

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MERKEZ İLETKENİ BAKIR OLAN SÜPERİLETKEN
CORC KABLOLARIN ALTERNATİF AKIM
KAYIPLARI**

DOKTORA TEZİ

Rıfki TERZİOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Türker Fedai ÇAVUŞ

Mayıs 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MERKEZ İLETKENİ BAKIR OLAN SÜPERİLETKEN
CORC KABLOLARIN ALTERNATİF AKIM
KAYIPLARI**

DOKTORA TEZİ

Rıfki TERZİOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 02 / 05 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
İbrahim BELENLİ
Jüri Başkanı**

**Yrd. Doç. Dr.
Türker Fedai ÇAVUŞ
Üye**

**Doç. Dr.
Mustafa AKDOĞAN
Üye**

**Yrd. Doç. Dr.
Burhan BARAKLI
Üye**

**Yrd. Doç. Dr.
Nigar Berna TEŞNELİ
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Rıfki TERZİOĞLU

02.05.2017

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım sırasında bana yol gösteren, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, yetiştirme ve gelişmeye katkıda bulunan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Türker Fedai Çavuş'a, Süperiletkenler hakkında ilk deneysel ve teorik çalışmalarında benden yardımını esirgemeyen, yurtdışına gitmemi teşvik eden Prof. Dr. İbrahim Belenli ve Doç. Dr. Mustafa Akdoğan'a, deneysel çalışmalarımı yapmam için Slovakya Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Bölümünde çalışmama imkan sağlayan ve AA kayıpların teorik hesaplaması hakkında kendisinden çok şey öğrendiğim Sayın Prof. Dr. Fedor Gömöry ve Dr. Michal Vojenciak'a en derin saygılarımla teşekkürü bir borç bilirim.

Bölüm başkanımız Prof. Dr. Ertan Yanıkoğlu'na, tez izlemelerimde bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Burhan Baraklı'ya, çalışma arkadaşlarıma ve Abant İzzet Baysal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümüne verdikleri destek ve imkanlardan dolayı teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her zaman her konuda bana destek olan ailem ve hayat arkadaşım Nesime Kübra Keskin'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma 1059B141500014 kodlu TÜBİTAK 2214/A-Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı desteklenmiş, uygulama ve ölçümler 09.10.2015-01.08.2016 tarihleri arasında "Slovak Academy of Sciences (SAS)" da gerçekleştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvi
SUMMARY	xvii
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
 BÖLÜM 2.	
SÜPERİLETKENLİK VE ALTERNATİF AKIM KAYIPLARI.....	7
2.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin Temeli	8
2.1.1. YBCO kaplanmış iletkenler/şeritler (CC).....	11
2.1.2. Şeritlerde anizotropi.....	14
2.1.3. Şeritlerde homojensizlikler	14
2.2. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerde AA Kayıpları	16
2.2.1. Manyetizasyon kayıpları (Q_{mag}).....	17
2.2.1.1. Süperiletken histerezis kayıpları.....	18
2.2.1.2. Ferromanyetik histerezis kayıpları (2G şeritlerde).....	19
2.2.1.3. Çiftlenim kayıpları.....	19
2.2.1.4. Eddy akım kayıpları	20
2.2.2. Transport akım kayıpları (Q_{tra})	20
2.2.2.1. Öz-alan kayıpları	21
2.2.2.2. Akı akışı kayıpları	21

2.2.2.3. İletken katmanlarındaki rezistif kayıplar	22
2.2.3. Alternatif akım kayıplarının analitik hesaplanması	23
2.2.3.1. Bean Kritik Durum Modeli (Bean KDM)	23
2.2.3.2. Transport (Öz-alan) kayıplarının hesaplanması	26
2.2.3.3. Akı akışı ve rezistif kayıpların hesaplanması	29
2.2.3.4. Eddy akım kayıplarının hesaplanması	30
2.2.3.5. Manyetizasyon kayıplarının hesaplanması	31
2.2.3.6. Çiftlenim kayıplarının hesaplanması	37
2.2.4. Alternatif akım kayıplarını etkileyen parametreler	40
2.2.4.1. Sıcaklık (T)	40
2.2.4.2. Manyetik alan (B)	41
2.2.4.3. Frekans (f)	41
2.2.4.4. Filaman sayısı ve çapı (r)	41
2.2.4.5. Bükme derecesi - uzunluğu (l_p)	41
2.2.4.6. Matris Öz direnci	42
2.2.5. Alternatif akım kayıplarını azaltmak için yapılabilecek işlemler	42
2.3. Alternatif Akım Kayıplarının Ölçüm Yöntemleri ve Karşılaştırılması ..	43
2.3.1. Manyetik yöntemler	43
2.3.2. Elektriksel yöntemler	44
2.3.3. Termal yöntemler	46
2.4. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin Güç Sistemlerinde Uygulamaları	47
2.4.1. SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)	47
2.4.2. SFCL (Superconducting Fault Current Limiter)	48
2.4.3. Süperiletken motor ve jeneratörler	49
2.4.4. Süperiletken transformatörler	50
2.4.5. Süperiletken güç iletim kabloları	50

BÖLÜM 3.

YÜKSEK SICAKLIK SÜPERİLETKEN KABLOLAR	54
3.1. RACC Kablo (Roebel Assembled CC Cable)	55
3.2. TSTC (Twisted Stacked-Tape Cable) Kablo	58

3.3. CORC (Conductor on Round Core) Kablo	61
3.4. Diğer Kablo Modelleri	71
 BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN ÖLÇÜM SİSTEMLERİ.....	74
4.1. Dört Nokta Kontak Yöntemiyle Kritik Akım Ölçüm Sistemi	74
4.2. Kritik Akımla Manyetik Alan Açısı Arasındaki İlişkiyi Ölçme Sistemi.....	75
4.3. Transport Alternatif Akım Kaybı Ölçüm Sistemi.....	76
4.4. Manyetizasyon Alternatif Akım Kaybı Ölçüm Sistemi.....	77
4.5. AA/AA Durum Altındaki Alternatif Akım Kaybı Ölçüm Sistemi	78
4.6. Kritik Akım ve Homojensizlik Ölçümlerinde Kullanılan Darbe Sinyal Sistemi.....	79
4.7. Deneylerde Kullanılan Şeritlerin Özellikleri	86
 BÖLÜM 5.	
ŞERİT VE CORC KABLOLARIN DA-AA KARAKTERİSTİKLERİ.....	89
5.1. Şeritlerin Kritik Akım ve Bükme Ölçümleri	89
5.2. Şeritlerin $I_c(B, \alpha)$ Ölçümleri.....	94
5.3. Şeritlerin Manyetizasyon AA Kayıpları	95
5.4. CORC Kablo Üretimi ve Akım Terminalleri.....	102
5.4.1. Kablonun modellenmesi ve sarım işlemi	103
5.4.2. Akım terminalleri.....	103
5.4.3. Terminal kontak dirençleri için analitik bir model	104
5.5. CORC Kabloların Kritik Akım Ölçümleri.....	105
5.6. Kablonun Transport AA Kayıpları	112
5.7. Kabloların Manyetizasyon AA Kayıpları	115
5.8. Kablonun AA/AA durumu altındaki AA kayıpları.....	121
 BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR	126

KAYNAKLAR	130
EKLER.....	140
ÖZGEÇMİŞ	150



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: Şerit genişliğin yarısı
AA	: Alternatif akım
α	: Lehimleme açısı
B	: Manyetik alan
B_a	: Uygulanan manyetik alanın genliği
B_c	: Kritik manyetik alan
B_{c1}	: Alt kritik manyetik alan
B_{c2}	: Üst kritik manyetik alan
$B_{eksenel}$	: Eksenel manyetik alan
B_p	: Nüfuz etme manyetik alanı
$B_{rms-etkin}$	: Manyetik alanın etkin değeri
B_x	: x düzlemindeki manyetik alan
B_y	: y düzlemindeki manyetik alan
B_z	: z düzlemindeki manyetik alan
$BSCCO$	: Bizmut stronsiyum kalsiyum bakır oksit
CC	: Coated Conductor
CD	: Soğuk dielektrik
$CICC$	: Conductor in conduit conductors
$CORC$	: Conductor on Round Core
CSD	: Chemical Solution Deposition
d	: Süperiletken filaman kalınlık
D	: Kabloda çap
D_0	: Kabloda orta boş kısmın çapı
D_f	: İletken çapı
d_b	: Bariyer kalınlığı
DA	: Doğru akım

DSS	: Düşük Sıcaklık Süperiletkenler
E	: Elektrik alan
E_c	: Kritik elektrik alan
$E_{şerit}$	: Şerit elektrik alanı
E_{kablo}	: Kablo elektrik alanı
ε	: Gerilme
f	: Frekans
$FACTS$	: Flexible Alternating Current Transmission Systems
FCL	: Fault Current Limiter
Hz	: Hertz
$IBAD$	: Ion-Beam-Assisted-Deposition
I	: Akım
I_c	: Kritik akım
$I_c(B, \alpha)$	: Manyetik alan değeri ve yönü altında kritik akım
I_{kablo}	: Kablonun akımı
I_{mag}	: Magnet akımı
$I_{rms-etkin}$	: Akımın etkin değeri
$I_{şerit}$	: Şerit akımı
IRL	: Industrial Research Limited
ISD	: Inclined Substrate Deposition
$ITER$	: International Thermonuclear Experimental Reactor
i	: Normalize akım
J	: Akım yoğunluğu
J_c	: Kritik akım yoğunluğu
$J_c(B, \alpha)$	: Manyetik alan değeri ve yönü altında kritik akım yoğunluğu
J_{c-SH}	: Kılıf ile birlikte kritik akım yoğunluğu
J_e	: Mühendislik kritik akım yoğunluğu
KDM	: Kritik Durum Modeli
$LBCO$	: Lantan baryum bakır oksit
L	: Örnek uzunluğu
L_c	: Kritik numune uzunluğu
$L_{bükme}-l_p$	: Bükme uzunluğu

M	: Manyetizasyon
$MAGLEV$	: Magnetic Levitation
$MOVCD$	: Metal Organic Vapor Chemical Deposition
MRI	: Magnetic Resonance Imaging
N	: Bobin tur sayısı
n	: Şerit sayısı
NMR	: Nuclear Magnetic Resonance
P	: Güç
PVD	: Physical vapor deposition
Q	: Kayıplar
Q_e	: Eddy kayıpları
Q_H	: Histerezis kayıpları
Q_{mag}	: Manyetizasyon kaybı
Q_{toplam}	: Toplam kayıplar
Q_{tra}	: Transport kayıpları
R	: Direnç
$RABiTS$	: Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate
$RACC$	: Roebel Assembled Coated Conductor
$RCE-dr$	: Reactive Co Evaporation by-Deposition and Reaction
RF	: Radyo frekansı
R_f	: Filaman yarıçapı
S	: Kesit alanı
$SFCL$	: Superconducting Fault Current Limiter
$SMES$	: Superconducting Magnetic Energy Storage
$SQUID$	: Superconducting Quantum Interference Devices
T	: Sıcaklık
T_c	: Kritik Sıcaklık
t	: Zaman
$TSTC$	: Twisted Stack Tape Cable
v	: Hacim
V	: Gerilim
V_{ind}	: Gerilimin endüktif bileşeni

V_{kablo}	: Kablo gerilimi
$V_{kayıp}$	: Gerilimin gerçek bileşeni
V_{rms}	: Gerilimin etkin değeri
$V_{şerit}$	: Şerit gerilimi
WD	: Sıcak dielektrik
w_{kablo}	: Şeritin kablo üzerindeki genişliği
$w_{şerit}$	: Şerit genişliği
$YBCO$	: İtiryum baryum bakır oksit
YSS	: Yüksek Sıcaklık Süperiletkenler
δ	: Nüfuz etme derinliği
ρ	: Özdirenç
ρ_t	: Enine özdirenç
σ	: İletkenlik
σ_b	: Bariyer iletkenliği
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
χ	: Manyetik alınganlık
χ'	: Manyetik alınganlığın gerçek bileşeni
χ''	: Manyetik alınganlığın sanal bileşeni
κ	: Manyetik geçirgenlik
τ	: Zaman sabiti
λ	: Doluluk oranı
Γ	: Kayıp faktörü
ω	: Açısal hız

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Güç sistemlerini bekleyen sorunlar ve bu sorunların çözümü	3
Şekil 2.1. Cıvanın sıcaklık-direnç grafiği.....	7
Şekil 2.2. Süperiletken Öz direnç-sıcaklık grafiği.....	9
Şekil 2.3. Meissner etkisi (sol taraf normal, sağ taraf süperiletken durum).	10
Şekil 2.4. Süperiletkenliği etkileyen parametreler	10
Şekil 2.5. Süperiletkenlerin faz diyagramları (a) I. Tip; (b) II. Tip Süperiletkenler	11
Şekil 2.6. YBCO'nun genel yapısı	12
Şekil 2.7. Şeritlerin genel yapısı.....	13
Şekil 2.8. Farklı yönlerde uygulanan manyetik alanlarda $J_c(B)$	14
Şekil 2.9. Avrupa'da üretilmiş bir şeritteki boyuna kritik akım değişimi	15
Şekil 2.10. 6 mm genişlikteki şeritin genişlik boyunca J_c dağılımı.....	16
Şekil 2.11. Süperiletken şeritteki enerji kaybının iki farklı çeşitteki kaynaktan beslenmesi: (a) elektriksel; (b) mekanik	18
Şekil 2.12. Histerezis döngüsü	18
Şekil 2.13. Süperiletken malzemelerde (a) çiftlenim yok; (b) çiftlenim var	20
Şekil 2.14. Süperiletken şeritteki enerji kaybının akımı oluşturan güç kaynağı tarafından beslenmesi	20
Şekil 2.15. Lorentz kuvvetinin oluşumu.....	22
Şekil 2.16. Transport akım dağılımı	24
Şekil 2.17. Farklı kritik akımlara sahip elips ve şeritlerin transport kayıp-akım ilişkisi	27
Şekil 2.18. İki modelin normalize edilmiş transport kayıp-akım ilişkisi	28
Şekil 2.19. Monoblok modeli (iç kısım boş)	29
Şekil 2.20. İletkenin kesit alanı (a) içi dolu, (b) içi boş.....	30
Şekil 2.21. Manyetik alana paralel yönelmiş sonsuz uzunlukta levha	31

Şekil 2.22. y-z düzlemine paralel olarak (a) artan ve (b) azalan manyetik alan (maksimum alan B_p olacak şekilde) uygulandığında levhadaki: Manyetik alan (üst kısım) ve akım yoğunluğu (alt kısım) dağılımları	32
Şekil 2.23. Bir önceki şekille benzer fakat manyetik alan B_p ’den başlayarak artmakta (sol) sonra ise negatif bir değere azaltılmakta (sağ).....	33
Şekil 2.24. Farklı kritik akım yoğunluğu ve genişliklere sahip levhaların kayıpları.....	34
Şekil 2.25. Kayıp faktörünün manyetik alan değişimi (B_p ’den önce +1, sonra -1).....	35
Şekil 2.26. Elips iletkenin kesit alanı ve boyutları	36
Şekil 2.27. Bükülmüş iki filaman arasında indüklenen elektrik alan her yarım döngüde polarite değiştirir	38
Şekil 2.28. Uygulanan ve örnek üzerindeki manyetik alan, zaman sabiti gösterimi.....	39
Şekil 2.29. AA manyetik alan altındaki histerezis kayıplarını ölçen sinyal bobinleri sistemi	44
Şekil 2.30. Öz-alan kayıplarını ölçmek için kullanılan sistem.....	45
Şekil 2.31. SMES sistemi ve kontrolü.....	48
Şekil 2.32. SFCL eşdeğer devresi.....	49
Şekil 2.33. 5 GW’lık enerjinin taşınacağı mesafe-kayıp ilişkisi	51
Şekil 3.1. (a) 5 Şerit+1 bakır, (b) 16 iletken (sağ) ile yapılmış RACC	56
Şekil 3.2. Roebel Kablo kayıp ölçme düzeneği.....	57
Şekil 3.3. Bükme öncesi yığın haline getirilmiş YBCO şeritler.....	59
Şekil 3.4. (a) kablo-akım kolu bağlantısı,(b) kablo-kablo bağlantısı	60
Şekil 3.5. Şeritlerin maruz kalabileceği gerilme çeşitleri.....	61
Şekil 3.6. Bükme aparatı; üstteki eksenel çekme alttaki eksenel sıkıştırma	62
Şekil 3.7. [83]’te YBCO şerit için Normalize kritik akım - gerilme ilişkisi	63
Şekil 3.8. (a) Şeritin düzlem içi bükülmüş hali, (b) Şeritin genişliği boyunca gerilme profili.....	63
Şekil 3.9. Tek şerit ile sarılmış CORC kablo	65
Şekil 3.10. GBCO ve YBCO için kritik akımın gerilmeye bağımlılığı	66

Şekil 3.11. [89]'de CORC kablo ile sarılan bobinin iç tabakadaki 6 sarımı	66
Şekil 3.12. Örneklerin şematik gösterimi (a) orijinal şerit; (b)-kenarları kesilmiş örnek; (c) filamanlı örnek; (d) filamanlı ve kenarları kesilmiş örnek. Oklar çiftlenim akımlarını temsil etmektedir	67
Şekil 3.13. Orta çaplı bir kablonun düzlem modeli. D_f gövde iletkeninin çapı, $L_{bükme}$ kablunun bükme derecesi ve n şerit sayısıdır	69
Şekil 3.14. Orta çaplı kablodaki bir şeridin detaylı gösterimi, kesik çizgili dikdörtgen önceki şekildeki dikdörtgene karşılık gelmektedir	70
Şekil 3.15. Bükülmüş-yığın YSS CICC	72
Şekil 3.16. Klasik süperiletken kablo	72
Şekil 4.1. DA kritik akım ölçüm düzeneği	74
Şekil 4.2. Kritik akımla manyetik alan açısı arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan sistem.....	75
Şekil 4.3. AA Transport kaybını elektriksel ölçme sistemi.....	76
Şekil 4.4. AA Manyetizasyon kayıplarını ölçmek için kullanılan “calibration free” sistemi.....	77
Şekil 4.5. AA/AA durum altında kayıpları ölçmek için kullanılan kalorimetrik sistem.....	79
Şekil 4.6. Kritik akım ölçümlerinde kullanılan darbe sistemi bileşenleri	80
Şekil 4.7. Darbe ölçüm programı için görsel arayüz	81
Şekil 4.8. Darbe sisteminde ölçüm sonrası verilerin işlenmesi	82
Şekil 4.9. Yarım sinüs darbesinin farklı uzunluk ve genliklerdeki I-E grafikleri	83
Şekil 4.10. DA ölçümü ve darbe sinyal ölçümü ile elde edilen bükme sonuçlarının karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.11. DA ve darbe sinyal ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	85
Şekil 4.12. Düz çizgiler: Akım-İletken çapı; kesikli çizgiler: normalize edilmiş akım-iletken çapı grafikleri	86
Şekil 5.1. Şeritlerin farklı iletkenlere bir tur sarılmış kritik akım ölçüm düzeneği	90
Şekil 5.2. B1, 45 derece lehimlenmiş; kritik akım-iletken çapı ilişkisi.....	91

Şekil 5.3. B1 örneğinin farklı lehimleme derecelerinde bükme deney sonuçları	91
Şekil 5.4. Farklı marka şeritlerin iletken çapı-kritik akım grafikleri.....	92
Şekil 5.5. Farklı marka şeritler ile yapılacak CORC kabloların Mühendislik akım yoğunluklarının karşılaştırılması.....	93
Şekil 5.6. B1, B2 ve B3 örneklerine ait iletken çapı-kritik akım eğrileri.....	94
Şekil 5.7. B3 malzemesinin Kritik akım – manyetik alan yönü ilişkisi	95
Şekil 5.8. Farklı stabilize malzemesinden üretilmiş şeritlerin manyetizasyon kayıplarının deneysel sonuçları	97
Şekil 5.9. Farklı stabilize malzemesinden üretilmiş şeritlerin manyetizasyon kayıplarının nümerik sonuçları.....	97
Şekil 5.10. A2-A3-A4 şeritlerin manyetizasyon kayıplarının karşılaştırılması ...	99
Şekil 5.11. Manyetik ve manyetik olmayan alttaşa sahip olan şeritlerin manyetizasyon kayıpları.....	100
Şekil 5.12. A5 örneğine ait manyetik kritik akım ölçüm sonuçları.....	101
Şekil 5.13. B1-B2-B3 şeritlerin manyetizasyon kayıplarının karşılaştırılması	101
Şekil 5.14. CORC Kablo yapım adımları.....	102
Şekil 5.15. CORC kablo terminali; 1 - CORC kablo, 2 – akım terminalleri, 3 – bakır iletken, 4 – her şeritte gerilim uçları için yer, 5 – bakır üzerine yerleştirilecek gerilim ucu için yer.....	104
Şekil 5.16. Kablonun kontak dirençleri için oluşturulmuş basit elektriksel model.....	105
Şekil 5.17. Kablo kritik akım ölçümü için hazırlanan soğutma bölmesi.....	106
Şekil 5.18. 1 tabakalı CORC kablunun IE eğrisi (E_{1-2-3} şeritlerden ölçülen elektrik alan; $E_{t1-t2-t3}$ analitik modelleme sonucu elde edilen elektrik alan değerleri) ve şeritlerin kritik akım eğrileri (içteki şekilde).....	106
Şekil 5.19. İletken etrafına sarılan tek şerit ve düz açılmış gösterimi.	107
Şekil 5.20. Düz sarılmış şeritlerin ürettiği manyetik alan ve bileşenleri.	109
Şekil 5.21. CORC kablunun uçlarından kesilen 6 cm lik parçalar.	110
Şekil 5.22. Direkt kontak direnci ölçümü için hazırlanan kablo terminalleri	110
Şekil 5.23. Kablo kontak direnç ölçüm sonuçları.....	111
Şekil 5.24. CORC kablodaki şeritlerdeki akım dağılımları.....	112

Şekil 5.25. 36-72-108-144Hz bakır iletken den ölçülen transport kayıp eğrisi.....	112
Şekil 5.26. Transport kayıp ölçüm sonuçları.....	113
Şekil 5.27. AA transport kaybının frekans bağımlılığı	114
Şekil 5.28. Manyetizasyon kayıpları için kesilen kablolar.....	115
Şekil 5.29. Manyetizasyon ölçüm sistemi.....	116
Şekil 5.30. 36-72 Hz için manyetizasyon kayıpları.....	117
Şekil 5.31. 36-72 Hz için manyetizasyon kayıplarının deneysel ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	117
Şekil 5.32. Manyetik alınganlığın gerçek bileşeni.....	119
Şekil 5.33. Manyetik alınganlığın sanal bileşeni.....	119
Şekil 5.34. CORC kablonun benzetim sonuçları: (a) CORC kablodaki manyetizasyon kayıplarının dağılımı; (b) Manyetik alan ve akım dağılımı; (c) Farklı CORC kablolar da bakır iletken deki manyetik alan dağılımları; (d) Tek katman CORC kabloda nüfuz eden manyetik alan	120
Şekil 5.35. Kablonun etrafına sarılan ısıtıcı	122
Şekil 5.36. AA/AA kayıplarını ölçmek için kullanılan sistem.....	122
Şekil 5.37. AA/AA durum altındaki kayıplar.....	123
Şekil 5.38. Ekstrapole transport kayıpları ve elektriksel transport kayıpları	124
Şekil 5.39. Sabit akımda (458A) farklı manyetik alanlar altında kayıpları.....	124
Şekil 5.40. Daha fazla veri ile elde edilen sonucun eklenmiş hali	125

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Süperiletken bazı elementler/alaşım lar ve kritik sıcaklıkları	7
Tablo 2.2. Manyetizasyon kayıpları hesaplanacak örneklere ait veriler	33
Tablo 2.3. Farklı manyetik alanlarda kayıpları azaltmak için yapılabilecek işlemler	43
Tablo 2.4. Süperiletken uygulamaların geleneksel uygulamalara göre boyut ve ağırlığındaki azalma oranları.....	49
Tablo 2.5. Uygulamalarda süperiletken kullanımı ile kayıptaki azalma oranları	51
Tablo 2.6. Dünya’da yapılan ve yapımı devam eden süperiletken uygulamalar.	53
Tablo 3.1. Kablo modellerinin karşılaştırılması	73
Tablo 4.1. Deneysel ölçümlerde kullanılan örneklere ait özellikler	88
Tablo 5.1. A2-A3-A4 örneklerine ait kritik akım ve efektif genişlik değ erleri...	99
Tablo 5.2. CORC kabloda kullanılan şeritlerin özellikleri	106
Tablo 5.3. Kablo kontak dirençlerinin deneysel ve modelleme sonuçları.....	111

ÖZET

Anahtar kelimeler: YSS kablo, CORC, AA kayıpları.

REBCO (RE = rare earth) kullanılarak üretilen yüksek sıcaklık süperiletkenler ticari üretime ulaşmış olup özellikleri sürekli olarak geliştirilmektedir. Fakat magnet (bobbin) üretimi için gerekli olan yüksek kritik akım değerine sahip kabloların yapımında bu iletkenlerin kullanımında zorluklar devam etmekte ve az sayıda kablo konsepti bulunmaktadır. Bu kablo konseptlerinden her biri farklı karakteristikler sergilemektedir.

Bu çalışmada enerji sistemlerinde kullanılabilecek, gövdede bakır tüp iletken üzerine sarılmış Asya üretim şeritler kullanılarak üretilmiş CORC kablolar deneysel olarak incelenmiştir. Bakır iletkenin kullanımı, iletken içerisinde soğutucu sıvı geçirilerek soğutma kanalı olanağı sağlar. Temel olarak AA transport akımında, harici bir AA manyetik alanda ve eşzamanlı uygulanmaları durumlarında alternatif akım kayıpları incelenmiştir.

Transport AA akım durumunda, toplam kaybın arttığı ve bu kaybın büyük bir bölümüne eksenel manyetik alanın sebep olduğu girdap akımlarının neden olduğuna dair göstergeler bulunmuştur. Manyetizasyon AA kayıplarının incelenmesi için farklı konfigürasyonlara sahip örnekler hazırlanmış ve bakır gövde iletkeninde meydana gelen kayıplardan dolayı toplam AA kayıplarında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca düşük genlikli manyetik alanlarda tüm kablonun AA kayıplarının sadece bakır iletkenin kayıplarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin uygulanan manyetik alanın süperiletkenler tarafından perdelenmesinden kaynaklandığı görülmüş ve benzetim çalışmalarıyla da gösterilmiştir.

ALTERNATIVE CURRENT LOSSES OF SUPERCONDUCTOR CORC CABLES WITH COPPER FORMER

SUMMARY

Keywords: HTS cable, CORC, AC loss

High temperature superconductors from *REBCO* (RE = rare earth) family reached industrial production and their performance is continuously enhancing. However, cabling technology using these conductors for high-current (kA-range) cables for magnet (coil) technology is still challenging and there are only few cable concepts (CORC[®], Roebel cable, twisted stack cable). Each of them exhibits different characteristics.

In this study we experimentally investigate CORC[®] cable produced in house utilizing copper tube former. Such former offers central cooling channel for partial or complete cable cooling by forced flow of coolant. We focused mainly on AC loss due to transport AC current, external applied AC magnetic field and their simultaneous action.

In case of transport AC current we have found indications that large part of total loss has origin in eddy current due to axial magnetic field. For magnetization AC loss investigation we prepared several samples with different configurations. In this case we found direct evidence of AC loss increase due to loss in former. However, we have also found that at low field amplitudes magnetization AC loss of the complete cable is lower than loss in bare former. This is caused by shielding of the magnetic field by superconductor, which was also confirmed by numerical simulations.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi çoğunlukla jeneratörler vasıtasıyla alternatif akım olarak üretilen AA gerilimlerdir. Güç sistemlerinde bu üretilen AA gerilimler daha sonra transformatörler aracılığı ile uygun bir gerilime dönüştürülerek uzun mesafelerce iletim hatlarıyla taşınır ve yerel dağıtım için tekrar uygun gerilime dönüştürülürler. Tüketicie kadar hat veya kablolarla taşınan elektrik enerjisi ışık, mekanik, ısı ve kimyasal enerjiye dönüşürler.

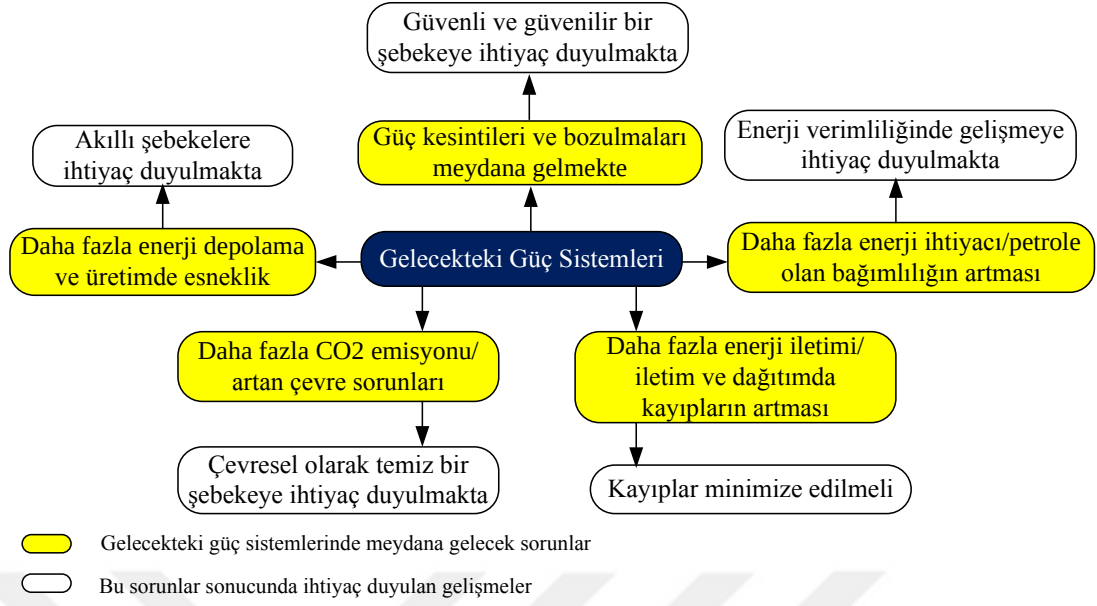
Elektrik enerjisi yıllar içerisinde hayatın her alanında ihtiyaç duyulan temel bir gereksinim haline gelmiştir. Elektrik enerjisinin yaşamımızın her alanına dahil olması güç sistemleri planlanmasının ve analizinin önemini arttırmaktadır. Güç sistemleri birçok sorunla karşı karşıya kalmaktadır. Bu sorunların bazıları kısa devre, aşırı yüklenme, gerilim çökmesi, yeni iletim hatları için yeterli alanının bulunmaması ve yüksek kayıplarının meydana gelmesi şeklinde sıralanabilir. Geleneksel iletim ve dağıtım sistemlerinde kayıpların minimum düzeye kadar indirilmesi gerekmektedir. 2006-2010 yılları arasında Türkiye’de iletim ve dağıtım kayıpları toplam üretilen gücün % 14’ünü oluşturuyorken 2011-2015 yılları arasında artarak % 15’e kadar ulaşmıştır [1]. Yüksek kayıpların yanı sıra nüfus artışı ve yeni teknolojilerin hayatımıza girmesi (elektrikli araçlar ve yeni teknolojiler) gibi nedenlerden dolayı dünyadaki enerji ihtiyacının 2030 yılında 2010 yılındakine göre %20’den daha fazla artacağı öngörülmektedir [2]. Kentsel bölgeler enerji ihtiyacının artması daha fazla güç iletimi, kayıp ve gerilim düşümü sorunlarını da beraberinde getirecektir. Bu sorunların yanı sıra Kyoto Protokolü’nce çevreye zarar vermeyen temiz enerji olarak adlandırılan yenilebilir enerji kaynaklarına da ilgi artmaktadır.

Dünya’da kayıpları minimize etmek, enerjinin birim fiyatını düşürmek ve daha güvenilir bir güç şebekesine sahip olmak için yenilebilir enerji kaynaklarına alternatif

olarak akıllı şebekeler gibi yeni sistemlere ilgi artmakta ve bu sistemler için yatırımlar yapılmaktadır. Gelecekte enerji birim fiyatının yükseleceği göz önünde bulundurulursa kayıpların daha da önemli bir konu halini alması kaçınılmazdır.

Enerji sistemindeki kayıpların artması ve gerilim düşümü gibi sorunlar dağıtık/yerinde üretimin (distributed generation), güç kontrolünün, kapasite yerleşiminin ve kademeli trafo gibi sistemlerin daha fazla kullanılmasına yol açmaktadır. Fakat bu sistemlerin kullanılmasıyla birlikte de kararlılık, güç kontrolü ve gerilim regülasyonu ile ilgili sorunlar ortaya çıkacaktır. Ayrıca bu sistemlerin kullanımı güç sisteminin kurulum ve işletme maliyetini de arttıracaktır. Kayıpları azaltmak için kullanılan genel bir çözüm ise yüksek gerilimde iletim ve dağıtım yapmaktır. Yüksek gerilimde iletim ve dağıtımın dezavantajı ise dağıtım merkezlerin maliyetinin artmasıdır.

Güç sistemlerinde kayıpları azaltmanın diğer bir yolu ise sistemdeki elemanları süperiletken adı verilen malzemelerden yapılmış bir elemanla değiştirmektir. Güç sistemlerinde kullanılarak sistemin daha kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlamak, sistemin verimini arttırmak, yeni teknolojilere imkân vermek, sistemde kullanılan elemanların boyutunu küçültmek, ağırlıklarını azaltmak ve karşılaştıkları güçlükleri (gerilim çökmesi, aşırı yüklenme, kayıplar vb.) en aza indirmek üzere süperiletken malzemelerden birçok uygulama yapılmış ve hala çeşitli uygulamalar geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu uygulamaların en önemlileri “Superconducting Magnetic Energy Storage” (SMES) [3-7], güç iletim kabloları [8-11], güç transformatörleri, “Fault Current Limiter”dir (FCL) [12-15]. Bu süperiletken donanımlar hakkında birçok çalışma yapılmış olup bir sonraki bölümde daha detaylı açıklanacaktır [16, 17]. Bu uygulamaların çoğunluğunda yüksek sıcaklık süperiletken kablolar ve bu kablolardan sarılmış bobinler kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Güç sistemlerini bekleyen sorunlar ve bu sorunların çözümü

Şekil 1.1.'de gelecekte güç sistemlerinde meydana gelmesi öngörülen sorunlar (şekilde sarı) ve bu sorunları çözmek için ihtiyaç duyulan gelişmeler (şekilde beyaz) gösterilmiştir. Güç sistemlerinde oluşacağı düşünülen sorunlar birbirini tetikleyen cinstendir. Yani enerji ihtiyacının artması beraberinde daha fazla enerji iletimini ve kayıpları getirmektedir. Kayıplar da CO₂ emisyonuna sebep olmaktadır. Süperiletken malzemelerin güç sistemlerinde kullanımıyla enerji verimliliği, kayıpların minimize edilmesi, çevreye zararsız ve daha güvenilir bir şebeke, üretim ve depolamada esneklik gibi bütün gereksinimler karşılanabilmektedir. Süperiletken elemanların güç sistemlerinde kullanılabilmeleri için, güç sistemlerindeki her bir elemanda olduğu gibi, kayıplarının incelenmesi gerekmektedir. Bu açıdan güç sistemlerinde ihtiyacı karşılayabilecek iyi özelliklere sahip YSS (Yüksek Sıcaklık Süperiletken) kabloların üretimi büyük bir önem taşımaktadır. Uygulamalar için kullanışlı bir YSS kablonun üretilmesi; kablonun transport ve manyetik özelliklerinin iyileştirilmesi (yüksek kritik akım yoğunluğu (J_c)) ve kabloda oluşacak olan kayıplarının mümkün olan en az miktarda tutulması ile sağlanabilir.

Süperiletken malzemelerin güç sistemlerindeki en önemli ve temel uygulamalarından biri süperiletken güç iletim kablolarıdır. Süperiletkenlere Doğru Akım (DA) uygulandığında “sıfır direnç” özelliğine sahiptirler. Fakat zamanla değişen bir

manyetik alandan indüklenen veya direkt olarak bir Alternatif Akım (AA) kaynağı tarafından akım uygulandığında süperiletkenlerde bazı elektromanyetik enerji kayıpları oluşur. Bu kayıplar AA kayıpları olarak adlandırılmaktadır.

Süperiletken güç kablolarının normal geleneksel güç iletim kablolarının yerini alabilmesi ve rekabet edebilmesi için önemli bir etken olan soğutma işlemindeki sorunlar giderilmeli ve kiloamper-metre başına düşen maliyetin (TL/kAm) iyileştirilmesi gerekmektedir. AA kayıpları nedeniyle ortaya çıkan ısıyı gidermek için soğutma sisteminin yükü artmaktadır. Bu yükü azaltmak için AA kayıpları en aza indirilmelidir. Süperiletken malzemelerin güç sistemlerinde geleneksel malzemelerin yerine kullanılabilmesi için alternatif akımda çalışırken sebep oldukları kayıpların analizi, modellenmesi, ölçümü ve azaltılması için yapılabileceklerin tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla araştırmada güç sistemlerinde kullanılabilecek, yeni bir kablo konsepti olan, mekanik özellikleri uygun, yüksek kritik sıcaklık ve kritik akım yoğunluğuna, düşük alternatif akım kayıplarına sahip olan CORC (Conductor on Round Core) kablolar modellenmiştir. Modellenen kablolar üretilmiş, mekanik performansları, transport ve manyetik alternatif akım kayıplarını incelenmiştir. Böylece yüksek kritik akıma sahip olan ve AA kayıpları azaltılmış süperiletken kablolar üretilerek endüstriyel açıdan daha uygun ve güç sistemlerinde kullanımları daha cazip hale gelmeleri hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı şerit ve CORC kabloların kritik akım değerleri ve AA kayıpları incelenmiştir.

Türkiye’de süperiletkenlerin mühendislik uygulamaları ve alternatif akım kayıpları ile ilgili sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. CORC kablo modeli transformatör, güç kabloları, FCL ve manyetik enerji depolamak için kullanılan bobinler gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışma ile süperiletken şerit/kablo üretimi ve AA kayıplarının ölçülmesi konularına temel atılmış olacaktır. Özellikle günümüzde güç sistemlerindeki birçok soruna çözüm aranırken süperiletkenler bu sorunlara çözüm olabilecek bir seçenek olarak bulunmaktadır.

Süperiletken malzemelerin çalışabildikleri sıcaklık aralığı ($0-203\text{ K}$), kritik sıcaklıkları tarafından sınırlandırıldığından süperiletken kablolar da soğutulma işlemine tabii tutulurlar. Bu çalışmada üretilen süperiletken kablolar 77 K sıvı azot sıcaklığında çalışmaya uygundur. Sıvı azot, sıvı helyuma oranla daha düşük maliyetle ve daha kolay şekilde elde edilmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümde süperiletkenlerin genel özellikleri, alternatif akım kayıplarının bileşenleri, kayıpların analitik yöntemlerle hesaplanması, kayıpları etkileyen faktörler ve süperiletken cihazların güç sistemlerinde kullanım alanları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde YSS kablo çeşitlerinden genel olarak bahsedilmiş daha sonra CORC kablolar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. CORC kablo tasarımındaki önemli parametreler, kullanım alanları, avantajları ve dezavantajları verilmiştir.

Dördüncü bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm sistemleri anlatılmaktadır. Hassas (kolayca zarar gören) şeritler için bir darbe sinyal ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem ayrıca şeritlerdeki boyuna homojenliklerinin test edileceği çalışmalar için bir başlangıç olabilecek basit bir sistem olarak kullanılabilir. Ayrıca kabloların AA/AA durumlarında kayıplarını ölçmek için tasarlanan kayıp ölçüm sistemi gösterilmiştir.

Beşinci bölüm deneysel çalışmalar sunulmuştur. Çalışmada Amerikan, Avrupa ve Asya üretimi şeritler kullanılmıştır. Bu malzemelerin üretim teknikleri, kullanılan alttaş malzeme, alttaş kalınlığı, süperiletken tabaka kalınlıkları ve koruma amaçlı stabilizasyon malzemeleri farklı olduğundan kablo yapımından önce bazı ölçümler yapılmıştır. Öncelikle CORC kablolarımızda kullanılacak Kaplanmış İletkenlerin/şeritlerin (Coated Conductor/CC) kritik akım, mekanik karakteristikleri ve kablo yapımında kullanılan Asya üretimi şeritin kritik akım – manyetik alan yönü ($J_c(B, \alpha)$) özellikleri incelenmiştir. Bu şeritlerin kayıpları, deneysel ölçümlerin yanı sıra ticari bir yazılım olan COMSOL ile modellenerek kayıpları incelenmiştir. Daha sonra bu malzemelerle orta uzunlukta tek şerit ve çoklu şerit kullanılarak farklı

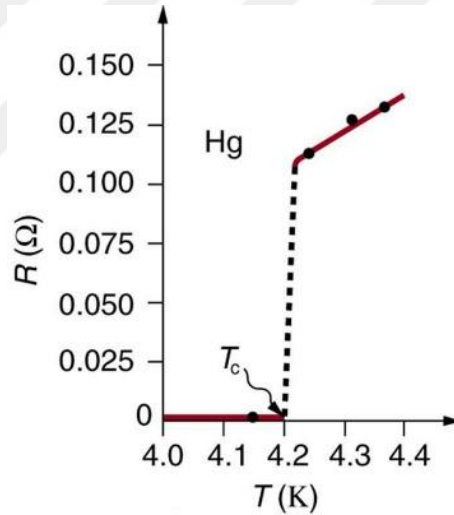
kablolar üretilmiştir. Üretilen CORC kablolar, dikkat edilmesi gereken parametreler ve karşılaşılan zorlukların yanı sıra kabloların modellenmesi, enerji taşıma performansları, manyetik özellikleri, mekanik özellikleri ve kayıpları incelenmiştir. Gerçek uygulamalarda kullanmaları hedefiyle ortadaki iletken bakır seçilerek kayıplara olan etkisi incelenmiştir. Üretilen kablonun transport, manyetizasyon ve AA/AA durum altındaki kayıpları incelenmiştir. Modelleme ve deneysel ölçümler Slovak Bilimler Akademisi'nde gerçekleştirilmiştir.

Altıncı bölümde çalışmadan çıkarılan sonuçlar tek tek açıklanmış olup sebepleriyle tartışılmıştır. Daha sonra gelecekteki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.



BÖLÜM 2. SÜPERİLETKENLİK VE ALTERNATİF AKIM KAYIPLARI

İlk süperiletken malzeme 8 Nisan 1911 yılında Lieden’de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes ve çalışma grubu tarafından keşfedilmiştir [18]. Onnes yaptığı çalışmaların sonucunda cıva elementinin sıvı helyum kullanarak 4,2 Kelvin’e kadar soğutulduğunda elektriksel direncinin sıfıra ($<10^{-27} \Omega m$) yaklaştığını görmüştür (Şekil 2.1.). Onnes yaptığı bu buluşla 1913 yılında Nobel ödülünü kazanmıştır.



Şekil 2.1. Cıvanın sıcaklık-direnç grafiği [19]

Süperiletkenliğin keşfedilebilmesi için gerekli altyapıyı sağlayan çalışma, aynı grubun 1908 de helyumu sıvılaştırmasıyla gerçekleşmiştir. Cıvadan sonra birçok elementin süperiletken olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Tablo 2.1.’de süperiletken olan bazı elementler ve bu elementlerin süperiletken oldukları sıcaklıklar gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Süperiletken bazı elementler/alaşımlar ve kritik sıcaklıkları.

Element	$T_c(K)$
In	3,40
Hg	4,015
Nb ₃ Al	17,5
NbTi	10,0

Süperiletkenliğin keşfinden sonra 1933 yılında Meissner ve Ochsenfeld, “Meissner etkisini”, 1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer “BCS teorisini” yayınlayarak süperiletkenlerin temel özelliklerini bilimsel olarak açıklamışlardır [20, 21].

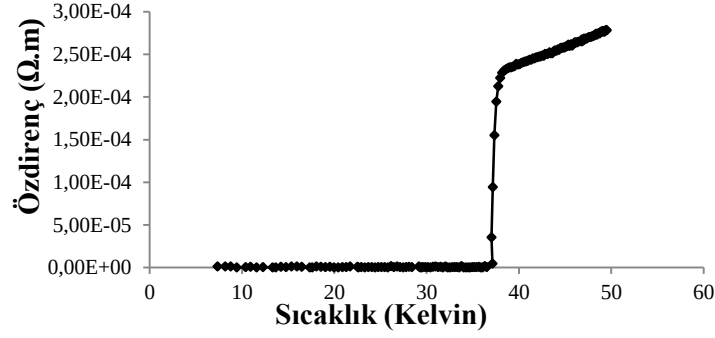
Bu gelişmelerden sonra süperiletken malzemeler kendilerine uygulama alanı bulmuş fakat soğutmanın helyumla yapılmasından ve süperiletkenliğin bozulduğu kritik akım değerlerinin yeterince yüksek olmamasından dolayı beklenen ve istenilen derecede yaygınlaşamamıştır.

2.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin Temeli

1986 yılında Bednorz ve Müller tarafından Zürih’te IBM Laboratuvarlarında Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri (YSS) olarak adlandırılan yeni bir süperiletken malzeme keşfedilmiştir (LBCO-Lantan baryum bakır oksit) [22]. En önemli YSS’ler YBCO (itriyum baryum bakır oksit) ve BSCCO (bizmut stronsiyum kalsiyum bakır oksit)’dir. YSS’lerin keşfinden sonra soğutma işlemi sıvı azotla gerçekleştirilmeye başlanmış ve kritik akım değerleri istenilen değerlere yükselmiş, böylelikle süperiletkenlerin uygulama alanları daha da artmıştır. 1986’dan günümüze bu alanda çok sayıda makale yayınlanmıştır. Süperiletkenler eşsiz özelliklerinden dolayı elektrik güç sistemleri, medikal, ulaşım ve teknoloji gibi birçok uygulama alanı bulmuştur [23, 24].

İletken üzerinden bir akım geçirmek için iletkenin uçları arasında bir potansiyel fark oluşturulmalıdır. İletkenden geçen akım, iletkenin direncinden dolayı ortaya ısı çıkarır. Ortaya çıkan ısı akımın karesi ve dirençle doğru orantılıdır. Direnç ne kadar büyükse, ortaya ısı olarak çıkan ve kaybolan enerji de o kadar büyük olur. Fakat bazı malzemeler kritik sıcaklık denilen bir sıcaklığın altına kadar soğutulduklarında malzemenin direnci sıfıra düşer. Bu durumda çok daha düşük gerilimlerde enerji kaybetmeden bir akım iletmek mümkün olur. İdeal metalik yapıda bir madde kritik sıcaklığın altına soğutulduğunda, fonon etkisi ortadan kalkar ve elektronlar yapı içerisinde örgü ile hiçbir etkileşmeye girmeden rahatlıkla hareket ederler. Bu durumda yapının direnci kritik sıcaklığın altında aniden sıfıra düşer. Kritik sıcaklığın altında direnci sıfır olan ve manyetik alanı dışlayan bu malzemeye süperiletken madde denir. Diğer bir ifadeyle

süperiletkenlik: en temel anlamda; belirli malzemelerin karakteristik kritik sıcaklıkları altına soğutulduklarında doğru akımda elektriksel dirençlerinin sıfır olması ve üzerlerine uygulanan manyetik alanı tamamen dışlaması olarak açıklanabilir.



Şekil 2.2. Süperiletken Öz direnç-sıcaklık grafiği

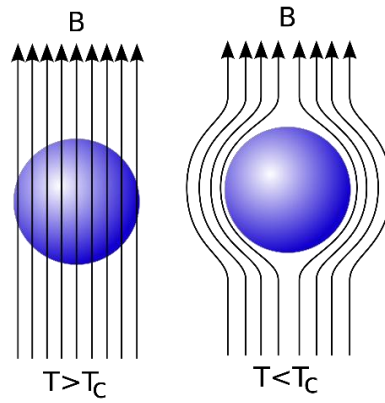
Şekil 2.2.'de süperiletkenlere ait örnek bir $R-T$ grafiği gösterilmiştir. Sıcaklık düşürüldükçe malzemenin öz direnci azalmakta ve kritik sıcaklık (T_c) değerine gelindiğinde öz direnç ($\rho = 0$) sıfır olmaktadır. Bu durumda manyetik alınganlık (χ) değeri ise -1 olmaktadır. Manyetik alınganlık değerinin -1 olması malzemenin mükemmel diyamanyetik özellik gösterdiği anlama gelmektedir. Diyamanyetik maddeler üzerlerine uygulanan manyetik alanın ürettiği manyetik alan çizgilerine zıt yönde mıknatıslanarak üzerlerine uygulanan manyetik alanı dışlar. Manyetik alanın dışlanması olayına Meissner etkisi denmektedir. Şekil 2.3.'te Meissner etkisini temsil etmek amacı ile örnek bir süperiletkenin kritik sıcaklığının altında ve üstünde, üzerine uygulanan manyetik alana olan davranışı gösterilmiştir.

$$B = \mu_0 H (1 + \chi), \quad (B = 0, \quad \chi = -1) \quad (2.1)$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.2)$$

$$H = -M, \quad (\kappa = 0) \quad (2.3)$$

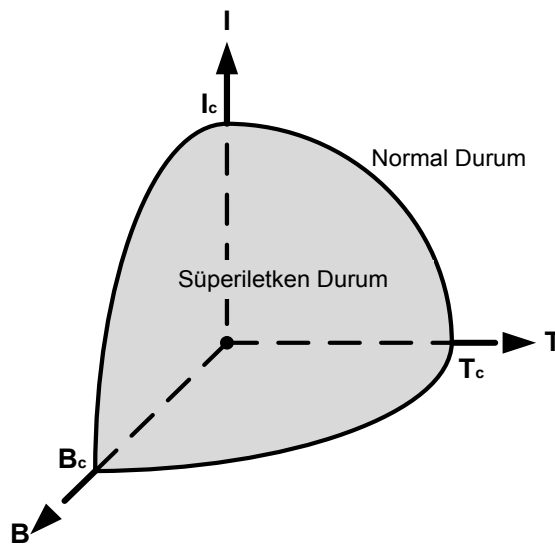
Bu ifadelerde yer alan χ manyetik alınganlık, κ manyetik geçirgenlik, M manyetizasyon (mıknatıslanma), B manyetik alan ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ 'dir.



Şekil 2.3. Meissner etkisi (sol taraf normal, sağ taraf süperiletken durum)[25]

Süperiletken malzemeler maruz kaldıkları dış (harici) manyetik alana göre normal durum veya süperiletken durumunda bulunabilme yeteneğine sahiptirler. Manyetik alan belirli bir kritik değere (H_c veya H_{c1}) ulaştığında Meissner etkisi yok olur ve malzemenin içine manyetik akı nüfuz eder.

Her süperiletken malzemenin kendisine ait bir kritik sıcaklığı (T_c), kritik manyetik alanı (B_c) ve kritik akım yoğunluğu (J_c) vardır. Eğer malzeme kendine has olan kritik sıcaklık, kritik manyetik alan ve kritik akım yoğunluğu değerlerinden herhangi birinde fazlasına maruz kalırsa malzeme normal faza geçer ve süperiletkenlik özellikleri ortadan kalkar. Malzemeye ait kritik değerler Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi birbirlerine bağlıdır.

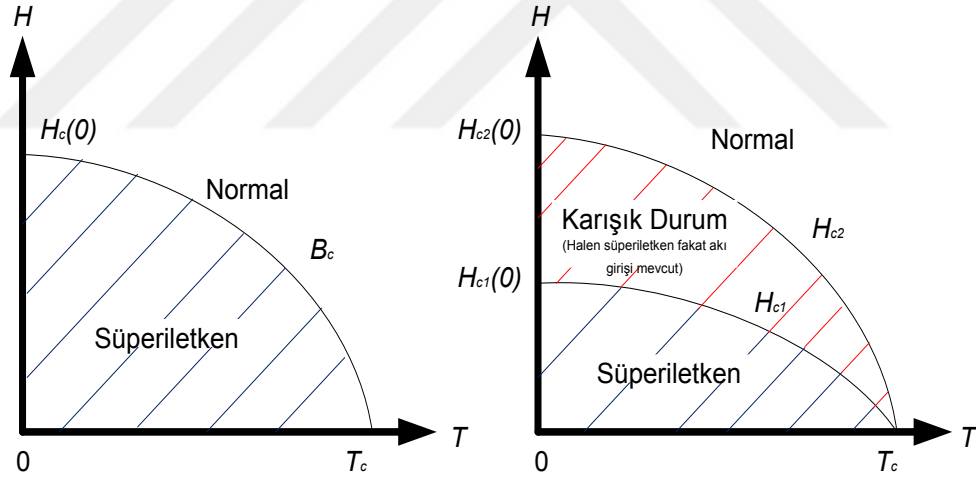


Şekil 2.4. Süperiletkenliği etkileyen parametreler

Manyetik alanın artmasıyla malzemenin verdiği tepkiye göre süperiletkenler I.Tip ve II.Tip süperiletkenler olarak iki kategoriye ayrılır:

I. Tip süperiletkenlerde malzeme belirli bir manyetik alandan (kritik manyetik alan) sonra Meissner etkisinden kurtulup normal duruma geçerek içerisinde manyetik akının tamamen nüfuz etmesine izin vermektedir. Genellikle kritik manyetik alanları küçüktür.

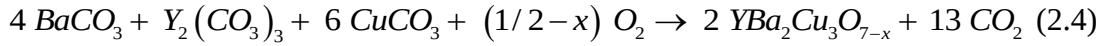
II. Tip süperiletkenlerde H_{c1} olarak adlandırılan alt kritik manyetik alan değerine kadar malzeme I.Tip ile aynı olup akı bünyesine nüfuz etmez. Bu değerden H_{c2} değerine kadar ise kısmi akı nüfuzu söz konusudur. Bu fazda süperiletkenlik hala devam eder. H_{c2} değerinden sonra ise malzeme normal faza geçiş yaparak süperiletkenliğini kaybeder. Şekil 2.5.'te I.Tip ve II.Tip süperiletkenlerin uygulanan manyetik alana göre bulundukları fazlar gösterilmiştir.



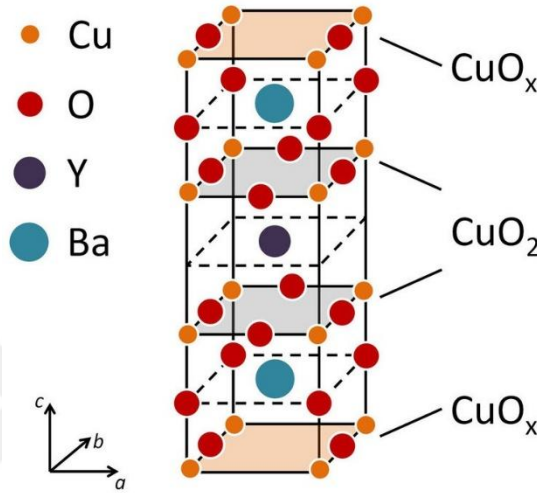
Şekil 2.5. Süperiletkenlerin faz diyagramları (a) I. Tip; (b) II. Tip Süperiletkenler [25]

2.1.1. YBCO kaplanmış iletkenler/şeritler (CC)

1987 yılında Zhao, Wu ve arkadaşları kritik sıcaklığı 93 K olan YBaCuO 'yu (YBCO) keşfettiler. Bu süperiletkenler açısından bir dönüm noktası olmuştur çünkü keşfedilen maddenin kritik sıcaklığı, sıvı azot (77 K) sıcaklığının üzerindeydi. YBCO'nun genel ifadesi $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (Y123) ve kimyasal denklemi aşağıdaki gibidir.



