

T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK SICAKLIK ÜSTÜNİLETKEN GÜÇ İLETİM
KABLOLARININ ELEKROMANYETİK ANALİZİ VE
ALTERNATİF AKIM KAYIPLARININ HESAPLANMASI**

Mevlüt OKUTAN

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fedai İNANIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

RİZE 2012

T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİMDALI

YÜKSEK SICAKLIK ÜSTÜNİLETKEN GÜÇ İLETİM KABLOLARININ
ELEKROMANYETİK ANALİZİ VE ALTERNATİF AKIM KAYIPLARININ
HESAPLANMASI

Mevlüt OKUTAN

Yüksek Lisans

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04/05/2012

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 21/05/2012

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fedai İNANIR

Jüri Üyesi : Doç. Dr. VAGIF NEVRUZOĞLU

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Uğur KÖLEMEN

Enstitü Müdürü: Doç. Dr. Fatih YILMAZ



Rize, 2012

ÖNSÖZ

“Yüksek sıcaklık üstüniletken güç iletim kablolarının elektromanyetik analizi ve alternatif akım kayıplarının hesaplanması” başlıklı bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Bu tez çalışması TUBİTAK-110T876 nolu proje tarafından desteklenerek hazırlanmıştır. Desteklerinden dolayı TUBİTAK’a teşekkür ederim.

Araştırma konunun seçilmesinde, çalışmaların planmasında ve verilerin değerlendirilmesinde her türlü desteğini gördüğüm ve çalışmanın tamamlanabilmesi için her türlü laboratuvar imkanlarını sunan Doç. Dr. Fedai INANIR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım esnasında çalışmalarımın çeşitli aşamalarında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli Fizik Bölümü hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmamım ve akademik hayatımın her anında, her türlü maddi ve manevi destekleriyle bana her zaman güç veren eşim ve çocuklarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mevlüt OKUTAN

Rize, 2012

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLolar DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Üstüniletken Malzemelerin Keşfi ve Teorik Gelişimi.....	1
1.2. Üstüniletkenlerin Modellenmesi.....	5
1.2.1. Tip I ve Tip II Üstüniletkenler.....	5
1.2.2. Kritik Hal Modeli	7
1.2.3. Brandt' Metodu	11
1.2.4. Sonlu Elemanlar Metoduna Dayanan Modelleme.....	11
1.2.5. Tezde Uygulanacak Hesaplama Yöntemi.....	14
1.3. Üstüniletken Teller ve Temel Fiziksel Özellikleri	16
1.3.1. Üstüniletken Güç İletim Kabloları	19
1.3.2. Üstüniletken Kablo Teknolojisi ve Gelişim Trendi.....	23
1.3.3. Üstüniletken Kabloların Avantajı Nedir?	24
1.3.3.1. Küçüklük ve Yüksek Kapasite	24
1.3.3.2. Düşük Taşıma Kaybı ve Çevre Dostu	25
1.3.3.3. Düşük İmpedans	26
1.3.4. Üstüniletken Kablo Gelişiminin Dünyadaki Durumu	29
1.3.4.1. ABD, Japonya ve Diğer Gelişmiş Ülkelerdeki Durum	29
1.3.4.2. Üstüniletken Kablo Konusunda Ülkemizde Yapılan Çalışmalar	30
1.4. Literatür Özeti.....	31
1.4.1. Histeresiz Kayıp Modelleri.....	33
1.4.2. Analitik Yöntemler	33
1.4.3. Sayısal Yöntemler	34
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	39
2.1. I. Yöntemin Temel Kavramları	40
2.2. İncelenecek Kablo Geometrisinin Girilmesi	43

2.2.1. Başlangıç ya da Üstüniletkenlik Parametrelerinin Belirlenmesi	43
2.2.2. Subdomain Ayarları.....	44
2.2.3. Sınır Şartlarının Belirlenmesi	44
2.2.4. Örgüleme “meshing” İşleminin Yapılması.....	45
2.2.5. Uygun Çözümleyici “solver”in Seçimi ve Problemin Çözümü	46
2.3. Yöntem	47
2.4. Geliştirilen II. Yöntem.....	49
2.4.1. Geliştirilen II. Yöntemin Temel Çerçevesi.....	51
3. BULGULAR	56
3.1. I. Yöntemin Uygulanması	56
3.1.1. Alternatif Akım Kayıplarına İletkenler Arasındaki Mesafenin Etkisi.....	62
3.1.2. Şerit – Boşluk Yapısı İçin AA Kayıplarının Hesaplanması	65
3.2. Geliştirilen II. Yöntemin Uygulanması	69
3.2.1. Kritik Akım Yoğunluğunun Alan Bağıllığının Alternatif Akım Kayıp Eğrilerine Etkisi	79
3.2.2. Güç İletim Kablolarının İşlem Gördüğü Sıcaklığın Kayıplar Üzerine Etkisi	83
3.2.3. İçi Boş Ve İçi Dolu Silindirik Tellerden Yapılmış Kabloların Kayıplarının Karşılaştırılması.....	88
3.2.4. Ferromanyetik Altlıklı İkinci Kuşak Giydirilmiş İletkenler Kullanılarak Dizayn Edilmiş İki Tabakalı Güç İletim Kablolarında Alternatif Akım Kayıplarının Karşılaştırılması.....	94
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	102
4.1. Geliştirilen I. Yöntemin Sonuçları	102
4.2. Geliştirilen II. Yöntemin Sonuçları	103
5. ÖNERİLER	105
6. KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	114

ÖZET

Üstüniletken güç iletim kablosu, üstüniletken şeritlerin “tapes” farklı şekillerde dizilmesi veya sarılması ile oluşan yapılardır. Kabloların akım taşıma performansını etkileyen başlıca faktörler şunlardır: şeritlerin boyutları ve sayısı, kablonun kesit alanında şeritlerin geometrik düzenlemesi, üstüniletkeni kaplama malzemesinin elektronik ve manyetik özellikleri, sarılma açısı vb. Kablonun üretim aşamasında, akım taşıma kapasitesi arttırmak ve dolayısıyla kayıpları azaltmak için kabloyu oluşturan üstüniletken şeritlerin farklı kombinasyonlarda dizilimlerini denemek ve test etmek çok önemlidir. Ancak denemeler çok zaman ve para kaybına neden olmaktadır. Daha da önemlisi, bu testler kablodaki kayıp mekanizmasının fizikinin anlaşılmasına çok az katkı sağlamaktadır. En verimli (düşük alternatif akım (aa) kaybın olduğu) elektromanyetik tasarımı gerçekleştirmek ve kayıp mekanizmasını iyi anlayabilmek için hem üretim aşamasından önce hem de test aşamasından sonra üstüniletken tel ve kabloya akı, akım nüfuzunun doğru bir şekilde anlaşılması ve aa kayıplarının hesaplanması gerekmektedir. Bu kablo üretiminde zaman ve para israfını önemli ölçüde düşürecektir. Bu projede ticari bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, farklı çalışma şartları altında ikinci kuşak kaplı üstüniletken tellerden yapılmış “2G-coated conductors” iki tabakalı kabloları akı ve akım nüfuzunu simüle edecek ve kayıpları hesaplayacak yeni iki metod geliştirildi. Geliştirilen metodun literatürde halihazırda kullanılan metotlara göre güç iletim kablolarına uygulanması daha kolay ve hesaplama süresini de daha kısaltmaktadır. Tez üç aşamadan oluşmaktadır: birinci aşamada çok basit şerit yerleşimine sahip ve aa akıma maruz bırakılan kablo yapısı için şeritlerde taşınan akımı eşit şekilde paylaşacak metodun geliştirildi. İkinci aşamada, metod daha gerçekçi fiziksel modellere uygulanacak ve farklı çalışma şartları için hesaplamalar gerçekleştirildi. Üçüncü aşamada, geliştirilen metod ferromanyetik malzeme ile kaplanmış şeritlerden oluşan kablolar için akı, akım ve aa kayıplarının hesaplanmasına uygulandı. Üstüniletken kablo teknolojisinin ülkemize kazandırılması bakımından öncü bir tez özelliği taşımaktadır. Tez sonucunda geliştirilen metodun ve bu metoda dayanan bilgisayar programının ülkemizde üstüniletken teller ve kablolar üzerine çalışan deneysel gruplara ve şirketlere üretim aşamasından önce çok önemli öngörüler sağlayacağı düşünülmektedir. Bu proje TÜBİTAK 110T876 nolu proje ile desteklenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Üstüniletken, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Güç iletim Kablosu

SUMMARY

ELECTROMAGNETIC ANALYSIS and CALCULATION of ALTERNATING CURRENT LOSS of HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING POWER TRANSMISSIONS CABLES

Superconducting power transmission cable is a structure created by arranging or wrapping superconducting tapes in different ways. The main factors affecting current transmission capacity are: size and number of tapes, their geometrical arrangement in the cross-section of the conductors, electronic and magnetic properties of coating material, wrapping angle, etc. In the cable manufacturing process, to increase current carrying capacity and so to lessen the loss, trying and testing different arrangement of superconducting wire inside cables is very important. However, the testing causes very large of time and money consuming. More importantly, this kind of testing can provide very little contribution understanding to physics of loss mechanism. Performing most efficient (low alternative current (ac) loss) electromagnetic design and to be able to find out loss mechanism the flux and current penetration into superconducting wire and cable should correctly be understood both before production stage and after testing. This will reduce significantly waste of time and money in cable production. In this project, using a commercial finite element software a new method will be developed that will simulate flux and current penetration into two layer cables produced from second generation coated conductors and calculate the loss. Developed method to implement to power transmission cables will be easier than the methods used currently and also intended to further shorten the calculation time. The projects consist of three stages: in the first stage, we have aimed to develop a toy method that will share equally currents carried by tape layers for a cable structure having very simple tape arrangement and subjecting alternative current. In the second stage, the method was implemented more realistic physical models and carried out calculations for various working conditions. In the third stage, the developed method was be adapted to evaluate flux, current and ac loss for the cables coated ferromagnetic substance. This project has characteristic of a pioneering project for acquiring superconducting cable technology to our country. We expect that the method developed as a result of thesis and computer program based on this method will provide an important insight to the teams working experimentally on superconducting wires and cables and companies. This project was supported by TÜBİTAK project number: 110T876

Key Words: Superconductor, Finite Element Method, Power Transmission Cable

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Meissner etkisi.....	2
Şekil 2. Farklı sıcaklıklarda çeşitli üstüniletkenlerin kritik manyetik alanların karşılaştırılması. Üstüniletkenliği sona erdiren H_{c2} üst kritik manyetik alan siyah çizgi ile gösteriliyor. Kritik akım yoğunluğunun sıfıra gittiği H^* tersinmezlik alanı kırmızı ile gösteriliyor.....	5
Şekil 3. Tip II üstüniletkenlerin manyetizasyonu.....	6
Şekil 4. Üstüniletken slabda KHM'ye modeline göre hesaplanan manyetik alan ve manyetik akı profilleri.	8
Şekil 5. Farklı manyetik alan genlikleri ($Hc=J_c/\pi$) için 2a genişliğindeki bir stripte Brandt teorisine göre hesaplanan manyetik alan profili.	10
Şekil 6. Hesaplamalarda kullanılacak kablo modeline örnek. Üstteki şekilde üstüniletken kablo şeması veriliyor. Alttaki şekillerde ise kablonun kesit alanın görünümü gösteriliyor. R_{kablo} , kablonun yarıçapı; w_{sc} süperiletken şeridin genişliği; h_{sc} süperiletken tapenin yüksekliği; w_T ferromanyetik altlığın genişliği, h_T ferromanyetik altlığın yüksekliği, h_B süperiletken ve ferromanyetik arasındaki boşluk.....	15
Şekil 7. Düşük ve yüksek sıcaklık üstüniletkenlerin sıcaklığa karşı üst kritik manyetik alan H_{c2} 'nin değişimi (veriler JR Hull, Reports on Progress in Physics 66 (2003) 1865 alınmıştır).....	17
Şekil 8. YSÜİ güç iletim kablolarının şematik gösterimi (a) sıcak dielektrik tasarımı (b) soğuk dielektrik tasarımı.....	21
Şekil 9. Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan üstüniletken kablo dizaynları.....	22
Şekil 10. (a) Üstüniletken kablonun toplam kurulum maliyeti. (b) konvansiyonel kablo ve üstüniletken kablonun toplan kurulum maliyetlerinin karşılaştırılması.....	25
Şekil 11. Konvansiyonel ve üstüniletken kablolarda nakil kayıplarının karşılaştırılması.....	26
Şekil 12. Paralel devreli ağ çalışması örneği.....	27
Şekil 13. Doğrulama testlerinden çıkan bir sonuç, kablonun kritik akım yoğunluğu ile operasyon sıcaklığı arasındaki ilişki.....	28
Şekil 14. ISI web of science' de yapılan taramaya göre son on yılla üstüniletken kablolar üzerine yapılan çalışmaların ülkelere göre dağılımı.....	32

Şekil 15. Üstüniletken şerit için geliştirilmiş devre modeli.	35
Şekil 16. Geliştirilecek yöntemde kullanılacak güç iletim kablosunun iki boyutlu kesit alanı. R_i içteki gövdenin yarıçapı. R_d dıştaki gövdenin yarıçapıdır. İçteki gövde genellikle bakırdan yapılır. İki şerit arasına dielektrik malzeme konulur. Akım şeritlerden akıtılmaktadır.	41
Şekil 17. Sonlu elemanlar hesabında kullanılacak geometri ve çözüm yapılacak uzay. Çözüm yapılacak uzay güç iletim kablosunun dış yarıçapının yaklaşık 20-25 katı olmalıdır. Burada A_1 ve A_2 sınır şartlarını belirtir. Üstüniletken şeritler dikdörtgenlerle gösterilmiştir ve bunlara subdomain denir.	43
Şekil 18. Çalışma yapılacak uzayın örgülenmesi. İletkenlerde çok büyük olduğu için örgülemenin çok dikkatli yapılması gerekir.	46
Şekil 19. Akımı eşitlemek için kullanılan algoritma	47
Şekil 20. Modelleme çalışmasında kullanılacak geometri burada R_i üstüniletken tüp şeklindeki kablonun iç yarıçapı, R_d dış yarıçapıdır. Üstüniletken bölgenin kalınlığı $\eta \ll R_i$ ve R_d	52
Şekil 21. Mevcut yöntemin uygulanmadığı ve uygulandığı durumda elde edilecek akım dağılımları. Soldaki yöntemin uygulanmadığı dağılımı sağdaki ise uygulandığı akım dağılımını gösteriliyor. $I=50A$ 'lik bir akım uygulanıyor ve iletkenler arası mesafe 1mm dir. Kırmızı akımın yüksek olduğu kısmı lacivert daha düşük kısmı, beyaz ise akımın akmadığı kısmı göstermektedir.....	57
Şekil 22. Kablodan geçirilen akıma karşı her bir iletkende oluşan akı. Akı kablonun dışındaki bir nokta ile kablonun merkezi arasındaki A_z manyetik vektör potansiyeli farkından hesaplanmıştır. Bu histeresizlerin alanı kaybı vermektedir. Histeresizlerin alanını hesaplamak için yamuk “trapezoid” metodu kullanılarak integral alınmıştır.	58
Şekil 23. Geliştirilen yöntem ile denklem 28 ile analitik olarak hesaplanan “duoblock” modelin karşılaştırılması. Her iki hesaplama yönteminde aynı değerler kullanılmıştır. İçteki iletken ile dıştaki iletken arasındaki mesafe 1 mm dir.	59
Şekil 24. Dıştaki iletken ve içteki iletkende meydana gelen kayıpların karşılaştırılması.....	60
Şekil 25. İçteki ve dıştaki iletkenlerden geçen akım dağılımları ve iletkenler civarındaki manyetik alan dağılımları iki boyutta gösteriliyor. İletken şeritten	

geçirilen akım (a) 75 A (b) 37.5 A (c) 5.6 A (d) -5.6 A (e) -37.5 A (f) -75 A. Şekilde kabaca kırmızı ile gösterilen akım +z yönünde, lacivertle gösterilen akım -z yönünde ve beyaz ile gösterilen ise akımın akmadığı bölgeleri göstermektedir.	61
Şekil 26. Tek boyutta üstüniletken şeritlerde akan akım profilleri. Akım değerleri dıştaki iletkenin y eksenin tam ortasına gelecek şekilde x eksenini boyunca alınmıştır.	62
Şekil 27. Kablonun dış yarıçapı değiştirilerek elde edilen AA kayıp eğrisi.	63
Şekil 28. $I_{ac}=15$ A seçilerek kaybın yarıçapa göre değişimi.	64
Şekil 29. $I_{max}=15$ A için üstteki iletken içerisindeki akım dağılımı. Düşük akımlarda iletkenin sağında ve solundaki akım dağılımları asimetrik olmaktadır. İletkenler arasındaki mesafe ile oynayarak simetrik hale getirilebilir.	65
Şekil 30. Şerit-boşluk “tape-on-gap” kablo yapısı	66
Şekil 31. Şerit-Şerit yapısı ile şerit-boşluk yapısının karşılaştırılması.	67
Şekil 32. Şerit-boşluk yapısı için iletkenlerden iletken etrafındaki manyetik potansiyel ve iletkenlerin içerisinde geçen akım dağılımları. Her bir iletkenin geçen akımı eşittir. Akımlar daha çok iletkenin uçlarından geçmeye meyillidir. Benzeşimlerde kullanılan geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri tablo 1’de veriliyor. Dıştaki iletkenin yarıçapı $R_d=18$ mm dir. Geçirilen akımlar $I = (a) 75, (b) 37.5, (c) 5.6, (d) -5.6, (e) -37.5, (f)-75$ A dir.	68
Şekil 33. İki boyutta kesit alanı verilen iç içe geçmiş tüp biçimindeki kabloda alt bölgeler “subdomain” ve sınırlar.	69
Şekil 34. Artan akım durumu için iç içe geçmiş kabloda akım dağılımı. Küçük akım genliklerinde $I_a=I_c/10$ dış iletkenin dış yüzeyinde pozitif akım iç yüzeyinde ise negatif akım akmaktadır. Uygulanan akımın genliği arttıkça negatif akım değeri azalmaktadır.	73
Şekil 35. Tek boyutta iç içe geçmiş kablo modelinin kesit alanının farklı akım genlikleri için (a) akım dağılımı (b) manyetik alan dağılımını gösteriyor. Akım ortamında hiç manyetik alan yokken alansız soğutma işleminden sonra sıfırdan itibaren arttırılıyor. . Dıştaki üstüniletken tüpte iki farklı zıt akımın aktığı görülmektedir. Uygulanan akımın genliği arttıkça zıt akım daha dar	

bölgede akmaktadır. Bu akımın nedeni iki ara bölgede meydana gelen manyetik alan olabilir.	74
Şekil 36. Çeşitli akım genliklerine karşı alternatif akım kaybı. Grafikte yeni geliştirilen yöntem ile analitik yöntemler ve bir önce raporda sunulan yöntemin sonucu karşılaştırılıyor. Burada her iki tabakada oluşan toplam kayıp hesaplanmıştır.	75
Şekil 37. Uygulanan akımın genliğine karşı üstüniletkenlerde hesaplan toplam manyet	77
Şekil 38. Uygulanan alana karşı olarak denklem 17 ile verilen kriitik akım yoğunluğu fonksiyonu. Manyetik alan bağıllığını artırmak için $J_{c0}=1 \times 10^{10}$ A/m, $B_0=0.5$, $k=1$ ve $\beta=2$ değerleri kullanılmıştır	81
Şekil 39. Alana bağlı $j_c(B)$ ve alandan bağımsız j_{c0} için Transport akımın genliğinin fonksiyonu olarak kabloda meydana gelen kayıp.	82
Şekil 40. Alana bağlı ve alandan bağımsız kritik akım yoğunlukları için iletken kablunun dış takasındaki şeritler akan transport akımların dağılımlarının karşılaştırılması.....	83
Şekil 41. Üstüniletken kablolarda çalışma sıcaklığının akım kayıplarına etkisi hesaplamalarında kullanılan geometri.	84
Şekil 42. Uygulanan akımın genliği 75 A seçilerek hesaplanan T_c kritik sıcaklıkla normalize edilmiş ortam sıcaklığının karşı kabloda ortaya çıkan toplam kayıp. YBCO için $T_c=92K$ kullanılmıştır.....	87
Şekil 43. Farklı sıcaklıklar için üstüniletken şeritlerdeki akım dağılımı.	88
Şekil 44. Hesaplamalarda kullanılan kablo modeli	91
Şekil 45. İçi boş ve içi dolu tellerden dizayn edilen kabloların toplam transport akım kayıplarının karşılaştırılması.	92
Şekil 46. İçi boş iletken telden ve içi dolu iletken telden yapılan kabloların iç ve dış takalarında oluşan AA kayıplarının karşılaştırılması.....	92
Şekil 47. $I_{max}=90A$ 'dan itibaren alan azalırken çeşitli alan değerleri için içi dolu iletken ve içi boş iletkenlerdeki akım ve manyetik alan dağılımı. Kırmızı bölgeler +z yönünde geçen akımı lacivert olan bölgeler ise -z yönünde geçen akımı gösteriyor. Kötörler sabit vektör potansiyelini gösteriyor.....	94
Şekil 48. Ferromanyetik altlık üzerine büyütülmüş kaplı iletkenlerden dizayn edilecek kablo yapıları.....	96

