

T.C.  
RİZE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**(Sm123)<sub>1-x</sub>(Nd123)<sub>x</sub> SÜPERİLETKENLERİNİN  
MANYETİK KALDIRMA KUVVETİNİN SIVI AZOT  
SICAKLIĞINDA İNCELENMESİ**

**Menekşe SARIHAN**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şükrü ÇELİK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**RİZE 2011**

T.C.  
RİZE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**(Sm123)<sub>1-x</sub>(Nd123)<sub>x</sub> SÜPERİLETKENLERİNİN  
MANYETİK KALDIRMA KUVVETİNİN SIVI AZOT  
SICAKLIĞINDA İNCELENMESİ**

**Menekşe SARIHAN**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şükrü ÇELİK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**RİZE 2011**

T.C.  
RİZE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

(Sm123)<sub>1-x</sub>(Nd123)<sub>x</sub> SÜPERİLETKENLERİNİN MANYETİK KALDIRMA  
KUVVETİNİN SIVI AZOT SICAKLIĞINDA İNCELENMESİ

Menekşe SARIHAN

Yüksek Lisans

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01.06.2011

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 20.06.2011

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şükrü ÇELİK

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ekrem YANMAZ

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Osman GÖRÜR

Enstitü Müdürü: Doç. Dr. Fatih YILMAZ



RİZE 2011

## ÖNSÖZ

Katıhal tepkime yöntemi ile hazırlanan külçe  $(Sm123)_{1-x}(Nd123)_x$  süperiletkenlerinin üretimi ve sıvı azot sıcaklığında gerçekleşen manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri Rize Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında, yapısal ölçümler ise Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirildi.

Tez çalışmam boyunca yardımı esirgemeyen danışmanım sayın Doç. Dr. Şükrü ÇELİK'e gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca elindeki olanakları bize sonuna kadar sunan K.T.Ü. Fizik Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Ekrem YANMAZ'a teşekkür ederim. Yrd. Doç. Dr. Murat TOMAKİN'e, bölümdeki tüm hocalarıma ve Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında çalışmakta olan grup arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Bu zamana kadar hiçbir desteklerini esirgemeyen ANNEME ve BABAMA teşekkür ederim.

Menekşe SARIHAN

Rize 2011

## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| ÖNSÖZ .....   | III             |
| İÇİNDEKİLER .....   | IV              |
| ÖZET .....  | VI              |
| SUMMARY .....   | VII             |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....   | VIII            |
| TABLolar DİZİNİ .....   | XI              |
| SEMBOLLER DİZİNİ.....   | XII             |
| 1. GENEL BİLGİLER.....  | 1               |
| 1.1. Giriş .....  | 1               |
| 1.2. Sıfır Direnç Özelliği .....                                      | 4               |
| 1.3. Kritik Sıcaklık ( $T_c$ ) ve Kritik Manyetik Alan ( $H_c$ )..... | 5               |
| 1.4. Meissner Olayı.....  | 7               |
| 1.5. Kritik Akım Yoğunluğu .....                                      | 9               |
| 1.6. I. ve II. Tip Süperiletkenlerin Manyetizasyonu.....              | 10              |
| 1.7. Süperiletkenlerde Akı Çivilenmesi ( Flux Pinning ).....          | 14              |
| 1.8. Süperiletkenlerde Akı Sıçraması ( Flux Jumping ) .....           | 15              |
| 1.9. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenliği .....                           | 15              |
| 1.9.1. Perovskit yapı .....   | 16              |
| 1.9.2. YBCO süperiletkenlerin kristal yapıları.....                   | 16              |
| 1.10. Süperiletkenlerin Teknolojide Kullanım Alanları.....            | 18              |
| 1.11. MagLev ( Magnetic Levitation ) Sistemler .....                  | 19              |
| 1.12. Malzeme Üretim Teknikleri .....                                 | 20              |
| 1.12.1. Katıhal tepkime yöntemi .....                                 | 21              |
| 1.12.2. Eritme – döküm yöntemi .....                                  | 22              |
| 1.13. Manyetik Kaldırma Kuvveti.....                                  | 22              |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....  | 26              |
| 2.1. Toz Örneklerin Hazırlanması .....                                | 26              |
| 2.2. DTA Ölçümü .....   | 27              |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.3.   | NdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> Süperiletkeninin Hazırlanması ..... | 28 |
| 2.3.1. | Kalsinasyon işlemi.....  | 28 |
| 2.3.2. | Sinterleme işlemi .....  | 30 |
| 2.3.3. | Oksijen verme işlemi.....  | 31 |
| 2.4.   | Sm(123) <sub>1-x</sub> Nd(123) <sub>x</sub> Süperiletkeninin Hazırlanması.....         | 32 |
| 2.4.1. | Kalsinasyon işlemi.....  | 32 |
| 2.4.2. | Sm(123) <sub>1-x</sub> Nd(123) <sub>x</sub> serisinin hazırlanması.....                | 34 |
| 2.4.3. | Sinterleme işlemi .....  | 35 |
| 2.4.4. | Oksijen verme işlemi.....  | 36 |
| 2.5.   | X-Işını Kırınım Ölçümleri.....   | 36 |
| 2.6.   | Direnç Ölçümü .....  | 37 |
| 2.7.   | Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçümü.....  | 38 |
| 2.8.   | Mıknatısın Yüzey Manyetik Profil Ölçümü.....   | 40 |
| 3.     | BULGULAR .....   | 41 |
| 3.1.   | DTA Analizleri.....  | 41 |
| 3.2.   | X-Işını Kırınım Sonuçları.....   | 42 |
| 3.3.   | Direnç Ölçüm Sonuçları .....   | 44 |
| 3.4.   | Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sonuçları.....   | 46 |
| 3.5.   | Mıknatısın Yüzey Manyetik Profili Ölçüm Sonuçları.....                                 | 60 |
| 4.     | TARTIŞMA.....  | 64 |
| 5.     | SONUÇ ve ÖNERİLER.....   | 67 |
|        | KAYNAKLAR.....   | 68 |
|        | ÖZGEÇMİŞ.....  | 72 |

## ÖZET

Bu çalışmada katıhal tepkime yöntemi ile hazırlanan külçe  $(\text{Sm123})_{1-x}(\text{Nd123})_x$  süperiletken yapısının  $x = 0,00; 0,10; 0,20; 0,30$  katkı oranlarına bağlı olarak manyetik kaldırma kuvveti özellikleri sıvı azot sıcaklığında incelendi.

Örneklerin yapısal özellikleri diferansiyel termal analiz (DTA), X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak; fiziksel özellikleri düşük sıcaklık (4-120 K) direnç (R-T) ölçümleriyle tayin edildi. Manyetik kaldırma kuvveti ise laboratuarda oluşturulan sistem ile yapıldı. Buna bağlı olarak örneklerin manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları hesaplandı. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri farklı hızlarda ve farklı minimum mesafelerde ölçülerek bunların kaldırma kuvveti üzerindeki etkileri de incelendi. Ayrıca farklı magnetler kullanılarak magnetin yüzey profilinin manyetik kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi de araştırıldı. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinden,  $x$  katkı miktarı arttıkça manyetik kaldırma kuvvetinin de arttığını gözlemlendi. Yani katkı miktarına bağlı olarak örnek içerisinde tuzaklanan akı miktarı da artmaktadır. Buna göre en yüksek kaldırma kuvveti  $x = 0,30$  katkılı örnekte gözlemlendi. Örneğin hızının ve minimum mesafenin azalması kaldırma kuvveti üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Süperiletkenlik, Sm123, Nd123, Katıhal Tepkime Yöntemi, Manyetik Kaldırma Kuvveti

## SUMMARY

### **Investigation of Magnetic Levitation Force of $(\text{Sm123})_{1-x}(\text{Nd123})_x$ Superconductors at Liquid Nitrogen Temperature**

In this work, levitation force properties of bulk superconductor  $(\text{Sm123})_{1-x}(\text{Nd123})_x$  composition, produced with solid state reaction depending on changing on  $x = 0,00; 0,10; 0,20; 0,30$  doping rate, were investigated at liquid nitrogen temperature.

Structural properties of the superconductor samples were determined by differential thermal analysis (DTA) and X-ray diffraction (XRD) analysis, physical properties were studied by low temperature R-T measurements. The magnetic levitation force measurements were performed by magnetic levitation force measurement system, designed in our laboratory, and magnetically levitation force densities were calculated. Magnetic levitation force measurements under different velocity, minimum height and magnet size were used to examine the effects of them on the force. The results of the force measurements showed that the force increased with the increase of the content  $x$ . That is, the amount of the fluxed trapped inside the sample increased with increase of  $x$ . It is observed that the maximum force value belongs to the sample with  $x = 0,30$ . The decrease in the velocity of the sample and the minimum height affect on the force positively.

**Key Words:** Superconductivity, Sm123, Nd123, Solid State Reaction, Magnetic Levitation Force



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Şekil 1.  | Civanın süperiletkenliğe geçişi (Onnes, 1911).....   | 2  |
| Şekil 2.  | Süperiletken ve süperiletken olmayan iki malzeme için direncin sıcaklık ile değişimi.....                                  | 5  |
| Şekil 3.  | a) I. ve b) II. tip süperiletkenlerin kritik manyetik alan ve kritik sıcaklık davranışları.....                            | 6  |
| Şekil 4.  | Manyetik alan yokluğunda ve varlığında soğutulan süperiletken malzeme (Rose-Innes and Rhoderick, 1980) .....               | 8  |
| Şekil 5.  | Kritik yüzey faz diyagramı.....  | 9  |
| Şekil 6.  | a) I. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrisi b) II. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrisi (Schmidt, 1997).....    | 11 |
| Şekil 7.  | Vorteks mekanizması .....  | 12 |
| Şekil 8.  | Perovskit birim hücresinin kristal yapısı .....  | 16 |
| Şekil 9.  | YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> (YBCO) yapısı (Çelik, 2006) .....  | 17 |
| Şekil 10. | DTA ölçüm sistemi .....  | 28 |
| Şekil 11. | NdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> süperiletkeninin 1. kalsinasyon işlemi için sıcaklık-zaman grafiği..... | 29 |
| Şekil 12. | NdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> süperiletkeninin 2. kalsinasyon işlemi için sıcaklık-zaman grafiği..... | 30 |
| Şekil 13. | NdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> süperiletkeninin sinterleme işlemi için sıcaklık-zaman grafiği .....    | 31 |
| Şekil 14. | NdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> süperiletkeninin oksijen verme işlemi için sıcaklık-zaman grafiği.....  | 32 |
| Şekil 15. | SmBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> süperiletkeninin 1. kalsinasyon işlemi için sıcaklık-zaman grafiği..... | 33 |
| Şekil 16. | SmBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub> süperiletkeninin 2. kalsinasyon işlemi için sıcaklık-zaman grafiği..... | 34 |
| Şekil 17. | Sm(123) <sub>1-x</sub> Nd(123) <sub>x</sub> süperiletkeninin sinterleme işlemi için sıcaklık-zaman grafiği.....            | 35 |
| Şekil 18. | Sm(123) <sub>1-x</sub> Nd(123) <sub>x</sub> süperiletkeninin oksijen verme işlemi sıcaklık-zaman grafiği.....              | 36 |
| Şekil 19. | X-ışını kırınım sistemi.....   | 37 |
| Şekil 20. | Direnç ölçüm sistemi.....  | 38 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Şekil 21. | Örneklerin kesilmesi ve dört nokta yöntemi ile kontak yapılmasının şematik gösterimi .....   | 38 |
| Şekil 22. | Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi .....  | 39 |
| Şekil 23. | Manyetik kaldırma kuvveti ölçümü sırasında süperiletken örnek ile magnet arasındaki mesafe ilişkisi.....   | 40 |
| Şekil 24. | Sm(123) ve Nd(123) süperiletkenlerinin diferansiyel ısıl işlemleri.....  | 42 |
| Şekil 25. | Süperiletken örneklerin polikristal difraktometresiyle elde edilmiş x-ışını kırınım desenleri.....   | 43 |
| Şekil 26. | Süperiletken örneklerin x-ışını kırınımları kullanılarak hesaplanan örgü parametreleri ( $a$ , $b$ , $c$ ) ve $V$ hacimlerinin katkı miktarlarına göre değişimleri ..... | 44 |
| Şekil 27. | Serideki örneklerin direnç-sıcaklık eğrileri.....  | 45 |
| Şekil 28. | Katkıya göre kritik geçiş sıcaklık aralığı.....  | 46 |
| Şekil 29. | Serideki örneklerin farklı çevrimlerdeki manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu ölçümleri.....   | 47 |
| Şekil 30. | Serideki örneklerin farklı hızlardaki manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu ölçümleri.....  | 48 |
| Şekil 31. | Serideki örneklerin aynı hızlardaki manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu ölçümleri.....  | 49 |
| Şekil 32. | $x = 0,00$ için farklı $z_{min}$ değerlerindeki manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları.....   | 50 |
| Şekil 33. | Farklı magnetler kullanılarak elde edilen manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları.....   | 51 |
| Şekil 34. | Farklı magnet hızlarının farklı magnetlerin kaldırma kuvvetleri üzerindeki etkisi .....  | 52 |
| Şekil 35. | Manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu farkı ( $\Delta f$ ) hesabının şematik gösterimi.....   | 53 |
| Şekil 36. | Aynı katkının farklı hızlar için $\Delta f$ 'nin mesafeye göre değişimi .....  | 54 |
| Şekil 37. | Aynı hızlarda farklı katkılar için $\Delta f$ 'nin mesafeye göre değişimi .....  | 55 |
| Şekil 38. | $\Delta f_{maks}$ ve $z_{maks}$ değerlerinin şematik gösterimi .....   | 56 |
| Şekil 39. | Aynı hızda $\Delta f_{maks}$ 'ın katkıya göre değişimi.....  | 57 |
| Şekil 40. | Aynı hızda $z_{maks}$ 'ın katkıya göre değişimi.....   | 58 |
| Şekil 41. | Aynı katkıya ait $\Delta f_{maks}$ 'ın örneğin hızına göre değişimi .....  | 59 |
| Şekil 42. | Aynı katkının $z_{maks}$ 'ın hıza göre değişimi .....  | 59 |
| Şekil 43. | 1. ve 2. mıknatısların yüzey merkezinden olan mesafeye göre eksenel yönde manyetik alanın değişimi.....  | 60 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Şekil 44. | 1. Miknatısın yüzeyden farklı yüksekliklerdeki manyetik alanın eksensel yöndeki bileşeninin yatay düzleme göre değişimleri..... | 61 |
| Şekil 45. | 2. Miknatısın yüzeyden farklı yüksekliklerdeki manyetik alanın eksensel yöndeki bileşeninin yatay düzleme göre değişimleri..... | 62 |
| Şekil 46. | 1. miknatısın $z=0,25\text{mm}$ 'de manyetik yüzey profilinin gölge grafiği (Gauss biriminde).....                              | 63 |
| Şekil 47. | 2. miknatısın $z=0,25\text{mm}$ 'de manyetik yüzey profilinin gölge grafiği (Gauss biriminde).....                              | 63 |

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tablo 1. | Bazı I. tip süperiletkenlerin $T_c$ kritik sıcaklıkları ve $H_c(0)$ kritik manyetik alan değerleri (Aslan, 2005) .....  | 11 |
| Tablo 2. | Bazı II. tip süperiletkenlerin $T_c$ kritik sıcaklıkları ve $H_{c2}$ kritik manyetik alan değerleri ( Aslan, 2005) .....  | 13 |
| Tablo 3. | $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 'nun ( YBCO ) ab-düzlemi ve c-ekseni yönünde $T=0$ K'de süperiletkenlik ana parametreleri. $\xi$ , koherens uzunluğu; $\lambda$ , manyetik alan girme derinliği; $H_c$ , termodinamik kritik manyetik alan; $J_c$ , kritik akım yoğunluğu; $H_{c1}$ ve $H_{c2}$ ise sırasıyla alt ve üst kritik manyetik alan değerleri (Ginsberg, 1994; Poole, 2000) ..... | 18 |
| Tablo 4. | Başlangıç bileşenlerini oluşturmak için kullanılan oksit tozların molekül ağırlıkları ve saflık dereceleri.....   | 26 |
| Tablo 5. | $SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ süperiletkeni için oksit bileşenlerinin miktarları .....   | 27 |
| Tablo 6. | $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ süperiletkeni için oksit bileşenlerinin miktarları .....   | 27 |
| Tablo 7. | $Sm(123)_{1-x}Nd(123)_x$ süperiletkeni için her bir katkıya ait başlangıç bileşenlerinin kütle miktarları .....   | 34 |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|             |  |
|-------------|--|
| $a,b,c$     | : Örgü parametreleri                                 |
| $B$         | : Manyetik alan                                      |
| $c$         | : Işık hızı  |
| $e$         | : Elektron yükü                                      |
| $E$         | : Elektrik alan                                      |
| $F$         | : Lorentz kuvveti                                    |
| $f$         | : Manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu                 |
| $h$         | : Planck sabiti                                      |
| $H$         | : Dış manyetik alan                                  |
| $H_c$       | : I. tip süperiletkenlerde kritik manyetik alan      |
| $H_{c1}$    | : II. tip süperiletkenlerde alt kritik manyetik alan |
| $H_{c1}(0)$ | : Mutlak sıfır sıcaklıkta alt kritik manyetik alan   |
| $H_{c2}$    | : II. tip süperiletkenlerde üst kritik manyetik alan |
| $H_{c2}(0)$ | : Mutlak sıfır sıcaklıkta üst kritik manyetik alan   |
| $J$         | : Akım yoğunluğu                                     |
| $J_c$       | : Kritik akım yoğunluğu                              |
| $K$         | : Kelvin   |
| $M$         | : Manyetizasyon                                      |
| $n_s$       | : Elektron yoğunluğu                                 |
| $R$         | : Direnç   |
| $T$         | : Sıcaklık   |
| $T_c$       | : Kritik sıcaklık                                    |
| $V$         | : Birim hücrenin hacmi                               |
| $\chi$      | : Manyetik alınganlık                                |
| $\lambda$   | : Girme derinliği                                    |
| $\kappa$    | : Ginzburg-Landau parametresi                        |
| $\xi$       | : Koherens uzunluğu                                  |
| $\theta_D$  | : Debye sıcaklığı                                    |
| $\rho$      | : Öz direnç  |

|          |                     |
|----------|---------------------|
| $\Omega$ | : Ohm               |
| $\Phi_0$ | : Akı kuantası      |
| $\delta$ | : Oksijen eksikliđi |

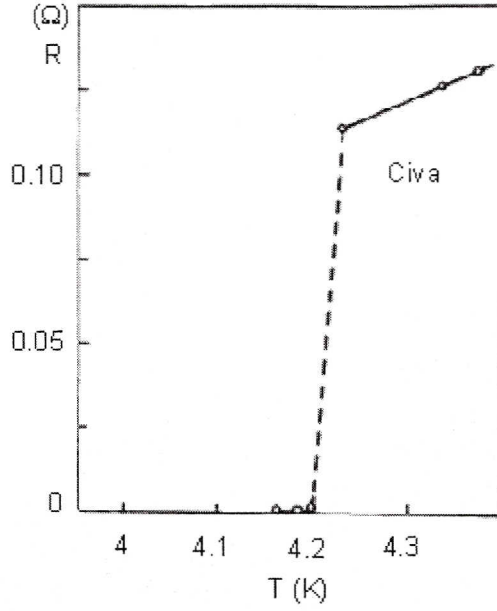
## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Süperiletkenlik, belirli bir kritik geçiş sıcaklığının altında direnci sıfıra düşen ve mükemmel diamanyetik özellik gösteren malzemelerle ilgili katıhal fiziğinin bir dalıdır. Süperiletkenler, belirli bir kritik sıcaklığın altında elektrik akımına karşı dirençlerini tamamen kaybeden maddelerdir. Bu bize elektrik akımının, sıradan iletkenlerde dirençten doğan ve ısı olarak yayılan enerji kaybını engelleme olanağı verir. Bugün hala, bilinen teknolojik uygulamalarda kullanılacak tüm özelliklere sahip süperiletken bir madde bulunmuş değildir (Özkurt, 2007).

Bir iletkenin elektriksel öz direncini etkileyen birçok unsur mevcuttur. Elektronlar, bir kristalde bulunan yapısal kusurlardan dolayı saçılırlar. Ayrıca örgü iyonlarının, katıda hareket eden ve ses dalgalarına benzer bir olayı meydana getiren titreşimleri vardır. Bu titreşimlerden oluşan dalgalara fonon denir. Sıcaklık arttıkça örgüde daha çok fonon oluşmaktadır. Bunun sonucunda da iletim elektronlarını saçan ve daha fazla dirence sahip olan bir elektron-fonon etkileşmesi oluşur. Bu yüzden sıcaklık azaldıkça katının elektriksel direnci azalmalıdır. Ancak, kristal kusurlarından dolayı mutlak sıfır civarında bile bir artık direnç beklenir. Buna karşılık, madde süperiletken halde ise direncin davranışı farklıdır. Bir süperiletkenin direnci, kristal ya da saf olup olmadığına bakılmaksızın mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklıklarda sıfır olabilmektedir. Direncin kaybolduğu sıcaklığa, kritik sıcaklık veya kritik geçiş sıcaklığı ( $T_c$ ) denir (Aslan, 2005).

Süperiletkenlik ile ilgili ilk çalışmalar 1908 yılında Hollandalı fizikçi Kamerling Onnes'in helyumu sıvılaştırması ile düşük sıcaklık alanında yaptığı deneylerle başladı (Onnes, 1911). Onnes ve yardımcıları ilk olarak Platin'i incelediler ve öz direncinin, örneğin saflık derecesine bağlı olduğunu buldular. Bu çalışmadan 3 yıl sonra (1911) Onnes, deneyinde helyum gazını sıvılaştırarak sıcaklığı  $-269\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye (4 K) kadar düşürdü, saf cıvanın bu sıcaklıklardaki direncini ölçtü ve 4,19 K'de cıva direncinin  $120\text{ }\mu\Omega$ 'dan  $3\text{ }\mu\Omega$ 'a aniden düştüğünü gözledi (Şekil 1) (Çelik, 2006). Bundan bir yıl sonra ise Onnes, yeterince yüksek manyetik alan uygulanması durumunda süperiletkenliğin yok olduğunu keşfetti. Helyumu sıvılaştırması ve maddelerin düşük sıcaklık özellikleri üzerine yaptığı çalışmalar Onnes'e 1913 yılında Nobel Fizik Ödülünü kazandırdı



Şekil 1. Cıvanın süperiletkenliğe geçişi (Onnes, 1911)

W. Meissner ve R. Ochsenfeld 1933 yılında süperiletkenlerin manyetik özelliklerini incelediler ve manyetik alanda soğutulan bir süperiletkenin, kritik sıcaklık altında manyetik akıyı dışladığını buldular (Meissner and Ochsenfeld, 1933). Bu olay Meissner Olayı olarak bilinir. Ayrıca süperiletken malzemelerin  $H_c(T)$  kritik manyetik alanlarından daha büyük manyetik alanlarda süperiletkenlik özelliklerini kaybettiklerini gözlemlediler.

Süperiletkenliğin elektrodinamik özelliklerini açıklayan ilk makroskobik teori London Teorisidir (1935) (Schmidt vd, 1997). Sezgiye dayalı bu teori, süperiletkenliğin temel özelliği olan diamanyetizma ve sıfır direnç özelliğini açıklar ve Maxwell denklemlerine dayalı iki denklemden oluşur. Daha sonraki yıllarda manyetik alandaki davranışlarına göre süperiletkenleri iki ayrı grupta toplamanın mümkün olduğu anlaşıldı. London teorisi her iki tür süperiletken için ortak olan Meissner durumunu açıklamaktadır.

London teorisi kuantum etkilerini hesaba katmamaktadır. İşte bu etkileri dikkate alan süperiletkenliğin ikinci makroskobik teorisi Ginzburg - Landau teorisidir (1950) (Schmidt vd., 1997). Ginzburg ve Landau, normal hal ile süperiletken hal arasında bir düzen parametresi olduğunu düşündüler (Ginzburg and Kirzhnits, 1982).

1957 yılında süperiletkenliğin doğasının anlaşılması J. Bardeen, L. Cooper, J. R. Schrieffer tarafından geliştirilen ve BCS olarak anılan mikroskobik teori ile mümkün oldu (Bardeen vd.,1957). Süper akımı taşıyan elektron çiftlerinin fononlar aracılığıyla



çiftlendiğini ortaya koyan BCS teorisi mutlak sıfır civarındaki süperiletkenliği açıklamaya yöneliktir. Cooper, atomik örgü titreşimlerinin doğrudan bütün elektronları birleştirmekten sorumlu olduğunu fark etti. Bu titreşimler, elektronların takım halinde çiftlenmesine neden olur ve kristal örgü içerisindeki engellerle herhangi bir temas girmeden aralarından geçmelerini sağlar. Bu elektronların oluşturduğu takımlara Cooper çiftleri (Cooper pairs) adı verilmektedir. Cooper ve arkadaşları normalde bir elektronun diğer elektronu itmesi gerektiğini ve aynı zamanda süperiletken içinde ezici bir çekiciliğin de olması gerektiğini düşünüyorlardı. Bu ikilemin çözümü fononlarda bulundu. Teorilerine göre, süperiletken örgü içerisindeki pozitif yüklenmiş bir bölgeden bir negatif yüklü elektron geçtiğinde örgüde bir büzüşme meydana geliyordu. Elektron bu bölgeden çıkmadan ve örgü eski pozisyonuna gelmeden önce bu bölgeden geçen ikinci bir elektronun diğer elektron tarafından itilmesi beklenirken, bu pozitif etkileşimden dolayı birbirlerine bağlanırlar (Kılıç, 2008). BCS süperiletkenlik teorisi, onlara 1972 yılında Nobel Fizik Ödülünü kazandırdı.

Bu yılları takiben Abrikosov, süperiletkenliğin GL parametresi ( $\kappa$ ) olarak bilinen bir özelliğinin o zamana kadar kabul edildiği gibi 0,71'den küçük değil de büyük olması durumunda neler olabileceğini sorguladığı bir makale oluşturdu (Abrikosov, 1957). Böylece süperiletkenler, I. tip ve II. tip olmak üzere iki gruba ayrıldı.

1962 yılında Brian D. Josephson, 2 mm kalınlığındaki yalıtkan bir engel ile ayrılmış iki süperiletken arasında elektron çiftleri tarafından taşınan tünelleme akımının var olacağını öngördü, bu öngörü kısa bir süre içerisinde ispatlandı. Yine aynı yıllarda Bean, bir süperiletkenin, süperiletkenlik özelliğini kaybetmeden önceki kritik akım yoğunluğunun, alınganlık eğrilerinden bulunabileceğini gösterdi (Bean, 1962).

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri ilk önce 1986'da J. Bednorz ve K. A. Müller tarafından La-Ba-Cu-O sisteminde gözlemlendi (Bednorz and Müller, 1986). Bu sistemde süperiletkenlik geçiş sıcaklığı 35 K olarak ölçüldü. Bu keşfin ardından  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  bileşiğinin 92 K'de süperiletken hale geçtiği gözlemlendi (Wu vd.,1987). Bu sıcaklık sıvı azot sıcaklığının (77 K) üzerinde olduğundan süperiletkenlik konusundaki çalışmalar bu tarihten sonra hızla arttı. Bunun hemen ardından  $REBa_2Cu_3O_{7-x}$  (RE= Y, Yb, La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Lu) formundaki bileşiklerin 90 K civarında  $T_c$  gösterdikleri gözlemlendi (Müller vd., 1997). Ocak 1988'de  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$  bileşiğinin 110 K'de  $T_c$  gösterdiği ölçüldü ve daha sonra  $Ti_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$  bileşiğinin de 120 K'de  $T_c$  gösterdiği belirlendi. Ardından civa bazlı bakır oksitler keşfedildi ve  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_9$  bileşiğinin 134

K'de  $T_c$  gösterdiği 1993 Mayıs ayında bulundu. Son yıllarda yapılan çalışmalarda basit bir kristal yapıya sahip olan magnezyum diborürün ( $MgB_2$ ) 39 K'de süperiletken özellik gösterdiği bulundu (Nagamatsu vd., 2001). Bu keşif süperiletkenlik alanındaki çalışmalara yeni bir ivme kazandırdı.

