

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**SÜPERİLETKEN HATALI AKIM SINIRLAYICI (SHAS) TASARIMI,
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Ercan ERTEKİN

FİZİK ANABİLİM DALI

**ANKARA
2016**

Her hakkı saklıdır.

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

27.07.2016

Ercan ERTEKİN

ÖZET

Doktora Tezi

SÜPERİLETKEN HATALI AKIM SINIRLAYICI (SHAS) TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Ercan ERTEKİN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali GENCER

Bu tezde süperiletken hatalı akım sınırlayıcı (SHAS) uygulamalarında kullanılmak üzere MgB_2 ve YBCO yığın numuneler üretilmiştir. MgB_2 üretimi esnasında katı hal reaksiyon yöntemiyle beraber, yüksek basınç ve sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. YBCO üretiminde ise; katı hal reaksiyon ve eritme yöntemleriyle birlikte yüksek basınç altında presleme işlemi yapılmıştır. Üretilen numunelerin kristal yapı özellikleri; X-ışını toz kırınımı yöntemiyle (XRD), manyetik özellikleri ise; AA alınganlık ve manyetik kaldırma kuvveti sistemleriyle belirlenmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri ise, Vickers Mikro sertlik ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon çalışmalarına ek olarak 3 ayrı tipte SHAS üretimi gerçekleştirilmiş ve kısa devre testleri tamamlanmıştır. Üretilen SHAS'lar 6 kVA 3-fazlı manyetik akı transferi tipinde, 6 kVA 3-fazlı rezistif tipte ve tek fazlı indüktif tiptedir. SHAS tasarımı aşamasında COMSOL programı yardımıyla birincil ve ikincil nüveler arasındaki enerji transferinin yaklaşık %100 oranında gerçekleştiği simülasyon çalışmalarıyla gösterilmiştir. Birincil ve ikincil nüvelerin çiftlenimi için süperiletken halkanın fiziği esas alınarak akı transferinin gerçekleştiği, süperiletken durumun normal duruma geçişi ile birlikte enerji transferinin önemli ölçüde sınırlandırılması ile birlikte ikincil bobine bağlı elektrik yükünde gerilim düşmesi deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bu özellik, üretilen manyetik akı transferi tipindeki trafonun SHAS olarak kullanılmasına imkân vermektedir. Üretimi gerçekleştirilen trafoların suni bir kısa devre oluşturulduğu durumda, hem birincil hem de ikincil sarımlardaki akım-gerilim dalga şekillenimleri zamanın fonksiyonu olarak PicoScope üzerinde kaydedilmiştir. Suni kısa devre anında ani yükselme eğiliminde olan akımın birkaç periyot içerisinde sınırlandırıldığı deneysel olarak gözlemlenmiş ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen trafonun SHAS olarak kullanılması halinde geleneksel olarak süperiletken sarımlı trafolarla mukayese edilmiş ve önerilen sistemin avantaj ve dezavantajları ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Böyle bir sistemin geleneksel devre kesicilerle birlikte kullanılmasıyla ikincil devrede akım ve gerilim sarım sayısına bağlı olarak belli bir değerde tutulmasının, devre kesicilerin kullanım ömrünü uzatması bakımından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Temmuz 2016, 116 sayfa

Anahtar Kelimeler: MgB_2 , YBCO, süperiletken hatalı akım sınırlayıcı, manyetik akı transferi

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN, FABRICATION AND CHARACTERISATION OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER (SFCL)

Ercan ERTEKIN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ali GENCER

In this thesis, MgB_2 and YBCO bulk samples were produced for application of superconducting fault current limiter (SFCL). Solid state reaction method with high pressure and hot press processes used for MgB_2 production. Solid state reaction and melt-textured methods with high pressure process used for YBCO production. Crystal microstructure characteristics of bulk samples determined by X-Ray diffraction (XRD) method, the magnetic properties of the samples have been investigated by AC susceptibility and magnetic levitation force systems. Vickers Micro hardness measurements were performed to characterize the mechanical properties of the samples. In addition to characterization studies, 3 different types of SFCL production and their short circuit tests were completed. 6 kVA 3-phases magnetic flux transfer type, 6 kVA 3-phases resistive type and a 1-phase inductive type SFCLs were produced. At the simulation studies, about 100% energy transfer between primary and secondary iron cores was shown with COMSOL software. For the coupling of the primary and the secondary iron cores based on the physics of the superconducting ring via the magnetic flux transfer has taken place and the limitation of the energy transfer with the voltage drop in the electrical load connected to the secondary coil with the transition from the superconducting state to the normal state has been observed experimentally. With this feature, this magnetic transfer type transformer can be used as a SFCL. When an artificial short circuit applied to the transformer, the wave forms of current-voltage on both primary and secondary windings have been recorded to the PicoScope. When a short circuit applied, the fault current limitation was observed in a few periods and the measurements were made. The possible advantages and disadvantages between this transformer and the conventional SFCL-transformers for the current limiting have been discussed. If this transformer is used on a real grid, the circuit breakers' lifetime expected to be longer.

July 2016, 116 pages

Key Words: MgB_2 , YBCO, superconducting fault current limiter, magnetic flux transfer

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek her konuda engin fikirleriyle yetişmeme ve gelişmeme katkıda bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali GENCER'e (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı), çalışmalarım sırasında önemli katkılarda bulunan ve yönlendiren Dr. Janos Kosa'ya (Kecskemet Koleji Öğretim Üyesi) ve Prof. Dr. Ekrem Yanmaz'a (Gelişim Üniversitesi Mekatronik Bölümü Öğretim Üyesi), projeler kapsamında birlikte çalıştığım Doç.Dr. Ahmet KILIÇ (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı), Dr. Serap SAFRAN (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) ve Sahure GEÇER ile laboratuvarında birlikte çalıştığım tüm arkadaşlarıma ve çalışmalarım süresince birçok fedakârlıklar göstererek beni destekleyen eşim ve oğluma en derin duygularla teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, “TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Burs Programı” kapsamında ve “Hatalı Akım Sınırlayıcı İçin Uygun Nano-Yapılı Süperiletken Külçe MgB_2 Ve Eriyik Y-Ba-Cu-O Halka Numunelerin Yüksek Basınç Ve Sıcaklık Altında Üretimi; Manyetik Ve Mekanik Karakterizasyonu (113F205-TÜBİTAK)” konulu proje tarafından desteklenmiştir.

Ercan ERTEKİN
Ankara, Temmuz 2016

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1 Sıfır Direnç	8
2.2 Meissner Etkisi	9
2.3 Sızma Derinliği (λ)	10
2.4 Uyum Uzunluğu (ξ)	11
2.5 I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler.....	12
2.5.1 Kritik sıcaklık (T_c).....	13
2.5.2 Termodinamik kritik manyetik alan (H_c)	13
2.5.3 Kritik akım yoğunluğu (J_c)	14
2.6 Tez Kapsamında Kullanılan Süperiletkenler	14
2.6.1 YBCO süperiletkeni	14
2.6.2 MgB_2 süperiletkeni	16
2.7 Süperiletken Halka Fiziği.....	17
2.8 Hatalı Akım Sınırlayıcılar	18
2.9 Hatalı Akım Sınırlayıcı Uygulamaları	22
2.10 Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı Çeşitleri.....	24
2.10.1 Rezistif tasarımlar	24
2.10.2 Hibrid tasarımlar	26
2.10.3 İndüktif tasarımlar.....	27
2.10.4 Doymuş çekirdek tipi tasarımlar	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1 MgB_2 Süperiletken Numunelerin Üretimi	31
3.2 YBCO Süperiletken Numunelerin Üretimi	38
3.3 Çeşitli SHAS Tasarımları ve Üretimleri	43
3.3.1 Manyetik akı transferi tipi SHAS tasarımı	44
3.3.2 İndüktif tip SHAS tasarımı.....	50
3.3.3 Rezistif tip SHAS tasarımı	52
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	55
4.1 XRD Analizleri	55
4.1.1 MgB_2 numunelerinin XRD analizleri.....	55

4.1.2 YBCO numunelerinin XRD analizleri.....	62
4.2 AA Alınganlık Ölçümleri	68
4.3 Kaldırma Kuvveti Analizleri	82
4.3.1 Halka ve disk numunelerin kaldırma kuvveti ölçümleri	82
4.4 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	87
4.5 SHAS Uygulamaları.....	90
4.5.1 Manyetik akı transferi tipi SHAS uygulaması.....	90
4.5.2 İndüktif tip SHAS uygulaması	99
4.5.3 Rezistif tip SHAS uygulaması.....	100
5. SONUÇ.....	104
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ.....	114



SİMGELER DİZİNİ

T_c	Kritik Sıcaklık
K	Kelvin
J_c	Kritik Akım Yoğunluğu
B	Manyetik Alan
λ	Sızma Derinliği
T	Sıcaklık
ξ	Uyum Uzunluğu
κ	Ginzburg-Landau Parametresi
M	Mıknatıslanma
H_{c1}	Alt Kritik Manyetik Alan
H_{c2}	Üst Kritik Manyetik Alan
Φ_0	Akı Kuantumu
μ_0	Manyetik Geçirgenlik
P	Güç
N	Sarım Sayısı
ε	Gerilim Düşümü
L	İndüktans

Kısaltmalar

SHAS	Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı
HAS	Hatalı Akım Sınırlayıcı
YSS	Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Enterkonnekte yapı	1
Şekil 1.2 Türkiye geneli bildirimsiz ve uzun süreli yüksek gerilim arızalarının dağılımı	3
Şekil 1.3 Dağıtım şirketlerinin trafolarına etki eden alçak gerilim arızalarının dağılımı	3
Şekil 2.1 Süperiletken ve metallerde direncin sıcaklıkla değişiminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.2 Mükemmel iletkenin manyetik alana karşı davranışının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.3 Bir süperiletkenin manyetik alana karşı davranışının şematik gösterimi	10
Şekil 2.4 Sızma derinliğinin manyetik alanla değişiminin şematik gösterimi	11
Şekil 2.5.a. I. tip, b. II. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrileri, c.d. I. tip ve II. Tip süperiletkenlerin faz diyagramları	12
Şekil 2.6 2G YSS telin (SCS4050) görünümü	15
Şekil 2.7 MgB_2 'nin kristal yapısı	16
Şekil 2.8 Manyetik alan altında süperiletken halka	18
Şekil 2.9 SHAS'ların genel çalışma prensibi	20
Şekil 2.10 SHAS içeren örnek bir devre	21
Şekil 2.11 HAS ana pozisyonda.....	22
Şekil 2.12 HAS besleyici pozisyonunda	23
Şekil 2.13 HAS bara birleştirme pozisyonunda	23
Şekil 2.14 Hatalı akım ve sınırlandırılmış akım.....	24
Şekil 2.15 Rezistif SHAS'ın şematik görünümü.....	25
Şekil 2.16 Hibrid SHAS'ın şematik gösterimi	26
Şekil 2.17 Korumalı çekirdek tasarımı.....	27

Şekil 2.18 Doymuş çekirdek tipi SHAS tasarımı.....	29
Şekil 3.1 Numune hazırlamak için kullanılan kalıplar.....	33
Şekil 3.2 SHAS özellikli trafonun kavramsal olarak gösterimi	44
Şekil 3.3 Manyetik akı transfer tipi ve süperiletken trafonun tasarımsal karşılaştırılması	46
Şekil 3.4 Süperiletken halka içerisindeki manyetik akı değişimi	46
Şekil 3.5 Manyetik akı transfer tipi SHAS'ın tek fazlı detaylı şematik gösterimi.....	47
Şekil 3.6 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'ın şematik gösterimi.....	48
Şekil 3.7 3-fazlı 6 kVA'lık sisteme ait görseller.....	50
Şekil 3.8 İndüktif SHAS için hazırlık aşaması.....	51
Şekil 3.9 Süperiletken polikristal YBCO halka üzerine 13 sarımlı süperiletken tel.....	52
Şekil 3.10 Rezistif SHAS için hazırlanan süperiletken tel (tek faz)	53
Şekil 3.11 Deneysel düzeneğe ait görseller-I.....	53
Şekil 3.12 Deneysel düzeneğe ait görseller-II.....	54
Şekil 4.1 MgB_2S_4 numunesine ait XRD grafiği	56
Şekil 4.2 Farklı geometride oluşturulmuş MgB_2p_5 numunelerine ait XRD grafikleri.....	56
Şekil 4.3 MgB_2p_6 numunesine ait XRD grafiği.....	57
Şekil 4.4 MgB_2pd_1 numunesine ait XRD grafiği.....	58
Şekil 4.5 MgB_2hp_4 numunesine ait XRD grafiği.....	58
Şekil 4.6 MgB_2hp_5 numunesine ait XRD grafiği.....	59
Şekil 4.7 MgB_2hp_9 numunesine ait XRD grafiği.....	59
Şekil 4.8 MgB_2hp_{10} numunesine ait XRD grafiği.....	60
Şekil 4.9 MgB_2hpd_1 numunesine ait XRD grafiği.....	60
Şekil 4.10 MgB_2hpd_2 numunesine ait XRD grafiği	61
Şekil 4.11 MgB_2hpd_3 numunesine ait XRD grafiği	61

Şekil 4.12 MgB ₂ hp4 numunesine ait XRD grafiği	62
Şekil 4.13 YBCO1 numunesine ait XRD grafiği	63
Şekil 4.14 YBCO2 numunesine ait XRD grafiği	64
Şekil 4.15 YBCO3 numunesine ait XRD grafiği	64
Şekil 4.16 MT-2 numunesine ait XRD grafiği.....	65
Şekil 4.17 MT-3 numunesine ait XRD grafiği.....	65
Şekil 4.18 MT-4 numunesine ait XRD grafiği.....	66
Şekil 4.19 YBGP0 numunesine ait XRD grafiği	66
Şekil 4.20 YBGP10 numunesine ait XRD grafiği	67
Şekil 4.21 YBGP15 numunesine ait XRD grafiği	67
Şekil 4.22 YBGP20 numunesine ait XRD grafiği	67
Şekil 4.23 MgB ₂ p5 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	68
Şekil 4.24 MgB ₂ pd1 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği.....	69
Şekil 4.25.a. MgB ₂ hp4, b. MgB ₂ hp5 numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği.....	70
Şekil 4.26.a. MgB ₂ hp9, b. MgB ₂ hp10 numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği.....	71
Şekil 4.27 MgB ₂ s4 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	72
Şekil 4.28 MgB ₂ hp8 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği.....	73
Şekil 4.29.a. YBCO1, b. YBCO2 numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği.....	74
Şekil 4.30 YBCO3 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	74
Şekil 4.31.a. MT-2, b. MT-3 numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	75
Şekil 4.32 MT-4 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	76
Şekil 4.33.a. İlk ısıtıl işlem, b. ikinci ısıtıl işlem sonunda YBGP0 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	77

Şekil 4.34 YBGP0 numunesinin 1. ve 2. ısıtım işlem sonucu oluşan AA alınganlık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması	78
Şekil 4.35 İlk ısıtım işlem sonunda YBGP10 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği.....	78
Şekil 4.36.a. İlk ısıtım işlem, b. ikinci ısıtım işlem sonunda YBGP15 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	79
Şekil 4.37 YBGP15 numunesinin 1. ve 2. ısıtım işlem sonucu oluşan AA alınganlık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması	80
Şekil 4.38.a. İlk ısıtım işlem, b. ikinci ısıtım işlem sonunda YBGP20 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği	81
Şekil 4.39 YBGP20 numunesinin 1. ve 2. ısıtım işlem sonuncu oluşan AA alınganlık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması	81
Şekil 4.40 YBGP serisi numunelerinin 2. ısıtım işlem sonunda alınan AA alınganlık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması	82
Şekil 4.41 MgB ₂ p6a numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm grafiği.....	83
Şekil 4.42 MgB ₂ p6b numunesine ait ikinci ölçüm grafiği.....	83
Şekil 4.43 MgB ₂ p7 numunesine ait kaldırma kuvveti grafiği.....	84
Şekil 4.44 MgB ₂ hpd1 numunesine ait kaldırma kuvveti grafiği.....	85
Şekil 4.45 MgB ₂ hpd2 numunesine ait kaldırma kuvveti grafiği.....	86
Şekil 4.46 MgB ₂ hpd4 numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm grafiği.....	86
Şekil 4.47 YBCO numuneler için mikrosertliğin uygulanan yüke bağlı değişimi	87
Şekil 4.48 MgB ₂ numunelerinin mikro sertliğinin uygulanan yüke bağlı değişimi.....	89
Şekil 4.49 Yüksüz durumda demir nüve üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu ...	91
Şekil 4.50 z eksen boyunca yüksüz durumda demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu	92
Şekil 4.51 Yük olduğu durumda demir nüve üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu	92

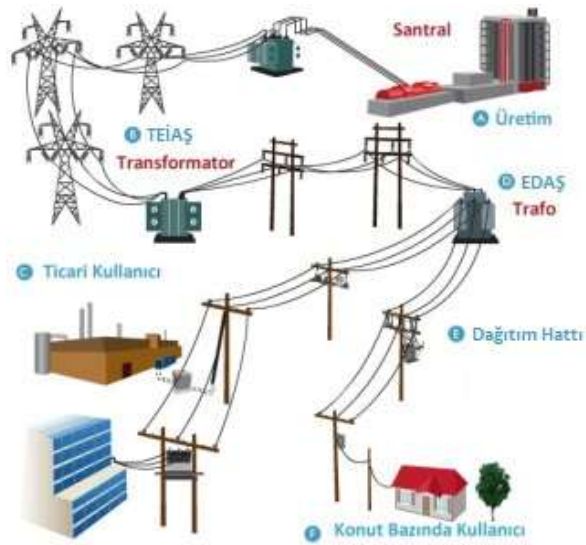
Şekil 4.52 z eksenli boyunca yüklü durumda demir nüve üzerinde oluşan manyeti k akı yoğunluğu.....	93
Şekil 4.53 Düşüm hesabı için devrenin şematik gösterimi	94
Şekil 4.54 Yüksüz durumda birincil ve ikincil taraflarda görülen gerilim değerleri	97
Şekil 4.55 Referans bobini ve ikincil bobindeki akım değerleri ve giriş gerilim değeri.....	97
Şekil 4.56.a. Kısa devre edilmeden önceki durum, b. kısa devre süresince oluşan durum, c. kısa devre işlemi bittikten sonraki durum.....	98
Şekil 4.57 Süperiletken halkanın SHAS konumunda normal çalışma durumu	99
Şekil 4.58 Süperiletken halkanın şok geçiş (quench) anı.....	100
Şekil 4.59 Devrede arıza olduğunda hatalı akım sınırlayıcının çalışma durumu.....	100
Şekil 4.60 Sistemin çalışma testi.....	101
Şekil 4.61 Maksimum giriş geriliminde sistemin çalışma durumu.....	101
Şekil 4.62 Kısa devre anında sistemde akım-gerilim değişimi	102
Şekil 4.63 Başka bir fazda kısa devre işlemi.....	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 SHAS'ların karşılaştırması (Meerovich ve Sokolovsky 2015).....	30
Çizelge 3.1 Katı hal reaksiyon yöntemi için kullanılan başlangıç tozlarının özellikleri	31
Çizelge 3.2 10 gr MgB_2 için hesaplanan başlangıç toz miktarları	32
Çizelge 3.3 Numune üretiminde kullanılan kalıpların ölçüleri	32
Çizelge 3.4 Üretilen MgB_2 numuneleri ve üretim parametreleri	38
Çizelge 3.5 YBCO üretiminde kullanılan başlangıç tozları ve özellikleri.....	38
Çizelge 3.6 10 gr YBCO için hesaplanan başlangıç toz miktarları.....	39
Çizelge 3.7 Katı hal reaksiyon yöntemiyle üretilen YBCO numunelerin işlem detayları.....	40
Çizelge 3.8 Süperiletken ve manyetik akı transfer tipi trafoların karşılaştırması	45
Çizelge 3.9 3-fazlı sistemin detayları.....	48
Çizelge 4.1 YBCO numunelerin uygulanan kuvvete karşı elde edilen sertlik değerleri	88
Çizelge 4.2 MgB_2 numunelerin uygulanan kuvvete karşı elde edilen sertlik değerleri ..	90
Çizelge 4.3 20 cm çapında süperiletken halkanın indüktans ölçümleri	95
Çizelge 4.4 Sıvı azotun özısı değerleri (https://www.bnl.gov 2016b)	96

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişmekte olan ülkelerin, büyüyen ekonomileriyle birlikte hızlı bir şekilde artan enerji ihtiyaçları, elektrik şebekelerinin güvenilirliğinin artırılması gereğini, önemli hale getirmiştir. Dünyada şebeke ve buna bağlı sistemlerin korunması için yaygın olarak devre kesiciler kullanılmaktadır. Genel olarak devre kesicilerin karışık çalışma prensipleri, yüksek akım taşıyabilen parçaların boyutlarının büyük olması ve güç kayıplarının yüksek olması nedeniyle, son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel boyutlarda Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı-SHAS'lar üzerine AR-GE çalışmaları yoğunlaşmıştır. Hatalı akım, elektrik mühendislerinin karşılaştığı en eski bilinen problemlerden biridir. Orta ve/veya yüksek gerilimli bir dağıtım şebekesinde bir hata meydana geldiği anda, kısa devre akımı devreden geçmesi gereken nominal akımın 30-60 kat üstüne çıkabilmektedir. Geleneksel devre kesiciler bu kısa devre akımını 60-80 ms sonra, özel olarak tasarlanmış hızlı akım kesici devreler ise bu akımı biraz daha hızlı bir şekilde kesebilmektedirler. Ancak en azından 10 ms'lik bir zaman dilimi içerisinde elektrik sistemindeki bütün bileşenlerin bu oluşan hatalı akımın yıkıcı etkilerine (termal ve elektromanyetik) karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Ülkemizdeki elektrik üretim, iletim ve dağıtım şebekesi birden çok güç kaynağının, iletim hattının ve indirici trafonun birbirine bağlanmasıyla (enterkonnekte yapı) oluşmuştur (Şekil 1.1).

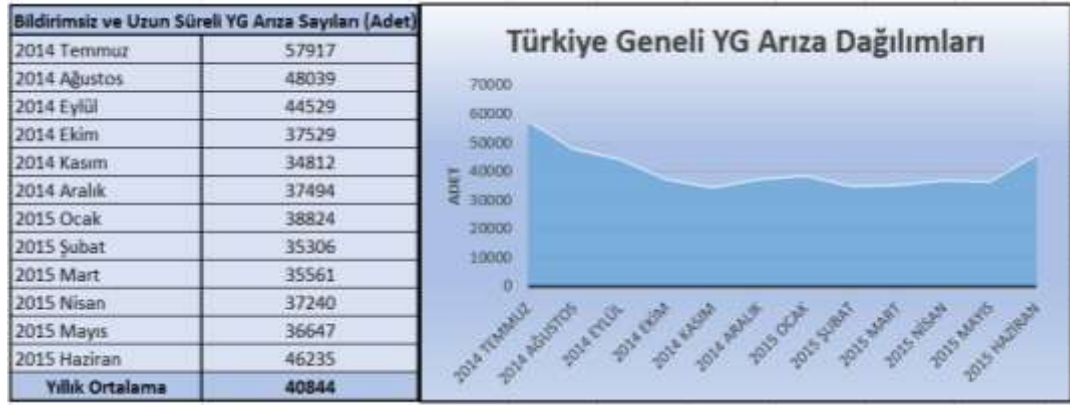


Şekil 1.1 Enterkonnekte yapı

Bu sistemde geleneksel tip jeneratörlerin karakteristik yapısı gereği dağıtım şebekesinde hata akımları oldukça yüksektir (16-25 kA). Genel olarak büyümeye devam eden bir elektrik şebekesine aynı zamanda daha da büyüyen hatalı akım seviyelerinin eşlik etmesi beklenmektedir. Ayrıca hatalı akım seviyelerinin yükselmesi, elektrik güç ekipmanları üzerindeki arıza ihtimallerini de arttırmaktadır.

Hatalı akım seviyelerinin yükselişi; jeneratörlerin, trafoların, iletim hatlarının ve devre kesicilerin elektrodinamik ve termal kararlılıklarını bozmakla birlikte boyut, ağırlık ve maliyet anlamında da önemli bir artışa sebep olmaktadır.

Ülkemizdeki 21 elektrik dağıtım şirketinin web sitelerinde yayınlamış oldukları tedarik sürekliliği tablolarından aşağıdaki veriler çıkarılmıştır (<http://www.gdzeletrik.com.tr> 2014a, <http://www.admelektrik.com.tr> 2014, 2015a, <http://www.akdenizedas.com.tr> 2014, 2015b, <http://www.akedasdagitim.com.tr> 2014, 2015c, <http://www.arasedas.com> 2014, 2015d, <https://www.ayedas.com.tr> 2014, 2015e, <https://www.baskentedas.com.tr> 2014, 2015f, <https://www.bedas.com.tr> 2014, 2015g, <http://cedas.com.tr> 2014, 2015h, <http://www.coruhedas.com.tr> 2014, 2015i, <http://www.dedas.com.tr> 2014, 2015j, <http://www.firatedas.com.tr> 2014, 2015k, <http://www.kcetas.com.tr> 2014, 2015l, <http://osmangaziedas.com.tr> 2014, 2015m, <https://www.sedas.com> 2014, 2015n, <https://www.toroslaredas.com.tr> 2014, 2015o, <http://www.tredas.com.tr> 2014, 2015ö, <http://www.uedas.com.tr> 2014, 2015p, <http://www.vedas.com.tr> 2014, 2015r, <http://www.yesilirmakedas.com> 2014, 2015s). Bu veriler ışığında ülkemiz geneli bildirimsiz ve uzun süreli yüksek gerilim arıza adetlerini gösteren bilgiler şekil 1.2’de verilmektedir. Bahse konu arızalar TEİAŞ merkezlerinde bulunan trafoları etki etmekte olup, EPDK’nın 2014 yılı piyasa gelişim raporu incelendiğinde bu arızaların etkilerine maruz kalan Türkiye genelinde 1550 adet TEİAŞ trafosu bulunduğu belirtilmektedir (www.epdk.org.tr 2014b). Böylece her bir TEİAŞ trafosu başına ayda ortalama 26,35 adet hatalı akım olayının gözlemlendiği belirlenmiştir. Bahse konu arızaların oluşturduğu yüksek akımların dağıtım şebekesinde meydana getirdiği yıkıcı etkiler, bu etkilerin sonucunda ortaya çıkan uzun süreli kesintiler ve yüksek maliyetli tamirat giderlerinin azaltılması için yüksek gerilim (YG) seviyesinde hatalı akımın sınırlandırılması önemli bir zaruriyet olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.2 Türkiye geneli bildirimsiz ve uzun süreli yüksek gerilim arızalarının dağılımı

Benzer bir araştırma alçak gerilim (AG) seviyesinde yapılmış olup şekil 1.3'te gösterilmektedir. EPDK'nın 2014 yılı piyasa gelişim raporundan alınan TEDAŞ trafo sayıları incelendiğinde Türkiye genelinde 397.336 adet trafo olduğu tespit edilmiştir. Yapılan incelemede trafo başına 5 ayda 1 arıza meydana geldiği ifade edilebilir.



Şekil 1.3 Dağıtım şirketlerinin trafolarına etki eden alçak gerilim arızalarının dağılımı

Şebekeyi koruma konusunda mühendisler ve planlayıcılar, hatalı akımlardan kaynaklı, güç sistemlerindeki hasarı önlemek ve elektrik kesintilerini azaltmak için çeşitli önlemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemler aşağıda kısaca listelenmiştir:

- Şebekeyi elektriksel olarak bağımsız daha küçük alt şebekelere ayırmak,
- Trafo empedansını arttırmak,
- Trafo nüvesini doyurmak,

- Hatalı akım sınırlayıcı (HAS) kullanmak.

Bu önlemler sistemin:

- Aşırı düzeyde parçalanmasına,
 - Ekstra empedanslardan dolayı enerji tedarik sürekliliğinin ve veriminin azalmasına,
 - Kayıpların ve işletim maliyetlerinin artmasına,
- neden olmaktadır.

Süperiletken malzemelerin, teknolojik uygulamalarda kullanılan geleneksel birçok cihazın özelliklerinin iyileştirilmesinde ve hatta yerine geçmesinde kilit rol oynayabilecek üstün fiziksel özelliklere sahip oluşu, hatalı akım sınırlayıcı uygulamasında da kullanım imkânını ortaya çıkarmıştır. Özellikle süperiletkenlerin sıfır direnç özelliği nominal durumda şebekeye ek bir direnç vermemesini sağlamaktadır. Hatalı akım durumunda ise, aşırı akımdan dolayı normal duruma geçen süperiletken akımı sınırlandırabilmek için gerekli olan ekstra direnci şebekeye sunmaktadır.

Külçe süperiletken malzemelerin pratik uygulamalar açısından kendisine geniş bir alan bulması için hala temel ve teknik düzeyde çözülmesi gereken bazı problemler bulunmaktadır. Bu problemler arasında tanecikler arası bağlantının geliştirilmesi ve süperiletken akım yoğunluğuna karşı oluşan yapısal olumsuzlukların giderilmesi gibi hususlar yer almaktadır. MgB_2 tabanlı malzemelerde, potansiyel süperiletken akım yoğunluğunun sadece % 10-15' lik kısmı elde edilebilmekte ve yenilikçi malzeme üretim teknikleri ile elde edilen akım yoğunlukları 5 kata kadar arttırılabilmektedir (Eisterer 2007, Collings vd. 2008). Bu artış yapısal olarak tanecik sınırlarının geliştirilmesi, tanecik boyutunun küçültülmesi (Eisterer vd. 2002), nano boyutta akı çivileme merkezlerinin oluşturulması, ikincil fazların katkılanması ve uygun yapı kusurlarının oluşturulması ile daha yüksek seviyelere taşınabilir. Bununla birlikte, Mg'nin oksitlenmesini ve buharlaşmasını önlemek, tanecik boyutunu kontrol etmek, daha yoğun ve yapısal olarak daha kararlı malzemeler üretmek açısından MgB_2 üretim aşamasında yüksek basınç uygulamak son derece önemlidir. Ayrıca YBCO malzemelerin hazırlanmasında da tavlama öncesi belirli bir sıcaklık ve basınç altında

preslemenin kritik parametrelere olumlu yönde etkilerinin olduğu bilinmektedir. YBCO üretiminde Eriyik halinde yönlendirme (melt-textured) metodu ile elde edilen malzemelerinde iyi özellikler sergiledikleri yapılan çalışmalarda görülmektedir. Yoğun bir malzeme üretilmesinin, kullanım esnasında bozulmalara ve nem ile reaksiyona karşı kararlı bir davranışın sergilenmesiyle birlikte, uygulamalarda da mekanik ve yapısal özelliklerin daha iyi olacağı bilinmektedir (Aydiner vd. 2010)

Genel olarak süperiletkenler kritik sıcaklık parametresine bağlı olarak düşük ve yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS) olarak iki sınıfta değerlendirilmektedirler. Bununla birlikte manyetik alandaki davranışlarına göre ise; 1. ve 2. tip olarak iki türde adlandırılmaktadırlar. Düşük sıcaklıklara ulaşmanın ve bu sıcaklıklarda kararlı halde çalışmanın getirdiği maliyet nedeniyle YSS'in teknolojik uygulamalardaki kullanımına ilişkin çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir. YSS'in arasından uygulamalardaki kullanım potansiyeli bulunan YBCO ve BSCCO süperiletken sistemleri, hem teknolojik uygulamalar hem de özelliklerin iyileştirilmesi açısından günümüzde de üzerinde yoğun olarak çalışılan sistemler içerisinde yer almaktadır.

YSS'in arasında bulunan Yttriyum tabanlı-YBCO süperiletkeni, diğer Talyum tabanlı (TBCCO), Bizmut tabanlı (BSCCO) ve cıva tabanlı (HBCCO) süperiletkenlerle kıyaslandığında daha düşük T_c değerine sahiptir. Ancak, yapısında zehirli elementler içermemesi, kullanılan elementlerin daha kararlı olması, kritik akım yoğunluğunun yüksek olması ve diğer YSS'e göre daha kolay bir üretime sahip olması nedeniyle teknolojik kullanımda en çok tercih edilen numunelerden biri haline gelmiştir (Skakle 1998). Bununla birlikte kritik parametrelerinin daha da iyileştirilmesi amacı ile farklı üretim yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar oldukça yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Yüksek akım gereken uygulamalar için, yüksek kritik akım yoğunluğuna (J_c) sahip malzemeler üretilmelidir. Bunu sağlamak için ise, tanelerin tek bir yönde yönlendirilmesi gerekmektedir. Süperiletken uygulamalarında verimliliği artırmak için literatürde birçok üretim tekniği bulunmaktadır (Eritme ile Büyütme, Üstten Tohumlanmış Eriyik Büyütme (ÜTEB), vb.). Bu yöntemlerden en çok tercih edileni ise

ÜTEB yöntemidir. ÜTEB yöntemi ile üretilen yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip malzemelerin, gerek manyetik ve gerekse mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi uygulamalar açısından önemlidir.

Eritme yönlendirme yöntemi ile elde edilmiş YBCO numunesinin AC manyetik alınganlık değeri sabit bir manyetik alan ve farklı frekans değerlerinde, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Alınganlıktan elde edilen veriler ışığında sıcaklığın bir fonksiyonu olan öz direncin frekans değerlerinden bağımsız olduğu ortaya çıkarılmıştır (Jin vd. 1992).

Li vd. (1997), Eritme-Yönlendirme-Büyütme (EYB) metodu ile YBCO numunelerini, 5, 10 ve 15 dakika süre ile 150 °C'lik bir sıcaklık gradyenti altında üretmişlerdir. Üretilen numunelerin sertliğini, kırılmaya karşı dayanıklılığını (fracture toughness) ve kritik akım yoğunluğu değerlerini incelemişlerdir. Buna göre, Y-211 yeşil fazının (green phase) malzemenin hem kritik akım yoğunluğunu hem de mekanik özelliklerini etkilediğini görmüşlerdir.

Son yılların en çok çalışılan süperiletken malzemelerinden biri de MgB_2 bileşiğidir. Sahip olduğu kritik sıcaklık değeri ve uygulamalardaki kullanılabilirliği düşünüldüğünde gelecek vaat eden bir malzemedir. Bu bileşiğin oksijen duyarlılığının olmasından dolayı atmosfer şartlarına dayanıklılığını ölçmek için yapılmış bazı çalışmalar bulunmaktadır. Su ve nemli hava MgB_2 'yi olumsuz yönde etkilemekte ve hatta oda sıcaklığında bile yapısında $Mg(OH)_2$, $MgCO_3$ ve B_2O_3 'ün oluşmasını sağlamaktadır (Dou vd. 2001).

Uygulamalar açısından bakıldığında zaman düşük manyetik alanlarda saf MgB_2 'nin kritik akım yoğunluğu (J_c) yeterince yüksektir. Bununla beraber, MgB_2 'de etkili çivileme bölgelerinin eksikliği ve düşük H_{c2} 'den dolayı artan manyetik alanla birlikte, J_c 'nin hızlı bir şekilde düştüğü gözlenmiştir. MgB_2 süperiletkeninin kritik parametrelerinin geliştirilmesi ve teknolojiye uygulanabilirliği için manyetik alan altında J_c 'nin iyileştirilmesi gerekmektedir. Kritik akım yoğunluğunun artması, tane iletkenliğinin

artmasına ve bunun yanı sıra artan çivileme kuvvetleriyle üst kritik alan H_{c2} 'nin artmasına sebep olur (Sandu vd. 2011).

MgB_2 'nin üretim aşamasında; Mg'nin oksitlenmesini ve buharlaşmasını önlemek, tanecik boyutunu kontrol etmek, daha yoğun ve yapısal olarak kararlı malzemeler üretmek açısından yüksek basınç uygulamak son derece önemlidir. Üretim sonucunda MgB_2 yoğunluğu yüksek olan bir numune; kullanım aşamasında karşılaşılabilecek bozulmalara, neme ve reaksiyona karşı daha dirençli davranmakta ve uygulamalar açısından da daha iyi mekanik ve yapısal özellikler sergilemektedir.

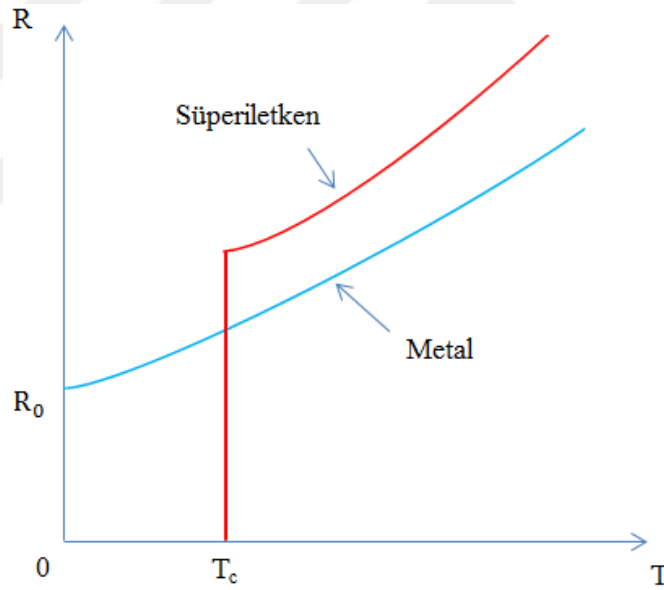
Tez kapsamında YBCO ve MgB_2 süperiletkenleri külçe numune olarak üretilmiştir. Üretilen malzemelerin SHAS uygulaması için kullanılabilirliği araştırılmıştır. Araştırma sonucunda bu numunelerin şebekelerde SHAS uygulaması için hem boyut hem de taşıyabileceği akım yoğunlukları düşünüldüğünde yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. SHAS uygulamaları için ticari olarak satın alınan polikristal YBCO külçe ve 2. nesil kaplanmış süperiletken teller (YBCO) kullanılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde süperiletkenlerin temel özellikleri, YBCO ve MgB_2 süperiletkenleri ve hatalı akım sınırlayıcıların genel özelliklerine kısaca değinilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Sıfır Direnç

Kamerling Onnes tarafından ilk kez 1911 yılında gözlemlenmiş olan bu olay, süperiletkenlerin en temel özelliğidir (Onnes 1911). Direncin sıfır olması, akımın iletilmesi esnasında kaybın sıfır olması anlamına gelmektedir. Bu durum süperiletkenlerin günümüzdeki uygulamalara adaptasyonu için önemli bir parametredir. Mükemmel iletkenler olarak bilinen metallerle süperiletkenleri karşılaştıracak olursak; metallerde atomların termal titreşimleri, yapı kusurları ve safsızlıklar dirence ve buna bağlı kayıplara neden olur. Direncin süperiletken ve metallerde sıcaklıkla değişimini şekil 2.1’de görebiliriz.