Şekil 49. Ferrromanyetik altlık kullanılarak yapılan ikinci kuşak kaplı iletkenlerin farklı dizilimleri ile dizayn iki tabakalı üstüniletken kabloların toplam transport akım kayıplarının karşılaştırılması.	99
Şekil 50. Üstüniletken güç iletim kablosunun yalnızca iki tane şeridin üst üst üste geldiği kısımdaki akım yoğunluğu dağılımı. Geçen akım miktarı $I=16$ A yani kritik akımın %20'si kadardır. Üstteki kısım kablonun dış tabakasını içteki kısım ise iç tabakasını göstermektedir. Görüldüğü gibi akımın büyük bir kısmı şeritlerin merkezinde akmaktadır. Uygulanan akım azaldıkça şeritlerin uçlarından zıt yönde akım indüklenmektedir. Bu şeritlerin uçlarından manyetik akının çıktığını göstermektedir. (a) SS yapısı (b) M1 yapısı (c) M2 yapısı (d) YY yapısı (e) FM olmayan altlığın kullanıldığı yapıları göstermektedir.	100
Şekil 51. Hesaplamada kullanılan her bir model için üstüniletken kablonun dış ve iç tabakalarında oluşan transport kayıpların karşılaştırılması.	101

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Ülkemizde üstüniletken teller ve şeritler üzerine yürütülen ve sonuçlandırılmış projeler	30
Tablo 2. Referans hesaplamadan aa kayıplarının sapması	46
Tablo 3. . Benzeşimde kullanılan nicelikler ve değerleri	56
Tablo 4. Benzeşimde kullanılan nicelikler ve değerleri	71
Tablo 5. Benzemişimde kullanılan geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri	86
Tablo 6. içi boş ve içi dolu tellerden yapılmış kablounun geometrik özellikleri	90
Tablo 7. Hesaplamalarda kullanılan parametreler	97

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- ξ : Eş uyum uzunluğu
 ϕ : Toplam akı
 φ : Vektör potansiyel farkı.
 μ_0 : Boşluğun geçirgenliği
 ϕ_0 : 2×10^{-15} Wb akı kuantumu
A: Vektör potansiyeli
 A_{diff} : İki tabaka arasındaki manyetik potansiyel farkı.
 A_n : Vektör potansiyelini ölçeklendirme parametresi.
B: Manyetik indüksiyon
 B_c : Kritik manyetik alan
 B_{c1} : Alt kritik manyetik alan
 B_{c2} : Üst kritik manyetik alan
E: Elektrik alan şiddeti
 E_0 : Elektrik alan ölçeklendirme parametresi
H: Manyetik alan şiddeti
 h_{SC} : Şeritlerin boyu
I: Akım şiddeti
J: Akım yoğunluğu
 J_c : Kritik akım yoğunluğu
M: Manyetizasyon
N: Kabloyu oluşturan şeritlerin sayısı
Q: Kayıp
R: Hesaplama yapılacak uzayın yarıçapı
 R_d : Kablonun dış yarıçapı
 R_i : Kablonun iç yarıçapı
T: sıcaklık
 T_c : Kritik sıcaklık
 w_{SC} : Şeritlerin eni

1. GENEL BİLGİLER

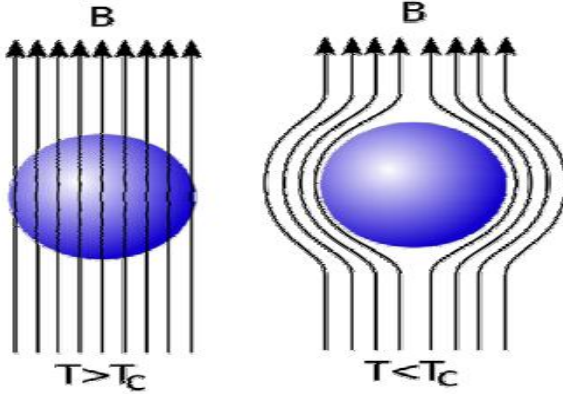
1.1. Giriş

1.1.1. Üstüniletken Malzemelerin Keşfi ve Teorik Gelişimi

Üstüniletkenlik 1911 yılında Kamerlingh Onnes tarafında keşfedilmiştir. 4.2 Kelvinde cıvanın direnciden birden bire sıfır olmasıyla üstüniletkenlik gözlemlenmiştir. Bundan sonra geçen on yıllar boyunca üstüniletkenlik cıvadan başka malzemelerde de ki bu malzemelerin çoğu metaldir, üstüniletkenlik gözlemlenmiştir. 1913 yılında kurşunda 7 K'de üstüniletkenlik gözlemlenmiştir. Daha sonra yine Niodyum nitritte 1941 yılında 16K de üstüniletkenlik keşfedilmiştir.

Üstüniletkenlik keşfedildikten sonra, bilim adamları süperiletkenlik olayını teorik argümanları kullanarak açıklamaya çalışmışlardır. Üstüniletkenli anlamadaki en önemli kilometre taşı 1933 yılında olmuştur. Bu tarihte Meissner ve Ochhsenfeld üstüniletkenlerin üzerlerine uygulanan manyetik alanı tamamıyla dışarıladıklarını keşfetmişlerdir. Bu gün bu olaya Meissner etkisi diyoruz. Şekil 1'de şematik olarak Meissner etkisi gösteriliyor. Sıcaklık T_c kritik sıcaklığın altına düştüğü zaman, üstüniletken içerisindeki bütün manyetik alanı dışarılar yani içerisine manyetik alanın nüfuz etmesine izin vermez.

1935 yılında London Meissner olayını açıklamaya çalıştı ve gösterdiği Meissner etkisi aslında üstüniletken akım tarafından oluşturulan elektromanyetik serbest enerjinin minimizasyonunun bir sonucudur. Meissner etkisinde üstüniletkenliği sürdürebilmek için, üstüniletken üzerinde nüfuz derinliği çok küçük olan ve sürekli dolanan olan bir akım indüklenir. Bu akımın dolandığı derinlik üstüniletkenin kalınlığı ile karşılaştırıldığında yüzeyinden itibaren ihmal edilebilecek kadar kbir mesafededir (London ve London, 1935).



Şekil 1. Meissner etkisi

Landau ve Ginzburg üstüniletkenliği modelleyecek ilk teoriyi ortaya attılar. Bu teoride genel termodinamik argümanları kullanarak süperiletkenliği altında yatan mikroskobik mekanizmayı açıklamaksızın üstüniletkenli olayının bir kısmını izah etmeye çalışmışlardır (Ginzburg ve Landau, 1950). Ginzburg-Landau teorisini kullanarak, Abrikosov Üstüniletkenleri iki I. Tip ve II. Tip olarak iki sınıfa ayırması gerektiğini ön görmüştür (Ginzburg ve Landau, 1957).

Üstüniletkenliği başarılı bir biçimde açıklayan ilk mikroskobik teori Barden, Cooper ve Schrieffer tarafından ortaya konulmuştur. Bu teoriye bu gün BCS teorisi denir. BCS teorisine göre, üstüniletken akım Cooper çiftleri denilen elektron çiftleri tarafından taşınır. Cooper çiftleri örgü içerisinde tek elektron göre daha karalı bir yapıdadır, çünkü Cooper çiftleri örgü titreşimlerine karşı daha fazla karşı koyabilir. Bu nedenle, Cooper çiftleri kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda nispeten ısısal titreşimlerden (elektron-fonon etkileşmesi) etkilenmeksizin örgü içerisinde rahatça hareket edebilir. BCS teorisi T_c kritik sıcaklığın altında ve Meissner etkisinin ortaya çıktığı T sıcaklıklardaki E enerji aralığını doğru olarak öngördüğü için büyük bir başarı kazanmıştır.

Üstüniletkenlik 1911 yılında bulunmasına rağmen, keşfinden ancak elli yıl sonra büyük ölçekli uygulamalarda kullanılmak üzere üstüniletken teller üretilmeye başlanılmıştır. Bunun nedeni ilk keşfedilen metalik üstüniletkenler, ki bunlara tip I üstüniletkenler denilir, ancak çok küçük miktarda akımı taşıyabilir veya çok küçük miktarda manyetik alana maruz kalırlarsa üstüniletkenliklerini sürdürebilirler. Tersine, tip II üstüniletkenler büyük ölçekli uygulamalar için kullanılabilirler çünkü bunlar üstüniletkenliklerini kaybetmeksizin çok büyük miktardaki akımı geçirebilirler yada çok

büyük manyetik alanlara dayanabilirler. 1960 yılında, ilk ticari olarak kullanılması için üstüniletken tel Niyodyum-titanyum (Nb_3Ti) alaşımı ve Niyodyum kalay alaşımı, araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu teller ilk olarak üstüniletken elektromıknatısların yapımında kullanılmıştır (Matthias vd., 1957). $NbTi$ 'nin kritik sıcaklığı 10K'dir ve yaklaşık olarak 15 Teslaya kadar manyetik alana dayanabilir. Nb_3Sn değerine göre daha pahalıdır ancak 30 T lık manyetik alan üretebilir ve kritik sıcaklığı daha yüksektir yaklaşık olarak 18,3 K civarındadır.

1980'lere gelindiğinde üstüniletkenlik sahasında her şey yerli yerine oturmuş gibi gözüküyordu. BCS teorsisi üstüniletkenli açıklayabiliyordu ayrıca $NbTi$ ve Nb_3Ti mühendislik uygulamaları için üretilebiliyordu. BCS teorisine göre 30K ulaşılacak en yüksek kritik sıcaklıktı. Yüksek sıcaklık üstüniletkenliğinin (YSÜ) ortaya çıkışı bu düzeni bozdu. Yüksek sıcaklık üstüniletkenliği ilk defa 1986 yılında IBM araştırmacıları Karl Müler ve Johannes Bednorz tarafından 35 K'de keşfedilmiştir (Bednorz ve Müller, 1986). Yitriyum baryum Bakır oksit (YBCO) ve Bizmut stransiyum kalsiyum bakır oksit (BSCCO) sırasıyla 93 K'de ve 105 K'de süperiletken hale geçiyordu (Bednorz ve Müller, 1986; Wu vd., 1987; Maeda ve ve., 1986) Yüksek sıcaklık üstüniletken ailesinin tamamı bakır oksitli (bakırımsı) üstüniletkenlerdir. Bakırımsılar daha geniş koordinasyon karmaşıklığı içeren bir bakır bileşiğidir ve genelde negatif bir yüke sahiptir. Bakırımsı üstüniletkenler genellikle, zayıf çiftlenilmiş bakır-oksit(CO_2) tabakaları içerisinde hareket eden elektronlar tarafından yön verilen üstüniletkenlik gösteren hemen hemen iki boyutlu-malzemeler olarak görülebilir.

YSÜ malzemelerin keşfi üstüniletkenlerin endüstriyel kullanımında çok geniş bir alan açmıştır. Bu tür malzemelerin endüstride daha fazla kullanılmasının bir nedeni kritik sıcaklıklarının daha yüksek olmasıdır. Sıvı azot düşük sıcaklık üstüniletkenlerin soğutmasında kullanılan helyuma göre elde etmesi daha kolay ve daha ucuzdur. Diğer avantajı daha yüksek kritik akım yoğunluğu ve daha yüksek üstüniletkenliğin ortadan kalktığı kritik manyetik alana sahiptir. Geniş ölçekli uygulamalarda aranan iki temel özellik yüksek kritik manyetik alana ve yüksek kritik akım yoğunluğuna sahip olmasıdır.

BSCCO üstüniletken tel yapımında kullanılan kullanılan ilk üstüniletkenlerdir. Bu tür tellerle birinci kuşak iletkenler (1G YSÜ) denir. Bu tür malzemeler iki tipe ayrılır: BSCCO-2212 ($Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$) ve BSCCO-2223 ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_8$). Bu malzemelere kısaca Bi2212 ve Bi2223 denir. BSCCO nun üstüniletken olabilmesi için katyon katkısı ile boşluk dope etmek gerekir. Bu genellikle bakır düzlemlerine oksijen yarıkları oluşturularak

başarılabilir. Hem Bi 2212 hem de Bi2223 “powder-in-tube” metodu ile tel haline dönüştürülebilir.

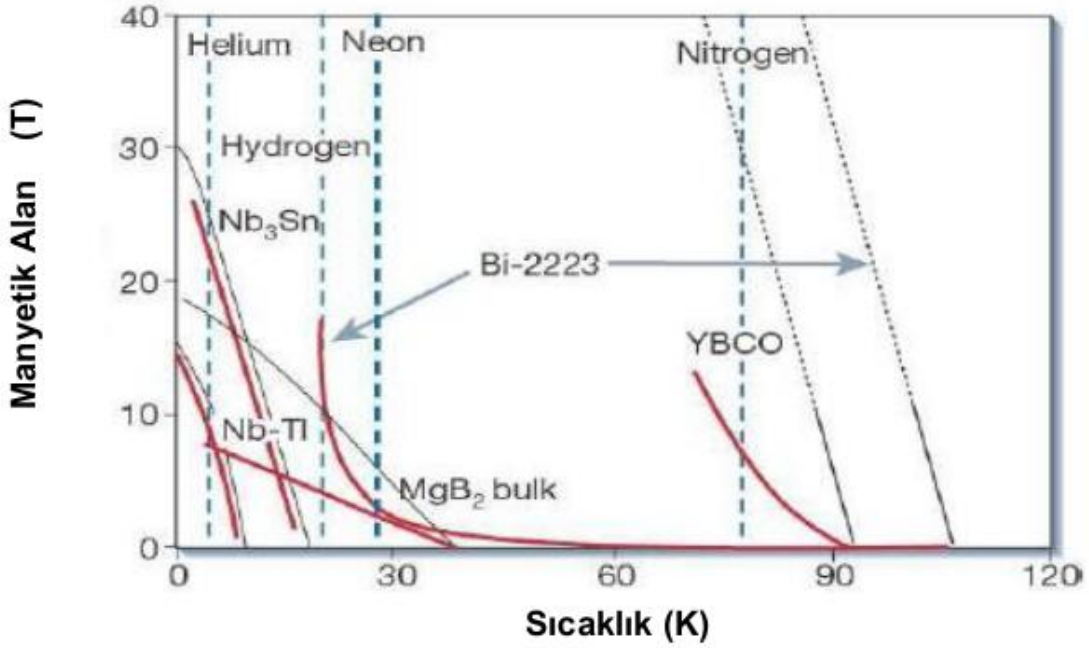
Son zamanlarda farklı nadir toprak-elementi bazlı YSÜ malzemeler ((RE)BCO) geliştirilmiştir. Nadir toprak elementleri Yitrium, Samaryum ve Gadolanyumu kapsar ama bunlarla sınırlı değildir. Bu malzemelere ikinci kuşak yüksek sıcaklık üstüniletken malzemeler denir. Bütün 2G YSÜ malzemeler arasında en meşhuru ve endüstriyel olarak üretilebileni Yitrium baryum bakır oksit (YBCO) dir ve kimyasal formülü $YBa_2Cu_3O_7$ dir. Bu malzemelerin endüstride yaygın olarak kullanılmasını engelleyen etmen tel yapılmasındaki zorluktur. Çünkü oksit malzemeler kırılığandır ve dolayısıyla geleneksel tel üretme metotları kullanarak tel haline getirilmeye çalışıldığında üretilen tellerde mekanik baskılara karşı son derece dirençsiz olacaktır. BSCCO’dan farklı olarak YBCO’da “powder-in-tube” yöntemi iyi sonuçlar vermez. Bu malzemeleri kullanmak için geliştirilen en popüler metod esnek metal bir şerit üzerine YBCO’yu yapıştırmak ve metal ile iletken arasına metal oksit bir tabakadan tampon yapmak. Bu tür iletkenlere giydirilmiş “coated” iletken denir. Bununla beraber son zamanlar YBCO’yu tel haline getirmek için iki farklı yöntem daha geliştirilmiştir: “Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates (RABITs)” yöntemi ve “Ion-Beam-Assisted Deposition (IBAD)” yöntemi. American superconductors, Superpower, Sumitomo, Fujikura, Nexans superconductors ve European Advanced Superconductors gibi şirketler rutin olarak bu 2g YSÜ şeritleri üretmektedir.

YSÜ lerin ilk keşfinden yirmi yıldan daha fazla geçmiştir. Hala bu malzemeler üzerinde çok yoğun hem teorik hem de deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Hala bunların özelliklerini açıklayabilecek doğru düzgün bir teori yoktur.

2001 yılında Nagamatsu ve arkadaşları, Mağnezyum diboraytta (MgB_2) 39K geçiş sıcaklığına sahip üstüniletkenlik keşfetmişlerdir (Nagamatsu vd., 2003). Bu geleneksel üstüniletkenler arasındaki en yüksek sıcaklıktır. Bu keşif bilim dünyasında çok büyük bir heyecan yarattı çünkü MgB_2 basit bir iyonik çiftli bileşiktir ve elde etmesi de pahalı değildir.

2008 yılında demir-tabanlı üstüniletkenler keşfedilmiştir (Ozawa ve Kauzlarich, 2008; Wu vd., 2009). Bunlar bakır oksit üstüniletkenlerin arkasından en ikinci yüksek geçiş sıcaklığına sahip malzemelerdir. Demir tabanlılara çok yoğun bir ilgi vardır. Bu ilginin nedeni bu yeni bileşiklerin bakır-oksit üstüniletkenlerden çok farklı olması ve BCS teorisi ile açıklanamayan üstüniletkenliğin nedenini açıklamaya yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Şekil 2 farklı sıcaklıklarda çeşitli üstüniletken malzemelerin kritik manyetik alanlarının karşılaştırmasını gösteriyor. Mavi kesikli çizgiler kaynama noktalarıdır. Şekilden de görüleceği üzere yüksek sıcaklık üstüniletkenlerin kritik manyetik alanları ve kritik sıcaklıkları düşük sıcaklık üstün iletken malzemelere göre daha yüksektir.



Şekil 2. Farklı sıcaklıklarda çeşitli üstüniletkenlerin kritik manyetik alanların karşılaştırılması. Üstüniletkenliği sona erdiren H_{c2} üst kritik manyetik alan siyah çizgi ile gösteriliyor. Kritik akım yoğunluğunun sıfıra gittiği H^* tersinmezlik alanı kırmızı ile gösteriliyor.

1.2. Üstüniletkenlerin Modellenmesi

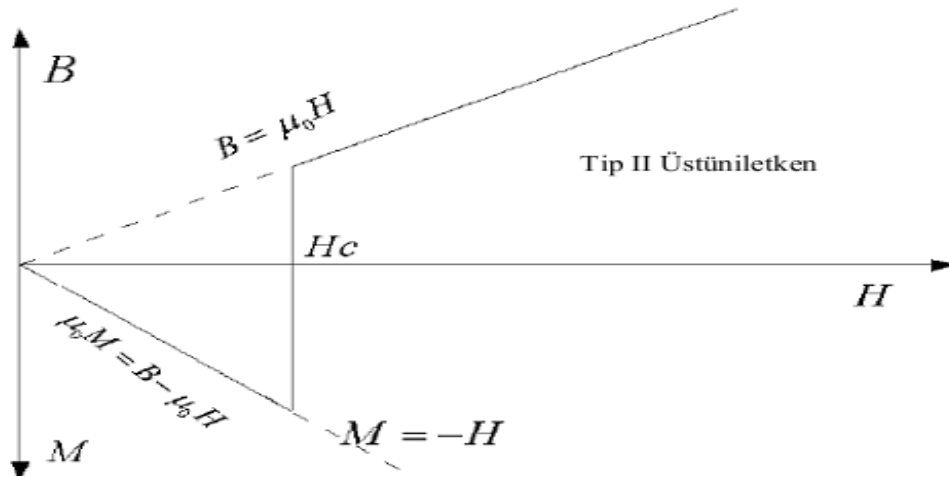
1.2.1. Tip I ve Tip II Üstüniletkenler

Üstüniletkenler çok çok yüksek manyetik alana maruz kaldıklarında, Meissner etkisi bozulacağı için, üstüniletkenlik özelliğini kaybederler. Bu bozulmasının nasıl meydana geldiğine bağlı olarak, üstüniletkenler Tip I ve Tip II diye iki sınıfa ayrılırlar. Tip I üstüniletkenlerde, uygulanan manyetik alan değeri H_c kritik alan değerine ulaşır ulaşmaz üstüniletkenlik birden bire ortadan kalkar. İlk bulunan alüminyum, kurşun gibi metal üstüniletkenler tip I üstüniletkenlerdir.

Denklem 1 denklemini H uygulanan manyetik alan, B manyetik akı yoğunluğu, M malzemenin manyetizasyonu, μ_0 boşluğun geçirgenliği bu dört parametreyi bir biri ile ilişkilendirir.

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

Şekil 3 tip I üstüniletkenlerdeki manyetizasyon işlemi gösteriyor. Üstüniletkene H_c den daha küçük bir manyetik alan uygulandığı zaman M manyetizasyonu H ya eşit olur, dolayısıyla üstüniletken içerisindeki toplam manyetik alan B sıfır olur. Ayrıca, uygulanan alan H_c yi çok az geçerse, M birden sıfıra düşer ve üstüniletken normal durumuna döner.