## 1.2. Sıfır Direnç Özelliği

Bir iletkende akım, iletken içinde serbestçe hareket edebilen iletim bandındaki elektronlar tarafından sağlanır.

Metallerdeki direnç, elektronların fononlar, safsızlıklar ve kristal kusurlarından saçılmaları ile oluşmaktadır. Metallerdeki termal titreşimler sonucu oluşan fononların iletim elektronları ile etkileşmeleri, elektronların saçılmalarını artırmaktadır. Bu yüzden metallerin ve alaşımların elektriksel dirençleri soğudukları zaman azalır. Çünkü sıcaklık azaldıkça atomların termal titreşimleri de azalacaktır. Bu da elektronların hareketi doğrultusunda iyonlarla daha az çarpışacağını gösterir. Direncin sıcaklıkla azalması Debye sıcaklığının ( $\theta_D$ ) üçte birine kadar düşürüldür. Bu sıcaklık altında ise direnç çok az değişim gösterir ve bir noktadan sonra sabit kalır. Bu sabit değere örneğin artık direnci denir.

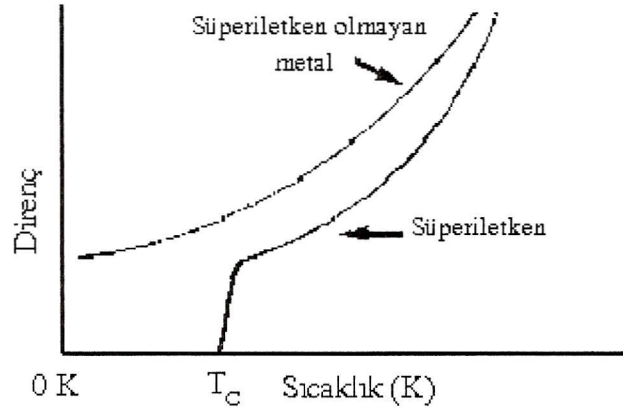
Fonon dışındaki diğer etkiler, metallerin iletkenliğine sıcaklıktan bağımsız bir üst limit getirir. Matthiessen kuralına göre metallerin özdirençleri sıcaklığa bağlı olarak;

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_i(T) \quad (1)$$

denklemleri ile verilmektedir. Buradaki  $\rho_0$  özdirenci, metal içindeki safsızlık atomlarından ve örgü kusurlarından kaynaklanmaktadır ve sıcaklıktan bağımsızdır. Öte yandan  $\rho_i(T)$  özdirenci, yüksek sıcaklıklarda T, düşük sıcaklıklarda ise  $T^5$  ile doğru orantılıdır. Oda sıcaklığının üstünde özdirence safsızlıklardan ve örgü kusurlarından olan katkı, örgü titreşimlerinden kaynaklanan katkının yanında ihmal edilebilir (Aslan, 2005).

Süperiletken durumun belirlenmesinde kullanılan en temel özellik sıfır direnç özelliğidir. Süperiletkenlerin sıfır direnç durumu direncin sıcaklığa karşı ölçümü ile belirlenebilmektedir. Süperiletken bir malzemede sıcaklığın düşmesiyle örneğin direnci sürekli olarak azalır ve kritik sıcaklığa gelindiğinde direnç aniden sıfıra gider. Yani, süperiletkenlik durumunda, doğru akım için elektriksel direnç sıfırdır (Şekil 2).

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri tanecikli yapıya sahip olduklarından sıfır direnç ancak bu tanecikler arasındaki bağlantı sağlandığı zaman geçerli olmaktadır.



Şekil 2. Süperiletken ve süperiletken olmayan iki malzeme için direncin sıcaklık ile değişimi

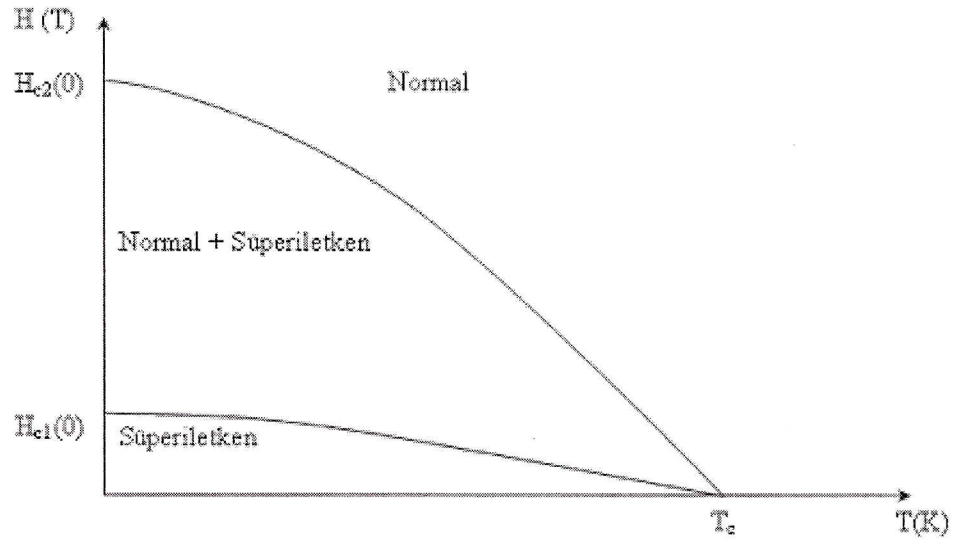
### 1.3. Kritik Sıcaklık ( $T_c$ ) ve Kritik Manyetik Alan ( $H_c$ )

Normal durumdan süperiletken duruma geçiş sıcaklığı kritik sıcaklık ( $T_c$ ) olarak adlandırılır. Süperiletken malzeme bu sıcaklık değerinin altına kadar soğutulduğunda malzemedeki direncin birden sıfıra gittiği ve malzemenin tam bir diamagnet durumuna geçerek uygulanan manyetik alanı dışladığı görülür. Bu nedenle kritik sıcaklık ( $T_c$ ), direnç ölçümlerinden veya manyetik alınganlık ölçümlerinden belirlenebilir.

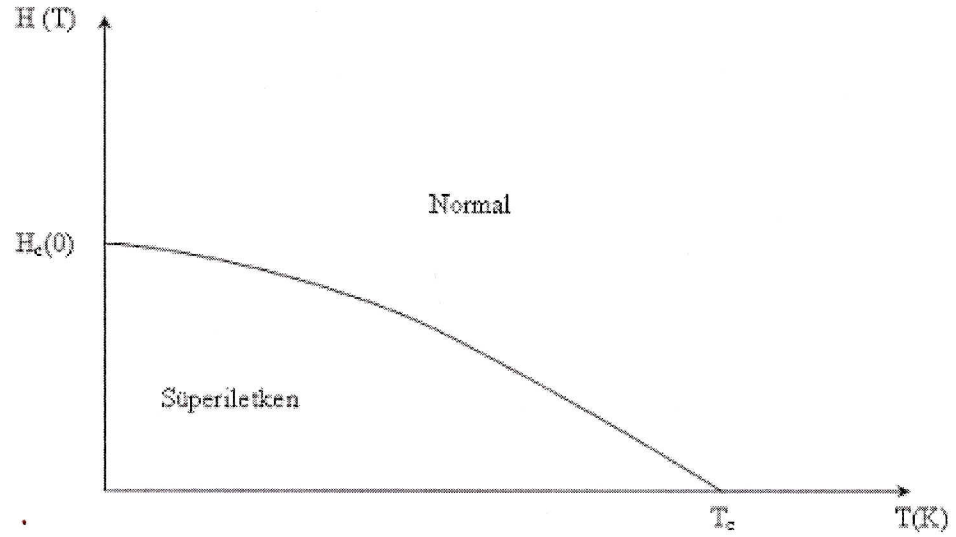
Süperiletken geçişlerini belirleyen bir başka temel özellik de kritik manyetik alandır. Süperiletken durumda malzemeye bir dış manyetik alan uygulandığında, alanın belirli bir değerine kadar malzeme süperiletkenliğini korurken yeteri kadar güçlü bir manyetik alan süperiletkenliği yok edebilir ve normal direnç tekrar ortaya çıkabilir. Süperiletkenliği bozan ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan bu alan, kritik manyetik alan ( $H_c$ ) olarak tanımlanır. Bir süperiletken için kritik alanın sıcaklığın fonksiyonu olarak değişimi Şekil 3'te görülmektedir. Kritik manyetik alanın sıcaklık bağımlılığı:

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

ile verilmektedir. Burada  $H_c(0)$  ve  $H_c$ , sırasıyla mutlak sıfırdaki ve  $T = T_c$ 'deki kritik manyetik alanlardır,  $T$  ise kritik sıcaklığın ( $T_c$ ) altında herhangi bir sıcaklıktır.



(b)



(a)

Şekil 3. a) I. ve b) II. tip süperiletkenlerin kritik manyetik alan ve kritik sıcaklık davranışları

Eğrinin altında kalan alan içinde H-T düzleminin her noktası süperiletken duruma karşılık gelmektedir. Bu hal diyagramına göre sabit sıcaklıkta ( $T < T_c$ ) manyetik alanın artırılmasıyla veya sabit alan altında ( $H < H_c$ ) sıcaklığının artırılmasıyla süperiletken örnek normal duruma geçebilmektedir.

Kritik manyetik alan ve sıcaklık, malzemenin cinsine bağlıdır. Süperiletken malzemelerin teknolojinin her alanında ekonomik olarak uygulanabilmesi için öncelikle kritik sıcaklık ve kritik alanı büyük değerde olması gerekmektedir.

Süperiletkenliğin geçiş sıcaklığı,  $\Delta T_c$  şeklinde bir sıcaklık aralığına sahiptir.  $\Delta T_c$ , malzeme direncini düşmeye başladığı sıcaklık ile direncin sıfır olduğu sıcaklık arasındaki farktır. Artan safsızlık miktarı ile genişleme gösteren ve geçiş bölgesi olarak adlandırılan bu bölge, kritik sıcaklığın belirlenmesini zorlaştırmaktadır.  $\Delta T_c$  farkı süperiletken örneğin kalitesini tanımlar. Aralık ne kadar dar ise örnek o kadar kalitelidir. I. tip süperiletkenlerde bu aralık çok dar olmasına karşın II. tip süperiletkenlerde daha geniştir.

#### 1.4. Meissner Olayı

Bir malzemenin süperiletken olabilmesinin temel şartları; sıfır dirençli ve mükemmel bir diamagnet olma özelliklerini gösterebilmesidir. 1933 yılına kadar süperiletkenlik sadece sıfır direnç olayı ile açıklanmaya çalışıldı. Kritik sıcaklığın üzerindeki bir sıcaklıkta süperiletken malzeme manyetik alan içerisine konulduğunda, manyetik alan malzeme içerisinden geçmektedir. Ancak, Meissner ve Oschenfield yaptıkları deneyde, süperiletken bir malzemeye  $T_c$  sıcaklığının altında manyetik alan uygulanması durumunda uygulanan alanın malzemedan dışlanarak mükemmel bir diamagnet gibi davrandığını gözlemladiler. Meissner olayı olarak bilinen bu olay, süperiletken malzemenin içindeki manyetik alanın daima sıfır olacağını söyler ve sıfır direnç olgusu ile açıklanamaz. Meissner etkisi manyetik alınganlık ölçümleri ile belirlenebilmektedir.

Kritik sıcaklığın altında süperiletken örneğe uygulanan manyetik alana zıt yönde mıknatıslanarak örnek içindeki alanı sıfırlamakta ve bu durum manyetik alanın örnek içinden dışlandığı görünümünü vermektedir. Zıt yöndeki mıknatıslanmaya neden olan, Lenz Yasası gereği dış manyetik alan uygulanması sonucu oluşan perdeleme yüzey akımlarıdır. Yüzey akımlarının oluşturduğu manyetik alan uygulanan manyetik alana eşit büyüklükte ve zıt yöndedir (Zan, 2006).

Ayrıca klasik elektrodinamik açısından bakılırsa Ohm Yasası;

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (3)$$

ile verilmektedir. Sıfır direnç durumunda  $\rho = 0$  için  $E = 0$  olmalıdır.

Öyleyse, Faraday Yasasına göre;

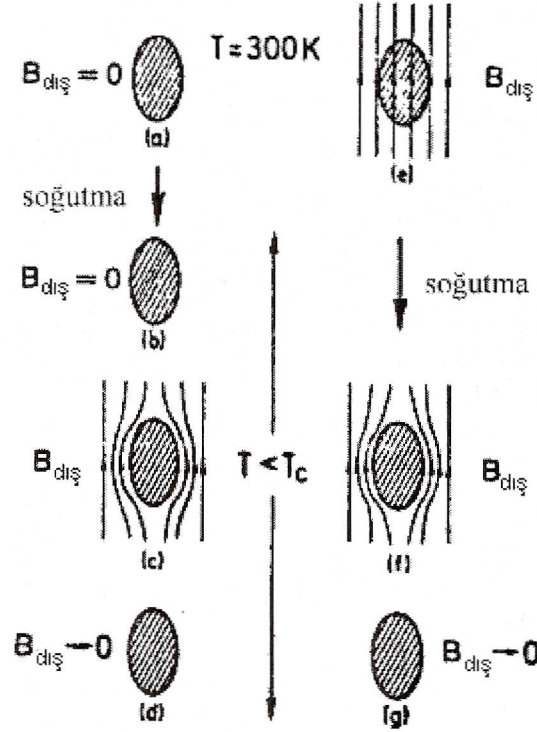
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$\partial \vec{B} / \partial t = 0$  olur ve bu durumda, içerde manyetik alanın sabit olduğunu ifade eder. Ancak, deneysel gözlemler bu sabitin hep sıfır olduğunu gösterdi. Bu çelişki nedeniyle sıfır direnç özelliğinden hareketle Meissner Olayının açıklanamayacağı görülür.

Uygulanan bir dış manyetik alanda bir maddenin içindeki manyetik alan S.I. birim sisteminde,

$$\vec{B}_{iç} = \vec{H}_0 + \vec{M} \quad (5)$$

ile verilir.  $H < H_c$  durumunda  $B_{iç} = 0$  olacağından  $H_0 + M = 0$  durumu oluşacaktır. Manyetik alınganlığın  $\chi = M/H$  olduğu hatırlanırsa  $\chi = M/H_0 = -1$  olduğu bulunur ki bu durum da bize süperiletkenlerin neden bir diamagnet olduklarını açıklar.



Şekil 4. Manyetik alan yokluğunda ve varlığında soğutulan süperiletken malzeme (Rose-Innes and Rhoderick, 1980)

Şekil 4’de görüldüğü gibi süperiletkenlerde farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. Manyetik alan varlığında veya yokluğunda kritik sıcaklığın altına soğutulan bir süperiletken, her iki durumda da manyetik alanı dışlayacak şekilde bir akım oluşturur ve bu

akımla, dış manyetik alana zıt yönde bir iç manyetik alan meydana getirir. Bu şekilde süperiletken içindeki net manyetik akı sıfır olur. Böylece süperiletken durum için,

$$\rho = 0 \quad (6)$$

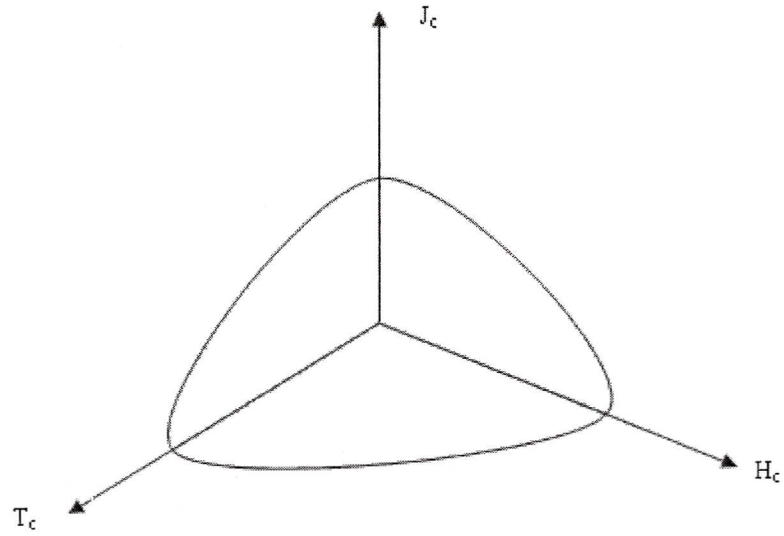
$$B = 0 \quad (7)$$

olduğu sonucuna varılır.

### 1.5. Kritik Akım Yoğunluğu

Kritik manyetik alan değerinde olduğu gibi, bir süperiletken malzemede akım, kritik bir değerin üzerine çıkarıldığında da süperiletkenlik bozulur. Bu  $J_c$  kritik akım yoğunluğu değeri  $T = T_c$ 'de artmaya başlar ve  $T = 0$ 'da maksimum değerine ulaşır. Şekil 5'te kritik akım yoğunluğunun manyetik alan ve sıcaklıkla değişimini gösteren faz diyagramı görülmektedir.

II. tip süperiletkenlerin keşfinden sonra I. tip ve II. tip süperiletkenlerin taşıyabildikleri akım değerleri arasında büyük fark olduğu görüldü. Böylece hem II. tip süperiletkenler üzerine çalışmalar yoğunlaştı hem de endüstride kullanılmaya başlandılar. Fakat II. tip süperiletkenlerin seramik yapıda olması endüstride kullanılmaları esnasında sıkıntı oluşturdu.



Şekil 5. Kritik yüzey faz diyagramı

## 1.6. I. ve II. Tip Süperiletkenlerin Manyetizasyonu

Ginzburg-Landau teorisi, süperiletkenlerin iki sınıfta incelenmesi gerektiğini öngörür. Bunlar manyetik alan içindeki davranışlarına göre I. ve II. tip süperiletken olarak sınıflandırılır. Saf metaller genellikle I. tip süperiletken özellik gösterirken alaşımlar ve geçiş metalleri II. tip süperiletken özellik gösterir. Süperiletkenliğin mekanizması açısından I. ve II. tip süperiletkenler arasında bir fark yoktur. Her iki tür de sıfır manyetik alanda süperiletken-normal geçişi sırasında benzer özelliklere sahiptir. Ancak, Meissner etkisi tümüyle farklıdır. Abrikosov, II. tip süperiletkenlerde  $H_{c1} < H < H_{c2}$  aralığında manyetik akının kuantize olmuş akı girdapları şeklinde külçe örnek içine girmesi gerektiğini ifade etti (Seeber, 1998).

I. tip süperiletkenlerde uygulanan manyetik alan, kritik manyetik alan değerine ulaştığında manyetik alanın tümü örnek içerisine girer ve malzeme normal hale geçer. Benzer şekilde I. tip süperiletkenlerde kritik manyetik alan değerine kadar mıknatıslık, negatif yönde hemen hemen doğrusal olarak artar, ancak kritik manyetik alan değerinde keskin bir şekilde sıfıra düşer (Şekil 6.a). I. tip süperiletkenlerde süperiletken – normal geçişler keskindir ve I. tip süperiletkenlerin kritik manyetik alan değerleri  $H_c$  düşüktür.

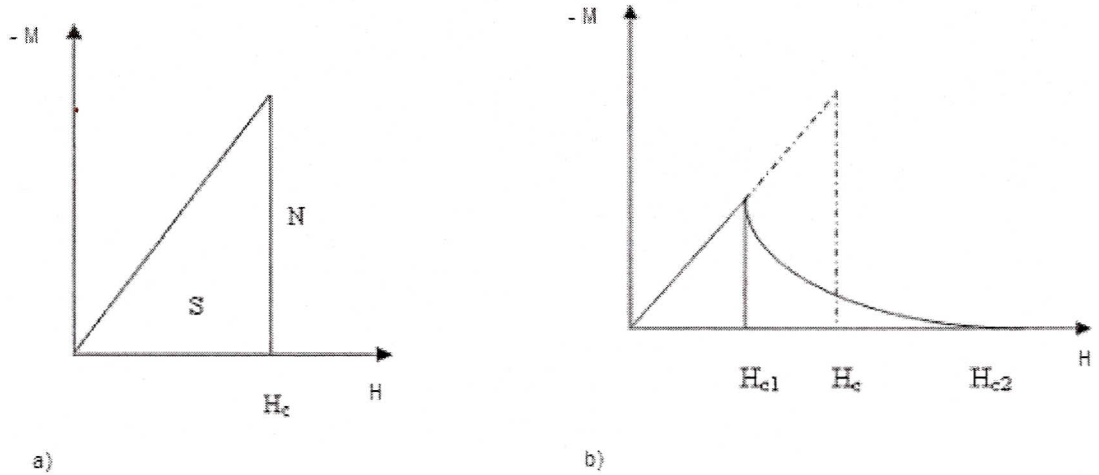
Düşük sıcaklık süperiletkenlerinin (çoğunlukla metaller ve bileşikler olup  $T < 25K$ ' dir) en geniş uygulama alanları, parçacık hızlandırıcıları ve tıpla ilgili cihazlardır. Düşük sıcaklık süperiletkenlerinin en büyük dezavantajı, kritik sıcaklığın altında tutulması için sıvı helyuma ihtiyaç duyulmasıdır. Sıvı helyum, kaynama sıcaklığı çok düşük olması ve doğada çok az bulunması nedeniyle elde etmesi oldukça zor ve pahalıdır. Bazı düşük sıcaklık metal süperiletkenlerin kritik geçiş sıcaklıkları ve  $T = 0 K$ 'deki kritik manyetik alan değerleri Tablo 1'de gösterilmektedir.



Tablo 1. Bazı I. tip süperiletkenlerin  $T_c$  kritik sıcaklıkları ve  $H_c(0)$  kritik manyetik alan değerleri (Aslan, 2005)

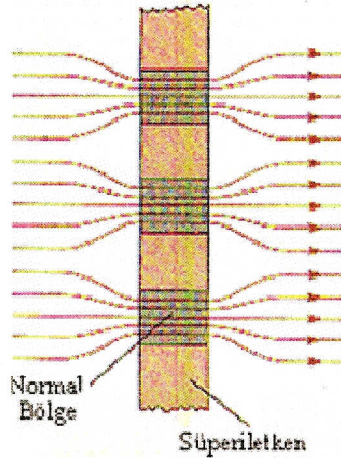
| I. tip süperiletkenler | $T_c$ (K) | $H_c(0)$ (Tesla) |
|------------------------|-----------|------------------|
| Al                     | 1,196     | 0,0105           |
| Ga                     | 1,083     | 0,0058           |
| Hg                     | 4,153     | 0,0410           |
| In                     | 3,408     | 0,0281           |
| Nb                     | 9,260     | 0,1991           |
| Pb                     | 7,193     | 0,0803           |
| Sn                     | 3,722     | 0,0305           |
| Ta                     | 4,470     | 0,0829           |

II. tip süperiletkenler,  $H_{c1}$  kritik manyetik alan değerine kadar I. tip süperiletkenlerin özelliğini (Meissner hali) gösterirler. Alt kritik manyetik alan ( $H_{c1}$ ) değerine kadar manyetik alanı dışarıda tutar ve negatif yönde mıknatıslanırlar. Bu değer üstünde uygulanan alanlarda, alanın bir kısmı dışlanmakta ve bir kısmı da malzemeye nüfuz etmektedir. Bu durumda malzeme yine süperiletkenliğini sürdürmektedir. Ancak manyetik alan  $H_{c2}$  ile gösterilen üst kritik manyetik alan değerine ulaştığında alan tümüyle malzemeye girer ve süperiletkenlik yok olur. II. tip süperiletkenler düşük  $H_{c1}$  ve yüksek  $H_{c2}$  değerlerine sahiptirler (Şekil 6.b).



Şekil 6. a) I. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrisi b) II. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrisi (Schmidt, 1997)

$H_{c1}$  ve  $H_{c2}$  değerleri arasında uygulanan alanlarda ise madde karışık hal (mixed state) olarak tanımlanır. Bu durumda manyetik alan, süperiletken malzemeye akı çizgileri ve akı tüpleri şeklinde girer. Süperiletken bölgeler tarafından sarılmış çok sayıdaki küçük silindirik normal bölgeler formundaki bu akı çizgileri vorteks olarak adlandırılır (Şekil 7). Manyetik alanın artışı ile vorteksler sayıca artar ve bu artışla beraber vorteksler birleşip büyüyerek malzemeyi normal hale geçirirler. Karışık durumda malzeme süperiletken-normal bölgeler şeklinde yapılaşmakta ve manyetik alan normal bölgelere tamamen girerken, süperiletken bölgeler içerisine ise belirli bir derinliğe kadar azalan şiddette girebilmektedir. Manyetik alanın süperiletken bölgeye girdiği mesafe ise  $\lambda$  girme derinliği (penetration depth) olarak tanımlanır. Normal ve süperiletken bölgeler arasında kimyasal ve kristalografik açıdan bir fark bulunmamaktadır. Ana eksen boyunca akı çizgileri uygulanan alana paraleldir ve bu manyetik alan vorteksler etrafında bir dolanım akımı oluşturur. Bu akım dolanımı normal durumu süperiletken durumdan ayırır. Ancak bu akım, bilinen geçiş akımı olmayıp ideal diamagnetizasyona neden olan I. tip süperiletkenlerdeki perdeleme akımlarıdır. Vortekslerin etrafındaki akım dolanımı her bir vorteksin ince bir magnet gibi davranmasına yol açar. Böylece II. tip süperiletkenlerden bir akım geçirildiğinde bu akımın etkisiyle vortekslere Lorentz kuvveti etki eder ve vorteksler bu kuvvetin etkisiyle hareket ederler. Vortekslerin bu hareketi devreden enerji çeken ve dolayısıyla direnç etkisi yapan akıma paralel bir elektrik alan indükler.



Şekil 7. Vorteks mekanizması

İki kritik alan değeri arasında malzeme içerisinde hem süperiletken hem de normal bölgeler karışık olarak bir arada bulunmaktadır.

Tablo 2’de bazı II. tip süperiletken örneklerin kritik geçiş sıcaklıkları ve  $T = 0$  K’deki üst kritik manyetik alan değerleri gösterilmektedir.

Tablo 2. Bazı II. tip süperiletkenlerin  $T_c$  kritik sıcaklıkları ve  $H_{c2}$  kritik manyetik alan değerleri ( Aslan, 2005)

| II. tip süperiletkenler | $T_c$ (K) | $H_{c2}(0)$ (Tesla) |
|-------------------------|-----------|---------------------|
| Nb <sub>3</sub> Al      | 18,7      | 32,4                |
| Nb <sub>3</sub> Ge      | 23,2      | 38                  |
| NbN                     | 15,7      | 15,3                |
| NbTi                    | 9,3       | 15                  |
| Nb <sub>3</sub> (AlGe)  | 21        | 44                  |
| PbMoS                   | 14,4      | 60                  |
| LaSrCuO                 | 36        | 32                  |
| YBaCuO                  | 92        | 120                 |
| BiSrCaCuO               | 125       | 89                  |
| HgBaCaCuO               | 135       | 190                 |

Süperiletken yapıda girme derinliğinin ( $\lambda$ ) yanı sıra eş uyum uzunluğu ( $\xi$ ) olarak tanımlanan bir parametre daha vardır. Eş uyum uzunluğu, süperelektron yoğunluk ( $n_s$ ) değişiminin  $n_s = 0$  ile  $n_s = 1$  arasında sabit kaldığı uzunluk değeridir. Bu iki parametre, örneğin I. tip veya II. tip süperiletken olduğunu belirler. Ginzburg-Landau parametresi olarak tanımlanan  $\kappa = \lambda/\xi$  oranı 0,71’den büyük ise örnek II. tip, küçük ise I. tip süperiletkendir.  $\kappa$ , 0,71’den büyük olduğunda süperiletken-normal ara yüzey enerjisi negatif olur. Yapı içine manyetik alan girdiğinde toplam enerji daha küçük olacaktır. Bu nedenle karışık halde manyetik alan örneğin içine kısmi olarak girmektedir.  $\Phi_0 = hc/2e$

akı kuantasına bağlı olarak  $H_{c1}$ ,  $H_{c2}$  ve  $H_c$  arasında yaklaşık olarak  $H_{c1} \approx \frac{\Phi_0}{\pi\lambda^2}$ ,

$$H_{c2} \approx \frac{\Phi_0}{\pi\xi^2} \text{ ve } \Phi_0 \approx \pi\xi\lambda H_c \text{ olmak üzere;}$$

$$H_c = \sqrt{H_{c1}H_{c2}} \quad (8)$$

bağıntısı vardır.