Şekil 2.1 Süperiletken ve metallerde direncin sıcaklıkla değişiminin şematik gösterimi

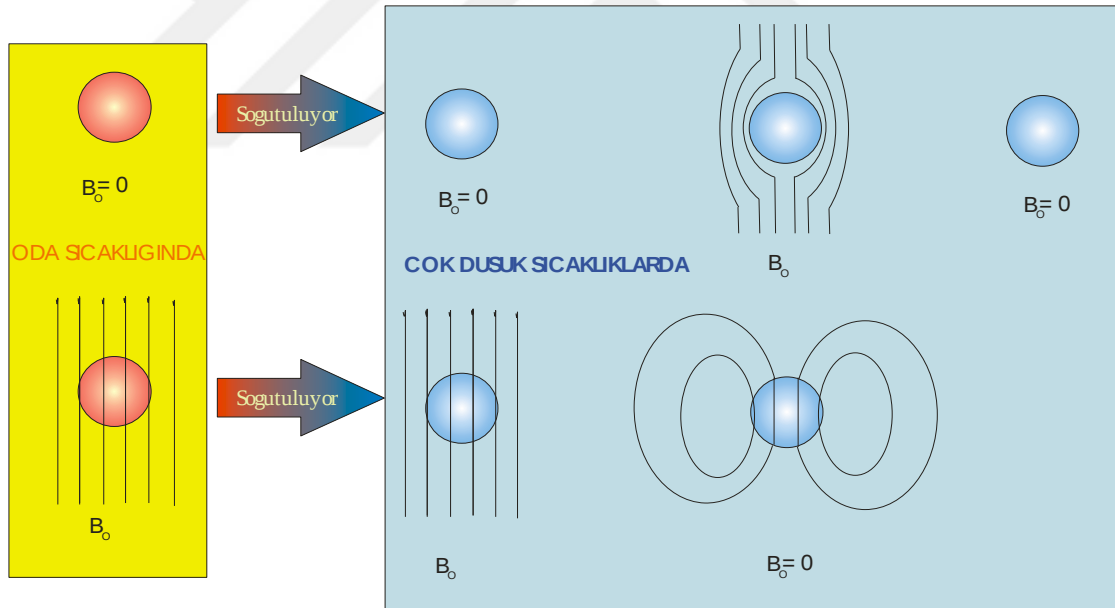
Metallerdeki yapı kusurları ve safsızlıklarla, elektronun dalga hareketi esnasında oluşan etkileşim metalde belli bir direncin oluşmasına sebep olur. Buna göre bu direnç ifadesi;

$$R = R_0 + R_i \quad (2.1)$$

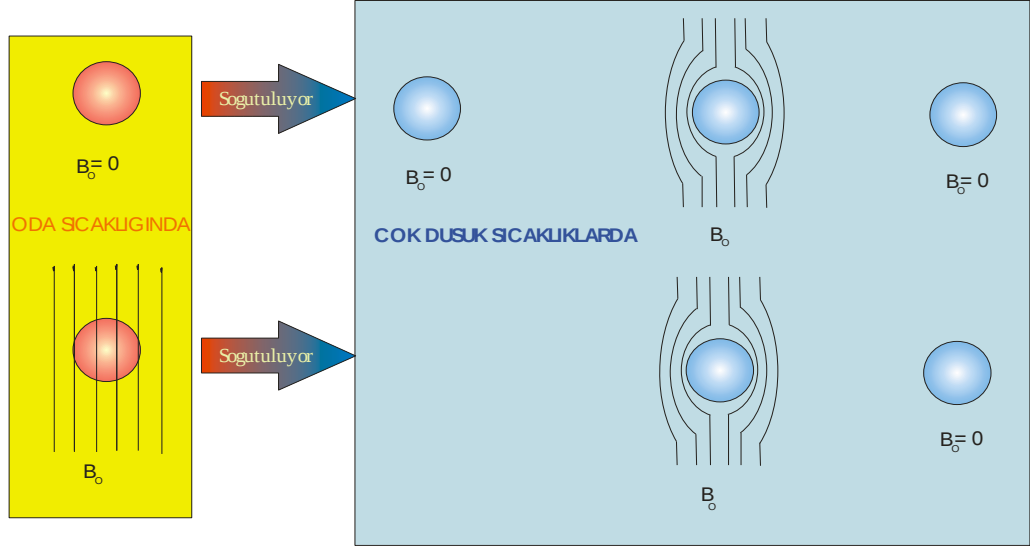
şeklinde verilir. Burada R , yüksek sıcaklıklarda lineer olarak değişirken, düşük sıcaklıklarda R_0 gibi sabit bir değer alır. Bu sabit değere “artık direnç” denir.

2.2 Meissner Etkisi

Süperiletkenlerin bir diğer önemli özelliği de manyetik alanı dışarlamaıdır. Buna “kusursuz diamanyetizma” da denir (Meissner ve Ochsenfeld 1933). Bu özellik sayesinde mükemmel bir iletken ile süperiletken bir malzeme ayırt edilebilir. Mükemmel iletken ve süperiletken için alan altında (B_0) ve alansız ($B_0=0$) soğutulurken mıknatıslanmalarının şematik gösterimlerini sırasıyla şekil 2.2-2.3’de görebiliriz. Her iki şekilden de görüldüğü üzere süperiletkende işlem önceliği olmaksızın manyetik alan dışarlanmaktadır. Ancak mükemmel iletkendeysse, sadece soğutulduktan sonra manyetik alan uygulanırsa bir dışarlama söz konusu olmaktadır.



Şekil 2.2 Mükemmel iletkenin manyetik alana karşı davranışının şematik gösterimi



Şekil 2.3 Bir süperiletkenin manyetik alana karşı davranışının şematik gösterimi

2.3 Sızma Derinliği (λ)

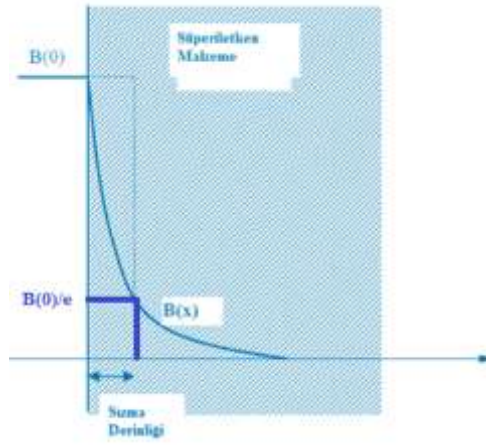
Manyetik alan içerisindeyken kritik sıcaklığının altına kadar soğutulan bir süperiletkenin yüzeyinde yüzey akımları oluşur. Bu yüzey akımları malzemenin içindeki net manyetik alanı sıfırlamaya çalışırlar. Malzemenin içerisinde manyetik alan değeri sıfır olsa da yüzeye yakın et kalınlığında sonlu bir bölgede manyetik alanın malzemeye girdiği gözlenmiştir. Tanım olarak ise, manyetik alanın yüzeydeki değerinin $1/e$ değerine düştüğü derinliğe London sızma derinliği adı verilir (Şekil 2.4) ve λ ile gösterilir (London ve London 1935). Malzemeye sızan manyetik alanın derinlikle değişimi ise;

$$B(x) = B(0) e^{-x/\lambda} \quad (2.2)$$

ile ifade edilir. Sızma derinliği sıcaklığa bağlıdır ve ampirik olarak;

$$\lambda(T) = \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

şeklinde değişmektedir.



Şekil 2.4 Sızma derinliğinin manyetik alanla değişiminin şematik gösterimi

2.4 Uyum Uzunluğu (ξ)

Uyum uzunluğu (ξ) BCS teorisinde, Cooper çiftlerini oluşturan elektronların bir arada kalabildikleri mesafe olarak tanımlanırken, Ginzburg-Landau teorisinde ise; çiftlenmiş elektronların normal duruma geçmeden özelliklerini koruyabildikleri mesafe olarak tanımlanır. Pippard'a göre ise; fermi enerjisi civarında elektron yoğunluğunun değişebileceği karakteristik mesafe olarak tanımlanır (Pippard 1953).

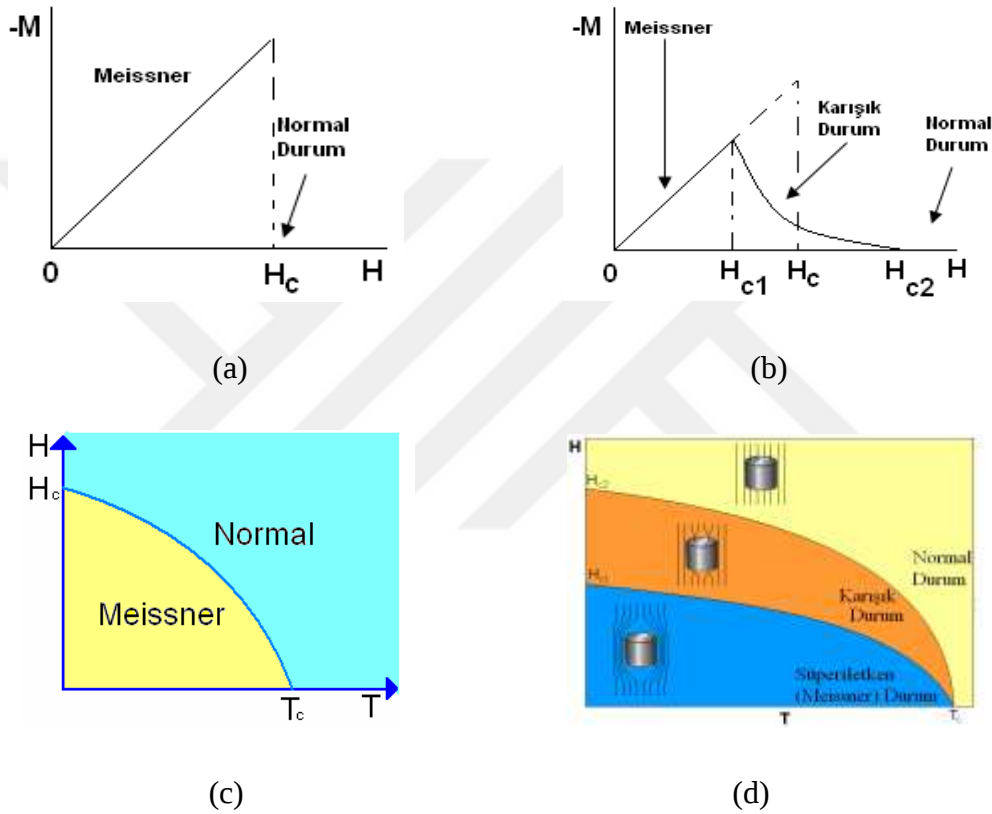
Sızma derinliği ile uyum uzunluğu arasında;

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (2.4)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Burada κ , Ginzburg-Landau parametresi olarak bilinir (Ginzburg ve Landau 1950). κ parametresinin $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 'den küçük ve/veya büyük olması durumuna göre süperiletkenler I. tip ve/veya II. tip olarak sınıflandırılırlar.

2.5 I. Tip ve II. Tip Süperiletkenler

1950 yılına kadar tek tip olarak bilinen süperiletkenler, Ginzburg-Landau ve Abrikosov'un teorisine göre; manyetik alan davranışlarına göre I. ve II. Tip olmak üzere iki tip süperiletkenlik vardır. Bunlara ait mıknatıslanma eğrileri ve faz diyagramları şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5.a. I. tip, b. II. tip süperiletkenlerin mıknatıslanma eğrileri, c.d. I. tip ve II. Tip süperiletkenlerin faz diyagramları

Şekil 2.5'ten de görüldüğü üzere I. tip süperiletkenlerde tek bir kritik manyetik alan (H_c) değeri vardır ve bu değer aşıldığında malzeme normal duruma geçer, buna karşın II. tip süperiletkenlerde H_{c1} ve H_{c2} şeklinde 2 adet kritik manyetik alan değeri bulunmaktadır. Burada faz diyagramlarını karşılaştıracak olursak II. tip süperiletkenlerde çift kritik manyetik alanından kaynaklı $H_{c1} < H < H_{c2}$ değerinde karışık durum söz konusudur. Karışık durum süperiletkene manyetik akı girişinin olması anlamına gelmektedir. Giren manyetik akı kuantum birimi ϕ_0 'ın tam katları ile ifade edilir ve;

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \quad (2.5)$$

şeklinde gösterilir. Burada h ; planck sabitidir, e ; elektron yüküdür ve 2 ise elektron çiftinin sayısı olarak ifade edilmektedir. I. tip süperiletkenlerde bu durum gözlenmez. Bir genelleme yapacak olursak, elementler (Hg, Pb, Sn, ... vb.) I. tip süperiletkenlerken, bileşikler veya alaşımlar ise II. tip süperiletkenlerdir.

Bir malzemenin süperiletken özelliğini koruyabilmesi için kritik sıcaklık (T_c), termodinamik kritik manyetik alan (H_c) ve kritik akım yoğunluğu (J_c) önemli parametrelerdir. Bu parametrelerden herhangi birisi aşılsa süperiletkenlik özelliği kaybolur. Bunlara kısaca aşağıda değinilmiştir.

2.5.1 Kritik sıcaklık (T_c)

Süperiletken olan her malzeme belirli bir kritik sıcaklığın (T_c) altındaki değerlerde süperiletken özelliklerini korur. Bu sıcaklık değerinin altında direnç hızla sıfıra doğru düşmektedir. Her malzemenin kritik sıcaklık değeri farklıdır.

2.5.2 Termodinamik kritik manyetik alan (H_c)

Kritik sıcaklığının altında süperiletken durumda olan bir malzemeye dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında, belirli bir manyetik alan değerinin üzerinde ise süperiletken normal iletken durumuna geçer. Bu alan değeri kritik manyetik alan değeridir ve sıcaklığa bağlıdır (Orlando ve Delin 1991):

$$H_c(T) = H_{c0} \left[1 - \frac{T^2}{T_c^2} \right] \quad (2.6)$$

$H_c(T)$ değeri, bir T sıcaklığındaki kritik manyetik alan değerini; H_{c0} değeri ise, $T=0$ K'deki kritik manyetik alan değerini ifade etmektedir. Denklem (2.6)'dan da görüleceği üzere $T=0$ K'de $H_c(T)$ maksimum değeri alır.

2.5.3 Kritik akım yoğunluğu (J_c)

Bir süperiletken malzemenin taşıyabileceği maksimum akım yoğunluğunun bir sınırı vardır. Bu üst sınıra kritik akım yoğunluğu (J_c) adı verilir. Bu akım yoğunluğunun üzerine çıkıldığında malzeme normal iletken durumuna geçer.

2.6 Tez Kapsamında Kullanılan Süperiletkenler

Tez kapsamında kullanılan YBCO ve MgB_2 süperiletkenleri hakkında öne çıkan önemli özellikleri hakkında kısa bir değerlendirme alt başlıklar altında yapılmaktadır.

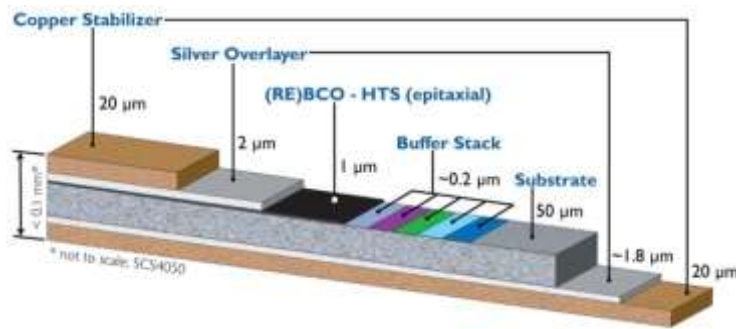
2.6.1 YBCO süperiletkeni

Yaklaşık 93 K geçiş sıcaklığına sahip olan YBCO süperiletkeni 1987 yılında keşfedilmiştir. Sıvı azot sıcaklığının üzerinde süperiletken olduğu belirlenen ilk bileşiklerdendir. İnce film, külçe ve ayrıca kaplanmış iletken “coated conductor” olarak üretilebilmektedir. İnce film YBCO bir altlık üzerinde PLD (pulsed laser deposition) tekniği ile üretilmektedir (Li vd. 2003). Çok kırılgan bir yapıya sahip olmasından dolayı ticari uygulamalarda kullanımı sınırlıdır.

Külçe olarak üretilen YBCO malzemelerin ise J_c değerleri, ince film ve kaplanmış iletkenlere oranla çok düşüktür. Uygulamalar açısından J_c değeri yüksek tek kristal malzemeler önemli bir yere sahiptir. Ancak kırılgan yapısından dolayı çok büyük malzemeler üretmek güçtür. YBCO üretiminde oksijen konsantrasyonu önemli bir yere sahiptir. YBCO külçe süperiletkeninin diğer seramik süperiletkenlere göre avantajları şu şekildedir:

- 77 K'den büyük kritik sıcaklığa sahip olduğu bilinen kararlı dört elementli tek bileşiktir.
- Zehirli elementler içermez.
- Tek-fazlı YBCO hazırlamak nispeten daha kolaydır.
- Diğer YSS numunelerine oranla daha düşük anizotropiye sahiptirler. Çünkü YBCO her bir tabakası metalik olan bir yapı içerir.
- Daha güçlü manyetik alan uygulandığında daha yüksek akım yoğunlukları taşıyabilirler. YBCO numunesi 77 K'de 10000 A/mm²'den daha yüksek akım yoğunluğuna sahiptir.

Kaplanmış YBCO iletkenlerin bir diğer adı da ikinci nesil teldir (2G wire). İkinci nesil (2G) kaplanmış teller birinci nesil süperiletkenlere göre çok daha yüksek akım yoğunluğu taşıyabilmektedirler. Ayrıca şekil 2.6'daki şematik yapısına göre üretimi teknik olarak zor olmasından dolayı birim uzunluk başına maliyeti yüksektir. Ticari olarak birkaç firma bu tellerin üretimini gerçekleştirebilmektedir. Örneğin, SuperPower firması 2G telleri IBAD (ion beam assisted deposition)/MOCVD (metal organic chemical vapour deposition) yöntemiyle üretmektedir (Hatzistergos vd. 2004, Xiong vd. 2007, <http://www.superpower-inc.com> 2016a). Tek parça halinde standart olarak 100-300 m arasında 77 K sıcaklığında 300 A kritik akım değerine sahip teller üretebilmektedirler. SuperPower firmasının üretmiş olduğu 2G YSS tel (SCS4050 tipinde) şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 2G YSS telin (SCS4050) görünümü (<http://www.superpower-inc.com> 2016a)

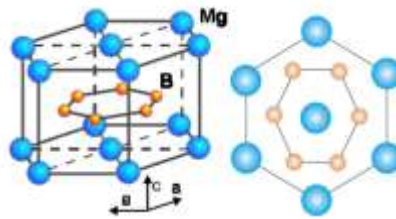
YBCO şerit daha ucuz başlangıç malzemeleri kullanılarak manyetik alan altında geliştirilmiş bir performans ve mekanik özellikler ile birlikte potansiyel olarak daha az maliyet sunar. Ayrıca daha geniş bir yüzey alanına sahip olan bir şerit, şok geçişten (quench) sonra çok daha çabuk bir şekilde şeridin tekrar soğutulmasına imkân sağlar.

2.6.2 MgB_2 süperiletkeni

2001 yılında süperiletkenliği keşfedilen MgB_2 bileşiği yaklaşık olarak 39 K kritik sıcaklığına sahiptir. YSS ile karşılaştırıldığında bu geçiş sıcaklığı düşük görünse de, ikili bileşikler arasında en yüksek kritik sıcaklığa sahip olması, MgB_2 'nin önemini artırmaktadır. MgB_2 süperiletkeni aşağıda verilen bazı özellikleri ile günümüzde hala ilgi çekmekte ve üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır.

- İkili bir bileşiktir.
- İkili bileşikler arasında yüksek T_c 'e sahiptir.
- Uyum uzunluğu büyüktür.
- Taneler arası zayıf bağ yoktur.
- Yüksek J_c 'ye ve mıknatıslanma özelliğine sahiptir.
- Anizotropi düşüktür.
- Ucuzdur.

Yukarıda da bahsedildiği üzere ikili bir bileşik olan MgB_2 , basit hegzagonal bir kristal yapıya sahiptir (Şekil 2.7) ve bu nedenle üretimi kolaydır.



Şekil 2.7 MgB_2 'nin kristal yapısı (Buzea ve Yamashita 2001)

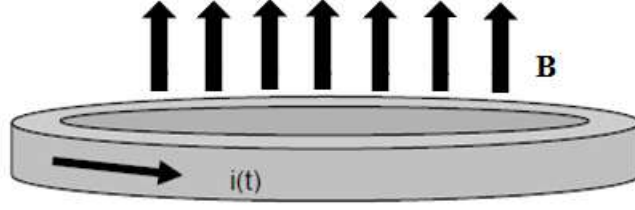
Bu yapının kristal parametrelerine bakacak olursak, $a=3.086\text{\AA}$ ve $c=3.524\text{\AA}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca B-B atomları arasındaki mesafe yaklaşık 0.178 nm ve Mg-Mg atomları arasındaki mesafe ise yaklaşık olarak 0.3086 nm'dir.

2.7 Süperiletken Halka Fiziği

Tez çalışması kapsamında süperiletken halka/sarım kullanıldığı için süperiletken halkanın fiziği hakkında kuramsal bir açıklama verilecektir. Bir süperiletken halka boyunca elektrik alanın çizgisel integrali (kapalı yol boyunca) Faraday yasasına göre;

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Bir süperiletken halka içerisinde tam bir döngüde elektrik alanın çizgisel integrali daima sıfırdır. Burada süperiletken halka içerisinde manyetik akının sabit ve kuantumlu olduğu matematiksel olarak kolayca gösterilebilir. Halkanın içerisindeki manyetik akı belli bir kritik değeri aştığında elektriksel şok (quench) geçişi gözlenir. Halka süperiletken duruma geçiş şartlarına bağlı olmak kaydıyla eğer sıfır manyetik alanda soğutularak süperiletken hale geçirilmişse, toplam manyetik akı süperiletkenlik özelliği kayboluncaya kadar $\phi=0$ olarak kalmaya devam edecektir. Eğer süperiletken bir manyetik alan içerisinde soğutulmuşsa (Şekil 2.8), süperiletken hale geçer geçmez halka içerisindeki toplam akı soğutulduğu andaki manyetik akı değerine eşit akıya sahip olmaya devam edecektir. Eğer süperiletken halka sıfır alanda soğutulur ve süperiletken hale geçtikten sonra manyetik alan uygulanırsa, süperiletken durumdan normal duruma geçiş kritik bir manyetik akı ($\phi_c=B_c \cdot A$) değeri aşıldığında gerçekleşecektir. Bu özellik trafo sarımında dikkate alınarak süperiletken sarım yapıldığında quench şartlarındaki halkanın direnç değeri ile süperiletken durumdaki direnç değeri birbirinden çok farklı değerlerde olduğu için birincil bobinden ikincil bobine enerji (akı) transferi önemli ölçüde etkilenecektir. Materyal ve yöntemde bu özellikten yararlanarak yapılan manyetik akı transferi tipi hatalı akım sınırlayıcının çalışma prensibi detaylı olarak verilecektir.



Şekil 2.8 Manyetik alan altında süperiletken halka

2.8 Hatalı Akım Sınırlayıcılar

Hatalı akım sınırlayıcı olarak yüksek sıcaklık süperiletkenleri kullanmak, dağıtım şebekelerinde oluşan hatalı akım seviyelerini kontrol etme konusunda kayda değer çözümler sunmaktadır. Bu tür hatalı akım sınırlayıcılar; reaktörlerin veya yüksek empedanslı transformatörlerin aksine, normal çalışma durumunda devreye ek empedans yaratmadan hatalı akımları sınırlayabilmektedirler. Dünyada, süperiletken hatalı akım sınırlayıcıların gelişimi birçok kamu kurumu ve elektrik üreticileri tarafından takip edilmekte ve ticari ekipman olarak kullanıma hazır olması beklenmektedir.

Şebekede oluşan hatalı akımı ortadan kaldıracı adıma hali hazırda en çok tercih edilen yöntemlerden biri hatalı akım sınırlayıcı (HAS) uygulamasıdır. Bir HAS'ın sahip olması gereken en temel özellikler şunlardır:

- Hatalı akımın tepe değerinin ilk periyotta sınırlandırılması (transient),
- Hatalı akımın takip eden periyotlarda sınırlandırılması,
- Nominal koşullarda düşük empedans,
- Nominal koşullarda düşük güç kaybı,
- Arıza sonlandırıldıktan sonra, düşük empedans durumuna hızlı geri dönüş,
- HAS'ın çalışmasının gerilim dalgalanmasına neden olmadan devam etmesi,
- Yüksek güvenilirlikte ve uzun kullanım ömrüne sahip olması,
- Sistemin nominal çalışma koşullarını bozucu etkisi olmadan çalışması,
- Uzun süreli ya da kısa süreli olarak tekrarlanan hatalı akımlarda HAS performansının belirgin bir şekilde düşmemesi,

- 50'den az olmamak kaydıyla akım sınırlama modunda bakım gerektirmeden birçok defa çalışabilme kapasitesi (Slade vd. 1992),
- Nominal ve arıza durumlarında soğutma için uygun soğutma sıvısı veya güç tüketimi,
- Yeterince küçük hatalı akımlarda herhangi bir akım sınırlaması olmadan çalışması.

İdeal bir HAS normal çalışma koşullarında korunması planlanan devrede sıfır empedansa sahiptir ve çalışma koşullarının değişmesi ile HAS'ın empedansı hızlı bir şekilde (hatalı akımın ilk pikinden önce) hatalı akımı sınırlamak için gereken büyüklükte bir değere ulaşır. Gerçekte, bir HAS bulunduran şebekede normal koşullar altında gerilim dalgalanması elektrik şebeke yönetmeliğinde belirtilen sınırları aşmamalıdır. Bu durumda; HAS güç sisteminin normal çalışmasını ve hatların özelliklerini etkilemez (Sokolovsky vd. 2007).

Bir trafodaki güç kaybı nominal gücünün %1-2'si kadardır (Fassbinder 2013). HAS içerisindeki kayıp ise trafodaki kayıptan çok daha az olmalıdır (korunması düşünülen şebekenin nominal gücünün yaklaşık %0.01-0.25 arası) (Slade vd. 1992, Sokolovsky vd. 2004).

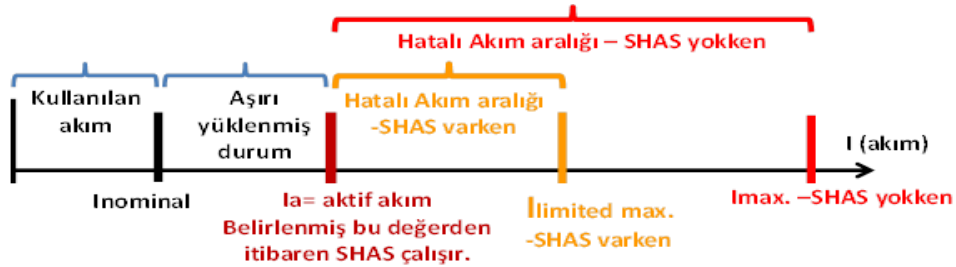
Hatalı akımın ilk pikinin sınırlanması için HAS'ın hızlı bir şekilde devreye girmesi gerekmektedir. Ancak çok hızlı bir şekilde empedansın artması, devrede tehlikeli yüksek gerilimlerin oluşmasına sebep olur. Literatürde 50-60 Hz frekans aralığında çalışan bir güç sistemi için, şebekede herhangi bir yüksek gerilime neden olmadan, 2-4 ms'lik bir süre ilk pikin sınırlandırılması için yeterlidir (Hoshino vd. 2001a,b, Meerovich vd. 1995a,b). Bir HAS tasarlanırken dikkat edilmesi gereken temel parametreler şunlardır:

- Normal çalışma koşullarındaki ve hata durumundaki empedans değerleri,
- HAS'ın devreye gireceği akım değeri,
- HAS'ın devreye gireceği süre,
- HAS'ın ilk çalışma durumuna dönme süresi (recovery time).

Hatalı akım sorununa daha umut verici çözümlerden biri de belirlenen bir akım değeri aşıldığında çok hızlı bir şekilde empedansını arttırabilen ve bu şekilde yüksek akım değerlerini sınırlayabilen Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı (SHAS) uygulamalarıdır. Süperiletken hatalı akım sınırlayıcılar; süperiletken malzemelerin 2 önemli özelliğini kullanmaktadırlar:

- Kritik akım değerinin altında mükemmel iletkenlik (sıfır direnç).
- Kritik akım değerinin üzerinde ve/veya yeteri kadar yüksek manyetik alan ve/veya sıcaklık değerinde, hızlı bir şekilde süperiletken durumdan normal iletken durumuna non-linear bir faz geçişi (S-N geçişi-quench durumu).

Genel olarak SHAS'ların çalışma prensibi şekil 2.9'da gösterilmektedir. Şebekedeki akım nominal akım değerinin üzerine çıktığında sistem aşırı yüklenmiş duruma geçer ve bu seviyede belirlenen aktif akım değerine kadar sistem zorlanır. Aktif akım değerine ulaşıldığında ise, SHAS hatalı akımı maksimum limit değerine kadar sınırlar. Bu aşamaya ulaşınca kadar geçen 60-80 ms içerisinde devre kesici sistemi kapatır. Eğer sistemde SHAS bulunmuyorsa, oluşan maksimum hatalı akım devreye zarar verir.



Şekil 2.9 SHAS'ların genel çalışma prensibi

Şekil 2.10'da ise verilen örnek devrede, aşağıdaki eşitsizlikler çerçevesinde oluşan SHAS ile sınırlanabilecek maksimum akım değeri, SHAS'ın empedansı ve SHAS'ın aktive olacağı akım değeri gibi çeşitli parametreler belirlenebilir.



Şekil 2.10 SHAS içeren örnek bir devre

$$I_{SHAS \text{ ile max. sınırlanan}} > \frac{V}{Z_{\min. SHAS} + Z_{\min. \text{şebeke}}} \quad (2.8)$$

$$Z_{\min. SHAS} > \frac{V}{I_{SHAS \text{ ile Maks. Sınırlanan}}} - Z_{\min. \text{Şebeke}} \quad (2.9)$$

$$I_a < \frac{V}{Z_{\max. SHAS} + Z_{\max. \text{Şebeke}}} \quad (2.10)$$

$$Z_{\max. SHAS} < \frac{V}{I_a} - Z_{\max. \text{Şebeke}} \quad (2.11)$$

$$\frac{V}{I_{SHAS \text{ ile Maks. Sınırlanan}}} - Z_{\min. \text{Şebeke}} < Z_{SHAS} < \frac{V}{I_a} - Z_{\max. \text{Şebeke}} \quad (2.12)$$

Yukarıda verilen eşitsizlikler kapsamında örnek bir hesaplama yapıldığında; 3-fazlı 6 kVA'lık bir SHAS için nominal akım değerimiz, her bir faz için 83.3 A'dir. Devrenin maksimum empedansı 0.05 ohm'dur. Bu parametrelere göre, maksimum sınırlanabilecek akım değerimiz 300 A'dir. Ayrıca SHAS'ın çalışması için belirlenmiş olan aktive olma akım değerimiz de 120 A'dir.

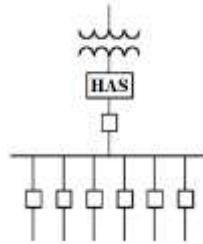
Süperiletkenler, sistemin çalışma koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterecek şekilde şebekeye bir empedans sunarak, sistem üzerinde tasarım kısıtlamalarını aşmak için bir yol ortaya koyar. Süperiletken hatalı akım sınırlayıcılar, normal çalışma durumunda çok düşük empedansa sahiptirler ve şebeke üzerinde görünmez bileşenlerdir. Bir hata durumunda, sınırlayıcı devreye empedans verir ve hatalı akımı sınırlar.

YSS'lerin gelişimi, ekonomik hatalı akım sınırlayıcıların gelişmesini sağlamaktadır. SHAS'lar ilk olarak 20 yıl önce çalışılmaya başlanmıştır. İlk tasarımlarda düşük sıcaklık süperiletkenleri kullanılmıştır ve malzemeler mutlak sıfırın birkaç derece üzerinde tüm dirençlerini kaybetmişlerdir. Düşük sıcaklık süperiletken malzemeler genellikle sıvı helyum ile soğutulmaktadırlar. Bunun yanı sıra soğutulmaları ve kullanımları hem zor hem de pahalıdır. YSS'in 1986 yılında keşfiyle bu malzemelerin daha yüksek sıcaklıklarda kullanımı ve nispeten daha ucuz olan sıvı azot ile soğutulabilmeleri sayesinde, süperiletken hatalı akım sınırlayıcılarla yeniden ilgilenilmeye başlanmıştır.

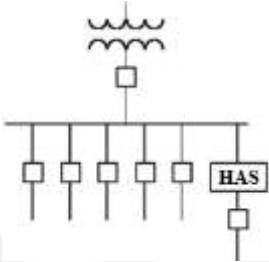
2.9 Hatalı Akım Sınırlayıcı Uygulamaları

Hatalı akım sınırlayıcılar bir dizi dağıtım ya da iletim bölgelerinde kullanılabilir. 3 ana uygulama bölgesi şekil 2.11-13'de gösterilmiştir. HAS'ın en çok kullanıldığı yer, şekil 2.11'deki gibi bara öncesinde yer alan/ana elektrik iletim yolu üzerindeki pozisyonudur. Bu uygulamada HAS'ın faydaları şu şekildedir:

- İletim yolu/bara üzerindeki artan talebi karşılamak üzere, kesici yükseltmeleri olmadan daha büyük bir transformatör kullanılabilir.
- Yeni güç seviyelerinde voltaj düzenlemesini sağlamak için kapasite olarak daha büyük ve aynı zamanda düşük empedanslı bir transformatör kullanılabilir.
- Transformatör üzerinde I^2t 'den kaynaklı oluşabilecek hata sınırlandırılmaktadır.
- Yüksek gerilim devresinde transformatörü besleyecek düşürülmüş hatalı akım akar ki bu durum orta gerilim bara/iletim yolu üzerinde oluşan bir hata sırasında, yüksek gerilim bara/iletim yolu yakınlarında gerilim düşümlerini minimize eder.



Şekil 2.11 HAS ana pozisyonunda

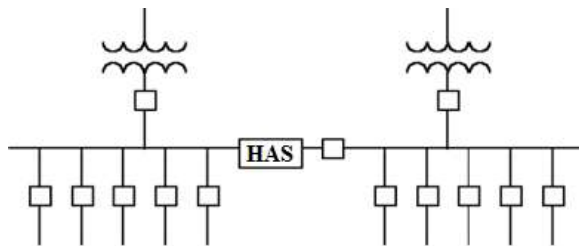


Şekil 2.12 HAS besleyici pozisyonunda

Bir HAS bara birleştirme pozisyonunda da kullanılabilir (Şekil 2.1). sınırlayıcı için küçük bir yük akım değeri gerekmektedir fakat bu sınırlama faydaları sağlar:

Bir HAS bara birleştirme pozisyonunda da kullanılabilir (Şekil 2.13). Böyle bir sınırlayıcı için küçük bir yük akım değeri gerekmektedir fakat bu sınırlayıcı aşağıdaki faydaları sağlar:

- Herhangi bir bara/iletim yolu üzerinde hata kapasitesinde çok yüksek artışlar olmaksızın, bağımsız baralar/iletim yolları birbirine bağlanabilir.
- Bir arıza sırasında sınırlayıcı üstündeki büyük bir gerilim düşümü, arızanın olmadığı bara/iletim yolu üzerinde gerilim seviyesini düzenler.
- Paralel yerleştirilmiş transformatörler; düşük sistem empedansı ve iyi gerilim düzenleme sonucunu doğurur, kademe değiştiren transformatörlerden kaçınılabilir.
- Her bir baranın/iletim yolunun kapasite artışı mümkündür, böylece transformatörün verimi daha iyi hale gelir.



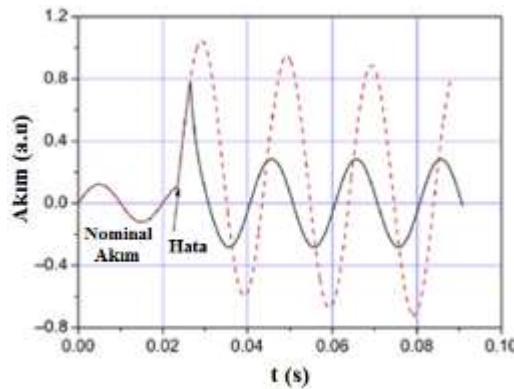
23

2.10 Süperiletken Hatalı Akım Sınırlayıcı Çeşitleri

Günümüze kadar çeşitli birçok süperiletken hatalı akım sınırlayıcı tasarımı ortaya çıkmıştır. Bunlar; rezistif, indüktif, doymuş çekirdek ve köprü tipi olarak verilebilir. Ayrıca farklı süperiletken malzemeler ve farklı tasarımsal değişikliklerle çeşitli hibrid tasarımlar da ortaya çıkmıştır (Giese ve Runde 1993, Giese 1995, Meerovich vd. 1995a,b, Leung 1997, Sokolovsky vd. 2003, Sokolovsky vd. 2004). Ayrıca birkaç SHAS prototipi yapılmış ve başarılı bir şekilde saha testleri tamamlanmıştır (Meerovich vd. 1995a,b, Paul vd. 1997, Gromoll vd. 1999, Noudem vd. 1999). Aynı zamanda birkaçı da ticarileştirilerek güç sistemlerine kurulumu gerçekleştirilmiştir.

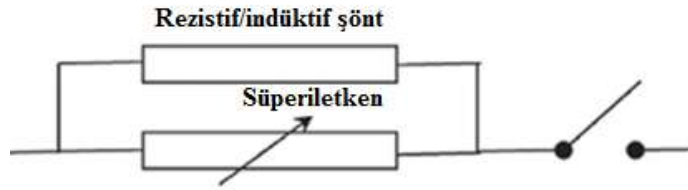
2.10.1 Rezistif tasarımlar

İlk tasarımda, bir süperiletkenin, süperiletken durumdayken sıfır olan elektriksel direncinin, kritik değerin üzerine çıktığında (normal duruma geçildiğinde-quench) belli bir değere sahip olma özelliği kullanılmıştır. En basit rezistif SHAS aktif bir süperiletken öge içerir ve bu korunması planlanan devreye seri olarak bağlanır. Devrede hatalı akım oluştuğunda, bu akım süperiletkende S-N geçişine sebep olur ve bu sayede süperiletken malzemenin elektriksel direnci artar. Tipik sınırlama sonuçları şekil 2.14'te genel olarak verilmektedir.



Şekil 2.14 Hatalı akım ve sınırlandırılmış akım (Meerovich ve Sokolovsky 2015)

Rezistif yaklaşım çok basit olmasına karşın, bu tasarımın yarattığı bazı zorluklar da vardır. Süperiletken öge boyunca alternatif akım akmaktadır. Normal çalışma rejiminde bu durum kayda değer AC kayıplara neden olacaktır. Aynı zamanda hatalı akımı sınırlama rejiminde çalışma süresi, süperiletkenin rezistif durumda ısınmasını önlemek ve çok çabuk bir şekilde eski haline dönmesi (süperiletken durum) için çok kısa olmalıdır. Rezistif tip SHAS'ın genel tasarımı şekil 2.15'te verilmektedir.



Şekil 2.15 Rezistif SHAS'ın şematik görünümü

Burada kullanılan şönt, rezistif SHAS'ın problemlerine çözümlerden biridir. Limitleme rejiminde empedansın ayarlanmasına yardımcı olur. Ayrıca, arıza durumunda oluşan yüksek hatalı akımın bir kısmı şöntün üzerinden geçirilerek süperiletkenin korunması sağlanır. Şöntün süperiletkene paralel bağlanması özellikle S-N geçişi anında oluşan aşırı ısınmanın önüne geçmesi ve hata ortadan kalktığında süperiletkenin çok çabuk bir şekilde eski haline dönmesi için önemlidir.