Şekil 3. Tip II üstüniletkenlerin manyetizasyonu

Genel olarak Tip II üstüniletkenler daha yüksek kritik sıcaklığa ve daha yüksek kritik manyetik alana sahiptirler. Bu onların daha yüksek akımı iletmesine ve daha çok uygulamada yer almasına neden olur.

Genel olarak üstüniletken malzemelerin manyetik özelliklerinin nitel ve nicel analizi ya da teorik öngörüsü için şu dört yaklaşım kullanılmaktadır: 1) Kritik hal modeli 2) Brandt modeli 3) Enerji minimizasyon yaklaşımı 4) Sonlu elemanlar yöntemi (Finite

element Method (FEM)). Bu yöntemlerden en ilkel kritik hal modelidir. Fakat bütün diğer modeller kritik hal modeline dayanır. Kritik hal modeline o yüzden özel bir önem verilecektir. Bizim metodu geliştireceğimiz sonlu elemanlar yöntemi detaylı bir biçimde açıklanacaktır.

Bu bölümde ilk olarak hesaplamaların dayandığı kritik hal modeli incelenecektir. Bu model aksel simetriye sahip "slab", silindir gibi geometrilerin nitel davranışını betimlemeye yetmektedir. Ancak karmaşık geometriler için çözüm üretmek çok zor ya da imkansızdır. Bu modelin temel kabullerine ve limitlerine bakılacaktır. İkinci olarak, tek tabakalı üstüniletken şeritlerin modellenmesinde kullanılan Brandt modelinden kısaca bahsedilecek ve son olarak sonlu elemanlar yöntemi "finite element method (FEM)" kısaca anlatılacaktır. Bir FEM problemini oluşturma ve çözüme uygulanacak adımlar anlatılacaktır. Son olarak bizim ele alacağımız yapı ve uygulayacağımız yöntem hakkında bilgi verilecektir.

1.2.2. Kritik Hal Modeli

Farklı çalışma şartları altında bulunan bir üstüniletken içerisindeki akım/alan dağılımlarını ve bunları kullanarak AC kayıpları hesaplamak için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bu modellerden en basiti ve en yaygın olarak kullanılan kritik hal modelidir (KHM), ilk defa Bean tarafından ortaya atılmıştır (Bean, 1965). Bu modelin temel kabulü üstüniletken içerisindeki akım yoğunluğu, uygulanan manyetik alanın nüfuz etmediği bölgelerde sıfır nüfuz ettiği bölgelerde ise $\pm J_c$ dir:

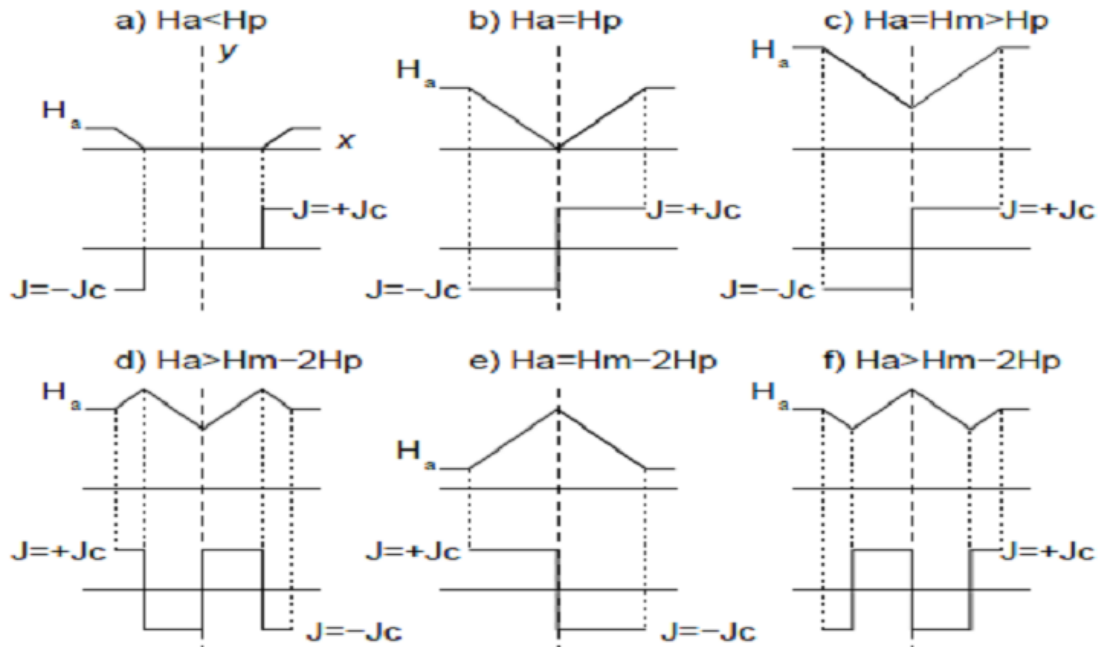
$$J(x) = \begin{cases} 0 & B(x) = 0 \\ \mu_o J_c & B(x) \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Kritik akım yoğunluğu J_c 'nin manyetik alandan bağımsız olduğu düşünülmüştür. Üstüniletken geçişini betimlemek için kullanılan üst yasası modelinde kullanılan n kuvveti, kritik hal modelinde $n=\infty$ 'a tekabül eder. Bu model, çok basit olmasına karşın bir üstüniletkenin normal hale geçişteki karşılaştığımız çok dik geçişi yeterince doğrulukla tahmin edebilmektedir örneğin düşük T_c 'li üstüniletkenler de bu n çarpanı 50'den çok daha büyüktür. Ancak bu yüksek sıcaklık üstüniletkeni için geçerli değildir. Çünkü YSÜ'lerde

üstüniletken - normal durum geçişi daha yumuşak bir geçiştir. Bu durumda kritik hal modeli YSÜ'ler için ancak nitel bir analiz için kullanılabilir.

Kritik hal modeli çeşitli durumlar veya geometriler için üstüniletken içerisindeki akı ve akım dağılımını analitik olarak çıkartmanıza olanak sağlar. Genellikle sonsuz uzun "slab" ve "strip" gibi basit geometriler için çözümler elde edebilirsiniz.

Şekil 4'de kritik hal yaklaşımı kullanılarak hesaplanan, geniş yüzeyi paralel doğrultuda dış manyetik alana maruz kalmış üstüniletken slab içerisindeki manyetik alan ve indüklenen akım dağılımını gösterilmektedir. Slabı iki kenarı üçüncüye göre daha büyük olan bir paralel kenar olarak tasavvur edebiliriz. Şekilde x - doğrultusunda genişliği $2a$ ve y -, z - doğrultularında sonsuz olan "slab"daki akı ve akım profilleri çizilmiştir. Manyetik alan z - yönünde uygulanıyor.



Şekil 4. Üstüniletken slabda KHM'ye modeline göre hesaplanan manyetik alan ve manyetik akı profilleri.

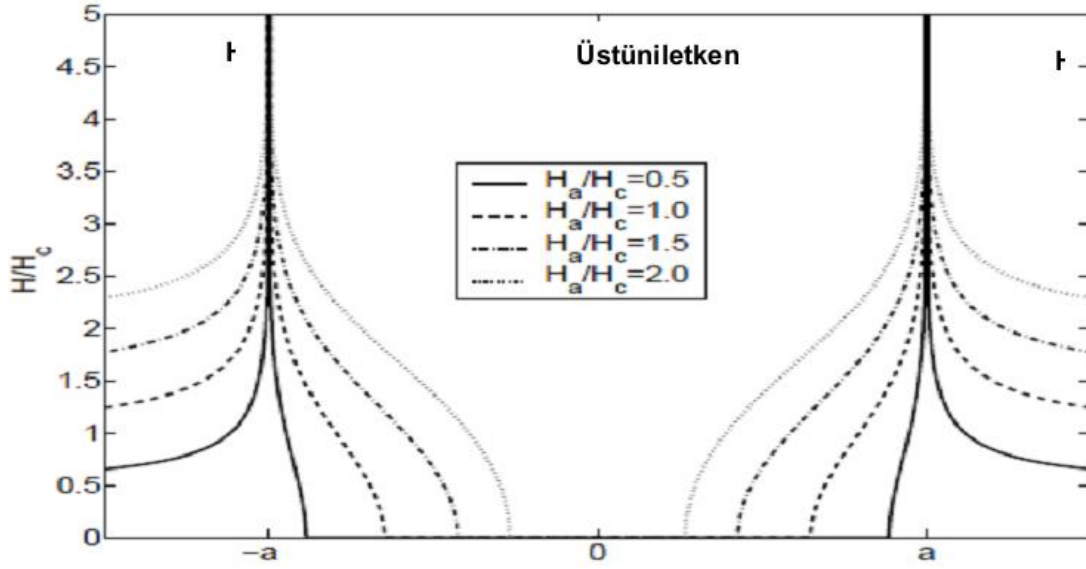
Manyetik alanın genliği H_a ve sıfırdan itibaren H_{c2} 'den küçük olmak kaydıyla sizin tayin edeceğiniz bir maksimum genliğe kadar adım adım arttırılıyor. Manyetik alan arttırıldıkça perdeleme akımı başlangıçta slabın yüzeyinde indüklenmeye başlayacak ve yavaş yavaş slabın merkezine doğru girecektir. Akımın yönü alan değişimine karşı

koyacak şekildedir ve slabın iç kısmına alan girişini perdeleyecek şekildedir. Betimlenen durumda alan yalnızca z bileşenine sahiptir ve Amper kanunundaki rotasyonel B skaler bir terime indirgenir. Özellikle, slab içerisindeki alan profili eğimli düz bir çizgi ile gösterilir. Üstüniletken içerisindeki akı ve akım profillerini çıkartmak için Maxwell denklemlerinden şu ikisini çözmek gerekir:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\end{aligned}\quad (3)$$

Alan "slab"a kısmen nüfuz edecektir ve alanın nüfuz ettiği bölgedeki akım yoğunluğu Şekil 4a'da gösterildiği gibi $\pm J_c$ olacaktır. Bu durum, uygulanan alanın üstüniletken "slab"ın merkezine ulaştığı belli bir H_p alan değerine kadar değerine kadar devam edecektir. Bu durumda "slab"ın bir yarısı $+J_c$ diğer yarısı ise $-J_c$ kadar akım taşır (Şek. 4b). Dış alan değeri H_p genliğinden daha büyük olduğu zaman, perdeleme akım yoğunluğunun değeri modele göre J_c 'yi aşamaz ve artık üstüniletken içerisindeki alan nüfuzuna karşı koyamaz yani üstüniletkenin her yerine akı nüfuz etmiştir. Alan yukarı doğru kayacak (Şek. 4c), numunenin kenarındaki ve merkezindeki alan değerleri arasındaki fark sabit kalır ve daima H_p 'ye eşittir.

Dış alan azaltılmaya başlandığı zaman perdeleme akımı zıt yönde dolanmaya başlar ve slabın kenar bölgelerinde ters akım ortaya çıkacaktır. Slabın geri kalan kısmında ise hiçbir şey değişmeyecektir (Şek. 4d). Uygulanan alanın değeri maksimum değerinden $2H_p$ değerine kadar azaldığı zaman. Alan ve akım desenleri önceki duruma göre tamamiyle ters bir hale dönüşecektir (Şek. 4e). Dış manyetik alan tekrar arttırılmaya başlanırsa, numunenin kenarında oluşacak yeni bölgelerde diğer bölgelere göre ters akım akacaktır (Şek. 4f). Bu basit analizin en önemli sonucu şudur: slaba alan kısmen ya da tamamiyle nüfuz etmeye başlar başlamaz, üstüniletkende daima bir perdeleme akımı oluşacaktır. Bu üstüniletkenin histeretik bir davranışa sahip olduğu anlamına gelir.



Şekil 5. Farklı manyetik alan genlikleri ($Hc=J_c/\pi$) için $2a$ genişliğindeki bir stripte Brandt teorisine göre hesaplanan manyetik alan profili.

Analitik çözüme sahip diğer bir özel geometri ise stripdir. Bu geometriyi şu şekilde tarif edebiliriz: $2a$ genişliğinde, sonlu bir kalınlığına ve sonsuz bir uzunluğa sahip önden bakıldığında dikdörtgen biçiminde olan geometridir. Bu geometri için alan ve akım dağılımları hem transport akım hem de dik manyetik alan için Brandt ve Indenbom tarafından elde edilmiştir (Brandt ve Indenbom, 1993). Çözüm sabit bir J_c için yapılmıştır.

Slab geometrisine uygulanan KHM modeli ile karşılaştırıldığı vakit, aralarında iki önemli farkın olduğu görülür: birincisi, perdeleme akımı numunenin bütün genişliği boyunca akar, hatta alanın nüfuz etmediği bölgelerde bile akım akmaktadır. İkincisi ise, x -ekseni boyunca akı profilinin biçimi "slab"daki gibi doğrusal değil, daha ziyade kuadrattır. "Strip" için Brandt tarafından hesaplanan manyetik alan dağılımı Şek. 3.2'de veriliyor. Buradaki en önemli nokta şudur: kuvvetli demanyetizasyon etkisinden dolayı, üstüniletken-hava ara kesitinde ($x=\pm a$) manyetik alanın değeri uygulanan alanın değerinden çok daha yüksek çıkmaktadır. Unutulmaması gereken en önemli nokta ise, kritik hal modellenen matematiksel basitliğinden dolayı ancak slab, silindir, stripe vb basit geometriler tam olarak çözülebilmektedir. Daha sonra kritik hal modelleri üzerinde pek çok düzeltmeler olmuştur.

1.2.3. Brandt' Metodu

1996 yılında keyfi akım voltaj karakteristiğine sahip II. Tip üstüniletkenlere akı, akım nüfuzu ve manyetik momentin 2 boyutta hesabı için bir nümeriksel metot Brandt tarafından geliştirmiştir. Brandt'ın analizi için başlangıç noktası Laplace denklemidir:

$$\nabla^2(A + xB_a) = -\mu_0 J \quad (4)$$

Burada A vektör potansiyelidir. Bu denklemin genel çözümü:

$$A(r) = -\mu_0 \int Q(r, r') J(r') d^2 r' - xB_a \quad (5)$$

burada $r=(x,y)$, $r'=(x',y')$ ve integral kerneli:

$$Q(r, r') = \frac{\ln|r - r'|}{2\pi} \quad (6)$$

Denklem 5 ifadesinin nümerik hesabı yalnızca üstüniletkenler için gerçekleştirilir ve sonlu elemanlar ve sonlu farklar için sınır şartları gerekmez ve çözüm çok kolay elde edilir ancak belli geometriler için çözümü mümkündür.

1.2.4. Sonlu Elemanlar Metoduna Dayanan Modelleme

Kritik hal modeli ve Brandt tarafından bulunan analitik ve nümerik çözümler slab ve strip gibi özel geometriler için güzel çözümler türetebilmektedir. Ancak pek çok durumda bu geometriler üstüniletken yapıyı betimlemekten çok uzaktadır. Sonlu elemanlar metoduna (FEM) dayanan hesaplamalar karmaşık geometrileri içine alan ve akım dağılımlarını çıkartmada oldukça kolaylık sağlamakta ve sonuçları da oldukça güvenilirdir. FEM hesaplamaları ayrıca farklı fiziksel etkileri içeren problemleri hesaplamalarda da rahatlıkla kullanılabilir. Genelde, bu teknik problemin geometrisini çizme, daha sonra bu geometriyi çok sayıda ayırık elemanlara bölme ve her bir eleman için problemin

çözümünde kullanılan diferansiyel denklemi ya da denklemleri uygun sınır koşulları veya başlangıç şartları için çözüme şeklidir. En önemli avantajı fiziksel nicelikler lokal olarak hesaplanır ve dolayısıyla elde edilen sonuç çok doğrudur. Daha önce bahsettiğimiz gibi KHM’de problem lokal olarak hesaplanmıyordu ortam sürekli kabul ediliyordu. Üstüniletkenlerin elektromanyetik davranışını çıkarmada kullanılacak diferansiyel denklemler Maxwell denklemleridir. Ancak Maxwell denklemleri HTS lerin non-lineer $E-J$ bağıntısı hesaba katılarak düzenlenmelidir. FEM tekniği üstüniletken içerisindeki akım ve alan dağılımını hesaplamada kullanılmış ve halende geniş bir biçimde kullanılmaya devam edilmektedir. Bazı gruplar kendi yaptıkları FEM kodunu kullanmaktadır(örneğin, (Gömöry vd., 2001; Ichikawa vd., 2001). Bu kodları geliştirmek genellikle çok uzun bir zaman almaktadır ve çok çok efektif bir algoritma değilse kod çalıştırıldığında sonuç vermesi de çok uzun zaman almaktadır. Bir diğer nokta ise diğer kullanıcılar tarafından anlaşılması ve geliştirilmesi çok zordur maalesef. Bu nedenle dünya üzerinde yüz binlerce araştırmacının tercih ettiği ticari bir FEM paketi kullanılacaktır.

Bu tez çalışmasında bir İsveç firması olan Comsol Inc. tarafından geliştirilmiş Comsol Multiphysics 4.2a yazılımı kullanılacaktır. Bu yazılım temel fizik problemlerinden, mühendislik problemlerine, biyoteknolojiden, nanoteknolojiye, jeofizikten astrofizığe kadar pek çok sahada kullanılmaktadır. Bütün bu işlemleri yapabilmek için Comsol MP yazılımında çeşitli bileşenler standart olarak bulunmaktadır: AC/DC modülü, Akustik modülü, CAD import modülü, kimya mühendislik modülü, earth science modülü, ısı transfer modülü, materyal kütüphanesi, MEMS modülü, optimizasyon laboratuvarı, yapısal mekanik modülü, RF modülü reaksiyon mühendisliği lab. Comsolun her bir modülünün nasıl kullanılacağını gösteren çok iyi bir kullanım klavuzu “User Guide” mevcuttur. Üstüniletken tel ve şeritlerin elektromanyetik özelliklerini hesaplamak için AC/DC modülü kullanılmaktadır. Burada çok önemli bir hususu vurgulamakta yarar vardır. Comsol çözeceğiniz diferansiyel denklemi ya da denklem sistemlerini tek bir sınır şartı, başlangıç şartı veya fiziksel parametre için çözebiliyor. Eğer sizin sınır şartlarınız veya başlangıç şartlarınız yada fiziksel probleminizdeki parametreleriniz iteratif olarak değişiyorsa, bu durumda Matlab’da kod yazıp Comsolu matlab ile birlikte çalıştırmanız gerekmektedir.

Comsol MP ile bir FEM problemini çözmek için uygulanacak temel adımlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Uygulama tipini seçmek (çözeceğiniz problemin türünü belirlemek)

Problem için uygun fiziği belirlemek, fiziksel boyutunu girmek vs.

2. Geometriyi çizmek

Çözeceğiniz geometriyi Comsol MPde çizilebilir veya uygun bir CAD yazılımı kullanarak çizilir sonra Comsol ortamına atılıp üzerinde çalışılabilir.

3. Fiziksel modelleme

Bu adımda denklemlerin ve kullanacağınız fiziğin parametreleri girilebilir ve ayarlanabilir. Bu kısım bir yada daha fazla adımdan oluşur.

Subdomain ayarları: bu adımda subdomain ayarları yapılır. Bunlar subdomainlerdeki malzemelerin özelliklerini, kaynaklarını ve PDE katsayılarını kapsamaktadır. Subdomainlerde aynı zamanda başlangıç şartlarını belirlemek mümkündür.

Sınır şartları: burada sınır ve ara kesit şartlarını belirleyebilirsiniz.

Kenar şartları: burada kenar şartlarını belirleyebilirsiniz. Kenarlarda malzemenin özelliklerini ve PDE katsayıları tanımlanır (yalnızca 3D modelleme için kullanılır).

Nokta ayarları: burada nokta ayarlarını yapmak gerekir. Nokta kaynaklarının özellikleri ve değerleri girilir veya geometri köşelerine uygulanacak değerler girilir (2D ve 3D modelleme).

Skaler değişkenler: Bazı uygulama modlarında geometriden bağımsız skaler değişkenler girilebilir.

Uygulama modu özellikleri: uygulama moduna bağlı olarak, analizin tipi ve denklem formülasyonları gibi bir dizi özellik girilebilir veya değiştirilebilir.

Bağlı değişkenler: Genişletilmiş MP modellerinde ve belli uygulamalar için değişkenleri ve ifadeleri çeşitli domainlere ilişkilendiren bağlı değişkenler atanabilir. Bu adımda bağlı değişkenleri tanımlamak gerekmektedir.

4. Ağ (mesh) oluşturma

Bu adımda model geometri için sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Bu Comsol'da çok basit geometriler için tek bir tıklamayla yapılabilmektedir.

5. Çözüm parametrelerini belirlemek.

Bu adımda hangi tip çözümleyiciyi kullanacağınız. Çözüm için toleransınız ne olacağını bu toleransa ulaşmak için maksimum adım sayısını ve probleminizin non-linear olup olmadığını girmek gerekir.

6. Problemi çözmek.

Problemi çözmek için Comsol MP'de solve butonuna basmak yeterlidir.

7. Analiz sonuçlarını iki boyutlu grafiklerde göstermek.

8. Gerekli oturmuş çözümleri elde edildikten sonra, problemi Matlab koduna dönüştürmek. Comsol'u bir modül olarak kullanan Matlab ile farklı durumlar için simülasyon yapmak.

