

T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YBCO (358) SÜPER İLETKENİNİN MIKNATISLANMA-
SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN KRİTİK HAL ÇERÇEVESİNDE
MODELLENMESİ**

MELTEM AKTAŞ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ İSHAK CUMHUR

II. DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ İBRAHİM DÜZGÜN

TEZ JÜRİLERİ

DOÇ. DR. AHMET GÖKDOĞAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ MEHMET ÜNLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MATEMATİK ANABİLİM DALI

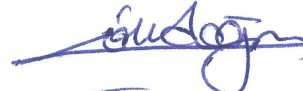
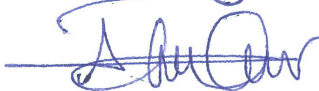

RİZE-2019

Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YBCO (358) SÜPER İLETKENİNİN MIKNATISLANMA-SICAKLIK
DEĞİŞİMİNİN KRİTİK HAL ÇERÇEVESİNDE MODELLENMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi İshak CUMHUR danışmanlığında Meltem AKTAŞ tarafından hazırlanan bu çalışma Enstitü Yönetim kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 25/06/2019 tarihinde Matematik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

| Jüri Üyeleri | Unvanı Adı Soyadı | İmzası |
|--------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Başkan : | Doç. Dr. Ahmet GÖKDOĞAN |  |
| Üye : | Dr. Öğr. Üyesi İshak CUMHUR |  |
| Üye : | Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜNLÜ |  |


Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ



ÖNSÖZ

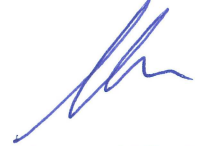
Bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Matematik Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans Tezi" olarak hazırlanmıştır. Çalışmada katıhal tepkime yöntemi ile üretilmiş olan saf YBCO (358) yüksek sıcaklık süperiletken numunesinin kritik hal çerçevesinde sabit manyetik alan değerinde alansız soğutma işlemi sonucunda deneysel manyetizasyon-sıcaklık eğrilerinin bilgisayar ortamında teorik olarak yeniden türetilmesi araştırıldı. Bu tezin hazırlanması aşamasında her türlü desteği ve imkânı sağlayarak beni yönlendiren ve bilgilerinden yararlandığım, saygı değer danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi İshak Cumhuri ve Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Düzgün 'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Desteklerini daima üzerimde hissettiğim kızlarıma ve değerli eşim Musa AKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Meltem AKTAŞ

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan ‘YBCO (358) Süperiletkeninin Mıknatıslanma-Sıcaklık Değişiminin Kritik Hal Çerçevesinde Modellenmesi’ başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 25/06/2019



Meltem AKTAŞ

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

ÖZET

YBCO (358) SÜPERİLETKENİNİN MIKNATISLANMA-SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN KRİTİK HAL ÇERÇEVESİNDE MODELLENMESİ

Meltem AKTAŞ

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Matematik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi İshak CUMHUR

Bu tezde, YBCO (358) süperiletkeninin manyetik-moment sıcaklık ölçümleri ve teorik analizleri araştırıldı. Manyetik moment-sıcaklık eğrilerinin sinterleme sırasında verilen oksijen oranına bağlılığı incelendi. Numunelerin deneysel sonuçlarının incelenmesinden, Oksijen oranının değişiminin moment-sıcaklık eğrilerinin deseninde değişiklik yaptığı görüldü. Deneysel sonuçlar kritik hal modeli çerçevesinde nitel olarak tartışıldı. Oksijen oranının miktarının artmasıyla (%0, 50, 100), kritik akım yoğunluğunun büyüklüğünün sırasıyla 50, 100 ve 0 olarak değiştiği bulundu. Her numune için teorik ve deneysel en iyi uyum eğrilerinden kritik akım yoğunluğunun alan ve sıcaklık bağlılığı belirlendi. M-T verilerine en iyi uyum eğrileri elde edildi ve kullanılan parametrik değerler her bir numune için karşılaştırıldı. Sonucun literatürle uyumlu olduğu görüldü.

2019, 31 sayfa

Anahtar Kelimeler: YBCO (358) Süperiletkeni, Kritik Akım Yoğunluğu, Manyetik Moment Sıcaklık eğrisi

ABSTRACT

MODELING OF THE MAGNETIZATION-TEMPERATURE CHANGE OF YBCO (358) SUPERCONDUCTOR IN CRITICAL STATE FRAMEWORK

Meltem AKTAŞ

Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mathematics
Master Thesis
Supervisor: Asst. Prof. Dr. İshak CUMHUR

In this thesis, YBCO (358) superconductor has been investigated by means of magnetic moment-temperature measurements and theoretical analysis. Magnetic moment-temperature curves were evaluated for the dependence of oxygen ratio during sintering. From the examinations of the experimental results of the samples, change of oxygen ratio was seen to change the pattern of moment-temperature curves. Experimental results are qualitatively discussed in the framework of the critical state model. The variation of the critical current density values from 50 to 100 and zero, caused the change in oxygen ratio from zero percent to 50% and 100 %, respectively. The field and temperature dependence of the critical current density for each sample were determined from the theoretical and experimental best fit curves. Best-fit curves were obtained for M-T data and the used parametric values were compared for each sample. It was seen that the results were consistent with the literature.

2019, 31 pages

Keywords: YBCO (358) Superconductor, Critical Current Density, Magnetic Moment Temperature, Curve

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ | I |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ..... | II |
| ÖZET | III |
| ABSTRACT | IV |
| İÇİNDEKİLER | V |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | VII |
| TABLolar DİZİNİ..... | VIII |
| SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ | IX |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1. Giriş | 1 |
| 1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri | 3 |
| 1.2.1. Sıfır Direnç | 3 |
| 1.2.2. Kritik Sıcaklık (T_c) | 3 |
| 1.2.3. Kritik Manyetik Alan (H_c)..... | 3 |
| 1.2.4. Kritik Akım Yoğunluğu (J_c) | 4 |
| 1.3. I. Tip Süperiletkenler | 4 |
| 1.4. II. Tip Süperiletkenler..... | 6 |
| 1.5. Kritik Hal ve Kritik Hal Modelleri | 9 |
| 1.6. Geliştirilen Kritik Hal Modelleri | 11 |
| 1.7. Tersinmezlik Çizgisi (Irreversibility Line)..... | 12 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 14 |
| 2.1. Süperiletken Numunelerin Tanımı | 14 |
| 2.2. Süperiletken Numunelerin Manyetik Özelliklerinin Ölçümü | 15 |
| 2.3. Teorik Çalışmalar | 15 |
| 2.3.1. Meissner Akımını İçeren Kritik Hal Modeli Hesaplamaları | 15 |
| 3. BULGULAR | 21 |

| | | |
|----|----------------------------|----|
| 4. | TARTIŞMA ve SONUÇLAR | 25 |
| 5. | ÖNERİLER | 26 |
| | KAYNAKLAR | 27 |
| | ÖZGEÇMİŞ | 31 |



ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Cıva (Hg) için R-T eğrisi (Serway, 1990) | 2 |
| Şekil 2. I. Tip süperiletkenler için H-T eğrisi | 5 |
| Şekil 3. II. Tip süperiletkenlerin faz gösterimi | 6 |
| Şekil 4. I. Tip süperiletkenler için (a) Ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (b) ortalama manyetizasyonun uygulanan manyetik alana bağlılığı, (c) ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (d) ortalama manyetizasyonun II. Tip süperiletkenler için uygulanan manyetik alana bağlılığı | 8 |
| Şekil 5. II. Tip süperiletkenlerde manyetik alan-sıcaklık grafiği..... | 8 |
| Şekil 6. Yüksek sıcaklık süperiletkenler için Bean kritik hal modeline karşılık gelen M-H eğrisi..... | 17 |
| Şekil 7. Yüksek sıcaklık süperiletkenler için Kim kritik hal modeline karşılık gelen M-H eğrisi..... | 18 |
| Şekil 8. S0 süperiletken numunesine ait FC ve ZFC deneysel eğrilerinin grafiği ve Tersinmezlik sıcaklığının (T _{irr}) gösterimi | 22 |
| Şekil 9. S0 süperiletken numunesine ait deneysel ZFC eğrisi ve teorik fit eğrisi. | 22 |
| Şekil 10. S50 süperiletken numunesine ait deneysel ZFC eğrisi ve teorik fiteğrisi. | 23 |
| Şekil 11. S100 süperiletken numunesine ait deneysel ZFC eğrisi ve teorik fit eğrisi. ... | 23 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1. İleri sürülen kritik hal modelleri | 11 |
| Tablo 2. Başlangıç tozlarının özellikleri | 14 |
| Tablo 3. Üç numune için teorik olarak elde edilen parametrik değerler..... | 24 |



SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------|
| B | Numune İçindeki İndüksiyon (Manyetik Akı Yoğunluğu) |
| E | Elektrik Alan |
| F_P | Çivileme Kuvveti |
| F_L | Lorentz Kuvveti |
| H | Manyetik Alan |
| H_a | Uygulanan Manyetik Alan |
| H_c | Kritik Manyetik Alan |
| H_{c1} | Alt Kritik Alan |
| H_{c2} | Üst Kritik Alan |
| H^* | İlk Tam Nüfuz Alanı |
| H_{*0} | $T=0$ 'daki İlk Tam Nüfuz Alanı |
| J_c | Kritik Akım Yoğunluğu |
| k | Boltzman Sabiti |
| M | Manyetizasyon (Mıknatıslanma) |
| R | Direnç |
| T_c | Kritik Geçiş Sıcaklığı |
| χ'' | Manyetik Alınganlığın Sanal Kısmı |
| Φ | Manyetik Akı |
| λ | Nüfuz (Girme) Derinliği |
| μ_0 | Boşluğun Manyetik Geçirgenlik Katsayısı |
| h | Planck Sabiti |
| e | Elektronun Yükü |
| Δ | Fark Operatörü |
| ∇ | Türev Operatörü |