Birçok araştırma grubu ve şirket rezistif tipte SHAS üzerinde çalışmaya ve geliştirme yapmaya devam etmektedir (Paul vd. 1997, Gromoll vd. 1999, Noe ve Steurer 2007). Araştırmaların en çok yoğunlaştığı alanlar; AC kaybın düşürülmesi, sıcak bölge problemi (hot spot problem) ve çok çabuk süperiletkenin eski haline dönme süresi (recovery time) üzerinedir. İlk prototip rezistif SHAS'lar, yüksek sıcaklık, külçe ve ince film süperiletkenler kullanılarak yapılmıştır. Günümüzde ise kaplanmış iletkenler (coated conductors) üzerine tasarımlar yapılmaktadır. Kaplanmış iletkenlerle yapılan bifilar (non-indüktif) sarımlı pankek bobinler kullanılarak AC kayıplar minimize edilmeye çalışılmıştır (Clem 2008). Bu şekilde sarılan bobinler sayesinde, akım sarımının her bir yüzeyinde sürekli yön değiştirerek AC kaybın düşmesine neden olur. Sıcak bölge (hot spot) problemi ise süperiletkenin kalite ve sıcaklık artışının kontrolü ile

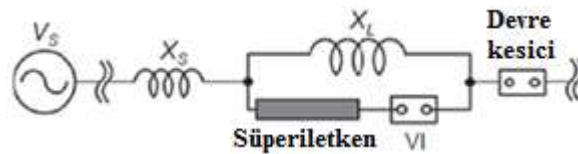
Çözölmüş durumdadır. Kaplanmış iletkenler bu problemin çözümünde önemli yer tutmaktadır.

Süperiletkenin normal durumdan tekrar süperiletken duruma geçme süresi (recovery time), tasarıma, soğutma koşullarına ve süperiletken malzemeye bağlıdır. Sıcaklığın çok fazla artması hem enerji kaybını arttırırken hem de geri dönüşüm süresini uzatmaktadır. SHAS tasarımındaki önemli bir görev de, geri dönüşüm süresinin (recovery time) yaklaşık 1 s olarak tutulmasıdır (Sokolovsky vd. 2004). Çok hızlı çalışabilen kesicilerin kullanılmasıyla enerji kaybının azalması sağlanabilir. Ancak, geleneksel kesiciler AC akımın 3-10 periyodunda akımı kesebilmekte olup, yarım periyotta hatalı akımı kesebilmeleri oldukça zordur.

2.10.2 Hibrid tasarımlar

Rezistif SHAS'ların dezavantajlarını (süperiletkenin ısınma problemi, geri dönüşüm süresi vb.) ortadan kaldırmak için hibrid tasarımlar geliştirilmiştir (Hori vd. 2006, Lee vd. 2008, Endo vd. 2009, Park vd. 2009, Lee vd. 2012, Na vd. 2012, Yim vd. 2013). Bu tasarımlarda aktif süperiletken öğeye seri olarak bir hızlı vakum kesici (fast vacuum interrupter) bağlanmıştır (Hori vd. 2006). S-N geçişi sırasında çok hızlı bir şekilde anahtarlama yapabilecek elektromekanik bir bağlantı da kullanılabilir (Park vd. 2009).

Şekil 2.16'da görölen ve Japon bir grup (Hori vd. 2006, Endo vd. 2009) tarafından geliştirilen hibrid tasarımda, süperiletken ve hızlı vakum kesici normal bir bobin ile şönt edilmiştir.



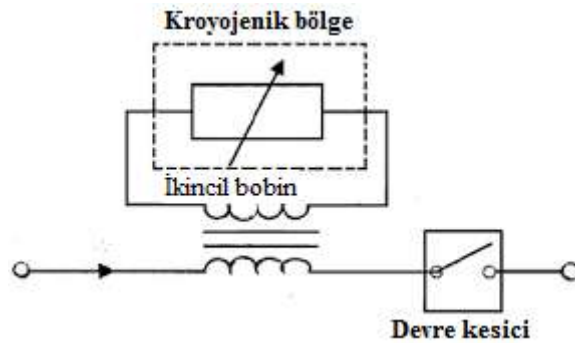
Şekil 2.16 Hibrid SHAS'ın şematik gösterimi (Endo vd. 2009)

V_S ve X_S sırasıyla jeneratör ve onun empedansının eşdeğeridir. X_L bobinin empedansı, VI ise vakum kesicidir.

Normal çalışma durumunda (süperiletken durumda) vakum kesici kapalıdır ve tüm akım süperiletken üzerinden akmaktadır. Hatalı akım oluşması durumunda, süperiletken normal duruma geçer ve hatalı akımın bir kısmı paralel bağlanmış bobin üzerinden geçmeye başlar. Bobinin manyetik alanı bir elektromanyetik itme plakası üzerinde ilerler ve vakum kesicinin kontaklarını ayırır. Akım sıfır olana kadar kontaklar arasında bir ark oluşur. Buradaki bobinin 2 fonksiyonu bulunmaktadır. Birincisi hatalı akımı sınırlama, ikincisi ise çok hızlı bir şekilde anahtarlama yapabilme durumudur. Hibrid cihazların prototipleri 3 tip süperiletken üzerine yapılmıştır. Bunlar Bi-2223 gümüş kılıflı teller, quench-melt-growth (QMG) külçe malzemeler ve YBCO ince filmlerdir.

2.10.3 İndüktif tasarımlar

Dağıtım şebekeleri için geliştirilen ilk SHAS tasarımı indüktiftir ve korumalı çekirdek (shielded-core) tasarımı veya trafo tipli tasarım olarak da adlandırılır. Bu tasarım kroyojenik bölgenin devrenin geri kalanından izole edilmesine olanak sağlar. Basitçe bu cihaz ikincil bobini kısa devre edilmiş bir trafoya benzemektedir ve tamamıyla bir süperiletken malzemeden veya bir süperiletken anahtarlama elemanı içeren bir bobinden de üretilebilir (Şekil 2.17) (Bashkirov vd. 1991, Giese 1995). Şekil 2.17’den de görüldüğü gibi bu trafonun birincil bobini korunacak olan iletim hattına seri olarak bağlanmıştır.



Şekil 2.17 Korumalı çekirdek tasarımı

Devrede hatalı akım yokken, ikincil bobin (veya süperiletken anahtar) süperiletken durumdadır. Birincil bobin tarafından üretilen manyetik akı, kısa devre edilmiş

süperiletken bobin üzerinde oluşan yüzey akımları tarafından oluşturulan ters manyetik akı ile dengelenmiştir. Cihazın empedansı, birincil ve ikincil bobinler arasında hava boşluğuna yayılan akı ile belirlenir. Kısa devre durumunda, ikincil bobindeki artan akım değeri kritik değerin üzerine çıkar ve süperiletken bobinin normal duruma geçmesine (direnç kazanmasına) neden olur. Eğer direnç enerji kaybına bağlı olarak bobinin indüktif reaktansından daha büyük olursa, ikincil bobin üzerinde indüklenen akım keskin bir şekilde azalır ve birincil bobinde oluşan manyetik akı artık dengelenemez bir hale gelir. Bu nedenle SHAS'ın empedansı artar ve hatalı akım sınırlanır. Bu tasarımın temel avantajları şunlardır:

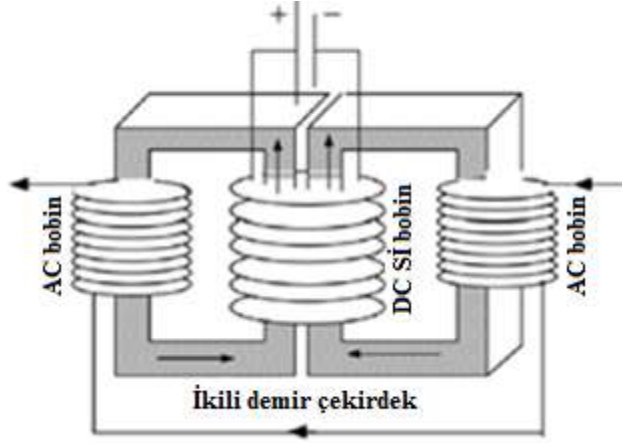
- Kroyojenik sıcaklıklarda buşing (current lead) kaybı yoktur.
- Süperiletken öge yüksek akım ama düşük voltaja tabidir.

Bu tasarımın popülerliği, çok sarımlı YSS bobinlerin ve aynı zamanda düşük direnç bağlantılı anahtarlama öğelerinin üretiminin teknolojik zorlukları ile birlikte ifade edilmektedir. Çeşitli indüktif SHAS tasarımlarının birbirlerinden temel farkını, manyetik çekirdeğin konfigürasyonu veya süperiletken halkaların düzeni oluşturmaktadır. Şekil 2.17'de açık çekirdek tasarımı görülmektedir. Büyük ölçekli cihazlar bu tasarıma göre yapılmışlardır. Birincil bobinle ilgili halkaların pozisyonunun içerde veya dışarda olmasının pek önemi yoktur (Sokolovsky vd. 2010).

YSS malzemelerin teknolojilerindeki ilerlemeyle birlikte, SHAS'lar için başka tasarımlar da düşünülmeye başlanmıştır. İndüktif SHAS tasarımının ilk haline benzeyen bir tasarım olarak, bu tasarıma bir YBCO külçe anahtarlama ögesiyle birlikte bir metal ikincil bobin kombine edilmiştir (Granados vd. 2002). Ancak en güçlü indüktif SHAS'lar, kaplanmış iletken (coated conductor) halka yığınları oluşturacak şekilde yapılmış tasarımlardır (Kaltenborn vd. 2011).

2.10.4 Doymuş çekirdek tipi tasarımlar

Doymuş çekirdek tipi SHAS'lar demirin dinamik manyetik karakteristiklerini kullanarak korunulması düşünülen hat üzerindeki indüktif reaktansı değiştirir. Tek fazlı doymuş çekirdek tipi SHAS'ın tasarımı şekil 2.18'de şematik olarak verilmektedir.



Şekil 2.18 Doymuş çekirdek tipi SHAS tasarımı

Şekil 2.18'den de görüldüğü gibi 2 adet demir çekirdek yan yana konumlandırılmış durumdadır. Küçük bir DC güç kaynağının süperiletken bobine DC sapma akımı ile enerji vermesiyle birlikte çok yüksek bir DC manyetik alan oluşur ki bu ferromanyetik çekirdeklerin mıknatıslanarak tam olarak doymuş duruma gelmesini sağlar.

Genel olarak yukarıda örnekleri verilmiş olan farklı tipte SHAS'ların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. SHAS'ların bu karşılaştırması çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1 SHAS’ların karşılaştırması (Meerovich ve Sokolovsky 2015)

HAS Tipi	Avantaj	Dezavantaj
Rezistif	Düşük hacim ve ağırlık. Kendi kendine çalışabilme. Anma “bias” akımı ve voltajı kolaylıkla arttırabilme.	Süperiletken boyunca yüksek voltaj düşümü. Süperiletkenlerde ısı dağılımı ile birlikte quench durumu. Şönt direncine ihtiyaç. Uzun geri dönüşüm süresi. Buşing kaybı vardır.
İndüktif	Buşing kaybı yoktur. Süperiletken boyunca düşük voltaj düşümü. Kendi kendini tetikleme. Fiziksel olarak kroyojenik ve normal kısım olarak ayrışma. Süperiletken veya soğutmada arıza durumunda ana akım yolunda kesintisizlik.	Büyük hacim ve ağırlık. Uzun geri dönüşüm süresi.
Hibrid I (Süperiletken tetikleme durumunda)	Kendi kendine çalışabilme. Düşük hacim ve düşük süperiletken maliyeti. Kısa geri dönüşüm süresi. Düşük güç kaybı.	Hızlı kesme durumunda kullanılamaması. Hatalı akımın ilk piki sınırlayamama durumu.
Hibrid II (Süperiletken tetikleme durumunda ve rezistif HAS)	Kendi kendine çalışabilme. Düşük hacim ve düşük süperiletken maliyeti. Kısa geri dönüşüm süresi. Düşük güç kaybı.	Hızlı kesme durumunda kullanılamama. Süperiletkenin hacmi, kayıplar, geri dönüşüm zamanı Hibrid I'e göre daha uzun. Karmaşık tasarım.
Köprü	S-N geçişi kullanılmıyor. Süperiletken DC kullanımda. Düşük güç kaybı. Kısa geri dönüşüm süresi.	Tristör, diyot gibi güç elektroniği ekipmanlarının kullanımı. Devrenin nominal rejiminin korunmasında güçlükler. Sınırlanan akımın zamanla artması. Bazı tasarımlar için DC kaynak ve özel kontrol sistemlerinin olma gerekliliği.
Doymuş Nüve “Saturated core”	S-N geçişi ve tetikleme yok. Süperiletken DC kullanımda. Düşük kayıplar. Bir hatadan sonra anında tam geri dönüşüm. Tedbirli çalışma.	Büyük hacim ve ağırlık. Bazı tasarımlar için DC kaynak ve özel kontrol sistemlerinin olma gerekliliği. Simetrik olmayan rejimlerde doymuş bobin üzerinde yüksek gerilim indüklenmesi.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde SHAS uygulamaları için üretilen MgB_2 ve YBCO külçe numunelerin üretimi ve üretilen 3 farklı tipteki SHAS hakkında bilgiler verilecektir.

3.1 MgB_2 Süperiletken Numunelerin Üretimi

Genel olarak MgB_2 külçe ve halka numuneler sitokiyometrik oranda tozlar karıştırılıp katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Tez çalışması kapsamında bu geleneksel yöntemin uygulanmasında bazı değişiklikler yapılmıştır. Şöyle ki, MgB_2 üretimi esnasında sitokiyometrik oranda hesaplanan B miktarının 2 katı kadar Mg tozu kullanılarak karışım hazırlanmıştır. Üretim aşamasında kullanılan başlangıç tozları çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Katı hal reaksiyon yöntemi için kullanılan başlangıç tozlarının özellikleri

Element ve Bileşikler	Safılık (%)	Molekül ağırlığı (gram/mol)	Rengi	Ergime sıcaklığı
Mg	99.8	24.312	Gri	650 °C
B	>98. 5	10.811	Siyah	2076 °C

Numuneler hazırlanırken kullanılan başlangıç tozlarının miktarları denklem (3.1) ile verilen kimyasal reaksiyonlar yardımıyla belirlenmiştir:



Üretilecek numunenin 1 molünün ağırlığı T olarak hesaplanmıştır. Kimyasal tepkimeye göre bir orantı kurulacak olursa; A, 1 mol başlangıç maddesinin ağırlığı, X ise numune hazırlığı için başlangıç madde miktarı, N hazırlanacak ana numunenin gram cinsinden miktarı ve K, tepkimedeki katsayı olmak üzere;

$$X = \frac{K.N(gr).A(mol/gr)}{T(mol/gr)} \quad (3.2)$$

ifadesi ile başlangıç toz miktarları hesaplanmıştır. Buna göre önce 10 gr'lık MgB_2 numunesinde bulunması gereken bor miktarı hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak karışıma girmesi gereken Mg tozu miktarı, B tozu miktarının iki katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Çizelge 3.2'de bu hesaplamaaya ait toz miktarları verilmiştir.

Çizelge 3.2 10 gr MgB_2 için hesaplanan başlangıç toz miktarları

Element	Toz miktarı (gr)
B	4.7
Mg	9.4
Toplam	14.1

Sonuç olarak 10 gr'lık numune hazırlamak için sitokiyometrik orandan daha fazla miktarda Mg tozu eklenmektedir. Fazlalık olarak görülen Mg, ısıtım işlem sürecinde gaz olarak uçmaktadır. Bu yöntemin en önemli özelliği; elde edilen numunelerin sertliğinin ve süperiletken özelliklerinin normal sitokiyometri ile hazırlanan numunelere oranla daha iyi olmasıdır.

Toz üretim aşamasına geçmeden önce, tez kapsamında yapılması planlanan halkalara özgü kalıplar tasarlanmış ve temin edilmiştir. Çizelge 3.3'te de görüldüğü üzere; farklı çap ve kalınlıklarda 4 adet halka şekilli kalıp ve 1 adet de 50 mm çapında disk şeklindeki kalıplar numune hazırlığında kullanılmıştır. Bu kalıplara ilişkin fotoğraflar ise şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Numune üretiminde kullanılan kalıpların ölçüleri

Kalıp Şekli	Dış Çap (mm)	İç Çap (mm)
Halka	25.00	15.00
Halka	35.00	25.00
Halka	45.00	35.00
Halka	50.00	35.00
Disk	50.00	-



Şekil 3.1 Numune hazırlamak için kullanılan kalıplar

MgB₂ üretimi için çizelge 3.2’de yer alan oranlar doğrultusunda başlangıç tozları hassas terazi ile tartılmıştır. Genel numune üretim aşamaları aşağıda verilmektedir:

1. Tozlar 15 dakika boyunca agat havan/bilyeli değirmende öğütülmüştür (1. öğütme işlemi).
2. Öğütülen tozlar krom tüp içerisine yerleştirilerek, önceden 1000 °C’ye çıkarılmış fırına konularak 15 dakika boyunca fırın içerisine Ar akışı sağlanarak ara ısıl işlem yapılmıştır.
3. İlk ısıl işlemden sonra soğuyan tozlar tekrar agat havan/bilyeli değirmende 15 dakika süreyle öğütülmüştür (2. öğütme işlemi).

Genel olarak numune üretimi aşamasında ilk 3 adım yukarıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki aşamalarda çeşitli değişiklikler vardır. Bu değişiklikler numune isimlerine göre aşağıda verilmektedir.

MgB₂s4 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımından 15 MPa’lık basınç uygulanarak 10x15x5 mm boyutlarında 1 adet dikdörtgen tablet üretilmiştir. Hazırlanan numuneler krom tüp içerisine, 2 gr Mg tozu eklenerek yerleştirilmiş ve tüpün her iki ucu pres altında sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C’de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

MgB₂p5 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımından 18 MPa'lık basınç uygulanarak, 35 mm dış çaplı halka ve aynı çapta disk olmak üzere 2 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan bu 2 numune de aynı krom tüp içerisine, üzerlerine 2 gr Mg eklenerek konulmuş ve tüpün uçları pres altında sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C'de 10 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra fırının sıcaklığı 850°C'ye kendiliğinden düştüğünde krom tüp fırından çıkarılmıştır.

MgB₂p6 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımından 6 ve 10 gramlık tozlar, 18 MPa'lık basınç uygulanarak, 35 mm dış çaplı halka olacak şekilde basılmıştır. Hazırlanan bu 2 numune de aynı krom tüp içerisine, üzerlerine 2 gr Mg eklenerek konulmuş ve tüpün uçları pres altında sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C'de 10 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂p7 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımından 6 gram tozdan, 18 MPa'lık basınç uygulanarak, 45 mm dış çaplı halka olacak şekilde basılmıştır. Hazırlanan bu numune krom tüp içerisine, üzerine 2 gr Mg eklenerek konulmuş ve tüpün uçları pres altında sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C'de 10 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂pd1 Numunesi için 21 gr'lık toz hazırlanmıştır. 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımından 25 MPa'lık basınç uygulanarak, 50 mm dış çaplı disk hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numune krom tüp içerisine, üzerlerine 2 gr Mg eklenerek konulmuş ve tüpün uçları pres altında sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C'de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hp4 Numunesi için toplam 21 gr'lık toz hazırlanmıştır. Hazırlanan toz karışımı 5 dakika süreyle bilyalı değirmende 400 rpm hızında karıştırılmıştır. Toz karışımından 13 gr tartılarak dış çapı 45 mm olan halka kalıbın içine yerleştirilmiştir. Preslenmeden önce

kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 20 MPa'lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 300 °C'ye ulaşınca kadar sıcak presleme işlemi yapılmıştır. Fırın soğuduktan sonra prestin çıkarılan halka, üzerine 4 gr Mg eklenerek krom tüp içine yerleştirilip uçları yine pres altında sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C'de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hp5 Numunesi için homojen bir karışım elde edebilmek adına etil alkol içerisine konulan 45 gramlık toz 10 dakika süreyle bilyalı değirmende 400 rpm hızında karıştırılmıştır. Bilyalı değirmenden çıkarılan etil alkol ve toz karışımı, vakumlu etüvde alkolün uçması için 5 saat süreyle 100 °C'de kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Vakumlu etüvden çıkarılan toz karışımı daha sonra krom tüp içerisine yerleştirilmiş ve tüpün her iki ucu sıkıca kapatılmıştır. 1000 °C'ye önceden ısıtılmış fırın içine yerleştirilen tüp 15 dk boyunca Ar atmosferi altında ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra soğuması için dışarı alınan krom tüp içerisinden çıkarılan toz karışımı tekrar bilyalı değirmende 10 dk süreyle 400 rpm hızında öğütülmüştür. Öğütme işleminden sonra elde edilen toz 45 µm'lik elekten geçirilmiştir. Elde edilen toz karışımından 15 gr tartılarak dış çapı 45 mm dış çapa sahip halka kalıbın içine yerleştirilmiştir. Yine preslenmeden önce kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 20 MPa'lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 300 °C'ye ulaşınca kadar sıcak presleme işlemi yapılmıştır. Fırın soğuduktan sonra prestin çıkarılan disk krom tüp içerisine, üzerine 4 gr Mg tozu eklenerek yerleştirilip tüpün uçları yine pres altında uçları sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C'de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hp9 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımı 45 µm'lik elekten geçirilmiştir. Elekten geçirilen tozdan 10 gr tartılarak dış çapı 45 mm olan halka kalıbın içine yerleştirilmiştir. Preslenmeden önce kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 20 MPa'lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 300 °C'ye ulaşınca kadar sıcak presleme işlemi

yapılmıştır. Fırın soğuduktan sonra prestan çıkarılan halka, üzerine 4 gr Mg eklenerek krom tüp içine yerleştirilip yine pres altında uçları sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C’de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hp10 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımı 45 µm’lik elekten geçirilmiştir. Elekten geçirilen tozdan 15 gr tartılarak dış çapı 50 mm olan halka kalıbın içine yerleştirilmiştir. Preslenmeden önce kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 20 MPa’lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 300°C’ye ulaşınca kadar sıcak presleme işlemi yapılmıştır. Fırın soğuduktan sonra prestan çıkarılan halka, üzerine 4 gr Mg eklenerek krom tüp içine yerleştirilip yine pres altında uçları sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C’de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hpd1 Numunesi için toplam 45 gramlık toz karışımı hazırlanmıştır. 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımı 45 µm’lik elekten geçirilmiştir. Sonra 15 gr toz tartılarak dış çapı 5 cm olan disk kalıbın içine yerleştirilmiştir. Preslenmeden önce kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 25 MPa’lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 400 °C’ye ulaşınca kadar sıcak presleme işlemi yapılmıştır. Fırın soğuduktan sonra prestan çıkarılan disk, üzerine 4 gr Mg eklenerek krom tüp içine yerleştirilip yine pres altında uçları sıkıştırılarak kapatılmıştır. 700 °C’de 10 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hpd2 Numunesi için toplam 45 gramlık toz karışımı hazırlanmıştır. 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımı 45 µm’lik elekten geçirilmiştir. Sonra 15 gr toz tartılarak dış çapı 5 cm olan disk kalıbın içine yerleştirilmiştir. Preslenmeden önce kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 25 MPa’lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 400 °C’ye ulaşınca kadar sıcak presleme işlemi yapılmıştır. 400 °C’de 45 dakika sıcak pres altında numune

bekletilmiştir. Fırın soğuduktan sonra presten çıkarılan disk, üzerine 4 gr Mg eklenerek krom tüp içine yerleştirilip yine pres altında uçları sıkıştırılarak kapatılmıştır. 700 °C’de 20 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hpd3 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımı 45 µm’lik elekten geçirilmiştir. Sonra 15 gr toz tartılarak dış çapı 5 cm olan disk kalıbın içine yerleştirilmiştir. Preslenmeden önce kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 25 MPa’lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 400 °C’ye ulaşıncaya kadar sıcak presleme işlemi yapılmıştır. 400 °C’de 60 dakika sıcak pres altında numune bekletilmiştir. Fırın soğuduktan sonra kalıptan çıkarılan disk, üzerine 4 gr Mg eklenerek krom tüp içine yerleştirilip yine pres altında uçları sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C’de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra krom tüp fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

MgB₂hpd4 Numunesi için 2. öğütme işleminden sonra elde edilen toz karışımı 45 µm’lik elekten geçirilmiştir. Sonra 15 gr toz tartılarak dış çapı 5 cm olan disk kalıbın içine yerleştirilmiştir. Preslenmeden önce kalıbın dışına halka şekilli fırın yerleştirilerek sıcak presleme işlemine hazırlık yapılmıştır. 25 MPa’lık basınç uygulanarak ve oda sıcaklığından 400 °C’ye ulaşıncaya kadar sıcak presleme işlemi yapılmıştır. 400 °C’de 75 dakika sıcak pres altında numune bekletilmiştir. Fırın soğuduktan sonra kalıptan çıkarılan disk, üzerine 4 gr Mg eklenerek krom tüp içine yerleştirilip yine pres altında uçları sıkıştırılarak kapatılmıştır. 1000 °C’de 15 dk süreyle Ar atmosferi altında sinterleme işlemi yapılmıştır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra krom tüp fırının dışına çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır.

Çizelge 3.4’te üretilen MgB₂ numunelerinin üretim parametreleri yer almaktadır. Üretilen disk ve dikdörtgen şekilli numuneler karakterizasyon için kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Üretilen MgB₂ numuneleri ve üretim parametreleri

Numune				Sıcak Presleme		Sinterleme	
Adı	Şekli	Boyutu	Presleme	Sıcaklık	Süre	Sıcaklık	Süre
MgB ₂ hp4	Halka	45 mm dış çap- 35 mm iç çap	20 MPa	300°C	-	1000°C	15 dk
MgB ₂ hp5	Halka	45 mm dış çap- 35 mm iç çap	20 MPa	300°C	-	1000°C	15 dk
MgB ₂ hp9	Halka	45 mm dış çap- 35 mm iç çap	20 MPa	300°C	-	1000°C	15 dk
MgB ₂ hp10	Halka	50mm dış çap- 45 mm iç çap	20 MPa	300°C	-	1000°C	15 dk
MgB ₂ hpd1	Disk	50 mm çap	25 MPa	400°C	-	700°C	10 dk
MgB ₂ hpd2	Disk	50 mm çap	25 MPa	400°C	45 dk	700°C	20 dk
MgB ₂ hpd3	Disk	50 mm çap	25 MPa	400°C	60 dk	1000°C	15 dk
MgB ₂ hpd4	Disk	50 mm çap	25 MPa	400°C	75 dk	1000°C	15 dk
MgB ₂ p5	Halka/Disk	35 mm dış çap- 25 mm iç çap/ 35 mm dış çap	18 MPa	-	-	1000°C	10 dk
MgB ₂ p6	Halka	35 mm dış çap- 25 mm iç çap	18 MPa	-	-	1000°C	15 dk
MgB ₂ p7	Halka	45 mm dış çap- 35 mm iç çap	18 MPa	-	-	1000°C	15 dk
MgB ₂ s4	Dikdörtgen	10mm x 15mm x 5 mm	15 MPa	-	-	1000°C	15 dk
MgB ₂ pd1	Disk	50 mm çap	25 MPa	-	-	1000°C	15 dk

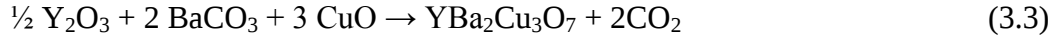
3.2 YBCO Süperiletken Numunelerin Üretimi

YBCO numuneler ilk katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak, daha sonra ise eritme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. YBCO üretimi için kullanılan başlangıç tozları ve özellikleri çizelge 3.5’te verilmektedir.

Çizelge 3.5 YBCO üretiminde kullanılan başlangıç tozları ve özellikleri

Element ve Bileşikler	Safılık (%)	Molekül ağırlığı (gram/mol)	Rengi	Ergime sıcaklığı
Ba(OH) ₂ *8H ₂ O	≥ 98	315,48	Beyaz	78 °C
CuCO ₃ *Cu(OH) ₂	≥ 95	221,12	Yeşil	200 °C
Y ₂ O ₃	99.99	225.81	Beyaz	2425 °C
BaCO ₃	99.999	197.34	Beyaz	811 °C
CuO	99.99	79.545	Siyah	1326 °C

Katı hal reaksiyon yöntemi için;



denkleminde yer alan sitokiyometri göz önüne alınarak başlangıç tozları hazırlanmıştır. Denklem (3.2) kullanılarak hazırlanan 10 gr'lık YBCO için örnek hesaplama çizelge 3.6'da verilmektedir.

Çizelge 3.6 10 gr YBCO için hesaplanan başlangıç toz miktarları

Bileşik	Toz miktarı (gr)
Y ₂ O ₃	1.513
BaCO ₃	5.289
CuO	3.198
Toplam	10.00

Katı hal reaksiyon yöntemi kullanılarak üretilen YBCO1, YBCO2, YBCO3 numunelerinin üretimi hakkındaki bilgiler aşağıda verilmektedir.

YBCO1 Numunesi için 10 gr numune çizelge 3.6'daki oranlarda başlangıç tozları tartılmıştır. Toz karışımı bilyeli değirmende 6 saat süreyle 75 rpm hızla öğütülmüştür. Daha sonra öğütülmüş toz karışımı ilk kalsinasyon işlemi için alümina pota içerisinde tüp fırın içine yerleştirilmiştir. Oda sıcaklığından başlayarak 5 °C/dk ısıtma hızıyla 880 °C'ye ulaşılmış ve bu sıcaklıkta 24 saat beklenilmiştir. Daha sonra 3 °C/dk hızla oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Soğuyan toz karışımı 1 saat süreyle agat havanda tekrar öğütülmüştür. Aynı işlem bu sefer 910 °C hedef sıcaklık seçilerek tekrarlanmıştır (ikinci kalsinasyon işlemi). Elde edilen toz karışımından 1,5 gr'lık dikdörtgen tablet 5 MPa'lık basınç uygulanarak preslenmiştir. Daha sonra tablet numune fırına yerleştirilerek sinterleme işlemine geçilmiştir. 3 °C/dk ısıtma hızıyla 940°C'ye ısıtılan fırın, bu sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş ve sonunda 1 °C/dk hızla soğutma işlemine geçilmiştir. Fırın 500 °C'ye indiğinde, bu sıcaklıkta 2 saat süreyle tüp fırının içine O₂ gazı verilmiştir. 2 saatin sonunda yine 1 °C/dk hızla fırın oda sıcaklığına kadar O₂ gazı akışı altında soğutulmuştur.

YBCO2 Numunesi için sitokiyometrik hesaplama yapılarak toz karışımı hazırlanmıştır (11.27 gr). Bir önceki numune hazırlama işlemindeki basamaklar aynen uygulanmış

olup, sadece 50 rpm hızında öğütme yapılmıştır. Ayrıca 1. ve 2. kalsinasyon işlemlerindeki ısıtma ve soğutma hızı 5 °C/dk olacak şekilde ayarlanmıştır. 2. kalsinasyondan sonra elde edilen toz karışımından 1.2 gr'lık dikdörtgen tablet 5 MPa'lık basınç uygulanarak üretilmiştir. Daha sonra tablet numune fırına yerleştirilerek sinterleme işlemine geçilmiştir. 1 °C/dk ısıtma hızıyla 960 °C'ye ısıtılan fırın, bu sıcaklıkta 30 saat bekletilmiş ve sonunda 1 °C/dk hızla soğutma işlemine geçilmiştir. Fırın 600 °C'ye indiğinde, bu sıcaklıkta 6 saat süreyle tüp fırının içine O₂ gazı verilmiştir. 6 saatin sonunda yine 1 °C/dk hızla fırın oda sıcaklığına kadar O₂ gazı akışı altında soğutulmuştur.

YBCO3 Numunesi için sinterleme aşamasına kadar toz hazırlama ve kalsinasyon süreci YBCO2 numunesi ile aynıdır. Hazırlanan numune oda sıcaklığında fırın içine yerleştirilmiştir. Numune, 5 °C/dk ısıtma hızıyla 945 °C'ye ısıtılan fırın içinde 24 saat bekletilmiştir. Sonra 5 °C/dk hızla soğutma işlemine geçilmiştir ve bu anda sisteme O₂ gazı vermeye başlanmıştır. Fırın 500 °C'ye indiğinde, bu sıcaklıkta 6 saat süreyle O₂ gazı akışı altında fırın içinde bekletilmiştir. 6 saatin sonunda yine 1 °C/dk hızla fırın oda sıcaklığına kadar O₂ gazı akışı altında soğutulmuştur. Çizelge 3.7'de katı hal reaksiyon yöntemiyle üretilen YBCO numunelerin ısıtma işlem detayları verilmektedir.

Çizelge 3.7 Katı hal reaksiyon yöntemiyle üretilen YBCO numunelerin işlem detayları

Numune adı	Isıtma hızı (°C/dk)	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Sinterleme süresi (saat)	Soğutma hızı (°C/dk)	O ₂ verme sıcaklığı/ Süresi (°C/saat)	Fırın soğutma hızı (°C/dk)
YBCO1	3	940	24	1	500/2	1
YBCO2	1	960	30	5	600/6	1
YBCO3	5	945	24	5	500/6	1

Eriyik YBCO üretiminde; BaCO₃ malzemesinin sertliğinden ve ayrıca YBCO üretimi esnasında safsızlığa neden olmasından dolayı kullanımından vazgeçilip, onun yerine Ba(OH)₂*8H₂O kullanılmıştır. Yine CuO malzemesinin hazır olarak kullanılmasının yerine, daha saf olması için CuCO₃*Cu(OH)₂ karışımından CuO elde edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca süperiletken özelliklerin iyileştirilmesi için YBCO malzemesinin yapısında farklı oranlarda green faz (Y₂Ba₁Cu₁O₅-Y211) oluşturulması için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Eritme yöntemi kullanılarak iki seri numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki sitokiyometrik oranlarda üretilen MT-2, MT-3 ve MT-4 numuneleridir. Bu numunelerinin üretimi hakkındaki bilgiler aşağıda verilmektedir.

MT-2 Numunesi için sitokiyometrik oranlarda başlangıç tozları (BaCO_3 , Y_2O_3 ve CuO) karıştırılarak 30 gr'lık YBCO malzemesi hazırlanmıştır. Daha sonra karışım 5 dk boyunca, 300 rpm hızla bilyalı değirmende homojen bir yapı elde edebilmek için karıştırılmıştır. Elde edilen toz karışımı oda sıcaklığından 5 °C/dk hızla 920 °C'ye çıkacak şekilde ayarlanmış fırının içine yerleştirilmiştir ve burada 10 saat kalacak şekilde kalsinasyon işlemi yapılmıştır. Fırından çıkarılan toz içine bir miktar YBCO tek kristal tozu karıştırılarak 3 cm çapındaki disk kalıbın içine yerleştirilmiştir. 7.5 MPa'lık basınç uygulanarak preslenen disk numune, daha sonra tabanına bir miktar Y_2O_3 tozu konulmuş alümina pota içerisine yerleştirilmiştir. Eritme işlemi için fırına konulan malzeme 2.5 °C/dk hızla 1030 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 90 dk bekletilmiştir. Daha sonra 2 °C/dk hızla 990 °C'ye ve bu sıcaklıkta hiç bekletilmeden 0.8 °C/saat hızla da 950 °C'ye inmesi sağlanmıştır. Son olarak ise 950 °C'de hiç bekletilmeden oda sıcaklığına 1 °C/dk hızla soğutulmuştur. Eritme işlemi tamamlandıktan sonra fırın tekrar 500 °C'ye kadar ısıtılmış ve numuneye burada 24 saat boyunca O_2 verilmesi sağlanmıştır.

MT-3 Numunesi için sitokiyometrik oranlarda başlangıç tozları (BaCO_3 , Y_2O_3 ve CuO) karıştırılarak 60 gr'lık YBCO malzemesi hazırlanmıştır. Daha sonra karışım 5 dk boyunca, 300 rpm hızla bilyalı değirmende homojen bir yapı elde edebilmek için karıştırılmıştır. Elde edilen toz karışımı oda sıcaklığından 5 °C/dk hızla 920 °C'ye çıkacak şekilde ayarlanmış fırının içine yerleştirilmiştir ve burada 10 saat kalacak şekilde kalsinasyon işlemi yapılmıştır. Fırından çıkarılan toz içine bir miktar YBCO tek kristal tozu karıştırılarak 6 cm dış çapındaki halka kalıbın içine yerleştirilmiştir. 7.5 MPa'lık basınç uygulanarak preslenen halka numune, daha sonra tabanına bir miktar Y_2O_3 tozu konulmuş alümina pota içerisine yerleştirilmiştir. Eritme işlemi için fırına konulan malzeme 2.5 °C/dk hızla 1020 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 90 dk bekletilmiştir. Daha sonra fırının sıcaklığının 2 °C/dk hızla 990 °C'ye ve bu sıcaklıkta hiç bekletilmeden 0.8 °C/saat hızla da 950 °C'ye inmesi sağlanmıştır. Son olarak ise

950 °C’de hiç bekletilmeden oda sıcaklığına 1 °C/dk hızla inmesi sağlanmıştır. Eritme işlemi tamamlandıktan sonra fırın tekrar 500 °C’ye kadar ısıtılmış ve numuneye burada 24 saat boyunca O₂ verilmesi sağlanmıştır.

MT-4 Numunesi için sitokiyometrik oranlarda başlangıç tozları (BaCO₃, Y₂O₃ ve CuO) karıştırılarak 60 gr’lık YBCO malzemesi hazırlanmıştır. Daha sonra karışım 5 dk boyunca, 300 rpm hızla bilyalı değirmende homojen bir yapı elde edebilmek için karıştırılmıştır. Elde edilen toz karışımı oda sıcaklığından 5 °C/dk hızla 920 °C’ye çıkacak şekilde ayarlanmış fırının içine yerleştirilmiştir ve burada 10 saat kalacak şekilde kalsinasyon işlemi yapılmıştır. Fırından çıkarılan toz içine bir miktar YBCO tek kristal tozu karıştırılarak ve ayrıca silikon yağı sıkılarak 5 cm dış çapındaki halka kalıbın içine yerleştirilmiştir. 7.5 MPa’lık basınç uygulanarak preslenen halka numune, daha sonra tabanına bir miktar Y₂O₃ tozu konulmuş alümina pota içerisine yerleştirilmiştir. Eritme işlemi için fırına konulan malzeme 2.5 °C/dk hızla 1020 °C’ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 30 dk bekletilmiştir. Daha sonra 2 °C/dk hızla 980 °C’ye ve bu sıcaklıkta hiç bekletilmeden 0.5 °C/saat hızla da 950 °C’ye inmesi sağlanmıştır. Son olarak ise 950 °C’de hiç bekletilmeden oda sıcaklığına 1 °C/dk hızla inmesi sağlanmıştır. Eritme işlemi tamamlandıktan sonra fırın tekrar 500 °C’ye kadar ısıtılmış ve numuneye burada 24 saat boyunca O₂ verilmesi sağlanmıştır.

Eritme yöntemi kullanılarak üretilen ikinci seride ise, YBCO malzemesine belirli oranlarda Y-211 (green faz) fazı eklenmiştir. Üretilen saf, %10, %15 ve %20 Y-211 fazı eklenmiş numuneler bir arada ısıtılmalara tabi tutulmuştur (YBGP0, YBGP10, YBGP15 ve YBGP20 numuneleri). %20 oranında Y-211 fazı eklenmiş 20 gr’lık numune hazırlamak için kullanılacak başlangıç malzemelerinin ağırlıkları; Y₂O₃= 4.4828 gr, CuO= 6.2237 gr, Ba(OH)₂ *8H₂O = 17.3066 gr olarak belirlenmiştir.