1.2.5. Tezde Uygulanacak Hesaplama Yöntemi

Tezde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ferromanyetik bir madde ile kaplanmış iki tabakalı üstüniletken kablolarda akı ve akım dağılımları için bir metod geliştirilecektir. Bu tür yapıya sahip başlangıç yapacağımız model kablo Şekil 6' da gösterilmektedir. Birinci bölümde açıklandığı gibi üstüniletkenlere akı nüfuzu,

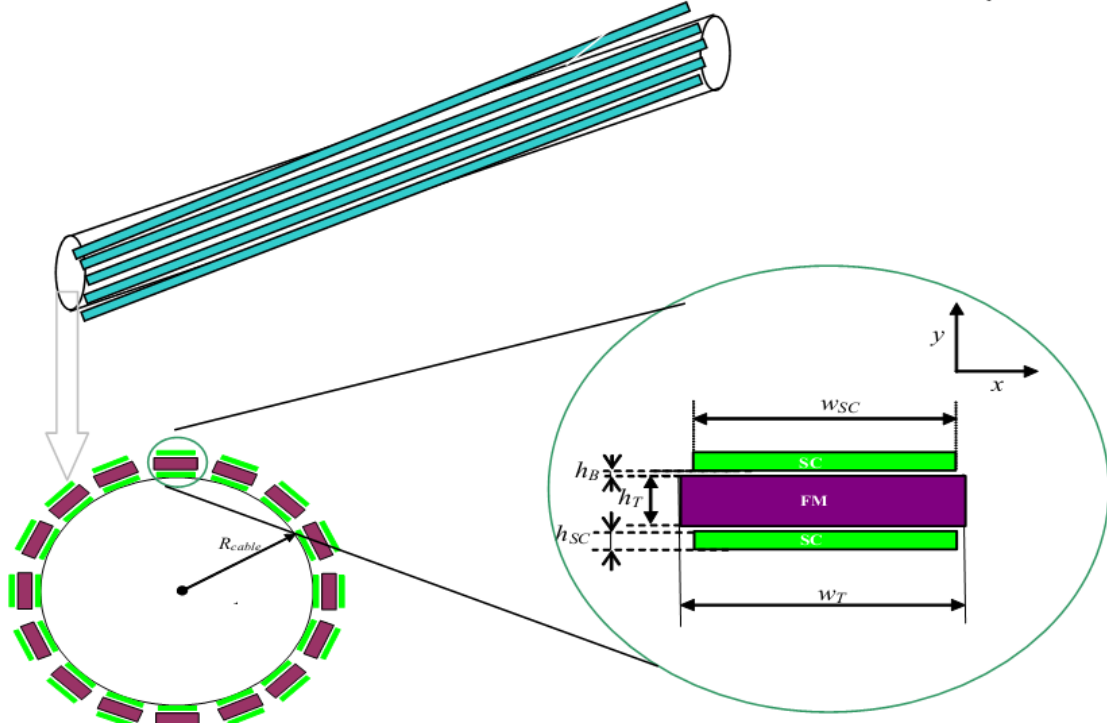
$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \mu_0 \vec{J} \quad (7)$$

manyetizma için ampere kanununun çözümü ile elde edilebilmektedir. Bu diferansiyel denklem Şekil 6' da verilen geometri için sonlu elemanlar yöntemini kullanan Comsol Multiphysics yazılımı kullanılarak çözülecektir. Akım z- eksenini boyunca akıtılmakta ve alta ki ve üstteki süper iletkenlere x ve y eksenlerinden nüfuz edecek manyetik akı B, manyetik vektör potansiyeli A yardımıyla hesaplanacaktır:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (8)$$

Bu denkleme göre hem manyetik vektör potansiyelinin hem de akım yoğunluğunun yalnızca z bileşenine sahiptir.

Üstüniletken güç
iletim kablosu şeması



Şekil 6. Hesaplamalarda kullanılacak kablo modeline örnek. Üstteki şekilde üstüniletken kablo şeması veriliyor. Altta şekillerde ise kablunun kesit alanının görünümü gösteriliyor. R_{kablo} , kablunun yarıçapı; w_{sc} süperiletken şeridin genişliği; h_{sc} süperiletken tapenin yüksekliği; w_T ferromanyetik altlığın genişliği, h_T ferromanyetik altlığın yüksekliği, h_B süperiletken ve ferromanyetik arasındaki boşluk.

Mevcut geometri için (Şekil 6) üzerinden I akımı geçen r_w yarıçaplı bir iletken bir halkanın R_c yarıçaplı silindirik bir kutuda oluşan manyetik vektör potansiyelin analitik ifadesi sınır şartı olarak uygulanacaktır:

$$A_c|_{x^2+y^2=R_c^2} = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(2 \ln \left(\frac{R_c}{r_w} \right) + 1 \right) \quad (8)$$

Burada μ_0 boşluğun geçirgenliğidir. AC alandaki bir üstüniletkende akım yoğunluğu için,

$$J_s = J_c \tanh \left(\frac{A_p(x, y) - (A_z \pm A_{diff}/2)}{A_n} \right) \quad (9)$$

ifadesi dikkate alınacaktır. Burada J_c kritik akım yoğunluğu, A_p bir önceki hesaplamada elde edilen vektör potansiyeli değeri, A_z mevcut hesaplamada elde edilecek vektör

potansiyeli değeridir, A_{diff} , tabakalara paylaştırılacak dış akının miktarı, A_n skalalama parametresi ve ayrıca (+) dış tabakadan azaltılacak akı için, (-) iç tabakaya verilecek akı için kullanılır.

Kritik nokta alttaki ve üstteki üstüniletkenlerden akan akımının eşit olmasıdır. Bunun için nümerik metot geliştirilecek ve akı ve alan dağılımları elde edilecektir. Akım değeri eşitlendikten sonra her bir adımdaki AC kayıplar,

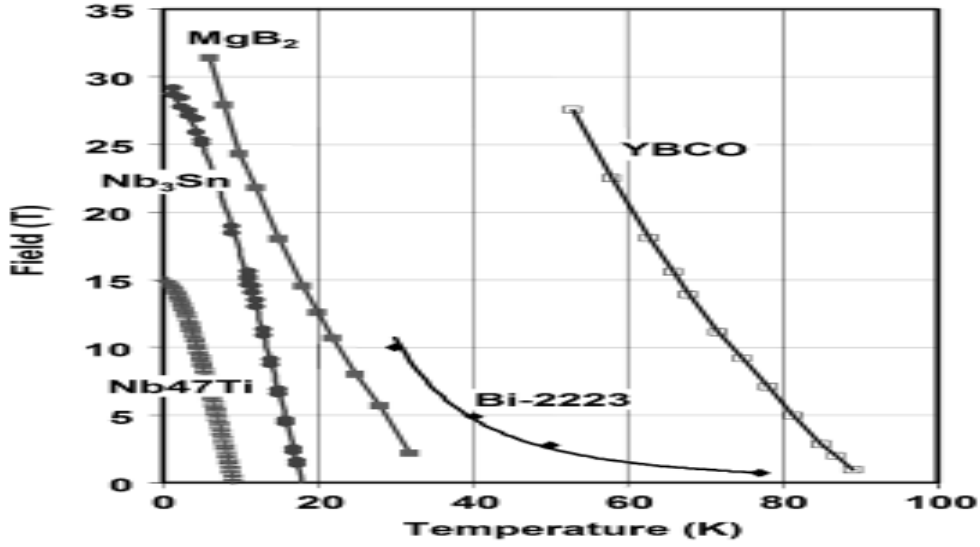
$$Q_{SC} = \oint \phi dI_{AC} \quad (10)$$

formülü ile hesaplanacaktır. Hesaplamalarda American Superconductor Cooperation tarafından üretilen ferromanyetik kaplı YBCO şeritlerin özellikleri dikkate alınacaktır.

1.3. Üstüniletken Teller ve Temel Fiziksel Özellikleri

Bu bölümde üstüniletken tellerin iletkenlik performansının altında yatan temel fiziksel kavramlar özet olarak verilecektir. Bu kavramlar daha geniş bir şekilde başka yerde bulunabilir. Üstüniletken malzemeler özel olarak teller, birbirine bağımlı olan şu üç fiziksel parametrenin: kritik sıcaklık T_c ' nin altında bir sıcaklığa, üst kritik manyetik alan H_{c2} ' nin altında bir manyetik alana ve kritik akım yoğunluğu J_c ' nin altında bir akıma maruz kaldıkları zaman üstüniletkenlik özelliği gösterir. Düşük sıcaklık üstüniletkenleri (DSÜİ) için maksimum kritik sıcaklık 23 K dir. MgB_2 için 40K (Rossi ve Todesco, 2006) ve bakır tabanlı (bakır oksit) yüksek sıcaklık üstüniletkenleri için ise 135 K civarındadır.

Sekil 7, şu anda ticari olarak kullanılan $Nb-Ti$, Nb_3Sn ve $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (BSCCO-223) ve ticarileştirilmeye çalışılan $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) ve MgB_2 için manyetik alan - sıcaklık ($H-T$) faz diyagramları gösterilmektedir. Bunların farklı faz diyagramlarına sahip olmalarının temel nedeni farklı kristal yapısına ve fiziksel parametrelere sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. Düşük ve yüksek sıcaklık üstüniletkenlerin sıcaklığa karşı üst kritik manyetik alan H_{c2} 'nin değişimi (veriler JR Hull, Reports on Progress in Physics 66 (2003) 1865 alınmıştır).

Şekilde gösterilen altı üstüniletken türü de külçe halinde üstüniletkenliğini $H_{c2}(T)$ 'ye kadar sürdürebilen tip II üstüniletkendir. *BSCCO-2223* ve *YBCO*'da H_{c2} son derece anizotropiktir yani yöne bağlıdır ve kristal büyüme eksenine doğrultusunda 100 T' den daha fazladır. Bununla beraber YSÜİ malzemelerin uygulama alanlarını sınırlayan en önemli faktör düşük tersinmezlik alanıdır $H^*(T)$, ki bu alan değerinde J_c sıfır olur.

Denge şartları altında H_{c1} alt kritik alandan daha yüksek bir manyetik alana maruz kaldığı zaman manyetik akı bulk üstüniletkene nüfuz etmeye başlar. Yukarıda bahsedilen malzemeler için alt kritik manyetik alan 100 mT'den daha küçüktür. Nüfuz eden manyetik akı kuantize olmuş akı çizgisi (girdap biçiminde olduğu için girdapta “vortex“ denmektedir) dizisi yâda fluxonlar diye tanımlanan bir şekilde üstüniletken içerisinde bulunur ve üstüniletken içerisinde uzaysal olarak düzgün ya da düzensiz olarak, statik ya da sıvı gibi dağılılabılır. Her bir girdap $\lambda(T)$ London nüfuz derinliği kadar yarıçapa sahip bir tüp olarak tasavvur edilebilir. Bu tüpün dış yüzeyinde üstüniletkenlik perdeleme akımları dolanır ve merkezinde yarıçapı $\xi(T)$ kadar küçük bir üstüniletken olmayan göbek bulunur, $\xi(T)$ üstüniletkenlik eş uyum uzunluğudur. Her bir girdabın etrafında dolanan perdeleme akımları manyetik akı kuantumu $\phi_0=2 \times 10^{-15}$ Wb kadar manyetik alan üretir.

$H_{c2}(T) = \phi_0 / 2\mu_0 \pi \xi(T)^2$ değerine eşit bir üst kritik alan değerinde normal göbekler tamamıyla birbirine girdiklerinde külçe üstüniletkenlik ortadan kalkar.

Tip II üstüniletkenler içerisinde şayet $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$, Maxwell denklemi ile tanımlanan bir mikroskobik akı yoğunluğu gradyenti varsa, “bulk” akım taşıyabilirler. Bu gradiyent mikro yapısal kusurlarda girdapların çivilenmesi ile sağlanabilir. Üstüniletkenler üretilirken yapılan işlemlerin çoğu üstüniletkenin akım taşıma kapasitesini en üst seviyeye çıkartmak için “akı çivilenmesini” optimize etmek maksadı ile yapılır. Mutlak sıfırda, maksimum çivilenme şiddetine karşılık gelen kritik akım yoğunluğu J_c' ye kadar üstüniletkenlik akımı hiç kayıpsız olarak (yani sıfır voltajda) taşınabilir. Ayrıca sonlu bir sıcaklıkta termal aktivasyon mikroskobik girdap yoğunluğunun düşmesine neden olan akı sürüklenmesine yol açar (aslında mutlak sıfır sıcaklıkta kuantum tünellemeden dolayı çok küçük bir akı sürüklenmesi meydana gelmektedir). Rastgele mikro yapısal kusurlara sahip pek çok malzeme, girdap yapısı düzensizdir ya da camsıdır “glassy” ve girdap cam teorisi, (vortex glassy theory) akı sürüklenmesinin $v \propto I^n$ voltaj – akım bağıntısının olacağını on görür, n “üst değeri” olarak isimlendirilir. Nanometre yâda daha büyük uzunluk skalalarında malzemenin tekdüze olmama özelliği bu üstel bağıntıya neden olur. Üstüniletken telin yarı kararlı modda işlev görebilmesi için indeks değerinin 30’un oldukça üzerinde olması gerekmektedir. Yarı kararlı moddan kasıt zamanla akımın bozulmasının minimum olmasıdır. Bu şart NbTi ve Nb₃Sn teller için sağlanırken üst değeri 15 ila 30 arasında olan YSÜİ teller için nadiren sağlanabilmektedir. Voltaj akım eğrisi sürekli olduğu için, J_c' nin mutlak bir ölçüsü yoktur. Bununla birlikte genellikle ya 0.1 ya da 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ seçilen karakteristik bir elektrik alanda voltaj akımla hızlı bir şekilde artar. Mıknatıs uygulamaları için daha düşük elektrik alanları bile yeterli olmaktadır.

J_c' nin yukarıdaki akım değerlerinde veya, sıcaklığın fonksiyonu ve YSÜİ malzemeler için H_{c2}' den çok daha düşük karakteristik “ H^* tersinmezlik alanının” üzerindeki alanlarda girdap yapısında çok dikkate değer değişimler meydana gelir. Bu değişimler çeşitli teorilerle açıklanmaya çalışılmıştır. Buna örnek olarak girdap cam erime teorisi verilebilir. Bu teoriye göre H^* in üzerindeki alanlarda girdaplar çivilendikleri yerden kurtulurlar ve bir sıvı gibi davranırlar. Bu şartlar altında, akımda kayıplar olmaya başlayacak, akı sürüklenmesi durumu ortaya çıkacak ve neticesinde direnç ortaya çıkacaktır. Bu basit kavram doğrudan akı akışı için verilen $\rho_{FF} = \rho_N B / \mu_0 H_{c2}$, burada ρ_N normal durum direncidir, Barden-Stephen formülü ile izah edilebilir.

Bulk uygulamalar için gerekli uzun iletkenlerde daima çok kristal malzemeler kullanılır ve dolayısıyla tanecik sınırlarının etkisi çok önemlidir. Metalik DSÜİ ve MgB_2 de iç kırıklar gibi büyük engeller çıkmadığı sürece çok(poli) kristal üstüniletken ana yapı boyunca akım akışı tekdüzedir. Gerçekte tanecik sınırları çivilenme merkezi görevi gördükleri için yararlı bir şeydir aslında, öyle ki tanecik büyüklüğü arttıkça J_c ' de artar.

Zamanla değişen akım ve/veya manyetik alanlar üstüniletkenlerde Alternatif akım (AA) kayıplarına neden olurlar. Üstüniletkenlerde metal ana yapıda ortaya çıkan eddy akım (girdap akımı da denir) kayıplarının yanı sıra üç tür kayıp mekanizması daha vardır: 1) üstüniletken içerisinde girdapların hareketinden dolayı histeresiz kayıpları; 2) çok filamanlı tellerde normal metal ana yapının dışında kalan filamanlar arasında akan indüklenen akımdan dolayı oluşan "çiftlenim" kayıpları 3) yine çok filamanlı teller (burada telden kasıt aslında her bir filamandır) arasındaki eddy akımı yüzünden teller arası "çiftlenim kayıpları". Bu kayıplar azaltılabilir ama asla yok edilemez. Üstüniletkene ac manyetik akının kısmen nüfuz ettiği düşük manyetik alanlarda, AA kayıplar J_c ile ters orantılı olarak değişim gösterir, bu nedenle histeretik kayıplar $J_c d$ ile normalize edilir, d üstüniletken filamanın yarıçapıdır. Bu yüzden d 'yi düşürmek için filamanları iyice metal ana yapının içerisine gömerler. Telleri şerit şeklinde yapmaktansa yuvarlak yapmak daha tercih edilir bir durumdur. Bunun nedeni yuvarlak telleri kablo yapmanın daha kolay olması ve eğer tel enlemesine bir manyetik alana maruz kalırsa yuvarlak telin şerit ile karşılaştırıldığında daha küçük olmasıdır.

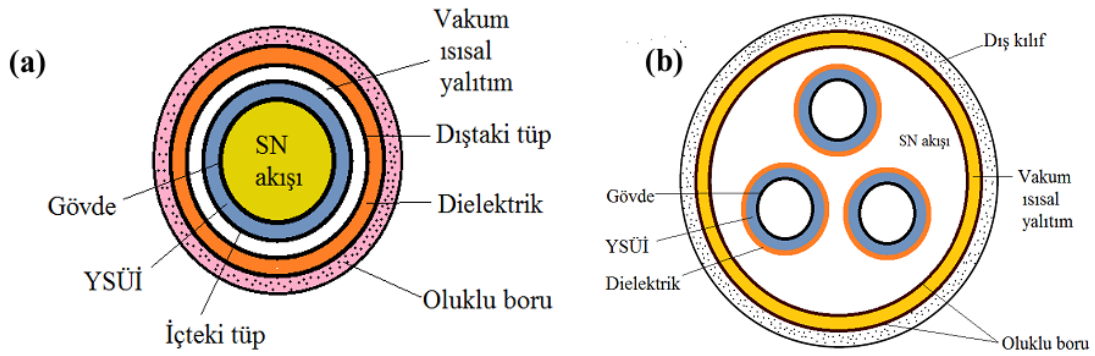
1.3.1. Üstüniletken Güç İletim Kabloları

Elektrik ihtiyacındaki artış ve bunun paralelinde yeni güç iletim kabloları döşeme gerekliliği, çevreye yer altı kablolarından ve trafolardan yağ sızması gibi endişeler güç iletiminde YSÜİ kabloların kullanım potansiyeli arttırmıştır. Kentsel alanlarda, mevcut yer altı kablo sistemini YSÜİ kablolar ile yenilenmesi durumunda ilave bir tünel açmadan mevcut tünel sistemi kullanılarak çok büyük bir kapasite artışı sağlanabilecektir. İletim ve dağıtım hatlarında ortaya çıkan manyetik alanlar bütün güç uygulamaları içerisinde en düşüğüdür, bu yüzden YSÜİ kablo teknolojisi küresel anlamda büyük ilgi görmektedir. Bi-2223 YSÜİ pek çok gösteri amaçlı projede kullanılmıştır. Bu projelerde üç fazlı kablolar kullanılmaktadır ki bununla 10-125 m uzunluğunda 10-225 kV ta birkaç yüz kilo amper akımlar taşınabilmektedir.

Pek çok YSÜİ kablo projesi AA güç iletimine odaklanmıştır. Bununla beraber, doğru akım iletim hatların gelecekte çok büyük bir potansiyele sahip olacaktır, özellikle çok büyük miktardaki elektriğin uzun mesafelere taşınması gerektiği durumlarda, örneğin kalabalık şehirlerden uzak olan hidroelektrik santralleri ya da nükleer santrallerden elektriğin taşınması gerektiği durumlarda.

