hacimsel bağlanma etkin ve d/a oranı bu eşğin altında ise, manyetik gevşeme bir ince filmde daha hızlı olur [53].

II. tip süperiletkenlerde akımın dirençsiz geçebilmesinin koşulu, tuzak merkezlerinin oluşturduğu akı tuzak kuvvetinin (F_p). Lorentz kuvvetinden (F_L) büyük olması ile sağlanır. F_p 'nin F_L 'ye eşit olduğu değer kritik akım yoğunluğu (J_c) değeridir

$$F_p = F_L = J_c B \quad (2.32)$$

Yüksek akım yoğunluğu elde edebilmek için çivileme kuvvetinin büyük olması gerekir. Bu da numune içerisinde etkin akım tuzak merkezlerinin olması ile sağlanır. Süperiletken olmayan bir parçacığın yapı içerisinde akım tuzak mekanizması olarak görülmektedir (Şekil 2.11). Çivileme kuvvetinin manyetik alana bağlı grafiklerinde pik oluşma nedeni akım tuzak merkezlerinin yetersiz olmasıdır. Manyetik alan arttıkça vorteks sayısı ve çivileme kuvveti artmaktadır. Çivileme kuvveti düşük alanda pik oluşturuyorsa yetersiz tuzak merkezi var demektir.

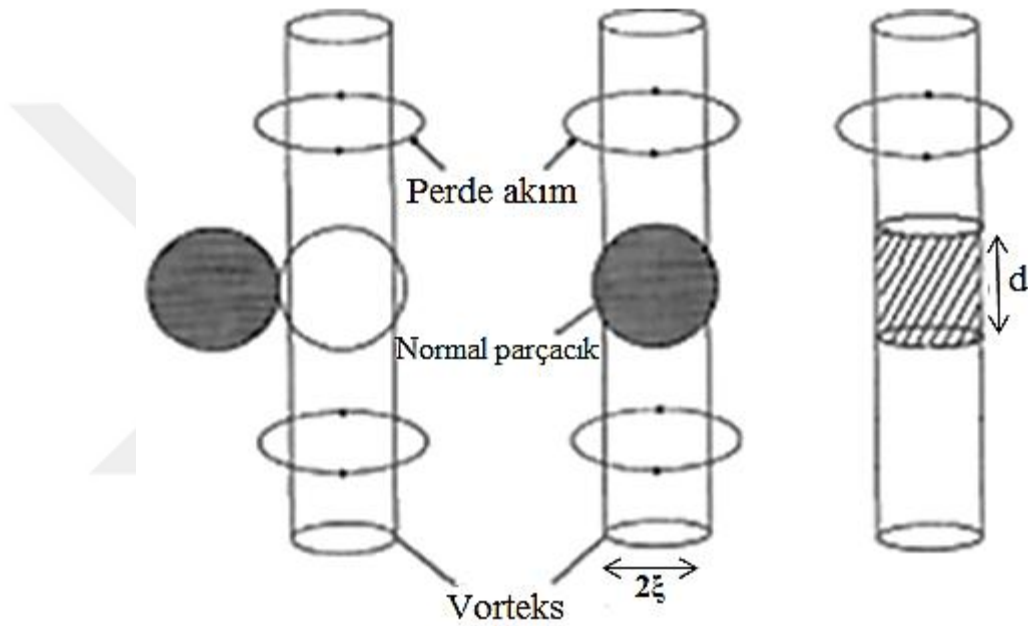
Vorteksler yapıda normal faza sahip parçacıklarla etkileştiklerinde, nüfuz ettikleri birim hacim başına azalan enerji miktarı;

$$U_p = (H_c^2 / 8\pi) \cdot (\pi \xi^2 d) \quad (2.33)$$

ile verilir. Burada ξ eşyayım uzunluğu ve d ise normal faza sahip parçacığın uzunluğudur. U_p tuzak enerji ile tuzak kuvveti F_p arasındaki ilişki ;

$$F_p = U_p / 2\xi = (H_c^2 / 16) \cdot \xi \cdot d \quad (2.34)$$

ile verilir.



Şekil 2.11. Akı tuzak mekanizmasının şematik gösterimi [54]

2.5. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler (HTS)

Süperiletkenler kritik sıcaklıklarına göre sınıflandırılabilir. Kritik sıcaklıklarına göre süperiletkenler düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık süperiletkenler olarak ikiye ayrılırlar. Genel olarak BCS teorisini temel alan 30 K altında kritik sıcaklığa sahip süperiletkenler düşük sıcaklık süperiletkenlerdir. 30 K sıcaklıktan yüksek kritik sıcaklığa sahip süperiletkenler yüksek sıcaklık süperiletkenler olarak tanımlanırlar [43].

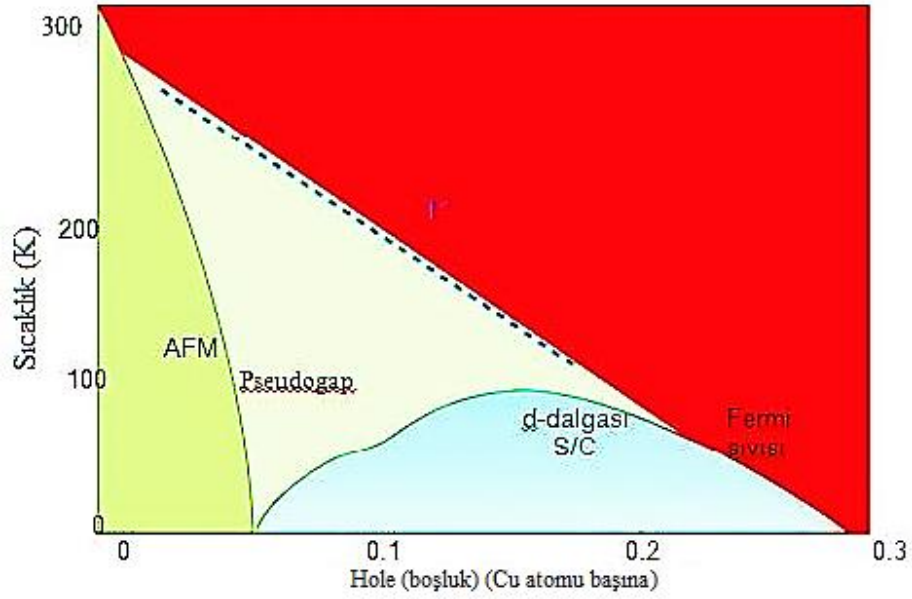
BCS teorisine göre iki elektron bir araya gelerek Cooper çiftleri oluştururlar. Örgü deformasyonu ile bir araya gelen bu elektron çiftleri arasında belli bir enerji boşluğu vardır. Enerji boşluğu kritik alan, spesifik ısı ve manyetik özellikler gibi

BCS süperiletkenlerin bir çok özelliklerini açıklar. Geleneksel süperiletkenler s-dalgası süperiletkenler olarak da bilinirler. Çünkü süperiletken çiftleri küresel s-dalgası simetrisine sahiptir. Yıllar boyunca, I. tip süperiletkenler bilinen tek süperiletkenlerdi. Kritik sıcaklıkları çok düşüktür ve onları süperiletken duruma getirmek için sıvı helyum kullanılmaktadır. Sıvı helyum oldukça pahalıdır ve pratik uygulamalar için karmaşık bir soğutma sistemi de gereklidir. Bu nedenle araştırmacılar oda sıcaklığında, en azında azotun kaynama noktasından (~ 77 K) daha yüksek sıcaklıklarda süperiletken duruma ulaşacak malzemeler araştırmaya başladılar. Bu doğrultuda 1986 yılında Johannes Georg Bednorz ve Karl Alexander Müller'in 35 K'e yakın geçiş sıcaklığına sahip Ba-La-Cu-O den oluşan süperiletken bir malzeme buldular [55]. Bir yıl sonra 1987 yılında 93 K kritik sıcaklığına sahip $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ süperiletken bileşiği keşfedildi [56]. HTS süperiletkenlerde bir Cooper çiftinin orbital fonksiyonu s-dalgası olmadığı için BCS teorisi HTS süperiletkenleri açıklayamamaktadır. Süperiletkenlik çifti fonon elektron etkileşmesi ile oluşmamaktadır. I. tip süperiletkenlerin aksine HTS süperiletkenler asimetric düzene sahiptir. Bir cooper çiftinde iki elektron antisimetric durumda olduğunda dalga fonksiyonu ile ayırt edilemez. Çünkü Cuprate süperiletkenler anizotropik d- dalga fonksiyonuna sahip, elektron çiftleri $l=2$ açisal momentumuna sahiptir [57]. II. tip süperiletken durum olarak da adlandırılan HTS'lerin süperiletkenlik mekanizması hala tam olarak açıklanamamaktadır. Çünkü vortex durumunda manyetik alan sınırlarını belirlemek çok zordur [33]. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin çoğu bakır oksit tabakaları içermektedir.

HTS'lerin yalnızca süperiletkenlikleri değil doping-sıcaklık faz diyagramı da şaşırtıcıdır. HTS'lerin çoğu, antiferromanyetik bir yalıtım durumu, d-dalgası süperiletkenliği ve farklı elektronik özellikler sergilerler. Kimyasal bileşim ve yapı kusurlarına ve küçük değişikliklere karşı güçlü bir duyarlılık gösterirler. Bu onların içsel özelliklerini anlamayı zorlaştırmaktadır [57,58].

Tüm HTS malzemelerinin ortak özelliği doping yapılabilen taşıyıcı yüklerin olduğu CuO_2 düzlemleridir ve eylemlerin çoğu bu düzlemde gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklı süperiletkenlerin ana bileşiklerinden elektronik orbitaller bakır atomu başına bir elektron veya bir hole (boşluk) ile yarı doludur. Bu, grup teorisine göre metalik özellik gösterir [59,60]. Ancak, düşük sıcaklıklarda yarı dolu CuO_2 düzleminde elektrostatik itme kuvveti en büyük olur ve malzemeler yalıtkan özellik

gösterirler. Sıcaklık sıfıra doğru gittiğinde iletkenlik kaybolur ve bu durum Mott yalıtkan olarak bilinir [61,62]. Gerçek yük hareketi engellenirken, bir Mott yalıtkanındaki sanal dalgalanmalar bir "süper-değişim (super-exchange)" etkileşimi oluşturur [41]. Pauli dışlama ilkesi nedeniyle çift doluluk, hatta sanal çift doluluk, eğer ikişerli dolu elektronlar antiparalel olan spinlere sahipse gerçekleşebilir. Böylece uzun menzilli bir antiferromanyetik düzen, sanal çift doluluğun gerçekleşmesine izin vererek sistemin enerjisini azaltabilir. Bu durumda her bölgede sadece spin dalgalanması olabilir.

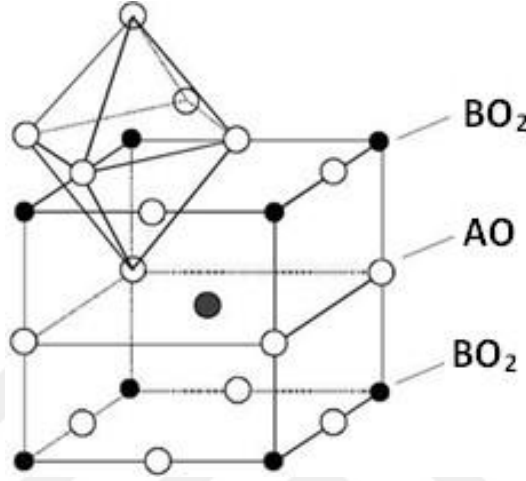


Şekil 2.12. Hole (boşluk) katkılı cupratların faz diyagramı [58]

HTS'lerin çoğunda, taşıyıcı yoğunlukları doping olarak bilinen kimyasal işlemlerle ayarlanabilir. Doping yapılan elektronlar veya holler (boşluklar) düzlem üzerinde elektronların atlayabileceği alanlar oluşturarak elektrik iletkenliğini sağlayabilirler. Antiferromanyetik fazda, Cu düzlemindeki komşu spinlerin manyetik momentleri zıt yönde olacak şekilde düzgün şekilde sıralanır [63]. Herhangi doping yapılmamış HTS'ler antiferromanyetik yalıtkanlardır. Hollerin (boşlukların) hızla artırılması, manyetizmayı hızla bastırır ve düşük sıcaklıklarda süperiletkenlik ortaya çıkar. Süperiletkenlikle antiferromanyetik arasında sınırlı bir doping aralığı vardır. Bu bölge pseudogap olarak adlandırılır ve bu bölgede düşük sıcaklıkta değişen manyetizma meydana gelir [64-66]. Düşük dopinglerde HTS'ler antiferromanyetik Mott yalıtkanlarıdır. Doping arttıkça antiferromagnetizm azalır ve süperiletkenlik ortaya çıkar. Pseudogap durumu, Mott yalıtkanı ve BCS süperiletkenleri arasında

bulunur (Şekil 2.12) [67-69]. Maksimum doping üzerinde doping yapıldığında, direnç fermi sıvısında beklenildiği gibi sıcaklığın karesi (T^2) ile orantılı olur [70].

HTS'ler perovskite olarak adlandırılan bir kristal yapıya sahiptir. Perovskite hücre ABO_3 genel formülü ile ifade edilir. Formüldeki A, B iki metal atomunu ve O ise oksijen atomunu temsil eder.



Şekil 2.13. Genel perovskite yapısının şematik gösterimi [75]

A atomu birim hücrenin merkezindedir ve etrafında 12 tane oksijen atomu vardır. B atomu köşelerde bulunur ve etrafında 6 tane oksijen iyonu bulunur (şekil 2.13). Birim hücrenin yapısına ve örgü parametresine göre üç tip perovskite vardır: İlk sınıf $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ gibi kübik perovskitelerdir ($a = b = c$). Bu sistem ilk yüksek T_c sistemlerden biri olup, geçiş sıcaklığı 10 K'dir. $KNiF_4$ yapısı olarak bilinen ikinci sınıf ise, tetragonal ($a = b \neq c$) simetriye sahip tek tabakalı perovskitelerdir. Buna bir örnek T_c 'si yaklaşık olarak 38 K olan $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ verilebilir. Burada a ve b örgü sabitleri, bakır oksit düzleminde ölçülmektedir ve c-ekseni ise düzleme diktir. Üçüncü sınıf ise ortorombik yapıya sahip ($a \neq b \neq c$). 92 K değerinde geçiş sıcaklığı gösteren $YBa_2Cu_3O_7$ şeklinde bir stokiometriye sahip olan çok tabakalı perovskitelerdir [21]. Bu yüksek sıcaklık süperiletkenlerin bazı özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

a) HTS'lerin hepsi II. tip süperiletken grubuna girer. b) Tanecikli yapıdadırlar ve seramik yapıya sahip oldukları için esnek numuneler değildir. Bu nedenle kırılındırlar. c) HTS'lerin yapısı tanecik, tanecik sınırları, tanecik sınırlarındaki zayıf bağlantılar, ikiz düzlemlerden oluşmuştur. Bu durumlardan dolayı külçe (bulk)

olarak sentezlenmiş HTS'lerin kritik akım yoğunluğu (J_c) düşüktür. J_c tek kristaller ve ince filmlerde maksimumdur ve tanecik sınırının artmasıyla J_c azalır [71,72]. d) Yüksek anizotropiye sahiptirler. Yani anizotropik olmasından dolayı yöne bağımlılık gösterirler. e) Uyum uzunluğu düşük sıcaklık süperiletkenlere göre çok küçüktür. Sızma derinliği yüksek olan numunelerdir. Uyum uzunluğu ab -düzleminde 10-30 Å ve c ekseninde 2-5 Å arasındadır [73,74].

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin bazı özellikleri çizelge (2.1)'de verilmiştir. Uygulanan manyetik alanın yönü ab -düzlemine dik ($H_{c2\perp}$) ve paralel ($H_{c2\parallel}$) olduğu durumlarda üst kritik manyetik alan değerleri Çizelge 2.1'deki gibi olur [75].

Çizelge 2.1. HTS'lerin bazı karakteristik değerleri [75]

Yapı Birim	T_c (K)	$\lambda_{c\perp}$ (nm)	$\lambda_{c\parallel}$ (μ m)	$\xi_{ab\parallel}$ (nm)	$\xi_{c\perp}$ (nm)	$H_{c2\perp}$ (T)	$H_{c2\parallel}$ (T)
$La_{1.83}Sr_{0.17}CuO_4$	38	100	2-5	2-3	0.3	60	
$YBa_2Cu_3O_{6+x}$	93	150	0.8	1.6	0.3	110	240
$Bi_2Sr_2CuO_{6+x}$	13	310	0.8	3.5	1.5	16-27	43
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$	94	200-300	15-150	2.0	0.1	>60	>250
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$	107	150	>1	2.9	0.1	40	>250
$Tl_2Ba_2CuO_{6+x}$	82	80	2.0	3.0	0.2	21	300
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8+x}$	97	200	>25	3.0	0.7	27	120
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$	125	200	>20	3.0	0.50	28	200
$HgBa_2CuO_{4+x}$	95	120-200	0.2-0.45	2.0	1.20	72	125
$HgBa_2CaCu_2O_{6+x}$	127	205	0.8	1.7	0.40	113	450
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$	135	130-200	0.7	1.5	0.19	108	
$HgBa_2Ca_3Cu_4O_{10+x}$	125	160	7.0	1.3-8		100	>200
$Sm_{1.85}Ce_{0.15}CuO_{4-y}$	11.5			8	1.50		
$Nd_{1.84}Ce_{0.16}CuO_{4-y}$	25	72-100		7-8	0.2-0.3	5-6	>100

HTS süperiletkenler birçok durumda BCS teorisi ile ters düşmektedir. Bir BCS süperiletkende fonon etkisinden dolayı T_c kritik sıcaklığı materyalde kullanılan izotop kütlesi ile ters orantılıdır. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerde izotop etkisi T_c kritik sıcaklığı etkilemez, bu yüzden yüksek sıcaklık süperiletkenlerde elektron çiftlerinin fononla bir bağlantısı yoktur. STM veya ARPES bir deneysel metot. Bunların sonuçları BCS ile ters düşüyor. Yüksek sıcaklık süperiletkenler d-dalgası simetrisi gösterir [77].

FeAs gibi CuO₂ katmanlı olmayan yüksek sıcaklık süperiletkenlerde vardır. FeAs süperiletkenler 2001 yılında keşfedildi ve çalışılmaya başlandı. Bu bileşiklerin süper iletken özelliklere sahip oldukları ancak normal basınçta süperiletkenliğe geçişleri oldukça düşük sıcaklıklarda oldukları bulunmuştur. Bu yüzden pratik uygulamaları sınırlı. Bazı demir esaslı süperiletkenler ve kritik sıcaklıkları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. FeAs süperiletkenlerin kritik sıcaklıkları [76]

Bileşik	Kritik Sıcaklık (K)
Ba _{0.6} K _{0.4} Fe ₂ As ₂	38.0
Ca _{0.6} Na _{0.4} Fe ₂ As ₂	26.0
CaFe _{0.9} Co _{0.1} AsF	22.0
Sr _{0.5} Sm _{0.5} FeAsF	56.0
LiFeAs	18.0
CeFeAsO _{0.84} F _{0.16}	41.0
SmFeAsO _{0.9} F _{0.1}	51.5
La _{0.5} Y _{0.5} FeAsO _{0.6}	43.1
NdFeAsO _{0.89} F _{0.11}	52.0
PrFeAsO _{0.89} F _{0.11}	52.0
GdFeAsO _{0.85}	53.5
SmFeAsO _{~0.85}	55.0

Uzun süreli yapılan araştırmalara rağmen, yüksek sıcaklık süperiletkenliğin mekanizması hala belirsizdir ve bilim insanları HTS'lerdeki tüm elektron detaylarını tam olarak açıklayamamaktalar. Bilim insanları bazı yönlerde elektronların güçlü bir şekilde bağlanmasını sağlayan d-dalga simetrisinin varlığını ve HTS'lerde manyetizma elektronları bir arada tutan kuantum yapıştırıcı olduğunu kabul etmektedirler [78].

2.5.1. YBCO sisteminin kristal yapısı

I. tip süperiletkenlerin aksine YBCO oldukça karmaşık bir kristal yapı gösterir. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin temel yapısı, bozulmuş, oksijen eksikliği olan çok katmanlı perovskite bir yapıdır. YBCO birim hücresi, bazı boş konumlardaki oksijen pozisyonlarına sahip iki bitişik BaCuO₃ küpü ile komşu merkezi YCuO₃ hücresinden oluşan üçlü bir perovskite olarak tanımlanabilir [79].

YBCO'nun süperiletkenliği, CuO zincir katmanları ve CuO₂ düzlemleri arasında meydana gelen yük transferi ile oluşturulmaktadır; CuO zincir tabakaları CuO₂ düzlemlerine yük taşıyıcıları sağlar [79]. Buna göre, iletim anizotropiye neden olan ab düzleminde bulunan CuO₂ düzleminde gerçekleşir [80,81]. YBCO sistemi yüksek anizotropiye sahiptir çünkü iletkenlik sadece CuO₂ düzleminde gerçekleşmektedir [81].

Bugüne kadar Y- (veya RE) -Ba-Cu-O sisteminde üç süperiletken faz olduğu bulundu. Süperiletken faz olan YBa₂Cu₄O₈ (Y124), YBa₂Cu₃O_{7-δ} (Y123) ve ince filmlerinde bir kusur olarak keşfedildi ve daha sonra ince filmlerde tek faz olarak hazırlandı [82]. Y124'ün kristal yapısı, tek CuO katmanlı Y123 ile yakından ilişkilidir [83]. Y₂Ba₄Cu₇O_{14+δ} süperiletken faz YBa₂Cu₃O_{7-δ} ile YBa₂Cu₄O₈ arasında sadece ince filmlerde bulunan bir ara fazdır [84]. Y247 yapısı ayrıca c-ekseni boyunca Y123 ve Y124 yapılarının sıralı bir değişimi olarak da görülebilir. Y247'ün T_c değeri ≈40 K ve Y124'ün T_c değeri ≈80 K'dır. Çizelge 2.3'de YBCO bileşikleri için örgü parametreleri ve T_c değerleri sunulmaktadır.

Çizelge 2.3. YBCO için kristal yapıları, örgü parametreleri ve T_c kritik sıcaklıkları [84]

Gösterim	Yapı	Formül	Örgü parametreleri			T _c (K)
			a(Å)	b(Å)	c(Å)	
Y123	tetragonal	YBa ₂ Cu ₃ O _{6+δ}	3.870	3.870	11.720	0
	ortorombik	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	3.827	3.893	11.666	90
Y124		YBa ₂ Cu ₄ O ₈	3.838	3.838	27.200	80
Y247		Y ₂ Ba ₄ Cu ₇ O _{14+x}	3.833	3.878	50.590	40

YBa₂Cu₃O_{6+δ} ve YBa₂Cu₃O_{7-δ} (δ ≤ 0.5)

2.5.2. YBCO sisteminin tetragonal ve ortorombik yapısı

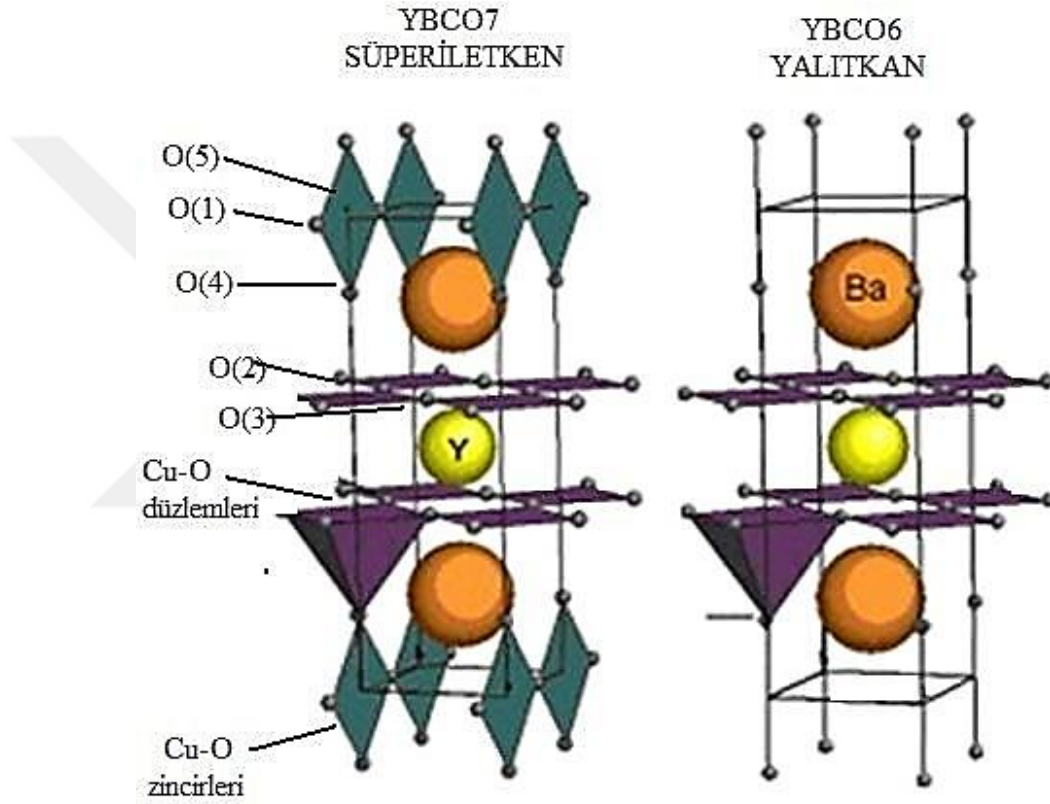
YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO-123) bir perovskite yapıya sahip, II. tip süperiletkendir. YBa₂Cu₃O_{7-δ} süperiletkeni oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak, tetragonal (a=b≠c) ve ortorombik (a≠b≠c) olmak üzere iki farklı yapıda bulunur [85-87]. Oksijen kaybına duyarlı olan CuO zincirleri YBa₂Cu₃O_{7-δ} süperiletken bileşiğinde ortorombik-tetragonal faz geçişine neden olur. Ortorombik- tetragonal faz geçişi sıcaklığa ve oksijenin kısmi basıncına bağlı bir faz geçişidir. YBCO'da tetragonal yapı 700 °C ile 950 °C sıcaklık aralığında gözlenir. Sıcaklık azaldıkça ve oksijen miktarı arttıkça 700 °C'de yapı tetragonal fazdan ortorombik faza geçer. Ortorombik

fazda a yönündeki oksijen eksikliği, birim hücrenin hafifçe sıkışmasına neden olur. Böylece a örgü parametresi b örgü parametresinden küçük olur. Tam düzende yani en yüksek ortorombik fazda O (5) boş ve O (1) dolu oksijen alanlarını gösterir (Şekil 2.14). Oksijenin bu asimetrik dağılımı ortorombik faza yol açar. $(b - a / b + a)$ bir düzen ölçüsüdür. b ve a arasındaki büyük fark, daha yüksek düzen derecesine karşılık gelir [88]. Ayrıca, c-örgü parametresi daha büyük değerde olduğunda örnek için düzen parametresi daha küçük değerde olur. Daha küçük c değeri daha iyi bir ara katman değişiminden sorumlu olabilir ve sonuç olarak daha iyi süperiletken özellikler sağlayabilir. Oksijen stokiometrisi $x = 7 - \delta = 75.250 - 5.856c$ ifadesinden hesaplanır, burada c-ekseni örgü parametresinin uzunluğudur [89]. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ sisteminde oksijen değeri $6.5 < 7 - \delta < 7$ olduğunda $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ sistemi $a = 3.82 \text{ \AA}$, $b = 3.89 \text{ \AA}$ ve $c = 11.68 \text{ \AA}$ örgü parametreleri ile ortorombik yapıya geçer ve süperiletken olur. Kristal yapıya fazla oksijen girmesi de T_c sıcaklığını düşüren başka bir etkidir. T_c sıcaklığı en büyük değerini $x=6.94$ 'de alır ve bu değer üstünde tekrar düşmeye başlar. Bunun nedeni CuO_2 düzlemlerinin fazla hole (boşluk) taşıyıcıları ile katılanmasıdır. Düşük oksijen konsantrasyonu için ($0.5 \leq \delta \leq 1$) birim hücredeki alt ve üst CuO zincirindeki Cu atomları arasına oksijen atomları rastgele dağılır. O(1) konumundan boş olan O(5) konumuna oksijenin geçmesi düzensizliğe neden olur. Bu durumda yapı $a = 3.87 \text{ \AA}$ ve $c = 11.77 \text{ \AA}$ 'lık örgü parametrelerine sahip tetragonaldır. Tetragonal YBCO, süperiletken olmayan antiferromanyetik bir yalıtkandır. Aksine, ortorombik yapı $T_c \approx 90 \text{ K}$ olan süperiletken bir fazdır ve $\delta \sim 0.07$ olduğunda optimum T_c değeri oluşur [90]. Ba ve Y atomları bir Ba-Y-Ba dizisinde c-ekseni boyunca istiflenmiştir ve Ba atomları hafifçe merkez Y atomuna doğru kaymıştır [85].

Yapının içinde üç düzlem; Cu ve O atomlarını, iki düzlem; Ba ve O atomunu, tek düzlem ise Y atomu içerir. Y atomunun görevi CuO_2 düzlemlerini ayırmaktır. Y yerine üç değerlikli atom konulursa süperiletken özelliklerden fazla değişiklik gözlenmez [91]. Ortorombik-tetragonal faz geçişi oksijen difüzyon kinetiği tarafından kontrol edilen süreçtir [92]. YBCO'nun ortorombik yapısı katmanlıdır.

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ kristalinde CuO_2 düzlemleri CuO zincirlerinin sayısı, farklı fiziksel özelliklere ve farklı kritik sıcaklığa yol açar [93]. CuO zincirleri CuO_2 düzlemleri için yük deposu görevi görürler [94]. Sıcaklığın artırılmasıyla yapıdaki toplam oksijen stokiometrisinde azalma görülür. Buna göre sıcaklık artışı ile Şekil

2.14'de O(4) konumundaki oksijenler yapıdan uzaklaşır ve yavaş yavaş O(5) konumları oksijen atomları tarafından doldurulmaya başlar. O(4) ve O(5) konumları yaklaşık eşit doluluğa ulaştığında yapının simetrisi ortorombikten tetragonale geçiş yapar. 1 atm basıncında yaklaşık 700 °C sıcaklıkta bu geçiş meydana gelir. Sıcaklık arttırılmaya devam edildiğinde hem O(4) hem de O(5) konumları boşalmaya devam eder ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ yapısına ulaşır. HTS'lerde yük taşınımı sadece CuO_2 düzlemleri üzerinden olmaktadır. Yapıda geri kalan düzlemler CuO_2 düzlemleri için yük deposu görevini görürler.



Şekil 2.14. a) Süperiletken ortorombik $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 'nin ve **b)** tetragonal $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ 'nin birim hücresi [86]

2.5.3. YBCO süperiletkeninde anizotropi durumu

Yüksek sıcaklıklı süperiletkenlerin önemli bir özelliği, onların katmanlı kristal yapılarının bir sonucu olan güçlü anizotropisidir [37]. Bu anizotropi, elektron kütlesi anizotropisi γ ile tanımlanır. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ bileşiği yöne bağlı olarak λ , ξ , H_{c2} değerlerinde farklılıklar gösterir. Bu farklılık yapının anizotropisinden kaynaklanır. Bu değerler a-b ile c eksenleri arasında fark edilir bir değişim gösterir. a ve b eksenleri arasındaki anizotropi değerleri ise ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

HTS'ler için anizotropi Ginzburg Landau teorisi ile tanımlanır ve bu teori yöne bağlı olarak hole (boşluk) taşıyıcıları için farklı etkin kütle tanımlar. Yapının anizotropisi γ parametresi ile verilir ve bu parametre

$$\gamma = (m_c/m_{ab})^{1/2} = \frac{\lambda_c}{\lambda_{ab}} = \frac{\xi_{ab}}{\xi_c} = (H_{c2})^{ab}/(H_{c2})^c \quad (2.35)$$

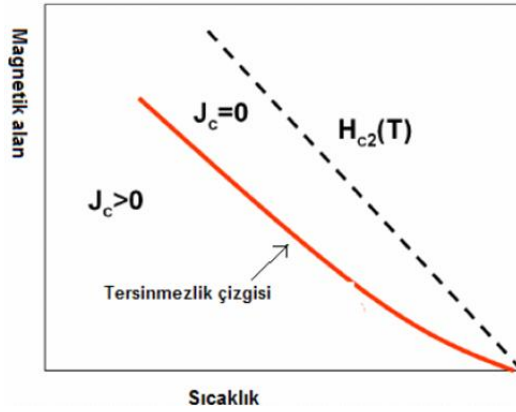
ile bulunur. Burada m_{ab} ve m_c 'nin, ab-düzlemindeki ve c-eksenindeki etkin elektron kütesidir, λ_{ab} ve λ_c ab-düzlemi ve c-eksenindeki London sızma derinlikleridir ve ξ_{ab} ve ξ_c ab-düzlemi ve c-ekseni boyunca eş uyum uzunluklarıdır. λ süperiletken durumu yüzey akımları tarafından engellenmiş olan manyetik alanın sızma derinliğini karakterize eder ve ξ süperiletken durumdan sorumlu Cooper çiftlerinin yoğunluğunun 0'dan maksimum değerine değiştiği karakteristik uzunluktur. YBCO için γ değeri 5~8 arasında değişir. Aşırı doping durum için daha düşük değerler elde edilir. Yöne bağlı olarak anizotropinin oluşma nedeni düzlemsel yapıdır.

2.5.4. YBCO sisteminin manyetik alan-sıcaklık (H-T) faz diyagramı

HTS'lerin uygulamalarda kullanılması açısından. H-T eğrilerinde H_{c2} üst kritik alanın hemen altında bulunan H_{ter} tersinmezlik çizgisi oldukça önemlidir (Şekil 2.15). II. tip süperiletkenlerde sıfır direnç, vorteks akışı çivilenme kuvvetleri tarafından engellendiğinde ortaya çıkar. Geri tersinmezlik alanı olan H_{ter} . tüm HTS bileşiklerinin çok önemli bir parametresidir. Vorteksler $H_{ter}(T)$ çizgisinin üzerinde sıvı (yani serbest hareket eden) ve bu çizginin altında cam (glassy-state) halde bulunur [96]. Vorteksler cam durumunda iken, $J_c > 0$ sıfırdan farklıdır ve girdap durumu tersinmezdir. Vorteksler sıvı durumunda iken tersinmezlik çizgisinin üstünde kritik akım yoğunluğu sıfıra gitmektedir ($J_c = 0$) ve girdap durumu tersinirdir [97]. Tersinmezlik çizgisi H_{c2} üst kritik alanın hemen altında olduğundan, bu tip süperiletkenlerin yüksek sıcaklık ve yüksek manyetik alanda kullanımı tersinmezlik çizgisi tarafından kısıtlanmaktadır. YBCO'nun Tl ve Bi tabanlı süperiletkenlere nazaran daha yüksek tersinmezlik çizgisine sahip olduğu bilinmektedir. Tersinmezlik çizgisi tanecikler arasındaki bağın, çivileme kuvvetinin büyüklüğünü göstermektedir. Bu durumda numune içerisindeki kritik akım yoğunluğunun büyüklüğünün göstergesidir [95].

Cam-sıvı geçişi. güçlü termal dalgalanmalar, kusurların neden olduğu girdap bozukluğu ve girdaplar arasındaki etkileşimlerle karmaşıklaşır. Bose cam geçişi

kolon kusurlarının varlığında düzenlenirken vorteks camı rasgele nokta kusurlarda oluşur [98].

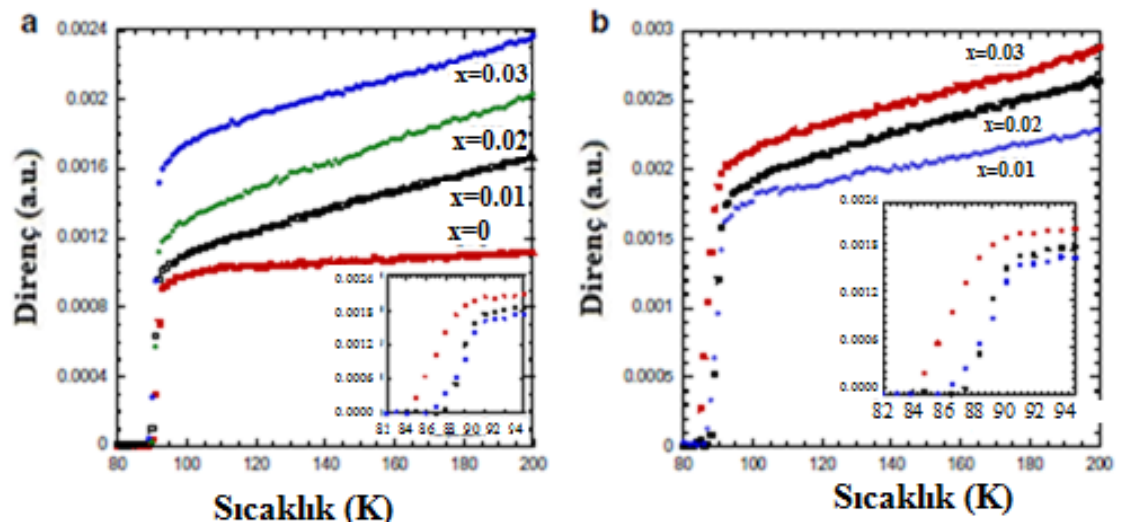


Şekil 2.15. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerde tersinmezlik çizgisi [95]

HTS'nin alan-sıcaklık (H-T) faz diyagramında tersinmezlik çizgisinin kökeni ilginçtir ve yaygın tartışılan bir konudur. Deneysel olarak, bu çizgi HTS'lerde numunede manyetikliğin tersinmezlikten tersinirliğe geçişinde sınır çizgisi olarak tanımlanır. Büyük dalgalanmalar ve nispeten zayıf bağlar manyetik tersinirlikte sorumlu olabilen dinamik ve statik geçiş farklılığı olan bir H-T faz diyagramına yol açar [95].

2.6. YBCO Süperiletkenlere Yönelik Geçmişte Yapılan Çalışmalar

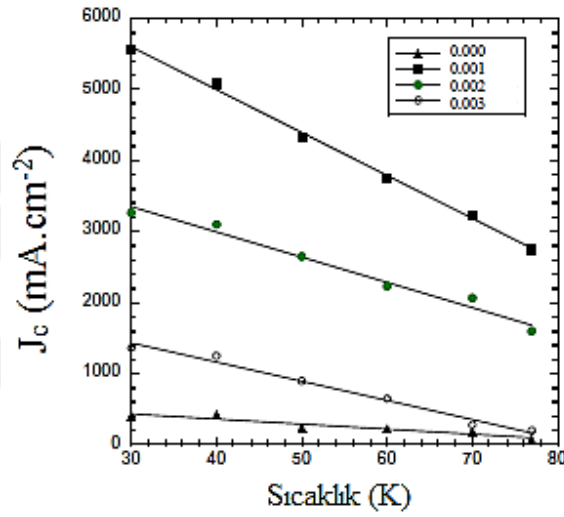
2.6.1. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{G})_x$ süperiletkenler



Şekil 2.16. a) $x = 0, 0.001, 0.002$ ve 0.003 ve b) $0.01, 0.02$ ve 0.03 oranlarında katılanmış $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{G})_x$ 'nin direnç-sıcaklık grafikleri [99]

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{G})_x$ ($x = 0.00, 0.001, 0.002, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03$) numuneler katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır [99]. Şekil 2.16’da sıcaklığa bağlı direnç eğrileri tüm örnekler için normal durumda metalik davranış göstermiştir. T_c sıcaklığı 90 ile 92 K arasında elde edilmiştir. Grafen (G) arttıkça T_c sıcaklığı azalmıştır [99]. Grafen oranı 0.001 oranında en yüksek J_c kritik akım yoğunluğu elde edilirken grafen oranı arttıkça J_c kritik akım yoğunluğu azalmıştır.

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{G})_x$ ’da ($x = 0.001$) en yüksek J_c kritik akım yoğunluğu 30 K sıcaklıkta saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ’ya göre yaklaşık 40 kat daha yüksek, 77 K sıcaklıkta ise 13 kat daha yüksektir (Şekil 2.17) [99].



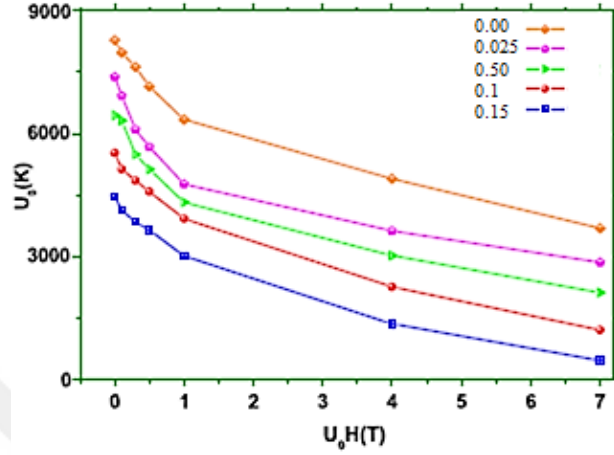
Şekil 2.17. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{G})_x$ ’nun sıcaklığa bağlı J_c kritik akım yoğunluğu eğrisi

2.6.2. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{Gd})_x$ süperiletkenler

Çizelge 2.4. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{Gd})_x$ malzemelerin aktivasyon (Vorteks bağlanma) enerjisi [100]

Malzeme	Aktivasyon enerjisi (K)						
	0 T	0.1 T	0.3 T	0.5 T	1 T	4 T	7 T
Gd0	8275	7973	7624	7144	6339	4898	3686
Gd1	7377	6918	6097	5671	4766	3621	2854
Gd2	6441	6312	5487	5124	4321	3017	2114
Gd3	5526	5128	4852	4581	3921	2258	1203
Gd4	4456	4123	3845	3641	3012	1354	459

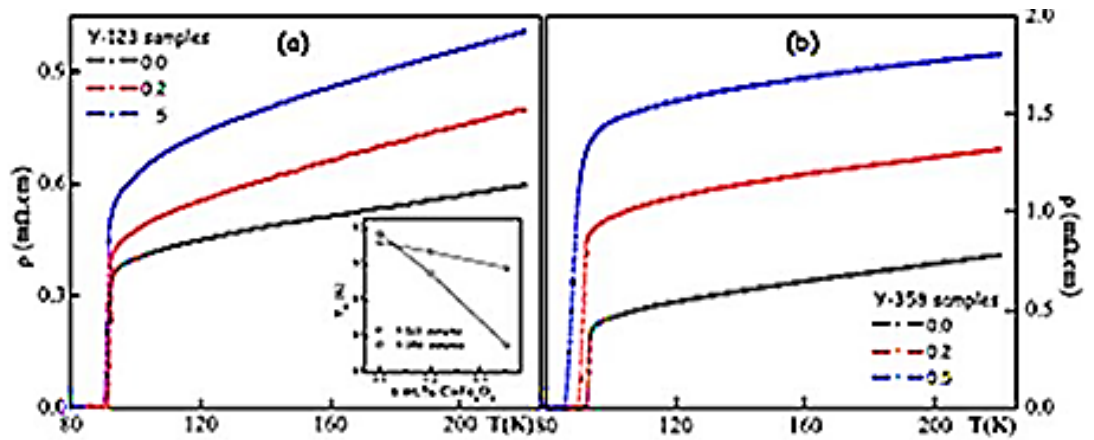
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{Gd})_x$ ($x = 0.00, 0.025, 0.050, 0.1, 0.15$) numuneleri katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır [100]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 2.4’de verilmiştir. Uygulanan manyetik alan ve Gd oranı arttıkça $U_0(\text{K})$ enerjisi azalmıştır (Şekil 2.18). Bunun nedeni Gd katkısının tanecikler içinde farklı süperiletken seviyeleri oluşturmaya bağlanmıştır [100].



Şekil 2.18. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{Gd})_x$ ’nin uygulanan manyetik alan-aktivasyon enerjisi [100]

2.6.3. $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_x$ ve $(\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18\pm a})_{1-x}(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_x$ süperiletkenler

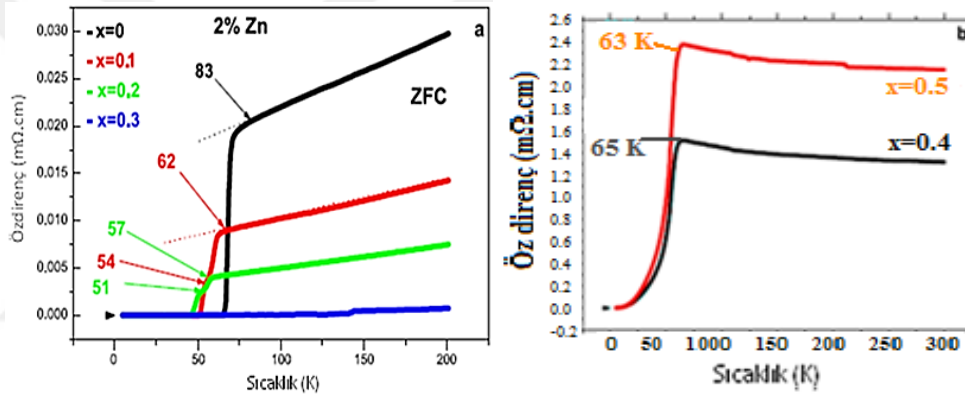
$(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_x$ ve $(\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18\pm a})_{1-x}(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_x$ ($x = 0.0, 0.02, 0.05$) katıhal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmıştır [101]. Şekil 2.19’deki sonuçlara göre, sıcaklığa bağlı direnç eğrileri tüm malzemeler için normal durumda metalik davranış göstermiştir. Y-123 süperiletkenin CoFe_2O_4 katkılama miktarı arttıkça T_c sıcaklığı 91 K’den 89.9 K’e azalmıştır ve Y-358 süperiletkenin CoFe_2O_4 katkılama miktarı arttıkça T_c sıcaklığı 92.4 K’den 85.7 K’e azalmıştır. (Şekil 2.19) [101].



Şekil 2.19. $x = 0.0, 0.2, 0.5$ oranlarında katkılanmış a) $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_x$ b) $(\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18\pm a})_{1-x}(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_x$ malzemelerinin öz direnç-sıcaklık grafikleri [101]

2.6.4. $Y_{1-x}Ca_xBa_2(Cu_{0.98}Zn_{0.02})_3O_{7-\delta}$ süperiletkenler

$Y_{1-x}Ca_xBa_2(Cu_{0.98}Zn_{0.02})_3O_{7-\delta}$ ($x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) numuneleri katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Şekil 2.20'deki sıcaklığa bağlı direnç eğrileri katkılama oranı 0 ile 0.3 arasında normal durumda metalik davranış olduğunu ve katkılama oranı 0.4 ile 0.5 arasında olduğunda yarıiletken davranış olduğunu göstermiştir. Ca oranı arttıkça T_c sıcaklığı azalmış ve ($\Delta T = T_{c(başlangıç)} - T_0$) genişlemiştir. Ca katkılama oranı ile T_c sıcaklığı 83 K'den 51 K'e düşmüştür (Şekil 2.20). Bunun nedeni Y^{+3} yerine Ca^{+2} ikame olması ile sistemde aşırı hole (boşluk) taşıyıcıların katılanması olarak yorumlanmıştır. Bu durum CuO_2 düzlemlerinde bozukluk oluşturmakta ve süperiletken geçiş sıcaklığında düşüşe neden olmaktadır [102].