Yüksek kritik manyetik alan değerine sahip olduklarından dolayı II. tip süperiletkenler mıknatıs yapımında kullanılmaktadır ve bu nedenle teknolojik

uygulamalarda önemli bir yere sahiptirler. Bunun yanında azot havada en bol bulunan gazdır. Kaynama noktası 77,3 K olduğundan elde edilmesi kolaydır. Bu nedenle 77,3 K üzerinde kritik geçiş sıcaklığına sahip yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfi, süperiletkenlerin teknolojik uygulamalarda kullanılmasını daha cazip hale getirmiştir (Murakami, 1992a; Murakami, 1994).

### 1.7. Süperiletkenlerde Akı Çivilenmesi ( Flux Pinning )

Kritik akım yoğunluğunu etkileyen faktörlerden biri de örnek içine akımın çivilenmesidir. Dolayısıyla akı çivileme mekanizmasının anlaşılması çok önemlidir.

II. tip süperiletkenlerde, alt kritik manyetik alan  $H_{c1}$  değerinden daha büyük manyetik alanlarda manyetik akı örneğe, manyetik akı tüpleri şeklinde nüfuz eder ve bu tüpler arasındaki mesafe nüfuz derinliği mertebesinde olduğunda birbirlerinin varlığını hissetmeye başlarlar.

Manyetik alan uygulanan örnekte bir akım geçirilirse akı tüpleri  $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$  şeklinde bir Lorentz kuvveti hissedeceklerdir ve bu kuvvet etkisiyle tüpler örnek içerisinde hareket etmeye başlayacaklardır. Manyetik akı tüplerinin hareket etmeye başlaması (akı hareketi) sistemden enerji çekecek ve akıma dik bir elektrik alan indükleyecektir. Bu nedenle akım bir dirençle karşılaşacaktır. Bu direnç süperiletkenliğin bozularak normal duruma geçişin bir göstergesidir. Süperiletkenlerde direnç, istenmeyen bir durum olduğundan bunun en aza indirilmesi konusunda çalışmalar günümüze kadar devam etmektedir. Anlaşılacağı gibi direnç oluşmaması örnek içerisindeki akımın hareketsiz hale getirilmesi, yani akımın bulunduğu yerde çivilenmesi ile sağlanabilmektedir. Bu amaçla süperiletkenlerde “çivileme merkezleri” adı verilen akı sabitleme merkezleri oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu merkezler hem akı tüpleri oluşurken daha az enerji harcanmasını sağlayacak hem de tüplerin hareketini minimuma indirerek daha az direnç ve daha yüksek akım yoğunluğu sağlayacaktır. Maksimum çivileme kuvveti, akı tüplerinin çivileme yerlerinden süperiletken bölgeye hareketi için gerekli minimum kuvvettir. Akı çizgileri için çivileme merkezi olarak rol oynayabilen bölgeler örnek içindeki normal bölgeler olup, homojen olmayan mikro yapı ve yapısal kusurlardır. Böylelikle süperiletkenlik içinde kusurlu bölgeler oluşturularak akı sabitlenmesi sağlanabilir. Günümüz süperiletkenlik çalışmalarının çoğunda süperiletken malzemeye yapılan katkılarının asıl amacı çivileme merkezleri oluşturarak kritik sıcaklığı ve kritik akım yoğunluğunu yükseltmek ve yüksek manyetik alan altında daha iyi performans göstermelerini sağlamaktır (Zan, 2006).

### 1.8. Süperiletkenlerde Akı Sıçraması ( Flux Jumping )

Manyetik alanın varlığında süperiletken içindeki magnetizasyon bazen kesikli bir şekilde değişir. Bu olgu akı sıçraması ( flux jumping ) olarak adlandırılır. Akı sıçramasıyla süperiletken içindeki perdeleme akımının ortadan kalkmasına ani bir manyetik akı artışı eşlik eder. Sıçrayan akı merkezleri, çivilenmiş kararsız akı merkezleridir. Akı sıçraması çivileme kuvveti çok yüksek olan örneklerde gerçekleşir. Bu durum sınırlı bir akı hareketi meydana getirir, böylece enerji israfına ve hafif bir sıcaklık artışına neden olur. Bu sıcaklık artışı, akı hareketini engelleyen çivileme kuvvetinde de kısmen azalmaya sebep olur.

### 1.9. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenliği

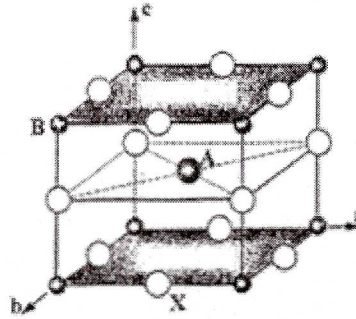
Yüksek sıcaklık süperiletkenleri, II. tip süperiletkenlerdir. 1986 yılından itibaren ardına bulunan La-Ba-Cu-O (LBCO), Y-Ba-Cu-O (YBCO), Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO), Tl-Ba-Ca-Cu-O (TBCCO), Hg-Ba-Ca-Cu-O (HgBCCO) sistemleri, bilinen yüksek kritik sıcaklık değerlerine sahip II. tip süperiletkenlerdir. Günümüzde, kritik sıcaklık değeri Hg-tabanlı süperiletken sistem için 166 K'e kadar yükseltildi.

Yüksek sıcaklık süperiletkenliğin Cu-O tabakalarında ortaya çıktığı düşünülmektedir ve bu nedenle tüm yüksek sıcaklık süperiletkenleri Cu-O tabakalarına sahiptirler. Bu yeni bulunan yüksek sıcaklık bakır oksitlerin sıfır direnç ve kusursuz diamanyetizma özelliklerini sağladıkları bulundu ve bunlara ek olarak aşağıdaki özelliklere sahip oldukları bilinmektedir.

- Bu malzemeler, üst kritik manyetik alanları 100 Tesla'dan daha büyük olan II. tip süperiletkenlerdir.
- Aşırı derecede anizotropiktirler. Yani yöne bağımlı özelliklere sahiptirler.
- Bu malzemelerin süperiletkenlik özellikleri ile kristal yapıları arasında doğrudan bir ilişki vardır.
- Cu-O tabakalarındaki atomların yerine başka atomların yerleştirilmesi süperiletkenliği bozmakta veya yok etmektedir. Başka konumlara yapılan yerleştirmelerin süperiletkenliğe etkisi küçüktür.
- Perovskit yapıda kristalleşirler.

### 1.9.1. Perovskit yapı

İdeal perovskit yapı, Şekil 8’de görüldüğü gibi, kübik olup  $ABX_3$  stokiyometresine sahiptir. A ve B atomları metalik katyonlar yani pozitif yüklü iyonlar, X atomları ise negatif yüklü metalik olmayan anyonlardır. A katyonu bu iki metal iyonundan büyük olanıdır. Küçük metalik B katyonları köşeleri işgal ederken, X anyonları da 12 kenarın orta noktalarında bulunurlar. Sıkça oksijen olarak ortaya çıkan X ise halojen ailesinin bir üyesi, flor, klor veya brom olabilir (Görür, 2001).



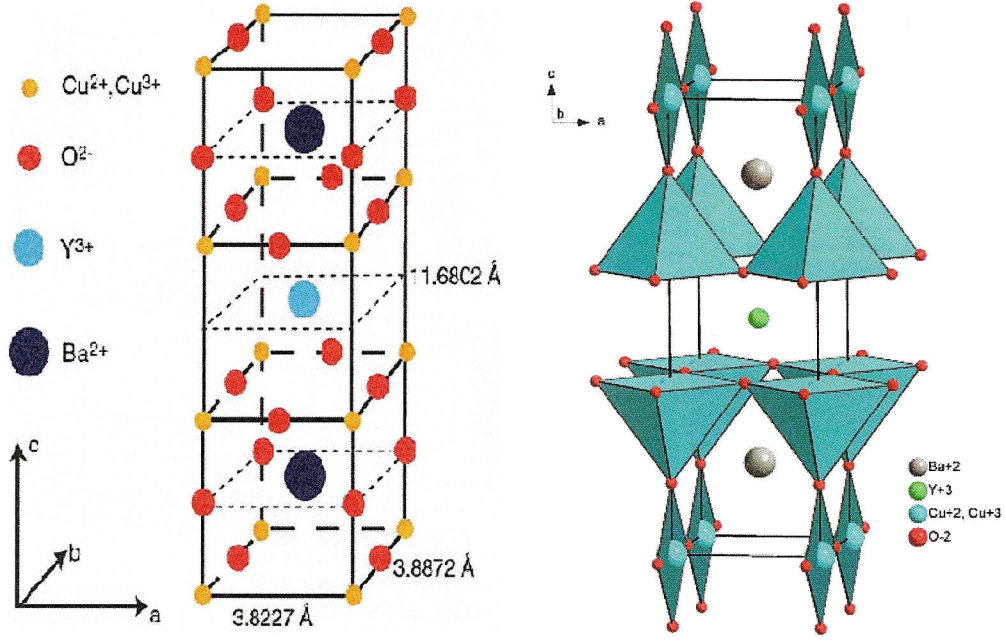
Şekil 8. Perovskit birim hücresinin kristal yapısı

### 1.9.2. YBCO süperiletkenlerin kristal yapıları

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri arasında  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO), ilk sentezlenenlerden biri olup oldukça ayrıntılı bir şekilde çalışılmaktadır.

Tüm yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin, süperiletiminde baskın rol oynayan  $CuO_2$  düzlemleridir. Diğer bileşenler  $CuO_2$  düzlemlerinde yük yoğunluğunu düzenleyen yük deposu olarak davranırlar ve taşıyıcılar yalnızca bu düzlemler boyunca hareket ederler. YBCO’nun özel durumunda, her birim hücre, iki adet BaO tabakasıyla araya alınmış ve Y atomuyla ayrılmış iki adet  $CuO_2$  düzlem içerir (Şekil 9).

Bileşik, mümkün iki yapıda bulunabilir. Bu yapılar, tetragonal ( $a=b \neq c$ ) ve ortorombikdir ( $a \neq b \neq c$ ). Bu yapıların oluşumu, hücre kenarlarındaki son Cu-O tabakalarındaki oksijen dağılımı ve miktarına bağlıdır. Düşük oksijen konsantrasyonu için ( $\delta \leq 1$ ), birim hücredeki alt ve üst  $CuO_2$  düzlemlerindeki bakır atomları arasında oksijen atomları rasgele dağılırlar. Bu durum tetragonal yapı oluşumuna öncülük eder.  $\delta$ ’nın değeri sifıra yakınsa, oksijen atomları bu tabakalardaki bakır atomlarının b-ekseni yönünde aralarına düzenli bir şekilde yerleşerek ortorombik yapıyı oluştururlar. Bu durumda, CuO atomları düzlemden ziyade zincir oluşur ve CuO zinciri olarak adlandırılırlar.



Şekil 9.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO) yapısı (Çelik, 2006)

YBCO örnekleri ile çalışmalarda dikkat edilmesi gereken en önemli şeylerden biri ise onları nemli havadan ve sudan korumaktır. Çünkü su, YBCO ile reaksiyon gerçekleştirip  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  süperiletken olmayan faza dönüşür (Yan vd., 1987). Çözünmeyi önlemek için örnekler mümkün olduğu kadar kuru ortamda tutulmalıdır.

Diğer yüksek sıcaklık süperiletkenleri gibi YBCO da II. tip süperiletkenlerdir.  $\text{CuO}_2$  düzlemleri boyunca taşıyıcıların oluşturduğu manyetik akı, ab-düzleminde ve c-ekseninde farklı özelliklere sahiptir. Süperiletken YBCO'nun ana karakteristik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 'nin ( YBCO ) ab-düzlemi ve c-ekseni yönünde  $T=0$  K'de süperiletkenlik ana parametreleri.  $\xi$ , koherens uzunluğu;  $\lambda$ , manyetik alan girme derinliği;  $H_c$ , termodinamik kritik manyetik alan;  $J_c$ , kritik akım yoğunluğu;  $H_{c1}$  ve  $H_{c2}$  ise sırasıyla alt ve üst kritik manyetik alan değerleri (Ginsberg, 1994; Poole, 2000)

| Parametreler |                            | ab - düzlemi        | c - eksen           |
|--------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| $\xi(0)$     | (nm)                       | 1,5 - 4,3           | 0,3 - 0,7           |
| $\lambda(0)$ | (nm)                       | 100 - 140           | 500 - 800           |
| $H_c(0)$     | ( $10^4$ Oe)               | 1 - 3               | 1 - 3               |
| $J_c(0)$     | ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) | 3 - $12 \cdot 10^8$ | 5 - $25 \cdot 10^7$ |
| $H_{c1}(0)$  | (Oe)                       | 20 - 230            | 80 - 90             |
| $H_{c2}(0)$  | ( $10^4$ Oe)               | 230 - 624           | 70 - 112            |

### 1.10. Süperiletkenlerin Teknolojide Kullanım Alanları

Süperiletkenliğin Kammerling Onnes tarafından keşfinden sonra bilim adamları teknolojiye pratik uygulamaları için araştırmalar yaptılar. Bilim adamlarının öncelikli amacı, oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta süperiletken özellik gösteren süperiletkenleri keşfetmektir. Böylece süperiletkenin kullanımı daha ucuz ve yaygın olabilir. Ancak teknolojiye uygulanması konusunda pek çok önemli problemin çözülmesi gerekmektedir. En zor olanı da kırılğan olan bu malzemelere şekil vermektir. Büyük ölçekli uygulamalar için tel ve şerit şeklinde malzeme elde etmek, SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) gibi küçük cihazlarda kullanılacak ince filmler üretmek, çözülmesi gereken teknik problemlerdir. Diğer önemli bir problem de seramik bileşiklerdeki düşük akım yoğunluğudur. Fakat bunlara rağmen istenilenler elde edilirse günlük hayatımızda önemli kolaylıklar sağlayacaktır.

Teknolojideki uygulamalarına bazı örnekler verecek olursak; barajlarda üretilen elektriğin taşınması, süperiletken teller yardımıyla yapıldığında enerji kayıpları daha az olacaktır. Çünkü enerji iletimi için kullanılmakta olan bakır teller zamanla ısınır ve dolayısıyla kayıp miktarının artmasına sebep olur. Süperiletken teller yapılabilirse enerji kayıpları minimuma indirilebilir. Süperiletkenlerin teknolojik olarak en büyük kullanımı elektronik sektöründe olmaktadır. Günlük hayatta kullandığımız bilgisayarlarda hız ve bellek kapasitesini artırmak için kullanılmaktadır. Bilgisayar çipleri arasındaki bağlantılar, süperiletken filmlerle sağlanabilir. Bu şekilde çip büyüklükleri düşürülebilir ve sonuç olarak hızları artırılabilir.



Japonya'da bazı araştırma grupları süperiletkenlerin, taşımacılık alanında kullanılması için araştırmalar yapmaktadırlar. Bir vagona yerleştirilen süperiletken mıknatıs kullanılarak, ilk örnek tren inşa edilmiştir (soğutma olarak sıvı helyum kullanılmıştır). Bu uygulamada hareket halindeki tren, normal iletken bir ray üzerinde girdap akımı itmesi ile havada kalmaktadır. Gelecekte bu sistemin otoyollarda da kullanılması yönünde araştırmalara başlanacağı ümit edilmektedir (Zan, 2006).

Süperiletken mıknatısların bir uygulaması da Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) olarak adlandırılan teşhis sistemidir. Bu sistem, son yıllarda teşhiste çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu cihazlarda, vücudun değişik kısımlarının görüntülenmesinde x-ışınlarına göre daha güvenli radyo frekanslı ışınlar kullanılmaktadır.

Josephson eklemlerinin en yaygın uygulamaları, SQUID'lerin kullanıldığı alanlardır. SQUID, manyetik alanların algılanması ve ölçümü için en duyarlı aygıttır. Bunun çalışma prensibi akı kuantumlanmasına ve Josephson eklemlerinde gerçekleşen tünellemeye bağlıdır. SQUID'lerin tıbbi teşhis, jeolojik tahmin ölçüm aletleri gibi çeşitli uygulama alanları vardır.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin teknolojik uygulamalarını şu şekilde özetleyebiliriz (Yılmazlar, 2002).

- a) Tıpta ( MRI, SQUID, biyoteknik mühendisliğinde ).
- b) Elektronikte (Parçacık hızlandırıcılarında, transistörler, Josephson Junction cihazlarında, devre bağlantı malzemelerinde, sensörlerde).
- c) Ulaştırımda (MagLev trenler).
- d) Güç üretiminde (Motorlarda, jeneratörlerde, enerji depolamada, iletimde, füzyon olaylarında, transformatörlerde ve indüktörlerde).

### **1.11. MagLev ( Magnetic Levitation ) Sistemler<sup>1</sup>**

MagLev, manyetik güç aracılığı ile taşıtım kaldırılıp yönlendirildiği ve hareket ettirildiği teknolojiler için kullanılan genel bir terimdir. MagLev sisteminde yol boyu sıralanmış bulunan makaralara, aracın mıknatıslarının kilitletiği bir manyetik dalga yaratmak üzere alternatif akım verilir. Böylece aracın mıknatısları ile yol boyu sıralanmış makaralar, aracın doğrusal hareketini sağlayan tek bir eş zamanlı motor oluşturur. Araç

---

<sup>1</sup> Bu başlık ( Aydınlar, 2006 ) kaynağından faydalanılarak hazırlandı.

hızı makaralara verilen akım frekansının değiştirilmesiyle denetlenir. Bu ilkeye dayalı iki farklı sistem geliştirilmiştir.

Japonların üzerinde çalıştığı itme modlu elektronik sistemde, yol boyundaki makaralarda akım indüksiyonu için araç üzerindeki süperiletken mıknatıslardan yararlanılır. Bu etkileşim sonucu oluşan manyetik yastık, aracı yaklaşık 1,5 cm havaya kaldırır ve araç, alçaktan uçan bir hava aracı gibi yol alır. Japonlarca bu sisteme göre geliştirilen araçlar 100 km/s'in üzerindeki hızlarda manyetik yastık, daha düşük hızlarda ise tekerlekler üzerinde gitmektedir.

Almanya'da geliştirilen çekme esaslı elektromanyetik sistemlerde ise araçtaki, bilinen demir-çekerdekli (süperiletken olmayan) elektromıknatıslar yolun altından tutturulmuş ferromanyetik parçalar tarafından yukarı doğru çekilmektedir. Bu tür bir manyetik yastık doğal olarak kararlı değildir ve aracın mıknatısları ile yol arasında 1,5 cm'lik açıklığın korunması hassas denetim gerektirmektedir. Sistemin bir üstünlüğü, hareketsiz durumda da araç manyetik yastık üzerinde kalabildiğinden uzun yüksek hız hatlarında olduğu gibi şehir içi ulaşım ve banliyö trenlerinde kullanılabilir.

### **1.12. Malzeme Üretim Teknikleri**

Seramik süperiletkenlerin yapısal ve fiziksel özellikleri üretim şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Aynı cins malzemenin özellikleri farklı üretim teknikleriyle elde edildiğinde farklı özellik gösterebilir. Seramik süperiletken malzemelerin üretilmesinde birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden bazıları liste halinde gösterilmektedir:

1. Katıhal Tepkime Yöntemi ( Solid State Reaction "SSR" )
2. Eritme Yöntemi ( Melt Process "MP" )
3. Eritme Büyütme Yöntemi ( Melt - Texture Growth "MTG" )
4. Hızlı Eritme Büyütme Yöntemi ( Quench - Melt Growth "QMG" )
5. Eritme – Toz – Eritme - Büyütme Yönetim ( Melt – Powder – Melt - Growth "MPMG" )
6. Hareketli Bölge Yöntemi ( Floating - Zone "FZ" )
7. Eritme - Döküm Yöntemi ( Melt - Cast Process "MCP" )
8. Üstten Tohumlamalı Eritme Büyütme Yöntemi (Top Seeding Melt Growth "TSMG")

Bu teknikler arasında en sık kullanılanlara aşağıda kısaca değinildi.

### 1.12.1. Katıhal tepkime yöntemi

Katıhal tepkime yöntemi, kolaylığı ve ucuzluğu bakımından süperiletkenlik araştırma gurupları tarafından en geniş kullanım alanına sahiptir. Bu yöntemde bileşikler; oksit ve karbonat gibi başlangıç maddeleri ile hazırlanır. Başlangıç maddelerinin saflığı uygun sonuçlar elde edebilmek için şarttır. Başlangıç maddeleri, stokiyometrik oranlarda karıştırılır ve ince tozlar haline getirebilmek için havanda öğütülür.

Öğütme işleminden sonra malzeme üzerindeki ilk ısıl işlem olan kalsinasyon aşamasına geçilir. Bu işlemin amacı oksit ve karbondioksitlerin sıcaklıkla ayrışmasını sağlamaktır. Bu da katıhal tepkime yönteminin temelini teşkil eder. Kalsinasyon için tozlar bir potaya konularak sıcaklığı ayarlanabilir fırın içerisinde belirli sıcaklıklarda belirli sürelerde tutulur. Daha sonra fırından çıkarılan tozlar tekrar havan yardımıyla öğütülür (ara öğütme) ve bu işlem birkaç kez tekrarlanabilir.

Kalsinasyondan sonra şekil vermek ve tanecikler arası bağlantıları güçlendirmek için presleme yapılır. Presleme için genellikle 4-6 ton/cm<sup>2</sup> arası basınç uygulanarak tozlar tablet haline getirilir.

Son aşama ise süperiletken fazı elde etmek, karışımı oluşturan atomlar arası bağlantıları kuvvetlendirmek, polikristalleri meydana getirmek, süperiletkenliğe geçiş sıcaklığını yükseltmek ve bazı örgü kusurlarını ortadan kaldırmak için yüksek sıcaklıkta belirli sürelerde tabletleri sinterlemektir. Sinterleme işlemi, örneğin sıcaklığının oda sıcaklığından başlayarak belirlenen sıcaklığa kadar artırılması ve belirli süre bekledikten sonra yavaşça oda sıcaklığına soğutulmasını içermektedir. Yapıda oksijen eksikliğini gidermek için örnekler 600- 400 °C arası belirli süre oksijen ortamında tutulur.

Katıhal tepkime yönteminde ara öğütme (Singh, 1998), optimum tavlama süresi ve sıcaklığı (Asada vd., 1988) ile yavaş soğutma oranları çok önemlidir (Kase vd., 1990). Tabletlerin ısıtılmasından sonra örnek içinde meydana gelebilecek iç zorlanma ve gerilmelerden kaçınmak için fırın yavaş soğutulmalıdır. Dikkat edilmesi gereken başka bir nokta da sinterleme yapılan kabın doğru seçilmesidir. Çünkü yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıtma işlemleri süresince kabın yapıldığı malzemeden örnek içerisine difüzyon olabilir. Bu yöntemde örneğin öğütülme, kalsinasyon ve sinterleme süresi ve sıcaklığı süperiletken malzemenin cinsine göre değişmektedir. Kalsinasyon sırasında sıcaklık BSCCO ile TBCCO aileleri için 750–850 °C arasında ve YBCO ailesi için 850-950 °C arasındadır (Zan, 2006).

### 1.12.2. Eritme – döküm yöntemi

Yüksek sıcaklık süperiletken örnekler hazırlamak için kullanılan yöntemler arasında en kullanışlı olanı eritme - döküm yöntemidir. Çünkü pota içerisinde yüksek sıcaklıkta eriyik haline gelen başlangıç örnek tozları, eridikten sonra atomik ve moleküler düzeyde birbiriyle karışırlar ve karışım maksimum düzeyde homojen olur.

Diğer yöntemlerde olduğu gibi stokiometrik oranlarda tartılan başlangıç tozları karıştırılıp öğütülür. Öğütülen tozlar kalsinasyon işlemine tabi tutulur. Kalsinasyon işlemi sonunda, platin bir pota içerisine konulan başlangıç tozları, ayarlanabilir bir fırının içine konur ve belirli bir artış oranıyla oda sıcaklığından malzemenin eriyebileceği yüksek bir sıcaklığa (1100–1200 °C) çıkartılır ve belirli bir süre bekletilir. Bu sıcaklıkta eriyik haline gelen toz karışımları, daha önce başka bir fırında ısıtılmış olan bakır kalıplara dökülür. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken en önemli şeylerden biri, döküm yapılan bakır kalıbın sıcaklığının eriyik halde bulunan örneğin sıcaklığına yakın değerde olmasıdır. Aşırı sıcaklık farkı olursa, bakır kalıp bu farktan dolayı çatlayıp parçalanabilir. Döküm işleminde hazırlanan bakır kalıbın şekline göre örnekler elde edilir. Döküm işleminden sonra tavlama işlemi için malzeme hazır hale gelmiş olur. Tavlama işleminde, fırın içerisine pota ile konan örnekler, oda sıcaklığından başlayarak malzemenin erime sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta yaklaşık olarak 100–200 saat arası tavlandıktan sonra süperiletken fazlar elde edilmiş olur.

### 1.13. Manyetik Kaldırma Kuvveti

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin keşfinden sonra yüksek kaldırma kuvvetine sahip YBCO külçe süperiletkenlerinin; manyetik diskler (Yang vd., 2002), havada dönen çarklar, motorlar (Yang vd., 2002) ve manyetik olarak havaya kaldırılmış taşıma sistemleri (MagLev trenler) gibi pratik uygulamaları üzerinde birçok bilim adamı çalışmaktadır.

Kaldırma kuvveti tek boyutta düşünülürse  $F = m \frac{dH}{dx}$  ,  $m = Mv$  ve  $M = AJ_c r$  şeklinde verilir. Burada; m, süperiletkenin toplam manyetik moment; dH/dx, dış alan tarafından üretilen manyetik alanın aksel yöndeki değişim hızı; M, birim hacimdeki magnetizasyon; A, örnek geometrisine bağlı bir sabit;  $J_c$ , süperiletkenin kritik akım yoğunluğu; r ise perdeleme akım ilmeğinin yarıçapıdır. Görüldüğü gibi dH/dx,  $J_c$  ve r ne kadar büyük olursa kaldırma kuvveti de o kadar büyük olur. Büyük  $J_c$  ve r değerleri de örnek içerisindeki akı çivileme merkezlerinin güçlü olmasına bağlıdır (Yang vd., 2001) .

Kritik akım yoğunluğu ve magnetin manyetik alan dağılımı dışında kaldırma kuvvetini etkileyen birçok parametre vardır. Bunlardan bazıları; tanecik yarıçapı, tanecik yönelimi (Yang vd., 2003), örneğin kalınlığı, süperiletken-magnet arasındaki mesafe (Yang vd., 2002) ve soğutma mesafesidir. YBCO külçe süperiletkenleri kullanılarak yapılan bir çalışmada soğutma mesafesinin 7 cm'den 0,8 cm'ye azaltılmasıyla maksimum kaldırma kuvvetinin de 74 N'dan 48 N'a düştüğü görüldü (Yang vd., 2003). Ayrıca kaldırma kuvveti ölçümü sırasında magnet ile süperiletken malzeme arasındaki mesafe azaldıkça kaldırma kuvvetinde bir artış gözlemlendi (Çelik, 2009). Süperiletken örneğin kalınlığı arttıkça kaldırma kuvveti de artmaktadır (Yamachi vd., 2003).

Kaldırma kuvvetinin tayini için üç önemli faktör vardır. Bunlar; örnek içindeki süperiletken tane (domain) büyüklüğü, uygulanan manyetik alana bağlı olarak domainlerin yönelimleri ve mikroyapısal kusurlardan kaynaklanan tanecikler arası çivileme mekanizmasıdır. Yapılan bir diğer çalışmada yüksek erime fazına sahip Nd123 çekirdekleri ile büyütülen YBCO tek kristalinin yüksek kaldırma kuvveti gösterdiği gözlemlendi (Todt, 1994).