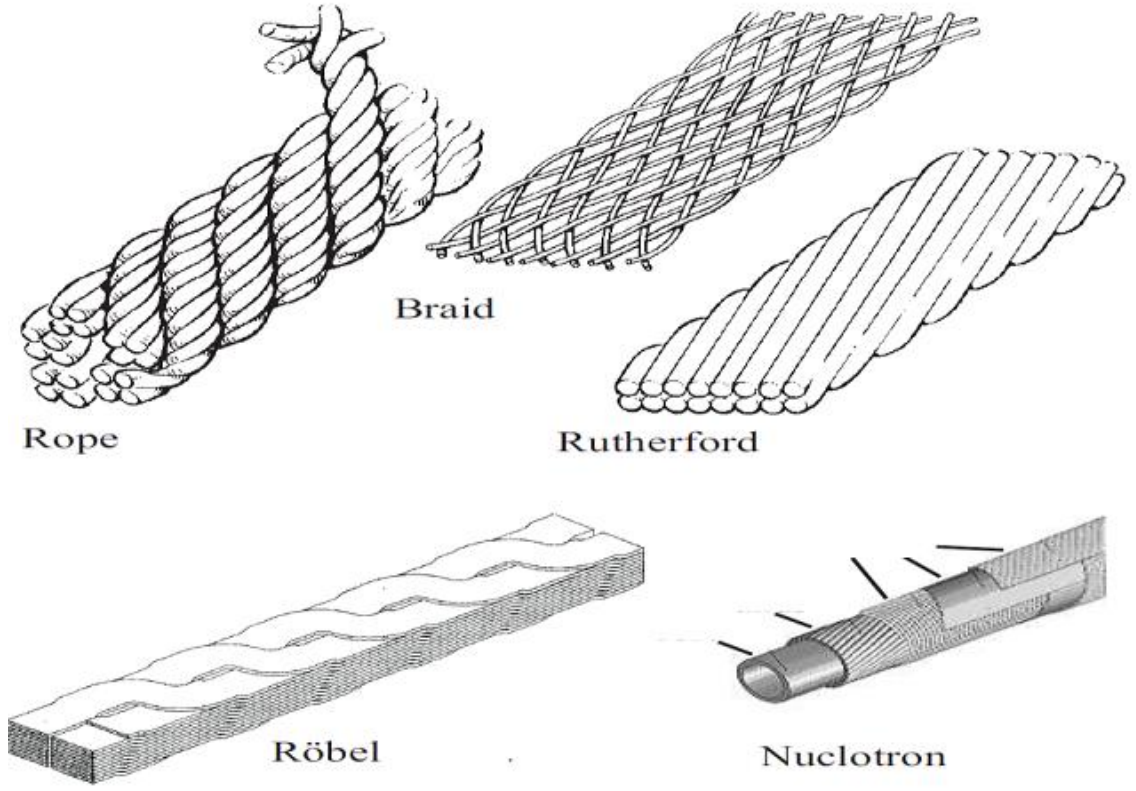
YSÜİ kabloların soğutulmasında genellikle sıvı azotun kapalı bir sistemde dolanan basit soğutucular kullanılır. Bu sistemler düşük sıcaklık üstüniletken kabloların soğutulmasında kullanılan çok aşamalı soğutucular kadar karmaşık değildir ve aynı zamanda onlar kadar pahalı değildir ve daha güvenilirlerdir. Tek fazlı yüksek sıcaklık üstüniletkendeki kayıplar 1 W/m mertebesindedir. Sıvı azot sıcaklığında “cryocooler” a giren 15-25 W elektriğin kabloda oluşturduğu ısı kaybı 1 W kadardır. Elektrik ve termal kayıplar kablonun boyunca oluşan sıcaklığa göre değişir. Soğutma sistemi, kablonun her yerindeki sıcaklığı T_c kritik sıcaklığının altında tutacak kadar yüksek ancak kablonun izolasyon malzemesine zarar verecek bir basınca neden olacak kadarda yüksek olmayan bir optimum akış hızına ulaşmalıdır.

YSÜİ kabloların soğutma sistemi için iki tip yöntem geliştirilmiştir: sıcak dielektrik ve soğuk dielektrik. Şekil 8 her iki tip soğutma sistemi için halihazırda kullanılan genel konsepti gösteriyor. Sıcak dielektrik hem daha derli toplu bir sistem hem de mevcut kablo sistemine uyarlaması kolay bir yöntemdir. Sıcak dielektrik dizaynlarında, sıvı azot gövde denilen içi boş metal tüp içerisinde akar ve üstüniletken şeritlerde birkaç tabaka olacak şekilde bu tüpün dışına helisel bir şekilde sarılır. Isısal izolasyon YSÜİ şeritlerini sarar, ve sıcak dielektrik ısısal yalıtkanın etrafına sarılır. Kablo yapımında soğuk dielektrik dizaynı, çok büyük güç yoğunluğundan ve kablonun dışarısında hemen hemen sıfıra yakın manyetik alandan dolayı daha tercih edilir bir yapıdır. Geliştirilmeye çalışılan diğer bir dizayn üç eksenli “triaksial” YSÜİ kablolardır. Bu dizaynda, fazların her biri aynı merkez civarında eş merkezli olarak içi içe konular ve soğuk dielektrik ile birbirinden ayrılır. Bu konseptin avantajı: kabloyu oluşturan üç fazında, tek fazlı geleneksel YSÜİ kabloların kesit alanından çok az büyük bir kesit alanına yerleştirilebilmesi ve dış manyetik alanın sıfır olmasıdır. Bununla beraber bu dizayndaki en önemli dezavantaj kablo uçlarının daha karmaşık olması ve kablo eklemelerinin zor olması olarak görülebilir.



Şekil 8. YSÜİ güç iletim kablolarının şematik gösterimi (a) sıcak dielektrik tasarımı (b) soğuk dielektrik tasarımı.

Yüksek akım ya da yüksek manyetik alan gerektiren uygulamalarda akımın homojen olarak dağıldığı ve düşük alternatif akım kayıplarının olduğu iletkenler kullanılması gerekir. Yüksek akım taşıma kabloları, transformatör, motorlar, hızlandırıcı mıknatısları, füzyon mıknatısları gibi uygulamalarda farklı şekilde dizayn edilmiş kablolar kullanılır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan beş farklı dizayn Şekil 9’da gösteriliyor.



Şekil 9. Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan üstüniletken kablo dizaynları.

1. **Rutherford** tipi kablo dizaynı bütün hızlandırıcı mıknatıslarında ve SIS 300 dizaynında kullanılır. Çeşitli nedenlerden ötürü, yüksek alan hızlandırıcında kullanılan süperiletken mıknatıslarda tercih edilen bir dizayndır. Çok yüksek paketleme oranından dolayı en yüksek akım taşıma kapasitesine sahip dizayndır. Rutherford tip kabloların yüksek paketleme oranı ve mekaniksel dayanıklılıktan dolayı mıknatıs uygulamaları için çok iyidir.
2. **Robel** tip kablolar çok aşamalı bükülmüş tellerden yapılırlar ve özellikle elektriği taşımak için yer altına açılan kanallara döşemek için kullanılır. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) bobinlerinde kullandığı kablolarda bin civarında telden oluşmuştur ve bu şekilde tellerin oluşturduğu boşluktan kabloların

içerisinden sıvı helyum kolayca akıp gidebilmektedir. Bu kablolar, Rutherford kablolarının sağladığı avantajlara sahip olmadıkları için hızlandırıcılarda kullanılmazlar.

3. **Braid** tip kablolar, geniş yüzeylerine dik bir kuvvete maruz kaldıklarında Rutherford kablolarına göre daha dayanıksızdırlar. Ancak yüksek akımla beraber yüksek manyetik alana maruz kalacak olan aygıtlarda oluşacak yüksek Lorentz kuvvetine karşı koyacak iç basınçlar için bu dizayn çok uygundur.
4. **Nuclotron** tipi kablolar süperiletken tellerin bir tüpün etrafına spiral şekilde sarılarak yapılırlar. Nuclotron kablo tüpün içerisinden sıvı azotu veya helyumu akıtarak soğutulabilmektedir. Bazı dizaynlarda direk helyumla soğutulmuş teller helisel şekilde sarılır. Nuclotron kablolar ve Rutherford kablolar bir çok bakımdan bir birilerine çok benzerler hatta Rutherford kablo düzleştirilmiş Nuclotron kablo olarakta görülebilir. Nuclotron kablolar SIS 100 mıknatıslarının yapımında kullanılmışlardır.
5. **Röbel** tip kablolar dolambaçlı geometriye sahip düz şeritlerden yapılırlar. Röbel kablolar süperiletken transformatörlerde ve ikinci kuşak füzyon rektörlerdeki kullanılması için çok uygundur. Röbel kablolar kurdele "ribbon" yada şerit "tape" iletkenlerden yapılırlar ve yapıları yuvarlak iletkenlerden yapılan Rutherford kablolar ile karşılaştırılabilir. Bu dizayn HTS şerit iletkenler için çok uygundur.

1.3.2. Üstüniletken Kablo Teknolojisi ve Gelişim Trendi

Üstüniletken kabloların küçüklüğü ve çok yüksek miktarlarda akım taşımaları, elektriğin yeraltından taşındığı günümüzün modern şehirlerinde ve şehircilik sisteminde bu kabloların kullanımını elzem hale getirmektedir. Bunun pratik sonucu, üstüniletken kabloları yeraltına döşeme maliyetinin bakır kabloları döşeme maliyetinden çok daha düşük olmasıdır.

Bizmut-tabanlı üstüniletken tellerin gelişiminde, yeni geliştirilen preslenmiş sinterleme metodu ile çok yüksek akım taşıma kapasitesine sahip düşük maliyetli uzun tellerin seri üretimine olanak sağlamaktadır. Üstüniletken telin kritik akımı tel başına 130A ($4\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$) aşmaktadır ve 140 MPa (oda sıcaklığında) kadar arttırılmış gerilme kuvvetine sahiptir, ki bu günlük hayatta artık üstüniletken kabloların kullanılabileceğini gösteren çok önemli bir mekaniksel özelliktir. Üstelik seri üretime geçildiğinde 1 km'den daha uzun uzunlukta her yerde aynı özelliği gösteren kablolar elde edilebilmektedir.

Bununla birlikte üstüniletken kabloların tercih edilme sebepleri şunlardır: hiç bir elektromanyetik alanın kabloların dışına sızması; kayıp düşük olduğu ve çok küçük boyutlarla çok yüksek akımın taşınabilmesi ile elektriğin iletim maliyetlerini önemli ölçüde düşürmesidir.

1.3.3. Üstüniletken Kabloların Avantajı Nedir?

1.3.3.1. Küçüklük ve Yüksek Kapasite

Üstüniletken kablolar aynı ölçülere sahip bakır kablolarla göre 100 kattan daha fazla elektrik akımını taşıyabilirler, yaklaşık etkin akım yoğunluğu 100 A/m^2 nin üzerindedir. Bu, günümüzde kullanılan bakır kablolarla göre daha küçük boyutlu kablolarla akımın taşınmasına olanak sağlayacağı ve neticesinde üretim maliyetlerinin önemli ölçüde düşülebileceği anlamına geliyor.

Örneğin, günümüzde kullanılan kablo ile 66KV, 1kA devreden gücü taşımak için normalde yerin altına üç kanal açmak gerekir. Talep edilen elektrik ihtiyacının bir kat arttığını farz edelim, bu durumda öncekilerin yanına altı tane daha yeni kanal açmak gerekir. Bunun yerine üç-göbekli üstüniletken kullanılsaydı eğer, yapılması gereken tek şey yalnızca bir üstüniletken kablo döşeyerek %200 taşıma kapasitesi artırılmış olacaktı. Kesinlikle yeni bir yeraltı hattı inşa etmeye gerek kalmayacaktır (Şekil 10 (a)). İstanbul, Ankara, İzmir gibi kalabalık şehirlerde yerin altına yeni bir kanal inşa etmenin maliyeti oldukça yüksektir. Şekil 10 (b)'de anlatılan şartlar altında geleneksel kablo ve üstüniletken kablo arasındaki inşaat maliyetlerini gösteriyor. Üstüniletken kablo hattı inşaat maliyeti hesaplanırken her 5 km ye bir soğutma sisteminin kurulacağı da dikkate alındı. Buna rağmen güç akımında üstüniletkenlerin kullanılması konvensiyonel kablolarla göre çok daha ucuza gelmektedir.

Şekil 10. (a) Üstüniletken kablonun toplam kurulum maliyeti. (b) konvansiyonel kablo ve üstüniletken kablonun toplan kurulum maliyetlerinin karşılaştırılması.

1.3.3.2. Düşük Taşıma Kaybı ve Çevre Dostu

Üstüniletken kabloların elektriksel direnci kritik sıcaklığın altında sıfırdır, bu yüzden elektriği naklederken direncin neden olduğu kayıplar çok düşüktür. Üstüniletken kablolarda üstüniletken perdelemeden dolayı, kablonun dışına elektromanyetik alan sızması yoktur. Bu elektromanyetik alandan kaynaklanan girdap “eddy” akım kayıplarını da ortadan kaldırır. Şekil 11’de üstüniletken kablo ve geleneksel kablolarda nakil kayıpları karşılaştırmaktadır. Üstüniletken kablolardaki enerji kayıplar genellikle alternatif akım

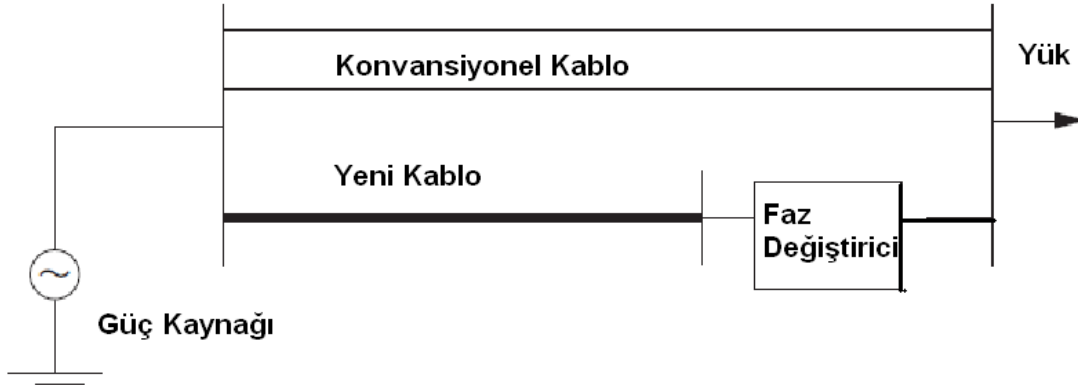
kayıplarından ileri gelmektedir. Bu kayıpların başlıcaları: üstüniletkenin kendisinden kaynaklanan histeretik manyetizasyon kayıpları, yalıtkanın dielektrik kaybı ve termal yalıtkan borusu içerisinde ısı istilasısıdır. Üstüniletken kablonun belirli sıcaklıkta üstüniletkenliğini sürdürebilmesi için sürekli soğutma biriminden soğutucu temin etmesi gerekir. Dolayısıyla soğutma birimi görevini ifa edebilmek için sürekli olarak elektriğe ihtiyaç duyar. Nakledilen enerjinin yaklaşık 0.1 kadarı burada harcanır. 66kV, 3kA, 350 MVA sınıfı kablolar karşılaştırıldığında, üstüniletken kablodaki kayıp konvansiyonel kablodaki kaybın yaklaşık yarısı kadardır (Şekil 11).

Şekil 11. Konvansiyonel ve üstüniletken kablolarda nakil kayıplarının karşılaştırılması.

1.3.3.3. Düşük İmpedans

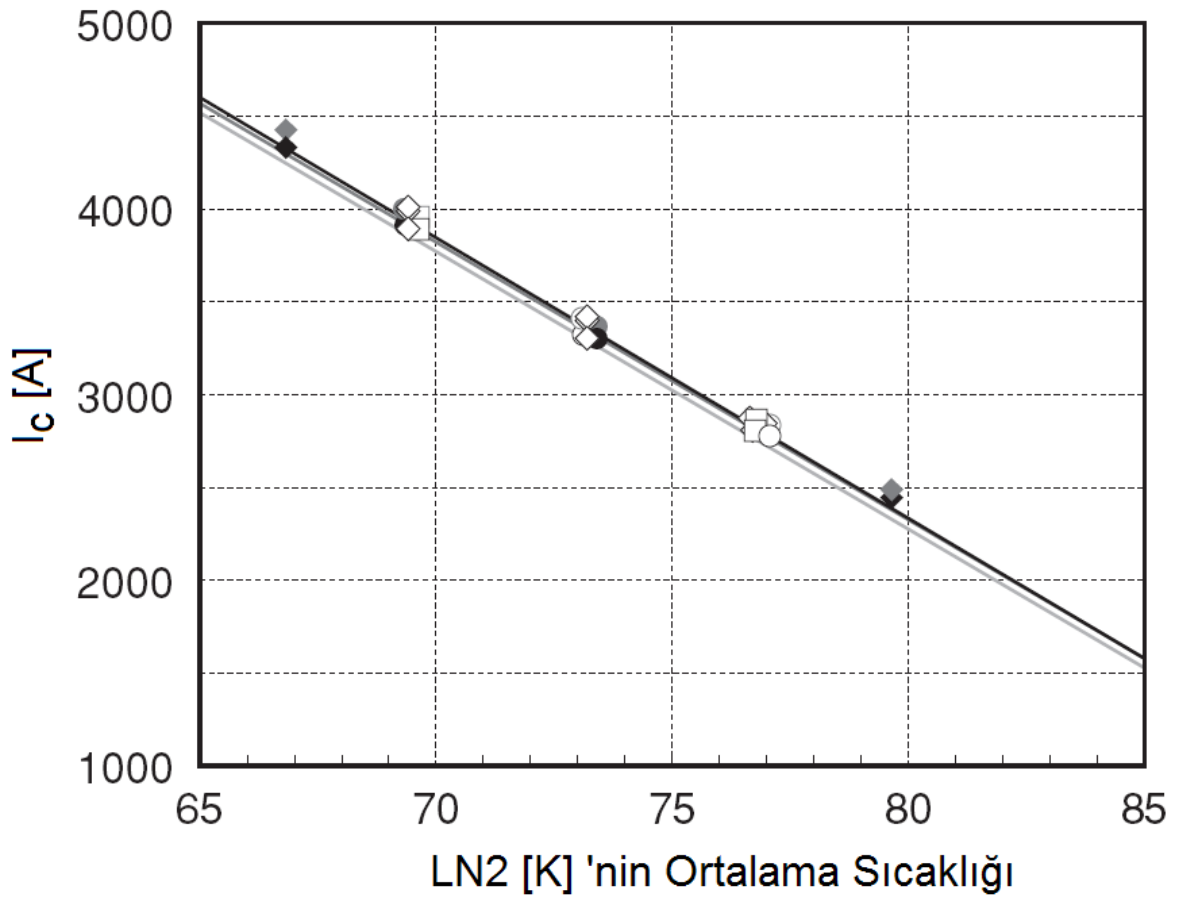
Üstüniletken perdelemekten dolayı, bir üstüniletken kablonun dışında elektromanyetik alan olmaz ve reaktansa çok düşüktür. Kablonun biçimine bağlı olarak, reaktans günümüzde kullanılan yeraltı bakır kablolarının 1/4' üne kadar düşürülebilir. Bu özellik geleneksel yeraltı kablolarına paralel yeni bir hat çekerek mevcut kabloların kapasitesinin artmasına olanak sağlar ve bir faz düzenleyici vasıtasıyla akım kontrol edilebilir (Şekil 12) . Bu durumda, faz düzenleyicinin kontrolü kolaylaşır. Mevcut kablo

hattına üstüniletken bir kablo döşeyerek, yalnızca konvansiyonel kablolanmanın yapıldığı hatta göre sistemin güvenilirliği arttırılmış olur.



Şekil 12. Paralel devreli ağ çalışması örneği

Bunlara ilaveten, üstüniletken bir malzemenin karakteristiksel bir özelliği şudur; operasyon sıcaklığı ne kadar düşükse akacak akımın miktarı o kadar yüksek olur. Şekil 13 üstüniletken kablonun sıcaklığı ve kritik akım arasındaki bağıntı gösterilmektedir. İşlem gördüğü sıcaklık 77K'den 70K'e düşürüldüğünde, akım taşıma kapasitesinde yaklaşık olarak %30 kadar bir artış sağlanabilmektedir. Bu özellik sayesinde, diğer kablo hatlarında bir problem çıktığında üstüniletken kablonun kapasitesi arttırılarak hattın işlevini sürdürülmesi sağlanabilir.



Şekil 13. Doğrulama testlerinden çıkan bir sonuç, kablonun kritik akım yoğunluğu ile operasyon sıcaklığı arasındaki ilişki.

1.3.4. Üstüniletken Kablo Gelişiminin Dünyadaki Durumu

1.3.4.1. ABD, Japonya ve Diğer Gelişmiş Ülkelerdeki Durum

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi, üstüniletken kablolar konvansiyonel kablolarla göre bir takım önemli ve kendine özgü avantajlara sahiptirler. Bundan dolayı, ABD, Avrupa Birliği, Japonya, Güney Kore, Çin gibi teknolojisini kendileri üretebilen ve pazarlayan devletler, üstüniletken kablo üretimi projelerini desteklemekte ve bu teknolojinin mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde ticarileşmesine çalışmaktadırlar.

ABD’de üstüniletken kabloların gelişimi Birleşik Devletler Enerji Departmanı (DOE) tarafından “Superconductivity Partnership Initiative (SPI)” projesi ile desteklenmektedir. Detroit’te gerçekleştirilen 120 m uzunluğunda üstüniletken kablo projesi başarısız olmuştur, ancak Shouthwire Şirketinin 30 m uzunluğundaki kablo projesi başarılı bir şekilde çalışmaktadır.

Son zamanlarda üç yeni projeye daha başlamışlardır. Projeler sayesinde üstüniletken kablolarının gelişimi de hızlandırılmış olacaktır. Projeler ABD elektrik sistemini güçlendirmek için (Ağustos 2003’de New York’ ta ciddi bir elektrik kesintisi olduğunda terörist bir saldırıya elektrik sisteminin yetersiz olduğunu görmüşler) üstüniletken kabloların kullanılmasına ön ayak olması açısından önemsenmektedir. Bu üç proje şunlardır: Albany Kablo projesi (350 m, 34.5 kV, 800 A), Ohio Kablo Projesi (220 m, 15 kV, 3 kA) ve Long Island Power Authority (LIPA) kablo projesi (600 m, 138 kV, 2.4 kA), bu projeler 2005 ve 2006 yıllarında başlamıştır.