YBGP0, YBGP10, YBGP15 ve YBGP20 numunelerinin üretim aşamaları şu şekilde gerçekleştirilmiştir: İlk olarak saf CuO elde edebilmek için bakır plaka içerisinde CuCO₃*Cu(OH)₂ karışımı, 550 °C’de 30 dk boyunca bekletilmiştir. Bu işlem sonunda plaka içerisinde saf CuO oluşmuştur. Daha sonra oluşan CuO içerisine 20 gr’lık numune hazırlamak için, 4.4828 gr Y₂O₃ eklenmiştir ve bu karışım etil alkol içinde, alkol kendi

kendine uçana kadar bırakılmıştır. Alkol yardımıyla homojen bir yapıya kavuşan karışım 1020 °C’de 1 saat ısıtım altında tutulmuştur. Isıtım tamamlandıktan sonra elde edilen karışım 17.3066 gr Ba(OH)₂*8H₂O ile birleştirilerek fırına yerleştirilmiştir. İlk önce, oda sıcaklığından 6 saat sonunda 830 °C’ye ulaşacak şekilde, daha sonra 830 °C’de 2 saat bekleyecek şekilde ısıtım işlemine tabi tutulmuştur. Isıtım sonunda oluşan malzeme kırılıp elle agat havanda yeniden öğütülmüştür. Daha sonra ise kare kalıpta 30 MPa basınç uygulanarak presleme işlemi yapılmıştır. Elde edilen numune için ısıtım işlem prosedürü şu şekildedir:

Oksijen akışı altında, oda sıcaklığından 945 °C’ye 18 saatte çıkılmıştır ve bu sıcaklıkta 20 saat beklenmiştir. Süre sonunda hızlı bir şekilde (fırının maksimum gücünde) 1050°C’ye çıkılıp bu sıcaklıkta 5 dk beklenmiştir. Daha sonra yine fırın soğutması ile 990 °C’ye inilmiştir. Burada hiç bekleme yapılmadan 945 °C’ye 6 saatte inilmiştir. Yine bu sıcaklıkta hiç bekleme yapılmadan oda sıcaklığına 16 saatte inilmiştir ve böylece ilk ısıtım işlemi tamamlanmıştır. Üretilen malzemenin XRD ve AA alınganlık ölçümleri tamamlandıktan sonra aynı numune ikinci bir ısıtım işlemine tabi tutulmuştur. Isıtım işlem prosedürü şu şekildedir:

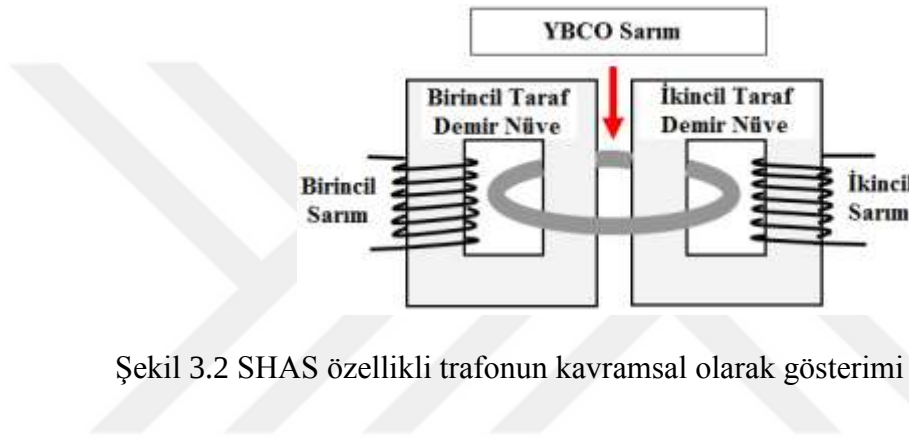
Oksijen akışı altında, oda sıcaklığından 1032 °C’ye 24 saatte çıkılmıştır ve burada 30 dk beklenmiştir. Daha sonra çok hızlı bir şekilde (fırın maksimum gücünde) 1052 °C’ye çıkılıp burada 10 dk beklenmiştir. Süre sonunda fırın soğutması ile 1000 °C’ye inilmiş ve burada hiç bekleme yapılmadan 30 saatte 945 °C’ye inilmiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra ise 24 saatte oda sıcaklığına iniş gerçekleştirilmiştir.

3.3 Çeşitli SHAS Tasarımları ve Üretimleri

Tez çalışması kapsamında 3 farklı tipte SHAS üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla manyetik akı transferi yöntemiyle yapılan SHAS, indüktif SHAS ve rezistif SHAS’tır. SHAS üretiminde ticari olarak satın alınan polikristal külçe YBCO ve 2. nesil kaplanmış iletken (coated conductor) YBCO süperiletkenleri kullanılmıştır.

3.3.1 Manyetik akı transferi tipi SHAS tasarımı

Literatürde tamamen süperiletken tel/şerit ya da bakır tel/şerit (konvansiyonel) kullanılarak sarılan trafolar mevcuttur. Bu iki trafo çeşidinin de birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tez kapsamında üretilen, bağımsız iki adet demir çekirdekli 3-fazlı 6 kVA'lık trafonun süperiletken bir sarım vasıtasıyla birbirine seri olarak bağlanması özelliği ile bir özgünlük taşımaktadır. Bu metodun şematik gösterimi şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 SHAS özellikli trafonun kavramsal olarak gösterimi (Ertekin 2016)

Şekil 3.2'deki tasarımda; YBCO sarımlar süperiletken fazda iken, birincil demir nüveden ikincil demir nüveye akı transferi vasıtasıyla kayıpsız enerji aktarılmaktadır. Hata anında süperiletken sarımın maruz kalacağı çok yüksek manyetik akı süperiletken sarımı normal duruma geçiş (quench) yaptırarak çiftlenmiş iki bağımsız demir nüveyi ayrıştırıp ikincil demir nüveye enerji akışının hızlı bir şekilde sınırlandırılmasını sağlamaktadır. Böyle bir quench durumunda ikincil sarımdaki gerilim aniden düşerek, hatalı akım kısa süre içerisinde sınırlandırılacaktır. Bu özelliği ile üretilen bu trafo SHAS olarak kullanılabilir. Bu tasarımda birbirinden bağımsız iki demir nüve ile birlikte bakır ve süperiletken sarımlar vardır. Diğer taraftan hatalı akım sınırlamaya yönelik tasarlanan süperiletken trafoların, sadece süperiletken sarımlardan oluştuğu ve bizim tasarımımdan farklı olduğu aşıkardır. Üretilen manyetik akı transfer tipi SHAS'ın bilinen süperiletken trafolarla teknik olarak karşılaştırması çizelge 3.8'de verilmiştir. Çizelge 3.8'de özellikleri verilen süperiletken trafolar (tek nüveli), hem birincil hem de ikincil bobinleri tamamıyla süperiletken malzeme kullanılarak hazırlanmaktadır. Manyetik akı transfer tipi trafoda ise sadece enerji transferini

sağlayabilmek için iki demir nüve arasında süperiletken bobin kullanılmıştır (Şekil 3.2). Bu durum süperiletken maliyetlerini azaltmaktadır.

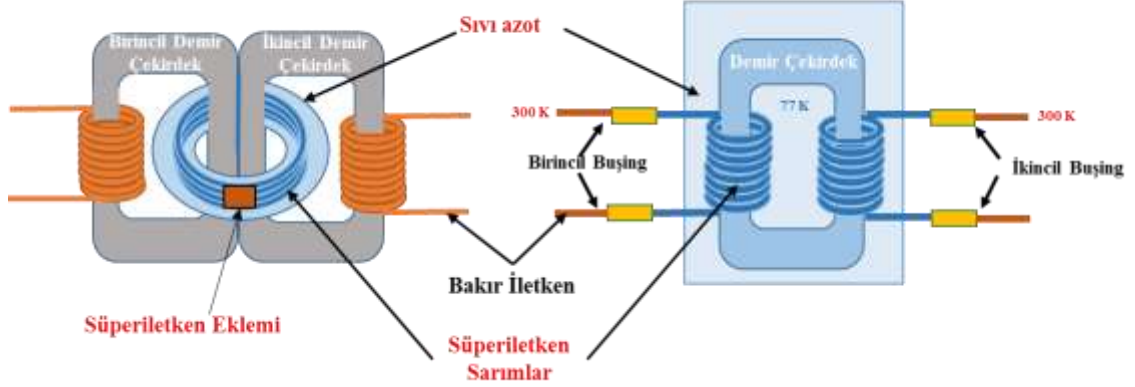
Çizelge 3.8 Süperiletken ve manyetik akı transfer tipi trafoların karşılaştırması

Teknik özellikler	Süperiletken Trafo	Manyetik Akı Transfer Tipi Trafo
Kullanılan Süperiletken bobin sayısı	İki bobin (birincil, ikincil)	Bir bobin
Kullanılan süperiletken miktarı ve maliyeti	Fazla	Az
Soğutulması gereken hacim miktarı	Fazla	Az
Nüvenin ısınmasından dolayı harcanan enerji	Fazla*	Az**
Kryostat tasarımı ve zorluğu	Zor	Kolay
Kryostat maliyeti	Fazla	Az
Kryostat enerji tüketimi	Fazla	Az
Kryojenik malzeme ihtiyacı	Fazla	Az
Buşing kaybı	Fazla	Yok

*Süperiletken sarımda akımın yüksek olmasından dolayı demir nüve manyetik doyum noktasına ulaşacaktır ve manyetik alan döngüsünde histerisis kaybı olacaktır. Bu kayıp soğutucu sıvı tarafından giderilmektedir.

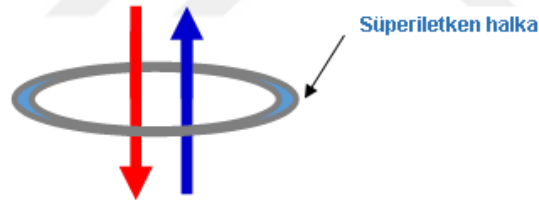
**Bu tür trafoda birincil ve ikincil bobinler normal bakır iletkenle sarıldığından dolayı daha düşük akımlarda çalışacağından, demir nüve doyum noktasına ulaşmadan manyetik akı döngüsü gerçekleşmektedir.

Bilindiği üzere YBCO süperiletkenlerin genel çalışma sıcaklığı, sıvı azot sıcaklığı olan 77.3 K'dir. Süperiletkenlerin çalışma sıcaklığı düşünüldüğünde, her iki çeşit trafo için de özel tasarım kryostata ve kryojenik sıvıya ihtiyaç vardır. Süperiletken trafolarda, tüm sistem (nüve, süperiletken bobinler vb.) soğutulurken; üretimini gerçekleştirdiğimiz trafoda sadece süperiletken bobinin soğutulması yeterli olmaktadır (Şekil 3.3). Bu nedenle süperiletken trafolarına göre soğutulması gereken hacim daha küçük ve bunun yanı sıra soğutma maliyetleri daha düşüktür. Ayrıca bilinen süperiletken trafoların elektrik şebekesi ile bağlantı noktası olan buşinglerinde ısı transferi kaynaklı bir kayıp ortaya çıkmaktadır. Üretimini gerçekleştirdiğimiz trafoda ise dış ortam ile herhangi bir fiziksel bağlantı söz konusu olmadığından dolayı böyle bir kaybın olmaması verimliliği arttırmakta ve önemli bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Sistemimizde YBCO sarımlardan oluşan kapalı bir halkada/sarımda sadece kontak noktasında küçük bir bara kullanır ve bunların hepsi soğutma sıvısı içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3 Manyetik akı transfer tipi ve süperiletken trafonun tasarımsal karşılaştırılması

Genel olarak; ürettiğimiz manyetik akı transfer tipi SHAS'ın temel çalışma prensibi Lenz Kanununa ve Süperiletken halka fiziğine dayanmaktadır. Buna göre süperiletken, üzerinde indüklenen akımın doğurduğu akıya ters yönde akı oluşturarak, içerideki net manyetik akıyı sıfırlama eğiliminde olur (Şekil 3.4). görünen kırmızı ok; kaynak tarafından oluşturulan manyetik akıyı, mavi ok ise; Lenz kanununa

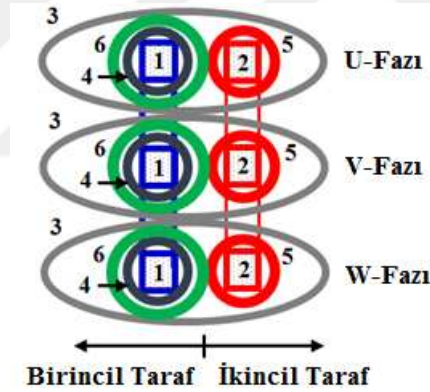


Şekil 3.4 Süperiletken halka içerisindeki manyetik akı değişimi

Şekil 3.4'e göre, bu akı değişimine tepki olarak süperiletken tarafından oluşturulan ters yönlü manyetik akıyı göstermektedir. Bu sistemin şematik gösterimi şekil 3.5'te verilmektedir.

Burada N_1 birincil taraftaki sarım sayısı, N_2 ikincil taraftaki sarım sayısı, V_1 birincil bobine uygulanan voltaj değeri, V_2 ikincil bobinde okunan voltaj değeri, i_{si} süperiletken üzerinde manyetik akı değişiminden kaynaklı oluşan akım değeri, $\phi_G(t)$ birincil demir nüvedeki manyetik akı değeri, $\phi_2(t)$ ikincil demir nüvedeki manyetik akı değeri, $\phi_{hava}(t)$ havaya sızan ve geri kazanılamayan ihmal edilebilir manyetik akı değeri, $\phi_{s1}(t)$ birincil demir nüvede oluşan akıya karşı süperiletken halkanın oluşturduğu ters yöndeki manyetik akı değeri, $\phi_{s2}(t)$ ikincil demir nüvede oluşan akıya karşı süperiletken halkanın oluşturduğu ters yöndeki manyetik akı değeri, R_1^m birincil demir nüvenin manyetik alana karşı gösterdiği direnç değeri (relüktans), R_2^m ikincil demir nüvenin manyetik alana karşı gösterdiği direnç değeri, $R_{yük}$ yükteki direnç değeridir.

Üretimi yapılan 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'ın şematik gösterimi şekil 3.6'da, detayları ise çizelge 3.9'da verilmektedir.



Şekil 3.6 3-fazlı 6 kVA'lık SHAS'ın şematik gösterimi

Çizelge 3.9 3-fazlı sistemin detayları

Gösterim	Açıklama
1	Birincil taraf (P-S) demir nüve (mavi)
2	İkincil taraf (S-S) demir nüve (kırmızı)
3	YBCO şerit (gri)
4	Birincil bakır sarımlı bobin (siyah)
5	İkincil bakır sarımlı bobin (kırmızı)
6	Birincil taraftaki referans bobini (bakır sarımlı) (yeşil)

Bu sistemin hazırlanmasında yapılan temel hesaplamalar şu şekildedir:

Öncelikli olarak kullanmış olduğumuz demir nüvenin kesit alanı fabrika verilerinden standart olarak 45.30 cm²'lik bir kesit alanına sahiptir. Genel trafo güç hesabından, trafonun gücü;

$$P \approx A^2 \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada P trafonun gücünü ve A ise kullanılacak demir nüvenin kesit alanını ifade etmektedir. Buna göre 6 kVA'lık 3-fazlı bir sistem için kullanılması gereken demir nüvenin yaklaşık olarak 44.72 cm²'nin üzerinde bir kesit alanına sahip olması gerekmektedir. Daha sonra bakır bobinlerin sarımı için gerekli olan bakır tellerin kesit alanı hesaplanmıştır. Gücümüz tek bir fazda 2 kVA olduğundan, bu sistem için nominal akım değerimiz; yaklaşık olarak 9.10 A olacaktır. Buna göre bir bakır telin ortalama 2.5 A/mm²'lik bir akım yoğunluğu taşıdığı varsayılırsa; minimum 2.15 mm çapında bakır tel kullanılması gerekmektedir. Üretim esnasında birincil bakır bobin için 2.5 mm çapında, ikincil bobin içinse 3 mm çapında bakır tel kullanılmıştır. Sarım sayıları ise birincil bobin için 150 sarım, ikincil bobin içinse 80 sarım olarak belirlenmiştir. Deneysel kontrol için birincil bobin üzerine yine 80 sarımlı bir referans bobini de sarılmıştır. İki bağımsız nüve birbirine YBCO süperiletken tel kullanılarak hiçbir elektriksel veya mekanik bağlantı olmaksızın bağlanmıştır (Şekil 3.7). Süperiletken tellerin soğutulabilmesi için uygun bir soğutma kabı kullanılmıştır. Deneyler sırasında ise sürekli sıvı azot ile doldurularak süperiletkenin bulunduğu ortamın sıcaklığının sıvı azot sıcaklığında kalması sağlanmıştır. İlk denemelerde yaşadığımız süperiletken telin yanması olayına çözüm olarak, süperiletken tellere paralel birer bakır kablo stabilizatör olarak sisteme entegre edilmiştir. Bu sayede süperiletken tel şok geçiş (quench) yaptığında üzerindeki yüksek akımın bir kısmı bakır kablo üzerinden geçecektir. Kullanılan YBCO telin (SF12050) kritik akım değeri $I_c = 254$ A'dır. Şekil 3.7'de de görüldüğü gibi süperiletken telin yüzeyi kapton şerit ve kağıt peçete ile kaplanarak süperiletken sargıların elektriksel yalıtımı sağlanmıştır. Hazırlanan sisteme ait görseller ise şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.7 3-fazlı 6 kVA'lık sisteme ait görseller

3.3.2 İndüktif tip SHAS tasarımı

Bu tasarım polikristal YBCO külçe kullanılarak üretilmiş indüktif tip bir SHAS'tır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen YBCO üretimleri sonucunda, numunelerde süperiletken özellikler görülmesine rağmen, uygulamaya yönelik kullanım potansiyeli yüksek numune üretimi gerçekleştirilememiştir. Uygulama açısından kullanılan polikristal YBCO yurt dışından hazır olarak satın alınmıştır. Halkanın dış çapı 7.5 cm ve iç çapı da 5.5 cm'dir. Numunenin büyük olması nedeniyle manyetik ve mekanik özellikleri incelenememiştir. Çünkü SHAS uygulaması için malzemenin halka bütünlüğünün bozulmaması gerekmektedir. Burada ilk önce süperiletken malzemenin normal iletken duruma geçtiği kritik akım değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için ilk deneyde sarım sayısı $N_1=120$, ikinci deneyde ise $N_2=200$ olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.8'de görülen sistem için;

$N_{1,2}$: bakır bobinin sarım sayısı.

I : Süperiletkenlikten normal iletkenliğe geçiş anında ölçülmüş akım değeri.

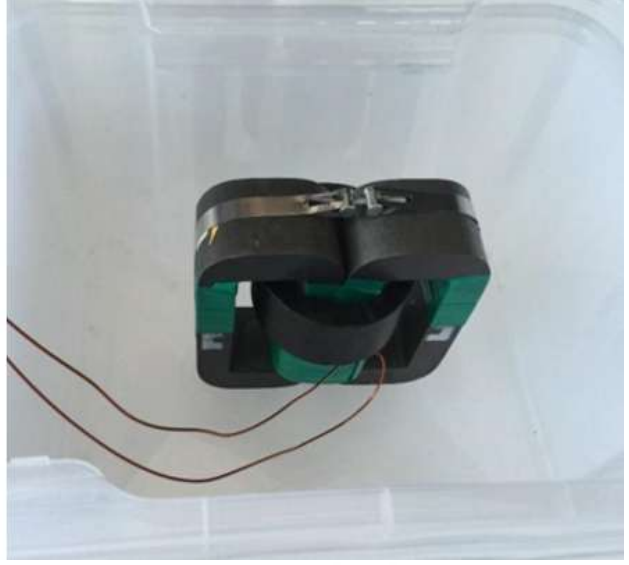
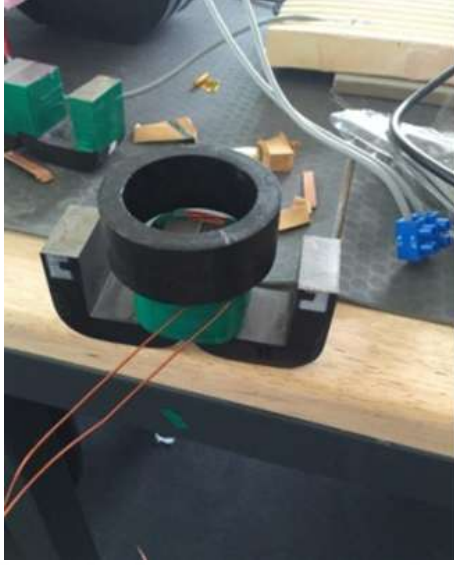
I_c : Yaklaşık olarak süperiletken üzerinden geçen maksimum akım değeri (kritik akım değeri)'dir.

$N_1=120$ sarım

$I=23$ A

$N_2=200$ sarım

$I=8.06$ A



Şekil 3.8 İndüktif SHAS için hazırlık aşaması

Bu değerler karşılığında süperiletken numunenin normal iletken duruma geçtiği anda üzerinden geçen akım değeri yaklaşık olarak belirlenebilir. YBCO malzeme üretimi sonucunda yapılan SHAS testlerinde maalesef iyi sonuçlar gözlenememiştir. Bunun en büyük sebebinin; malzemenin boyutlarının küçük ve buna bağlı olarak taşıyabileceği kritik akım yoğunluğunun düşük olmasına bağlanmaktadır. Çünkü bakır bobine hem 1-30 A aralığında akım verilmiş olmasına rağmen herhangi bir şok geçiş (quench) gözlenememiştir. Bu da malzemenin sahip olduğu kritik akım yoğunluğunun boyutuyla karşılaştırıldığında çok küçük olduğunu düşündürmektedir. Ancak üretimi yurt dışında gerçekleştirilmiş polikristal YBCO için bu testler başarılı sonuçlar vermiştir ve külçe malzemenin SHAS uygulamasında kullanılabilecek seviyede olduğu belirlenmiştir. Buna göre ilk denemede $N_1 \times I_1 = \text{Süperiletkenin Sarım sayısı} \times I_c$ yaklaşımından polikristal halkanın yaklaşık kritik akım değeri, 2760 A olarak hesaplanmıştır. Farklı bir günde bakır bobinin sarım sayısı 120'den 200'e çıkarılıp tekrar aynı ölçümle beraber hesap yapıldığında I_c değeri yaklaşık olarak 1612 A olarak bulunmuştur. Aradaki farkın, değişen sarım sayısı ve buna bağlı manyetik akıdaki değişimden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca soğutma koşullarının yeterli olmaması da bu duruma bir etken olabilir. Şöyle ki, deneyler sırasında süperiletken malzeme soğutma kabı içerisinde sabitlenememiştir. Buna bağlı olarak malzemede kritik akım değerine yaklaştıkça mekanik titreşimler artmıştır. Bu durum da belirlenen kritik akım değerinin düşmesinde bir etkindir.

Diğer bir tasarımda ise; bakır bobinin sarım sayısı 200'de tutularak şekil 3.9'daki sistem oluşturulup (YBCO polikristal malzeme üzerine yaklaşık 1.5 m uzunluğunda 13 sarımlı bakır kaplı YBCO süperiletken tel (SF4050) sarılmıştır), şok geçiş (quench) anında bakır bobin üzerinden geçen akım değeri ölçülmüştür. Burada süperiletken telin uçları bakır lama ve gümüş pasta ile birbirine bağlanmıştır. Süperiletken tel ve süperiletken polikristal halkanın farklı kritik akım değerleri olmasına karşın tek bir akım değerinde malzemelerin normal iletken durumuna geçtiği ve bu kritik akım değerinin yaklaşık olarak iki ayrı malzemenin toplam kritik akım değerlerine karşılık geldiği belirlenmiştir.



YBCO polikristal ve 13 sarımlı SF4050 ($I_c=80$ A)
Bakır kaplı süperiletken tel

Birincil bobin
 $N=200$
 $I_c=12,58 A_{rms} \times 200 \approx 2516$ A

Şekil 3.9 Süperiletken polikristal YBCO halka üzerine 13 sarımlı süperiletken tel

3.3.3 Rezistif tip SHAS tasarımı

Rezistif SHAS tasarımı bilinen en basit tasarımdır. Kuramsal temeller kısmında da bahsedildiği gibi devreye seri olarak süperiletkenin eklenmesiyle oluşturulan bir sınırlayıcıdır. Rezistif tasarımlarda genellikle kısa devre anında süperiletken malzemenin direncinin yüksek olması istendiğinden çok uzun malzemeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle deneyde kullanılan YBCO (SF4050) tel, yaklaşık 50 cm uzunluğunda bir strafora birbirine dokunmayacak şekilde sarılmıştır (Şekil 3.10). Deneysel düzenek 3-fazlı 6 kVA'lık olacak şekilde tasarlanmıştır. Buna göre her bir faz için şekil 3.10'daki gibi süperiletken sarımlar hazırlanmıştır. Elde olan süperiletken tel uzunluğuna göre her bir faz için sırasıyla; 14.3 m, 13.3 m ve 12 m olmak üzere süperiletken tel kesilmiştir. Sarımlar hazırlandıktan sonra her bir telin direnci oda sıcaklığında sırasıyla; 20 Ω , 19.3 Ω ve 17.8 Ω olarak ölçülmüştür. Buna göre her bir süperiletken sarım yine aynı sırayla;

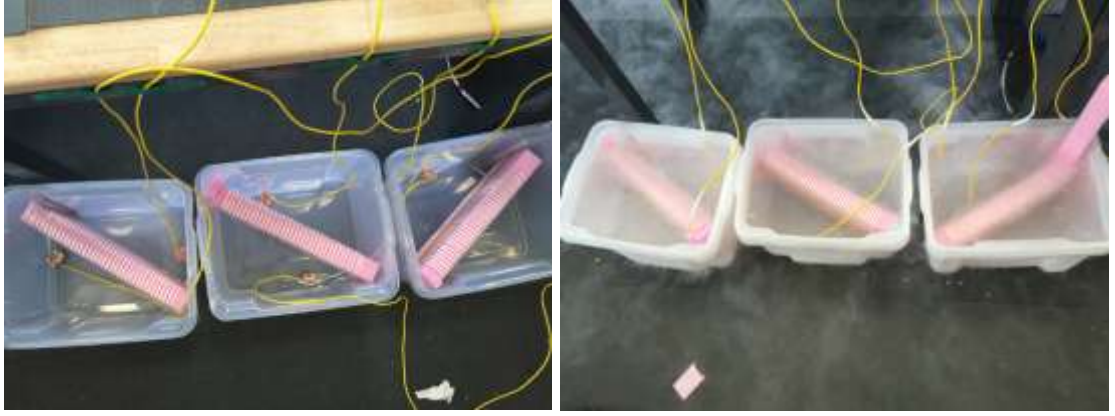
24 Ω , 23 Ω ve 21 Ω 'luk yüklere bağlanmıştır. Hazırlanan deneysel düzeneğe ait görseller şekil 3.11'de verilmektedir. Sistemin testleri sırasında maksimum 220 V uygulandığında her bir fazdan geçen en yüksek akım değerimiz yaklaşık olarak 9.5 A ölçülmüştür. Buna göre her bir faz için gücümüz $P=V.I$ ifadesinden 2090 VA olarak belirlenmiştir. Süperiletken tellerin soğutma işlemi için, tellerin sarılı olduğu straforlar tamamıyla sıvı azot dolu kalın plastik sepetlerin içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.11-Şekil 3.12).



Şekil 3.10 Rezistif SHAS için hazırlanan süperiletken tel (tek faz)



Şekil 3.11 Deneysel düzeneğe ait görseller-I



Şekil 3.12 Deneysel düzeneğe ait görseller-II

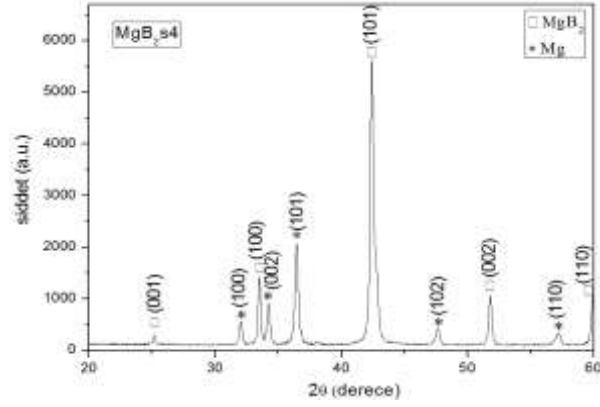
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 XRD Analizleri

Numunelerin kristal yapısını incelemek ve ana fazın yanında oluşabilecek safsızlıkları belirlemek için X-ışını kırınımı yöntemi kullanılmıştır. XRD ölçümleri Rigaku marka D/Max-IIIC model cihaz ile CuK_α ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında, MgB_2 numuneleri için $2\theta= 20^\circ\text{-}60^\circ$ aralığında 0.02 derece/dk tarama hızıyla, YBCO numuneler içinse $2\theta= 10^\circ\text{-}60^\circ$ aralığında 0.02 derece/dk tarama hızıyla alınmıştır. MgB_2 ve YBCO numunelerine ait XRD sonuçları aşağıda verilmektedir.

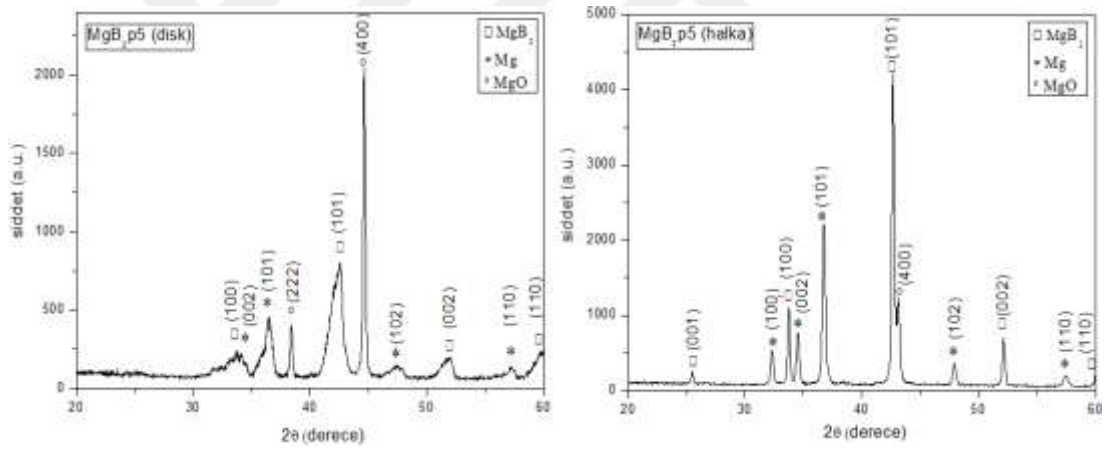
4.1.1 MgB_2 numunelerinin XRD analizleri

Üretilen MgB_2 numunelerinin hepsinde toz hazırlık aşamasında ve numuneler ısıtıl işlem öncesinde krom tüp içerisine yerleştirilirken fazlardan Mg tozu konulmuştur. Dolayısıyla XRD sonuçlarının genelinde Mg fazlarına rastlanmaktadır. Ayrıca krom tüpün kapatılma işleminin hava ortamında yapılması ve ısıtıl işlem esnasında Ar akışına rağmen numunelerin bulunduğu ortamdan uzaklaştırılamayan oksijen nedeniyle de MgO fazlarına rastlanmıştır. Ayrıca sıcak presleme ile üretilen numunelerin ana faz piklerinin daha keskin bir şekilde oluştuğu görülmüştür. Sıcak preste bekleme süresinin artmasıyla ana pik şiddetinin de arttığı gözlenmiştir. Böylece numune üretiminde başlangıç toz reaksiyon sıcaklığı, sıcak presleme sıcaklığı ve bekleme zamanı, ikinci ısıtıl işlem sıcaklığı ve süresinin, ayrıca toz presleme basıncının kristal yapı üzerinde etkili olan parametreler olduğu söylenebilir. Bu parametrelerden bir veya birkaçı değiştirildiğinde süperiletkenin yapısal, mekaniksel ve elektriksel özelliklerinin değiştirilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.1 MgB₂s₄ numunesine ait XRD grafiği

Şekil 4.1’de MgB₂s₄ numunesine ait XRD grafiği verilmektedir. Malzemenin XRD pikleri, süperiletken ana fazın oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca Mg fazlarına ait bazı piklerinde oluştuğu gözlenmektedir.



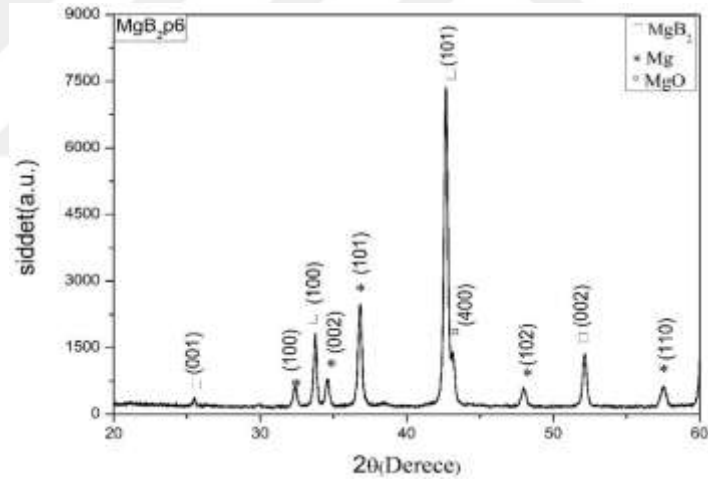
Şekil 4.2 Farklı geometride oluşturulmuş MgB₂p5 numunelerine ait XRD grafikleri

MgB₂p5 serisinde hazırlanan disk ve halka şeklindeki iki numuneye ait XRD grafikleri şekil 4.2’de verilmektedir. Üretim şartlarına bağlı olarak kristal yapıda farklılıklar oluştuğu gözlenmektedir. Her iki numunede de MgB₂ ana fazının yanı sıra Mg ve MgO fazlarına ait piklerin oluştuğu görülmektedir. XRD sonuçlarından Scherer formülü yardımı ile tane büyüklüğü hakkında yorumlar yapılabilir. Scherer formülü;

$$d = \frac{\kappa \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.1)$$

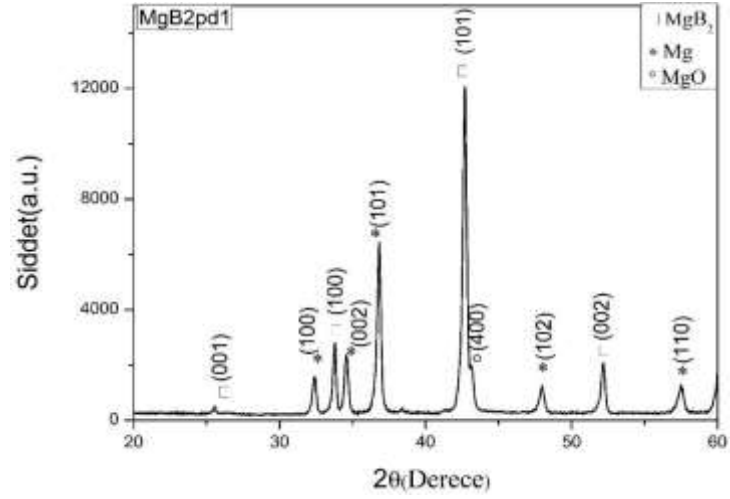
ile verilmektedir. Burada d , tane büyüklüğü; κ , sabit (0.9); λ , uygulanan X-ışınının dalga boyu; θ , Bragg yansıma açısı ve β ise pik yüksekliğinin yarı genişliği (FWHM) olarak verilmektedir. XRD grafiklerine bakıldığı zaman disk numuneye ait piklerin halka numuneye göre daha geniş olduğu görülmektedir. Scherer formülüne göre; disk numunenin tane büyüklüğünün halka numuneye göre daha küçük olması beklenmektedir.

MgB₂p6 numunesine ait XRD grafiği şekil 4.3'te verilmektedir. MgB₂'ye ait ana pikler elde edilmiştir. Bu değerler $2\theta=25.5^\circ$, 33.5° , 42.7° , 51.8° ve 59.9° açılarındadır. MgB₂p5 numunesiyle karşılaştıracak olursak, 2 halka numunenin de üretiminde farklı olan tek parametre ısıtma işlem süresidir. MgB₂p6 numunesi 5 dk daha uzun süre ısıtma işlemde kalmıştır. Bunun sonucu olarak ana faz pik yüksekliğinin daha uzun ve keskin olduğu görülmüştür.



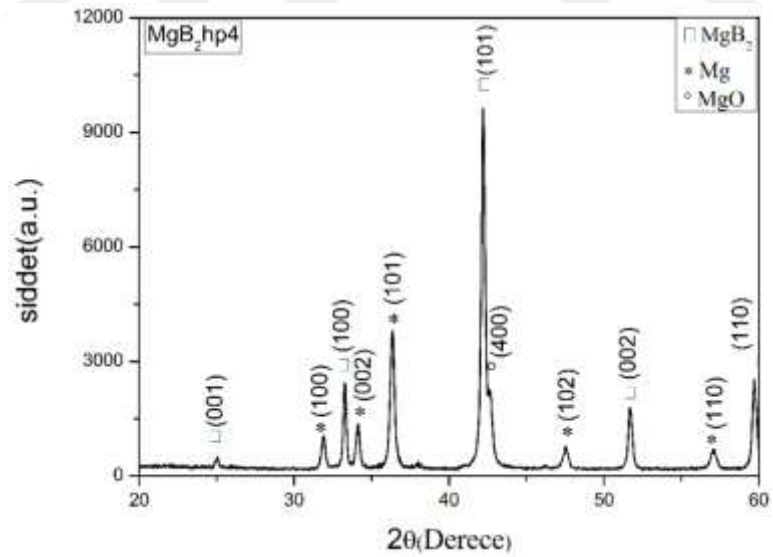
Şekil 4.3 MgB₂p6 numunesine ait XRD grafiği

MgB₂pd1 disk şeklindeki numuneye ait XRD grafiği şekil 4.4'te verilmektedir. Numunede MgB₂ ana fazının yanı sıra Mg ve MgO fazlarına ait piklerin olduğu görülmektedir.