Tek kristal YBCO külçe örneklerinde tanecik yöneliminin kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi sıvı azot sıcaklığında incelendiğinde kaldırma kuvvetinin, uygulanan dış manyetik alan (H) yönüyle değiştiği ve H alanının c-eksenine paralel olduğu durumda, c-eksenine dik olduğu durumdan üç kat daha büyük kaldırma kuvvetine sahip olduğu gösterildi (Yang vd., 1998). Ayrıca YBCO külçe süperiletkenlerinin hacmi, boyutu, şekli sabit kalırken tanecik sayısının artması, dolayısıyla tanecik boyutunun azalmasıyla kaldırma kuvvetinin azaldığı görüldü (Yang vd., 2002).

Magnet sayısı 1'den 12'ye arttıkça kaldırma kuvvetinin de 18,8 N'dan 49 N'a arttığı gözlemlendi. Bu da göstermektedir ki farklı magnet konfigürasyonlarında kaldırma kuvveti değeri de farklılaşmaktadır. Aynı çalışmada aynı sayıda magnet kullanıldığı halde manyetik kutupların küçülmesiyle kaldırma kuvvetinin arttığı da gözlemlendi (Yang vd., 2001).

Tek kristal  $YBa_2Cu_3O_x$  süperiletkenlerinde oksijen verme sürecinin kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde örneğin hacminden bağımsız olarak oksijenle tavlamanın, 450 °C'de ve yaklaşık ilk 10 saatlik periyotta kaldırma kuvvetine bir etkisi olduğu belirlendi. Deneysel sonuçlar, yaklaşık 10 saatlik oksijenle tavlama sürecinin kaldırma kuvvetini artırdığını göstermektedir (Donglu, 1997).

Çok taneli ve tek taneli YBCO süperiletkenleri ile kaldırma kuvveti arasındaki ilişki incelendiğinde tek taneli YBCO süperiletkeninin kaldırma kuvvetlerinin toplamının çok taneli YBCO süperiletkeninin kaldırma kuvvetinden yaklaşık %5 kadar daha fazla bir değere sahip olduğu gözlemlendi (Yang vd., 2002).

Eritme yöntemi ile hazırlanan YBCO külçe süperiletkenleri, 77 K'de yüksek kritik akım yoğunluğu ve yüksek kritik manyetik alana sahip olduklarından yüksek kaldırma kuvvetine de sahiptirler (Wang vd., 2003). Bir başka çalışmada aynı yöntem ile hazırlanan YBCO + Pt süperiletkenlerinin Y123+Y211 süperiletkenlerinden daha yüksek kaldırma kuvvetine sahip olduğu gözlemlendi (Balachandran, 1993).

Üstten tohumlamalı büyütme yöntemi (TSMG) ile üretilen YBCO süperiletkenine farklı oranlarda Ca katkısı ve  $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  süperiletkenlerinde x katkı miktarı arttıkça süperiletkenlik geçiş sıcaklığının azaldığı görüldü (Lin, 2002).

Katıhal tepkime yöntemi düşük sıcaklıkta sinterlenen malzemeler için, MPMG yöntemi ise yüksek  $J_c$  değerleri ve tanecikler arası güçlü etkileşimler için oldukça uygundur (Çelik, 2009). MPMG yöntemi hazırlanan Sm123 ve katıhal tepkime yöntemi ile hazırlanan Yb211 örneklerinin belirli oranlarda katılanmasıyla elde edilen  $(Sm123)_{1-x}(Yb211)_x$  süperiletkenleri için x katkı miktarının kaldırma kuvvetleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, x katkı miktarı arttıkça kaldırma kuvveti yoğunluğunun da arttığı görüldü. Bunun nedeni süperiletken olmayan Yb211 yapısının Sm123 tanecikleri arasında akı çivileme merkezleri olarak davranmasıdır. Ayrıca farklı sıcaklıklarda (1080 °C, 1100 °C, 1120 °C) sinterlenen  $(Sm123)_{1-x}(Yb211)_x$  süperiletkenleri arasında 1100 °C'de sinterlenen örneğin en yüksek kaldırma kuvveti yoğunluğuna sahip olduğu gözlemlendi (Çelik, 2009).

Yapılan başka bir çalışmada  $Y_{1-x}Yb_{x/2}Gd_{x/2}Ba_2Cu_3O_{7-y}$  süperiletkenleri üzerinde Yb'nin difüzyon etkisi incelendi ve Yb123 yapısının ayrışma sıcaklığı Y123 ve Gd123 yapısının ayrışma sıcaklığından düşük olduğu için Yb123 yapısı, Y123 veya Gd123 yapısındaki taneciklerin birleşmesine neden olduğu görüldü (Çelik, 2009).

Üstten tohumlama (TSMG) yöntemi ile hazırlanmış  $PtO_2$ ,  $Ag_2O$  ve  $CeO_2$  katkılı  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  külçe süperiletkenlerinin manyetik özellikleri incelendiğinde uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak kritik akım yoğunlukları  $J_c(B)$ , sıcaklık ve alana bağlı gevşeme oranları olan  $S(T)$  ve  $S(B)$  türetildi. Bu sonuçlar üzerine farklı katkıların etkisi incelendi. Katkılı örneklerin (Pt, Ag, Ce katkılı) daha düşük gevşeme oranlarına ve daha yüksek kritik akım yoğunluklarına, dolayısıyla pratik uygulamalar için daha yüksek kaldırma kuvvetine sahip olduğu görüldü (Qin, 1999).

Farklı oranlarda  $\text{Nd}_4\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{10}/\text{Sm}_2\text{Ba}_1\text{Cu}_2\text{O}_5$  katkılarıyla eritme yöntemi ile elde edilen Nd123 ve Sm123 süperiletkenlerinin fiziksel ve yapısal özellikleri incelendi ve 5 Tesla'nın üzerindeki alanlar için kritik akım yoğunluğu ve kritik sıcaklık değerlerinden Nd123 ve Sm123 için farklı parametre değerleri elde edildi. Sm123 süperiletkenin yüksek kaldırma kuvvetine yol açan yüksek  $J_c$  değerine sahip olduğu, Nd123 süperiletkeninin ise üretiminin daha karmaşık ve henüz optimize edilmediği görüldü (Kaiser, 1998).

MPMG yöntemi ile çift çekirdekli YBCO süperiletkenlerinin hazırlanması esnasında çift çekirdek kullanılması 123 taneciklerinin büyümesi için gerekli olan zamanı kısaltırken tanecik sınırlarında tuzaklanmış manyetik alanını ve kaldırma kuvveti değerini azaltmaktadır. Tanecikler arasındaki zayıf bağların temel nedeni, artık bir erimenin var olmasıdır (Kim, 2001).

Sonuç olarak literatürde süperiletkenlerin kaldırma kuvvetleri ile ilgili çok sayıda pratik uygulamanın mevcut olduğu görülmektedir. Amaç, olabildiğince yüksek kaldırma kuvvetine sahip pratik uygulamalarda kullanılabilen süperiletkenler üretebilmek için optimum koşulları bulabilmektir. Yapılan bu çalışmada literatürde henüz olmayan  $(\text{Sm123})_{1-x}(\text{Nd123})_x$  süperiletkeni için;

- x katkı miktarının kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi,
- Süperiletken ile magnet arasındaki minimum yaklaşırma mesafesi değiştirilerek bu durumun düşey doğrultudaki kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi,
- Magnetin hızı değiştirilerek hızın ve katkı oranının kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi,
- Farklı manyetik dağılımlara sahip magnetlerin kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendi.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada,  $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (Nd123) toz örnekleri sinterleme aşamasında  $SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (Sm123) yapısına katkılanarak  $Sm(123)_{1-x}Nd(123)_x$  süperiletken örnekleri  $x=0,00; 0,10; 0,20; 0,30$  için katıhal tepkime yöntemi ile hazırlandı. Üretilen örneklerin kritik geçiş sıcaklığını tayin etmek için R-T ölçümleri yapıldı. Pelet halindeki örneklerin farklı şartlarda manyetik kaldırma kuvvetleri ölçüldü.

### 2.1. Toz Örneklerin Hazırlanması

$Sm_2O_3$ ,  $Nd_2O_3$ ,  $BaCO_3$  ve  $CuO$  tozları stokiometrik oranlarda hassas terazi ile tartıldı.

$SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  için kimyasal reaksiyon formülü:



$NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  için kimyasal reaksiyon formülü:



Başlangıç bileşenlerini elde etmek için kullanılan oksit tozlarının molekül ağırlıkları ve saflık değerleri Tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 4. Başlangıç bileşenlerini oluşturmak için kullanılan oksit tozların molekül ağırlıkları ve saflık dereceleri

| Bileşiğin adı   | Kimyasal formülü | Molekül ağırlığı (gr / mol) | Saflık derecesi (%) |
|-----------------|------------------|-----------------------------|---------------------|
| Samaryum Oksit  | $Sm_2O_3$        | 348,70                      | 99,998              |
| Neodim Oksit    | $Nd_2O_3$        | 336,50                      | 99,990              |
| Baryum Karbonat | $BaCO_3$         | 197,34                      | 99,997              |
| Bakır Oksit     | $CuO$            | 79,545                      | 99,995              |

25'er gramlık  $SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ve  $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  süperiletkenlerinin hazırlanması için gerekli oksit tozlarının stokiometrik değerleri Tablo 5’de ve Tablo 6’da sırasıyla verilmektedir.



Tablo 5. SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> süperiletkeni için oksit bileşenlerinin miktarları

| Kimyasal Formül                | Kütlesi (gr) |
|--------------------------------|--------------|
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,9905       |
| BaCO <sub>3</sub>              | 13,5598      |
| CuO                            | 8,1989       |

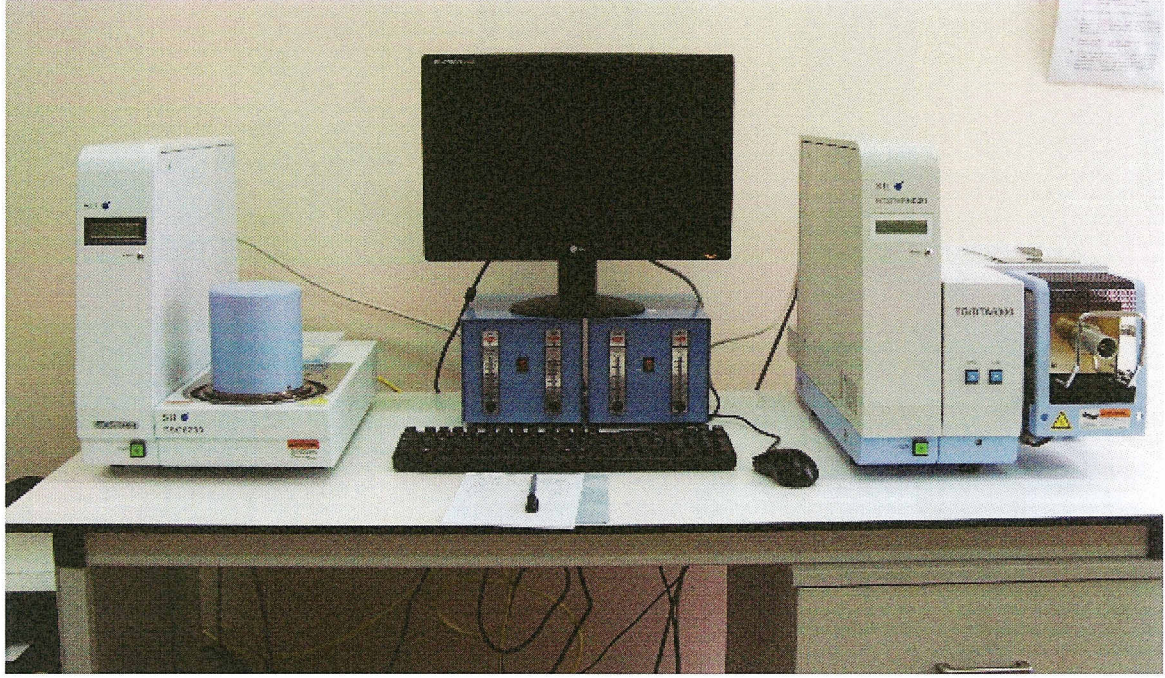
Tablo 6. NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> süperiletkeni için oksit bileşenlerinin miktarları

| Kimyasal Formül                | Kütlesi (gr) |
|--------------------------------|--------------|
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,8293       |
| BaCO <sub>3</sub>              | 13,6748      |
| CuO                            | 8,2684       |

SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> ve NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> süperiletkenlerinin üretimi için gerekli oksit tozları 0,1 mg hassasiyete sahip hassas terazi yardımıyla tartıldı. Her bir örnek için tozlar ayrı ayrı karıştırılarak agad havanında 60 dakika el ile karıştırıldı. Karışım, mekanik karıştırıcı kullanılarak 90 dakika öğütüldü. Kalsinasyon, sinterleme, faz geçişi ve oksijen salma/alma sıcaklıklarını belirlemede kullanılmak için 1'er gramlık toz örnekler ayrılarak "differential thermal analysis" (DTA) ölçümleri yapıldı. Bu ölçümler sonucunda örneklerin kalsinasyon ve sinterleme sıcaklıkları belirlendi. Öğütülen tozların her biri alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) potaya konarak kalsinasyon işlemine hazır hale getirildi.

## 2.2. DTA Ölçümü

Örneklerin endotermik ve ekzotermik reaksiyonunun sıcaklığa göre değişimi DTA (Differential Thermal Analysis) analiziyle belirlenebilmektedir. DTA analizi Exstar600 TG/DTA6300 model sistemde yapıldı ve sistem Şekil 10'da gösterilmektedir. Referans toz olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu alümina potaya yerleştirildi. Fırının sıcaklığı 10 °C/dak hızla 1160 °C'ye kadar ısıtıldı. Ölçüm süresince Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozunun sıcaklığı (T) ve örnek ile referans tozu sıcaklıkları farkı ΔT (voltaj cinsinden) ölçüldü. Ölçümde kullanılan örnek tozları, stokiometrik oranlarda karıştırılmış oksit tozlarıdır. Potalara konulan örnek tozları 0,1-0,4 gr arasındadır. Sıcaklık ölçümlerinde Pt-PtRh%13 termoçift kullanıldı. Ölçümler, bilgisayar programı kullanılarak yapıldı.



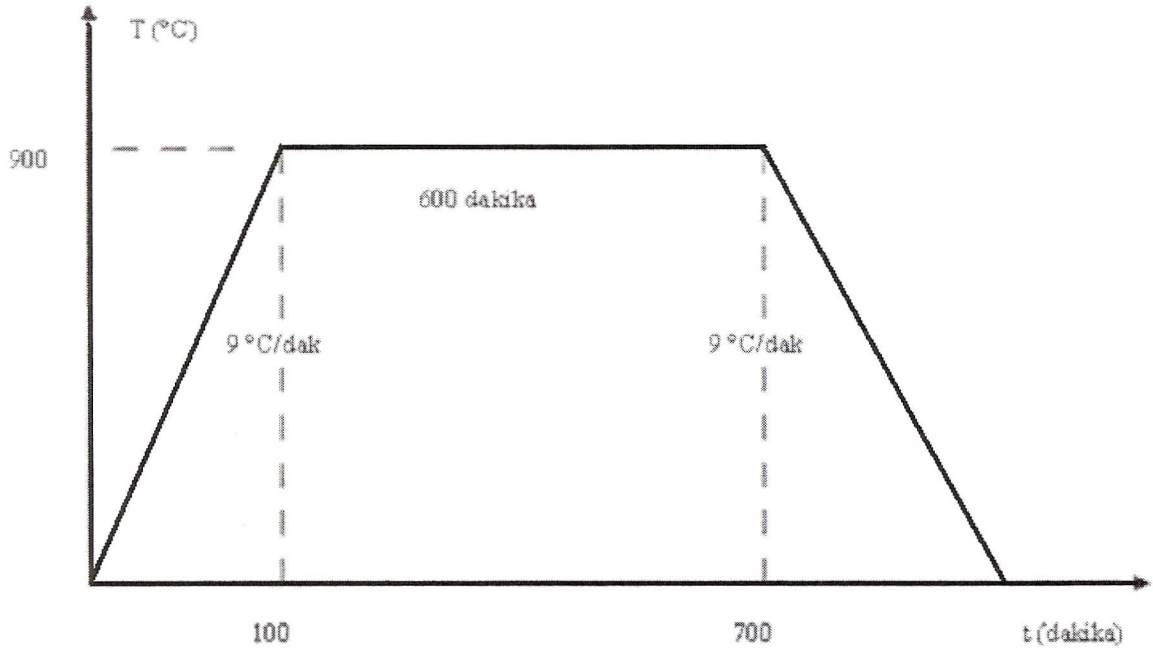
Şekil 10. DTA ölçüm sistemi

### 2.3. $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Süperiletkeninin Hazırlanması

$\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeni katıhal tepkime yöntemi ile hazırlandı. Isıl işlemlerin tamamı Protherm marka programlanabilir tüp fırın içinde gerçekleştirildi. Isıl işlemler için gerekli sıcaklık değerleri ise DTA verilerinden elde edildi.

#### 2.3.1. Kalsinasyon işlemi

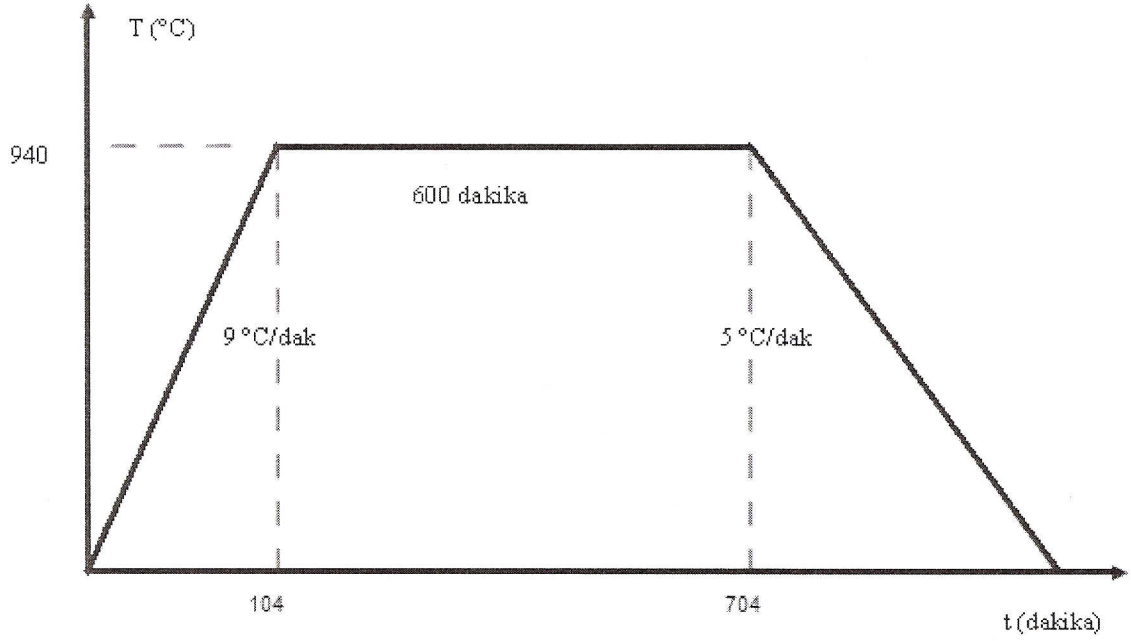
Öğütülen tozlar, alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) potaya konarak tüp fırın içine yerleştirildi. Fırın, oda sıcaklığından  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye  $9\text{ }^\circ\text{C}/\text{dak}$  hızla ısıtıldı. Bu sıcaklıkta 10 saat bekletilen örnekler  $9\text{ }^\circ\text{C}/\text{dak}$  hızla oda sıcaklığına soğutuldu. Böylece 1. kalsinasyon işlemi tamamlandı. 1. kalsinasyon işleminin şematik diyagramı Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11.  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeninin 1. kalsinasyon işlemi için sıcaklık–zaman grafiği

Oda sıcaklığına soğutulan örnekler önce agad havanında elle 60 dakika, sonra da mekanik karıştırıcıda 90 dakika öğütüldü. Karıştırılan tozlar, 2. kalsinasyon işlemi için hazır hale getirildi.

2. kalsinasyon işlemi için öğütülen tozlar alümina potaya konarak tüp fırın içine yerleştirildi. Fırın, oda sıcaklığından  $940^{\circ}\text{C}$ 'ye  $9^{\circ}\text{C}/\text{dak}$  hızla ısıtıldı. Bu sıcaklıkta 10 saat bekletilen örnekler  $5^{\circ}\text{C}/\text{dak}$  hızla oda sıcaklığına soğutuldu. Böylece 2. kalsinasyon işlemi de tamamlandı. 2. kalsinasyon işleminin şematik diyagramı Şekil 12'de gösterilmektedir.

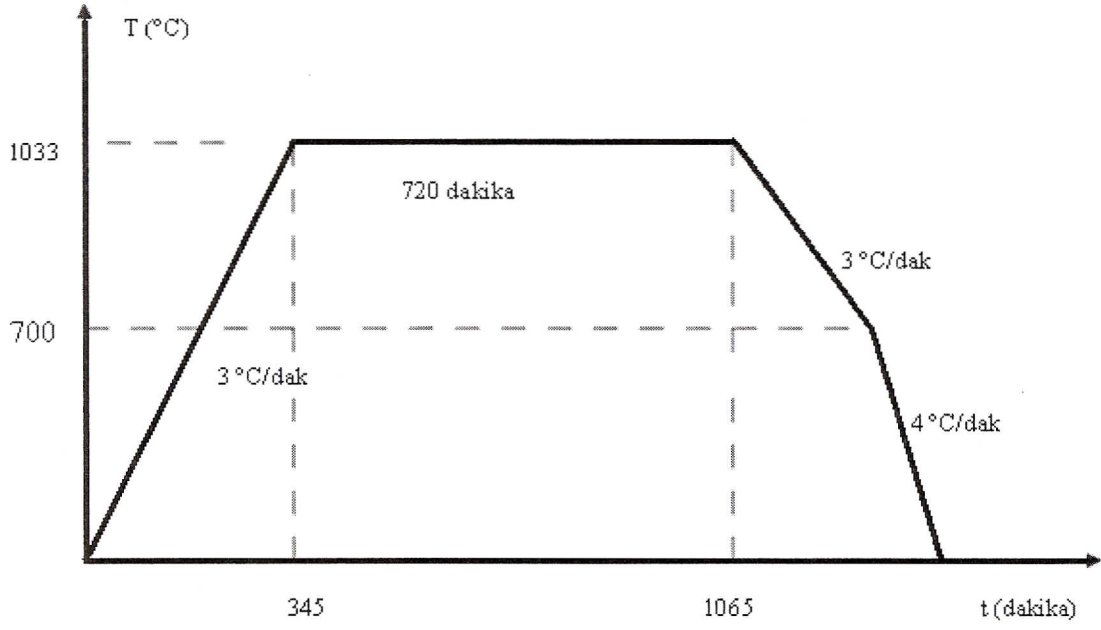


Şekil 12.  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeninin 2. kalsinasyon işlemi için sıcaklık–zaman grafiği

Oda sıcaklığına soğutulan örnekler önce agad havanında elle 60 dakika, sonra da mekanik karıştırıcıda 90 dakika öğütüldü. Karıştırılan tozlar, sinterleme işlemi için hazır hale getirildi.

### 2.3.2. Sinterleme işlemi

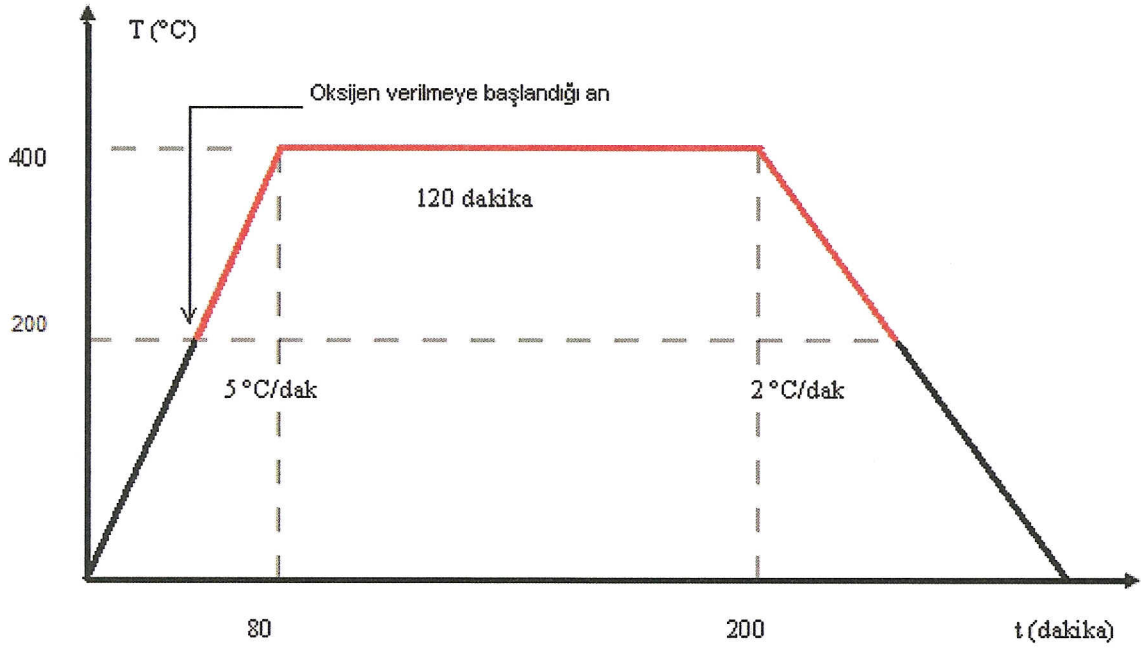
Sinterleme işlem için öğütülen tozlar yaklaşık 250 MPa basınç altında preslenerek 13 mm çapında pelletler haline getirildi ve pelletler programlanabilir tüp fırın içine yerleştirildi. Fırın, 3 °C/dak hızla oda sıcaklığından 1033 °C çıkartıldı. Bu sıcaklıkta 720 dakika bekletildi ve 3 °C/dak hızla 700 °C'ye ve 700 °C'den de 4 °C/dak hızla oda sıcaklığına soğutuldu (Şekil 13).



Şekil 13.  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeninin sinterleme işlemi için sıcaklık–zaman grafiği

### 2.3.3. Oksijen verme işlemi

Sinterlenen örneklere son aşama olarak Şekil 14’te gösterildiği gibi oksijen verme işlemi gerçekleştirildi. Örnekler, 5 °C/dak hızla oda sıcaklığından 200 °C’ye ısıtıldı ve bu aşamada örnekler fırına yerleştirilerek oksijen verme işlemine başlandı. 5 °C/dak hızla 400 °C’ye çıkıldı ve bu sıcaklıkta 120 dakika oksijen ortamında bekletildi. Sıcaklık, 2 °C/dak hızla tekrar 200 °C’ye düşürüldü ve oksijen verme işlemine son verildi. Fırın, 2 °C/dak hızla oda sıcaklığına soğutuldu. Böylece  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (Nd123) süperiletkeni elde edildi.