Avrupa Birliğinde 6. Çerçeve Programı içerisinde Fransız Nexan firması öncülüğünde AB’den 7 kuruluşun katılımıyla 2004 yılında “Super 3C” projesi başlatılmış ve 2009 yılında neticelendirilmiştir. Katılımcı kuruluşlar: Nexan (Fransa), EON AG (Almanya), Tempere Teknoloji Üniversitesi (Finlandiya), Slovak Academy of Sciences, Institute of Electric Engineering (Slovakya), Instituto de Ciencia de Materials de Barcelona (İspanya), ZFV (Almanya), Lebian Tecnia (İspanya). Bu proje ile ikinci kuşak HTS şeritler kullanarak 17 MW güç taşıma kapasitesine sahip 30 m uzunluğundaki kabloyu başarılı bir şekilde test etmişlerdir.

Japonya’da, süper GM projesinin bir parçası olarak, CRIEPI ve Furukawa Elektrik Co. Ltd, CRIEPI laboratuvarında 500 m, 77 kV tek-göbekli test kablosu yapılmış ve uzun vadeli testler başlamıştır.

Otuz metre üstüniletken kablo Güney Kore’de “Dreams of Advanced power System by Applied Superconductivity Technologies (DAPAS)” tarafından

geliştirilmektedir. Çin Yunyan projesi ile 33.50 m, 35 kV, 121 MVA HTS kabloyu hali hazardaki mevcut ağına monte etmeyi başarmıştır. Bütün dünyada artık üstüniletken kablo projeleri ciddi biçimde desteklenmektedir.

1.3.4.2. Üstüniletken Kablo Konusunda Ülkemizde Yapılan Çalışmalar

Ülkemizde üstüniletkenlik konusunda akademik anlamda yoğun olarak Ankara Üniversitesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnönü Üniversitesi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, TOBB Ekonomi Üniversitesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi, Bilkent Üniversitesi, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Rize Üniversitesi, Gaziosmanpaşa Üniversitesindeki gruplar çalışmaktadır. Endüstriyel anlamda bu konuda çalışan yada yatırım yapan firma bulunmamaktadır. Akademik çalışmalarda ağırlıklı olarak üstüniletken malzeme üretimi ve elektrik, manyetik, mekaniksel karakterizasyon yapılmaktadır. Tübitak'ın <http://mistug.tubitak.gov.tr/proje/index.php> sayfasında “süperiletken” veya “üstüniletken” anahtar kelimeleri ile sorgulama yapıldığında sonuçlanan ve halen yürütülen toplam 43 proje bulunmaktadır. Bu projelerin ancak 6 tanesi üstüniletken kablo üretimi karakterizasyonu ile ilgilidir.

Tablo 1. Ülkemizde üstüniletken teller ve şeritler üzerine yürütülen ve sonuçlandırılmış projeler

Proje No	Proje Adı	Proje Yürütücüsü	Kuruluş	Yürüt. Grup	Proje Türü
196T053	Gümüş İçerisinde Üretilen Bismut Temelli Yüksek Sıcaklık Süperiletken (YSS) Tel ve Şeritlerin Elektriksel Yalıtımında Kullanılacak Uygun Seramik Bağlayıcı Karışımlarının Araştırılması	Prof.Dr.İBRAHİM BELENLİ	HAKKARİ Ü.	TBAG	Araştırma
107T588	MgB ₂ Süperiletken Tel Üretimi ve Manyetik Karakterizasyonu	Prof. Dr. ALİ GENÇER	ANKARA Ü. FEN F.	TBAG	Hızlı Destek
102T248	Süperiletken Esnek Şerit Üretimi ve Teknolojik Uygulamaları	Doç. Dr. YAKUP BALCI	İNÖNÜ Ü. FEN-EDEBİYAT F, FİZİK B.	TBAG	DPT

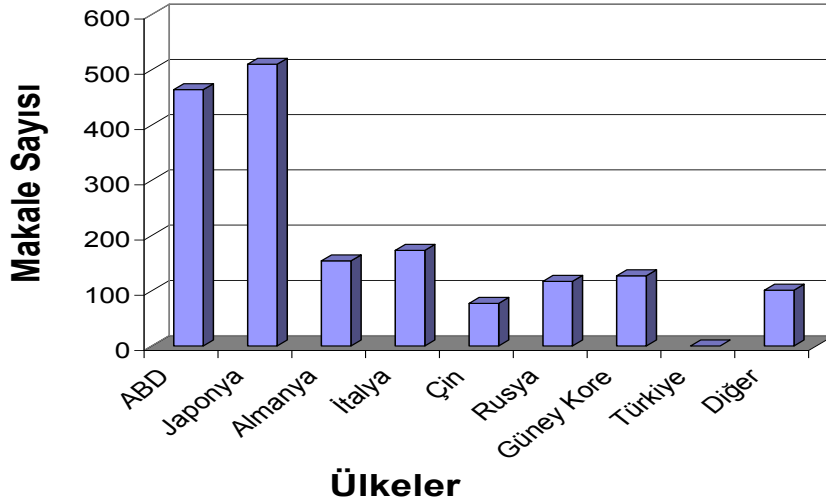
107T015	Yüksek Sıcaklık Süperiletken Bi:2223/Ag Şeritlerde AC Kayıpları Ve En İyi Çalışma Şartlarının Araştırılması	Prof.Dr. SELAHATTİN ÇELEBİ	KTÜ, FEN- EDEBİYAT F FİZİK B.	TBAG	Araştırm a
108M201	Sürekli Boru Yapma Ve Doldurma Yöntemi Ile B(Pb)SCCO-2223 Üstüniletken Şerit Üretimi Ve Bu Şeritlerden Üstüniletken Trafo Yapımı	Doç. Dr. CABİR TERZIOĞLU	AİB Ü. FEN- EDEBİYAT F. FİZİK B.	MAG	Araştırm a
102T094	Üstüniletken MgB ₂ Tellerinin Üretimi ve Karakterizasyonu	Doç. Dr. SALİH OKUR	İYT E. FEN F. FİZİK B.	TBAG	Araştırm a

Tablo 1'den görüldüğü gibi üstüniletken şerit ve kablolar üzerine 6 proje bulunmaktadır. Ancak üstüniletken kablo üzerine hiçbir proje yapılmamıştır. Bilindiği üstüniletken tellerin ve şeritlerin en önemli uygulaması üstüniletken güç iletim kablolarıdır. Tübitak tarafından desteklenen 110T876 nolu proje sayesinde yapılan bu tez üstüniletken kablo üzerine ülkemizde yapılan ilk yüksek lisans tezi olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca, Bu çalışma üstüniletken tel ve şeritler üzerine yapılan çalışmaların bir sonraki safhası niteliğinde olan bir çalışmadır.

1.4. Literatür Özeti

Üstüniletken kablo teknolojisi dünyada çok hızlı bir biçimde gelişmektedir. Pek çok gelişmiş ülke kendi teknolojisini geliştirme ve bunu günlük hayata uygulama peşindedir. Bunlara en çarpıcı örnek olarak Albany kablo projesi verilebilir. 2005 yılında başlayan ve 27 milyon dolar tutarındaki bu proje SuperPower, Sumitomo Electric gibi firmalar tarafından yürütülmektedir. Burada en önemli nokta üstüniletken kablo teknolojisinde dünya nerede biz neredeyiz? Bu soruya cevap aramak durumundayız. Şekil 14'de "science citation index" e giren dergilerde üstüniletken kablo üzerinde yapılan çalışmaların ülkelere göre dağılımı verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere maalesef ülkemizde üstüniletken kablo üzerinde ne deneysel ne de teorik bir çalışma yapılmamıştır. *Burada dikkat çekmemiz gereken bir noktada şudur: kablo "cable", tel "wire", şerit "tape"*

birbirinden tamamıyla ayrıdır. Kablo, tel ve şeritlerin belirli bir biçimde sarılmasıyla oluşturulan yapıdır. Ülkemizde üstüniletken tel ve şerit üzerine çeşitli projeler yürütülmüş ve hala yürütülmektedir ve dolayısıyla bunların neticesinde bir takım bilgi birikimleri ve bilimsel yayın ortaya çıkmıştır ve halada çıkmaktadır. Ancak kablo konusunda durum hiç de iç açıcı değildir. Bu durum çok şaşırtıcı değildir: Zira üstüniletken kabloların yapımı kolay olsa bile, onun elektro manyetik tepkisini gösterecek hem deneyi gerçekleştirmek hem de teoriyi yapmak oldukça zordur. Bir diğer önemli nokta ise bu kablo işinin genellikle büyük şirketlerin araştırma-geliştirme departmanları ya da günlük hayatımızda bazı değişimlere yol açacak büyük ölçekli projelerle yürütülmesidir.



Şekil 14. ISI web of science' de yapılan taramaya göre son on yılla üstüniletken kablolar üzerine yapılan çalışmaların ülkelere göre dağılımı

Üstüniletken kablo üzerine web of scienceden alınan verilere göre 5000 civarında çalışma vardır. Bu çalışmaların geneli deneysel yada deney artı simülasyon biçimindedir. Salt teorik çalışma sınırlı sayıdadır. Bizim projemiz salt simülasyon kablo modellemesi ile ilgili olduğu için üstüniletken kablo üzerine yapılan deneysel çalışmaların literatürünü göz ardı ettik sadece teorik çalışmaları dikkate alınmıştır. Teorik çalışmalar üç ana gruba ayrılabilir: 1. Genellikle üstüniletken malzemelerin elektromanyetik tepkisini (em) analiz etmek için kullanılan histeresiz modelleri. Bu modeller öncü çalışmalardır ve genellikle basit geometrilerin modellenmesine dayanır. Bu gün geliştirilen kabloların em analizini yapmak çok zordur ancak bu gün kullanılan modern benzeşim yöntemleri bu çalışmalara

dayanması bakımından önemlidir. 2. Kabloların akı ve akım dağılımını simüle etmek için geliştirilen analitik yöntemler. 3. Sayısal yöntemler

1.4.1. Histeresiz Kayıp Modelleri

Bean tarafından ortaya atılmış bir makroskobik teoridir (Bean, 1964). Model iki genel kabul çerçevesinde Maxwell denklemlerini çözmeye dayanır. Bu kabullerin ilki, manyetik alan ilk olarak YSÜ'nun kenarlarından başlayarak nüfuz eder. İkincisi, manyetik alanın nüfuz ettiği bölgedeki akım yoğunluğu, *kritik akım yoğunluğu* değerine eşittir. Bu kabullerden, farklı geometriler için histeresiz kayıpları hesaplanabilmektedir. Paralel manyetik alana maruz kalmış "slab" dilim geometrisi için aa kayıp denklemleri Ref. (Bean, 1964) de verilmektedir. Ref. (Norris, 1970) de transport akım uygulanan eliptik ve "strip" şerit şeklindeki tel için denklemler türetilmiştir. Akım ve manyetik alanın birlikte uygulandığı "slab" için aa kayıp denklemleri ref. (Carr, 1979) de verilmiştir. (Wilson, 1983) de dc akım taşıyan "slab"a paralel aa manyetik alan uygulandığı durum incelenmiştir. Son olarak, Brandt "strip" için dış manyetik alanın fonksiyonu olarak histeresiz kayıpları denklemleri ref. (Brandt ve Indenbom, 1993) de verilmiştir. Elbette YSÜ' lerin histeresiz kayıpları için başka yaklaşımlar da kullanmıştır ancak onları burada vermeye gerek yoktur.

1.4.2. Analitik Yöntemler

Üstüniletken şerit biçiminde kesilmiş tellerin silindiriksel bir göbek üzerine sarılmasıyla yapılan güç iletim kablolarındaki akım dağılımı ve aa kayıpları ilk defa Gerber vd. tarafından teorik olarak incelenmiştir (Gerber vd., 1993). Bu öncü çalışma daha sonraları Nb_3Sn den yapılan kabloları uygulanmıştır. Daha sonra çeşitli araştırmacılar BSCOO-2223 den yapılan birinci kuşak HTS şeritlerden dizayn edilen kablolarındaki aa kayıplarının teorisini ortaya koymuşlardır (Vellego ve Metra, 1995; Mukoyama vd., 1997; Daumling, 1999).

Daumling, eş merkezli iki tüpten alternatif akım geçirildiğinde oluşan kaybı analitik olarak hesaplamıştır ve dış tüpte akan akım kritik akımdan düşükse kayıp o tüpteki tek gövdeli kayıba özdeş olduğunu göstermiştir (Daumling, 2004).

Rossi ve Todesco hızlandırıcılarda kullanılan kuadrapol mıknatıslarının elektromanyetik dizaynı için yeni bir analitik yöntem geliştirmişlerdir (Rossi ve Todesco, 2006).

Mawatari ve Clem, akım geçen bir teli bir üstüniletken filmin üzerine yerleştirildiği zaman filmin elektromanyetik tepkisini teorik olarak incelemiş ve kritik hal modeline dayalı olarak akı ve alan dağılımını çıkartmışlardır (Mawatari ve Clem, 2006).

Ferromanyetik altlık üzerine yerleştirilen bir üstüniletken dilimin elektromanyetik davranışı Matawari tarafından incelenmiş ve sonuçlarını literatürde manyetik olmayan altlık üzerine yerleştirilen üstüniletken dilimin elektromanyetik davranışı ile karşılaştırmışlardır (Mawatari, 2006).

Mawatari değişik eğriliğe sahip silindirik kabuk şeklinde akım taşıyan üstüniletken şeridin elektromanyetik tepkisini teorik olarak incelemiştir. Akım ve alan dağılımları için analitik ifadeler sunmuştur (Mawatari, 2009).

Hamajima vd. tek tabakalı üç eksenli kabloda eşitlendirilmiş üç faz akım dağılımını analitik olarak incelemişlerdir. Bu analizde aa transport akım taşıyan üç eksenli kablunun aa kayıplarını hesaplamış, kablo boşunun fonksiyonu olarak aa kayıpları bulmuş ve üç eksenel kablunun minimum aa kaybını göstermişlerdir (Hamajima vd., 2008).

Takacs, Harmonik bir manyetik alanda normal metalle veya başka bir üstüniletkenle sarılmış üstüniletkenlerdeki aa kaybını hesaplayabilecek şekilde difüzyon denkleminin analitik ifadelerini çıkartmıştır (Takacs, 2010).

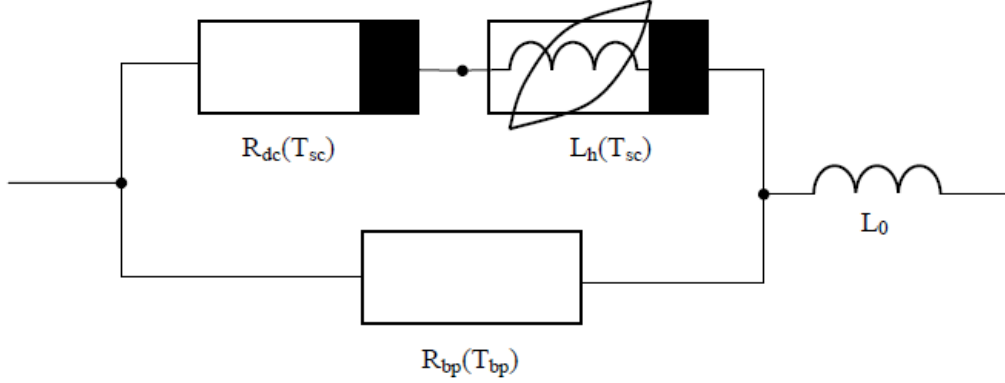
Clem ve Malozemoff ikinci kuşak HTS tellerden yapılmış güç iletim kablolarının aa kayıpları için yeni bir teori ortaya atmışlardır (Clem ve Malozemoff, 2010). Analitik yöntemler aa kayıplarını nitel yada yarı nicel olarak açıklamada çok başarılıdır. Deney sonuçlarını değerlendirmek için gerçek zamanlı simülasyon yapmada eksik kalmaktadır. Bir diğer önemli nokta ise analitik yöntemlerde akı sürüklenmesi, girdap akışı gibi farklı akı dinamiği etkilerini modellere sokmak çok zordur. Analitik yöntemler ya manyetik alan sabit olduğunda ya da transport akım sabit olduğunda çok iyi sonuç vermektedir. Nümerik yöntemler değişken manyetik alanla birlikte artan ve azalan transport akımlar içinde oluşan kayıpları ön görebilmektedir.

1.4.3. Sayısal Yöntemler

1.5.3.1 Eşdeğer Elektrik Devre Modeli

Daha önce bahsedildiği gibi üstüniletkenlerde her şey self ve karşılıklı indüktans tarafından belirlenmektedir. Bu davranışın pratik sonucu üstüniletken tabakalarda akan akımın eş değer olmamasıdır. Bu amaçla, üstüniletkeni özdeş bir elektrik devresi ile temsil

etme fikri farklı araştırmacılar tarafından gündeme getirilmiştir (Cristofolini vd., 2001; Gömöry vd., 2001; Ichikawa vd., 2001; Sjöström, 2001).



şekil 15. Üstüniletken şerit için genelleştirilmiş devre modeli.

şekil 15 Sjöström tarafından ortaya atılan geneleştirilmiş eş değer devre modelini göstermektedir. Model BSCOO' nun fiziksel yapısının yanı sıra ölçüm sonuçlarına ve Maxwell denklemlerine dayanır. İçerilen her bir devre elemanı, matematiksel ifadelerle tanımlanmıştır. Üstüniletken malzeme DC ölçümlerinden saptanan doğrusal olmayan $R_h(T_{sc})$ dirençle, dirence seri olarak $L_h(T_{sc})$ histeretik indüktans ve bunlara paralel by-pass malzemesi (Ag) $R_{bp}(T_{bp})$ doğrusal direnç tanımlanmıştır. Bu elemanlar kendi T_{sc} ve T_{bp} iç sıcaklıklarına bağlıdırlar. Bunlara ilaveten geleneksel indüktans L_o diğer elemanlara seri olarak bağlanırlar.

Däumling çok tabakalı üstüniletken güç iletim kablolarının elektromanyetik davranışını incelemiştir (Däumling, 2001). Kabloyu teşkil eden şeritlerin akım voltaj karakteristik modelini girdi olarak almış ve eşdeğer devre modelini kullanarak her bir şeritten akımı hesaplamak için yeni bir yöntem geliştirmiştir.

Noji vd. devre analizi modelini kullanarak helisel olarak sarılmış HTS kabloların sarılma açının etkisini incelemiş ve aa akım kaybının düşürülmesi için optimum ayarlamaların nasıl yapılacağını göstermiştir (Noji vd., 2004). Rostilla ve arkadaşları devre analizi modeline dayalı nümerik bir model geliştirmiş ve “coaksial” YBCO kabloların aa kayıplarını hesaplamak için kullanmıştır (Rostilla vd., 2006). Ishiyama vd. YBCO kaplı iletkenlerden yapılan kablolardaki transport akımın dağılımını ve termal davranışı

açıklamak için eşdeğer devre ve 3D FEM modeline dayalı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir (Ishiyama vd., 2008).

Noji tarafından tek fazlı yüksek sıcaklık BSCCO güç iletim kablolarındaki self-alan kayıplarını hesaplamak için elektrik devre modeline dayalı yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Noji, 2009). Uzun üstüniletken şeritlerden helisel sarılmasıyla yapılmış güç iletim kablolarının içerisindeki akım dağılımları devre denklemi ve analitik yöntem geliştirilerek çözülerek Tominaka tarafından incelenmiştir (Tominaka, 2009). Helisel ince şerit iletkenlerin self ve karşılıklı indüktansları sonsuz seri biçimindeki analitik ifadelerden hesaplanmıştır.

1.5.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Hesaplamalar

Stavrev vd. sonlu elemanlar yöntemini kullanarak BCSCO ve YBCO iletkenlerin AC kayıplarını karşılaştırmışlar ve YBCO ince filmin yalnızca self alanda çok düşük kaybın olduğunu, dolayısıyla kablo uygulamaları için çok uygun olabileceğini bulmuşlardır (Sato ve Amemiya, 2005; Stavrev vd., 2006). Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kaçak akım şartları altında YBCO kablolarda sıcaklık dağılımı Rostilla vd. tarafından incelenmiş ve bu şekilde kablonun termal kararlılığı araştırılmıştır (Rostilla vd., 2006). Klincok ve Gömöry tek tabakalı üstüniletken kabloda kabloyu teşkil eden şeritler arasındaki boşluğun aa kayıpları üzerine etkisini ticari sonlu elemanlar yazılımı Comsol MP kullanarak incelemiştir (Klincok ve Gömöry, 2006). Portone vd. ITER projesinde yeraltına dönecek kabloların elektromanyetik analizi için kritik hal modelini 3 boyutlu olarak çözen bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem kabloda kenar elemanlarının ayrıştırılarak bir tür minimizasyon yada varyasyonel probleminin çözümüne dayanmaktadır (Protono vd., 2007). Üstüniletken güç iletim kablolarında yada şeritlerin üç boyutlu modellenmesi çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir (Hashimoto vd., 2000; Amemiya vd., 1998; Barambilla vd., 2007; Miyagi vd., 2004; Miyagi vd., 2007). Miyagi ve arkadaşları, akım geçirilen HTS üstüniletken kablolarda ferromanyetik altlığın etkisi sonlu elemanlar yöntemini dayalı yeni bir metotla araştırmıştır (Miyagi vd., 2007). Akım dağılımı ve aa kayıpları hesaplanmıştır. Umabuchi vd. ferromanyetik malzeme ile kaplanmış üstüniletken şeritlerin bakır bir gövde üzerine sarılarak yapılan HTS kabloların manyetik alana bırakılması ile oluşan histeretik manyetizasyon kayıplar detaylı bir şekilde incelenmiştir (Umabuchi vd., 2007). Farklı ferromanyetik özellik gösteren malzemeler için aa kayıpları karşılaştırmıştır. Gömöry ve Klincok ticari sonlu elemanlar kodu kullanarak eliptik kesit

alanına sahip bir telde kritik akım yoğunluğu dağılımını hesaplamasını yapacak nümerik bir yöntem geliştirmişlerdir (Gömöry ve Klincok, 2006; gömöry ve vd., 2008). Jiang vd. kendilerinin geliştirdiği tek boyutlu FEM kodunu kullanarak dört tabakalı kaplı üstüniletken kablodaki aa kayıplarını hesaplayacak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir (Jiang vd., 2008). Ueda vd. bakır bir göbek üzerine sarılan giydirilmiş “coated” YCCO şeritlerden yapılmış 1m uzunluğundaki kabloda kaçak akım analizi yapmış, sonuçlarını değerlendirmek için eş değer devre modeline ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı yeni bir bilgisayar kodu geliştirmişlerdir. Bu kodu kullanarak kablodaki aa kayıplarını ve termal kararlılığı incelemiştir (Ueda vd., 2008). Gömöry vd. ferromanyetik bir malzeme ile kaplanmış kompozit üstüniletken tellerde manyetik akı simülasyonu ve aa kayıplar için yeni bir hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir (Gömöry vd., 2009). Brambilla vd. akım geçirilen istiflenmiş ve sarılmış ince üstüniletken tellerin transport aa kayıplarını hesaplamak için integral denklemi metodunu geliştirmişlerdir (Brambilla vd., 2009).

Sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanılarak altıgen şeklinde dizilmiş BSSCO şeritlerin elektromanyetik tepkisi incelenmiştir (Choi vd., 2010). Çalışmada kablodan akım geçirilmiş ve transport akım kayıpları hesaplanmıştır. HTS kabloyu oluşturan HTS tellerdeki akım dağılımlarını hesaplamak için Kim vd tarafından yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Sim vd., 2010). Yöntemi özel kılan taraf, önce deneysel olarak HTS kablodaki akım dağılımı hall probe yöntemi ile ölçülüp oradan elde edilen parametrelerin simülasyonda girdi olarak kullanılmalıdır. Gömöry vd., ferromanyetik malzeme ile kaplanmış ikinci kuşak YBCO şeritlerden oluşmuş tek tabakalı üstüniletken kabloların elektromanyetik davranışı ve aa kayıplarının hesabı için yeni bir hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir (Gömöry vd., 2010). Geliştirdikleri yöntem ile hem ferromanyetik kısımda hem de üstüniletken kısımda oluşan kaybı hesaplayabilmektedirler.

Transport akıma ve manyetik alana maruz bırakılan kaplı ROEBEL kablolarda transport ve manyetizasyon aa kayıplarını ölçmüşler ve sonuçlarını değerlendirmek için Comsol MP’de bir hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir (Terzieva vd., 2010).

Nguyen vd., “Yitrium, Baryum, Bakır, Oksit” (YBCO) “Roll Assisted bi Axially textured substrates” (RABITS) üstüniletken şeritlerden yapılan kabloların elektrodinamiği ve alternatif akım kayıplarını simüle etmek için Comsol Multiphysics 4.2a yazılımını kullanarak yapılabilen yeni bir FEM modeli ortaya atmışlardır. Bu model geçirgenliği manyetik alana bağlı seçerek RABIT’teki ferromanyetik kayıpları da hesaplayabilmektedir (Nguyen vd., 2010). Amemiya vd., ferromanyetik bir altlıkta büyütülmüş üstüniletken

şeritlerden yapılan iki tabakalı üstüniletken kablonun elektromanyetik alan analizi ve aa kayıplarını hesaplamışlardır. Hesaplamalarda kendi geliştirdikleri FEM kodunu kullanmışlardır (Amemiya vd., 2010). Kaplı iletkenin spiral bir şekilde sarılmasını ihmal etmişlerdir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Güç iletim kabloları yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin kısa süre içerisinde hayata geçirilebilir uygulamalarından birisidir. Hâlihazırda ABD, Japonya, Fransa, Kore, Çin, gibi pek çok ülkede mevcut elektrik dağıtım şebekesine üstüniletken güç iletim kabloları monte edilmiştir (URL-1). Alternatif akım (aa) kayıplarının ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi güç iletim kablolarının ticarileşmesi için kritik öneme sahiptir. aa kayıplarının azalması kabloları soğutma maliyetinin azaltılması için çok önemlidir. Üstüniletkenlerde alternatif akım kayıplarını etkileyen en önemli etmenler şunlardır: (1) Kullanılan şeritlerin kablonun kesit alanına dizilimleri (2) Şeritlerin farklı manyetik maddelerle kaplanması. Dolayısıyla kaplama malzemesinin manyetik özellikleri (3) Şeritler arasında akımın eşit olarak dağıtılması (4) Şeritlerin boyutları ve şeritlerin hem yan hem de karşı komşu şeritler arasındaki mesafe. (5) Şeritlerin iletken gövde üzerine sarılma açısı vb. Hiç şüphesiz doğru konfigürasyonu, doğru mesafeyi, doğru açığı, doğru özellikteki malzemeyi bulmak için laboratuarda denemeler yapmak gerekir. Üstüniletkenlik teknolojisi bu gün için çok pahalı bir teknolojidir. Bu denemeleri gerçekleştirmek maliyeti önemli ölçüde arttıracaktır. Bununla beraber kablo teknolojisinin anlaşılması için gerekli fizik hakkında da çok az bilgi verecektir. Bu amaçla, üstüniletken kabloları temel fizik ve mühendislik yaklaşımını kullanarak üstüniletken kabloların dizaynını laboratuara girmeden gerçekleştirmek ve kaybı en düşük olan yapıyı laboratuarda üretmek için, güç iletim kablolarında akı, akım dağılımlarını ve aa kayıplarını benzeşimle hesaplayacak yöntemler geliştirilmiştir (Clem ve Malozemoff, 2010; Cristofolin vd., 2001; Rossi ve Todesco, 2006; Amemiya vd., 2010). Bu yaklaşımlar ya analitik yöntemleri yada sayısal yöntemleri kullanır. Analitik yöntemler genellikle çok idealize geometriler için yapıldığı için endüstriye çok fazla hitap etmez. Sayısal yöntemler ya eşdeğer devre yaklaşımına ya da sonlu elemanlar yaklaşımına (SEY) dayanmaktadır. Eşdeğer devre yaklaşımı kabloyu oluşturan şeritlerdeki akımın hangi oranda dağılacığı hakkında bilgi verir. Nasıl dağıldığı, niçin böyle bir dağılımı seçtiği hakkında bilgi vermez. Yalnızca SEY de kullanılacak bir takım bilgileri sunar. Kabloların elektromanyetik dizaynı gerçekleştirmek için en efektif çözüm olarak araştırmacılar ya kendi yazdıkları sonlu elemanlar kodunu ya da ticari sonlu elemanlar yazılımını inceleyecekleri kablo sistemine uygulamışlardır. Kablo dizaynı için birinci çözüm yolunu kullanmada çok ciddi zorluklar vardır. Zira sonlu elemanlar kodunu yazmak ve kodu optimize etmek çok ciddi matematik ve nümerik analiz bilgisi gerektirir ayrıca bu işlemleri gerçekleştirmek çok uzun zaman alır. Daha da önemlisi böyle bir kodu yazan bir kişi

kodunu başka birisi ile paylaşmaz. Ticari sonlu elemanlar yazılımını incelenecek güç iletim kabloları sistemlerine uygulamak hem daha kolay, hem de daha hızlı çözümler sunmaktadır. Ancak bu bilgisayarı al, yazılımı kur, sistemi çalış basitliğinde değildir. Sonlu elemanlar programlama bilgisinin yanında çalışılacak sistemi çok iyi bilmek, fiziksel durumları sisteme uygulayabilmek ve karşılaşılan zorlukların üzerinden gelebilecek çözümler geliştirebilmek ve sistemin hassasiyetini arttırmak için yeni hesaplama yöntemleri geliştirilmesine ihtiyaç duyulur. Sonlu elemanlar yöntemini birinci nesil yada ikinci nesil şeritlerden yapılan tek tabakalı güç iletim kablolarına uygulamak nispeten çok kolaydır. Ancak çok tabakalı güç iletim kabloları üzerine hesap yapmak kolay değildir. Çünkü üstüniletkenlere has özelliklerden dolayı akım daima dış tabakadan akmaya çalışacaktır. Bu durumda üstüniletkenlerde inanılmaz aa kayıplarına neden olmaktadır. Bu zorluğun üzerinden ancak akımı bütün tabakalara eşit olarak paylaştırılarak gelinebilir. Bu amaçla bu çalışma döneminde iki tabakalı güç iletim kablosunda dış tabakadaki akıyı çekip içerideki tabakaya verecek yeni bir yöntem geliştirildi ve bu yöntem kullanılarak çeşitli kablo yapılarına uygulandı.

2.1. I. Yöntemin Temel Kavramları

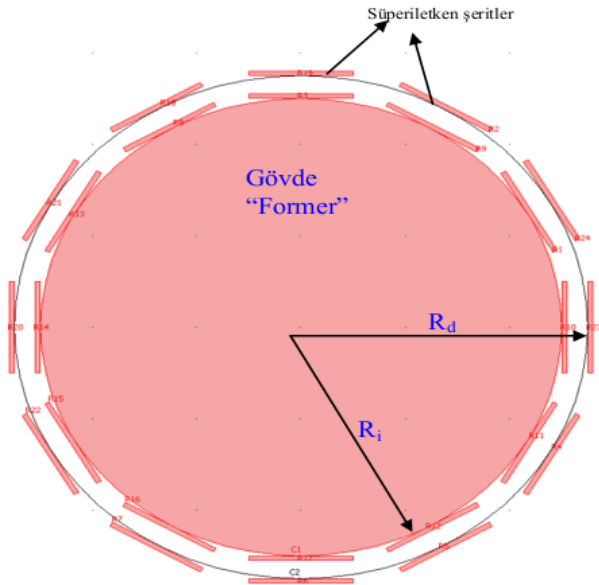
İki tabakalı üstüniletken kabloları oluşturan üstüniletken şeritlere akımı eşit bir şekilde paylaşmak ve alternatif akım kayıplarını hesaplamak için nümerik bir yöntem geliştirildi. Modelleme çalışmasında Şekil 16'da gösterildiği gibi iki tabakalı kablo yapısı kullanılmıştır. Şeritler iç yarıçapı R_i dış yarıçapı R_d olan bir gövde üzerine karşılıklı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Şeritler gövde üzerine sarılmamış her bir iletken birine paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca akı sürüklemesi, akı akışı, akı atlama gibi bütün akı dinamiği etkileri ihmal edilmektedir. İletkenler xy - düzleminde yatmakta ve z - yönünde ise sonsuz olduğu kabul edilmektedir. Kablo z -yönündeki bileşenleri diğer yönlerde göre çok çok daha büyük olduğu için bu yönde sonsuz olarak kabul edilebilir ve hesaplamaları iki boyutta yapmak yeterlidir. Akım z - yönünde akmakta ve üstüniletken şeritler tarafından taşınmaktadır. Bir kablodan akım geçirildiği zaman indüklenen self alan kablo içerisinde akım ve alan dağılımını değiştirir. Bu geometride A manyetik vektör potansiyeli bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Manyetik vektör potansiyelinin rotasyoneli manyetik akı yoğunluğunu verir,

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (11)$$

Bu durumda çözülmesi gereken denklem,

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (12)$$

Burada μ manyetik geçirgenlik J akım yoğunluğudur. Kritik hal modeline göre tip-II üstüniletkenlerin içerisinde akım yoğunluğu, ya sıfırdır yada kritik akım yoğunluğu J_c kadardır. Eğer üstüniletken içerisinde hiçbir elektrik alan yoksa o bölgedeki akım yoğunluğu sıfırdır. Akım yoğunluğunun yönelimi üstüniletken içerisinde sıfır olamayan lokal elektrik alan tarafından belirlenir. Elektrik akımının ve manyetik alanın değişmesi ile ortaya çıkan elektrik alan,



Şekil 16. Geliştirilecek yöntemde kullanılacak güç iletim kablosunun iki boyutlu kesit alanı. R_i içteki gövdenin yarıçapı. R_d dıştaki gövdenin yarıçapıdır. İçteki gövde genellikle bakırdan yapılır. İki şerit arasında dielektrik malzeme konulur. Akım şeritlerden akıtılmaktadır.

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (13)$$

ile verilir. Burada A manyetik vektör potansiyeli, ϕ skaler potansiyeldir. Üstüniletkenlerde elektrik alan ile akım yoğunluğu arasında şöyle bir doğrusal olmayan karakteristik bağıntı vardır (elektrik alan akım yoğunluğu (E-J) bağıntısı):

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (14)$$

burada E_0 10^{-4} V m⁻¹ ve n , akı sürüklenme parametresi, orijinal Bean modeline göre $n=\infty$ 'dur. Sonlu elemanlar hesaplamalarında üstüniletken içerisinde akım yoğunluğu ile vektör potansiyeli arasında denklem (13) ve denklem (14) kullanılarak şöyle bir bağıntı tanımlanmıştır (detaylar için şu referansa bakınız(Gömöry vd., 2009)):

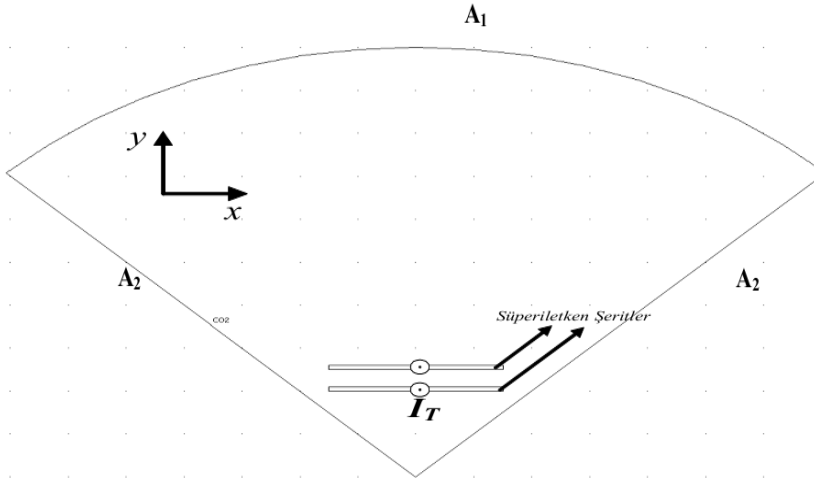
$$J_s(x, y) = J_c \tanh\left(\frac{A_p(x, y) - A_z(x, y)}{A_n}\right) \quad (15)$$

Burada A_p bir başlangıç alan yada akım aktivasyonunda ortaya çıkan manyetik vektör potansiyeli dağılımı, A_z şu an ortaya çıkan manyetik potansiyel dağılımı, A_n skalama çarpanı. A_n değeri zıt akımın dolandığı bölgeler arasındaki sınırın genişliğini etkiler.

1. İncelenecek kablo geometrisinin Comsol Multiphysics (MP) programına girilmesi
2. Başlangıç yada üstüniletkenlik parametrelerinin girilmesi
3. Subdomain ayarlarının yapılması
4. Sınır şartlarının belirlenmesi
5. Örgüleme “meshing” işleminin yapılması
6. Uygun çözümleyici “solver”in seçimi ve problemin çözümü
7. Problemi farklı şartlar için çözecek matlab kodunun yazılması

2.2. İncelenecek Kablo Geometrisinin Girilmesi

Comsol MP 4.2a programına incelenecek geometri iki şekilde girilebilir ya direkt çizim ara yüzünde geometri çizilebilir yada bir Cad yazılımı kullanılarak geometri çizilebilir ve comsola aktarılır. Bu çalışmada iki tabakalı iletken kablo için Şekil 16 ile verilen geometri çizilmiştir. Burada yapının periyodikliğinden dolayı ortaya çıkan simetriden dolayı, ve hesaplama süresini kısaltmak için yalnızca üst üste iki iletken olduğu dilimi kullanmak yeterlidir. Burada iki farklı subdomain vardır: 1) akımın geçtiği üstüniletken kısımlar 2) dielektrik kısım (boşluk). İletkenlerin bir birleri ile hiçbir fiziksel teması yoktur ancak manyetik olarak bir birleri ile etkileşmektedir.



Şekil 17. Sonlu elemanlar hesabında kullanılacak geometri ve çözüm yapılacak uzay. Çözüm yapılacak uzay güç iletim kablosunun dış yarıçapının yaklaşık 20-25 katı olmalıdır. Burada A₁ ve A₂ sınır şartlarını belirtir. Üstüniletken şeritler dikdörtgenlerle gösterilmiştir ve bunlara subdomain denir.

2.2.1. Başlangıç ya da Üstüniletkenlik Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu benzeşim için girilmesi gerekli parametreler: numune boyutları, malzemenin kritik akım yoğunluğu, manyetik potansiyeli ölçekleyecek parametre, uygulanacak akım değeri vs. Benzeşimde kullanılacak bazı üstüniletkenlik parametrelerinin uygulanan geometriye göre girilmesi son derece önemlidir. Örneğin uygulayacağımız akım değeri üstüniletkenin kritik akım yoğunluğundan küçük olmalıdır. Bir diğer kritik parametre ise manyetik potansiyeli ölçeklendirme parametresi A_n. Bu fonksiyonun biçimi $y = \tanh(x/A_n)$ şeklindedir.

2.2.2. Subdomain Ayarları

Üstüniletken malzemelere ait karakteristik parametrelerin ve denklemlerin tanımlanacağı kısım burasıdır. Burada üstüniletkenlerin doğrusal olmayan davranışını betimleyen denklem 15, denklem 12'nin çözümü için tanımlanır. Her özel durum için özel denklem tanımlamak gerekebilir yada deneyde alınan sonuçlarda başka parametreleri belirlemek için yine subdomain ayarları olarak girilebilir.

2.2.3. Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar hesaplamalarının en can alıcı kısmı sınır şartlarının doğru seçilmesine veya tanımlanmasına bağlıdır. Mevcut durum için iki farklı sınır şartı tanımlanmıştır. Birinci sınır şartını şu şekilde belirlendi. İçinden $I(t)$ akımı geçen R' yarıçaplı bir silindir ele alındı bu silindirin merkezinde R kadar uzaklıkta ($R \gg R'$) oluşturduğu manyetik potansiyel ifadesi sınır şartı olarak uygulandı. Coulomb ayarında ($\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$ olarak tanımlanır), içinden I akımı geçen bir telden R kadar uzaklıktaki bir noktada oluşturduğu manyetik potansiyel,

$$A(R, t) = -\frac{\mu_0 I_w(t)}{2\pi} \ln(R) \quad (16)$$

Bununla beraber, manyetik potansiyel için,

$$A(R, t) = -\frac{\mu_0 I_w(t)}{2\pi} \ln(R) - A_k(t) \quad (17)$$

Burada A_k Coulomb ayarında tanımlanan kerneldeki vektör potansiyelidir. Denklem 17 ile belirtilen sınır şartı şekil 17' de gösterilen A_l ile gösterilen sınır şartı için kullanıldı. Dilimin yanlarındaki sınır şartları için hem simetriyi hem de sürekliliği belirtmek için,

$$\hat{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0 \quad (18)$$

kullanılabilir. Çözüm bölgesi içerisinde kalan "subdomainlerin" sınırları için herhangi bir şart belirtmeye gerek yoktur.