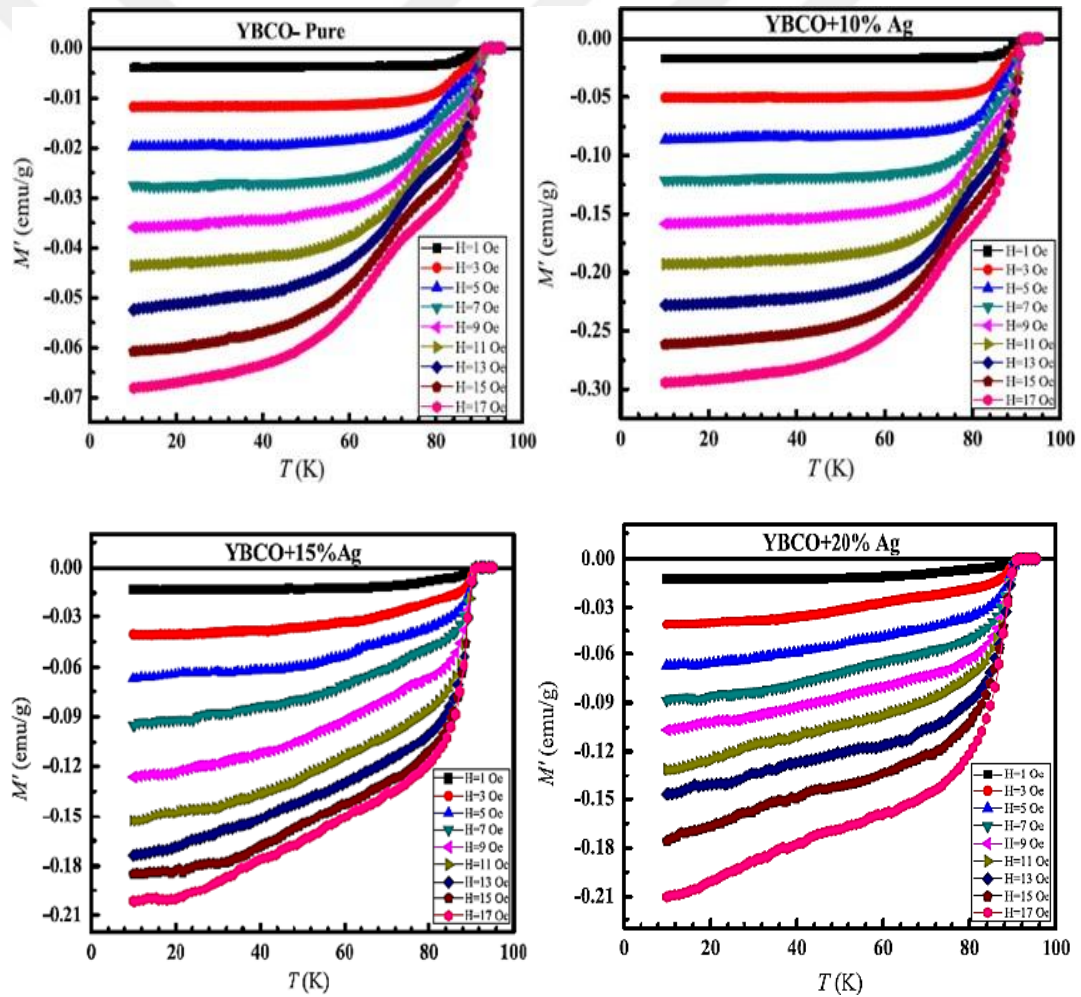
Şekil 2.20. $Y_{1-x}Ca_xBa_2(Cu_{0.98}Zn_{0.02})_3O_{7-\delta}$ 'nin öz direnç-sıcaklık grafikleri [102]

2.6.5. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}+Ag_x$ süperiletkenler

Çizelge 2.5. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}+Ag_x$ malzemelerin AC değerlerinde T_p sıcaklık değerleri

AC (Oe)	$T_p(K)$ YBCO	$T_p(K)$ YBCO+10 (%Ag)	$T_p(K)$ YBCO+15 (%Ag)	$T_p(K)$ YBCO+20 (%Ag)
1	88.28	87.99	78.84	70.95
3	82.92	86.00	70.79	59.41
5	80.52	84.19	65.44	48.69
7	78.40	82.06	61.09	40.39
9	76.86	80.24	56.73	33.47
11	73.91	77.99	52.77	26.30
13	71.23	76.30	49.40	23.05
15	68.69	74.04	44.05	17.15
17	65.88	71.51	42.49	9.68

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}+\text{Ag}_x$ ($x = 0.0, 0.10, 0.15, 0.20$) malzemeleri katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır [103]. Bu çalışmada T_p vortekslerin erimeye başladığı kritik sıcaklık sonuçları Çizelge 2.5’de verilmiştir. Sisteme eklenen Ag oranı 0’dan 0.1’e arttığında T_p geçiş sıcaklığı artmış ve daha sonra T_p değeri azalmıştır. Uygulanan manyetik alanın artması ile T_p ilk sıcaklığı düşmüştür. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}+\text{Ag}_x$ malzemelerin sıcaklığa bağlı taneler arası bağlamanın ve manyetizasyonun Ag-eklenmiş malzemeler için ağırlıkça % 10’a kadar yeterince geliştirildiği ve daha yüksek Ag içerikleri için azaldığı bulunmuştur (Şekil 2.21). YBCO süperiletkeninde sınırlı miktarda Ag ilave edilmesinin, taneler birleştirmeyi ve sonuç olarak optimal süperiletken performansı önemli ölçüde geliştirdiği sonucuna varılmıştır [103].



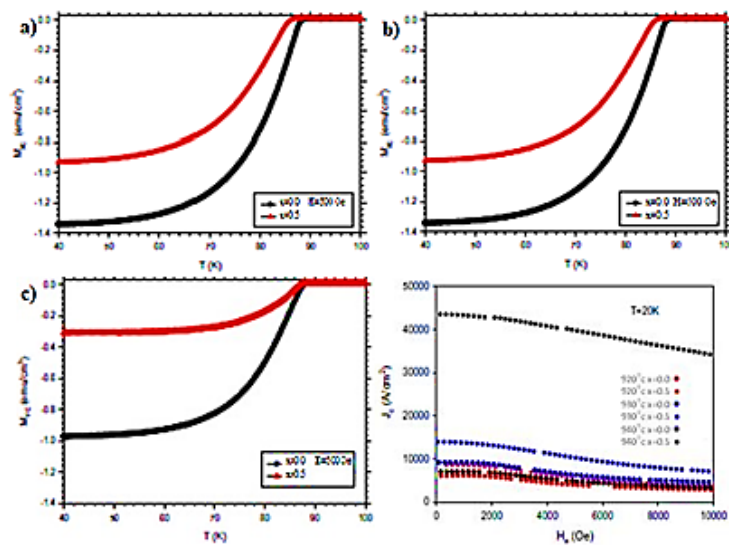
Şekil 2.21. Uygulanan farklı manyetik alanlarda YBCO + % Ag (0, 10, 15, 20) malzemelerinin sıcaklığa bağlı manyetik moment değişim grafikleri [103].

2.6.6. $Y_{1-x}Lu_xBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ süperiletkenler

Çizelge 2.6. $Y_{1-x}Lu_xBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ ($x = 0.0, 0.5$) malzemelerinin T_c ve J_c değerleri [104]

Sinterleme sıcaklığı(°C)	Doping miktarı	Boyutlar (cm ³)	T_c (K)	$J_c(20\text{ K, } 0\text{ Oe})$ A/cm ²
920	0.0	0.24x0.24x0.20	90.0	6.005
930	0.0	0.22x0.25x0.26	90.0	9.083
940	0.0	0.24x0.25x0.34	90.0	6.897
920	0.5	0.23x0.23x0.24	88.0	8.551
930	0.5	0.22x0.24x0.25	89.0	13.942
940	0.5	0.24x0.30x0.21	89.5	43.514

$Y_{1-x}Lu_xBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ ($x = 0.0, 0.5$) numuneleri 920 °C, 930 °C, 940 °C sıcaklıklarda sinterlenerek hazırlanmıştır [104]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 2.6’da verilmiştir. Bu verilere göre saf malzemede sinterlenme sıcaklığı ile T_c sıcaklığı değişmemiştir. Saf malzemede J_c kritik akım yoğunluğu ise 930 °C’de en yüksek değere ulaşmıştır. Lu elementi 0.5 oranında katkılандığında saf malzemeye göre T_c sıcaklığının daha düşük olduğu ve sinterleme sıcaklığı ile T_c sıcaklığının arttığı bulunmuştur. Lu katkılı malzemede J_c değeri saf malzemeye göre daha yüksek ve sinterleme sıcaklığı ile artarak 940 °C’de en yüksek değeri almıştır. Lu katkısı tanecikler arası zayıf bağı güçlendirdiği için J_c kritik akım yoğunluğunu yükseltmekte ve sonuç olarak en büyük J_c kritik akım yoğunluğu 940 °C sıcaklık ve 0.5 Lu katkısında elde edilmiştir (Şekil 2.22) [104].



Şekil 2.22. a) 920 °C, b) 930 °C, c) 940 °C sıcaklıklarda sinterlenerek hazırlanmış $Y_{1-x}Lu_xBa_2Ca_3O_{7-\delta}$ ($x = 0.0, 0.5$) malzemelerinin sıcaklığa bağlı manyetik moment ve d) uygulanan alana bağlı J_c grafikleri [104]

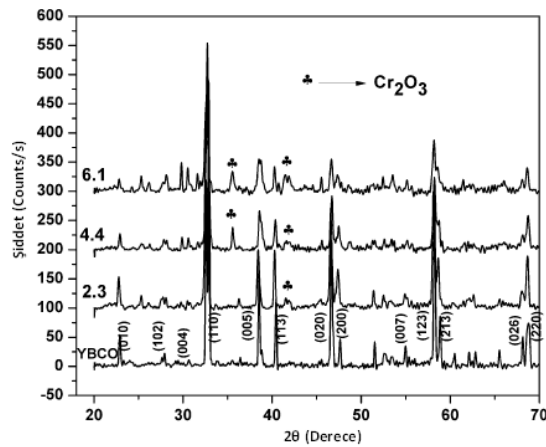
2.6.7. $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Cr_2O_3)_x$ süperiletkenler

Çizelge 2.7. $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Cr_2O_3)_x$ için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik dereceleri ve oksijen miktarları [105]

$Cr_2O_3(\%)$	$a(\text{\AA})$	$b(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	$V(\text{\AA}^3)$	$\Delta=(b-a)/(b+a)$	$O_{7-\delta}$
0.0	3.815(1)	3.882(1)	11.683(2)	173.023	0.008	6.8
2.3	3.826(1)	3.889(1)	11.700(4)	174.087	0.008	6.7
4.4	3.821(1)	3.889(1)	11.697(5)	173.815	0.008	6.7
6.1	3.810(2)	3.891(2)	11.689(4)	173.286	0.010	6.8

$(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Cr_2O_3)_x$ ($x=0.0, 0.023, 0.044, 0.061$) malzemeleri katıhal reaksiyon yöntemi ile hazırlanmıştır [105]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 2.7’de verilmiştir. Bu verilere göre Cr_2O_3 katkı oranı % 4.4’e kadar artırıldığında ortorombik simetri değişmeden kalmış ve % 6.1’de ise değişmiştir (Şekil 2.23).

Cr_2O_3 ağırlıkça % 4.4 değerine kadar sisteme katkı yapıldığında b-örgü uzunluğunda belirgin bir değişiklik olmamış, ancak ağırlıkça % 6.1’lik bir katkı yapıldığında b-örgü uzunluğunda bir değişiklik olduğu görülmüştür, a-örgü uzunluğu. Cr_2O_3 katkılı örneklerde, saf numuneye göre daha büyük olduğu ve % 2.3 katkılı örnekte en yüksek olduğu bulunmuştur, % 2.3 katkılı örnekte c-örgü uzunluğu ve kristal hacmi en büyük değere ulaşmıştır. b ve a arasında elde edilen büyük fark, daha yüksek Δ düzen derecesine karşılık gelmektedir. Daha küçük c-değeri daha iyi bir ara katman değişiminden sorumlu olabileceği ve sonuç olarak daha iyi süperiletken özellikler sağlayabileceği sonucu çıkarılmıştır [105].



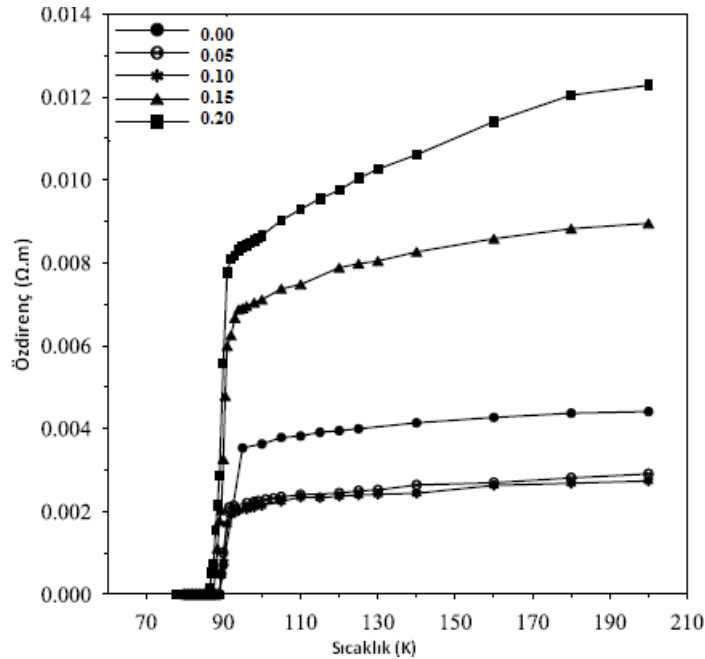
Şekil 2.23. $x = 0.0, 0.023, 0.044, 0.061$ oranlarda hazırlanmış $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Cr_2O_3)_x$ numunelerinin XRD grafikleri [105]

2.6.8. $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Ag}_x\text{O}_y$ süperiletkenler

Çizelge 2.8. $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Ag}_x\text{O}_y$ malzemeleri için T_c sıcaklıkları, c-örgü parametreleri, süperiletkenlik parametreleri ve öz dirençler [106]

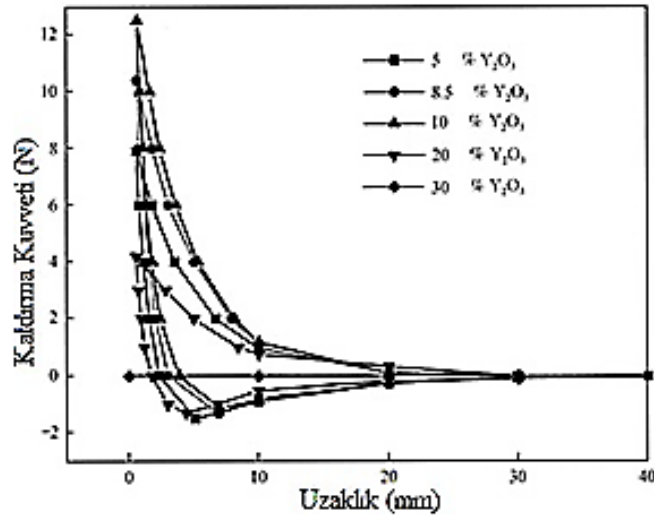
x	$T_{c,0}$ (K)	$T_{c,\text{başlangıç}}$ (K)	ΔT (K)	c (Å)	$\Delta=(b-a)/(b+a)$	ρ (g/cm ³)
0.00	89.0	95.0	6.0	11.6806	0.00822	5.14
0.05	89.0	91.5	2.5	11.6808	0.00822	5.56
0.10	89.0	92.0	3.0	11.6808	0.00822	5.16
0.15	87.5	93.0	5.5	11.6806	0.00822	4.95
0.20	86.0	91.0	5.0	11.6806	0.00822	4.72

$\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Ag}_x\text{O}_y$ (x=0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20) numuneleri katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır [106]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 2.8’de verilmiştir. Ag katkılanması ile a, b ve c-parametrelerinde büyük değişimler olmadığı görülmüştür. Katkılama ile Δ süperiletkenlik parametresi sabit kalmıştır. Ag katkı miktarı arttıkça $T_{c,0}$ değeri 0.15 katkı oranına kadar sabit kalmış ve bu katkı değerinden sonra azalmaya başlamıştır. $T_{c,\text{başlangıç}}$ değerinde ise dalgalanma olduğu görülmüştür (Şekil 2.24). Ag katkısı ile YBCO süperiletkenlerde tanecikler arasında bağlantıların güçlendiği ve iyileştiği belirtilmiştir [106].



Şekil 2.24. $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Ag}_x\text{O}_y$ süperiletkenler için direnci sıcaklığa bağlılığı [106]

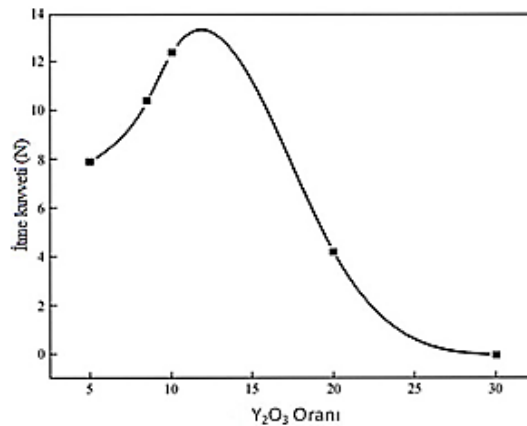
2.6.9. (YBCO)_{1-x}+(Y₂O₃)_x süperiletkenler



Şekil 2.25. (YBCO)_{1-x}+(Y₂O₃)_x sisteminde kaldırma kuvvetinin uzaklığa bağlılığı [107]

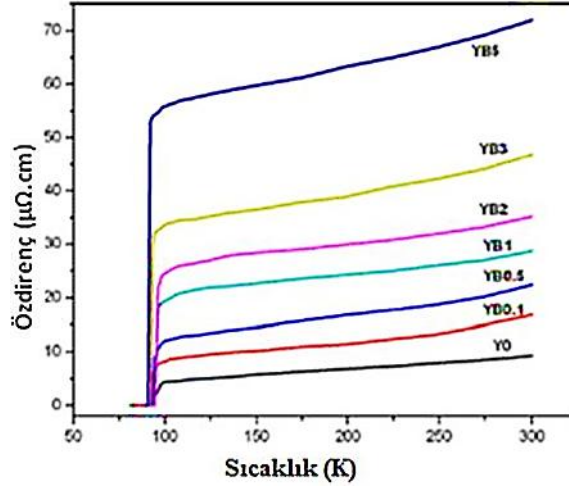
(YBCO)_{1-x}+(Y₂O₃)_x (x=0.05, 0.085, 0.1, 0.2, 0.3) malzemeleri katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır [107]. Bu çalışmada 77 K sıcaklıkta kaldırma kuvvetinin uzaklığa bağlı değişimi Şekil 2.25’de verilmiştir. Bu verilere göre kaldırma kuvveti mıknatısla numune arasındaki 10 mm uzaklıkta etkili olmuştur. En büyük kaldırma kuvvetinin 0.1 Y₂O₃ katkılama değerinde 12 N olduğu belirlenmiştir [107].

77 K sıcaklıkta malzemenin kaldırma kuvvetinin Y₂O₃ değerine bağlı değişimi Şekil 2.26’de verilmiştir. Bu verilere göre Y₂O₃ katkı miktarı 0.05’den 0.1’e kadar arttıkça kaldırma kuvveti artarak en büyük değeri almış ve daha sonra azalarak sıfıra gitmiştir [107].



Şekil 2.26. Bir mıknatısla çeşitli oranlarda eklenmiş Y₂O₃ numuneleri arasında kaldırma kuvvetinin Y₂O₃ değerine bağlılığı [107]

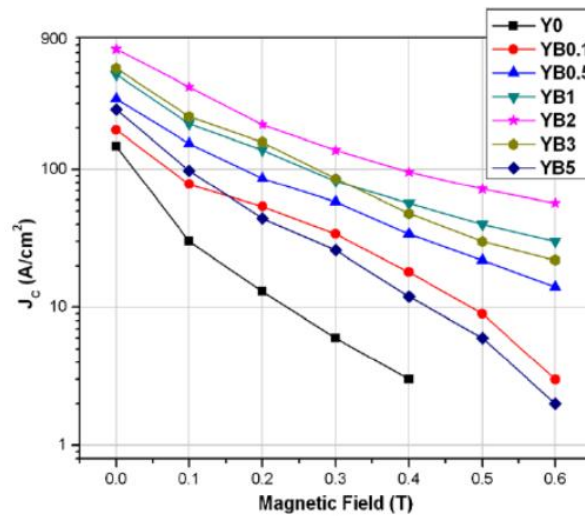
2.6.10. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}+\text{BaHfO}_3$ süperiletkenler



Şekil 2.27. % 0.00, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5 oranlarında hazırlanmış $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}+(\text{BaHfO}_3)_x$ malzemenin sıcaklık direnç grafikleri [108]

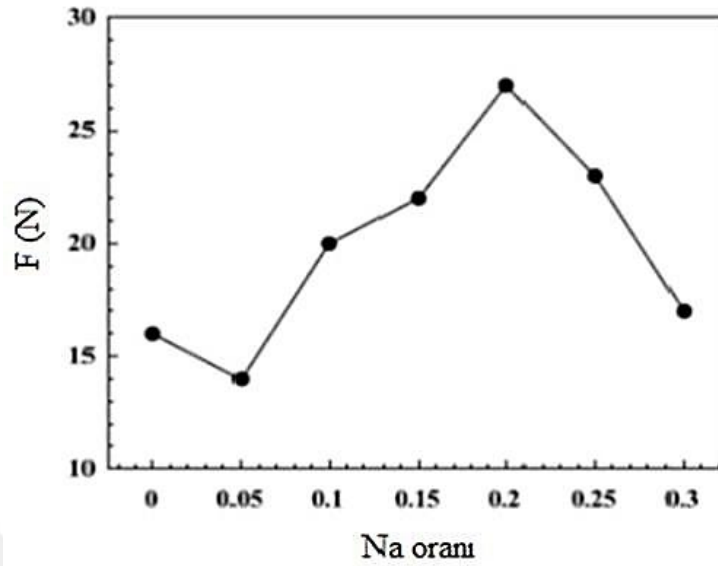
$(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}+(\text{BaHfO}_3)_x$ ($x = 0.00, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5$) malzemeleri katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır [108]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Şekil 2.27 ve Şekil 2.28’da verilmiştir. Sıcaklığa bağlı öz direnç eğrileri tüm örnekler için normal durumda metalik davranışı göstermiştir. BaHfO_3 ekleme oranı 0’dan 2’ye arttırıldığında T_c sıcaklığı 92 K’den 95 K’e artmış ve daha sonra azalmıştır (Şekil 2.27) [108].

J_c ’nin yoğunluğunun manyetik alanla değişimi Şekil 2.28’da verilmiştir. Bu verilere göre BaHfO_3 ekleme oranı 0’dan 2’ye arttığında J_c yoğunluğu artarak en büyük değeri almış ve daha sonra azalmıştır [108].



Şekil 2.28. J_c ’nin manyetik alana bağlılığı [108]

2.6.11. $\text{YBa}_{2-x}\text{Na}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ süperiletkenler



Şekil 2.29. Sisteme ait kaldırma kuvvetleri. Mıknatıs 25 mm çapında; mıknatısın manyetik alanı 0.5 T'dir [109]

Bu çalışmada $\text{YBa}_{2-x}\text{Na}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($x=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$) malzemeleri hazırlanmıştır [109]. Sıfır manyetik alan, 77 K sıcaklıkta $\text{YBa}_{2-x}\text{Na}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ malzemelerinin kaldırma kuvvetinin Na değerine bağlı değişimi Şekil 2.29'da verilmiştir. Bu verilere göre Na katkılama oranı 0.05'den 0.2 oranına kadar artarken, kaldırma kuvveti 16 N'dan 27 N'a yükselmiştir. Na katkılama oranı 0.2'den büyük olduğundan kaldırma kuvveti 17 N'a azalmıştır [109].

2.7. Süperiletkenlerin Kullanım Alanları

Süperiletkenlerin uygulamaları temel olarak Meissner etkisine dayanır. Motorlar ve jeneratörler, transformatörler güç iletim hattı, süperiletken mıknatısı enerji depolama cihazları ve hareketli araç taşımacılığı gibi uygulamalar süperiletken malzemeler kullanılarak daha verimli olabilir. Bununla birlikte, süperiletkenlerin kullanımı, T_c ve J_c değerleri ile sınırlıdır. Geleneksel süperiletkenlerin uygulamaları çoğunlukla manyetik koruyucu cihazlar (MRI), tıbbi görüntüleme sistemleri, süperiletken kuantum girişim cihazları (SQUIDS), kızılötesi sensörler, analog sinyal işleme cihazları ve mikrodalga cihazlar gibi düşük sıcaklık uygulamaları içindir. Süperiletkenlerin uygulamaları, çizelge 2.9'da listelendiği gibi güç üretimi, elektronik bilimi, mıknatıslar, taşımacılık ve tıbbi uygulamalar olmak üzere beş ana kategoride sınıflandırılabilir. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin performansı arttıkça güç

aktarımı, jeneratörlerdeki süperiletken mıknatıslar, enerji depolama cihazları, parçacık hızlandırıcıları, hareketli araç taşımacılığı, dönme hareketi yapan makineler ve manyetik ayırıcılar gibi uygulamalar geliştirmeye devam etmektedir [110-119].

Çizelge 2.9. HTS uygulamalarına örnekler [120]

Güç üretimi	Motorlar ve Jeneratörler Enerji depolama İletim hatları Transformatörler ve İndüktörler
Mıknatıs	Süperiletken Elektromıknatıs Sensörler ve dönüştürücüler Parçacık Hızlandırıcıları
Taşımacılık	Manyetik-havaya yükselme
Tıbbi	Manyetik rezonans görüntüleme (MRI) Nükleer manyetik rezonans (NMR)
Elektronik	Transistörler Devre bağlantıları Sensörler

2.7.1. Süperiletken manyetik enerji depolama

Süperiletkenler sıfır dirençli çok büyük bir indüktör olarak manyetik enerji depolamada kullanılabilir. Bir DC akımı kısa devre yapmış bir indüktörde dolaştırılırsa, enerji bozulmaksızın manyetik alanında saklanabilir.

Süperiletken manyetik enerji depolama sistemi dört ana bileşenden oluşmaktadır: a) Süperiletken kablolardan oluşan bir bobin: Enerji, bobinde dolaşan bir DC akımı tarafından üretilen manyetik alanda depolanır. Bobin içinde depolanabilecek enerjinin miktarı, indüktans ile belirlenir. b) Helyum veya azot kullanılarak süperiletken teller için düşük çalışma sıcaklığını sağlayan sistemin bir bölümü vardır. c) Güç şebekesi ile ara yüz oluşturmak için AC / DC dönüştürücülere ihtiyaç vardır. d) Sistemin bileşenlerini yönetmek için kontrol devresi bulunur [110,111].

Süperiletken manyetik enerji depolama birimleri farklı kapasitelerde inşa edilebilir. Büyük ve orta kapasitelerde, güç kalitesi için şebeke güç sisteminde kısa süreli bir depolama istasyonu olarak kullanılabilirler. Daha küçük kapasitelerde, süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri özel amaçlar için kesintisiz güç kaynağı üniteleri olarak kullanılabilir. Süperiletken manyetik enerji depolama sistemlerinin hızlı dinamik yanıtı nedeniyle, çok hızlı güç darbelerinin gerekli olduğu uygulamalar için önerilmişlerdir. Örneğin gemi elektrik sistemleri ve bazı askeri uygulamalar için kullanılabilirler [110,111].



Şekil 2.30. Albany. New York'ta süperiletken güç şebekesi [120]

2000 yılında American Superconductor © Wisconsin'de dağıtılmış süperiletken bir manyetik enerji depolama sistemi kurdu. Her bir ünitesi, güç şebekesinde 3 milyon W'tan fazla rezerve yapabilmektedir (Şekil 2.30) [120].

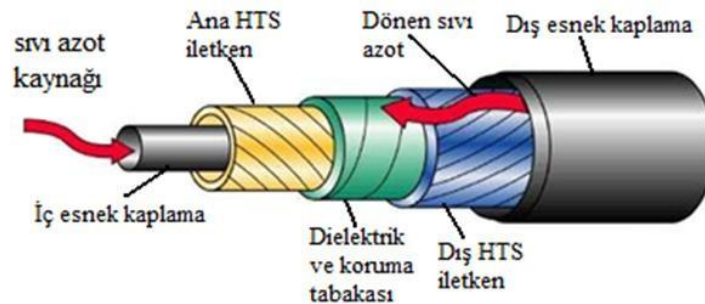
2.7.2. HTS motorları ve jeneratörleri

HTS motorları ve jeneratörlerinde gerekli manyetik hareket kuvveti, bakır tellerin birçok dönüşünden kaynaklanan uyarım bobinleri aracılığıyla DC akımları geçirilerek üretilir. Dönüşlerin sayısı ve uyarıcı bobinlerin akımı, makinelerin manyetik hareket kuvvetini belirler. Daha yüksek manyetik hareket kuvvetinde çalışmak, makinenin güç yoğunluğunu artırır ve bu nedenle daha küçük boyutlarda yüksek güç yoğunluğu elde edilebilir. HTS kablolarını, eş zamanlı motorların ve jeneratörlerin uyarıcı devresinin iletkenleri olarak kullanarak, bakır bazlı uyarıcı bobinlerle karşılaştırıldığında daha düşük kayıplarla daha fazla manyetik hareket

kuvveti üretilebilir. HTS motorları ve jeneratörlerinde demir çekirdeğin ortadan kaldırılması ağırlığın azalmasıyla sonuçlanır ve daha yüksek akı yoğunluğunda çalışmak boyutta azalmalara yol açar. Bu nedenle, HTS motorları ve jeneratörler geleneksel emsallerine göre daha küçük ve daha etkilidir. Ayrıca, HTS motorlarının ve jeneratörlerinin verimliliği, benzer geleneksel bakır ve demir bazlı makinelerin verimliliğinden daha yüksektir [115,116]. American Superconductor © 2000 yılında 5000 beygir gücünde süper iletken tel motoru yapmıştır [121].

2.7.3. HTS güç iletim kabloları

Elektrik enerjisinin en önemli özelliklerinden biri, diğer enerji türlerinden daha kolay ve daha verimli aktarılabilmesidir. Ancak, güç iletimi hala en önemli ve zorlu konulardan biridir. Enerji, santrallerden tüketicilere iletim hatları ve dağıtım şebekeleri üzerinden üstten geçen hatlar ve güç kabloları ile aktarılır. Üstten geçen hatlar daha ucuz ve kurulumu daha kolay olsa da güç kablolarının bazı avantajları vardır. Güç kablolarında iletkenler yalıtkan tabakaları ile kaplanır, bu nedenle yeraltı tünellerinde veya su yüzeyinin altında (deniz, nehirler) döşenebilirler. Bu, depremler, fırtınalar ve tsunamiler gibi doğal afetler durumunda onları daha güvenilir hale getirir. Bazı durumlarda, gücün kıyı alanlarına aktarılması gerektiğinde veya şehirlerin merkezinde üstte götürme sistemlerin kullanılmasının hiçbir yolu olmadığında, güç kabloları, elektrik iletmede tek geçerli seçeneklerdir. Güç kablolarında farklı voltaj seviyelerindeki (faz ve toprak) iletkenler yalıtım hatları nedeniyle birbirine yakın olarak paketlenirken, üstten geçen hatlarda birbirinden nispeten uzağa yerleştirilirler. Bu nedenle, güç kablolarındaki iletkenlerin indüktansları, üstten götürülen hatların indüktanslarından oldukça düşüktür ve sonuç olarak voltaj düzenlemesi, sistem kararlılığı ve benzerleri açısından daha iyi elektrik performansları sergilerler (Şekil 2.31) [110-112].



Şekil 2.31. HTS güç iletim kablosu [122]

Güçle ilgili uygulamalar için süperiletkenlerin avantajları sıfır elektrik direnci ve daha iyi akım taşıma kapasitesidir. Konvansiyonel metal (bakır veya alüminyum) bazlı iletim hatlarında elektrik enerjisinin yaklaşık % 10 – 15'i ısı olarak kaybolmaktadır. Konvansiyonel metal iletkenleri (bakır ve alüminyum) süperiletkenler ile değiştirilerek, direnç yoluyla meydana gelen ısı kaybı geri kazanılabilir. Ayrıca, süperiletken kablolar ile % 7000'den fazla alan verimlilik ve daha fazla akım elde edilebilir. Örneğin, 113 kg YBCO kabloları 8164 kg bakır tellerin yerini alabilir. Günümüzde süperiletkenlerin güç uygulamaları temel olarak iletken formlarda sıvı azot sıcaklığında çalışabilen BSCCO ve YBCO bazlıdır. Araştırmalar, şu anda süperiletken özellikleri büyütme ve ticari gereksinimleri karşılamak için akım yoğunluğunu (J_c) artırmaya odaklanmıştır. HTS güç kablolarının gelişimi son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle bugün dünya genelinde bu uygulama üzerinde devam eden birçok proje bulunmaktadır. SuperPower ©. Albany, New York'ta bir güç şebekesi sistemi için 10 km'lik süper iletken kabloyu başarıyla uygulamıştır (Şekil 2.30). Bununla birlikte, en büyük sorun, geleneksel bakır telden yaklaşık on kat daha pahalı olan YBCO kablosunun maliyetidir [123].

2.7.4. HTS transformatörleri

Süperiletkenler, bakırdan daha yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olduklarından, HTS telleri kullanılarak, transformatörlerin toplam ağırlığı ve boyutu azaltılabilir.

HTS transformatörlerinin sargısındaki AC kayıplarının miktarı, geleneksel transformatörlerin sargısındaki Ohmik kayıplardan daha düşüktür. Ek olarak, demir çekirdeğin küçültülmüş boyutu nedeniyle, HTS transformatörleri geleneksel transformatörlere göre daha düşük enerji kayıplarına sahiptir. Bu nedenle, HTS transformatörlerinin verimliliği geleneksel olanlardan daha yüksektir [118,119].

Sıvı azot iyi bir izolatördür, bu nedenle HTS transformatörlerinde hem soğutucu hem de yalıtkan olarak kullanılır. HTS transformatörlerinin çalışma sıcaklığı konvansiyonel transformatörlerden oldukça düşük olduğu için daha uzun ömürlü olmaları beklenmektedir [118,119].

Süperiletken ve normal durumlar arasındaki çok keskin geçiş, süperiletkenleri akıllı anahtar olarak kullanılmak üzere çok uygun bir malzeme haline getirir. Süperiletken hata akımı sınırlayıcıları, güç şebekesine seri olarak bağlanan akım sınırlama cihazlarıdır. Sağlıklı koşullarda, korunan ağdaki mevcut seviyeler güvenlik sınırları içinde olduğunda. Süperiletken hata akımı sınırlayıcıları neredeyse kısa devre olarak hareket eder ve ağda görünmezdir. Korunmalı akım güvenlik seviyesini aşar aşmaz, süperiletken hata akımı sınırlayıcıların süperiletken bileşeni normal duruma geçer ve arıza akımını sınırlamak için yeterince büyük bir empedans sağlar [125].

Elektronik uygulama alanı süperiletkenlerin uygulamaları için oldukça önemlidir. Elektronik çiplerdeki bilgi işlem hızını arttırmak ve özellikle çip boyutunu azaltmak için süperiletken kullanılabilir. Zorluklar devrelerdeki ısı ve kapasitörlerin şarj olma süreleridir. Bu sorunlar, süperiletken elektronikler uygulanarak elde edilebilen, birbirine bağlanan metal filmlerin direncinin azaltılmasıyla çözülebilir. HTS ince filmleri, iletim süresini büyük ölçüde birkaç mertebede azaltabilir ve çiplerde üretilen ısıyı sıfır elektrik direnciyle ortadan kaldırabilir. Tıbbi alan uygulamasında büyük manyetik alanlar süperiletkenlerin mükemmel bir uygulamasıdır. Süperiletken mıknatıslar, MRI ve NMR için gereken kararlı yüksek yoğunluklu manyetik alanlar üretebilmektedir [120].

Süperiletkenliğin Meissner etkisi, manyetik kuvveti kullanan bir aracın askıya alınması, yönlendirilmesi ve ilettilmesi için manyetik kaldırma kuvveti uygulanabilir. Süperiletken mıknatıslar kullanılarak, büyük miktarlarda elektrik enerjisi saklanabilir ve mıknatıs bileşeninin fiziksel boyutu geleneksel mıknatıslara kıyasla büyük ölçüde azaltılabilir. Manyetik platformlu bir trenin en yüksek hızı, 2003 yılında CJR'nin MLX01 süperiletken maglev'i tarafından Japonya'da elde edilen 581 km/saattir (361 mil/saat) [126].

Mühendislikte süperiletkenliği yaygın olarak kullanmak için çok sayıda araştırmanın yapılması gerekmektedir. Bu nedenle YBCO süperiletkenin teknolojiye uygulama performansını geliştirmek için yapılan araştırmalar, süperiletkenlik uygulamaları için çok önemlidir. Bu araştırmalarda YBCO numunesinde katkılama koşulunu ayarlayarak kritik akım yoğunluğu ve akı sabitleme mekanizmasını değiştirmek mümkündür. Böylece, bu çalışmanın amacı pining koşullarını optimize

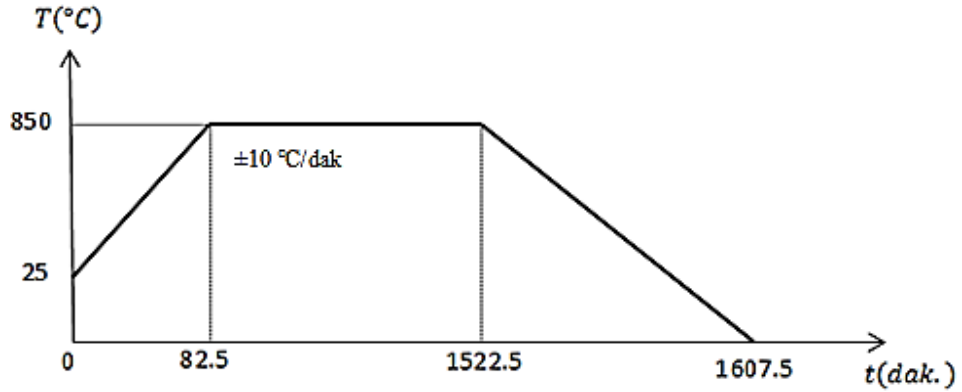
ederek vorteks sabitlemeyi geliştirmek için çeşitli sinterleme sıcaklıklarında ve katkılama yaparak daha yüksek akım yoğunluğu Meissner etkisini elde edebilmektedir.

Bu çalışmada yarıçapları, erime sıcaklıkları ve elektron sayıları farklı periyodik tabloda aynı grupta olan bor ve talyum elementleri farklı oranlarda ve sıcaklıkta YBCO numunesine katkılanarak yapısal, elektriksel, manyetik özellikleri, vorteks sabitlemesine etkileri ve kritik akım yoğunlukları araştırılmıştır. Bu çalışmada en dışuk bor katkıda (0.05) sabitleme kuvvetinin ve kritik akım yoğunluğunun değerinin arttığını fakat talyumda ise en dışuk katkıda (0.05) sabitleme kuvvetinin ve kritik akım yoğunluğunun azaldığı, talyum katkı oranı arttıça sabitleme kuvvetinin ve kritik akım yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir. Saf ve bor katkılı YBCO numuneleri için vorteks bağlanma kuvvetleri yani kritik akım yoğunlukları ve Meissner etkilerinin en büyük değeri 1000 C'de ± 2 C/dak sıcaklıkta elde edilirken talyum katkılı YBCO için ise 1000 C'de ± 10 C/dak sinterleme sıcaklıkta üretilen numunelerde elde edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

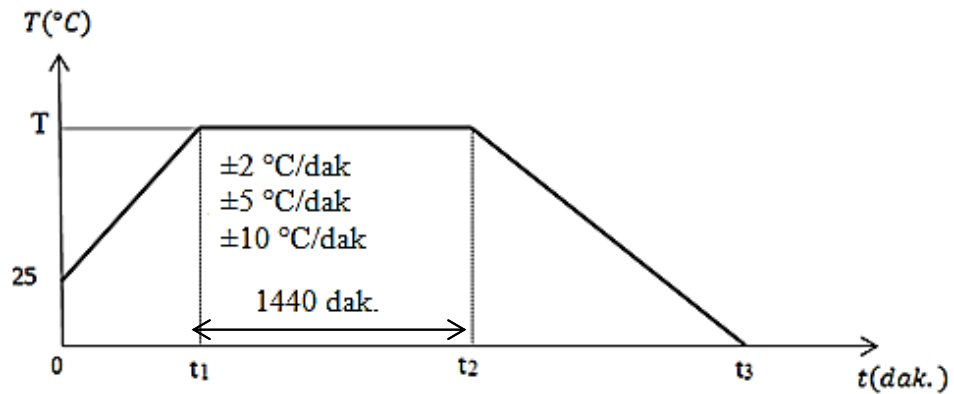
3.1. Örneklerin Hazırlanması

Tez kapsamında hazırladığımız örnekler, katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu örneklerin hazırlanmasında ilk olarak %99.9 saflıktaki Y_2O_3 , CuO , $BaCO_3$, B_2O_3 ve Tl_2O_3 bileşikleri uygun stokiometrik oranlarda karıştırılıp homojen karışım elde etmek için agat havanda 75 dakika öğütüldü.



Şekil 3.1. YBa₂Cu₃O_{7-δ} numunelerinde kalsinasyon işlemini gösteren zaman-sıcaklık diyagramı

Öğütülerek toz haline getirilen numneler 850 °C'de 24 saat bekletilip ilk kalsinasyon işlemi yapıldı (Şekil 3.1). Daha sonra bu örnekler 50 dakika öğütülerek 850 °C'de 24 saat süreyle ikinci kalsinasyon işlemi uygulandı. Bu işlemlerin amacı örneklerin istenilen stokiometriye ulaşması ve karbonatlı yapıdan arındırılarak homojen bir karışım elde etmektir. Kalsinasyon işleminin arkasında 25 dakika öğütülen örnekler 5 ton/cm² basınç altında 4 dakika bekletilerek 10 mm çapında ve yaklaşık 2 mm kalınlığında 1 gramlık peletler haline getirildi.



Şekil 3.2. YBa₂Cu₃O_{7-δ} numunelerinin T = 900, 920, 1000, 1020 °C sıcaklıklarda sinterleme işlemini gösteren zaman-sıcaklık diyagramı

Kalsinasyon işleminden sonra elde edilen peletlerden $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$, $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$ ve $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$) sıcaklıklarda saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiği, $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$, $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$ ve $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$) sıcaklıklarda 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiği ve $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$ ve $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$) sıcaklıklarda 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiği üretilmiştir (Şekil 3.2).

Üretilen örnekler, X-Işınlari Kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı x ışınları Spektroskopisi (EDX), elektriksel direnç ölçümü (R-T), manyetik ölçümler (M-H, M-T), kritik akım yoğunluğu (J_c), üst alt kritik manyetik alanları (H_{c1} , H_{c2}), aktivasyon enerjileri (U_0) ve çivileme kuvvetleri (F_p) hesaplamaları ile karakterize edilmişlerdir.

3.2. Örneklerin Analizleri

3.2.1. X ışınları kırınımı (XRD)

Hazırlanan örnekler 10 dakika öğütölüp toz haline getirildikten sonra, bilgisayar kontrollü x-ışını difraktometresi kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, CuK_α ($\lambda = 0.5405\text{ Å}$) radyasyonu kullanılarak $2\theta = 2-80^\circ$ aralığında $2^\circ/\text{dakika}$ tarama hızı ile yapılmıştır. Elde edilen desenler Jade 6.0+ kristal yapı analizi kullanılarak ve kütüphanesinde bulunan diğer yapılarla karşılaştırarak örneğin kristal yapısı çözülmüştür.

3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-Işını analizleri (EDS)

Numunelerin tanecik boyutu, tanecikler arası boşluklar, taneciklerin yönelimleri, mikro yapıdaki mikro çatlaklar ve temas yüzeylerin gözlenmesi, farklı fazların tespiti ve bunların şeklinin, miktarının ve örnekteki dağılımlarının belirlenmesi için SEM ve EDS incelemeleri yapılmıştır. SEM ölçümleri yüksek voltajda hızlandırılmış elektronlar temas ettiği bölgede x ışınları, ikincil elektronlar ve geri saçılan elektronlar olmak üzere üç durum için incelenmiştir.

Numuneler, İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma merkezinde bulunan LEO marka ve EVO 40 XVP model maksimum 30 kV hızlandırma voltajında, dedektörleri 3 nm ayırma gücüne sahip, 7 ile 1.000.000 kez büyütme

kapasitesine sahip elektron mikroskop ile incelenmiştir. Örneklerin faz analizleri ise EVO 40 XVP sistemi ile birlikte 124 eV gücü ile çalışan Bruker Dedector kullanılarak yapılmıştır.

3.2.3. Manyetik alan altında elektriksel direnç ölçümleri (MR-T)

Elektriksel ölçümler, 9 T manyetik alan uygulama gücüne sahip Quantum Design PPMS (Physical Property Measurement System) ile yapılmıştır. Dört nokta kontak yöntemi ile elektriksel direnç ölçümleri alınmıştır. Numunelerin elektriksel direnç ölçümleri (R-T) 0, 2, 4, 6, 8 T manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Manyetik ölçümler (M-H, M-T) ve kritik akım yoğunluğu hesaplamaları

Hazırladığımız malzemelerin uygulanan manyetik alana karşılık manyetizasyon (M-H) ölçümleri 10 K, 20 K, 30 K sabit sıcaklıklarda -9 ile 9 tesla arasında incelenmiştir. 100 Oe sabit manyetik alanda sıcaklığa bağlı manyetizasyon (M-T) ölçümleri Quantum Design PPMS sisteminin manyetik ölçüm opsiyonu ile 5 K ile 120 K arasında yapılmıştır. Elde edilen manyetizasyon değerleri numune hacmine bölünerek (emu/cm^3) birim manyetizasyon hesaplanıp, dış manyetik alana bağlı manyetizasyon eğrileri elde edilmiştir.

Kritik akım yoğunluğu (J_c) hesaplamaları M-H eğrileri yardımıyla ΔM ve dikdörtgenler prizması şekline getirilen numunelerin a ve b boyutlarına bağlı olarak; Bean formülü

$$J_c = \frac{20\Delta M}{a\left(1-\frac{a}{3b}\right)} \quad (3.1)$$

ile hesaplanmıştır. Burada a ve b ($b>a$) örneklerin boyutlarıdır. ($\Delta M=M_+-M_-$), M_+ ve M_- örneğe uygulanan manyetik alanın pozitif ve negatif değerlerine karşılık gelmektedir.

3.2.5. Çivileme (pinning) kuvveti ve aktivasyon enerjisi hesaplamaları

Numunede vortekslerin çivileme (pinning) kuvvetleri manyetik alan ve akım yoğunluğu kullanılarak

$$F_B = J_c \times B \quad (3.2)$$

denkleminde hesaplanmıştır. Eşitlikte F_p çivileme kuvvetini, J_c kritik akım

yoğunluğunu göstermektedir.

Vorteksin bağlanma enerjisinin bir ölçüsü olan aktivasyon enerjisi TAFF teorisi ile açıklanmıştır. TAFF teorisine göre aktivasyon enerjisi

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{U_0}{k_B T}} \quad (3.3)$$

ile verilen Arrhenius denklemi ile bulunur. Burada ρ herhangi bir sıcaklıkta öz direnç, ρ_0 oda sıcaklığında öz direnç, k_B Boltzman sabiti, U_0 aktivasyon enerjisi ve T sıcaklıktır. Denklem (4.3)'de aktivasyon enerjisi;

$$U_0 = -k_B T \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3.4)$$

elde edilmektedir. U_0 aktivasyon enerjisi, $\ln \frac{\rho}{\rho_0}$ 'ın $1/T$ 'ye göre grafiğın eğiminde hesaplanmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. X Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri

YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğine ait karakteristik pikler; (003), (013), (103), (005), (113), (020), (200), (123), (213), (026), (220), (130) ve (303) düzlemlerine ait piklerdir. YBCO bileşiğinin ortorombik yapısında (013) pikinin şiddeti (103) pikinin şiddetinden daha küçüktür ve bu pikler birbirine çok yakındırlar. Bunlara ek olarak (213) pikinin şiddeti (123) pikinin şiddetinden daha düşüktür. Bu durum yapının ortorombik olduğunu göstermektedir. Bu bize saf yapıların ortorombik yapıda olduğunu göstermiştir. Tetragonal yapıda ise (013) ve (103) pikleri çakışıktır.