Şekil 14.  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeninin oksijen verme işlemi için sıcaklık–zaman grafiği

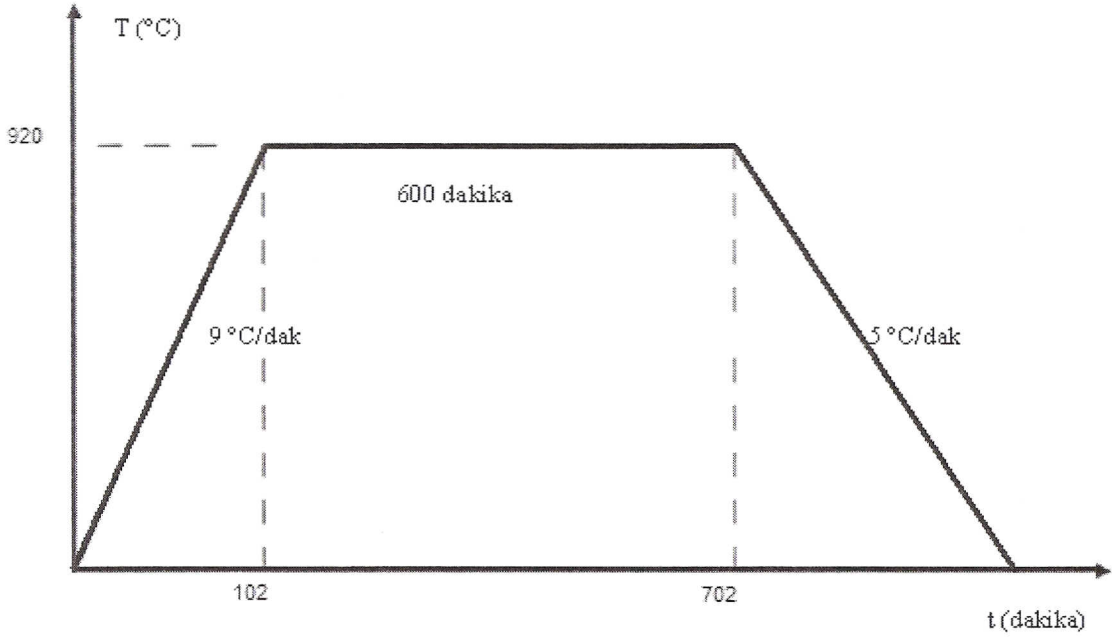
Oksijen verme işleminden sonra pelet halindeki  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeni,  $\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  süperiletkenin  $x=0,00; 0,10; 0,20; 0,30$  serisini elde edebilmek için önce elle 60 dakika sonra da agad havanda 90 dakika tekrar öğütülerek toz haline getirildi.

#### 2.4. $\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$ Süperiletkeninin Hazırlanması

$\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  süperiletkeni katıhal tepkime yöntemi ile hazırlandı. Isıl işlemlerin tamamı Protherm marka programlanabilir tüp fırın içinde gerçekleştirildi.

##### 2.4.1. Kalsinasyon işlemi

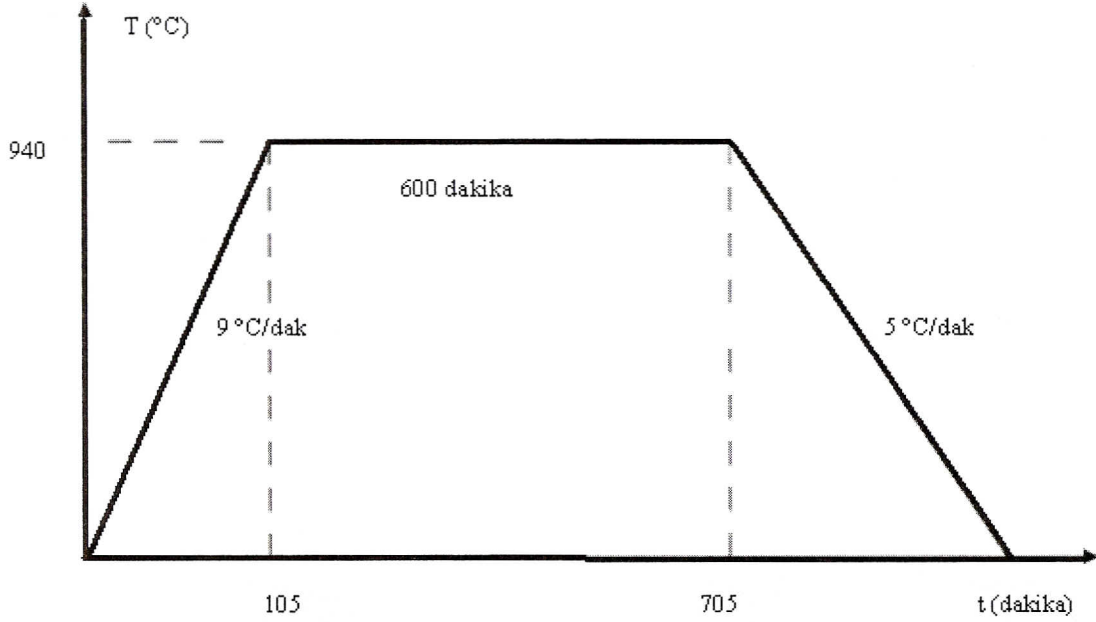
$\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletken örnek oluşturmak için öğütülen tozlar, alümina potaya konularak tüp fırın içine yerleştirildi. Fırın, oda sıcaklığından  $920^{\circ}\text{C}$ 'ye  $9^{\circ}\text{C}/\text{dak}$  hızla ısıtıldı. Bu sıcaklıkta 10 saat bekletilen örnekler  $5^{\circ}\text{C}/\text{dak}$  hızla oda sıcaklığına soğutuldu. Böylece 1. kalsinasyon işlemi tamamlandı. 1. kalsinasyon işleminin şematik diyagramı Şekil 15'te gösterilmektedir.



Şekil 15.  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  süperiletkeninin 1. kalsinasyon işlemi için sıcaklık–zaman grafiği

Oda sıcaklığına soğutulan örnekler önce agad havanında elle 60 dakika, sonra da mekanik karıştırıcıda 90 dakika öğütüldü. Karıştırılan tozlar, 2. kalsinasyon işlemi için hazır hale getirildi.

2. kalsinasyon işlemi için öğütülen tozlar alümina potaya konarak tüp fırın içine yerleştirildi. Fırın, oda sıcaklığından 940 °C'ye 9 °C/dak hızla ısıtıldı. Bu sıcaklıkta 10 saat bekletilen örnekler 5 °C/dak hızla oda sıcaklığına soğutuldu. Böylece 2. kalsinasyon işlemi de tamamlandı. 2. kalsinasyon işleminin şematik diyagramı Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16.  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeninin 2. kalsinasyon işlemi için sıcaklık–zaman grafiği

Oda sıcaklığına soğutulan örnekler önce agad havanında elle 60 dakika, sonra da mekanik karıştırıcıda 90 dakika öğütüldü. Karıştırılan tozlar, sinterleme işlemi için hazır hale getirildi.

#### 2.4.2. $\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$ serisinin hazırlanması

$\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  yapısında ( $x=0,00; 0,10; 0,20; 0,30$  için) her birinden 5 gramlık tozlar elde etmek için stokiometrik oranlarda kalsine edilen  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ve sinterlenmiş  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  toz miktarları hesaplandı. Bu değerler Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7.  $\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  süperiletkeni için her bir katkıya ait başlangıç bileşenlerinin kütle miktarları

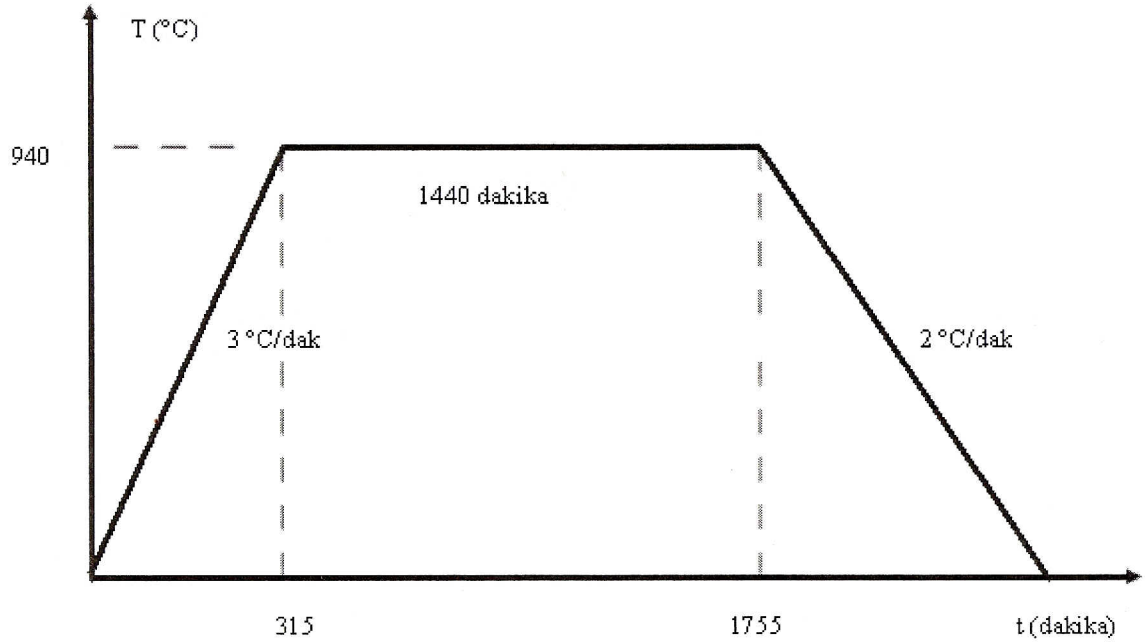
| Katkı oranı | $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ miktarı (gr) | $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ miktarı (gr) |
|-------------|--|--|
| $x = 0,00$  | 5  | 0  |
| $x = 0,10$  | 4,5038   | 0,4962   |
| $x = 0,20$  | 4,0067   | 0,9933   |
| $x = 0,30$  | 3,5089   | 1,4911   |



Her bir katkı miktarı için,  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ve  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  miktarları hassas terazi ile ayrı ayrı tartıldı ve örnek tozlar 60 dakika el ile agad havanında, ardından da 90 dakika mekanik karıştırıcıda öğütüldü. Böylece her bir katkı için homojen bir karışım elde edilmeye çalışıldı. Her bir katkıya ait 5 gramlık örnek tozu, 3 gr ve 2 gr olmak üzere tartılarak yaklaşık 250 MPa basınç altında 13 mm çaplı silindirik tablet (pelet) kalıplarında preslendi. 3 gramlık tabletler manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinde, 2 gramlık tabletler ise direnç ölçümünde kullanılmak üzere hazırlandı.

### 2.4.3. Sinterleme işlemi

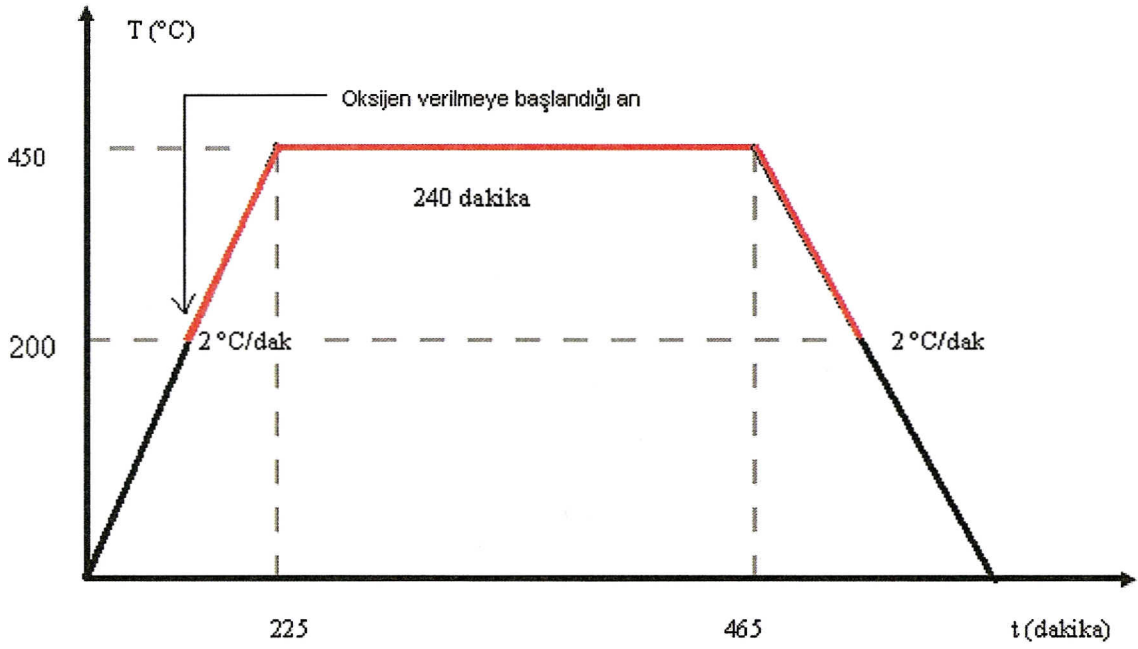
$x=0,00$  katkılı 3 gr ve 2 gr'lık iki tablet, oda sıcaklığında bulunan tüp fırına yerleştirildi. Fırın,  $3\text{ }^\circ\text{C/dak}$  hızla oda sıcaklığından  $940\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtıldı. 24 saat bu sıcaklıkta bekletilen tabletler  $2\text{ }^\circ\text{C/dak}$  hızla tekrar oda sıcaklığına soğutuldu. Aynı ısıl işlem, serideki her bir katkıya aynı şartlarda ayrı ayrı uygulandı. Bu ısıl işlem şematik olarak Şekil 17'de gösterilmektedir.



Şekil 17.  $\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  süperiletkeninin sinterleme işlemi için sıcaklık-zaman grafiği

#### 2.4.4. Oksijen verme işlemi

Sinterlenen örnekler son aşama olarak Şekil 18’de gösterilen sıcaklık-zaman grafiğine göre oksijen verme işlemi uygulandı. Örneklerin hepsi aynı anda uçları kapatılmış tüp fırın içine yerleştirildi. Fırın, 2 °C/dak hızla oda sıcaklığından 450 °C’ye ısıtıldı. Isıtma işlemi sırasında sıcaklık, 200 °C’ye geldiğinde fırının içine oksijen verilmeye başlandı ve örnekler 450 °C’de 4 saat oksijen ortamında bekletildi. Ardından fırın, 2 °C/dak hızla oda sıcaklığına soğutuldu ve soğutma esnasında da 200 °C’ye gelindiğinde oksijen verme işlemine son verildi.



Şekil 18.  $\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  süperiletkeninin oksijen verme işlemi sıcaklık-zaman grafiği

#### 2.5. X-Işını Kırınım Ölçümleri

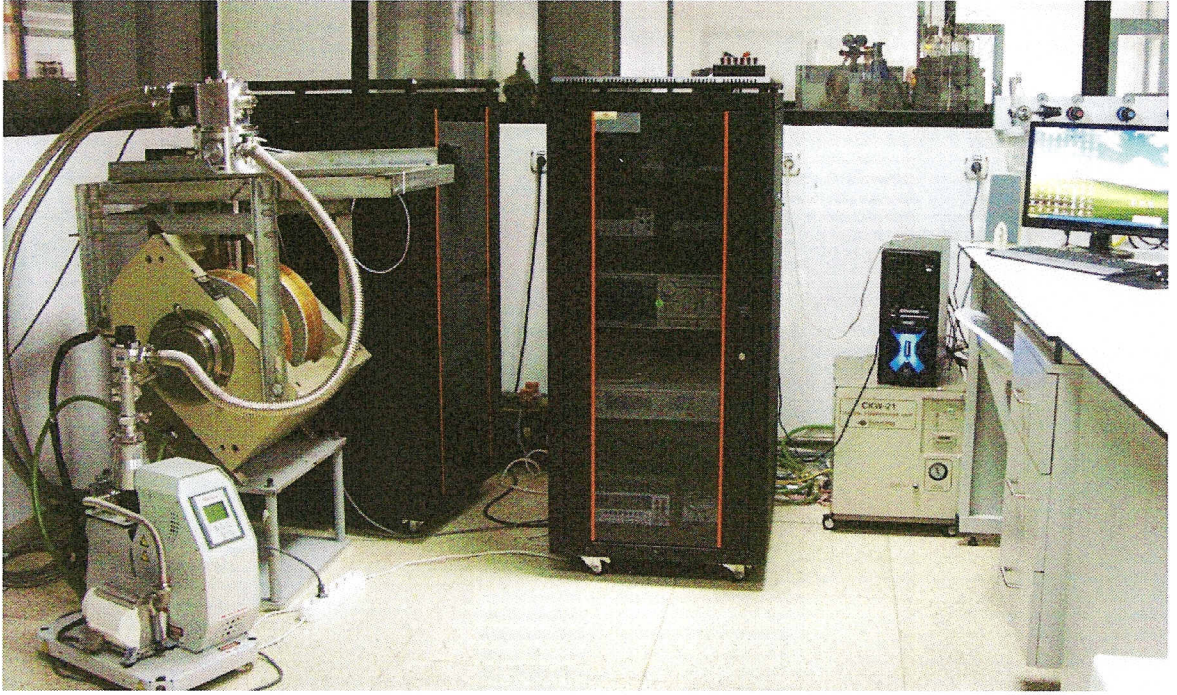
Rigaku D/Max-IIIC difraktometresinde  $\text{Cu-K}_\alpha$  kullanılarak X-ışını kırınım ölçümleri elde edildi. (Şekil 19). Ölçümler için, çalışma voltajı ve akımı 30 kV ve 20mA olarak seçildi. Ayrıca ölçümler esnasında  $2\theta = 20^\circ - 60^\circ$  aralığı 5 °/dak hızla tarandı.



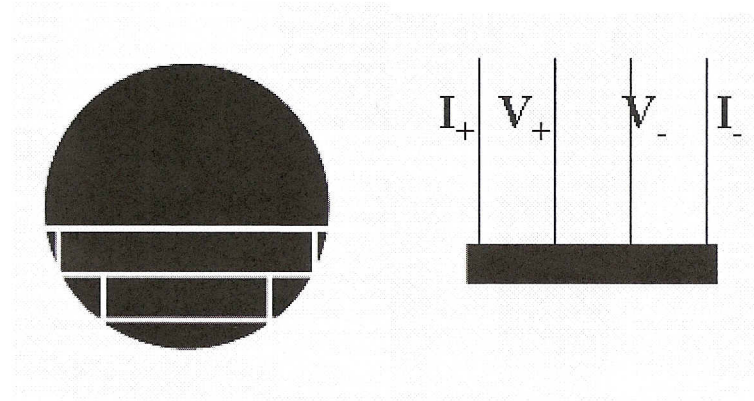
Şekil 19. X-ışını kırınım sistemi

## 2.6. Direnç Ölçümü

Direnç ölçüm sistemi, 4–325 K sıcaklık aralığında çalışabilen kapalı devre He Kryostat sistemi, kapalı devre su soğutma sistemi, turbo moleküler pompa, Lakeshore 332S sıcaklık kontrolcüsü, Keithley AC ve DC akım kaynağı, Keithley Nanovoltmetre'den oluşmaktadır. Direnç ölçümleri bilgisayar programı tarafından kontrol edilerek yapıldı. Ölçüm sistemi Şekil 20'de gösterilmektedir. Direnç ölçümü yapılmadan önce hazırlanan serinin 2 gramlık örnekleri Metkon Mikrocut model 150 kesici ile 2,5 mm genişliğinde kesildi (Şekil 21). Kesilen örneklere gümüş pasta ile bakır teller kullanılarak dört nokta kontak yapıldı. Kontakları yapılan örnekler kryostat üzerindeki örnek tutucuya yerleştirildi. Alansız direnç ölçümü 4–120 K sıcaklık aralığında gerçekleşti. Ölçümlerde uygulanan akım 10 mA olarak seçildi.



Şekil 20. Direnç ölçüm sistemi

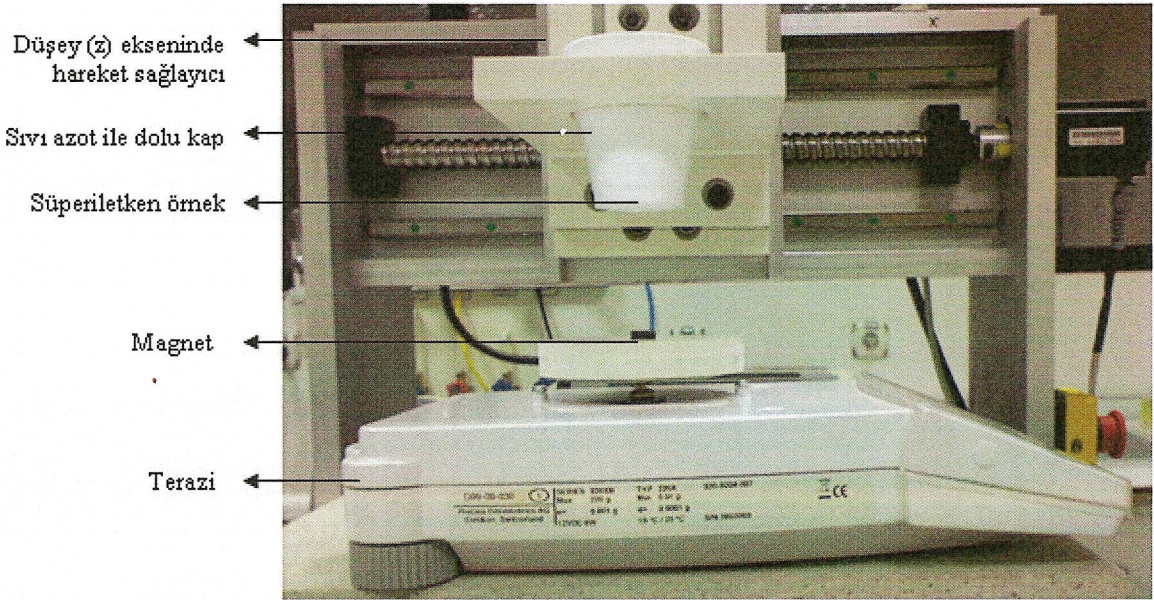


Şekil 21. Örneklerin kesilmesi ve dört nokta yöntemi ile kontak yapılmasının şematik gösterimi

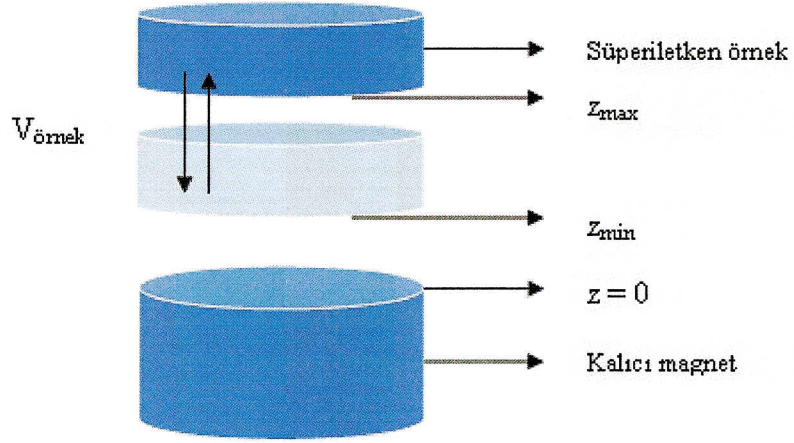
## 2.7. Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçümü

Üç ayrı step motoruna sahip 3 eksenli hareket edebilen sistemin xy-düzlemine hassas terazi yerleştirildi ve terazinin kefesinin tam orta noktasına ise yüksekliği 5 mm ve çapı 12 mm olan silindirik geometriye sahip doğal mıknatıs konuldu. z-düzlemindeki hareketli kol üzerine, yüksekliği 2 mm ve çapı 13 mm olan silindirik geometriye sahip süperiletken örneğin içinde bulunduğu sıvı azot doldurulmuş kabın yerleştirilebileceği bir

düzenek monte edildi (Şekil 22). Ayrıca sıvı azot dolu kabın içindeki süperiletken örneğin, kabın tabanında ve tam orta noktasında durmasını sağlayan bir aparat hazırlandı. Böylelikle süperiletken örnek ve mıknatıs aynı eksenel doğrultuda olmaları sağlandı (Şekil 23). Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri, hazırlanan serinin 3 gramlık örnekleri ile yapıldı. Soğutma işlemi, süperiletken örneğin taban yüzeyi ile mıknatıs üst yüzeyi arasındaki mesafe ( $z_{max}$ ) 50 mm iken kaba sıvı azot konularak gerçekleştirildi. Ölçümlerde mıknatıs sabit tutulup, süperiletken örnek hareket ettirildi. Süperiletken örnekler farklı hızlarda ( $v_{örnek}=0,840; 0,603; 0,418; 0,284$  ve  $0,200$  mm/s) ve farklı minimum yaklaşırma mesafelerinde ( $z_{min}=1,5; 3; 5; 7$  ve  $10$  mm) magnete yaklaştırılıp uzaklaştırılarak manyetik kaldırma kuvvetleri, oluşturulan program yardımıyla  $0,25$  mm'lik adımlarla ölçüldü ve ölçüm sonuçları süperiletken örneğin hacmine bölünerek manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu program tarafından hesaplandı. Kullanılan magnetin yüzey profilinin kaldırma kuvvetine olan etkisini de incelemek için benzer ölçümler  $9$  mm çapa ve  $9$  mm yüksekliğe sahip silindirik bir magnet ile tekrarlandı.



Şekil 22. Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi



Şekil 23. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümü sırasında süperiletken örnek ile magnet arasındaki mesafe ilişkisi

## 2.8. Mıknatısın Yüzey Manyetik Profil Ölçümü

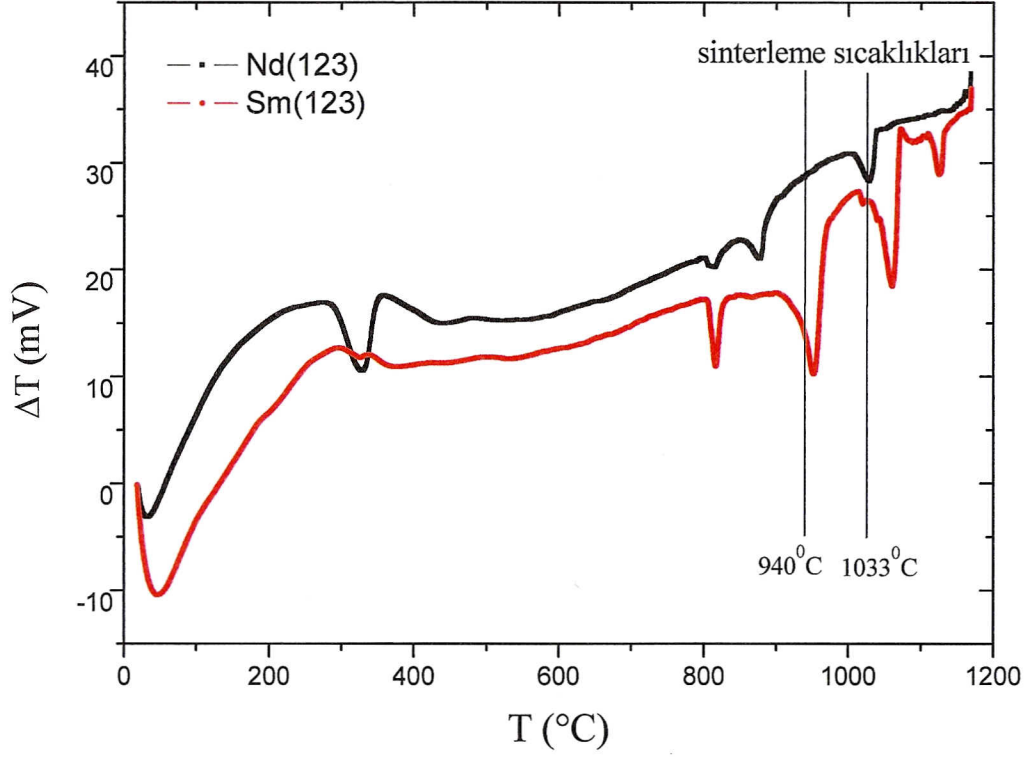
Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sisteminde yapılan değişiklikle iki farklı mıknatısın üst yüzeyinden belirli mesafelerde ( $z = 0,25; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 30; 50$  mm), xy-düzleminde  $30 \times 30$  mm<sup>2</sup>'lik alanda 0,25 mm adımla, LakeShore Model 455DSP gausmetre ve probu kullanılarak her konumun manyetik alanının aksenal doğrultudaki bileşeni ölçüldü. Ölçümler bilgisayar programı ile kontrol edildi.