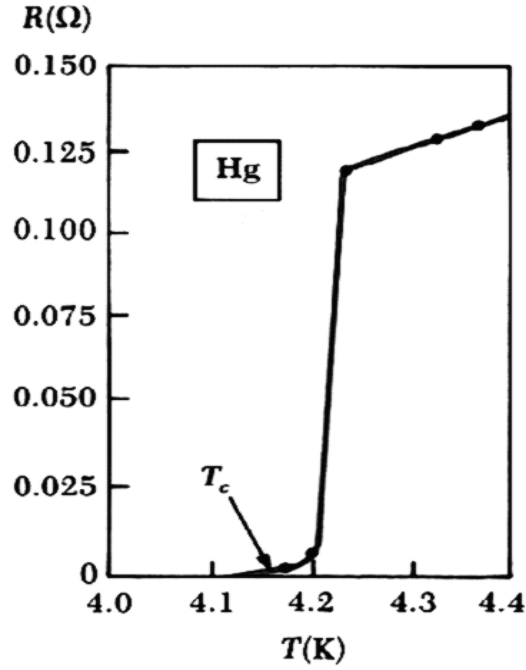
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Süperiletkenlik konusu bilim dünyasına 1911 yılında Hollandalı bilim insanı Heike Kamerlingh Onnes 'in, metallerin düşük sıcaklıklardaki öz direnç deney ve ölçümleri ile dahil oldu. Sıvı helyum sıcaklığında birçok metal ve alaşım süperiletken faza geçmektedir. Onnes 'in gerçekleştirdiği deneyde, kritik sıcaklık (T_c) diye adlandırılan sıcaklık bölgesinde ve bu değerin altında civanın elektriksel direncinin $R < 10^{-5} \Omega$ olduğunu gözledi. Bu deneysel gözlem ile süperiletkenlik konusu fizikte yeni bir sayfa açmış oldu. Onnes 'in çalışmalarından sonraki süreçte süperiletkenliğin maddenin yeni bir durumu, fazı olduğu ve kendisine özgü ilginç özellikleri olduğu anlaşıldı.

Süperiletkenlik fazına ait temelde iki özellik mevcuttur: Bunlardan ilki, “sıfır direnç” diye adlandırılan durumdur. Bu durum süperiletken haldeki bir malzemenin, içinden geçen akıma karşı hemen hemen hiç direnç göstermemesidir. Şekil 1.1’de saf cıva metali, kritik sıcaklığın üzerindeki bir T sıcaklığından soğutulmaya başlanırsa dirençte sabit bir düşüş gözlemlenirken kritik noktaya çok yaklaştığında sabit düşüşten hızlı bir düşüğe geçmesi ve nihayetinde kritik sıcaklığın altındaki bir değerde sıfır direnç özelliği gösterdiği görülmektedir.

Süperiletkenlerin ikinci özelliği ise ideal diyamanyetik özellik göstermeleridir. Bir süperiletken malzeme manyetik alan içinde iken soğutulmuş ve uygulanan manyetik alan değeri kritik manyetik alanın altında ise malzeme süperiletken hale geçer geçmez manyetik alan çizgilerini kendi içerisinde dışarılar ($B=0$). Bu olay ilk defa 1933’te Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld tarafından gözlenmiş ve Meissner etkisi olarak adlandırılmıştır (Meissner ve Ochsenfeld, 1933).



Şekil 1. Cıva (Hg) için R-T eğrisi (Serway, 1990).

1935 yılında, Fritz London ve kardeşi Heinz London tarafından Maxwell denklemleri süperiletken duruma uygulanarak Meissner etkisini açıklamayı başardılar. 1950 yılında Vitaly Lazarevich Ginzburg ve Lev Davidovich Landau isimli iki fizikçi süperiletkenin mikroskobik yapısı hakkında fenomenolojik bakış açısı getirdiler. Ancak onların getirmiş olduğu teori olayın nasıl olduğunu açıklarken nedenini açıklayamamaktadır. Böylece bu tarihten itibaren bu alanda uğraş sarf eden bilim insanları teknolojik uygulama alanlarına yönelik yeni ve verimli süperiletken malzemeler bulma ve geliştirme yarışına girmiş olup kısa sürede önemli yol kat etmişlerdir. Süperiletkenlik olgusunu açıklamak için kuantum fiziğinden yararlanılmış ve 1957 senesinde John Bardeen, Leon Neil Cooper ve Robert Schriffer tarafından BCS Teorisi olarak isimlendirilen süperiletkenliğin kuantum teorisi bilim camiasıyla tanıştırılmış oldu. BCS teorisi süperiletkenliğin mikroskobik ölçekte nasıl meydana geldiğinin çok detaylı bir açıklamasıdır. Elektron – Fonon etkileşimi aracılığıyla süperiletkenliğin, “Cooper çifti”nin varlığından ortaya çıktığı teorisini geliştirdiler (Bardeen vd., 1957).

1.2. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri

1.2.1. Sıfır Direnç

Bir metali düşük sıcaklıklara doğru soğutmakla onun elektriksel özdirencini azaltmış oluruz. Matthiessen kuralı; sıcaklığın, yabancı atomların (safsızlık) ve şekil değişiminin metallerin özdirenci üzerindeki etkisini ampirik olarak açıklamaktadır. Metalden akım geçtiğinde kristal örgüdeki yukarıda sayılan kusurlardan herhangi birisinin olması elektron dalgalarının saçılmasına sebebiyet verir ve neticesinde direnç gözlenir. Bu etkilerin olmadığı durumda ya da ortadan kaldırılmasıyla metalden geçecek akım herhangi bir dirençle karşılaşmadığında sıfır direnç gösterebilir.

1.2.2. Kritik Sıcaklık (T_c)

Bir malzemenin sıcaklığının düşürülmesi neticesinde normal halden süperiletken hale geçtiği zamandaki sıcaklık değeridir. Bu aynı zamanda malzemenin direncinin sıfır olduğu en büyük sıcaklık değeridir. Kritik sıcaklık değerini belirlemede yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi, dört nokta yönetimi ile ölçümü sonucunda elde edilen sıcaklık-direnç grafiğinden ve diğer yöntem ise düşük alanda ölçülen AC alınganlığın sıcaklıkla değişim eğrisinden belirlenmesidir.

1.2.3. Kritik Manyetik Alan (H_c)

Bilim insanları süperiletkenlik olayını keşfettikten sonra bazı parametrelerin önemi çok geçmeden anladılar. Bunlardan bir tanesi malzeme süperiletken haldeyken dışarıdan manyetik alan uygulandığında belli bir değerine kadar süperiletkenlik özellik gösterirken bu değer aşıldığında malzeme normal duruma dönmektedir. Bu eşik değerine kritik manyetik alan denir ve H_c ile gösterilir. Malzemenin cinsine bağlı olan bu parametre teknolojik açıdan önemlidir. Bilim insanları kritik manyetik alan değerleri yüksek olan malzemeler keşfetmek için yoğun mesai harcamaktadırlar.

1.2.4. Kritik Akım Yoğunluğu (J_c)

Malzemenin süperiletken fazda iken normal duruma geçmeden kayıpsız olarak taşıyabileceği maksimum akım yoğunluğudur. II. Tip süperiletkenlerde kritik akım yoğunluğunun sıcaklık ve alan bağımlılığı manyetizasyon ölçümlerinden bulunabildiği gibi, AC alınganlık deneysel verilerinden de elde edilebilir. Bunun yanı sıra dört nokta (four probe) yöntemi ile de belirlenebilir. Ayrıntılı tartışma Çelebi vd., (2000)'de bulunabilir.

1.3. I. Tip Süperiletkenler

Bir süperiletken malzemenin, düşük veya yüksek sıcaklık süperiletkenlerden hangisi olduğunun söylenilebilmesi için manyetik alandaki davranışına bağlıdır. Bu davranış neticesinde süperiletken malzemeler I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler olarak iki gruba ayrılır. I. Tip Süperiletkenler, girme (nüfuz) derinliği haricinde manyetik akıyı dışarlar. Yaklaşık olarak girme derinliği $\lambda = 1000 \text{ \AA}$ civarındır. İhmal edilebilecek değere sahip yüzey bölgesi haricinde ideal I. Tip süperiletkende manyetik akı malzemenin içerisine giremez. Bu nedenle;

$$\langle B \rangle = \mu_0 H + \mu_0 \langle M \rangle \quad (1)$$

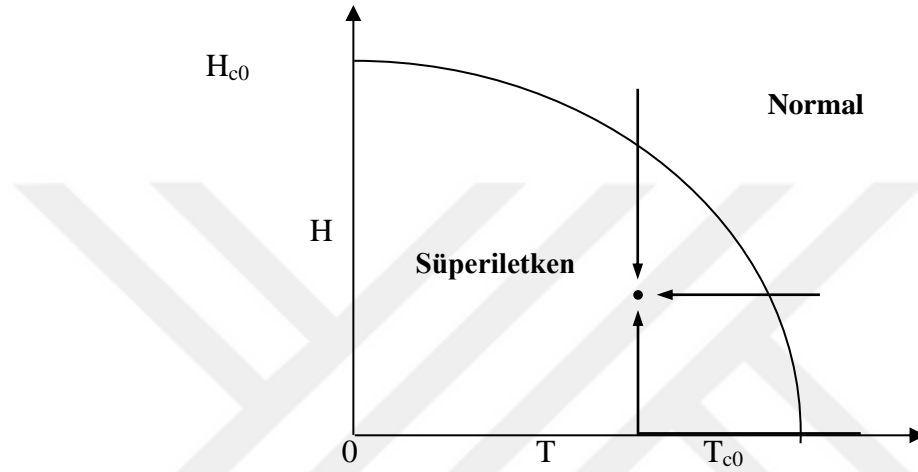
ile verilen bağıntı yardımıyla manyetizasyon

$$\langle M \rangle = -H \quad (2)$$

bağıntısı I. Tip süperiletken grubu için yazılabilir. Bunun nedeni olarak malzemenin mükemmel diyamanyetizma özelliği göstermesidir. Yani $\langle B \rangle = 0$ 'dır. Burada H , uygulanan manyetik alanı ve $\langle B \rangle$ ise tüm malzeme üzerindeki ortalama manyetik akı yoğunluğunu ifade eder. Süperiletken durumdan normal duruma geçişi sağlayan kritik alan değeri I. Tip süperiletken malzemeler için sıcaklıkla yaklaşık olarak aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$H_c = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c0}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Bu denklemde H_{c0} , $T=0$ 'daki kritik manyetik alan değeridir ve T_{c0} ise $H=0$ değerindeki kritik sıcaklıktır (Rose ve Innes, 1980) Denklemdeki kavramlar faz diyagramı Şekil 1.2' de gösterilmektedir.