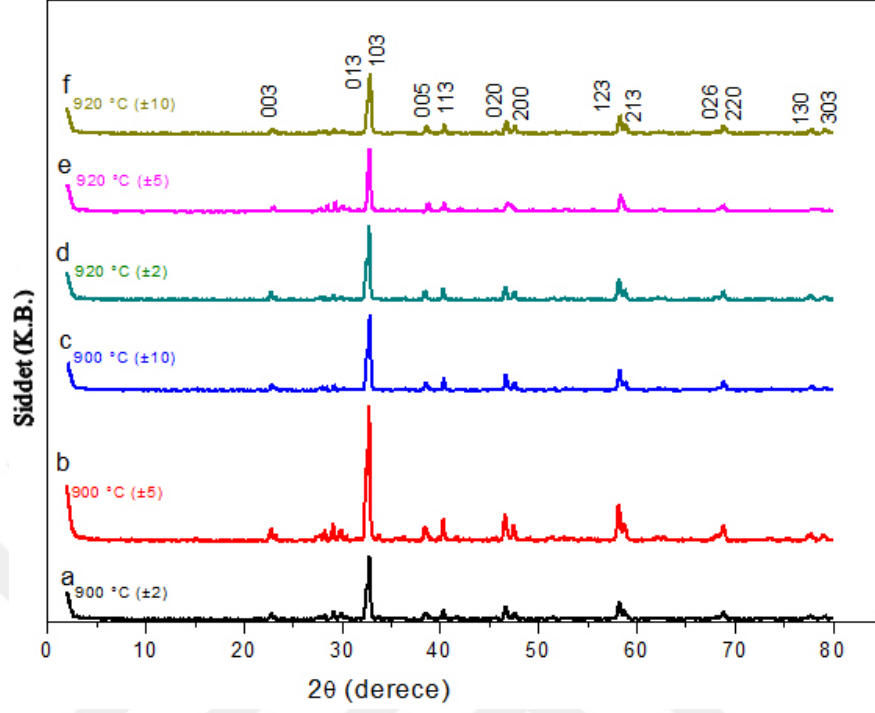
Çizelge 4.1. YBa₂Cu₃O_{7-δ} için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik parametreleri ve oksijen miktarları

Sinterleme Sıcaklığı (°C)	a(Å)	b(Å)	c(Å)	V(Å ³)	Δ=(b-a)/(b+a)	O _{7-δ}
900 °C ±2 °C/dak	3.820	3.888	11.676	173.475	0.009	6.9
900 °C ±5 °C/dak	3.826	3.893	11.693	174.197	0.009	6.8
900 °C ±10 °C/dak	3.816	3.888	11.676	173.259	0.009	6.8
920 °C ±2 °C/dak	3.822	3.890	11.699	173.943	0.009	6.7
920 °C ±5 °C/dak	3.819	3.887	11.670	173.242	0.009	6.9
920 °C ±10 °C/dak	3.816	3.882	11.658	172.714	0.009	6.9
1000 °C ±2 °C/dak	3.814	3.891	11.676	173.329	0.010	6.8
1000 °C ±5 °C/dak	3.816	3.890	11.676	173.351	0.009	6.8
1000 °C ±10 °C/dak	3.807	3.879	11.660	172.187	0.009	6.9
1020 °C ±2 °C/dak	3.817	3.891	11.670	173.376	0.009	6.9
1020 °C ±5 °C/dak	3.820	3.893	11.705	174.104	0.009	6.7
1020 °C ±10 °C/dak	3.816	3.883	11.670	172.938	0.009	6.9

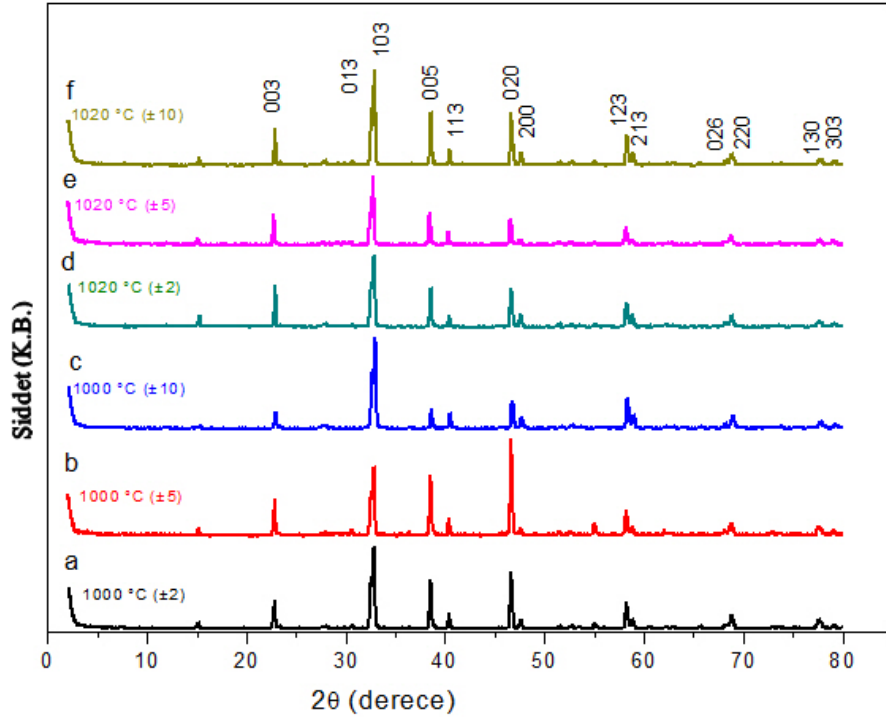
Bu çalışmada elde edilen saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu verilere göre sinteleme sıcaklığı 900 °C’den 1020 °C’ye arttırıldığında ortorombik yapı neredeyse sabit kalmaktadır. a, b, c örgü parametreleri değerlerinde büyük bir değişiklik görülmemektedir. b ve a arasındaki fark, “Δ” düzen derecesine karşılık gelir. “Δ” düzen derecesi süperiletkenlik parametresini gösterir. O_{7-δ} oksijen stokiyometrisinde önemli bir değişiklik görülmemektedir. “Δ” düzen derecesi ve O_{7-δ} oksijen stokiyometrisi malzemelerin ortorombik yapıda olduğunu göstermektedir.

YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğinde ısıtma işlem sıcaklıklarının 900 °C ve 920 °C sinterleme

sıcaklığında pik şiddetlerinin birbirleri ile benzer oldukları, 1000°C’de pik şiddetlerinin en büyük değer aldığı görülmüştür (Şekil 4.1 - Şekil4.2).



Şekil 4.1. 900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ve 920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri



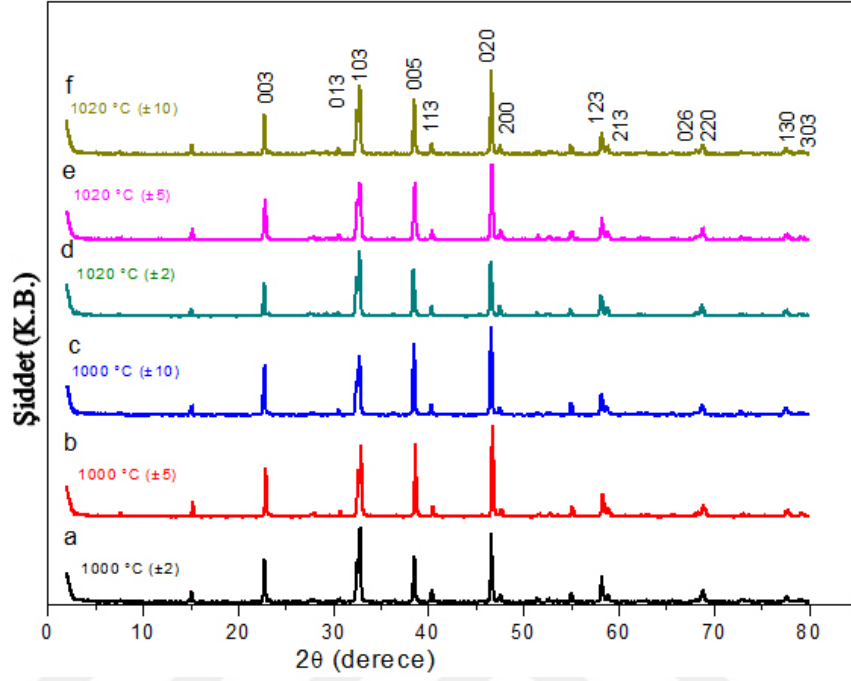
Şekil 4.2. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ve 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri

Çizelge 4.2. $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(B_2O_3)_x$ için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik dereceleri ve oksijen miktarları

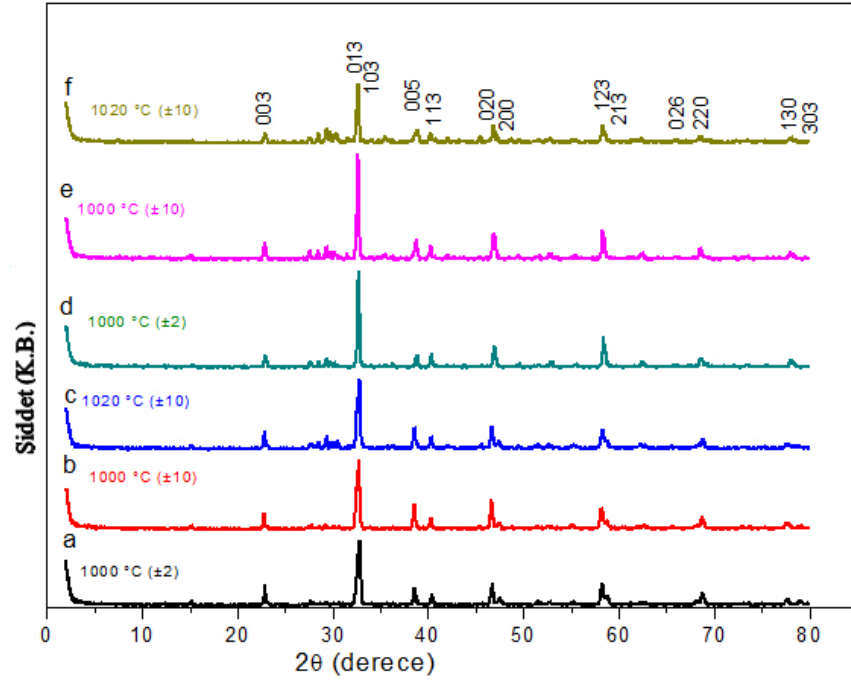
x	Sinterleme sıcaklığı (°C)	a(Å)	b(Å)	c(Å)	V(Å ³)	$\Delta=(b-a)/(b+a)$	O _{7-δ}
0.05	1000 °C ±2 °C/dak	3.820	3.893	11.676	173.68	0.009	6.8
0.05	1000 °C ±5 °C/dak	3.813	3.885	11.657	172.68	0.009	6.9
0.05	1000 °C ±10 °C/dak	3.822	3.896	11.687	174.04	0.009	6.8
0.05	1020 °C ±2 °C/dak	3.826	3.898	11.705	174.59	0.009	6.7
0.05	1020 °C ±5 °C/dak	3.817	3.888	11.659	173.06	0.009	6.9
0.05	1020 °C ±10 °C/dak	3.822	3.895	11.687	173.98	0.009	6.8
0.1	1000 °C ±2 °C/dak	3.825	3.886	11.659	173.35	0.008	6.9
0.1	1000 °C ±10 °C/dak	3.827	3.891	11.67	173.79	0.008	6.9
0.1	1020 °C ±10 °C/dak	3.823	3.887	11.664	173.36	0.008	6.9
0.2	1000 °C ±2 °C/dak	3.838	3.880	11.635	173.32	0.005	7.1
0.2	1000 °C ±5 °C/dak	3.868	3.885	11.658	175.20	0.002	6.9
0.2	1000 °C ±10 °C/dak	3.866	3.887	11.647	175.06	0.002	7.0
0.2	1020 °C ±2 °C/dak	3.871	3.877	11.629	174.53	0.001	7.1
0.2	1020 °C ±5 °C/dak	3.874	3.888	11.676	175.90	0.002	6.8
0.2	1020 °C ±10 °C/dak	3.881	3.890	11.693	176.58	0.001	6.7
0.3	1000 °C ±2 °C/dak	3.868	3.873	11.595	173.77	0.001	7.3
0.3	1000 °C ±5 °C/dak	3.883	3.890	11.612	175.40	0.001	7.2
0.3	1000 °C ±10 °C/dak	3.836	3.871	11.566	171.76	0.004	7.5
0.4	1000 °C ±10 °C/dak	3.840	3.880	11.549	172.12	0.005	7.6
0.5	1000 °C ±10 °C/dak	3.845	3.873	11.566	172.28	0.004	7.5
0.6	1000 °C ±10 °C/dak	3.820	3.865	11.583	171.04	0.005	7.4

$(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(B_2O_3)_x$ malzemeler [$x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ve 0.6] sistemi için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. B_2O_3 katkı oranı 0.2’ye kadar arttırıldığında, ortorombik yapı neredeyse sabit kalmakta ve 0.2’de yapı değişmeye başlamaktadır. Malzemelerin b-örgü parametresinde katkı ve sıcaklığa bağlı olarak belirgin bir değişiklik görülmemektedir. a-örgü parametresinde ve " Δ " düzen derecesinde 0.2 katkı ile belirgin bir değişiklik başlamıştır. B_2O_3 katkılı örneklerde, a-örgü parametresi saf numunelere göre daha büyüktür ve 0.3 katkılı örneklerde en büyük değeri almaktadır. $x=0.2$ ’lik B_2O_3 katkılı örneklerde " Δ " düzen derecesinde belirgin bir azalma başlamıştır. $O_{7-\delta}$ oksijen stokiyometri değerlerinde 0.3 katkı oranına kadar küçük değişiklikler olurken 0.3’lük bir katkı ile belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Kristal yapının 0.2 katkı oranından sonra ortorombik

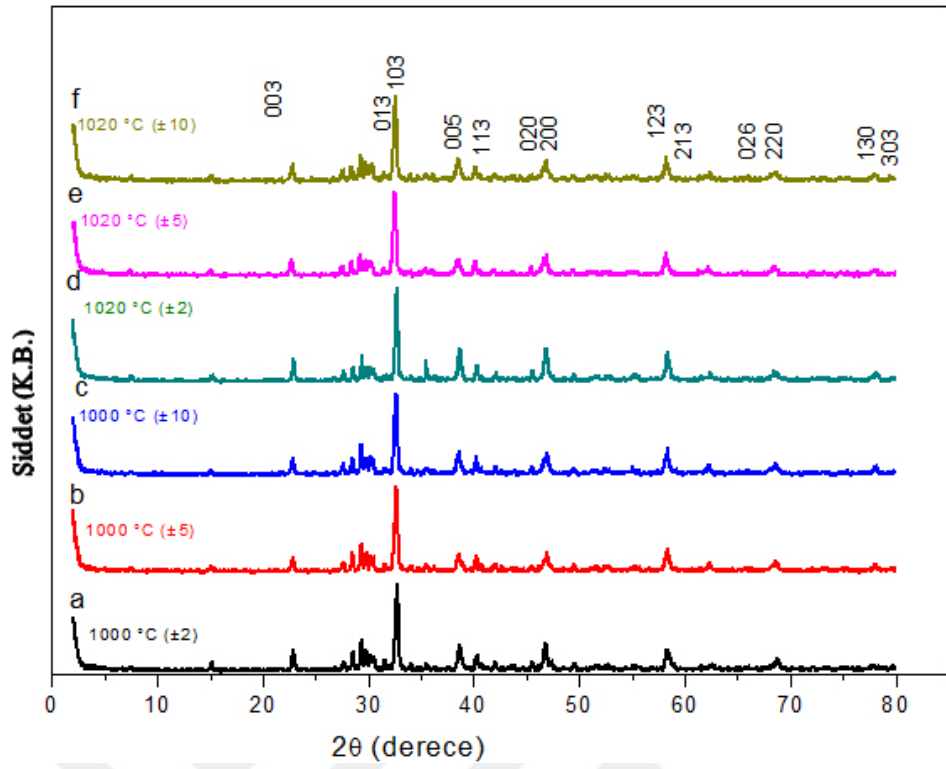
simetriden tetragonal simetriye geçtiği açıktır. Şekillerde $0.05 \leq x \leq 0.3$ bor katkılı numunelerde pik şiddetlerinin yaklaşık aynı kaldığı, $x \geq 0.3$ bor katkılı numunelerde ise daha büyük olduğu görülmüştür (Şekil 4.3 - Şekil 4.6).



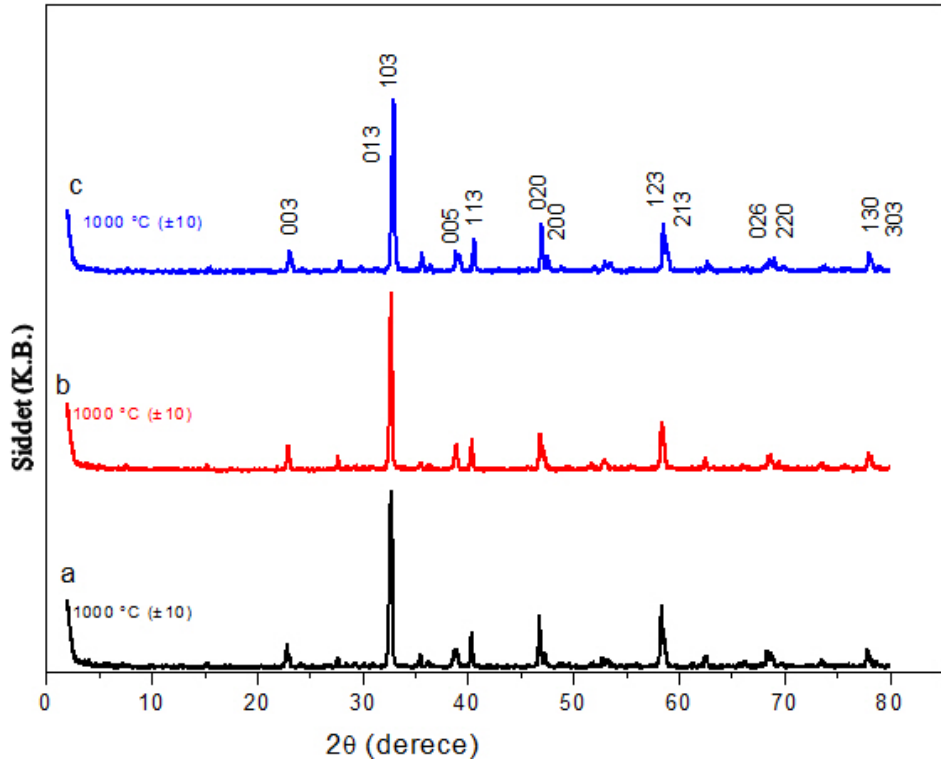
Şekil 4.3. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ve 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri



Şekil 4.4. 1000 °C ±2, ±10 °C/dak ve 1020 °C ±2 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a)0.1 ve d)0.3 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri



Şekil 4.5. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ve 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri



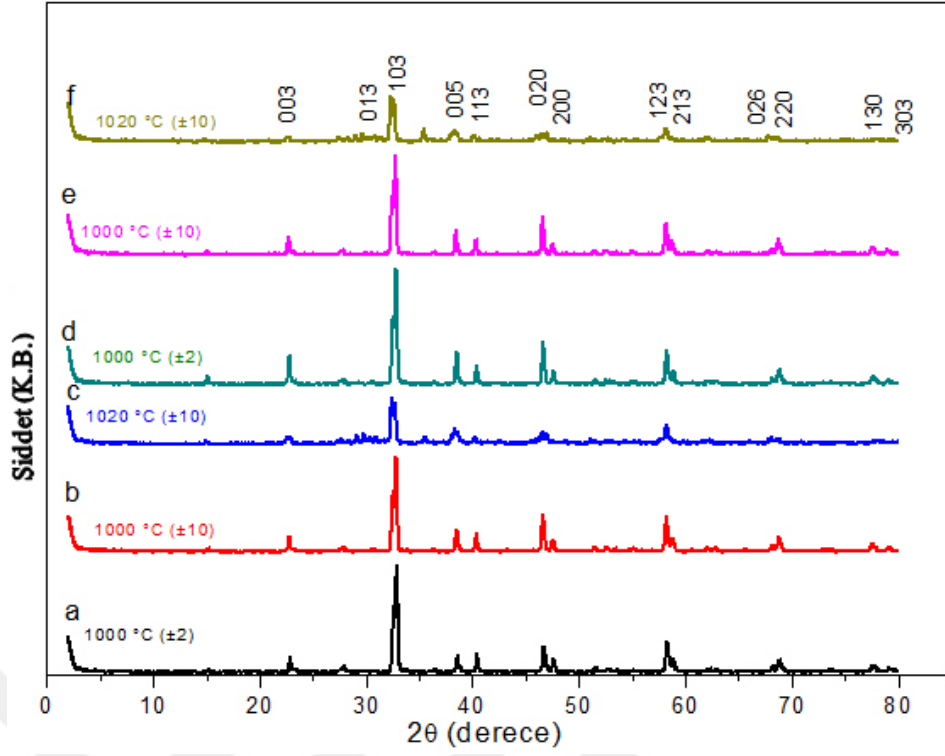
Şekil 4.6. 1000 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri

Çizelge 4.3. $(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Tl_2O_3)_x$ için örgü parametreleri, örgü hacimleri, süperiletkenlik dereceleri ve oksijen miktarları

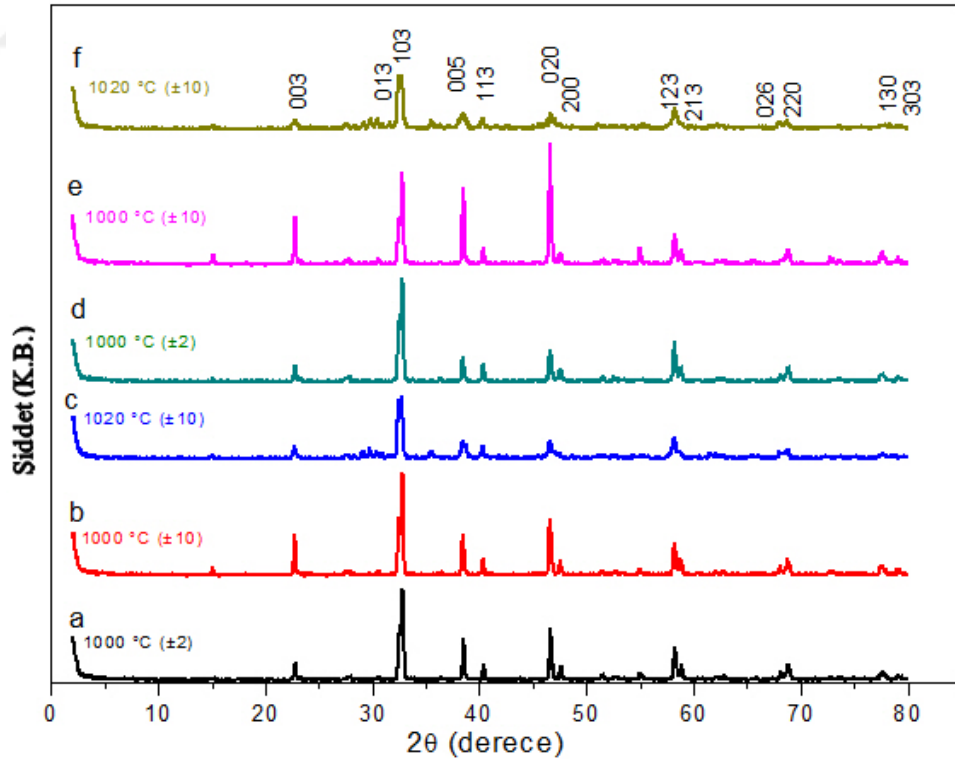
x	Sinterleme sıcaklığı (°C)	a(Å)	b(Å)	c(Å)	V(Å ³)	$\Delta=(b-a)/(b+a)$	O _{7-δ}
0.05	1000 °C ±2 °C/dak	3.813	3.888	11.658	172.854	0.009	6.9
0.05	1000 °C ±10 °C/dak	3.823	3.893	11.682	173.898	0.009	6.8
0.05	1020 °C ±10 °C/dak	3.868	3.898	11.653	175.714	0.003	7.0
0.1	1000 °C ±2 °C/dak	3.819	3.903	11.671	173.985	0.010	6.9
0.1	1000 °C ±10 °C/dak	3.823	3.897	11.699	174.365	0.009	6.7
0.1	1020 °C ±10 °C/dak	3.872	3.924	11.728	178.241	0.006	6.5
0.2	1000 °C ±2 °C/dak	3.817	3.893	11.681	173.618	0.009	6.8
0.2	1000 °C ±10 °C/dak	3.819	3.897	11.688	173.993	0.010	6.8
0.2	1020 °C ±10 °C/dak	3.828	3.910	11.659	174.544	0.010	7.0
0.3	1000 °C ±2 °C/dak	3.822	3.893	11.682	173.825	0.009	6.8
0.3	1000 °C ±10 °C/dak	3.822	3.891	11.705	174.096	0.009	6.7
0.3	1020 °C ±10 °C/dak	3.863	3.891	11.693	175.818	0.003	6.7

$(YBa_2Cu_3O_{7-\delta})_{1-x}(Tl_2O_3)_x$ malzemeler [$x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$] sistemi için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmiştir. Bu verilere göre Tl_2O_3 katkı oranı 0.2’ye kadar arttırıldığında, ortorombik yapı neredeyse sabit kalmakta ve 0.2’de değişmektedir. Malzemelerin b-örgü parametresinde katkı ve sıcaklığa bağlı olarak belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Sıcaklık 1000 °C’den 1020 °C’ye çıkarıldığında örneklerin a-örgü parametresinde ve “ Δ ” düzen ölçülerinde belirgin bir değişiklik olduğu görülmektedir. a-örgü parametreleri 1020 °C’de en yüksek değerleri almaktadırlar. b ve a-örgü parametrelerine bağlı “ Δ ” düzen ölçüleri ise 1020 °C’de en düşük değerleri almaktadırlar. 1000 °C sıcaklıkta O_{7-δ} oksijen stokiyometri değerlerinde katkı oranına bağlı olarak belirgin bir değişiklik görülmezken, 1020 °C sıcaklıkta O_{7-δ} oksijen stokiyometri değerleri katkı oranına bağlı olarak değişmektedir. Yapının 1000 °C’de ortorombik simetride, 1020 °C’de tetragonal simetride olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.7 - Şekil 4.8’de Tl katkılı numunelerde pik şiddetlerinin neredeyse değişmediği görülmüştür. Tl katkılı numunelerde pik şiddetleri bor katkılı numunelerdeki pik şiddetlerinden daha büyüktür.



Şekil 4.7. 1000 °C ±2, ±10 °C/dak ve 1020 °C ±2 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a) 0.05 ve d) 0.1 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri



Şekil 4.8. 1000 °C ±2, ±10 °C/dak ve 1020 °C ±2 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a) 0.2 ve d) 0.3 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin XRD grafikleri

4.2. SEM ve EDS İncelemeleri

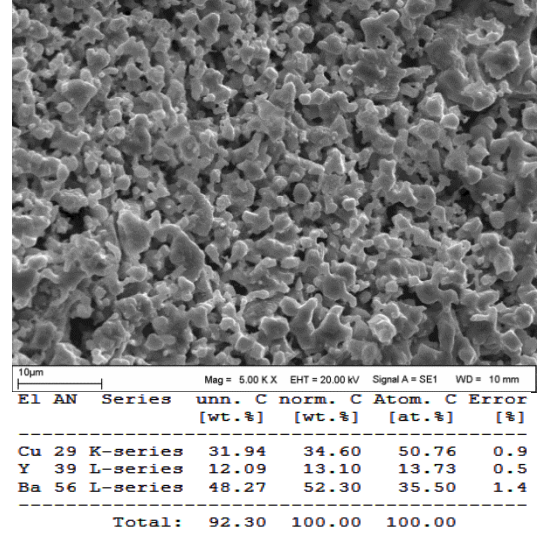
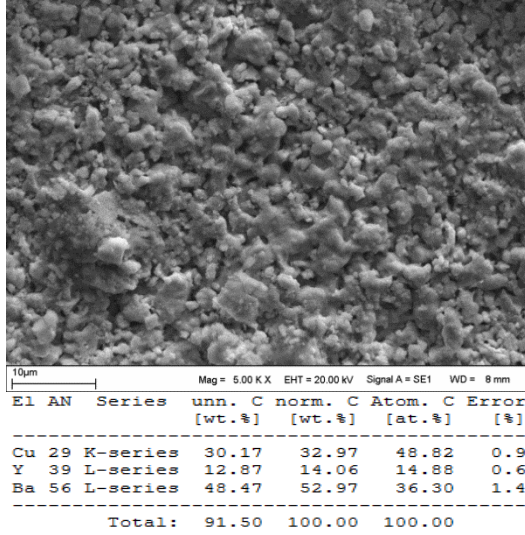
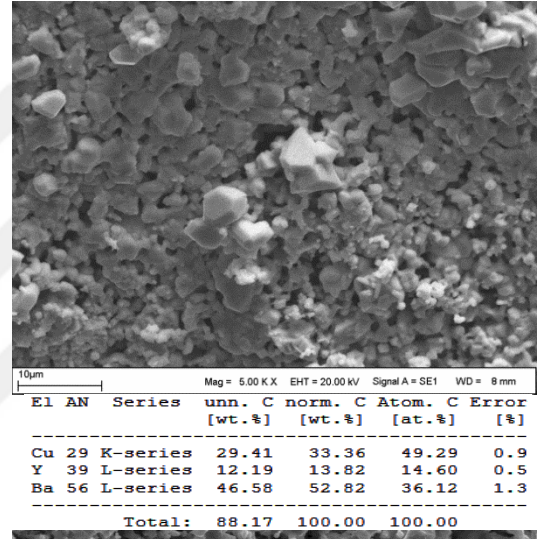
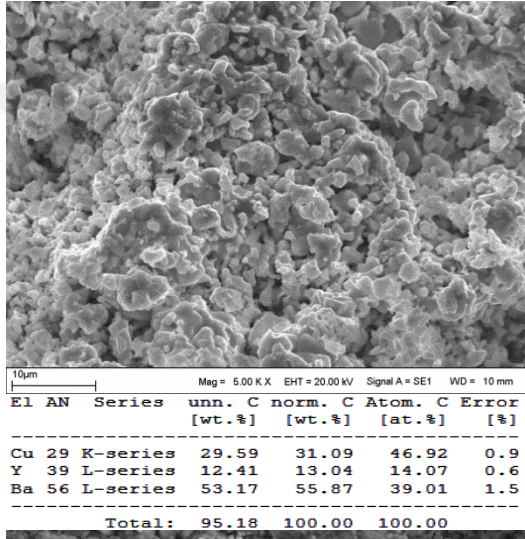
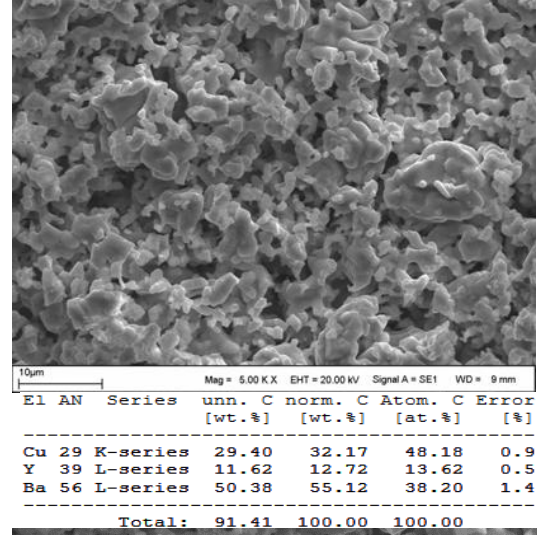
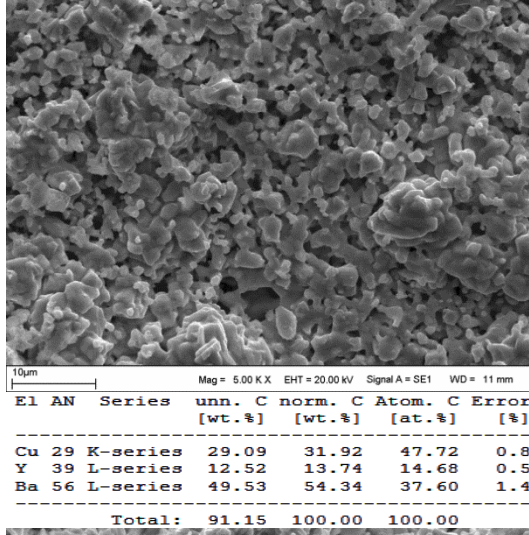
YBCO süperiletkenler tanecikli mikro-yapıya sahiptir. SEM ile elde edilen görüntülerden bu taneciklerin yönelimleri, tane sınırları, tanecikler arası boşluklar, ısıtma işlemlerin ve katkılamaların numunede meydana getirdiği bazı morfolojik değişiklikler hakkında bilgi elde edilebilmektedir

$(YBa_2B_xCu_3O_{7-\delta})_{1-x}B_x$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) katkılı numunelerin ve $(YBa_2B_xCu_3O_{7-\delta})_{1-x}Tl_x$ ($x = 0.0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$) katkılı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.9-Şekil 4.23'de verilmiştir. $1000^\circ C$ 'ye kadar ısıtma işlemi gören saf ve katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ malzemeler rastgele yönelmiş tanecikli bir yapı göstermektedir. Bu tür yapı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ malzemesinin genel karakteristiği olup ısıtma işlemlerin, talyum ve bor katkılamasının bu yapı üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

Saf ve bor katkılı yapıların SEM'leri sıcaklık artışına bağlı olarak incelendiğinde; bor katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 'da $\pm 2^\circ C/dak$ ısıtma hızlarında kısmen düzlemsel taneciklerin olduğu, $\pm 5^\circ C/dak$ ısıtma hızlarında taneciklerin büyüklüğünün arttığı yapı ve $\pm 10^\circ C/dak$ ısıtma hızlarında ise kısmen erimenin olduğu tanecikli yapı gözlenmiştir (Şekil 4.9-Şekil 4.18).

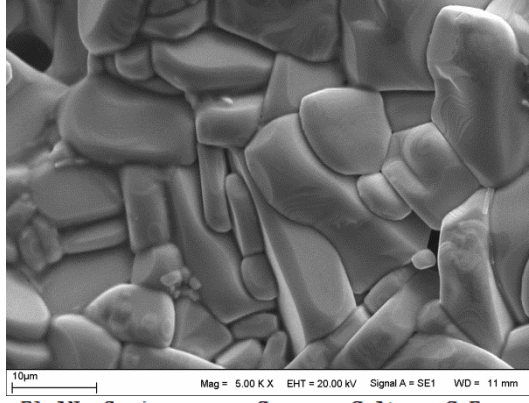
Bor katkılı yapıların SEM'leri katkı oranına bağlı olarak incelendiğinde; $1000^\circ C (\pm 2), (\pm 5)$ ve $(\pm 10)^\circ C/dak$ sıcaklık değişiminde; 0,05 bor katkısı için yapı kısmen düzlemsel tanecik şeklinde, 0,1 bor katkısında tanecikler arasında boşlukların arttığı ve taneciklerin daha belirginleştiği, 0,2 bor katkısında eriyik bölgelerde taneciklerin olduğu, 0,3 bor katkısında ise yapıda eriyik bölgelerin arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.13, Şekil 4.15, Şekil 4.17, Şekil 4.18). 0,4, 0,5 ve 0,6 bor katkısı için; $1000^\circ C \pm 10^\circ C/dak$ ısıtma hızlarında eriyik bölgeler oluşarak yüzey düzlemselleşmiştir. (Şekil 4.19). $1020^\circ C (\pm 2), (\pm 5)$ ve $(\pm 10)^\circ C/dak$ sıcaklık değişiminde; bor katkı oranı arttıkça eriyik bölgeler artarak yapı yüzeyi düzlemselleşmektedir (Şekil 4.14, Şekil 4.16).

EDS tablolarında yapıların istenilen saflıkta ve yaklaşık istenilen atomik oranlarda olduğunu görülmektedir.

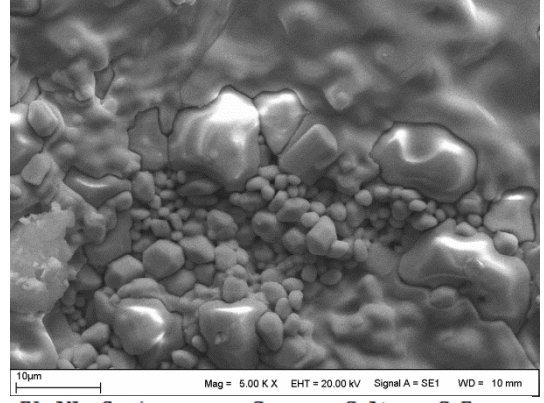


Şekil 4.9. 900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin SEM görüntüleri

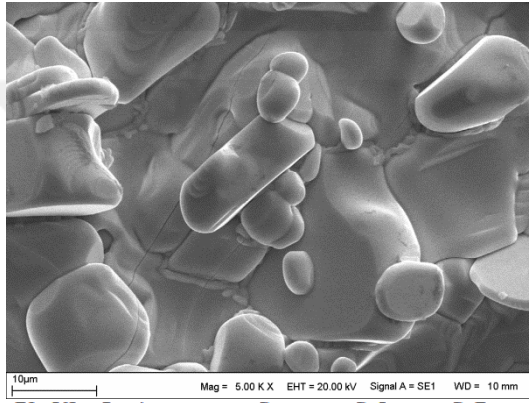
Şekil 4.10. 920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin SEM görüntüleri



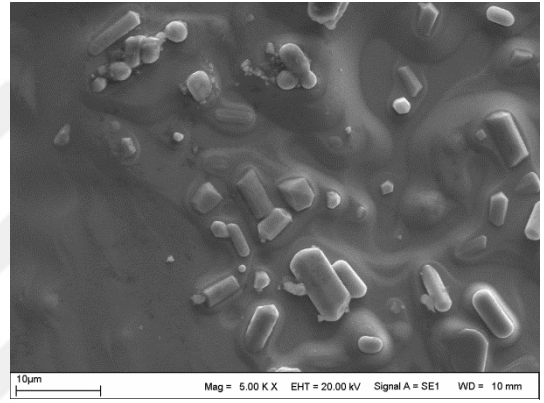
El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Cu	29	K-series	30.52	32.91	48.50	0.9
Y	39	L-series	14.37	15.50	16.32	0.6
Ba	56	L-series	47.83	51.59	35.18	1.4
Total:			92.72	100.00	100.00	



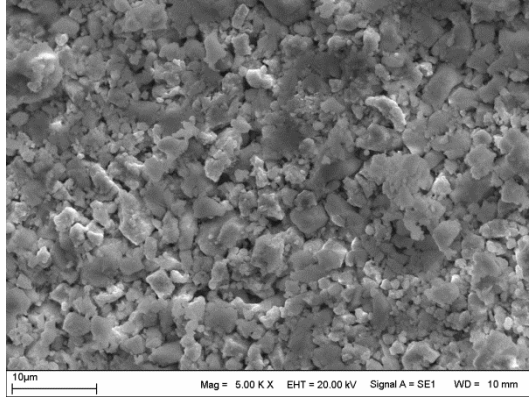
El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Cu	29	K-series	28.57	34.10	49.77	0.8
Y	39	L-series	13.02	15.54	16.21	0.6
Ba	56	L-series	42.19	50.36	34.01	1.2
Total:			83.78	100.00	100.00	



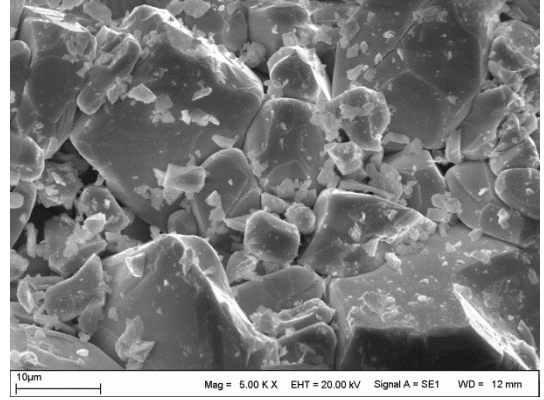
El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Cu	29	K-series	30.75	33.78	49.46	0.9
Y	39	L-series	13.99	15.36	16.08	0.6
Ba	56	L-series	46.30	50.86	34.46	1.3
Total:			91.04	100.00	100.00	



El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Cu	29	K-series	31.59	35.60	51.38	0.9
Y	39	L-series	13.68	15.42	15.91	0.6
Ba	56	L-series	43.46	48.98	32.71	1.2
Total:			88.73	100.00	100.00	



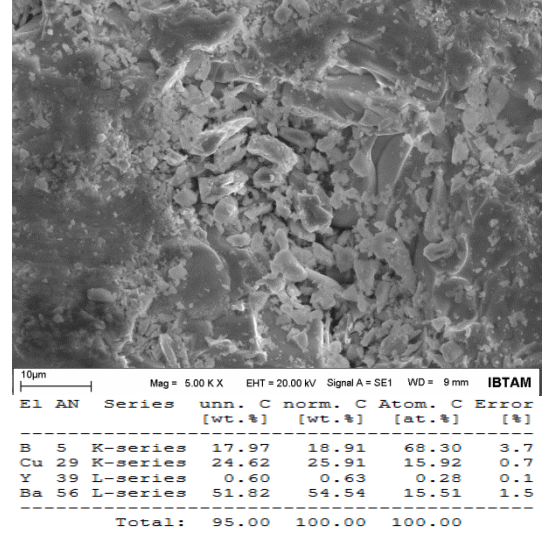
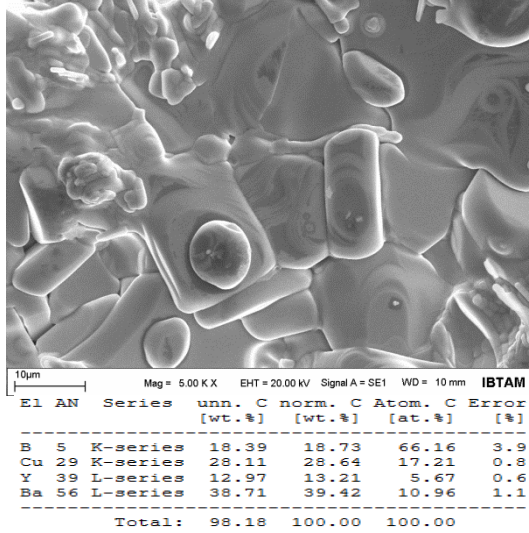
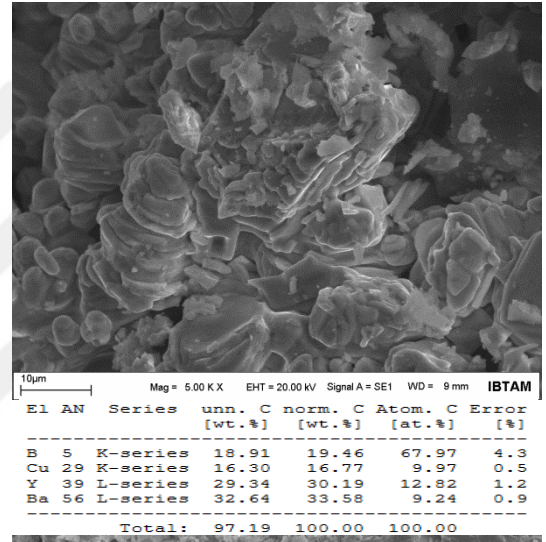
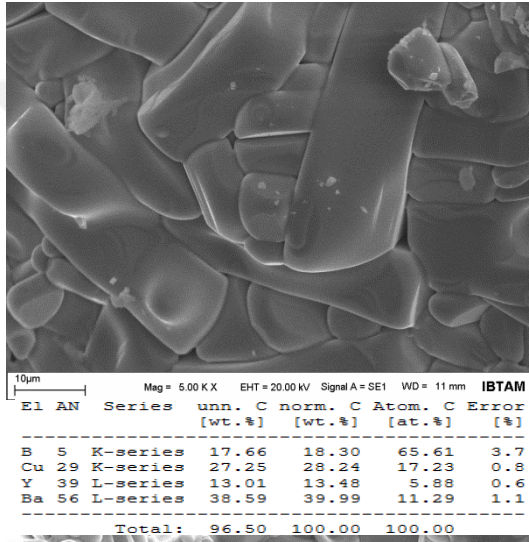
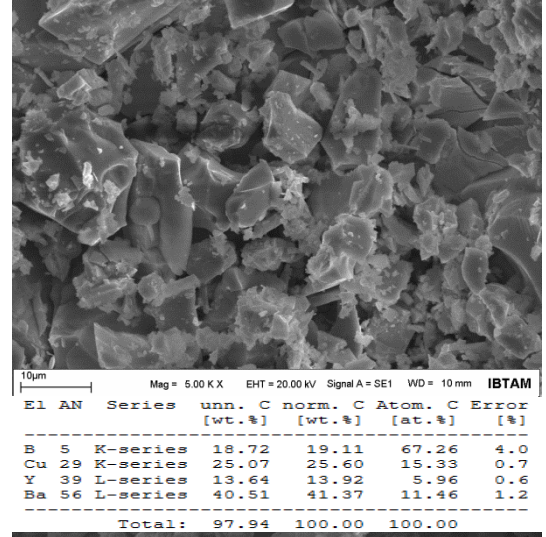
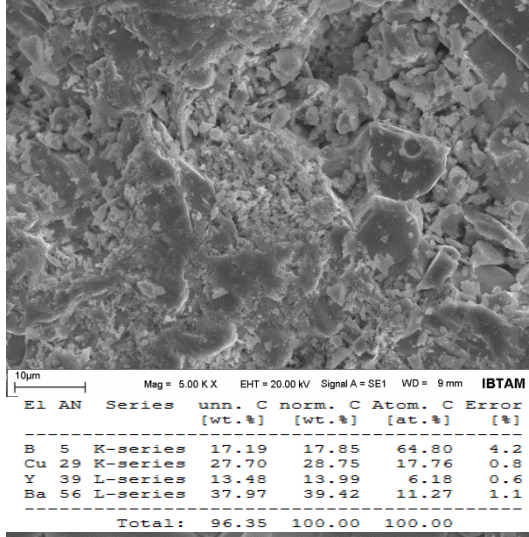
El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Cu	29	K-series	29.86	32.63	48.10	0.9
Y	39	L-series	14.66	16.02	16.88	0.6
Ba	56	L-series	47.00	51.36	35.03	1.3
Total:			91.53	100.00	100.00	



El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Cu	29	K-series	34.51	34.78	51.58	1.0
Y	39	L-series	9.73	9.81	10.40	0.5
Ba	56	L-series	54.96	55.41	38.02	1.6
Total:			99.20	100.00	100.00	