### 3. BULGULAR

$\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  süperiletkeni için  $x = 0,00; 0,10; 0,20; 0,30$  serisi katıhal tepkime yöntemi ile hazırlandı. Üretilen örneklerin elektrik, manyetik ve yapısal özellikleri incelendi.  $x$ -ışını polikristal difraktometresiyle elde edilen kırınım desenlerinden örneklerin içerdiği fazlar ve örgü parametreleri tespit edildi. Sıcaklığa göre direnç değerleri manyetik alan yokken (Zero Field Cooling) ölçülerek kritik geçiş sıcaklığı ve katkının kritik geçiş sıcaklığına etkisi incelendi. Her bir katkının farklı minimum değerlerinde ve farklı hızlarda manyetik kaldırma kuvveti ölçüldü ve katkının manyetik kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendi. Farklı magnetler kullanılarak ölçümler tekrarlandı ve kullanılan magnetin manyetik kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendi. Elde edilen sonuçlar diğer çalışmalardaki sonuçlar ile kıyaslandı.

#### 3.1. DTA Analizleri

$\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (Sm123),  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (Nd123) süperiletken örnekleri ve  $\text{Sm}(123)_{1-x}\text{Nd}(123)_x$  süperiletken örneklerinin  $x=0,00; 0,10; 0,20; 0,30$  serisi için kalsinasyon, sinterleme, oksijen salma ve faz geçiş sıcaklıklarının hepsi DTA ölçümlerinin sonucunda belirlendi (Şekil 24). Serideki örnekler arasında kıyaslama yapılabilmesi için tüm seriye aynı ısıl işlemler uygulandı. Seriyeye uygulanan sinterleme sıcaklığı  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeninin erime sıcaklığının hemen altında olması gerekmektedir. Bu sıcaklık değerinde  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeni, malzeme içerisinde katı halde bulunacak ve sıvı fazın kaybını engelleyecektir. Bu yüzden DTA verileri kullanılarak  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  süperiletkeninin sahip olduğu erime sıcaklığının altında olan ve sıvı fazın yapıdan dışarı çıkmayacağı sinterleme sıcaklığı  $940\text{ }^\circ\text{C}$  olarak belirlendi. Oksijen salma sıcaklıkları ise  $200\text{--}450\text{ }^\circ\text{C}$  arasında olduğu için, örneklerin hepsinin birlikte oksijende tavlanması  $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 4 saat bekletildikten sonra oksijen ortamında  $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{dak}$  hızla  $200\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ve aynı hızla hava ortamından oda sıcaklığına soğutuldu. Böylece her örneğe aynı şartlarda oksijen verilmesi sağlandı.

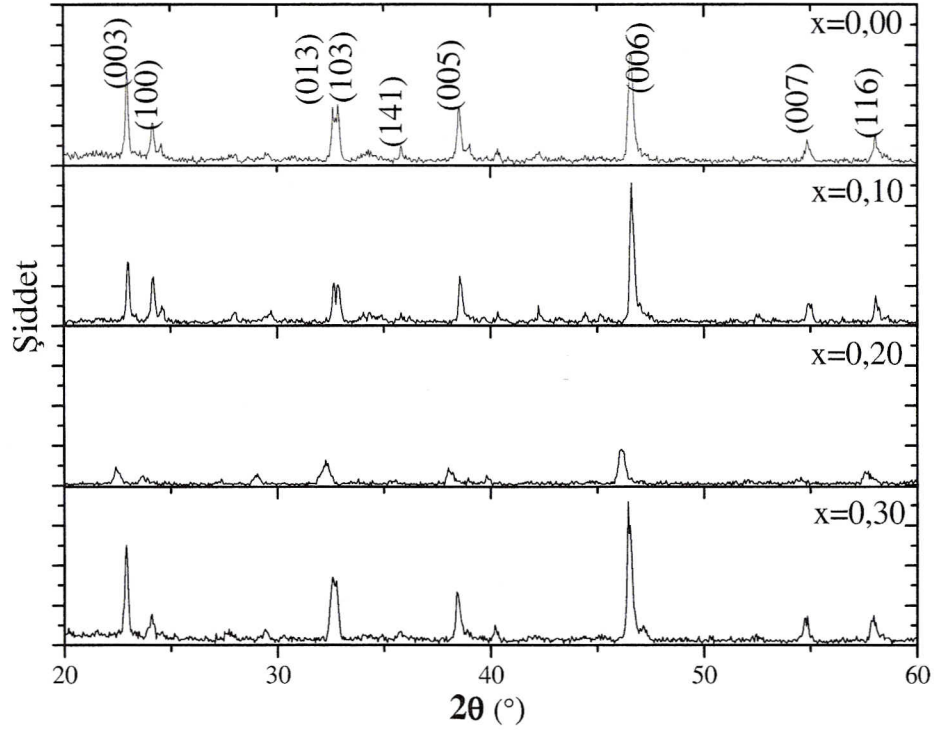


Şekil 24. Sm(123) ve Nd(123) süperiletkenlerinin diferansiyel ısı işlemleri

### 3.2. X-Işını Kırınım Sonuçları

Hazırlanan serinin, polikristal difraktometresinde elde edilen X-ışını kırınım desenleri Şekil 25'te gösterilmektedir. Serideki örneklerin spektrumlarında 123 yapısına ait (003), (100), (013), (103), (005), (006), (007) ve (116) pikleri görüldü. Ayrıca  $x = 0,00$  katkılı süperiletken örnekte çok düşük şiddette 211 yarıiletken yapısına ait (141) piki  $35,821^\circ$ 'de gözlemlendi. Seride  $x = 0,20$  katkılı örneğin pik şiddetleri diğer katkıların aynı açılardaki pik şiddetlerine göre çok küçük olduğu ve katkı miktarının artması ile ortorombik yapının korunduğu gözlemlendi.

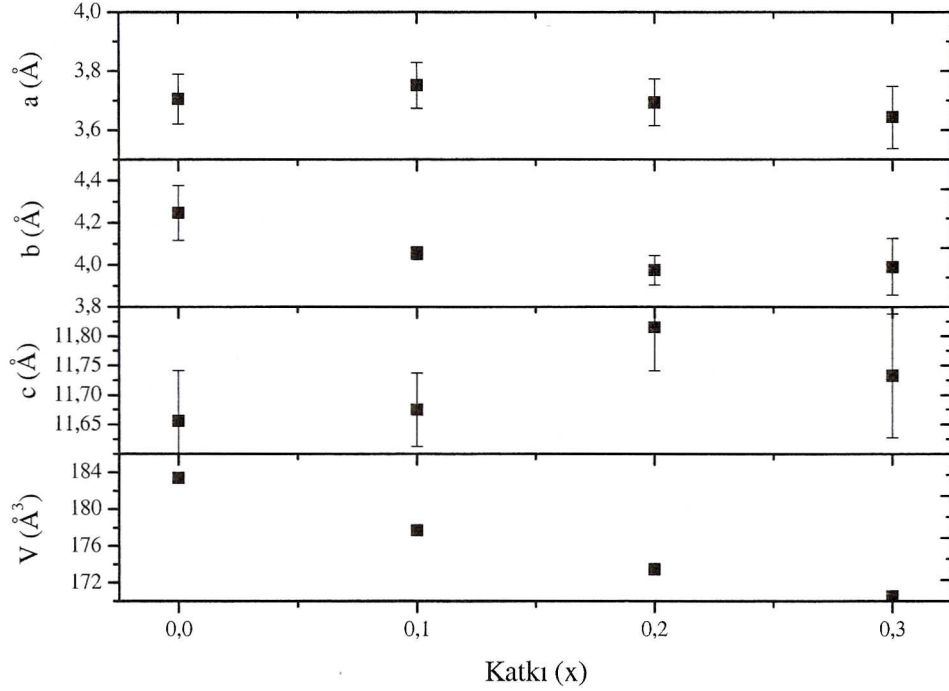




Şekil 25. Süperiletken örneklerin polikristal difraktometresiyle elde edilmiş x-ışını kırınım desenleri

İndisler ve düzlemler arası mesafe kullanılarak örgü parametreleri ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  ve hacim) hesaplandı. Hesaplama en küçük kareler metodu kullanılarak geliştirilen bilgisayar programından faydalandı. Program ile yapılan hesaplamada, ilgili piklerin indisleri girilerek  $a$ ,  $b$  ve  $c$  değerleri hesaplatıldı. Örgü parametreleri ile düzlemler arası mesafe kullanılarak (hkl) Miller indislerinin tekrar hesaplatılmasıyla programın kendi içerisinde doğruluğu test edilmiş oldu. Hesaplanan  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ve  $V$  (hacim) değerlerinin katkı miktarına ( $x$ ) göre değişimi Şekil 26'da verilmektedir. Kristal yapıya Nd atomları girdikçe birim hücre hacminin ( $V$ ) azaldığı görülmektedir. Yapıda katkı arttıkça Sm123 yapısı azalmakta ve Nd123 yapısı da artmaktadır. Sinterleme işlemi sırasında yapıdaki Sm123 erime sıcaklığı yakınında ve Nd123 yapısı ise katı halde bulunmaktadır. Eriyik haldeki Sm123 yapısının katılaşması katı haldeki Nd123 yapısından başlayacağı için, örgü parametreleri de Nd123 yapısının örgü parametrelerine yakın olması beklenir. Sm123 ve Nd123'ün  $c$ -örgü sabitleri sırasıyla 11,709 Å (Vennila, 2005) ve 11,74 Å (Çelik, 2009) iken, bu çalışmada üretilen örneklerde  $x = 0$  için (Sm123)  $c$ -örgü parametresi 11,656 Å olarak hesaplandı. Şekil 26'dan da görüldüğü gibi, katkı miktarı arttıkça  $a$  ve  $b$ -örgü parametreleri

hata aralıkları da düşünülerek yaklaşık lineer olarak azalırken  $c$ -örgü parametresinin  $x = 0,20$  dışında hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir.  $x = 0,20$  katkısına sahip örneğin  $c$ -örgü parametresinin farklı çıkması, XRD desenindeki pik şiddetleri, diğer örneklerin pik şiddetlerine göre çok küçük ve pik genişliklerinin büyük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca katkı miktarı artarken hacimde de lineer olarak azalma meydana gelmektedir.



Şekil 26. Süperiletken örneklerin x-ışını kırınımları kullanılarak hesaplanan örgü parametreleri ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) ve  $V$  hacimlerinin katkı miktarlarına göre değişimleri

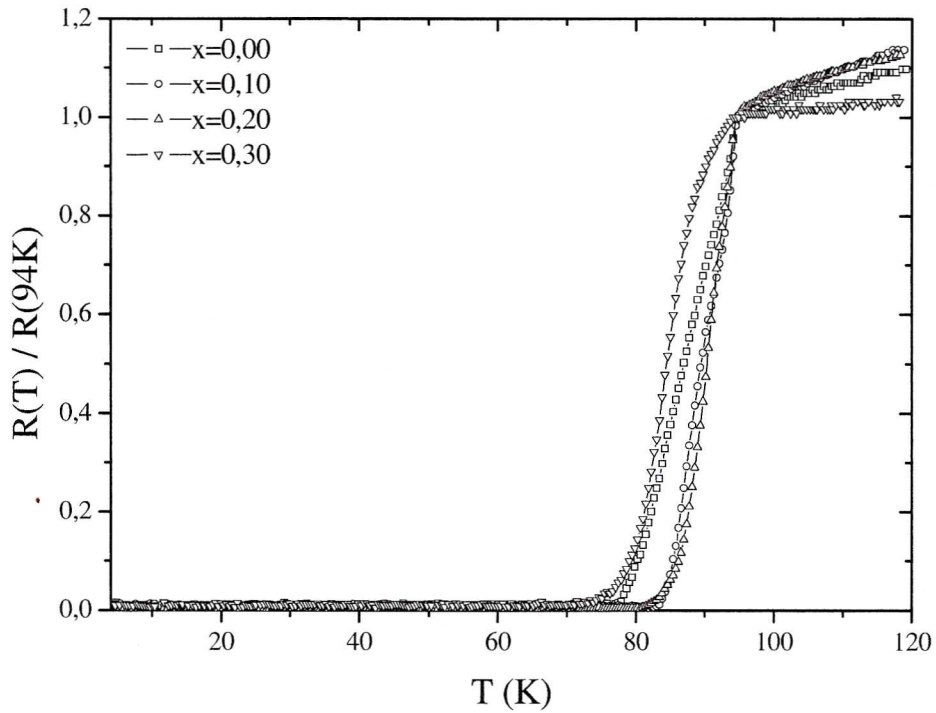
### 3.3. Direnç Ölçüm Sonuçları

Süperiletken örneklerin 4–120 K sıcaklık aralığında manyetik alansız 94 K sıcaklığındaki direnç değerine göre normalize edilmiş direnç–sıcaklık değişimleri Şekil 27’de görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi hemen hemen örneklerin tümünde çok az da olsa yarıiletken faz mevcut olup  $x = 0,30$  katkı oranına sahip örneğin içinde yarıiletken faz diğerlerine göre daha fazladır. Bu nedenle kritik geçiş sıcaklık aralığı Şekil 28’den de görüldüğü gibi en fazla  $x = 0,30$  katkı oranına sahiptir. Kritik geçiş sıcaklık aralığına göre katkının değişimi Şekil 28’de gösterilmekte olup, bu çalışmadaki üretim

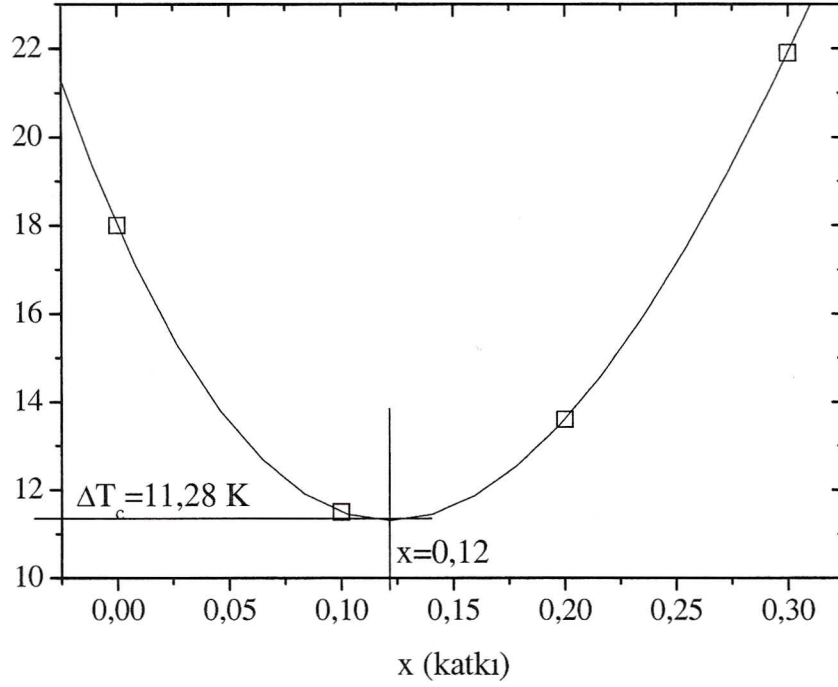
şartlarına göre en az geçiş sıcaklık aralığına sahip katkı  $x = 0,12$  ve  $\Delta T_c = 11,28$  K'dir. Bu geçiş sıcaklığının da büyük olmasının nedeni sinterleme sıcaklığının düşük seçilmesidir. Bu çalışmada Nd123 yapısının, hemen hemen eriyik haldeki Sm123 yapısını tutması, dışarıya akmasını engellemesi amaçlandı. Dolayısıyla sinterleme sıcaklığı düşük seçildi.

Ayrıca kritik geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak hepsinin aynı  $\sim 94$  K olması ise, Sm123 ve Nd123 yapılarının kritik geçiş sıcaklıklarının yaklaşık olarak aynı olduğunu göstermektedir.

Normal bölgenin direnç eğrisinin eğimi azalması daha iletken malzeme olduğuna işaret etmektedir. Buna göre normal bölgedeki en yüksek eğime sahip eğri  $x = 0,30$  katkıya aittir.



Şekil 27. Serideki örneklerin direnç-sıcaklık eğrileri



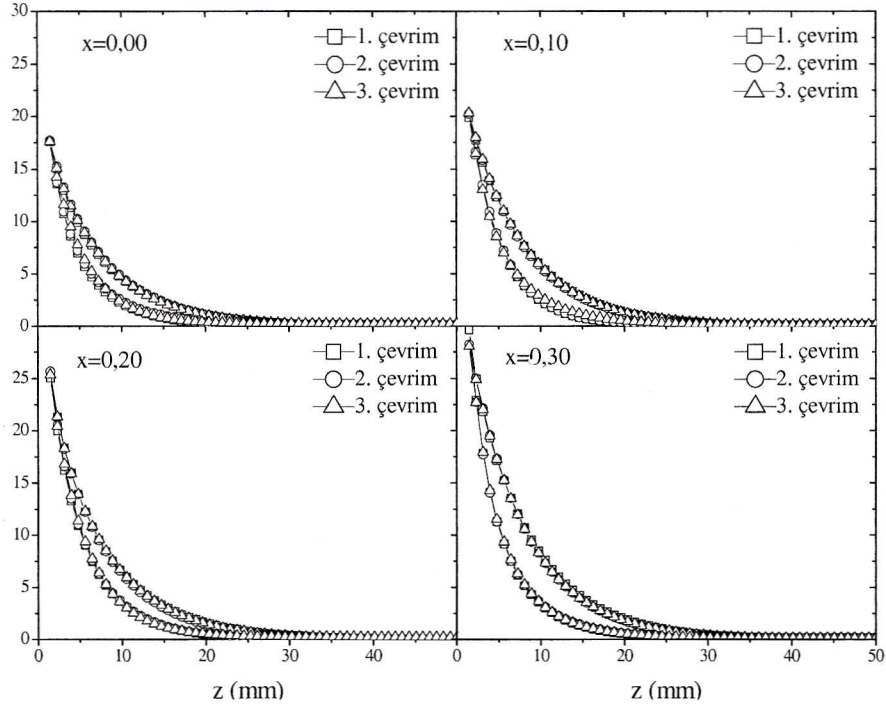
Şekil 28. Katkıya göre kritik geçiş sıcaklık aralığı

### 3.4. Manyetik Kaldırma Kuvveti Ölçüm Sonuçları

Serideki her bir örnek  $z_{max}$  değerinde iken alansız olarak soğutuldu (ZFC) ve kaldırma kuvveti ölçümü yapıldı. Bu çalışmada katkının, örnek hızının ve magnet ile örnek arasındaki minimum yaklaştırma mesafesinin kaldırma kuvvet yoğunluğu üzerindeki etkileri incelendi.

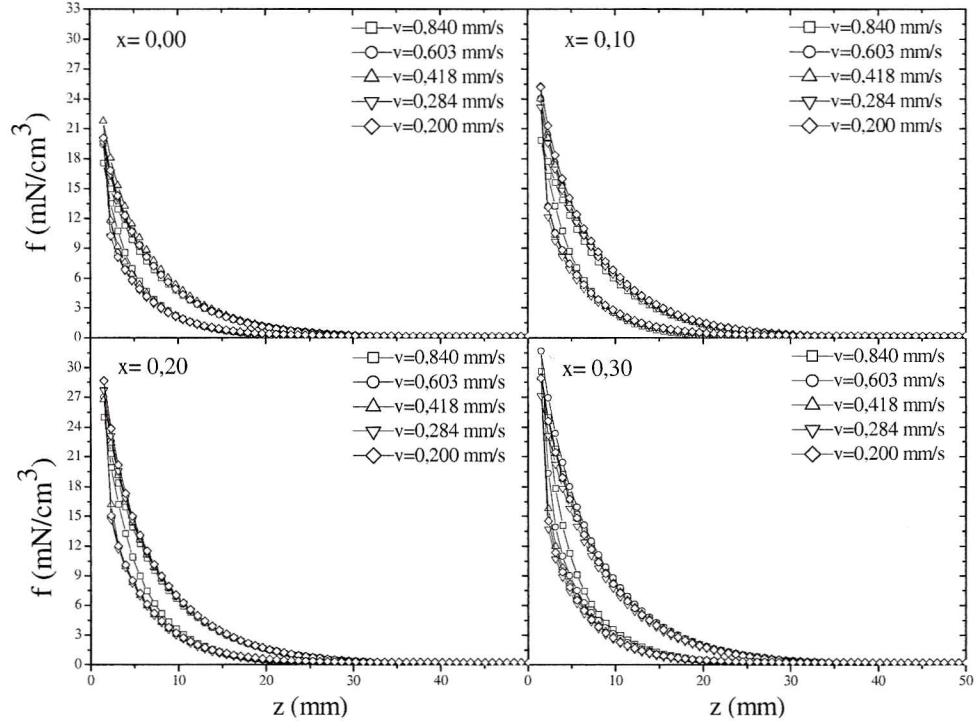
Kaldırma kuvveti ölçümleri bakıldığında çok küçük değerlerde de olsa belirgin bir çekici kuvvetin olduğu görülmektedir.

Öncelikle serideki örnekler 0,840 mm/s hızında 0,25 mm'lik adımlarla bekletilmeksizin 3 çevrim şeklinde magnete yaklaştırılıp uzaklaştırıldı. Çevrim sayısının değişmesi ile manyetik kaldırma kuvveti yoğunluğunda önemli bir değişiklik olmadığı, yani her devirden sonra örnek içine giren akı ile çıkan akının aynı olduğu, örnek içerisinde fazladan bir manyetik akının tuzaklanmadığı görüldü (Şekil 29). Ayrıca verilerden de görüldüğü gibi x katkı miktarı arttıkça manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu da artmaktadır.



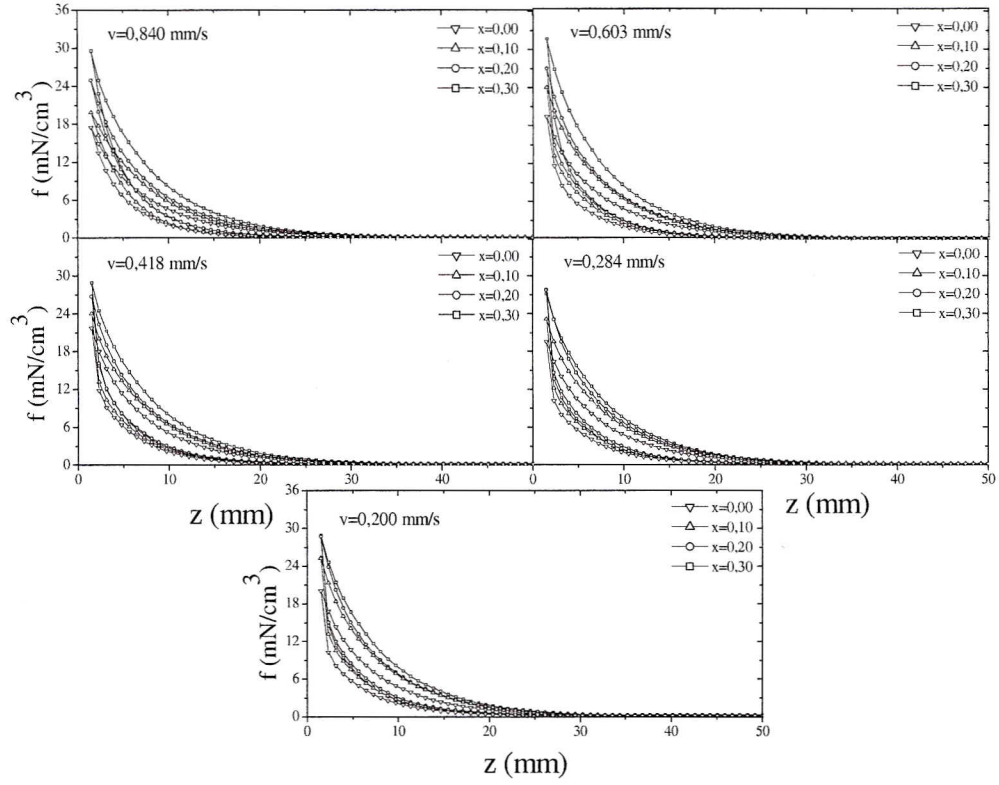
Şekil 29. Serideki örneklerin farklı çevrimlerdeki manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu ölçümleri

Serideki her bir örnek, magnete farklı hızlarda ( $v = 0,840; 0,603; 0,418; 0,284$  ve  $0,200$  mm/s) yaklaştırılıp uzaklaştırıldı ve örnek ile magnet arasındaki hızın manyetik kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendi. Şekil 30'dan da görüldüğü gibi bu çalışmadaki en yüksek hız değeri olan  $0,840$  mm/s'de süperiletken içinde tuzaklanan manyetik alan daha azdır. Örneğin hızı azaldıkça manyetik alanın örnek içine daha fazla girdiği ve örnek magnetten uzaklaşırken kuvvetin daha az olduğu düşünülmektedir. Genel olarak bakıldığında her katkı için magnetin hareket hızı arttıkça yaklaşma ve uzaklaşma durumlarında aynı mesafedeki kuvvet yoğunlukları farkında kısmen azalma olduğu görülmektedir.



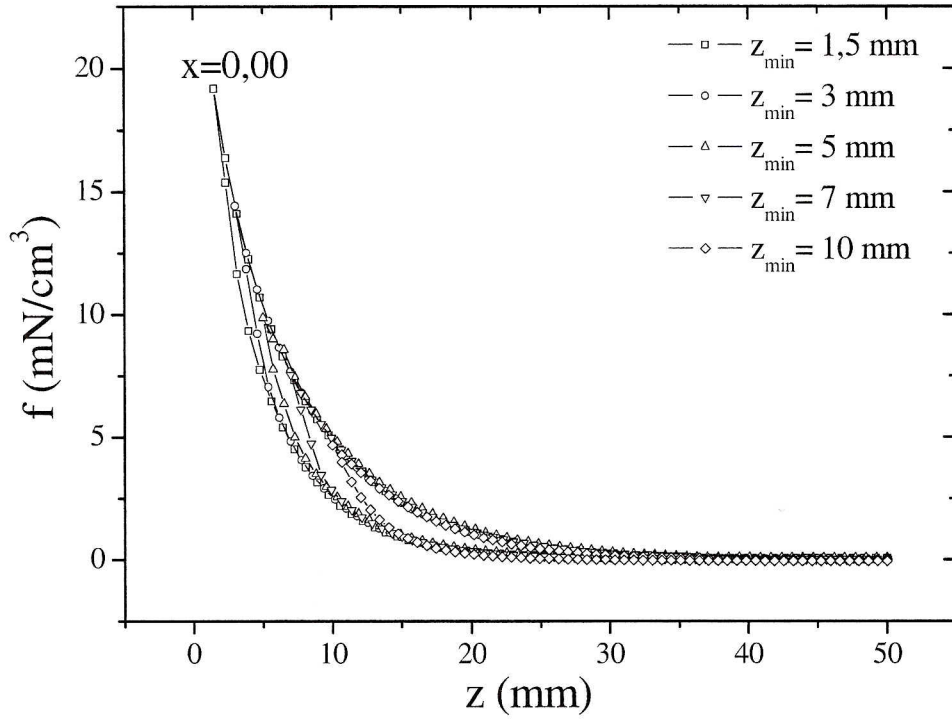
Şekil 30. Serideki örneklerin farklı hızlardaki manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu ölçümleri

Serideki örneklerin aynı hızlardaki manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları karşılaştırıldı. Şekil 31'de görüldüğü gibi, hız aynı iken  $x$  katkı miktarı artmasıyla manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu da artmaktadır.