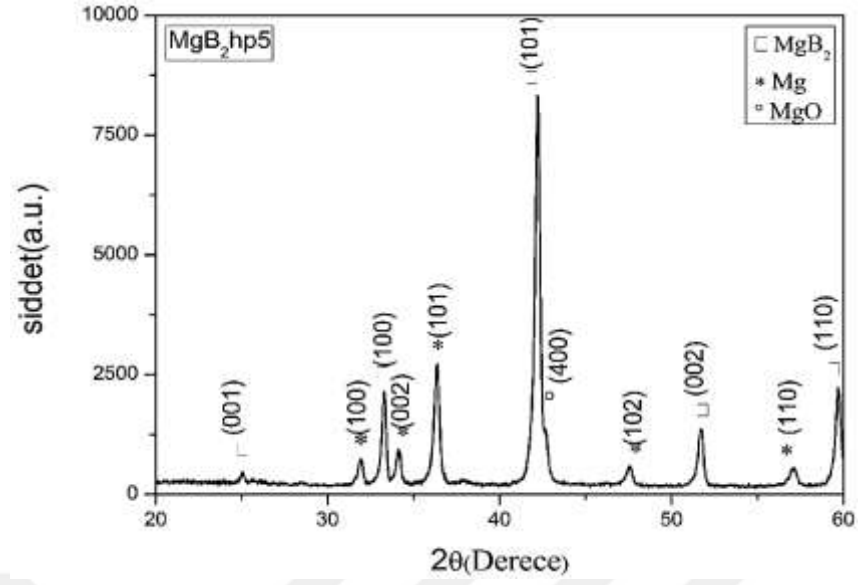


Şekil 4.4 MgB₂pd1 numunesine ait XRD grafiği

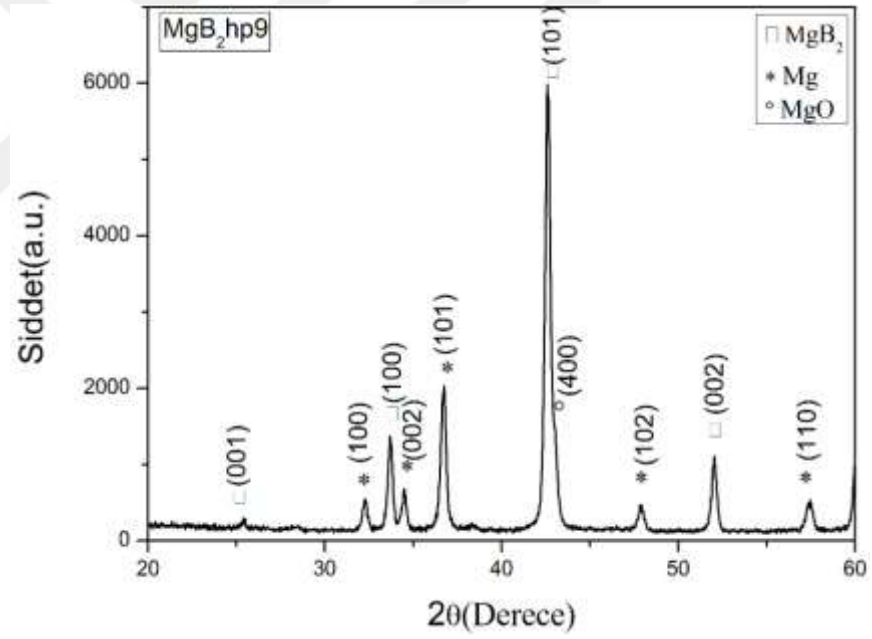
MgB₂hp4, MgB₂hp5, MgB₂hp9, MgB₂hp10 numunelerine ait XRD grafikleri şekil 4.5-4.8'de verilmektedir. Malzemelerin XRD pikleri, süperiletken ana fazın oluştuğunu göstermektedir. Sıcak preslemenin kristal yapının oluşumunda ve ana faza ait piklerin keskinleşmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.



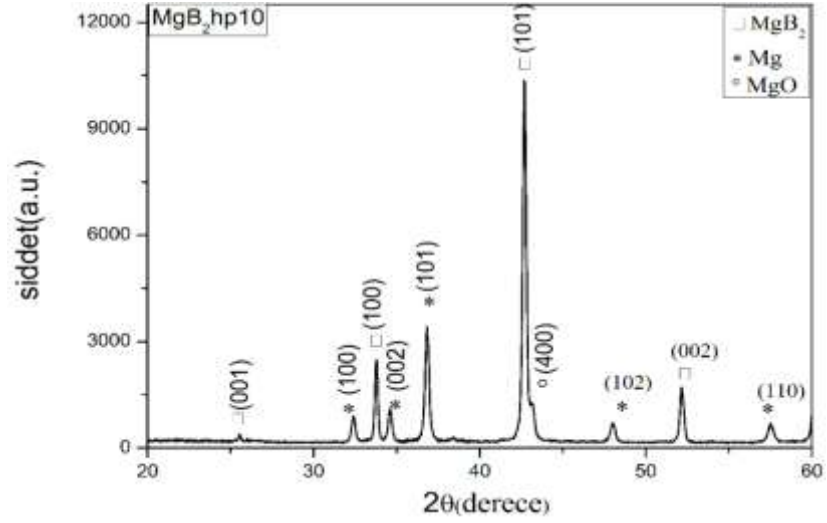
Şekil 4.5 MgB₂hp4 numunesine ait XRD grafiği



Şekil 4.6 MgB₂hp5 numunesine ait XRD grafiği

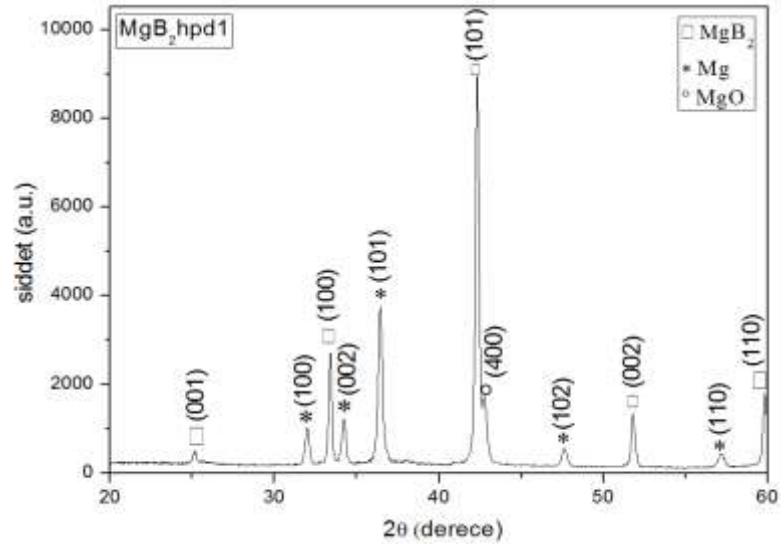


Şekil 4.7 MgB₂hp9 numunesine ait XRD grafiği



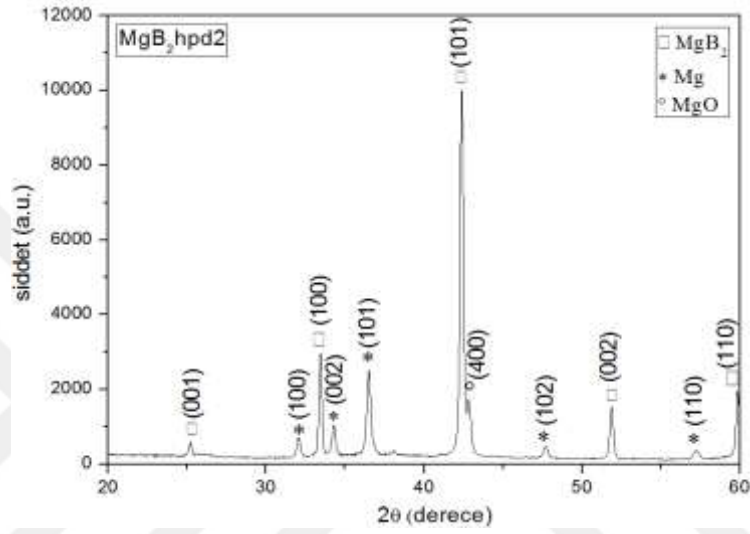
Şekil 4.8 MgB₂hp10 numunesine ait XRD grafiği

MgB₂hpd1 numunesine ait XRD grafiği şekil 4.9’da verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere MgB₂’ye ait olan ana pikler elde edilmiştir. Bu değerler $2\theta=25.1^\circ$, 33.4° , 42.5° , 51.8° ve 59.9° açılarındadır. Sıcak presleme sıcaklığı bu numune için 400°C idi. Bir önceki numunede sıcak presleme sıcaklığı ise 300°C idi. Burada ısıtıl işlemin 700°C ’de ve 10 dk süreyle olmasının, pik yüksekliklerinde önceki numunelerden çok farklı bir yapının oluşmamasına yol açtığını düşündürmektedir.

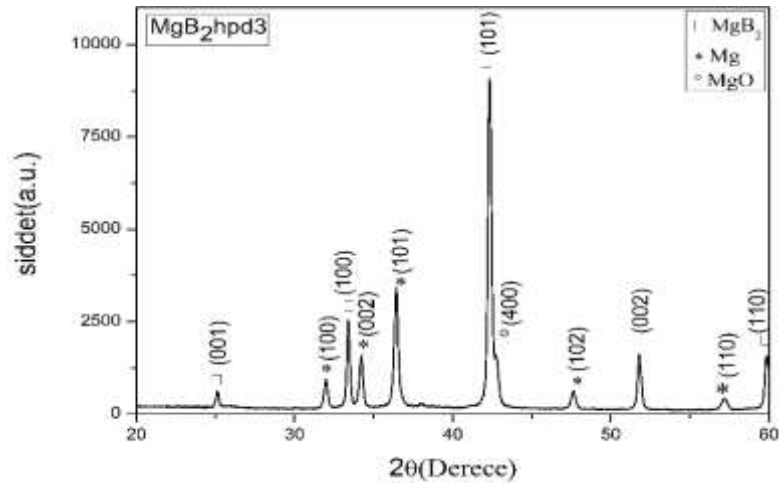


Şekil 4.9 MgB₂hpd1 numunesine ait XRD grafiği

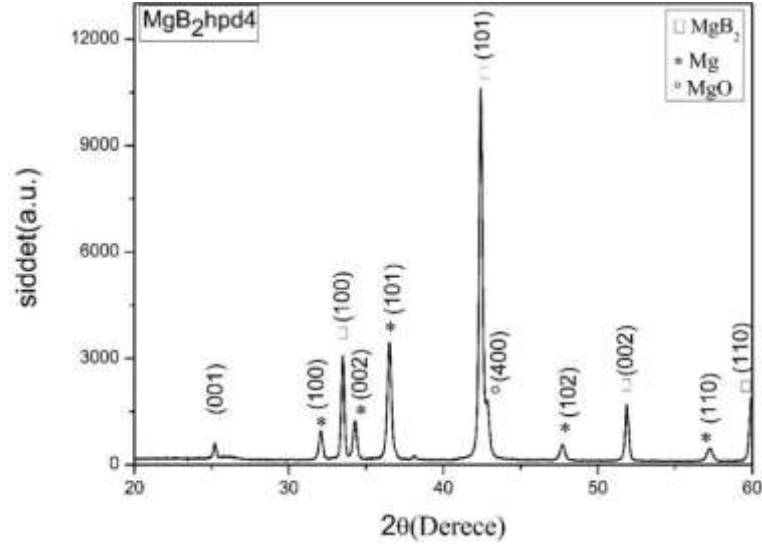
MgB₂hpd2 numunesine ait XRD grafiği şekil 4.10’da verilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi MgB₂’ye ait ana fazların oluştuğu görülmektedir. MgB₂hpd1 numunesiyle karşılaştırıldığında; ısıtım sıcaklığı her iki numunedeki de aynı olmasına karşın, ısıtım süresinin burada 20 dk tutulması ve ayrıca sıcak presleme süresinin 45 dk olması, süperiletken yapıya ait pik yüksekliklerinde belirgin bir artışa sebep olmuştur.



Şekil 4.10 MgB₂hpd2 numunesine ait XRD grafiği



Şekil 4.11 MgB₂hpd3 numunesine ait XRD grafiği



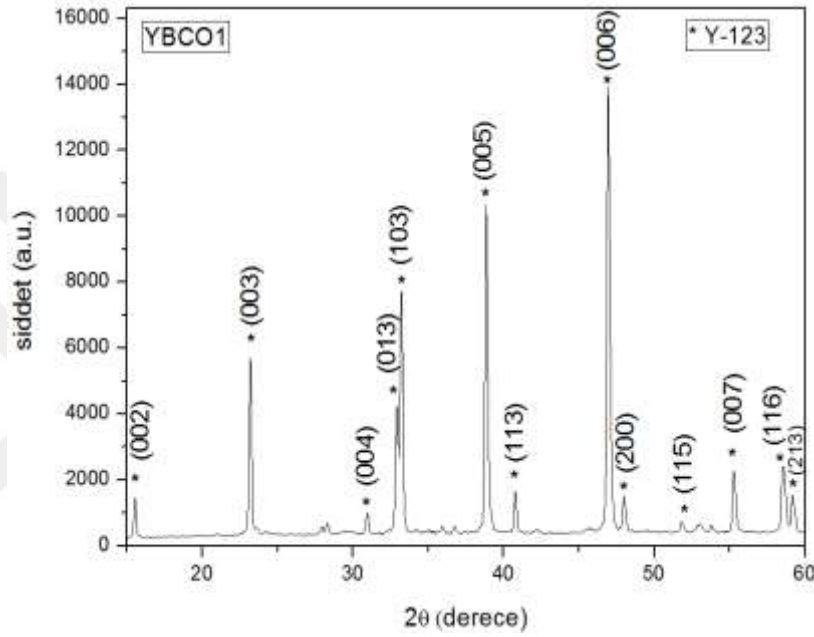
Şekil 4.12 MgB₂hpd4 numunesine ait XRD grafiği

MgB₂hpd3, MgB₂hpd4 numunelerine ait XRD grafikleri ise, şekil 4.11-4.12’de verilmektedir. Grafikler incelendiğinde 42.3°’deki pik şiddetinin MgB₂hpd4 numunesinde daha yüksek olduğu görülmektedir. MgO pikinin yok denecek oranda küçük olduğu söylenebilir. XRD grafiğinde de yine benzer ana piklerin oluştuğu ve süperiletken yapının elde edildiği söylenebilir. Sıcak presleme işleminde bekleme süresinin artmasıyla ana pik şiddetinin de arttığı gözlenmektedir.

4.1.2 YBCO numunelerinin XRD analizleri

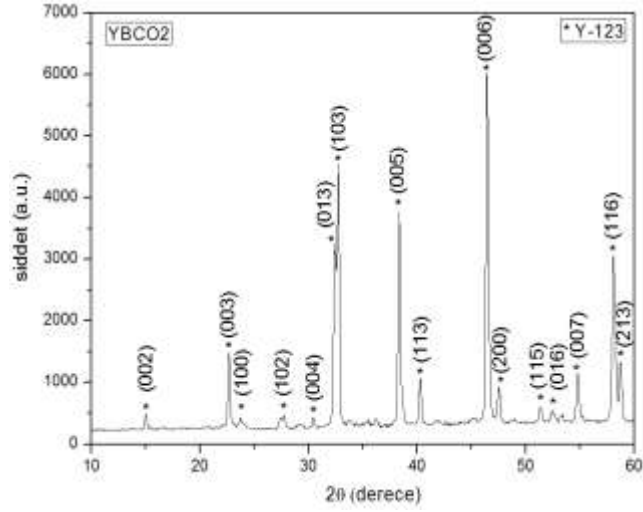
SHAS uygulamaları açısından en çok çalışılan numunelerden olan YBCO malzemesinin halka şekilli olarak üretilmesi sırasında, aynı şartlarda karakterizasyon amaçlı külçe numuneler de üretilmiştir. Gerek katı hal reaksiyon yöntemiyle, gerekse de eritme yöntemiyle üretilen numunelerde YBCO ana fazlarının oluştuğu görülmüş ve yabancı fazlara rastlanmamıştır. Genel olarak üretilen numunelerde 001 yapısındaki piklerin şiddetlerinin sistematik olarak artma eğiliminde olduğu ve bu nedenle de c eksen yönünde tercihli bir dizilişin var olduğu düşünülmektedir. Ayrıca XRD desenlerinde genel olarak (103) pikinin (013) pikinden büyük olmasından dolayı numune yapısının ortorombik olduğu kanaatine varılmıştır.

YBCO1 numunesine ait XRD grafiği Şekil 4.13'te verilmektedir. Standart bir YBCO malzemesinin X-ışını desenine bakıldığında en yüksek pikin $2\theta=32.75^\circ$ olduğu bilinmektedir ve $2\theta=32.75^\circ$ ve 58.25° 'deki piklerin Őiddetinden numunenin kristal yapısı hakkında fikir sahibi olunabilir. XRD grafiğine bakıldığında (103) pikinin (013) pikinden bđyđk olduğu belirlenmiştir. (103) pikinin (013) pikinden bđyđk olması numunenin ortorombik yapıda olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

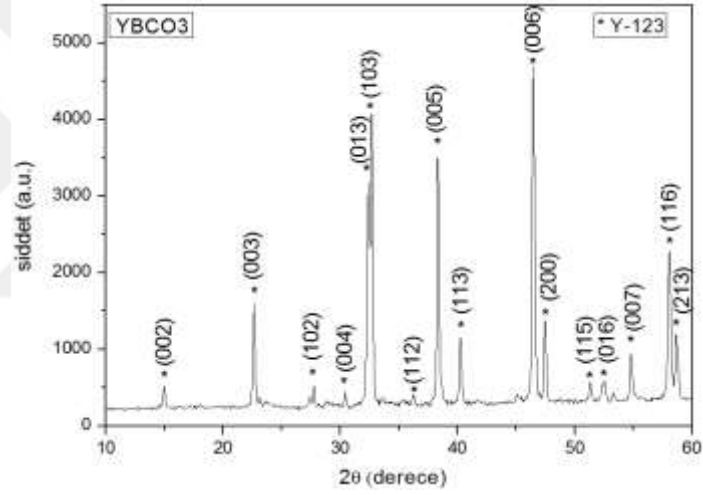


Şekil 4.13 YBCO1 numunesine ait XRD grafiği

YBCO2 ve YBCO3 numunelerine ait XRD grafikleri sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmektedir. XRD grafiklerinden bu iki numunenin de, YBCO1 numunesine benzer bir yapı sergilediği ve oluşan fazların Y-123 fazlarına ait olduğu tespit edilmiştir. YBCO1 numunesine gđre YBCO2 numunesinin sinterleme işleminin 960°C 'de yapılmış olmasının pik Őiddetlerindeki dđřüřđn sebebi olabileceği dđřđncesini oluşturmuştur. YBCO3 numunesinde ise sinterleme sıcaklığının 945°C 'ye şekilmesinin pik Őiddetlerinde olumlu bir artışa neden olmadığı gđrđlmüřtđr.



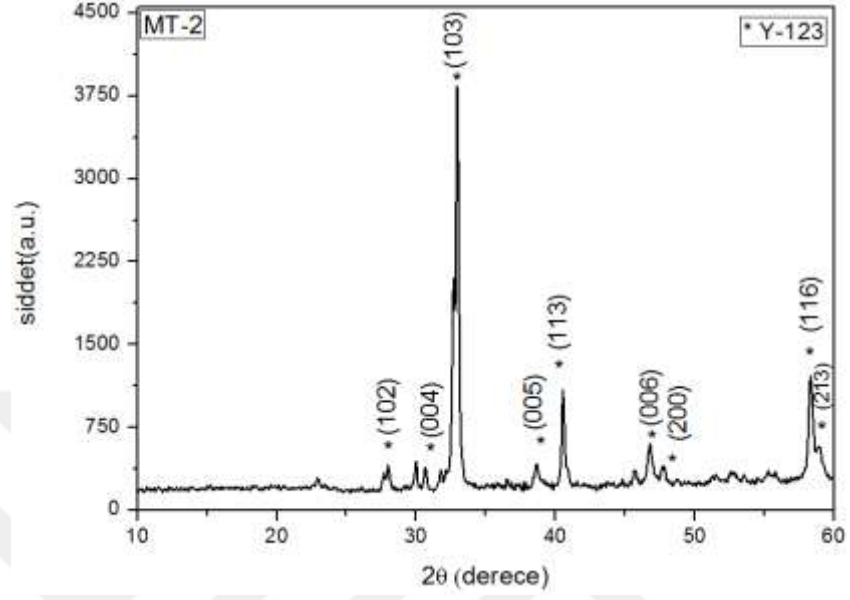
Şekil 4.14 YBCO2 numunesine ait XRD grafiği



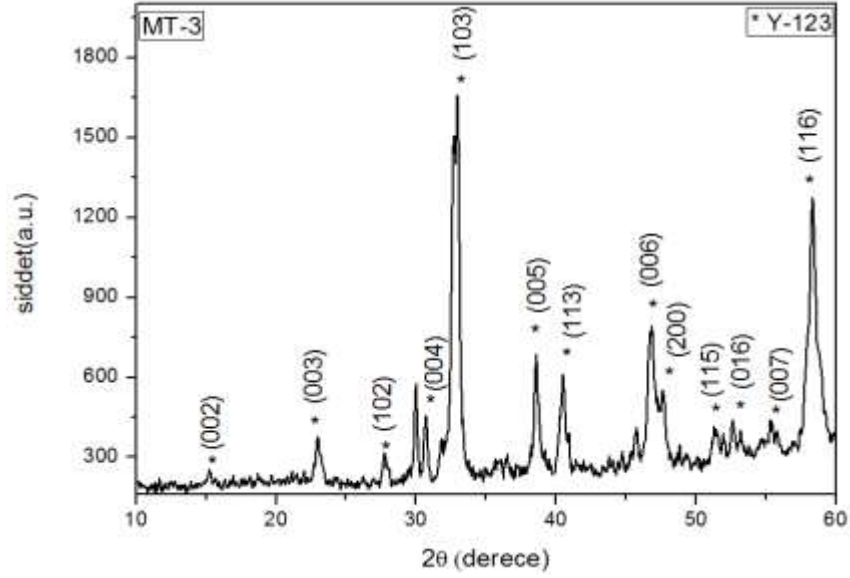
Şekil 4.15 YBCO3 numunesine ait XRD grafiği

Eritme yöntemiyle üretilen MT-2, MT-3, MT-4 numunelerine ait XRD grafikleri şekil 4.16–4.18’de sırasıyla verilmektedir. Oluşan piklerin Y-123 fazlarına ait olduğu, sistemde yabancı fazların bulunmadığı tespit edilmiştir. X-ışını desenine bakıldığı zaman en yüksek pikin sırasıyla $2\theta=32.97^\circ$, $2\theta=32.74^\circ$, $2\theta=33.32^\circ$ olduğu belirlenmiştir. Bu üç numuneye ait XRD grafiklerine bakıldığında zaman, bu numuneler içinde (103) pikinin en büyük pik olduğu görülmektedir. (103) pikinin en büyük pik olması sebebiyle incelenen numunelerin ortorombik yapıda olduğu şeklinde değerlendirilmiştir. Ayrıca en yüksek pikin MT-2 numunesinde olduğu görülmektedir. Buna göre bu numunenin

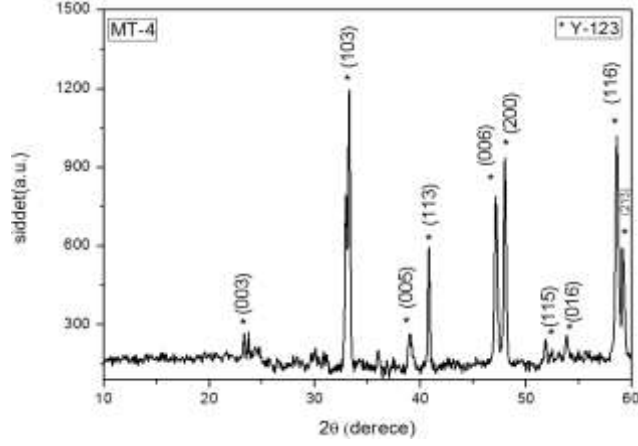
üretim aşamalarında iyileştirmelere gidilerek kristal yapının daha iyi oluşturulabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.16 MT-2 numunesine ait XRD grafiği

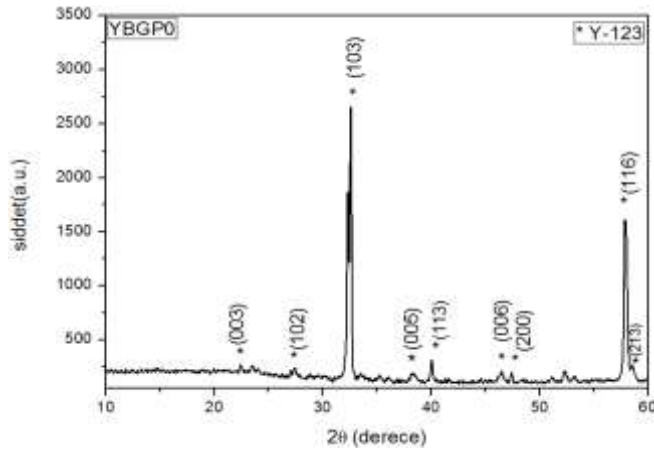


Şekil 4.17 MT-3 numunesine ait XRD grafiği

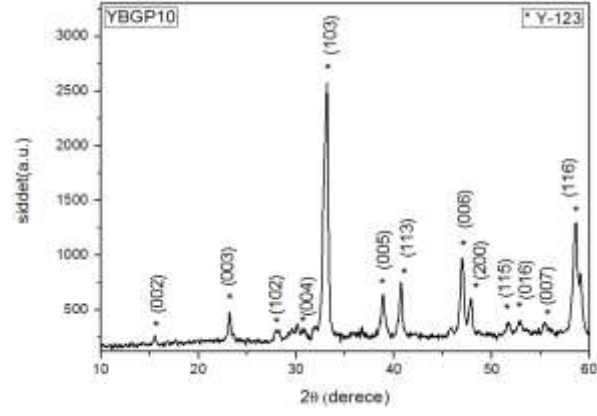


Şekil 4.18 MT-4 numunesine ait XRD grafiği

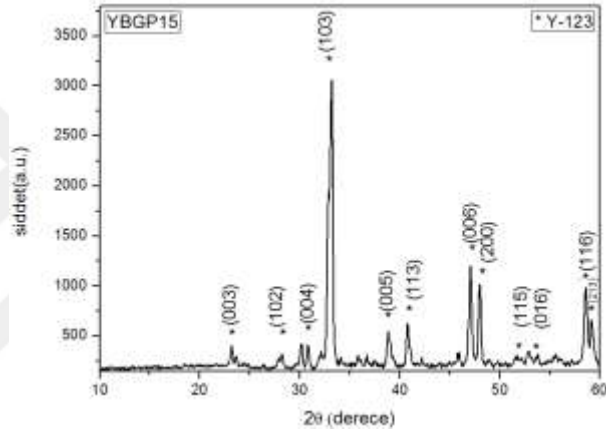
Eritme yöntemiyle ve değişik oranlarda yeşil faz eklenerek üretilen YBGP0, YBGP10, YBGP15, YBGP20 numunelerine ait XRD grafikleri şekil 4.19–4.22’de verilmektedir. Oluşan fazların Y-123’e ait olduğu, sistemde yabancı fazların bulunmadığı tespit edilmiştir. Numunelerden alınan X-ışını desenine bakıldığı zaman en yüksek piklerin sırasıyla $2\theta=32.6^\circ$, $2\theta=33.33^\circ$, $2\theta=33.15^\circ$, $2\theta=32.79^\circ$ ’de olduğu belirlenmiştir. Oluşan yapıların ortorombik yapıda olduğu düşünülmektedir. Bu seride başlangıç tozlarında bir değişiklik yapılarak BaCO_3 ve CuO hazır olarak kullanılmamıştır. Genel olarak bakıldığında %15’lik yeşil faz katkısına sahip numunede piklerin daha keskin ve ana pikin daha yüksek olduğu söylenebilir. Daha detaylı değerlendirme, alınganlık ve sertlik ölçümleriyle beraber tezin sonuç kısmında verilecektir.



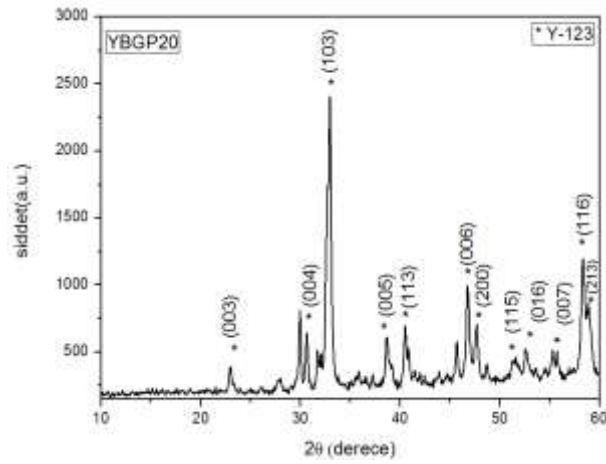
Şekil 4.19 YBGP0 numunesine ait XRD grafiği



Şekil 4.20 YBGP10 numunesine ait XRD grafiği



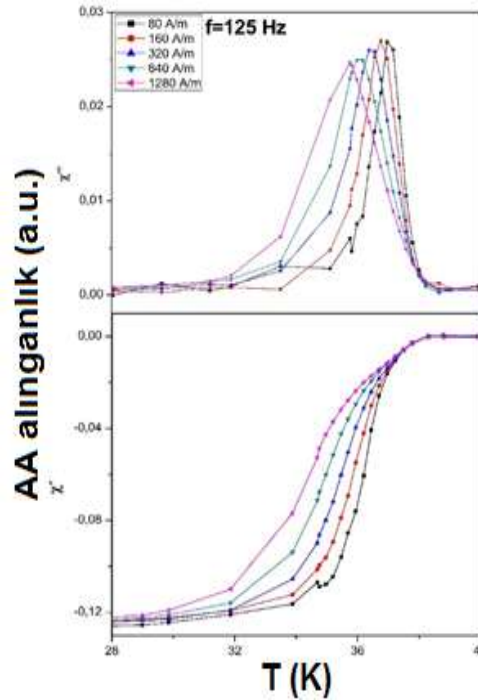
Şekil 4.21 YBGP15 numunesine ait XRD grafiği



Şekil 4.22 YBGP20 numunesine ait XRD grafiği

4.2 AA Alınganlık Ölçümleri

AA alınganlık ölçümleri, YSS'lerin tane-içi ve taneler arası özelliklerinin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan süperiletken yapıyı bozmayan bir yöntemdir. Tez çalışmasında AA alınganlık ölçümleri “Lake Shore 7130 AC Susceptometer” sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu sistem, karşılıklı indüktans ölçüm yöntemi ile manyetik alınganlığı, sıcaklığın, uygulanan AA alan genliğinin ve frekansın fonksiyonu olarak ölçen bir sistemdir. Ölçümler; 125 Hz frekansta ve farklı AA alan büyüklüklerinde alınmış ve grafiklerde sanal ve reel kısımlar gösterilmiştir. Manyetik alan 80, 160, 320, 640 ve 1280 [A/m] büyüklüklerinde uygulanmıştır. Farklı uygulamalarla üretilen MgB_2 numunelerinde süperiletkenlik özellikleri görülmesine karşın, bu özelliklerin iyileştirilmesi SHAS uygulamaları açısından yetersiz görülmüştür. Üretilen numunelerin tamamında uygulanan alan değeri arttıkça sistematik bir kayma gözlenmiştir.

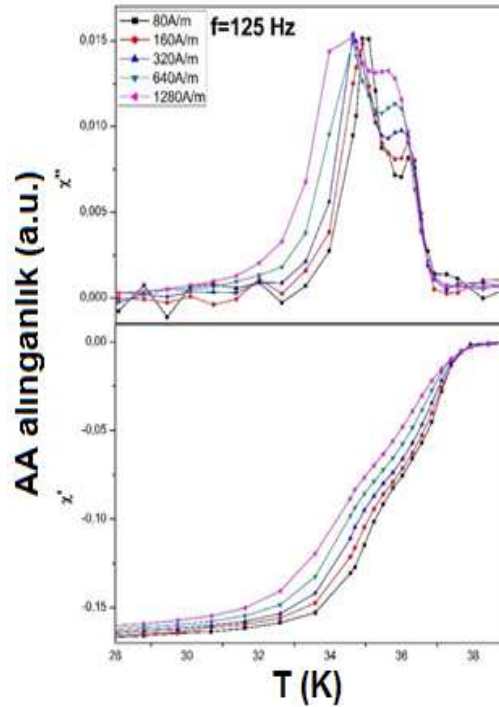


Şekil 4.23 MgB_2p_5 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

Şekil 4.23'te MgB_2p_5 numunesine ait AA alınganlık grafiği verilmektedir. AA alınganlık grafiğinin reel kısmından süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı 38.4 K olarak

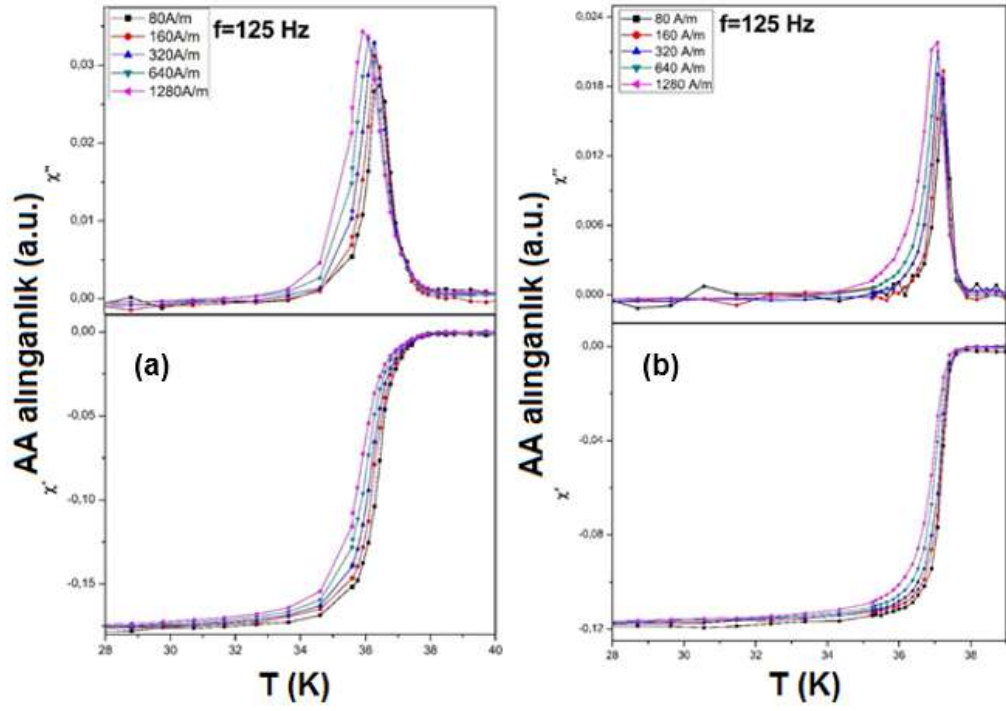
belirlenmiştir. Bununla birlikte alan bağımlılığı görülmektedir. Yani alan değeri arttıkça en küçük alandan en büyük alana doğru sistematik bir kayma söz konusudur. Sinterleme işlemi esnasında fırının sıcaklığının 1000 °C’de 10 dakika bekledikten sonra birkaç dakika içinde kontrolsüz olarak 850 °C’ye düşmesiyle, istenilen sinterleme koşullarından uzaklaşmıştır. Bu nedenle süperiletkenliğe geçişin geniş bir aralıkta olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.24’te MgB_2Pd1 numunesine ait AA alınganlık grafiğinin sanal ve reel kısmı gösterilmektedir. Numunenin geçiş sıcaklığının yaklaşık 38 K olduğu söylenebilir. İki adımda geniş bir süperiletkenlik geçişi görülmektedir ve alan arttıkça alınganlığın sanal kısmında görülen pikin tepe noktasının düşük sıcaklıklara kaydığı görülmektedir. Bu geçişlerin ilki tanelerin süperiletkenliğe geçişi, diğeri ise taneler arası bölgenin süperiletkenliğe geçişi olarak tanımlanmaktadır. Üretilen numunenin AA alınganlık grafiğinde ikinci bir omuz bölgesi görülmesi, numune içeriğinde ikinci bir fazın bulunduğu anlamına da gelebilmektedir.



Şekil 4.24 MgB_2Pd1 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

Şekil 4.25.a'da $\text{MgB}_2\text{hp4}$, şekil 4.25.b'de $\text{MgB}_2\text{hp5}$ numunelerine ait AA alınganlık grafiğinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. $\text{MgB}_2\text{hp4}$ grafiğinden de görüldüğü üzere malzemede bir alan bağımlılığı söz konusudur. Süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak 38 K olarak belirlenmiştir.

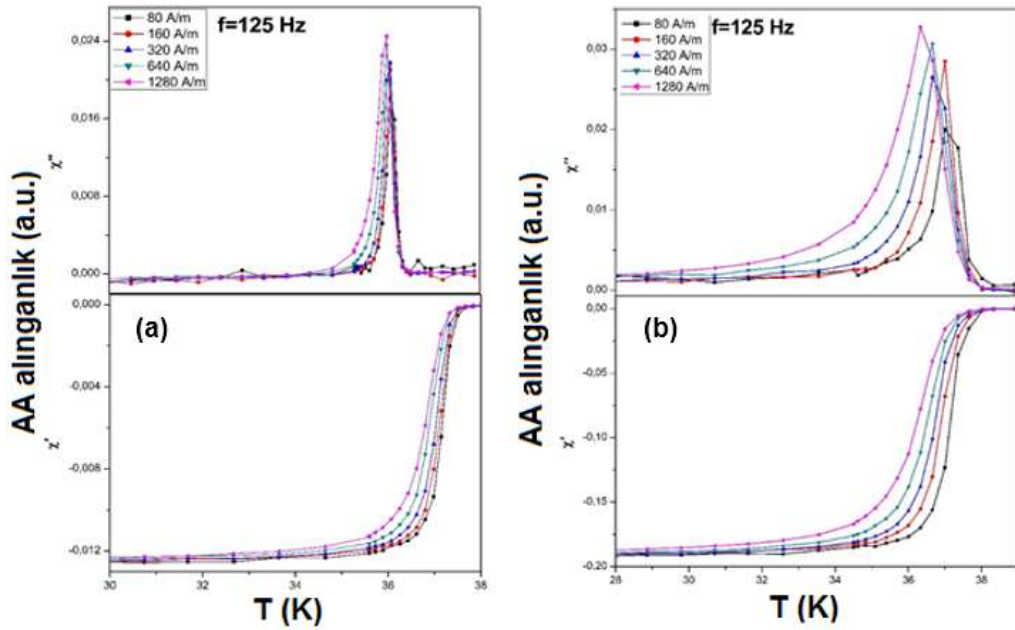


Şekil 4.25.a. $\text{MgB}_2\text{hp4}$, b. $\text{MgB}_2\text{hp5}$ numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

$\text{MgB}_2\text{hp5}$ numunesine ait grafiğin hem reel hem de sanal kısımlarına bakıldığında ise, bu yöntemle elde edilen numunelerin geçiş sıcaklığının yaklaşık 37.6 K olduğu belirlenmiştir. $\text{MgB}_2\text{hp4}$ numunesiyle kıyaslandığı zaman süperiletkenliğe geçiş daha dar bir aralıkta olmuştur ve alan bağımlılığı daha azdır. Akım taşıma kapasitesinin $\text{MgB}_2\text{hp4}$ numunesinden daha az olduğu düşünülmektedir. Bunun sebebinin $\text{MgB}_2\text{hp5}$ numunesinin diğer numunelere göre daha homojen bir toz yapısında oluşması için alkol ortamında bilyalı değirmende öğütme işlemi yapılması olayıyla bağlantılı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.26.a'da $\text{MgB}_2\text{hp9}$, şekil 4.26.b'de $\text{MgB}_2\text{hp10}$ numunelerine ait AA alınganlık grafiğinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. $\text{MgB}_2\text{hp9}$ grafiğinin hem reel hem de

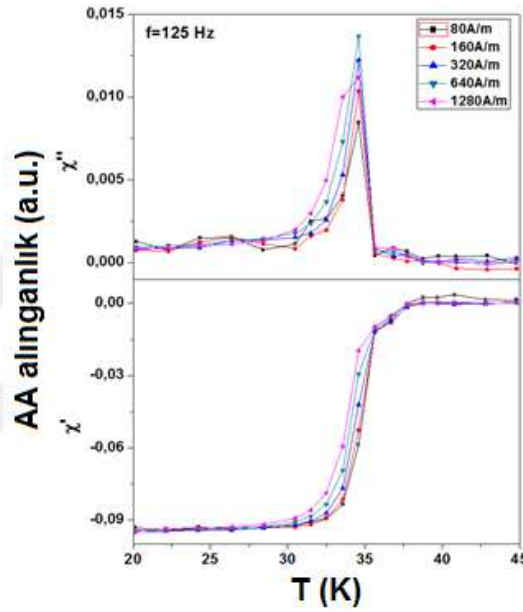
sanal kısımlarına bakıldığında, bu yöntemle elde edilen numunelerin geçiş sıcaklığının yaklaşık 37.6 K olduğu belirlenmiştir. Numuneler düşük alan değerinde daha güçlü bir diyamanyetik davranış göstermektedir. En küçük alandan en büyük alana doğru incelendiğinde sistematik bir kayma söz konusudur.