Şekil 2. I. Tip süperiletkenler için H-T eğrisi (Düzgün, 2005).

Şekil 2. aynı manyetik alan ve sıcaklık değerine sahip olan bir noktaya üç değişik şekilde varılacağını göstermektedir. 1 nolu yol başlangıçta manyetik alan uygulanmadan malzemenin normal olduğu sıcaklık bölgesinden süperiletken faza geçtiği kritik sıcaklığın altına kadar sıcaklığın düşürülmesini ve sonrasında sabit sıcaklıkta iken manyetik alan uygulanarak istenilen noktaya ulaşmayı ifade etmektedir. Bu işleme yani 1 nolu sürecin uygulanmasına alansız soğutma (Zero Field Cooled) “ZFC” işlemi denir. 2 numaralı yol, istenilen alan altında (şekle göre noktanın bulunduğu manyetik alan değeridir) kritik sıcaklığın altındaki değere soğutmak olup alan altında soğutma (Field Cooled) “FC” işlemi olarak isimlendirilir.

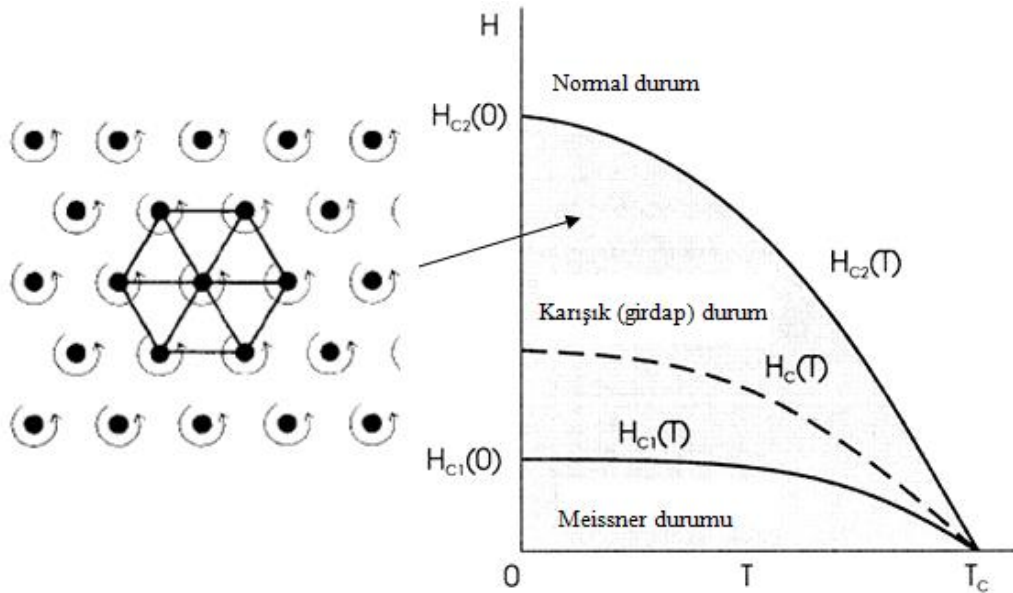
3 nolu yol sıcaklık olarak süperiletken fazda olunmasına rağmen uygulanan yüksek manyetik alandan dolayı malzeme normal bölgededir. Böyle bir durumdan alanın azaltılmasıyla istenilen noktaya ulaşıldığı anlaşılmaktadır. İlk durumda manyetik akı yoğunluğu $B=\mu_0H$, 2 ile 3 nolu yollar için malzemeye düzgün olarak nüfuz eder.

Bunun sebebi malzemenin normal durumda olmasıdır. Malzeme süperiletken faza geçtiğinde manyetik akı $\Phi=B \cdot A$ Atümüyle dışarı atılır. Formüldeki A ifadesi malzemenin akı çizgilerine dik olan kesit alanıdır. 2 ve 3 nolu yolları boyunca normal-süperiletken geçişini belirleyen sınırlarda manyetik akının numuneden dışarılanması Meissner olayı olarak isimlendirilir.

1.4. II. Tip Süperiletkenler

1950'lerde nobel ödüllü Rus fizikçi Alexei A. Abrikosov manyetik alan içerisinde koyulan yüksek kritik sıcaklık değerlerine sahip II. Tip süperiletkenlerin davranışlarını anlatan bir teori yayınladı. Doktora hocası Lev Landau ve Ginzburg'un birlikte geliştirdikleri teoriden de faydalanan Abrikosov, kritik sıcaklığın altındaki bir süperiletken malzemenin manyetik davranışının, alanın şiddetine ve sıcaklıkla olan ilişkisini gösterdi.

II. Tip süperiletkenlerin manyetik-sıcaklık ilişkisi Şekil 3.'te olduğu gibi temsil edilebilir.



Şekil 3. II. Tip süperiletkenlerin faz gösterimi (Seeber 1998; Bishop vd.,1993).

Uygulanan manyetik alan $H_{c1}(T)$ 'den küçük olduğu zaman süperiletken malzeme tümüyle bu alanı dışarı atmaktadır. Sıcaklığa bağlı olan ve Meissner durumunun sınırlarını belirleyen bu alana alt kritik $H_{c1}(T)$ alan adı verilir.

Alan $H_{c1}(T)$ 'nin üstüne çıkartıldığında karışık (girdap) hal olarak isimlendirilen durum yer almaktadır. Bu durumun sınırlarını uygulanan alanın değeri belirler. Bu değer $H_{c1}(T) < H_a < H_{c2}(T)$ aralığındadır.

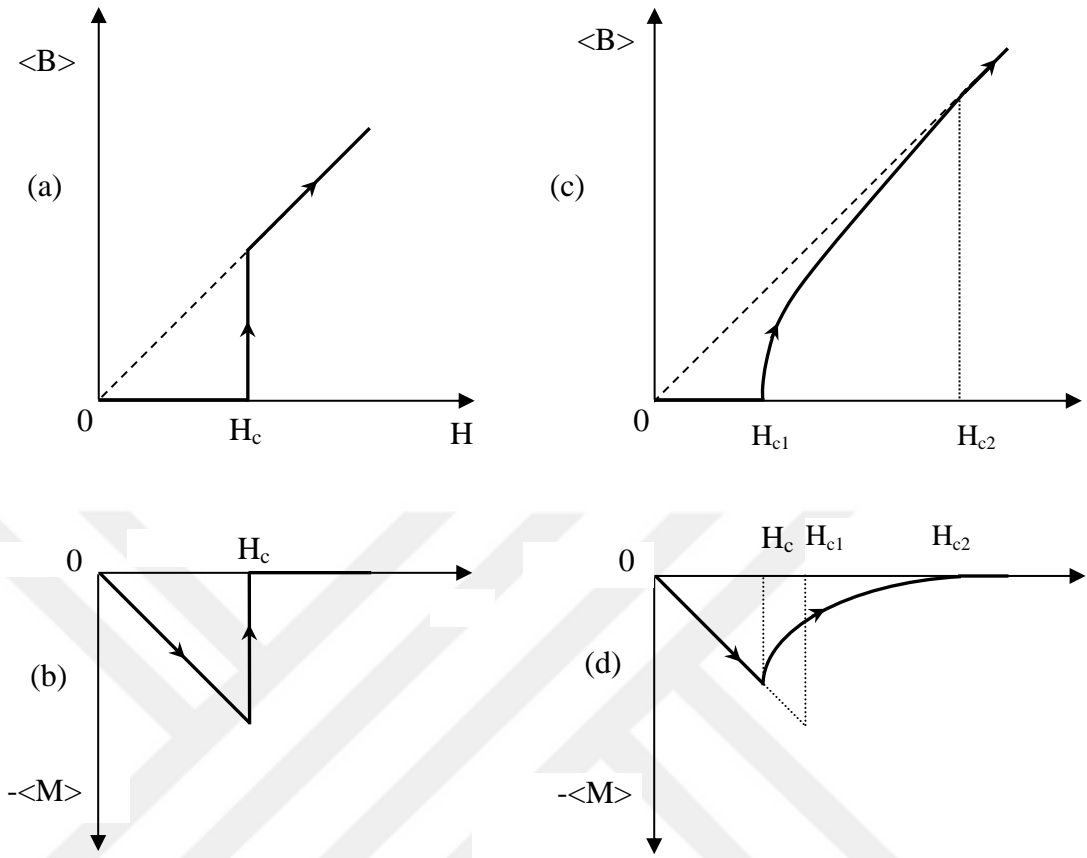
Eğer manyetik alan değeri alan üst kritik alan olarak isimlendirilen $H_{c2}(T)$ 'den büyük olursa malzeme normal duruma geçiş yapar. Karışık halde manyetik alan süperiletken malzemeye nüfuz eder. Buradaki nüfuz, girdaplar halinde ve kısmi bir nüfuzdur.

Kuantum mekaniğine göre girdapların (akı çizgilerinin) aynı büyüklükte olması gerekir. Bu büyüklüğe akı kuantumu denir ve $\Phi_0 = h/2e = 2.067 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$ olarak verilir.

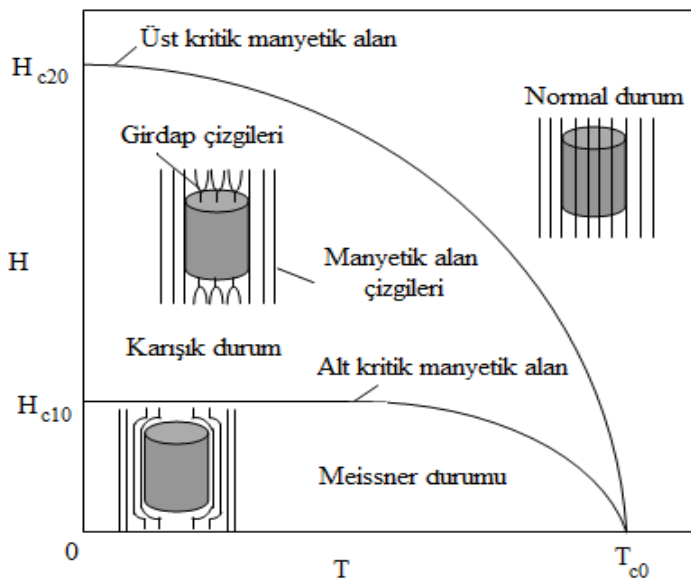
Abrikosov teorisinde akı çizgilerinin şeklinin üçgen veya hegzagonal (altıgen) olarak düzenleneceğini göstermiştir. Bunun sebebi, alan değeri arttıkça akı çizgilerinin yoğunluğunun artması ve girdapların arasındaki mesafenin azalacak olmasıdır. Böylece akı çizgileri enerjisini minimum olacak şekilde yani üçgen veya hegzagonal bir örgü oluşturacak biçimde düzenlenecektir.