Şekil 31. Serideki örneklerin aynı hızlardaki manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu ölçümleri

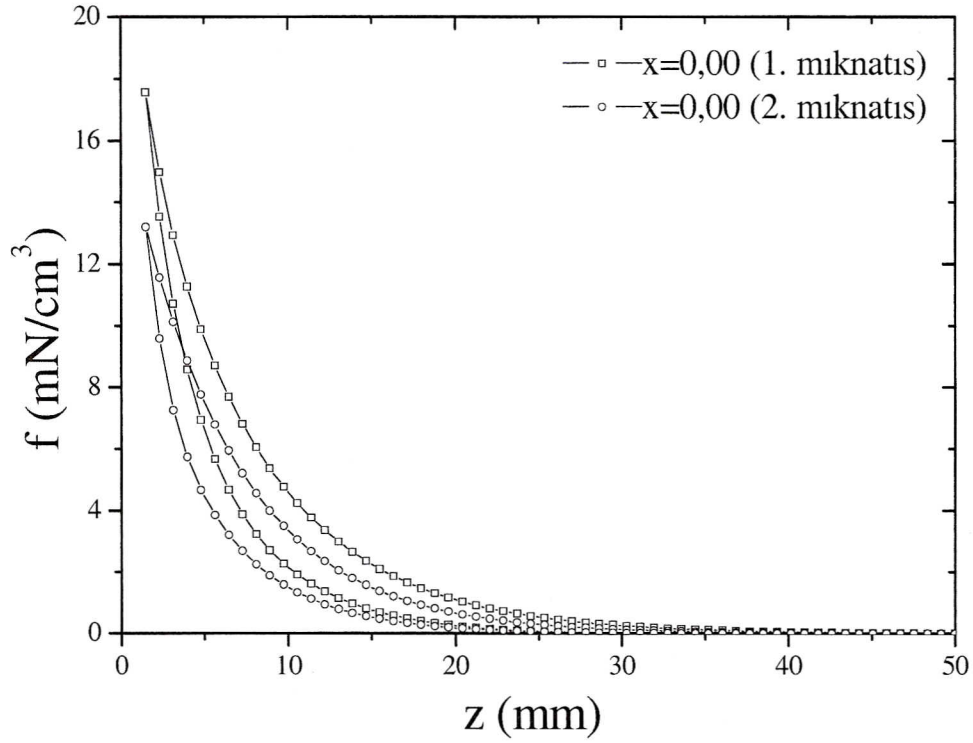
Serideki  $x = 0,00$  katkılı örnek için farklı  $z_{\min}$  değerlerindeki manyetik kaldırma kuvveti ölçüldü. Şekil 32’de görüldüğü gibi örnek magnete yaklaşırken ve uzaklaşırken manyetik kuvvet yoğunluğunun değişimi minimum yaklaştırma mesafesinden bağımsız bir şekilde her farklı  $z_{\min}$  değeri için aynı olup sadece  $z_{\min}$  civarında farklılık göstermektedir. Magnetin manyetik yüzey profiline bağlı olarak magnet ile örnek arasındaki mesafe azaldıkça örnek içerisine nüfuz eden manyetik alan artmakta, dolayısıyla içerde tuzaklanan alan da artmaktadır. Tuzaklanan akı merkezleri manyetik kaldırma kuvveti üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır.



Şekil 32.  $x = 0,00$  için farklı  $z_{\min}$  değerlerindeki manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları

Farklı geometrideki magnetlerin manyetik kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendi. Aynı hızlarda farklı magnetler kullanılarak manyetik kaldırma kuvveti ölçüldü. Şekil 33'de her iki magnetin de manyetik kaldırma kuvveti yoğunlukları karşılaştırmalı olarak verildi.

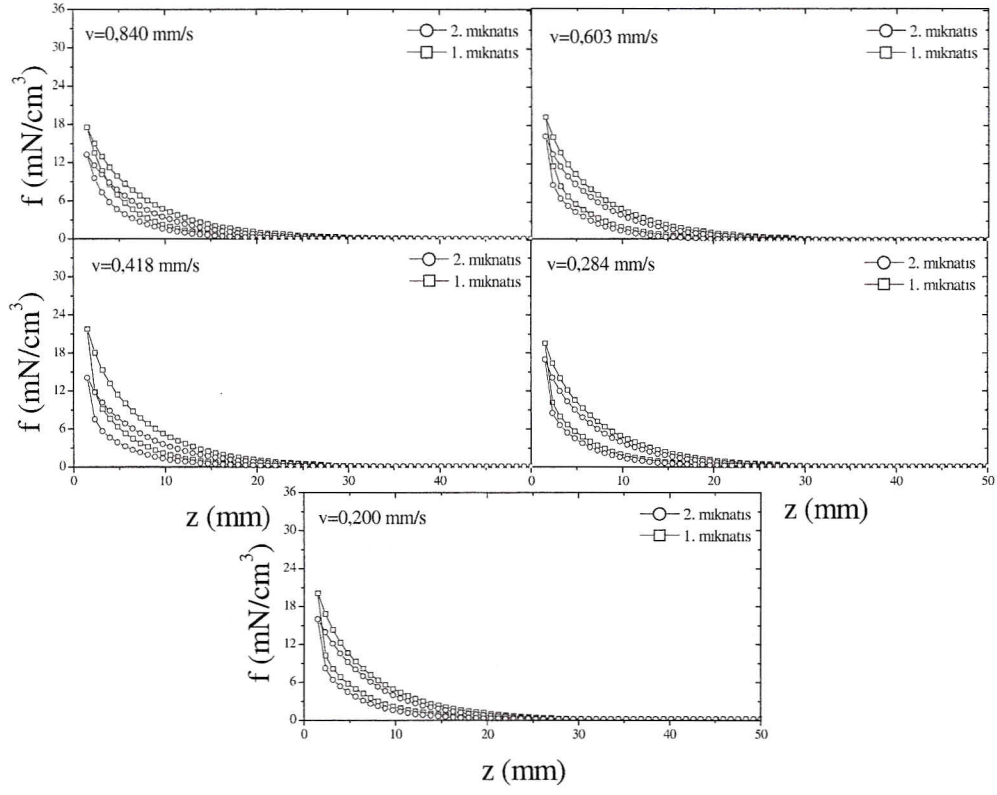




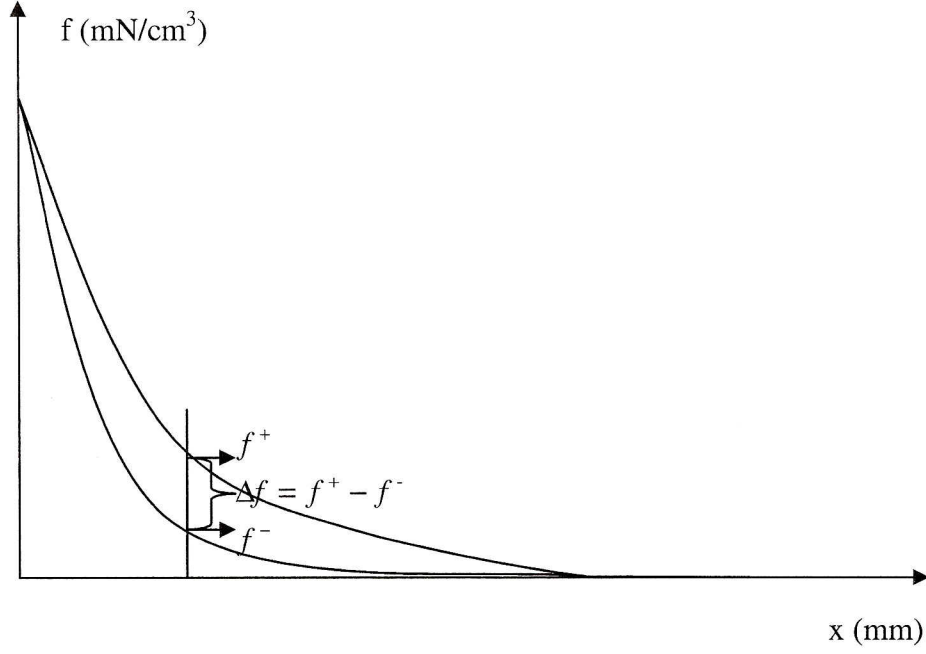
Şekil 33. Farklı magnetler kullanılarak elde edilen manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları

Ölçüm yapılan 1. mıknatıs 12 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde iken 2. mıknatıs 9 mm çapında ve 9 mm yüksekliğindedir. 1. mıknatıs daha büyük bir çapa ve daha küçük bir yüksekliğe sahip olduğundan dolayı manyetik alanın yatay bileşeni daha büyüktür. Ayrıca 1. mıknatısın manyetik yüzey profili incelendiğinde daha fazla yüzey manyetik alanına sahip olduğu da görülmektedir (Şekil 33). Bu nedenle 1. mıknatıs ile daha yüksek bir manyetik kaldırma kuvveti elde edildi.

Farklı magnetlerle yapılan manyetik kaldırma kuvvet ölçümleri bu kez örnek hızları değiştirilerek karşılaştırıldı (Şekil 34). Sonuç olarak, manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğuna hem örnek hızının hem de magnetin geometrisinin etkili olduğunu görüldü. Manyetik yüzey profili ve yüzey alanının genişliğinden dolayı 1. mıknatıs ile daha yüksek bir manyetik kaldırma kuvveti elde edildi. İki magnet ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, minimum mesafedeki kaldırma kuvvet yoğunlukları farkı, örnek hızı  $v = 0,418$  mm/s olduğunda en fazla olduğu görüldü.

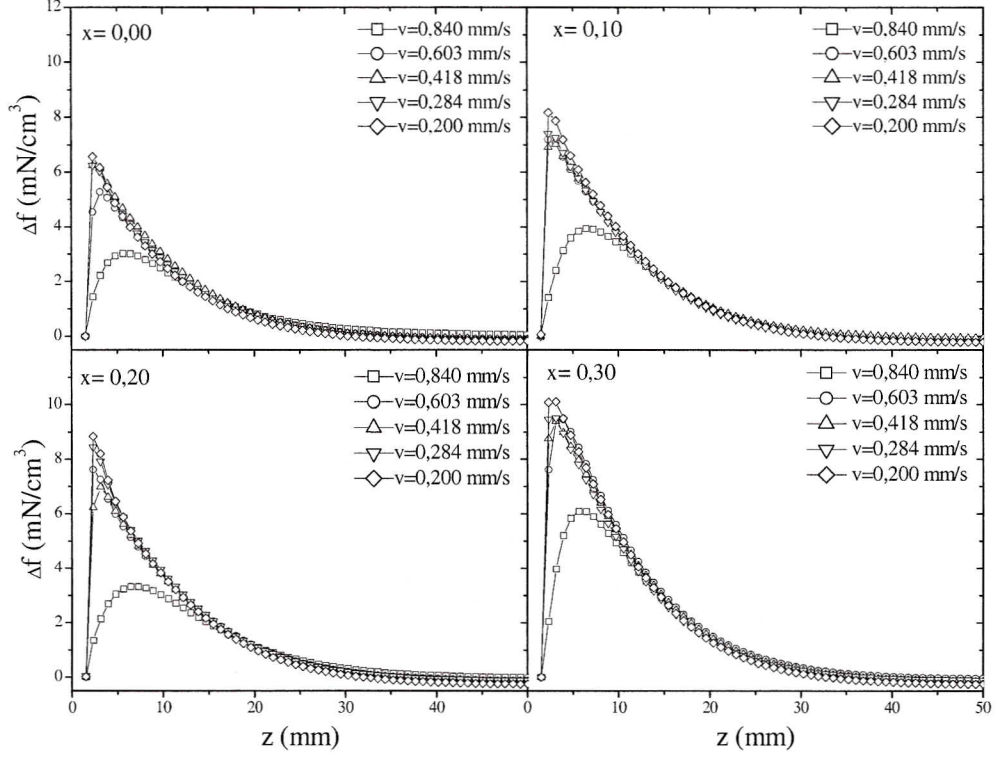


Şekil 34. Farklı magnet hızlarının farklı magnetlerin kaldırma kuvvetleri üzerindeki etkisi



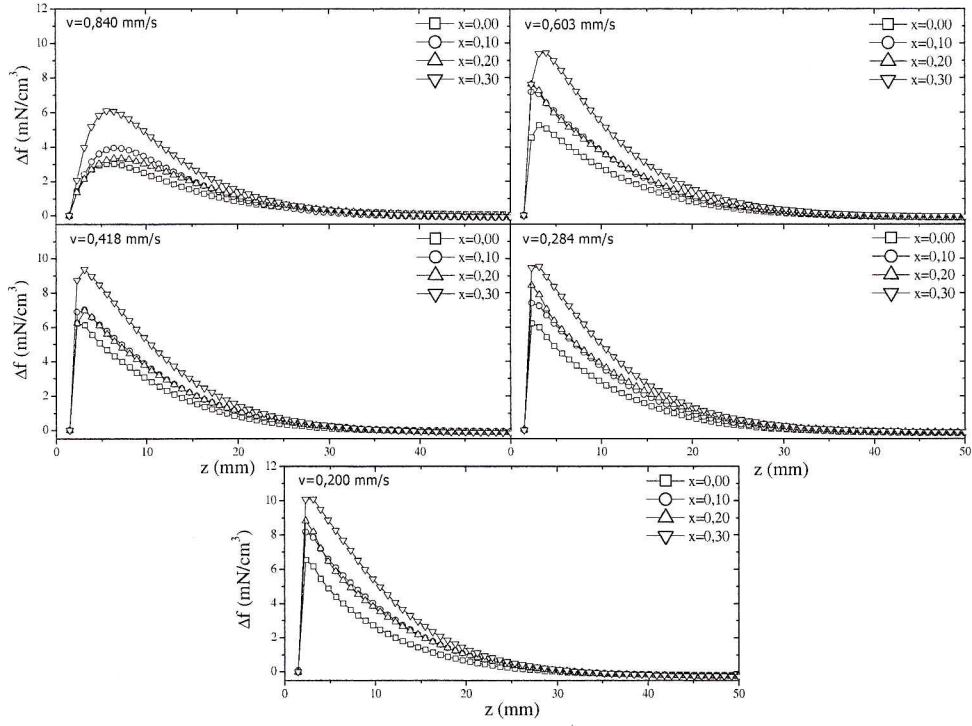
Şekil 35. Manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu farkı ( $\Delta f$ ) hesabının şematik gösterimi

Örneği magnete yaklaştırırken ve uzaklaştırırken oluşan kuvvet yoğunluklarını sırasıyla  $f^+$  ve  $f^-$  ile gösterirsek, aynı mesafedeki kuvvet yoğunlukları farkı da  $\Delta f = f^+ - f^-$  şeklinde tanımlayabiliriz.  $\Delta f$  genişliği ne kadar büyükse örnek içinde çivilenen akı o kadar fazla demektir. Buradan hareketle, her bir örneğin farklı şartlarda ölçülen kuvvet yoğunluklarından  $\Delta f$  değerleri hesaplandı ve konuma göre değişimleri aynı katkıda farklı hızlar (Şekil 36) için ve aynı hızda farklı katkılar (Şekil 37) için incelendi.



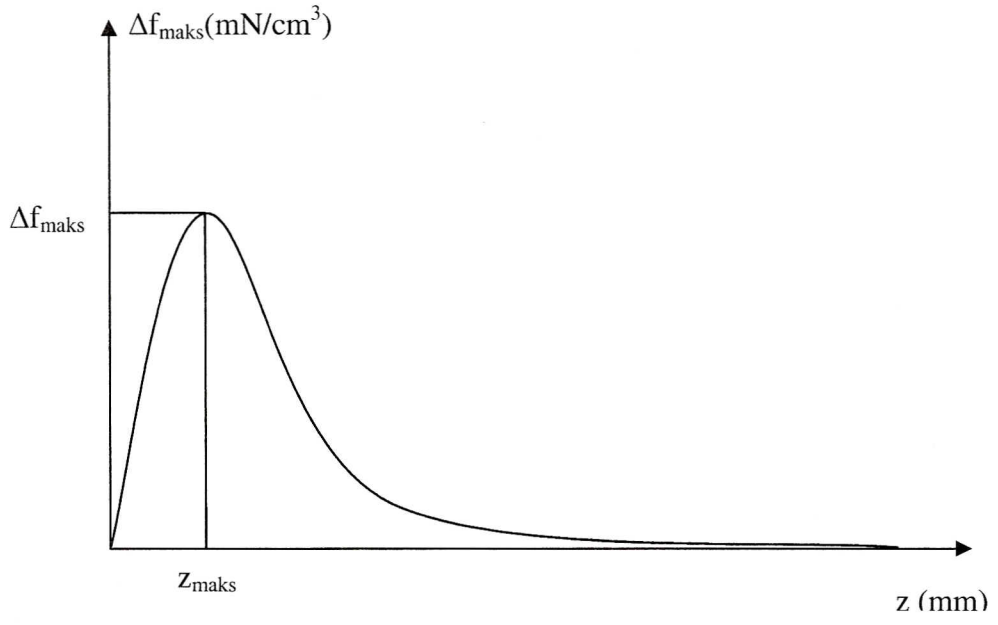
Şekil 36. Aynı katkıının farklı hızlar için  $\Delta f$ 'nin mesafeye göre değişimi

Şekil 36'dan görüldüğü gibi katkı miktarı arttıkça örneğin çivileme mekanizması da güçlenmekte ve malzeme içerisine daha çok manyetik alan tuzaklanmaktadır. Bu aynı zamanda katkı miktarının artışının manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğunun artmasına neden olduğunu göstermektedir.



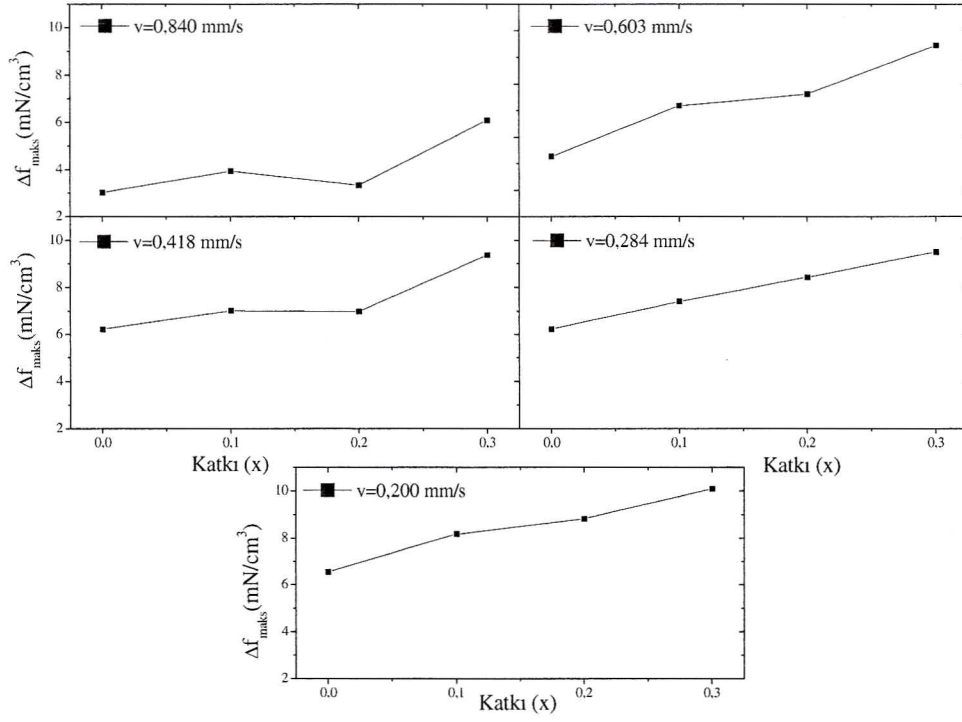
Şekil 37. Aynı hızlarda farklı katkılar için  $\Delta f$ 'nin mesafeye göre değişimi

Farklı hız değerlerindeki  $\Delta f$  değerlerini karşılaştırsak Şekil 37'ye göre örneğin hızı azaldıkça örnek içerisine giren manyetik alanın arttığı söylenebilir. Bunun nedeni, yapı içine manyetik alanın girmesi belirli bir zaman almaktadır ve örnek hızının en düşük olduğu durumda  $\Delta f$  değeri en yüksek olmaktadır.



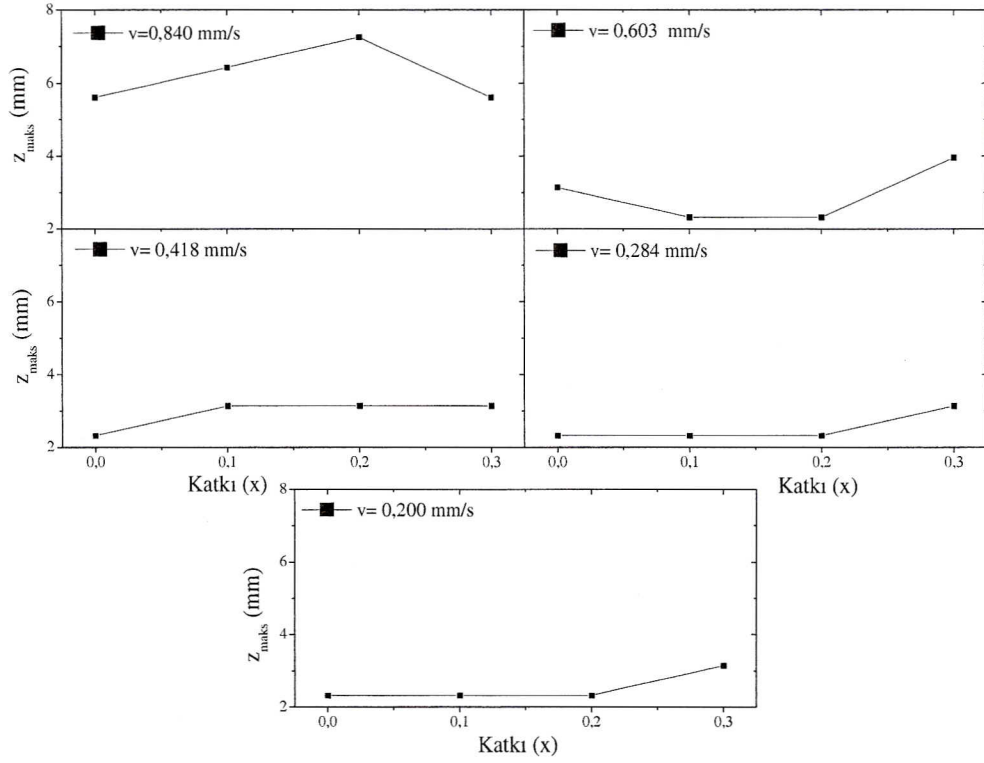
Şekil 38.  $\Delta f_{\text{maks}}$  ve  $z_{\text{maks}}$  değerlerinin şematik gösterimi

Çizilen  $\Delta f$ - $z$  grafiklerinden maksimum  $\Delta f$ 'ye karşılık gelen  $z$  değeri,  $z_{\text{maks}}$  değeri olarak adlandırılırsa her bir katkıya ait  $\Delta f_{\text{maks}}$  ve  $z_{\text{maks}}$  değerleri Şekil 38'deki gibi bulunur. Bu değerlerin katkıya göre ve örnek hızına göre grafikleri çizildi.



Şekil 39. Aynı hızda  $\Delta f_{maks}$ 'ın katkıya göre değişimi

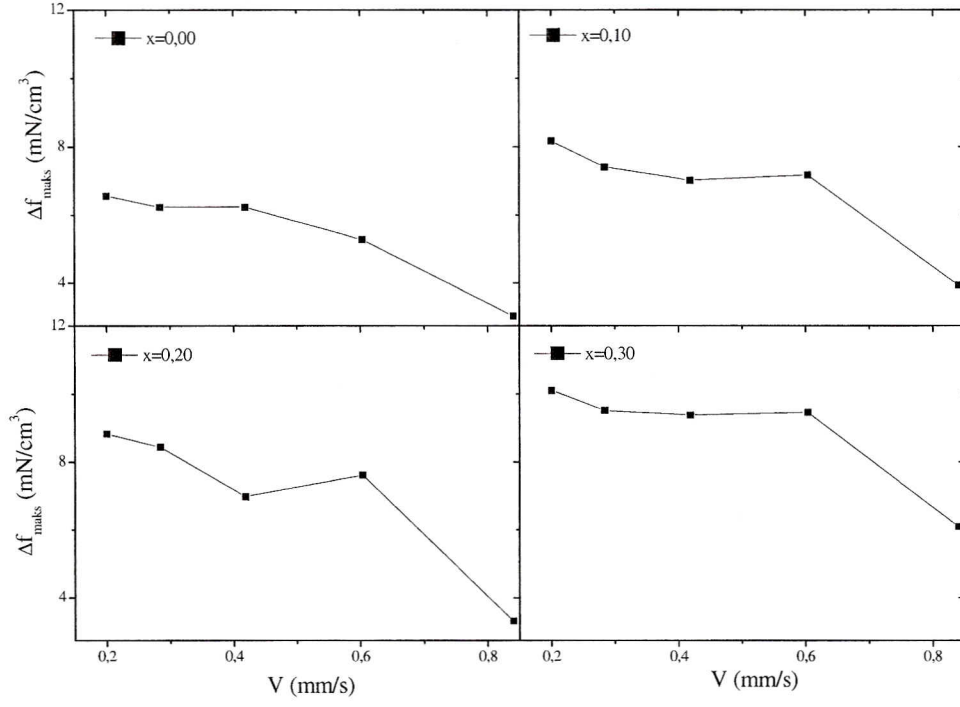
$\Delta f$ 'nin maksimum değerleri katkı miktarlarına göre incelendiğinde bütün hız değerleri için katkı miktarı arttıkça maksimum  $\Delta f$  değerinin de yaklaşık olarak doğrusal arttığı gözlenmektedir (Şekil 39). Doğrusal artış parametresi olan eğim,  $v = 0,603$  mm/s hızında birden artmaktadır. Diğer hız değerlerinde de katkı arttıkça ve hız azaldıkça  $\Delta f_{maks}$  değeri de doğrusal olarak artmaktadır.



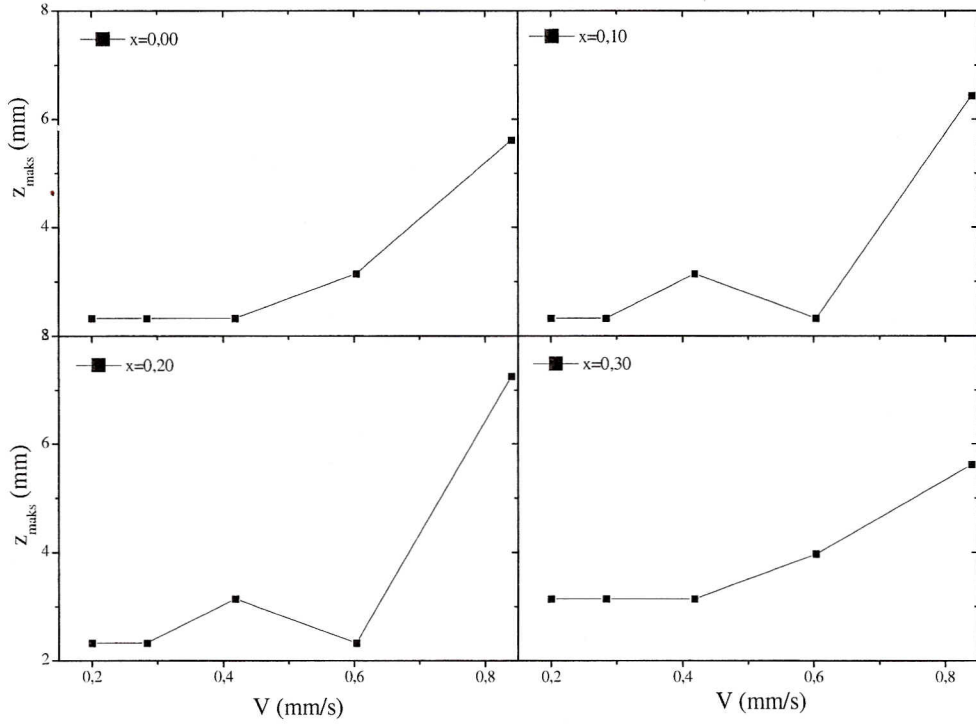
Şekil 40. Aynı hızda  $z_{maks}$ 'ın katkıya göre değişimi

Aynı hızlarda maksimum  $\Delta f$  değerine karşılık gelen  $z$  mesafesinin ( $z_{maks}$ ) katkıya göre değişimi Şekil 40'ta gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, örneklerin maksimum manyetik kaldırma kuvvet yoğunluk farklarının hıza göre değişimleri (Şekil 41) incelendiğinde, hız arttıkça  $\Delta f_{maks}$  değerinin azaldığı görüldü. Bu değişim örnekler arasında kıyaslandığında azalma yaklaşık olarak doğrusal olup eğim,  $x = 0,20$  katkılı örnekte büyük, diğer katkılarda ise hemen hemen aynıdır. Ayrıca, maksimum kuvvet yoğunlukları farkına ait  $z_{maks}$  değerinin hıza göre değişimi (Şekil 42) incelendiğinde, hız arttıkça  $z_{maks}$  değeri de eksponansiyel olarak artmaktadır.