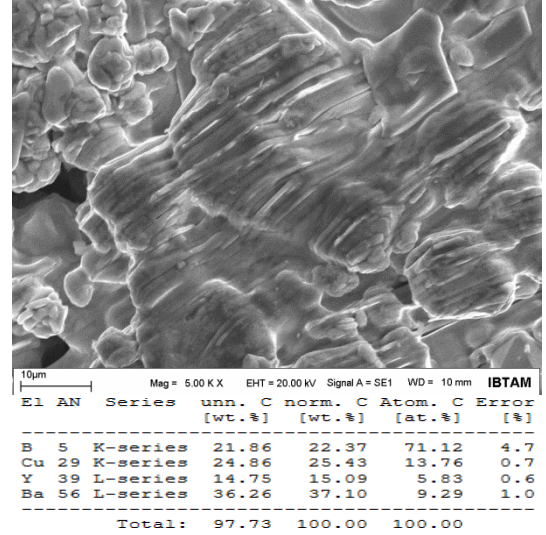
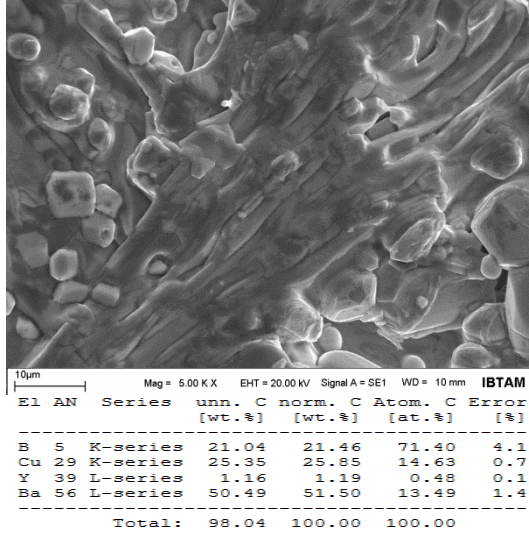
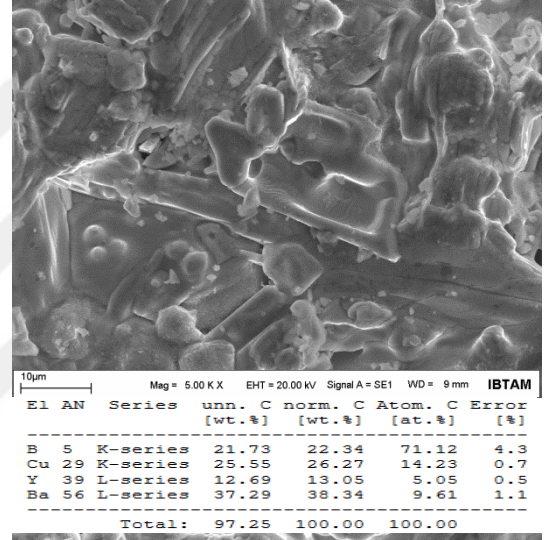
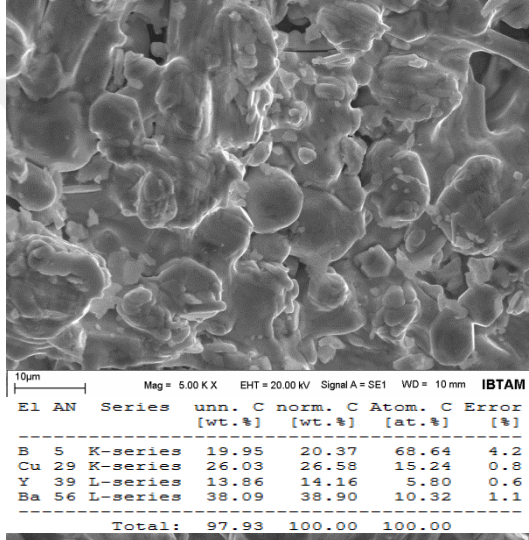
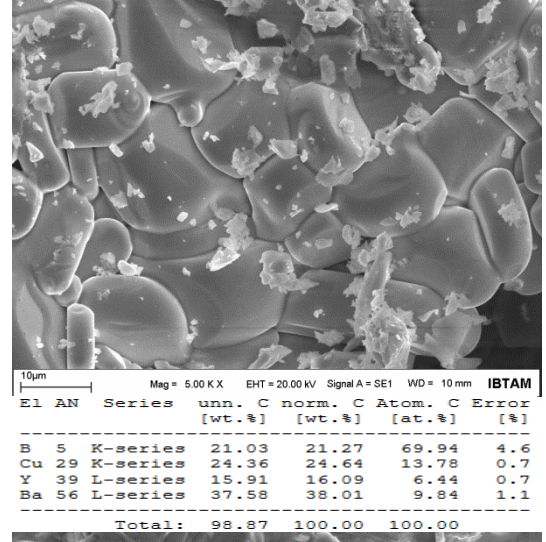
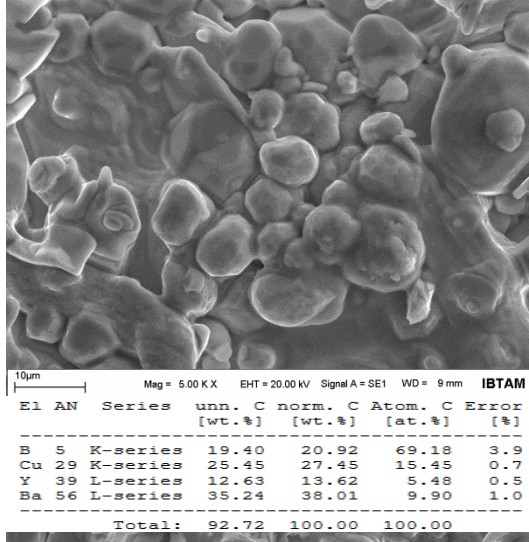
Şekil 4.11. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğinin SEM görüntüleri

Şekil 4.12. 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğinin SEM görüntüleri



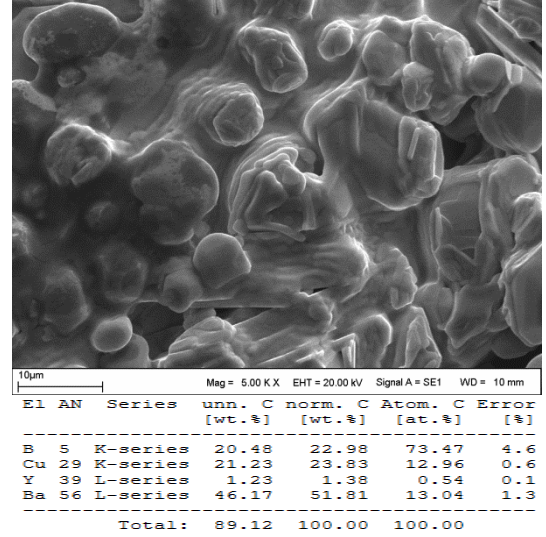
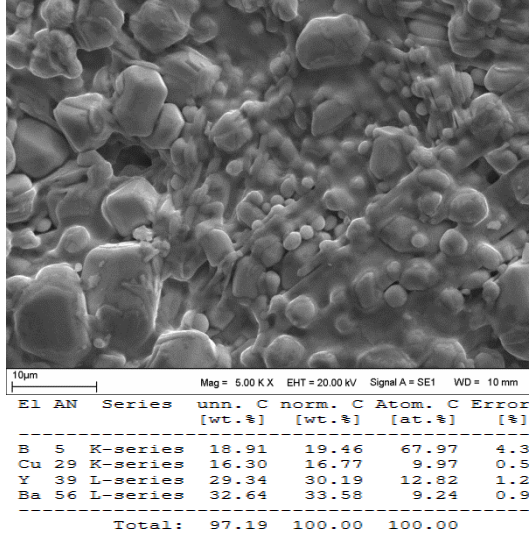
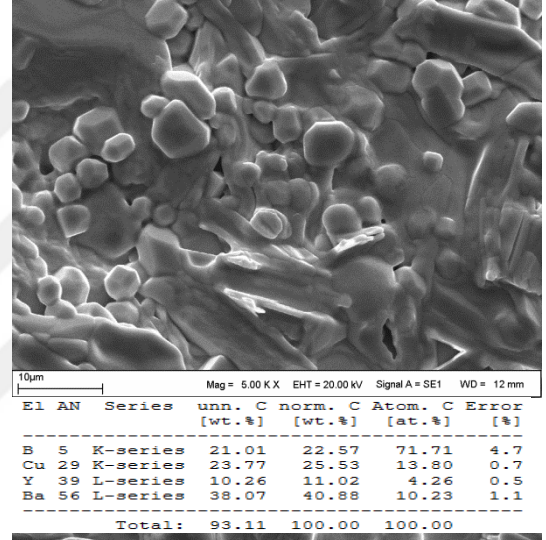
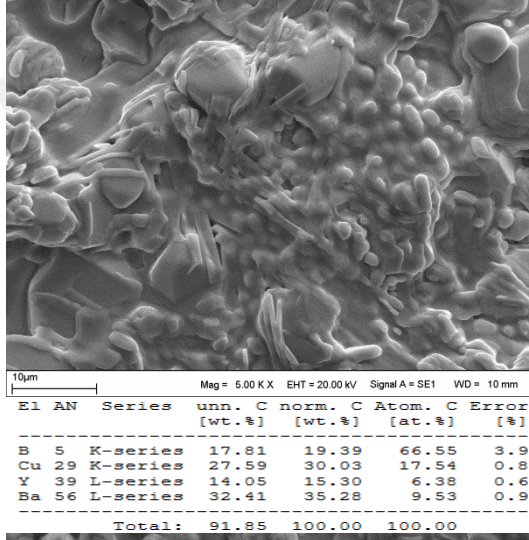
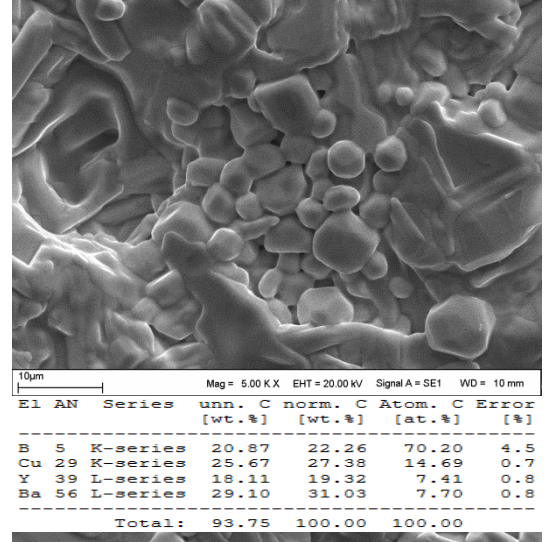
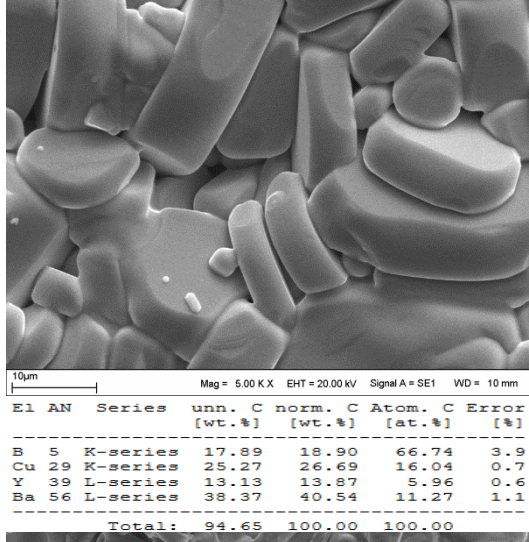
Şekil 4.13. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin SEM görüntüleri

Şekil 4.14. 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin SEM görüntüleri



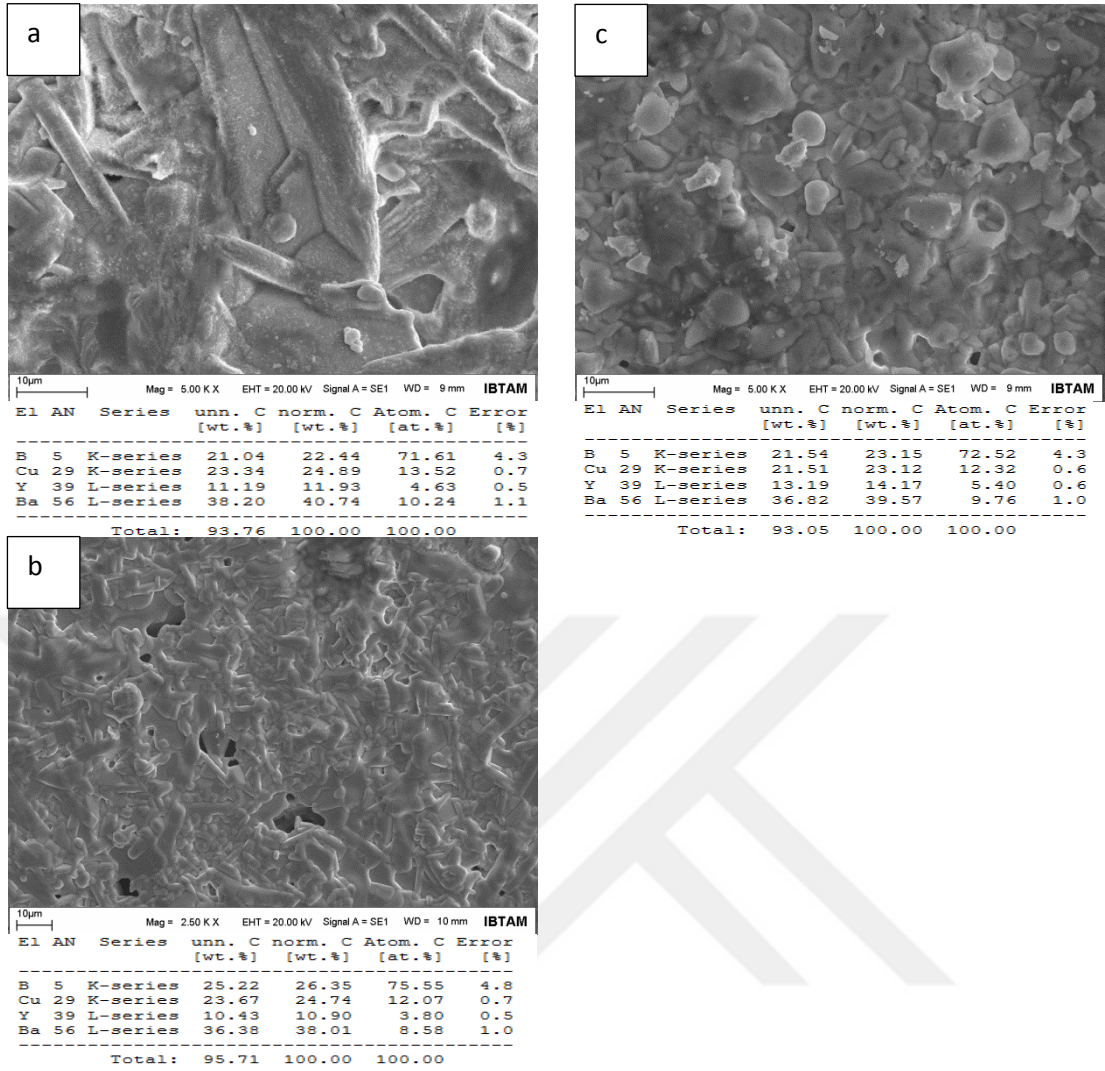
Şekil 4.15. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin SEM görüntüleri

Şekil 4.16. 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin SEM görüntüleri



Şekil 4.17. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin SEM görüntüleri

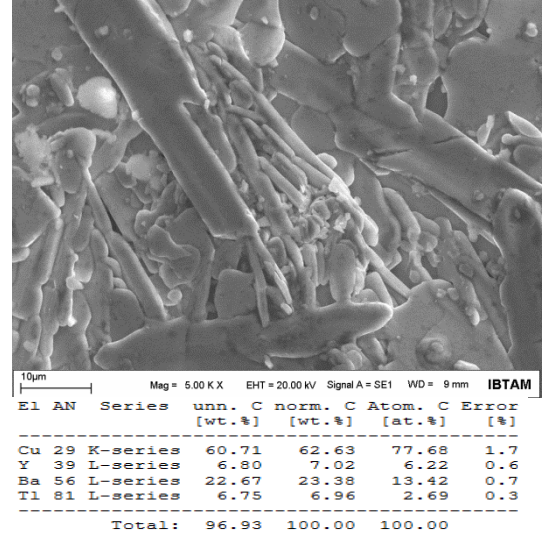
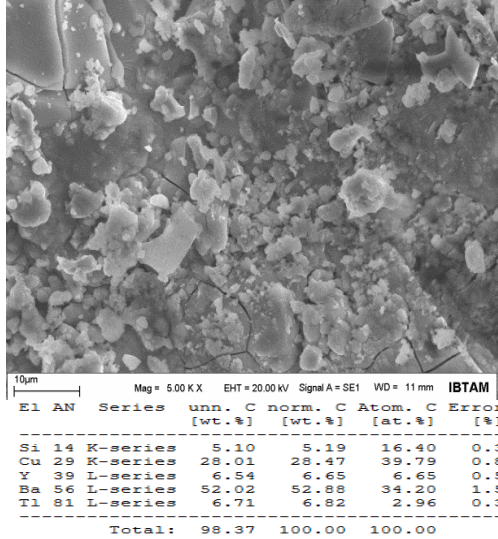
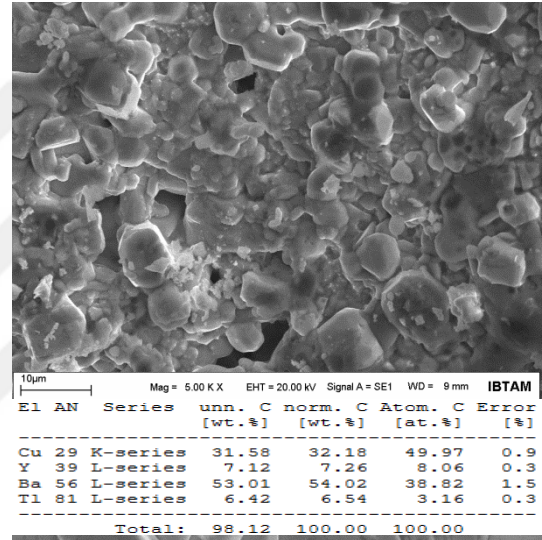
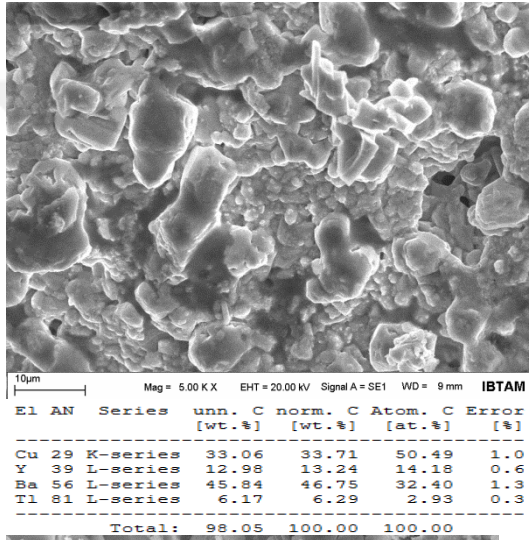
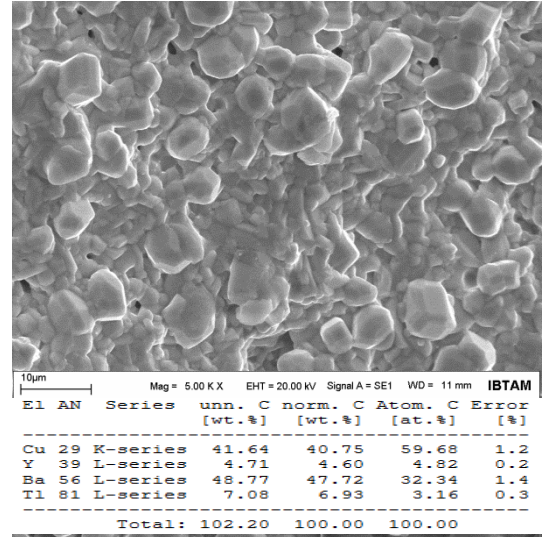
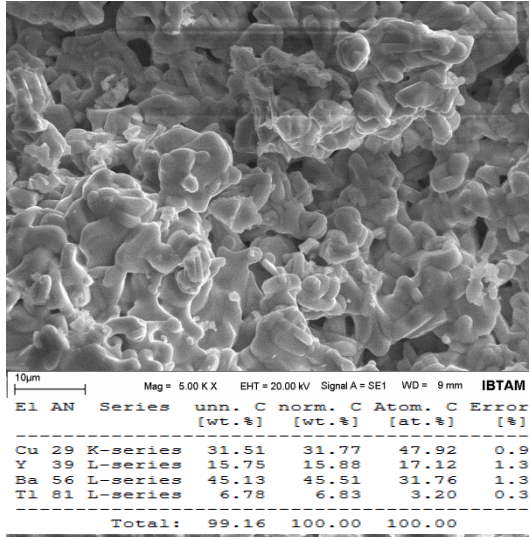
Şekil 4.18. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin SEM görüntüleri



Şekil 4.19. 1000 °C 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a) 0.4, b) 0.5 ve c) 0.6 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin SEM görüntüleri

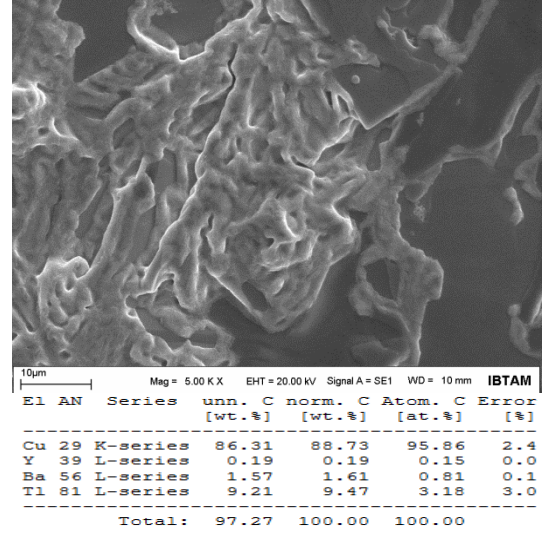
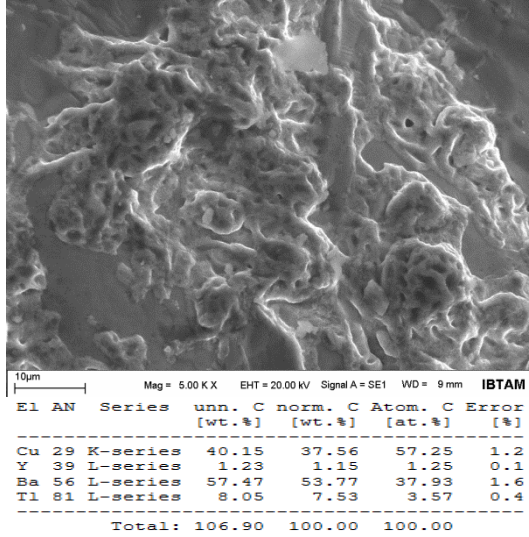
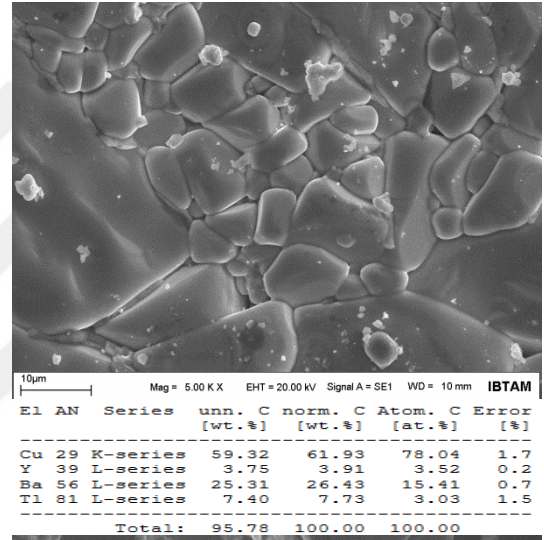
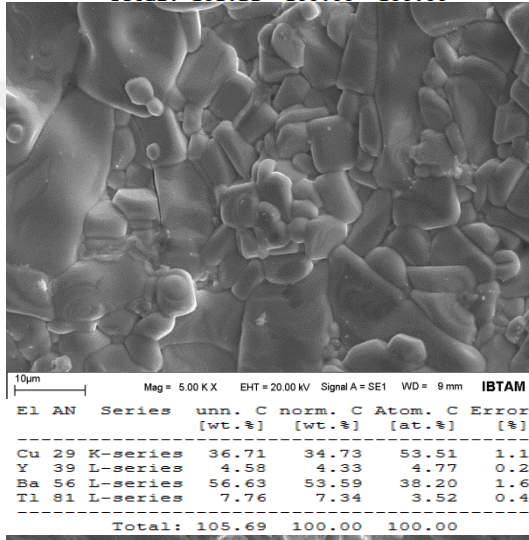
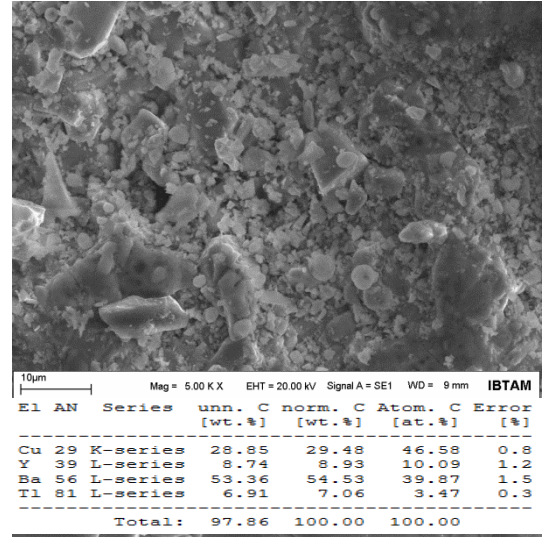
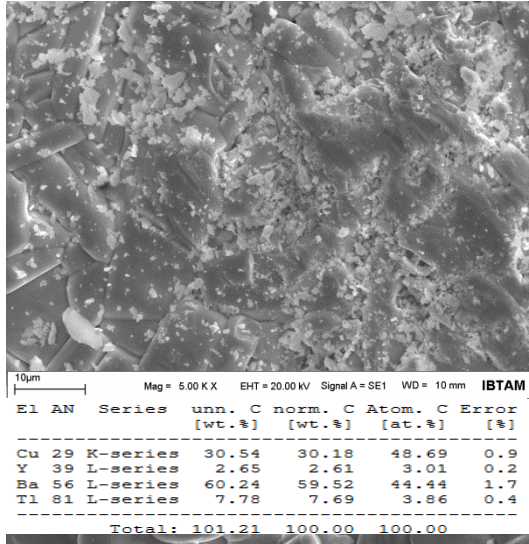
Talyum katkılı yapıların SEM'leri sıcaklık artışına bağlı olarak incelendiğinde; 0,05 talyum katkısı için; 1000 °C (± 2) °C/dak ısıtma hızlarında yapı tanecik şekildedir, 1000 °C (± 10) °C/dak ısıtma hızlarında tanecik yapılarda büyüme ve aralarındaki boşlukların azaldığı görülmektedir ve 1020 °C (± 10) °C/dak ısıtma hızlarında ise eriyik bölgelerde tanecik yapılar gözlenmektedir (Şekil 4.20-Şekil 4.23).

Talyum katkılı yapıların SEM'leri katkı oranına bağlı olarak incelendiğinde; 1000 °C (± 2), (± 10) °C/dak ve 1020 °C (± 10) sıcaklık değişiminde; 0,05 talyum katkısı için yapı tanecik şekilde, 0.1, 0.2 ve 0.3 talyum katkısında tanecik yapılarda büyüme ve düzlemselleşme görülmektedir.



Şekil 4.20. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin SEM görüntüleri

Şekil 4.21. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin SEM görüntüleri



Şekil 4.22. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin SEM görüntüleri

Şekil 4.23. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin SEM görüntüleri

4.3. Elektriksel Ölçümler (MR-T)

0 T, 2 T, 4 T, 6 T ve 8 T manyetik alan altında ve 900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C'de ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanan örneklerin direnç sıcaklık eğrileri Şekil 4.24- 4.38'de gösterilmiştir. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin dirençleri ve 0 T manyetik alanda başlangıç ve son kritik sıcaklıklarının sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi Çizelge 2.4 –2.6'da gösterilmiştir.

Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin ($\rho - T$) grafikleri incelendiğinde T_c kritik sıcaklığa kadar sıcaklık azaldığında tüm malzemelerin elektriksel direncinin lineer olarak azaldığı yani metalik özellik gösterdiği görülmektedir. Numunelerde T_c sıcaklığına ulaşıldığında direnç sıfıra aniden düşerek süperiletkenliğe geçiş olmuştur. $T_{c,\text{başlangıç}}$ ve $T_{c,\text{sıfır}}$ değerleri arasında kalan bölge geçiş bölgesidir. $\Delta T (= T_{c,\text{başlangıç}} - T_{c,\text{sıfır}})$. Kristal yapı ve faz oluşum kusurlarına bağlı olarak değişmektedir. Uygulanan alanla bu aralık artmaktadır. Tanecikler arasında zayıf bağlar ve tanecikler arasında safsızlıklar ΔT aralığının büyüklüğünü etkilemektedir. Ayrıca uygulanan manyetik alanın etkileri ile numunenin direncinin artması da bu durumun nedenlerindendir.

Çizelge 4.4. $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{O}_{7-\delta}$ malzemelerinin kritik sıcaklıkları ve öz dirençleri

Sinterleme sıcaklığı (°C)	$T_{c,\text{sıfır}}$ (K)	$T_{c,\text{başlangıç}}$ (K)	ΔT (K)	ρ (ohm.cm)
900 °C ± 2 °C/dak	72,2	89.8	17.6	0.4500
900 °C ± 5 °C/dak	90.2	92.2	2.0	0.0022
900 °C ± 10 °C/dak	81.2	90.8	9.6	0.4200
920 °C ± 2 °C/dak	90.3	92.7	2.4	0.0023
920 °C ± 5 °C/dak	81.2	90.8	9.6	0.2000
920 °C ± 10 °C/dak	81.2	90.8	9.6	0.0350
1000 °C ± 2 °C/dak	86.7	92.3	5.6	0.0070
1000 °C ± 5 °C/dak	90.3	92.7	2.5	0.0010
1000 °C ± 10 °C/dak	86.6	91.4	4.8	0.0150
1020 °C ± 2 °C/dak	88.4	91.6	3.2	0.0100
1020 °C ± 5 °C/dak	90.2	91.8	1.6	0.0050
1020 °C ± 10 °C/dak	85.6	90.4	4.8	0.0140

Çizelge 2.4'de verilenlere göre, örneklerin $T_{c,\text{başlangıç}}$ değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemektedir fakat bazı numunelerin $T_{c,\text{sıfır}}$ değerleri nispeten küçük

çıkmiştir. Özellikle 900 ve 920 °C’de üretilen numunelerde bu durum daha belirgin görülmektedir ve bu örneklerin ΔT ’leri ve dirençleri diğer örneklerle göre genelde daha büyüktür.

Çizelge 4.5. $(YBa_2Cu_{3-x}O_{7-\delta})_{1-x}(B_2O_3)_x$ malzemelerinin kritik sıcaklıkları ve öz dirençleri

x	Sinterleme sıcaklığı (°C)	$T_{c, \text{ sıfır}}$ (K)	$T_{c, \text{ başlangıç}}$ (K)	ΔT (K)	ρ (ohm.cm)
0.05	1000 °C ± 2 °C/dak	86.6	91.4	4.8	0.012
0.05	1000 °C ± 5 °C/dak	86.7	92.3	5.6	0.013
0.05	1000 °C ± 10 °C/dak	90.3	92.7	2.4	0.004
0.05	1020 °C ± 2 °C/dak	87.6	92.4	4.8	0.002
0.05	1020 °C ± 5 °C/dak	88.4	91.6	3.2	0.001
0.05	1020 °C ± 10 °C/dak	88.4	91.6	3.2	0.002
0.1	1000 °C ± 2 °C/dak	61.4	88.6	27.2	0.042
0.1	1000 °C ± 10 °C/dak	89.3	91.7	2.4	0.002
0.1	1020 °C ± 10 °C/dak	90.2	91.8	1.6	0.002
0.2	1000 °C ± 2 °C/dak	51.4	78.6	27.2	0.100
0.2	1000 °C ± 5 °C/dak	57.8	88.2	30.4	2.000
0.2	1000 °C ± 10 °C/dak	38.8	53.2	14.4	0.025
0.2	1020 °C ± 2 °C/dak	63.2	88.8	25.6	0.060
0.2	1020 °C ± 5 °C/dak	90.2	91.8	1.6	0.004
0.2	1020 °C ± 10 °C/dak	88.4	91.6	3.2	0.004
0.3	1000 °C ± 2 °C/dak	72.2	89.8	17.6	0.042
0.3	1000 °C ± 10 °C/dak	90.3	92.7	2.4	0.002
0.3	1020 °C ± 10 °C/dak	63.1	87.9	24.8	0.220

Çizelge 2.5’e göre, bor katkılı örneklerin $T_{c, \text{ başlangıç}}$ değerlerinde 0,2 katkı oranına kadar önemli bir değişiklik görülmemektedir. $X \geq 0,2$ için dalgalanmalar olmaktadır. $T_{c, \text{ sıfır}}$ ve ΔT değerlerinde ise 0,1 katkı oranında sonraki değerlerde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Genelde örneklerin direnç değerleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir fakat 0.2 ve 0.3 bor katkılı üç numunede normal durumda direnç değerlerinin daha büyük olduğu bulunmuştur.

Bor katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bileşiklerin grafikleri incelendiğinde ise 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 bor katkıda numuneler T_c değerine kadar soğutulduğunda metalik özellik gösterdiği görülmektedir. 0.4, 0.5, 0.6 bor katkılı numunelerde ise süperiletkenlik kaybolmaktadır (Şekil4.28-4.34).

Çizelge 2.6'ya göre talyum katkılı örneklerin $T_{c,sıfır}$, $T_{c,başlangıç}$, ΔT ve ρ değerleri arasında belirgin bir değişiklik görülmemektedir ancak 0.1 katkılı 1020 °C ± 10 sıcaklıkta üretilen örneğin $T_{c,sıfır}$ değeri diğerlerine göre daha küçüktür. Talyum katkılanması ile $T_{c,sıfır}$ değerlerinde artış görülmüştür. Talyum katkılı örneklerin direnç değerleri saf ve bor katkılı numunelere göre daha küçüktür.

Çizelge 4.6. $(YBa_2Cu_{3-x}O_{7-\delta})_{1-x}(Tl_2O_3)_x$ malzemelerinin kritik sıcaklıkları ve öz dirençleri

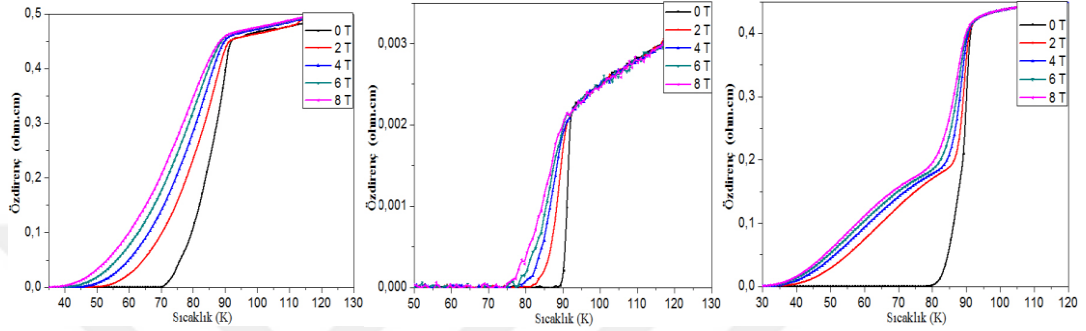
x	Sinterleme sıcaklığı (°C)	$T_{c, sıfır}$ (K)	$T_{c, başlangıç}$ (K)	ΔT (K)	ρ (ohm.cm)
0.05	1000 °C ± 2 °C/dak	86.7	92.3	5.6	0.0020
0.05	1000 °C ± 10 °C/dak	80.2	89.8	9.6	0.0540
0.1	1000 °C ± 2 °C/dak	86.6	91.4	4.8	0.0010
0.1	1000 °C ± 10 °C/dak	86.6	91.4	4.8	0.0010
0.2	1000 °C ± 2 °C/dak	86.7	92.3	5.6	0.0007
0.2	1000 °C ± 10 °C/dak	88.4	91.6	3.2	0.0010
0.3	1000 °C ± 2 °C/dak	88.4	91.6	3.2	0.0009
0.3	1000 °C ± 10 °C/dak	88.5	92.5	4.0	0.0012

Talyum katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bileşiklerin grafikleri incelendiğinde ise $T_{c,başlangıç}$ değerine kadar direnç sıcaklıkla lineer olarak azaldığı için örnek metalik özellik göstermektedir.

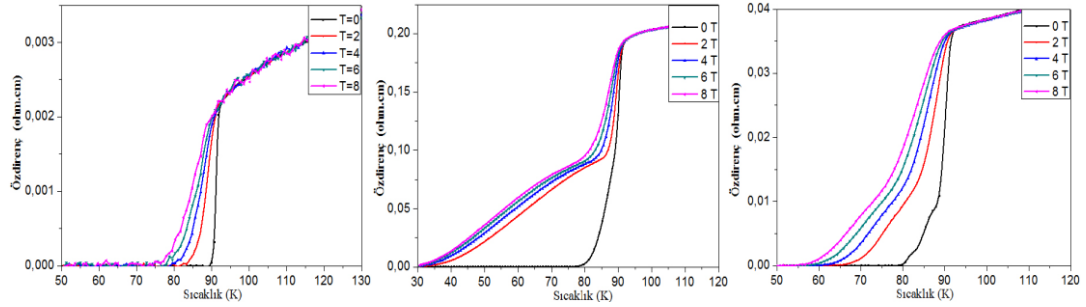
Talyum katkılı örneklerde katkılama ile $T_{c,başlangıç}$ 'ın etkilenmesinin çok düşük olması, kristal yapı kusurlarının boşluk, çatlak ve tanecik kusurlardan kaynaklı olduğunu gösterebilir. $T_{c,sıfır}$ değerinde meydana gelen artış ise süperiletken numunede taneciklerin birbirine daha sıkı bağlandığını göstermektedir. Normal durumda numunenin tamamında bulunan manyetik alan süperiletkenliğe geçişle birlikte Meissner etkisinin sonucu olarak yapıda dışlanır. Bu olayın gerçekleşmesi için numunenin dış yüzeyinde akım oluşur ve bu akım dış manyetik alana zıt yönde ve eşit büyüklükte bir manyetik alan oluşturur. Uygulanan manyetik alan arttıkça yüzey akımında aynı oranda artar. Vorteksin ilk oluşmasından itibaren manyetik alan artırıldığında vortekslerin sayısı artarak genişliği azalır ve belli bir değerde sabit kalır. Bu değerden sonra manyetik alan arttırılmaya devam ettiğinde vorteksler gevşeyerek numunenin her tarafına yayılır ve süperiletkenlik kaybolur. Malzemede akacak akımla (J_c), sıcaklıkla ters bir ilişkisi olduğundan uygulanan manyetik alanın

artması $T_{c.sifir}$ değeri düşüşe yol açar. Bu nedenle 0 T'dan 8 T'ya manyetik alanı arttırdığımızda $T_{c.sifir}$ değeri azalma gözlenmiştir (Şekil.4.35-4.38).

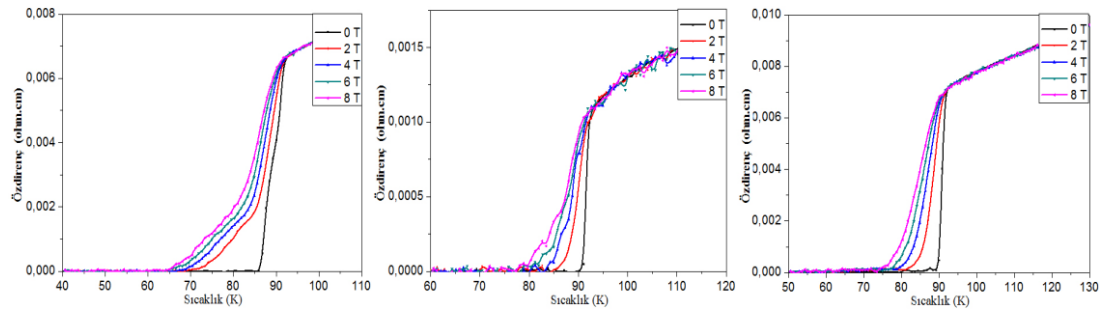
Kritik sıcaklığın katkılamayla değişimi incelendiğinde katkılamanın $T_{c.baslangic}$ değerlerini olumsuz etkilemediği görülmektedir. Bu durum katkılamanın yapıya zarar vermediğini gösterir. Bu durum XRD desenleri ve SEM/EDS ile uyum içindedir.