I. ve II. Tip süperiletkenler için şekil 4. ve şekil 5.'te verildiği gibi H_{c1} ve H_{c2} olarak gösterilen iki kritik manyetik alan ile karakterize edilir.

İdeal tersinir II. Tip süperiletkenlerde manyetik alan H , alt kritik alan (H_{c1}) 'den az ise $\langle B \rangle = 0$ olur. Uygulanan manyetik alan alt ve üst kritik değerler arasında olduğunda karışık durumda olduğu bilinmektedir. Şekil.5.'te faz diyagramı verilmektedir.



Şekil 4. I. Tip süperiletkenler için (a) Ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (b) ortalama manyetizasyonun uygulanan manyetik alana bağlılığı, (c) ortalama manyetik akı yoğunluğunun, (d) ortalama manyetizasyonun II. Tip süperiletkenler için uygulanan manyetik alana bağlılığı



Şekil 5. II. Tip süperiletkenlerde manyetik alan- sıcaklık grafiği

Süperiletken karışık veya vorteks halinde olduğunda, ortalama manyetik akı yoğunluğu $\langle B \rangle$ değeri $\mu_0 H$ olan bir denge değerindedir. Aynı zamanda alana dik homojen olmayan ve iki boyutta periyodik olarak değişmektedir. Manyetik akı karışık haldeyken, akı çizgileri veya akı girdapları olarak isimlendirilen ve $\phi_0 = h/2e$ değerinde girdaplardan (fluxon) oluşur. Akı çizgileri dışarıdan uygulanan manyetik alanın artırılmasıyla birbirine o kadar çok yakın olacaktır ki, uygulanan alan değeri üst kritik manyetik alan değerine eşit olduğu anda süperiletken faz ortadan kaybolacaktır. Alanın artması ile girdaplar $\vec{F}_L = \vec{J}_c \times \vec{B}$ Lorentz kuvvetinin etkisi ile birbirine o kadar yaklaşacaktır ki, göbekler üst üste gelecek (overlap) süperiletkenliği sağlayan (koruyan) girdaplar malzemede yer almayacaktır, (Bishop vd., 1993).

Süperiletken fazdan normal duruma geçinceye kadar, manyetik akıyı tümüyle dışarlayansüperiletkenlere I. Tip süperiletkenler denir. Literatürde genellikle “saf” ya da “yumuşak” süperiletkenler olarak ta bilinirler (Cyrot ve Pavuna, 1992). Yüksek kritik sıcaklığına sahip süperiletkenler II. tip süperiletken yada “sert” süperiletkenler olarak bilinir. II. Tip bir süperiletkenlerde iki kritik alan değeri mevcuttur: alt kritik alan H_{c1} ve üst kritik alan H_{c2} . Manyetik akı karışık halde II. Tip süperiletken malzemeye kuantize olmuş akı çizgileri şeklinde nüfuz ederler (Seeber, 1998).

1.5. Kritik Hal ve Kritik Hal Modelleri

İlk olarak, uygulanan alan ($H_a=0$) iken kritik sıcaklığın altındaki bir sıcaklığa soğutulmuş hiç girdap içermeyen bir malzemeye sıfırdan başlayarak dışarıdan bir manyetik alan uyguladığımızı varsayalım. H_a , H_{c1} 'i aştığı zaman, akı çizgileri çekirdeklenmeye başlayıp süperiletken malzemeye nüfuz eder. Eğer malzemede çivileme merkezleri yoksa akı çizgileri malzemenin kesiti boyunca düzgün şekilde dağılır. Fakat çivileme kuvvetleri bu nüfuza ve harekete karşı koyacaktır. Akı çizgilerindeki dağılım düzgün olmayacağı gibi akı yoğunluğu profilinde kritik eğim oluşturur.

Düzgün olmayan şekillerde, akı çizgisine etki eden kuvvetlerinin incelenmesi yararlı olacaktır. Akı çizgileri kendilerinin arkasında kalan akı çizgilerinin itmesiyle içeriye doğru önünde kalan akı çizgilerinin itmesinden ötürü de dışarıya doğru olacak

şekilde itmelere maruz kalır. Akı çizgilerinin yoğunluğu $\frac{dB}{dx}$ gradienti oluşturacak şekilde ilerleme yönü boyunca değişirse ortaya net bir kuvvet çıkar. Akı çizgisi üzerine etkiyen ve itmeden kaynaklanan net kuvvet kaynağı çivileme merkezi olan $F_p(B)$ maksimum çivileme (pinning) kuvvet yoğunluğu tarafından dengelenir. Çivileme engelleri aşılmadığı takdirde akı çizgisi yoğunluğunda bir artış gözlenmeyecektir. O halde $\frac{dB}{dx}$ gradienti kritik bir durumda olmalıdır. Bu durumu klasik elektromanyetik teorinin öngördüğü denklemlerle ifade etmeye çalışalım. Maxwell-Ampere denklemi

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}_c \quad (4)$$

ve \vec{B} 'nin y-z düzlemi boyunca yönlendiği düzlemsel geometri için;

$$\frac{dB}{dx} = \pm \mu_0 J_c \quad (5)$$

şeklinde olur. İzotropik malzemeler için, indüklenmiş elektrik alan \vec{E} ve kritik akım yoğunluğu \vec{J}_c , akı çizgisi yoğunluğu \vec{B} 'ye diktir. Kritik akım yoğunluğu J_c , akı çizgilerini yerinden sökmek (depinning) için gerekli minimum kuvvet ile ilişkili olup Lorentz kuvveti,

$$\vec{F}_L = \vec{J}_c \times \vec{B} \quad (6)$$

\vec{F}_p çivileme kuvvet yoğunluğunu yendiğinde bu değerde olur. Böylece kritik hal,

$$\vec{J}_c \times \vec{B} + \vec{F}_p = 0 \quad (7)$$

denklemleri ile ifade edilir.

Uygulanan manyetik alan değeri H_{c1} 'in üzerindeki değerleri almaya devam ettikçe ilerleyen akının önephesi sonunda malzemenin merkezine varır. Böyle bir durum için uygulanan manyetik alanı H_a , ilk tam nüfuz alanı olarak isimlendirilir ve H^* ile gösterilir.

Akı çizgilerini yerinden söken kritik akımlar, akım yoğunluğu kritik değer J_c 'yi aştığında $\vec{E} \cdot \vec{J}$ çarpımı kadar enerji kaybına sebep olurlar. Bu akımlar için yoğunlukları J_c değerini geçmedikçe kayıpsız olmaları ve kalıcı olmaları normal metallerle olan önemli farklarıdır (Çelebi ve LeBlanc, 2002).

1.6. Geliştirilen Kritik Hal Modelleri

Bean (1962) tarafından ortaya konulan kritik hal modeli, yüksek sıcaklık süperiletkenlerin manyetik alanla ilişkisinin analizinde kullanılmaktadır. Ortaya koyulan model basit bir mantığa sahiptir. Kritik akım yoğunluğu (J_c), Manyetik akı yoğunluğuna (B) bağımlı olmadığı varsayılır. Kim vd. 'nin (1963) modeli ise kritik akım yoğunluğunun manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak yeniden düzenlendi. Irie ve Yamafuji (1967) ve Green ve Hlawiczka (1967) bir üs yasası modeli yani önerdiler. Üs yasasına göre kritik akım yoğunluğu manyetik akı yoğunluğuna n gibi bir kuvveti ile bağlıydı ve n pozitif bir sabittir. Bu modeller alt kritik alan H_{c1} 'in altındaki akı dışarlama etkisini göz ardı ettiler. Fietz vd. (1964) kritik hal modelini denge manyetizasyonu ile iyileştiren bir üstel model geliştirdiler. Clem (1979), malzemenin içine akı girişi/çıkışı için fazladan alan artışı (ΔH_{en} ya da ΔH_{ex}) gerektiren yüzeyde potansiyel bariyeri içeren bir kritik hal modeli ileri sürdü. Şimdiye kadar öne sürülen kritik hal modelleri aşağıdaki tabloda görülebilir.

Tablo 1. İleri sürülen kritik hal modelleri

| Model İsmi | Kritik Hal Modelleri |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Bean Modeli (1962;1964) | $J_c = J_{c0}$ |
| Kim Modeli (Kim vd., 1963) | $J_c = \frac{J_{c0}}{B + B_0}$ |
| Irie ve Yamafuji (1967) ; Green ve Hlawiczka(1967) | $J_c = \frac{J_{c0}}{B^n}$ |

Tablo 1 (devam). İleri sürülen kritik hal modelleri

| Model İsmi | Kritik Hal Modelleri |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Fietz vd., (1964) | $J_c = J_{c0} e^{-b/B_0} + c_0$ |
| Hampshire ve Taylor (1972) | $J_c = 2(1 - b)$ |
| Brand (1972) | $J_c = 2.86\sqrt{b}(1 - b)$ |
| Hughes (1974) ; Campbell (1968) | $J_c = 1.41 \frac{1 - b}{\sqrt{b}}$ |
| Kramer (1973) (Düşük Alan) | $J_c = \frac{0.353}{\sqrt{b}(1 - b)^2}$ |
| Kramer (1973) (Yüksek Alan) | $J_c = 2.86 \frac{(1 - b)^2}{\sqrt{b}}$ |
| Clem (1979) | $J_c = \frac{J_{c0}}{B - B(\Delta B_{en}, \Delta B_{ex})}$ |
| Tochihara vd., (1998) | $J_c = \frac{J_{c0}}{B - B_{c1} - \Delta B_{en}}$ |
| Çelebi vd., (1999) ; LeBlanc vd., (2000) | $J_c = \frac{J_{c0}}{(B - B_{c1}^{p+1} / B^p)^n}$ |

Burada $b=B/B_{c2}$ indirgenmiş alan, B_{c1} , alt kritik manyetik alan; B_{c2} üst kritik manyetik alan, ΔB_{en} , ΔB_{ex} sırasıyla numuneye akının girmesi ve çıkması için gerekli alan değerleridir ve ayrıca J_{c0} , B_0 ve c_0 pozitif sabitlerdir (İnanır, 2006).