Şekil 4.26.a. MgB₂hp9, b. MgB₂hp10 numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

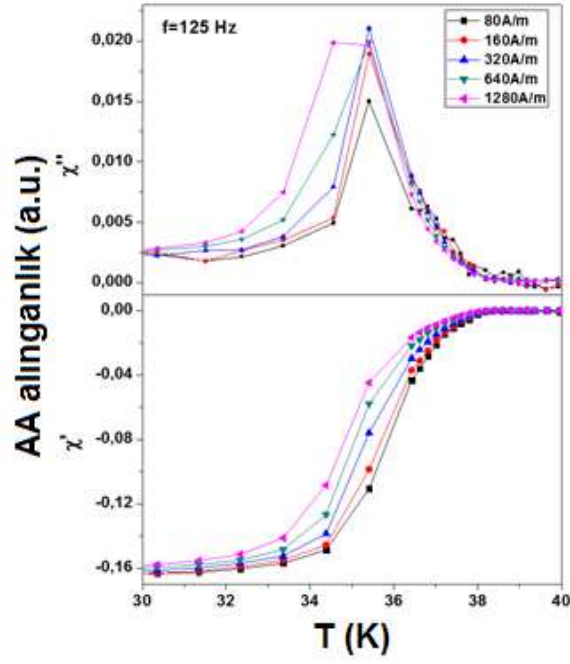
MgB₂hp10 numunesine ait grafiğe bakıldığında ise; alan değeri 80[A/m]'den 1280[A/m]'ye arttırıldığında χ' davranışının düşük sıcaklığa doğru değiştiği görülmektedir. Yani numune düşük alan değerinde daha güçlü bir diyamanyetik davranış göstermektedir. En küçük alandan en büyük alana doğru incelendiğinde sistematik bir kayma söz konusudur. Bu da manyetik alanın tane sınırlarından malzemeye nüfuz ettiğini göstermektedir. Geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak 38 K olarak belirlenmiştir. MgB₂hp9 numunesiyle kıyaslandığında, alan bağımlılığının daha fazla olduğu, süperiletkenliğe geçişin daha geniş bir sıcaklık aralığında olduğu gözlenmiştir ve akım taşıma kapasitesinin MgB₂hp9 numunesine oranla daha düşük olduğu düşünülmektedir. Ayrıca üretim aşamasında numunelerin büyüklükleri göz önüne alındığında, daha büyük çaplı numune olan MgB₂hp10 numunesinin süperiletkenlik özelliklerinde kötüleşme olduğu söylenebilir.

MgB₂s₄ numunesine ait AA alınganlık grafiği şekil 4.27’de verilmektedir. Malzemede hem taneler arası hem de taneler içi geçiş görülmektedir. Bu durumun ise malzemenin üretim aşamalarında yapılacak değişiklikler (örneğin yüksek basınç ile presleme) ile düzeltilebileceği düşünülmektedir. AA alınganlık grafiğinin reel kısmından süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı 38 K olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte alan bağımlılığı görülmektedir ve süperiletkenliğe geçiş geniş bir aralıkta oluşmaktadır. Bu ise istenmeyen bir durumdur.



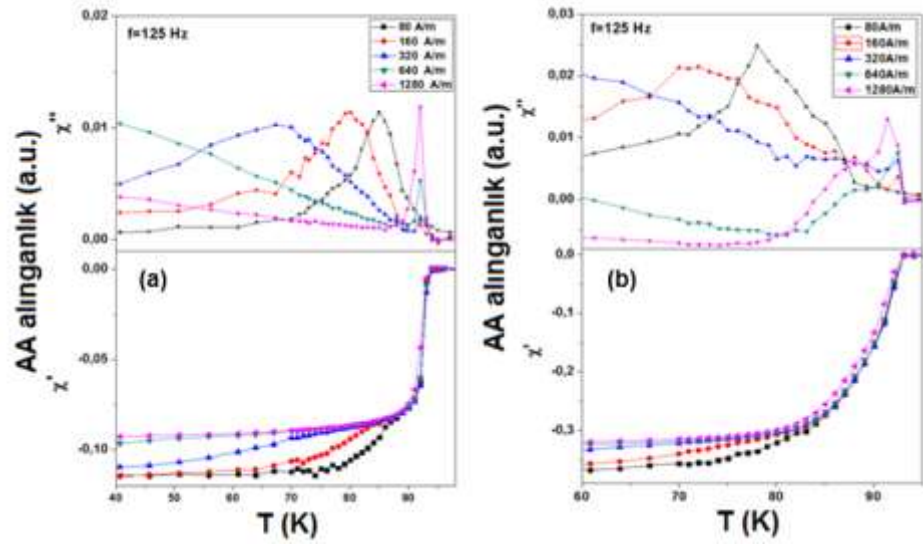
Şekil 4.27 MgB₂s₄ numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

Şekil 4.28’de MgB₂hp₈ numunesine ait AA alınganlık grafiğinin sanal ve reel kısmı gösterilmektedir. Bu grafiğin hem reel hem de sanal kısımlarına bakıldığında bu yöntemle elde edilen numunelerin geçiş sıcaklığının yaklaşık 38 K olduğu söylenebilir. Numuneler düşük alan değerinde daha güçlü bir diyamanyetik davranış göstermektedir. En küçük alandan en büyük alana doğru incelendiğinde sistematik bir kayma söz konusudur. Malzemelere küçük manyetik alan uygulandığı zaman numunelerin akım taşıma kapasiteleri daha yüksektir. Sıcak presleme işlemi ile üretilmiş olan bu numunede süperiletkenlik özelliklerinin iyileştirilemediği söylenebilir.

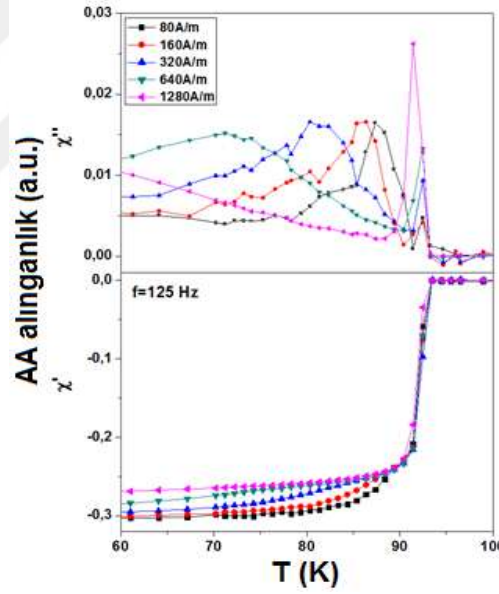


Şekil 4.28 MgB₂hp8 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

Şekil 4.29.a'da YBCO1, şekil 4.29.b'de YBCO2 numunelerine ait AA alınganlık grafiğinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. YBCO1 numunesine ait grafiğin hem reel hem de sanal kısımlarına bakıldığında katı hal reaksiyon yöntemiyle elde edilen numunenin geçiş sıcaklığının yaklaşık 93.5 K olduğu söylenebilir. AA alınganlığın reel kısmına bakıldığında keskin bir süperiletkenlik geçişi görülmektedir. Her iki numunede de süperiletkenlik geçişinden sonra alana bağımlılığı gözlenmiştir. Düşük alandan yüksek alan değerlerine doğru akım taşıma kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca yine her iki numunede de AA alınganlığın sanal kısmında iki pik görülmektedir. Bu da YSS'lerde görülen zayıf bağ probleminin bu iki numunede de olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Alan değeri arttıkça sistematik olarak gözlenen ikinci piklerin düşük sıcaklıklara doğru kaydığı gözlenmektedir. YBCO2 numunesinin AA alınganlık grafiğinin reel kısmından 93 K'de süperiletkenlik geçişinin olduğu tespit edilmiştir. Buradaki süperiletken geçiş YBCO1 numunesine göre daha geniştir.



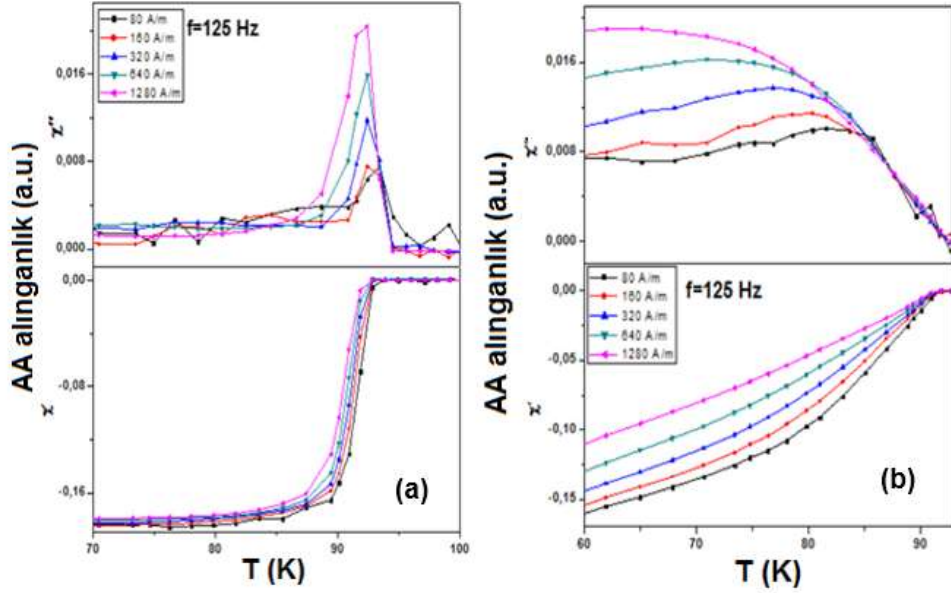
Şekil 4.29.a. YBCO1, b. YBCO2 numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği



Şekil 4.30 YBCO3 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

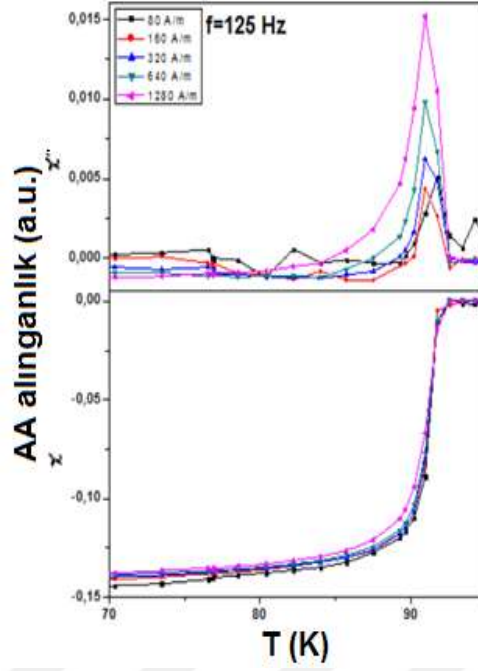
Şekil 4.30'da YBCO3 numunesinin AA alınganlık grafiğinin reel kısmından 93.4 K'de süperiletkenlik geçişinin olduğu tespit edilmiştir. Buradaki süperiletken geçiş YBCO2 numunesine göre daha dardır. YBCO1 ve YBCO3 numunelerinin süperiletkenlik geçişi oldukça benzerdir. Alan değeri arttıkça grafik sola doğru kaymaktadır, bu numune de alan bağımlılığı vardır. YBCO1 ile YBCO3 numunesi karşılaştırıldığı zaman, YBCO3 numunesinin akım taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu düşünülmektedir. AA

alınanlığın sanal kısmında ise iki pik görülmektedir. Bu da tane-içi ve taneler arası süperiletken geçiş olarak yorumlanmaktadır. Alan değeri arttıkça sistematik olarak gözlenen ikinci pikin düşük sıcaklıklara kaydığı gözlenmektedir.



Şekil 4.31.a. MT-2, b. MT-3 numunelerine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

Şekil 4.31.a'da MT-2, 4.31.b'de MT-3 numunelerine ait AA alınganlık grafiğinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. MT-2 numunesine ait grafiğin hem reel hem de sanal kısımlarına bakıldığında, eritme yöntemiyle elde edilen numunelerin geçiş sıcaklığının yaklaşık 93 K olduğu belirlenmiştir. AA alınganlığın reel kısmına bakıldığında keskin bir süperiletkenlik geçişi ve geçişten sonra da alana bağımlılık vardır. Düşük alandan yüksek alan değerlerine doğru akım taşıma kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Yine şekil 4.31.b'de MT-3 numunesinin AA alınganlık grafiğinin reel kısmından 93 K'de süperiletkenlik geçişinin olduğu tespit edilmiştir. Buradaki süperiletken geçiş MT-2 numunesine göre daha geniştir ve henüz plato bölgesine ulaşılmamıştır (diyamanyetik doyum) . Alan değeri arttıkça grafik sola doğru kaymaktadır, alan bağımlılığı vardır. Düşük alandan yüksek alan değerlerine doğru akım taşıma kapasitesinin azaldığı görülmektedir.

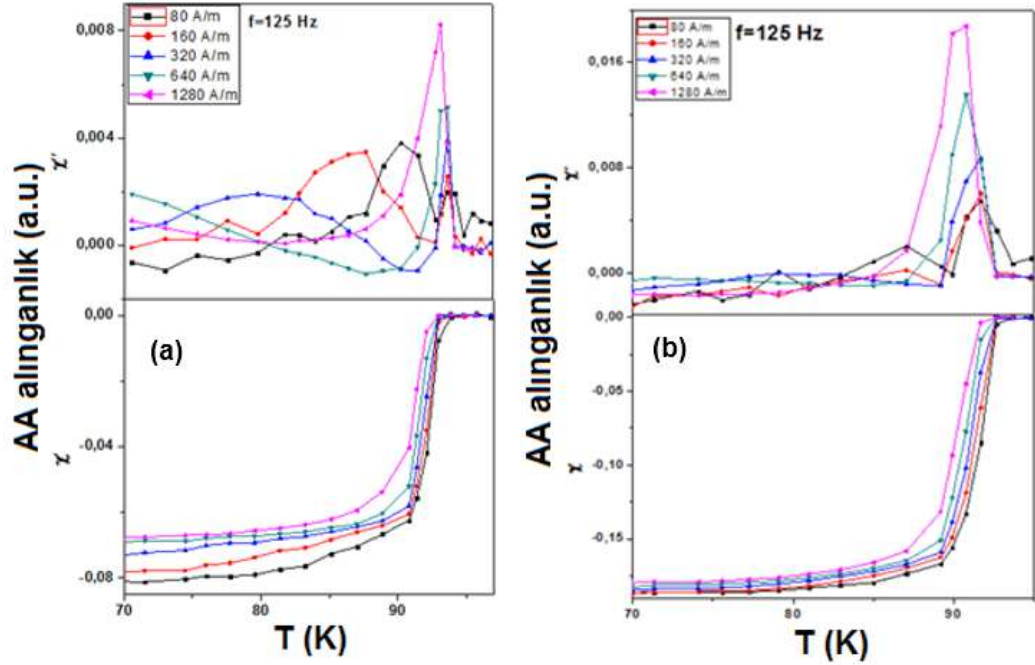


Şekil 4.32 MT-4 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

Şekil 4.32’de MT-4 numunesinin AA alınganlık grafiğinin reel kısmından 93.4 K’de süperiletkenlik geçişinin olduğu tespit edilmiştir. Dar ve keskin bir süperiletken geçiş vardır. MT-2 ve MT-4 numunelerinin süperiletkenlik geçişi oldukça benzerdir. MT-4 numunesinde alan bağımlılığı yok denecek kadar azdır. MT-2 ile MT-4 numuneleri karşılaştırıldığı zaman, MT-2 numunesinin akım taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu düşünülmektedir. MT-4 numunesinin AA alınganlık grafiğinin sanal kısmında ise tek pik görülmektedir. Bu da yüksek sıcaklık süperiletkenlerin de görülen zayıf bağ probleminin burada olmadığı şeklinde yorumlanmaktadır.

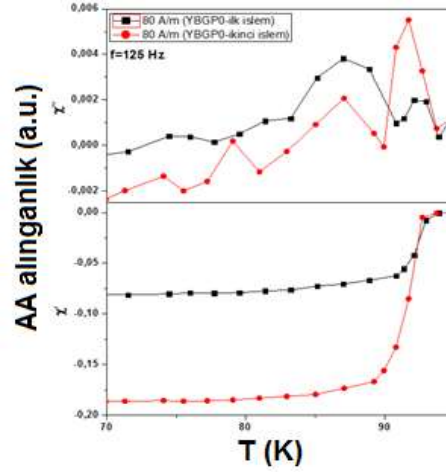
Şekil 4.33.a’da ilk ısıtıl işlem, şekil 4.33.b’de ikinci ısıtıl işlem sonucu YBGP0 numunesine ait AA alınganlık grafiklerinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. İlk ısıtıl işlem sonucu elde edilen grafiğin hem sanal hem de reel kısımlarına bakıldığında, bu yöntemle elde edilen numunelerin geçiş sıcaklığının yaklaşık 93.3 K olduğu belirlenmiştir. AA alınganlığın sadece reel kısmına bakıldığında ise, keskin bir süperiletkenlik geçişi görülmektedir. Süperiletkenlik geçişinden sonra alana bağımlılık belirlenmiştir. Düşük alandan yüksek alan değerlerine doğru akım taşıma kapasitesinin azaldığı görülmektedir. AA alınganlığın sanal kısmında ise iki pik görülmektedir. Bu da yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde görülen zayıf bağ probleminin burada da olduğu

şeklinde yorumlanmaktadır. Alan değeri arttıkça sistematik olarak gözlenen 2. pikin düşük sıcaklıklara kaydığı gözlenmektedir.



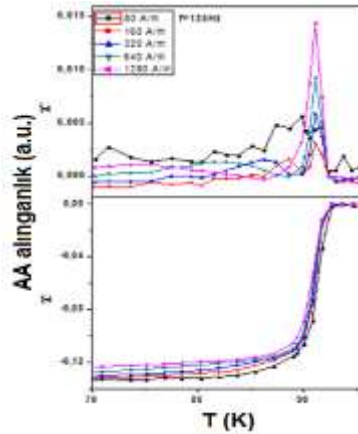
Şekil 4.33.a. İlk ısıt işlem, b. ikinci ısıt işlem sonunda YBGP0 numunesine ait AA alinganklık-Sıcaklık grafiği

İkinci ısıt işleminden sonra ise şekil 4.33.b'den de görüldüğü üzere, ilk ısıt işlem sonrasında sanal kısımda görülen ikinci piklerin neredeyse ortadan kalktığı söylenebilir. Yani zayıf bağ probleminin ortadan kalkmaya başladığı düşünülmektedir. Ayrıca reel kısım ilk ısıt işlem sonucuna göre daha yüksek bir doyum diyamanyetik sinyal değerine sahiptir (Şekil 4.34). Bununla beraber kritik geçiş sıcaklığı 92.6 K olarak belirlenmiştir. İkinci ısıt işlem sonucunda numunenin akım taşıma kapasitesinin arttığı görülmektedir. İkinci ısıt işlemin süperiletkenlik özelliklerine olumlu yönde etki ettiği düşünülmektedir.



Şekil 4.34 YBGP0 numunesinin 1. ve 2. ısıt işlem sonucu oluşan AA alinganlılık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması

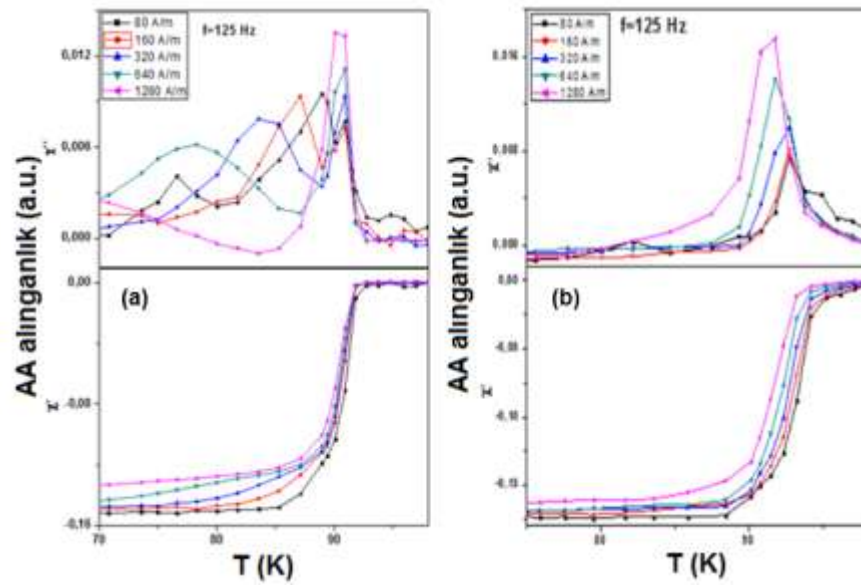
Şekil 4.35'te ilk ısıt işlem sonucu YBGP10 numunesine ait AA alinganlılık grafiğinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. Bu yöntemle elde edilen numunelerin geçiş sıcaklığının yaklaşık 92.6 K olduğu belirlenmiştir. AA alinganlığın reel kısmına bakıldığında keskin bir süperiletkenlik geçişi ve geçişten sonra ise alana bağımlılık belirlenmiştir. Düşük alandan yüksek alan değerlerine doğru akım taşıma kapasitesinin azaldığı görülmektedir. AA alinganlığın sanal kısmında ise iki pik görülmektedir. Bu da YSS'lerde görülen zayıf bağ probleminin burada da olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.



Şekil 4.35 İlk ısıt işlem sonunda YBGP10 numunesine ait AA alinganlılık-Sıcaklık grafiği

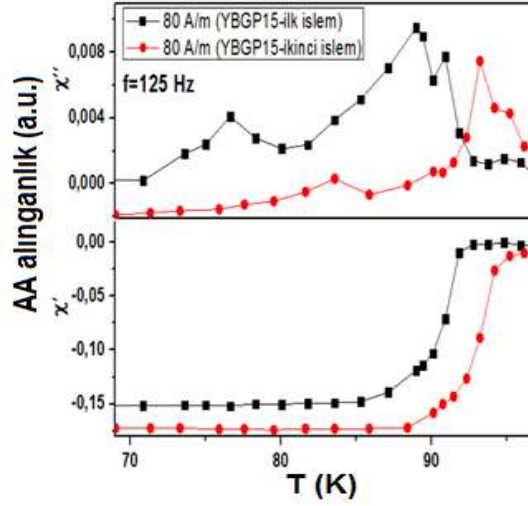
Şekil 4.36.a'da ilk ısıt işlem, şekil 4.36.b'de ikinci ısıt işlem sonucu YBGP15 numunesine ait AA alinganlılık grafiğinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. İlk ısıt

işlem sonucu elde edilen grafiğin hem reel hem de sanal kısımlarına bakıldığında eritme yöntemiyle ve %15 yeşil faz katkılmasıyla elde edilen numunenin geçiş sıcaklığının yaklaşık 90 K olduğu belirlenmiştir. AA alınganlığın reel kısmına bakıldığında ise, keskin bir süperiletkenlik geçişi ve geçişten sonra da alana bağımlılık belirlenmiştir. AA alınganlığın sanal kısmında ise iki pik görülmektedir. Bu da yüksek sıcaklık süperiletkenlerin de görülen zayıf bağ probleminin olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Alan değeri arttıkça sistematik olarak gözlenen 2. pikin düşük sıcaklıklara kaydığı gözlenmektedir.



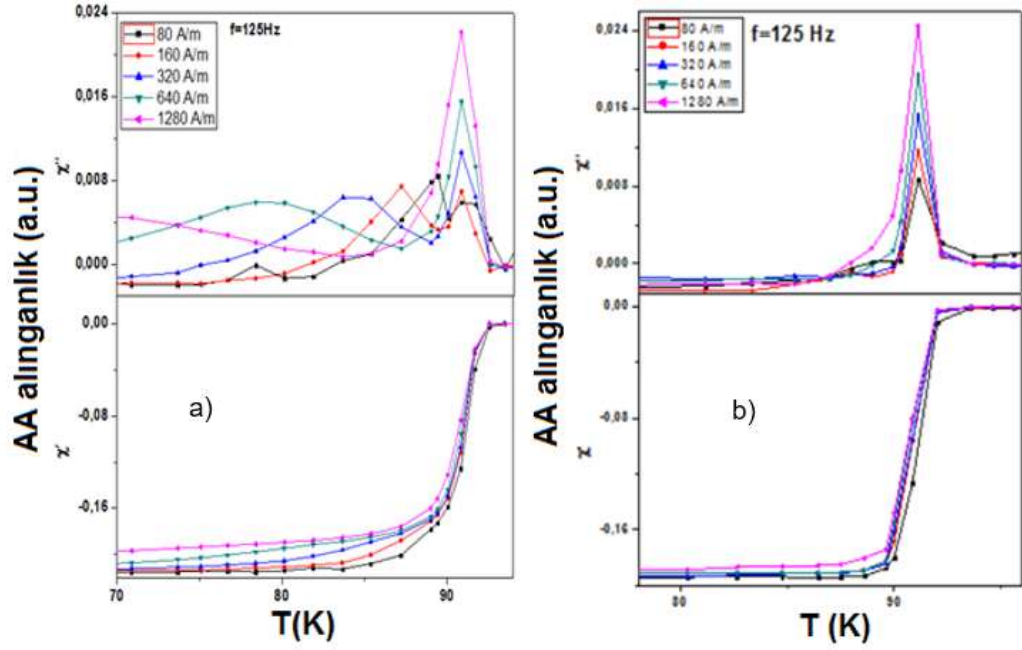
Şekil 4.36.a. İlk ısıt işlem, b. ikinci ısıt işlem sonunda YBGP15 numunesine ait AA alınganlık-Sıcaklık grafiği

İkinci ısıt işleminden sonra ise şekil 4.36.b’den de görüldüğü üzere sanal kısımda görülen ikinci piklerin ortadan kalktığı söylenebilir. Yani zayıf bağ probleminin ortadan kalkmaya başladığı düşünülmektedir. Ayrıca reel kısımdaki süperiletken geçiş daha geniş aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 4.37). Bununla beraber kritik geçiş sıcaklığı 94.2 K olarak belirlenmiştir. İkinci ısıt işlemin süperiletken özelliklere olumlu yönde etki ettiği düşünülmektedir.

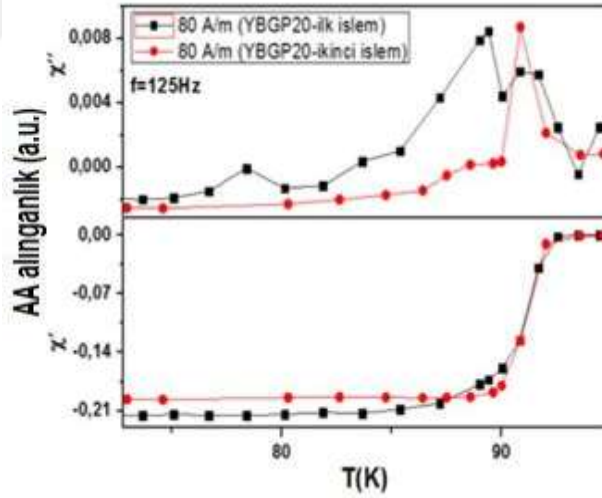


Şekil 4.37 YBGP15 numunesinin 1. ve 2. ısıl işlem sonucu oluşan AA alınganlık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması

Şekil 4.38.a'da ilk ısıl işlem, şekil 4.38.b'de ikinci ısıl işlem sonucu üretilen YBGP20 numunesine ait AA alınganlık grafiklerinin sanal ve reel kısımları gösterilmektedir. İlk ısıl işlem sonucu elde edilen grafiğin hem reel hem de sanal kısımlarına bakıldığında eritme yöntemiyle elde edilen numunelerin geçiş sıcaklığının yaklaşık 92,6 K olduğu belirlenmiştir. AA alınganlığın reel kısmına bakıldığında ise, keskin bir süperiletkenlik geçişi ve geçişten sonra da alana bağımlılık görülmüştür. AA alınganlığın sanal kısmında ise iki pik görülmektedir. Bu da YSS'lerde görülen zayıf bağ probleminin olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Alan değeri arttıkça sistematik olarak gözlenen ikinci pikin düşük sıcaklıklara kaydığı gözlenmektedir. İkinci ısıl işleminden sonra ise şekil 4.38.b ve şekil 4.39'dan da görüldüğü üzere sanal kısımda görülen ikinci piklerin neredeyse ortadan kalktığı söylenebilir. Yani zayıf bağ probleminin ortadan kalkmaya başladığı düşünülmektedir. Bununla beraber kritik geçiş sıcaklığı 92,0 K olarak belirlenmiştir. Süperiletkenliğe geçiş davranışı hemen hemen aynıdır.



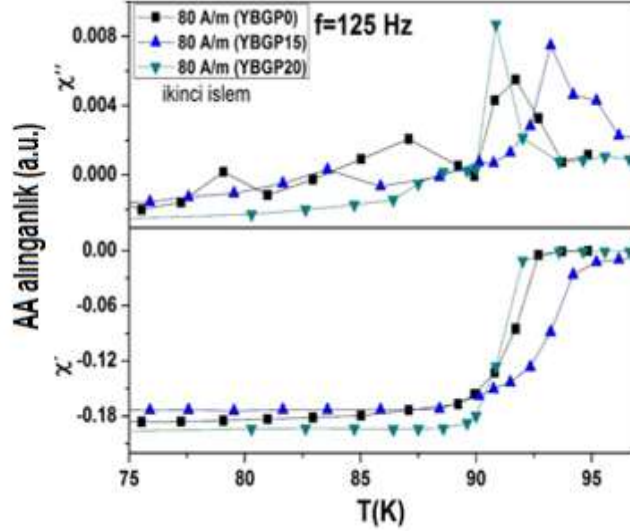
Şekil 4.38.a. İlk ısıtma işlemi, b. ikinci ısıtma işlemi sonunda YBGP20 numunesine ait AA alinganklık-Sıcaklık grafiği



Şekil 4.39 YBGP20 numunesinin 1. ve 2. ısıtma işlemi sonucunda oluşan AA alinganklık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması

YBGP serisi numunelere ait 2. ısıtma işlemi sonunda alınan AA alinganklık-Sıcaklık grafiklerinin toplu karşılaştırması ise şekil 4.40'ta verilmektedir. Buna göre YBGP0 ve YBGP20 numuneleri benzer davranış sergilemekle birlikte yaklaşık 92 K geçiş sıcaklığına sahiptir. Bununla birlikte YBGP15 numunesinin yaklaşık 95 K geçiş

sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir. Yeşil faz katkısının süperiletkenlik özelliklerine bir iyileştirme getirdiği söylenebilir.



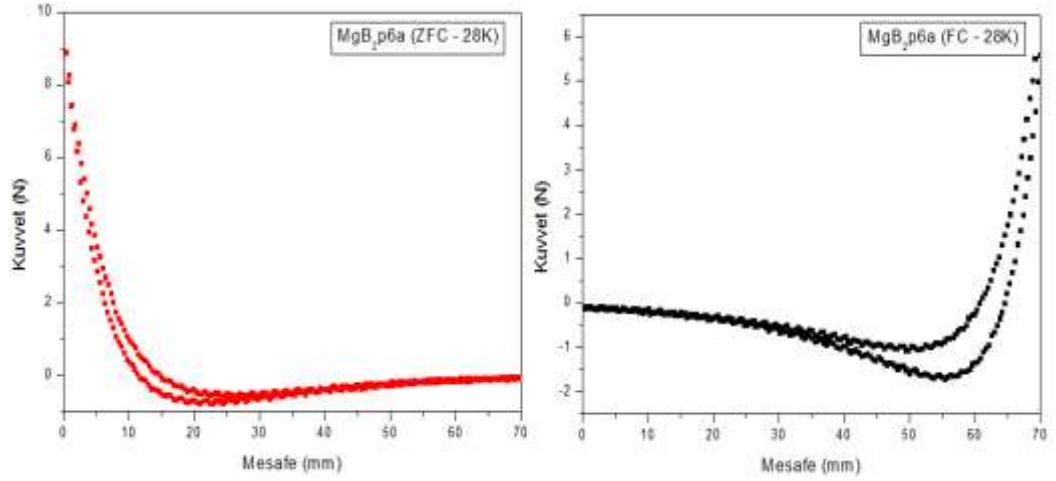
Şekil 4.40 YBGP serisi numunelerinin 2. ısıt işlem sonunda alınan AA alıngnlık-Sıcaklık grafiklerinin karşılaştırması

4.3 Kaldırma Kuvveti Analizleri

Bu bölüm SHAS uygulamasında kullanılabilecek halka ve disk şeklindeki numunelerin karakterizasyonu için yapılan ölçümleri içermektedir.

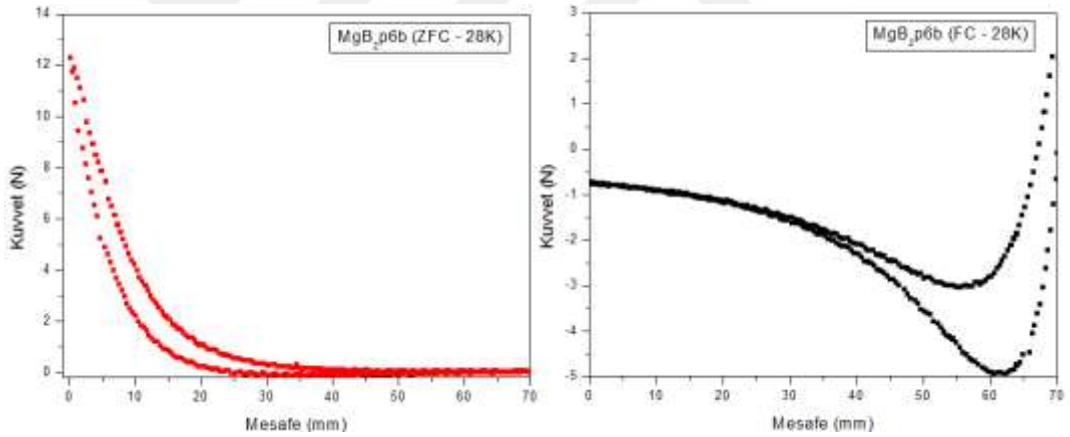
4.3.1 Halka ve disk numunelerin kaldırma kuvveti ölçümleri

MgB₂p6a numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm sonuçları şekil 4.41’de verilmektedir. Bu örneğin sıfır alan altında (ZFC) ve alan altında (FC) grafiği karşılaştırıldığında en yakın noktada elde edilen kuvvet değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşan histerisis (yarılma) miktarının FC rejiminde daha fazla olduğu gözlenmektedir. Bu durum beklenen bir sonuçtur.



Şekil 4.41 MgB₂p6a numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm grafiği

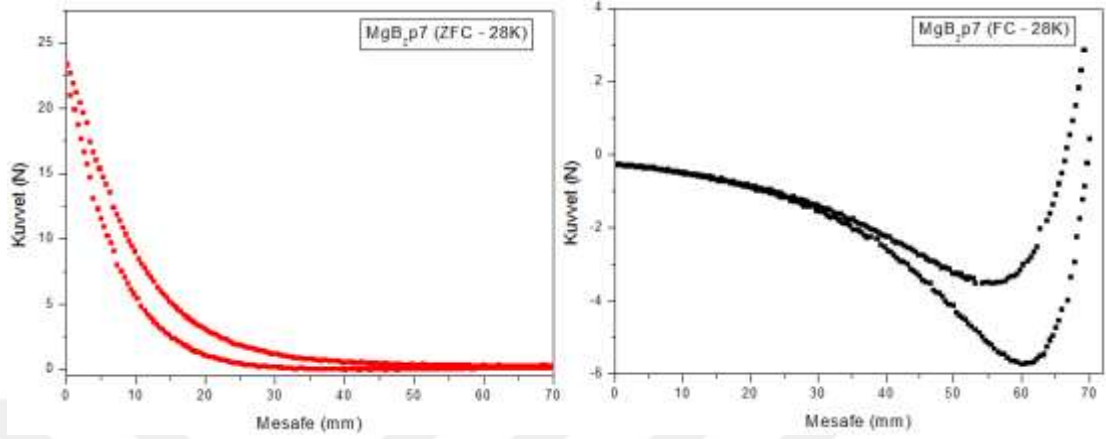
Şekil 4.42’de ise MgB₂p6b numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.42 MgB₂p6b numunesine ait ikinci ölçüm grafiği

Şekil 4.41’deki ZFC grafiği ile şekil 4.42’deki ZFC grafiği arasındaki fark; çapların aynı kalması şartı ile kütle miktarının artmasıyla ortaya çıkan kaldırma kuvvetinin farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Büyük kütleli halkanın daha yüksek bir kaldırma kuvveti oluşturduğu açıktır. Benzer kıyaslama FC grafiğinde de yapılabilir. Burada daha büyük bir histeresis oluşmuştur. Bunun sonucu olarak bu malzemenin daha fazla manyetik alan hapsedtiği yani perçinleme (pinning) merkezi sayısının ya da etkinliğinin daha fazla olduğu şeklinde değerlendirilmektedir.

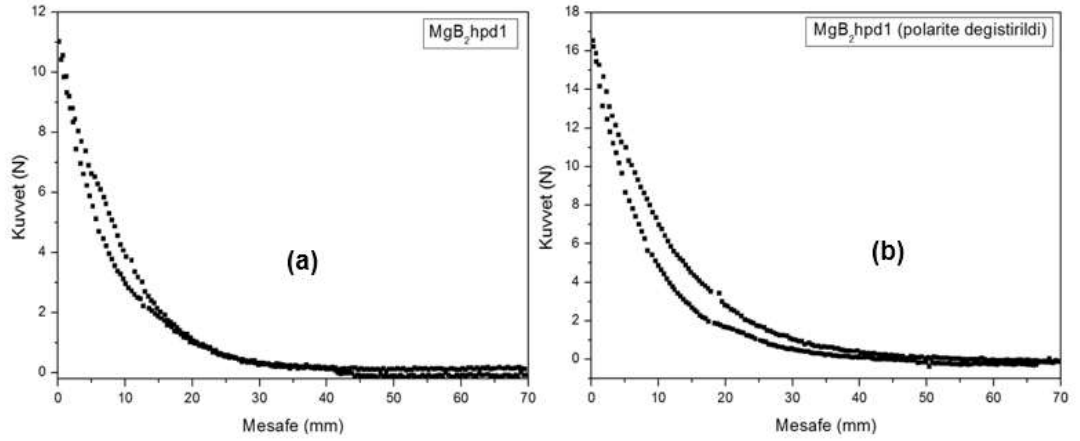
MgB₂p7 numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm sonuçları ise şekil 4.43'te verilmektedir.



Şekil 4.43 MgB₂p7 numunesine ait kaldırma kuvveti grafiği

45 mm çapındaki halka (MgB₂p7) ile oluşturulan numunenin ZFC rejimindeki kaldırma kuvveti eğrisi dikkatle incelendiğinde yaklaşık 25 N değerinde bir itici kuvvet elde edilmiştir. Bu sonucun, 35 mm halkadan (MgB₂p6a) elde edilen ZFC değerine göre yaklaşık 2-3 kat mertebesinde değiştiği gözlenmiştir. Bunun sebebi, 45 mm çapındaki halkanın akım taşıma kapasitesinin, 35 mm çapındaki halkaya göre daha yüksek olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Buna bağlı olarak da, MgB₂p7 numunesinin perçinleme merkezi sayısının daha fazla olduğu düşünülmektedir. FC rejimine bakıldığında ise, kaldırma kuvveti değerlerinin ZFC rejimine göre çok küçük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda yarılmının daha büyük olduğu, yani uygulanan manyetik alanın süperiletkenin içerisine nüfuz ettiği söylenebilir. Bu manyetik alan değerinin büyük kısmının numune tarafından hapsedilebileceği söylenebilir.