$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ in süperiletkenlik özellikleri oksijen içeriği olan x değerine karşı hassastır. Sadece $0 \leq x \leq 0,65$ aralığındaki değerlerde T_c altında ve $x \sim 0,07$ değerinde malzeme en yüksek 95 K sıcaklığında süperiletken olmaktadır.



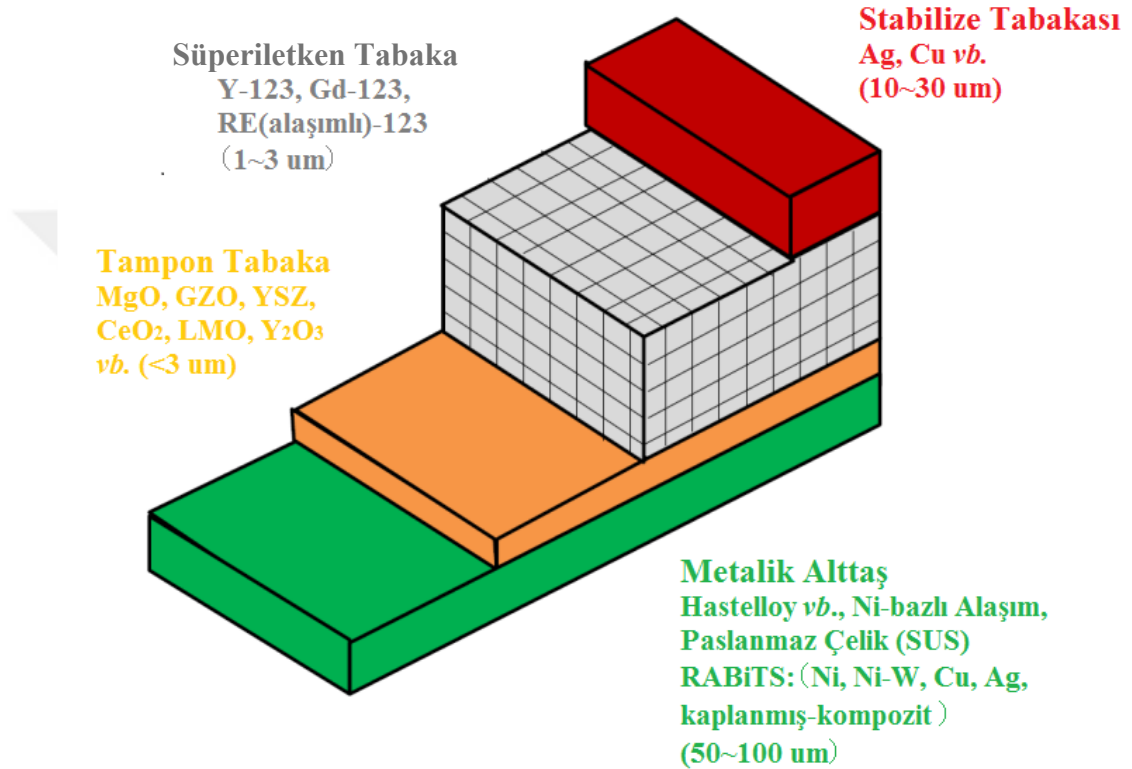
Şekil 2.6. YBCO'nun genel yapısı

Şekil 2.6.'da YBCO'nun atomik yapısı gösterilmiştir. Burada akımı taşıyan tabakalar CuO tabakalarıdır.

İkinci kuşak (2nd generation - 2G) YSS tel olarak adlandırılan YBCO kaplanmış iletkenlerde/şeritlerde 2000'li yıllarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Günümüzde 2G teller ile dönen makine, yüksek alan bobinleri, güç kabloları, transformatörler, kısa devre akım sınırlayıcı (FCL) vb. birçok uygulama için küçük modeller yapılmıştır. Kaplanmış iletkenlerin mükemmel akı çivileme (sabitlenme) özellikleri, geliştirilmiş mekanik güç, düşük alternatif akım kaybı, normal durumda yüksek öz direnç özelliği ve düşük üretim masraflarına sahip olma gibi avantajları vardır.

İkinci kuşak YSS teller tabakalı bir yapıya sahiptirler. Tek kristal Y-123 kalın filmlerin elastik metal alttaşlarda büyümesiyle oluşturulur. 1991 yılında alttaş olarak Ni-temelli alaşım şeritler IBAD (Ion-Beam-Assisted-Deposition) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Şerit alttaş üretiminde bu yöntemler dışında alternatif olarak ISD (Inclined

Substrate Deposition) ve RABITS (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate) yöntemleri mevcuttur. Süperiletken tabakayı oluştururken kullanılan yöntemlerden bazıları ise PVD (Pulsed Vapor Deposition), MOVCD (Metal Organic Vapor Chemical Deposition), CSD (Chemical Solution Deposition) ve RCE-dr'dir (Reactive Co Evaporation by-Deposition and Reaction).



Şekil 2.7. Şeritlerin genel yapısı

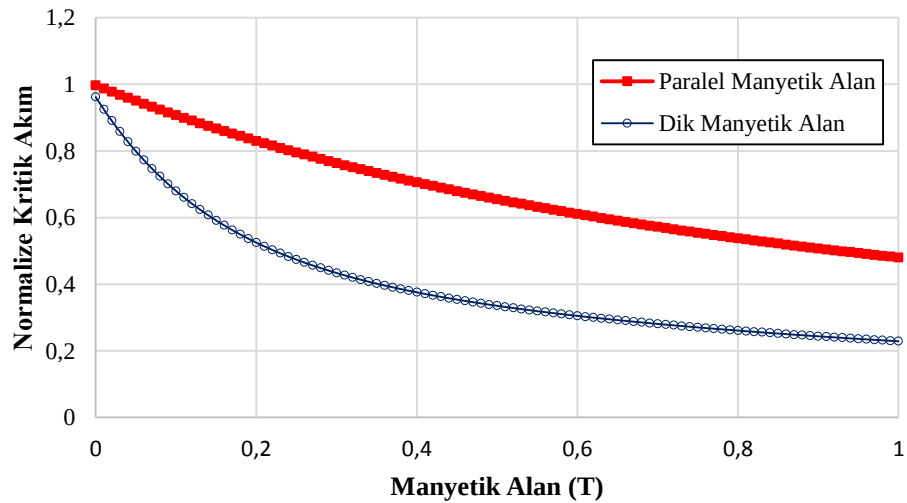
Şekil 2.7.'de şeritlerin genel yapısı gösterilmiş olup bunun dışında değişik yapılar sahip şeritleri bulunabilmektedir (Örneğin şeritlerin çift süperiletken taraflı ve çift tarafın stabilize edilmiş çeşitleri mevcuttur). Stabilize katmanının yüksek termal iletkenliğe ve düşük öz dirence sahip olması istenilir. Bu çalışmada stabilize edilmiş ve edilmemiş şeritler kullanılmış ve kritik akım değerlerine yakın akımlarda stabilizasyonun ne kadar önemli olduğu incelenmiştir.

Süperiletken tabakada düzlem içerisinde tanecik hizalaması (in plane grain alignment), homojenlik, yüksek I_c için kalın film ve yüksek oranda biriktirme önemlidir. Bu kavramların her biri şeritin süperiletkenlik özelliklerini etkilemektedir. Tampon tabaka

tanecik hizalaması için bir zemin (template) oluşturmaktadır. Ayrıca kimyasal reaksiyonlara ve çatlak oluşumlarına engel olmaktadır. Tampon tabakanın da homojen olması önemlidir. Metalik tabakanın ise yüksek mekanik güce sahip olması, manyetik olmayan bir malzemedan yapılması, ince ve pürüzsüz bir yüzeyinin olması istenir.

2.1.2. Şeritlerde anizotropi

Süperiletkenlerde anizotropi, malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerinin yöne bağımlılığı anlamına gelir. Örnek vermek gerekirse şeritlerin süperiletken özelliklerini (kritik akımlarını) geniş yüzeylerine paralel uygulanan manyetik alanlar, dik uygulanan manyetik alanlardan daha az etki eder. YSS tanecikli yapılarından dolayı anizotropiktirler. Aşağıdaki Şekil 2.8.'de manyetik alan değerinin $J_c(B)$ ve süperiletkenin yüzeyine farklı yönlerle (dik ve paralel) uygulanan manyetik alanın kritik akıma etkileri gösterilmiştir. Dik manyetik alandaki etki paralel manyetik alandaki etkiye göre daha fazladır.

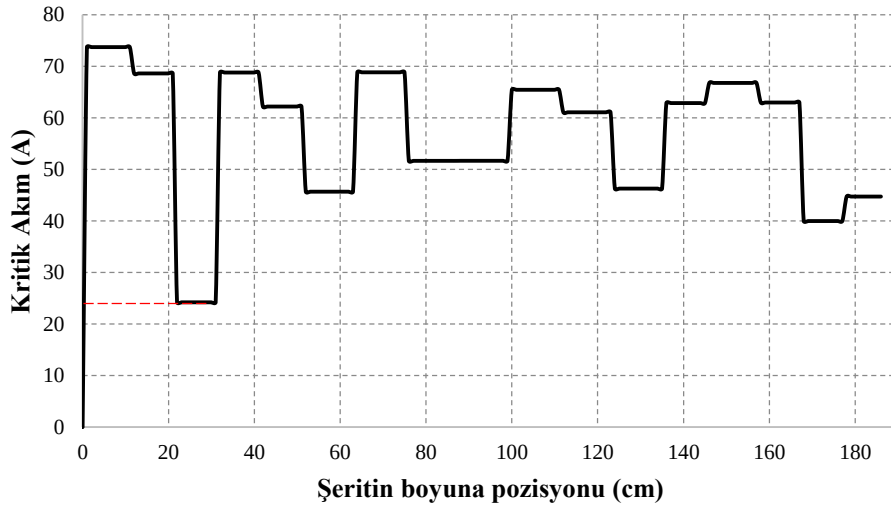


Şekil 2.8. Farklı yönlerde uygulanan manyetik alanlarda $J_c(B)$

2.1.3. Şeritlerde homojensizlikler

Şeritlerin kullanıldığı uygulamalarda süperiletken tabakadaki homojensizlikler önemli bir rol oynar. Bazı durumlarda şeritlerde boyuna kritik akım değerinde farklılık görülmektedir. Bu farklılıklara üretim esnasında veya uygulama esnasında zarar gören

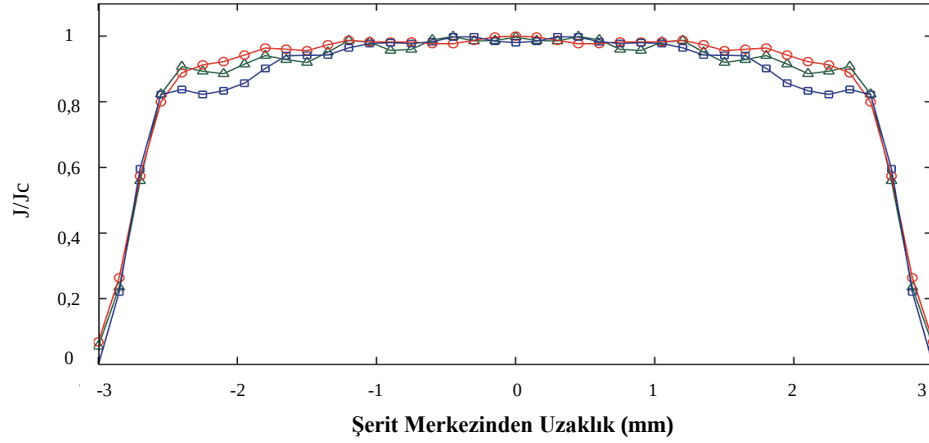
şeritlerde rastlanır. Çalışmada kullanılan stabilize edilmemiş Avrupa’da üretilmiş bir şeritin boyuna kritik akım dağılımı Şekil 2.9.’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Avrupa’da üretilmiş bir şeritteki boyuna kritik akım değişimi

Şekilde görüldüğü gibi boyuna kritik akım değeri değişim göstermektedir. Bu uygulamalar için olumsuz bir etkidir. Şeritin kritik akım değeri en zayıf noktasındaki değer olan 25 A civarındadır. Süperiletken malzeme en zayıf noktası kadar güçlüdür. Bu yüzden olabildiğince homojen kritik akım dağılımına sahip şerit üretmek ve uygulamalarda kullanmak oldukça önemlidir.

Şeritlerde boyuna kritik akım dağılımına ek olarak enine kritik akım dağılımında da homojensizlikler mevcuttur. Üretimden kaynaklı şeritlerin kenarlarında kritik akım genellikle daha az olur. Kritik akımın enine ve boyuna değişken olmasının yapılacak olan uygulama ve modellemelerde hesaba katılmalıdır. Bu şeritlerin özelliklerini anlamak amacıyla manyetik haritalama ‘magnetic mapping’ deneyleri yapılır ve nümerik olarak hesaplanacak olan kayıplar modellenirken bu deneyin sonuçlarından yararlanılır [26, 27]. Aynı seri şeritlerden alınan enine kritik akım dağılımı Şekil 2.10.’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. 6 mm genişlikteki şeritin genişlik boyunca J_c dağılımı [26]

2.2. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerde AA Kayıpları

Yüksek sıcaklıklı süperiletkenlerin güç sistemlerindeki uygulama alanlarında ve bu uygulamaların modellenmesinde AA kayıplarının önemli bir parametre olduğu önceki bölümlerde değinildi. AA kayıplarının azaltılması için iyi özelliklere sahip YSS tel/şerit üretilmesi gerekir.

Amemiya ve arkadaşları süperiletken malzemelerin çoklu filamanlara ayrılarak toplam AA kayıplarını azalttığını göstermiş [28] ve numuneleri bükerek çeşitli manyetik alanlar altında AA kayıplarını incelemişlerdir [29]. Bükme işleminin her manyetik alan altında AA kayıpları azaltmadığını belirttiler. Daha sonra Glowacki ve arkadaşları filaman sayısı ve filamanların birbirleriyle geometrilerinin AA kayıplarına etkisini incelemiştir [30, 31]. Nguyen ve arkadaşları, süperiletken tellere uygulanan akım ile manyetik alanın arasındaki faz farkının AA kayıplarına etkisi inceleyerek malzemelerin ideal faz farklarındaki kayıplarını tespit etmiştir [32]. Jiang ve arkadaşları ise bükme işlemi gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmemiş şeritlerin, geniş yüzeyine dik ve paralel dış manyetik alanlar uygulamış ve AA kayıplarını incelemiştir [33-35].

Güç iletiminde kullanılan süperiletken şeritlerde alttaş tabakanın manyetik bir malzeme kullanıldığında AA kayıplarına etkileri Amemiya ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [36]. Spektor ve arkadaşları ise sinüzoidal olmayan durumlar altında AA

kayıplarının karakteristiklerini incelemiştir [37]. Choi ve arkadaşları çeşitli süperiletken tellerdeki AA kayıpların sıcaklık ve transport akımı fonksiyonlarına bağlı olarak tahminlerini gerçekleştirmiştir [38]. Li ve arkadaşları ise dış çapı sabit kabul edilecek güç iletim kablolarındaki AA kayıplarının minimize etmenin yollarını incelemiştir [39]. Bu çalışmaların hepsi ayrı ayrı AA kayıplarını incelediğinden ideal çalışma şartlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

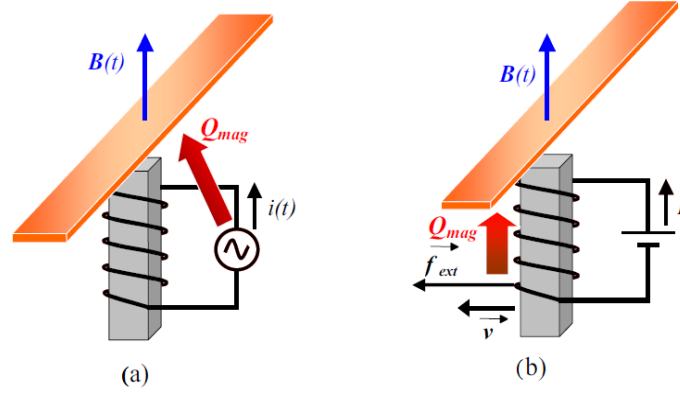
AA kayıpları hakkında birçok çalışma yapılmasına rağmen şeritler kullanılarak üretilen CORC kabloların alternatif akım kayıpları ile ilgili sınırlı sayıda çalışmaya rastlanılmaktadır. Yapılan çalışmaların büyük bir kısmında Amerikan yapımı şeritler kullanılmakta iken bu çalışmada buna alternatif olabilecek Asya ve Avrupa üretimi şeritlerin özellikleri ve bu şeritlerden Asya'da üretilen ile yapılmış CORC kabloların AA kayıplarını incelenmiştir. Mevcut çalışmalardan farklı olarak gerçek uygulamalara daha benzerlik gösteren CORC kabloları, ortada bulunan iletkeni bakır kullanarak bunun mekanik, DA ve AA karakteristiklerine etkisi araştırılmıştır.

DA uygulandığında kayıpların olmadığı ve alternatif bir akım veya manyetik alan uygulandığında süperiletkenlerde elektromanyetik enerji kaybı meydana geldiğine daha önceden değinilmişti. Alternatif manyetik alan ve/veya transport akımlar Tip II süperiletkenlerinde her frekansta enerji kaybına sebep olurken, Tip I süperiletkenlerinde sadece çok yüksek frekanslarda kayba sebep olurlar (10 GHz) [40, 41]. Literatürde AA kayıplarının farklı sınıflandırmalar yapılmakla birlikte temel olarak manyetizasyon kayıpları ve transport kayıpları olmak üzere iki sınıfta toplanırlar.

2.2.1. Manyetizasyon kayıpları (Q_{mag})

Süperiletken bir malzemenin değişken bir manyetik alana maruz kalması manyetizasyon kayıplarına sebebiyet verir. Bu kaybın enerjisi, manyetik alanı değiştiren kaynak tarafından beslenmektedir. İki şekilde değişken manyetik alan elde edilebilir ve Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. Bunların birincisi alanı oluşturan akımın değişken olmasıdır. Bu durumda kayıplar bu akımı oluşturan güç kaynağı tarafından

karşılır. Diğer i ise manyetik alanın mekanik olarak değıştirilmesidir. Bu durumda ise kayıplar bu mekanik enerjiyi oluşturan kaynak tarafından karşılanır [42].

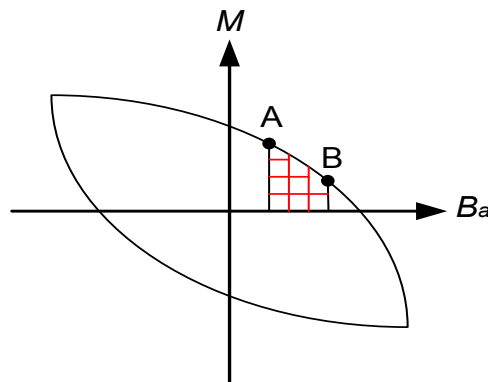


Şekil 2.11. Süperiletken şeritteki enerji kaybının iki farklı çeşitteki kaynaktan beslenmesi: (a) elektriksel; (b) mekanik [42]

Değişken manyetik alan süperiletken şeritler üzerinde süperiletken histerezis, ferromanyetik histerezis, çiftlenim ve Eddy akım kayıpları olmak üzere dört farklı kayba sebep olur.

2.2.1.1. Süperiletken histerezis kayıpları

Süperiletken malzeme dışarıdan (harici) değişken bir manyetik alana maruz kaldığında manyetizasyon (M) ile manyetik alan (B_a) arasındaki ilişkiyi gösteren histerezis eğrisi Şekil 2.12.'deki gibidir. M - B_a eğrisi altındaki alan, bir döngüdeki iki durum arasındaki geçişte (A-B) kaybedilen enerjidir ve histerezis kaybı olarak adlandırılmaktadır. Histerezis kayıpları Denklem 2.5 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2.12. Histerezis döngüsü

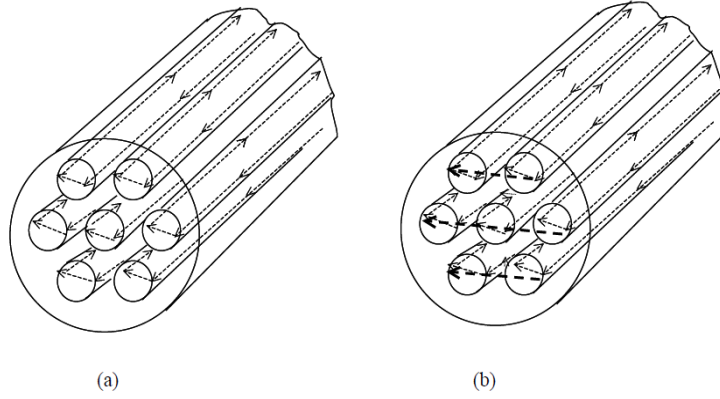
$$Q_H = \int_A^B MdB \quad (2.5)$$

2.2.1.2. Ferromanyetik histerezis kayıpları (2G şeritlerde)

Ferromanyetik histerezis kayıpları Ni ve W gibi ferromanyetik alaşımları alt malzeme olarak kullanan 2G (2nd Generation) şeritlerde görülür. Ferromanyetik malzemelerde oluşan ferromanyetik histerezis ve Eddy akım kayıplarıdır. Toplam kayıplar hesaplanırken bu kayıplarda hesaba katılır.

2.2.1.3. Çiftlenim kayıpları

Süperiletken histerezis kayıplarını düşürmek için normal metal matris içine gömülmüş çeşitli sayılarda filamanlarla (damarlı) üretilirler. Düşük frekanslarda manyetizasyon kayıpları sadece histerezistik bileşenden oluşmaktadır. Uygulanan manyetik alanın frekansı ve filaman (damar) sayısı arttıkça veya filamanlar arası mesafe uygun değerden daha küçükse filamanlar arası çiftlenim akımları (Eddy çiftlenim akımları) oluşmaya başlar. Burada çiftlenim, aynı yolu izleyen akımların birleşmesini tanımlamak için kullanılmıştır. Filamanlar tamamen birleştikleri zaman tek filaman gibi davranırlar. Bu yüksek iletkenlikle filamanlar arası geçen akımlar iletkenin normal metal kısımlarında enerji kaybına sebep olurlar. Bu kayıplara çiftlenim kayıpları veya Eddy akımı çiftlenim kayıpları denmekte olup normal Eddy akım kayıplarından çok daha büyüktür. Süperiletken bir malzemede çiftlenim akımlarının olması ve olmaması durumu Şekil 2.13.'te gösterilmiştir. Normal iletkenlerde akım veya manyetik alan değişiminden kaynaklı Eddy akımları oluşur. Eğer Eddy akımının yolu üzerinde süperiletken filamanlar bulunuyorsa, akımın izleyeceği yoldaki direnç düşmüş olur. Çiftlenim akımlarının artması AA kayıplarını da artırır [43].



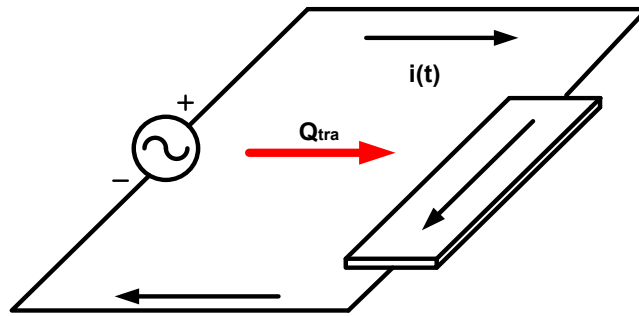
Şekil 2.13. Süperiletken malzemelerde (a) çiftlenim yok; (b) çiftlenim var [43].

2.2.1.4. Eddy akım kayıpları

Mekanik olarak daha kararlı ve AA kaybın azaltılması gibi çeşitli sebeplerden dolayı, süperiletken numuneler üretilirken normal iletken bir kılıfın içine konulurlar. Eddy akım kayıpları, numuneye dışarıdan bir manyetik alan veya bir alternatif transport akım uygulandığı zaman normal iletken matriste indüklenen akımların ortaya çıkması sonucunda oluşmaktadır [44]. Bu etki güç sistemlerinde deri etkisi olarak adlandırılır.

2.2.2. Transport akım kayıpları (Q_{tra})

Süperiletken bir malzemenin değişken bir akım taşımaması sonucunda oluşan kayıplara Transport akım kayıpları denir. Transport akım kayıpları, süperiletkene uygulanan akımı oluşturan güç kaynağı tarafından beslenir. Şekil 2.14.'te alternatif akım uygulanan bir süperiletken şerit gösterilmiştir. Transport akım kayıpları üç temel bileşene ayrılır:



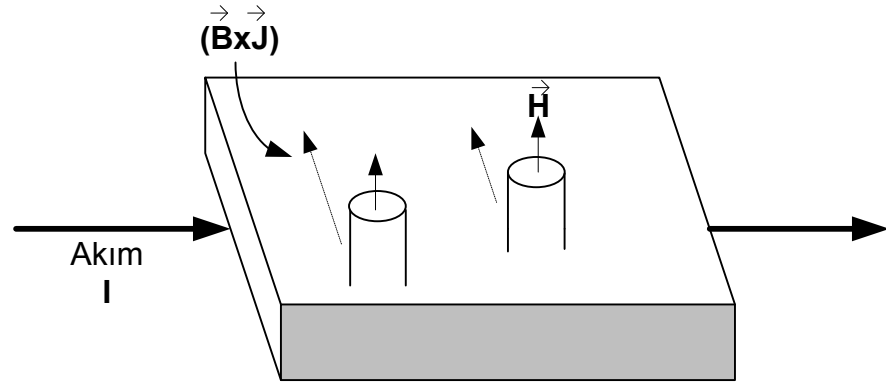
Şekil 2.14. Süperiletken şeritteki enerji kaybının akımı oluşturan güç kaynağı tarafından beslenmesi

2.2.2.1. Öz-alan kayıpları

Süperiletken malzemelere değişken bir transport akım uygulandığında malzeme çevresinde öz-alan olarak adlandırılan bir manyetik alan oluşur. Bu filamanlardaki transport akımından veya bitişiğindeki filamanlardan geçen akımın oluşturduğu değişken manyetik alanların sebep olduğu histerezis kayıplarıdır. Dışarıdan herhangi bir manyetik alan uygulanmasa bile alternatif transport akımının oluşturduğu öz-alan sebebiyle oluşan histerezistik kayıplar öz-alan kayıpları olarak adlandırılır.

2.2.2.2. Akı akışı kayıpları

II. Tip süperiletkenler (BSCCO ya da YBCO gibi) karışık durumda bulunurken, dış harici manyetik alan veya öz alan altında, akı çizgileri kristal örgüdeki kusurlardan dolayı çivileme merkezleri olarak adlandırılan noktalarda sabit olarak bulunmaktadır. Transport akımı bu akı çizgilerini süperiletkenin sınırları içerisinde hareket ettirmek için bir kuvvet uygular. Hareket eden yüklü bir parçacık üzerinde oluşan manyetik ve elektriksel alan kaynaklı kuvvetlerin bileşkesine Lorentz kuvveti denir. Uygulanan manyetik alan akıma (yükün hareket yönüne) paralel ise bu kuvvet noktasal çapımdan dolayı sıfır olur. Maksimum kuvvet ise akım ile manyetik alan birbirine dik olduğunda görülür. Bu kuvvet çivileme kuvvetinden küçük olduğunda akı çizgileri bir yer değişikliğine gidemezler. Fakat akım yeterince büyük bir değere ulaştığında akı çizgileri süperiletken içerisinde hareket etmeye başlarlar. Bu hareket bir enerji kaybına yol açar ve bu kayıplara akı akışı kayıpları denir. Şekil 2.15.'te Lorentz kuvveti gösterilmiştir. Şekilde H uygulanan manyetik alan, I akım ve $(B \times J)$ Lorentz kuvvetine karşı olan çivileme kuvvetleridir [45].



Şekil 2.15. Lorentz kuvvetinin oluşumu

2.2.2.3. İletken katmanlarındaki rezistif kayıplar

Transport akımı, süperiletken malzemenin taşıyabileceği kritik akım değerini aştığı zaman fazla akım alternatif bir yol izler. Bu yol 1G tel/şeritlerde süperiletken filamanları saran matris, 2G tel/şeritlerde ise iletken katmanlarıdır (gümüş katman, stabilize katmanı vb.).

Transport akımı küçük olduğunda öz alan kayıpları baskın olmaktadır. Akım arttıkça belirli bir noktada vorteksler (manyetik alan çizgileri) çivileme noktalarından kurtulurlar ve akı akışı kayıpları genel kayıplara dahil olurlar. Daha yüksek akımlarda akı akışı kayıpları baskın olmakta ve öz alan kaybını geçecek değerlere gelebilmektedir. Akım artışını devam ettirdiğinde ise fazla akım iletkenleri saran matris veya iletken katmanlarından yoluna devam ederek diğer kayıplara baskın olan omik kayıplara sebep olur.

Bir süperiletken malzemenin toplam AA kaybı yukarıda bahsedilen manyetizasyon ve transport akım kayıplarının toplamıdır.

$$Q_{toplam} = Q_{mag} + Q_{tra} \quad (2.6)$$

Değişken bir manyetik alana maruz kalan süperiletken malzemenin histerezis kayıpları (döngü başına) tersinemez manyetik özelliklerinden kaynaklanmaktadır ve frekanstan bağımsızdır. Tek filamanlı veya hacimsel (bulk) süperiletkenler için kayıpların baskın

kısmı histerezis kayıplarıdır. Bu durumda çivileme kuvveti akı çizgilerinin malzemeye girmesine veya çıkmasına izin vermez. Fakat kritik akım değeri aşıldığında, akı çizgilerinin hareketi, akı akışı kayıplarının baskın kayıplar olmasını sağlar.

Süperiletkenler genellikle kompozit malzemelerdir ve yüksek termal iletkenliğe, düşük öz dirence sahip normal metal veya bileşiklerden yapılmış stabilizasyon matrisleri vardır. Bundan dolayı normal bölgelerde Eddy kayıpları ve çiftlenim kayıpları mevcuttur.

2.2.3. Alternatif akım kayıplarının analitik hesaplanması

Süperiletkenlerin alternatif akım kayıplarının analitik ifadeleri genel olarak Bean Kritik Durum Modeli (KDM) kullanılarak açıklanır. Sadece tabaka benzeri ve yuvarlak geometrik şekillere sahip yapıların analitik ifadeleri mevcuttur. Her farklı yapı için nümerik analizler gerekmektedir. Analitik ifadelerin anlatımına başlamadan önce Bean KDM açıklanacaktır.

2.2.3.1. Bean Kritik Durum Modeli (Bean KDM)

Akı çizgileri ile çivileme merkezleri arasındaki etkileşim basit durumlar için anlaşılır olmaktadır süperiletken malzemelerin karmaşıklığı ve çivileme merkez çeşitliliği (değişkenliği), çivileme kuvvetinin makroskobik hacim yoğunluğunu mikroskobik hesaplamalardan direkt olarak tahminini sağlayan bir çözümün elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Süperiletkenlerin makroskobik davranışlarını açıklayan bir model geliştirmek daha kullanışlı olmaktadır. Bu modellerin ilki 1962 yılında Bean [46] tarafından geliştirilmiş ve “Bean Kritik Durum Modeli (Bean KDM)” olarak adlandırılmıştır.

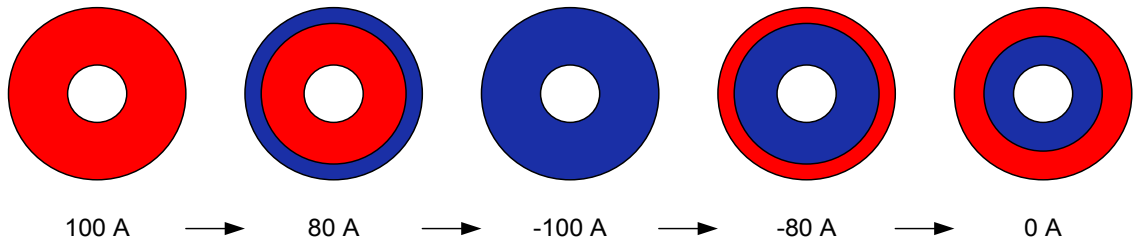
Normal metallerde akım yoğunluğu ve elektrik alan arasındaki ilişkiler Ohm kanunu ($J = \sigma.E$ ve $V = I.R$) ile açıklanır. Ohm kanununda akım ile gerilim arasındaki ilişki doğrusaldır. Fakat süperiletkenlerde akım ile gerilim arasında farklı bir ilişki vardır.

$$E = E_c \cdot \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.7)$$

Bean Modeli kritik akım yoğunluğu ifadesini idealleştirir. Elektrik alan kritik akım değerine kadar sıfır olurken bu değerden sonra ani olarak artar. Bean modelinde bu ani artışın olduğu noktanın manyetik alandan bağımsız olduğu kabul edilir. Süperiletkenin herhangi bir bölgesindeki akım yoğunluğunun ya kritik akım yoğunluğuna ($+j_c$ veya $-j_c$) ya da sıfır değerine sahip olacağı kabul edilir. Bir elektrik alan varlığında akım ile elektrik alanın aynı yönde olduğu ve bir elektrik alan uygulanıp sonra sıfıra azaltılırsa, o elektrik alan sıfır olana kadar akım yoğunluğunun kritik akım yoğunluğu değerinde olacağı varsayılır. Süperiletken içerisinde hiçbir elektrik alan oluşmayan kısımlarda ise akım yoğunluğu sıfırdır. Bean KDM modelini ifade eden denklem aşağıda iki durum için verilmiştir.

$$|J| = \begin{cases} 0 \rightarrow B = 0 \\ J_c \rightarrow \text{Diğer} \end{cases} \quad (2.8)$$

Bu modelin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2.16.'da kritik akımı $I_c=120$ A olan yuvarlak bir telin akım yoğunlukları gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Transport akım dağılımı

Telden geçen akım I (I_c 'den küçük) değerinde iken telin kesit alanının sadece bir kısmı elektrik akımını taşır ve manyetik alan oluşturur. Tel üzerinden akan akım azaltıldığında ise akımın geçtiği kesit alanı azalır. Bu durumda sadece ters yönde kritik akım yoğunluğuna sahip bir akımın aktığı varsayılmaktadır. Bunun sebebi süperiletken içerisinde bir kez indüklenen kritik akım yoğunluğu yok edilememekte,

sadece bir kısmının polaritesi tersine çevrilebilmektedir. Şeklin en sonundaki 0 A akım akan durum ile en başta hiç akım akmazken durum aynı değildir bunun sebebi akı çivilemesidir. Örnekte görüldüğü üzere üzerinden bir kez akım geçen telin içerisindeki bir bölüm kritik akım yoğunluğuna sahiptir.

Akım dağılımındaki geçmişe olan bağımlılık (histerezis), akım kaynağı tarafından sağlanan elektromanyetik enerji ısıya dönüşerek kaybolur. Bu ısı dönüşümünün başka bir adı ise alternatif akım kayıplarıdır. Süperiletkenler genellikle kritik akım değerlerinden düşük akım değerlerinde çalıştırılırlar. Bunun sonucunda telin ortasında sürekli olarak akım geçmeyen bir bölge oluşur. Bu bölgeye nötr bölge adı verilir. Kritik durum modelinde bu bölgede elektrik alan, manyetik alan ve akım dağılımlarındaki değişimlere rağmen sıfır kalmaktadır.

Manyetik alanın kritik akımı etkilemesi de hesaba katılarak bulunan sonuçlar deneysel sonuçlara daha yakınlık gösterebilir fakat bu durumda çözüm analitik olmaktan çıkar. Bu yüzden problemin temelini anlaşılmaması için J_c sabit olarak alınır. Bu amaçla kritik akım yoğunluğunun manyetik alan bağımlılığını içeren ifadeler eşitliklerden çıkarılmıştır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanlarından birisi Kim-Anderson modelidir [47].

$$J_c = \frac{J_0}{1 + \frac{H}{H_0}} \quad (2.9)$$

J_0 ve H_0 numuneye ait sabitlerdir.

Bean KDM açıklanmasından sonra bir sonraki bölümde süperiletken malzemelerin bazı özel yapılarına ve uygulanan değişken manyetik alan ve/veya akımlarda AA kayıplarının analitik ifadeleri verilmiştir. Bu ifadelerin tanımları daha önceden yapıldığından sadece denklemleri verilmiştir.

2.2.3.2. Transport (Öz-alan) kayıplarının hesaplanması

Bölüm 2.2.2.1’de detaylı bir şekilde anlatıldığı gibi süperiletken malzemenin üzerinden alternatif I akımı geçtiğinde transport (öz-alan) AA kaybı oluşur. I_c malzemenin kritik akımı ve normalize akım genliği $i = I / I_c$ olmak üzere farklı yapılara sahip malzemelerde bir döngü boyunca öz-alan AA kayıpları aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

Norris, 1970 yılında yaptığı çalışmada [48] elips ve yuvarlak (dairesel) kesitli tellerde transport kaybını hesaplamak için,

$$Q_{tra} = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left[(1-i) \ln(1-i) + i - i^2 / 2 \right] \left[Jm^{-1} \right] \quad (2.10)$$

eşitliğini vermiştir. $\left[(1-i) \ln(1-i) + i - i^2 / 2 \right]$ ifadesi kayıp fonksiyonudur ve i^3 ile doğru orantılıdır.

Sonsuz uzunluktaki bir levha (infinite slab) ve ince şerit için transport kayıplarını veren ifadeler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

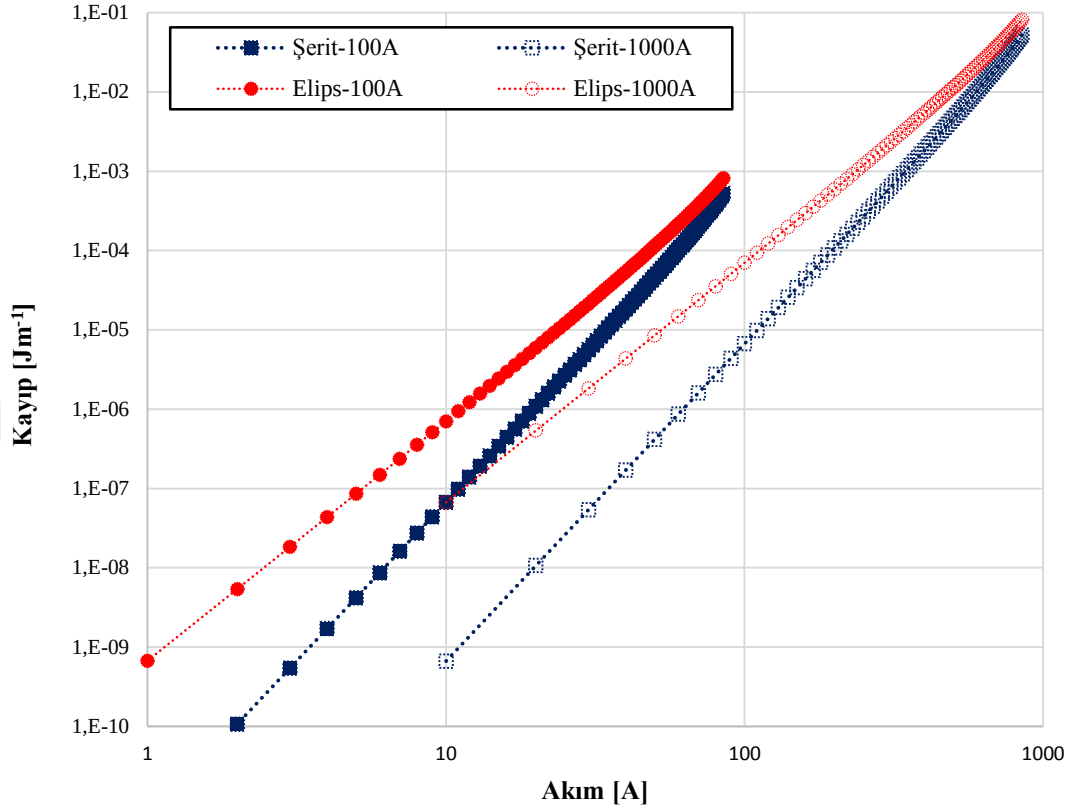
$$Q_{tra} = \frac{2B_p^2}{3\mu_0} i^3; Q_{tra} = \frac{2\mu_0^2 J_c d^2 I^3}{3\mu_0 I_c^3} \left[Jm^{-1} \right] \quad (2.11)$$

$$Q_{tra} = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left[(1-i) \ln(1-i) + (1+i) \ln(1+i) - i^2 \right] \left[Jm^{-1} \right] \quad (2.12)$$

Şeritlerde kayıp fonksiyonu i^4 ile orantılıdır. Yukarda verilen denklemler $i < 1$ için geçerlidir.

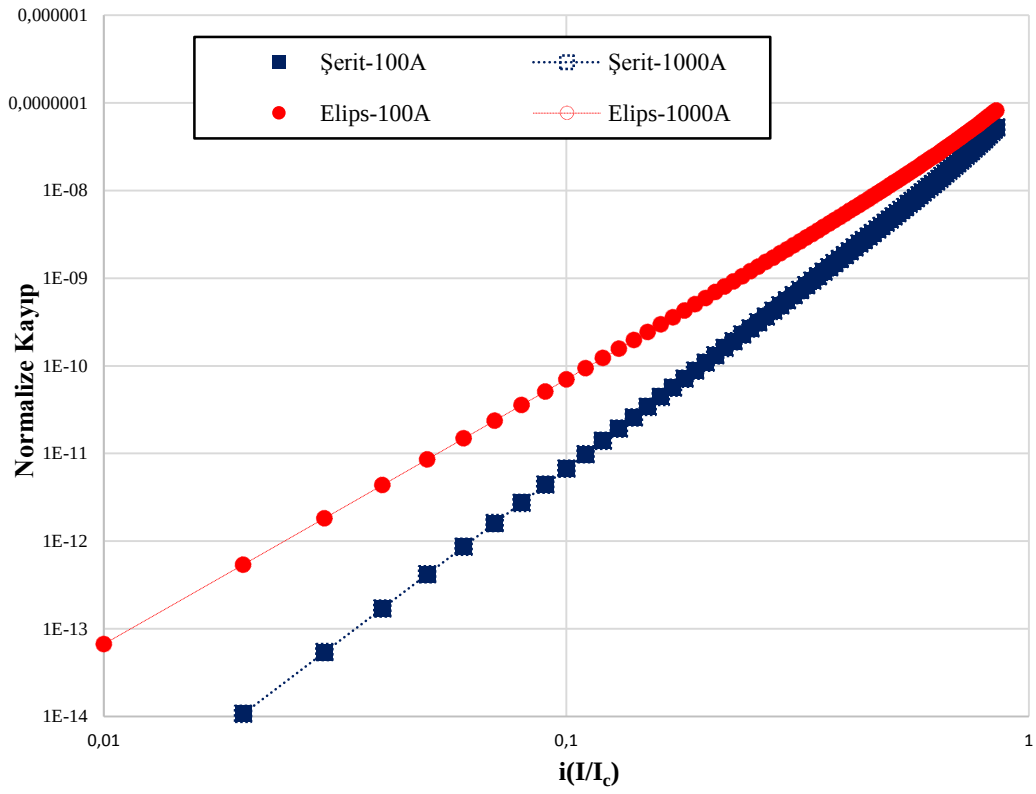
Literatürde yapılan bazı çalışmalarda ölçülen kayıplar, şerit ve elips için kuramsal olarak hesaplanan kayıp değerlerinin arasında olduğu görülmüştür [49].

Şekil 2.17.'de Norris'in elips ve ince şerit için eşitliklerini farklı kritik akımlara (100 ve 1000A) sahip olan iki süperiletken için karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.17. Farklı kritik akımlara sahip elips ve şeritlerin transport kayıp-akım ilişkisi

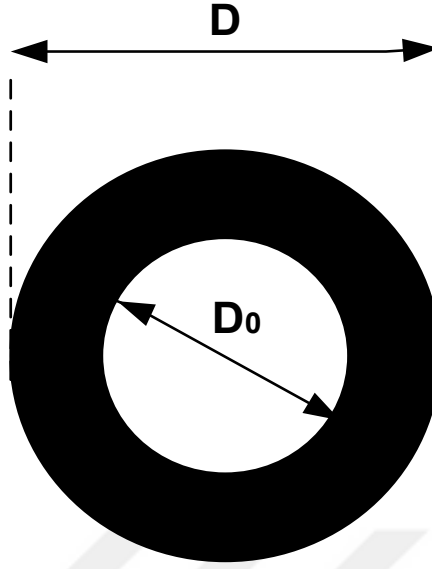
Elips ve şeritler için hesaplanan transport AA kayıpları Şekil 2.17.'de gösterilmiştir. Aynı kritik akıma sahip malzemelerde elipsteki kayıplar şerittekinden daha yüksektir. Elips modelde kayıp +3 eğim ile artarken, ince şerit modelde +4 eğim ile artmaktadır. Kayıplar kritik akım değerinde birbirlerine yaklaşmaktadır. Buradaki önemli bir detay kritik akımdaki kayıplar kritik akımın artmasıyla artış gösterse de aynı taşıma akımında yüksek kritik akıma sahip olan süperiletkende daha az kayıp görülmektedir. Bu iki modelde eksenleri değiştirerek farklı kritik akıma sahip süperiletkenler karşılaştırılabilir. X ekseninde bağımsız bir kavram olan akımın kritik akıma oranı (i), Y ekseninde ise akımın karesine bölünerek elde edilen normalize kayıplar kullanılacaktır.



Şekil 2.18. İki modelin normalize edilmiş transport kayıp-akım ilişkisi

Şekil 2.18.'de görüldüğü üzere kayıplar normalize edildiği zaman elips ve şeritlerdeki AA kayıplarının davranışı daha açık görülür. Düşük akımlarda şeritlerdeki kayıplar daha küçük bir değere sahipken, kritik akıma doğru yaklaşıldıkça elips şeklindeki süperiletkenlerin kayıplarına yaklaşır.

Güç iletim sistemlerinde kullanılan kabloların transport kayıplarını hesaplamak için genel olarak Monoblok model kullanılır [50]. Monoblok yapısı Şekil 2.19.'da gösterildiği üzere, halka şekilde aralıksız süperiletken malzemeye çevrili içi boş bir iletkenidir. Gerçek kablolarda şeritlerin arasında boşluklar mevcuttur. Bu yapıya sahip iletkenlerdeki transport akımı yüzeye paralel bir manyetik alan üretir.



Şekil 2.19. Monoblok modeli (iç kısım boş)

Monoblok şeklindeki iletkenlerdeki transport kayıpları aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$Q_{tra} = \frac{\mu_0 I_c^2}{2\pi h^2} [(2 - ih)ih + 2(1 - ih)\ln(1 - ih)] [Jm^{-1}] \quad (2.13)$$

Bu eşiklikte D iletkenin dış çapı, D_0 iletkenin iç çapı ve $h = \frac{D^2 - D_0^2}{D^2}$ 'dir

2.2.3.3. Akı akışı ve omik kayıpların hesaplanması

Bean KDM'de akım, kritik değerden yüksek olamamaktadır. Fakat süperiletkenler normal-süperiletken arasında düşük n değerinden kaynaklanan yavaş bir geçiş sağlayarak kritik akım değerlerinden daha fazla akım taşıyabilmektedirler. Bu durumda akım matris materyali üzerinden taşınmaktadır. Bu durum iki paralel kol ile tanımlanır:

$$I = I_c(B) \left(\frac{E}{E_c} \right)^{1/n(B)} + \frac{ES}{\rho} \quad (2.14)$$

İlk terim akı akışını, ikinci terim ise matris üzerinden akan akımı tanımlar. ρ matris ve kılıfın toplam öz direnci ve S iletkenin kesit alanıdır. AA sinüzoidal bir transport akımı içi döngü başına omik kayıplar aşağıdaki denklem ile hesaplanır [51].

$$Q_{tra} = \frac{1}{S} \int_0^{1/f} E(t) I_t \sin(2\pi ft) dt \quad (2.15)$$

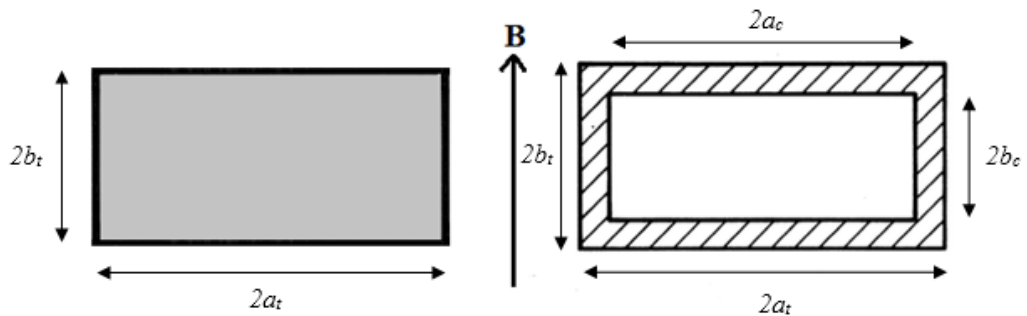
2.2.3.4. Eddy akım kayıplarının hesaplanması

Alternatif bir manyetik alan normal iletkenlerde Eddy akımları adı verilen akımlar indüklenir. Süperiletkenlerde dış kılıf olarak gümüş, bakır vb. normal iletkenler kullanılmaktadır. Sinüzoidal bir manyetik alanda Eddy akımlarının nüfuz etme derinlikleri,

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_s}{\mu_0 \omega}} \quad (2.16)$$

denklemleriyle bulunur. Eddy akım kayıplarını hesaplamak için aşağıda eşitlik verilmiştir [49].

$$Q_e = \frac{2\pi^2 f B_a^2}{S \rho} [J_{m,y}] \quad (2.17)$$



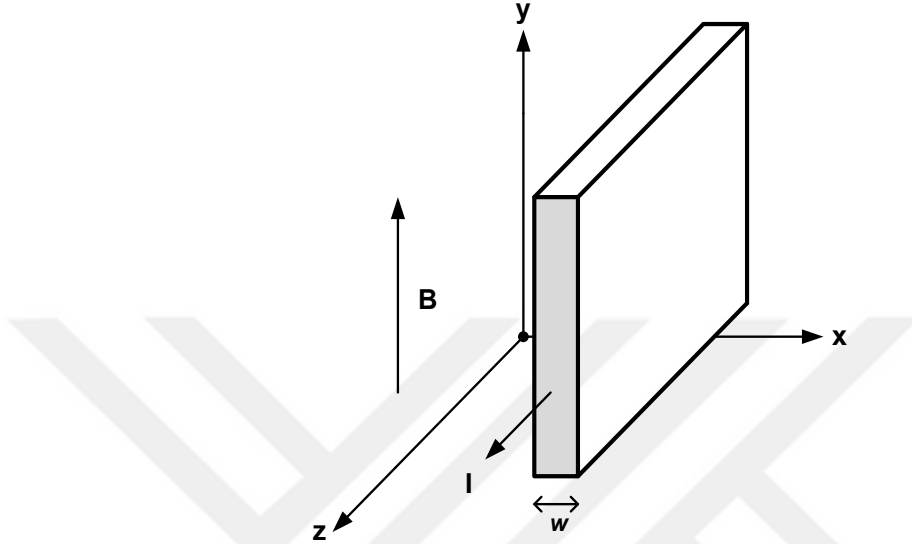
Şekil 2.20. İletkenin kesit alanı (a) içi dolu, (b) içi boş

Bu eşitliklerde içi dolu iletken için $J_{m,y} = \frac{4}{3} a_t^3 b_t$ ve içi boş iletken için

$$J_{m,y} = \frac{8a_t^3 2b_t - 8a_c^3 2b_c}{12}, \text{dir.}$$

2.2.3.5. Manyetizasyon kayıplarının hesaplanması

Şekil 2.21.'de paralel manyetik alan altında sonsuz uzunluktaki bir levha gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Manyetik alana paralel yönelmiş sonsuz uzunlukta levha.