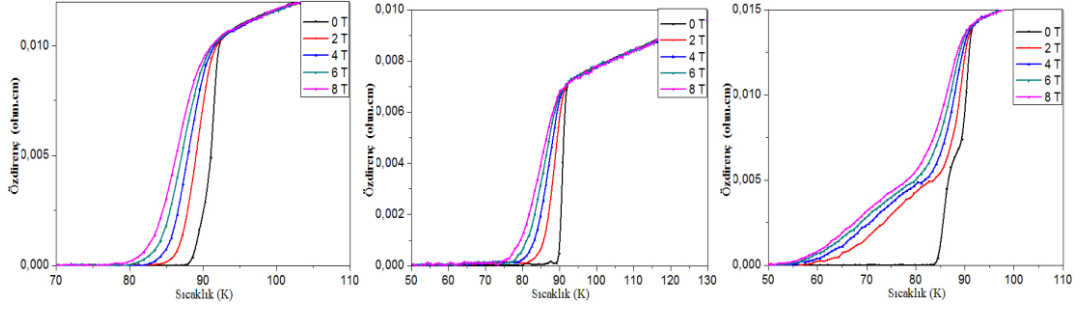
Şekil 4.24. 900 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



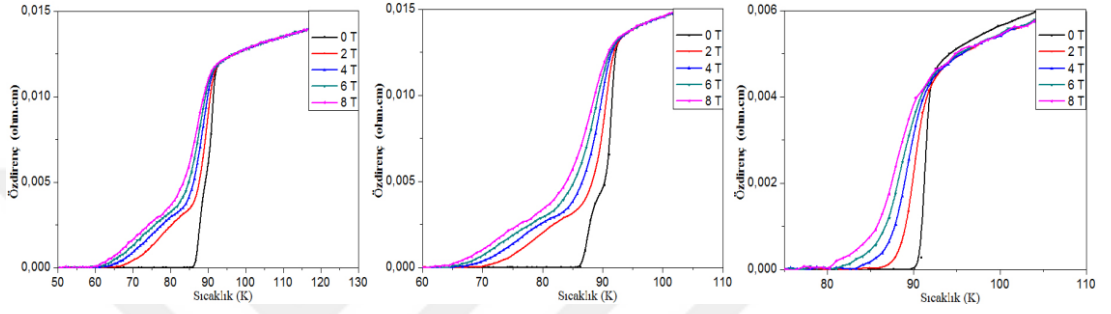
Şekil 4.25. 920 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



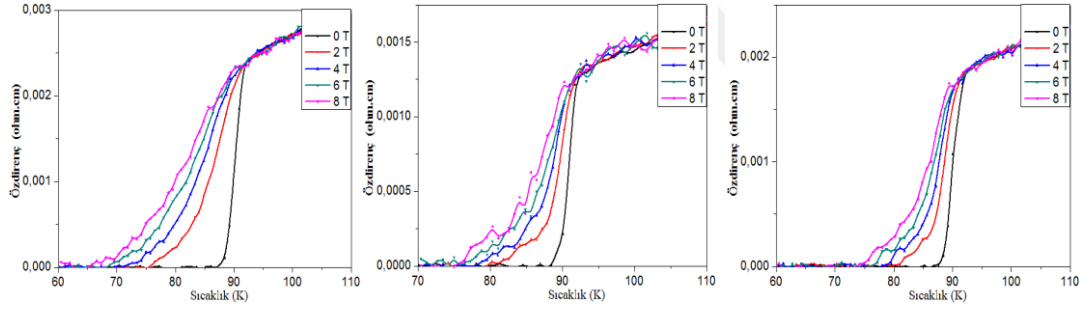
Şekil 4.26. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



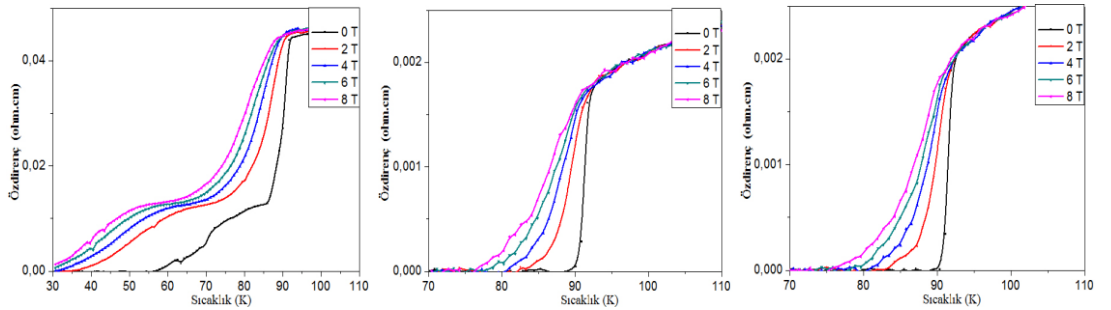
Şekil 4.27. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



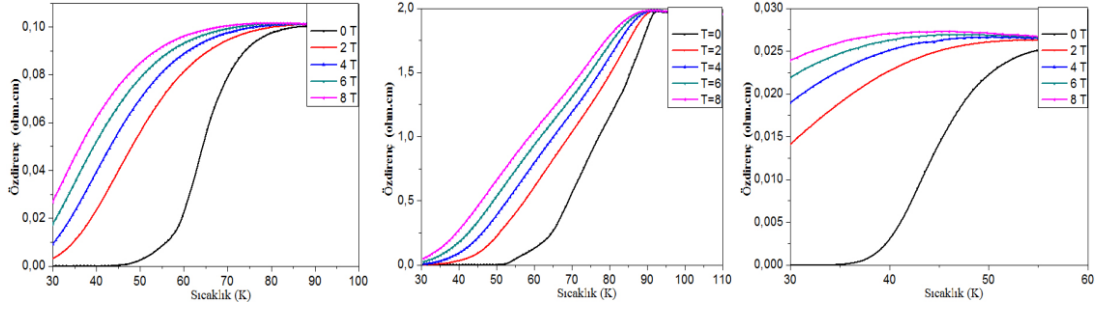
Şekil 4.28. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



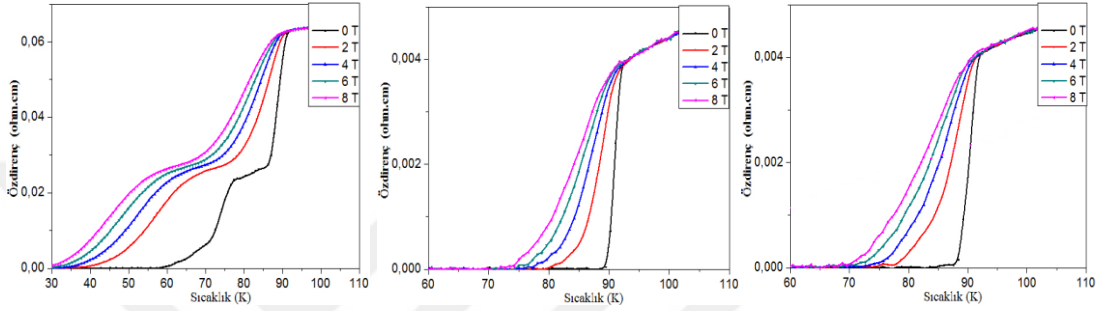
Şekil 4.29. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



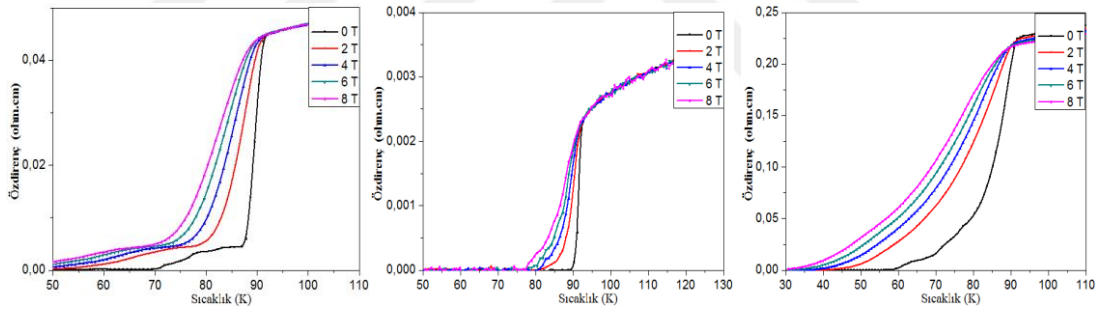
Şekil 4.30. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



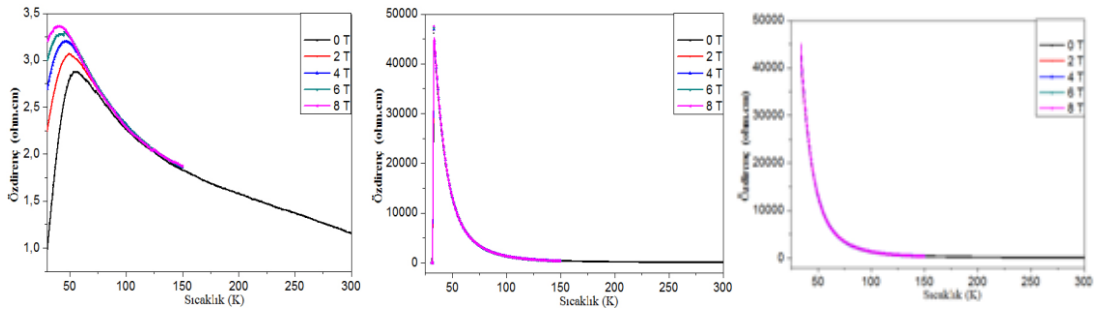
Şekil 4.31. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



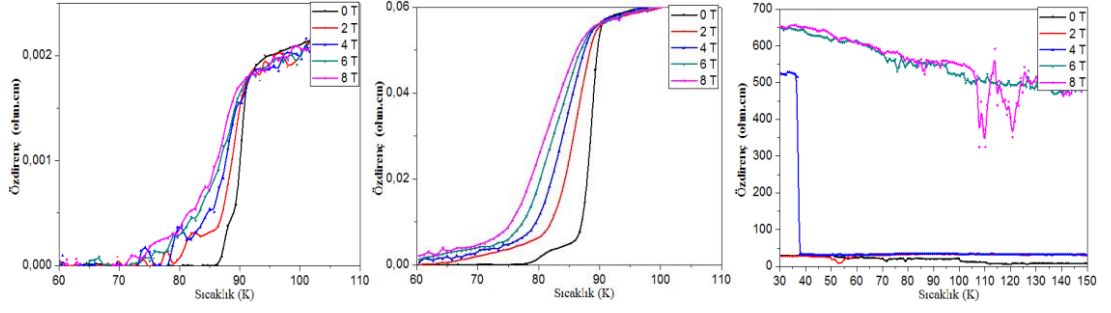
Şekil 4.32. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



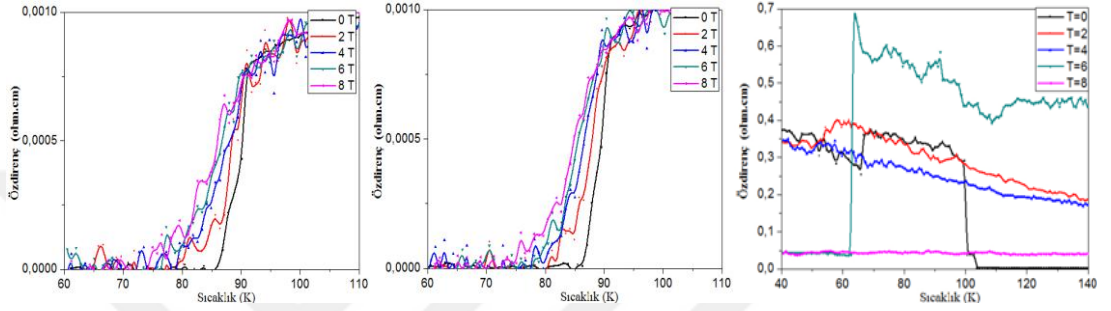
Şekil 4.33. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



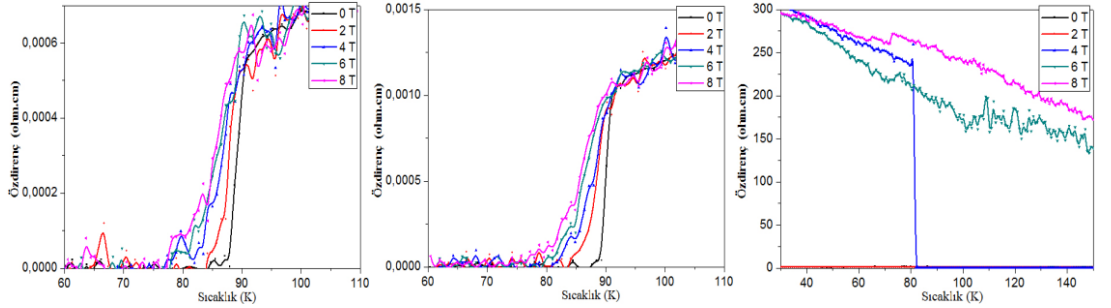
Şekil 4.34. 1000 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



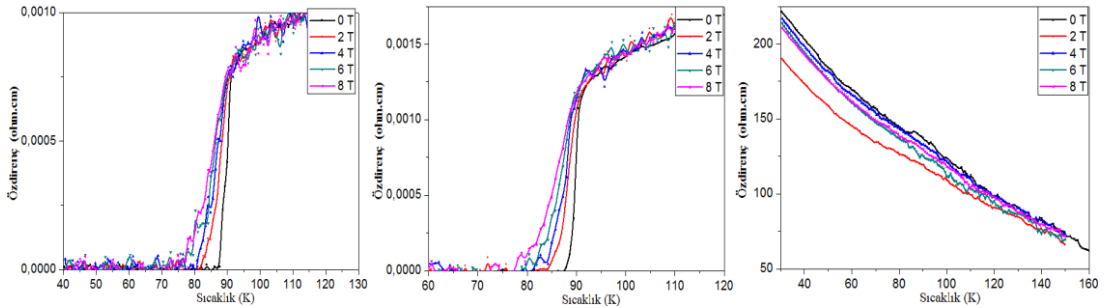
Şekil 4.35. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



Şekil 4.36. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



Şekil 4.37. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri



Şekil 4.38. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin MR-T eğrileri

4.4. Manyetik Moment-Sıcaklık Ölçümleri (M-T)

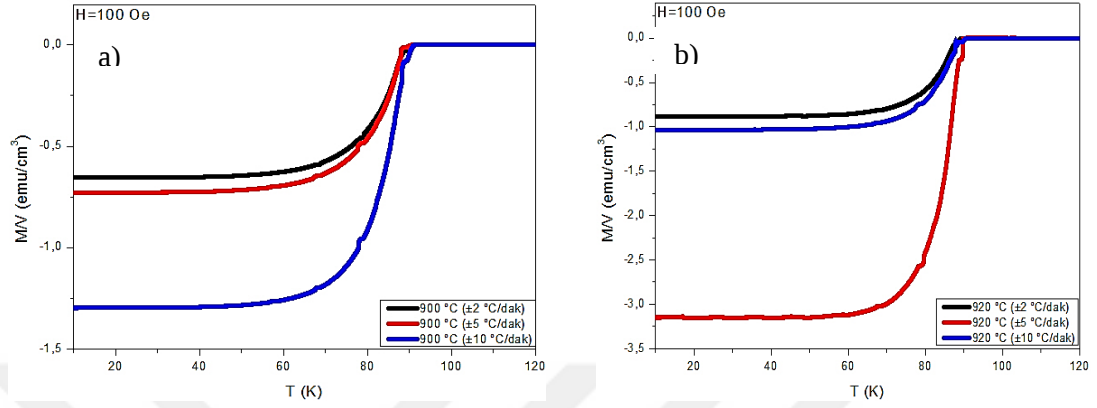
100 Oe alan altında saf, bor ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, bileşiklerinin sıcaklığa bağlı manyetik moment grafikleri 900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C’de ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak hızlarda ısıtılma işlemi gören numuneler için Şekil 4.39 – 4.46’da gösterilmiştir.

Örneklerin M-T değişim grafikleri incelendiğinde; saf, bor katkılı ($x=0.05$, 0.1) ve talyum katkılı ($x=0.05$, 0.1, 0.2 ve 0.3) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ’da sıcaklık T_c kritik sıcaklığına kadar azaltılırken manyetizasyon sabit kalmakta ve T_c değerinden sonra numunede aniden negatif manyetizasyon oluşturmaktadır. Bu manyetizasyon sıcaklığın azalması ile negatif yönde artmakta ve belli bir değerden sonra sabit kalmaktadır. Bu durum yapıda kristal kusurun fazla olmadığını göstermektedir. Bor oranı 0.1 olduğunda ve sıcaklık T_c kritik sıcaklığın altına düşürüldüğünde çift geçişli manyetik moment oluşmaktadır. Bunun nedeni bor tanecikleri küçük boyutta oldukları için kristal yapı arasına girerek kristal yapı bütünlüğünü ve tanecikler arasındaki yapı bütünlüğünü bozması olabilir. Bor oranı 0.2 ve 0.3 olduğunda sıcaklık T_c kritik sıcaklığına kadar azaltılırken manyetizasyon pozitif yönde artmakta ve T_c değerinden sonra numune diamanyetik davranış göstererek aniden negatif yönde manyetizasyon oluşturmaktadır. Bu manyetizasyon sıcaklığın azalması ile negatif yönde artmakta ve belli bir değerden sonra tekrar kristal kusur fazla olduğu için pozitif yönde manyetizasyon artmaktadır yani düzlük oluşmamaktadır. Bor katkı oranı 0.4, 0.5 ve 0.6 olduğunda negatif yönde manyetizasyon oluşmamaktadır (Şekil 4.39 – Şekil 5.46).

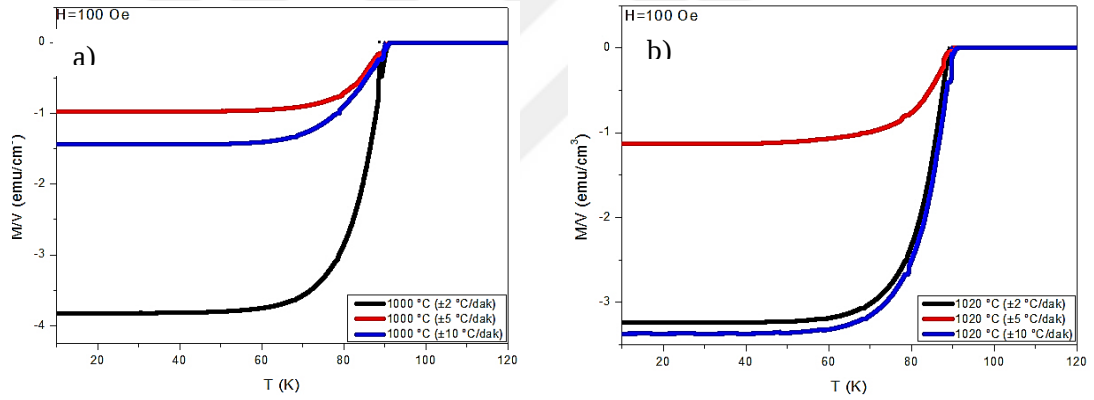
Bor katkılı örneklerin manyetik momentleri katkı oranlarının artmasına bağlı olarak azalmaktadır. Talyum katkılı örneklerde ise katkı oranının artmasıyla manyetik moment değerlerinde artma olmaktadır. (Şekil 4.45 – Şekil 4.46).

Bor katkılı örneklerin katkı oranı arttıkça manyetik moment-sıcaklık grafiklerin eğimi azalmaktadır ve 0.3 bor katkıda kritik sıcaklıkları 90 K’den 30 K’e düşmüştür. 1000 °C’de Talyum katkılı örneklerin katkı oranına bağlı olarak manyetik moment-sıcaklık grafiklerin eğimi değişmemekte sabit kalmaktadır. 1000 °C’de saf örneklerin ve talyum katkılı örneklerin grafik eğimleri arasında belirgin bir fark yoktur. Talyum katkılı numunelerin 1020 °C’deki grafiklerinin eğimi 1000 °C’ye göre fazladır (Şekil 4.45 – 4.46).

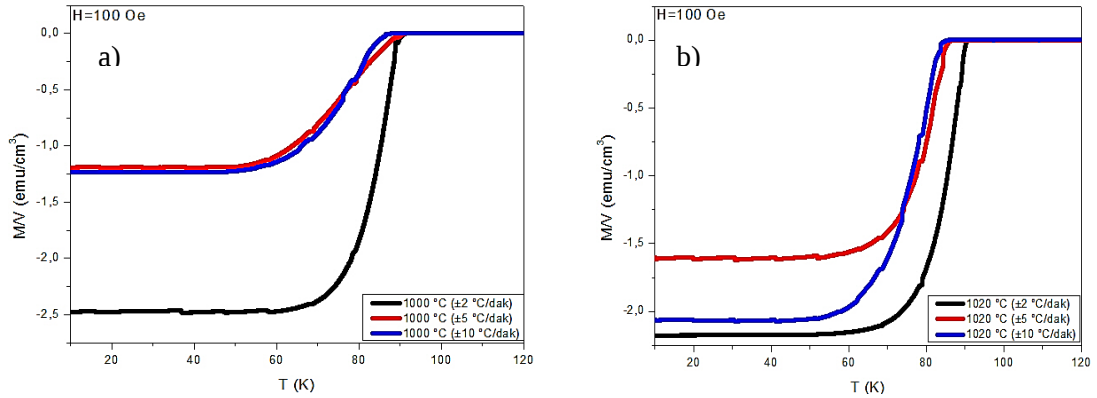
Saf ve bor katkılı YBCO numuneleri için manyetik moment etkilerinin en büyük değeri 1000 °C'de (± 2 °C/dak) sıcaklıkta elde edilirken, talyum katkılı YBCO için ise 1000 °C'de (± 10 °C /dak) sinterleme sıcaklıkta üretilen numunelerde elde edilmiştir.



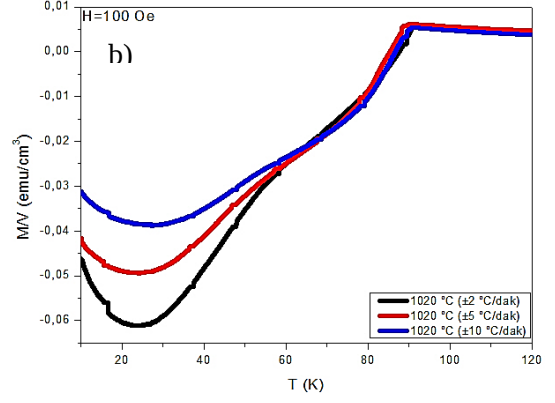
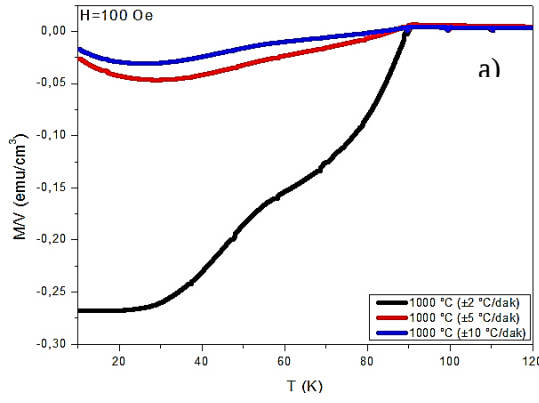
Şekil 4.39. a) 900 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak. **b)** 920 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-T eğrileri



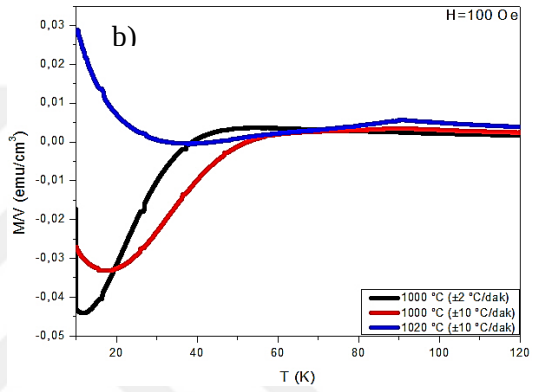
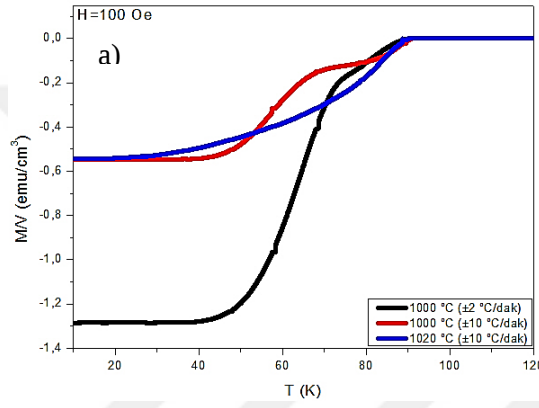
Şekil 4.40. a) 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak. **b)** 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-T eğrileri



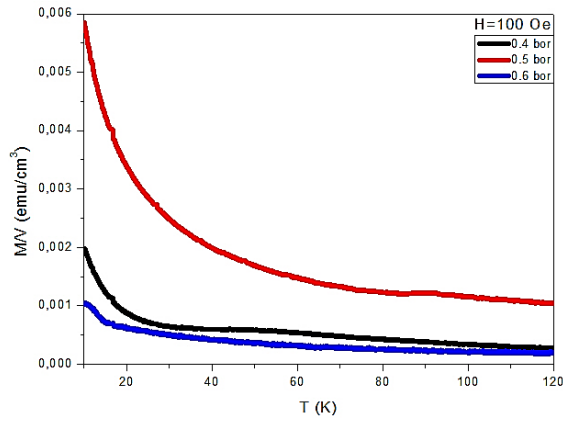
Şekil 4.41. a) 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak. **b)** 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-T eğrileri



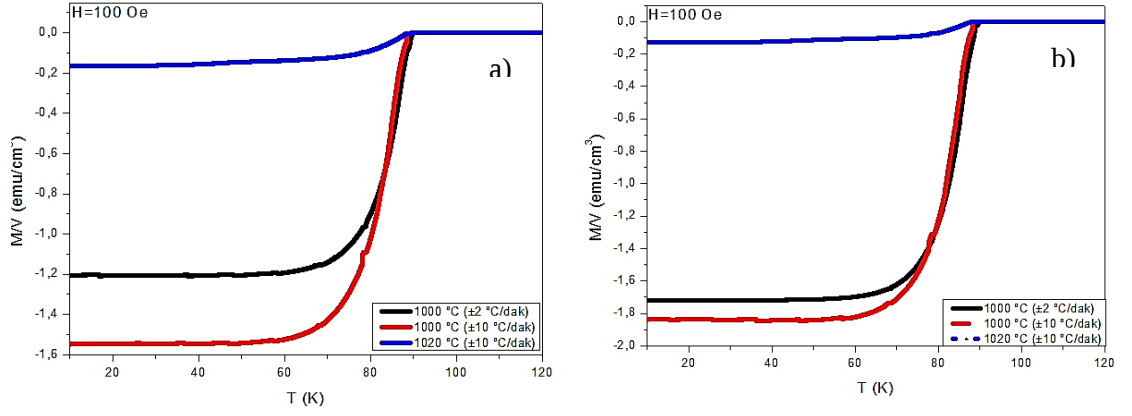
Şekil 4.42. a) 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak. **b)** 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-T eğrileri



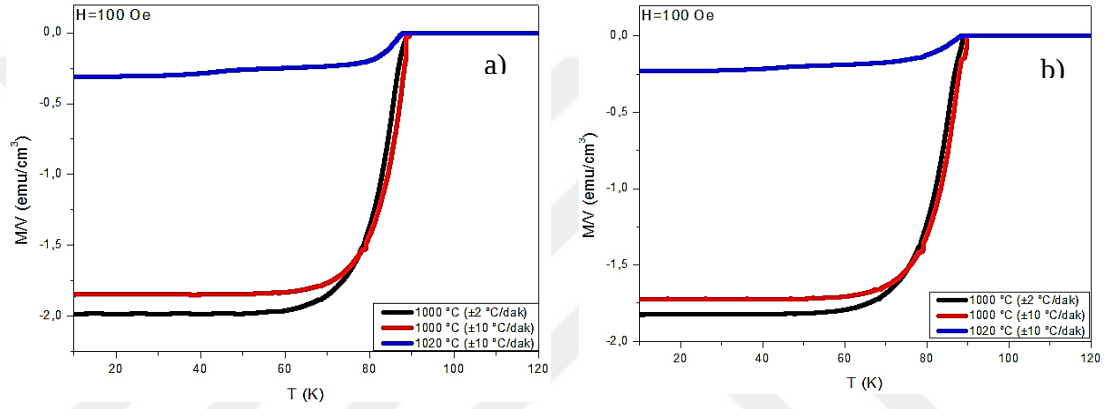
Şekil 4.43. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış a) 0.1 Tl b) 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri



Şekil 4.44. 1000 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-T eğrileri



Şekil 4.45. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış **a)** 0.05 Tl **b)** 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri



Şekil 4.46. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış **a)** 0.2 Tl **b)** 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinin M-T eğrileri

4.5. Manyetik Alan-Manyetizasyon Ölçümleri (M-H)

Süperiletken numunelerde manyetik alan uygulandığında numunede yüzey akımları oluşur ve manyetik alan dışlanır. İkinci tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alan H_{c1} değerine kadar manyetik alan dışlanır ve numune uygulanan alana ters yönde manyetizasyon gösterir. Uygulanan alan alt kritik manyetik alana kadar arttırıldığında ters yönde manyetizasyonda artar. Uygulanan alan alt kritik alanı geçtiğinde ise manyetik alan numune içerisine akı tüpleri şeklinde girer ve ters yöndeki manyetizasyon azalır. Uygulanan alan üst kritik alan H_{c2} değerine geldiğinde ise ters yönde manyetizasyon sıfır olur. Uygulanan alan azaldığında akı çizgisi tersinir özellik göstererek uygulanan alana ters yönde oluşan manyetizasyon bu defa pozitif yönde değişir. Dış manyetik alan H_{c1} değerine geldiğine değerler tersinir olmaktan çıkar ve dış manyetik alan çok küçük bir oranda da olsa numunenin içine sızmaya başlar. Ancak güçlü bir çivileme etkisinin bir sonucu olarak M-H

grafiğinde fark edilebilecek bir değişim uygulanan alanın vortekslerin erimeye başladığı manyetik alan (H_p) değerine gelmesiyle gerçekleşir. H_p değerinde artık numunede yüzey akımlarının meydana getirdiği zıt manyetik alan dolayısıyla diamanyetizma en büyük değerine gelmiştir ve bundan sonra manyetizasyon azalmaya başlar. Numunenin bu noktada gösterdiği diamanyetizmanın seviyesi numunedeki süperiletkenlik özelliğinin önemli bir göstergesini oluşturur. Uygulanan manyetik alanın H_p değerini geçmesiyle birlikte malzemedeki süperiletken bölgenin hacmi küçülür ve küçük hacimdeki bölgenin oluşturduğu diamanyetik seviye hızla azalır. Uygulanan alan üst kritik manyetik alan (H_{c2}) değerine geldiğinde girdaplar genişleyerek numune normal faza döner. Bu nokta doyum noktası olarak adlandırılır ve bu noktanın değeri süperiletkenlik özelliğinin önemli parametrelerinden biridir.

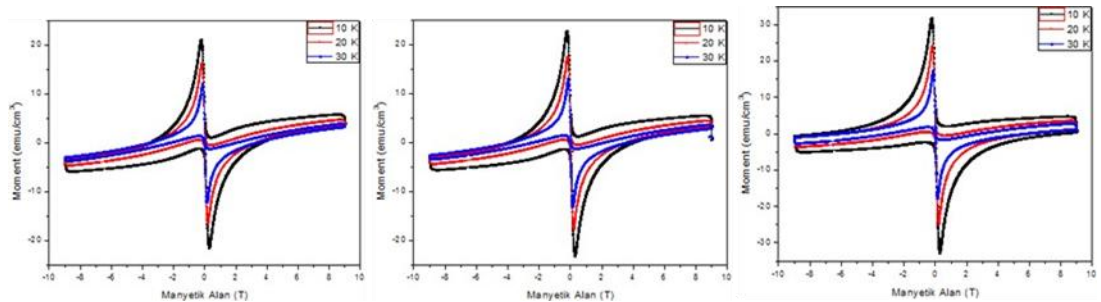
Manyetik alan sıfıra düşürüldüğünde ise numune içerisinde bir miktar akı tuzaklanacağı için manyetizasyon-manyetik alannın eğrisi tersinmez bir davranış göstererek histerisiz bir durum oluşturduğu görülür. Bu histerisiz durumun sebebi numunede yer alan homojen olmayan mikro yapı ve yapısal kusurların (örgü kusurları, dislokasyonlar, tane sınırları) oluşturduğu numune süperiletken durumda iken normal bölgeler gibi davranan akı çivileme merkezleridir. Bu çivileme merkezleri akı tüplerinin bu merkezlerde tutulmasını sağlayarak akı tüplerinin hareket etmesini engeller. Numune içinde akı tüplerinin sabit kalması ve bundan dolayı herhangi bir direnç oluşmaması anlamına gelir ki bu durumda da kritik akım yoğunluğu yüksek olmaktadır.

900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C’de ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak hızlarda hazırlanan Saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 0.5 ve 0.6 bor katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ve 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 talyum katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ’nun 10 K, 20 K ve 30 K sıcaklıklarda uygulan alana bağlı olarak manyetizasyon ölçümleri yapıldı. Şekil 4.47 – Şekil 4.61’de manyetik alana bağlı olarak manyetizasyon değişimi verilmiştir. Ölçülen veriler numunenin hacmine bölünerek birim hacimde dış manyetik alana bağlı olarak manyetizasyonun değişimi incelenmiştir. Saf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunelerinin grafikler karşılaştırıldığında 1000 °C ± 2 °C/dak’da üretilen numunede, histerisiz eğrisinin en geniş olduğu görülmektedir. Histerisiz eğrisinin oluşma nedeni vortekslerin bağlanma kuvvetidir. Bor katkılı numunede ise 0.05 katkı oranı, 1000 °C ± 2 °C/dak sıcaklıkta histerisiz eğrisi en geniştir ve talyum katkılı numunede ise 0.3 katkı oranı, 1000 °C ± 10 °C/dak sıcaklıkta histerisiz eğrisi

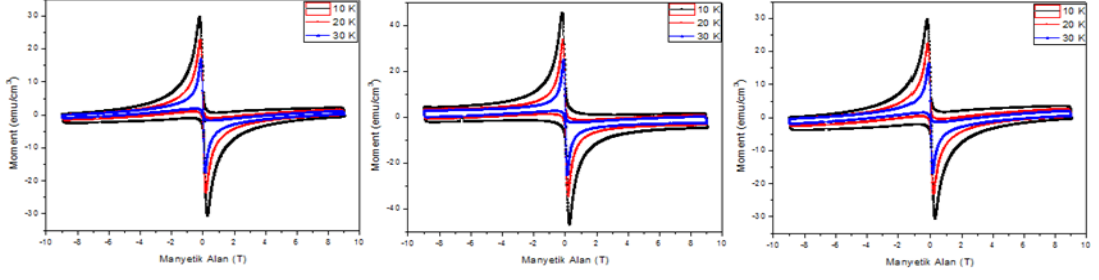
en geniştir. Bor katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça histerisiz eğrisinin genişliği azalmakta. Bor katkısı arttıkça ($x > 0.2$) diamanyetik özellikten paramanyetik özelliğe geçiş olmuştur. Talyum katkılı numunelerde ise tüm numuneler diyamanyetik özellik göstermektedir. Talyum katkı oranı arttığında histerisiz eğrisinin genişliği artmakta ve 0.3 katkı oranında en büyük değeri almaktadır. Fakat 1020 °C’de talyum katkı oranına bağlı olarak histerisiz eğrisinin genişliğinde düzenli artış yada azalış olmamaktadır. 1000 °C’de talyum katkı oranının manyetizasyonu arttırdığı fakat borun bütün sıcaklıklarda manyetizasyonu azalttığı açıktır. Numunede oluşan histerisiz eğrisi manyetik akı çivilemesinden kaynaklanmaktadır [95]. Manyetizasyon eğrisinin genişliği mıknatıslanma değerini ve taşıyabileceği en yüksek akım miktarını gösterir. Bu durumda katkılama miktarı arttırıldığında talyumun vortekslerin bağlanma kuvvetini arttırdığı, borun ise azalttığını söyleyebiliriz (Şekil 4.47– 4.61).

Manyetik alan sıfırdan başlayarak pozitif yönde arttırıldığında negatif yönde manyetizasyon belli bir değere kadar artıp aniden azalışa geçerek pik oluşturmuştur. Piki durumu numunenin homojenliği hakkında bilgi verir. Piki $H = 0$ ’da oluşması numunelerin homojen yapıya sahip olduğunu gösterir. Bizim numunelerde $H = 0$ ’da oluştuğu için numunelerin homojen olduğunu söyleyebiliriz (Şekil 4.47–Şekil 4.61).

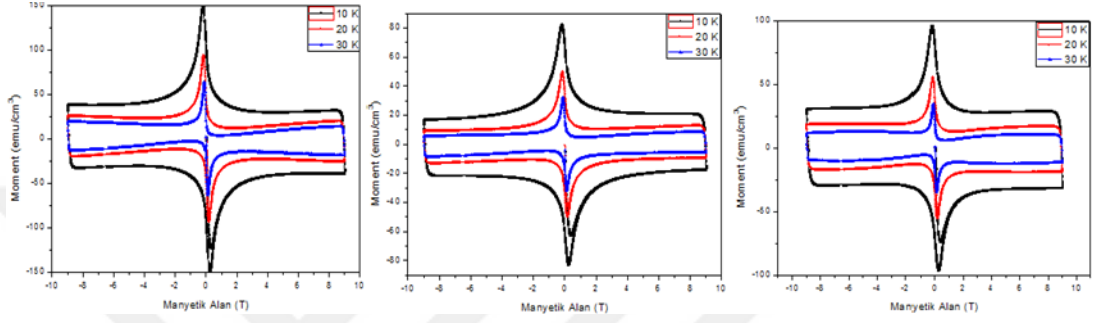
Histerisiz eğrilerinde gözlenen diğer bir özellik ise sıcaklık azaldıkça ilmekler arasındaki kalan alanın artmasıdır. İlmekler arasındaki alanın artma sebebi sıcaklık azaldıkça akı tüplerinin denge konumu etrafında titreşim hareketlerinin azalmasını ve kritik akım yoğunluğunun (j_c) artmasını söyleyebiliriz (Şekil 4.47– 4.61).



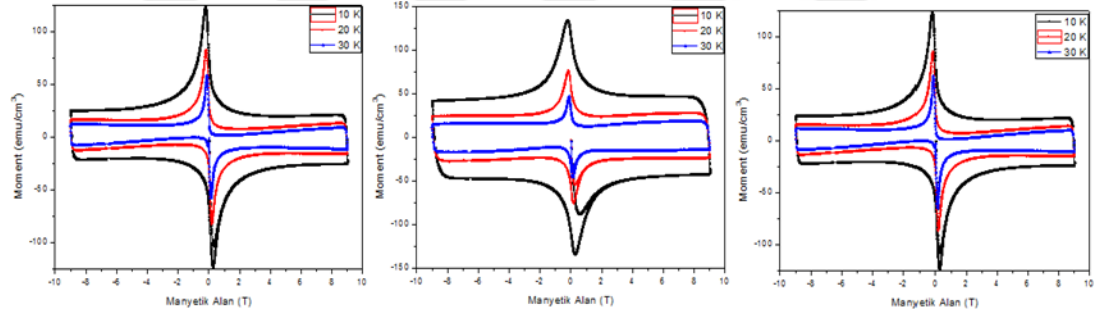
Şekil 4.47. 900 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



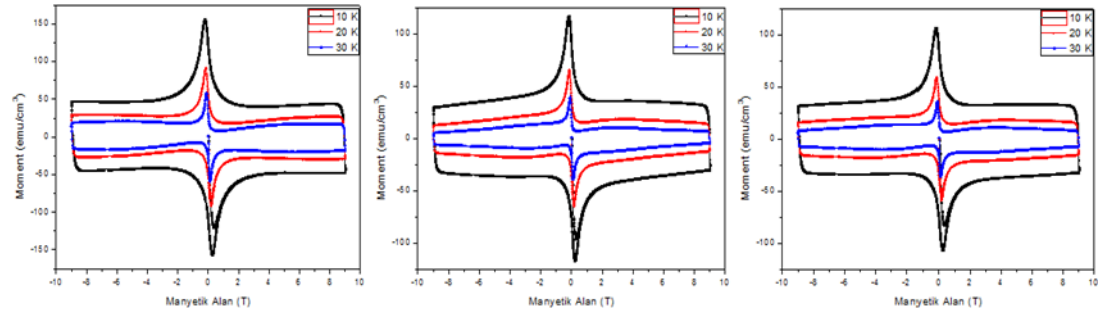
Şekil 4.48. 920 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



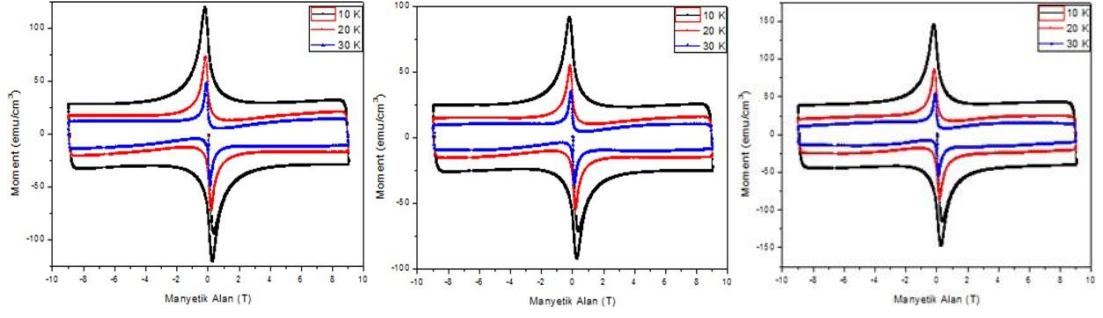
Şekil 4.49. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



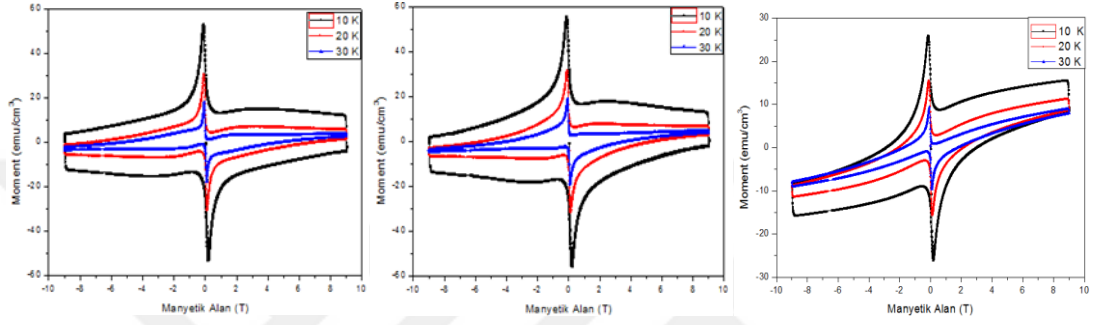
Şekil 4.50. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



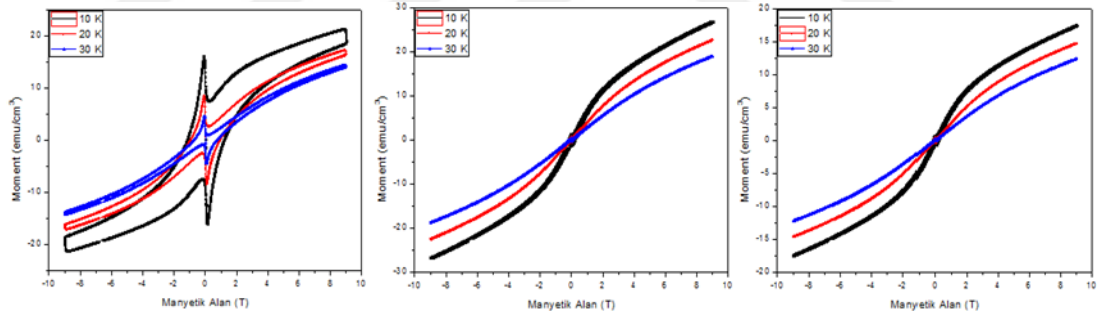
Şekil 4.51. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



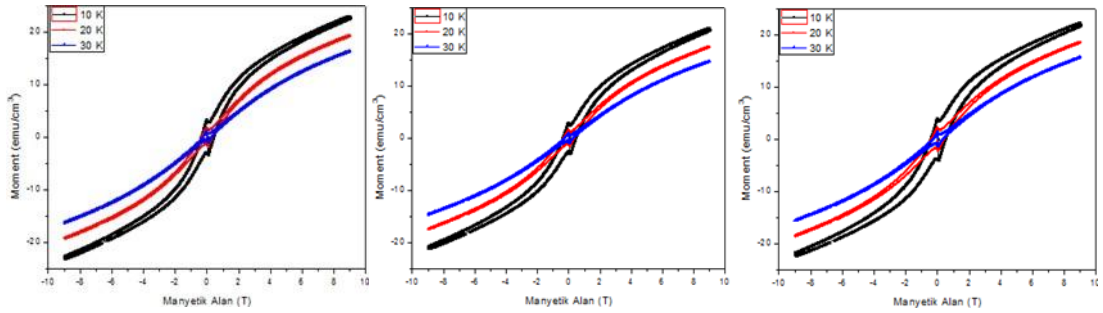
Şekil 4.52. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



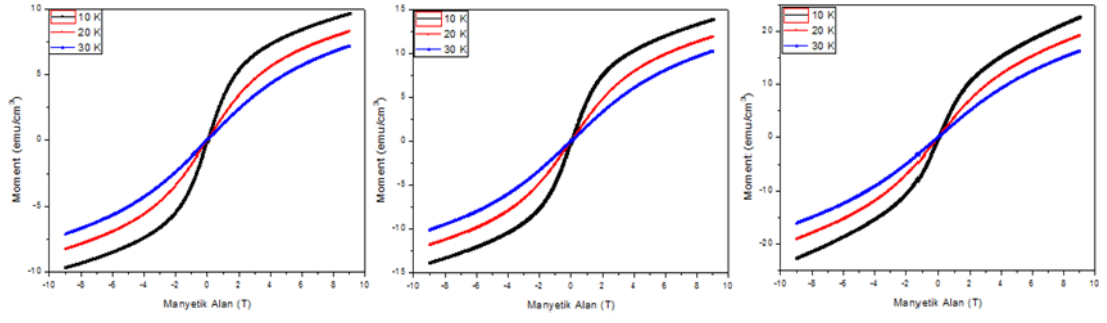
Şekil 4.53. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



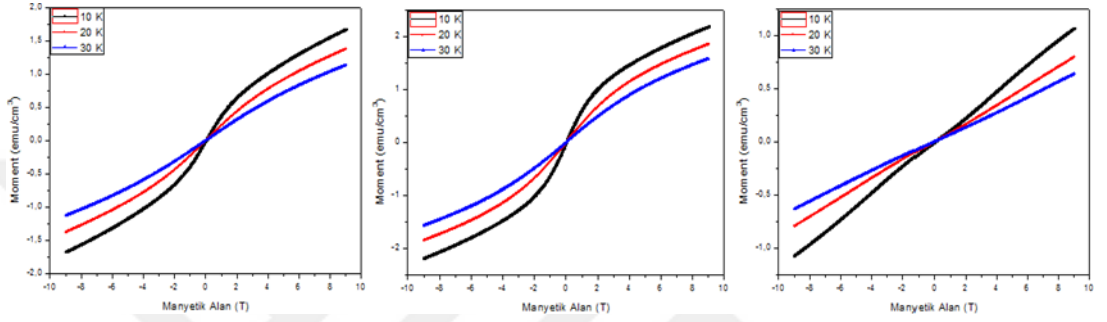
Şekil 4.54. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



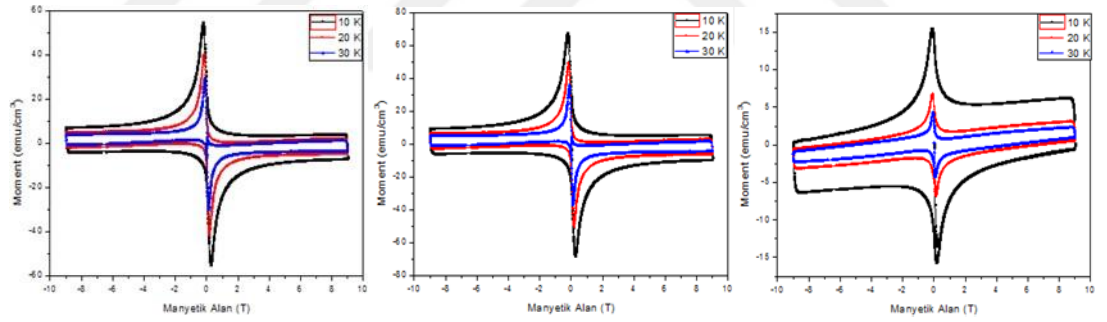
Şekil 4.55. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



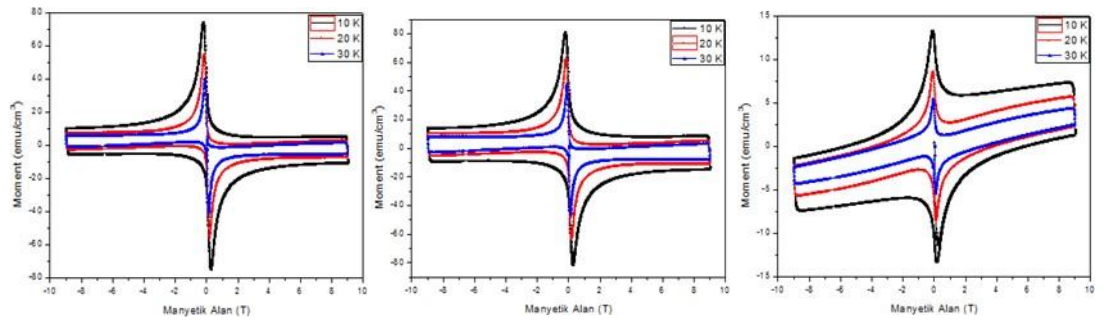
Şekil 4.56. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri



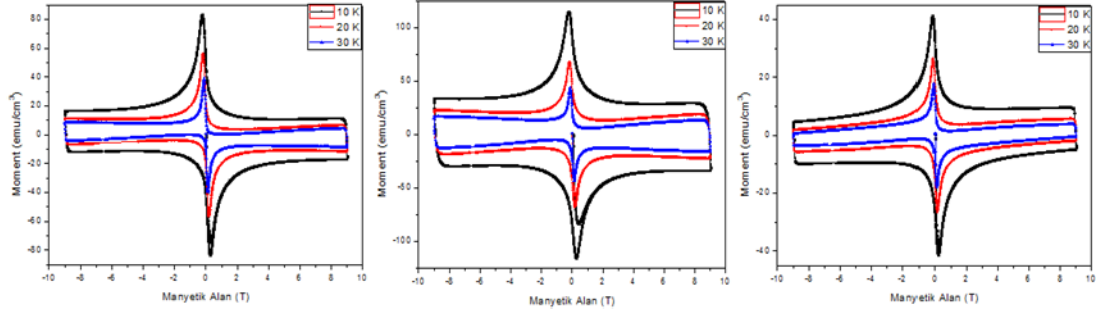
Şekil 4.57. 1000 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.4, 0.5 ve 0.6 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri



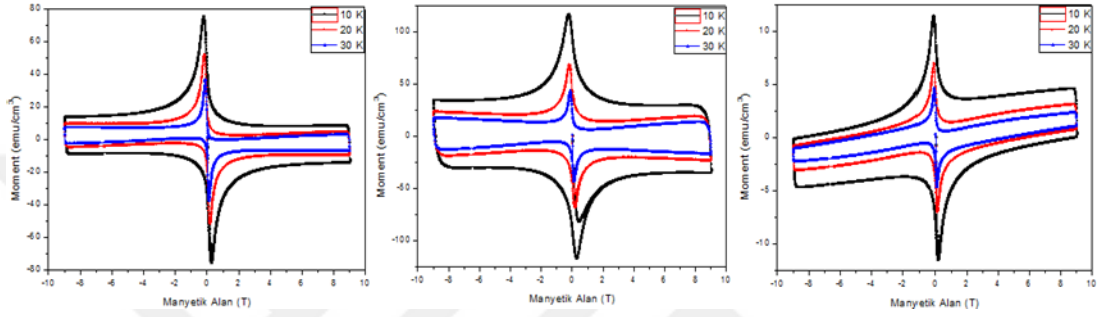
Şekil 4.58. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 Talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri



Şekil 4.59. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin M-H eğrileri



Şekil 4.60. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri



Şekil 4.61. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin M-H eğrileri

4.6. Kritik Akım yoğunluğu Hesaplamaları (J_c -H)

900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C’de ±2 °C/dak, ±5 °C/dak ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanan Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 0.5 ve 0.6 bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ve 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ’nun 10 K, 20 K ve 30 K sıcaklıklarda elde edilen M-H eğrileri kullanılarak dikdörtgenler prizması şekline getirilen numunelerin kritik akım yoğunlukları denklem 4.1’de verilen Bean formülü ile hesaplandı:

$$j_c^{mag} = \frac{20\Delta M}{a\left(1-\frac{a}{3b}\right)} \quad (4.1)$$

$\Delta M = M_+ - M_-$ dir ve buradaki M_+ histersiz eğrilerindeki pozitif manyetizasyon değeri, M_- ise histerisiz eğrisindeki negatif manyetizasyon değeridir. a ve b ($b>a$) ise numunelerin boyutlarıdır.