1.7. Tersinmezlik Çizgisi (Irreversibility Line)

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde kritik akım yoğunluğunun sıfır olduğu ama manyetik davranışın diyamanyetik olduğu bir bölgenin varlığı bilinmektedir. Bu bölge H-T faz diyagramında tersinmezlik çizgisi (IL) sayesinde belirlenir. Tersinir ve tersinmez bölgeyi ayırıcı olarak tanımlanır. Tersinmezlik çizgisinin üzerindeki bölgede süperiletken malzemenin manyetizasyonu tamamen tersinir altındaki bölgede ise manyetizasyonun davranışı histeriktir. Fiziki açıdan anlamı ise çivilenme kuvvetinin akı

çizgilerinin üzerinden kaldırıldığı alana karşılık gelmesidir (Seeber, 1998). İlk olarak tersinmezlik çizgisi üzerine araştırma raporunu Müller ve arkadaşları (Müller, 1987) tarafından yayınlandığı görülmektedir. Tersinmezlik çizgisinin bulunuşuna dair metotlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1- Seçilen alanlarda alan altında soğutma (FC) manyetizasyonu M_{FC} ve alan yokken soğutma (ZFC) manyetizasyonu M_{ZFC} eğrileri ölçülür. Eğrilerin birleştiği sıcaklık tersinmezlik sıcaklığı T_{irr} değerini verir ve bu sıcaklıktaki alan değeri de H_{irr} olarak belirlenir (Müller, 1987; Frischerz, 1995; Malozemoff, 1988; Düzgün, 2010).

2- T_{irr} olarak gösterilen seçilen sıcaklıklarda histerik eş sıcaklık manyetizasyon eğrileri ölçülür. Histerezisin kaybolduğu alan değeri tersinmezlik alan değerini vermektedir (Düzgün, 2010; Revaz, 1996). Bu şekilde farklı sıcaklıklarda tekrarlanan ölçümlerle tersinmezlik çizgisi belirlenir.

3- Sabit DC alanda kompleks AC alınganlık ölçülür ve H_{irr} belirlenir. Sanal kısmın χ'' onset sıcaklığı (Düzgün, 2010; Civalo, 1991) ya da pik sıcaklığı (Düzgün, 2010; Emmen, 1990) tersinmezlik sıcaklığı T_{irr} değerini verir. AC alınganlık ölçümlerinden tersinmezlik çizgisini belirlemede alınganlığın 3. harmoniğinin onset değeri uygun bir ölçüt oluşturduğu rapor edilmiştir (Düzgün, 2010; Dubois, 1996).

4- Seçilen manyetik alanların varlığında sıcaklığın fonksiyonu olarak direnç ölçümlerinden belirlenebilir. Her bir seçilmiş alanda (H_{irr}) sıfır dirençle ilişkilikritik sıcaklıklardan tersinmezlik sıcaklığı (T_{irr}) belirlenebilir (Düzgün, 2010; Çelebi, 1998).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Süperiletken Numunelerin Tanımı

Bu çalışmada kullanılan numunelerin hazırlanması yapısal özellikleri ve manyetik ölçümleri (Başoğlu vd., 2016)'da ayrıca yapının örgü parametreleri (Düzgün, 2018)'de ayrıntılı bir şekilde verilmektedir. Bu çalışmada, YBCO (358) numunesinin manyetik moment-sıcaklık değişimi incelenmesine rağmen, numuneler hakkında bilgi verilmesi faydalı olacaktır. Katıhal tepkime yöntemiyle hazırlanan YBCO (358) süperiletkeni $Y_3Ba_5Cu_8O_{18+}$ stokiyometrik kompozisyonuna uygun olarak yapıldı. Deneyde kullanılan başlangıç tozları için gerekli kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Başlangıç tozlarının özellikleri

| Bileşik | Safılık Derecesi (%) | Molekül Ağırlığı (gr) |
|----------|----------------------|-----------------------|
| Y_2O_3 | 99,99 | 225,81 |
| $BaCO_3$ | 99,98 | 197,34 |
| CuO | 99,99 | 79,55 |

Seçilen başlangıç kompozisyonunun hazırlanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.



Numuneler $840^\circ C$ 'de 24 saat kalsine edildi. Kalsinasyon işleminden sonra numuneler 5 saat içerisinde oda sıcaklığına soğutuldu. Numuneler daha sonra $930^\circ C$ 'de 24 saat boyunca uygun oksijen ve argon ortamında sinterlendi. Sinterleme sonrasında toz haldeki numuneler 12mm çapında ve 1mm kalınlığında olmak üzere ~ 220 bar basınç altında pellet haline getirildi. Numuneler, $950^\circ C$ 'ye oksijen ortamında 24 saat tutuldu. Bu sürenin bitiminde tabletler $500^\circ C$ 'ye kadar soğumaya bırakıldı. Numuneler S0, S50 ve S100 olarak isimlendirildi. Burada 0, 50 ve 100 oksijen oranını belirtmektedir.

2.2. Süperiletken Numunelerin Manyetik Özelliklerinin Ölçümü

Manyetik ölçümler, Quantum Design PPMS sistemi kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin uzunluğu manyetik alana paralel olacak şekilde monte edilmiştir. Numunenin boyutları $2.5 \times 2.5 \times 1.5 \text{ mm}^3$ olarak ölçüldü. Ölçüm sistemi, uygulanan manyetik alana göre moment değişimini verecek şekilde kapalı devre soğutma sistemi 4–330 K arasında sıcaklık kontrolü sağlayabilen kompakt bir sistemdir. Ayrıca manyetik alınganlığın gerçel ve imajiner kısımlarını; sıcaklığın, uygulanan AC alan genliğinin ve frekansının fonksiyonu olarak ölçebilecek şekilde dizayn edilmiştir. Tüm süperiletken malzemeler için Manyetik moment-Sıcaklık verileri 20-120 K arasında $H=250$ Oe sabit alan ve manyetik alan numunenin c eksenine paralel olacak şekilde ölçülerek elde edilmiştir.

2.3. Teorik Çalışmalar

2.3.1. Meissner Akımını İçeren Kritik Hal Modeli Hesaplamaları

Bean (1964) ve Basit Kim (1962) modellerinde Meissner katkısı göz ardı edilmektedir. Yani $H_{c1}=0$ kabulü yapılır. Ayrıca Bean modeline göre J_c kritik akım yoğunluğu manyetik alandan bağımsız kabul edilmektedir. Kim modelinde kritik akım yoğunluğu manyetik alan ile H^{-1} orantısına sahiptir. Daha reel bir model için hem Meissner akımını hem de J_c 'nin alan bağımlılığını da içermesi gerekir. Teorik hesaplamalar Mathematica programından yararlanılarak yapılmıştır. Hem silindir hem de dilim (slab) geometrisi için manyetizasyon ölçümlerinin teorik hesaplamaları (Öztürk, 2005) doktora tezinde ayrıntılı olarak yapılmıştır. Bu çalışmada benzer denklemler yardımıyla, (ZFC) işlemine göre mıknatıslık-sıcaklık verilerine en iyi uyumu verecek biçimde, denklemler türetilmiş ve üretilen malzeme için bazı süperiletkenlik parametreleri teorik olarak hesaplanmıştır. Dilim geometrisi için denklemler aşağıda verilmiştir.

Kritik akım yoğunluğunun manyetik alan ve çivileme bağımlılığı için

$$J_c(H, T) = \frac{J_{c0}(T)}{\left[\frac{H_a + H_0 - I_M}{H_{ref}} \right]} \quad (8)$$

denklemlerle belirlenen fonksiyon biçimindedir. Eşitlikte yer alan H_a uygulanan manyetik alanı, H_0 bir sabit, I_M ise alan bağımlı Meissner akımını ifade etmektedir. H_{ref} ise $J_{c0}(T)$ teriminin akım yoğunluğu biriminde olduğunu garantilemek için verilmektedir. Meissner akımı iki pozisyonda olabilir. İlk olarak $H_a \leq H_{c1}$ durumunda $I_M = H_a$ olacaktır. Diğer durum için ise ($H_a \geq H_{c1}$);

$$I_M = \frac{H_{c1}}{\left[\frac{H_a}{H_{c1}} \right]^p} = \frac{H_{c1}^{p+1}}{H_a^p} \quad (9)$$

şeklinde p üsteli ile belirlenebileceği gösterilmiştir. Sonsuz uzunlukta ve genişlikte $2X$ kalınlığa sahip dilim geometrisine sahip süperiletken malzeme için,

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_c \quad (10)$$

Maxwell denklemi (Ampère Yasası) kullanılarak,

$$J_c = \frac{dH}{dx} \quad (11)$$

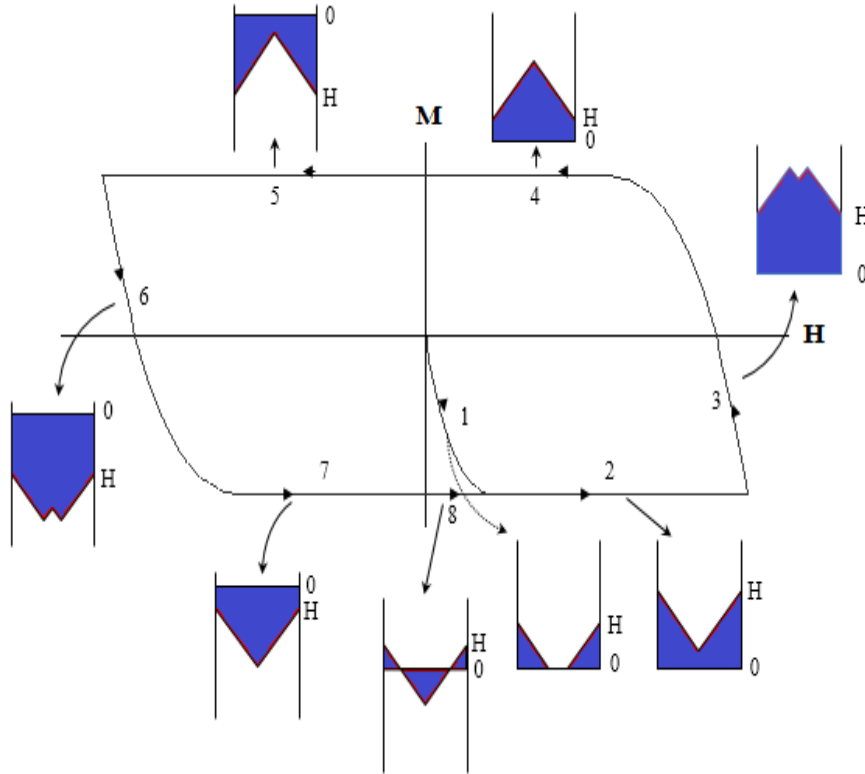
elde edilir. Bu kısımda akı yoğunluğu konfigürasyonuna ait $H(x)$ denkleminin bulunabilmesi için profile ait olan eğrinin sınırlarından faydalanılır. Kolaylık açısından 0 noktasına göre simetrik olan malzemenin 0-X kısmı üzerinde durulur. Dilim geometrisi için,

$$H(x) = [(H_a + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)]^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \quad (12)$$