Genişliği w olan bir levha ve bu levhanın geniş yüzeyine paralel bir manyetik alan uygulandığı kabul edilsin. Manyetik alanın, levhanın tam ortasına ($w/2$) kadar nüfuz ettiği manyetik alan değerine nüfuz etme alanı denilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$B_{p,levha} = \mu_0 j_c \frac{w}{2} \quad (2.18)$$

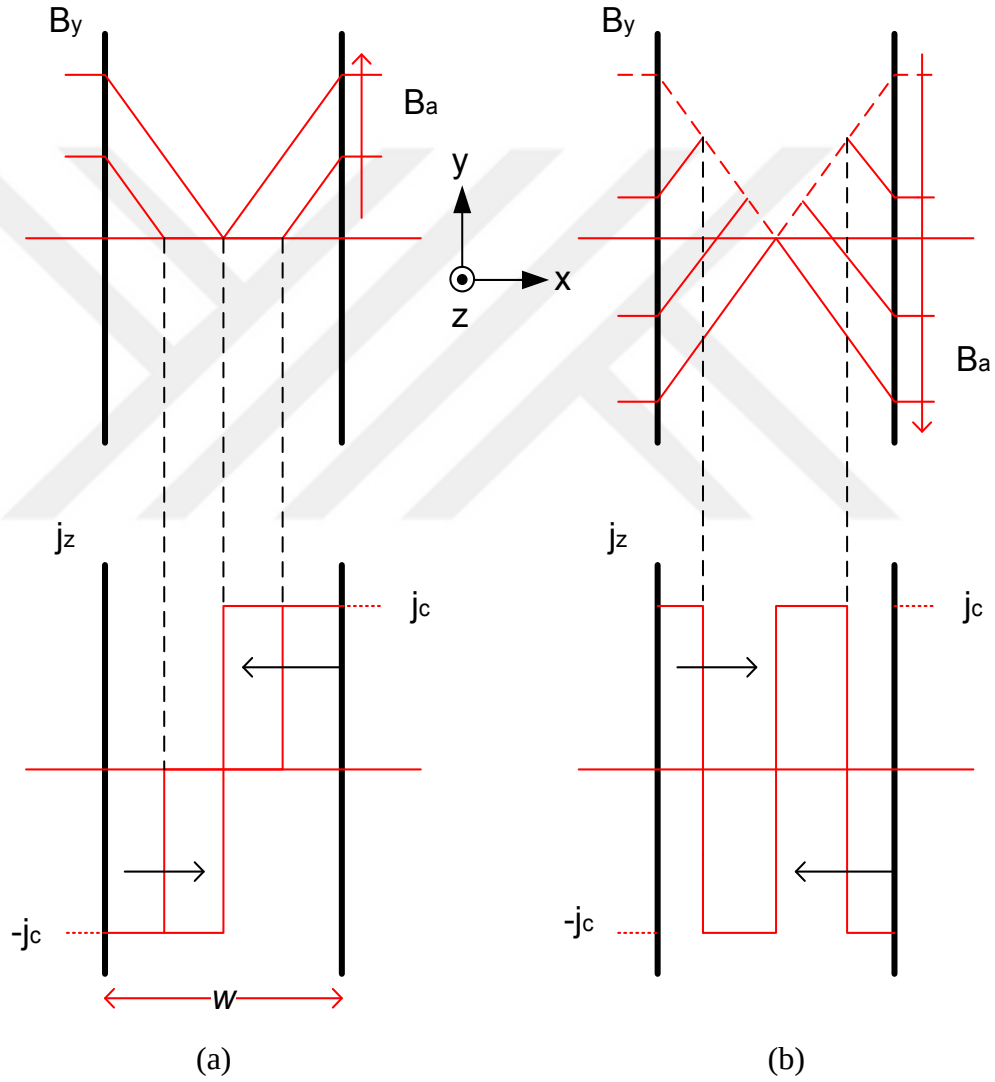
M - H grafiklerinde kullanılabilecek doyma manyetizasyonu ise aşağıda verilmiştir.

$$M_{s,levha} = \frac{B_{p,levha}}{\mu_0} = j_c \frac{w}{2} \quad (2.19)$$

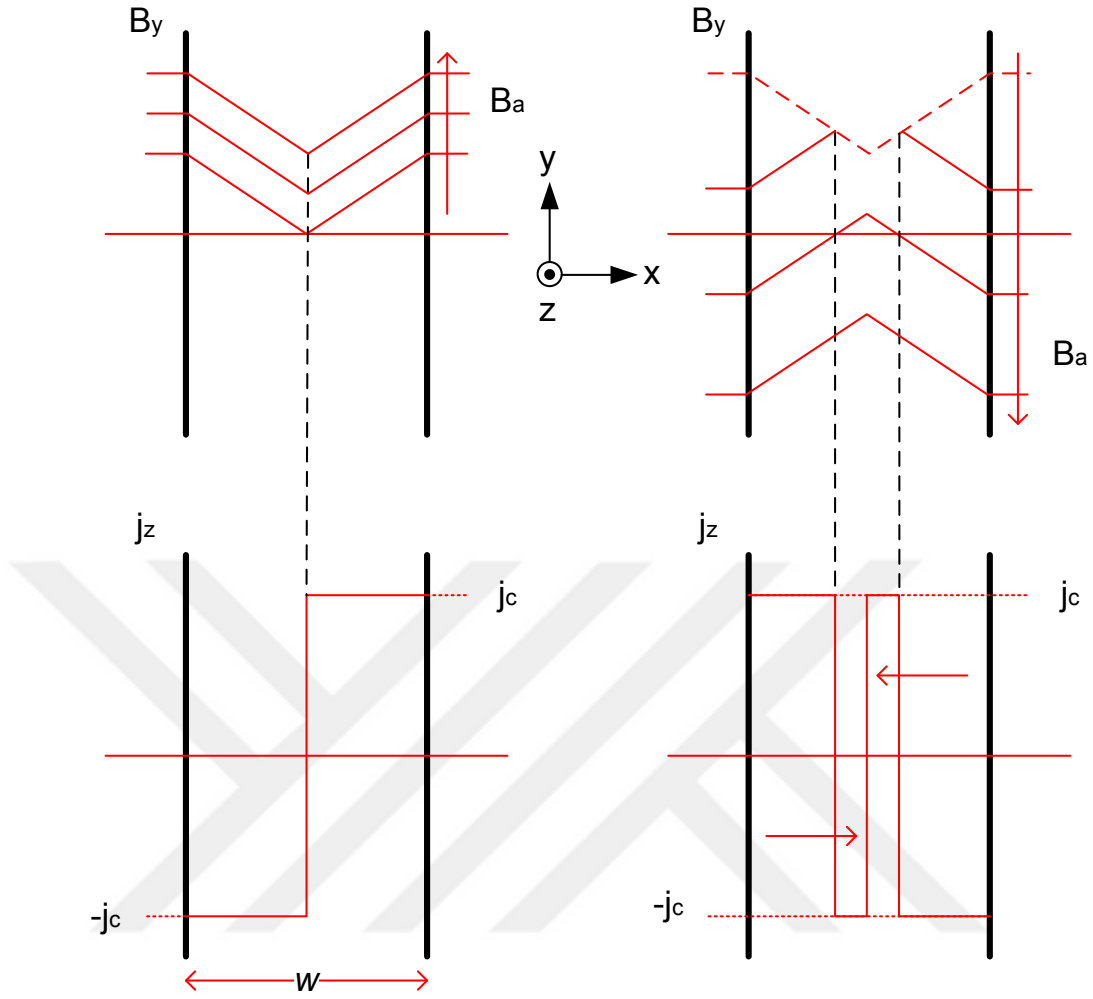
B_a genliğine sahip bir alternatif manyetik alanda bulunan sonsuz uzunluktaki bir levhanın bir döngüdeki birim hacim başına kaybı,

$$\frac{Q}{v} = \frac{1}{\mu_0} \begin{cases} \frac{2}{3} \frac{B_a^3}{B_p} \rightarrow B_a < B_p \\ 2B_p B_a - \frac{4}{3} B_p^2 \rightarrow B_a > B_p \end{cases} \quad [J / \text{döngü.m}^3] \quad (2.20)$$

ifadesinden hesaplanır. Şekil 2.22. ve 2.23.'te levhanın farklı durumlardaki akım yoğunluğu ve manyetik alan dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 2.22. y - z düzlemine paralel olarak (a) artan ve (b) azalan manyetik alan (maksimum alan B_p olacak şekilde) uygulandığında levhadaki: Manyetik alan (üst kısım) ve akım yoğunluğu (alt kısım) dağılımları



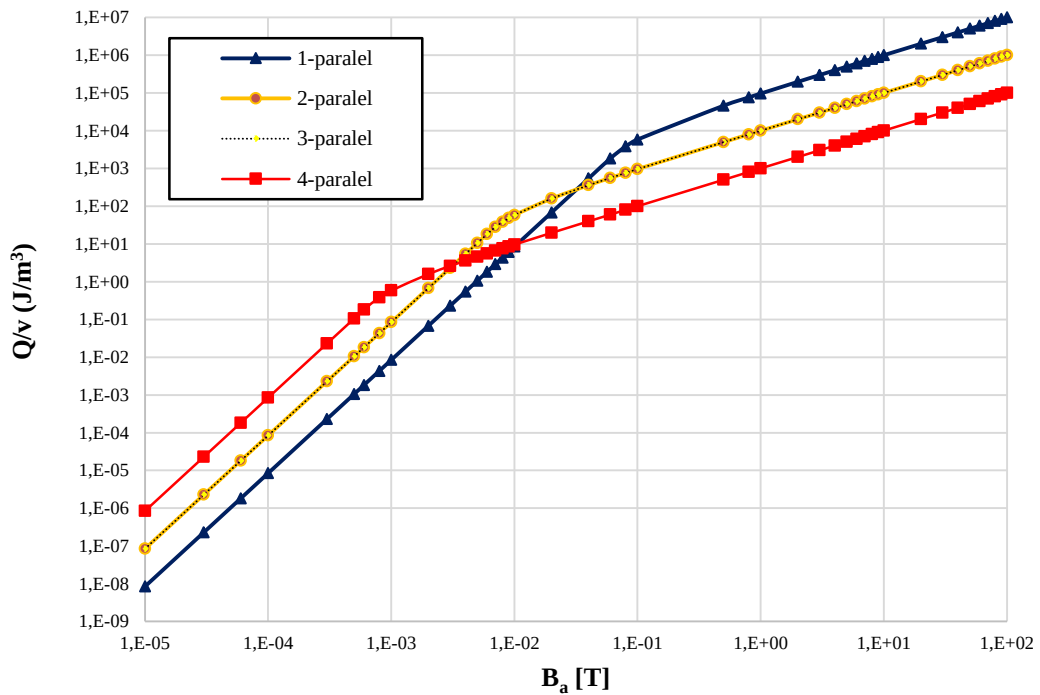
Şekil 2.23. Bir önceki şekille benzer fakat manyetik alan B_p 'den başlayarak artmakta (sol) sonra ise negatif bir değere azaltılmakta (sağ)

Kayıp eğrisinin manyetik alana bağımlılığındaki önemli bir nokta; eğri eğiminin nüfuz etme alanından sonra değişmesidir. Nüfuz etme alanına kadar $Q \propto B_a^3$ iken, $B_a \gg B_p$ gibi daha yüksek alanlarda bağımlılık azalır ($Q \propto B_a$). Kaybın manyetik alana bağımlılığının daha iyi anlaşılması için aşağıda örnek bir gösterim verilmiştir.

Tablo 2.2. Manyetizasyon kayıpları hesaplanacak örneklere ait veriler.

	Genişlik (m)	J_c (A/m^2)	Hesaplanan B_p (T)
1 numaralı örnek	0,1	10^8	6,2832
2 numaralı örnek	0,01	10^8	0,62832
3 numaralı örnek	0,1	10^7	0,62832
4 numaralı örnek	0,01	10^7	0,06283

Tablo 2.2.'de 2 farklı genişliğe ve 2 farklı kritik akım yoğunluğuna sahip 4 şerit için kullanılan değerler verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.18'de kullanılarak nüfuz etme alanları (B_p) hesaplanmıştır. Daha sonra Denklem 2.20'de gerekli değerler yerine konularak değişik manyetik alan değerlerinde hesaplandığında çıkan sonuçlar Şekil 2.24.'te gösterilmiştir. Şekil 2.24'ten de görüldüğü üzere nüfuz etme alanından önce eğimler +3 iken bu alan aşıldığı zaman eğrinin eğimi +1 olmaktadır. Kritik akım yoğunluğu ve şeridin genişliği nüfuz etme alanını etkilemektedir. Düşük manyetik alanlarda en fazla kayba sahip olan örnek 4 numaralı örnek iken, yüksek manyetik alanlarda 1 numaralı örnektir.

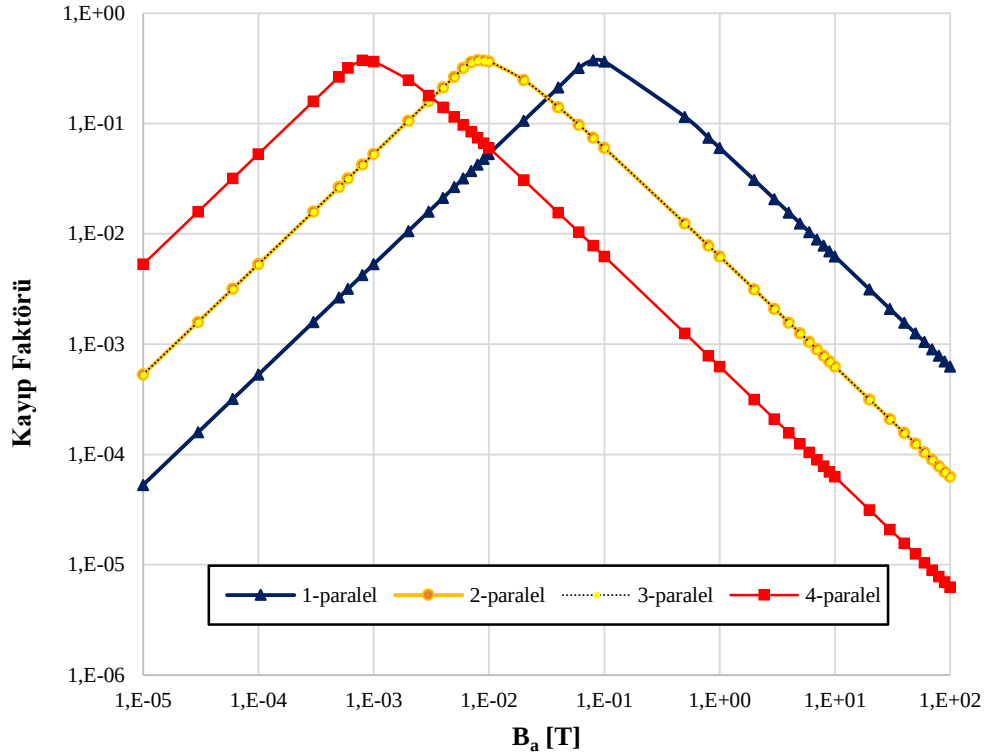


Şekil 2.24. Farklı kritik akım yoğunluğu ve genişliklere sahip levhaların kayıpları.

Kayıpların manyetik alana göre değişimlerini daha iyi görebilmek için kullanılan bir diğer terim ise, boyutsuz olan, kayıp faktörüdür (Γ). $\beta = B_a / B_p$ olmak üzere kayıp faktörü aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\Gamma = \mu_0 Q_{mag} / 2B_a^2 \quad (2.21)$$

Kayıp faktörünün kullanılmasıyla, kayıp - manyetik alan eğrisinin eğimi nüfuz etme alanına kadar +1 ve bu alandan büyük alanlarda ise -1 eğime sahip olduğu Şekil 2.25'te görülmektedir.



Şekil 2.25. Kayıp faktörünün manyetik alan değişimi (B_p 'den önce eğim +1, sonra -1)

Kayıp faktörü kullanılarak örnekler arası karşılaştırma yapmak daha kolaydır. Böylece nüfuz etme alanı değerleri arasındaki fark daha net olarak görülür.

Brandt Modeli genişlik-kalınlık oranı yaklaşık 1000 olan ince filmler için Brandt tarafından geliştirilmiştir [53]. Bu model geniş yüzeyine dik yönde manyetik alan uygulanan, yüksek genişlik-kalınlık oranına (aspect ratio) sahip şeritler için uyumludur.

Şerit kesit alanı ihmal edilebilecek kalınlıkta dikdörtgen şeklinde kabul edilir. Genişliğin yarısı a ve birim genişlik başına kritik akım olarak tanımlanan kılıf kritik akım yoğunluğu J_{C-SH} olarak tanımlanır.

$$J_{C-SH} = \frac{I_C}{2a} [A/m^{-1}] \quad (2.22)$$

Levha ve ince şerit arasındaki en büyük fark şeritte perdeleme akımlarının aynı zamanda akı-serbest (flux-free) bölgelerinden de akmasıdır. Süperiletkene H_a manyetik alanı uygulandığında ilk nüfuz edilen alan, karakteristik birim akı-serbest bölgesinin yarı genişliği olan, b 'dir.

$$b = \frac{a}{\cosh \frac{H_a}{H_{ch}}} [m] \quad (2.23)$$

Bu eşitlikte $H_{ch} = \frac{J_{C-SH}}{\pi}$ 'dir. Bu denklemler kullanılarak ince şeridin kaybı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$Q_{mag} = 4\mu a^2 J_{C-SH} H_a \left[\frac{2H_{ch}}{H_a} \ln \cosh \frac{H_a}{H_{ch}} - \tanh \frac{H_a}{H_{ch}} \right] [Jm^{-1}] \quad (2.24)$$

Elips kesit alanına sahip iletkenlerde kayıp hesaplanırken manyetik alanın yönü önemli bir parametredir. Genişlik-kalınlık oranı $a:b=100:1$ olan bir eliptik süperiletken düşünelim.



Şekil 2.26. Elips iletkenin kesit alanı ve boyutları

Manyetik alan kısa eksene paralel olduğunda “dik manyetik alan” olarak adlandırılır. Bu durum için manyetik alana göre enine boyutları ve doyma manyetizasyonu aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$\overline{x_{\perp}} = \frac{4a}{3\pi}; \quad M_s = j_s \frac{4a}{3\pi} \quad (2.25)$$

Tel 90 derece döndürüldüğünde ise “paralel manyetik alan” olarak adlandırılır. Enine boyutları ve doyma manyetizasyonu aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\overline{x_{\parallel}} = \frac{4b}{3\pi}; \quad M_s = j_s \frac{4b}{3\pi} \quad (2.26)$$

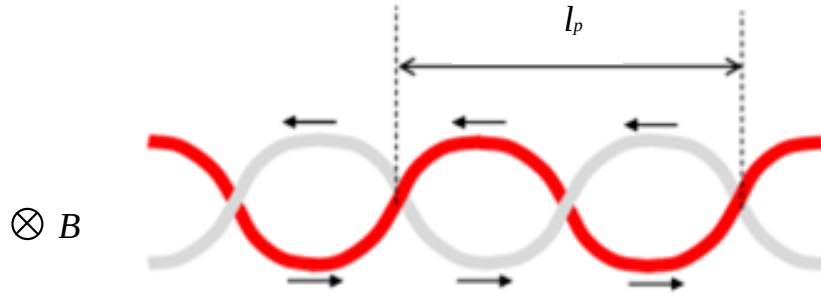
$B_a \gg B_p$ manyetik alanlarda bir döngüdeki hacim başına kayıp aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\frac{Q}{v} = 4M_s B_a \left[J / \text{döngü.m}^3 \right] \quad (2.27)$$

İki farklı şekilde uygulanan manyetik alan (paralel ve dik) durumlarında genişlik-kalınlık oranı 100/1 olan bir eliptik kesite sahip süperiletkende, doyma manyetizasyonun değerindeki farktan dolayı AA kayıplarında dik manyetik alanda paralel manyetik alana göre 100 kat daha büyük bir kayıp meydana gelir [52].

2.2.3.6. Çiftlenim kayıplarının hesaplanması

Bölüm 2.2.1.3'te çiftlenim akımları ve kayıplarının mekanizmasından bahsedilmişti. Süperiletken tel filamanlara ayrılrsa da çiftlenim akımlarının varlığı sebebiyle AA kayıplarında etkili bir azalma görülmez. Filamanlar tek bir filaman gibi davranmakta ve bu filamanları ayrıştırmak (un-couple) için bükme gibi ek bir işleme gerek duyulur. Bükme yaparak değişken manyetik alan ile filamanlarda indüklenen elektrik alanın polaritesi her yarım döngüde değişkenlik gösterir. Böylelikle bir filamanda üretilen net gerilim ihmal edilebilir seviyelere gelir.



Şekil 2.27. Bükülmüş iki filaman arasında indüklenen elektrik alan her yarım döngüde polarite değiştirir [52]

Fakat yarım döngüdeki paralel filamanlar arasındaki potansiyel fark varlığını sürdürmeye devam eder. Bu ise matrisi eksenine dik (traverse-enine) kesen bir akıma sebebiyet verir ($J_{\perp} = \frac{l_p B}{2\pi\rho_t}$). Bu oluşum çiftlenim akımlarına karşı manyetik akı difüzyonu olarak adlandırılabilir ve zaman sabiti,

$$\tau = \frac{\mu_0}{2\rho_t} \left(\frac{l_p}{2\pi} \right)^2 \quad (2.28)$$

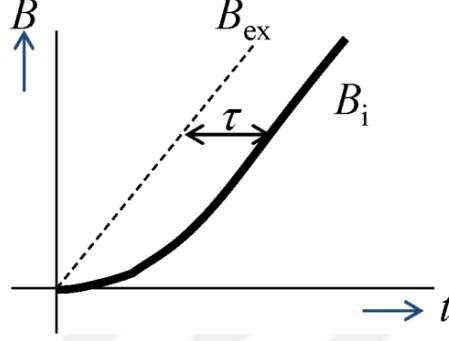
olur. Bu denklemde ρ_t matrisin efektif enine öz direncidir (effective traverse resistivity). Bu öz direnç, matrisin öz direnci ρ_m yardımıyla hesaplanır. $\lambda = \frac{S_{sc}}{S_{tel}}$ (doluluk oranı) olmak üzere matrisin öz direncinin genel denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\rho_t = \rho_m \frac{(1 + \lambda) + X(1 - \lambda)}{(1 - \lambda) + X(1 + \lambda)} \quad (2.29)$$

Bu denklemdeki X , bariyer varken kullanılan bir katsayıdır ve $X = (\rho_m r_f) / (\sigma_b d_b)$ 'dir. r_f filaman yarıçapı, σ_b kullanılan bariyerin iletkenliği ve d_b bariyerin kalınlığıdır.

Bariyer kötü veya yok ise $X = 0$ ve $\rho_t = \rho_m \frac{(1+\lambda)}{(1-\lambda)}$, bariyer mükemmel ise $X = \infty$ ve

$\rho_t = \rho_m \frac{(1-\lambda)}{(1+\lambda)}$ olarak hesaplanır.



Şekil 2.28. Uygulanan ve örnek üzerindeki manyetik alan, zaman sabiti gösterimi [52]

Malzemedeki manyetik alan uygulanan manyetik alan değerine gecikmeli olarak ulaşmaktadır. Ölçüm yapılarak bulunabilecek bu zaman farkına zaman sabiti denilmektedir. Zaman sabiti daha Şekil 2.28.'de gösterilmiştir.

Süperiletken tellerde kritik akım değerindeki telin boyu Denklem 2.30'dan hesaplanır. Eğer numunenin uzunluğu bu denklem ile hesaplanan değerden kısa ise çiftlenim akımları tüm kesit alanını doldurmamış, uzun ise doldurmuştur. Numune boyunu veren denklem aşağıdaki gibidir.

$$L_c = 4\sqrt{\rho_m a J_{c,fil} / f B_a} \quad (2.30)$$

Bu denklemde a filamanların yarı genişliği, $J_{c,fil}$ filamanın kritik akım yoğunluğu ve f frekanstır. Çiftlenim akımlarının sebep olduğu birim hacim başına AA kayıpları [54],

$$\frac{Q_c}{v} = \frac{B_a^2}{\mu_0} \frac{\chi_0 \pi w \tau}{1 + w^2 \tau^2} \left[J / döngü.m^3 \right] \quad (2.31)$$

ifadesiyle hesaplanır. χ_0 malzemenin manyetik alınganlık değeridir. a ve b ölçülerine sahip elips şeklindeki iletkenlerde $\chi_0 = 1 + a/b$ 'dir [55]. Dairesel kesitli tel ve kablolarda bu değer $\chi_0 = 2$ olarak kullanılmaktadır.

2.2.4. Alternatif akım kayıplarını etkileyen parametreler

AA kayıplarını etkileyen başlıca parametreler sıcaklık, manyetik alan, frekans, filaman çapı, bükme derecesi ve matris direncidir.

2.2.4.1. Sıcaklık (T)

Sıcaklığın artması kritik akım yoğunluğunun düşmesine sebep olur. Uygulanan manyetik alanın nüfuz etme alanından düşük olduğu durumlarda, sıcaklık kaynaklı kritik akım yoğunluğu düşüşü kayıpların azalmasına sebep olmaktadır.

Sıcaklığın artması aynı zamanda süperiletken malzemenin manyetizasyonunu azaltır. Bunun sonucu olarak $M-H$ eğrisi içerisindeki alan küçüleceğinden döngü başına histerezis AA kaybı azalır. Kayıpların azalmasına rağmen kritik akım yoğunluğundaki azalma istenmeyen bir durumdur.

Kritik akım yoğunluğundaki azalma güç iletim kablolarında iletilebilecek maksimum gücü veya bobinlerde üretilebilecek maksimum manyetik alanı düşürecektir.

Sıcaklık yeterince yüksek ve frekans yeterince düşük ise süperiletken malzeme içerisinde akı sürüklenmesi oluşur. Yani çivilenen akı çizgileri (fluxonların) termal olarak aktif hale gelir. Bu olay efektif özdirenci büyütür ve çiftlenim kayıplarını artırır. Akı sürüklenmesinin olduğu filamanlarda akım için ek omik yollar ortaya çıkar.

2.2.4.2. Manyetik alan (B)

Bean KDM'de süperiletkenleri modellerken tek kritik akım yoğunluğu olduğunu, fakat gerçekte akım yoğunluğunun manyetik alana bağımlı olduğu daha önce ifade edilmişti (Kim-Anderson Modeli).

Kritik akımın manyetik alan bağımlılığı sonucunda $B_a < B_p$ durumunda azalan kritik akım yoğunluğu manyetizasyon kayıplarını arttırırken, $B_a > B_p$ durumunda ise azalan kritik akım yoğunluğu manyetizasyon kayıplarını azaltır. Ayrıca manyetik alanın çiftlenim kayıplara etkisi alanın karesiyle doğru orantılıdır.

2.2.4.3. Frekans (f)

Histerezis kayıpları bir döngü boyunca frekanstan bağımsız kabul edilir. Fakat çiftlenim kayıplarında, bütün filamanlar çiftlenmeden ve doyma oluşmadan önce alçak frekanslarda, kayıplar frekansla lineer olarak değişir. Alçak frekanslarda, bir döngü başına toplam manyetizasyon AA kayıpları histerezis ve Eddy çiftlenim kayıplarının toplamıdır.

$$Q = Q_h + Q_e \cdot f \quad (2.32)$$

2.2.4.4. Filaman sayısı ve çapı (r)

Histerezis ve çiftlenim kayıpları, filaman çapı ve sayısına bağlıdır. Uygulanan manyetik alan nüfuz etme değerinden büyük olduğu durumlarda birim hacim başına histerezis kaybı filaman çapıyla orantılıdır. Her kablo modelinde, öncelikli önem arz eden durumlara göre, uygun filaman sayısı ve çapı hesaplanmalıdır.

2.2.4.5. Bükme derecesi - uzunluğu (l_p)

Denklem 2.27. ve 2.30.'dan görüldüğü üzere çiftlenim kayıpları l_p 'nin karesiyle orantılıdır. Eğer malzeme hiç bükülmemişse ve uzunluğu L ise, bükme derecesi

$2.L$ 'dir. Denklem 2.29.'da verilen numune boyunun altındaki bükme uzunluklarında çiftlenim kayıpları oluşmaz. Çiftlenim kayıplarını azaltmak için l_p olabildiğince küçültülmek istense bile mekanik üretim şartları bunu sınırlar. Enine manyetik alanlarda l_p azaldıkça çiftlenim kayıpları azalırken, boyuna uygulanan manyetik alanlarda doğrusal bir ilişki söz konusu değildir. Malzeme için ideal bükme derecesi hesaplanmalıdır.

2.2.4.6. Matris öz direnci

Süperiletkenlerin l_p değerini azaltmak için bir sınır olduğundan çiftlenim kayıplarını azaltmak için enine öz direnci ($\rho_{\perp}$) arttırmak gerekir. Matris direnci histerezis kayıplarını etkilemediğinden $\rho_{\perp}$ 'yi azaltmak için iki yöntem mevcuttur. Biri matrisi Ni gibi malzemelerle alaşım yapmak diğeri ise matris içerisinde omik bariyerler oluşturmaktır.

2.2.5. Alternatif akım kayıplarını azaltmak için yapılabilecek işlemler

Yüksek manyetik alanlarda nüfuz etme alanının $B_p \approx j_c w$ (w uygulanan manyetik alana dik uzunluk) olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Buradaki AA kaybını azaltmak için ya akım yoğunluğu ya da süperiletkenin genişliği azaltılmalıdır. Akım yoğunluğunu azaltmak, aynı akımı taşımak için daha fazla süperiletken malzeme kullanımı anlamına geleceğinden burada makul olan çözüm genişliğin azaltılmasıdır. Şerit ve kablolarda genişliğin azaltılmasından çok, var olan şerit filamanlara bölünür. Süperiletkenin uç kısımlarında (akım terminallerinde) bu filamanlar tekrar birleşeceğinden çiftlenim akımları meydana gelir. Çiftlenim akımlarından kaynaklanan kayıpları azaltmak için ise filamanlar transpoze (bükme-dönme) edilir. Çiftlenim kayıplarını azaltmanın başka bir yolu ise filamanlar arası malzemenin (matris malzemesi) daha yüksek öz dirence sahip malzemelerden seçilmesidir. Histerezis manyetizasyon kayıplarını azaltmak için yapılabilecekler tablo şeklinde aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı manyetik alanlarda kayıpları azaltmak için yapılabilecek işlemler.

Filaman Çiftlenimi	Paralel Manyetik Alanda	Dik Manyetik Alanda	Öz Alanda
Tamamen Çiftlenim	- Filamanlı yapı, - Bükülmüş çoklu filaman, - kısa bükme derecesi	- Dar filamanlar.	- Dar-ince filamanlar, - Filaman transpozu.
Kısmi Çiftlenim	- Yüksek genişlik-kalınlık oranı - Yüksek öz dirençli matris elemanı, - Filamanlar arası yalıtım bariyerleri.		- Düşük genişlik - kalınlık oranı.
Çiftlenmemiş	- Yüksek efektif öz direnç, - Düşük genişlik-kalınlık oranı, - İnce filamanlar.	- Yüksek efektif öz direnç, - Dar filamanlar.	- Dar-ince filamanlar.

2.3. Alternatif Akım Kayıplarının Ölçüm Yöntemleri ve Karşılaştırılması

Süperiletkenlerin AA kayıplarını ölçmek için genellikle kullanılan üç yöntem mevcuttur. Bunlar manyetik yöntemler, elektriksel yöntemler ve termal yöntemlerdir.

2.3.1. Manyetik yöntemler

Manyetik yöntemlerin en çok kullanılanları histerezis eğrisi yöntemi ve AA alınganlık yöntemidir. Histerezis eğrisi yönteminde T_c sıcaklığı altında, maksimum değeri B_m olan bir manyetik alan uygulanarak $M-B$ eğrisi elde edilir. $M-B$ eğrisini kullanarak AA kaybını hesaplamak için kullanılan denklem aşağıda verilmiştir.

$$Q_H = \int M dB \quad (2.33)$$

Bu yöntemde sıcaklık, manyetik alanın genliği, yönü ve dalga şekli kolaylıkla değiştirilerek histerezis kayıpları hesaplanabilir.

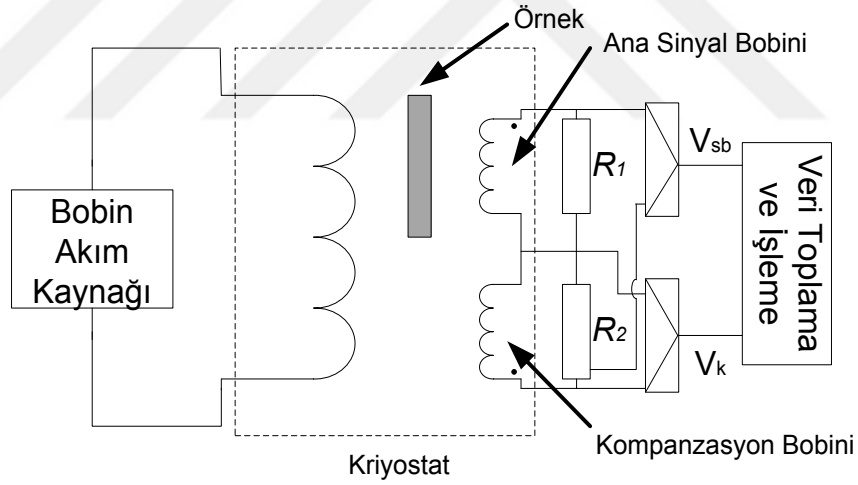
AA alınganlık yönteminde ise manyetik alınganlığın sanal bileşeni ölçüldükten sonra histerezis kayıpları aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$V_{kayıp} I_{mag} = \frac{B_a^2 \pi f L S}{\mu_0} \chi'' \quad (2.34)$$

Bu denklemde L numune uzunluğu, S numunenin kesit alanı ve f uygulanan sinyalin (akım/gerilim) frekansdır.

2.3.2. Elektriksel yöntemler

Elektriksel yöntemler ile kayıpları ölçmek için ise sinyal bobinleri yöntemi ve kilitlemeli yükseltici (Lock-in Amplifier) yöntemi en genel ve en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Sinyal bobinleri yöntemiyle süperiletken örneklerin veya bobinlerin değişken bir manyetik alan altındaki histerezis kayıpları ölçülür. Bu yöntemde Şekil 2.29.'da gösterildiği gibi bir güç kaynağı, kriyostat, bobin (mıknatıs), sinyal bobini ve kompanzasyon bobini kullanılır.



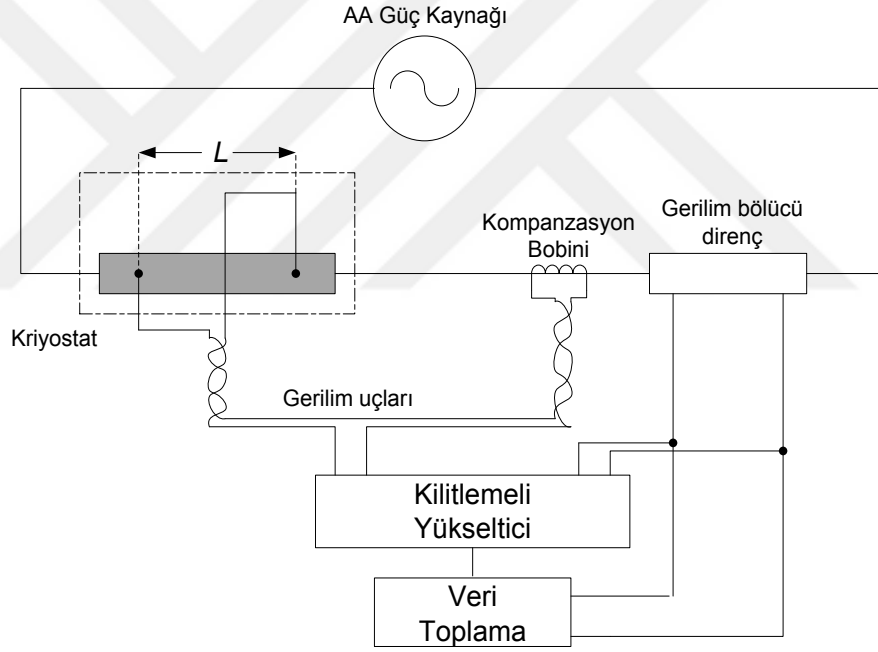
Şekil 2.29. AA manyetik alan altındaki histerezis kayıplarını ölçen sinyal bobinleri sistemi

Kompanzasyon bobini AA manyetik alanın genliğini ve sinyal bobininde indüklenen gerilimi kompanse etmek için kullanılır. Örnek uzunluğu h_o , sinyal ve kompanzasyon bobinlerinin yükseklikleri sırasıyla h_{sb} ve h_k olmak üzere; $h_o \geq 3h_{sb} = 3h_k$ olmalıdır. Bu iki bobinde ölçülen gerilimler yardımıyla $V_{rms} = (V_{sb} - V_k)_{rms}$ hesaplanan gerilim kullanılarak aşağıdaki denklem ile değişken manyetik alan altında birim uzunluk başına AA kaybı bulunur.

$$P_h = \frac{hV_{rms}B_{rms}}{\mu_0NL} \quad (2.35)$$

Bu denklemde yer alan $h = h_{sb}$, N sinyal bobinin sarım sayısı (dönme sayısı) ve L örneğin uzunluğudur.

Kilitlemeli yükseltici yönteminde ise süperiletkenlerin öz-alan kayıpları ölçülür. Bu yöntem ile yapılan ölçümlerde bir güç kaynağı, kriyostat, gerilim bölücü bir direnç, kilitlemeli yükseltici, kompanzasyon bobini ve veri toplama sistemi vardır. Ölçüm yöntemi Şekil 2.30.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Öz-alan kayıplarını ölçmek için kullanılan sistem

Gerilim bölücü direnç, süperiletken üzerinden akan akımın etkin değerini ölçmek ve kilitlemeli yükselticiye referans olacak omik gerilim sinyalini sağlamak için kullanılır. Kaybı ölçülecek örnekte indüklenen gerilimi yok etmek amacıyla örneğin gerilim uçlarıyla kompanzasyon bobinin uçları anti-seri şekilde bağlanır. Kilitlemeli yükseltici kullanımıyla ölçülen gerilimin (omik referans gerilimiyle aynı fazdaki) etkin değeriyle

(RMS) hesaplanan birim uzunluk başına öz-alan kaybı (W/m) Denklem 2.36'dan hesaplanır.

$$P = \frac{V_{etkin} I_{etkin}}{L} \quad (2.36)$$

2.3.3. Termal yöntemler

Termal yöntemler olarak ise termometrik ve kaynatma yöntemleri mevcuttur. Termometrik yöntem de AA kaybı ölçülecek örnek soğutma banyosundan izole edilir. Örnek sadece uçlarından sıcaklığı sabitlenmiş terminallere bağlanır. Değişken akım veya manyetik alan uygulandığında örneğin sıcaklığı artar. Uçları sabit bir sıcaklığa ayarlandığından örnek boyunca sıcaklık sabit olmaz. Maksimum sıcaklık örneğin ortasında meydana gelmektedir ve bu noktadaki sıcaklık kayıp ile orantılıdır. Örneğin orta kısmına yerleştirilen termometre ile referans sıcaklık arasındaki fark yardımıyla kayıp hesaplanmaktadır.

$$\Delta T_{orta} = \frac{L^2}{8wd\sigma_m(1-\eta_{si})} P \quad (2.37)$$

Bu denklemde w ve d kesit alanının ölçüleri, σ_m matrisin termal iletkenliği ve η_{si} kesit alanında süperiletkenin oranıdır.

Kaynatma (diğer adı kalorimetrik) yönteminin çalışma prensibi ise test altındaki sistemde üretilen sıcaklığın (oluşan kaybın) belirli bir miktarda kriyojenik sıvı buharlaştırmasına dayanır. Bu buharlaşan gazın miktarı gaz-akış metresi yardımıyla ölçülür. Bu sistemin kalibrasyonu kolaydır. Ölçüm yapılacak sisteme bir ısıtıcı (direnç) yerleştirilir ve direnci bilinen değerde bir enerji verilerek buharlaşan sıvı ölçülür. Bir önceki ölçümde meydana gelen gaz akışı sağlandığında, ısıtıcının güç değeri kayıp değerini ifade eder.

Elektriksel yöntemler karmaşık olmayan, boyu kısa örnekler için uygundur. Termal yöntemlerin geniş uygulama alanları, kolay kalibrasyonu ve karmaşık devrelere

ihtiyaç duymamaları avantaj sağlar. Fakat termal yöntemlerde hassasiyet önemli bir sorundur. Küçük örneklerde yeterli hassasiyete sahip ölçümler yapılamaz.

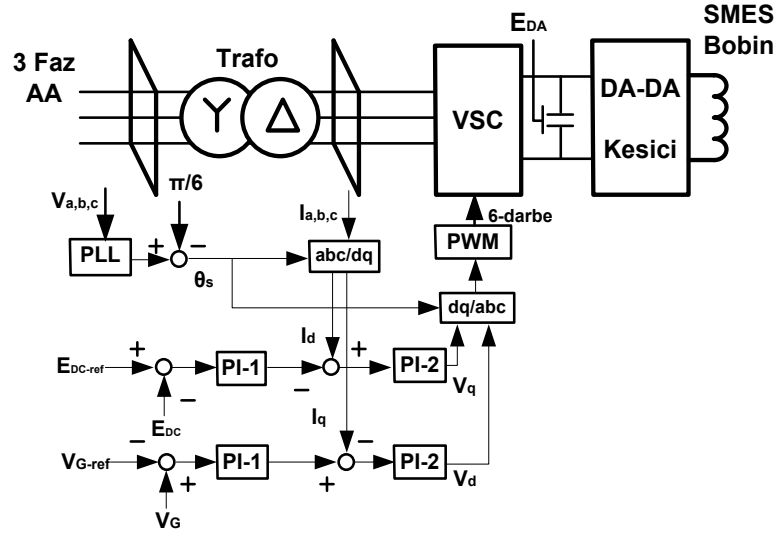
2.4. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin Güç Sistemlerinde Uygulamaları

YSS'ler elektrik güç sistemlerinde SMES, SFCL, motor, jeneratör, transformatör, güç kabloları ve ulaşım gibi uygulamalarıyla yer alırlar. Bunlar dışında medikal, teknoloji ve elektronikte de uygulamaları bulunmaktadır.

2.4.1. SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)

Enterkonnekte şebekede enerji kalitesini, gerilimdeki dalgalanmalar, harmonikler, gerilim (voltaj) düşmesi ve kısa süreli kesintiler gibi sorunlar bozar. SMES'ler bu sorunların çözümü için kullanılan bir uygulamadır.

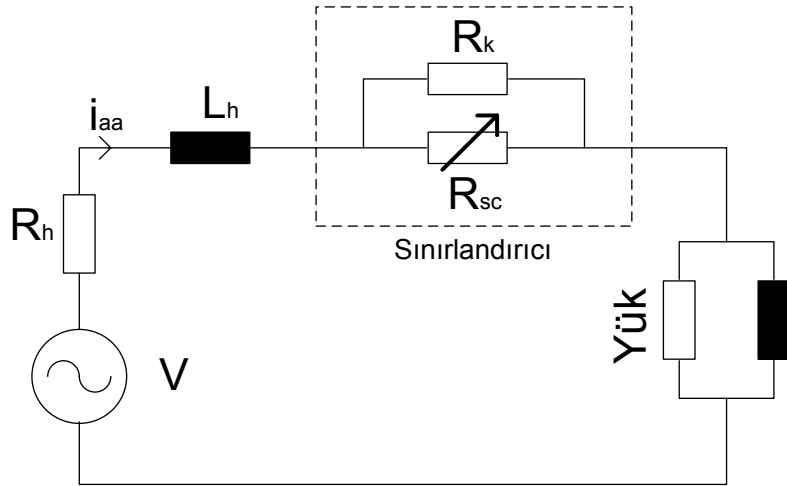
SMES'ler enerjiyi Doğru Akım (DA) kullanarak depolayan bir sistemdir. SMES sistemde ihtiyaç fazlası enerjiyi yeterli olmadığında sisteme geri verir. Sistemde özellikle arıza akımı oluşacak durumlarda reaktif güç ihtiyacını karşılamakta yardımcı elemanlardır. Şekil 2.31.'de örnek bir SMES bobin ve güç sisteminde kontrolü gösterilmektedir. Güç sistemlerine AA-DA dönüştürücüler aracılığıyla bağlanırlar. Sisteme hızlı bir şekilde müdahale ederek sistem kararlılığına yardımcı olurlar. Bir çeşit FACTS (Flexible AC Transmission Systems) cihazıdır ve sisteme paralel bağlanırlar. SMES'lerde önemli parametreler kullanılacak süperiletken bobinin depolayabildiği maksimum enerji, indüktans değeri ve dolma-boşalma süreleridir. Diğer önemli bir konu ise bu sistemlerin kontrolü ve tepki süreleridir.



Şekil 2.31. SMES sistemi ve kontrolü [4]

2.4.2. SFCL (Superconducting Fault Current Limiter)

Sistemde oluşabilecek kısa devre akımlarını bir döngüden kısa bir sürede algılayıp bu hata akımını (arıza akımını) kabul edilebilir bir değerde tutabilen veya belirli süreler için tamamen sıfıra düşürebilen süperiletken cihazlardır. Örnek bir SFCL Şekil 2.32.'de gösterilmiştir. Normal kesicilere göre daha kısa sürede arıza akımını kestiklerinden açılı kararlılığına olumlu etkileri vardır. SFCL'lerde, süperiletkenlerin lineer olmayan olan akım-gerilim özellikleri kullanılır. Kritik akım değeri aşıldığında süperiletkenler sıfır direnç özelliklerini kaybeder ve akıma karşı bir direnç gösterirler bu da sistemin empedansını arttırdığından akım alternatif olarak süperiletkene paralel bağlanmış koruma amaçlı dirençten geçer. Bu direncin değeri ilk durumdaki süperiletkenin daha yüksek olduğundan sistemin empedansı artar. Gerilimin sabit olduğu düşünülürse, empedansın artması akımı sınırlandırır. İnsan müdahalesi gerektirmeden otomatik olarak çalışan kompakt sistemlerdir. Fiyatları uygun, hafif ve yüksek güvenilirliklidirler. Omik (rezistif) ve indüktif SFCL'ler mevcuttur. Sadece süperiletkenin bulunduğu kısmı soğutmak yeterli olduğundan güç sistemlerinde arasında uygulanabilirliği en kolay olan elemandır.



Şekil 2.32. SFCL eşdeğer devresi

SFCL'nin içerisinde süperiletkene paralel bağlanan koruma direnci SFCL'nin zarar görmemesi açısından önemlidir. Sistemde aşırı akım oluştuğunda SFCL normal duruma geçiş yaparak direnç sahibi olacak ve paralel olarak bağlanan koruma direnci FCL'nin direnciyle kıyaslanabilir olduğundan akımın bir kısmı koruma direnci üzerinden akacaktır. Böylelikle SFCL zarar görebileceği akımlardan korunmuş olmaktadır.

2.4.3. Süperiletken motor ve jeneratörler

Süperiletken malzemelerden üretilen motor ve jeneratörler daha hafif, küçük ve yüksek verimlerde çalışmaktadırlar. Boyutun küçülmesi sürtünmeyi ve armatürde oluşan kayıpları azaltır. Tablo 2.4.'te aynı güç değerleri için üretilen normal ve süperiletkenlerden yapılmış ekipmanlarda boyutlardaki değişim oranları gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Süperiletken uygulamaların geleneksel uygulamalara göre boyut ve ağırlığındaki azalma oranları.

Uygulama Alanı	Boyut ve ağırlıktaki azalma
Jeneratörler	%30-50
Transformatörler	%30-50
Kablolar	>%50

Aynı boyutlarda üretilen süperiletken jeneratörlerde normal geleneksel eşdeğerlerine kıyasla yaklaşık iki katı güç üretilmektedir. Reaktansları oldukça düşüktür. Ayrıca

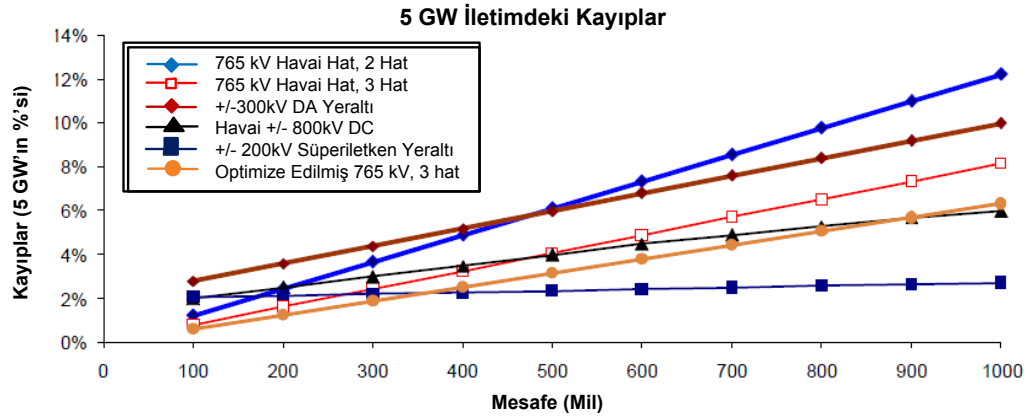
jeneratörlerde, düşük kayıplardan dolayı iletim gerilim seviyesinde elektrik üretilerek üretimdeki transformatör ihtiyacından kurtulmuş olunur.

2.4.4. Süperiletken transformatörler

Normal transformatörlere göre ömürleri daha uzun, aşırı yüklenmeye dayanıklı, daha küçük boyut ve ağırlıklara sahiptirler. Normal trafolarla soğutma yağı ile, süperiletken trafolarla ise azotla yapıldığı için çevre dostu olarak kabul edilirler. Dünyada uygulaması birçok yerde mevcuttur ve hala çalışmaktadır. Ortalama kayıpları normal transformatörlere oranla %50 azdır [56].

2.4.5. Süperiletken güç iletim kabloları

DA'da sıfır direnç göstermelerinden, AA'da da çok küçük empedanslarından dolayı minimum seviyede enerji kaybına sebep olurlar. Düşük gerilim düşümleri nedeniyle, yüksek akımda enerji iletimi gerçekleştirebilirler. Aynı akımı iletmek için daha küçük kesitte kullanılabilir veya normal iletkenle aynı kesitte daha fazla güç iletebilirler. YSS güç kabloları normal kabloların 2 ila 10 katında akım taşıyabilirler. Kablonun izlediği yol genellikle yeraltındadır. Sıcaklığın kontrolü yeraltında daha kolaydır. Geleneksel yer altı kabloları birbirlerine çok yakın konulamamaktadır, fakat süperiletkenlerde böyle bir sorun yoktur. Ayrıca kabloların yeraltında oluşu estetikliği sağlar. Nüfus yoğunluğunun çok olduğu bölgeler için idealdir. Süperiletken güç kabloları ve normal geleneksel güç kablolarının kullanılması sonucunda oluşan kayıpları ekonomik olarak karşılaştıran çalışmalar mevcuttur [57]. Şekil 2.33.'te DA'da 5 GW enerjiyi 1600 km (1000 mil) taşınması durumunda kullanılan iletim hattıyla kayıplar karşılaştırılmıştır. Konverter kayıpları %2, soğutma kayıpları 22 kW/km'dir. Görüldüğü üzere enerjinin taşınacağı mesafe arttıkça süperiletken güç kabloları daha kullanışlı hale gelmektedir. 5 GW'da kayıpları %2,75 iken taşınacak güç 10 GW'a yükseldiğinde kayıplar %2,4 olmaktadır [58].



Şekil 2.33. 5 GW'lık enerjinin taşınacağı mesafe-kayıp ilişkisi [58]

Bu uygulamaların dışında ulaşım sektöründe MAGLEV trenleri mevcuttur. MAGLEV kelimesi “Magnetic Levitation” kelimelerinin kısaltmasıdır. MAGLEV trenlerin altında güçlü süperiletken mıknatıslar bulunur. Bu mıknatıslar sayesinde tren havada askıda kalmakta böylece ses ve sürtünme en aza inmektedir. Aynı zamanda MAGLEV trenleri çevre dostu olarak kabul edilir.

Süperiletken mıknatıs ve bobinlerin kullanıldığı NMR ve MRI gibi medikal uygulamalar da vardır. Ayrıca Biyomedikal Mühendisliğinde, kanser tedavisinde ve nano parçacıklarda da süperiletken malzemelerden yararlanılır. Bilimsel araştırmalarda ise yüksek enerji fiziği, RF (Radyo Frekans) mıknatısları, hassas manyetik ölçümleri (SQUID) vb. birçok alanda kullanılır.

Bütün uygulamalarda kayıpların azalması enerji verimliliğini arttırmaktadır. Süperiletken malzemelerin kullanımıyla uygulamalarda kayıplarda meydana gelen azalma Tablo 2.5.'te gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Uygulamalarda süperiletken kullanımı ile kayıptaki azalma oranları.

Uygulama Alanı	Kayıptaki Azalma
Jeneratör (birkaç MVA)	%30-40
Jeneratör (yüzlerce MVA)	%40-50
Transformatörler	%50
Manyetik ısıtma	%50
HTS yüksek alan bobinleri	%90

Ayrıca SFCL ve SMES gibi süperiletken cihazlar geleneksel sistemlerde bulunmayan yeni teknolojiler olarak ortaya çıkmaktadır. Süperiletkenlerin düşük empedansı, SFCL

ile daha yüksek kısa devre kapasitesi ve SMES'ler ile hataları daha hızlı kompanze etme özellikleriyle güç sistemleri daha yüksek güç kapasitesine sahip olacaktır. Ayrıca soğutmanın da sıvı azot kullanılarak yapılması bu cihazların çevre dostu uygulamalar olmasını sağlamaktadır.

Süperiletkenlik ilk bulunduğu bazı zorluklar sebebiyetiyle güç sistemlerinde kendilerine bir yer bulamamışlardır. Bu sebeplerden biri küçük değerlerde kritik manyetik alan ve akım yoğunluğunun süperiletkenliği bozmasından kaynaklanan süperiletkenlerin temel karakteristiklerindeki yetersizliktir. İkincisi sistemi soğuk tutmak için gerekli sistemin karmaşıklığı ve bu sıcaklığı korumak için harcanan enerjinin maliyetidir. Üçüncüsü ise var olan normal iletkenlerin kullanımı ve sürekli gelişmesidir. Fakat bu zorluklara rağmen bazı süperiletken cihazların, geleneksel cihaz ve sistemlerinde var olmayan özellikler sağlamasıyla (SFCL ve SMES gibi) süperiletkenler yavaş yavaş güç sistemlerinde yerlerini bulmaya başlamıştır.

Süperiletkenlerin gerçek enterkonnekte sistemlerde birçok uygulaması mevcuttur. Süperiletkenlerin gerçek güç şebekelerinde kullanılmasına ilişkin bazı uygulamalar aşağıda verilmiştir.

- Southwire Şirketi tarafından Amerika Carrollton'da aktif bir yüke güç ileten ilk YSS kablo üretildi. Üç faz soğuk dielektrik (CD) kablo ve performansını ölçecek test sistemi kuruldu. Ocak 2000'de tam yükte 40 000 saat çalışabileceğini ve 12,47 kV'ta 1,25 kA taşıyabileceğini göstermiştir. Kablo uzunluğu 30 metreydi.

- Sumitomo Şirketi tarafından Amerika Albany'de: Kablo sistemi Albany'deki iki trafo merkezini birbirine bağlamıştır ve 34,5 kV'ta 800 A'i 350 metre taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. 2006 yılından itibaren 7000 saat arızasız ve hatasız çalışmıştır. Zamanının en uzun YSS kablosu olmuştur.

- Nexans şirketi tarafından Amerika Long Island'ta: Kablo sistemi 2008'de 2400 A'i 138 kV gerilim seviyesinde 620 metre taşımak üzere uygulamaya konulmuştur. Tam yükte çalışma durumunda kablo 574 MW gücü iletebilmektedir. Bu rakam 300 000

eve güç vermeye yetecek değerdedir. Bu projede kendi zamanının en uzun YSS kablosu olmuştur.

- Japonya Ekonomi Ticaret ve Sanayi Bakanlığı ile ortaklaşa NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Org.) Yokohoma'da: proje 2007 yılında başlamıştır ve şebekeye uygulanmadan önce kablonun performansını araştırmak 5 yıl sürmüştür. Bu projenin ana amacı YSS kablo sistemlerinin (66 kV/200 MVA) gerçek şebeke içerisindeki güvenilirliklerini ve kararlılıklarını göstermektir.

- Nexans Şirketi «Ampacity» adlı projeleri için Almanya'da: 2013 yılında «Ampacity» isimli projede kullanılmak üzere; Essen Almanya'da iki trafo merkezini, 40 MVA gücü taşıyabilen, bir eklem noktası bulunan 1km uzunluğa sahip 10 kV'luk YSS kablo projesidir. Bu kablonun saha testleri en az 2 yıl sürecektir. Bu proje 10 kV'luk bir şebekenin 110 kV'luk bir şebekenin yerini alma olasılığını doğuracaktır. Bu uygulamalar dışında gerçekleştirilen bazı projeler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.6. Dünya'da yapılan ve yapımı devam eden süperiletken uygulamalar.