Çizelge 4.7’de verilenlere göre, saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ süperiletkenlerde kritik akım yoğunluğu 1000 °C ve 1020 °C için 900 °C ve 920 °C için elde edilen değerlere göre daha büyük elde edilmiştir. 10 K sıcaklıkta ölçülen M-H verilerine göre saf numuneler içinde 1000 °C ±2 °C/dak sıcaklıkta üretilen Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

numunesinin kritik akım yoğunluğunun en büyük olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin kritik akım yoğunluğu

Sinterleme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	T = 10 K	T = 20 K	T = 30 K
	$j_c^{mag}(\frac{A}{cm^2})$	$j_c^{mag}(\frac{A}{cm^2})$	$j_c^{mag}(\frac{A}{cm^2})$
900 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	2.0×10^4	1.5×10^4	1.0×10^4
900 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C/dak}$	2.5×10^4	1.7×10^4	1.2×10^4
900 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	3.0×10^4	2.3×10^4	1.6×10^4
920 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	3.0×10^4	2.3×10^4	1.7×10^4
920 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C/dak}$	7.8×10^4	6.0×10^4	4.4×10^4
920 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	3.2×10^4	2.2×10^4	1.5×10^4
1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	1.4×10^5	1.0×10^5	7.0×10^4
1000 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C/dak}$	7.8×10^4	5.5×10^4	3.8×10^4
1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	8.5×10^4	5.8×10^4	4.0×10^4
1020 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	8.0×10^4	6.2×10^4	4.5×10^4
1020 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C/dak}$	8.4×10^4	5.0×10^4	3.2×10^4
1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	1.1×10^5	8.0×10^4	6.2×10^4

Çizelge 4.8’de verilenlere göre, 0.05 oranında bor katkılı olduğunda kritik akım yoğunluğu saf duruma göre daha büyük olurken katkılama arttığında kritik akım yoğunluğu azalmaktadır. 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 oranlarda bor katkılı olduğunda ise kritik akım yoğunluğu elde edilememiştir.

Kritik akım yoğunluğu numunenin birim yüzeyinde süperiletkenliğin bozulmadan taşınabileceği akım miktarıdır. Saf, bor ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerinin kritik akım yoğunluğunun uygulanan alana bağlı olarak değişimini veren grafikler Şekil 4.62 – 4.74’de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, uygulanan manyetik alan 0 T’den başlayarak pozitif yönde artırıldığında kritik akım yoğunluğu belli bir değere kadar hızla artmakta ve aniden düşüşe geçerek zamanla düşüş hızı yavaşlamaktadır. Kritik akımın manyetik alanla hızla yükselmesi yapının homojen olduğunu gösterir. İlk durumda vortekslerin çekirdek yarıçapları azalarak birbirine uyguladıkları itme kuvveti azalır, sayıları artmakta ve belli değerde sabit kalıp birbirini harekete zorlamaktadır. Bu durumda bağlanma kuvveti artarak kritik akım yoğunluğu azalmaktadır. Kritik akımın azalma hızı vortekslerin bağlanma kuvvetlerinin büyüklüğünü gösterir. Bağlanma kuvveti büyük olan numunelerde kritik akımın azalma hızı diğer numunelere göre daha yavaş olmaktadır.

Çizelge 4.8. B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin kritik akım yoğunluğu

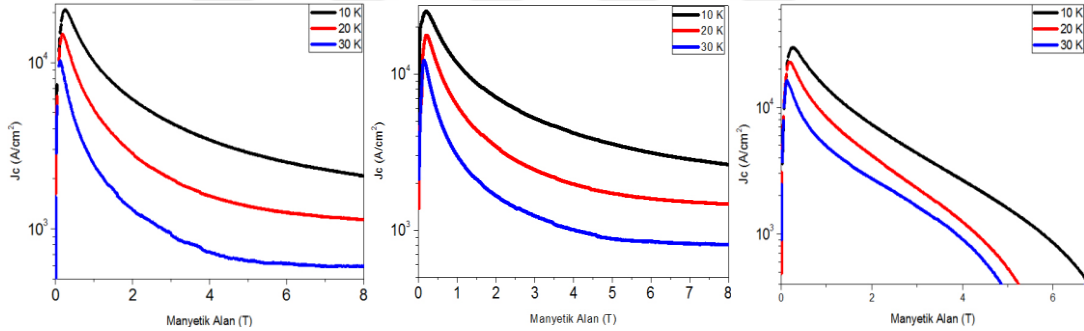
Bor katkı oranı	Sinterleme sıcaklığı (°C)	T = 10 K	T = 20 K	T = 30 K
		$j_c^{mag}(\frac{A}{cm^2})$	$j_c^{mag}(\frac{A}{cm^2})$	$j_c^{mag}(\frac{A}{cm^2})$
0.05	1000 °C ±2 °C/dak	1.7×10^5	1.2×10^5	8.0×10^4
0.05	1000 °C ±5 °C/dak	1.0×10^5	6.5×10^4	4.0×10^4
0.05	1000 °C ±10 °C/dak	8.0×10^4	5.0×10^4	3.2×10^4
0.05	1020 °C ±2 °C/dak	1.5×10^5	8.0×10^4	6.0×10^4
0.05	1020 °C ±5 °C/dak	8.0×10^4	5.6×10^4	3.9×10^4
0.05	1020 °C ±10 °C/dak	1.3×10^5	9.0×10^4	6.0×10^4
0.1	1000 °C ±2 °C/dak	6.5×10^4	3.5×10^4	2.0×10^4
0.1	1000 °C ±10 °C/dak	6.3×10^4	3.4×10^4	1.8×10^4
0.1	1020 °C ±10 °C/dak	3.0×10^4	1.7×10^4	1.0×10^4
0.2	1000 °C ±2 °C/dak	2.3×10^4	1.0×10^4	5.0×10^3
0.2	1000 °C ±5 °C/dak	1.8×10^3	8.0×10^2	5.0×10^2
0.2	1000 °C ±10 °C/dak	1.2×10^3	6.0×10^2	3.0×10^2
0.2	1020 °C ±2 °C/dak	4.5×10^2	2.3×10^2	1.3×10^2
0.2	1020 °C ±5 °C/dak	7.5×10^2	3.8×10^2	2.0×10^2
0.2	1020 °C ±10 °C/dak	5.0×10^2	2.8×10^2	1.5×10^2

Talyum katkılı numunelerde ise tüm numuneler diyamanyetik özellik göstermektedir. 0.05 oranında talyum katkılı olduğunda kritik akım yoğunluğu saf duruma göre daha küçük olurken katkılama oranı arttığında kritik akım yoğunluğu artmaktadır Talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerinin grafikleri karşılaştırıldığında 0.3 katkı oranı ve 1000 °C ±10 °C/dak sıcaklıkta üretilen numunede, kritik akım yoğunluğunun en büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni borun küçük katkılama oranlarında, talyumun büyük katkılama oranlarında çivileme merkezlerinin büyük olmasıdır.

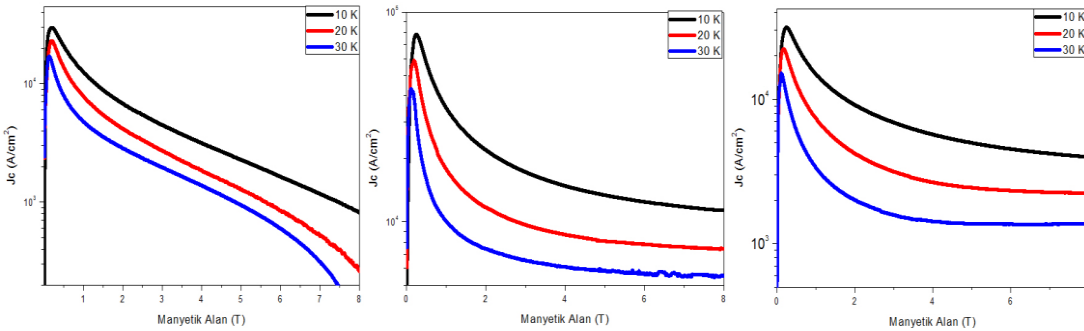
Manyetik alanın artmasıyla kritik akım yoğunluğunda meydana gelen düşme süperiletkenliğin karakteristik bir özelliğidir. Bu düşüşün büyüklüğü çivileme merkezinin büyüklüğü hakkında bilgi verir. Numuneler vortekslerin sürüklenmemesini sağlayacak çivileme merkezlerine sahipse J_c 'nin alana bağımlılığı nispeten zayıf olur.

Çizelge 4.9. Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin kritik akım yoğunluğu

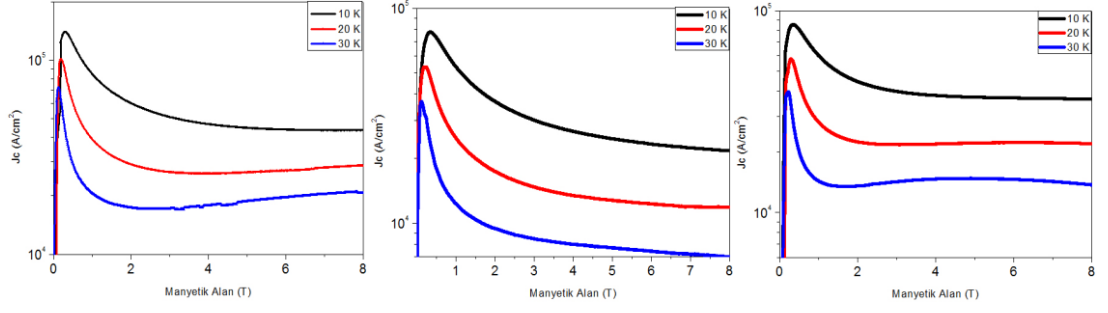
Talyum katkı oranı	Sinterleme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	T = 10 K	T = 20 K	T = 30 K
		$j_c^{mag} (\frac{\text{A}}{\text{cm}^2})$	$j_c^{mag} (\frac{\text{A}}{\text{cm}^2})$	$j_c^{mag} (\frac{\text{A}}{\text{cm}^2})$
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	6.0×10^4	4.6×10^4	3.4×10^4
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	7.8×10^4	6.0×10^4	4.4×10^4
0.05	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	1.9×10^4	1.1×10^4	6.0×10^4
0.1	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	8.5×10^4	6.5×10^4	5.0×10^4
0.1	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	8.5×10^4	6.4×10^4	4.5×10^4
0.1	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	1.7×10^4	1.0×10^4	6.0×10^3
0.2	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	7.8×10^4	5.8×10^4	4.2×10^4
0.2	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	8.8×10^4	6.0×10^4	4.2×10^4
0.2	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	4.7×10^4	2.8×10^4	1.8×10^4
0.3	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C/dak}$	8.8×10^4	5.8×10^4	4.0×10^4
0.3	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	9.0×10^4	6.2×10^4	4.5×10^4
0.3	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C/dak}$	1.5×10^4	8.8×10^3	5.0×10^3



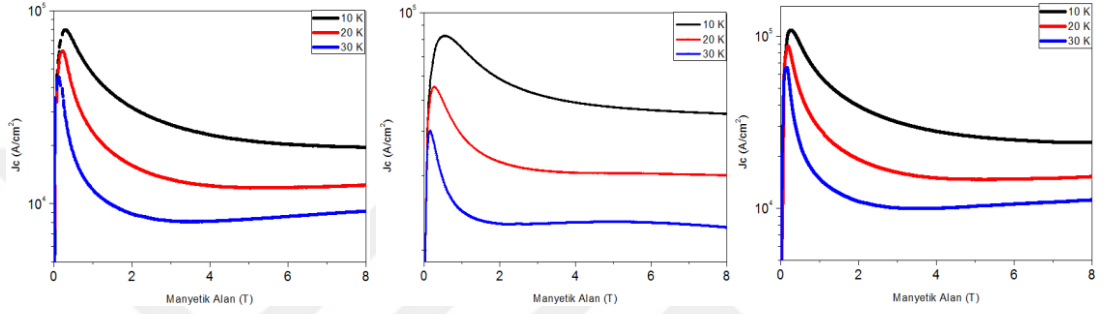
Şekil 4.62. 900 $^{\circ}\text{C} \pm 2$, ± 5 ve ± 10 $^{\circ}\text{C/dak}$ ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



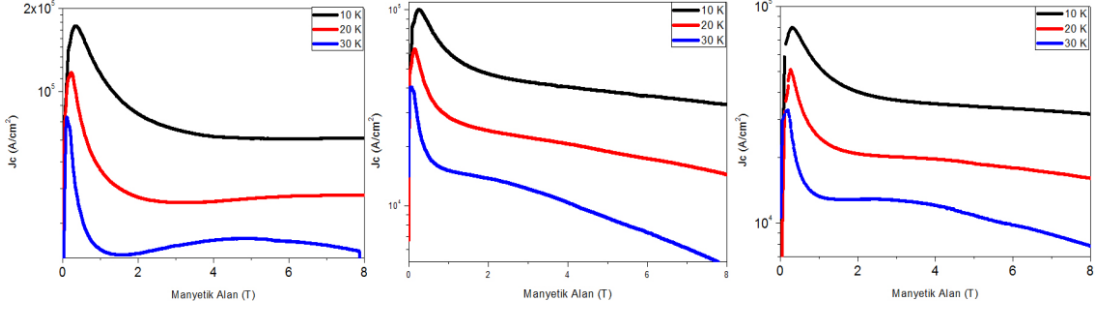
Şekil 4.63. 920 $^{\circ}\text{C} \pm 2$, ± 5 ve ± 10 $^{\circ}\text{C/dak}$ ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



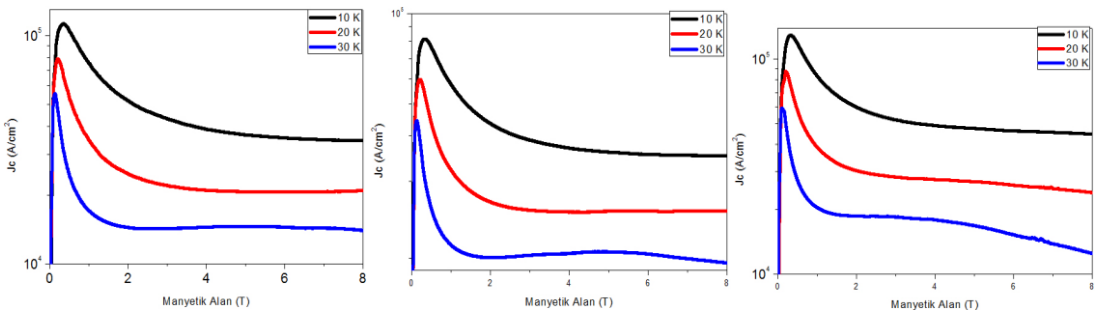
Şekil 4.64. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



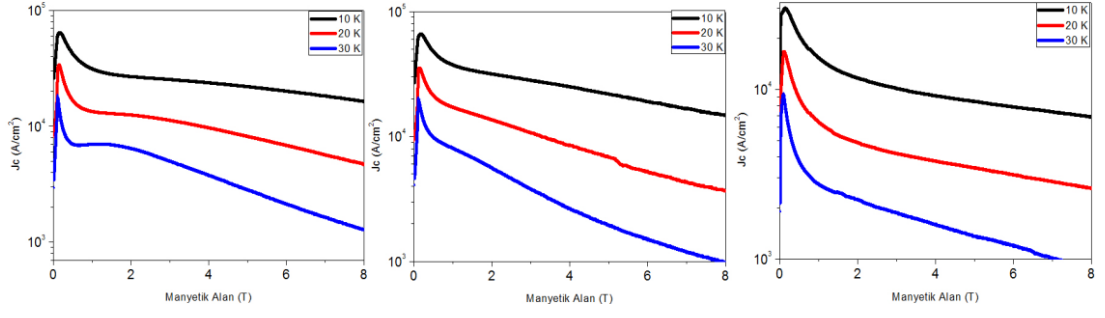
Şekil 4.65. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



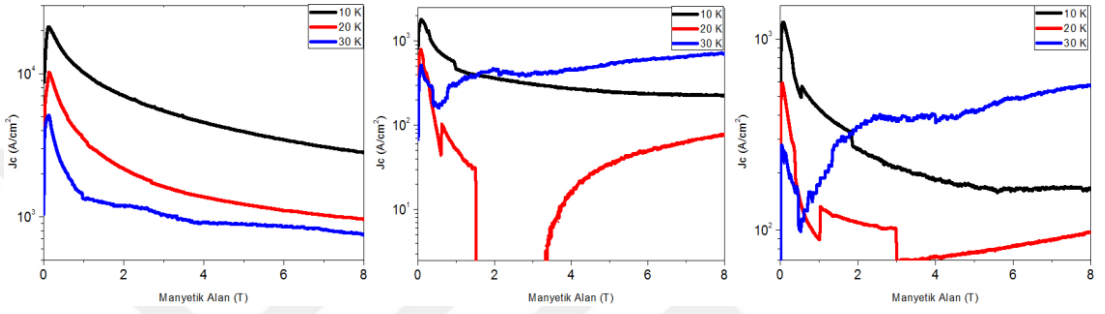
Şekil 4.66. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



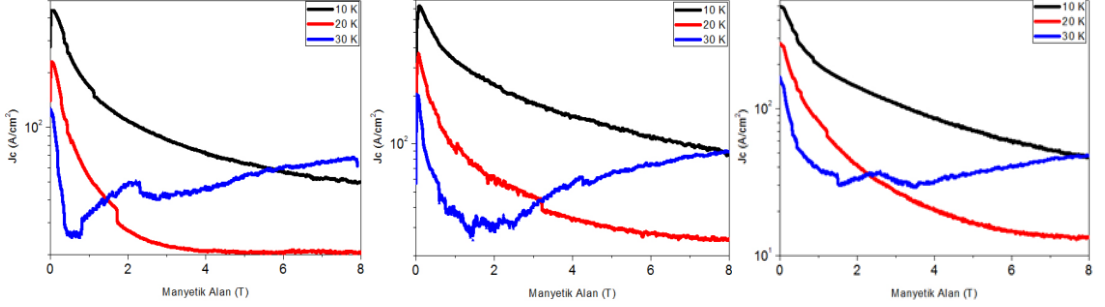
Şekil 4.67. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



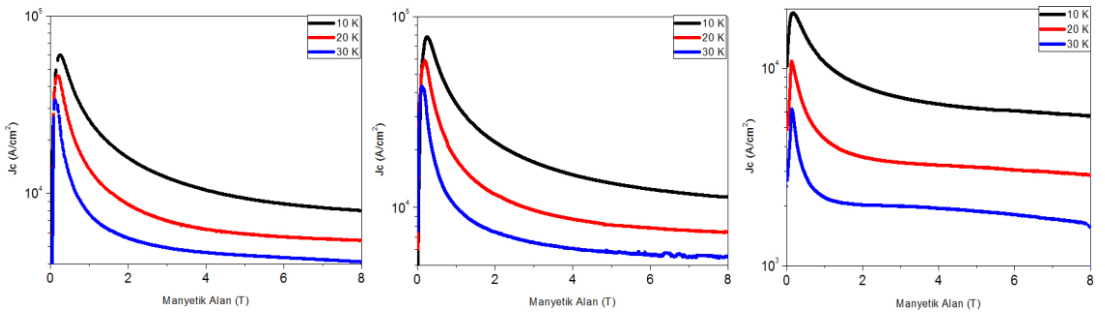
Şekil 4.68. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



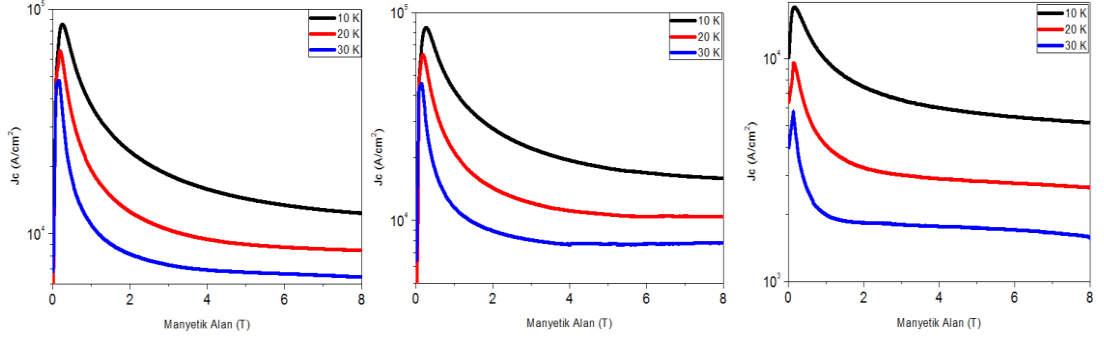
Şekil 4.69. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



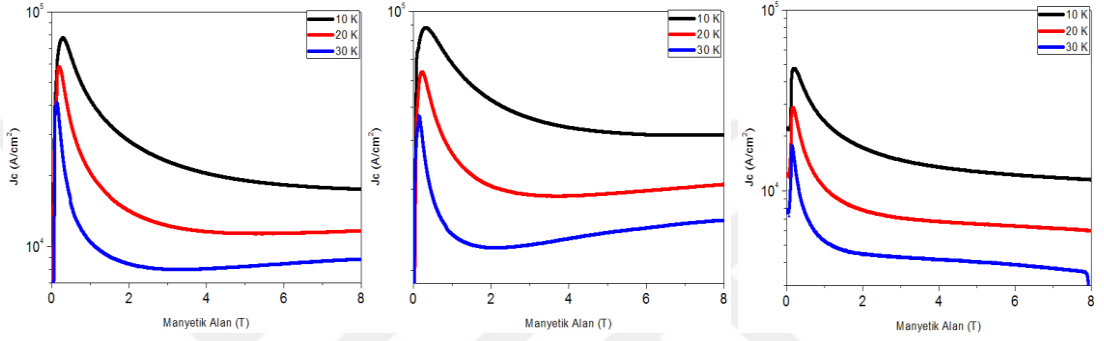
Şekil 4.70. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



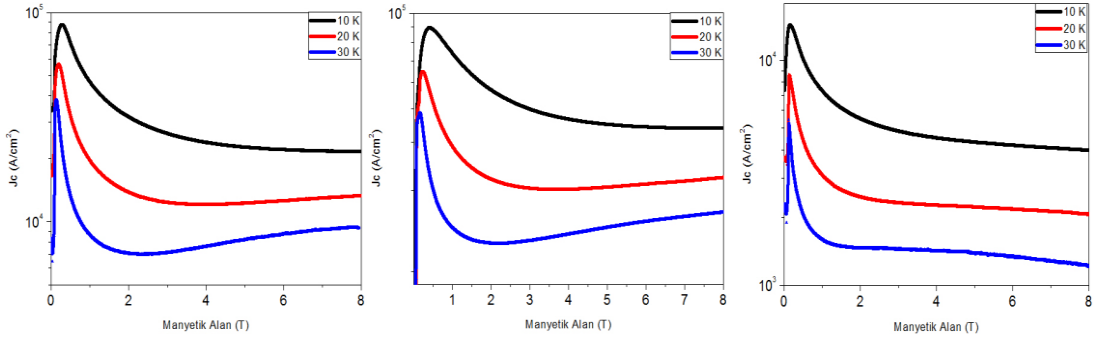
Şekil 4.71. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



Şekil 4.72. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



Şekil 4.73. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri



Şekil 4.74. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin J_c -H eğrileri

4.7. Aktivasyon Enerjisi Hesaplamaları

900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C'de ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanan saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, ($x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ve 0.6) $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{B})_x$ ve ($x = 0.05, 0.1, 0.2$ ve 0.3) $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{Tl})_x$ 'nın aktivasyon enerjisi denklem 4.2'de verilen Arrhenius formülü ile hesaplandı:

$$\rho = \rho_0 \ln \left(-\frac{U_0}{k_B T} \right) \quad (4.2)$$

Şekil 4.75 – 4.88’de $\ln(\rho/\rho_0)-1/T$ grafiklerinin eğimi kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjilerinin uygulanan alana bağlılığı Şekil 4.89 – 4.102’de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunesine ait aktivasyon enerjisi

Sinterleme sıcaklığı (°C)	Aktivasyon enerjisi (U_0)				
	0 T	2 T	4 T	6 T	8 T
900 °C ± 2 °C/dak	18000	6200	4500	3600	2800
900 °C ± 5 °C/dak	12200	3000	2000	1800	1700
900 °C ± 10 °C/dak	2900	300	270	250	230
920 °C ± 2 °C/dak	10000	3200	2400	1900	1700
920 °C ± 5 °C/dak	3000	250	230	215	200
920 °C ± 10 °C/dak	4500	1500	1250	1000	750
1000 °C ± 2 °C/dak	5000	1500	1400	1300	1200
1000 °C ± 5 °C/dak	11000	4000	3000	2000	1900
1000 °C ± 10 °C/dak	8000	1000	900	850	800
1020 °C ± 2 °C/dak	10000	6200	5000	3500	3100
1020 °C ± 5 °C/dak	8000	2800	2000	1800	1600
1020 °C ± 10 °C/dak	6000	800	700	650	600

Çizelge 4.10’da görüldüğü gibi manyetik alan arttığında aktivasyon enerjisi 0 T ile 2 T arasında hızlı düşmüş, 2 T’den daha büyük manyetik alan değerlerinde enerji düşüş hızı yavaşlamıştır. Bu durumda uygulanan manyetik alan enerjisinin bir kısmı vorteks sıvılaşması için harcanmış ve vorteks hareketi için gerekli enerji hızla azalmıştır. Uygulanan alanla aktivasyon enerjisinin büyük değişim göstermesi yapı kusurları ve safsızlıkların olmadığını gösterir. 900, 920 °C’deki numunelerin aktivasyon enerjilerinin azalma hızları, 1000, 1020 °C’deki numunelerin enerji azalma hızlarından daha büyüktür. Bu durum 1020 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde yapı kusurlarının daha fazla olduğunu gösteriyor.

Çizelgede verilenlere göre, bor katkılı numunelerde aktivasyon enerjisinin azalma hızının en yüksek olduğu değerler, 0.05 bor katkı oranı 1000 °C ± 2 °C/dak sıcaklık ve 1000 °C ± 5 °C/dak sıcaklıklarda üretilen numunelerde görülmektedir. Bor katkılı numunelerde aktivasyon enerjisinin azalma hızının en yavaş olduğu değerler, 0.2 bor katkı oranı 1000 °C ± 2 °C/dak sıcaklık ve 0.3 bor katkı oranı 1020 °C ± 10

$^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ sıcaklık değerleridir.

0 T manyetik alanda borun katkı oranı 0.05'den 0.2'ye arttırıldığında aktivasyon enerjisi azalmakta fakat 0.2'den 0.3'e arttırıldığında aktivasyon enerjisinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.11. B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin aktivasyon enerjisi

Bor katkı oranı	Sinterleme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Aktivasyon enerjisi				
		0 T	2 T	4 T	6 T	8 T
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	9000	1300	1000	1200	2000
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	8300	1500	1400	1300	2800
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	16000	6300	4500	3700	3500
0.05	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	6000	1500	1200	1000	800
0.05	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	12000	3500	2500	1800	1500
0.05	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	13500	3500	2500	1750	1500
0.1	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	600	250	200	150	120
0.1	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	13200	3000	2700	2000	1800
0.1	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	13100	3900	2000	1800	1750
0.2	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	650	130	100	80	70
0.2	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	500	320	200	160	150
0.2	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	600	40	30	15	5
0.2	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	700	270	200	150	130
0.2	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	8000	2500	2000	1500	1200
0.2	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	8000	2200	1500	1300	1100
0.3	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	1800	600	500	400	350
0.3	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	12300	3000	2800	2400	2000
0.3	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	700	380	300	270	240

Çizelge 4.12'de verilenlere göre, talyum katkılı numunelerde aktivasyon enerjisinin azalma hızının en yüksek olduğu değer, 0.2 talyum katkı oranı ve en küçük değer 0.1 talyum katkı oranında görülmektedir.

Çizelge 4.12. Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin aktivasyon enerjisi

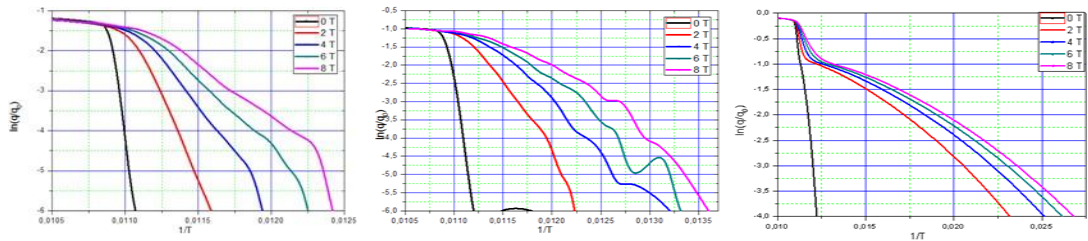
Bor katkı oranı	Sinterleme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Aktivasyon enerjisi				
		0 T	2 T	4 T	6 T	8 T
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	3750	2100	1500	1070	1000
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	2200	1100	950	750	600

Çizelge 4.12. Devamı

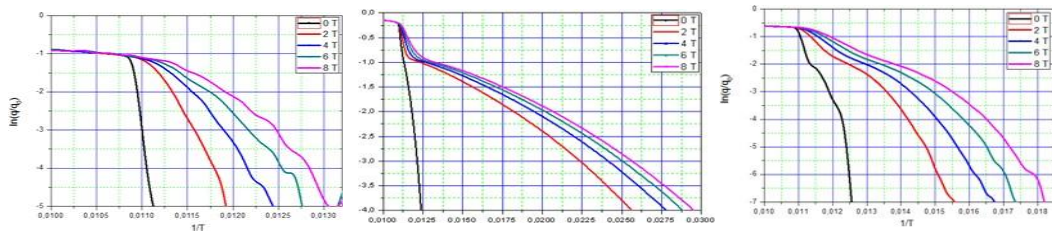
Bor katkı oranı	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Aktivasyon enerjisi				
		0 T			0 T	
0.1	1000 °C ±2 °C/dak	3200	2600	1600	1200	1100
0.1	1000 °C ±10 °C/dak	3600	1800	1300	1150	1000
0.2	1000 °C ±2 °C/dak	7000	3200	2000	1500	1150
0.2	1000 °C ±10 °C/dak	14400	3000	2200	1600	1400
0.3	1000 °C ±2 °C/dak	4000	2000	1500	1400	1200
0.3	1000 °C ±10 °C/dak	9200	2400	2200	2000	1850

0 T manyetik alanda talyumun aktivasyon enerjisi talyum katkı oranı artırıldığında aktivasyon enerjide artmaktadır. Süperiletkenlerde vorteks hareketi direnç oluşturduğu için bu enerji süperiletkenlik için önemlidir.

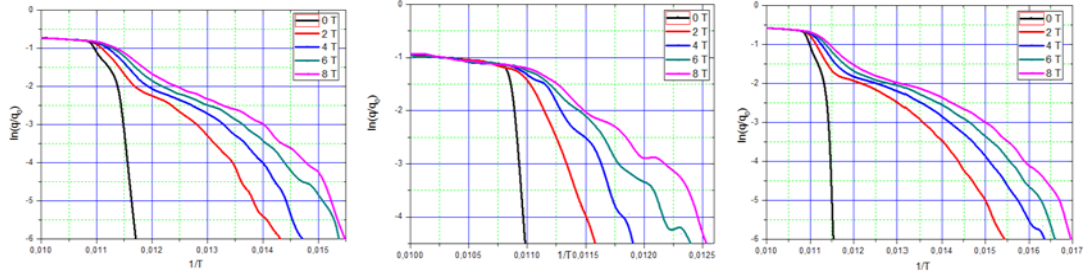
0 T manyetik alanda aktivasyon enerjilerini ve enerji azalma hızlarını karşılaştırdığımızda en yüksek saf YBCO'da görülmektedir. 0.05 ile 0.1 katkı oranında borun aktivasyon enerjisi ve azalma hızı, talyumun aktivasyon enerjisinden ve azalma hızından büyük, 0.2 ve 0.3 katkı oranında ise talyumun aktivasyon enerjisi ve enerji azalma hızının daha büyük olduğu görülmektedir. Aktivasyon enerjisi büyük olan numunede vorteksleri hareket ettirmek için daha büyük enerjiye ihtiyaç olduğundan daha yüksek akım taşınabilir. Aktivasyon enerjisinin azalma hızı vortekslerin bağlanma kuvvetleri ile ters orantılıdır.



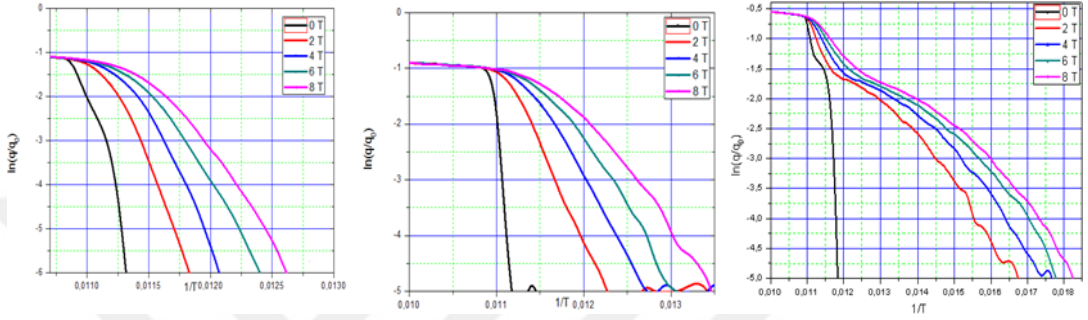
Şekil 4.75. 900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin ln(ρ/ρ₀)-1/T eğrileri



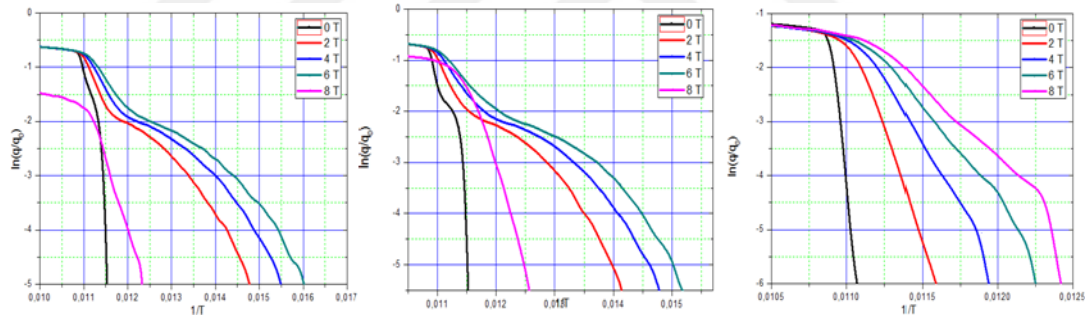
Şekil 4.76. 920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin ln(ρ/ρ₀)-1/T eğrileri



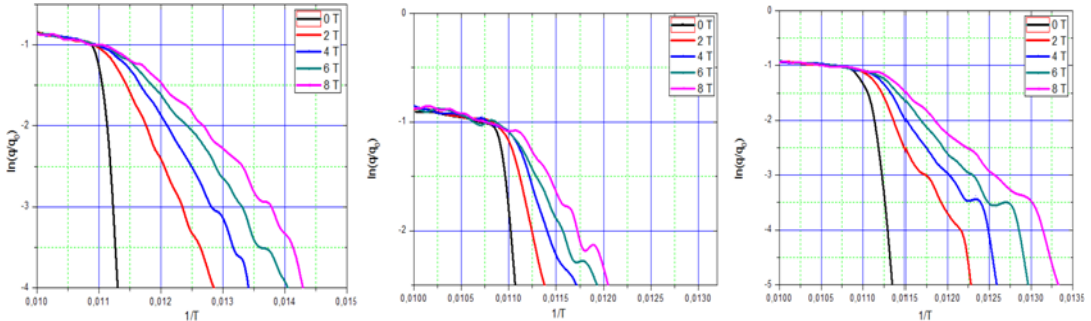
Şekil 4.77. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ -1/T eğrileri



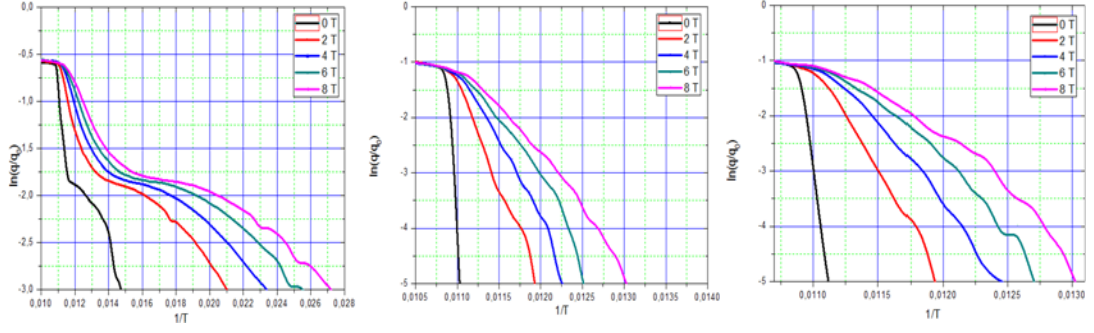
Şekil 4.78. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ -1/T eğrileri



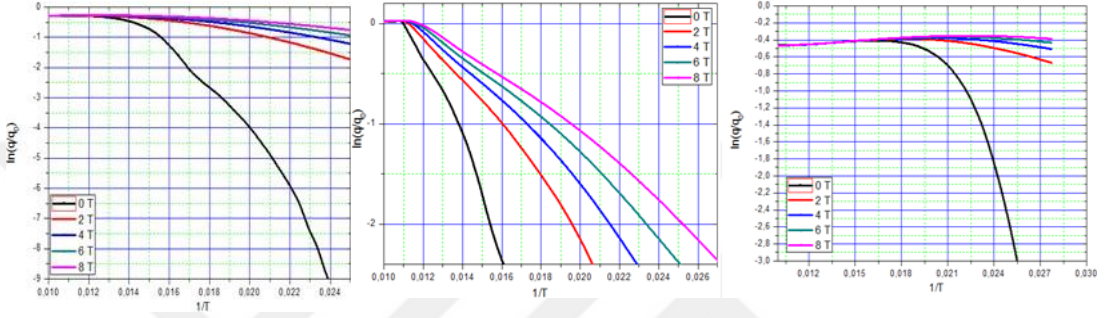
Şekil 4.79. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ -1/T eğrileri



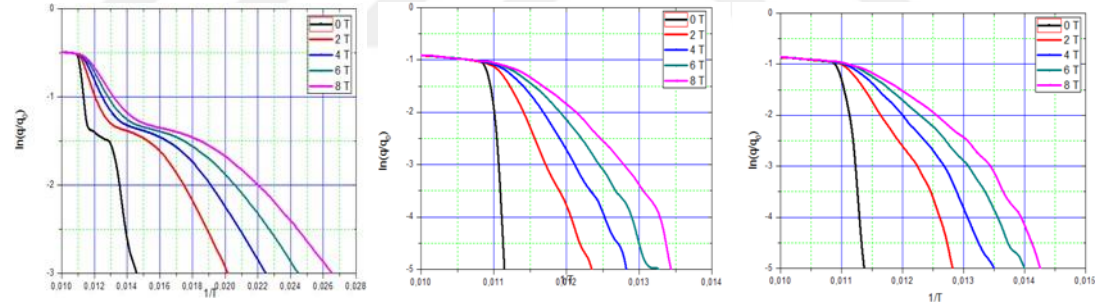
Şekil 4.80. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ -1/T eğrileri



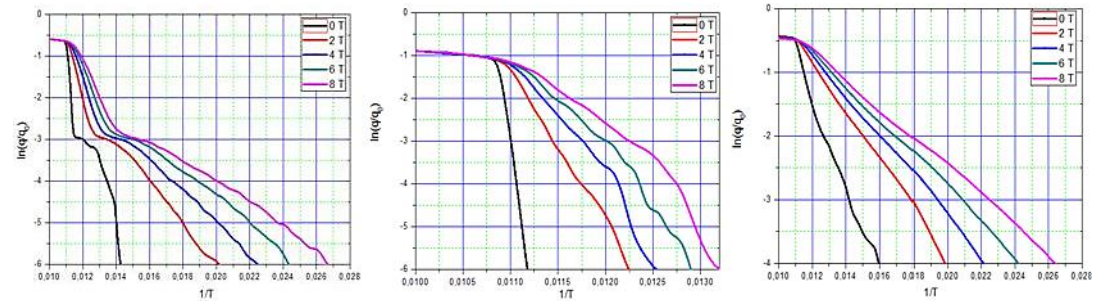
Şekil 4.81. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin ln(ρ/ρ₀)-1/T eğrileri



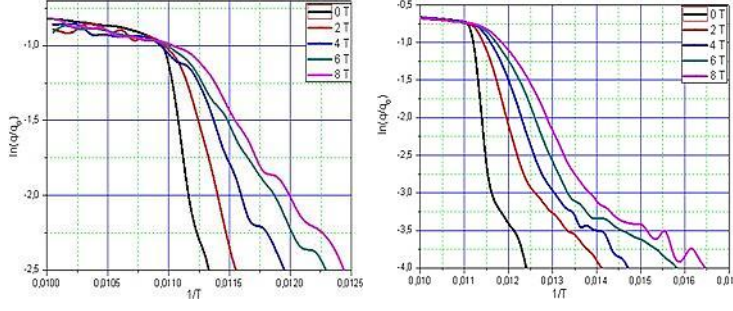
Şekil 4.82. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin ln(ρ/ρ₀)-1/T eğrileri



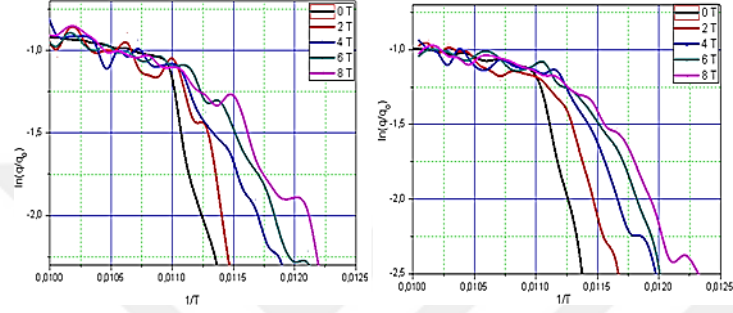
Şekil 4.83. 1020 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin ln(ρ/ρ₀)-1/T eğrileri



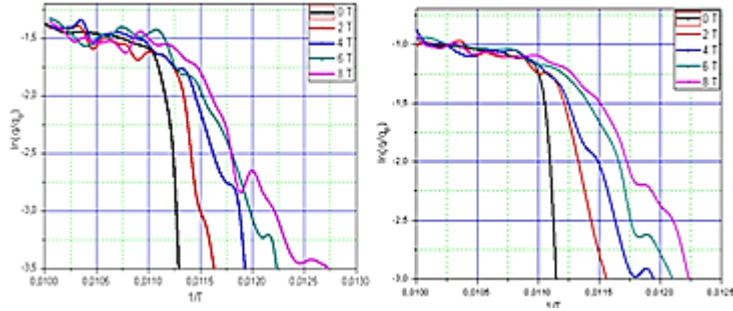
Şekil 4.84. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin ln(ρ/ρ₀)-1/T eğrileri



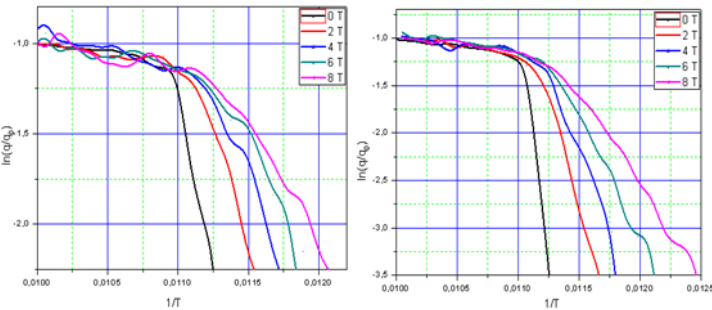
Şekil 4.85. $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ - $1/T$ eğrileri



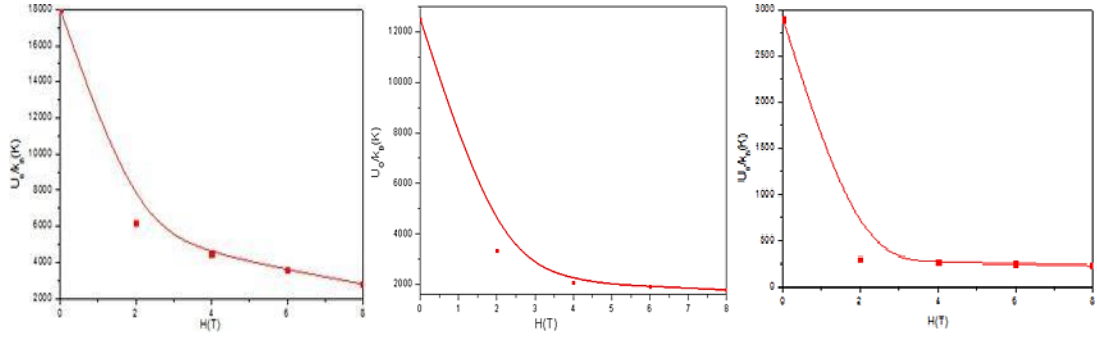
Şekil 4.86. $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ - $1/T$ eğrileri



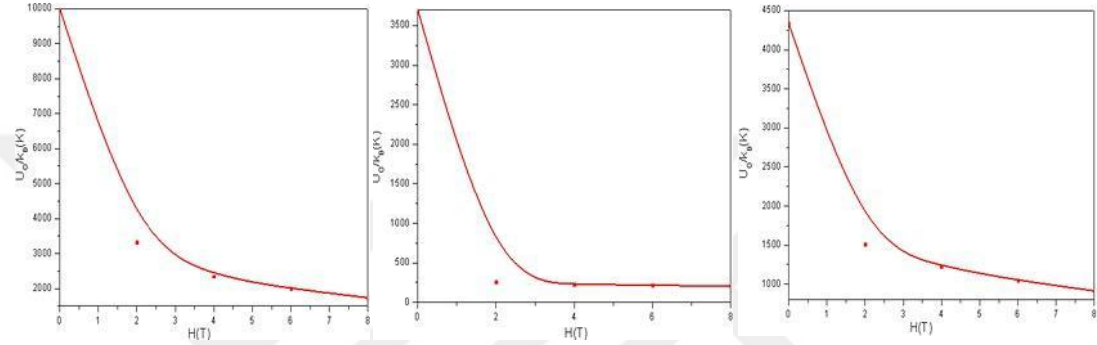
Şekil 4.87. $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ - $1/T$ eğrileri



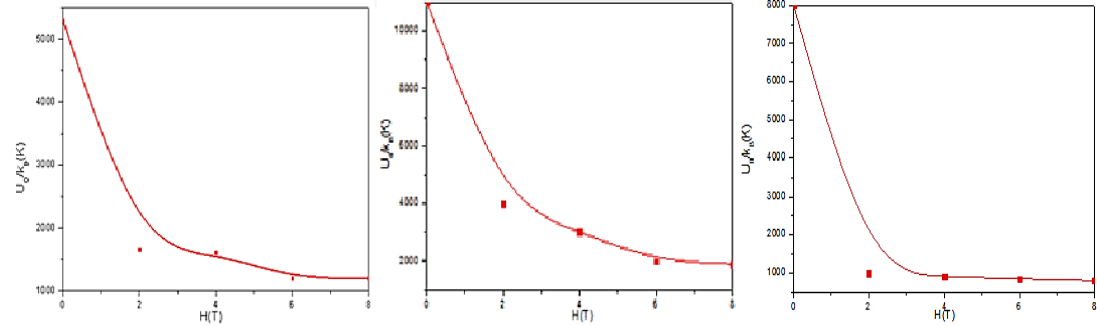
Şekil 4.88. $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $\ln(\rho/\rho_0)$ - $1/T$ eğrileri



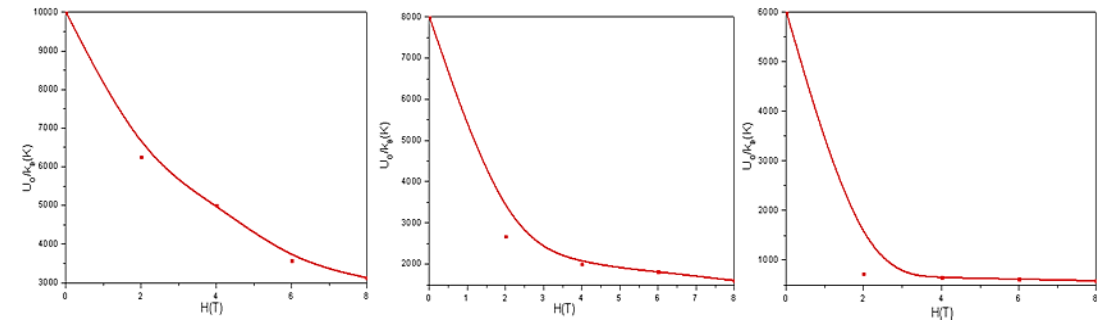
Şekil 4.89. 900 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(\text{T})$ eğrileri