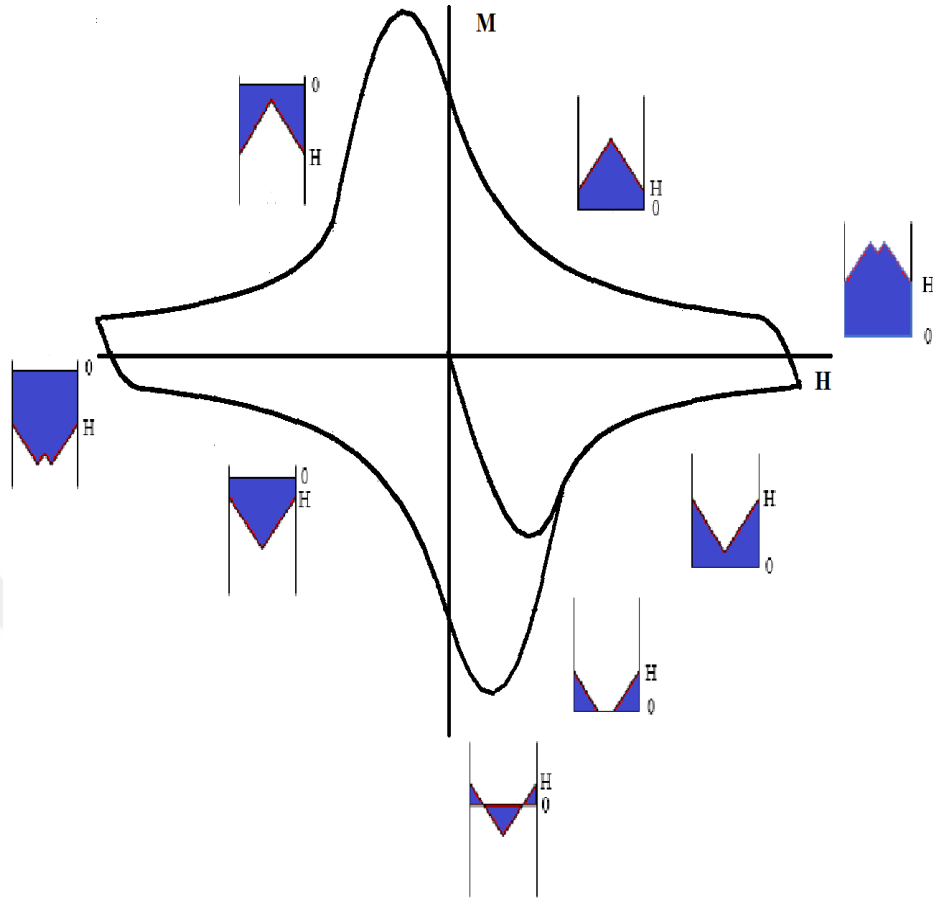
eşitliği elde edilir. Dilim geometrisine sahip malzemeler için manyetizasyon hesaplamalarında

$$\langle M \rangle = \frac{1}{X} \int H(x) dx - H_a \quad (13)$$

integrali çözülmelidir. (12) eşitliğindeki $H(x)$ ifadesi, integralin sınırları malzemeye uygulanan manyetik alanın artırılması ve azaltılmasıyla akı yoğunluğu konfigürasyonunun alacağı duruma göre belirlenmelidir.



Şekil 6. Yüksek sıcaklık süperiletkenler için Bean kritik hal modeline karşılık gelen M-H eğrisi



Şekil 7. Yüksek sıcaklık süperiletkenler için basit Kim kritik hal modeline karşılık gelen M-H eğrisi

Şekil 6.'da Bean kritik hal modeli, Şekil 7. 'de Kim kritik hal modeline göre çizilen M-H eğrisinin uygulanan alana göre aşamaları gösterilmiştir. Kim modeline göre eğer aşamaları denklemlerle ifade edecek olursak, Aşama I için, $H_a \leq H_{c1}$ için, $I_M = H_a$ değerindedir ve

$$\langle M \rangle = -H_a \quad (14)$$

olur. Aşama II için, $H_a \geq H_{c1}$ için Meissner akımını

$$I_M = \frac{H_{c1}}{[H_a + H_{c1}]^p} = \frac{H_{c1}^{p+1}}{H_a^p} \quad (15)$$

değerine sahip olur.

$$H(x) = [(H_a + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)]^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \quad (16)$$

elde edilmiş olur. Ortalama manyetizasyonu bulmak için ise

$$\langle M \rangle = \frac{1}{X} \int_{x_0}^x \left[[(H_a + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)]^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \right] dx - H_a \quad (17)$$

integrali çözülür.

$$H_* = [\alpha(1+n)X]^{\frac{1}{n+1}} \quad (18)$$

eşitliği ile ilk nüfuz alanı bulunur. Aşama III için, $H_a \geq H_*$ için akı yoğunluğu profiline ait denklemden değişiklik olmaz.

$$H(x) = [(H_a + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)]^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \quad (19)$$

Ortalama manyetizasyon için,

$$\langle M \rangle = \frac{1}{X} \int_0^x \left[[(H_a + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)]^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \right] dx - H_a \quad (20)$$

integrali çözülür. Aşama IV için, $H_{\max} \geq H_a \geq H_{\max} - H_{**}$ için uygulanan manyetik alanın artan ve azalan değerleri için,

$$H^+(x) = [(H_{\max} + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)]^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \quad (21)$$

$$H^-(x) = [(H_{\max} + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)]^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \quad (22)$$

şeklinde bulunur. Burada;

$$H_{**} = [2\alpha(1+n)X]^{\frac{1}{n+1}} \quad (23)$$

şeklindedir. Ortalama manyetizasyon için,

$$\langle M \rangle = \frac{1}{X} \left\{ \int_0^{x_i} \left[(H_{\max} + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \right] dx + \int_{x_i}^X \left[(H_a + H_0 - I_M)^{n+1} + \alpha(1+n)(X-x)^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \right] dx \right\} - H_a \quad (24)$$

integrallerini çözmek gerekir.

Aşama V için, $H_{\max} - H_{**} \leq H_a \leq H_{c1}$ durumu için,

$$H^-(x) = [(H_{\max} + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)^{\frac{1}{n+1}} - H_0] \quad (25)$$

denklemini kullanarak,

$$\langle M \rangle = \frac{1}{X} \int_0^x \left[(H_a + H_0 - I_M)^{n+1} - \alpha(1+n)(X-x)^{\frac{1}{n+1}} - H_0 \right] dx - H_a \quad (26)$$

denkleminin çözümü ortalama manyetizasyonu verecektir.

Diğer aşamalar, grafikten de görüleceği üzere diğer aşamalar simetriktir o yüzden bulunan denklemlerin negatifleri alınarak bulunabilir.

3. BULGULAR

Bu çalışmada ele alınan M-T (manyetik moment-sıcaklık) grafiklerini fiziksel olarak fit edecek denklemler, Maxwell denklemlerinden türetilen yukarıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir.

$$\gamma = \gamma p * f * t_{irr}^2 \quad (27)$$

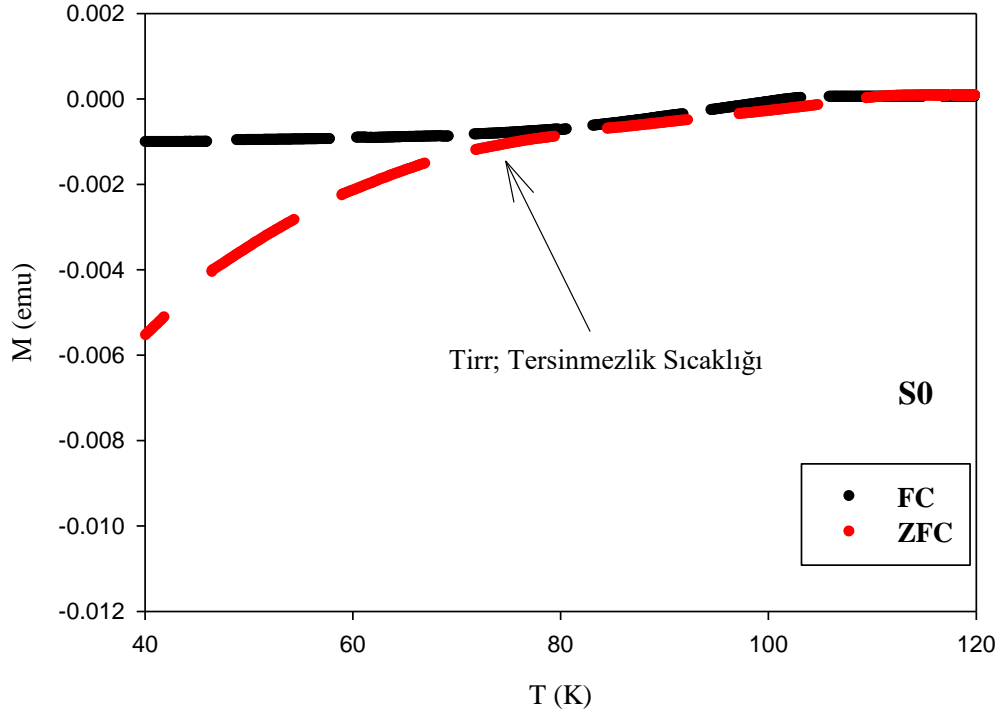
$$H_a = \frac{1}{\gamma} (1 - t_{c1}^2) \quad (28)$$