Ülke	Gerilim (kV)	Akım (A)	Uzunluk (m)	Yıl
Amerika	13,2	3000	200	2006-2009
Amerika	13,8	4000	300	2008-2010
Amerika	13,8	2000	1760	2010-2011
Amerika	24	2400	120	2001-2010
Amerika	DA±200	12500	2000	2015
Hollanda	50	3000	6000	2012
İspanya	10	1000	30	2009
Danimarka	36	2000	30	2001-2003
Rusya	20	1500	200	2009-2010
Kore	22,9	1250	100	2006
Kore	154	3750	100	2001-2011
Çin	10,5	1500	75	2003-2005
Çin	DA 1,3	10000	360	2011-2012
Çin	110	3000	1000	2012
Japonya	66	1000	100	2001-2002
Japonya	77	1000	500	2004-2005
Japonya	DA ±10	2000	200	2010
Japonya	275	3000	30	2008-2012

BÖLÜM 3. YÜKSEK SICAKLIK SÜPERİLETKEN KABLOLAR

Yüksek akım ve yüksek manyetik alan uygulamaları için yapılan araştırmalar çoğunlukla *REBCO* ile üretilen şeritler ve PIT (Powder In Tube) ile üretilen BiSCCO iletkenler üzerinedir. *REBCO* ile üretilen yüksek sıcaklık süperiletkenlerde endüstriyel üretime geçilmiş ve özellikleri de sürekli olarak gelişme göstermektedir. *REBCO* materyali ticari bir ürün olarak birçok firma tarafından uzun metrelerce temin edilebilmektedir [59-61]. Ticari olarak rahat elde edilebilmeleri birçok uygulamada yer almalarına sebep olmuştur. *REBCO* şeritlerin kullanıldığı motor, jeneratör, transformatör, iletim hatları ve FCL gibi süperiletken güç sistemi uygulamalarının çoğu AA rejimde çalışmaktadır. Üretimleri ticarileşmiş olmasına rağmen yüksek akım (kA seviyelerinde) iletken üretimindeki az sayıdaki mevcut kablo konseptleri halen gelişme aşamasında olup yeni kablo konseptleri de aranmaktadır. Her bir kablo konseptinde farklı zorluklarla karşılaşmaktadır. Ana zorluk şeritlerin ince yapılarından kaynaklanan bükme/bükülebilme limitleridir. Yüksek manyetik alan bobin uygulamaları ve yüksek akım taşıma kapasitesine sahip kablolarda YSS malzemelerin kullanımı bazı avantajlar sağlamaktadır.

Düşük Sıcaklık Süperiletkenler (DSS) ile karşılaştırıldıklarında YSS daha yüksek kritik manyetik alan ve kritik akıma sahiptirler. 10-20 T aralığındaki yüksek alan uygulamalarında kullanılabilmeleri, termal iletkenliklerinin iyi olması ve yüksek akım yoğunluğuna sahip olmaları uygulamalarda kullanılmalarına imkân sağlar. YSS aynı zamanda daha düşük sıcaklıklarda da kullanılabilirler (5-20 K). Düşük sıcaklıklarda Al ve Cu gibi stabilize malzemelerinin termal iletkenlikleri 10 kata kadar artar. DSS ile karşılaştırıldıklarında soğutma işleminin sebep olacağı güç tüketimi azalmaktadır. YSS'lerin diğer önemli bir özelliği ise geniş çalışabilme sıcaklıklarından dolayı daha kararlı olmalarıdır.

YSS ekipmanların kullanıldıkları yerde verimli olabilmeleri için düşük AA kayıplarına ve yüksek akım kapasitelerine sahip olmaları gerekir. Uygulamalarda kullanılan çalışma akımı, tek bir süperiletken filamanın taşıyabildiği akımdan daha yüksektir. Ayrıca üretilen şeritlerin maksimum kritik akım değerleri ve uzunlukları sınırlıdır. Bu yüzden çoklu iletkenlerin kullanımıyla üretilen yüksek akım kapasitelerine sahip kablo modelleri önem taşımaktadır. Örneğin bobin uygulamalarında akımın artması ile birlikte bobinde daha az sarım kullanılır. Bunun bir sonucu olarak bobinin indüktansı ve boyutları küçülür. Üretilen kablolarda yüksek manyetik alan ve yüksek akım yoğunluğu dışında aranabilecek diğer özellikler ise bükülebilirlikleri, her filaman/şeritte eşit elektromanyetik şartların/durumun sağlanması ve düşük AA kayıplarına sahip olmasıdır.

Süperiletken kabloların geleneksel kablolara göre bazı avantajları kayıpların daha az olması, kesit ve ağırlığın küçülmesi ve çevreye ısı yaymaması olarak sıralanabilir.

En çok kullanılan kablo modelleri Roebel, Yığın Şeritler (Stacked Tapes), CICC (conductor in conduit conductors) ve CORC kablolarıdır. Bu kablo konseptleri değişik kombinasyonlar ile bir arada kullanılabilir.

3.1. RACC Kablo (Roebel Assembled CC Cable)

1914 yılında Ludwig Roebel bakır kablolar için düşük kayıplara sahip bir kablo modelini geliştirmiş ve adı “Roebel Kablo” olarak adlandırmıştır. Roebel kablonun özelliği akımı tek bir parça iletken ile taşımak yerine, çok filamanlı yapıya sahip farklı bir şekilde sarılmış, akımı kollara ayrılmış iletkenle taşımıştır. Martin Wilson 1997 yılında REBCO şerit kullanarak YSS Roebel kablo modelini önermiştir [62]. Fakat o dönemde bükme işleminin nasıl gerçekleştirileceği, her bir iletkenin şekli ve iletkenlerin birleştirilmesi gibi konularda belirsizlik vardı. Roebel kablolarda kullanılacak şeritlerin filamanlı yapısı 2005 yılında Wilfried Goldacker tarafından önerilmiş ve 2006 yılında öz-alan altında 500 A (@77K) akım taşıyabilen ilk kablo üretilmiştir [63,64]. Bu kablo Şekil 3.1.’de gösterilmekte olup akım taşıma kapasitesi ayrı ayrı iletkenlerin akım taşıma kapasiteleri toplamının yarısı değerine sahiptir.



Şekil 3.1. (a) 5 Şerit+1 bakır, (b) 16 iletken (sağ) ile yapılmış RACC [64]

İkinci kablo 12 mm genişliğe sahip şeritler ile üretilmiş ve öz-alan altında 1,02 kA (@77 K) akım taşıma kapasitesine sahiptir [65].

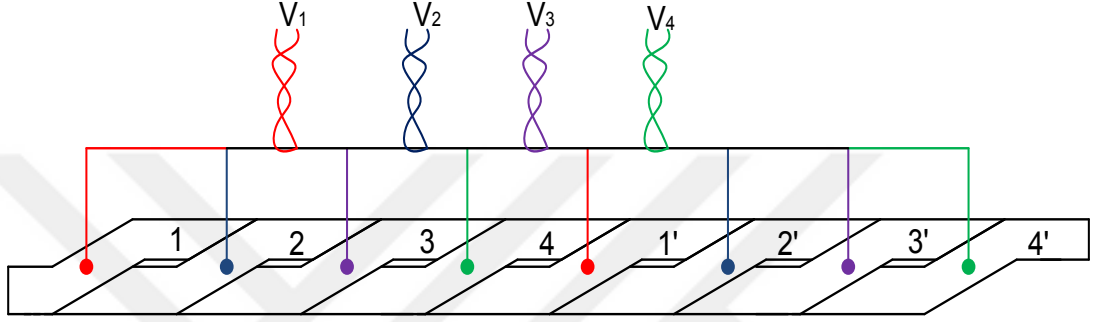
Roebel kablonun üretimi içerisindeki her bir iletkenin şekli sebebiyle zor bir süreçtir. Şeritlere uygun şekli vermek için lazer kesme, piko saniye kızılötesi lazer (picoseconds infrared laser) ve mekanik yumruklama gibi yöntemler kullanılır.

İletkenleri bir araya getirerek kabloyu oluşturmak karmaşık bükme işlemi sebebiyle zor bir işlemdir. Bu sorunu IRL (Industrail Research Limited) grubu, makineler yardımıyla çözerek Roebel kabloların daha uzun ölçülerde - boyutlarda üretimlerini gerçekleştirmiştir [66].

Roebel kablolarındaki transport akımları oluşan öz-alandan oldukça etkilenirler. Bunun sebebi, kablodaki iletkenlerin her noktasının, genlik ve yön olarak farklı manyetik alanlara maruz kalmasıdır.

Roebel kablolar sadece 77 K'deki uygulamalarda değil daha düşük sıcaklıklardaki uygulamalarda da düşünülebilir. Cryocooler teknolojisinin son yıllardaki gelişimi ile uygulamaların sıvı azot sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda kullanılma olasılığı doğmuştur. Bu kapalı soğutma sistemleri sıvı helyum, sıvı hidrojen (20 K) ve sıvı neon (28 K) ile test edilmiştir. 4,2 K'de 10 T alan altında yapılan ölçümlerde Roebel kabloların akımlarının 10 kat arttığı görülmüştür [67].

Roebel kabloların transport AA kayıplarının ölçüm yöntemi tek şeritler ile aynıdır. Önceki bölümlerde açıklanan kilitlemeli yükseltici yöntemi ile transport akımıyla aynı fazda olan gerilimin ölçülmesiyle elde edilir. Roebel kabloların karmaşık yapılarından dolayı ilk sorun gerilim ölçüm uçlarının nereye bağlanacağıdır. Bu soruna Jiang ve arkadaşları [68] çözüm bulmuşlardır. Bu yöntemde Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi birden fazla gerilim ucu bağlanıp bu uçlardaki kayıpların ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.2. Roebel Kablo kayıp ölçme düzeneği

$$Q_t = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k I_{kablo}}{df} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1.'de gerilim uçları arasındaki mesafe d , iletken (filaman) sayısı N ve frekans f olarak alınmıştır. Bu yapı yerine gerilim uçları direkt olarak akım uçlarına bağlanabilir; fakat bu durumda akım terminalinde oluşan ve kaybın sebep olduğu gerilimden çok daha yüksek olan omik gerilim bileşenlerinin hesaplanıp çıkartılması gerekir.

İletkenler arası boşluklar süperiletkenin maruz kaldığı manyetik alanı etkilediğinden transport AA kayıplarına etki eder. Boşluklar arttırıldığında kritik akım artmakta ve Q_{tra} azalır. Transport AA kayıplarının baskın olduğu durumlarda boşluklar arttırılarak kayıplar azaltılabilir fakat bu işlem kablonun mühendislik kritik akım yoğunluğunu azaltır [69].

Manyetizasyon AA kayıplarının ölçümü Roebel kablonun kısa bir parçasını keserek sinyal bobinleri yöntemi veya “calibration free” yöntemiyle [70] ölçülebilmektedir. Serbest kalibrasyon yöntemi 4.bölümde açıklanacaktır.

Roebel kabloların AA kayıplarının analitik modellenmesinde Bean’ın levha modeli, Norris’in elips ve şerit modelleri kullanılabilir fakat bu analitik modellerde kritik akımın manyetik alana bağımlılığı hesaba katılmadığından sonuçlar kaba bir fikir elde etmeyi sağlar. Bu yüzden Roebel kabloların AA kayıplarını hesaplamak için nümerik modellere başvurulmalıdır [71-73].

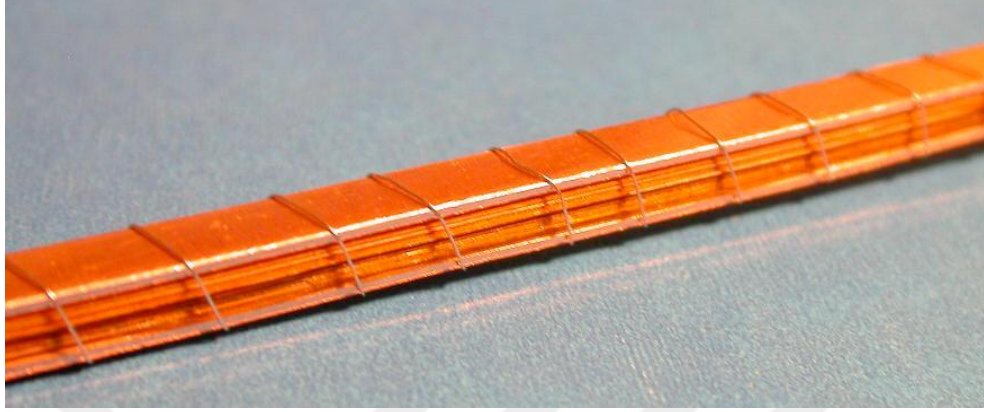
Son yıllarda Roebel kablolarla birçok proje ve araştırma yapılmaktadır. Bu kablo modeli azaltılmış alternatif akım kayıpları ve yüksek akım taşıma beklentilerini karşılamaktadır. Roebel kablolar, AA uygulamalar için tam transpoze - sarmal yapıyı sağlayan, kompakt yapıya sahip, yüksek akım yoğunluklu bir kablo modelidir.

Roebel kabloların bükülebilme kapasiteleri özellikle bobin uygulamaları için önemli bir avantaj sağlamaktayken, *REBCO* şeritlerin 77 K’deki performansları yanı sıra düşük sıcaklıklarda (4,2 K) akım yoğunluklarındaki artış ilgi çekicidir [74].

3.2. TSTC (Twisted Stacked-Tape Cable) Kablo

Roebel kabloda şeritlerin özel zikzaklı bir yapıya getirilmeleri gerektiği daha önceki bölümde değinilmişti. Şeritleri bu yapıya getirmek uzun kablo üretimini zorlaştırır. Bu sorunu aşmak için farklı bir kablo modeli, özellikle füzyon bobin çalışmaları için Takasu ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [75]. Takasu ve arkadaşları bu çalışmasında yüksek akım ve yüksek manyetik alanlara ulaşmayı hedeflemiştir. Ana fikir 3 şerit yığını oluklu bakır çubuklara bükerek lehimlemektir. Bu kablo modeli “Twisted Stacked Tape Cable (TSTC)” olarak bilinir. İlk örnek kablo, serbest duran şeritlerin yığın düzleminde bükülmesiyle elde edilmiştir. Yığın şeritlerin bükülmeden önceki hali Şekil 3.3.’te gösterilmiştir. Bükme işlemi dışardan bir gerilme ya da boyuna bir kuvvet ile sıkıştırılarak yapılır. TSTC bir stabilizör ve destekleyici yapı olmak amacıyla iletken bir kanal (boru) ile kaplanabilmektedir. TSTC elde etmek için birkaç yöntem vardır, bunlar: (1) yığın ve bükme sonra kaplama; (2) yığın ve kaplama

sonra bükme; (3) yığın sonra yapılandırılmış bir kanal içindeki açık oluklara gömmedir.



Şekil 3.3. Bükme öncesi yığın haline getirilmiş YBCO şeritler [76]

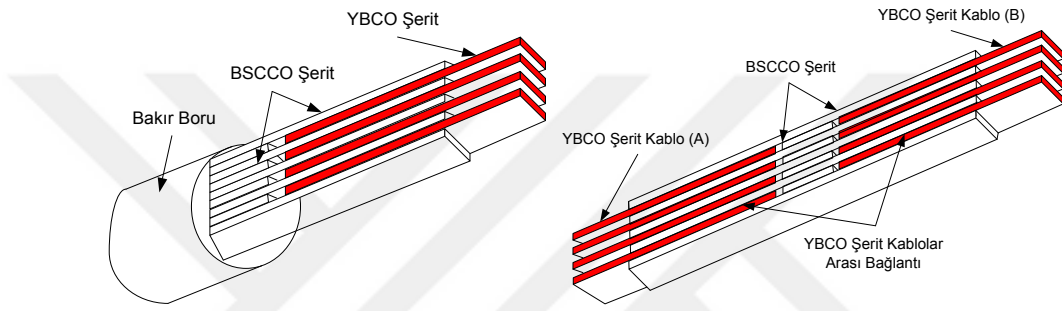
Kısa kablolardaki davranışlarını anlamak için, şeritlerdeki gerilmeler, bu gerilmelerin kritik akıma etkileri, şeritlerdeki akım dağılımı [77], terminal bağlantı rezistansları [78], öz alandaki performansları, bükme derecesinin etkileri, şeritler arası indüktans dağılımı ve histerezis kayıpları ayrı ayrı incelenmiştir [79].

Kritik akım, boyuna eksenindeki gerilme ve manyetik alana bağlıdır. TSTC’de boyuna gerilmeler düzgün bir dağılıma sahip değildirler. Bu yüzden TSTC’deki bir şeritin kritik akımı kesit alanındaki kritik akım yoğunluklarının integrali alınarak hesaplanmaktadır.

TSTC’de şeritler tam sarmal yapıda olmadıkları için akım dağılımları ve indüktansları eşit değildir. Tek bir şeritin indüktansı, kendi öz indüktansı ve diğer şeritlerle olan karşılıklı indüktanslarından oluşur. Bobinlerde, büyük bobin indüktansı bütün şeritlerin indüktanslarına eklendiğinden, şeritler arası fark ihmal edilebilir. Şeritler yığın halinde büküldüklerinde dış yüzeydeki şerit iç kısımdakilerden daha uzundur ve indüktans uzunlukla orantılıdır. Ancak manyetik alan etkisi yanında indüktans etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

TSTC’de diğer önemli bir konuda kablo bağlantı uçları/eklemlerdir. Geleneksel süperiletken kablolarda teller bir araya sarılarak birbirlerine lehimlenir. TSTC’de

kullanılan YBCO şeritler arası bağlantı asimetrik elektriksel iletkenlikleri (tampon tabaka sebebiyle her iki yüzeyindeki iletkenlik farklı) sebebiyle bu yöntemle yapılamaz. Bu sebeple her YBCO şeritin gümüş tabakasının olduğu tarafa BSCCO şerit lehimlenmiş veya söküp takılabilir olması için basınçla mekanik bir bağlantı yapılmıştır (Şekil 3.4.). Daha sonra BSCCO şeritin diğer ucu bakır uca bağlanır [75]. Bu yöntem ile bağlantının homojen olması sağlanır. Bağlantı Şekil 3.4.'de gösterilmiştir. Kaynak [75]'te mekanik olarak 55 MPa ile birleştirilen YBCO ve BSCCO şeritler arasında $1 \mu\Omega$ 'dan daha az bir omik dirence rastlanmıştır.

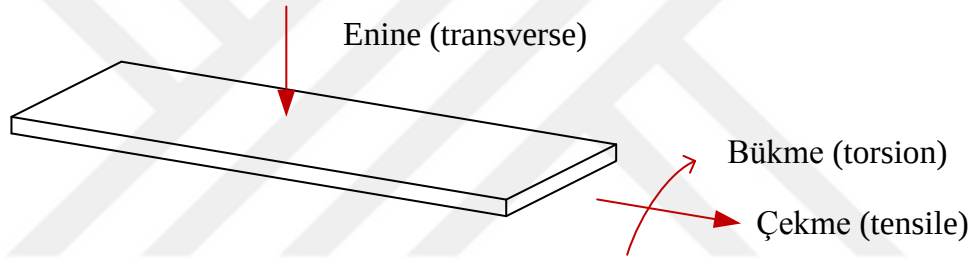


Şekil 3.4. (a) kablo-akım kolu bağlantısı, (b) kablo-kablo bağlantısı [75]

TSTC'de $B_a > 5 T$ için histerezis kayıplarının dominant kısmı manyetik alanın dik olan bileşenden kaynaklanır. Kayıpların tahmini, paralel manyetik alan altındaki levha, dik manyetik alandaki şerit ve dik manyetik alan altındaki sonsuz yığın-şerit modelleriyle tahmin edilir. Paralel manyetik alanda şerit yığnında indüklenen akımlar çiftlenim kayıplarına sebep olur. Bu indüklenen akım, bükme derecesinin (l_p) ve zaman sabitinin karesiyle orantılıdır [80]. Bu yüzden kayıpları azaltmak için bükme derecesini minimize etmek önemlidir. Fakat bu değerin minimize edilmesi gerilme ve diğer mekanik sebepler ile sınırlandırılır. İletkenlerin enine dirençlerinin artırılmasıyla çiftlenim kayıplarının azaldığına önceki bölümlerde değinilmişti. Fakat şeritler arası homojen akım paylaşımını gerçekleştirmek için düşük enine direnç tercih edilir. TSTC, DA veya düşük frekans uygulamaları için kullanışlıdır. AA güç sistemleri veya daha yüksek frekans uygulamaları için şeritler daha dar - ince yapılara veya çoklu filamanlı hale getirilmelidir [81, 82].

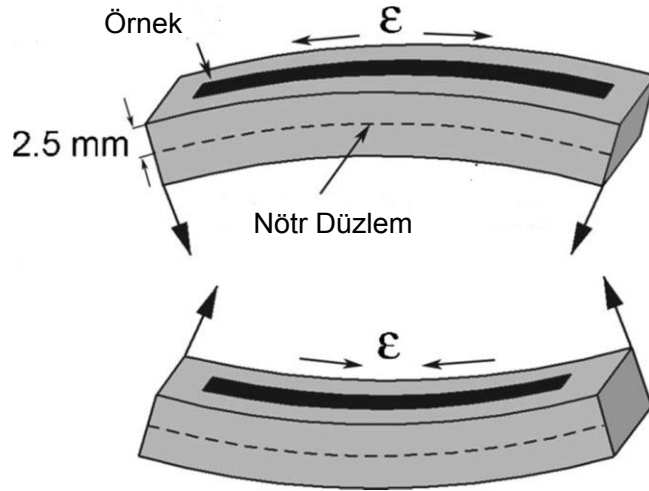
3.3. CORC (Conductor on Round Core) Kablo

CORC kabloların yapısı ve özelliklerinden bahsetmeden önce şeritlerdeki gelişmelere değinmek gerekir. Uygulamalarda kullanılabilmeleri için şeritlerin elektriksel özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerinin de anlaşılması gerekir. DSS uygulamalarının tasarımında gerilmenin kritik akıma olan etkisi önemli ve etkili bir parametredir. YSS keşiflerinden sonraki ilk 17 yılda gerilmeden kaynaklı kritik akımda tersinebilir bir değişim bildirilmemiştir. Bu kırılgan seramik materyallerin akım yoğunluğu %0,2-0,4 gerilmelerde etkilenmekte, daha yüksek değerlerde akım yollarının kırılması sebebiyle tersinemez şekilde akımda azalma görülür. Şeritlerin maruz kaldığı gerilmeler Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Şeritlerin maruz kalabileceği gerilme çeşitleri

2007 yılında D C Laan ve arkadaşları 3 farklı şeriti kapsamlı mekanik gerilme aralıklarında incelemiş ve bir tersinir kritik akım azalımı görmüşlerdir [83]. Öz-alan altında %1 kompresif (içe doğru sıkıştırma) gerilme altında şeritlerin kritik akım değerlerinin %40 azaldığını göstermişlerdir. Kritik akım yoğunluğunu yüksek çekme (tensile) ve kompresif gerilme altında ölçmüşlerdir. Bükme aparatı Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



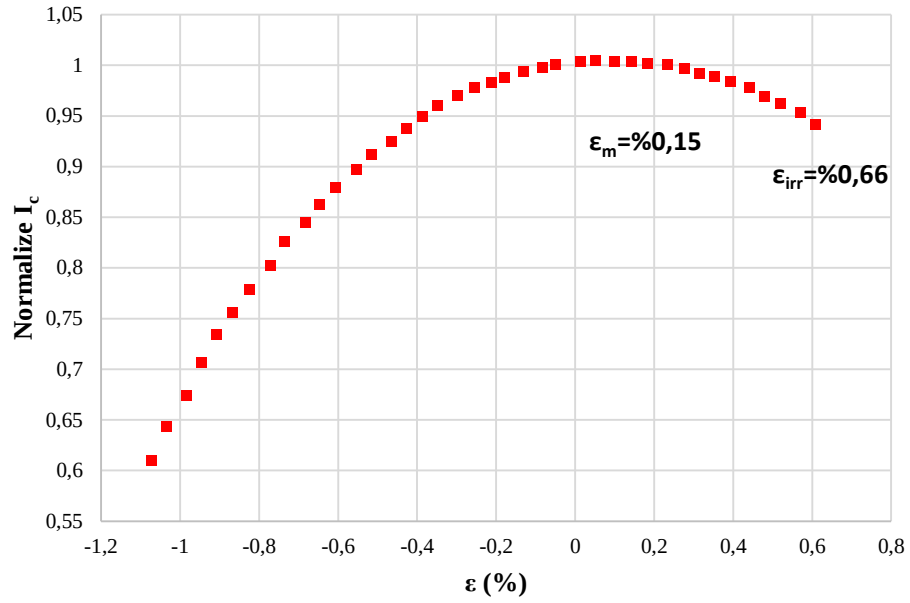
Şekil 3.6. Bükme aparatı; üstteki eksenel çekme alttaki eksenel sıkıştırma [83]

Malzemeler soğuduğunda genel özellikleri itibariyle doğal bir kompresif gerilme oluşmaktadır. Şeritler soğuk ortama konulduğunda kompresif gerilmeye ters bir gerilme meydana gelmektedir (ϵ_m). Bu gerilme MOCVD-IBAD ve MOD-RABITS yöntemiyle üretilen şeritler için %0,03 ve bakırla çevrilmiş şeritler için %0,08-0,11'dir. Kritik akım yoğunluğu ve gerilme arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$\epsilon_0 = \epsilon - \epsilon_m \quad (3.2)$$

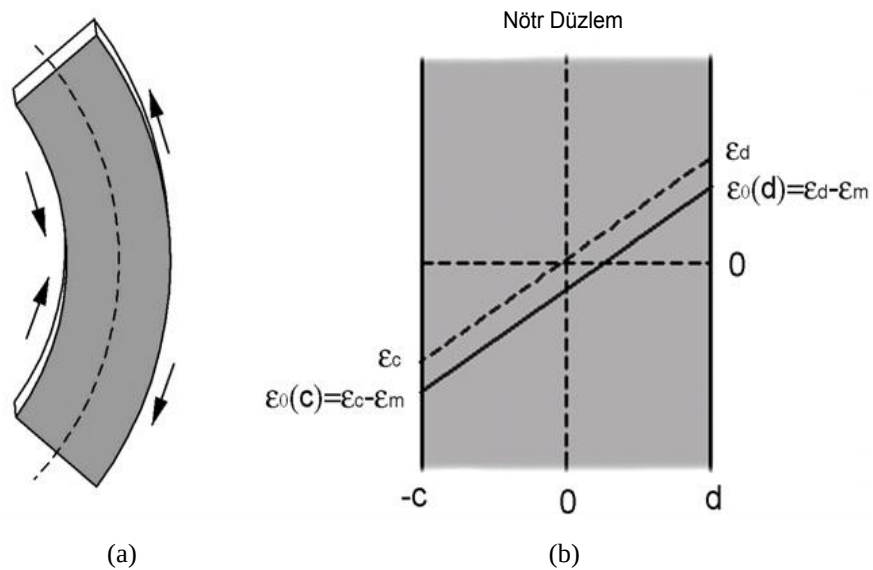
$$\frac{J_c(\epsilon)}{J_c(\epsilon_0)} = 1 - a |\epsilon_0|^{2,2 \pm 0,02} \quad (3.3)$$

Burada denklem ile a katsayısı MOCVD-IBAD yöntemi ile üretilen şeritler için 6918 ± 210 ve MOD-RABITS yöntemi ile üretilen şeritler için 9538 ± 290 bulunmuştur. Ayrıca tersinemez gerilme sınırının %0,6 olduğunu tespit etmişlerdir. Bu denklemdeki a , gerilme hassaslığı katsayısıdır.



Şekil 3.7. [83]'te YBCO şerit için Normalize kritik akım - gerilme ilişkisi

D C Laan ve arkadaşları başka bir çalışmalarında [84] şeritlerin uygulamalarda sadece aksenal gerilmeye değil ayrıca düzlem içi gerilmeye de maruz kaldığını belirlemişlerdir. Süperiletken kısım ölçüm aletinin iç kısmına lehimlenerek düzlem boyu gerilmenin kritik akım yoğunluğuna etkisini araştırmışlardır. Düzlem içi gerilme uygulandığında şeritlerin yarısı kompresif (sıkıştırma) gerilmesine yarısı çekme gerilmesine maruz kalmakta, ortası ise gerilmeye maruz kalmamıştır. Aksenal gerilmenin ölçülme yöntemi Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. (a) Şeritin düzlem içi bükülmüş hali, (b) Şeritin genişliği boyunca gerilme profili [84]

Bakır ve YBCO'nun termal genleşme katsayılarındaki fark, soğuk ortamdaki farklı çekme gerilmelerine (ε_m) sebep olmaktadır. Bu çalışma sonucunda geniş örneklerin düzlem içi bükülmeye karşı daha hassas oldukları ve 4mm'lik örneklerin 0,25-0,28 m yarıçapında bir bükülmeye maruz kaldıklarında J_c 'nin %4-5 oranında azaldığını göstermişlerdir. Kritik akım yoğunluğu, çekme altındaki kenarın tersinemez gerilme sınırının aştığı r yarıçapından sonra tersinemez bir şekilde azalmaktadır.

DSS bobin uygulamaları $B_c=26\text{ T}$ (Nb_3Sn @4,2 K) ile sınırlı kalmaktadır. Daha yüksek manyetik alanlara ulaşmak için YSS kullanılması gerekir. Şeritlerin mekanik gerilme altındaki kritik akım davranış özellikleri bobin uygulamaları için uygun bir aday haline getirmiştir.

YSS süperiletkenleri ile yüksek akımlara ulaşmak için şeritler ile kablo oluşturmak gerekir. D C Laan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmaya kadar kullanılabilir tek kablo konsepti Roebel kablo modelidir. Önceki bölümlerde bu kablo modelinin zorluklarından bahsedilmişti. D. C. Laan 2009 yılında şeritleri %-2 sıkıştırma (kompresif) gerilme altındaki elektromekanik özellik ölçümlerini yapmış ve bu değere kadar kritik akımda tersinemez bir azalım tespit edememiştir [85].

Alttaş tabaka kalınlığı t , bükme yarıçapı r olmak üzere kompresif gerilme değerini aşağıdaki denklemi kullanarak elde etmiştir.

$$\varepsilon(r) = \frac{-t}{2r} \quad (3.4)$$

Aynı çalışmada D. C. Laan şeritleri farklı çaplardaki iletkenlere sararak kritik akım yoğunluğundaki davranışı incelemiş ve şeritlerin ufak çaplı iletkenlere sarıldığı, düşük AA kayba sahip, yüksek alan bobin uygulamalarında kullanılabilecek yeni bir YBCO şerit kablo modeli sunmuştur. Bu kablo modeline CORC kablo adını vermiştir. Tek şerit ile sarılmış örnek bir CORC kablo Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.

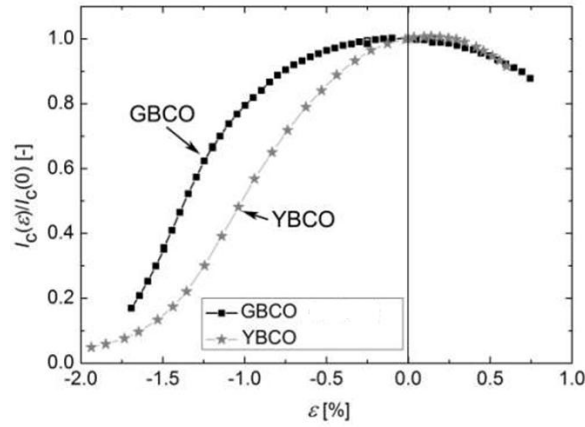


Şekil 3.9. Tek şerit ile sarılmış CORC kablo

D. C. Laan ilk olarak 3,19 mm çapında farklı bükme derecesi değerlerine sahip 5 farklı kablo üretmiştir. Bükme derecesinin büyük olduğu değerlerde I_c 'ninde buna bağlı olarak daha yüksek olduğunu görmüştür. Ayrıca şeritte süperiletken tabakanın nötr bölgeye daha yakın olması için süperiletken tabakanın olduğu yüze 50 μm bakır tabaka yerleştirilmiştir. Bu bakır tabakanın yerleştirilmesi sonucu %-1,28 olan kompresif gerilme yüzdesi %-0,71 değerine düşmüş ve 49 A olan kritik akım değeri 99 A'e yükselmiştir.

Bu kablo modelinin kullanılabilirliğini gösterildikten sonra bobin uygulamalarındaki davranışları hakkında daha fazla bilgi sahibi olabilmek adına 2010 yılında şeritlerin gerilme, manyetik alan ve alan açısının kritik akıma etkilerini gösterilmiştir [86]. 76K'de %-0,5 gerilme altında 5T//c eksenine paralel ve 8T//ab düzlemine paralel manyetik alan değerlerinde kritik akımın %30, öz alan altında ise %13 azaldığını gösterilmiştir. Alan yönü bağımlılığı, gerilmenin çivileme mekanizmalarını etkilediğini göstermektedir. Ayrıca manyetik alan değeri-yönü ve gerilmenin değişimiyle alakalı davranışları ayrıntıyla aynı çalışmada göstererek gerilme karakterizasyonunun önemli olduğunu kanıtlamıştır.

2011 yılında D. C. Laan ve arkadaşları YBCO yerine GdBCO kullanarak üretilmiş CORC kabloların bobin ve güç sistem uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermişlerdir [87]. Bu çalışmada GdBCO'nun mekanik stres altında kritik akımındaki davranışının YBCO'dan daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. YBCO/GdBCO karşılaştırılması Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. GBCO ve YBCO için kritik akımın gerilmeye bağımlılığı [87]

Aynı grup DA güç iletiminde kullanılabilecek 7561 A (3745+3816'dan %10 düşük öz alan 302 mT) kritik akıma sahip 5 MW gücünde 2 fazlı bir kablo modeli önermişlerdir. Bu kablo iki faz iç içe geçirilerek oluşturulmuştur. Aynı yönde ve zıt yönde çalıştırılabilmektedir. Kablonun en iyi performansı öz alanların birbirini yok ettiği, akımların ters yönde aktığı çalışma şekli olarak belirlenmiştir [88].



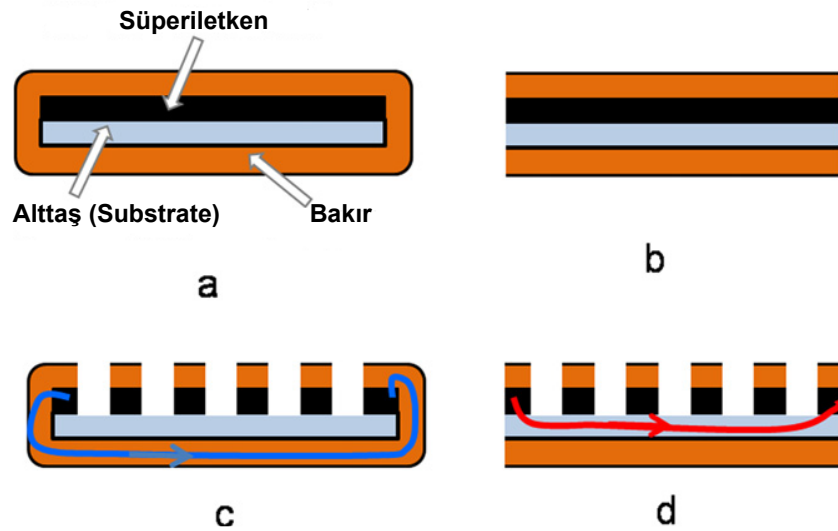
Şekil 3.11. [89]'de CORC kablo ile sarılan bobinin iç tabakadaki 6 sarımı

2013 yılında 4,2 K 19 T alan altında 5021 A kritik akıma sahip bir kablo üretilmiştir. Kablo çapı 7,5 mm ve $J_e=114 \text{ A/mm}^2$ 'dir. Daha sonra 6 m uzunluktaki CORC kablo ile iç çapı 9cm olan 12 tur 2 tabaka ilk bobin sarılmış ve kritik akımı 4,2 K 20 T'da 1966 A olarak ölçülmüştür ($J_e=50 \text{ A/mm}^2$). Bu çalışma ile CORC kabloların yüksek alan bobinlerinde kullanılabilecekleri gösterilmiştir [89].

AA kayıp açısından ilk çalışma 2010 yılında Souc ve arkadaşları 11 cm uzunluğunda farklı bükme derecelerine (1,7-2,4 cm) ve iletken çaplarına sahip (5, 8 ve 10 mm) 1-6 şerit kullanılmış CORC kablo yapmışlardır [90]. Kablolarda kullanılan şerit 4,1 mm genişliğe 118 A kritik akıma sahiptir. Normalde şeritlerin daha ince iletkenlere sarılabilme özelliğine sahip olmalarına rağmen kritik akımda azalma ile karşılaşmamak için daha büyük çaplarda kablolar üretilmiştir. Bu çalışmadaki amaç 36 ve 72 Hz’de kabloların transport ve manyetizasyon kayıplarının gösterilmesidir. Deneysel sonuçların karşılaştırılması için transport kayıplarında Norris eğrisi kullanılmıştır.

M. Vojenciak ve arkadaşları, şeritlerin filamanlara ayrılarak daha az AA kayıplarına sahip olduklarını gösterdikten sonra [91] bu şeritleri CORC kablolarında kullanarak AA kayıp analizleri yapmışlardır [92].

Şeritlerin kenarlarının kesilmesiyle akacak olası çiftlenim akım yollarını keserek kayıpların daha da azaltılabileceği gösterilmiştir. Şeritlerin gösterimleri Şekil 3.12.’de gösterilmiştir. Fakat filaman sayısının artması kritik akımı azalttığından 4,1 mm genişliğe sahip şerit için kablo yapımındaki şeritlerin 5 filamanlı olarak kullanmaya karar verilmiştir [92].



Şekil 3.12. Örneklerin şematik gösterimi (a) orijinal şerit; (b) kenarları kesilmiş örnek; (c) filamanlı örnek; (d) filamanlı ve kenarları kesilmiş örnek. Oklar çiftlenim akımlarını temsil etmektedir [92]

Bu şeritlerle 1, 2 ve 3 tabakalı CORC kablolar yapılmıştır. Filamanlı ve filamansız yapının alınganlık sonuçlarına etkisi gösterilmiştir.

2014 yılında Majoros ve arkadaşları SMES'lerde kullanılabilecek 13 tabaka 40 şeritten oluşan bir CORC kablo üreterek farklı manyetik alan ve frekanslarda kablonun AA kayıplarını incelemişlerdir [93].

2015 yılında C. Barth ve arkadaşları CORC kabloların değişik sıcaklık (4,2-77K) ve manyetik alanlar (0-12T) altındaki kritik akımlarını ölçerek elde ettikleri sonuçlar ile CORC kabloların yüksek alan ve füzyon bobin uygulamaları için iyi bir aday olduklarını belirlemişlerdir [94].

2017 yılında J. D. Weiss ve arkadaşları, 30 µm alttaş ve 2 mm genişliğindeki şeritler ile iletim hatlarında ve bobin uygulamalarında kullanılabilecek CORC kabloların elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir [95]. Bu kablolar ile 4,2 K 10 T'da 233 A/mm² mühendislik kritik akım yoğunluğuna sahip 5 sarımlı bir solenoid bobin üretilmiştir.

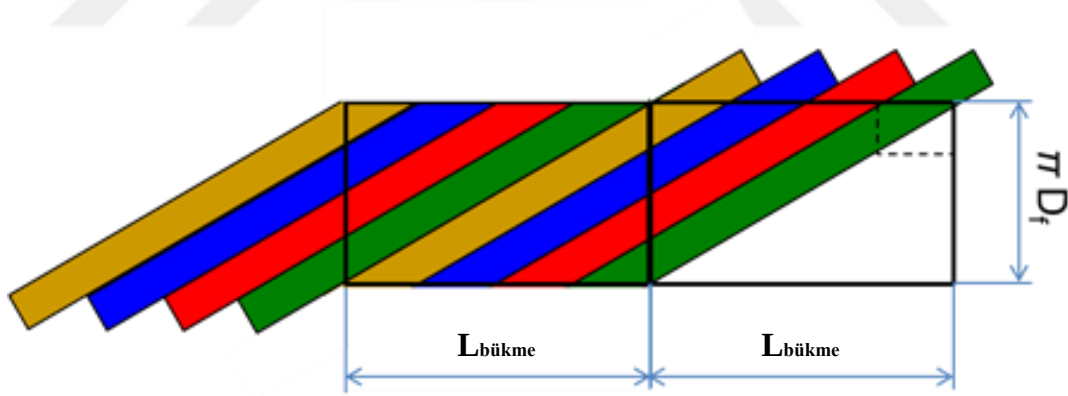
Kısaca CORC kabloların sahip oldukları özellikler aşağıda sıralanmıştır.

- DA iletiminde: düşük ağırlık, yüksek akım yoğunluğuna sahiptirler.
- Yüksek alan uygulamalarında (SMES, transformatörler) yüksek akım yoğunluğuna, iletkende düşük anizotropiye, düşük manyetizasyon kayıplarına, yuvarlak iletken şekline sahiptirler.
- İletken içinden soğutma seçeneğine sahiptirler.
- İletken tam transpoze olma (katmanlar arası değil) özelliğine sahiptirler.
- Kısa bükme derecesine sahiptirler.
- Yüksek mekanik dayanım (sivri uçları yok), esnek orta iletken özellikleri vardır.

- Şerit ve kablolar arası akım dağılımı ayarlanabilir (eklem rezistanslarıyla).
- Kablolama işleminde düşük akım azalımına (<%10) sahiptirler.
- Ekonomik olarak uygun ve uzun mesafe üretilebilme imkanı vardır [96].

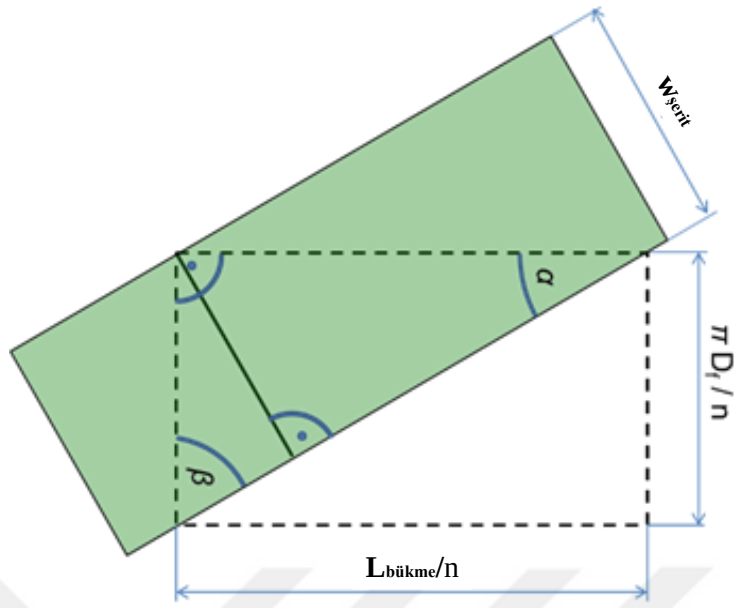
Orta çaptaki CORC kablolarında merkezde bir iletken ve bu iletken etrafında spiral şekilde sarılmış çok sayıda şerit bulunur. İletken çapına göre bir tabakada bulunabilecek şeritlerin sayısı ve lehimlenme açıları hesaplanmalıdır. Bu geometrik parametreler bulunurken şeritlerin sonsuz incelikte olduğu ve şeritler arası boşluk olmadığı kabulleri yapılmalıdır. Boşluklar hesaba katılmak istenirse hesaplamalarda şeritin genişliği olduğundan büyük bir değer alınabilir.

Hesaplamalar yuvarlak gövdenin düzlem modeliyle yapılır. Gövde iletkeninin yüzeyi genişliği gövdenin çevresi olacak şekilde dikdörtgen şeklinde açılmaktadır. Şekil 3.13.'te $n=4$ şeritli ve gövde iletken çapı D_f olan bir kablo için hesaplama yapılırken kullanılacak yapı gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Orta çaplı bir kablonun düzlem modeli. D_f gövde iletkeninin çapı, $L_{bükme}$ kablonun bükme derecesi ve n şerit sayısıdır

Siyah dikdörtgenler 1 bükme derecesi uzunluğunda gövde iletkeninin yüzeyini göstermektedir. Sonraki adımlarda bu modelin sadece bir kısmı kullanılacaktır.



Şekil 3.14. Orta çaplı kablodaki bir şeridin detaylı gösterimi, kesik çizgili dikdörtgen önceki şekildeki dikdörtgene karşılık gelmektedir

Şekil 3.14. kullanarak $\pi D_f / n$ ve $L_{bükme} / n$ değerleri bulunabilmektedir. Şeritin genişliği $w_{şerit}$ olarak gösterilmiştir. Şerit gövde iletkenine göre α açısıyla eğik durmaktadır. Geometrik analiz bilinen ve bilinmeyen parametrelere göre değişiklik gösterebilir. Aşağıda iki farklı analiz gösterilmiştir. Birincisi; şeritin genişliği, sayısı ve gövde iletken çapı biliniyorken lehimleme açısı ve bükme uzunluğunun bulunmasıdır.

$$\sin \beta = \frac{w_{şerit}}{\pi D_f / n} = \frac{n w_{şerit}}{\pi D_f} \quad (3.5)$$

$$\beta = \arcsin \frac{n w_{şerit}}{\pi D_f} \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{n w_{şerit}}{\pi D_f} \quad (3.8)$$

$$\sin \alpha = \frac{w_{şerit}}{L_{bükme} / n} = \frac{n w_{şerit}}{L_{bükme}} \quad (3.9)$$

$$L_{bükme} = \frac{n w_{şerit}}{\sin \alpha} \quad (3.10)$$

İkinci olasılık ise açısı ve iletken çapı bilinirken bükme uzunluğunun ne olabileceği ve ek olarak şerit genişliği bilinmekteyse bir tabakadaki maksimum şerit sayısının bulunmasıdır.

$$\tan \alpha = \frac{\pi D_f / n}{L_{bükme} / n} = \frac{\pi D_f}{L_{bükme}} \quad (3.11)$$

$$L_{bükme} = \frac{\pi D_f}{\tan \alpha} \quad (3.12)$$

$$\sin \alpha = \frac{w_{şerit}}{L_{bükme} / n} = \frac{n w_{şerit}}{L_{bükme}} \quad (3.13)$$

$$n = \frac{\sin \alpha L_{bükme}}{w_{şerit}} \quad (3.14)$$

Bulunan değerler bir düşük tam sayıya yuvarlanmalıdır.

3.4. Diğer Kablo Modelleri

Yüksek akım kapasitelerine ulaşmak için kullanılan bir diğer kablo modeli ise CICC'dir (Cable in Conduit Conductors). Bu kablo modeli özellikle yüksek manyetik alan gerektiren füzyon uygulamalarında kullanılmaktadır [97].

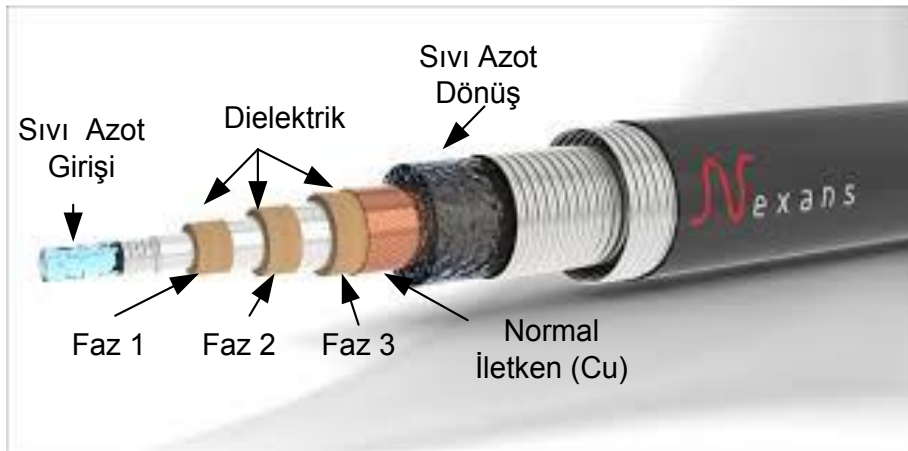
CICC modelinde filamanlı yapıya sahip iletkenler spiral şeklinde bir iletkene sarılarak/bükülerek metal bir kılıf içerisine konulmaktadır. Metal kılıf mekanik güçlendirmeyi sağlamaktadır. Soğutma işlemi ortadaki iletkenin içerisinden ve iletkenler arasındaki boşluklardan yapılmaktadır. Kablonun kararlılığını arttırmak ve kablonun normal duruma geçmesi durumunda akıma düşük öz dirençli bir yol oluşturmak için bakır iletkenler de eklenmektedir. ITER'de (International Thermonuclear Experimental Reactor) de füzyon enerjisi üretiminde CICC kablo modeli kullanılmaktadır. CICC kablonun modellenmesinde malzemelerin

elektromanyetik, metalürjik, mekanik, termal ve hidrolik karakteristikleri incelenmektedir [98].



Şekil 3.15. Bükülmüş-yığın YSS CICC [99]

Bu modeller dışında ilk üretilen klasik süperiletken kablolar da mevcuttur. Bu kablolarda soğutma sıvısının gideceği bir iç boru, bu boru üzerine sarılmış süperiletken teller, yalıtım tabakası ve soğutma sıvısının dönüş yapacağı katman bulunmaktadır. İzolasyon tabakasının soğutma düzeneğinin arasında veya dışarısında olmasına göre soğuk dielektrik ve sıcak dielektrik süperiletken kablo olarak adlandırılmaktadır. Bu yapıya sahip aynı soğutma çemberi içerisinde 3 fazın bulunduğu ve 3 fazın aralarında yalıtım yapılarak aynı iletken sarılı çeşitleri vardır. Şekil 3.16.'da klasik süperiletken kablo örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Klasik süperiletken kablo [100]

Tablo 3.1.'de kablo modellerinin kullanılabilecekleri yerler ve avantaj-dezavantajları verilmiştir.

Tablo 3.1. Kablo modellerinin karşılaştırılması [75].

	Yuvarlak bir iletkene sarmal sarılarak		Yığın	
Kablo modeli	Klasik SC	CORC	RACC	TSTC
Akım yoğunluğu	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek
Kablo/şerit uzunluk oranı	l_p ve $r_{iletken}$ 'e göre %94-97	l_p ve $r_{iletken}$ 'e göre %40-90	İletken sayısına* göre %40-89	%99
Bobin alanının şeritlere yönü	Şeritlere bütün yönlerde	Şeritlere bütün yönlerde	Şerit düzlemine paralel	Şeritlere bütün yönlerde
Öz-alanının şeritlere yönü	Şerit düzlemine paralel	Şerit düzlemine paralel	Şerit düzlemine dik	Şerit düzlemine dik
Uzun boyutlarda üretilme kapasiteleri	Uygun değil	Mümkün	Zor	İyi
Uygulamalar	Güç iletim kabloları	Orta akımlarda esneklik gerektiren uygulamalarda	Birkaç kA'lık bobinlerdeki iletken için	Yüksek akım yüksek manyetik alan uygulamaları

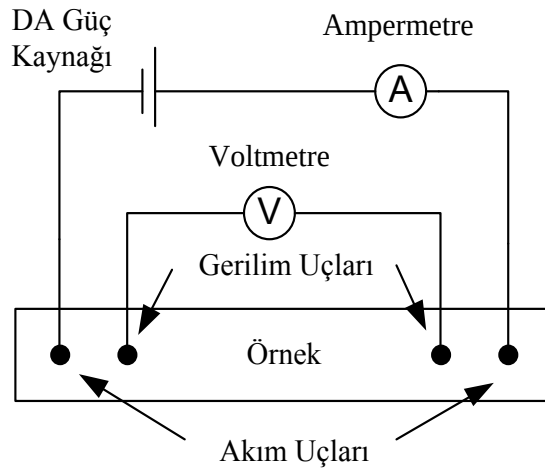
*orijinal şeritten elde edilen filaman sayısı.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan kritik akım, AA manyetizasyon kayıpları, AA transport kayıpları ve AA/AA durum altındaki kayıpları ölçüm sırasında kullanılan sistemler anlatılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan şeritlerin üretim teknikleri ve fiziksel özellikleri açıklanmıştır.

4.1. Dört Nokta Kontak Yöntemiyle Kritik Akım Ölçüm Sistemi

4 nokta kontak yöntemi süperiletkenlerin kritik akımı ölçümünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bir DA güç kaynağı ile örneğe akım verildikten sonra örnek üzerindeki gerilim kaydedilir. Örnek, akıma karşı bir direnç gösterirse, üzerinde bir gerilim düşümü meydana gelir. Gerilim uçlarından elde edilen değerler yardımıyla örneklerin kritik akımları tespit edilir. Kritik akım tespit edilirken $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ kriteri kullanılmıştır. Deney düzeneğinde Keithley 2700 Multimetre kullanılmıştır.

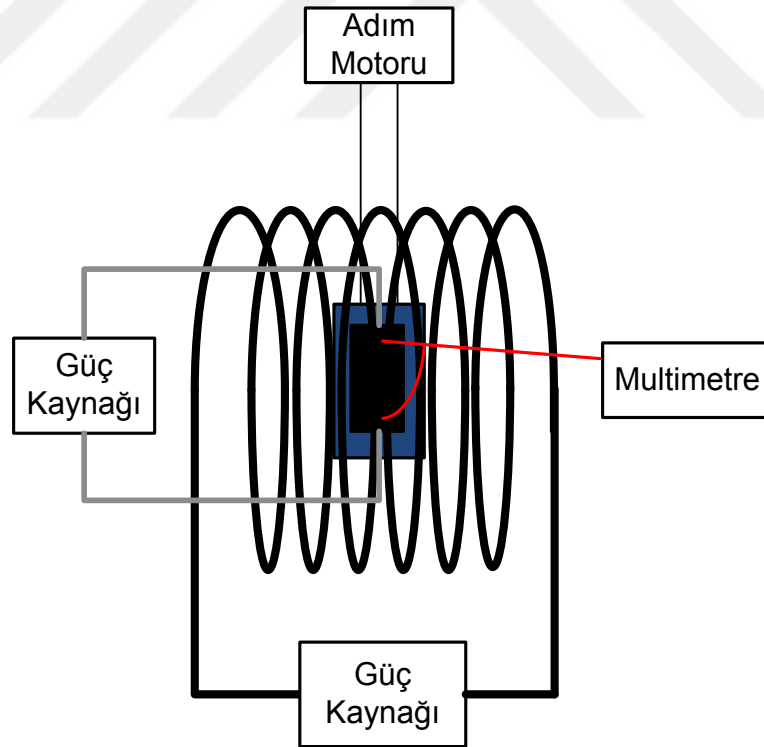


Şekil 4.1. DA kritik akım ölçüm düzeneği

Ölçüm düzeneği Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Bu yöntem standart 2 nokta kontak ile direnç ölçüm yöntemine göre daha hassastır. 2 nokta kontak yönteminde örnek üzerinde oluşan gerilim kaydedilir. Kaydedilen bu gerilim değeri örnekte oluşan gerilim dışında istenmeyen kontak gerilimlerini de içermektedir. 4 nokta kontak yöntemi ile bu durumdan kaçınılmış olunur.