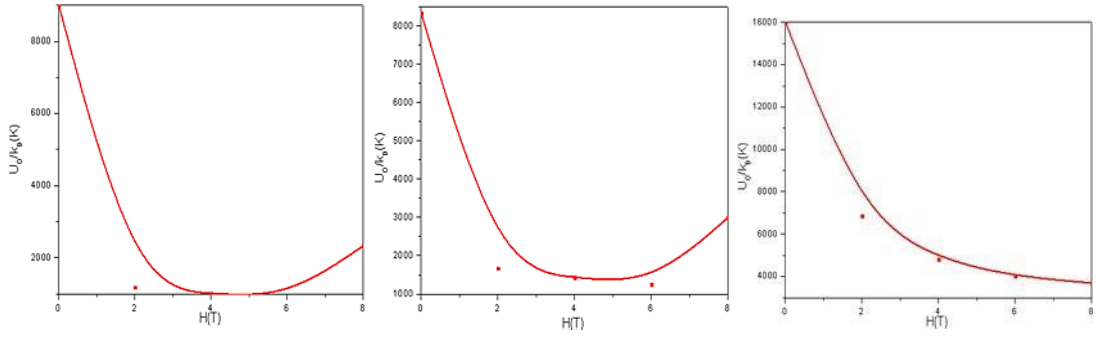
Şekil 4.90. 920 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(\text{T})$ eğrileri



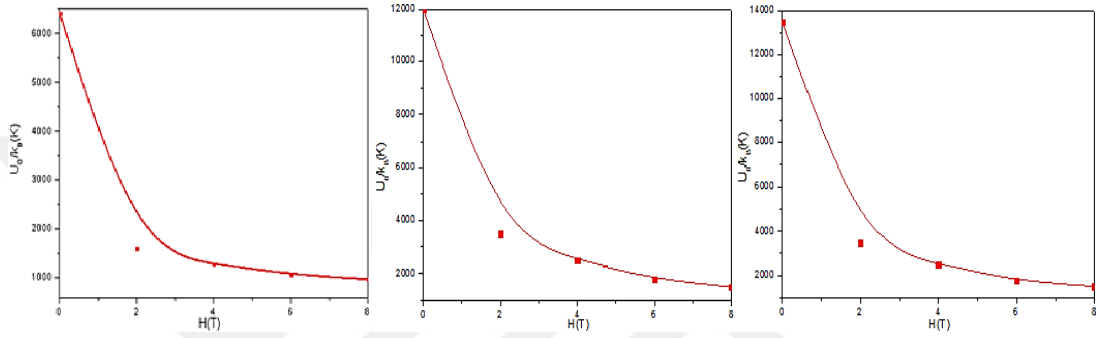
Şekil 4.91. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(\text{T})$ eğrileri



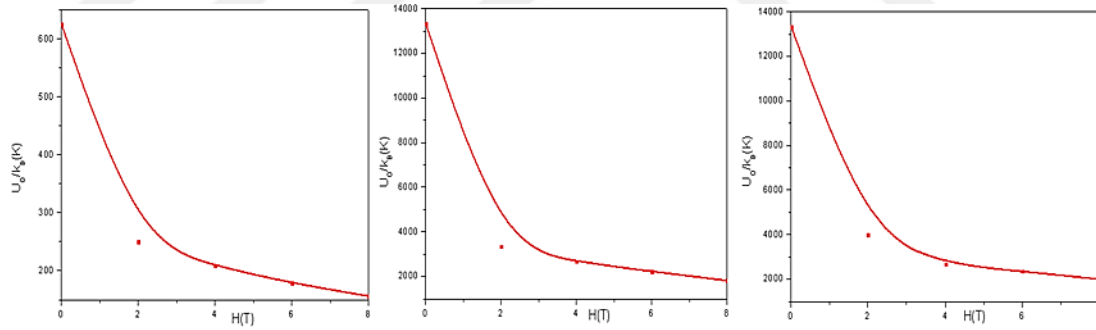
Şekil 4.92. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(\text{T})$ eğrileri



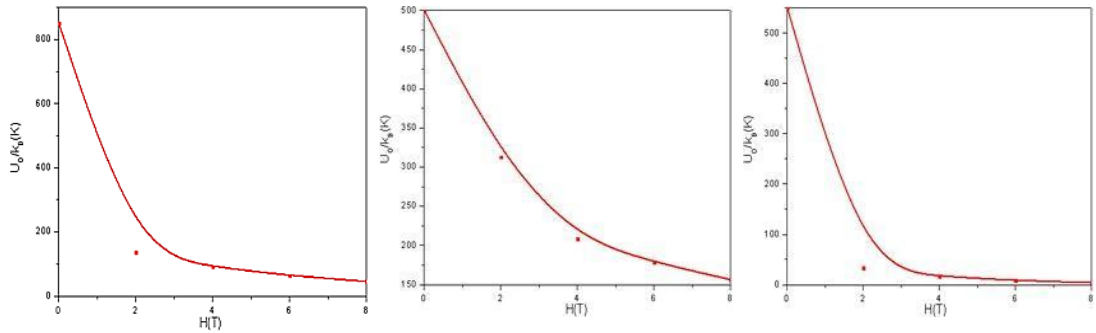
Şekil 4.93. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(T)$ eğrileri



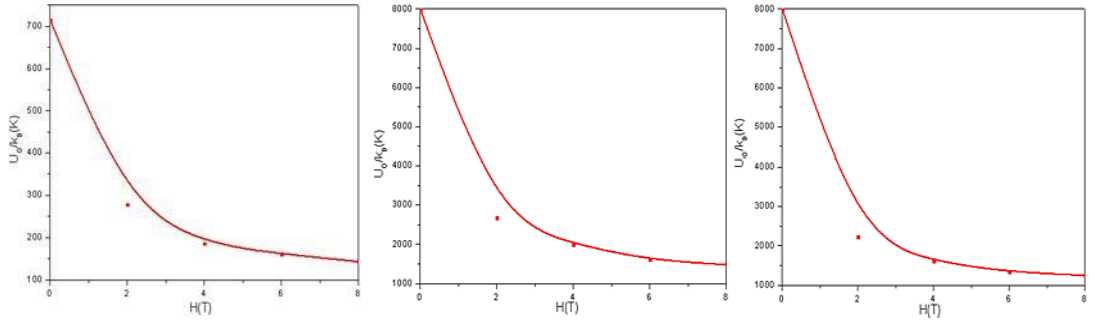
Şekil 4.94. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(T)$ eğrileri



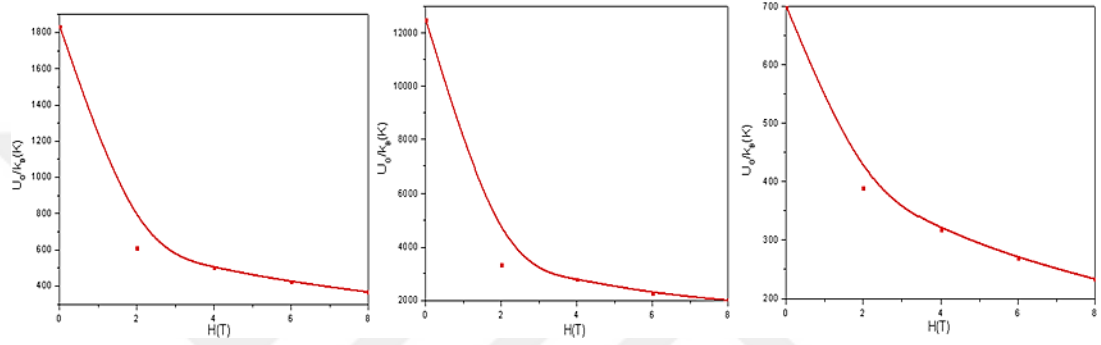
Şekil 4.95. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(T)$ eğrileri



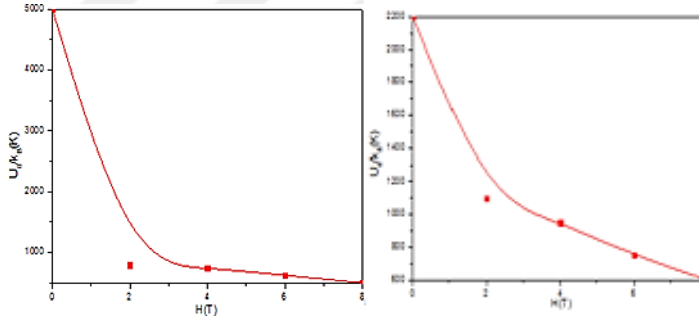
Şekil 4.96. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $U_0/k_B(\text{K})$ - $H(T)$ eğrileri



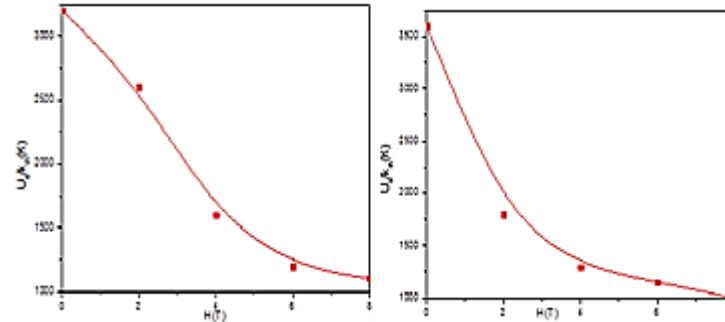
Şekil 4.97. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin U_0/k_B (K)- H (T) eğrileri



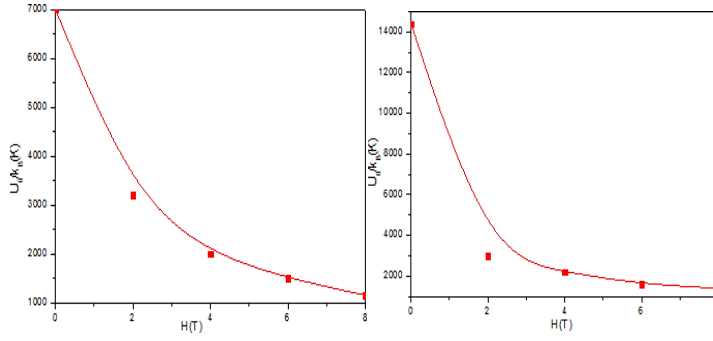
Şekil 4.98. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin U_0/k_B (K)- H (T) eğrileri



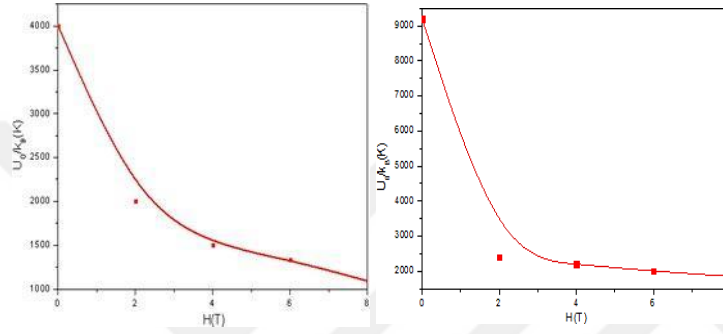
Şekil 4.99. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin U_0/k_B (K)- H (T) eğrileri



Şekil 4.100. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin U_0/k_B (K)- H (T) eğrileri



Şekil 4.101. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğinin $J_c/k_B(K)$ -H(T) eğrileri



Şekil 4.102. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 °C /dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğinin $J_c/k_B(K)$ -H(T) eğrileri

4.8. Çivileme (Pinning) Kuvveti Hesaplamaları

YBa₂Cu₃O_{7-δ} süperiletkende vorteksler H_{c1} değerinden sonra ortaya çıkmaya başlar. Numunede akım geçtiğinde vortekslere Lorentz kuvveti ($F_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$) etki eder. Lorentz kuvveti çivileme kuvvetini aştığında ($F_L > F_p$) vorteksler hareket etmeye başlar. Bu hareket eden vorteksler sistemden enerji çekerek akıma dik bir elektrik alanı oluşturacaklardır. Bu nedenle sistemde direnç oluşarak süperiletkenlik bozulmaya başlayacaktır. H_{c2} üst kritik manyetik alanda çivileme kuvveti sıfır olur. H_{c2} alanın sıcaklığa bağlı olarak değişimi veren grafik Şekil 4.103 – 4.116’da verilmiştir. Direnç oluşmaması için yani vortekslerin hareketini zorlaştırmak için tane sınırları, dislokasyonlar, safsızlıklar gibi normal bölgeler oluşturulur. Bu normal bölgeler çivileme merkezi şeklinde hareket ederler. Çivileme merkezleri vortekslerin hareketini zorlaştırır. Bu kuvvet Lorentz kuvvetinden büyük ya da eşit olduğu sürece vorteksler hareket etmeyeceği için örnek dirençsiz kalacaktır.

900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C’de ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarda hazırlanan Saf YBa₂Cu₃O_{7-δ}, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 0.5 ve 0.6 bor

katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ve 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 talyum katkı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'nın çivileme kuvvetinin manyetik Alana göre değişimi Çizelge 4.13-4.15'de ve grafikleri Şekil 4.117 – 4.129'da verilmiştir.

10 K, 20 K ve 30 K sıcaklıklarda manyetik alana bağlı olarak çivileme kuvvetini gösteren grafikler incelendiğinde 10 K'de çivileme kuvvetinin büyüklüğü 30 K'deki çivileme kuvvetinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni sıcaklıkla vortekslerin titreşimi artacağı için vortekslerde çivileme kuvvetinin azalmasıdır. Saf numunelerin uygulanan alanla çivileme kuvvetleri $900\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C/dak}$ ve $900\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C/dak}$ sıcaklıkları hariç benzer davranışlar gösterirler. Numunelerin çivileme kuvvetleri 8 T'ya kadar neredeyse lineer olarak artmaktadır. Manyetik alan arttıkça hem çivileme merkezlerinin sayısı hem de büyüklüğü arttığı için alanın artmasıyla çivileme kuvveti artmıştır.

Çizelge 4.13. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin çivileme kuvveti

Sinterleme sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	T = 10 K	T = 20 K	T = 30 K
	F_p 10^6 (N/m)	F_p 10^6 (N/m)	F_p 10^6 (N/m)
$900\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C/dak}$	177	95	50
$900\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C/dak}$	195	114	65
$900\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C/dak}$	376	220	137
$920\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C/dak}$	240	128	73
$920\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C/dak}$	525	325	220
$920\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C/dak}$	350	200	125
$1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C/dak}$	2700	1750	1200
$1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C/dak}$	3120	1760	1120
$1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C/dak}$	2540	1480	575
$1020\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C/dak}$	1570	625	240
$1020\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C/dak}$	7250	4300	2750
$1020\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C/dak}$	3700	2260	1530

Çizelge 4.13'de Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'ın çivileme kuvvetleri incelendiğinde $900\text{ }^\circ\text{C}$, $920\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklara göre $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ve $1020\text{ }^\circ\text{C}$ 'de çivileme kuvvetleri daha büyük olduğu görülmektedir. Saf numunelerde en büyük çivileme kuvveti ise $1020\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C/dak}$ de üretilen numunede olduğu görülmüştür.

Çizelge 14'de verilenlere göre, 0.05 bor katkılama çivileme kuvveti saf

numunelere göre artarken 0.1, 0.2 ve 0.3 katkı oranı ile çivileme kuvveti azalmaktadır. 0.2 katkı oranında azalma hızının çok yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek çivileme kuvveti değeri 0.05 bor katkı oranı, 1000 °C ±5 °C/dak sinterleme sıcaklığında elde edilmiştir.

Çizelge 4.14. B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin çivileme kuvveti

Bor katkı oranı	Sinterleme sıcaklığı (°C)	T = 10 K	T = 20 K	T = 30 K
		F_p 10 ⁶ (N/m)	F_p 10 ⁶ (N/m)	F_p 10 ⁶ (N/m)
0.05	1000 °C ±2 °C/dak	7400	4500	2900
0.05	1000 °C ±5 °C/dak	5350	2300	1000
0.05	1000 °C ±10 °C/dak	5400	2750	1350
0.05	1020 °C ±2 °C/dak	5000	3100	1600
0.05	1020 °C ±5 °C/dak	3800	2300	1500
0.05	1020 °C ±10 °C/dak	6000	3450	1800
0.1	1000 °C ±2 °C/dak	1370	430	170
0.1	1000 °C ±10 °C/dak	1250	380	130
0.1	1020 °C ±10 °C/dak	580	220	80
0.2	1000 °C ±2 °C/dak	260	85	75
0.2	1000 °C ±5 °C/dak	20	7	75
0.2	1000 °C ±10 °C/dak	15	7	50
0.2	1020 °C ±2 °C/dak	45	18	63
0.2	1020 °C ±5 °C/dak	45	13	45
0.2	1020 °C ±10 °C/dak	55	15	55

Çizelge 4.15’de verilenlere göre, 0.05 talyum katkılama ise çivileme kuvveti saf numunelere göre azalırken 0.1, 0.2 ve 0.3 katkı oranı ile çivileme kuvveti artmaktadır. En yüksek çivileme kuvveti değeri 0.3 talyum katkı oranı, 1000 °C ±5 °C/dak sinterleme sıcaklığında elde edilmiştir. Ayrıca tabloda verilenlere göre tüm talyum katkılar için 1000 °C ±5 °C/dak sıcaklıkta çivileme kuvvetleri en büyük değer çıkmıştır. Yani talyumda çivileme kuvveti için ideal sıcaklık 1000 °C ±5 °C/dak .

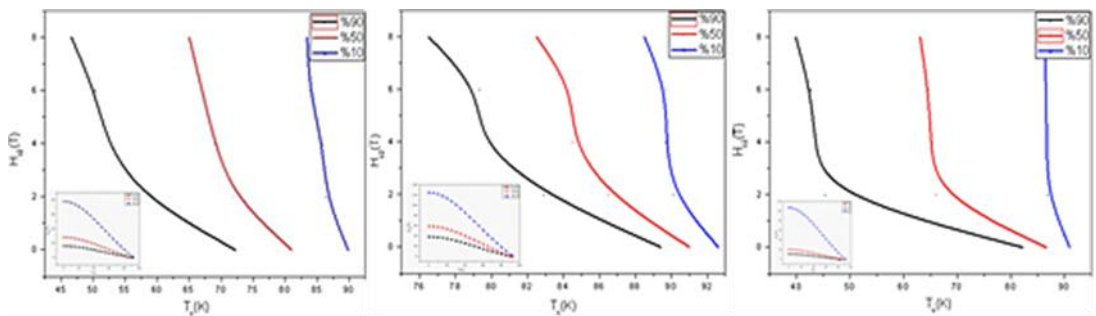
Çivileme (pinning) kuvvetini anlamak için vorteks örgü davranışı ve numunelerdeki çivileme (pinning) merkezi dikkate alınmalıdır. Çivileme kuvveti vorteks etkileşimlerinden küçükse vorteks katı halde ve çekirdeği büyüktür. Vorteks çekirdeği küçüldükçe vorteks etkileşimi çivileme kuvvetine göre azalır. Numuneye

nüfuz eden vorteks sayısı çivileme (pining) merkezine eşit olduğunda en büyük çivileme kuvveti değeri yakalanır. Yüksek alanlarda çivileme (pining) merkezlerinde daha fazla vorteks vardır, bu nedenle merkezler arasında eş zamanlı geçişler beklenebilir.

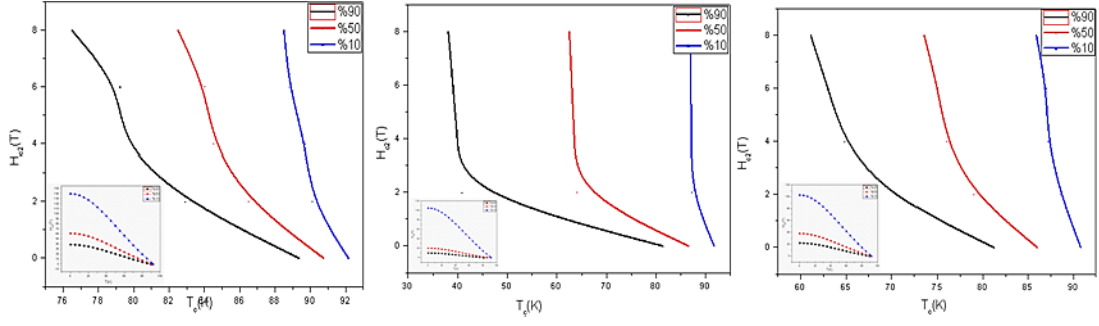
Numunedeki tanecik büyüklüğü uygulanan manyetik alanda çivileme (pining) kuvvetinin davranışında öneme sahiptir. Bu çalışmada taneciklerin büyüklüğünün çivileme kuvvetini arttırdığı görülmektedir.

Çizelge 4.15. Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin çivileme kuvveti

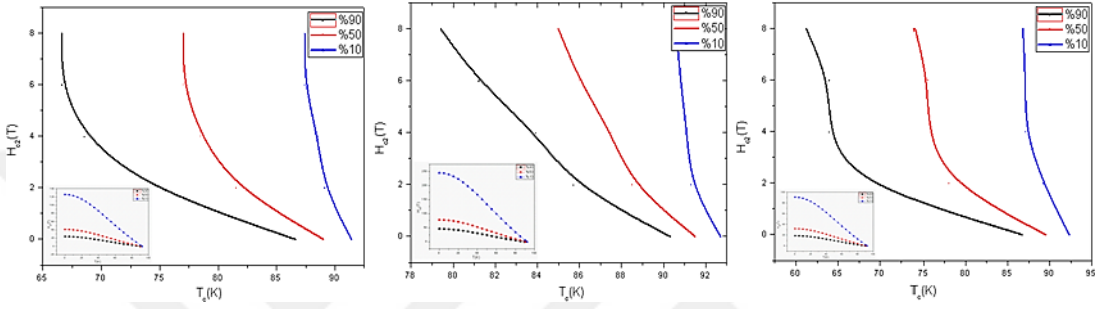
Bor katkı oranı	Sinterleme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	T = 10 K	T = 20 K	T = 30 K
		$10^6 F_p$ (N/m)	$10^6 F_p$ (N/m)	$10^6 F_p$ (N/m)
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	820	500	350
0.05	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	1250	650	390
0.05	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	480	180	100
0.1	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	1160	700	500
0.1	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	1580	1020	700
0.1	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	450	260	165
0.2	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	1870	1380	1000
0.2	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	4200	3250	2300
0.2	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	970	420	250
0.3	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	1850	620	450
0.3	1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	4250	3000	2200
0.3	1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$	340	175	100



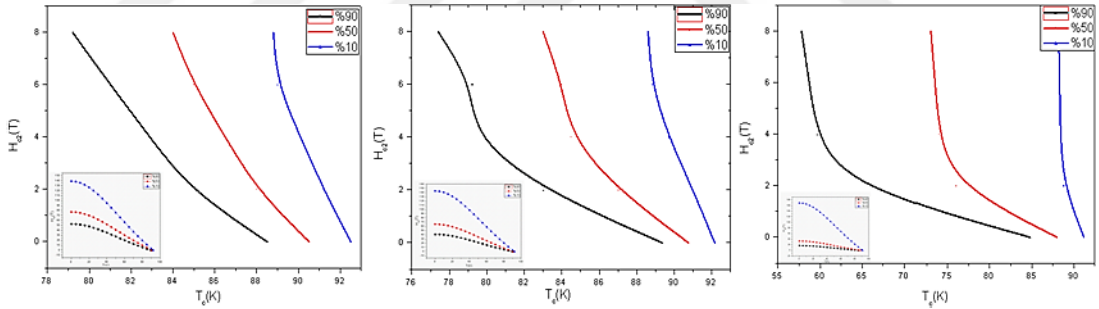
Şekil 4.103. 900 $^{\circ}\text{C} \pm 2$, ± 5 ve ± 10 $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $J_c(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



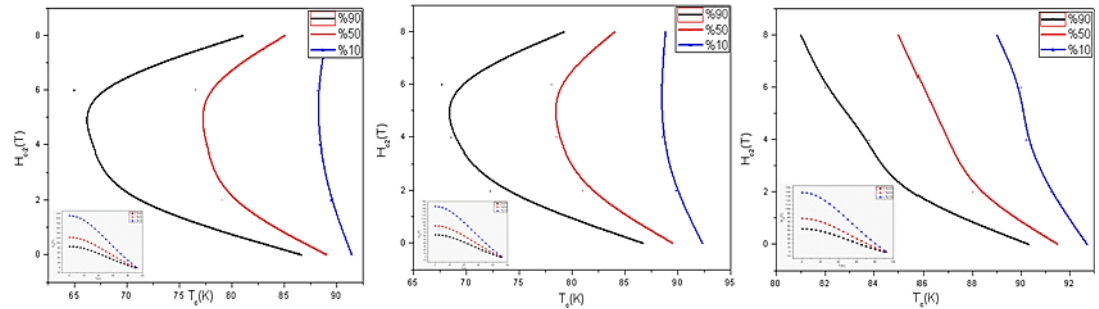
Şekil 4.104. 920 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



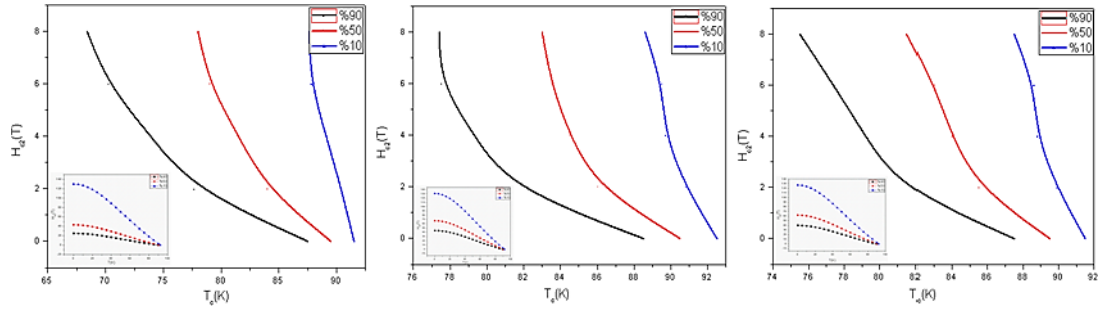
Şekil 4.105. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



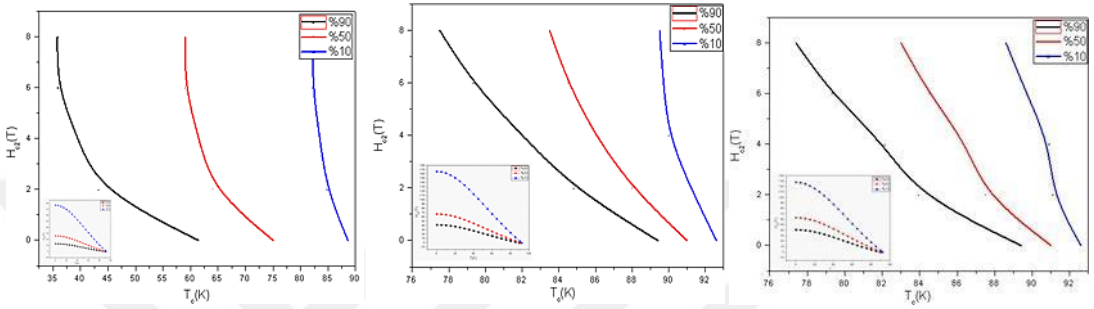
Şekil 4.106. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



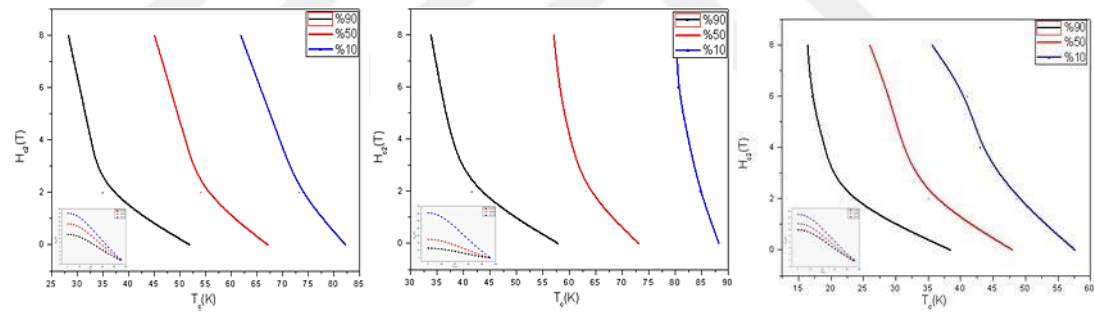
Şekil 4.107. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



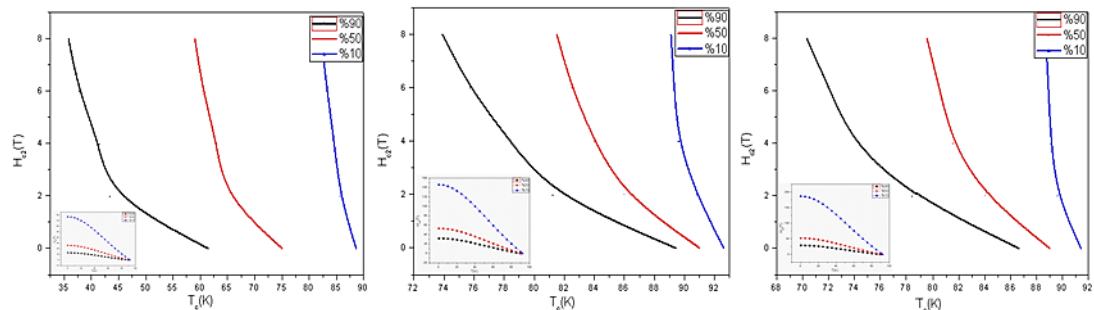
Şekil 4.108. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



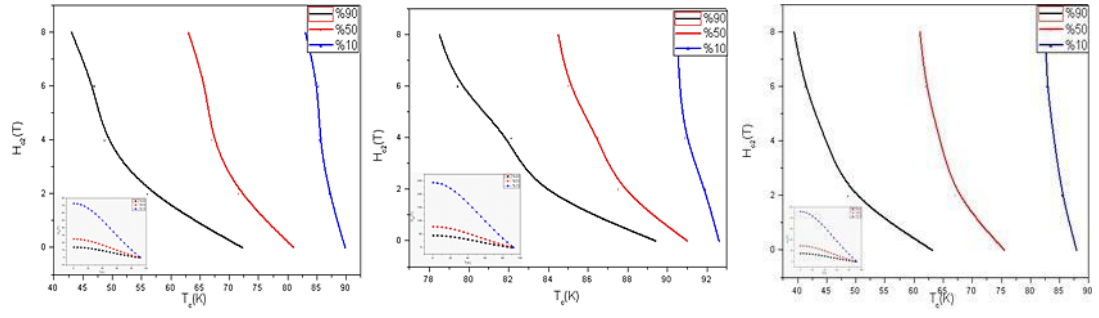
Şekil 4.109. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



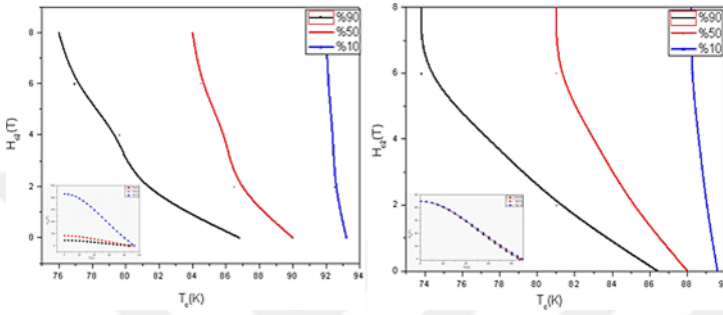
Şekil 4.110. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



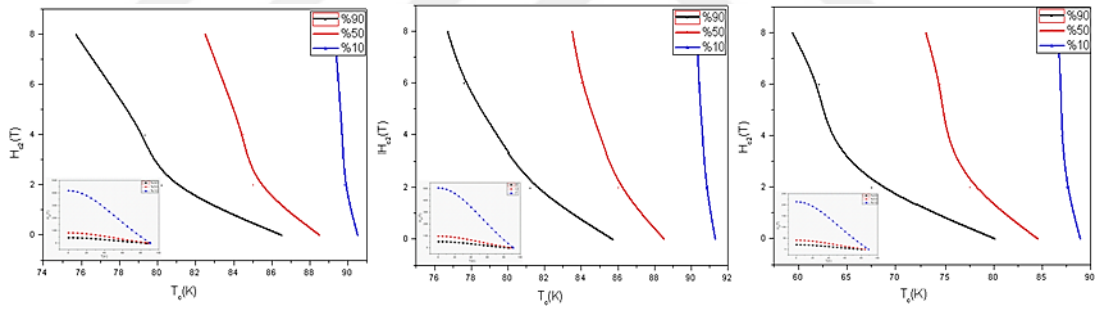
Şekil 4.111. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



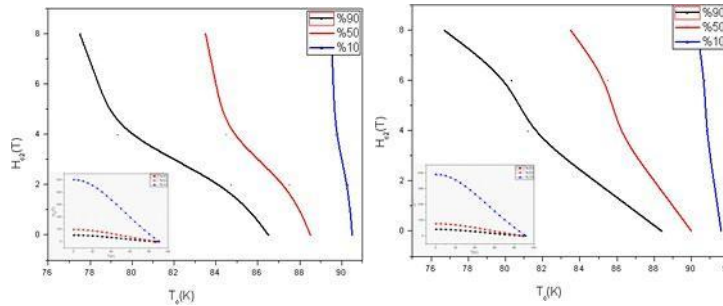
Şekil 4.112. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 B katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin H_{c2}(T)-T_c(K) eğrileri



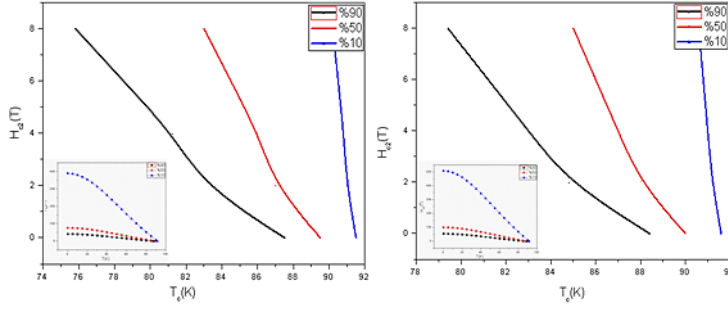
Şekil 4.113. 1000 °C ±2, 1020 °C ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin H_{c2}(T)-T_c(K) eğrileri



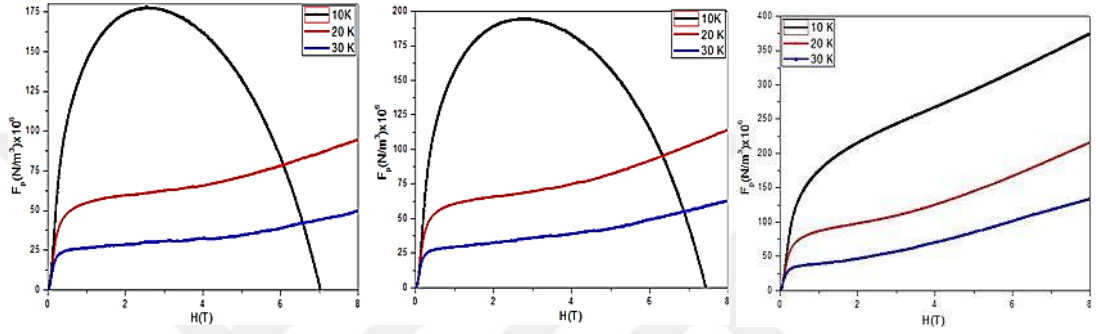
Şekil 4.114. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 ve 1020 °C ±10 °C/dak sıcaklık değişiminde hazırlanmış 0.1 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin H_{c2}(T)-T_c(K) eğrileri



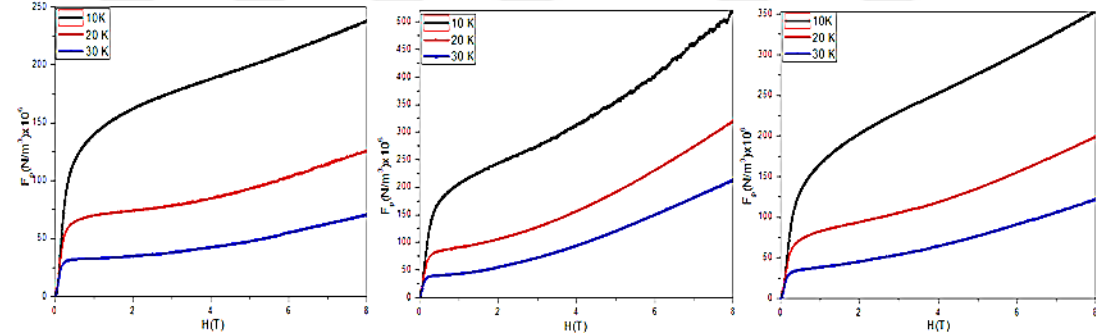
Şekil 4.115. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 °C/dak sıcaklık değişiminde hazırlanmış 0.2 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin H_{c2}(T)-T_c(K) eğrileri



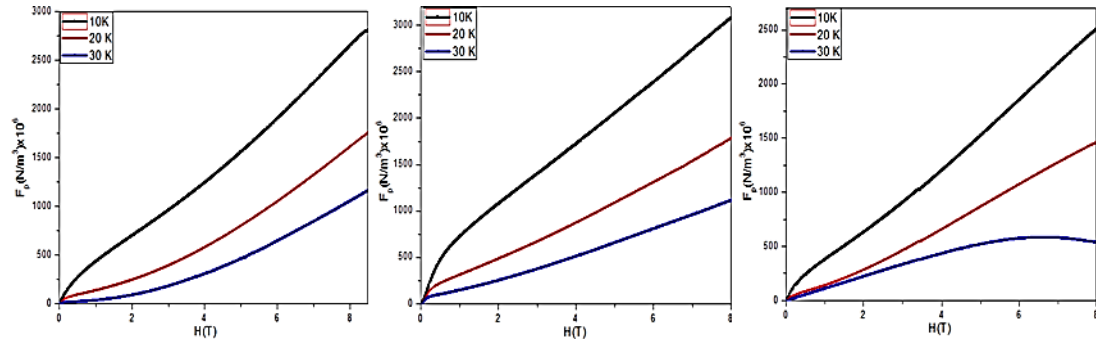
Şekil 4.116. 1000 °C ±2, 1000 °C ±10 °C/dak sıcaklık değişiminde hazırlanmış 0.3 Tl katkılı YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin $H_{c2}(T)$ - $T_c(K)$ eğrileri



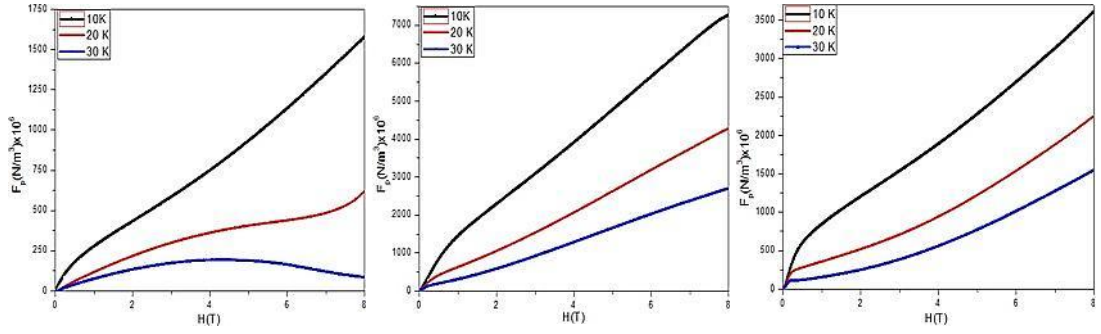
Şekil 4.117. 900 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin $F_p(N/m^3)$ - $H(T)$ eğrileri



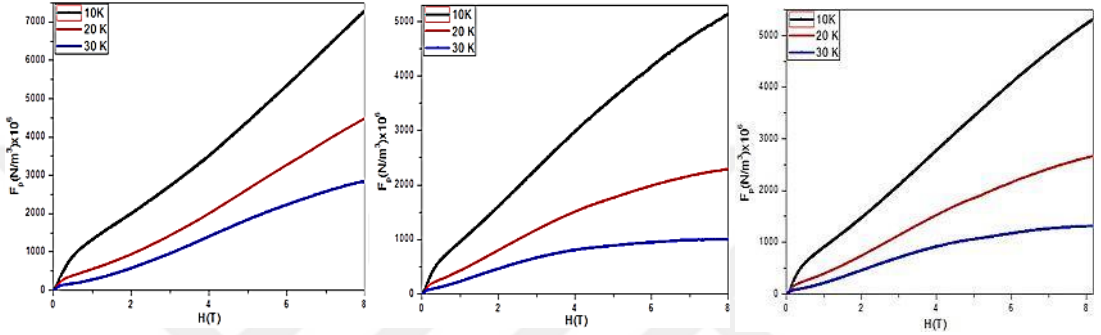
Şekil 4.118. 920 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin $F_p(N/m^3)$ - $H(T)$ eğrileri



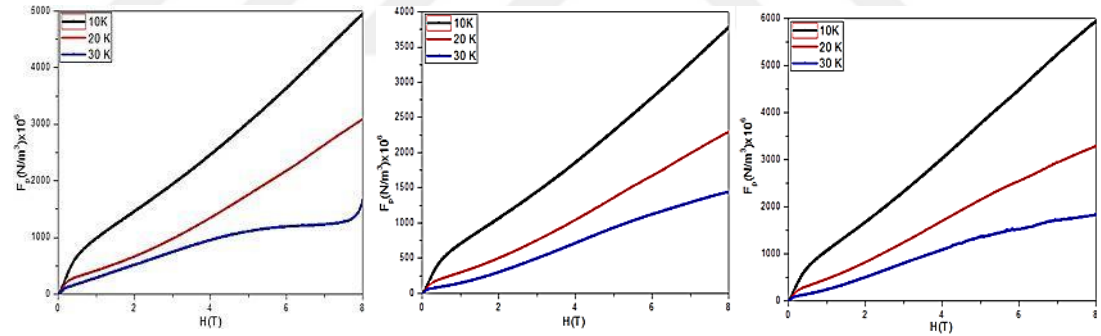
Şekil 4.119. 1000 °C ±2, ±5 ve ±10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf YBa₂Cu₃O_{7-δ} bileşiğin $F_p(N/m^3)$ - $H(T)$ eğrileri



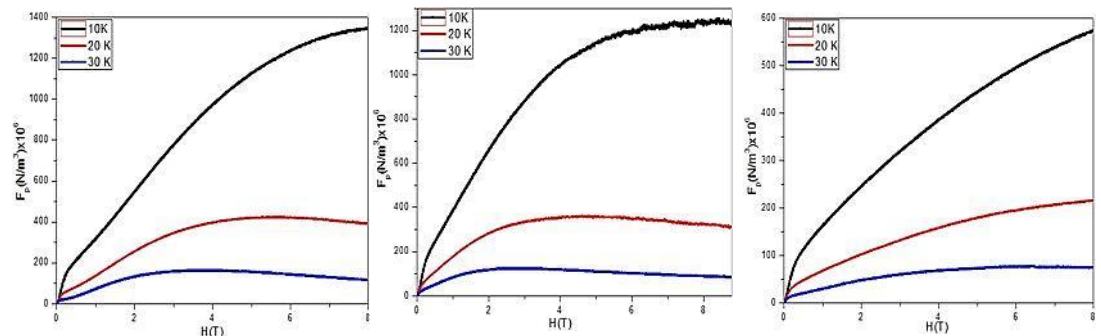
Şekil 4.120. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



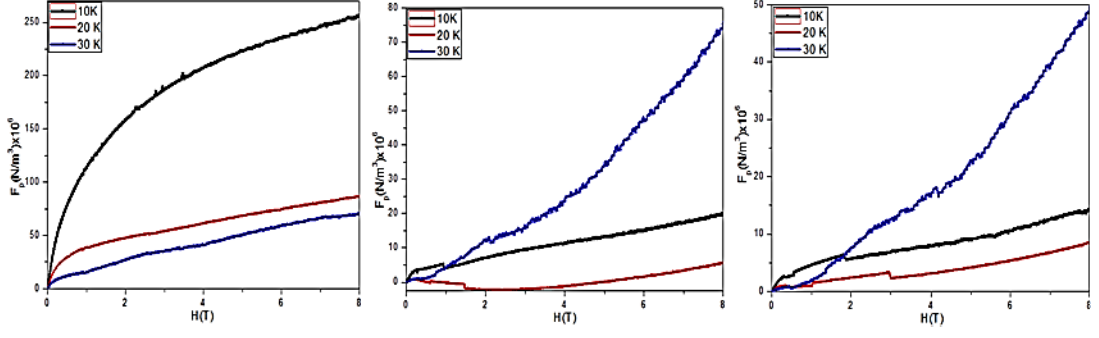
Şekil 4.121. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



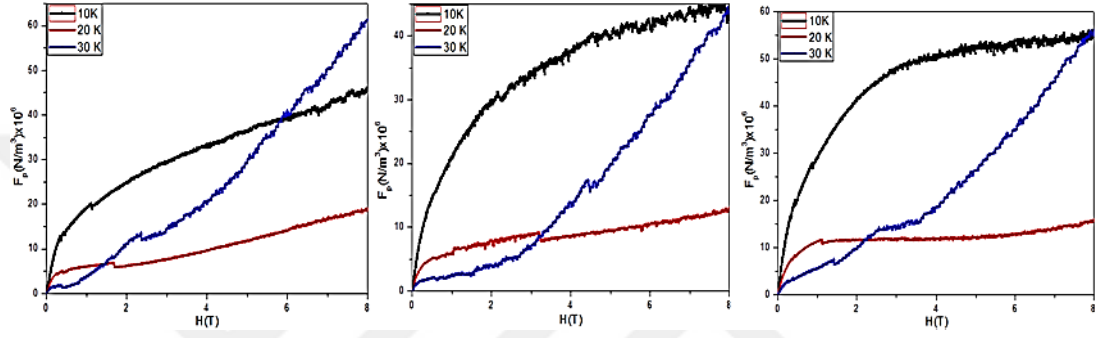
Şekil 4.122. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.05 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



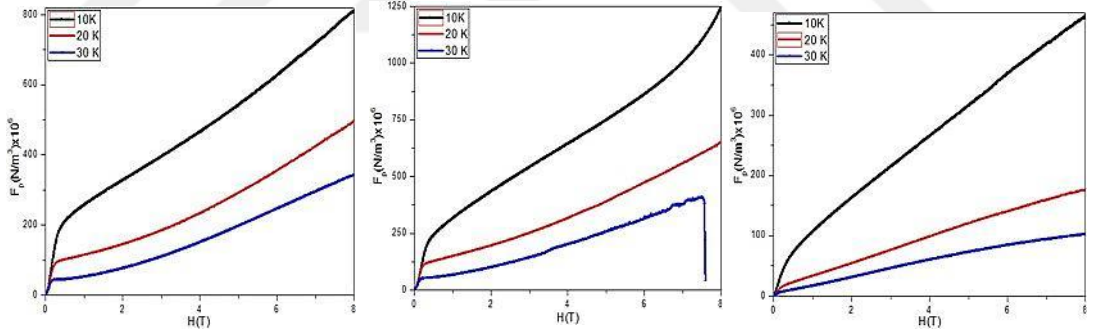
Şekil 4.123. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.1 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



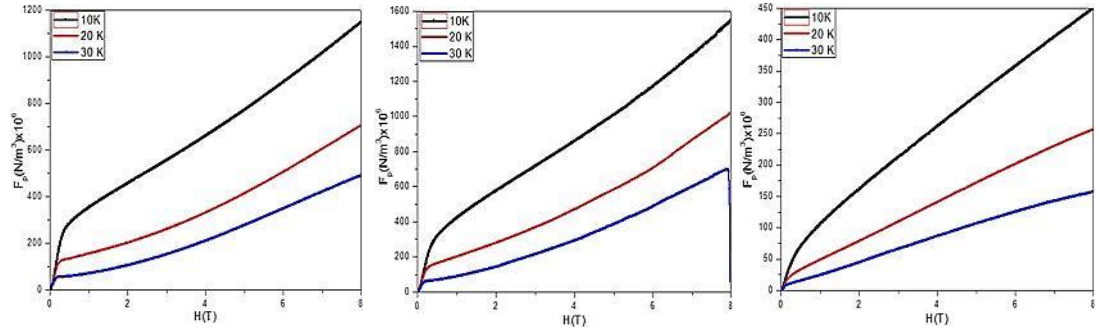
Şekil 4.124. 1000 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



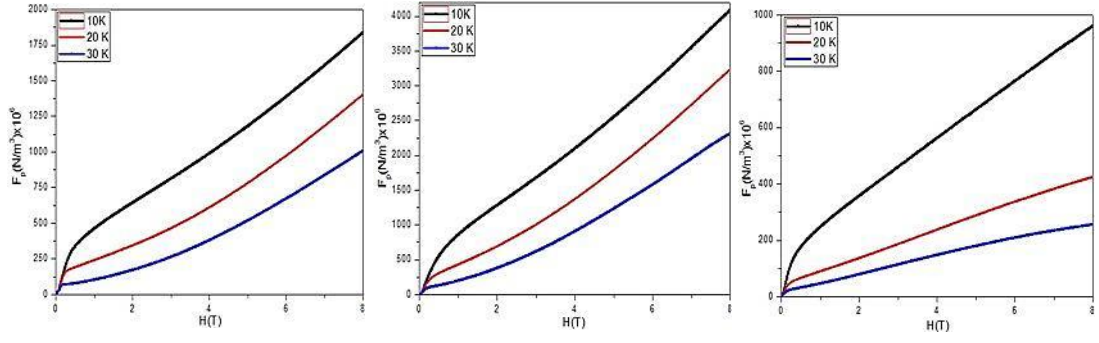
Şekil 4.125. 1020 °C ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.2 B katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



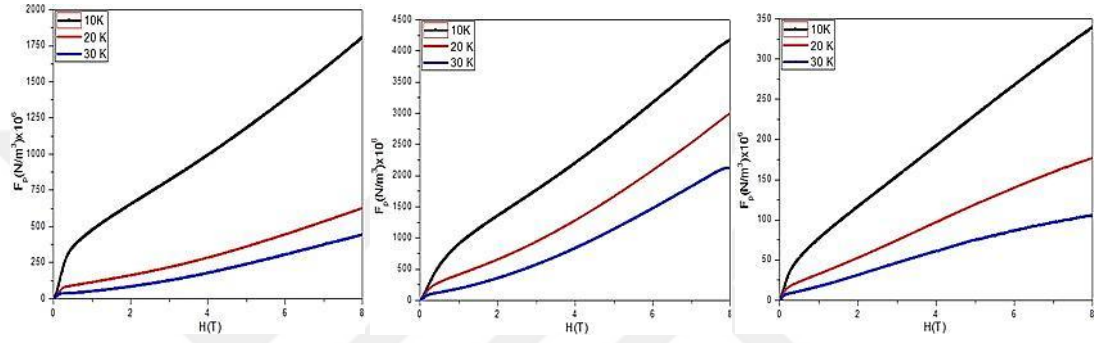
Şekil 4.126. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık değişiminde hazırlanmış 0.05 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



Şekil 4.127. 1000 °C ± 2 , 1000 °C ± 10 ve 1020 °C ± 10 °C/dak sıcaklık değişiminde hazırlanmış 0.1 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



Şekil 4.128. $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ ve $1020\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$ sıcaklık değişiminde hazırlanmış 0.2 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri



Şekil 4.129. $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ ve $1020\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C/dak}$ ısıtma hızlarında hazırlanmış 0.3 Tl katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin $F_p(\text{N/m}^3)$ - $H(\text{T})$ eğrileri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tezin temel hedefleri üretilen $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunesinin elektrik ve manyetik özelliklerinde, çivileme (pinning) kuvvetinde (F_p), kritik akım yoğunluğunda (j_c) iyileşmeler elde etmektir. Bu amaç doğrultusunda hem üretilen $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ stokiometrik yapısında bir değişime gidilmiş hem de en uygun sinterleme sıcaklığı ve ısıtma hızının tesbiti için bor ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak 900 °C, 920 °C, 1000 °C ve 1020 °C sıcaklıklarında ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarda saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiği, 1000 °C ve 1020 °C sıcaklıklarında ± 2 °C/dak, ± 5 °C/dak ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarda $x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ve 0.6 bor katkılı $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{B}_2\text{O}_3)_x$ bileşiği, 1000 ve 1020 °C sıcaklıklarda ± 2 °C/dak ve ± 10 °C/dak ısıtma hızlarda $x = 0.05, 0.1, 0.2$ ve 0.3 talyum katkılı $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{Tl}_2\text{O}_3)_x$ bileşiği üretilmiştir. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinin elektriksel özelliklerine bakıldığında en iyi yapılanmanın olduğu sıcaklık değerinin 1000 °C sıcaklık ± 5 °C/dak ısıtma hızında olduğu görülmüştür. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde manyetik özelliklerine bakıldığında en iyi yapılanmanın olduğu sıcaklık değerinin 1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısıtma hızında olduğu görülmüştür. Bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde elektrik özelliklerine bakıldığında en iyi yapılanmanın olduğu sıcaklık ve katkılama değeri 0.05 bor katkılı 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıtma hızında olduğu görülmüştür. Bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde manyetik özelliklerine bakıldığında en iyi yapılanmanın olduğu sıcaklık ve katkılama değerinin 0.05 bor katkılı 1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısıtma hızında olduğu görülmüştür. Talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde elektrik ve manyetik özelliklerine bakıldığında en iyi yapılanmanın olduğu sıcaklık ve katkılama değerinin 0.3 talyum katkılı 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıtma hızında olduğu görülmüştür. Bu durumda 1000 °C sıcaklıkta hazırlanan saf, bor katkılı ve talyum katkılı örneklerin elektrik ve manyetik özelliklerinin en iyi yapılanmada olduğu bulunmuştur.