$$J_c(T) = \left(1 - \frac{t^2}{t_{irr}^2}\right)^k \quad (29)$$

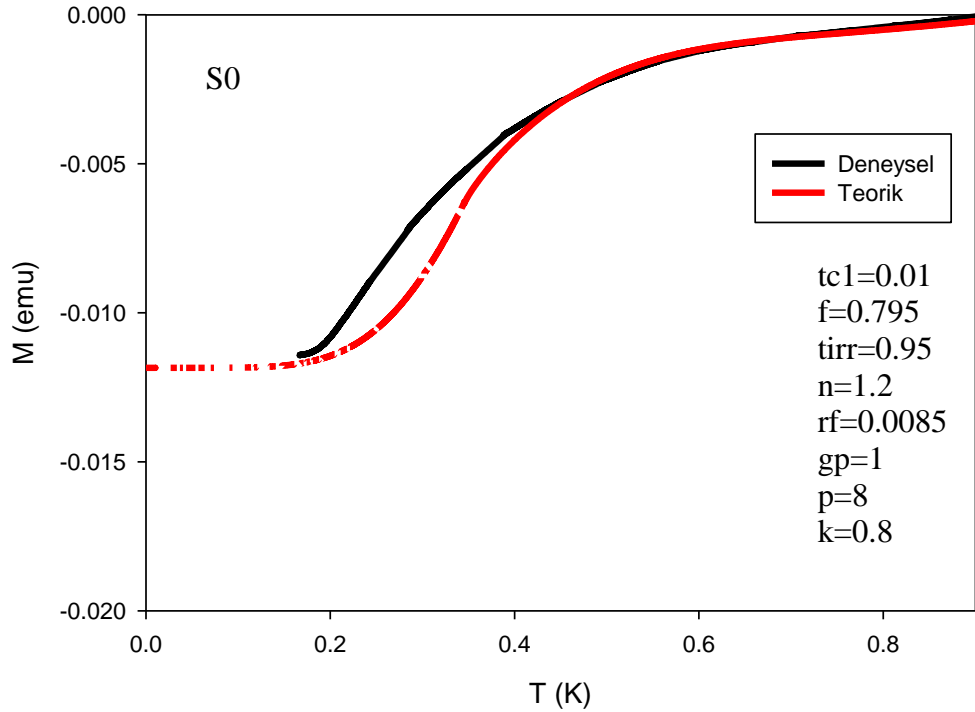
$$I_M = \frac{1 (1 - t^2)^{p+1}}{\gamma (1 - t_{c1}^2)^p} \quad (30)$$

$$H(x) = \left[\left(\frac{1}{\gamma} (1 - t_{c1}^2) - I_M \right)^{n+1} - J_c(T)(1 - x) \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (31)$$

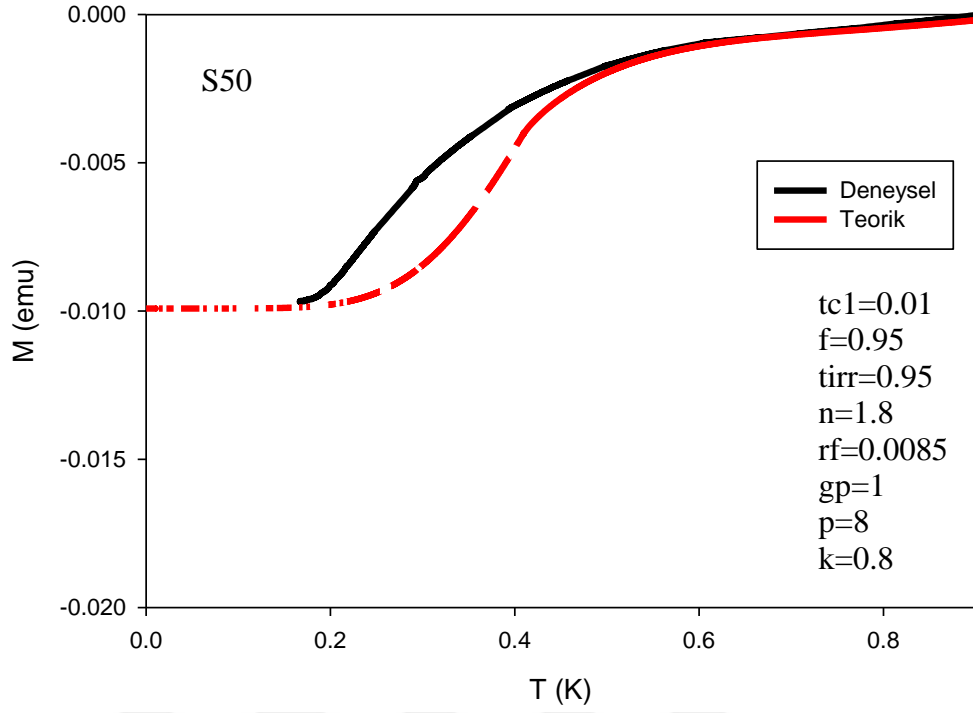
Bu eşitliklerde γ , f , γp , t_{irr} , k , p ve n sabittir. t_{irr} parametresi FC ve ZFC süreçlerinin ayrıldığı noktadaki sıcaklık değeridir. Diğer adıyla tersinmezlik sıcaklığıdır. x numuneye ait kalınlığı vermekte olup manyetik alanın girme derinliğiyle yakından ilişkili bir parametredir. Program çalıştırılırken sıcaklık eksenini en yüksek sıcaklık değerine bölünerek normalize edilmiştir. Yukarıda bahsi geçen parametreler bu normalize olmuş değerlere göre seçilmiştir.



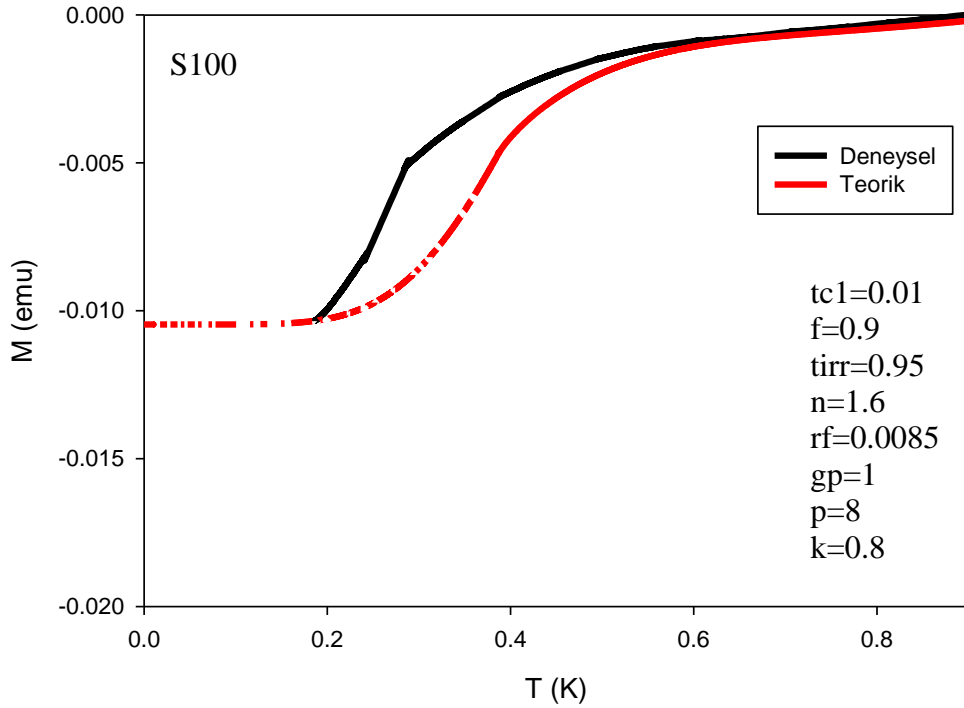
Şekil 8. S0 süperiletken numunesine ait FC ve ZFC deneysel eğrilerinin grafiği ve Tersinmezlik sıcaklığının (T_{irr}) gösterimi



Şekil 9. S0 süperiletken numunesine ait deneysel ZFC eğrisi ve teorik fit eğrisi.



Şekil 10. S50 süperiletken numunesine ait deneysel ZFC eğrisi ve teorik fit eğrisi.



Şekil 11. S100 süperiletken numunesine ait deneysel ZFC eğrisi ve teorik fit eğrisi.

Şekil 11.'de gösterildiği üzere t_{irr} parametresi üç süperiletken malzeme için belirlenmiştir. Daha sonra fiziksel değeri olan verilerin mathematica programına girilmesiyle teorik olarak, deneysel verilere en iyi uyumu gösterecek veriyi bulmak için deneme-yanılma yöntemiyle program koşturulmuş ve bu şekilde verilerin yeniden türetilmesi sağlandı. Tablo 3'de kullanılan parametreler ve değerler her bir numune için gösterildi.

Tablo 3. Üç numune için teorik olarak elde edilen parametrik değerler

| | N | f | t_{cl} | t_{irr} | rf | γ_p | p | K |
|-------------|-----|-------|----------|-----------|--------|------------|---|-----|
| S0 | 1,2 | 0,795 | 0,01 | 0,95 | 0,0085 | 1 | 8 | 0,8 |
| S50 | 1,8 | 0,95 | 0,01 | 0,95 | 0,0085 | 1 | 8 | 0,8 |
| S100 | 1,6 | 0,90 | 0,01 | 0,95 | 0,0085 | 1 | 8 | 0,8 |

Burada n parametresi kritik akım yoğunluğunun manyetik alana bağlılığını gösteren parametredir. f parametresi numuneler için elde edilen t_{irr} değerinden sonra grafiğin geri kalan kısmını fit edebilmek için gerekli olan katsayıdır. Geri kalan parametreler her üç numune için de aynı değere sahip olup değişimin sadece n parametresine ait olduğu görülmektedir. 2016 yılında Başoğlu ve diğerleri tarafından (Başoğlu, 2016) Y358 numunesine ait kritik akım yoğunluğunun karşılaştırılması yapılmış büyükten küçüğe doğru sırasıyla S50, S100 ve S0 numunelerine ait olduğunu hem deneysel hem de M-H ölçümlerinden göstermişlerdir.