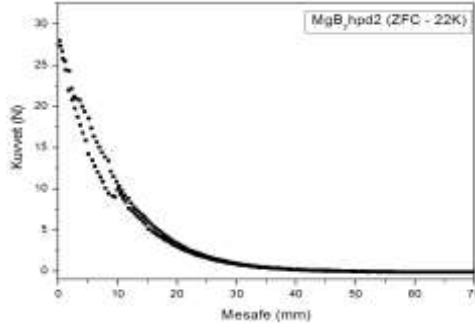
MgB₂hpd1 numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm sonuçları şekil 4.44'te verilmektedir.



Şekil 4.44 MgB₂hpd1 numunesine ait kaldırma kuvveti grafiği

Şekil 4.44'te solda görüldüğü gibi mıknatıs ile süperiletkenin etkileşme mesafesinin 50 mm civarında başladığı ve mıknatıs süperiletkene yaklaştırıldıkça kuvvet değerinin keskin bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu yaklaşım anında elde edilen kuvvet değerinin, itici bir karakterde olduğunu göstermektedir. Maksimum itici kuvvet 11 N civarında elde edilmiştir ve dönüş eğrisine bakıldığı zaman yaklaşık olarak aynı çizgi üzerinde dönüşün gerçekleştiği görülmektedir ve dönüş çizgisinin negatif bölgeye hiç geçmediği tespit edilmiştir. Bunun sebebi, uygulanan manyetik alanın süperiletkenin içerisine tuzaklanacak değerde olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu düşüncenin doğru olup olmadığı Şekil 4.44'te sağda görülmektedir. Mıknatıs süperiletkenden 70 mm uzaktayken birinci çevrimden sonra mıknatısın yönü 180 derece değiştirilmiştir. Böylece ikinci ölçüm sonucunda grafikten de görüldüğü gibi daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Bunun sebebi birinci çevrimde hapsolan manyetik alanı benzer bir kutupla yaklaşıldığında Coulomb itme kuvvetinden dolayı daha yüksek bir itici kuvvet elde edilmesidir.

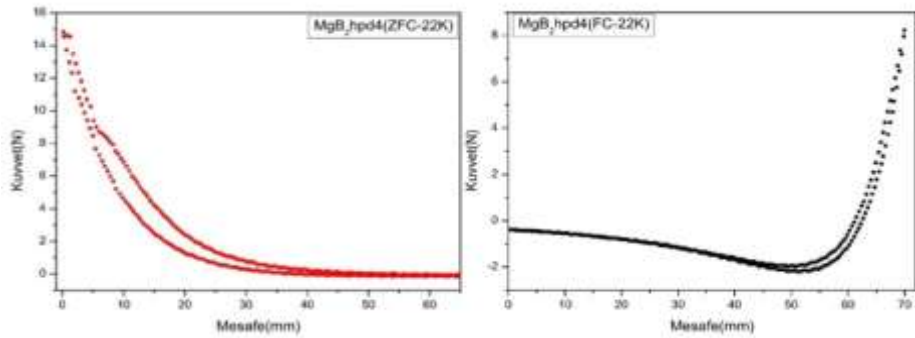
MgB₂hpd2 numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm sonuçları Şekil 4.45'te verilmektedir.



Şekil 4.45 MgB₂hpd2 numunesine ait kaldırma kuvveti grafiği

MgB₂hpd1 numunesinde görülen özellikler bu numunede de gözlenmiştir. Şekil 4.45'te görüldüğü gibi maksimum itici kuvvet 30 N civarında elde edilmiştir. Bunun sebebi, ölçüm sıcaklığının 22 K'e çekilmesi veya sıcak preslemede bekleme süresinin arttırılması şeklinde yorumlanabilir.

MgB₂hpd4 numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm sonuçları şekil 4.46'da verilmektedir. Grafikler incelendiğinde 50 mm çapındaki disk ile oluşturulan numunenin ZFC rejimindeki kuvvet eğrisi dikkatle incelendiğinde yaklaşık 15 N değerinde bir itici kuvvet elde edilmiştir. FC rejimine bakıldığında ise, kaldırma kuvveti değerlerinin ZFC rejimine göre küçük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda FC rejimine göre yarılmanın daha büyük olduğu, yani uygulanan manyetik alanın süperiletkenin içerisine nüfuz ettiği söylenebilir.



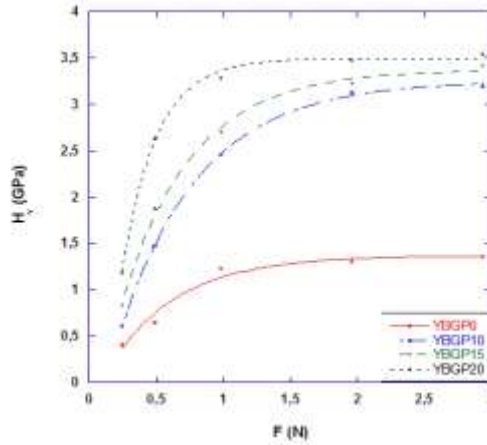
Şekil 4.46 MgB₂hpd4 numunesine ait kaldırma kuvveti ölçüm grafiği

4.4 Mikro Sertlik Ölçümleri

Malzemelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu için Vickers Mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Shimadzu HVM-2 model mikrosertlik cihazı ile oda sıcaklığında alınmıştır. Vickers Mikrosertlik testinde elmas uçlu piramit, 0.245 N, 0.490 N, 0.980 N, 1.960 ve 2.940 N olmak üzere 5 farklı yükte numuneler üzerine 10 s süreyle bastırılmıştır. Daha sonra yüzeyde oluşan dikdörtgen izin köşegenleri mikroskopla ölçülmüştür. Hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu aşağıda verilen eşitlikte kullanılarak numunelerin Vickers mikrosertlik değerleri belirlenmiştir.

$$H_v = 1854.4 \frac{F}{\left(\frac{d_1+d_2}{2}\right)^2} \quad (4.2)$$

Malzemeler ISE (çentik boyutu etkisi (ÇBE)) ve RISE (ters çentik boyutu etkisi (TÇBE)) olmak üzere iki tip davranış gösterirler. Malzemeye uygulanan yük arttıkça sertlik azalıyorsa ISE, uygulanan yük arttıkça sertlik artıyorsa RISE davranışı olarak tanımlanır.



Şekil 4.47 YBCO numuneler için mikrosertliğin uygulanan yüke bağlı değişimi

Eritme yöntemi ve yeşil faz katkıları ile üretilen YBCO numuneler için mikrosertliğin uygulanan yüke bağlı değişimi Şekil 4.47’de gösterilmektedir. Grafikten de görülebileceği gibi uygulanan yük 0.245 N değerinden 2.940 N değerine atırıldığında

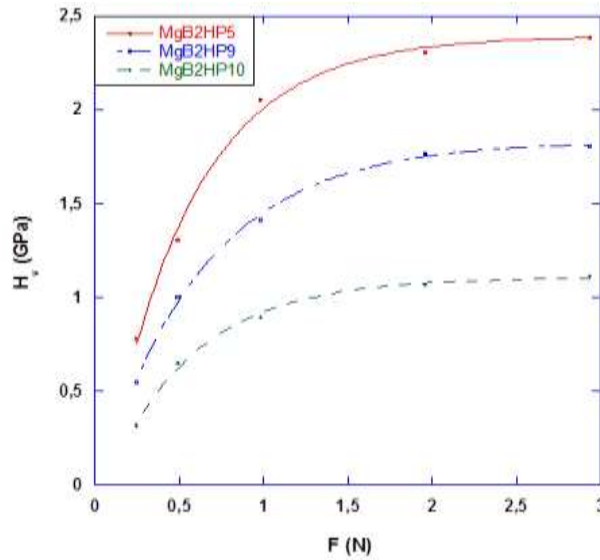
sertlik değerleri artmıştır. Yani, YBCO numuneler RISE davranışı gösterirler. Uygulanan yükün yanı sıra numune içindeki yeşil faz oranı da sertlik değerlerini etkilemiştir. Numune hazırlama esnasında eklenen yeşil faz oranı arttıkça sertlik değerlerinde katkısız numuneye göre ani sistematik bir artışın olduğu görülmektedir. YBCO numuneler için 3 N civarında plato bölgesine ulaşıldığı görülmektedir. Yeşil faz oranının artması ile sertliğin artması süperiletken gözenekli yapının azaldığı şeklinde yorumlanabilir. Malzemelerin mekanik karakterizasyonları analiz edilirken uygulanan kuvvete karşı elde edilen sertlik değerleri ve mikroskop ile ölçülen yüzeyde oluşan dikdörtgen izin köşegen uzunluğunun ortalaması (d) izelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 YBCO numunelerin uygulanan kuvvete karşı elde edilen sertlik değerleri

Numune adı	F (N)	H _v (GPa)	d (m)
YBGP0	0.245	0.407	33.40
	0.490	0.643	37.56
	0.980	1.224	38.51
	1.960	1.306	52.75
	2.940	1.351	63.50
YBGP10	0.245	0.614	27.20
	0.490	1.472	24.85
	0.980	2.458	27.19
	1.960	3.129	34.08
	2.940	3.194	41.31
YBGP15	0.245	0.837	23.30
	0.490	1.874	22.02
	0.980	2.696	25.96
	1.960	3.229	33.55
	2.940	3.414	39.96
YBGP20	0.245	1.189	19.55
	0.490	2.637	18.56
	0.980	3.293	23.49
	1.960	3.482	32.31
	2.940	3.550	39.19

Sıcak presleme yöntemi ile hazırlanan numuneler arasından seçilmiş olan MgB₂ numunelerinin mikro sertliğinin uygulanan yüke bağlı değişimi şekil 4.48’de gösterilmektedir. Bu grup numunelerde de YBCO numunelerde olduğu gibi uygulanan yük 0.245 N değerinden 2.940 N değerine atırıldığında sertlik değerleri artmıştır. Yani, grafikte verilen MgB₂ numuneler de RISE davranışı gösterirler. Sıcak presleme yöntemi

ile hazırlanan bu üç numune karşılaştırıldığında MgB_2hp5 numunesi en yüksek sertlik değerlerine sahip olan numunedir. MgB_2hp5 numunesi diğer iki numuneden farklı olarak etil alkol içerisinde 10 dakika süreyle bilyalı değirmende 400 rpm hızında karıştırılmıştır. Yapılan bu uygulama sonucunda daha homojen bir karışım elde edildiği ve bunun da sertlik değerleri üzerinde olumlu bir etki yaptığı düşünülmektedir. MgB_2hp9 ve MgB_2hp10 numuneleri karşılaştırıldığı zaman ise sadece halka büyüklüklerinin farklı olduğu görülmektedir. Her iki numunede 20 MPa basınç altında hazırlanmıştır. Buna göre MgB_2hp10 numunesinin boyut olarak daha büyük olması, birim alan başına uygulanan kuvvetin daha az olması yani MgB_2hp9 numunesine göre daha az yoğun bir yapının oluşması olarak yorumlanmaktadır. Mikro sertliğin uygulanan yüke bağlı değişimi grafiğine bakıldığı zaman MgB_2hp9 numunesi MgB_2hp10 numunesine göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olması yukarıdaki açıklamalar bağlamında düşünüldüğünde uyum içindedir. Malzemelerin mekanik karakterizasyonları analiz edilirken uygulanan kuvvete karşı elde edilen sertlik değerleri ve mikroskop ile ölçülen yüzeyde oluşan dikdörtgen izin köşegen uzunluğunun ortalaması (d) çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.48 MgB_2 numunelerinin mikro sertliğinin uygulanan yüke bağlı değişimi

Çizelge 4.2 MgB₂ numunelerin uygulanan kuvvete karşı elde edilen sertlik değerleri

Numune adı	F (N)	H _v (GPa)	d (μm)
MgB₂HP5	0.245	0.775	24.21
	0.490	1.303	26.41
	0.980	2.054	29.75
	1.960	2.305	39.71
	2.940	2.384	47.82
MgB₂HP9	0.245	0.548	28.79
	0.490	1.001	30.13
	0.980	1.412	35.88
	1.960	1.765	45.38
	2.940	1.808	54.91
MgB₂HP10	0.245	0.316	37.92
	0.490	0.644	37.56
	0.980	0.893	45.11
	1.960	1.065	58.42
	2.940	1.113	69.99

4.5 SHAS Uygulamaları

4.5.1 Manyetik akı transferi tipi SHAS uygulaması

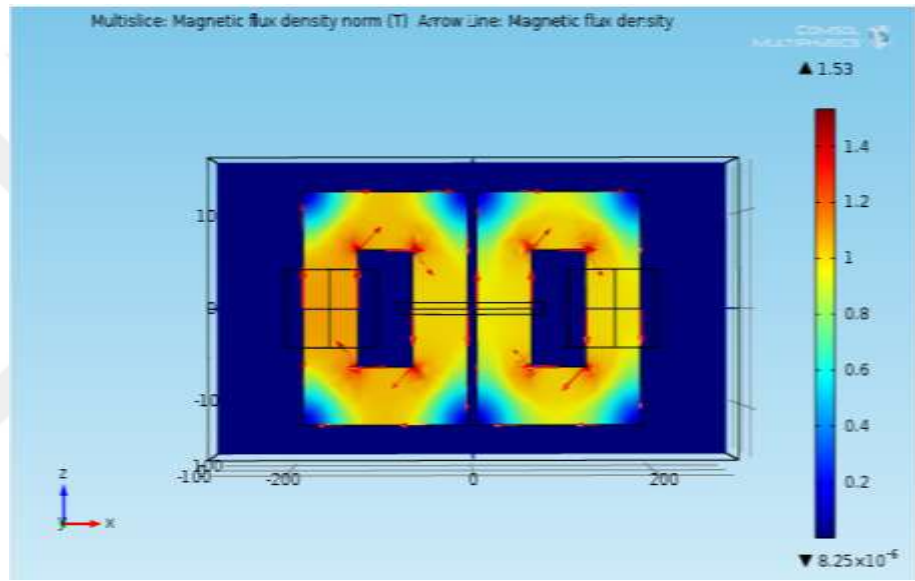
Öncelikli olarak bu yöntemin çalışılabilirliği, simülasyon çalışmalarıyla test edilmiştir. Simülasyon çalışmasında manyetik akının demir nüve üzerindeki değişimine, yüklü ve yüksüz durumlar için bakılmıştır. Bunun için öncelikle matematiksel hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar hatalı akım sınırlandırıcının kullanılabileceği en kötü durumlar (laboratuvar imkânları, kısa devre, yüksek hatalı akım, vb.) göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

$$V_{max.} = B_{max.} \times 2 \times \pi \times f \times A_{demir nüve} \times N \quad (4.3)$$

(4.3) denkleminde göre, tek-fazlı 2 kVA'lık bir SHAS tasarımı için bobin sarım sayısı;

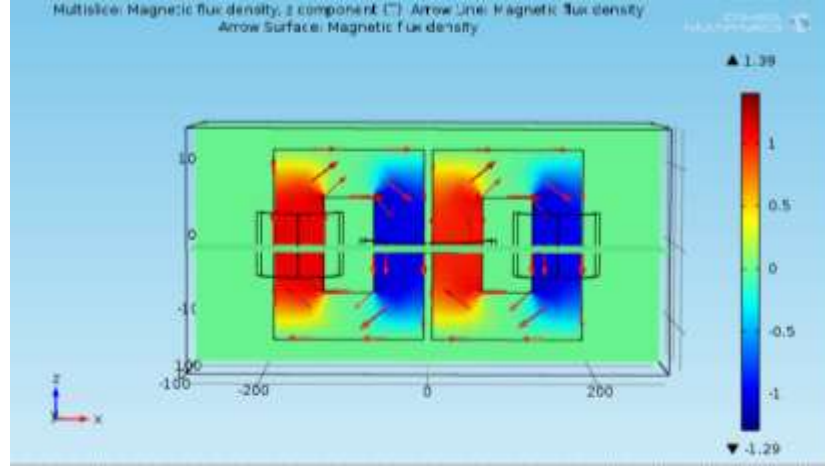
$$220 \text{ V} = 1,7 \text{ T} \times 2 \times \pi \times 50 \text{ Hz} \times 36 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times N \quad (4.4)$$

ifadesinden, yaklaşık olarak N (sarım sayısı) 120 olarak hesaplanmıştır. Bu değer demir nüvenin kesit alanına ve taşıyabildiği maksimum manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Bu hesaplamalardan sonra kolay olması nedeniyle, manyetik akı transferi tipinde tek-fazlı 2 kVA'lık SHAS simülasyonuna geçilmiştir. Simülasyon için COMSOL programı kullanılmıştır. Öncelikli olarak 2 A/mm²'lik akım yoğunluğu altında demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu üstüne simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyonda kullanılan bobinlerin kesit alanı 400 mm² olarak seçilmiştir. Bu çalışmaya ait simülasyon görüntüleri şekil 4.49–4.52'de verilmektedir.



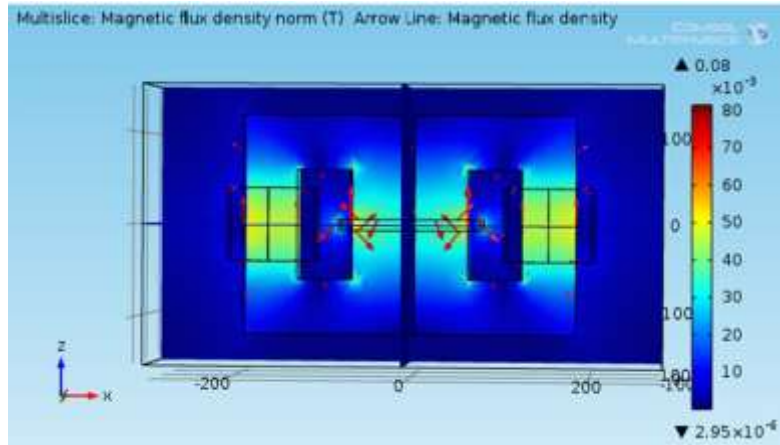
Şekil 4.49 Yüksüz durumda demir nüve üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu

Şekil 4.49'da demir nüvede oluşan manyetik akı yoğunluğu renk skalasıyla gösterilmiştir. Demir nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun yaklaşık 1T olduğu ve herhangi bir doyuma ulaşmadığı görülmektedir. Burada ikincil bobin herhangi bir yüke bağlı değildir. Uygulamalar açısından demir nüvenin doyuma ulaşmamış olması gerekmektedir. Doyuma ulaştıktan sonra demir nüvenin sağlıklı çalışması beklenmemektedir. Oklar ise; demir nüve üzerindeki manyetik akının yönünü göstermektedir. İki demir nüvenin bağlantısı süperiletken tel ile yapılmıştır. Manyetik akı transferi süperiletken tel yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



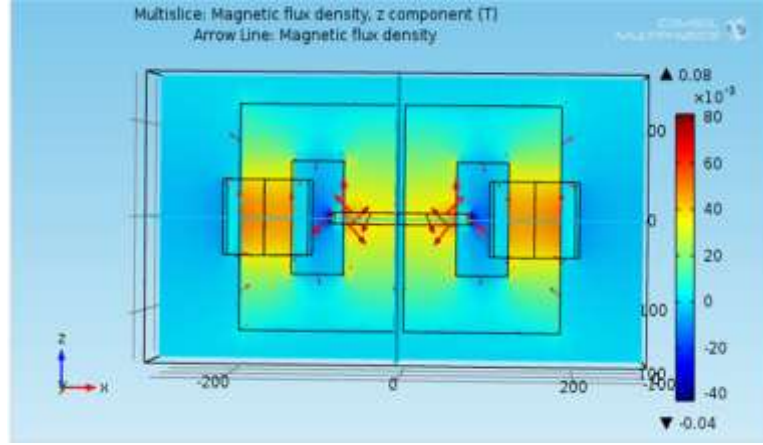
Şekil 4.50 z eksenini boyunca yüksüz durumda demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu

Şekil 4.50'den de görüleceği üzere ikincil bobine bağlı yük olmadığı durumda, soldaki demir nüvede (mavi renkle gösterilen) oluşan manyetik akı yoğunluğu, süperiletken halka içerisinde sağdaki demir nüve üzerinde (kırmızı renkle gösterilen) ters yönlü manyetik akı yoğunluğunu oluşturmaktadır. Bu şekilde toplam manyetik akı süperiletken halka içerisinde yaklaşık olarak sıfır olmaktadır.



Şekil 4.51 Yük olduğu durumda demir nüve üzerindeki mutlak manyetik akı yoğunluğu

Şekil 4.51'de, ikincil bobine yük bağlandığında demir nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Bu durum demir nüveden havaya manyetik alan sızmasından dolayı kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.52 z eksenı boyunca yüklü durumda demir nüve üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu

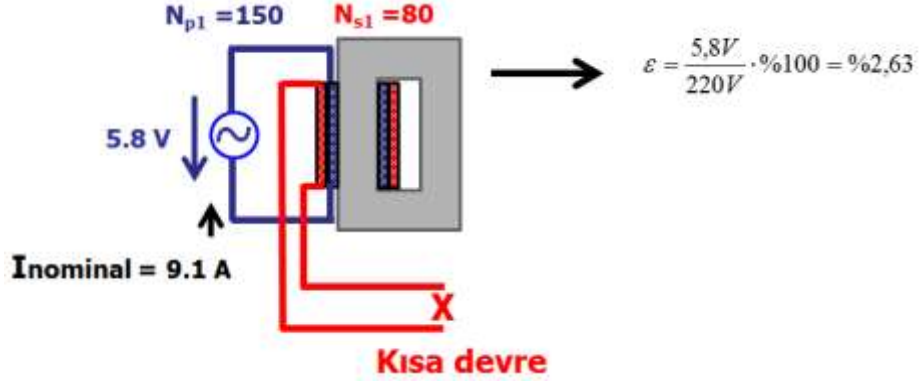
Şekil 4.52’de yüksüz duruma göre demir nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun z eksenı boyunca azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi manyetik alanın havaya sızmasıdır.

Genel olarak, yük olduğu durumda manyetik alanın havaya daha çok sızdığı görülmüştür. Bu simülasyon iki tane bağımsız demir nüvenin bir süperiletken yardımıyla birbirine manyetik olarak bağlanarak tek bir trafo gibi çalışabileceğini göstermektedir. Simülasyon sonuçları ile birlikte akı transferi yönteminin çalıştığı gözlemlenmiştir. Bir sonraki aşamada aynı yöntem kullanılarak 3-fazlı 6 kVA’lık trafonun üretimine geçilmiştir.

Manyetik akı transferi metodu ile çalışan 6 kVA’lık 3-fazlı SHAS sistemimiz için birincil ve ikincil taraftaki voltaj düşüm (drop-ε) hesapları deneysel verilerle birlikte yapılmıştır.

İlk olarak birincil taraftaki düşüm hesabı için referans bobini kısa devre edilerek, nominal akım değerinde birincil bobin üzerindeki gerilim değeri ölçülmüştür. Buna göre sistemimizde 9.1 A olarak belirlenen nominal akım değerine karşılık gelen gerilim değeri 5.8 V olarak ölçülmüştür. Düşüm hesabı denklem (4.5)’e göre yapılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{kısa devre}}}{V_{\text{nominal}}} \cdot \%100 \quad (4.5)$$



Şekil 4.53 Düşüm hesabı için devrenin şematik gösterimi

Sisteme uygulayabileceğimiz nominal gerilim değeri şehir şebekesinden kaynaklı olarak 220 V olduğundan dolayı ε değerimiz %2.63 olarak bulunmuştur. Bu değer kısa devre anında birincil taraftaki gerilim düşüm oranını vermektedir (Şekil 4.53).

Düşüm hesabının ardından ise, bu sistemin karşılayabileceği maksimum hatalı akım değeri hesaplanmıştır. Bu hesap için,

$$I_{\text{hatalı akım}} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot I_{\text{nominal}} \quad (4.6)$$

ifadesinden yararlanılmıştır. Buna göre birincil kısmın karşılayabileceği maksimum hatalı akım değeri 345.2 A olarak belirlenmiştir.

Aynı şekilde ikincil taraf için de benzer bir ölçüm alınmıştır. Bu sefer ikincil taraftaki bobin kısa devre edilmiş ve birincil bobin üzerinde nominal akım değerine ulaşıldığı andaki gerilim değeri ölçülmüştür. Bu değer 79.2 V'tur. Buna göre düşüm hesabı yapıldığında $\varepsilon = \%36$ olarak bulunmuştur. Bu değere karşılık gelen maksimum hatalı akım değerimiz ise 25.27 A'dir. Burada çıkan gerilim düşüm değeri yüksek gerilim uygulamalarında kullanılabilirlik için iyi bir değerdir.

Birincil ve ikincil demir nüvelerin birbirine bağlanmasını sağlayacak olan süperiletken telin oda sıcaklığında, dairesel şekilde ve $2r=20$ cm çapında 30 sarıma kadar indüktansları LCR metre ile ölçülmüştür. Bu ölçülen değerler çizelge 4.3'te verilmektedir. Ayrıca sıvı azotun sıcaklığa bağlı özısı değişimi ise çizelge 4.4'te verilmektedir. Bu değerler süperiletkenin şok geçiş (quench) yaptığı anda açığa çıkaracağı enerjiyi belirlemede önemli bir parametredir. Bu değerler ışığında 3-fazlı sistemimiz için quench anındaki yaklaşık enerji kaybı hesaplanmıştır. Bu hesap için şu yaklaşımlar yapılmıştır:

- Her bir fazı soğutmak için yaklaşık 1lt sıvı azot kullanılmıştır.
- Sıcaklık değişimi kabaca 77,74 K ile 116,99 K arasında düşünülmüştür. İletkenin yüzeyinde hızlı bir buharlaşmaya dayalı olarak azot gazı yüzeyi adeta bir ince film gibi kaplayacaktır. Azot gazının özısı sıvınıninkinden daha düşük olduğu değerlendirildiğinde iletkenin sıcaklığının hızlı bir şekilde artması beklenmektedir. Bu bakımdan temsili olarak yaklaşık 40 K'lık muhtemel bir sıcaklık değişimi öngörülerek ısı değiş tokuşu hesaplanarak irdelenmiştir.

Çizelge 4.3 20 cm çapında süperiletken halkanın indüktans ölçümleri

Sarım Sayısı	L (μH)	Sarım Sayısı	L (μH)
1	1,185	16	256,900
2	4,156	17	287,200
3	9,098	18	322,200
4	16,324	19	357,400
5	25,270	20	393,200
6	37,130	21	430,200
7	49,160	22	471,800
8	64,930	23	516,100
9	81,700	24	556,800
10	101,460	25	598,300
11	122,820	26	626,800
12	145,160	27	646,900
13	169,160	28	706,700
14	196,730	29	757,900
15	226,100	30	808,800

Çizelge 4.4 Sıvı azotun özısı değerleri (<https://www.bnl.gov> 2016b)

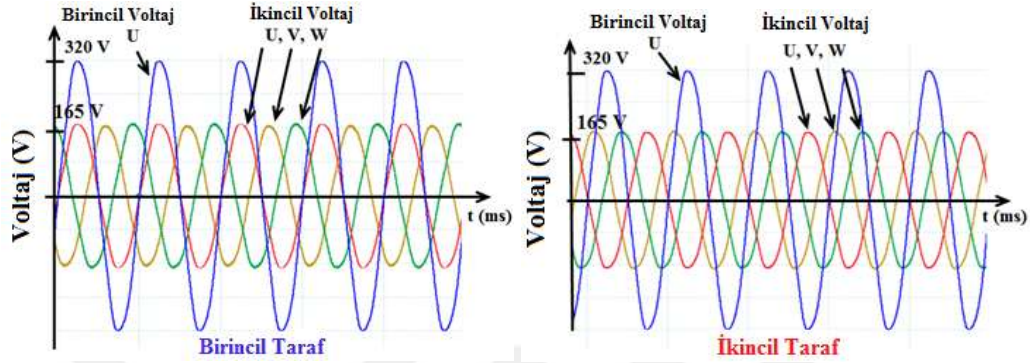
Sıcaklık (K)	Özısı (C) (cal/gr.mol. K)	Sıcaklık (K)	Özısı (C) (cal/gr.mol. K)
70,28	13,45	95,39	14,50
71,80	13,66	95,46	14,71
72,69	13,56	99,55	15,04
73,50	13,69	103,31	15,63
74,57	13,59	103,72	15,56
75,46	13,74	107,72	15,99
76,58	13,68	107,48	16,10
77,74	13,64	111,57	17,30
79,17	13,76	112,97	17,60
82,64	13,95	115,25	18,27
89,50	14,16	116,99	18,72

Sıvı azotun öz kütlesi; 0.808 gr/ml olduğuna göre, 1lt'si yaklaşık olarak 28.85 mol'dür. Çizelge 4.8'den de görüldüğü üzere 1lt sıvı azotun 77.74 K deki özısı değeri 13.64 cal/gr.mol.K iken, 116.99 K deki özısı değeri 18.72 cal/gr.mol.K'dir. Yaklaşık olarak 40 K'lık bir sıcaklık değişiminde ortalama özısı değeri 16.18 cal/gr.mol.K olmaktadır. Buradan sıcaklık değişimi için gerekli ısı miktarı; $Q = m.C.\Delta T$ formülünden; yaklaşık olarak 522937.6 cal'dir. 3-fazlı sistem için yaklaşık olarak 20 cm çapında süperiletken halka kullandığımızı varsayarsak, bu telin 14 sarım için indüktans değeri 196.73 μH 'dir (Çizelge 4.3). Süperiletken telin 77 K de şok geçiş (quench) anında açığa çıkaracağı enerji kabaca;

$$W = \frac{1}{2} \mu_r L I^2 \quad (4.7)$$

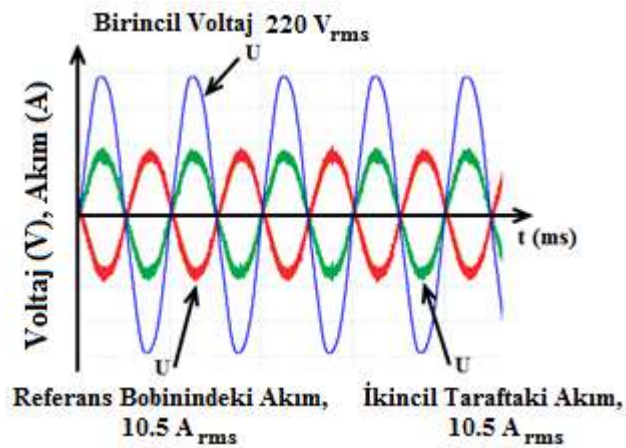
formülüyle hesaplanabilir. Kullanmış olduğumuz süperiletken telin kritik akım değeri 254 A'dir. μ_r değerimiz ise; 1000 olarak alınmıştır. Buna göre şok geçiş (quench) anında açığa çıkan enerji tek bir faz için yaklaşık olarak, 6346.12 J olacaktır. Bu hesaplamaların ardından SHAS üzerinde nominal çalışma ve kısa devre durumları için çeşitli ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler için; 3 adet Fluke marka multimetre, 3 adet yine Fluke marka Clamp metre ve 1 adet PicoScope marka 3425 model 4 kanallı osiloskop kullanılmıştır.

Şekil 4.54'te birincil ve ikincil taraflarda yüksüz durum için gerilim pik değerleri görülmektedir. Bu değerler sarım sayıları ile orantılıdır ve güçlü bir çiftlenimle manyetik akının ikincil tarafa iletildiği görülmektedir.



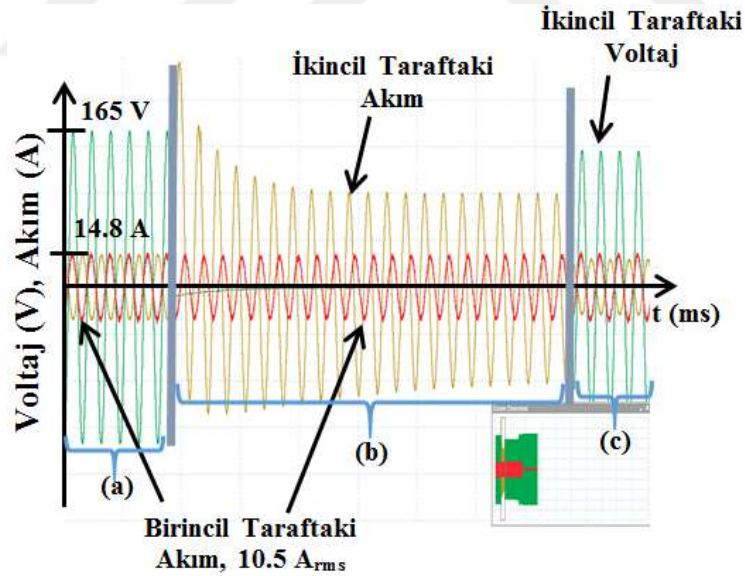
Şekil 4.54 Yüksüz durumda birincil ve ikincil taraflarda görülen gerilim değerleri

Şekil 4.55'te ise yüklü durum için referans bobini ve ikincil taraftaki bobin üzerindeki akım değerleri ve birincil bobine uygulanan gerilim değeri görülmektedir. Uygulanan gerilim değeri maksimum değer olan 220 V'tur. Buna karşılık gelen referans bobinindeki akım değerimiz 10.5 A'dır. Referans bobini ve ikincil bobindeki sarım sayılarımız aynı olduğundan gördüğümüz akım değerleri aynıdır. Bu durum da bize akı transferinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.55 Referans bobini ve ikincil bobindeki akım değerleri ve giriş gerilim değeri

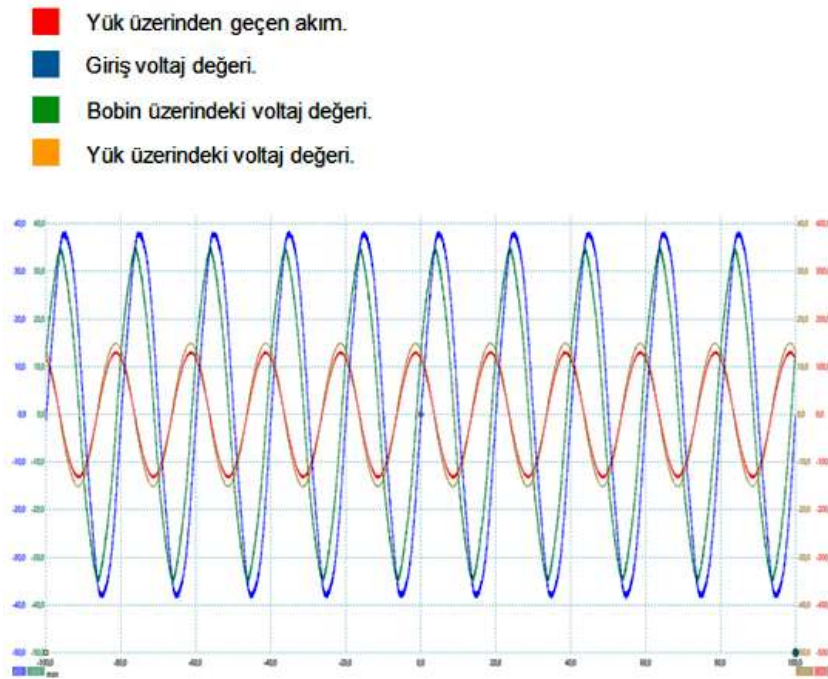
Bu sistemin bir SHAS olarak kullanılabileceğini görebilmek için ikincil bobin üzerinde kısa devre yapıldığında; ilk olarak ikincil taraftaki akım değeri bir an için artmakta ancak birkaç periyot içerisinde tekrardan azalıp belli bir değerde sabit kalmaktadır (Şekil 4.56). Bu arada kısa devre edilen taraftaki gerilim değeri neredeyse sıfıra düşmektedir. İkincil bobinin kısa devre edilme işleminin birincil taraftaki referans bobinini hiçbir şekilde etkilemediği yine şekil 4.56'dan görülmektedir. Şekil 4.56'da yeşil renk ile gösterilen, ikincil taraftaki gerilimdir. Kırmızı renk, birincil taraftaki akımı, sarı renk ise; ikincil taraftaki akımı göstermektedir. Yapılan bu deney esnasında ölçülen değerler göz önüne alındığında; ikincil bobindeki akım değeri yaklaşık olarak 27.3 A'ye ulaştığında süperiletken telimiz quench olmuştur. Bu da bize yaklaşık olarak nominal akım değerimizin (9.1 A) üç katı bir değer vermektedir. Yani ikincil bobinde nominal akım değerinin üç katına ulaşıldığında süperiletken şok geçiş (quench) yapmış ve kısa devre akımı şekil 4.56'dan da görüldüğü üzere sınırlanmıştır. Dolayısıyla bu sistem bir SHAS olarak kullanılabilmektedir. Sınırlanmış olan bu akım herhangi bir devre kesiciyle 4-5 periyot sonra (80-100 ms) tamamen sistemden uzaklaştırılabilir.