5.1. XRD Sonuçları

Saf, talyum ve 0.05, 0.1 bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ örneklerin XRD grafiklerinde elde edilen piklerin $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ fazı ile uyum içerisinde olduğu ve ortorombik simetrisinin bozulmadığı bulunmuştur.

Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ örneklerinde 1000°C 'de (103) piki hariç daha şiddetli pikler meydana gelmiştir. Bor katkılanmasıyla XRD piklerinin şiddetlerinde 0.4 katkı oranına kadar belirgin bir değişiklik olmazken 0.4, 0.5 ve 0.6 bor katkılama pik şiddetleri belirgin bir şekilde artmıştır. Talyum katkılı örneklerin pik şiddetleri saf örneklerin pik şiddetlerinden belirgin bir şekilde büyük olduğu bulunmuştur.

Saf numunelerin sıcaklık değerlerine bağlı olarak a, b ve c örgü parametrelerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Bundan dolayı a ve b örgü parametreleri farkına bağlı Δ düzen parametrelerinde ve c örgü parametresine bağlı olan O_{7-y} oksijen stokiyometrisinde de belirgin bir değişiklik bulunmamıştır.

Bor katkılı numunelerin sıcaklık değerlerine katkı oranlarına bağlı olarak 0.2 bor katkı değerine kadar a, b ve c örgü parametrelerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. 0.2 katkı değerinden sonra a örgü parametresinde artma olduğu, b ve c örgü parametrelerinde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bundan dolayı a ve b örgü parametreleri farkına bağlı olan Δ düzen parametrelerinde azalma ve c örgü parametresine bağlı olan O_{7-y} oksijen stokiyometrisinde de belirgin bir değişiklik görülmemiştir. 0.2 bor katkısından sonra a örgü parametresinde artma yapının ortorombik yapıdan tetragonal yapıya geçtiğini gösterir. Bu durumda oksijen miktarının arttığını hole (boşluk) sayısının azaldığını ve yapının süperiletkenlik fazdan antiferromanyetik faza geçtiğini gösterir.

Talyum katkılı numunelerin sıcaklık değerlerine bağlı olarak b ve c örgü parametrelerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak, 0.1 talyum katkılı 1020°C sıcaklık $\pm 10^\circ\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında ve 0.3 talyum katkılı 1020°C sıcaklık $\pm 10^\circ\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında üretilen numunelerin a örgü parametresinde artma görülmüştür. Bundan dolayı a ve b örgü parametreleri farkına bağlı olan Δ düzen parametrelerinde azalma bulunmuştur. Diğer talyum katkılı bütün numunelerin Δ düzen parametrelerinde ve O_{7-y} oksijen stokiyometrisinde de belirgin bir değişiklik bulunmamıştır.

5.2. SEM Sonuçları

SEM sonuçlarına göre hem katkılı hem katkısız numunelerin rastgele yönelmiş taneciklerin oluşturduğu bir yüzey morfolojisi gösterdiği bulunmuştur. Örneklerin, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunesinin genel karakterine uygun bir yapılanma gösterdiği ve bu

sebeple bor ve talyum katkılanmasının numunenin yapısını çok fazla değiştirmediği bulunmuştur.

SEM görüntülerinde saf örneklerde tanecikler spiral formunda bir büyüme gösterirken ± 5 $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ hızda erimenin daha fazla olduğu görülmüştür. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğin’de spiral büyüme 1000 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ sıcaklıkta daha belirgin olduğu görülmüştür.

Bor katkılı numunelerde ± 2 , ± 5 ve ± 10 $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ sıcaklık atış- azalış hızlarında üretilen numunelerde hız arttıka tanecikler arasında erimenin arttığı görülmüştür. Bor katkılanmayla tanecikler arasında erimenin orantılı olduğu bulunmuştur. Bor katkılı örneklerin tanecik yapısının $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunesinin karakteristik özelliğine uyduğu ve bor katkılanması katı faz ile sıvı faz arasındaki kimyasal potansiyel enerjiyi azalttığı görülmüştür.

Saf ve bor katkılı örneklerin tanecik boyutlarına göre talyum katkılı örneklerin taneciklerinin daha küçük olduğu görülmüştür. 1000 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ sıcaklıkta talyum katkı oranı arttıka tanecik büyüklükleri de artmaktadır. Talyum katkılı numunelerde 1020 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ sıcaklıkta üretilen numunelerde tanecikler arasında erimenin fazla olduğu görülmüştür. Talyum katkılanmayla tanecikler arasında erimenin orantılı olduğu bulunmuştur. Talyum katkılı örneklerin tanecik yapısının $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunesinin karakteristik özelliğine uyduğu görülmüştür.

EDS analizine göre hazırlanan örneklerde Y, Ba, Cu, B ve Tl dışında herhangi bir elementin piki gözlenmemiştir. Bundan dolayı bileşiğin saf bir yapıda olduğu bulunmuştur.

5.3. Elektriksel lm Sonuçları

Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde tüm malzemelerin elektriksel direncinin sıcaklıkla doğru orantılı olarak T_c kritik sıcaklığa kadar azaldığı yani metalik özellik gösterdiği görülmüştür. Bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşikleri 0.05, 0.1 ve 0.3 bor katkıda metalik özellik gösterdiği görülmüştür. 0.2 bor katkılı numunelerde ise 1000 $^{\circ}\text{C}$ de yarı iletken, 1020 $^{\circ}\text{C}$ de ise metalik özellik göstermiştir. 0.4, 0.5, 0.6 bor katkılı numunelerde ise süperiletkenlik kaybolmuştur.

Numunelerde sıcaklık azaltılarak $T_{c,\text{başlangıç}}$ kritik geçiş sıcaklığına ulaşıldığında

yapı süperiletken faza geçerek elektriksel direnç aniden sıfıra düşmektedir. Elektriksel direnç-sıcaklık grafiğinde direncin sıfıra düşüş eğimi kristal yapı ve faz oluşum kusurlarına göre değişmektedir. Numuneye uygulanan alan arttırıldığında veya kristal kusurlu yapılarda grafiğin eğimi azalmaktadır. Tanecikler arasında zayıf bağlar ve tanecikler arasındaki safsızlıklarda bu durumun nedenlerindendir.

Saf numunelerde sinterleme sıcaklığı arttıkça eğimin arttığı yani taneciklerin birbirine daha kuvvetli bağlandığı görülmüştür. Eğimin en fazla olduğu yani taneciklerin daha sıkı bağlı olduğu numune 1020 °C sıcaklık ± 5 °C/dak ısıtma hızında üretilmiştir ve bu sıcaklıkta süperiletkenliğe geçişteki direnç en küçük değer çıkmıştır. Eğimin en az olduğu yani taneciklerin daha zayıf bağlı olduğu numune 900 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısıtma hızında üretilmiştir. Bu sıcaklıkta süperiletkenliğe geçişteki direnç en büyük değer çıkmıştır.

Bor katkılı numunelerde ise eğimin en fazla olduğu yani taneciklerin daha sıkı bağlı olduğu numune 0.05 bor katkılı numunelerdir ve 0.05 bor katkılı numunelerin süperiletkenliğe geçiş ortalama dirençleri en küçük çıkmıştır. Bor katkı oranı arttıkça eğimin azaldığı yani taneciklerin birbirine daha zayıf bağlandığı görülmüştür. Eğimin en az olduğu yani taneciklerin daha zayıf bağlı olduğu numune 0.3 bor katkılı numunelerdir. Bu katkı oranında ortalama direnç en büyük çıkmıştır. Bor katkılı numunelerin sinterleme sıcaklık değerine göre grafik eğimlerinde ve direnç değerlerinde dalgalanmalar olmuştur.

Katkı oranı fazla olan talyum katkılı numunelerde direnç-sıcaklık grafik eğimi daha fazla çıkmıştır. Bu, katkı oranının artırılmasının taneciklerin birbirine daha sıkı bağlanmasını arttırdığını gösterir. Direnç değerleride talyum katkı oranı ile daha düşük çıkmıştır.

Saf numunelerin $T_{c,başlangıç}$ kritik sıcaklıklarında belirgin bir fark görülmemiştir. 900 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıtma hızında, 920 °C sıcaklık ± 5 °C/dak ısıtma hızında ve 920 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısıtma hızında üretilen numunelerin $T_{c,sıfır}$ kritik sıcaklıkları düşük çıkmıştır. Bu numunelerin tanecik bağlanma kuvvetlerinin zayıf olduğu gösterir.

Bor katkılı numunelerde $T_{c,başlangıç}$ kritik sıcaklıklarında 0.2 katkı oranına kadar belirgin bir fark görülmemiştir. 0.2 katlı oranından sonra dalgalanmalar olmuştur.

$T_{c,sıfır}$ kritik sıcaklığında ise 0.1 katkı oranına kadar belirgin bir değişiklik olmamıştır. Bu durum 0.1 katkıdan sonra tanecikler arasında bağların zayıfladığını ve 0.2 katkıdan sonra yapının bozulduğunu göstermektedir.

Talyum katkılı numunelerde $T_{c,başlangıç}$ kritik sıcaklıklarında belirgin bir fark görülmemiştir. Ancak, $T_{c,sıfır}$ kritik sıcaklığı ise 0.1 katkı oranı 1020 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısınma hızında küçük çıkmıştır. 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısınma hızında üretilen talyum katkılı numunelerde, katkılamanın yapıyı bozmadığı ve talyum katkı oranı arttıkça taneciklerin birbirine daha sıkı bağlandığı bu çalışmada görülmüştür.

5.4. Manyetik Ölçüm Sonuçları

1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısınma hızında üretilen 0.05 bor katkılı $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ numunesinin M-H grafiklerinde histerisiz eğrisinin en geniş olduğu görülmüştür. Bor katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça histerisiz eğrisinin genişliğinin azaldığı bulunmuştur. 0.2 bor katkılı numunede diamanyetik özelliğin yanında paramanyetik özellikte görülürken 0.3 bor katkıda diamanyetik özellik kaybolmuştur. Bor katkısı arttıkça diamanyetik özellikten paramanyetik özelliğe geçiş olmuştur. M-H ölçümlerine göre bor katkılanmasıyla numune diamanyetik-paramanyetik faz geçişi göstermiştir. Bu durum borun paramanyetik dipol momentlere sahip olmasından dolayı olmuştur. Talyum katkılı numuneler ise diamanyetik özellik göstermiştir. Ancak 1020 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısınma hızında üretilen talyum katkılı numunelerde paramanyetik özellikte görülmüştür.

Numunelerde M-H grafiklerinde manyetizasyon eğrisinin oluşmasında pikin yaklaşık $H = 0$ 'da oluştuğu görülmüştür. Bu durum numunelerin homojen bir yapıya sahip olduğunu gösterir.

Histerisiz eğrilerinde gözlenen diğer bir özellik ise sıcaklık arttıkça ilmekler arasındaki kalan alanın azaldığı görülmüştür. İlmekler arasındaki alanın azalma sebebi sıcaklık arttıkça akı tüplerinin denge konumu etrafında titreşerek hareket etmeleri sebebiyle manyetik alanın dışarlama etkisinin küçülmesi ve diamanyetik etkinin azalmasıdır.

Bu çalışmada 1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısınma hızında üretilen saf numuneler için, 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısınma hızında üretilen talyum katkılı numuneler için, 1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısınma hızında üretilen bor katkılı

numuneler için ideal sıcaklık ve 0.05 bor katkı, 0.3 talyum katkı ideal katkılama oranı olarak bulunmuştur.

M-T grafiğine göre saf ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'da sıcaklık azalırken manyetizasyon T_c sıcaklığına kadar sabit kaldığı ve T_c değerinden sonra numune diamanyetik madde gibi davranarak aniden negatif manyetizasyon oluşturduğu görülmüştür. Bu negatif manyetizasyon sıcaklığın azalması ile negatif yönde artmış ve belli bir değerden sonra sabit kalmıştır. Bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'da bor oranı 0.05 ve 0.1 olduğunda saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'da olduğu gibi manyetizasyon oluşturmuştur. Bor oranı 0.2 ve 0.3 olduğunda sıcaklık T_c kritik sıcaklığına kadar azaltılırken manyetizasyonun pozitif yönde arttığı gözlenmiştir ve T_c değerinden sonra numune diamanyetik madde gibi davranarak aniden negatif yönde manyetizasyon oluşturmuştur. Bu manyetizasyon sıcaklığın azalması ile negatif yönde artmakta ve belli bir değerden sonra tekrar pozitif yönde arttığı gözlenmiştir. Bu durum bor katkı oranı 0.2 ve 0.3 olduğunda kristal yapıya zarar verdiğini gösterir. Bor katkı oranı 0.4, 0.5 ve 0.6 olduğunda negatif yönde manyetizasyon oluşmamıştır.

1000 °C ve 1020 °C sıcaklıklarda üretilen Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ numunelerin kritik akım yoğunluğu 900 °C ve 920 °C değerlerine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Bor katkılama yapıldığında ise 0.05'de saf duruma göre kritik akım yoğunluğu artmakta fakat bor katkı oranı arttırıldığında kritik akım yoğunluğu azalmaktadır. 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 oranlarda bor katkılı olduğunda ise kritik akım yoğunluğu oluşmamaktadır. Talyum katkılama yapıldığında ise 0.05'de saf duruma göre kritik akım yoğunluğu azalmakta fakat talyum katkı oranı arttırıldığında kritik akım yoğunluğu değerinde artma olmaktadır. Bunun nedeni talyum katkısının tanecikleri daha sıkı bağlaması ve ek çivileme merkezleri oluşturmasıdır. 1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısıma hızında saf ve 0.05 bor katkılı numuneler için ideal sıcaklık olduğu bulunmuştur. 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıma hızında 0.3 talyum katkılı numuneler için ideal sıcaklık katkılama oranı olduğu bulunmuştur.

Hazırlanan numunelerde uygulanan manyetik alan arttırıldığında aktivasyon enerjileri azalmaktadır. Saf numunelerde 900 °C'de üretilen numunelerin aktivasyon enerjilerinin büyük, 920 °C'de üretilenlerin ise küçük olduğu görülmüştür. Bor katkılama oranları arttırıldığında ise ortalama aktivasyon enerjilerinde azalma olduğu görülmüştür. Bor katkılı numunelerin aktivasyon enerjilerinin sıcaklığa bağlı

değişimlerine bakıldığında ise aktivasyon enerjisinde bir dalgalanma olduğu bulunmuştur. Katkılamaya bağlı olarak 0.2 ve 0.3 oranlarında talyum katkılı ve 0.05 oranında bor katkılı numunelerde aktivasyon enerji değerleri büyük bulunmuştur.

Saf, bor ve talyum katkılı numunelerde çivileme kuvvetinin uygulanan manyetik alana bağlı değişimi incelendiğinde 10 K'de çivileme kuvvetinin büyüklüğü 30 K'deki çivileme kuvvetinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni sıcaklıkla vortekslerin titreşim yani kinetik enerjisi artacağı için çivileme kuvveti azalır. Saf $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'larda çivileme kuvvetleri 900 °C, 920 °C sıcaklıklara göre 1000 °C ve 1020 °C'de daha büyük olmuştur. Saf numunelerde en büyük çivileme kuvveti ise 1020 °C ± 5 °C/dak'de üretilen numunede olduğu görülmektedir. Bor katkılı numunelerde çivileme kuvveti 0.05 bor katkılamada saf numuneye göre artarken, 0.1, 0.2 ve 0.3 katkı oranı ile çivileme kuvveti azalmıştır. Talyum katkılı numunelerde talyum katkı oranı arttıkça çivileme kuvvetide artmıştır. 0.2 ve 0.3 talyum katkılı numunede çivileme kuvveti 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıtma hızında saf numuneye göre daha büyük olduğu bulunmuştur.

Saf, bor ve talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiklerinde daha iyi homojen fazın ve buna bağlı olarak daha iyi süperiletkenlik yapının oluştuğu sıcaklık değeri 1000 °C olduğu görülmüştür. Bor katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde en iyi yapılanmanın oluştuğu değer 0.05 bor katkılı 1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısıtma hızında olduğu bulunmuştur. Bor katkılama oranı arttıkça yapının homojenliği bozularak süperiletkenlik özelliğın azaldığı görülmüştür. Talyum katkılı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bileşiğinde en iyi yapılanmanın oluştuğu değer 0.3 talyum katkılı 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıtma hızında olduğu bulunmuştur. Talyum katkılama oranı arttıkça yapının homojenliği artarak süperiletkenlik özelliğın arttığı görülmüştür.

Katıhal reaksiyon yöntemi kullanılarak $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{B}_2\text{O}_3)_x$ bileşiğinde $x = 0.05$ bor katkılamadan daha küçük katkılamalarla 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıtma hızında elektriksel, 1000 °C sıcaklık ± 2 °C/dak ısıtma hızında manyetik özelliğı geliştirilebilir. $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta})_{1-x}(\text{Tl}_2\text{O}_3)_x$ bileşiğinde $x = 0.3$ talyum katkılamadan daha büyük katkılamalarla 1000 °C sıcaklık ± 10 °C/dak ısıtma hızında elektrik ve manyetik özellikleri geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] H.K. Onnes, *The Superconductivity of Mercury*, **Leiden Commun.** 120b (1911) 1479-1481.
- [2] F.J. Owens, C.p.Jr. Poole, *The New Superconductors*, **Kluwer Academic Publishers**, 31 (2002) 121-158.
- [3] P. Müller, A.V. Ustinov, *The Physics of Superconductors*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg Newyork, 5 (1997) 879.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, *Ein neuer Effekt bei eintritt der Supraleitfähigkeit*, **Naturwissenschaften**, 21 (1933) 787.
- [5] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, McGraw Hill New York, NY, 1996.
- [6] E. Housecroft and A.G. Sharpe, *organic Chemistry Catherine*, Pearson PrenticeHall, third edition 2008, 213-125.
- [7] J. Bardeen, L.N. Cooper, and J.R. Schrieffer, *Theory of Superconductivity*, **Phys. Rev.**, 108 (1957) 1175- 1204.
- [8] A.A. Abrikosov, *On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group*, **Sov Phys JETP-Ussr.**, 5 (1957) 1174.
- [9] J.G. Bednorz and K.A. Muller, *Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system*, **Z Phys B Cond Mat.**, 64 (1986) 189.
- [10] M. K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Torng, P.H. Hor, R.L. Meng, L. Gao, Z.J. Huang, Y.Q. Wang, and C.W. Chu, *Superconductivity at 93 K in a New Mixed- Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure*, **Phys Rev Lett.** 58 (1987) 908.
- [11] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutumi and T. Asano, *Superconductivity at 100 K in Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O*, **Jpn. J. Appl. Phys.**, 27 (1988) 209.
- [12] Z.Z. Sheng and A.M. Hermann, *Bulk superconductivity at 120 K in the Tl-Ca/Ba-Cu-O system*, **Nature**, 332 (1988) 138.
- [13] A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo, and H. R. Ott, *Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O system*, **Nature**, 363 (1993) 56.
- [14] G.F. Sun, K. W. Wong, B. R. Xu, Y. Xin, and D. F. Lu, *Enhancement of $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ by Tl substitution*, **Phys. Lett. A**, 192 (1994) 122.
- [15] C.W. Chu, L. Gao, F. Chen, Z. J. Huang, R. L. Meng and Y. Y. Xue, *Superconductivity above 150 K in $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ at high pressures*, **Nature**, 365 (1993) 323.
- [16] L. Gao, Y. Y. Xue, F. Chen, Q. Xiong, R. L. Meng, D. Ramirez, C. W. Chu, J. H. Eggert and H. K. Mao, *Superconductivity up to 164 K in $HgBa_2Ca_{m-1}Cu_mO_{2m+2+\delta}$ ($m=1, 2$, and 3) under quasi hydrostatic pressures*, **Phys. Rev. B**, 50 (1994) 4260.
- [17] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, *Superconductivity at 39 K in magnesium diboride*, **Nature** 410 (2001) 63.
- [18] Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, R. Kawamura, H. Yanagi, T. Kamiya, and H. Hosono, *Iron-Based Layered Superconductor: $LaOFeP$* , **J. Am. Chem. Soc.** 128 (2006) 10012.
- [19] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, *Iron-Based Layered Superconductor $La[O_{1-x}F_x]FeAs$ ($x = 0.05-0.12$) with $T_c = 26$ K*, **J. Am.**

- Chem. Soc.** 130 (2008) 3296.
- [20] C.P.Jr. Poole, H.A. Farach, R.J. Crewick, *Superconductivity*, **Elsevier Ltd, Academic Press, Neyherland**, 25 (1995) 196.
 - [21] Z. Zhao, C. P. Poole, T. Datta and H. A. Farach, *Copper Oxide Superconductors*, Wiley, New York, 1987, 274.
 - [22] A. Mann, *High-temperature superconductivity at 25: Still in suspense*, **Nature** 475 (2011) 280.
 - [23] P. Charles, Jr. Poole, *Handbook of Superconductivity*, Department of Physics and Institute of Superconductivity University of South Carolina, 2000, 544.
 - [24] K. Yu, *Vortex Dinamics in Nanostructured Superconducting Weak-Pinning Channels*, PhD Thesis, B. S. Central University, 2010.
 - [25] E. Maxwell, *Isotope Effect in the Superconductivity of Mercury*, **Phys. Rev.** 78 (1950) 477.
 - [26] Khawaja Zakaullah, *Preparation and characterization of Bi-based high – Tc superconductors*, PhD Thesis, Ghulam Ishaq Khan Institute, Pakistan, 2008
 - [27] Anonymous (2017).http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_fall2003.web.dir/T.J.Barry/bcstheory.html, (on-line access on 17 March, 2017).
 - [28] A. Mourachkine, *High Temperature Superconductivity in Cuprates*, Kluwer Academic Publishers, 2002, 29-32.
 - [29] P.J. Ford and G.A. Saunders, *The Rise of the Superconductors*, Taylor & Francis, 2004, 113-130.
 - [30] D.J. Scalapino, *The case for dx^2-y^2 pairing in the cuprate superconductors*, **Physics Reports** 250 (1995) 329-365.
 - [31] A. Marouchkine, *Room-Temperature Superconductivity*, Cambridge International Science Publishing, 2004, 32-36.
 - [32] J. Hook, E.H. Hall, *Katıların Fiziği*, Literatür Yayınları, İstanbul, 1999, 290-291.
 - [33] C Kittle, *London Interaction*, Introduction to Solid State Physics. J. Wiley & Sons, 2005, 53-56.
 - [34] S.I.Ronald, *Superconductivity In Small Systems*, PhD Thesis, University of Rochester, 1967.
 - [35] J.R. Waldram, *Superconductivity of metals and cuprates*, Taylor & Francis, Bristol, UK, 1996,13-27.
 - [36] M. Tinkham, *Introduction to superconductivity*, Dover, Mineola, New York, second edition, 1996, 18-20.
 - [37] A.C. Rose-Innes, E.H. Rhoderic, *Introduction to superconductivity*, Pergamon, 1991, 5-30
 - [38] P. Müller, A.V. Ustinov, *The Physics of Superconductors*, Springer, 1997, 25.
 - [39] V.L. Ginzburg and L.D. Landau, *Ginzburg-Landau Theory*, Zh. Ekxperim. i. Teor. Fiz. 20, 1950, 1064.
 - [40] F. London and H. London, *The electromagnetic equations of the supraconductor*, **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society, 149 (1935) 71-88.
 - [41] Ayşe Belkız KARCI, *Süperiletken YBCO İnce Filmlerin Elektriksel ve Manyetik Özelliklerinin Üretim Parametrelerine Bağlılığının İncelenmesi*,

Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Türkiye, 2009.

- [42] A. Abrikosov, *Type II superconductors and the vortex lattice*, *Reviews of Modern Physics*, **Nobel Lecture**, 76 (2004) 975-979.
- [43] L. Äkäslompolo, *Critical magnetic field of a superconductor*, (2012), <http://physics.aalto.fi/groups/nanospin/facilities/pulsed-laser-deposition/critical/>, (on-line access on 7 May, 2015).
- [44] K. Fossheim and A. Sudbø, *Superconductivity*, Physics and Applications, Wiley, 2004, 171-190.
- [45] D. Publications, *Introduction to superconductivity*, Michael Tinkham, Inc., second edition 1996, 97-125.
- [46] A. Marouchkine, *Room-Temperature Superconductivity*, Cambridge International Science Publishing, 2004, 32-36.
- [47] R. Alexandrov, *Theory of Superconductivity*, IOP, Philadelphia, 2003, 90-104.
- [48] R. Wesche, *High-Temperature Superconductors*, Materials, Properties, and Applications, Kluwer Academic Publisher Boston, 1998, 203-230.
- [49] M. Murakami et al., *Flux Pinning and Critical Current in Melt Processed YBCO superconductors*, **Supercond. Sci. Technol.**, 4 (1991) 43-50.
- [50] R.E. Throckmorton, *Nuclear magnetic resonance in optimally-doped YBCO and the electronic phases of bilayer graphene*, PhD Thesis, The Florida State University, 2012.
- [51] ÖZTÜRK Kemal, *Gadolinium ve İterbiyum Difüzyonunun $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Bileşiğinin Yapısal ve Süperiletkenlik Özelliklerine Etkisi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2006.
- [52] P. Charles, Jr. Poole, *Handbook of Superconductivity*, Department of Physics and Institute of Superconductivity University of South Carolina, 2000, 556-565.
- [53] Ruslan Prozorov, *Static and dynamic irreversible magnetic properties of high temperature superconductors*, PhD Thesis, Submitted to the Senate of Bar-Ilan University Ramat-Gan, Israel, 1998.
- [54] M. Murakami et al., *Flux pinning and critical currents in melt processed YBaCuO superconductors*, **Supercond. Sci. Technol.**, 48 (1991) 43-50.
- [55] D. Dew-Huges, *The critical current of superconductors: an historical review*, **American Institute of Physics**, 27 (2001) 9-10.
- [56] D.T. Dzhafarov, *Diffusion in High-Temperature Superconductors*, **Phys. Stat. Sol.**, 158 (1996) 335.
- [57] N. Doiron-Leyraud, C. Proust, D. LeBoeuf, J. Levallois, J.B. Bonnemaïson, R. Liang, D. A. Bonn, W. N. Hardy, and L. Taillefer, *Quantum oscillations and the Fermi surface in an underdoped high- T_c superconductor*, **Nature (London)**, 447 (2007) 565.
- [58] Wendell Alexander Huttema, *Superconducting electrodynamics of underdoped Yttrium Barium Cuprate*, PhD Thesis, Simon Fraser University, 2010.
- [59] L.F. Mattheiss, *Electronic band properties and superconductivity in $La_{2-y}X_yCuO_4$* , **Physics Review Letters**, 58 (1987) 1028.
- [60] J. Yu, A.J. Freeman, and J.H. Xu, *Electronically driven instabilities and*

- superconductivity in the layered $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ perovskites, **Physics Review Letters**, 58 (1987) 1035.
- [61] J. Orenstein and A.J. Millis, *Advances in the physics of high-temperature superconductivity*, **Science**, 288 (2000) 468.
 - [62] D. A. Bonn, *Are high-temperature superconductors exotic?* **Nature Physics**, 2(3) (2006) 159.
 - [63] S. Sachdev and B. Keimer, **Physics Today** **64**, 2 (2011) 29.
 - [64] R.F. Kiefl, J. H. Brewer, J. Carolan, P. Dosanjh, W. N. Hardy, R. Kadono, J. R. Kempton, R. Krahn, P. Schleger, B. X. Yang, Hu Zhou, G. M. Luke, B. Sternlieb, Y. J. Uemura, W. J. Kossler, X. H. Yu, E. J. Ansaldo, H. Takagi, S. Uchida, and C. L. Seaman, *Muon-spin-rotation study of magnetism in $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ below 90 mK*, **Physical Review Letters**, 63(19) (1989) 2136.
 - [65] A. Weidinger, Ch. Niedermayer, A. Golnik, R. Simon, E. Recknagel, J.I. Budnick, B. Chamberland, and C. Baines. *Observation of magnetic ordering in superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ by muon spin rotation*, **Physical Review Letters**, 62(1), (1989) 102.
 - [66] C. Panagopoulos, J.L. Tallon, B.D. Rainford, T. Xiang, J.R. Cooper, and C.A. Scott, *Evidence for a generic quantum transition in high- T_c cuprates*, **Physical Review B**, 66(6) (2002) 064501.
 - [67] W.W. Warren, R. E. Walstedt, G. F. Brennert, R. J. Cava, R. Tycko, R. F. Bell, and G. Dabbagh, *Cu spin dynamics and superconducting precursor effects in planes above T_c in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.7}$* , **Physical Review Letters**, 62(10) (1989) 1193.
 - [68] J. Orenstein, G.A. Thomas, A. J. Millis, S.L. Cooper, D.H. Rapkine, T. Timusk, L.F. Schneemeyer, and J.V. Waszczak, *Frequency and temperature-dependent conductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ crystals*, **Physical Review B**, 42(10) (1990) 6342.
 - [69] C.C. Homes, T. Timusk, R. Liang, D.A. Bonn, and W.N. Hardy, *Optical conductivity of c axis oriented $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.70}$: Evidence for a pseudogap*, **Physical Review Letters**, 71(10) (1993) 1645.
 - [70] A.P. Mackenzie, S.R. Julian, D.C. Sinclair, and C.T. Lin, *Normal-state magnetotransport in superconducting $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ to millikelvin temperatures*, **Physical Review B** 53(9) (1996) 5848.
 - [71] H. Marwanitani, *Transport and Magnetic Properties of the New High Temperature Superconductors $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{(3-x)}\text{Fe}_x\text{O}_{10}$ and $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{(3-x)}\text{Zn}_x\text{O}_{10}$* , Phd Thesis, American University of Beirut, 2005.
 - [72] J. Ayache, *Grain Boundaries in high temperature superconducting ceramics*, **Philos. Mag.**, 86(15) (2006) 2193-2239.
 - [73] D. Dew-Huges, *The critical current of superconductors:an historical review*, **American Institute of Physics**, 27 (2001) 9-10.
 - [74] R. Jarvinen, K. Kacprzak, S. Valtonen, *Superconductivity and High T_c Superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$* , FYSZ460 Advanced Laboratory Work, 2008, 150-200.
 - [75] W. Buckel, R. Kleiner, *Superconductivity Fundamentals and Applications*, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004, 161-178.
 - [76] Katarzyna Dlugon, *Superconductivity in carbon nanomaterials*, Master of

Science In Chemistry, Northeastern Illinois University, 2015.

- [77] L. Jacak and L. Bujkiewicz, *Pairing Symmetry and Isotope Effect in High-Temperature Superconductor*, **Modern Phys Lett. B**, 9 (1995) 1017.
- [78] J.S.V. Dyke, F. Massee, M.P. Allan, J. C.S. Davis, C. Petrovic, and D.K. Morr, *Direct evidence for a magnetic f -electron-mediated pairing mechanism of heavyfermion superconductivity in CeCoIn_5* , **PNAS**, 111 (2014) 32.
- [79] T. Siegrist, S. Sunshine, D.W. Murphy, R.J. Cava and S.M. Zahurak, *Crystal structure of YBCO system*, **Phys. Rev. B**, 35 (1987) 7137.
- [80] T. K. Worthington, W. J. Gallagher and T. R. Dinger, *Anisotropic nature of high-temperature superconductivity in single-crystal $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$* , **Phys. Rev. Lett.**, 59 (1987) 1160.
- [81] D.C. Larbalestier, A. Gurevich, D.M. Feldmann and A.A. Polyanskii, *High T_c superconducting materials for electric power applications*, **Nature**, 414 (2001) 368.
- [82] P. Marsh, R.M. Fleming, M.L. Mandich, A.M. Desantolo, J. Kwo, M. Hong and L.J. Martinezmiranda, *Crystal structure of the 80 K superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$* , **Nature**, 334 (1988) 141.
- [83] D.S. Ginley and D.A. Cardwell, *Handbook of Superconducting Materials*, Taylor & Francis, 2002, 891.
- [84] P. Bordet, C. Chaillout, J. Chenavas, J.L. Hodeau, M. Marezio, J. Karpinski and E. Kaldis, *Structure determination of the new high-temperature superconductor $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{14+x}$* , **Nature**, 334 (1988) 596
- [85] J. D. Jorgensen, B.W. Veal, A.P. Paulikas, L.J. Nowicki, G.W. Crabtree, H. Claus and W.K. Kwok, *Structural properties of oxygen-deficient $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$* , **Phys. Rev. B**, 41 (1990) 1863.
- [86] P. Benzi, E. Bottizzo and N. Rizzi, *Oxygen determination from cell dimensions in YBCO superconductors*, **J. Cryst. Growth**, 269 (2004) 625.
- [87] G. Calestani and C. Rizzoli, *Crystal structure of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductor by single-crystal X-ray diffraction*, **Nature**, 328 (1987) 606.
- [88] A. Kulpa, A.C.D. Chaklader, N.R. Osborne, G. Roemer, B. Sullivan, D.L. Williams, *Influence of oxygen ordering and sintering temperatures on the superconducting transition temperature of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ compound at fixed oxygen content x higher than $x = 6.8$* , **Solid State Commun.** 71 (1989) 265–268.
- [89] P. Benzi, E. Bottizzo, N. Rizzi, *Oxygen determination from cell dimensions in YBCO superconductors*, **J. Cryst. Growth**, 269 (2004) 625–629.
- [90] V. Breit, P. Schweiss, R. Hauff, H. Wuhl, H. Claus, H. Rietschel, A. Erb and G. M. Vogt, *Density-functional theory and strong interactions: Orbital ordering in Mott-Hubbard insulators*, **Phys. Rev. B**, 52 (1995) 15727.
- [91] V.K. Vlasko-Vlasov et al., *Visual representation of the Meissner expulsion of the magnetic flux in YBaCuO single crystals*, **Superconductivity, Physics, Chemistry, Technology**, 5 (1917) 11.
- [92] K. Brodt, H. Fuess, E. F. Paulus, W. Assmus, and J. Kowalewski, *Untwinned single crystals of the high-temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$* , **Acta Crystallogr C**, 46 (1990) 354.
- [93] D.T. Dzhaferov, *Diffusion in High-Temperature Superconductors*, **Phys. Stat.**

Sol., 158 (1996) 335.

- [94] J.D. Jorgensen et al., *Oxygen ordering and the orthorhombic-to-tetragonal phase transition in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$* , **Physical Rev. B**, 36 (7) (1987) 3608-3616.
- [95] D.J.C. Jackson et M.P. Das, *Melting of the flux-Line-Lattice*, **Superconductor science and technology**, 9(9), 1996, 713-727.
- [96] D.S. Fisher, M.P.A. Fisher and D. A. Huse, *Thermal fluctuations, quenched disorder, phase transitions, and transport in type-II superconductors*, **Phys. Rev. B**, 43 (1991) 130.
- [97] D.J.C. Jackson, M.P. Das, *Melting of the Flux Line*, **Supercond. Sci. Technol.**, 9, (1996) 713-727.
- [98] T. Horide, K. Matsumoto, P. Mele, Y. Yoshida, A. Ichinose, R. Kita, S. Horii and M. Mukaida, *Control of the glass-liquid transition temperature in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films*, **Phys. Rev. B**, 79 (2009) 092504.
- [99] W. Kong, I. Kong, M.S. Hamdan, S. Radiman, R. Abd-Shukor, *AC Susceptibility and Superconducting Properties of Graphene Added $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$* , **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, 26 (2017) 1-5.
- [100] M. Dogruer et al., *Importance of Magnetoresistivity Properties and Decrement of the Flux Pinning Energy in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Bulk Superconductors Doped with Gd Nanoparticles*, **J Supercond. Nov. Magn.**, 27 (2014) 681–686.
- [101] Y. Slimani et al., *Excess Conductivity Study in Nano- CoFe_2O_4 -Added $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ and $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18\pm x}$ Superconductors*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 28 (2015) 3001–3010.
- [102] M. Mahtali, E.H. Boudjema, A. Nouicer, *Magnetic and Electrical Properties of Superconducting Ceramic $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Co-doped with Ca and Zn*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 26 (2013) 1129–1133.
- [103] R. Poonam, J. Rajveer, V.P.S. Awana, *AC Susceptibility Study of Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7:\text{Ag}_x$ Bulk Composites ($x = 0.0-0.20$): The Role of Intra and Intergranular Coupling*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 26 (2013) 2347–2352.
- [104] E. Uysal • A. Ozturk • S. Kutuk • S.Çelebi, *Effects of Lu Doping on the Magnetic Behavior of YBCO Superconductors Prepared by MPMG Method*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 27 (2014) 1997–2003.
- [105] M. Sahoo, D. Behera, *Inhomogeneity Induced Conductivity Fluctuation in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ Composite*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 26 (2013) 3017– 3025.
- [106] A. Yıldız, K. Kocabaş, G. Akyüz, *Dependence of the Structural, Electrical and Magnetic Properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Bulk Superconductor on the Ag Doping*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 25 (2012) 1459-1467.
- [107] Y. Wanmin et al., *Effect of Excess Y_2O_3 Addition on the Physical Properties of Melt Processed YBCO Bulks*, **Science in China Ser. G. Physics and Astronomy**, 47 (2004) 17-23.
- [108] P.P. Rejith et al., *Enhancement of Vortex Pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ - BaHfO_3 Superconductor-Insulator System*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 25 (2012) 1817-1822.
- [109] W.M. Yang et al., *Effect of Na-dopant on the Levitation Force of Single*

- Domain YBCO Bulk Superconductors Fabricated by TSMTG Process*, **J. Supercond. Nov. Magn.**, 24 (2011) 2211-2214.
- [110] S. Eckroad, *Superconducting Power Equipment, Technology*, EPRI, Palo Alto, CA, 2010.
 - [111] W.V. Hassenzahl et al., *Electric power applications of superconductivity*, **Proceedings of the IEEE**, 92(10) (2004) 1655 – 1674.
 - [112] S. Eckroad, *Superconducting Power Cables : Technology Watch 2009*, EPRI, Palo Alto, CA 2009.
 - [113] P. Luo, L.H. Yao, S.Y. Yang, and G.Z. Ni, *Application Areas of Superconductors*, **Appl Electromagnetics and Mechanics**, 13 (2009) 183.
 - [114] C.K. Yang, C.S. Hwang, J.C. Jan, F.Y. Lin, C.H. Chang, M. Fee, and M. Christian, *Design, Construction, and Performance of the TPS Accelerator Magnets*, **IEEE Trans Appl Supercon**, 22(3) (2012) 4002304.
 - [115] J. Pyrhonen, *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons, 10:1002 (2008) 9780470740095.
 - [116] S.D. Umans, *Transient performance of a high-temperature-superconducting generator*, **Miami, FL, United states**, June 3-6, (2009), 451–457.
 - [117] G.G. Sotelo, D.H.N. Dias, R. de Andrade, and R.M. Stephan, *Tests on a Superconductor Linear Magnetic Bearing of a Full-Scale MagLev Vehicle*, **IEEE Trans Appl Supercon**, 21 (2011) 1464.
 - [118] T. Janowski et al., *Fault current limitation in power network by the superconducting transformers made of 2g hts*, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 21(3) (2011) 1413 – 1416.
 - [119] N. Hayakawa et al., *Progress in development of superconducting fault current limiting transformer (sfclt)*, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 21(3) (2011) 1397–1400.
 - [120] C.F. TSAI, *Enhanced flux-pinning properties in superconducting YBa₂Cu₃O_{7-δ} thin films with nanoengineering methods*, Phy Physics, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University, 2013.
 - [121] G. Snitchler, B. Gamble, and S. S. Kalsi, *The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor*, **IEEE Trans Appl Supercon**, 15 (2005) 2206.
 - [122] Anonymous (2018). <http://www.ornl.gov>, (on-line access on 27 May, 2018).
 - [123] L. Y. Xiao and L. Z. Lin, *Power System Protection*, **IEEE Trans Appl Supercon**, 17 (2007) 2355.
 - [124] Majid Siahraang, *Numerical elektromagnetic modeling of HTS power transmission cables*, PhD thesis, Universit'e De Montr'eal 'Ecole Polytechnique De Montr'eal, 2011.
 - [125] P. M. Anderson, *Power System Protection*, IEEE Press, 1999, 120-200.
 - [126] R. Lane and B. Craig, *Materials that sense and respond: An introduction to smart materials*, **The Amptiac Quarterly**, 7 (2003) 9-15.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Erkan UÇAR

D. Yeri ve Tarihi: Doğanşehir/MALATYA, 15.07.1973

Adres: Ferhadiye Mah. ada çayı sokak No:26 Daire
No:8 Battalgazi/Malatya

E-Posta: erkanucar7@gmail.com

Lisans: Gazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik, (1993-1997)

Yüksek Lisans: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, (1999-2002)

Mesleki Deneyimi: Milli Eğitim Bakanlığı'nda Fizik Öğretmeni

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

1. **E. Ucar**, M.E. Yakinci, Static and Dynamic of Vortex in $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Superconductor, **Physics and Materials Chemistry**, DOI:10.12691/pmc-5-1-1

TEZDEN TÜRETİLEN SUNUMLAR

1. **E. Ucar**, M.E. Yakinci, F. Kurt, Vorteksin Statiğinin ve Dinamiğinin Sıcaklık ve Manayetik Alana Bağlı Olarak $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Sisteminde İncelenmesi, **9 International Conference on Magnetic and Superconducting Materials (MSM15)**, Antalya-Turkey, 30 April-3May 2015