Bu tezde elde edilen sonuçlar, yukarıda bahsi geçen referansı doğrulamakta olup elde edilen teorik eğrinin referansla uyum içinde olduğunu göstermektedir.

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç farklı YBCO (358) yüksek sıcaklık süperiletkenin manyetik moment- sıcaklık özellikleri kritik hal modeli hesapları ile araştırıldı.

Sabit alanda (250 Oe) ölçülen moment- sıcaklık verilerinden, sinterleme ortamında verilen oksijen oranına göre kritik akım yoğunluğunun literatür ile uyumlu şekilde olduğu gözlemlendi.

Modellemede kullanılan kritik hal modeli (Bean ve basit Kim modeli) yardımıyla türetilen denklemler M-T verilerinden elde edilen ZFC eğrisine oldukça iyi derecede uyum sağladığı görüldü.

Modellemede kullanılan bazı süperiletkenlik parametreleri elde edildi.

5. ÖNERİLER

Araştırmacılar, kritik sıcaklık ve kritik akım yoğunluğunu arttırmak amacıyla farklı süperiletken malzemeleri için yahut eldeki süperiletken numunelere değişik ilave malzemeler katkı ederek bu durumu geliştirmek için çaba göstermektedirler. Bizde bu çalışmamızda, YBCO (358) yüksek sıcaklık süperiletkenin farklı sinterleme ortamları için manyetik moment- sıcaklık eğrileri üzerine etkisini ve teorik olarak eğrilerin elde edilmesi ile bazı süperiletkenlik parametrelerinin belirlenmesini inceledik. Ancak ilave malzemesi olarak farklı malzemeler kullanılarak daha iyi neticeler elde edilebilir.

Bu çalışmada uygulanan model Bean ve Kim modellerine göre yapılmıştır. Geliştirilen diğer modellere göre denklemler türetilip programı yazılırsa daha iyi sonuçlar verebilir. Analitik çözümlerin yanı sıra nümerik çözümlerden istifade edilmesi daha hızlı ve etkin bir sonuç verebilir.

KAYNAKLAR

- Abrikosov, A.A., 1957.** On the magnetic properties of superconductors of the second group, english translate soviet physics. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 5, 1174.
- Bardeen, J., Cooper, L.N. and Schrieffer, J.R., 1957.** Theory of superconductivity. Physical Review, 108, 1175-1203.
- Başoğlu, M. ve Düzgün, İ., 2016.** Improvement of current density of different atmosphere-sintered Y358 Superconductors. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 29, 1737-1740.
- Bean, C.P., 1962.** Magnetization of hard superconductors. Physical Review Letters 8,250-253.
- Bean, C.P., 1964.** Magnetization of high-field superconductors. Review of Modern Physics, 36, 31-38.
- Bishop, D.J., Gammel, P.L. and Huse, D.A., 1993.** Resistance in high-temperature superconductor. Scientific American, 48.
- Brand, R.A., 1972.** Paramagnetic Critical State: Pinning in a Series of Type II Superconducting Alloys. Doktora Tezi, Cornell Üniversitesi, Ithaca, Yunanistan, 90 s., 35.
- Campbell, A.M., Evetts, J. E. and Dew-Hughes D., 1968.** Study of the barrier against flux exit from type II superconductors. Philosophical Magazine, 18, 313-323.
- Civale, L., Worthington T.K. and Gupta, A., 1991.** Thickness dependence of the irreversibility line in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films. Physical Review B, 43, 5425.
- Clem, J. R., 1979.** Theory of AC losses in type-II superconductors with a field-dependent surface barrier. Journal of Applied Physics, 50, 3518.
- Cyrot, M. and Pavuna, D., 1992.** Introduction to superconductivity and high- T_c materials. World scientific, Singapore, 87-99.
- Çelebi, S., Öztürk, A. ve Çevik, U., 1999.** Magnetic responses of a high- T_c Semi-reversible YBCO superconductor. Journal of Alloys and Compounds, 288, 249-255.
- Çelebi, S. ve LeBlanc, M.A.R., 2000.** Magnetic relaxation in a commercial Superconductor Science Technology, 137, 1057-1061.
- Çelebi, S., Öztürk, A., Karaca, İ. ve Kölemen, U., 2000.** The effect of potassium doping on resistive transitions and transport critical current of bulk YBCO high- T_c superconductors. Turkish Journal of Physics, 24, 567-576.

- Çelebi, S. ve LeBlanc, M.A.R., 2002.** Flux line cutting in granular high T_c superconducting tubes. Studies of high temperature superconductors: vortex physics, Cilt 42, Nova Science Publishers, 169-245.
- Çelebi, S., Karaca, I., Öztürk, A. ve Nezir, S., 1998.** Fabrication and characterization of $\text{Bi}_{1.84}\text{Pb}_{0.34}\text{Sr}_{1.91}\text{Ca}_{2.03}\text{Cu}_{3.06}\text{O}_{10}$ superconductors prepared by a wet technique. Journal of Alloys and Compounds, 268, 256.
- Dubois, S., Carmona, F. and Flandrois, S., 1996.** Irreversibility line of YBaCuO sintered ceramics, YBaCuO single crystal and superconducting composites studied by AC susceptibility and transport measurements. Physica, 260, 19.
- Düzgün, İ., 2005.** Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerinde Ag_2O İlavesinin AC Kayıplarına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 59 s., 5,6,7,8.
- Düzgün, İ., Öztürk, A. ve Çelebi, S., 2010.** Irreversibility line and flux relaxation in Bi:2223/Ag tape prepared by CTFF technique: H//c axis. Journal Superconductivity Novel Magnetism, 23, 1349-1354.
- Düzgün, İ., 2018.** The investigation of the lattice strains and crystallite sizes of Y357 and Y123 high-temperature superconductors. Turk Journal of Physics, 42, 378-385.
- Emmen, J.H.P.M., Stollman, G.M. and De Jonge, W.J.M., 1990.** Frequency and field dependence of the irreversibility line in a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ film. Physica C, 169, 418.
- Fietz, W. A., Silcox, J., Beasley, M. R., and Webb, W.W., 1964.** Magnetization of superconducting Nb-25%Zr wire. Physics Review A, 136, 335-345.
- Frischerz, M.C., Sauerzopf, F.M., Weber, H.W., Murakami, M. and Emel'chenko, G.A., 1995.** Comparative study of experimental techniques for irreversibility lines and critical current densities in high-temperature superconductors. Superconductor Science Technology, 8, 485.
- Ginzburg, V.L. and Landau, L.D., 1950.** On the theory of superconductivity. Soviet Physics Journal Experimental and Theoretical Physics, 20, 1064.
- Green, I. M. and Hlawiczka, P., 1967.** Pinning forces and hysteresis in type 2 superconductors. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 114, 1329.
- Hampshire R.G., and Taylor, M.T., 1972.** The numerical study of influence of flux creep on AC losses in superconductors. Journal Physics F: Metal Physics, 2, 89-92.
- Hughes, D., 1974.** Effect of an edge barrier on magnetization of superconductor. Philosophical Magazine, 30, 293-297.

- İnanır, F., 2006.** Farklı Alan Etkileri İçin II. Tip Süperiletkenlerin Manyetik zorlamının Modellenmesi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 142 s., 20.
- Irie, F. and Yamafuji, K., 1967.** Theory of flux motion in non-ideal type-II superconductors. Journal of the Physical Society of Japan, 23, 255-268.
- Kim, Y.B., Hempstead, C.F. and Strnad, A.R., 1962.** Critical persistent current in hard superconductors. Physics Review Letter, 9, 306-309.
- Kim, Y.B., Hempstead, C.F. and Strnad, A.R., 1963.** Magnetization and critical supercurrents. Physics Review, 129, 528-534.
- Kramer, E.J., 1973.** Scaling laws for flux pinning in hard superconductors. Journal of Applied Physics, 44, 1360-1370.
- London, F. and London, H., 1935.** Alternating current losses in superconductors of the second kind. Proceedings of the Royal Society A, 149, 71.
- Malozemoff, A.P., Worthington, A.P., Yeshurun, Y., Holtzberg, F. and Kes, P.H., 1988.** Frequency dependence of the AC susceptibility in a Y-Ba-Cu-O crystal: A reinterpretation of H_{c2} . Physics review B, 38, 7203-7206
- Meissner, W.H., Ochsenfeld, R., 1933.** Upper critical fields of high T_c superconducting Y-Ba-Cu-O. Nature, 132, 931-935.
- Müller, K.A., Tagashie M. ve Bednortz, J.G., 1987.** Flux trapping and superconductive glass state In La_2CuO_{4-y} :B. Physics review letter, 58, 1143.
- Onnes, H.K., 1911.** Superconductivity and magnetizm. Communications Physics Laboratory at the University of Leiden, 119-120.
- Öztürk, A., 2005.** Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerinin Elektriksel ve Manyetik Özelliklerinin Deneysel ve Modelleme ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 146 s., 50,51.
- Revaz, B., Triscone, G., Fabrega, L., Junod, A. and Muller, J., 1996.** Low-field dc magnetization investigations in a $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ single crystal: observation of a magnetic phase transition at the vortex melting line. Euro Physics Letter, 339, 701.
- Rose-Innes, A.C., Rhoderick, E.H., 1980.** Introduction to superconductivity. Pergamon Press, Oxford, England.
- Seeber, B., 1998.** Handbook of applied superconductivity.1. Cilt, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK.

Serway, R.A., 1990. Physics for scientists and engineers, third edition. Saunders College Publishing, 1291-1317

Tochihara, S., Yasuoka, H. and Mazaki, H., 1998. Effect of surface barriers and lower critical fields to magnetization of type-II superconductors. Physica C, 295, 101-125.



ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Manisa’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Manisa’da tamamladı. 2007 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Eğitim Fakültesi Matematik Öğretmenliği Bölümünü kazandı. 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Millî Eğitim Bakanlığı bünyesinde matematik öğretmeni olarak göreve atandı. 2015 yılında başladığı Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Matematik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir. Halen Milli eğitim Bakanlığı Pazar Kız Kulesi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi’nde öğretmen olarak görevine devam etmektedir.