4.2. Kritik Akımla Manyetik Alan Açısı Arasındaki İlişkiyi Ölçme Sistemi

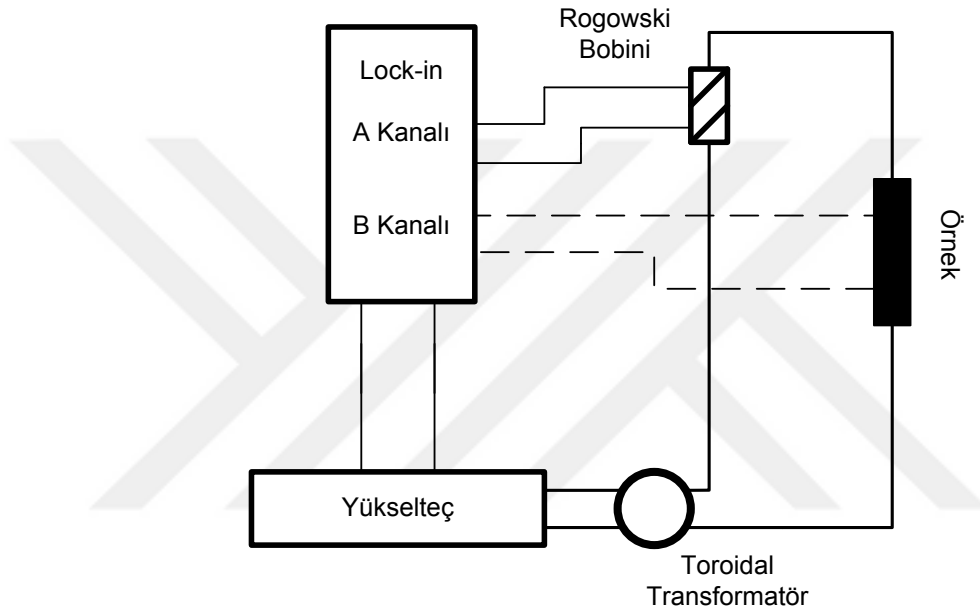
Şekil 4.2.'de süperiletken bir örneğe farklı açılarda manyetik alan uygulandığı zaman kritik akımdaki değişimi ölçmek için kullanılan sistem gösterilmiştir. Örneğin kritik akımı 4 nokta kontak yöntemiyle ölçülür. Örnek üzerindeki gerilim kontakları bir multimetreye bağlanır. Numune tutucu bir step (adım) motoruna bağlıdır. Böylelikle örnek eksen etrafında 360 derece döndürülerek kritik akımı ölçülür. Örneğin manyetik alana maruz kalması için bir bobinin içerisine yerleştirilir.



Şekil 4.2. Kritik akımla manyetik alan açısı arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan sistem

4.3. Transport Alternatif Akım Kaybı Ölçüm Sistemi

Şerit ve kablolarda AA transport kayıplarını ölçmek için elektriksel bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem ile yapılan ölçümlerde bir güç kaynağı, kriyostat, toroidal transformatör, kilitlemeli yükseltici, kompanzasyon bobini ve veri toplama sistemi vardır. Şekil 4.3.'te kullanılan sistem gösterilmiştir.

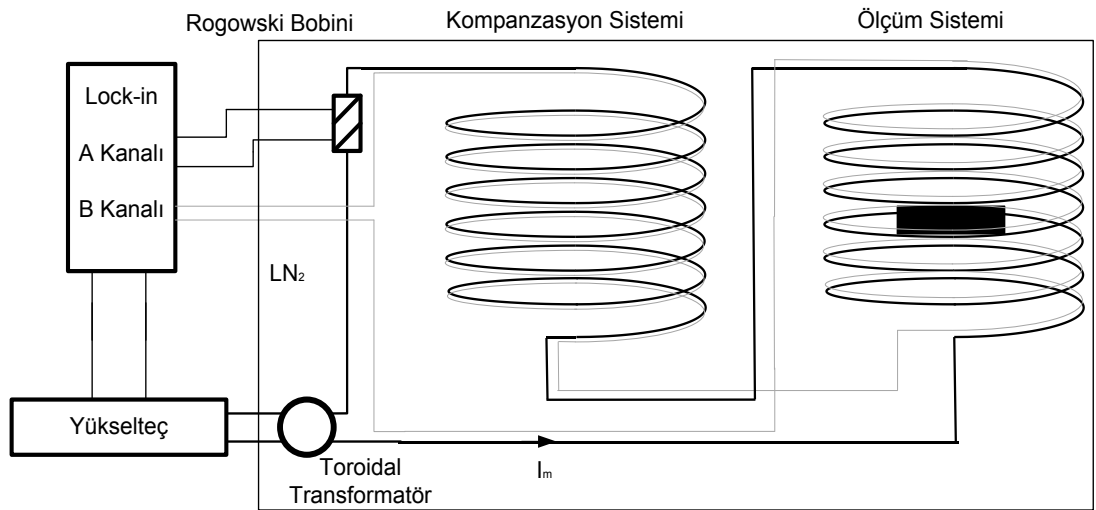


Şekil 4.3. AA Transport kaybını elektriksel ölçme sistemi

Güç kaynağı olarak QSC RMX 2450 Profesyonel Güç Amplifikatörü, kilitlemeli yükseltici olarak ise EG&G Instruments 7265 DSP kilitlemeli yükseltici kullanılmaktadır. Güç kaynağından elde edilen akım örneklerin kritik akımlarından çok küçük olduğundan akımı yükseltmek için toroidal transformatör kullanılır. Toroidal transformatör, süperiletken üzerinden akan akımın etkin değerini ölçmek ve kilitlemeli yükselticiye referans olacak rezistif gerilim sinyalini sağlar. Kaybı ölçülecek örnekte indüklenen gerilimi yok etmek amacıyla örneğin gerilim uçlarıyla kompanzasyon bobinin uçları anti-seri şekilde kilitlemeli yükselticiye bağlanır. Kilitlemeli yükseltici kullanımıyla ölçülen kayıp gerilimin etkin değeri değeri (omik referans gerilimle aynı fazda) yardımıyla hesaplanır.

4.4. Manyetizasyon Alternatif Akım Kaybı Ölçüm Sistemi

Çalışmada Manyetizasyon AA kayıplarını ölçmek için “calibration free” yöntemi [70] kullanılmıştır. Sistem AA bir kaynakla bobinlerin merkezlerinde şeritlerin geniş yüzeyine dik şekilde manyetik alan uygulanarak yapılmaktadır. Ölçüm sistemi iki eşdeğer yarış pisti (racetrack) tipi bobinin seri bağlanması ve bunlarla paralel fakat ters polaritede sarılmış ölçüm (pick-up) bobinlerinden oluşmaktadır. Bobinler Eddy kayıplarını engellemek adına ince, birbirinden izole edilmiş 16-19 bakır telden yapılmıştır. İçerisine örnek yerleştirildiğinde ölçüm sistemi malzemeden kaynaklanan kaybın dışındaki gerilimleri diğer kompanzasyon bobini sayesinde ölçmez. İçerisinde örnek bulunmadığında ölçülen sinyalin sıfırı göstermesi beklenir. Bobinlerin ideal olmaması, çevredeki gürültünün varlığı ve farklı materyallerin bulunması da bobinlerde ölçülen sinyallerin farklı olmasına sebebiyet verir. Bunun için sistem boş durumdayken ufak akımlarda ilave indüktif ve kayıp bileşenini sıfır yapmak için bakırla sarılmış küçük bir sinyal (pick-up) bobini kullanılır. Bu bobinin konumu ölçüm bobininden gelen sinyalin sıfıra olabildiğince düşürülmesiyle bulunur. Bobinin oluşturduğu manyetik alan değeri Rogowski bobinindeki akım ve bobinin mT/A değeri yardımıyla hesaplanır. Akım ve kayıp aynı faza getirilmekte ve örneğin indüktif ve gerçek kayıp bileşenleri için ölçümler yapılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada verilerin ölçülmesi için ara yüz olarak Labview programı kullanılmıştır.



Şekil 4.4. AA Manyetizasyon kayıplarını ölçmek için kullanılan “calibration free” sistemi [70]

Manyetizasyon kayıplarını ölçmek için kullanılan sistem Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Ölçümler 77 K sıvı azot sıcaklığında, kullanılan bobine göre 0-70 mT (etkin değer) aralığında 36 Hz, 72 Hz ve bazı özel durumlarda 144 Hz frekanslarda yapılmıştır.

Güç kaynağı olarak QSC RMX 5050 ve 1450 Profesyonel Güç Amplifikatörü ve kilitlemeli yükseltici olarak ise EG&G Instruments 7265 DSP kilitlemeli yükseltici kullanılmaktadır. Rogowski bobini sabiti 442080'dir. Bobinlerin sabiti ise 1,52 mT/A'dır.

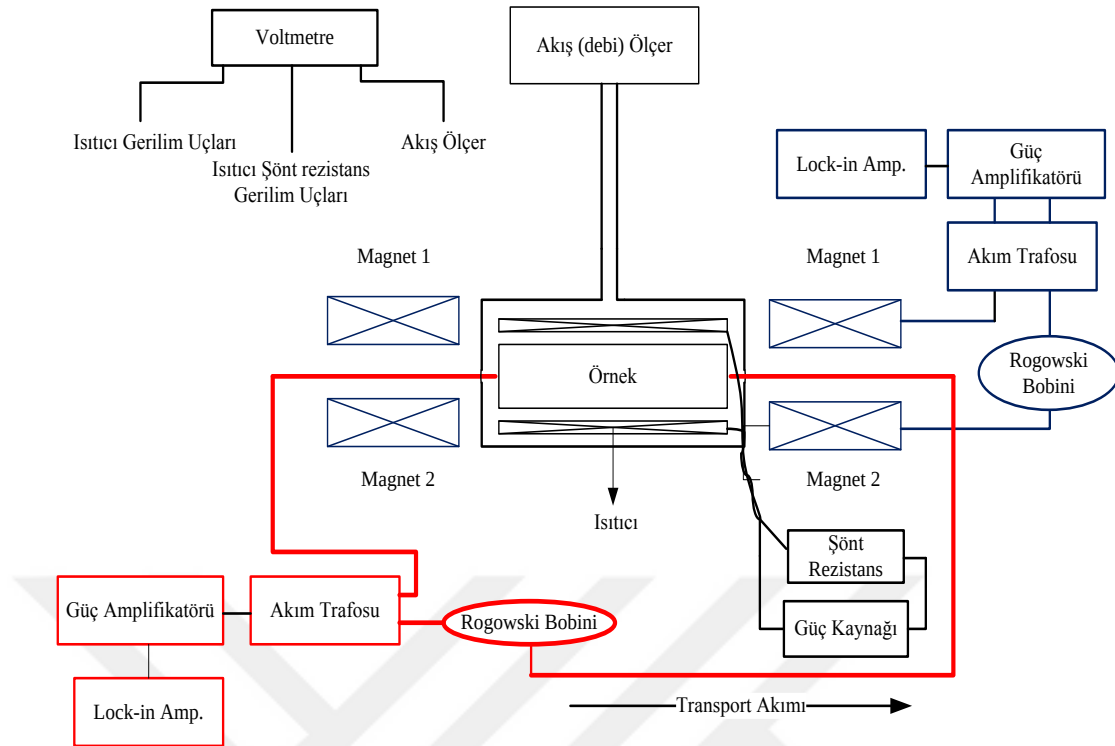
4.5. AA/AA Durum Altındaki Alternatif Akım Kaybı Ölçüm Sistemi

Çalışmada CORC kabloların alternatif bir transport akımı ve manyetik alan altındaki kayıplarını ölçmek amacıyla termal kaynatma bir yöntem kullanılmıştır.

Termal kaynatma yöntem AA kaybindan kaynaklı buharlaşan kriyojen gazını ölçen bir AA kayıp ölçme yöntemidir [101]. Gaz akış oranı ve ısı gücü arasındaki ilişkiyi belirlemek için gücü bilinen bir ısıtıcı kullanılır. Sistem üç ana kısımdan oluşur.

Birinci kısım AA transport akımının kabloya verildiği sistemdir. Verilen akım değeri bir güç amplifikatörü ve akım trafosu yardımıyla ayarlanırken, Rogowski bobiniyle de ölçülür. Kullanılan aletlerin sınır değerleri ve frekans değiştirildiğinde kompanzasyon değerine bağlı olarak sistemin verebileceği maksimum akım değişir. Güç kaynağı olarak QSC RMX 2450 Profesyonel Güç Amplifikatörü ve kilitlemeli yükseltici olarak ise EG&G Instruments 7265 DSP Lock-in Amplifikatörü kullanılmaktadır.

Sistemdeki ikinci kısım ise manyetik alanın üretildiği altı üstü 2 bobindir. Kablo, bu iki yarış tipi (racetrack) bobinin ortasına yerleştirilmiştir ve manyetik alan değeri rogowski bobini yardımıyla tespit edilmektedir. 36-72 Hz'de uygulanan manyetik alan değerleri 0 ila 100 mT arasında değiştirilebilmektedir. Uygulanan akım ile manyetik alanın aynı fazda olmasını sağlamak amacıyla kilitlemeli yükselticilerin referans kanalları kullanılır. Ölçüm düzeneği Şekil 4.5.'te gösterilmiştir.



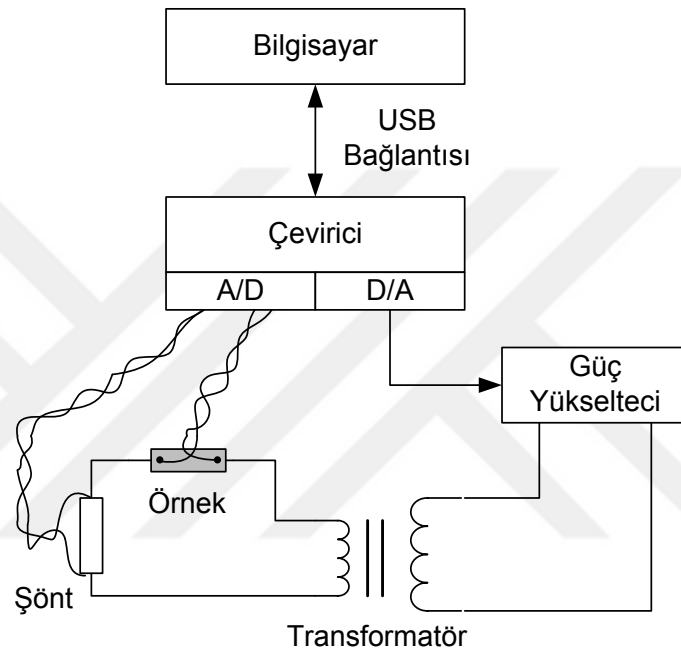
Şekil 4.5. AA/AA durum altında kayıpları ölçmek için kullanılan kalorimetrik sistem

Sistemin üçüncü kısmı kablunun da bulunduğu G10 malzemesinden yapılmış, üst kısmından buharlaşan gaz miktarının ölçüldüğü akış metreye bağlı bölümdür. Buharlaşan gaz miktarının karşılık geldiği güç miktarını kalibre edilmesi için kablo etrafına ek bir ısıtıcı sarılır. Bu ısıtıcı ek olarak bölme içerisine konulması yerine kablo şekline benzerlik göstermesi amacıyla kablo etrafına sarılır. Kablunun AA/AA durumundaki kaybindan dolayı buharlaştırdığı gaz miktarı ölçüldükten sonra transport akımı ve manyetik alan devre dışı bırakılır. Daha sonra kayıp değeri hesaplanması için ısıtıcı yardımı ile bir önceki durum ile aynı miktarda gaz buharlaştıran güç değeri ayarlanır. Bölme içine yerleştirilebilecek kablunun maksimum uzunluğu 15 cm'dir.

4.6. Kritik Akım ve Homojensizlik Ölçümlerinde Kullanılan Darbe Sinyal Sistemi

Bu çalışmada stabilize katmanına sahip şeritlerin kritik akımı ölçüldükten sonra stabilize katmanı bulunmayan şeritler DA yöntemi ile kritik akımları ölçülmek istenmiştir. Ölçümler sırasında şeritlerin ölçü aletine bağlanırken ve lehimleme işlemleri sırasında lehimleme bölgesinde meydana gelen sıcaklık artışı ve ölçüm sırasında akım şeritlere zarar vermiştir. Bu sebeple stabilize katmanı bulunmayan

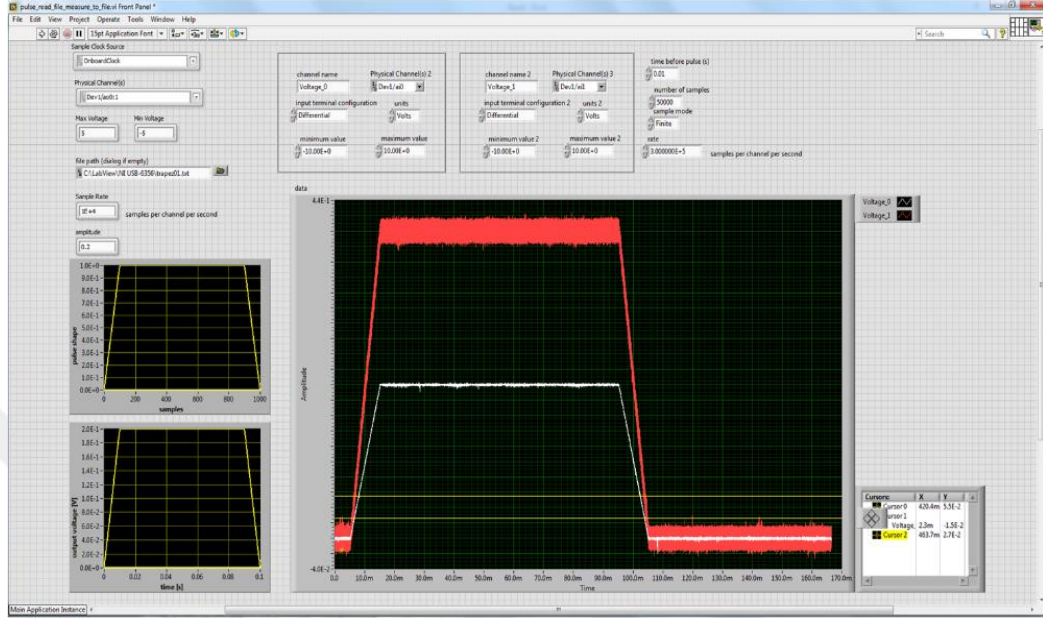
şeritlerin kritik akımlarını şeritlere zarar vermeden ölçmek için yeni bir ölçüm sistemine ihtiyaç duyulduğu açık olarak görülmüştür. Bu amaç ile darbe ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Ölçüm sisteminde bir güç yükselteci, akım transformatörü, şönt rezistans ve veri toplama kartı bulunmaktadır. Sistem oluşturulduktan sonra ölçümlerde kullanılmak üzere darbe sinyallerinin şekli, genliği ve uzunluklarını belirlenir.



Şekil 4.6. Kritik akım ölçümlerinde kullanılan darbe sistemi bileşenleri

Ölçümler Labview programı tarafından takip edilmiştir. Bilgisayar, içerisinde analog-dijital (A/D) ve dijital-analog (D/A) çeviriciler bulunduran NI USB-6356 veri toplama kartına USB bağlantısı ile bağlanmaktadır. D/A çevirici hazırlanan nümerik darbe şeklini -10V,+10V aralığındaki analog bir gerilime dönüştürmektedir. D/A çeviricisinin çıkışı güç yükseltecini kontrol etmektedir. Güç kaynağı olarak KEPCO BOP 20-50MG cihazı gerilim kaynağı seçeneğinde kullanılmıştır. Bu kaynağın maksimum çıkış akımı 50A'dır. Daha yüksek akımlara ulaşmak ve sistemin esnekliğini arttırmak amacıyla toroidal bir akım transformatörü kullanılmıştır. Akım şönt bir rezistans ile ölçülmektedir ($R_{sh} = 0,239 \text{ m}\Omega$, $L_{sh} = 3,7 \text{ nH}$). Şönt ve örnek üzerindeki gerilimleri ölçmek için A/D çevirici kullanılmıştır. Veri toplama kartı

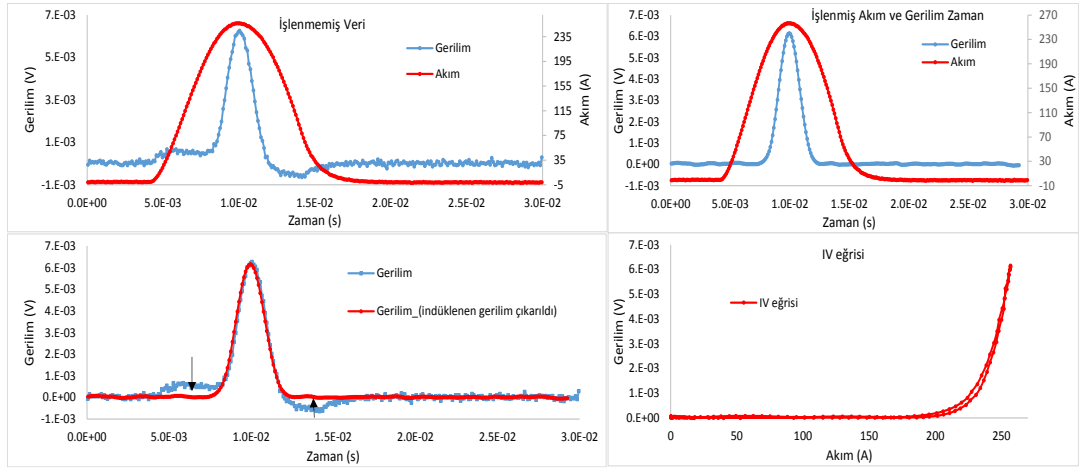
eşzamanlı 8 girişi 1,25mega_örnek/saniye 16 bit çözünürlükte ve 2 analog çıkışı 3,33 mega örnek/saniye 16 bit, +10/-10 V aralığında örnek alabilmektedir.



Şekil 4.7. Darbe ölçüm programı için görsel ara yüz

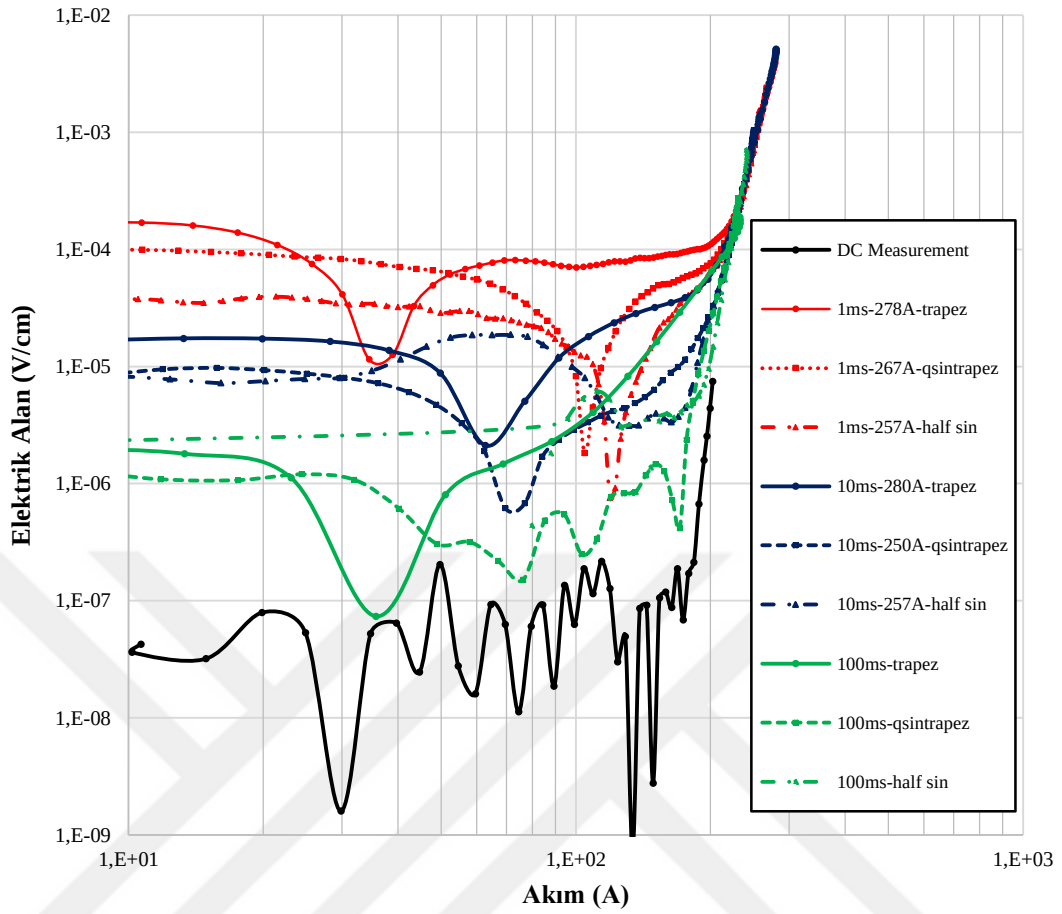
Şekil 4.7.'de güç yükseltecinin test edilmesi sırasında kullanılan programın ara yüzü gösterilmiştir. Beyaz eğri yükseltecin giriş gerilimi iken kırmızı eğri yükseltecin çıkış gerilimidir.

Kritik akımı belirlemek için en iyi sinyal çeşidini ve süresini bulmak için 1-100 ms aralığında sinüs, yarım sinüs, çeyrek sinüs, lineer, trapez ve çeyrek sinüs-trapez-çeyrek sinüs dalga şekilleri kullanılmıştır. Akım ve gerilim değerleri DA voltmetreye kıyasla daha hızlı veri toplama kartıyla ölçülmüştür. Ham verileri elde ettikten sonra I-V eğrilerini elde etmek için verilerde aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmektedir. Öncelikle her 10 noktanın ortalaması alınarak bir nokta oluşturulup bu işlemten sonra sinyalin içinde bulunan indüklenmiş gerilim değerleri çıkartılmıştır. Daha sonra şekilde görüldüğü gibi I-V eğrileri çizdirilmektedir.



Şekil 4.8. Darbe sisteminde ölçüm sonrası verilerin işlenmesi

DA ölçüm sistemine kıyasla daha yüksek gürültü sebebiyle kritik akım değerini belirlemek için iki yaklaşım kullanılmıştır. İlk yaklaşım elektrik alan olarak daha yüksek bir kriter kullanmaktır (10^{-4} V/cm). Diğeri ise elde edilen I-V grafiğinin ekstrapole edilerek geleneksel kriter olan 1 μ V/cm'deki akım değerini bulmaktır. Ekstrapolasyonun sebebi, gerçek I-V eğrisi gürültü sebebiyle elde ettiğimiz grafiğin içinde yer almaktadır sadece ölçüm cihazının hassasiyeti yeterli olmamaktadır. Log-log eksenlerde çizilen I-V grafiğinin ekstrapolasyonu alınarak kritik akım değeri elde edilebilmektedir. DA ölçüm sistemiyle karşılaştırmak amacıyla kritik akım değeri 190 A stabilize katmanı olan başka bir şerit ile doğrulama yapılmıştır. Farklı şekiller ve süreler kullanılarak sistemimiz için en uygun şeklin yarım sinüs olduğu görülmüştür.



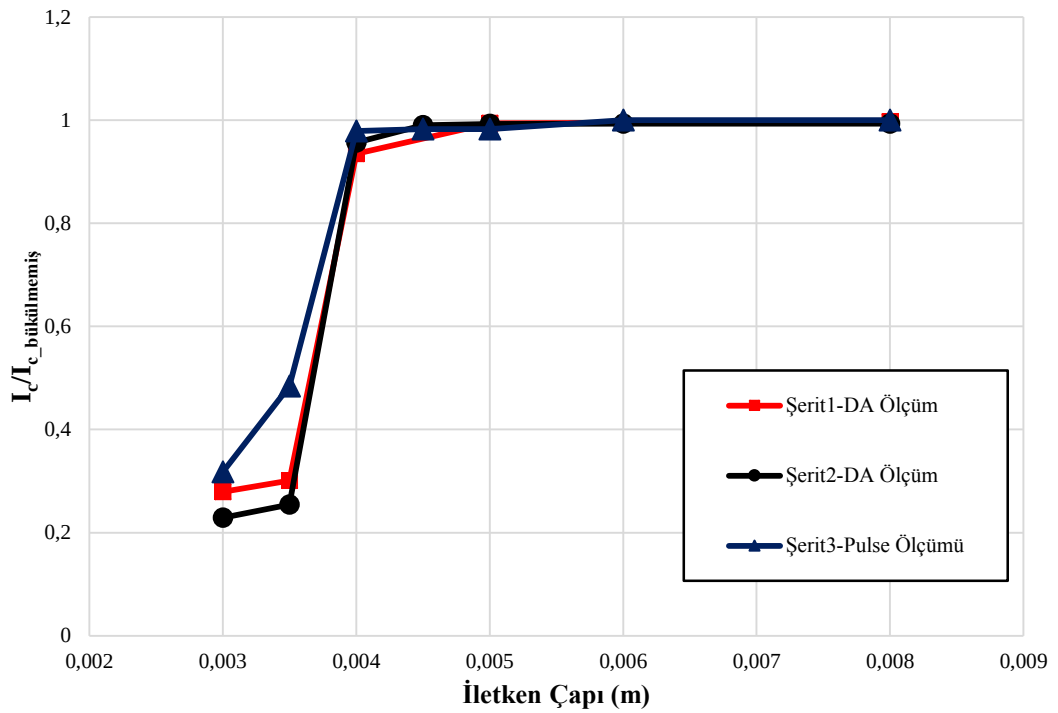
Şekil 4.9. Yarım sinüs darbesinin farklı uzunluk ve genliklerdeki I-E grafikleri

Yarım sinüs dalgasını kullanmaya karar verdikten sonra Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi kriter daha yüksek bir değer (10^{-4} V/cm) seçildiğinde sinyalin genliği ve süresinin etkisinin azaldığı görülmüştür. Stabilize katmanı olmayan şeritlerimizin sıcaklığa hassas olduğunu bildiğimizden 10 ms'den uzun sinyaller kullanılmamaya karar verilmiştir. Elde edilen eğriler ekstrapole edildiğinde kritik akım değerleri 188-193 A aralığında olduğu görülmüştür.

- Darbe Sinyal Ölçüm Yönteminin Doğrulanması:

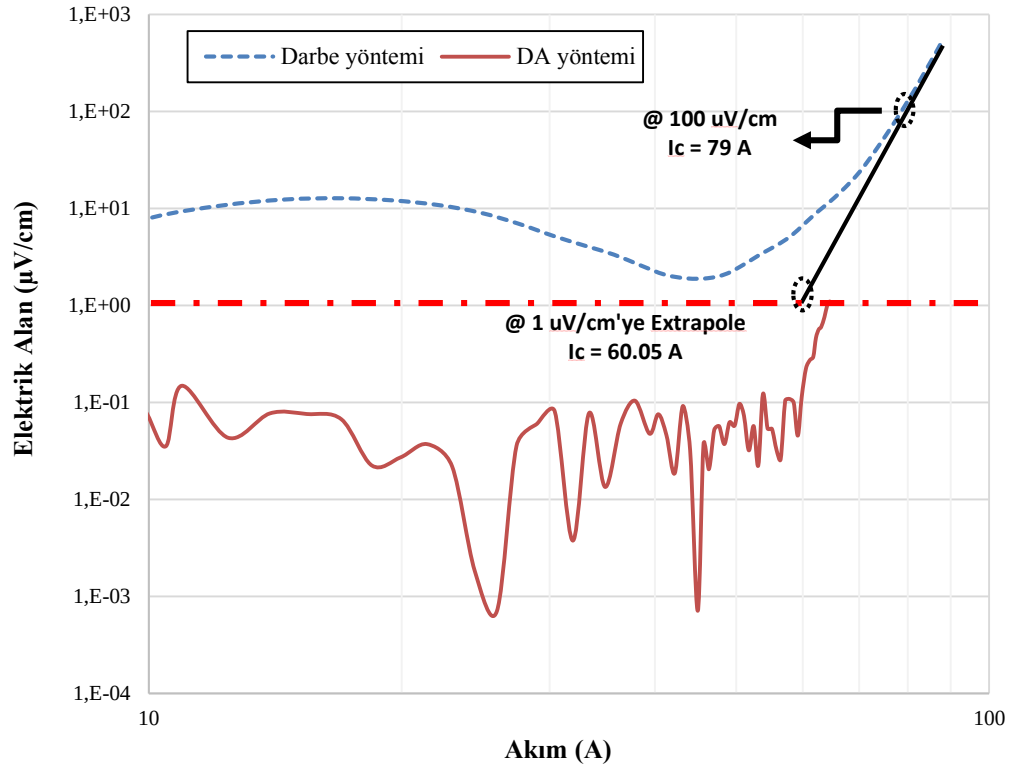
Ölçüm sonuçlarımızın doğruluğunu göstermek için önceden iletken çapı-kritik akım grafiğini elde ettiğimiz bir örneğin darbe sinyali sistemimizle gerçekleştirerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Önceden kullanılan iletken çaplarında ölçüm sonuçları kullanılarak kriter 10^{-4} V/cm olarak seçilmiştir. Bu kriteri kullanmamızın sebebi

deneyde yüksek kriterde tüm sonuçlar aynı kritik akım değerini göstermektedir. Ayrıca diğer kriterin kullanımı %5 hata payına sahiptir. Bilindiği üzere bükme deneylerinde Y ekseninde kullanılan değer kritik akım değeri değil, kritik akımın normalize edilmiş değeridir. Bükülmüş şeritlerin gerçek kritik akım değerleri düz şeritlerin DA sisteminde ölçülen kritik akım değerlerinin darbe ölçümüyle elde edilen Şekil 4.10.'da gösterilen katsayı ile çarpılmasıyla elde edilebilir. Şekil 4.10.'da görüldüğü üzere iki yöntem ile elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir.



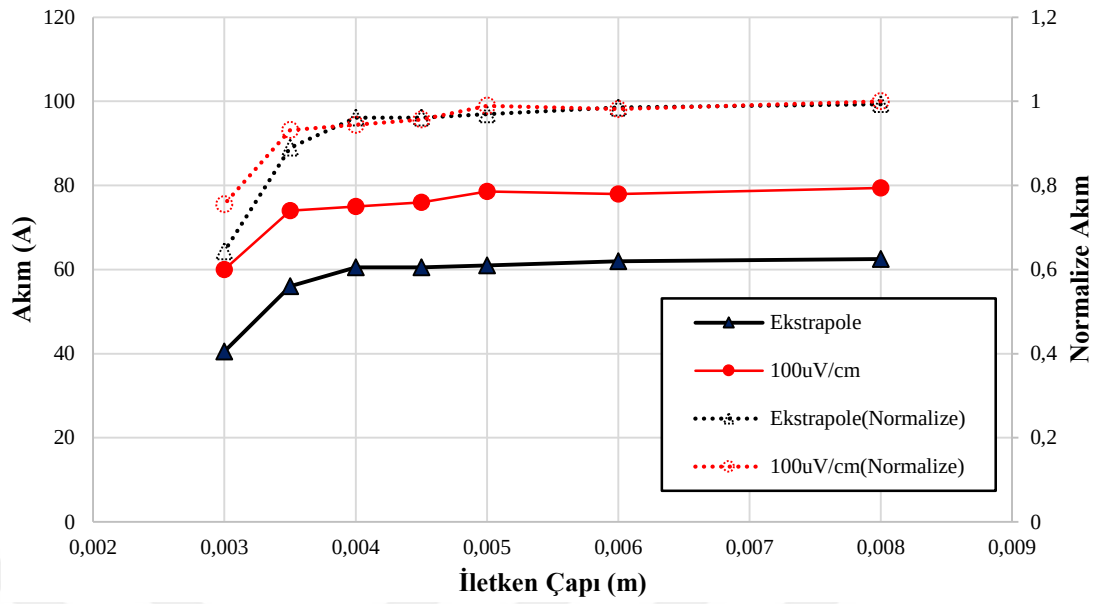
Şekil 4.10. DA ölçümü ve darbe sinyal ölçümü ile elde edilen bükme sonuçlarının karşılaştırılması

Darbe sisteminin kullanılabilirliği görüldükten sonra örnek bir şeritin kritik akımı DA ve darbe yöntemiyle ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 4.11.'de gösterilmiştir. Önceden belirtildiği üzere darbe yöntemiyle elde edilen grafiğin ekstrapole ederek bulunan kritik akım değerinin %5-10 hata payıyla bulunmaktadır. DA ölçüm sonucu 63,1 A olan örnek darbe yöntemiyle 60,05 A bulunmuştur.



Şekil 4.11. DA ve darbe sinyal ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Ölçümlerde hangi kriterin kullanılacağı ölçüm amacımıza bağlı olarak değişebilmektedir. Kritik akımını tespit etmek istediğimizde ekstrapole kriteri gerçek sonuca daha yakındır. Fakat bükme deneylerinde y eksenini genellikle normalize edilmiş akım değeri olarak kullanılmaktadır. İki kriterle elde edilmiş sonuçlar Şekil 4.12.'de gösterilmiştir. Kesik çizgiler normalize edilmiş kritik akımları temsil etmektedir. Kritik akım değerleri farklı bulunsun da bükme karakteristikleri normalize edildiklerinde benzerdir.



Şekil 4.12. Düz çizgiler: akım-iletken çapı; kesikli çizgiler: normalize edilmiş akım-iletken çapı grafikleri

4.7. Deneylerde Kullanılan Şeritlerin Özellikleri

Çalışmada kullanılan şeritler 4 farklı markaya aittir. A grubu olarak adlandırdığımız şeritler kimyasal yöntemlerle (CSD) elde edilmiş Avrupa üretimi şeritlerdir. B grubu şeritler RCE-dr tekniği ile üretilmiş Asya, C grubu tampon (buffer) tabakaları IBAD süperiletken tabakaları MOCVD yöntemiyle üretilmiş Amerika ve D grubu şeritler ise PVD (physical vapor deposition) yöntemiyle üretilmiş Çin yapımı şeritlerdir. Çalışmamızda A ve B şeritlerine önem verilerek Avrupa veya Asya şeritleriyle CORC kablo üretilmesi hedeflenmiştir. A grubunda 5 adet şerit bulunmaktadır. A1 bükme deneylerinde kullanılmak üzere, A2 ve A3 şeritleri 4 ve 6 mm olup 10 mm olan A4 şeridinden kesilerek elde edilmiştir. Alttaş malzemesi manyetik olmayan Ni ve %9 tungstenden yapılmıştır. A5 ise yine 4mm genişliğe sahip fakat alttaş malzemesi ferromanyetik olan %5 tungsten-Ni malzemesindendir.

B grubunda ise 3 şerit mevcuttur ve hepsi 4 mm genişliğe sahiptir. B1 ve B3 hastelloy alttaşa B2 ise paslanmaz çelik alttaşa sahiptir. C kodlu şerit 4mm genişlikte olup karşılaştırma amacıyla bazı deneylerde kullanılmıştır. C grubu malzeme hakkında çok sayıda çalışma mevcut olup yapılan yayınların çoğunluğu bu şeritlerden üretilen kablolar üzerinedir.

D kodlu şeritlerde farklı 3 çeşit bulunmaktadır. FCL yapımında kullanılması planlanan bu şeritler, normal durum direnci yüksek, kalın stabilize tabakalı farklı materyallerden oluşmuş şeritlerdir. Bu şeritler ile stabilize katmanının kalınlığı ve malzemesinin AA kayıplara etkileri incelenmiştir. Tablo 4.1.'de örneklere ait özellikler verilmiştir.



Tablo 4.1. Deneysel ölçümlerde kullanılan örneklerle ait özellikler.

Örnek Adı	Genişlik/Süperiletken (mm)	Alttaş Malzeme	Alttaş Kalınlığı (μmm)	Stabilize Katman Kalınlığı (μmm)	Stabilize Katman Materyali	Süperiletken Tabaka Kalınlığı (μmm)	Kritik Akım (A)
A1	4	Hastelloy	50	1	Gümüş	1	60
A2	4	Ni-%9tungsten	50	1	Gümüş	1	45
A3	6	Ni-%9tungsten	50	1	Gümüş	1	90
A4	10	Ni-%9tungsten	50	1	Gümüş	1	190
A5	4	Ni-%5 tungsten	50	1	Gümüş	1	63
B1	4	Hastelloy	50	20	Gümüş-Bakır	1	220
B2	4	Paslanmaz Çelik	100	20	Gümüş-Bakır	1	235
B3	4	Hastelloy	50	20	Gümüş-Bakır	1	250
C1	4	Hastelloy	50	20	Gümüş-Bakır	1	220
D1	4.75/3.33	Hastelloy	50	75	Bakır	1	80
D2	4.75/3.33	Hastelloy	50	75	Brass	1	80
D3	4.75/3.33	Hastelloy	50	75	Paslanmaz Çelik	1	80

BÖLÜM 5. ŞERİT ve CORC KABLOLARIN DA-AA KARAKTERİSTİKLERİ

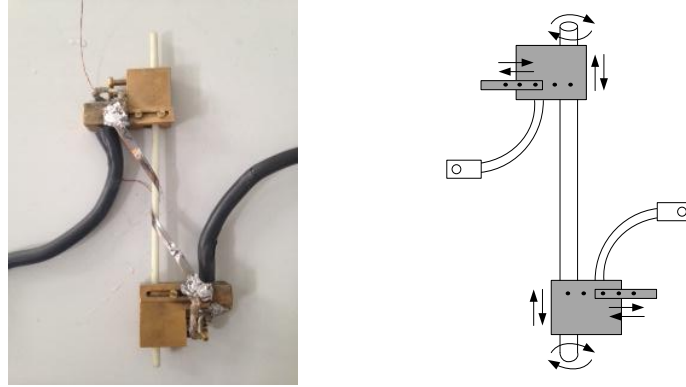
Bu bölümde farklı özelliklere sahip şerit ve CORC kabloların, DA elektriksel özellikleri ve AA kayıp karakteristikleri gösterilmiştir. Kritik akımlar 4 kontak yöntemiyle ölçülmüştür. Bu yöntemle kritik akımı ölçülemeyen şeritlerde darbe ölçüm sistemi kullanılarak kritik akımları tespit edilmiştir. Şeritlerin mekanik karakteristikleri göstermek için bir bükme aparatı geliştirilmiştir. Ayrıca bu şeritlerin analitik, nümerik ve deneysel AA kayıpları ölçülmüştür. Daha sonra Asya üretim şeritler kullanılarak bakır iletkene sarılmış CORC kablo üretilmiştir. Gerçek uygulamalarda kullanılmaya daha yakın olan ilk bakır iletkene sarılan ve Asya şeritlerinden yapılan CORC kablonun üretim aşamaları detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Kablodaki şeritlerin sarma işleminden sonra kritik akım değerlerinin azalmamasının sebebi hem geometrik hem de manyetik açıdan açıklanmıştır. Kablonun transport kayıpları ve manyetizasyon kayıpları ölçülmüştür. Ortadaki iletkenin bakır olarak kullanılmasının uygunluğu, DA karakteristiklerine, transport ve manyetizasyon kayıplarına etkisi incelenmiştir. Kablo yapımında önemli olan kontak dirençleri ve şeritler arası akım dağılımı deneysel ve analitik bir model ile gösterilmiştir. Son olarak CORC kabloların bobin uygulamalarında karşılaşılabilecekleri AA manyetik alan/AA transport akımı altındaki toplam AA kayıpları kalorimetrik bir yöntem ile ölçülmüştür.

5.1. Şeritlerin Kritik Akım ve Bükme Ölçümleri

CORC kabloların esnek, yüksek akım yoğunluğu, kullanılan şeritlerin mekanik özelliklerinin güçlü olması, düşük AA kayıpları ve kablolama işleminde akım yoğunluğunda düşük oranda azalma gerçekleşmesi gibi güç uygulamalarında kullanılmalarını sağlayan birçok avantajı vardır. Bu bölümde yapılan çalışma ve

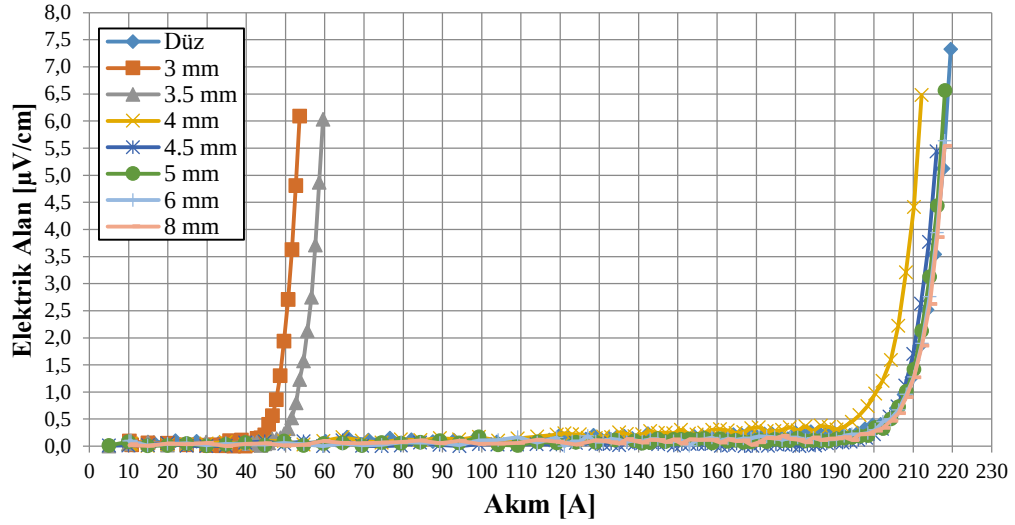
deneysel ölçümlerin temel amacı stabilize katmanı olmayan A ve olan B örneklerimizin elektriksel ve mekanik özelliklerini tespit etmektir. Stabilize katmanı olmayan şeritlerin incelenmesinin sebebi bu malzemeler ile yapılan CORC kabloların henüz olmaması ve fiyat, esneklik gibi avantajlara sahip olabileceği öngörüsüdür. Bu konuda çalışma olmaması bilgi eksikliğine sebep olmaktadır. CORC kablonun yapımından önce iletken çapı-kritik akım ilişkisi, $I_c(B, \alpha)$ ölçümleri, şeritlerin mekanik özellikleri ve şeritlerin AA kayıpları ölçülür. Bu ölçümler kablo modellenmesi ve hazırlanmasında oldukça faydalıdır. Bu ölçüm sonuçları ile şeritlerin mekanik stres altındaki davranışları ve kritik akım yoğunluğunun azalmaya başladığı iletken çapı tespit edilir. Elde edilen bu iki sonuç kablonun kritik akım yoğunluğunu etkilediğinden CORC kablo üretiminde önemli parametrelerdir. İletken çapının yanı sıra şeritlerin iletken üzerine lehimleme açıları da değiştirilerek etkisi incelenmiştir.

Bükme deneylerinde kullanılan ölçüm düzeneği Şekil 5.1.'de gösterilmektedir. Bu ölçüm aleti ile şeritlerin kablolama işlemi sırasında uğrayacağı mekanik gerilme ortamı oluşturulmaktadır. Ölçümlerde farklı iletken çapları ve lehimleme açılarının etkileri incelenmiştir.



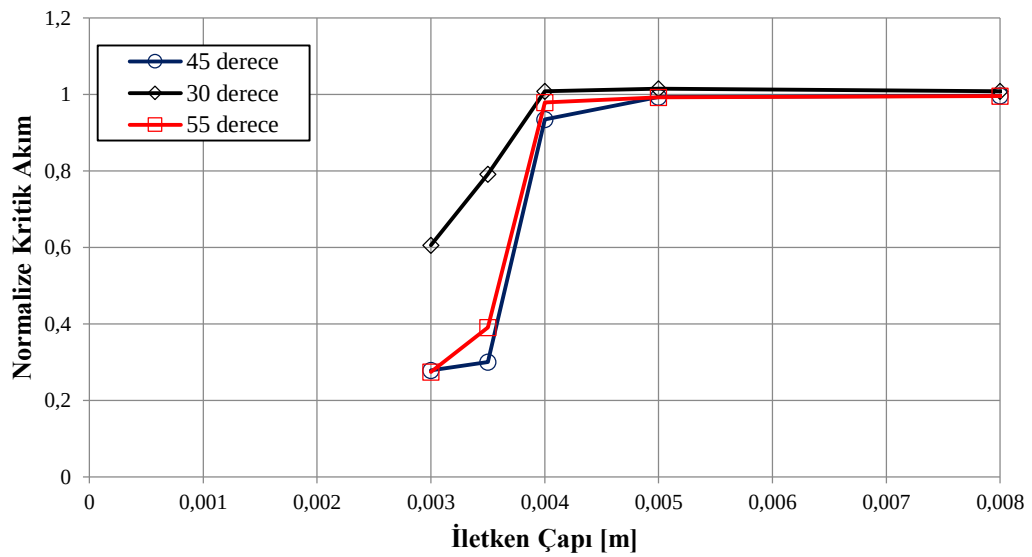
Şekil 5.1. Şeritlerin farklı iletkenlere bir tur sarılmış kritik akım ölçüm düzeneği

Kritik akım ölçümlerinde A şeritlerinde Bölüm 4'te anlatılan darbe ölçüm sistemi B şeritlerinde ise klasik DA 4 kontak yöntemi kullanılmıştır. Aşağıdaki şekilde kritik akımı 210 A olan 4 mm genişliğindeki B1 örneğimizin 45 derece lehimleme açısıyla farklı iletken çaplarındaki kritik akım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.2. B1, 45 derece lehimlenmiş; kritik akım-iletken çapı ilişkisi

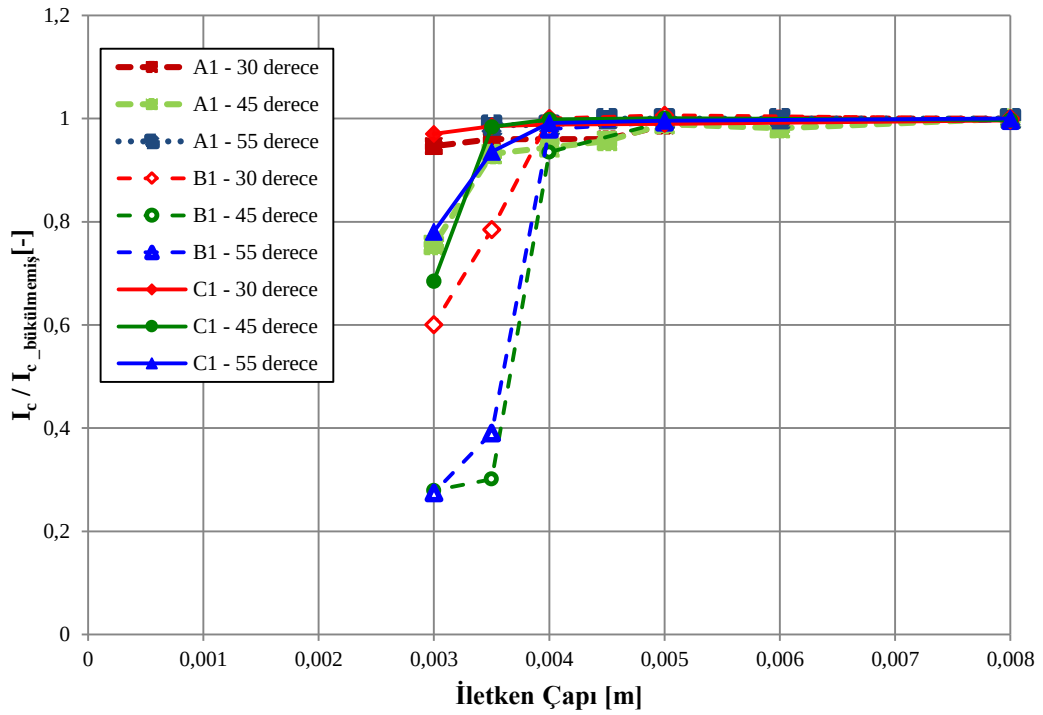
Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi B1 örneği 3,5 mm çapındaki iletkene bir tur sarıldığında kritik akım değeri yaklaşık %70 azalır. B1 örneğinin mekanik özellikleri ölçüldükten sonra stabilize katmanı bulunmayan A1 örneğinin farklı iletken çaplarındaki kritik akımları aynı şekilde DA yöntemi ile ölçülmeye çalışılmış ancak ölçümler sırasında şeritlerin ölçü aletine bağlanması ve lehimleme işlemleri sırasında lehimleme bölgesinde meydana gelen sıcaklık artışı ile ölçüm sırasında uygulanan akım şerite zarar vermiştir. Bu sebeple A grubu şeritlerin kritik akımlarını şeritlere zarar vermeden ölçmek için yeni bir ölçüm sistemine ihtiyaç duyulduğu açık olarak görülmüştür. Bu amaç ile Bölüm 4'te anlatılan darbe ölçüm sistemi kullanılmıştır.



Şekil 5.3. B1 örneğinin farklı lehimleme derecelerinde bükme deney sonuçları

Farklı lehimleme açılarının kritik akıma etkisi ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 5.3.'te gösterilmiştir. Kriter ve ölçüm yöntemi karar verildikten sonra darbe yöntemiyle A markalı şeritlerin sonuçları da elde edilmiştir.

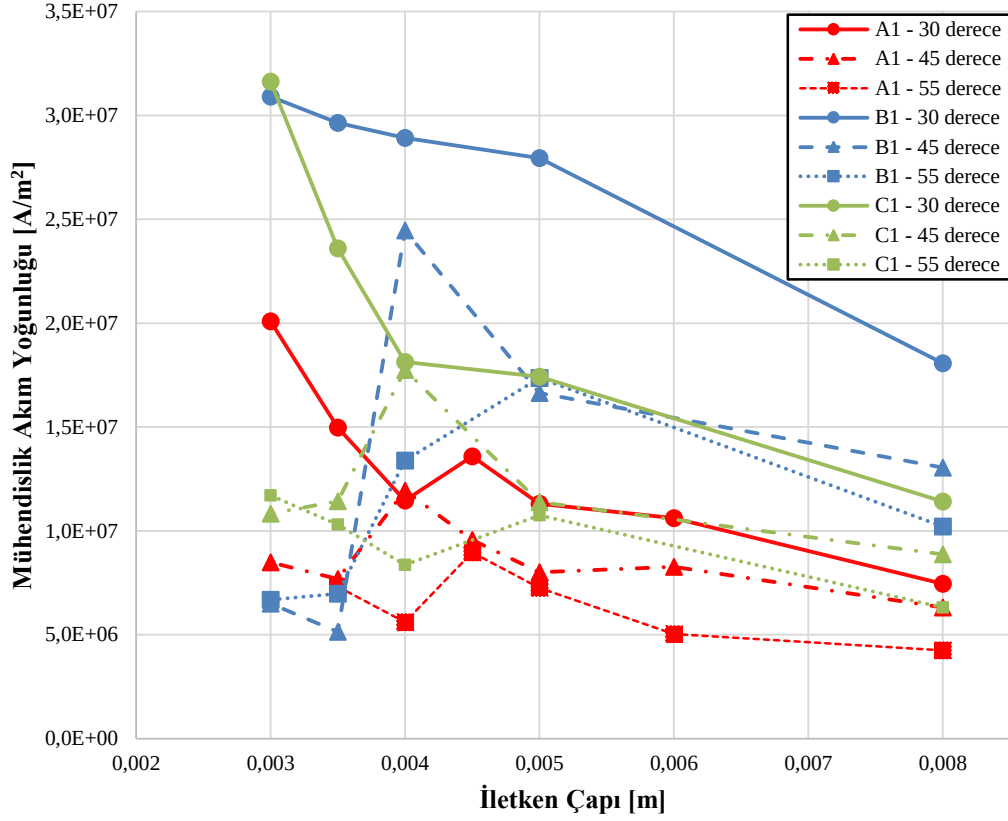
Daha detaylı bir karşılaştırma yapabilmek için A1, B1 ve C1 örnekleri farklı lehimleme açılarıyla bükme testinden geçirilmiştir.