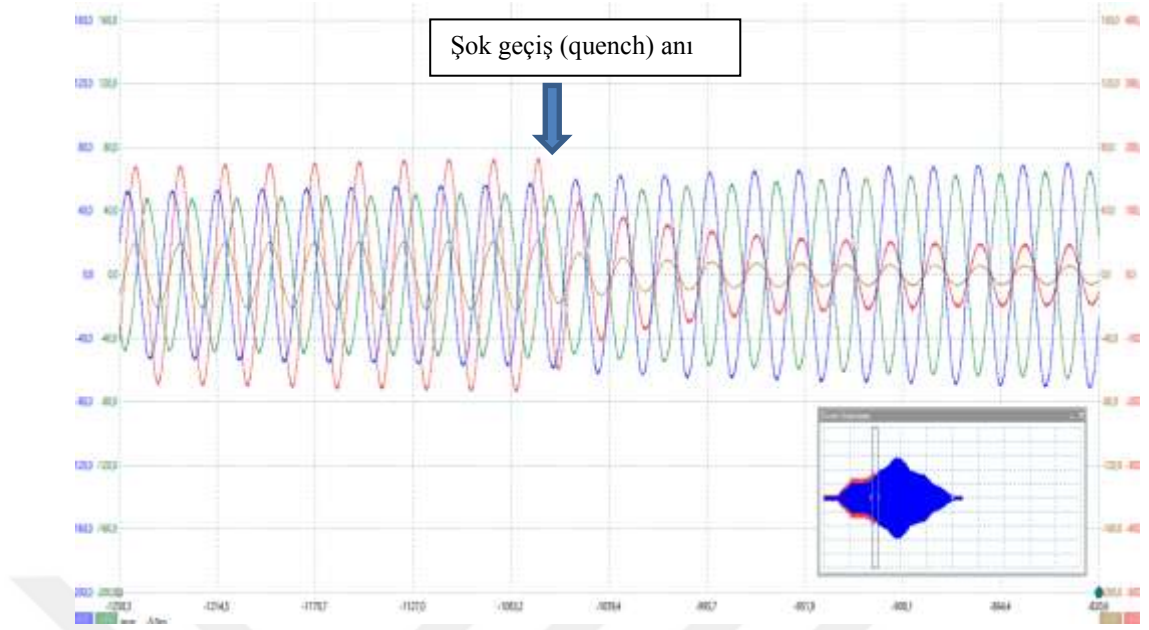
Şekil 4.56.a. Kısa devre edilmeden önceki durum, b. kısa devre süresince oluşan durum, c. kısa devre işlemi bittikten sonraki durum

4.5.2 İndüktif tip SHAS uygulaması

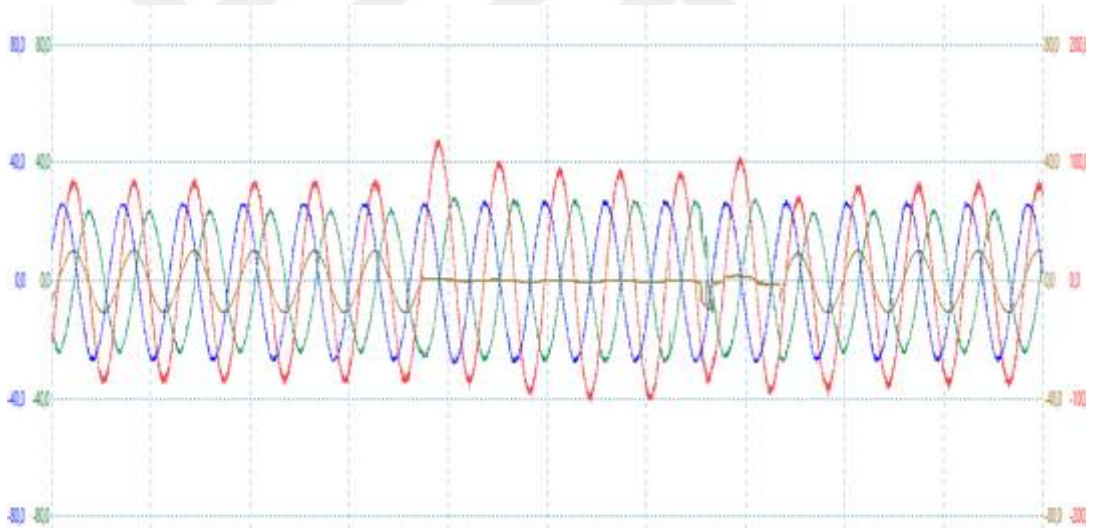
İndüktif tipte yapılan uygulamanın sonuçları şekil 4.57-4.59’da verilmektedir. Şekillerdeki renk kodlarına bakacak olursak; kırmızı, yük üzerinden geçen akım miktarını; mavi, giriş voltaj değerini; yeşil, bobin üzerindeki voltaj değerini ve sarı ise yük üzerindeki voltaj değerini göstermektedir. Şekil 4.57’de süperiletken halkanın hatalı akım sınırlayıcı konumunda iken normal çalışma durumu gösterilmektedir. Şekil 4.58’de sistem normal çalışma durumunda iken, giriş voltajı arttırıldığında akımın da artmasıyla beraber süperiletken kritik akım değerine ulaşp şok geçiş (quench) yapmaktadır. Dolayısıyla süperiletkenin normal duruma geçmesi; yük üzerindeki gerilim ve akım değerini azaltmaktadır. Bu da uygulama açısından korunması istenen bir devrede, süperiletken malzeme yüksek akıma maruz kaldığı anda normal duruma geçerek yük/yükler üzerindeki gerilimin düşmesine neden olacaktır. Devrede oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda (kısa devre anında) da, benzer şekilde yük üzerindeki akım değeri önce artmakta daha sonra ise belirli bir değerde sınırlanıp azalmaya başlamaktadır (Şekil 4.59).



Şekil 4.57 Süperiletken halkanın SHAS konumunda normal çalışma durumu



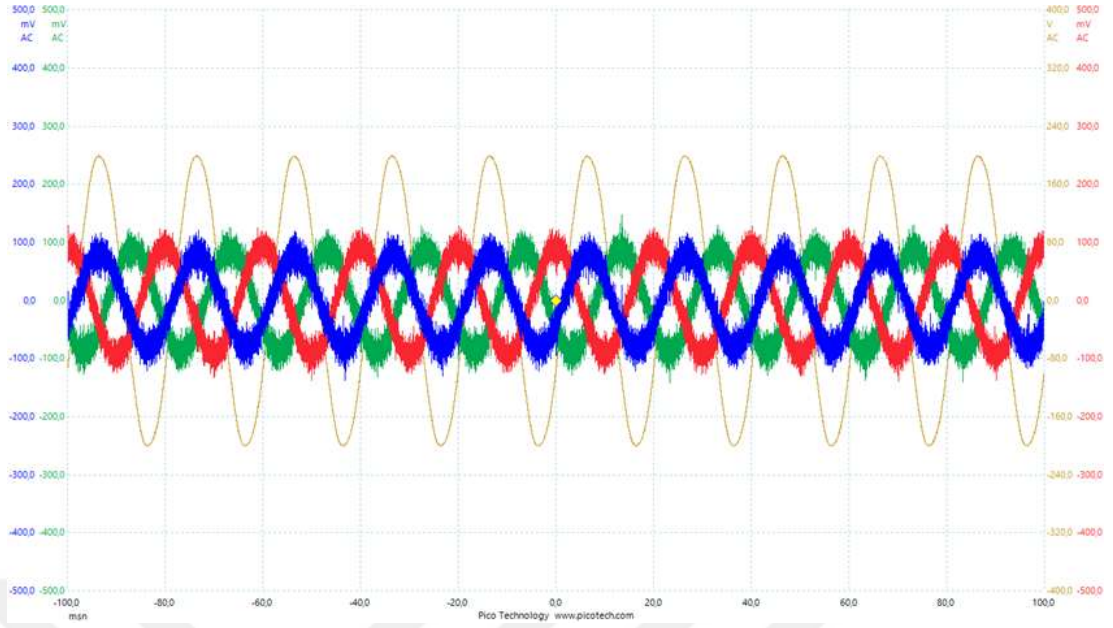
Şekil 4.58 Süperiletken halkanın şok geçiş (quench) anı



Şekil 4.59 Devrede arıza olduğunda hatalı akım sınırlayıcının çalışma durumu

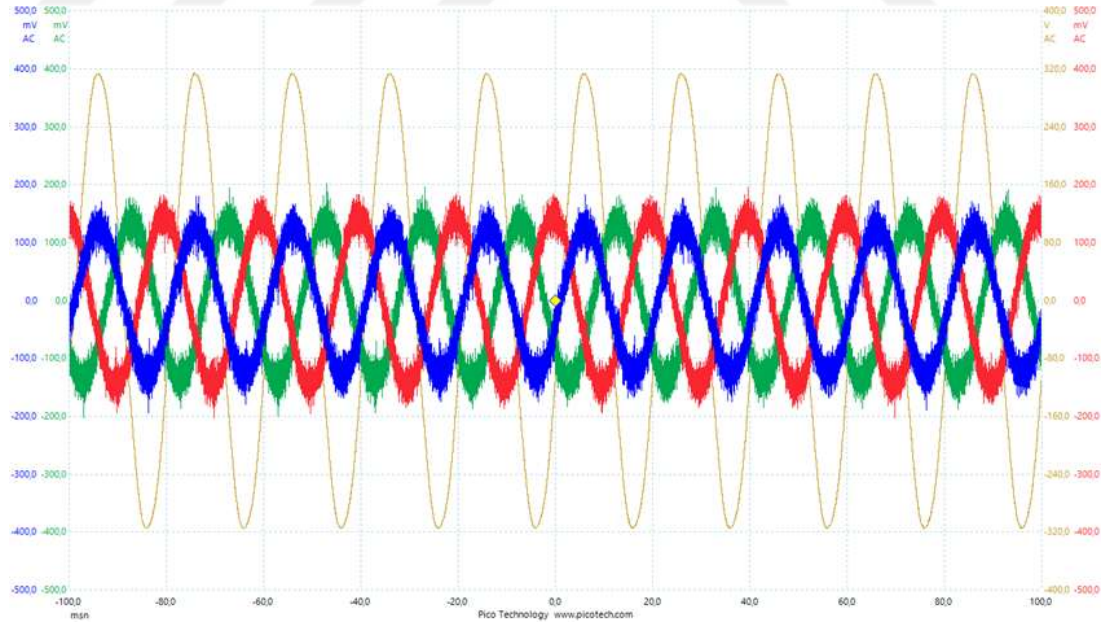
4.5.3 Rezistif tip SHAS uygulaması

Bu çalışmada ilk olarak sistemin düzgün bir şekilde çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Buna göre, ilk önce 220 V pik değerine kadar giriş gerilimi artırılmıştır (Şekil 4.60). Sistemin normal bir şekilde çalıştığı görüldükten sonra maksimum pik değerine ulaşıncaya kadar giriş gerilimi artırılmıştır (Şekil 4.61).



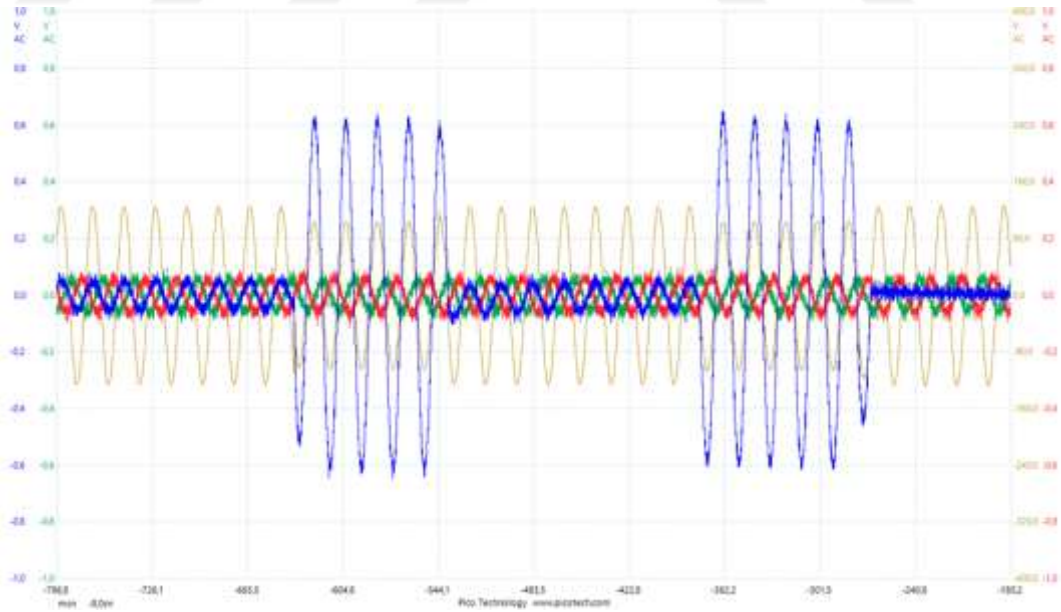
Şekil 4.60 Sistemin çalışma testi

Şekil 4.60 ve şekil 4.61’de sarı renk giriş gerilimini, yeşil, kırmızı ve mavi ise her bir fazdan geçen akım değerini göstermektedir.

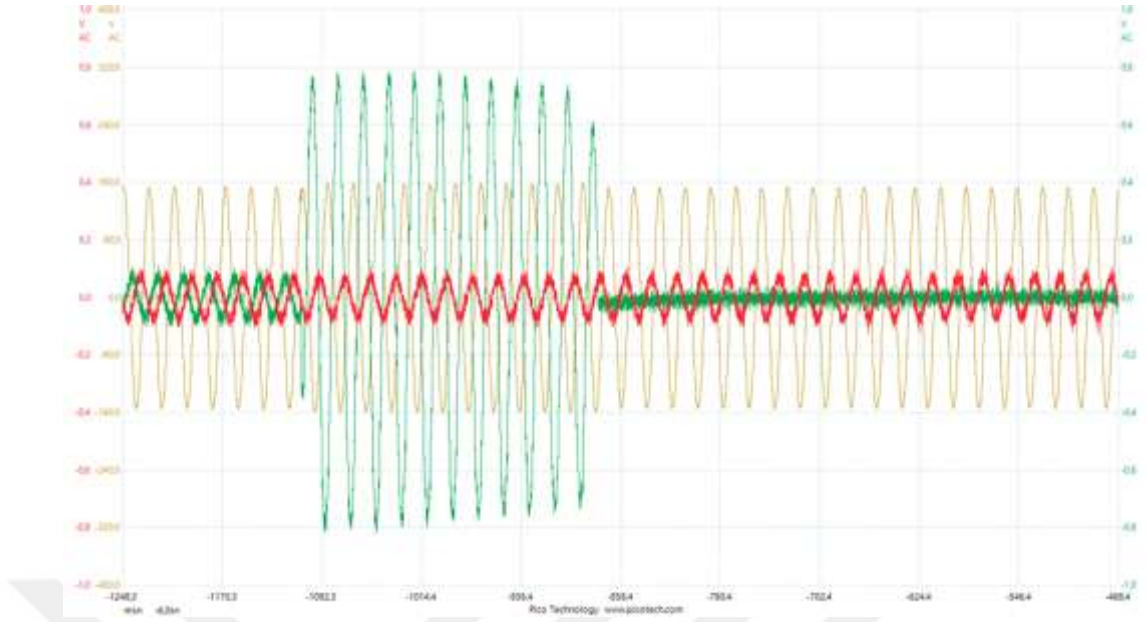


Şekil 4.61 Maksimum giriş geriliminde sistemin çalışma durumu

Şekil 4.62’de ise fazlardan biri kısa devre edildiğinde sistemin tepkisi görülmektedir. Buna göre gerilimde bir azalma söz konusuysen, faz üzerindeki akımın çok kısa süre için bile olsa kısa devre anlarında azalmaya başladığı görülmektedir. Kısa devre (hata) durumu geçtiğinde sistem normal düzeyde çalışmasına devam etmektedir. Yani süperiletken kısa devre anında quench olup hatalı akımı sınırlarken, kısa devre ortadan kalktığında süperiletken yine süperiletken durumuna geçip sistemin eski halinde çalışmasına izin vermektedir. Şekil 4.62’de dikkat edilmesi gereken bir husus da, ikinci kısa devre işleminden sonra mavi çizgi sıfır seviyesinde devam etmektedir. Bunun sebebi, soğutma kabı içerisindeki süperiletken tellerin maruz kaldığı kuvvetin, telin sıvı azotun dışına çıkmasına sebep olması ve bu nedenle ısınan telin bağlantı noktalarından yanmasıdır. Eğer süperiletken teller, soğutma kabının içerisinde mekanik olarak hareket edemeyecek şekilde uygun malzemeler kullanılarak sabitlenebilseydi böyle bir problemle karşılaşılmayacaktı. Şekil 4.63’te diğer fazda gerçekleştirilen kısa devre işlemi görülmektedir. Bu deney esnasında 3-fazdan sadece ikisi kullanılmıştır. Görüldüğü üzere hatalı akım uzun süre devrede olduğunda bu fazdaki süperiletken de yanmıştır. Ancak yanma anına kadar telin hatalı akımı sınırlayabildiği de görülmektedir.



Şekil 4.62 Kısa devre anında sistemde akım-gerilim değişimi



Şekil 4.63 Başka bir fazda kısa devre işlemi

5. SONUÇ

Tez kapsamında, SHAS'larda kullanılma potansiyeli yüksek olan külçe şeklinde MgB_2 ve YBCO süperiletkenlerinin bu amaca uygun kalitede üretim metodları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Üretilen MgB_2 numunelerinin hepsinde toz hazırlık aşamasında ve numuneler ısıtıl işlem öncesinde krom tüp içerisine yerleştirilirken fazlardan Mg tozu konulmuştur. Dolayısıyla XRD sonuçlarının genelinde Mg fazlarına rastlanmaktadır. Bunun yanı sıra krom tüpün kapatılma işleminin hava ortamında yapılması ve ısıtıl işlem esnasında Ar akışına rağmen numunelerin bulunduğu ortamdaki uzaklaştırılamayan oksijen nedeniyle de MgO fazlarına rastlanmıştır. Ayrıca sıcak presleme ile üretilen numunelerin ana faz piklerinin daha keskin bir şekilde oluştuğu görülmüştür. Sıcak preste bekleme süresinin artmasıyla ana pik şiddetinin de arttığı gözlenmiştir. Böylece numune üretiminde; başlangıç toz reaksiyon sıcaklığı, sıcak presleme sıcaklığı ve bekleme süresinin, ikinci ısıtıl işlem sıcaklığı ve süresinin, ayrıca toz presleme basıncının kristal yapı üzerinde etkili olan parametreler olduğu söylenebilir. Bu parametrelerden bir veya birkaçı değiştirildiğinde süperiletkenin yapısal, mekaniksel ve elektriksel özelliklerinin değiştirilebileceği düşünülmektedir.

SHAS uygulamaları açısından en çok çalışılan numunelerden biri olan YBCO malzemesinin halka şekilli olarak üretilmesi sırasında, aynı şartlarda karakterizasyon amaçlı külçe numuneler de üretilmiştir. Gerek katı hal reaksiyon yöntemiyle, gerekse de eritme yöntemiyle üretilen numunelerde YBCO ana fazlarının oluştuğu görülmüş ve yabancı fazlara rastlanmamıştır. Ayrıca tez kapsamında yeşil faz (Y-211) katkılandırılmasının kritik parametrelere etkisi de araştırılmıştır. Genel olarak üretilen YBCO numunelerinin XRD desenlerinde 001 yapısındaki piklerin şiddetlerinin sistematik olarak artma eğiliminde olduğu ve bu nedenle de c eksen yönünde tercihli bir dizilişin var olduğu düşünülmektedir. Ayrıca XRD desenlerinde genel olarak (103) pikinin (013) pikinden büyük olmasından dolayı numune yapısının ortorombik olduğu kanaatine varılmıştır.

Üretilen numunelerin alınganlık ölçümleri; 125 Hz frekansta ve farklı AA alan büyüklüklerinde alınmış ve grafiklerde sanal ve reel kısımlar gösterilmiştir. Manyetik

alan 80, 160, 320, 640 ve 1280 [A/m] büyüklüklerinde uygulanmıştır. Üretilen numunelerin tamamında uygulanan alan değeri arttıkça sistematik bir kayma gözlenmiştir. Farklı uygulamalarla üretilen MgB_2 numunelerinde süperiletkenlik özellikler lokal bazda görülmesine karşın, süperiletkende transport süper akım değerleri kaldırma kuvveti ölçümleriyle belirlenmeye çalışılmış ancak büyük ölçüde üretilmiş süperiletken halkaların optimizasyon işlemi gerçekleştirilemediğinden (bunun için fazla miktarda kimyasal malzeme ve zaman gerektiğinden) TÜBİTAK projesindeki ortaklarımızdan iyi nitelikli MgB_2 süperiletken halka temin edilmiş ancak bu süperiletken halka ile ilgili ayrıntılı fiziksel özelliklerin karakterizasyonu gerçekleştirilememiştir. Dolayısıyla kullanılması düşünülen MgB_2 'nin uygun soğutma şartları laboratuvar imkanlarında gerçekleştirilemediğinden 77 K'de süperiletken özelliklere haiz YBCO halkalar kullanılmıştır. Yığın malzeme olması bakımından taşımakta oldukları kritik transport akım değerleri düşük değerlerde kalmaktadır. Bu nedenle kaplanmış süperiletken YBCO, bir sarımında 77 K'de 300 A akım taşımaya bakımından tez kapsamında tasarlanan SHAS'ın üretimi YBCO kaplanmış süperiletken ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma prensibi açısından bir süperiletken halkanın fiziği ile çok sarımdan oluşan süperiletken bobinin fiziğinin büyük ölçüde benzerlik gösterdiği deneysel çalışmalarla teyit edilmiştir. Süperiletken halka ile yapılan çalışmalar bulgular ve tartışma kısmında özet olarak verilmiştir.

YBCO süperiletkenler kullanılarak 3 farklı tipte SHAS, laboratuvarımızda yapılmış olup, ölçümleri sıvı azot sıcaklığında (77 K) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ülkemizde bu alanda yapılan ilk uygulamalı çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Özellikle manyetik akı transferi metodu ile üretilen 3-fazlı 6 kVA'lık trafo, SHAS uygulamaları içerisinde yenilikçi özellikler ortaya koymaktadır. Hem kullanılan süperiletken miktarının, rezistif ve indüktif tipte uygulanan SHAS'lara oranla düşük olması, hem de soğutma ihtiyacının minimize edilmiş olması bu tür bir sistemin diğer sistemlere göre avantajlarını ön plana çıkarmaktadır.

Deneysel çalışma esnasında üretilen rezistif tipteki SHAS'ın test sonuçları olumlu olmasına karşın, soğutma kabı içerisindeki süperiletkenlerin yeterli düzeyde mekanik olarak sabitlenememesinden dolayı iki ve üçüncü denemelerde süperiletken tellerin

bağlantı noktalarında yanma ve buna bağlı kopmaların olduğu görölmüştür. Bu problem genel olarak tez kapsamında üretilen SHAS'larda yaşanan bir problemdir.

Bu çalışmanın bir sonraki aşamasında şehir şebekelerine uygunluk açısından; özellikle soğutma sisteminin iyileştirilerek kullanılan süperiletkenlerin kapalı bir soğutma devresi içerisinde soğutulmasının sistemin güvenilirliği ve daha uzun süreli kullanımı açısından önemli olduğu düşünölmektedir. Bu sağlandıktan sonra yüksek gerilim seviyelerinde çalışabilecek bir sistem geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Anonim. 2014a. GDZ Elektrik Dağıtım, Tedarik Sürekliliği Kalite Göstergeleri, Web Sitesi: <http://www.gdzelektrik.com.tr/bpi.asp?caid=890&cid=2657>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014b. EPDK, Web Sitesi: www.epdk.org.tr/TR/Dokuman/2458, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015a. ADM Elektrik Dağıtım, Tedarik Sürekliliği Kalitesi Tabloları, Web Sitesi: <http://www.admelektrik.com.tr/bpi.asp?caid=726&cid=1030>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015b. Akdeniz Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Tabloları, Web Sitesi: <http://www.akdenizedas.com.tr/sayfa.asp?mdl=sayfalar&id=159>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015c. Akedaş Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Göstergeleri, Web Sitesi: http://www.akedasdagitim.com.tr/Kalite_Gostergeleri, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015d. Aras Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Göstergeleri, Web Sitesi: <http://www.arasedas.com/musteri-hizmetleri-islemleri.asp?Id=28>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015e. Ayedaş, Tedarik Sürekliliği Kalite Göstergeleri, Web Sitesi: <https://www.ayedas.com.tr/Pages/Bilgilendirme/YasalBildirimler/Tedarik-Surekliligi-Kalite-Gostergeleri.aspx>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015f. Başkent Edaş, Tedarik Sürekliliği Kalite Göstergeleri, Web Sitesi: <https://www.baskentedas.com.tr/Pages/Bilgilendirme/YasalBildirimler/Tedarik-Surekliligi-Kalite-Gostergeleri.aspx>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015g. Boğaziçi Elektrik Dağıtım, Tedarik Sürekliliği, Web Sitesi: https://www.bedas.com.tr/tr/sayfalar/154/hizmet_kalitesi_gostergesi, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015h. Çamlıbel Elektrik Dağıtım, Tedarik Sürekliliği Kalitesi Tabloları, Web Sitesi: http://cedas.com.tr/sayfa.asp?mdl=sayfalar&id=38&m_id=267, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015i. Çoruh Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Kalite Tabloları, Web Sitesi: <http://www.coruhedas.com.tr/bp.asp?caid=766>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.

- Anonim. 2014-2015j. Dicle Edaş., Hizmet Kalite Göstergeleri, Web Sitesi: http://www.dedas.com.tr/bilgi/_Hizmet_Kalite_Gostergeleri/67, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015k. Fırat Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Kalitesi, Web Sitesi: <http://www.firatedas.com.tr/bp.asp?caid=766>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015l. Kayseri ve Civarı Elektrik Türk A.Ş., Tedarik Sürekliliği Kalitesi, Web Sitesi: <http://www.kcetas.com.tr/?kanal=kaliteteknik#>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015m. Osmangazi Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Kalite Tabloları, Web Sitesi: <http://www.osmangaziedas.com.tr/Istatistik-Tablolar?tablo=tedarik>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015n. Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Kalite Göstergeleri, Web Sitesi: [https://www.sedas.com/tr-tr/Bilgi_Danisma/Pages/TedarikSürekliligiKalitesi.aspx](https://www.sedas.com.tr-tr/Bilgi_Danisma/Pages/TedarikSürekliligiKalitesi.aspx), Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015o. Toroslar Edaş., Tedarik Sürekliliği Kalite Göstergeleri, Web Sitesi: <https://www.toroslaredas.com.tr/Pages/Bilgilendirme/YasalBildirimler/Tedarik-Surekliligi-Kalite-Gostergeleri.aspx>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015ö. Trakya Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği, Web Sitesi: <http://www.tredas.com.tr/Faaliyetlerimiz/Sayfalar/Tedarik-Sürekliligi.aspx>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015p. Uludağ Elektrik Dağıtım, Ticari Kalite Tabloları, Web Sitesi: <http://www.uedas.com.tr/sayfa.asp?mdl=sayfalar&id=123>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015r. Vangölü Elektrik Dağıtım, Tedarik Sürekliliği Kalitesi, Web Sitesi: <http://www.vedas.com.tr/bilgi-merkezi/kalite-gostergeleri/tedarik-surekliligi-kalitesi>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonim. 2014-2015s. Yeşilırmak Elektrik Dağıtım A.Ş., Tedarik Sürekliliği Göstergeleri, Web Sitesi: <http://www.yesilirmakedas.com/musteri-teknik-hizmetleri-islemleri.asp?Id=37>, Erişim Tarihi: 16.06.2016.
- Anonymous. 2016a. Web Sitesi: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>, Son Erişim:14.07.2016.
- Anonymous. 2016b. Web Sitesi: <https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section6.pdf>, Son Erişim:15.07.2016.

- Aydiner, A., Çakır B., Başoğlu M. and Yanmaz E. 2010. The Effect of Excess Y₂O₃ Addition on the Mechanical Properties of Melt-Processed YBCO Superconductor, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 23, 1493–1497.
- Bashkistrov, Y.A., Fleishman, L.S., Patsayeva, T.Y., Soboler, A.N. and Vdovin, A.B. 1991. Current-limiting reactor based on high-T_c superconductors, *IEEE Transaction on Magnetism*, 27(2), 1089-1092.
- Buzza, C. and Yamashita, T. 2001. Review of the superconducting properties of MgB₂, *Superconductor Science and Technology* 14, 115-146.
- Clem, J.R. 2008. Field and current distributions and ac losses in a bifilar stack of superconducting strips, *Physical Review B*, 77, 134506.
- Collings, E.W., Sumption, M.D., Bhatia, M., Susner, M.A. and Bohnenstiehl, S.D. 2008. Prospects for improving the intrinsic and extrinsic properties of magnesium diboride superconducting strands, *Supercond. Sci. Technol.* 21, 103001.
- Dou, S.X., Wang, X.L., Horvat, J., Milliken, D., Li, A.H., Konstantinov, K., Collings, E.W., Sumption, M.D. and Liu, H.K. 2001. Flux jumping and a bulk-to-granular transition in the magnetization of a compacted and sintered MgB₂ superconductor, *Physica C*, 361, 79-83.
- Eisterer, M. 2007. Magnetic properties and critical currents of MgB₂, *Supercond. Sci. Technol.* 20, 47-73.
- Eisterer, M., Zehetmayer, M., Tönies, S., Weber, H.W., Kambara, M., Hari Babu N., Cardwell, D.A. and Greenwood, L.R. 2002. Neutron irradiation of MgB₂ bulk superconductors, *Supercond. Sci. Technol.* 15, L9–L12.
- Endo, M., Hori, T., Koyama, T., Kaiho, K., Yamaguchi, I., Arai, K., Mizoguchi, H. and Yanabu, S. 2009. Development of a superconducting fault current limiter using various high-speed circuit breakers, *IET Electric Power Applications*, 3(4), 363-370.
- Ertekin, E., Gecer, S., Yanmaz, E., Safran, S., Kosa, J., Kilicarslan, E.S., Kilic, A., Amemiya, N. and Gencer, A. 2016. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, DOI:10.1007/s10948-016-3623-y.
- Fassbinder, S. 2013. Application notes efficiency and loss evaluation of large power transformers, European Cooper Institute (ECI) Publication No Cu0144. Web Sites: http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/documents-and-links/Cu0144_Efficiency%20and%20Loss%20Evaluation%20of%20Large%20Power%20Transformers_v1.pdf, Son Erişim: 15.06.2016.

- Giese, R.F. 1995. Fault current limiter - A second look, Report for International Energy Agency (IEA). Argonne National Laboratory. Web Sites: <https://community.dur.ac.uk/superconductivity.durham/Handbook/Fault-current%20limiters%20-%20Giese%20Argonne+Naperville.pdf>, Son Erişim: 16.06.2016.
- Giese, R.F. and Runde, M. 1993. Assessment study of superconducting fault-current limiters operating at 77 K, IEEE Transactions on Power Delivery, 8(7), 1138-1147.
- Ginzburg, V.L. and Landau, D.L. 1950. Zh. Exsp. Theor. Fiz. 20, 10064.
- Granados, X., Puig, T., Obradors, X., Mendoza, E., Teva, J., Calleja, A., Serradilla, I.G., Segarra, M., Calero, J., Tabares, L.G. Oyarbide, E., Iturbe, R. and Peral, L. 2002. Design, building up and testing of a 400 kVA hybrid FCL. Physica C, 372-376 (Part 3), 1680-1683.
- Gromoll, B., Ries, G., Schmidt, W., Kraemer, H.-P., Seebacher, B., Utz, B., Nies, R. and Neumueller, H.W. 1999. Resistive fault current limiters with YBCO films-100 kVA functional model, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 9(2), 656-659.
- Hatzistergos, M.S., Efstathiadis, H., Reeves, J.L., Selvamanickam, V., Allen, L.P., Lifshin, E. and Haldar, P. 2004. Microstructural and Compositional Analysis of YBa₂Cu₃O_{7-δ} Films Grown by MOCVD before and after GCIB Smoothing, Physica C: Superconductivity, 405, 179-186.
- Hori, T., Otani, A., Kaiho, K., Yamaguchi, I., Morita, M. and Yanabu, S. 2006. Study of superconducting fault current limiter using vacuum interrupter driven by electromagnetic repulsion force for commutating switch, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 16(4), 1999-2004.
- Hoshino, T., Nishikawa, M., Salim, K.M., Muta, I. and Nakamura, T. 2001a. Preliminary studies on characteristics of series-connected resistive type superconducting fault current limiter for system design, Physica C, 354(1-4), 120-124.
- Hoshino, T., Salim, K.M., Nishikawa, M., Muta, I. and Nakamura, T. 2001b. Proposal of saturated DC reactor type superconducting fault current limiter (SFCL), Cryogenics, 41(7), 469-474.
- Jin, X.C., Xue, Y.Y., Huang, Z.J., Bechtold, J., Hor, P.H. and Chu, C.W. 1992. AC magnetic susceptibility of melt – textured YBa₂Cu₃O_{7-x}, Phys. Rev. B, 47(10), 6082-6085.
- Kaltenborn, U., Mumford, F., Usoskin, A., Schmidt, S. and Janetschek, T. 2011. “Inductive shielded superconducting fault current limiter-an enabler of smarter grids”, C I R E D 21st international conference on electricity distribution

Frankfurt. Paper 0955. Web Sites:
http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011_0955_final.pdf, Son Erişim: 16.06.2016.

- Lee, B.W., Park, K.B., Sim, J., Oh, I.S., Lee, H.G., Kim, H.R. and Hyun, O.B. 2008. Design and experiments of novel hybrid type superconducting fault current limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18(2), 624-627.
- Lee, S.R., Yoon, J.-Y., Yang, B. and Lee, B. 2012. Specifications of the 22.9 kV SFCL considering Protection systems in korean power distribution system, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(3), 5602404.
- Leung, E. 1997. Surge protection for power grids, *IEEE Spectrum*, 34(7), 26-30.
- Li, L.F., Zhang, Z., Jin, D., Li, Y.Y. and Merianil S. 1997. Microstructure and Mechanical Properties of MTG YBCO, *Physica C*, 282-287, 2599-2600.
- Li, M., Ma, B., Koritala, R.E., Fisher, B.L., Venkataraman, K. and Balachandran, U. 2003. Pulsed Laser Deposition of YBCO Thin Films on IBAD-YSZ Substrates, *Superconductor Science and Technology*, 16, 105-109.
- London, H. and London, F. 1935. The electromagnetic equations of the Superconductors, *Proceeding of Royal Society*, A149, 71.
- Meerovich, V. and Sokolovsky, V. 2015. High-temperature superconducting fault current limiters (FCLs) for power grid applications, *Superconductors in the Power Grid*. Editör:Rey, C. UK: Woodhead.
- Meerovich, V., Sokolovsky, V., Jung, G. and Goren, S. 1995a. Inductive superconducting current limiter: state of art and prospects, In *Institute of Physics Conference Series: 148, Applied superconductivity* 603-606.
- Meerovich, V., Sokolovsky, V., Jung, G., Goren, S. 1995b. High-T_c superconducting inductive current limiter for 1 kV/25 A performance, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 5(6), 1044-1048.
- Meissner, W. and Ochsenfeld, R. 1933. Superconductivity, *Naturwiss*, 11, 219.
- Na, J.B., Kim, Y.J., Jang, J.Y., Ryu, K.S., Hwang, Y.J., Choi, S. and Ko, T.K. 2012. Design and tests of prototype hybrid superconducting fault current limiter with fast switch, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(3), 5602604.
- Noe, M. and Steurer, M. 2007. High-temperature superconductor fault current limiters: Concepts, applications and development status, *Supercond. Sci. Technol.*, 20 (3), 15 -27.

- Noudem, J., Barbut, J.M., Sanchez, O., Tixador, P. and Tournier, R. 1999. Current limitation at 1080 A under 1100 V with bulk Bi-2223, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9(6), 664-667.
- Onnes, H.K. 1911. Disappearance of The Electrical Resistance of Mercury of Helium Temperature. *Akad. Van Wetenschappen (Amsterdam)*, 14,113.
- Park, D.K., Chang, K.S., Yang, S.E., Kim, Y J., Ahn, M C., Yoon, Y.S., Kim, H.M., Park, J.W. and Ko, T.K. 2009. Analytical and experimental studies on the hybrid fault current limiter employing asymmetric non-inductive coil and fast switch, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 1896-1899.
- Paul, W., Lakner, M., Rhyner, J., Unternahrer, P., Baumann, Th, Chen, M., Widenhorn, L. and Guerig, A. 1997. Test of 1.2 MVA high-Tc superconducting fault current limiter, *Superconducting Science and Technology*, 10, 914-918.
- Pippard, A.B. 1953. *Physica* 19, 765.
- Sandu, V., Aldica, G., Popa, S., Badica, P., Cimpoiasu, E., Dumitrache, F. and Sandu, E. 2011. Transport properties of superconducting MgB2 composites with carbonencapsuled Fe nanospheres, *Journal of Applied Physics*, 110, 123921.
- Skakle, J.M.S. 1998. Crystal chemical substitutions and doping YBa2Cu3Ox and related superconductors, *Material Science and Engineering*, R23, 1-40.
- Slade, P.G., Wu, J.L., Stacey, E.J., Stubler, W.F., Voshall, R.E., Bonk, J.J., Porter, J.W. and Hong, L. 1992. The utility requirements for a distribution fault current limiter, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(2), 507-515.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Beilin, V. and Vajda, I. 2003. Application of an HTS thin film switching element in the inductive current limiter, *Physica C*, 386, 480-484.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Chubraeva, L.I. and Vajda, I. 2010. An improved design of an inductive fault current limiter based on a superconducting cylinder, *Superconductor Science and Technology*, 23(8), 085007.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Györe, A. and Vajda, I. 2007. Transient stability of a power system with superconducting fault current limiters, *Periodica Polytechnica, Electrical Engineering*, 51(1-2), 3-9.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Vajda, I. and Beilin, V. 2004. Superconducting FCL: design and application, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(3), 1990-2000.
- Xiong, X., Lenseth, K.P., Reeves, J.L., Rar, A., Qiao, Y., Schmidt, R.M., Chen, Y., Li, Y., Xie, Y.Y. and Selvamanickam, V. 2007. High Throughput Processing of Long-length IBAD MgO and Epi-buffer Templates at SuperPower, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17, 3375-3378.

Yim, S.-W., Park, B.-C., Jeong, Y.-T., Kim, Y.-J., Yang, S.-E., Kim, W.-S., Kim, H.R. and Du, H.I. 2013. Improvement in operational characteristics of KEPCO's line-commutation-type superconducting hybrid fault current limiter, *Physica C*, 484, 267-271.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ercan ERTEKİN

Doğum Yeri : Samsun

Doğum Tarihi : 04.08.1981

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Tülay Başaran Anadolu Lisesi (1999)

Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü (2007)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
(Eylül 2007 – Eylül 2010)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ankara Üniversitesi. 2010-devam ediyor.

Yayınlar (SCI)

Babaoglu, M.G., Safran, S., Çiçek, Ö., Agil, H., **Ertekin, E.**, Hossain, M.S.A., Yanmaz, E. and Gencer, A. 2012. Microstructural and superconducting properties of C₆H₆ added bulk MgB₂ superconductor, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 324(21), 3455-3459.

Hossain, M.S.A., Motaman, A., Çiçek, Ö., Agil, H., **Ertekin, E.**, Gencer, A., Wang, X.L. and Dou, S.X. 2012. The effects of annealing temperature on the in-field J_c and surface pinning in silicone oil doped MgB₂ bulks and wires, Cryogenics, 52(12), 755-759.

Agil, H., Çiçek, Ö., **Ertekin, E.**, Motaman, A., Hossain, M.S.A., Dou, S.X. and Gencer, A. 2013. Effects of MgO on the electronic and superconducting properties in succinic acid (C₄H₆O₄) doped MgB₂ bulks, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 26(5), 1525-1529.

Hossain, M.S.A., Motaman, A., Xu, X., See, K.W., Çiçek, Ö., Agil, H., **Ertekin, E.**, Gencer, A., Cheong, K., Maeda, M. and Dou, S.X. 2013. Structurally homogeneous MgB₂ superconducting wires through economical wet mixing process, Materials Letters, 91, 356-358.

Korucu, D., **Ertekin, E.**, Belenli, I. and Altindal S. 2013. Frequency and voltage dependence of dielectric loss of MgB₂ composites at different temperatures, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 26(6), 2165-2170.

Gecer, S., **Ertekin, E.**, Yanmaz, E., Kosa, J., Safran, S., Özgüzel, R., Kilicarslan, E.S., Kilic, A. and Gencer, A. 2016. Switching and Decoupling Effects in a Single-Phase Transformer Using Extra DC Current. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26(3), Article number 7422687.

Ertekin, E., Gecer, S., Yanmaz, E., Safran, S., Kosa, J., Kilicarslan, E.S., Kilic, A., Amemiya, N. and Gencer, A. 2016. Test of 6-kVA Three-Phase Flux Transfer-Type Current-Limiting Transformer, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, DOI: 10.1007/s10948-016-3623-y.

Hakemli Dergiler

-

Ulusal Kongre Sunum

-

Uluslararası Kongre Sunum

Ertekin, E., Agil, H. and Gencer A. 2013. Effect of Aromatic Hydrocarbon Addition on the Microstructural, Thermal and Magnetic Properties of MgB₂ Superconductors, EUCAS-2013, İtalya, Poster.

Ertekin, E., Gecer, S., Kosa, J., Yanmaz, E. and Gencer, A. 2015. Enhanced superconducting and mechanical properties of disc and ring shape Melt-Processed YBCO fabricated for levitation and SFCL applications, 11th International Workshop on Magnetism and Superconductivity at the Nanoscale, İspanya, Poster.