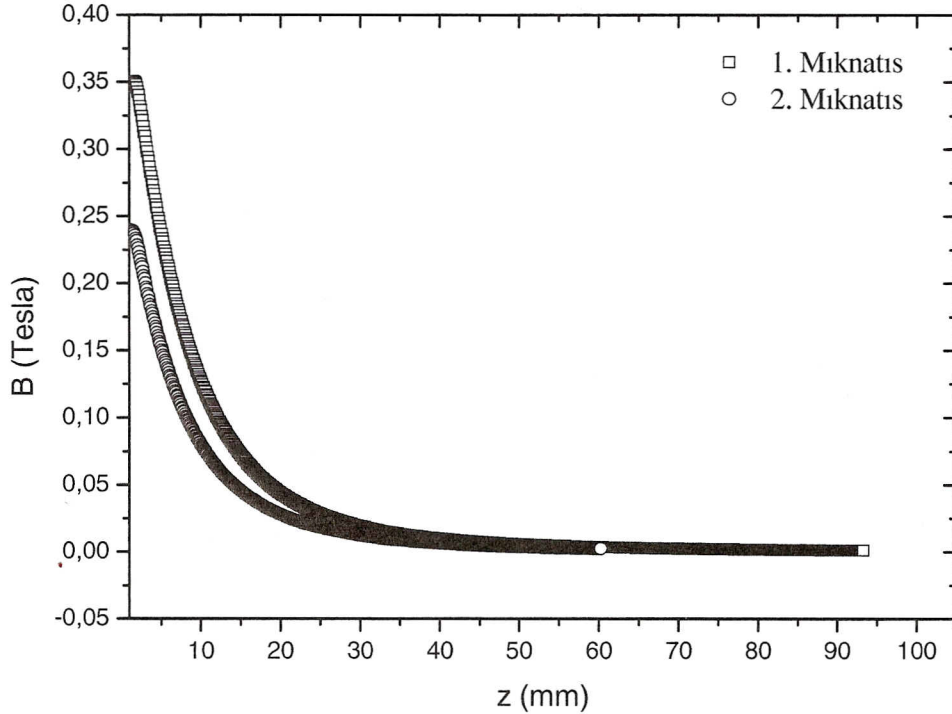
Şekil 41. Aynı katkıya ait  $\Delta f_{maks}$ 'ın örneğin hızına göre değişimi



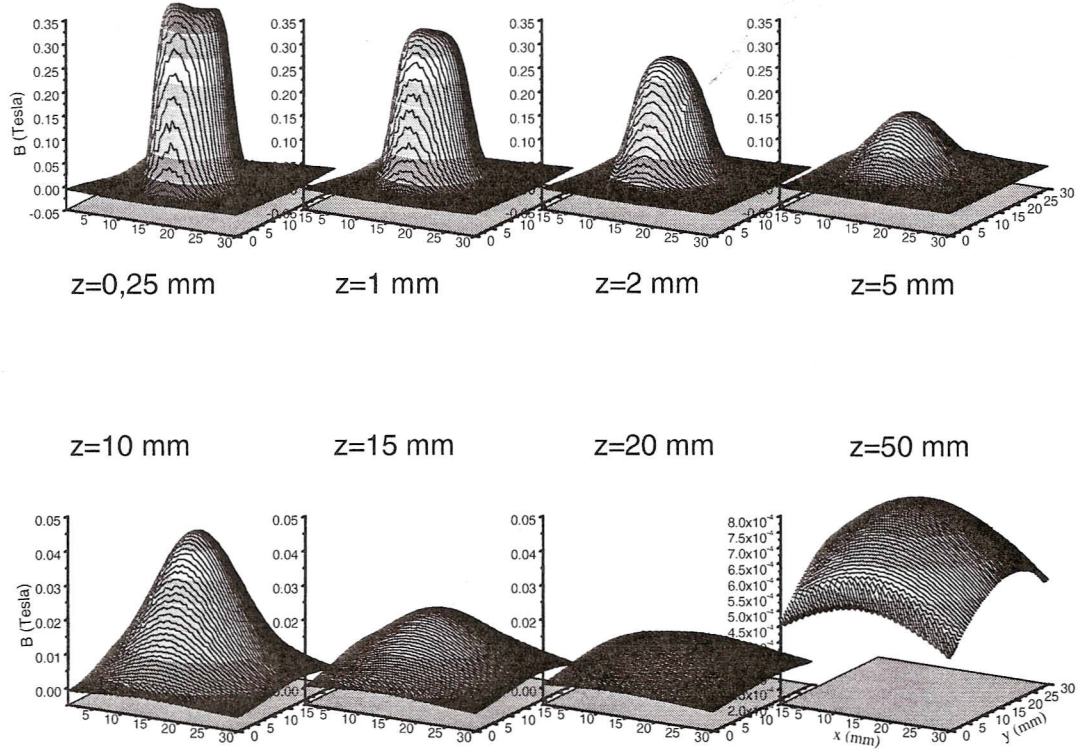
Şekil 42. Aynı katkının  $Z_{maks}$ 'ın hıza göre değişimi

### 3.5. Mıknatısın Yüzey Manyetik Profili Ölçüm Sonuçları

Ölçüm yapılan 1. mıknatıs 12 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde ve 2. mıknatıs 9 mm çapında ve 9 mm yüksekliğindedir. Mıknatısların yüzey merkezlerindeki manyetik alan ölçümlerinin farklı z mesafelerine göre değişimi Şekil 43'de gösterilmektedir.  $z = 0,25$  mm'lik bir mesafede 1. mıknatısın yüzey manyetik alan değeri yaklaşık olarak 0,35 Tesla ve 2. mıknatısın yüzey manyetik alan değeri 0,25 Tesla'dır. 1. mıknatıs, 2. mıknatıstan daha büyük bir çapa sahip olduğundan yakın mesafelerde manyetik alanın dikey yönde bileşeni diğerine göre daha büyüktür.

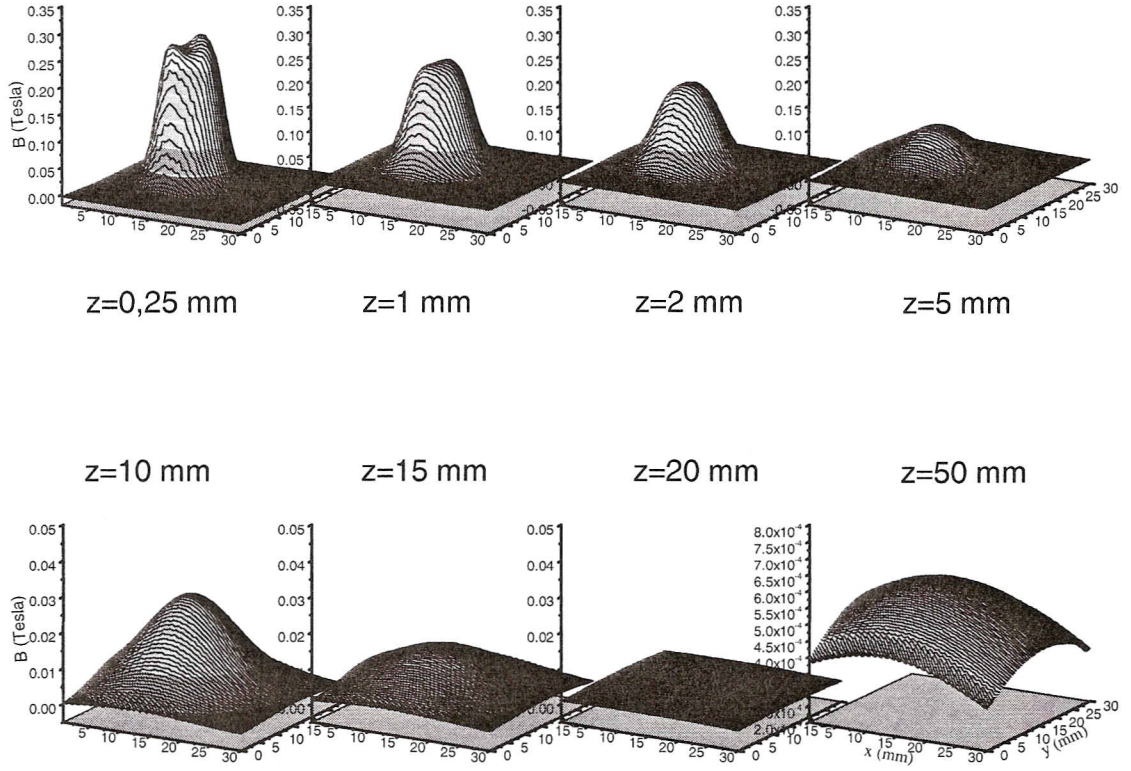


Şekil 43. 1. ve 2. mıknatısların yüzey merkezinden olan mesafeye göre eksenel yönde manyetik alanın değişimi



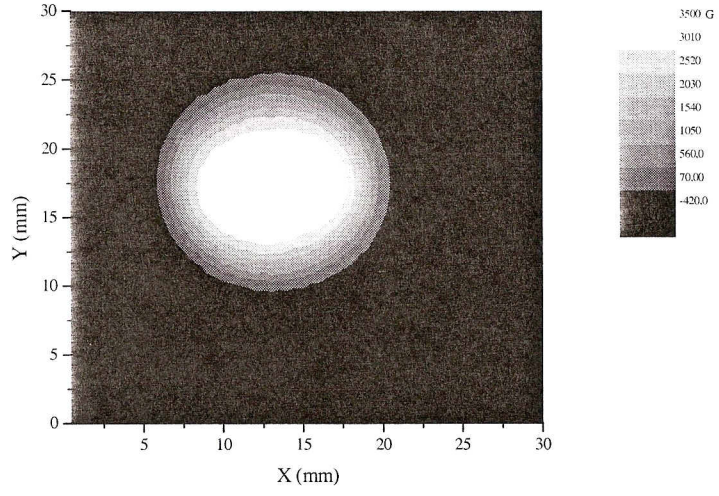
Şekil 44. 1. Mıknatısın yüzeyden farklı yüksekliklerdeki manyetik alanın eksensel yöndeki bileşenin yatay düzleme göre değişimleri

1. ve 2. mıknatısların yüzey profillerinin  $x = y = 0$  konumuna göre farklı yüksekliklerde simetrik olduğu sırasıyla Şekil 44 ve Şekil 45’de görülmektedir. Bu da silindirik geometriye sahip olmalarının yanı sıra mıknatısların içindeki manyetik momentlerin her yerde aynı yönde homojen dağıldığını ve dolayısıyla manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinde kullanılabilir özellikte olduğunu göstermektedir. Öte yandan mıknatısın manyetik alanının yatay bileşenlerinin de simetrik olduğunu göstermektedir.

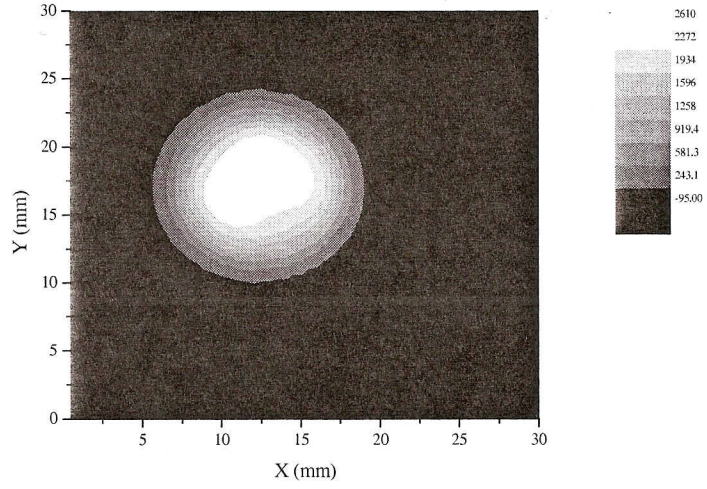


Şekil 45. 2. Mıknatısın yüzeyden farklı yüksekliklerdeki manyetik alanın eksensel yöndeki bileşeninin yatay düzleme göre değişimleri

1. ve 2. mıknatısın yüzeylerinden  $z = 0,25$  mm yükseklikteki manyetik alan profillerinin görüntüleri sırasıyla Şekil 46 ve Şekil 47’de verilmektedir. Simetrisinin mevcut olduğu bu grafiklerden daha net görülmektedir.



Şekil 46. 1. mıknatısın  $z=0,25\text{mm}$ 'de manyetik yüzey profilinin gölge grafiği (Gauss biriminde)



Şekil 47. 2. mıknatısın  $z=0,25\text{mm}$ 'de manyetik yüzey profilinin gölge grafiği (Gauss biriminde)

#### 4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, katıhal tepkime yöntemiyle hazırlanan külçe  $(Sm123)_{1-x}(Nd123)_x$  süperiletkenlerinin yapısındaki x katkı miktarının manyetik kaldırma kuvveti üzerine etkisi incelendi.

Farklı katkı oranlarında ( $x = 0,00; 0,10; 0,20$  ve  $0,30$ ) külçe  $(Sm123)_{1-x}(Nd123)_x$  süperiletken malzemelerin yapısal özellikleri x-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak; fiziksel özellikleri düşük sıcaklık (4-120 K) direnç (R-T) ölçümleriyle ve manyetik özellikleri ise kaldırma kuvveti ölçüm sistemi ile ölçüldü. Buna bağlı olarak örneklerin manyetik kaldırma kuvvet yoğunlukları hesaplandı ve direnç değerleri normalize edildi. İncelemelere göre aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

1) X-ışını kırınım desenlerinden, serideki örneklerde 123 yapısına ait pikler görülmektedir. Kristal yapıdaki Nd atomları arttıkça birim hücre hacminin (V) azaldığı görülmektedir. Örneğin sinterleme sıcaklığında ( $940^{\circ}C$ ) yapıdaki Sm123 eriyik halde ve Nd123 ise katı halde bulunmaktadır. Bu durumda katılaşma Nd123 yapısından başlayacağından süperiletken örneğin örgü parametrelerinin Nd123 yapısının örgü parametrelerine yakın olması beklenir.

2) 4–120 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilen R-T ölçüm sonuçlarına göre bütün örneklerin kritik geçiş sıcaklıklarının  $\sim 94$  K olduğu görülmektedir. Buna göre bütün direnç değerleri 94 K'deki direnç değerine göre normalize edildi. Literatürdeki çalışmalara göre ise Sm123'ün kritik geçiş sıcaklığı 91 K (Öztürk, 2009) ve Nd123'ün kritik geçiş sıcaklığı 94 K (Higuchi, 1996) olduğu görülmektedir. Örneklerin hemen hemen tümünde çok az da olsa yarıiletken faz mevcut olup,  $x=0,30$  katkı oranına sahip örneğin içinde yarıiletken faz diğerlerine göre daha fazladır. Bu nedenle kritik geçiş sıcaklık aralığı en fazla olan  $x = 0,30$  katkılı örnektir. Bu çalışmadaki üretim şartlarına göre en az geçiş sıcaklık aralığına sahip katkı  $x = 0,12$  ve  $\Delta T_c = 11,28$  K'e karşılık gelmektedir. Bu geçiş sıcaklık aralığının 11,28 K gibi yüksek bir değere sahip olmasının nedeni ise sinterleme sıcaklığının, yapıda eriyik fazda bulunan Sm123'ün dışarı akmasını engelleyecek kadar düşük seçilmesidir.

3) Manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinden elde edilen sonuçlar:

a) Süperiletken örneklerdeki x katkı miktarı arttıkça manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu da artmaktadır. Yapıdaki Nd123 miktarı akı çivileme merkezleri olarak görev

yapmakta ve taneler arasındaki etkileşimi artırmaktadır. Ayrıca katkı miktarı ile birlikte örnek içerisinde tuzaklanan akı miktarı da artmaktadır. Yapılan bu çalışmada serideki  $x=0,30$  katkılı örnek en yüksek kaldırma kuvvet yoğunluğuna sahiptir.

b) Süperiletken örnek ile mıknatıs arasındaki hızın kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde ise örneğin hızı arttıkça ölçülen kaldırma kuvvet yoğunluğunun azaldığı görülür. Yani, yüksek hızlarda örnek içerisine giren manyetik alanın tuzaklanması için gerekli dengeleme süresi sağlanamamaktadır.  $v = 0,840; 0,603; 0,418; 0,284$  ve  $0,200$  mm/s hızlarında yapılan ölçümlerde en yüksek kaldırma kuvvet yoğunluğuna  $0,200$  mm/s değerinde ulaşıldı.

c) Süperiletken örnek ile mıknatıs arasındaki minimum mesafe değiştirilerek yapılan manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerine göre örnek ile mıknatıs arasındaki minimum mesafe azaldıkça manyetik kaldırma kuvvetinin de arttığı gözlemlendi. Yakın mesafelerde mıknatısın yüzey manyetik alan çizgilerinin örnek üzerinde daha etkili olduğu ve örnek içerisine daha çok manyetik alanın girdiği söylenebilir.

d) Farklı manyetik alan dağılımlarında manyetik kaldırma kuvvetinin nasıl değiştiğini gözlemek için iki farklı mıknatıs kullanarak kaldırma kuvveti ölçümlerini gerçekleştirildi. Mıknatıslardan birinin yüzeyindeki manyetik alan değeri yaklaşık olarak  $0,35$  Tesla iken diğerinin yüzeyindeki manyetik alan değeri ise  $0,25$  Tesla civarındadır. Manyetik kaldırma kuvvetinin kaynağı manyetik alan olduğundan ve daha yüksek bir manyetik alanda daha büyük bir manyetik kaldırma kuvveti elde edileceğinden ilk mıknatıs olan  $0,35$  Tesla'ya sahip mıknatısla yapılan ölçümlerde daha büyük bir manyetik alan ölçüldü.

e) Süperiletken örnek mıknatısa yaklaştırılıp uzaklaştırılırken oluşan kuvvet değerleri arasındaki fark olan  $\Delta f$ , malzeme içerisinde tuzaklanmış olan akı miktarı hakkında bilgi vermektedir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre  $x = 0,30$  katkılı örneğin  $\Delta f$  değerinin en yüksek olduğu, en fazla akının bu katkıda tuzaklandığı görülmektedir. Bu durum, en yüksek kaldırma kuvvet yoğunluğunun bu örnekte gözlenmesi sonucunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak katıhal tepkime yöntemi ile üretilen  $(Sm123)_{1-x}(Nd123)_x$  serisinde  $x=0,30$  katkılı örnekte minimum mesafede yaklaşık olarak  $f = 35$  mN/cm<sup>3</sup> kadar bir maksimum manyetik kaldırma kuvvet yoğunluğu ölçüldü. Ayrıca bu çalışma ile Nd123 katkısının süperiletken yapı içerisindeki akı çivileme merkezlerini güçlendirdiğini, sinterleme sıcaklığı civarında eriyik fazda bulunan Sm123 yapısının malzemeden akıp gitmesini engellediğini söyleyebiliriz. Bunun yanı sıra örnek ile mıknatıs arasındaki hız

değerinin de manyetik kaldırma kuvvetini etkilediğini ve yapılan bu çalışmada en düşük hız değeri olan 0,200 mm/s'de en yüksek manyetik kaldırma kuvveti ölçüldüğü görülmektedir.



## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın devamı olarak,  $(\text{Sm}123)_{1-x}(\text{Nd}123)_x$  süperiletken serisi, Eritme–Toz–Eritme–Büyütme (MPMG) veya Üstten Tohumlamalı Eritme–Büyütme (TSMG) yöntemi gibi tek kristal elde edebileceğimiz yöntemler kullanılarak üretilebilir ve dolayısıyla taneler arası etkileşimin yüksek olduğu örnekler oluşturulabilir. Üretilecek olan bu örneklerin manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri farklı sıcaklıklarda da yapılarak kaldırma kuvveti üzerine sıcaklığın da etkisi incelenebilir.

## KAYNAKLAR

Abrikosov, A., A., 1957. On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group. Sov. Phys. JETP, 32, 1442-1452.

Asada, Y., Maeda, H., Ogava, K., 1988. Magnetic Properties of  $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$  Superconductors. Jpn. J. Appl. Phys., 27 L665.

Aslan, F., 2005. Sol-Jel Methodu ile  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Süperiletken Elde Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Aydiner, A., 2006, Tek Kristal Süperiletkenlerde Tuzaklanan Manyetik Alanın Hesaplanması. Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Balachandran, U., Zhong W., Youngdahl, C., A., Poeppel, R., B., 1993. Microstructure and associated properties of YBCO superconductors prepared by melt-processing techniques. Journal of Electronic Materials, 22, 10, 1285-1288.

Bardeen, J., Cooper; L., N., Schrieffer, J., R., 1957. Theory of Superconductivity. Physical Review, 108, 5, 1175-1204.

Bean, C., P., 1962. Magnetization of Hard Superconductors. Phys. Rev. Lett., 8, 6, 250-253.

Bednorz, J., G., and Müller, K., A., 1986. Possible High  $T_c$  Superconductivity in the La-Ba-Cu-O System, Z. Phys. B-Condensed Matter, 64, 189-193.

Çelik, Ş., 2006.  $(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_{x/2}\text{Gd}_{x/2})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ve  $(\text{Yb}_{1-x}\text{Gd}_x)\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Süperiletkenlerinin Yapısal ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Çelik, Ş., Öztürk, K., 2009. Semiempirical equation of the levitation-force density for  $(\text{Sm}_{123})_{1-x}(\text{Yb}_{123})_x$  superconducting samples. Phys. Status Solidi A, 4, 724-730.22, 23, 24, 43, 64

Donglu, S., Qu, D., Tent, B., A., 1997. Effect of oxygenation on levitation force in seeded melt grown single-domain  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ . Physica C, 291, 181-187.

Ginsberg, D., M., 1994. Physical Properties of High Temperature Superconductors. IV. World Scientific, Singapore.

Ginzburg, V., L., and Kirzhnits, D., A., 1982. High Temperature Superconductivity, New York and London.

Görür, O., 2001.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Süperiletken İnce Filmlerin Üretimi, Bazı Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Higuchi, T., Yoo, S., I., Sawada, N., Sakai, N., Murakami, M., 1996. Critical current of OCMG processed Nd123 crystals. Physica C, 263, 1-4, 396-400.

Kaiser, A., W., HEnnig, W., Bornemann, H., J., 1998. Properties of melt textured Sm/Nd-Ba-Cu composites. Physica C, 299, 185-190.

Kılıç, S., 2008. Yüksek Geçiş Sıcaklıklı Süperiletkenlerde Kritik Durum Modellerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Kim, C., J., Hong, G., W., Oh, H., J., 2001. Multi-seeded melt growth processed YBCO superconductors. Physica C, 357-360, 635-641.

Lin, C., T., Liang, B., Chen, H., C., 2002. Top-seeded solution growth of Ca-doped YBCO single crystals. Journal of Crystal Growth, 237-239, 778-782.

Meissner, W., and Ochsenfeld, R., 1933. Superconductivity, Nature, 132, 931-935.

Murakami, M., 1992a. Flux Pinning of Melt Processed YBCO Superconductors and Their Applications in Studies of High Temperature Superconductors, Volume 9, Nova Sci. Pub., New York.

Murakami, M., 1994. Melt-Processing of High Temperature Superconductors. Prog. Mater. Sci., 38, 311-357.

Müller, P., Ustinov, A., V., Schmidt, V., V., 1997. The Physics of Superconductors-Introduction to Fundamentals and Applications. Springer, Germany, p. 1-115.

Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y., Akimitsu, J., 2001. Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride. Nature, 410, 6824, 63-64.

Onnes, H., K., 1911. Superconductivity and Magnetism, Comm. Phys. Lab. Univ., Leiden.

Özkurt, B., 2007. Nd ve Gd Katkılı BSCCO Cam Seramik Süperiletken Sisteminin Fiziksel ve İletim Özellikleri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Öztürk, K., Çelik, Ş., Cansız, A., 2009. Determination of levitation force and pinning properties of  $(\text{Sm}_{123})_{1-x}(\text{Yb}_{211})_x$  bulk superconductor depending on Yb211 doping ratio. Phys. Status Solidi A, 206, 11, 2569-2575.

Poole, C., P., 2000. Handbook of Superconductivity. Academic Press, San Diego.

Qin, M., J., Kaiser, A., W., Bornemann, H., J., 1999. Study of magnetic properties of melt textured  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  with Pt, Ce and Ag dopants. Physica C, 311, 280-286.

Schmidt, V., V., Müller, P., and Ustinov, A., V., 1997. The Physics of Superconductors-Introduction to Fundamentals and Applications, Springer, Germany, 206s.

Seeber, B., 1998. Handbook of Applied Superconductivity, Volume 1, Genova Uni. IOP Publishing, Bristol.

Todt, V., R., Sengupta, S., Shi, D., Sahm, P., R., Mcginn, P., J., Poeppel, R., B., Hull, J., R., 1994. Processing of large  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  domains for levitation applications by a  $\text{Nd}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_y$  seeded melt-growth technique. Journal of Electronic Materials, 23,11,1127-1130.

Vennila, R., S., Jaya, N., V., Natarajan, S., 2005. High-pressure and high-temperature electrical resistivity studies on Nd-123. Materials Letters, 59, 14-15, 1764-1766.

Wang, J., S., Wang, S., Y., Ren, Z., Y., Jiang, H., Zhu, M., Wang, X., R., Shen, X., M. and Song, H., H., 2003. Experiment results of high temperature superconducting Maglev vehicle. Physica C, 386, 431-437.

Wu, M., K., Ashburn, J., R., Torng, C., J., 1987. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. Phys. Rev. Lett., 58, 908-910.

Yamachi, N., Nishikawa, T., Sakai, N., Sawa, K. and Murakami, M., 2003. Levitation forces of bulk superconductors in varying field. Physica C, 392-396, 579-584.

Yan, M., F., Barns, R., L., O'Bryan, H., M., Jr., Gallagher, P., K., Sherwood, R., C., Jin, S., 1987. Water Interaction with the Superconducting  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  Phase. App. Phys. Lett., 51(7), 532-534.

Yang, W., M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P., X., Chen, S., Wu, M., Z., Zhang, C., P., Wang, F., Y., Du, Z., H., Wang, J., R., Yu, Z., M., Wu, X., Z., Gawalek and W., Gornert, P., 1998. The grain-alignment and its effect on the levitation force of melt processed YBCO single-domained bulk superconductors. Physica C, 307, 271-276.

Yang, W., M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P., X., Nicolsky, R. and de Andrade Jr, R., 2003. The characterization of levitation force and attractive force of single-domain YBCO bulk under different field cooling process. Physica C, 398, 141-146.

Yang, W., M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P., X., Wang, J., R., Zhang, C., P., Yu, Z., M., Tang, X., D. and Wei, W., 2001. The effect of magnet configurations on the levitation force of melt processed YBCO bulk superconductors. Physica C, 354, 5-12.

Yang, W., M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P., X., Zhang, C., P., Yu, Z., M. and Tang, X., D., 2002. The relationship of levitation force between single and multiple YBCO bulk superconductors. Physica C, 371, 219-223.

Yılmazlar, M., Nezir, S., Investigation of Physical and Structural Properties of Cesium Doped Yttrium-based Superconductors, ICSM, 2008. Antalya.

Zan, R., 2006.  $\text{Bi}_{2-x}\text{Tb}_x\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$  Süperiletken Malzemesine Tb Katkısının Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Rize’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Çayeli’nde, lise öğrenimini ise Rize’de tamamladı. 2003 yılında K.T.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü kazanarak İngilizce hazırlık sınıfına kaydoldu ve 2008 yılında Fizik bölümünden bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Aynı yıl Rize Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda tezli yüksek lisansa başladı ve halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2009 Eylül ayında Erasmus programı çerçevesinde gittiği Almanya-Berlin’deki Freie University’de 5 ay STM laboratuvarındaki çalışmalara katıldı.