Şekil 5.4. Farklı marka şeritlerin iletken çapı-kritik akım grafikleri

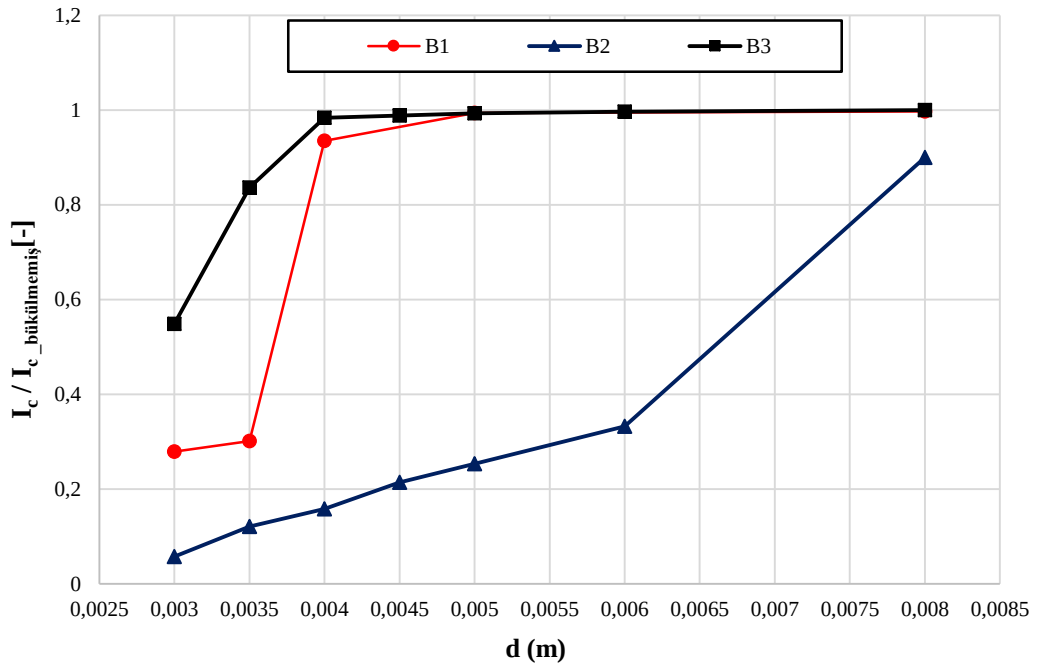
Şekil 5.4.'te 3 farklı markaya ait bükme deney sonuçları gösterilmiştir. Çalışmamızda Asya veya Avrupa şeritlerin kullanımıyla bir kablo üretilmesi hedeflenmektedir. C şeritler birçok çalışmada tercih edilmesinden dolayı karşılaştırma amaçlı koyulmuştur. A koduna sahip şeritler düşük çaplarda çok iyi mekanik özellikler gösterse de lehimlemede karşılaşılabilecek sorunlar, mekanik anlamda dışarıdan bir darbe aldığında kırılma olmaları ve yapılması planlanan CORC kablonun iletken çapının 6-7 mm olacak olması sebebiyle tercih edilmemiştir. Ayrıca bu şeritlerde stabiliz katmanı bulunmaması lehimleme işlemlerinde zorluk çıkarmıştır. Şekil 5.4.'te görüldüğü gibi tüm şeritler 5 mm iletken çapında benzer özellikler göstermişlerdir ve kritik akımda %5'ten fazla azalma olmamıştır. Kablo yapımında kritik akım azalımı konusuyla karşı karşıya gelmemek için güvenli iletken çap aralığı 5,5-6,5 mm seçilmiştir.

CORC kablo yapım aşamasında şeritlerin merkez iletkene lehimlenme açılarının bir katmana sığacak şerit sayısını değiştirdiği tespit edilmiştir. Şerit sayısının değişmesi kritik akım yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. Kablo kritik akımlarının kablo kesitine bölünmesi ile mühendislik kritik akım yoğunluğu elde edilmektedir. Lehimleme açısının mühendislik kritik akım yoğunluğuna etkisi Şekil 5.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı marka şeritler ile yapılacak CORC kabloların mühendislik akım yoğunluklarının karşılaştırılması

Kablo yapımında kullanılacak şerit seçiminde bükme deneyleri dikkate alındığında A örnekleri daha iyi özellik gösterebilirler de, stabilize katmanının olmayışı ve ölçümlerde lehimleme işleminin şerite zarar vermesi gibi nedenlerden dolayı B örneklerinin kullanımı ilk aşamada uygun görülmüştür. 3 farklı B marka şerit için bükme deneyleri tekrar yapılmıştır.



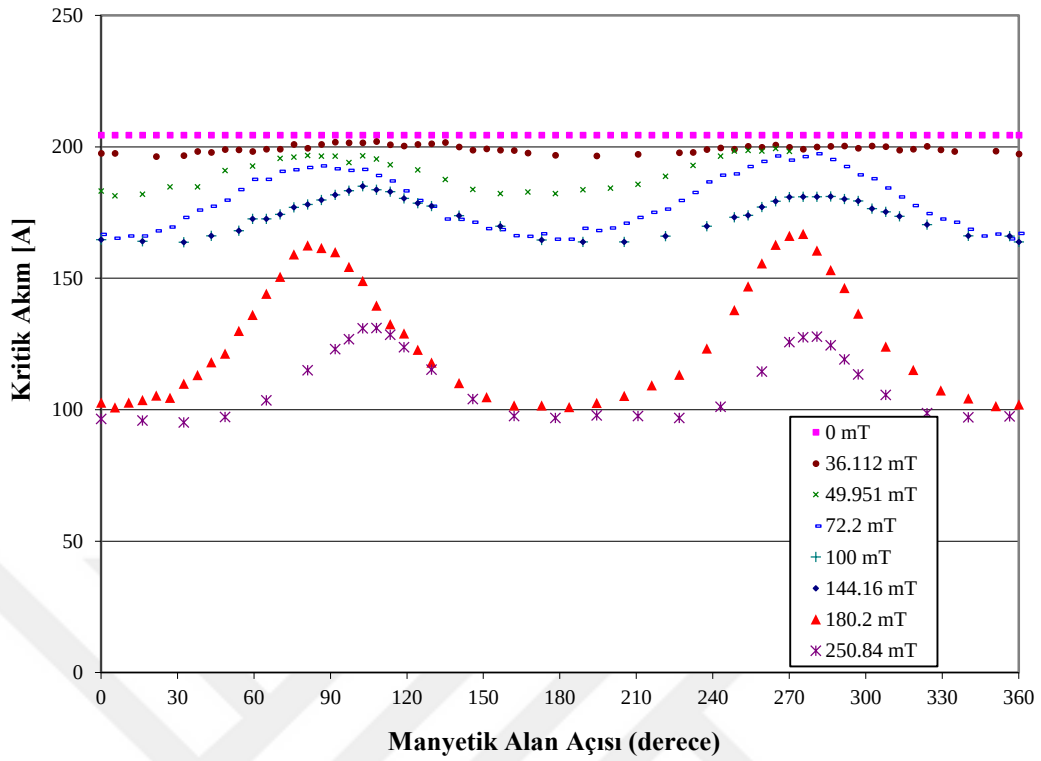
Şekil 5.6. B1, B2 ve B3 örneklerine ait iletken çapı-kritik akım eğrileri

Şekil 5.6.'daki sonuçlardan yola çıkarak 100 µm paslanmaz çelik olarak alttaş malzemesi ile oluşturulan B2 örneğinin gerilmeye karşı daha hassas olduğu ve mekanik özelliklerinin diğer iki örneğe göre daha düşüktür olduğu gözlemlenmiştir.

C şeritlere alternatif olarak düşünülen şeritler arasında gerek kritik akımı gerekse mekanik özellikleri sebebiyle üstünlükleri bulunan B3 örneğinin seçilme olasılığı kuvvetlenmiştir.

5.2. Şeritlerin I_c (B,alfa) Ölçümleri

Şekil 5.7.'de CORC kablo yapımında kullanılan şeritin kritik akım - manyetik alan yönü ilişkisi verilmiştir. Bu ölçüm Bölüm 4.2.'de anlatılan yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Şerite farklı açılarda, farklı manyetik alan değerleri uygulanarak kritik akımındaki değişimler tespit edilmiştir. Sıfır derece şeritin geniş yüzeyine dik anlamına gelmektedir.



Şekil 5.7. B3 malzemesinin kritik akım – manyetik alan yönü ilişkisi

Deney sonuçları nümerik çalışmalarda CORC kablunun modellenmesinde kullanılır.

5.3. Şeritlerin Manyetizasyon AA Kayıpları

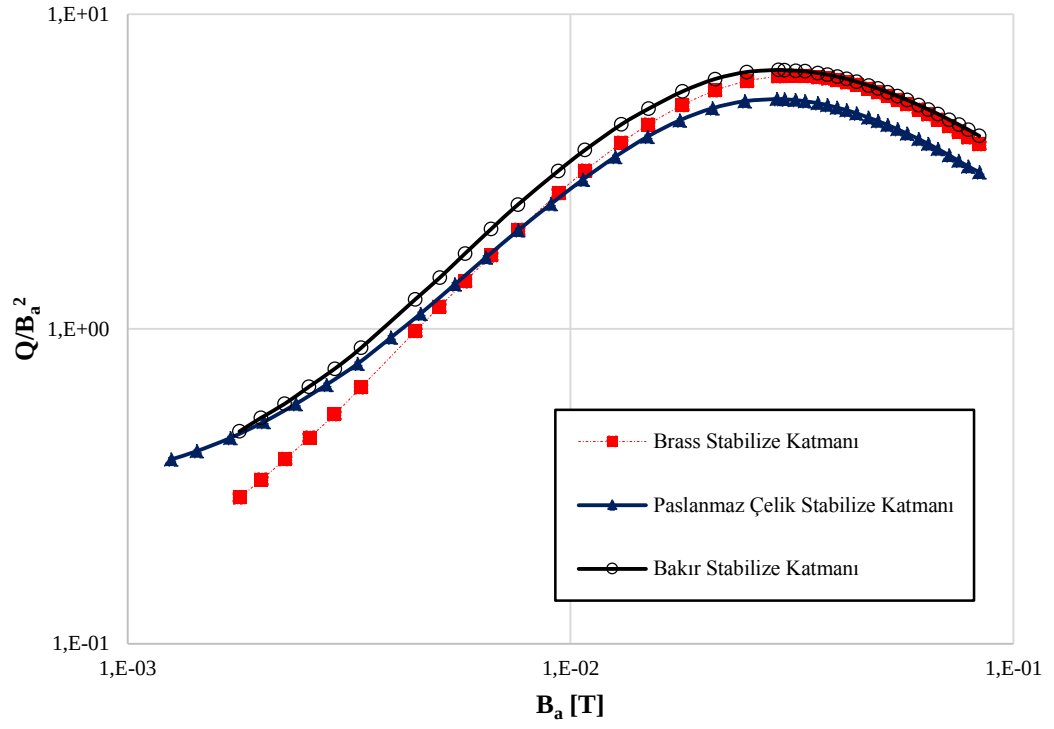
Bu çalışmanın amaçlarından birinin Amerikan yapımı şeritlerden üretilen CORC kablolar yerine alternatif olacak Avrupa veya Asya üretimi şeritler ile CORC kablo yapımı olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Bölüm 5.1.'de bu şeritlerin bükme deneyleri ile mekanik özellikleri incelenmiş ve kablo yapımına en uygun olabilecek örneklerin B markalı şeritler olduğu tespit edilmiştir. Bu bölümde CORC kablo üretiminde kullanılması düşünülen Avrupa (A) veya Asya (B ve D) şeritlerin AA manyetizasyon kayıpları incelenmiştir. Ek olarak şeritlerde AA manyetizasyon kayıplarını etkileyen parametreleri anlamak için ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde stabilize malzemesinin, şerit genişliğinin, şerit üretiminde alttaş malzemesinin manyetik veya manyetik olmayan malzemelerden üretilmesinin kayıplara olan etkileri incelenmiştir.

Bu bölümde örneklerin manyetizasyon AA kayıplarını ölçmek için “calibration free” [70] yöntemi kullanılmıştır. Ölçümlerimiz 77 K sıvı azot sıcaklığında, kullanılan bobine göre 0-100 mT (etkin değer) aralığında 36 Hz, 72 Hz ve bazı özel durumlarda 144 Hz frekanslarda yapılmıştır.

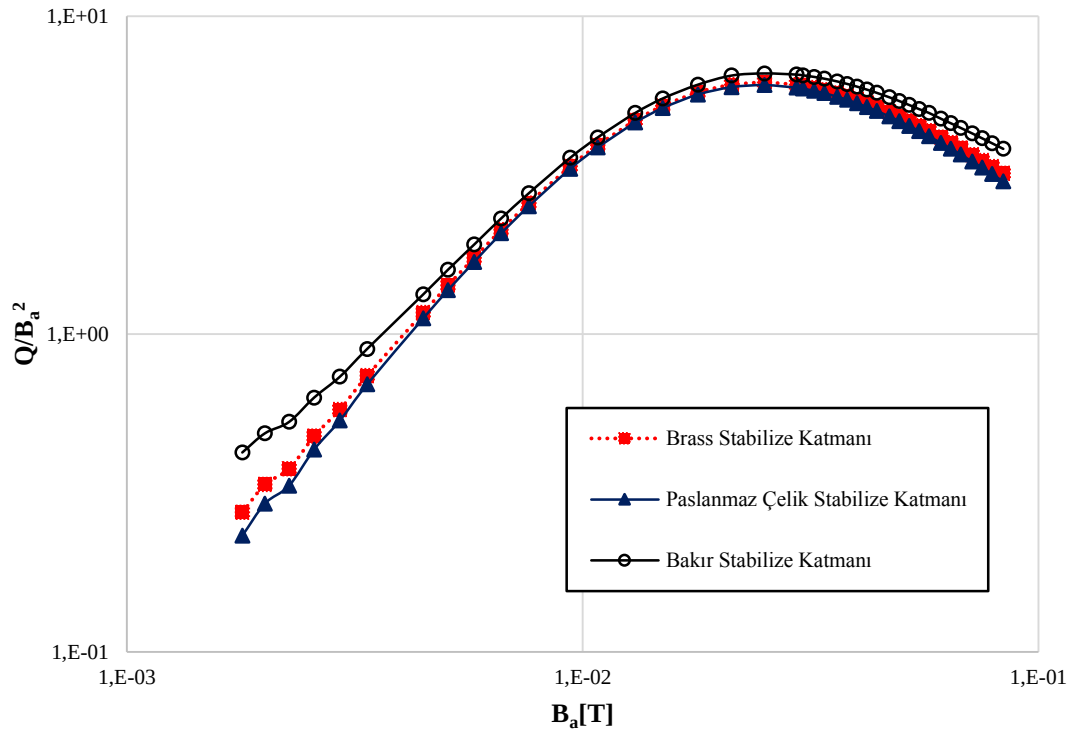
Şeritlerin farklı genişlik, alttaş malzeme, stabilize malzemesi ve kalınlığının olmasının AA manyetizasyon kayıplarına etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.

Öncelikle D grubu şeritlerimiz kullanılarak farklı stabilize malzemelerinin AA kayıplarına etkisi incelenmiştir. Bu şeritler önceden belirtildiği üzere FCL için üretilmiş Çin yapımı şeritlerdir. FCL’lerde normal durum direnci önemli olduğundan normalden (20 μ m) daha kalın stabilize katman ve etkisi incelemek için farklı malzemelerde (bakır-D1, brass-D2, paslanmaz çelik-D3) üretilmişlerdir. Bu üç örneğin kritik akımı 80 A’dır. Genişlikleri 4,75 mm olup süperiletken tabakanın genişliği 3,33 mm’dir. Kalan boşluklar lehim ile kapatılmaktadır.

Şeritlerdeki stabilize katmanının etkisinin rahat görülmesi için çift taraflı 75 μ m stabilize katmanı bulunmaktadır. Sıvı azotta stabilize malzemelerin iletkenlikleri; bakır = $5e^8$ S/m, brass = $15e^7$ S/m, ve paslanmaz çelik = $5e^7$ S/m’dir.



Şekil 5.8. Farklı stabilize malzemesinden üretilmiş şeritlerin manyetizasyon kayıplarının deneysel sonuçları



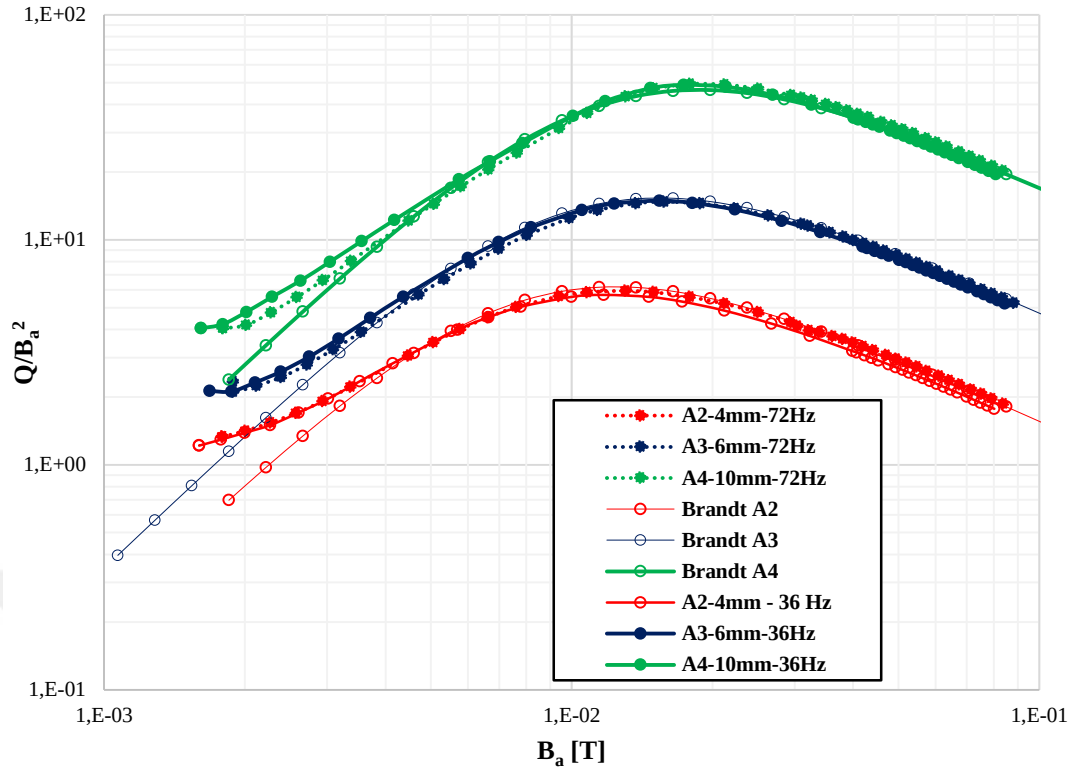
Şekil 5.9. Farklı stabilize malzemesinden üretilmiş şeritlerin manyetizasyon kayıplarının nümerik sonuçları

Şekil 5.8. ve 5.9.'da farklı stabilize malzemelerinden üretilmiş şeritlerin (D1-D2-D3) 72 Hz'deki deneysel ve nümerik AA manyetizasyon kayıp sonuçları gösterilmiştir.

Deneysel sonuçlar nümerik sonuçlara göre sağa ötelenmiş olarak bulunmuştur. Bu da etiket değeri 80 A olarak verilen şeritlerin bazı bölgelerinde daha yüksek kritik akıma sahip olmalarıyla açıklanabilir. Manyetizasyon kayıplarında şerit ile kontak veya akım sürülme işlemi olmadığından lokal bölümlerdeki daha yüksek kritik akıma sahip bölgeler sonuçların sağa doğru kaymasına sebebiyet verdiği tahmin edilmiştir. Bakırın iletkenliği daha yüksek olduğundan kayıpları daha fazla çıkmış olabileceği söylenebilir. Bunun sebebi, bakır daha düşük dirence sahip olduğundan çiftlenim kayıplarını arttırmış olmasıdır. Stabilize malzemesinin bu örneklerde bulunuş amacı FCL'de kısa devre anında normal duruma geçiş yapıldığında şerit üzerinde meydana gelecek geçici veya kısa süreli ısınmaları sönmölmektir. Bundan dolayı termal iletkenlikte hesaba katılmalıdır. Bu anlamda bakıldığında ve AA kayıplarında aşırı bir fark olmadığından bakır en avantajlı stabilize malzemesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca H S Shin ve arkadaşları [102], şeritlerde stabilize katmanı bulunmasının mekanik anlamda da gerilme - I_c açısından daha iyi bir davranışa sahip olduğunu göstermişlerdir.

Nümerik sonuçlar COMSOL'da 2D bir model ile elde edilmiştir. Nümerik 2D model Ek 1'de detaylı olarak gösterilmiştir.

Farklı stabilize malzemesinin AA manyetizasyon kayıplarına etkisi incelendikten sonra şeritlerin genişliklerinin AA manyetizasyon kayıplarına etkisini incelemek için farklı genişlikteki A2, A3 ve A4 örneklerinin AA manyetizasyon kayıpları incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.10.'da gösterilmiştir.



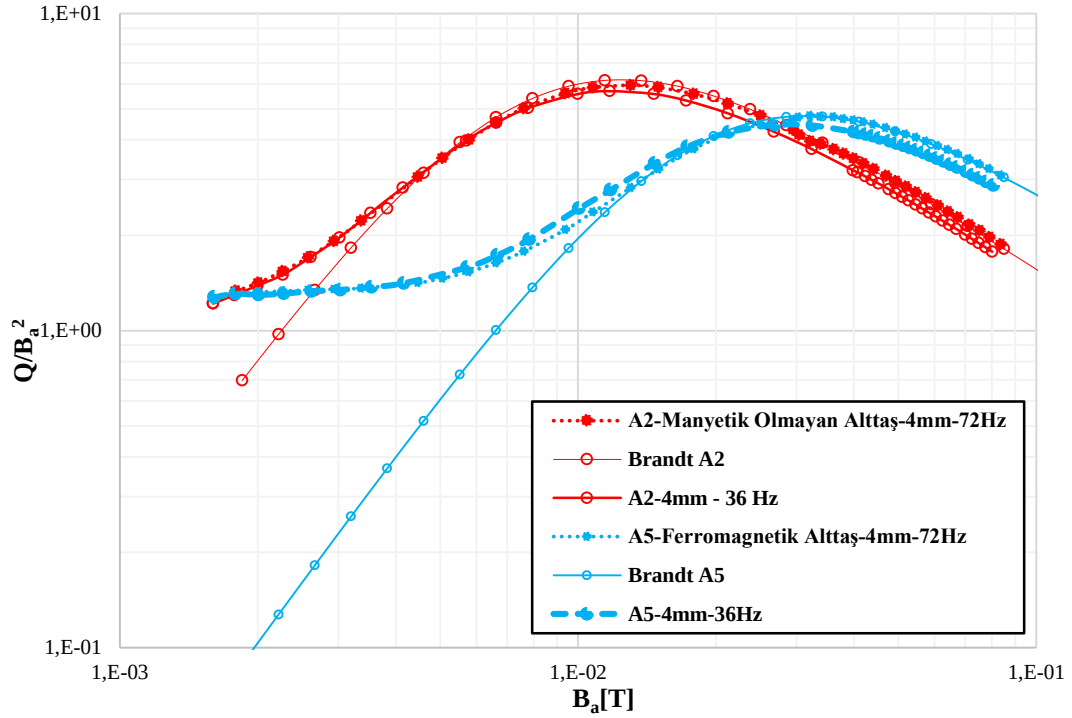
Şekil 5.10. A2-A3-A4 şeritlerin manyetizasyon kayıplarının karşılaştırılması

Bu 3 örnekte alttaş malzeme olarak manyetik olmayan Ni %9 tungsten kullanılmaktadır. A2 (4 mm) ve A3 (6 mm) örnekleri, 10 mm genişliğe sahip olan A3 şeritlerden kesilerek elde edilmiştir.

Tablo 5.1. A2-A3-A4 örneklerine ait kritik akım ve efektif genişlik değerleri.

Örnek	Kritik Akım (A)	mm başına kritik akım (A/mm)	Efektif genişlik (mm)
A2 4mm	46	11,5	3,65 (91%)
A3 6mm	90	15	5,75 (96%)
A4 10mm	190	19	10 (100%)

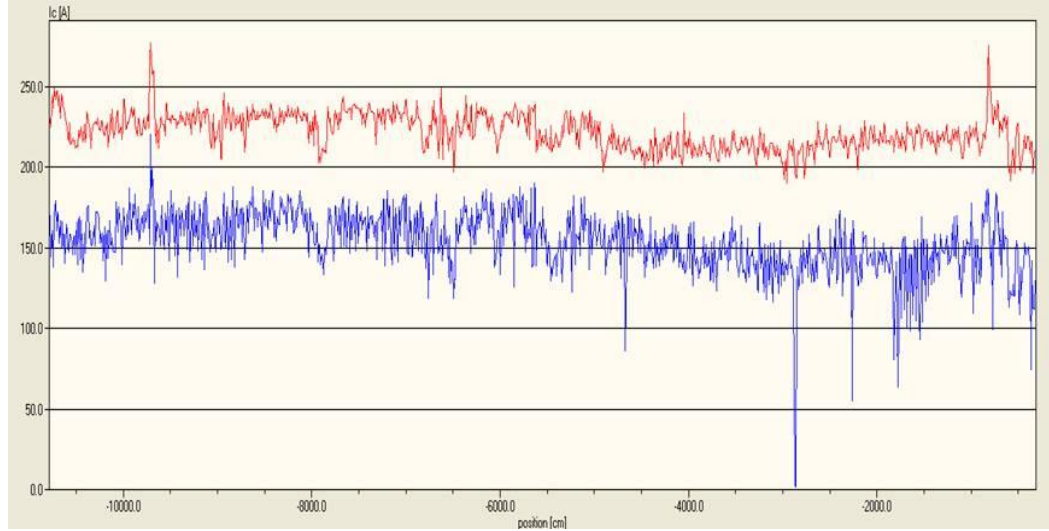
Kayıplar beklenildiği üzere genişlik azaldıkça azalsa da mm başına kritik akım ve efektif kullanılan genişlik (Brandt modeli ile hesaplandı) değerleri, kesme işleminin şeritlere zarar verdiğini göstermiştir. Farklı genişliğin AA manyetizasyon kayıplarına etkisinden sonra alttaş malzemesinin manyetik veya manyetik olmayan malzemelerle üretilmesinin AA manyetizasyon kayıplarına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla aynı genişliğe sahip A2 ve A5 örnekleri kullanılmıştır.



Şekil 5.11. Manyetik ve manyetik olmayan alttaşa sahip olan şeritlerin manyetizasyon kayıpları

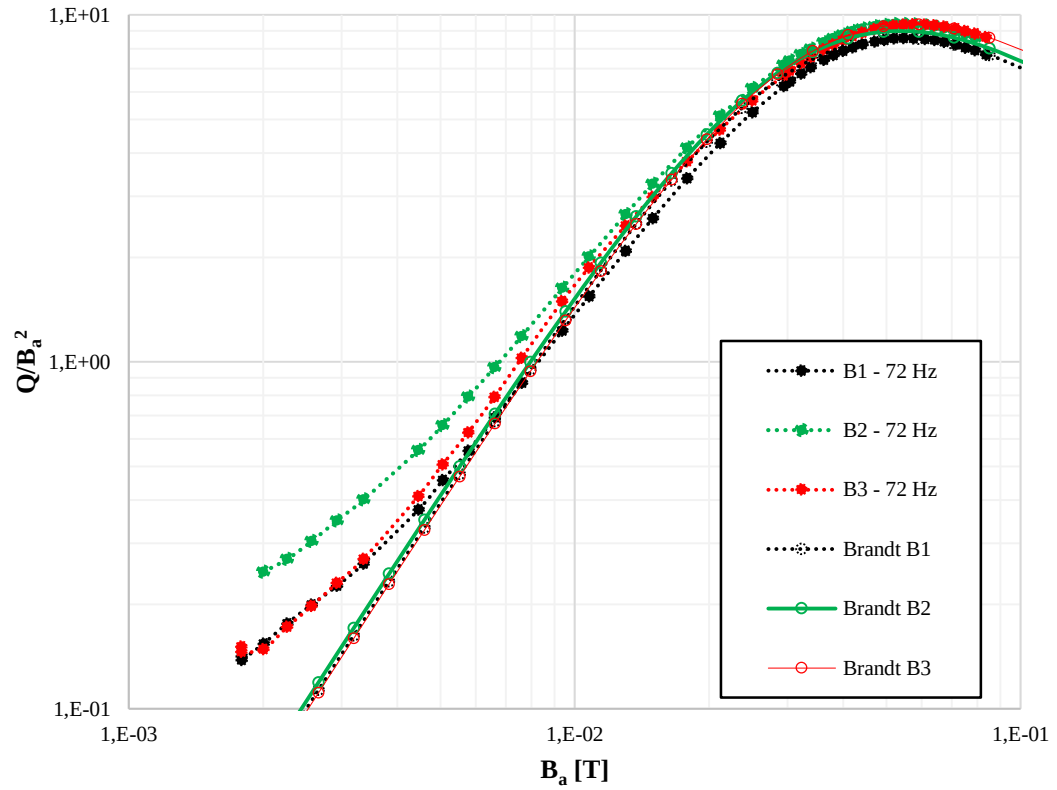
A5 örneği üretiminde alttaş malzeme olarak manyetik olan Ni %5 tungsten kullanılmıştır. Düşük alanlardaki Brandt modelinden farklı olarak alttaşın manyetik olmasından kaynaklı histerezis kayıpları oluşmuştur. Kritik akımı Brandt modeline göre 103 A efektif genişliği ise 3,4 mm olsa dahi ferromanyetik alttaş sebebiyle Brandt modelini direkt uygulamak uygun olmadığı görülmüştür. DA yöntemiyle kritik akım ölçüldüğünde 63 A bulunmuştur. Bu durumun daha önce yapılmış olan çalışmalarla uygun olduğu görülmüştür [103]. Manyetik alttaşın bulunması şeritin köşelerindeki öz alanı arttırmakta ve kritik akımda azalma meydana gelmektedir.

Manyetik alttaş kullanımı dışında A5 örneğindeki bir başka farklılık ise örneğin 10 mm'lik bir şeritin iki ucundan 3'er mm kesilmesi ile elde edilmesi ve bakır kaplama işlemi için ön kısmına 1 μ m, arka kısmına ise 0,5 μ m gümüş tabaka eklenmiş olmasıdır. Şekil 5.12.'de manyetik-indüktif kritik akım dağılımı gösterilmiştir. Kırmızı çizgi 10 mm'lik parçayı mavi ise kesilen 4 mm'lik kısmı göstermektedir. Görüldüğü gibi kenarlar daha kötü kalitede olduğu için kesilme gerçekleştiğinde kritik akımda beklenen 4/10 azalımı yerine 150/220 oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.12. A5 örneğine ait manyetik kritik akım ölçüm sonuçları

Bu ölçümlerin sonrasında CORC kablo üretiminde kullanılmasına karar verilen B markalı şeritlerin AA manyetizasyon kayıpları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.13. B1-B2-B3 şeritlerin manyetizasyon kayıplarının karşılaştırılması

Örneklerin etiket kritik akım değerleri B1, B2 ve B3 için sırasıyla 210 A, 235 A ve 250 A'dır. Gerçekte bu değerler artı eksi %5 değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 5.13.'e bakıldığında zaman 3 farklı B markalı şeritlerin AA manyetizasyon kayıpları arasında belirgin bir fark olmadığı fakat gerek mekanik özelliklerinin daha iyi olması gerekse kritik akımının daha yüksek olması sebebiyle CORC kablo üretiminde kullanmak için B3 şeritine karar verilmiştir.

5.4. CORC Kablo Üretimi ve Akım Terminalleri

CORC kablo üretimindeki adımlar özet olarak Şekil 5.14.'te gösterilmiştir. Kablolama işlemi Şekil 5.14.a.'da gösterilen düzende gerçekleştirilmektedir. Kablolama işlemi 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar modelleme, sarım ve ölçüm için hazırlanmadır. Lehimleme açısı genellikle 36-54 derece arası seçilmektedir [92]. Üçüncü bölümde CORC kısmında modelleme detayları açıklanmıştır. Bu anlatılan hesaplamalar ile kabloya ait bükme derecesi ve bir katmanda bulunacak şerit sayısı hesaplanır.



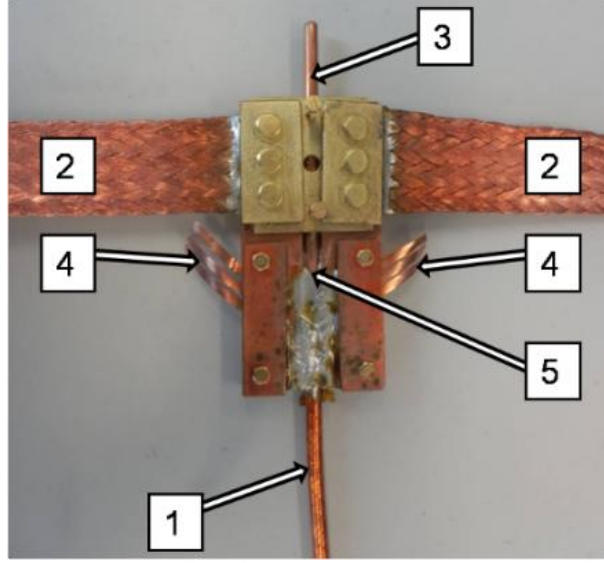
Şekil 5.14. CORC kablo yapım adımları

5.4.1. Kablonun modellenmesi ve sarım işlemi

Uygulamamızda kritik akım azalımı bölgesinden uzak durmak adına 6,30 mm çapında bir bakır iletken kullanılmıştır. Bu çaptaki bir iletkene bir tabakada 4 mm genişliğindeki 3 şerit yaklaşık 42 dereceyle lehimleneceği ve bükme derecesi 18 mm olarak hesaplanmıştır. Şerit malzemesi olarak B3 şerit kullanılmıştır. Sarım işlemi ise şeritlerin bakır iletkene yerleştirilmesi ve sarılmasını kapsamaktadır. Ayrıca kablonun izolasyonunu sağlamak amacıyla kapton bant ile sarılmaktadır. Öncelikle 70 cm uzunluğundaki bakır iletken kesilerek düzeneğe uygun açıyla sabitlenmiştir (Şekil 5.14.b.). Daha sonra sırayla şeritler sabit bir kuvvetle (2,5 kg=24,51 Newton) iletken etrafına sarılmışlardır (Şekil 5.14.c.). Üçüncü aşamada akım terminalleri ve ölçümler için gerekli yerlere gerilim kontakları yerleştirilmesini kapsamaktadır. Öncelikle şeritler terminal düzeneğine sabitleştirilmiş daha sonra lehimlenmiştir (Şekil 5.14.d. ve e.). Gerilim uçları kablonun iç ve dış kısmına (Şekil 5.14.f.) yerleştirilmiştir. İç ve dışardaki gerilim uçları arasındaki mesafe sırasıyla 24,8 ve 33 cm'dir. Ayrıca kritik akım ölçümü için akım terminalindeki bakır iletken üzerine aralarındaki uzaklık 35,8 cm olan gerilim ölçüm uçları yerleştirilmiştir.

5.4.2. Akım terminalleri

Kullanılan akım terminalleri kablodaki süperiletken şeritlerin kolay lehimlenmesini sağlamaktadır. Şeritlerin lehimlenmiş alanları bütün şeritler için yaklaşık aynıdır (Şekil 5.15.'e bakınız). Lehimlenen şeritlerin sayısı arttırılabilmektedir. Şeritlerin uçlarda boşta kalan kısımları gerilim uçlarının lehimlenmesi için uygun yerlerdir. Bu konsept ile iç tabakalardaki şeritlere de gerilim ölçüm bağlantısı yapmak mümkün olmaktadır. Ayrıca şekilde de görüldüğü gibi kablonun iki ucundaki bakır iletken (içi boş) soğutma işlemi için kullanılmaya müsaittir. Akım terminallerinin merkezinde bir önceki kısımda bahsedilen “bakır iletken üzerine” olarak adlandırılan gerilim uçları bağlanmıştır. Bu uçlara özellikle bakır üzerine diye adlandırılmasının sebebi bu noktalarda ölçülecek gerilimde ekstra omik bileşene sahip olacak olmasıdır.



Şekil 5.15. CORC kablo terminali; 1 - CORC kablo, 2 – akım terminalleri, 3 – bakır iletken, 4 – her şeritte gerilim uçları için yer, 5 – bakır üzerine yerleştirilecek gerilim ucu için yer

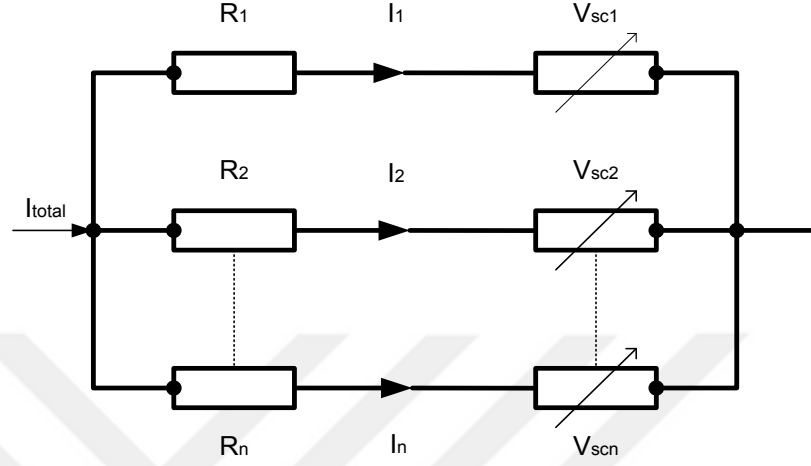
Özetle sunulan akım terminalleri; şeritlere lehimlenecek gerilim uçları için yeterince yer ve içeriden soğutma konsepti için uygun bir tasarımıdır. Şeritler paralel bağlanmış olsalar da birbirlerinden izole edilmedikleri ve bağlantı kontak dirençleri değişkenlik göstereceğinden gerilimleri farklı olacaktır. Bu fark düşük akımlarda düşük olsa da akımın artmasıyla yükselecek ve kritik akıma yaklaşıldıkça tekrar azalacaktır. Bu yüzden terminal kontak dirençleri eşit akım dağılımı için önemli bir parametredir.

5.4.2. Terminal kontak dirençleri için analitik bir model

Terminal kontak dirençleri, CORC kabloların kritik akım ölçümü ve akım dağılımı açısından önemli bir konudur. Bu değerlerdeki ufak değişiklikler şeritler arasında taşınan akım değerlerini önemli derecede etkilemektedir.

Homojen bir akım dağılımı için gerekli olan eşit kontak dirençleri yapılması zor bir işlemdir. Akım dağılımının homojenliğini ve kritik akım değerini kontak dirençlerindeki ufak değişiklikler dışında şeritlerin farklı $E-J$ ilişkileri ve çalışma durumunda şeritlerin “quench” olması da etkilemektedir. Çalışmamızda akım dağılımı ve kontak dirençlerinin belirlenmesi için [104]’teki modele yakın analitik bir model kullanılmıştır. Bu model ile elde edilen sonuçlar kablo terminalinin performansı ve kontak dirençlerinin akım dağılımına etkisi hakkında ilk bilgiye sahip olmamızı sağlar.

Modelde kullanılan CORC kablo ve bağlantı noktalarının elektriksel modeli Şekil 5.16.'da gösterilmiştir. R_1 , R_2 ve R_3 lineer terminal kontak dirençlerini; V_{sc1} , V_{sc2} ve V_{sc3} ise non-lineer olan süperiletkenlerin gerilimlerini temsil etmektedir.



Şekil 5.16. Kablonun kontak dirençleri için oluşturulmuş basit elektriksel model

Model MatchCad programında hazırlanmıştır. Kablodaki şeritlere ait gerilim-akım grafikleri ölçüldükten sonra program yardımıyla uygun bağlantı dirençleri bulunur. Bölüm 5.5.'te kullanılan akım dağılımı grafikleri bu program yardımıyla bulunmuştur.

5.5. CORC Kabloların Kritik Akım Ölçümleri

Kablonun kritik akımını tayin etmek için elektrik alan kablo uzunluğu kullanılarak hesaplanmıştır (şerit uzunluğu değil). Ölçüm sonrası kabloyu etkileyecek herhangi bir zararın meydana gelip gelmediğini görmek amacıyla tekrar ikinci bir ölçüm yapılmıştır ve herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Kritik akım değeri önceden bahsedilen bakır iletken üzerindeki sinyalden omik bileşenin çıkartılmasıyla elde edilmiştir. $1 \mu\text{cm}$ kriteri kullanılmıştır. Sonuç Şekil 5.18.'de gösterilmiştir. Kritik akım değeri yaklaşık 708 A 'dır. Şekilde gösterilen şeritlerdeki farklı gerilim davranışları kontak dirençlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuç daha önce yapılmış çalışmalara benzerlik göstermiştir [104].

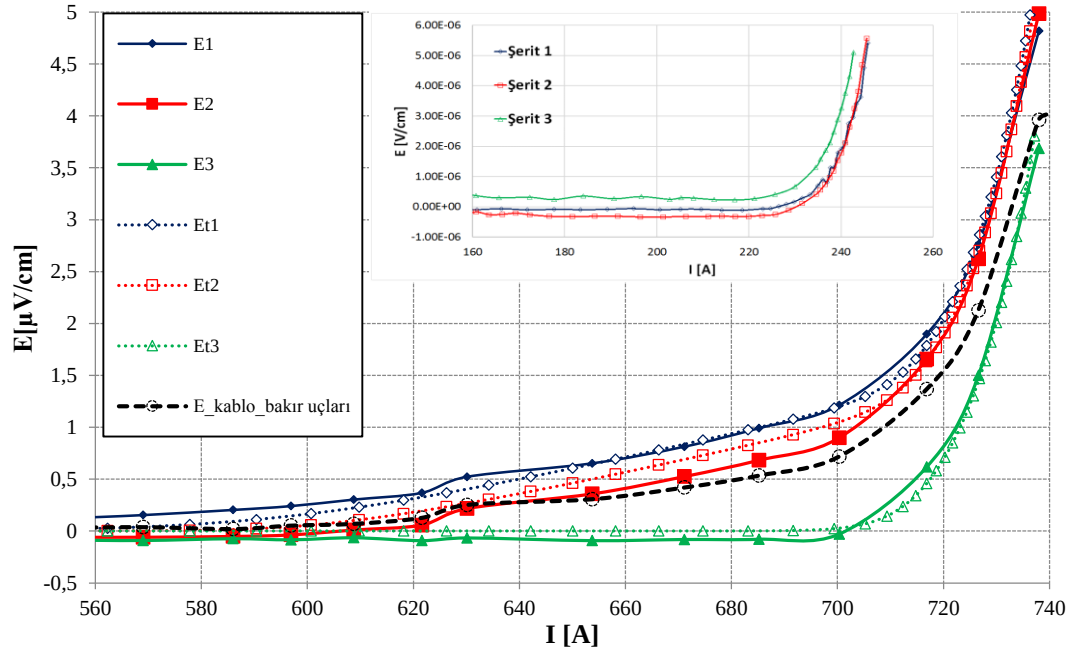


Şekil 5.17. Kablo kritik akım ölçümü için hazırlanan soğutma bölgesi

Mekanik olarak güvenli bölgede çalışıldığından kablounun kritik akımında sarımdan kaynaklanan bir azalma gerçekleşmemiştir. Aşağıda şeritlerin sarılmadan önce ölçülen kritik akımları Tablo şeklinde verilmiştir. Ölçümde omik bileşen 7,3 n Ω 'dur.

Tablo 5.2. CORC kabloda kullanılan şeritlerin özellikleri.

	Şerit 1	Şerit 2	Şerit 3
Uzunluk (cm)	59.4	58	59
Kritik Akım (A)	237.5	237.74	232
n (-)	34	44	30



Şekil 5.18. 1 tabakalı CORC kablounun IE eğrisi (E_{1-2-3} şeritlerden ölçülen elektrik alan; E_{t1-2-3} analitik modelleme sonucu elde edilen elektrik alan değerleri) ve şeritlerin kritik akım eğrileri (içteki şekilde)

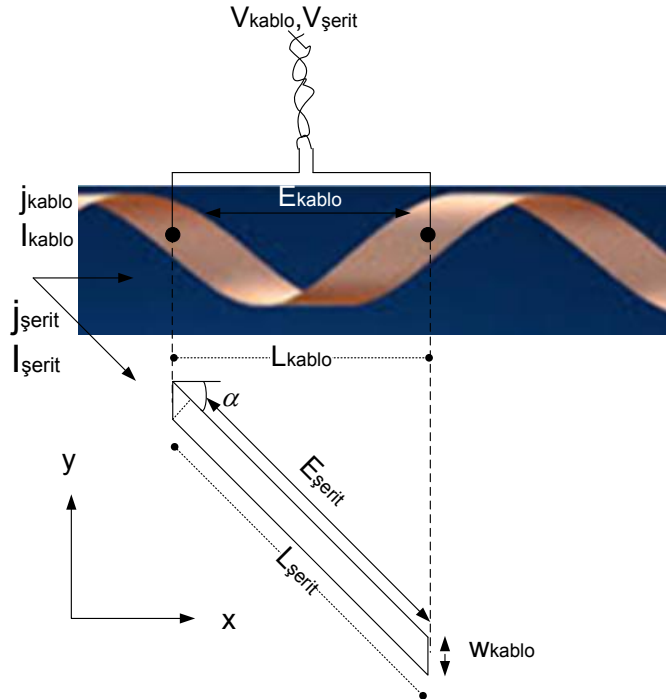
Tek düz halde kritik akımları ölçülmüş şeritlerin kritik akımlarının toplamı kablonun kritik akım değerine eşdeğer olduğu ölçümde görülmüştür. Öncelikle mekanik olarak 6,35 mm iletken çapı güvenli bölgededir ve üretimde veya sarımda yerel zayıf bölgeler oluşması dışında azalmalar mekanik olarak açıklanamaz. Kablonun kritik akımının azalmamasının açıklaması için öncelikle geometrik olarak tek şerite ait davranışı anlamak gerekir (Şekil 5.19.). Şekilde sarılmış bir iletken ve bu iletkenin açılmış durumu gösterilmiştir. Kablo ve düz şerit içinde ölçülen gerilim değerleri aynı olacaktır fakat gerilim uçları arası mesafe şeritin iletken üzerine lehimlendiği açı ile bulunabilir;

$$V_{\text{şerit}} = V_{\text{kablo}} \quad (5.1)$$

$$L_{\text{şerit}} = \frac{L_{\text{kablo}}}{\cos \alpha} \quad (5.2)$$

Bu iki denklem ile elektrik alanlar arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olacaktır;

$$E_{\text{şerit}} = E_{\text{kablo}} \cdot \cos \alpha \quad (5.3)$$



Şekil 5.19. İletken etrafına sarılan tek şerit ve düz açılmış gösterimi

Akım skaler bir büyüklüktür ve değeri yüzey alanı boyunca akım yoğunluğunun integrasyonu ile bulunabilmektedir;

$$I = \int j \cdot dS \quad (5.4)$$

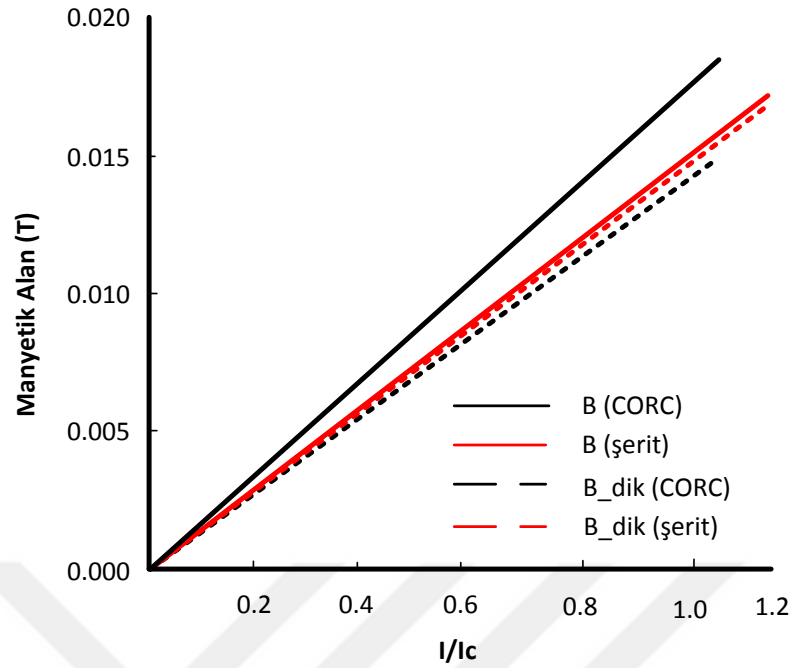
Düz şerit için akım yoğunluğunun ($j_{\text{şerit}}$) $\cos \alpha$ bileşeni kablunun akım yoğunluğunu (j_{kablo}) temsil etmektedir.

$$j_{\text{şerit}} \cdot \cos \alpha = j_{\text{kablo}} \quad (5.5)$$

Şeritin y eksenindeki akım bileşenlerinin net değeri (toplamı) her bir döngüde kendisini yok ettiğinden sıfırdır. Kabloda bulunan şerit genişliği (w_{kablo}) düz şerit genişliğinden ($w_{\text{şerit}}$) büyüktür ve aralarındaki ilişki $w_{\text{kablo}} = \frac{w_{\text{şerit}}}{\cos \alpha}$ 'dır. Bütün bu anlatılanlar göz önüne alındığında ve Denklem 5.4.'te yerine konulduğunda; kablunun akım yoğunluğu daha düşük olmasına rağmen aynı oranda genişliği daha büyük olduğundan, yüzey alanındaki integral sonucu sarılmış ve düz halde bulunan hallerin kritik akımları aynı bulunmaktadır.

$$I_{\text{şerit}} = I_{\text{kablo}} \quad (5.6)$$

Bu açıklama kablunun farklı geometrisinin akım yoğunluklarını değiştirse de akım değerinin aynı kaldığını göstermektedir. Fakat manyetik açıdan düşünüldüğünde oluşacak öz-alanlar altında kritik akımın davranışı düşünülmelidir.



Şekil 5.20. Düz sarılmış şeritlerin ürettiği manyetik alan ve bileşenleri

Şekil 5.20.'de düz şerit ve CORC kablo şeklinde sarılmış şeritin yüzey alanlarında üretilen manyetik alanlar gösterilmiştir (nümerik model ile elde edilen sonuçlar). CORC kablodaki toplam manyetik alan tek şerittekinden daha yüksektir. Bükme etkisinden dolayı dik bileşende fazla değişim oluşmazken manyetik alandaki artışın çoğunluğu paralel bileşendedir. Bilindiği üzere dik manyetik alan bileşeninin kritik akıma etkisi daha fazladır. Bu durum kritik akımda azalma meydana gelmemesini açıklar.

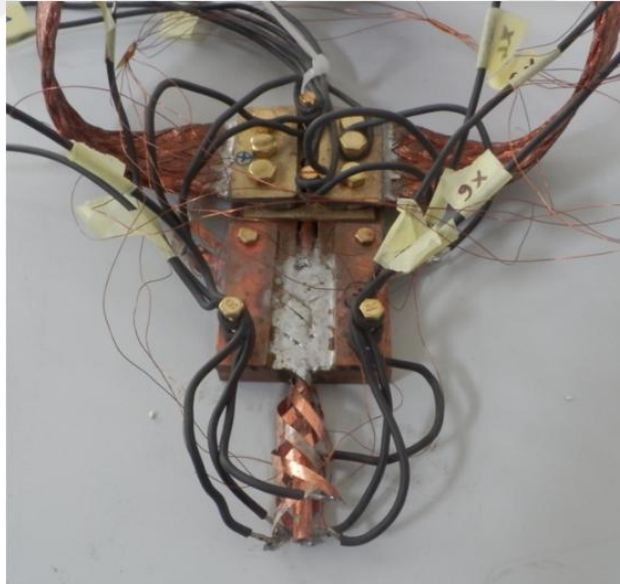
Çalışmamızda kullanılan 3 şerit tek tabakalı kablonun kritik akımında bir azalma gerçekleşmemiştir. Bazı şeritlerden üretilen CORC kablolarında, kablodaki şeritler üzerindeki akım dağılımının homojen olmaması, sarma tekniğinden kaynaklanan azalma veya üretim esnasında şeritteki homojensizlikler sebebiyle kritik akımda azalma gerçekleşebilmektedir. B1 şerit kullanılarak üretilen bir CORC kabloda gerçekleşen kritik akımdaki azalma Ek 2'de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Kritik akım ölçümü sırasındaki her şeritin gerilim akım ilişkisi kontak dirençlerinin tahmini için kullanılmıştır. Şekil 5.18.'deki E_{t1-2-3} modelleme sonucu hesaplanan elektrik alanları temsil etmektedir.



Şekil 5.21. CORC kablonun uçlarından kesilen 6 cm'lik parçalar

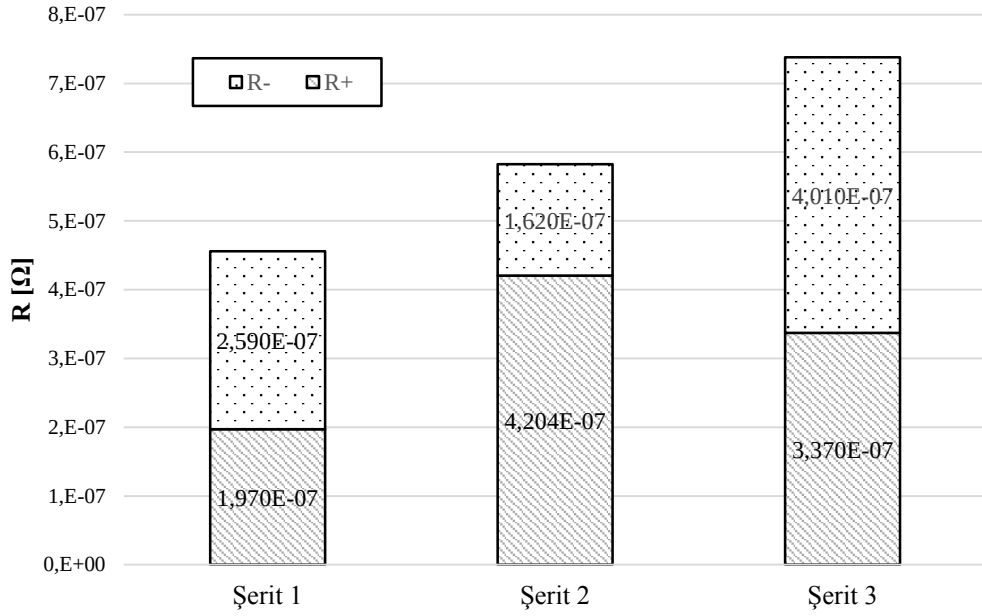
Deneysel olarak ise kablodaki tüm ölçümler yapıldıktan sonra kablonun kontak dirençlerinin de bulunduğu her iki taraftan 6 cm kesilmiştir. Kesilen bu parçalara yeni akım kolları ve gerilim uçları eklendikten sonra I-V'leri ölçülmüştür. Kesilen parçalar ve ölçüm için hazırlanmış son halleri Şekil 5.21. ve 5.22.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. Direkt kontak direnci ölçümü için hazırlanan kablo terminalleri

Modelleme ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.23. ve Tablo 5.3.'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi iki yöntemin sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. Kullandığımız analitik modelde kablonun iki ucu arası

modellendiğinden akım dağılımı hakkında daha güvenilir bilgi sağlayacaktır. Kesilen bu 6cm'lik parçalar dışında kablo içinde meydana gelen, şeritlerin bakır iletkenle ve şeritlerin kendi aralarında meydana getireceği paralel dirençler, deneysel bulunan değerleri modellenen değerlere yaklaştıracak tahmin edilmektedir. Ayrıca deneysel ölçümde kablonun kesilmesi gerekmektedir. Kullanılan model ise kablonun kesilmeden kontak dirençleri hakkında bilgi verebilmektedir.

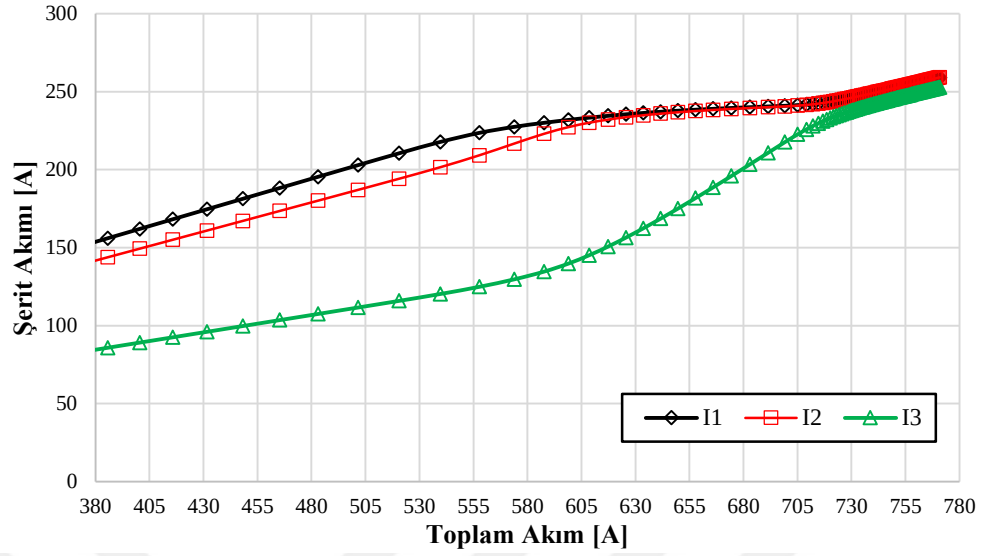


Şekil 5.23. Kablo kontak direnç ölçüm sonuçları

Tablo 5.3. Kablo kontak dirençlerinin deneysel ve modelleme sonuçları.

	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$R_3(\Omega)$
Modelleme	$3,3e-7$	$3,58e-7$	$6e-7$
Deneysel	$4,56e-07$	$5,824e-07$	$7,38e-07$

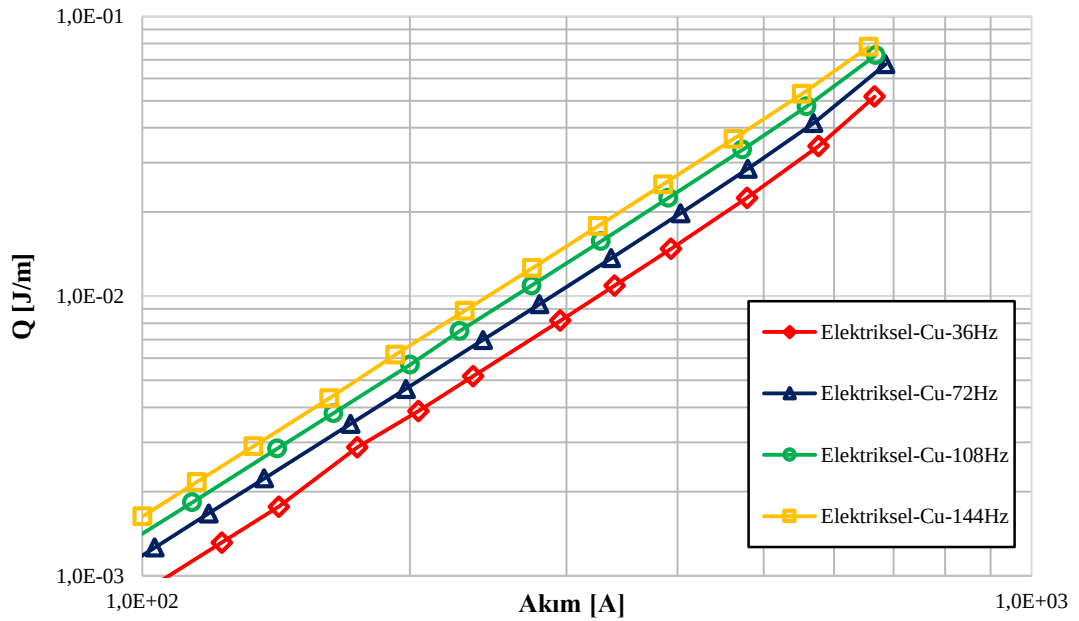
Modelleme sonuçlarının yardımıyla her şeritteki akım dağılımı bulunabilir (Şekil 5.24.). Akım dağılımlarından görüleceği üzere üçüncü şerit yüksek kontak direnci sebebiyle daha az akım taşıırken, birinci şerit kritik akım değerine yaklaşıp kadar, kablodaki akımın %77'sini birinci ve ikinci şerit taşımaktadır.



Şekil 5.24. CORC kablodaki şeritlerdeki akım dağılımları

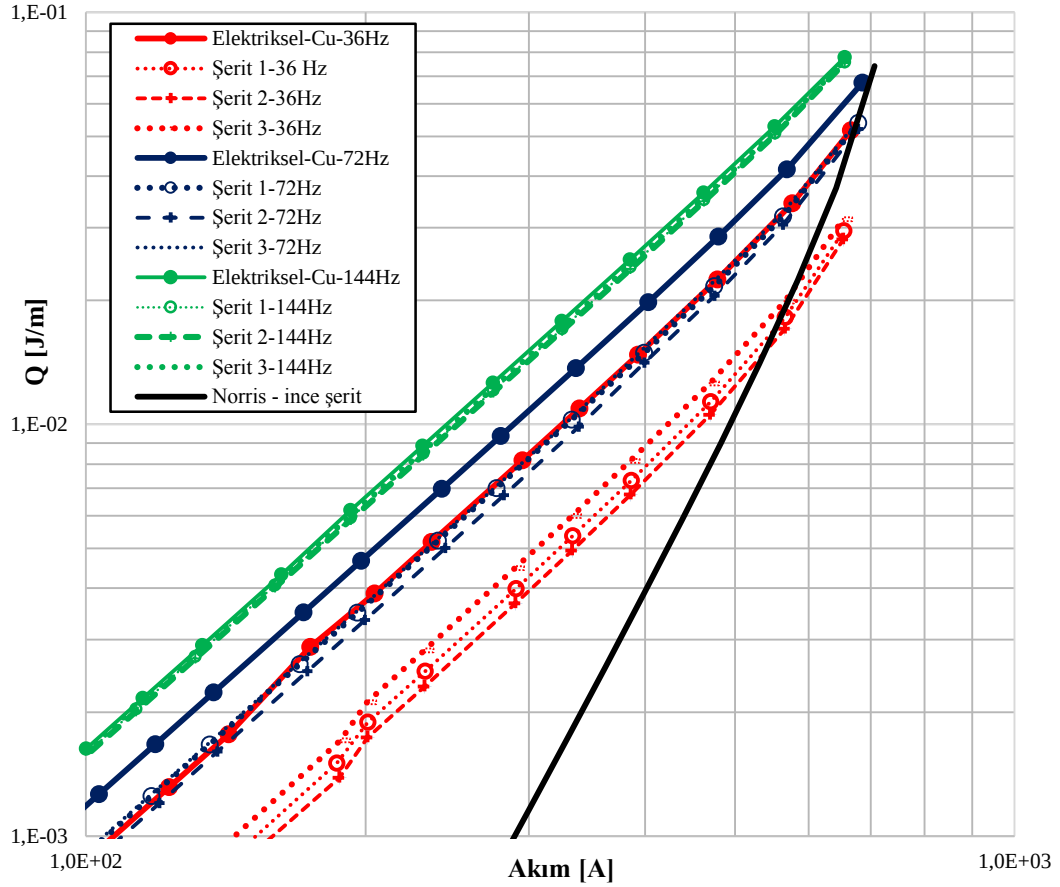
5.6. Kablonun Transport AA Kayıpları

Transport AA kayıpları, şeritler ve kablo terminalinden alınan gerilim değerlerini kullanarak hesaplanan klasik bir elektriksel yöntem ile ölçülmüştür. Bu yöntem Bölüm 4.'te detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bakır iletken (terminal) üzerinden alınan farklı frekanslara ait kayıp ölçümleri şekilde gösterilmiştir.



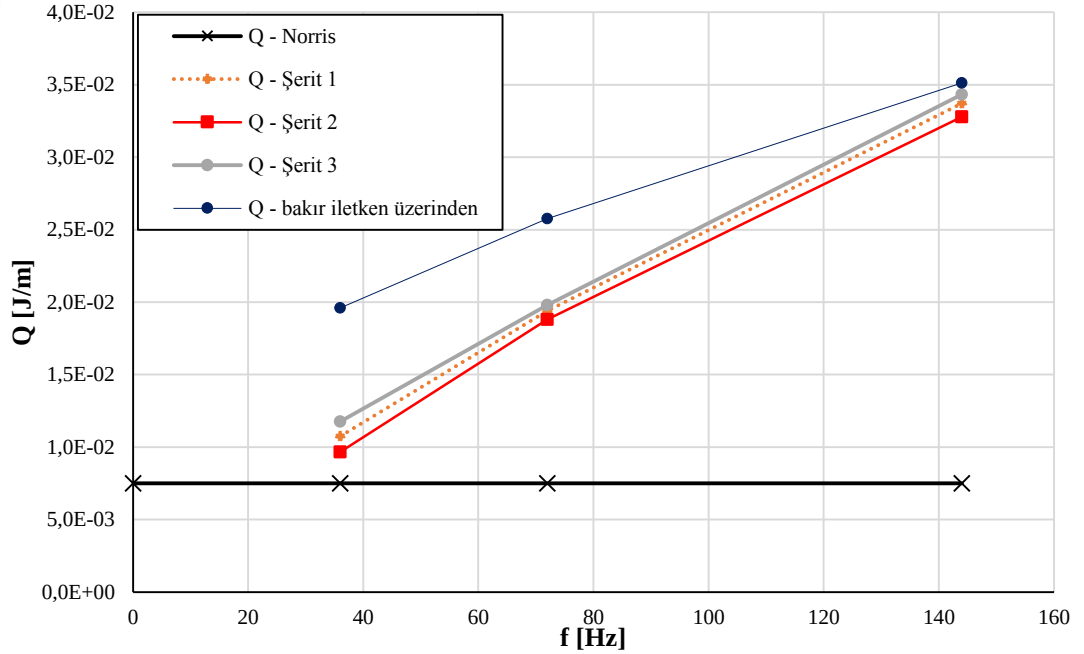
Şekil 5.25. 36-72-108-144 Hz bakır iletkeninden ölçülen transport kayıp eğrisi

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere kablodaki transport kayıplarının frekansa bağımlı olduğu tespit edilmiştir. Kaybın, bakır iletken üzerinden alınan ölçümler ile hesaplanması, gerilimde ek bir omik bileşen oluşmasına sebep olur. Bu sebepten şeritler üzerinden alınan gerilim değerleri ile farklı frekanslarda ($f=36-72-144$ Hz) kayıplar ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 5.26.'da gösterilmiştir.



Şekilde görüldüğü gibi şerit üzerinden ölçülen transport kayıpları, iletken üzerinden alınan sonuçlardaki ek omik bileşenin azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca farklı şeritlerden ölçülen kayıplar ufak farklılıklar göstermektedir. Bu farklılığın sebebi farklı kontak dirençlerinin sebep olduğu farklı akım dağılımları ile açıklanabilmektedir [104]. Artan frekans değeri ile kontak dirençlerinin sebep olduğu farklılık azalmaktadır; yüksek frekanslarda indüktif bir reaktans (bakır iletken kaynaklı) kontak dirençlerinin etkisini bastırmaktadır.

Yuvarlak kabloların transport kayıplarının hesaplanması için kesin-etkili bir analitik model bulunmamaktadır. Yuvarlak bir süperiletken tüp için bir model Hancox [50] tarafından geliştirilmiştir fakat bu model iletkeni saran süperiletkenler arasındaki boşlukları ihmal etmektedir. Ufak boşluklara sahip kablolarda kaybın, ince şeritler için kullanılan Norris modelinden 10 kat daha düşük olması beklenir [90]. Kabloda ölçülen transport kayıpları Norris modelinden elde edilen sonuçlardan daha yüksektir. Bu kabloda ek bir kaybın olduğunu göstermektedir. Başka bir sonuç ise ölçülen kayıp düşük bir eğime sahiptir (yaklaşık +2). Bu kayba iletken bakırdaki Eddy akımları sebep olur. Bu sonucu destekleyecek diğer bir veri ise Şekil 5.27.'de gösterildiği gibi kaybın frekans bağımlılığına sahip olmasıdır.



Şekil 5.27. AA transport kaybının frekans bağımlılığı

Tek katmanlı CORC kabloda transport akımı sonucunda bakır iletken üzerinde oluşan manyetik alanının, şeritlerin sarmal/spiral şekillerinden dolayı sadece eksenel (kablo düzlemi ile paralel) bileşeni mevcuttur. Kabloyu sonsuz uzunlukta bir solenoid şeklinde kabul edersek, eksenel manyetik alanın değeri,

$$B_{\text{eksenel}} l = \mu_0 N I \quad (5.7)$$

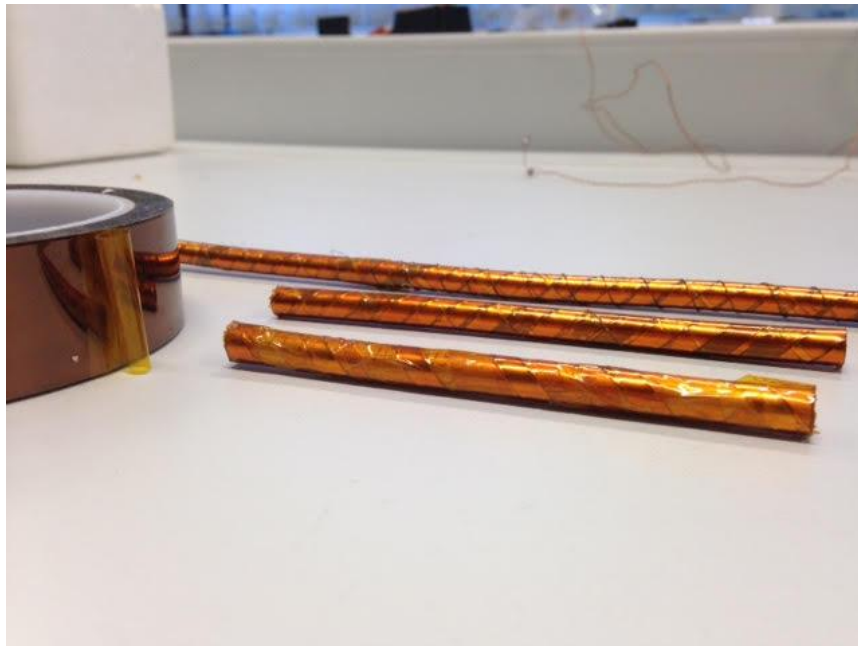
denklemleriyle bulunur. Bu denklemde l , N tur boyunca I akımı taşıyan solenoidin uzunluğudur. CORC® kabloda toplam kablo akımı I_{kablo} , kablonun çevresinde bükme derecesi uzunluğunca bir kez dönmektedir ve aşağıdaki denklem yazılabilmektedir.

$$B_{eksenel} = \mu_0 \frac{I_{kablo}}{L_{bükme}} \quad (5.8)$$

Çalışmamızda eksenel manyetik akı yoğunluğunun genliği, yüksek akımlarda en fazla 49mT'dir. Kaybın büyük bir kısmını bu eksenel manyetik alan sebebiyet vermektedir. Bu sorun çift sayılara sahip katmanlı CORC kabloların üretilmesi ile ortadan kalkacağı düşünülmektedir.

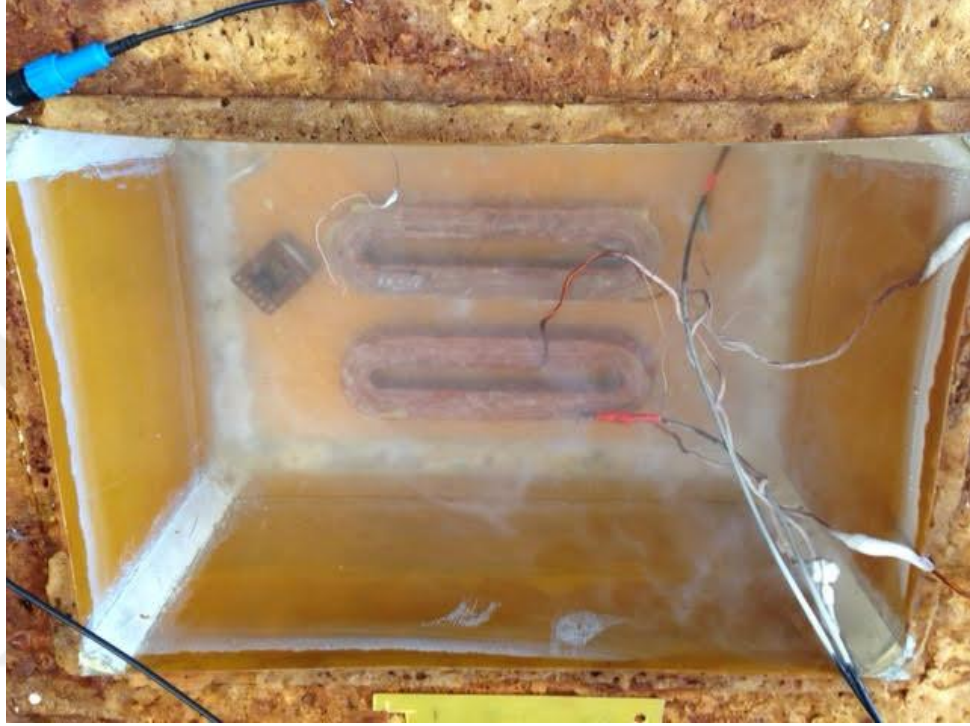
5.7. Kabloların Manyetizasyon AA Kayıpları

Manyetizasyon AA kayıpları için örnekler, diğer tüm ölçümler bittikten sonra kablonun orta kısmından kesilerek elde edilmiştir. Örneklerin boyu 5-6 bükme derecesine karşılık gelecek şekilde 90 ve 110 mm uzunluklarda kesilmiştir. Bunun sebebi örneklerin sonlarında meydana gelebilecek “edge effect” kenar etkisinden kurtulmaktır. Kesilen örnekler Şekil 5.28.'de gösterilmiştir.



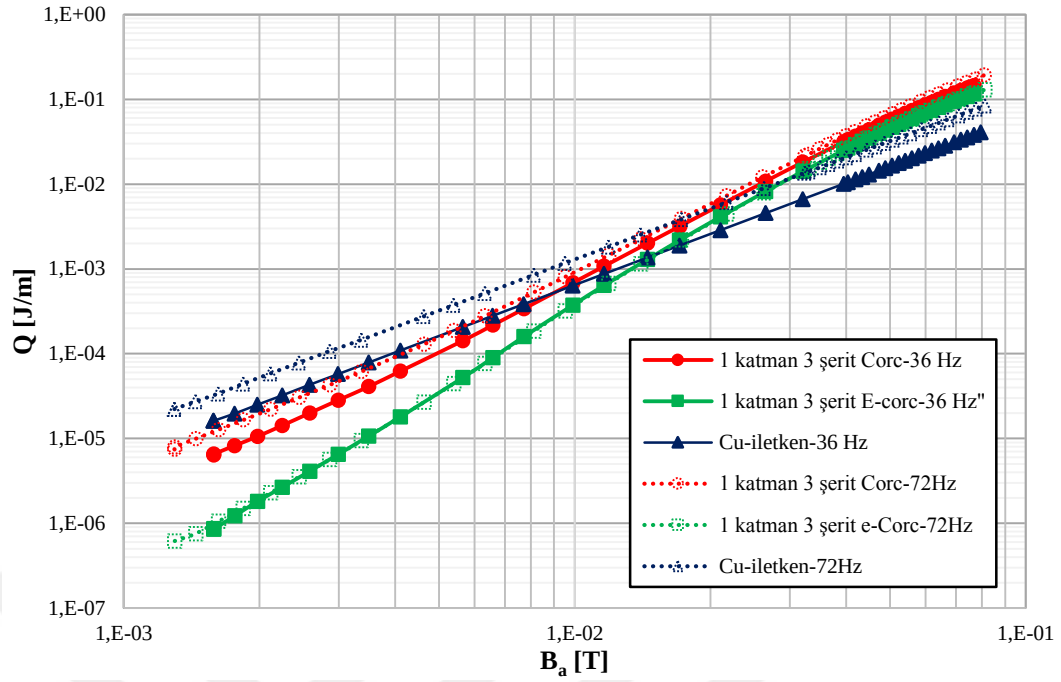
Şekil 5.28. Manyetizasyon kayıpları için kesilen kablolar

Manyetizasyon AA kayıpları farklı manyetik alan ve frekans değerleri altında Bölüm 4.'te açıklanan “calibration free” yöntemi ile ölçülmüştür. Manyetik alan, $f=\omega/2\pi$ ve genlik B_a olacak şekilde $B=B_a*\cos\omega t$ ile ifade edilir. Manyetizasyon AA kayıpları 36 ve 72 Hz de Şekil 5.29.'da gösterilen sistemle ölçülmüştür.

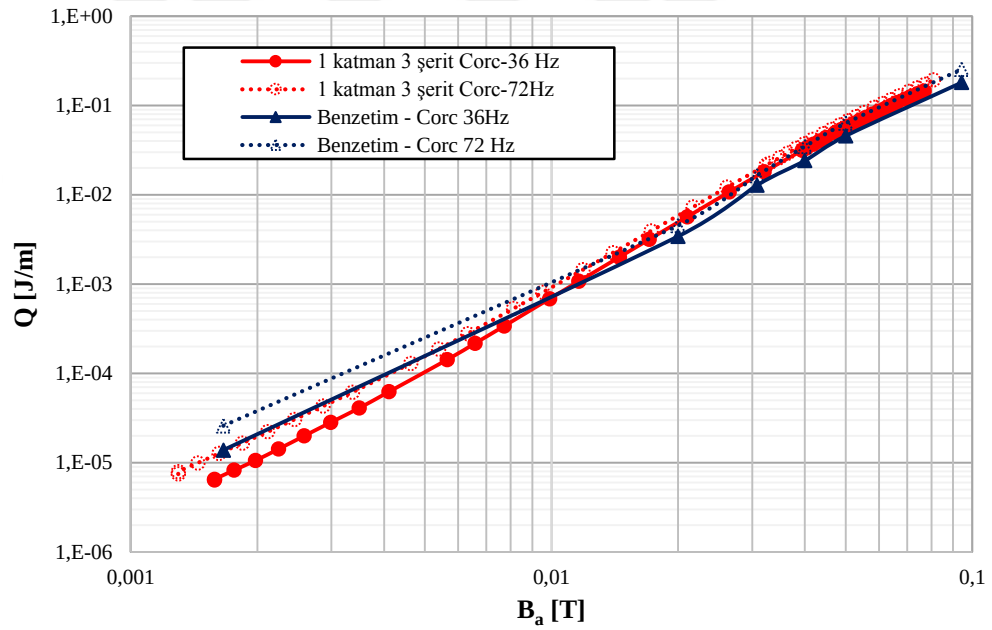


Şekil 5.29. Manyetizasyon ölçüm sistemi

Bakır iletkenin kayıplara etkisinin görülmesi açısından, ölçüm yapıldıktan sonra e-CORC olarak adlandırılan, ortadaki bakır iletken çıkartılarak kayıplar ölçülmüştür. Bu örneklere ait kayıplar Şekil 5.30.'da gösterilmiştir. Ölçümlerin doğruluğu için deneysel sonuçlar ile benzetim çalışmalarının karşılaştırılması da Şekil 5.31.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.30. 36-72 Hz için manyetizasyon kayıpları



Şekil 5.31. 36-72 Hz için manyetizasyon kayıplarının deneysel ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

Beklenildiği üzere bakır iletkenin kullanımından dolayı e-CORC'un kayıpları CORC kablodan daha düşüktür. Frekansı 36'dan 72 Hz'e yükselttiğimizde ise e-CORC'da frekans bağımlılığı görülmezken, bakır iletken kullanımından dolayı oluşan Eddy akım kayıpları CORC kablonun kayıplarında artışa sebep olmuştur.

Bakır boru ve CORC kablonun manyetizasyon AA kayıpları karşılaştırıldığında, düşük manyetik alan değerlerinde CORC kablonun kayıplarının bakır iletkenin kayıplarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç süperiletken şeritlerin bakır kablo üzerinde manyetik alanı dışladığı bir perdeleme etkisi ile açıklanabilmektedir.

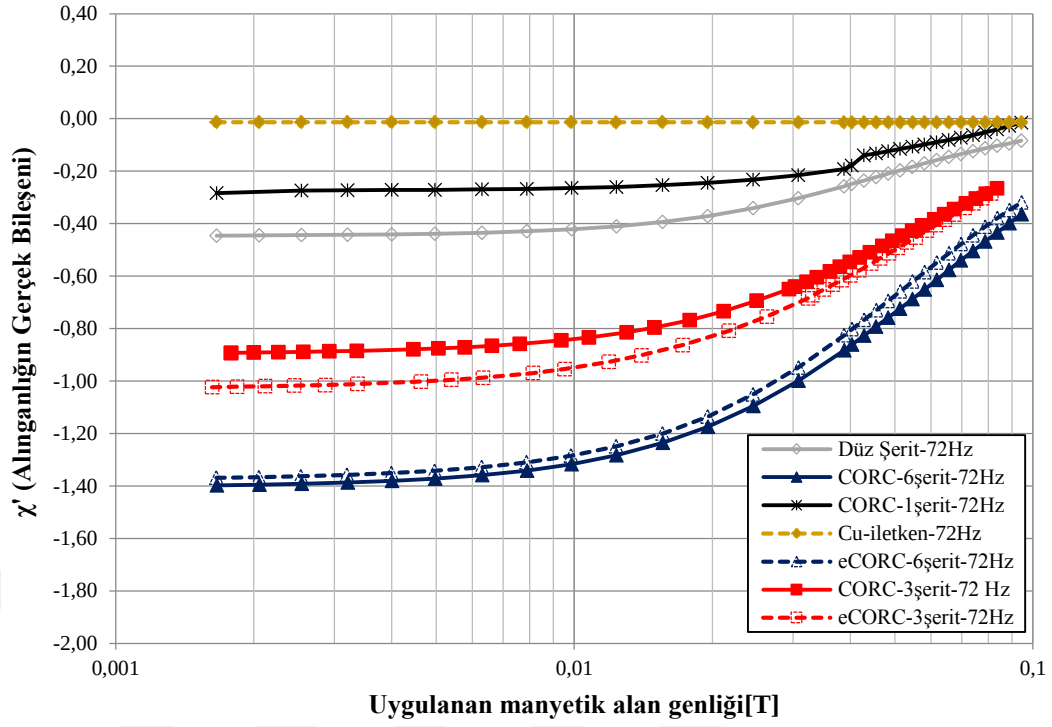
Bu perdeleme etkisinin daha detaylı anlaşılabilmesi için süperiletken şeritler ile bakır iletken farklı konfigürasyonlara sahip yeni örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan üç yeni örnek; bakır iletken üzerine konulmuş “düz şerit” (manyetik alan şeritin geniş yüzeyine dik gelecek şekilde), 1 şerit ile üretilmiş CORC kablo ve 2 tabaka 6 şeritli CORC kablodur.

Eklenen bu yeni örnekler ile birlikte perdeleme etkisinin anlaşılması için manyetik alınganlığın gerçek ve sanal bileşenleri [105]’teki denklemler ile hesaplanmıştır:

$$\chi' = \frac{\mu_0 V_{ind} I_{mag}}{\pi f L S B_a^2} \quad (5.9)$$

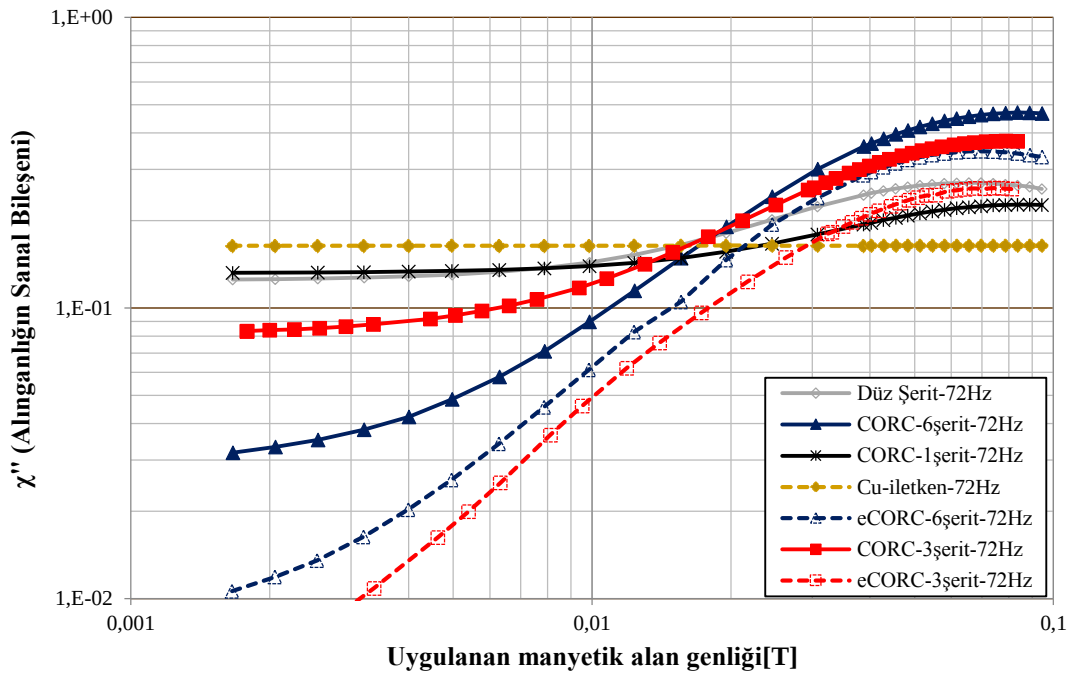
$$\chi'' = \frac{\mu_0 V_{kayıp} I_{mag}}{\pi f L S B_a^2} \quad (5.10)$$

Bu denklemlerde $V_{kayıp}$ akım ile aynı fazda ölçülen gerilim, V_{ind} akım ile aynı fazda olmayan indüktif gerilim bileşeni, L örneğin uzunluğu, I_{mag} bobinden geçen akım, B_a uygulanan manyetik alan, $f = \omega/2\pi$, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ ve S kablonun kesit alanıdır. Kayıplar yerine manyetik alınganlık değerlerinin gerçek kısımlarının incelenmesi, perdeleme etkilerinin incelenmesine ek olarak bazı belirli şekillerin alınganlık değerlerinin biliniyor olması gibi bir avantajı da sağlamaktadır. Sürekli bir süperiletken tüp için hesaplanan teorik değer $\chi' = -2$ ’dir [50].



Şekil 5.32. Manyetik alınganlığın gerçek bileşeni

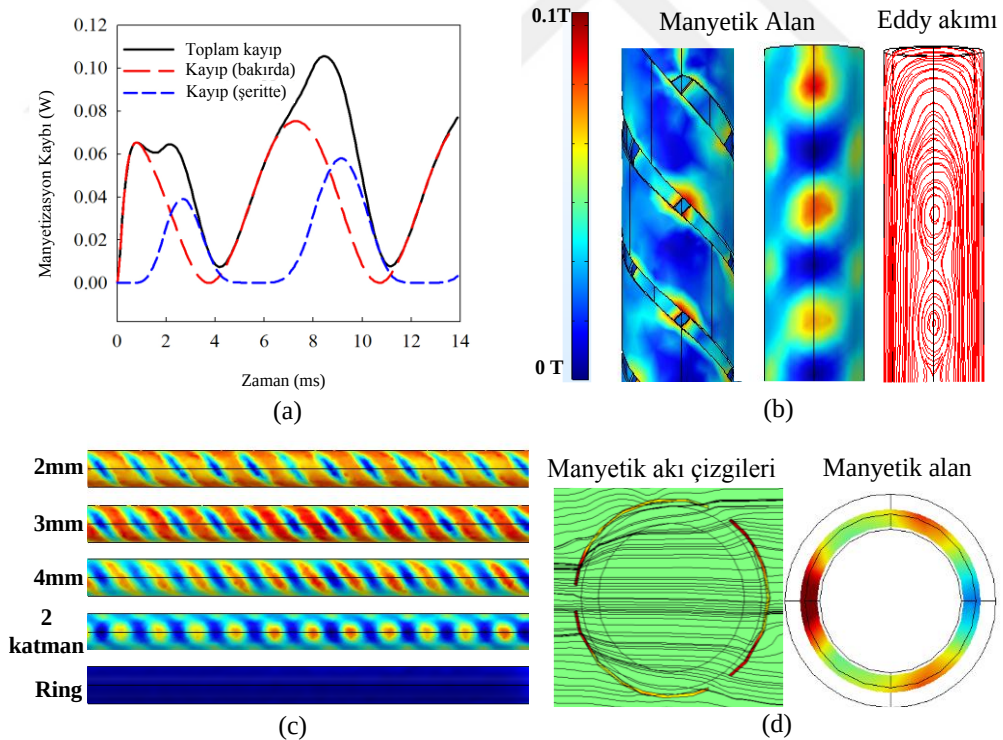
Katman sayısı arttıkça alınganlığın gerçek bileşenin teorik değere yaklaştığı görülmektedir. Katman sayısının artırılması ile boşlukların azalacağı ve bakır iletkene nüfuz eden manyetik alanın azalacağı söylenebilir.



Şekil 5.33. Manyetik alınganlığın sanal bileşeni

Alınanlık sonuçlarından elde edilen bilgilere göre “düz şerit” isimli örnek tek şerit ile üretilen CORC kablodan (tek şerit örneğe göre yaklaşık 1,41 kat daha fazla süperiletken kullanılmasına rağmen) daha iyi perdeleme özelliğine sahiptir. Bunun sebebi, manyetik alanın yüzeye dik geldiği alan düz şeritte, 1 şerit CORC kabloya göre daha fazla olmasıdır. 1 şerit CORC kabloda sarmal yapıdan dolayı manyetik alanın perdelenmesi daha azdır.

Şekil 5.33.’te manyetik alınganlığın sanal bileşenini göstermektedir. En yüksek katman sayısına sahip örnekler (6 şerit CORC ve e-CORC) düşük manyetik alanlarda en az kayıplara sahiptir. Bu tip kablolarda dış katman manyetik alanı dışladığından iç katmandaki kayıplar daha düşüktür. 6 şeritli CORC ve e-CORC arasındaki fark bakır iletkenlerden kaynaklanmaktadır. Aynı sebepten alınganlık değerinin yataydaki maksimum değeri, manyetik alanın tam nüfuz etmesinden, diğer örneklerle göre daha yüksektir.



Şekil 5.34. CORC kablunun benzetim sonuçları; (a) CORC kablodaki manyetizasyon kayıplarının dağılımı; (b) Manyetik alan ve akım dağılımı; (c) Farklı CORC kablolarda bakır iletkendeki manyetik alan dağılımları; (d) Tek katman CORC kabloda nüfuz eden manyetik alan [106]

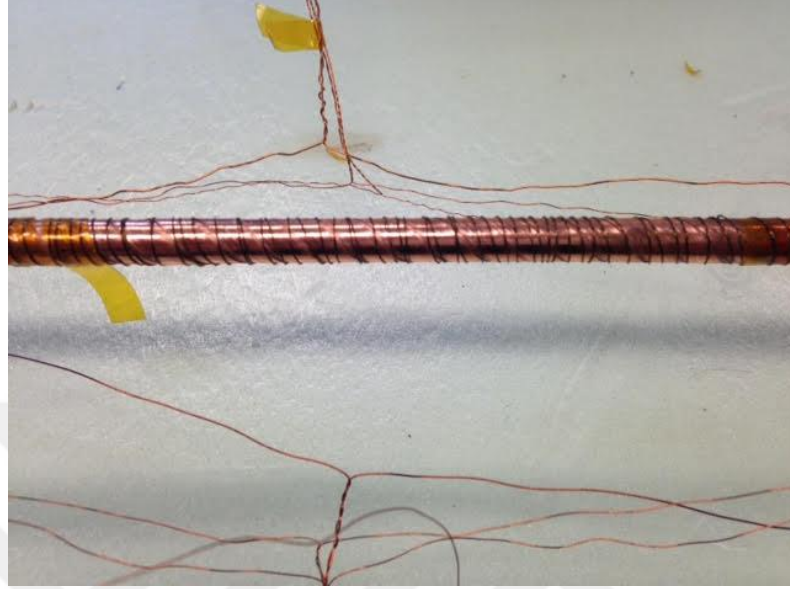
Manyetizasyon AA kayıplarını ve perdeleme etkisinin sebebinin ve bileşenlerini anlamak için COMSOL'da hazırlanmış 3 boyutlu bir CORC kablo modeli kullanılmıştır.

Şekil 5.34.'te dışardan bir manyetik alan uygulandığında CORC kabloda meydana gelen kayıpları gösteren bir 3D model ve sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5.34.(a)'da gösterildiği gibi CORC kablodaki toplam kaybın süperiletkendeki manyetizasyon kaybı ve bakır iletkendeki Eddy kaybı olmak üzere iki bileşeni mevcuttur. Kayıpta baskın bileşen, bakır iletkende meydana gelen bileşendir. CORC kablodaki manyetik alan dağılımı ve bakır iletkende oluşan Eddy akımları da Şekil 5.34.(b)'de gösterilmiştir. Açık bir şekilde süperiletken şeritlerin manyetik alanı perdeleyerek (dışlamasıyla) boşluklardan bakır iletkene nüfuz eden manyetik alan, bakır iletkende Eddy akımlarına sebep olmaktadır. Farklı genişliklere sahip şeritlerle üretilen CORC kablolarında, şeritlerin manyetik alanı bakır iletkenden perdeleme etkisi Şekil 5.34.(c)'de ve tek katmanlı bir CORC kablodaki manyetik alanın nüfuz etme karakteristiği de Şekil 5.34.(d)'de gösterilmiştir. Kullanılan şerit bakır iletkenin yüzeyini kaplama oranı arttıkça, bakır iletkene nüfuz eden manyetik alan dolayısıyla bakır iletkendeki Eddy kayıpları azalmaktadır. Fakat sürekli bir süperiletken ringdeki perdeleme etkisine tek katman ile ulaşılamamaktadır. Buna ulaşmak için deneysel sonuçlardan anlaşıldığı üzere katman sayısının en az 4 olması gerektiği tahmin edilmektedir. CORC kabloların 3D modeli ve benzetim çalışmalarının detayları [106]'da açıklanmaktadır.

5.8. Kablonun AA/AA durumu altındaki AA kayıpları

CORC kabloların AA/AA kayıpları bobin uygulamalarında kullanılabilecek bir parametredir. DA ile çalışan bobinler akım artışı anında AA/AA durumlarına maruz kalmaktadırlar. CORC kablonun AA/AA kayıplarının ölçülmesi için kalorimetrik kaynatma bir sistem kullanılmıştır. Bu sistemin ayrıntıları Bölüm 4.'te açıklanmıştır. Kalorimetrik kaynatma yöntemi AA kayıplardan kaynaklı buharlaşan kriyojenik soğutucu malzemenin miktarının ölçülmesiyle AA kayıplarının elde edildiği bir

yöntemdir. Kablo etrafına güç değeri bilinen bir ısıtıcının sarılmasıyla (Şekil 5.35.) akış oranı ve kayıp güç ilişkisi elde edilmektedir.



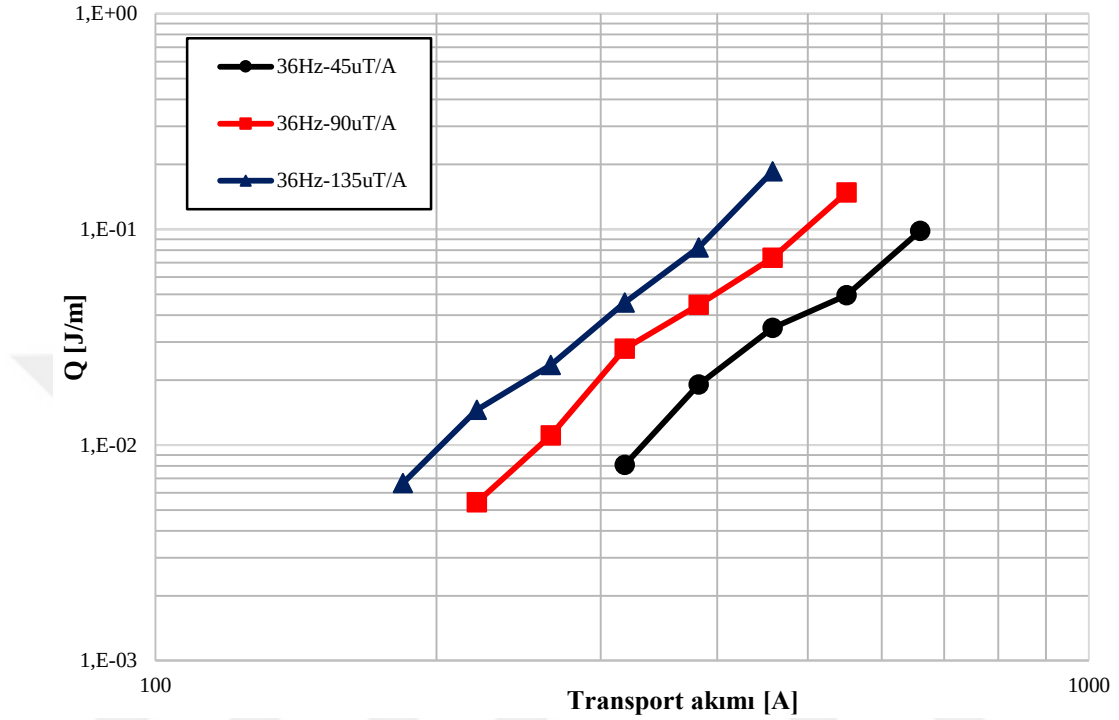
Şekil 5.35. Kablonun etrafına sarılan ısıtıcı

Örnek manyetik olmayan G10 ile üretilen bir kaba yerleştirilmekte ve bu kaptan buharlaşan gaz miktarını ölçmesi için bir akış metreye bağlanmaktadır.



Şekil 5.36. AA/AA kayıplarını ölçmek için kullanılan sistem

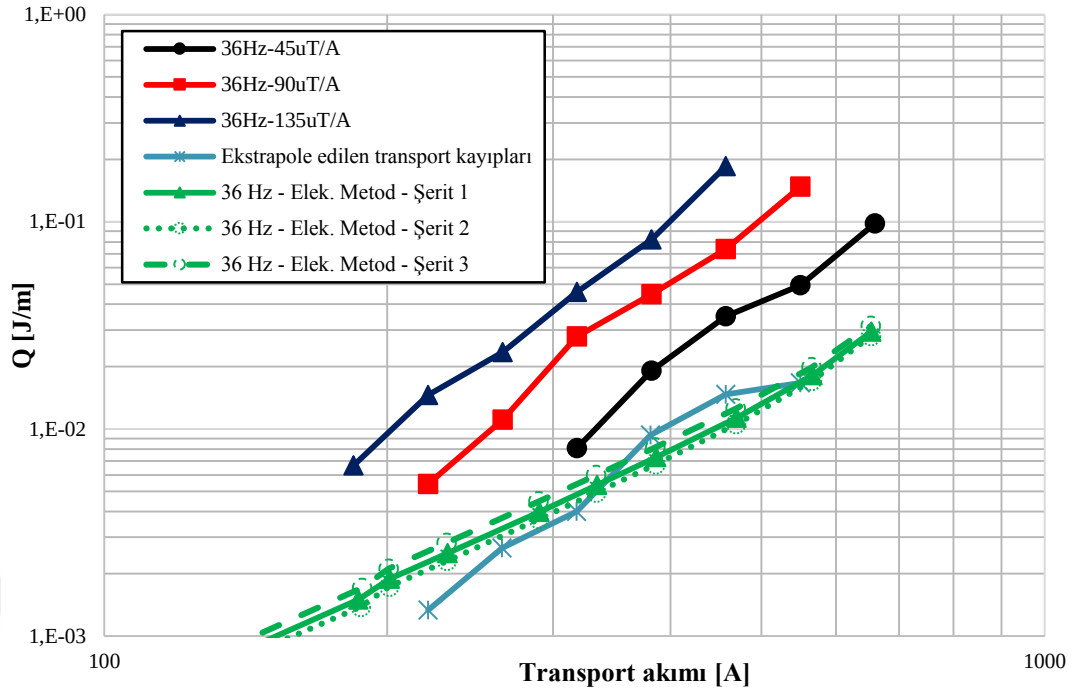
Kayıbı ölçülen kablunun uzunluğu 15 cm ve kayıplar bu yöntem kullanılarak 36 Hz’de ölçülmüştür. Tüm ölçümler 77 K’de gerçekleştirilmiştir. AA/AA kayıp ölçümleri manyetik alan – transport akımı oranlarında (45-90-135 $\mu\text{T/A}$) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.37. AA/AA durum altındaki kayıplar

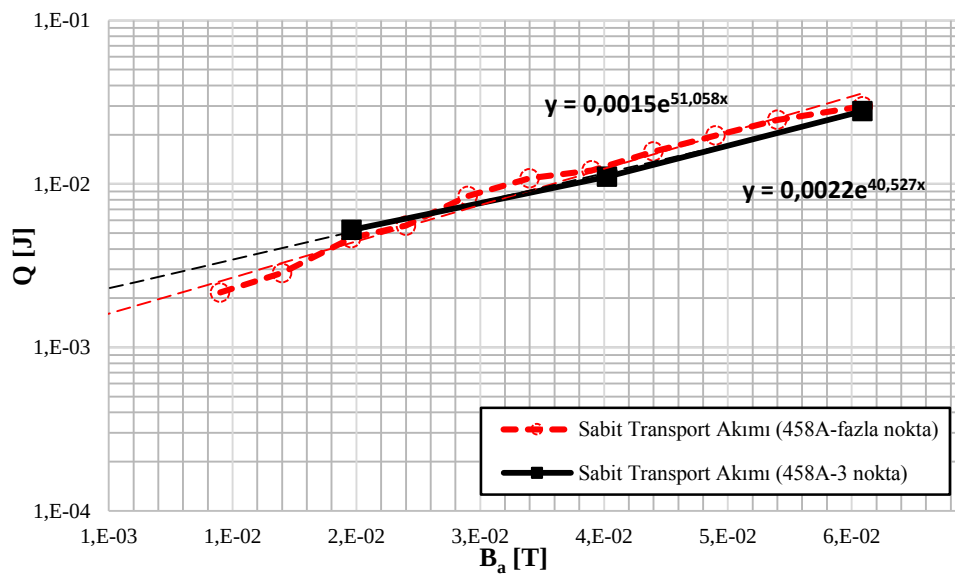
Bu sonuçlar, prensipte aynı akımı taşıyan fakat her katmanında farklı bir manyetik alana maruz kalan, CORC kablolarla üretilen bobinlerde AA kayıplarının tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 5.37.’de CORC kabloların AA/AA durumları altındaki kayıp davranışları gösterilmiş olup gelecekteki nümerik çalışmalar için bir referans olabilecek niteliktedir.

Bu sonuçların ekstrapolesi alınarak sıfır manyetik alan altındaki saf transport akımları hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şekil 5.38.’de gösterilmiş olup karşılaştırma yapabilmek için önceki bölümlerde elektriksel olarak elde edilen transport kayıpları sonuçlarıyla birlikte verilmiştir.



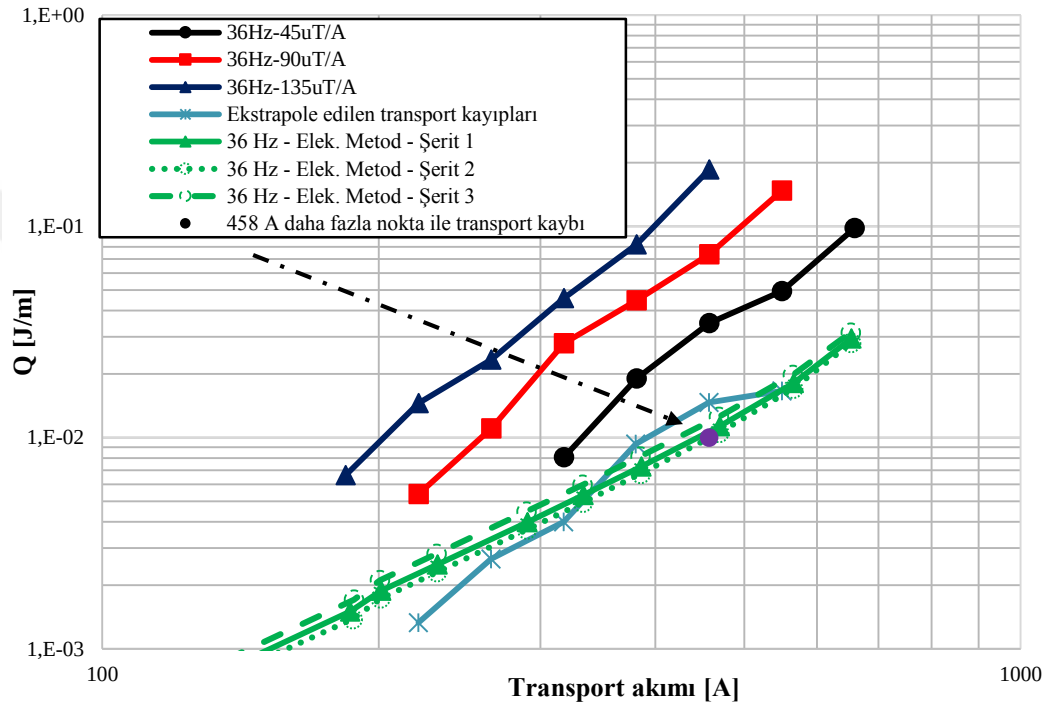
Şekil 5.38. Ekstrapole transport kayıpları ve elektriksel transport kayıpları

Bu sonuçlar transport kayıplarının aralığı ve davranışı hakkında hızlı ve ilk görüş vermekte olup, ayrıca kayıpların ölçülemeyecek kadar küçük olduğu durumlarda kullanılabilecek bir yöntemdir. Sonuçların doğruluğunu arttırmak amacı ile manyetik alan – transport akım oranlarının sayısı artırılarak transport akım kayıplarının tahmini gerçekleştirilmiştir. Aşağıda Şekil 5.39.’da $I_{transport} = 458A$ için ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.39. Sabit akımda (458A) farklı manyetik alanlar altında kayıpları

Nokta sayısının artırılması ile elde edilen kalorimetrik sonuçların ekstrapolesi, elektriksel yöntemle elde edilen sonuçlara kabul edilebilir oranda yakınlık göstermiştir ($0,0015/0,15=0,01$ J/m). Bu sonuç nokta olarak Şekil 5.38.'in üzerine eklenerek Şekil 5.40.'da gösterilmiştir. Sıfır manyetik alandaki kayıpların hesaplanması için yapılan ekstrapole işleminde üstel fonksiyon kullanılmasının deneysel veriler ile daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Günümüzde mevcut enerji kaynaklarının yetersizliği, artan nüfus ve yeni teknolojilerin hayata dahil olması sebebiyle enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacının artması ile enerji sistemlerinde enerji verimliliğini arttırmak ve kayıpların minimize edilmesi için yapılan çalışmalar daha da önem kazanmıştır. Geleneksel çözümler dışında süperiletken cihazların kullanımı da enerji sistemlerindeki sorunlara çözüm olabilmektedir. Fakat bu cihazların çalışması için düşük sıcaklıklara inilmesi gerekmekte, bunun bir sonucu olarak ise soğutma işleminde ek güç kaybı oluşmaktadır. Süperiletken bir cihazın geleneksel cihazların yerini alabilmesi için üretilen süperiletken cihazın toplam güç kaybının geleneksel eşdeğerine göre çok daha düşük olması gerekmektedir. Bu sebeple AA kayıplarının analizi oldukça önemli bir parametredir.

Ülkemizde süperiletken kabloların kullanımı ile güç sistemlerinde aktif olarak kullanılan bir uygulama bulunmamaktadır. Bu konuda Abant İzzet Baysal ve Ankara Üniversitesinde çalışmakta olan bilim adamları laboratuvar ortamlarında oldukça iyi sonuçlar almış ve gerçek güç sistemlerinde kullanılabilmesi için tam kapsamlı araştırmalar ve projeler yaparak sonuca oldukça yaklaştırmışlardır. Fakat ülkemizde Dünya'ya kıyasla Elektrik Mühendisliği alanında konuya olan ilgi ne yazık ki çok düşük bir seviyededir. Bu çalışmada süperiletkenlik ve alternatif akım kayıpları için temel bilgiler sunulmuş olup mühendislik alanında uygulamalarına dikkat çekmek istenmiştir. Gelecek vaat eden bu konunun anlaşılması; gerçek enerji sistemlerinde uygulamalarının bulunması ve uygun şartlar sağlandığında bu konsepti uygulamaya hazır bilim adamları ve mühendislerin bulunması ülkemizin geleceği açısından avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Bu amaçla mevcut çalışmada en temel uygulama sayılabilecek ve diğer tüm süperiletken uygulamalarda kullanılan süperiletken kablo

konseptleri, bu kabloların üretim aşamaları, AA kayıplarının ölçülmesi ve bu kayıpların bileşenleri incelenmiştir.

Çalışmada az sayıda YSS kablo konseptleri arasında bulunan CORC kablo modeli detaylı bir şekilde anlatılmıştır. CORC kablolarında önemli bir parametre olan bükme deneyleri farklı özelliklere sahip şeritlerde yapılarak bu özelliklerin şerit performansına etkileri sunulmuştur. Elde edilen sonuçlarda stabilize katman malzemesinin cinsi ve kalınlığının mevcut şeritlerin inceliğinden dolayı elektriksel performanslarında büyük bir değişime sebep olmadığı görülmüştür. Alttaş malzemenin ferromanyetik oluşu ve şerit genişliğinin artmasının AA kayıplarına olumsuz bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bükme deneyleri sırasında kritik akımları ölçülemeyen şeritler için bir darbe sinyal ölçüm sistemi oluşturulmuş ve detayları ile açıklanmıştır. Bu sistem ayrıca homojenlik çalışmalarına temel olabilecek bir prensipte çalışabileceği belirtilmiştir.

Süperiletken kabloların gerçek uygulamalarda yer edinmelerini güçleştiren önemli bir etken ekonomik olarak normal geleneksel iletkenlerden pahalı olmalarıdır. CORC kablolar genellikle Amerika menşeli şeritler ile üretilmektedir. Çalışmamız bu Amerika şeritlerine alternatif olabilecek eşdeğer özelliklere sahip Asya üretimi şeritlerin kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca üretilen kablonun bakır iletken ve Asya yapımı şeritler ile orta uzunlukta üretilen ilk CORC kablo olma özelliği mevcuttur.

CORC kabloların genel olarak bilinen bir dezavantajı merkezinde kullanılan ve akım taşımayan iletkenin sebep olduğu düşük kritik akım yoğunluklarıdır. Bu dezavantajdan, merkezdeki boşluktan soğutma işlemi gerçekleştirilerek belirli bir oranda faydanılabilmektedir. CORC kablolarındaki merkez bölgeyi bir soğutma kanalı olarak kullanabilmek için yüksek termal iletkenliğe sahip bir tüp iletken kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla merkez iletken, termal ve elektriksel özellikleri bakımından uygun olacağı düşünülen ve gerçek uygulamalarda kullanılmalarına imkan sağlayabilecek bakır malzemesinin kullanılması önerilmiştir. Çalışmamızda bu bakır iletkenin kullanımı ile kablonun elektriksel ve manyetik özelliklerine olan etkisi

detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu etkilerin anlaşılması amacıyla Asya menşeli 3 şerit ile üretilmiş tek katman bir CORC kablo üretilmiştir. Kablolama işlemi sırasında kritik akımda bir azalma gözlemlenmemiştir. Kritik akımda bir azalmanın meydana gelmemesi mekanik, geometrik şekil ve manyetik alan açısından açıklanmıştır. Kablonun elektriksel ve manyetik özelliklerinin tayin edilebilmesi için yeni akım terminalleri tanıtılmıştır. Ayrıca terminal dirençlerinin, şeritlerdeki akım dağılımına olan büyük etkileri gösterilmiştir. Terminal dirençlerinin ayarlanmasıyla akım dağılımlarının ayarlanabilmesi bir avantaj olsa da işlemin zorluğu bir dezavantajdır.

Kablonun AA kayıpları farklı frekanslarda, 77 K sıcaklıkta azot banyosunda ölçülmüştür. Elektriksel yöntemler dışında, yüksek verimlilikte sonuçlar veren ve elektriksel sonuçlarla örtüşen termal bir yöntemde sunulmuştur.

Merkez iletkenin bakır kullanılması ile transport kayıplarında bir artış gözlemlenmektedir. Kayıp eğrisinin düşük bir eğime ve frekans bağımlılığına sahip olması, bakır iletkenin ek Eddy kayıplarına sebep olduğunu göstermektedir. Kaybın bu bileşeni, şeritlerin sarmal yapılarının bir sonucu olarak bakır iletken üzerinde meydana getirdikleri eksenel manyetik alandan kaynaklandığı tahmin edilmiştir. Bakır iletkeninde meydana gelen bu kaybın azaltılması için çift sayıda katman yapılması ve ardı ardına gelen katmanların birbirlerine ters yönlerde sarılması ilk defa önerilmektedir. Böylelikle bakır iletkeninde meydana gelen eksenel manyetik alanların birbirini nötrleyeceği öngörülmektedir. Bu önerinin geçerliliği deneysel çalışmalarla gelecekte kontrol edilmesi planlanmaktadır.

Deneysel sonuçların yanı sıra nümerik sonuçlarda bakır iletkenin kablodaki manyetizasyon kayıplarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Düşük manyetik alanlarda süperiletken şeritler manyetik alanı perdeleyerek bakır iletkenine uygulanan dış-harici alandan daha az manyetik alana maruz kalmasını sağladığı görülmüştür. “Perdeleme etkisi” olarak tanımlanan bu olay farklı konfigürasyonlara sahip CORC kablolar ile deneysel olarak açıklanmış olup artan katman sayısı ile CORC kabloların manyetik alınganlık değerlerinin, kesintisiz süperiletken bir tüp ile aynı olabileceği

gösterilmiştir. Bu amaçla bakır iletken ile üretilecek CORC kablolarında en az 4 katman kullanılması önerilmiştir.

Kabloya eş zamanlı aynı fazda alternatif akım ve alternatif manyetik alan uygulandığında oluşan AA kayıpları termal yöntem ile 36 Hz'de ölçülmüştür. Bu ölçümlerde daha güvenilir sonuç elde edilebilmesi için daha sık aralıklarla ölçüm alınması gerektiği önerilmiş ve deneysel olarak gösterilmiştir. Bu sonuçlar CORC kablo ile yapılabilecek bobinlerde ve gelecekte planlanan nümerik modellerin sonuçları ile karşılaştırmada kullanılacaktır.

CORC kablolar ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle merkez iletken olarak manyetik olmayan malzemeler kullanılmıştır. Bakır iletken kullanılan çalışmalarda ise bu iletkenin kayıpları incelenmemiştir. Çalışmamızda ilk defa bakır iletkenin kullanılabilirliği gösterilmiş olup; DA özelliklere etkisi bulunmadığı fakat AA uygulamalarda veya manyetik alanın hızla değiştiği uygulamalarda dikkate alınması gereken bir etken olduğu çalışmamızda deneysel olarak kanıtlanmıştır. Eğer CORC kablonun kullanılacağı uygulamada AA kayıpları ana kriter ise katman sayısının artırılması veya aday olarak farklı bir merkez iletken malzemenin bulunması gerektiği önerilmiştir. Kablo Amerikan yapımı şeritlerle üretilen muadillerine göre %66 daha uygun ekonomik özelliğe sahiptir. [106]'da CORC kabloların ilk 3 boyutlu COMSOL modeli gerçekleştirilmiştir. Model kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile benzerlik göstermiştir. COMSOL modeli ile kablonun kayıp bileşenleri daha detaylı anlaşılmıştır. Bu model aynı zamanda gelecekte yapılması planlanan çalışmalar için kullanışlı bir araçtır.

Tüm deneysel ve nümerik sonuçlar ışığında CORC kabloların azami özelliklerine kavuşmadıkları görülmektedir. Şerit üretimindeki teknolojilerin gelişmesi ve fiyatlarının düşmesi ile geleneksel sistemler ile arasındaki fiyat farkının azalması, üretilen süperiletken kabloların akım yoğunluklarının geliştirilerek yükseltilmesi, soğutma sistemlerinde yapılan geliştirmeler ve Dünya'da enerji alanında farklı konseptlere olan ilginin artması sebebiyle süperiletken uygulamalara olan ilgi ve gereklilik daha da artacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] <http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS> Erişim Tarihi: 06.03.2017.
- [2] <http://www.adb.org/sites/default/files/publication/29782/energy-outlook.pdf> Erişim Tarihi: 06.03.2017.
- [3] Jiahui, Z., Qui, M., Wei, B., Zhang, H., Lai, X. ve Yuan, W., Design, dynamic simulation ve construction of a hybrid HTS SMES (high-temperature superconducting magnetic energy storage systems) for Chinese power grid, Energy, Elsevier, (51):184-192, 2013.
- [4] Ali, M., Wu, B. ve Dougal, R. A., An Overview of SMES Appliations in Power and Energy Systems, IEEE Transaction on Sustainable Energy, (1) 1, 2010.
- [5] Fang, J., Wen, J., Wang, S., Shi, J., Ren, L., Tang, Y., Peng X. ve Chen, Z., Laboratory and Field Tests of Movable Conduction-Cooled High-Temperature SMES for Power System Stability Enhancement, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, (23) 4, 2013.
- [6] Arai, Y., Seino, H., Yoshizawa K. ve Nagashima K., Development of superconducting magnetic bearing with superconducting coil and bulk superconductor for flywheel energy storage system, Physica C, (494), pp. 250-254, 2013.
- [7] Kang, B., Kim, S., Sung B. ve Park, J., A Study on Optimal Sizing of Superconducting Magnetic Energy Storage in Distribution Power System, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, (22) 3, 2012.
- [8] Hull, J. R., Applications of high-temperature superconductors in power technology, Rep. Prog. Phys., no. 66, pp. 1865-1886, 2003.
- [9] Malozemoff, A. P., Maguire, J., Gamble, B. ve Kalsi, S., Power Applications of High-Temperature Superconductors: Status and Perspectives, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, cilt 12, no. 1, Mart 2002.
- [10] Cheadle, M. J., Wozniak, M., Bromberg, L., Glowacki, B. A., Jiang, X., Zeng, R., Minervini, J. V. ve Brisson, J. G., DC Superconducting Cable Using MgB₂ Wires, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, (23) 3, 2013.

- [11] Scanlan, R. M., Malozemoff, A. P. ve Larvaletier, D. C., Superconducting Materials for Large Scale Applications, Proceedings of the IEEE, cilt 92, no. 10, Ekim 2004.
- [12] Morandi, A., State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system, Physica C, no. 484, p. 242–247, 2013.
- [13] Noe, M. ve Steurer, M., High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status, Supercond. Sci. Technol., no. 20, p. R15–R29, 2007.
- [14] Kovalsky, L., Yuan, X., Tekletsadik, K., Keri, A., Bock J. ve Breuer, F., Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, cilt 15, no. 2, Haziran 2005.
- [15] Gandioli, C. , Tixador P. ve Mariani, G. B., Tests and Simulations of Different YBCO Tapes for FCL, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, cilt 22, no. 3, Haziran 2012.
- [16] Shiohara, Y., Yoshizumi, M., Takagi, Y. ve Izumi, T., Future prospects of high T_c superconductors-coated conductors and their applications, Physica C, no. 484, pp. 1-5, 2013.
- [17] Hassenzahl, W. V., Hazelton, D. W., Johson, B. K., Komaerk, P., Noe, M. ve Reis, C. T., Electric Power Applications of Superconductivity, Proceedings Of The IEEE, cilt 92, no. 10, Ekim 2004.
- [18] Onnes, H. K., The superconductivity of mercury, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 1911.
- [19] <https://www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/electric-current-and-resistance-19/resistance-and-resistors-146/dependence-of-resistance-on-temperature-523-5640>. Erişim Tarihi: 01.04.2016.
- [20] Meissner, W., Ochsenfeld, R., Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit, Naturwissenschaften 21 (44): 787–788, 1933.
- [21] Bardeen, J., Cooper, L. N., Schrieffer, J. R., Microscopic Theory of Superconductivity, Physical Review 106 (1): 162–164, Nisan 1957.
- [22] Bednorz, J. G., Müller, K. A., Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system, Zeitschrift für Physik B Condensed Matter, (64) 2, sayfa 189-193, 1986.

- [23] Hartikainen, T., Lehtonen, J., Mikkonen, R., Reduction of greenhouse-gas emissions by utilization of superconductivity in electric-power generation, *Applied Energy*, (78) 2, syf 151-158, Haziran 2004.
- [24] Biswas, M., Azim, S., Saha, T. K., Zobayer, U., Urmi, M. C., Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems, *Smart Grid and Renewable Energy*, 2013, 4, 122-132.
- [25] Wang, Y., *Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering*, Wiley, 2013.
- [26] Solovyov, M., Šouc, J., Gömöry, F., Investigation of superconductor uniformity in CC tapes by magnetic field mapping, *Superconductivity Centennial Conference*, *Physics Procedia* 36, sayfa 617 – 622, 2012.
- [27] Solovyov, M., Pardo, E., Souc, J., Gömöry, F., Skarba, M., Konopka, P., Pekarcikova M., Janovec, J., Non-uniformity of coated conductor tapes, *Supercond. Sci. Technol.* 26 115013, 2013.
- [28] Amemiya, N., Kasai, S., Yoda, K., Jiang, Z., Levin, G. A., Barnes P. N., Oberly, C. E., AC loss reduction of YBCO coated conductors by multifilamentary structure, *Supercond. Sci. Technol.*, no. 17, syf. 1464-1471, 2004.
- [29] Amemiya, N., Jiang, Z., Ayai N., Hayashi, K., Total AC loss characteristics of high T_c superconducting tapes, *Physica C*, no. 392-396, syf. 1083-1090, 2003.
- [30] Amemiya, N., Jiang, Z., Nakahata, M., Yagi, M., Mukoyama, S., Kashima, N., Nagaya, S., Shiohara, Y., AC Loss Reduction of Superconducting Power Transmission Cables Composed of Coated Conductors, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, (17) 2, Haziran 2007.
- [31] Glowacki, B. A., Majoros, M., Rutter, N. A., Campbell, A. M., Superconducting-magnetic heterostructures as a new method of decreasing transport AC losses in multifilamentary and coated superconductors, *Cryogenics*, (41)103-109, 2001.
- [32] Nguyen, D. N., Sastry, P. V. S., Zhang, G. M., Knol, D. C., Schwartz, J., AC Loss Measurement With a Phase Difference Between Current and Applied Magnetic Field, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, (15) 2, Haziran 2005.
- [33] Yoshida, T., Fukui, S., Yamaguchi, M., Sato, T., AC Loss Characteristics of Bi2223 Twisted Multifilamentary Tape in AC Longitudinal Magnetic Field, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, (13) 2, Haziran 2003.

- [34] Jiang, Z., Amemiya, N., Ayai, N., Hayashi, K., Total AC loss characteristics of untwisted and twisted Bi-2223 multifilamentary tapes and interaction between self and external magnetic fields, *Supercond. Sci. Technol.*,(17) 1311-18, 2004.
- [35] Jiang, Z., Amemiya, N., Nishioka, T., Oh, S. S., AC loss measurements of twisted and untwisted BSCCO multifilamentary tapes, *Cryogenics*, (45), 29-34, 2005.
- [36] Amemiya, N., Nakahata, M., Numerical study on AC loss characteristics of superconducting power transmission cables comprising coated conductors with magnetic substrates, *Physica C*, no. 463-465, pp. 775-780, 2007.
- [37] Spektor, M., Meerovich, V., Sokolovsky, V., Prigozhin, L., AC losses in thin coated conductors under non-sinusoidal conditions, *Supercond. Sci. Technol.*, cilt 25, p. 10pp, 2012.
- [38] Choi, S., Yoon, J. H., Won, M. S., Lee, B. S., Ok, J. W., Kim, B. C., Park, J. Y., Kim, J. H., Dou, S. X., Lee, S. H., T. Kiyoshi, Prediction of AC Losses In MgB₂ Superconducting Wires as a Function of Transport Currents and Temperatures, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Cilt 22, No. 3, Haziran 2012.
- [39] Li, Q., Amemiya, N., Nishino, R., Nakamura, T., Okuma, T., AC loss reduction of outer-diameter-fixed superconducting power transmission cables using narrow coated conductors, *Physica C*, no. 484, pp. 217-222, 2013.
- [40] Kovachev, V., *Energy Dissipation in Superconducting Materials*, 1 ed. New York: Oxford University Press, 1991.
- [41] Carr, W. J., *AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors*, 2 ed. New York: Taylor and Francis, 2001.
- [42] Martinez, J. M. C., *Analysis of ac losses in superconducting electrical components for application in the design of electrical systems*, İspanya: PhD Thesis University of Extremadura, 2010.
- [43] Lee, E., *Ac loss in superconducting composites: continuous and discrete models for round and rectangular cross sections, and comparisons to experiments*, America: PhD Thesis The Ohio State University, 2004.
- [44] Safran, S., MgB₂ süperiletken tellerde alternatif akım kaybı ve akı perçinleme mekanizmaları, Ankara Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, doktora tezi, 2010.
- [45] Saxena, A. K., *High-Temperature Superconductors*, Berlin: Springer, 2010.
- [46] Bean, C.P., Magnetization of Hard Superconductors, *Phys. Rev. Lett.* 8, 250 1962.

- [47] Kim, Y. B., Hempstead C. F. ve Strnad A. R., Critical persistent currents in hard superconductors. *Phys. Rev. Lett.*, 9, 306, 1962.
- [48] Norris, W. T., Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying as: isolated conductors and edges of thin sheets, *Journal of Physics D* 3, 489-507, 1970.
- [49] Gömöry, F., Gherardi, L., Mele, R., Morin D. ve Crotti G., Critical state and AC losses in multifilamentary BiSrCaCuO-2223/Ag tapes studied by transport and magnetic measurements. *Physica C*, 279, 39, 1997.
- [50] Hancox, R.: Calculation of ac losses in a type II superconductor, *Proc. IEE*, 113, 1221-8, 1966.
- [51] Rabbers, J. J., AC loss in superconducting tapes and coils, PhD Thesis, Twente University, Enschede, Holland, 2001.
- [52] Gömöry, F., Superconductor dynamics, In: *Proc.CAS-CERN Accelerator School: Superconductivity for Accelerators*. Erice, Italy, Geneva: CERN. ISBN 978-92-9083-405-2. P. 477-495, 2014.
- [53] Brandt, E. H. ve Indenbom, M.: Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field, *Phys. Rev. B* 48, 12893, 1993.
- [54] Kwasnitza, K., ve Clerc, S., AC losses of superconducting high Tc multifilament Bi-2223/ag sheathed tapes in perpendicular magnetic fields, *Physica C* 233, 423–435, 1994.
- [55] Fabbriatore, P., Farinon, S., Innocenti, S., Gömöry, F., Magnetic flux shielding in superconducting strip arrays, *Phys. Rev. B* 61, 6413–6421, 2000.
- [56] Noe, M., Superconducting power applications and their potential to increase energy efficiency. *Symposium on Superconducting Devices for Wind Energy*. Barcelona, 2011.
- [57] Gu, C., Zhang, Y., Li, F., & Yuan, W., Economic analysis of interconnecting distribution substations via superconducting cables. *Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, CA: IEEE, 2013.
- [58] American Superconductor, *New Transmission Options – Case Study Superconductor Cables*. Denver, Colorado, Sheraton Downtown, America. Nisan 20-21, 2011.
- [59] SuperPower, Inc. <http://www.superpower-inc.com>. Erişim Tarihi: 06.03.2017.
- [60] American Superconductor Corporation, http://www.amsc.com/solutions-products/hts_wire.html. Erişim Tarihi: 06.03.2017.

- [61] Fujikura Ltd., <http://www.fujikura.com>. Erişim Tarihi: 06.03.2017.
- [62] Wilson, M. N., Superconductivity and Accelerators: the Good Companions, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 111-121, 1999.
- [63] Goldacker, W., Roebel Cable from Coated Conductors CEC/ICMC Conf. Keystone, CO, USA, August 29– September 2, 2005.
- [64] Goldacker, W., Nast, R., Kotzyba, G., Schlachter, S. I., Frank, A., Ringsdorf, B., Schmidt, C., Komarek, P., High current DyBCO- ROEBEL Assembled Coated Conductor (RACC), J. Phys. Conf. Ser. 43, 901, 2006.
- [65] Goldacker, W., Frank, A., Heller, R., Ringsdorf, B., Schlachter, S. I., Kling, A., Schmidt, C., AIP Conf. Proc. 986, 461, 2008.
- [66] Badcock, R. A., Long, N. J., Mulholland, M., Hellmann, S., Wright, A., Hamilton, K. A. , Progress in the manufacture of long length YBCO Roebel cables, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (3) 3244, 2009.
- [67] Fleiter, J., Ballarino, A., Bottura, L., Tixador, P., Electrical characterization of REBCO Roebel cables, Supercond. Sci. Technol. 26 65014, 2013.
- [68] Jiang, Z., Staines, M., Badcock, R. A., Long, N. J., Amemiya, N., Transport AC loss measurement of a five strand YBCO Roebel cable, Supercond. Sci. Technol. 22 95002, 2009.
- [69] Jiang, Z., Thakur, K. P., Staines, M., Badcock, R. A., Long, N. J., Buckley, R. G., Caplin, A. D., Amemiya, N., The dependence of AC loss characteristics on the spacing between strands in YBCO Roebel cables, Supercond. Sci. Technol. 24 65005, 2011.
- [70] Šouc, J., Gomory, F., Vojenčiak, M., Calibration free method for measurement of the AC magnetization loss Supercond. Sci. Technol. 18 592, 2005.
- [71] Terzieva, S., Vojenciak, M., Pardo, E., Grilli, F., Drechsler, A., Kling, A., Kudymow, A., Gomory, F., Goldacker, W., Transport and magnetization ac losses of ROEBEL assembled coated conductor cables: measurements and calculations, Supercond. Sci. Technol. 23 14023, 2010.
- [72] Grilli, F., Pardo, E., Simulation of ac loss in roebel coated conductor cables, Supercond. Sci. Technol. 23 2010 115018, 2010.
- [73] Pardo, E., Grilli, F. Numerical simulations of the angular dependence of magnetization AC losses: coated conductors, Roebel cables and double pancake coils, Supercond. Sci. Technol. 25 14008, 2012.

- [74] Goldacker, W., Grilli, F., Pardo, E., Kario, A., Schlachter, S.I., Vojenciak, M., Roebel cables from REBCO coated conductors: a one century old concept for the superconductivity of the future, *Superconductor Science and Technology* 27(9), 2014.
- [75] Takayasu, M., Chiesa, L., Bromberg, L. ve Minervini, J. V., HTS twisted stacked-tape cable conductor, *Supercond. Sci. Technol.* 25 014011 (21pp), 2012.
- [76] Takayasu, M., Minervini, J. V. ve Bromberge, L., HTS Twisted Stacked-tape Cable Development MIT PSFC Report JA-11-10, 2011.
- [77] Takayasu, M., Chiesa, L., Bromberg, L. ve Minervini, J. V., Cabling method for high current conductors made of HTS tapes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 21 2341–4, 2010.
- [78] Takayasu, M., Superconducting tape cable termination US Provisional Patent Application No. 61/400,858, 2010.
- [79] Takayasu, M., Chiesa, L., Bromberge, L. ve Minervini, J. V., Investigations of HTS Twisted Stacked-tape Conductor MIT, PSFC Report JA-11-4, 2011.
- [80] Wilson, M. N., *Superconducting Magnet* (New York: Oxford University Press, 1983).
- [81] Amemiya, N., Sato, S. ve Ito, T., Magnetic flux penetration into twisted multifilamentary coated superconductors subjected to ac transverse magnetic fields *J. Appl. Phys.* 100 123907, 2006.
- [82] Sumption, M. D., Collings, E. W., ve Barnes, P. N., AC loss in striped (filamentary) YBCO coated conductors leading to designs for high frequencies and field-sweep amplitudes *Supercond. Sci. Technol.* 18 122–34, 2005.
- [83] Van der Laan, D. C., ve Ekin, J. W., Large intrinsic effect of axial strain on the critical current of hightemperature superconductors for electric power applications, *Applied Physics Letters* 90, 052506, 2007.
- [84] Van der Laan, D. C., ve Ekin, J. W., Dependence of the critical current of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors on in-plane bending, *Supercond. Sci. Technol.* 21 115002, 2008.
- [85] Van der Laan, D. C., $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications, *Supercond. Sci. Technol.* 22 065013, 2009.

- [86] Van der Laan, D. C., Ekin, J. W., Douglas, J. F., Clickner, C. C., Stauffer, T. C., ve Goodrich, L. F., Effect of strain, magnetic field and field angle on the critical current density of YBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductors, Supercond. Sci. Technol. 23 072001, 2010.
- [87] Van der Laan, D. C., Lu, X. F. ve Goodrich, L. F., Compact GdBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications, Supercond. Sci. Technol. 24 042001, 2011.
- [88] Van der Laan, D. C., Goodrich, L. F., ve Haugan, T. J., High-current dc power transmission in flexible RE-Ba₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cables, Supercond. Sci. Technol. 25 014003, 2012.
- [89] Van der Laan, D. C., Noyes, P. D., Miller, G. E., Weijers, H. W., Willering, G. P., Characterization of a high-temperature superconducting conductor on round core cables in magnetic fields up to 20 T, Supercond. Sci. Technol. 26 045005, 2013.
- [90] Souc, J., Vojenciak, M. ve Gömöry, F., Experimentally determined transport and magnetization ac losses of small cable models constructed from YBCO coated conductors, Supercond. Sci. Technol. 23 045029, 2010.
- [91] Souc, J., Gömöry, F., Kovac, J., Nast, R., Jung, A., Vojenciak, M., Grilli, F. ve Goldacker, W., Low AC loss cable produced from transposed striated CC tapes, Supercond. Sci. Technol. 26 075020, 2013.
- [92] Vojenčiak, M., Kario, A., Ringsdorf, B., Nast, R., van der Laan, D. C., Scheiter, J., Jung, A., Runtsch, B., Gömöry, F., ve Goldacker, W., Magnetization ac loss reduction in HTS CORC[®] cables made of striated coated Conductors, Supercond. Sci. Technol. 28 104006, 2015.
- [93] Majoros, M., Sumption, M. D., Collings, E. W. ve van der Laan, D. C., Magnetization losses in superconductin YBCO conductor-on-round-core (CORC) cables, Supercond. Sci. Technol. 27 125008, 2014.
- [94] Barth, C., van der Laan, D. C., Bagrets, N., Bayer, C. M., Weiss, K-P ve Lange, C., Temperature- and field-dependent characterization of a conductor on round core cable, Supercond. Sci. Technol. 28 065007, 2015.
- [95] Weiss, J. D., Mulder, T., Kate, H. J. ve van der Laan, D. C., Introduction of CORC[®] wires: highly flexible, round high-temperature superconducting wires for magnet and power transmission applications, Supercond. Sci. Technol. 30 014002, 2017.

- [96] Van der Laan, D. C., Lu, X., Jager, A., Bromberg, L., Minervini, J., Noyes, P., Miller G., ve Weijers, H., High-temperature superconducting Conductor on Round Core magnet cables operated at high current ramp rates in background fields of up to 19 T, CEC-ICMC 2013, Anchorage, Alaska, June, 2013.
- [97] Muzzi, L., Marzi, G. D., Zenobio, A. ve della Corte, A., Cable-in-conduit conductors: lessons from the recent past for future developments with low and high temperature superconductors, *Superconductor Science and Technology* 28 053001, 2015.
- [98] Sekhar, D. R., Rao, V.V., Three dimensional CFD analysis of Cable-in-Conduit Conductors (CICCs) using porous medium approach, *Cryogenics* 54, 20–29, 2013.
- [99] Celentano, G., De Marzi, G., Fabbri, F., Muzzi, L., Tomassetti, G., Anemona, A., Chiarelli, S., Seri, M., Bragagni, A. ve della Corte, A., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 24 4601805, 2014.
- [100] http://www.nexans.us/eservice/US-en_US/navigatepub_185818_-32003/Nexans_is_in_the_top_50_Most_Innovative_Companies_.html.
Erişim tarihi: 16.06.2016.
- [101] Okamoto, H., Sumiyoshi, F., Miyoshi, K. ve Suzuki, Y., The Nitrogen Boil-Off Method for Measuring AC Losses in HTS Coils, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 16, NO. 2, June 2006.
- [102] Shin, H. S., Kim, K., H., Dizon, J. R. C., Tae-Young Kim, Rock-Kil Ko ve Sang-Soo Oh, The strain effect on critical current in YBCO coated conductors with different stabilizing layers, *Superconductor Science and Technol.* 18 S364–S368, 2005.
- [103] Cheggour, N., Ekin, J. W., Clickner, C. C., Feenstra, R., Goyal, A., Paranthaman, M., Lee, D. F., Kroeger, D. M. ve Christen, D. K., Transverse Compressive Stress, Fatigue, And Magnetic Substrate Effects On The Critical Current Density Of Y-Ba-Cu-O Coated Rabbits Tapes, *Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the International Cryogenic Materials Conference* Vol. 48, 2002.
- [104] Willering, G. P., van der Laan, D. C., Weijers, H. W., Noyes, P. D., Miller, G. E., ve Viouchkov, Y., Effect of variations in terminal contact resistances on the current distribution in high-temperature superconducting cables *Supercond. Sci. Technol.* 28 035001, 2015.
- [105] Fabbriatore, P., Farinon, S., Incardone, S., Gambardella, U., Saggese, A., ve Volpini, G., The transverse resistivity in S/C multifilament wires studied through ac susceptibility measurements *J. Appl. Phys.* 106 083905, 2009.

- [106] Sheng, J., Vojenciak, M., Terzioğlu, R., Frolek, L., Gömöry, F., Numerical Study on Magnetization Loss Characteristics of Superconducting Conductor on Round Core Cables. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 27(4), 2017.



EKLER

EK 1: YSS şerit ve kablo için nümerik bir model

Bu bölümde COMSOL 'da sonlu elemanlar yöntemiyle şerit ve kabloların modellenmesi açıklanmıştır.

Bazı problemlerin analitik yöntemlerle çözümü bulunmamaktadır. Bu gibi durumlarda nümerik metotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Pecher ve McCulloch 3 boyutlu düzlemde süperiletkenliği modellemek için denklemlerde manyetik alan H' ı bilinmeyen değişken olarak tanımlamışlardır. Tip II süperiletkenleri kompozit E-J fonksiyonuyla tanımlamış ve nonlinear eddy-akım problemini de sınır elemente dayalı Galerkin tekniğini curl-curl-H denkleminde uygulayarak çözüm bulmuşlardır.

Ω_c ve Ω_d iletken ve dielektrik bölgeleri temsil etmektedir. J_e 'nin zamanla değişen H_s -eddy akımları iletkende indüklenmektedir. Eddy-akımları konusunun çözüm metodu manyetizasyon H_e ve toplam manyetik alanı belirlemektir.

$$H = H^s + H^e \quad (E1.1)$$

- Denklemler ve Sınır Koşulları

Modellemede kullanılan Maxwell denklemleri:

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= J \\ \nabla \times E &= -\frac{dB}{dt} \end{aligned} \quad (E1.2)$$

$$\begin{aligned}\nabla \cdot J &= 0 \\ \nabla \cdot B &= 0\end{aligned}\tag{E1.3}$$

$$\begin{aligned}B &= \mu H \\ E &= \rho J\end{aligned}\tag{E1.4}$$

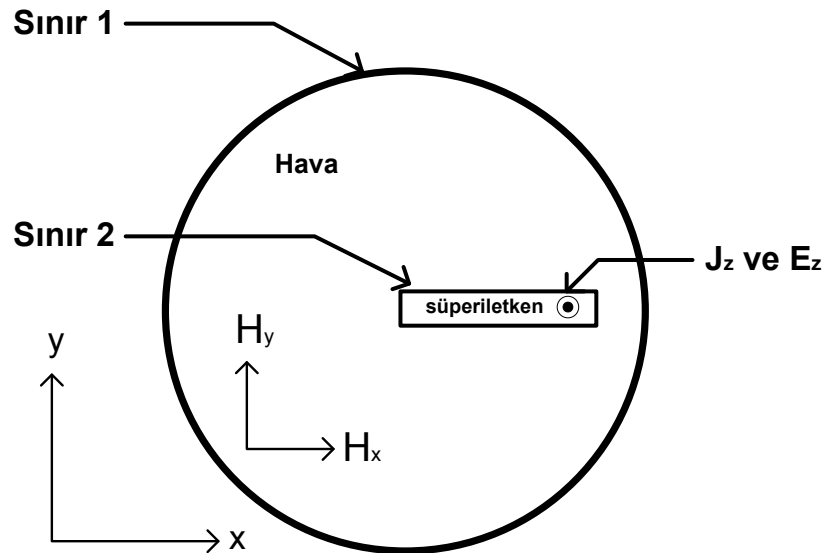
Önemli nokta standart Eddy-akım problemindeki normal iletkeni II. Tip süperiletkeninin E - J ilişkisiyle yer değiştirmektir:

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_0(B)} \right)^n\tag{E1.5}$$

Denklemlerin çözümü sayısal olarak FEM kullanılarak elde edilmektedir.

- Modeli oluşturmak ve bölgelere ayırma

Kağıt düzleminin x-y düzlemini ve z yönünde sonsuz uzunlukta olan bir alan düşünelim.



Şekil Ek-1.1. Modelleme gösterimi.

Dikdörtgen bir yüzey alanına sahip uzun bir süperiletken şerit y yönünde homojen olan bir manyetik alana konuluyor.

Aşağıda programa girilen parametre, sabitler ve değişkenler verilmiştir.

Şerit genişliği = 4 mm

Kalınlık;

Süperiletken=1µm

Bakır stabilize katmanı (her biri)=20µm

Alttaş (hastelloy)=50µm

Kullanılan Parametreler:

$J_c = 211 / (0.004 * 0.000001) \text{ [A/m}^2\text{]}$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

Freq=72 [Hz]

$E_0 = 10^{-4} \text{ [V/m]}$

Bakır iletkenliği=4.2e7[S/m]

Alttaş iletkenliği=11.97[MS/m]

Değişkenler:

$H_0\phi = (H \text{ value}) * \sin(2 \pi ft) / \mu_0$

Süperiletken için kullanılan elektrik alan ifadesi:

$\text{norm}E = E_0 (\text{norm}J / J_c)^{2.5}$

Dış sınırlardan manyetik alanın uygulanması:

$H_0 = [0 \ H_0\phi \ 0]$

Faraday Kanunu:

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt}$$

(E1.6)

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (E1.7)$$

Manyetik akı x-y düzleminde oluşmaktadır. 2D problemlerde iki bağımlı değişken vardır: H_x ve H_y (manyetik alanın x ve y yönlerindeki bileşenleri).

$$\mathbf{H} = [H_x \ H_y] \quad (E1.8)$$

$$\nabla \times E = -\mu_0 \mu_r \frac{d\mathbf{H}}{dt} \quad (E1.9)$$

İndüklenen elektrik alan ve akım yoğunluğunun sadece z yönünde bileşeni vardır.

$$\mathbf{E} = E_{sc_z}, \mathbf{J} = J_{sc_z}, E_{sc_z} = E_0 \left(\frac{J_{sc_z}}{J_c} \right)^n \quad (\text{E1.10})$$

J_c kritik akım yoğunluğu (standart 1uV.cm^{-1} elektrik alan kıstası ile belirlenmiş) n değeri süperiletken malzemenin karakteristik bir değeridir. Bu değer aynı zamanda akı sürüklenmesi seviyesini de etkilemektedir.

Ampere Yasası:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{E1.11})$$

J_{sc_z} sadece z yönünde bir bileşeni vardır.

$$J_{sc_z} = \frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} \quad (\text{E1.12})$$

$$\partial \left[E_0 \left(\frac{\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy}}{J_c(B)} \right)^n \right] / \partial y = -\mu_0 \mu_r \frac{dH_x}{dt} \quad (\text{E1.12})$$

$$-\partial \left[E_0 \left(\frac{\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy}}{J_c(B)} \right)^n \right] / \partial x = -\mu_0 \mu_r \frac{dH_y}{dt}$$

(E1.13)

İki denklem iki PDE ve iki skaler bağımlı değişken (H_x ve H_y) içermektedir. Bu ifadeler ile uygun sınır koşulların kombine edildiğinde sorun FEM yazılımı yardımıyla çözülebilmektedir.

Süperiletken olmayan bölgede non-lineer E - J ilişkisi yerine lineer Ohm yasası kullanılmaktadır (ρ havanın öz direnci):

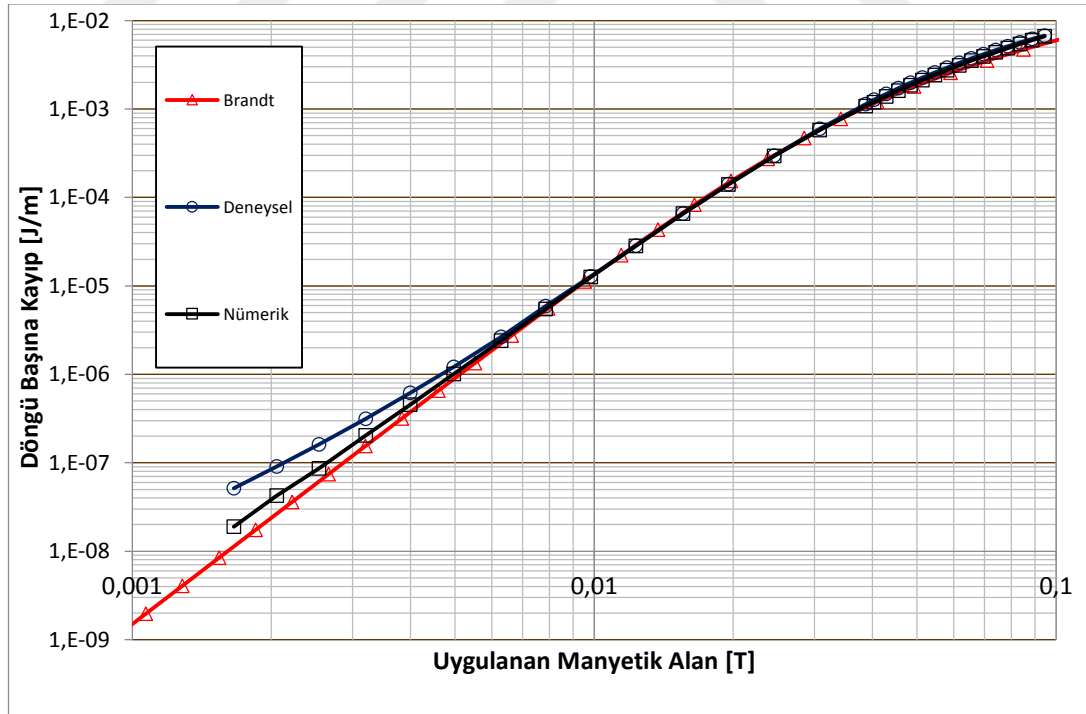
$$\partial \left[\rho \left(\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} \right) \right] / \partial y = -\mu_0 \mu_r \frac{dH_x}{dt} \quad (\text{E1.14})$$

$$-\partial \left[E_0 \left(\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} \right) \right] / \partial x = -\mu_0 \mu_r \frac{dH_y}{dt} \quad (\text{E1.15})$$

Dış sınır süperiletken olmayan bölge Dirichlet sınır durumu:

$$\begin{cases} H_x = f_x(t) \\ H_y = f_y(t) \end{cases} \quad (\text{E1.16})$$

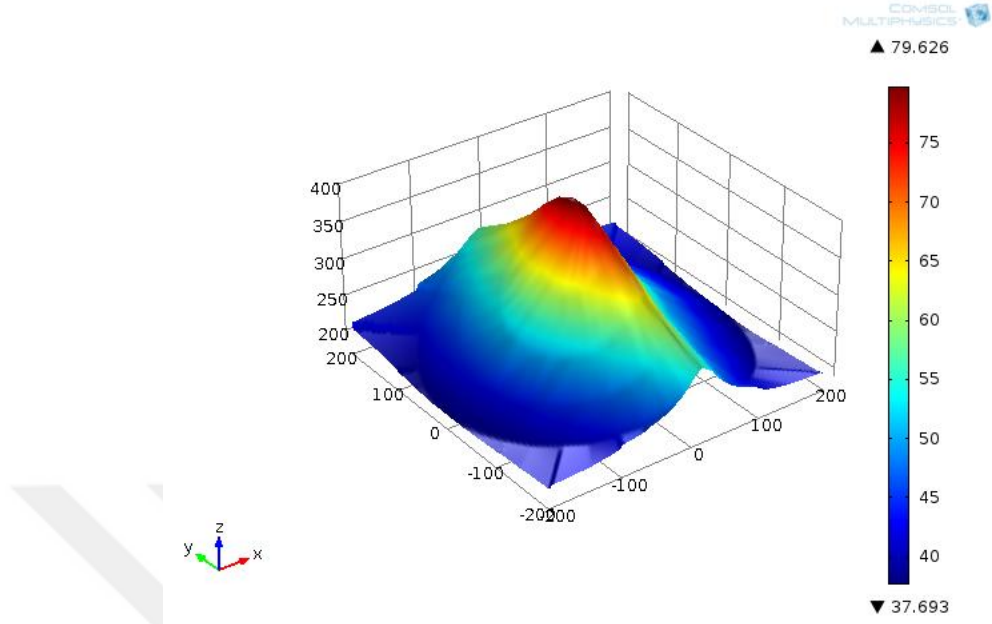
Modelin Doğrulanması



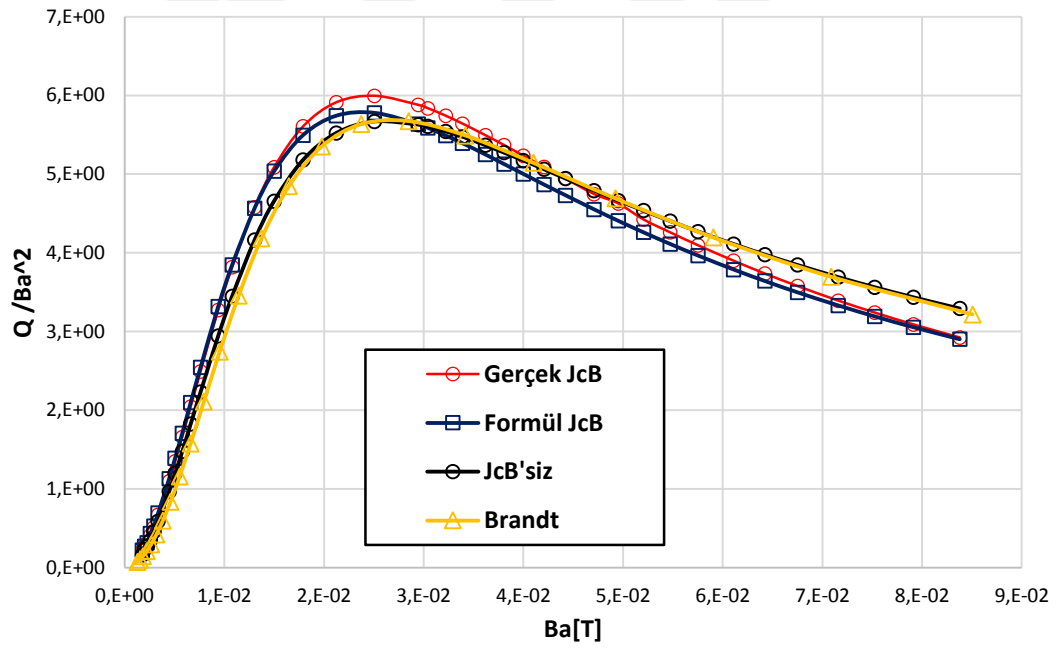
Şekil Ek-1.2. Sonuçların karşılaştırılması.

J_c 'nin manyetik alan bağımlılığının modele etkisi

$$J_c = (-2.4438 + 92.1892 \cdot \exp(-7.2202 \cdot \text{abs}(B)) + 60.655 \cdot \exp(-1.504 \cdot \text{abs}(B)) + 42.918 \cdot \exp(-0.2093 \cdot \text{abs}(B))) / 201$$



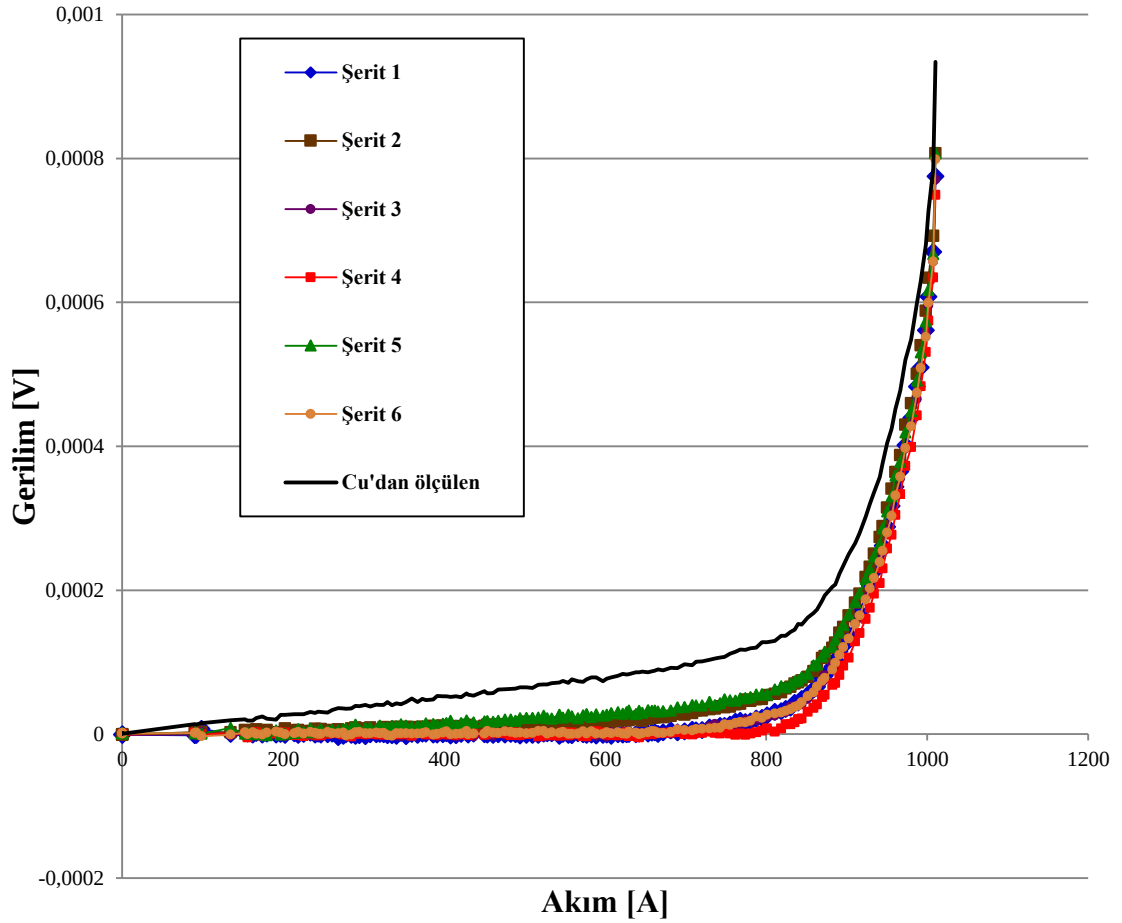
Şekil Ek-1.3. Nümerik modelde kullanılan gerçek manyetik alan bağımlılığı.



Şekil Ek-1.4. Farklı $J_c(B)$ modellerinin sonuçlara etkisi.

EK 2: CORC kablonun kritik akımındaki azalma

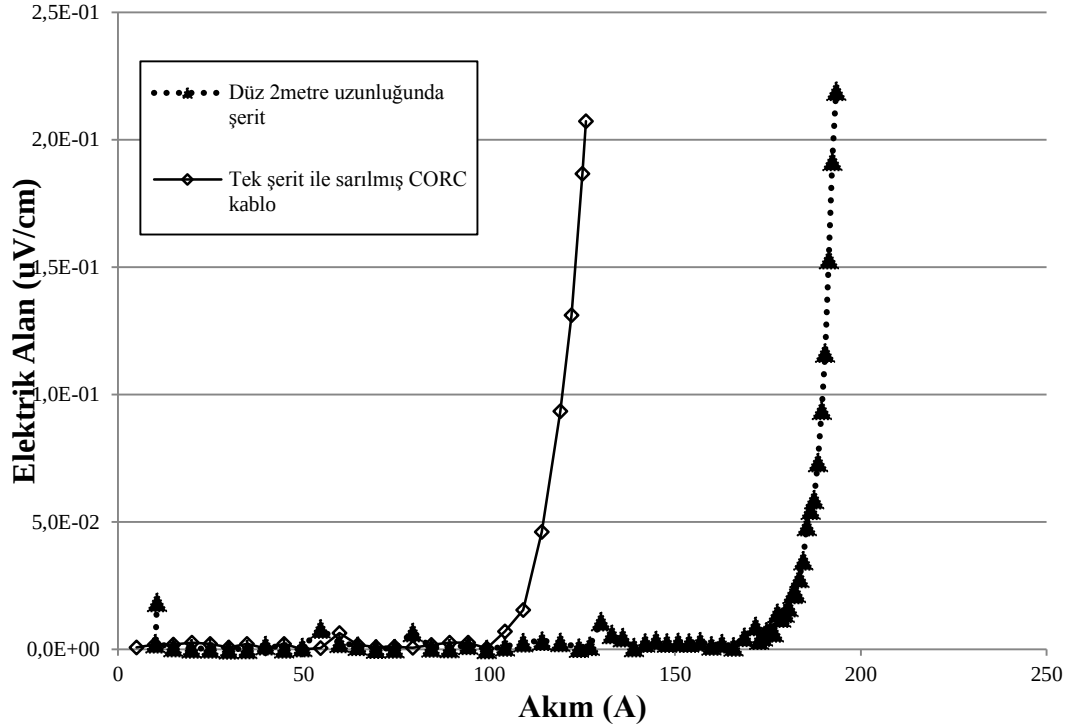
5. Bölüm’de CORC kabloların kritik akımlarının geometrik ve manyetik açıdan azalmaması gerektiği açıklanmıştır. Fakat kablounun kontak dirençlerinin homojen olmayışı, sarım sırasında gerçekleşebilecek mekanik hasarlar veya şeritte üretim esnasında oluşan homojensizlikler sebebiyle kritik akımda azalma görülebilmektedir. B1 malzemesi ile üretilen 2 tabakalı 6 şeritli 2,24 metre uzunluğunda bir CORC kablo üretilmiştir. Hesaplanan kritik akım değeri 1227 A’dır. Kabloya ait IV grafiği aşağıda gösterilmiştir.



Şekil Ek-2.1. 2 tabaka 6 şeritli CORC kablonun I-V eğrisi.

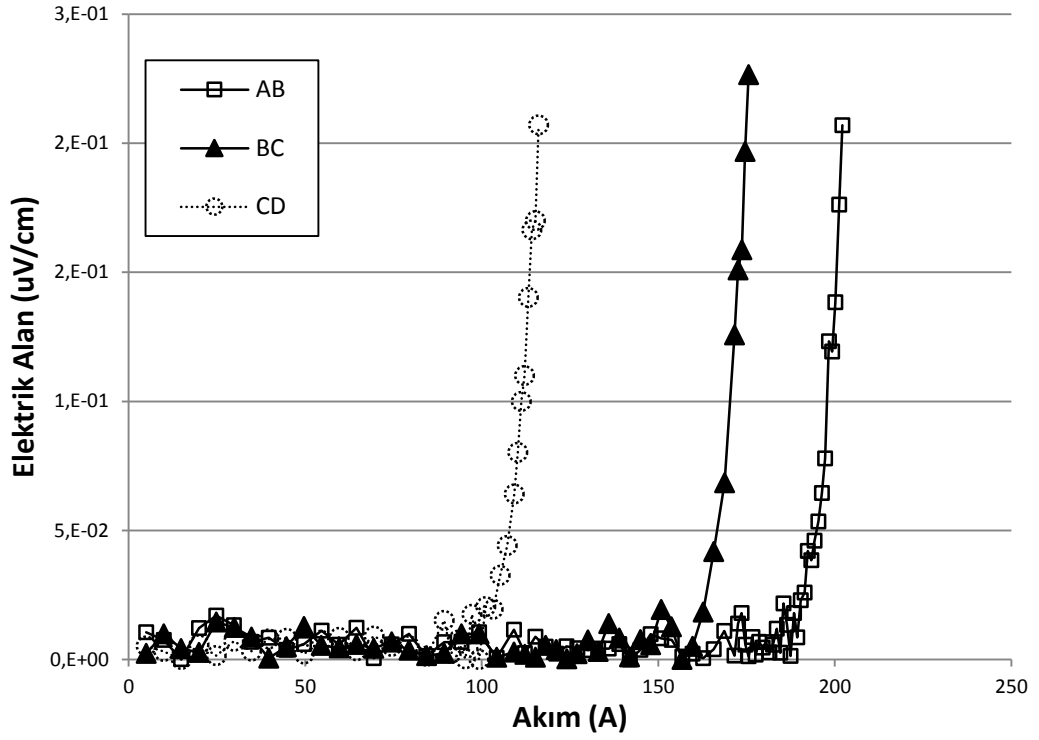
Şekilde görüldüğü üzere ölçülen kritik akım değeri 891 A olup hesaplanan kritik akım değerinden yaklaşık %27 düşüktür. Bu sorunun sebebini daha iyi anlamak adına aynı

malzemeden tek şerit ile CORC kablo üretilmiştir. Kabloya ait IV grafiği şekilde verilmiş olup aynı sorun bu kabloda da görülmüştür.



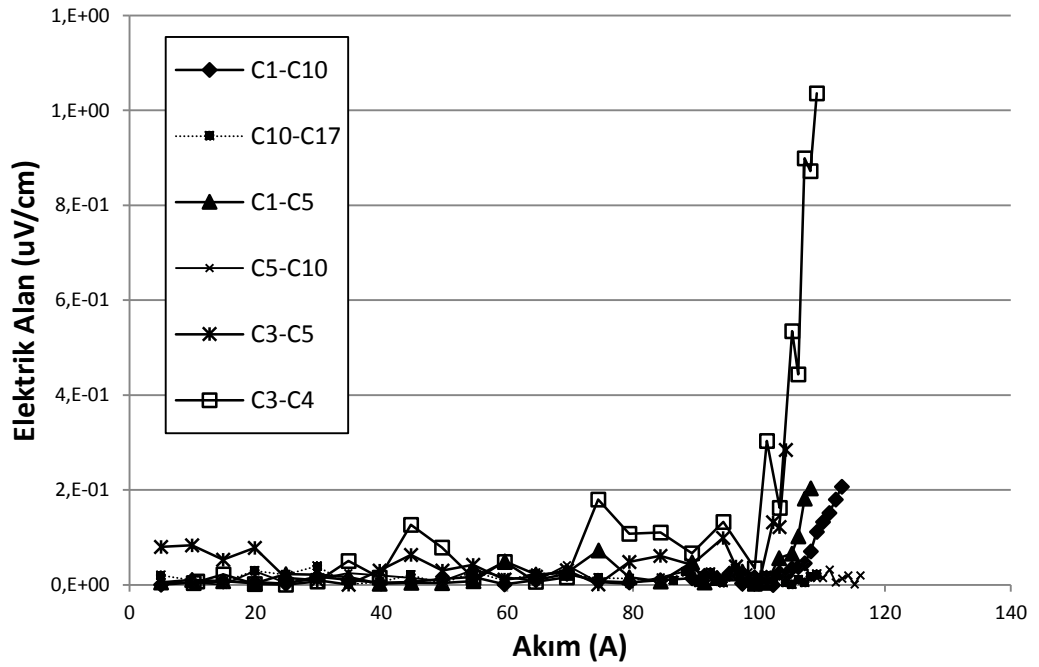
Şekil Ek-2.2. Tek şerit ile sarılmış CORC kablonun IV eğrisi.

Bu kablonun kritik akımındaki azalmanın sebebi sarım işlemi sırasında gerçekleştirilen bir zarar veya şerit üretiminde homojensizlikten kaynaklı diğer bölgelere oranla daha zayıf bir bölgenin varlığıdır. Daha sonra bu kablodaki zarar görmüş bölgeyi bulmak için kablo A-B-C-D şeklinde 3 farklı bölgeye ayrılarak IV ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil Ek-2.3. Kablonun A-B-C-D bölgeleri arasındaki IV eğrileri.

Şekilde görüldüğü gibi kablodaki arızalı kısım CD bölgesindedir.



Şekil Ek-2.4. Kablonun C-D bölgeleri arasındaki IV eğrileri.

Daha sonra C ve D noktaları arası eşit parçalara bölünerek zarar görmüş kısım C3-C4 noktaları arası olduğu tespit edilmiştir. 2 cm'lik bu zarar görmüş kısım kritik akımda yaklaşık %50 bir azalmaya sebebiyet vermektedir.



Şekil Ek-2.5. Kablonun zarar görmüş bölgesi.

ÖZGEÇMİŞ

Rıfki Terzioğlu, 31.05.1989'da Trabzon'da doğdu. İlkokul eğitimini Amerika'da, orta ve lise eğitimini Bolu'da tamamladı. 2006 yılında İzzet Baysal Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2006 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında bitirdi. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde başladığı yüksek lisans eğitimini 2013 yılında bitirdi. 2012 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlayıp yüksek lisans ve doktora eğitimi için Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görevlendirildi. 2015 yılında TÜBİTAK bursu ile doktora çalışmalarının deneysel kısmını yapmak üzere araştırmacı olarak Slovak Bilimler Akademisi'nde görev yaptı.