2.2.4. Örgüleme “meshing” İşleminin Yapılması

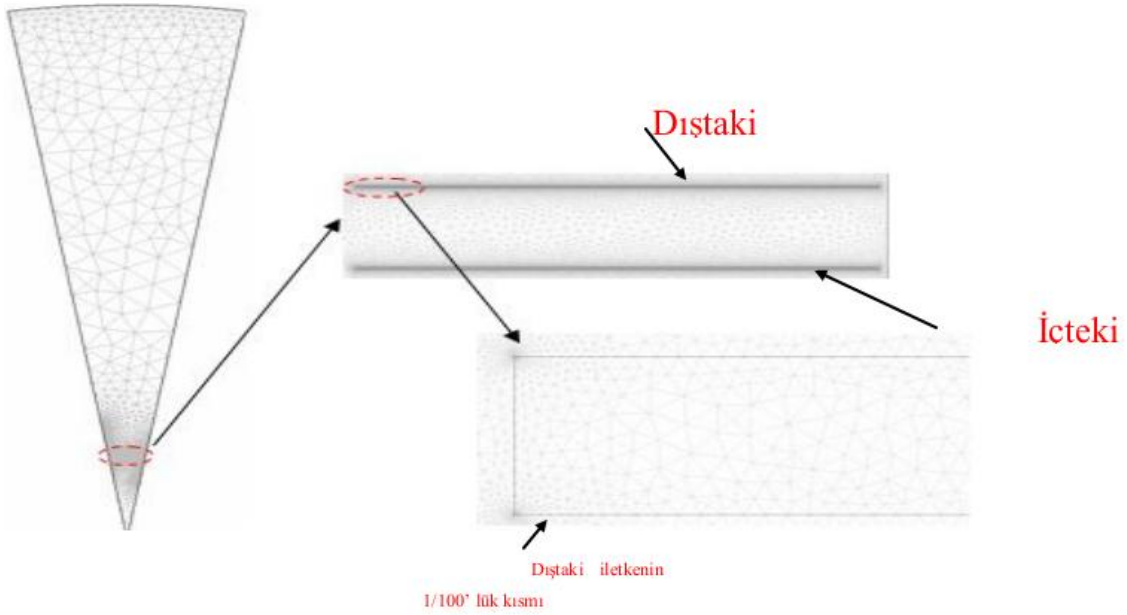
Hesaplamanın hassasiyetini belirleyen en önemli basamak çözüm yapılacak bölgede örgülemenin iyi yapılmasına bağlıdır. Buradaki en önemli sorunlardan bir tanesi hesap yapılacak iletkenlerin *en/boy* oranlarının çok yüksek olmasıdır. Bir diğer önemli nokta ise genel olarak bütün hesaplamalar için geçerli olan örgülemenin çok yoğun yapılması hesaplamanın hassasiyetini artırırken, çözüm yapma süresini çok önemli ölçüde uzatır. Yada örgüleme çok seyrek yapılırsa bu sefer çözüm sırası kısalmaya başlar ama hassasiyette düşer. Bu ikilemden kurtulmak için yapılması gerek R^2 testinin mutlaka yapılmasıdır. Yapılan bir referans hesaplamanın sonucu ile yapılacak hesaplamanın sonucunun karşılaştırılması için R^2 kriteri,

$$R^2 = 1 - \frac{\delta}{\Delta} \quad (19)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n (\log(Q_i) - \log(Q_{ri}))^2 \quad (20)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (\log(Q_{ri}) - \overline{\log(Q_r)})^2 \quad (21)$$

Q_i i . hesaplama noktasındaki aa kayıp değerleri, Q_{ri} i . hesaplama noktasında seçilen referans modelin aa kayıp değerleri. R^2 'in 1'e çok çok yakın olması gerekir.



Şekil 18. Çalışma yapılacak uzayın örgülenmesi. İletkenlerde çok büyük olduğu için örgülemenin çok dikkatli yapılması gerekir.

Bu kriter şekil 18’de gösterilen içteki ve dıştaki iletkenler için uygulandı. Bunların dışındaki uzay için yapılmadı bu testin sonucu Tablo 2’de veriliyor. Tablodan da anlaşılacağı üzere en/boy için 500/7 seçmek hem yakınsama için hem de hassasiyet için yeterlidir.

Tablo 2. Referans hesaplamadan aa kayıplarının sapması

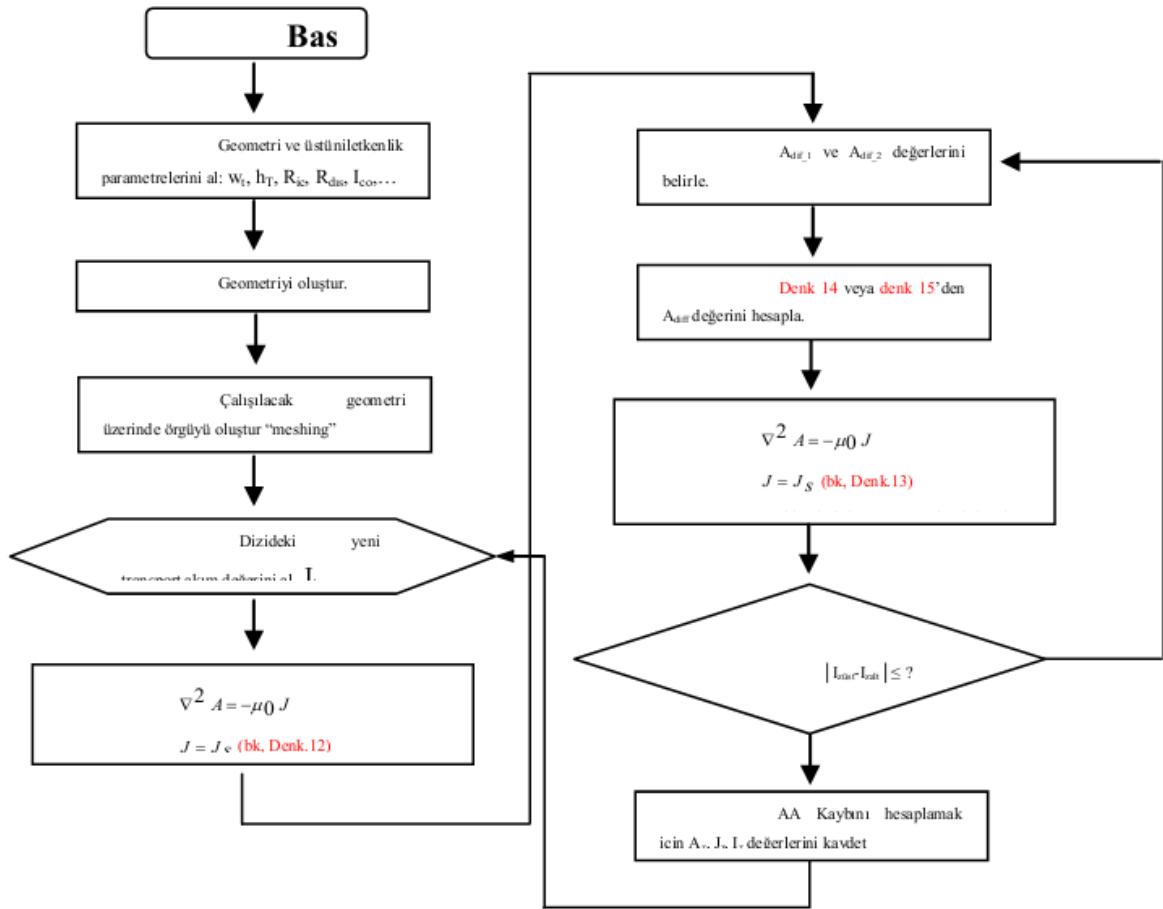
en/boy	10/7	50/7	100/7	500/7	1000/7	2000/7
R^2	0.86561485	0.98756124	0.99125472	0.99999972	0.99999991	0.99999992

2.2.5. Uygun Çözümleyici “solver”in Seçimi ve Problemin Çözümü

Problemin en son ayağında problemi çözecek çözücünün seçilmesi gerekir. Buradaki en önemli kıstas ya da akılda tutulması gereken nokta problemimizin doğrusal olmayışdır. Doğrusal olmayan “highly nonlinear” bir çözümleyici seçildi.

2.3. Yöntem

Buraya kadar anlatılanlar ile tek bir akım değeri için bir üstüniletken kabloda akım, manyetik potansiyel dağılımının nasıl hesaplanacağı ve nelere dikkat edilmesi gerektiğini ayrıntılı bir biçimde verildi. Bundan sonra yapılması gereken bunu belli periyotta geçirilen akım değerleri için her bir iletkeniden geçen akımı eşitlemektir. Bunu yapabilmek için matlabda kod yazıldı. Kodun algoritması şekil 19’da verilmektedir.



Şekil 19. Akımı eşitlemek için kullanılan algoritma

Hesaplama dikkat edilmesi gereken ilk nokta ilk akım alındıktan sonra subdomain ayarlarını sabit kritik akım yoğunluğu için hesaplatmaktır. Yani,

$$J_s = J_{c0}. \quad (22)$$

Bu başlangıç şartı için önemlidir. Bu hesaplamaların mantığı şuna dayanır: akım geçirildiği zaman geçirilen akımın büyük bir kısmı dıştaki iletkeni geçecektir. Dıştaki iletkendeki manyetik potansiyelin yarısını al ve içteki iletkene ver. Ancak bu yapıldığında iletkenlerin self indüktansları ve karşılıklı indüktanslarından dolayı içteki iletken bu sefer fazla akım taşınacaktır. Bu sefer içteki iletkendeki manyetik potansiyelin bir kısmını al dıştaki iletkene ver. Bir tür çok parçacık problemine benzetilebilir. Bu şekilde her iki iletkendeki akımlar arasındaki fark belli bir toleransın altına düşünceye kadar tekrarlanacaktır. Bunu başarabilmek için denklem 15 ile verilen akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_s(x, y) = J_c \tanh\left(\frac{A_p(x, y) - (A_z(x, y) \mp A_d/2)}{A_n}\right) \quad (23)$$

şekilde tanımlandı. Burada A_d her bir iletkeni çekilecek ve diğer iletkene verilecek manyetik potansiyeli gösterir. Programa başlamadan önce alttaki ve üstteki iletkenler için ayrı manyetik potansiyel değeri girilmelidir. Girilen bu manyetik potansiyel değerlerinden A_d değeri şu ifadelerle hesaplanabilir:

$$A_d = \frac{A_{ii} - A_a}{2} \quad (24)$$

ve

$$A_d = A_{ii} - \frac{(A_{ii} - A_a)I_{ii}}{(I_{ii} - I_a)} \quad (25)$$

Şeklinde bir yaklaşım kullanılabilir. Burada A_{ii} dıştaki iletkeni çekilecek manyetik potansiyel, A_a içteki iletkeni çekilecek yada eklenecek manyetik potansiyel, I_{ii} dıştaki iletkeni geçen akım şiddeti, I_a içteki iletkeni geçen akım şiddeti. Burada dikkat edilmesi gereken nokta şudur: A_d 'nin şekil 4'de gösterilen davranışından ötürü ilk 4-5 adımda A_d 'yi denklem 24 ile belirlemek, daha sonraları ise denklem 25'i kullanarak hızlı bir şekilde bulmaktır. Program içerisinde ayrıca şöyle bir mantık vardır: eğer $I_d = I_{ii} - I_a$ diye

iletkenlerden geçen akımlar arası tanımlanırsa ve $I_d > 0$ ise $A_a^i = A_a^{i-1}$ ve $A_u^i = A_u^{i-1}$ ayrıca akımlar için $I_a^i = I_a^{i-1} + (I_u^{i-1} - I_a^{i-1})$ ve $I_u^i = I_u^{i-1}$ olarak alınır. Zıddı bir durumda ise yani $I_d < 0$ ise bu mantığın zıddı uygulanır. Programın içerisine bunu yerleştirmek son derece önemlidir. Daha sonra iteratif olarak programı diğer akım değerleri için (burada I_m ile $-I_m$ arasında 21 tane akım değeri alındı) çalıştırarak her bir iletkendeki akı ve akım dağılımları hesaplanır. Program her bir I_m ile $-I_m$ arasında 21 değer almakta bu aralıktaki A_d değerini ise en az 11 adımda tespit edebilmekte. Dolayısıyla en az 231 adımda bir çevrimi tamamlayabilmektedir. Ayrıca her bir adım en az doğrusalsızlıklardan dolayı 70-80 adımda yakınsamaktadır. Burada hesaplama süresi ciddi anlamda uzamaktadır. Hesaplama süresini kısaltmak için, bir kaç tane A_d değerini belirledikten sonra geri kalan A_d değerleri aşağıdaki ifade ile belirlenebilmektedir:

$$A_d(i) = A_d(i-1) + (A_d(i-2) - A_d(i-1)) \frac{(I(i) - I(i-1))}{(I(i-2) - I(i-1))},$$

(26)

burada (i) bu adımda kullanılacak akım ve hesaplanacak manyetik potansiyel değerini, (i-1) ve (i-2) bir önceki ve iki önceki adımlarda hesaplanan manyetik potansiyel ve uygulanan akım değerlerini göstermektedir. Bu basit regrasyon ifadesi belli bir doğrulukta olmak kaydıyla hesaplama zamanını inanılmaz ölçüde kısaltmaktadır. Akımı eşit şekilde paylaşacak ve aa kayıplarını hesaplamak için yaklaşık 1000 satırlık comsol matlab kodu yazıldı.

2.4. Geliştirilen II. Yöntem

Üstüniletkenlerin teknolojiye uygulama bulmasındaki en önemli zorluk soğutma maliyetlerinin yüksek oluşudur. Bilindiği gibi üstüniletkenler doğru akımı dirençsiz olarak iletirken alternatif akıma karşı küçükte olsa bir direnç göstermektedir. Bu direnç ısıya dönüşmektedir ve bu oluşan ısı iletkeninin soğutma maliyetini yükseltmektedir. Üstüniletkenlerin önümüzdeki on yıl içerisinde en önemli ticari uygulamalarından ikisi güç iletim kablosu ve rüzgar türbinleri için jeneratörler olarak öngörülmektedir (URL-3). Ancak ne var ki bu uygulamaların en önündeki en önemli engel alternatif akım

kayıplarının düşürülmesidir. Alternatif akım (aa) kayıpların düşürmek için çok farklı yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Hanjo vd., 2010; Jिंगgang ve Wu, 2010; Mukoyama vd., 2010).

Üstüniletken kablolarda oluşan alternatif akım kayıplarının doğru olarak hesaplanması ve bu kayba neden olan mekanizmanın doğru olarak anlaşılması için sonlu elemanlar metoduna dayalı benzeşim yöntemine başvurulmaktadır (Siahrang vd., 2010; Vojenciak vd., 2011; Farinon, 2010). Benzeşim yönteminin sonuçlarının doğru olması yanında, kolay uygulanması ve hızlı olması endüstride en çok arzu edilen özelliktir. Üstüniletkenlerin doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı Üstüniletkenlerin elektromanyetik davranışını betimleyecek hızlı ve kolay uygulanabilecek bilgisayar kodu oldukça zordur ve bir takım yeni yöntemler geliştirmek gerekmektedir. Üstüniletkenlerin manyetik özelliklerini çözmek için üç farklı sonlu elemanlar yöntemi kullanılır: A - V formülasyonu, T - Ω formülasyonu ve H formülasyonu.

A - V formülasyonu, durum değişkeni olarak A vektör potansiyeli seçerek ve üstüniletkenler için E - J üs bağıntısını Maxwell denklemlerinden çıkartılır. Bu formülasyonda hiçbir akımın dolanmadığı durumdan başlanılır. Kritik akım yoğunluğu J_c taşıyan elemanlar maksimum vektör potansiyeli noktasında eklenir ve alan tekrar hesaplanır. İşlem, dış alan üstüniletkenin içerisinde ayrıştırılana kadar devam eder (Combs vd., 2001; Barnes vd., 1999).

$$\begin{aligned}
 E &= -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \\
 -\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A &= J \\
 E &= E_0 \times \left(\frac{J}{J_0} \right)^n
 \end{aligned} \tag{27}$$

T - Ω formülasyonu elektrik akım vektör potansiyeli T ve manyetik skaler vektör potansiyel Ω yı kullanır. Amemiya bu denklemleri üstüniletkenlikle birleştirmek için üstüniletkenlerde geçerli olan E - J üst yasaını bu denklemler ile birlikte kullandı (Amemiya vd., 1998; Amemiya vd., 1998).

$$\begin{aligned}
\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla \times T \right) &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} (H_0 + T - \nabla \Omega) \\
\nabla \cdot \mu \frac{\partial}{\partial t} (H_0 + T - \nabla \Omega) &= 0 \\
\sigma &= \frac{J_0^n}{E_0} (\nabla \times T)^{1-n}
\end{aligned} \tag{28}$$

Amemiya'nın makalesinde hem transport akım taşıyan hem de manyetik alana maruz kalmış durumları bükülmüş ve bükülmemiş üstüniletken şeritler için çözülmüştür. aa manyetik alana maruz kalmış kısa bir üstüniletken şeritteki akım dağılımları hesaplanmıştır. AC manyetik alanda AC transport akım geçirilen Bi-2223 şeritte oluşan transport kayıplarını ve manyetizasyon kayıpları deneysel olarak ölçülmüş ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ölçülen transport ve manyetizasyon kayıpları T - Ω modelinin öngörülleri ile çok iyi bir uyum elde edilmiştir.

H- formülasyonunda ise manyetik alan denklemleri E-J üst yasası ile birlikte çözülürler (Hong vd., 2006; Hong vd., 2007).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} \tag{29}$$

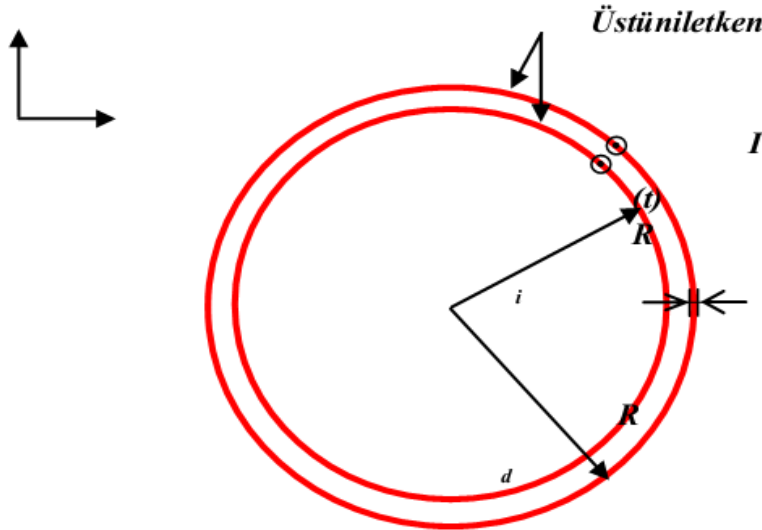
denklemleri kullanılır.

2.4.1. Geliştirilen II. Yöntemin Temel Çerçevesi

Bizim geliştirdiğimiz yöntem denklem 27 ile verilen A - V formülasyonuna dayanmaktadır. Yalnız E-J bağıntısı için fenomenolojik bir yaklaşım kullanılmıştır. Çünkü denklem 27'de verilen E-J bağıntısı çok stabil çalışmamaktadır. Problemin temel formülasyonu oturduktan sonra literatürde analitik çözümü olan basit bir model ile denenmiştir. Bu çalışmada Şekil 20'de görüldüğü gibi iç yarı çapı R_i dış yarı çapı R_d olan iç içe geçmiş iki tane üstüniletken silindirik tüp biçiminde kablo göz önüne alınıyor. Üstüniletken bölgelerin kalınlığı η kablunun yarıçapından çok küçüktür ancak London nüfuz derinliği λ 'dan ise çok çok büyüktür. Böyle bir problemi başlangıçta ele alınmasının nedeni; bu tip kablolar için analitik çözümün olmasıdır. Böyle bir problem önce sonlu elemanlar yöntemine dayanan bizim öngördüğümüz metodla çözülecek ve daha sonra

analitik yöntemle karşılaştırılacaktır. Tüpler x-y düzlemine yatmıştır ve hem içteki tüpten hem de dıştaki tüpten z-yönünde genliği I_m , frekansı f olan zamana bağlı olan $I(t) = I_m \sin(2\pi ft)$ biçiminde alternatif akım geçiriliyor. İletken z yönünde sonsuzdur. Problem kesit alanı x-y düzleminde iki boyutta çözülüyor. Hesaplamalarda kritik hal modeli temel alınmıştır ve kritik akım yoğunluğunun alan bağıllığı dikkate alınmamıştır. Başlangıçta üstüniletkenden hiçbir akım geçirilmeden ve manyetik alan uygulanmadan kritik sıcaklığın altına kadar üstün iletken soğutuluyor ve daha sonra akım geçirilmektedir.

Uygulanan akım I tüplerin kritik akım yoğunluğu I_c 'den daha küçük olmalıdır. Akı sürüklenmesi, akı atlama, vb akı dinamiği etkileri ihmal edilmektedir.



Şekil 20. Modelleme çalışmasında kullanılacak geometri burada R_i üstüniletken tüp şeklindeki kablounun iç yarıçapı, R_d dış yarıçapıdır. Üstüniletken bölgenin kalınlığı $\eta \ll R_i$ ve R_d .

Bu geometride A manyetik vektör potansiyeli bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Manyetik vektör potansiyelinin rotasyoneli manyetik akı yoğunluğunu verir,

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (30)$$

Bu durumda çözülmesi gereken denklem,

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{j} \quad (31)$$

Burada μ manyetik geçirgenlik j akım yoğunluğudur. Kritik hal modeline göre tip-II üstüniletkenlerin içerisinde akım yoğunluğu, ya sıfırdır yada kritik akım yoğunluğu J_c kadardır. Eğer üstüniletken içerisinde hiçbir elektrik alan yoksa o bölgedeki akım yoğunluğu sıfırdır. Akım yoğunluğunun yönelimi üstüniletken içerisinde sıfır olamayan lokal elektrik alan tarafından belirlenir. Denklem 31 belirli sınır şartları için sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan ticari Comsol 4.2a kodu ile çözülmüştür.

Hem elektrik alanın hemde akım yoğunluğunun sıfır olmayan bileşeni kablonun uzun eksenidir. Şekil 20'de gösterildiği gibi çözüm kartezyen koordinat sisteminde olmaktadır. Akım z yönünde akmakta manyetik alan x ve y yönünde kabloya nüfuz etmektedir. Boyut sayısını düşürmek için üstüniletken içerisinde şu şekilde bir doğrusal olmayan akım voltaj bağıntısı aldık (Gömöry ve ark., 2009):

$$j_{s,z}(x, y) = j_c \tanh\left(\frac{E_z(x, y)}{E_c}\right), \quad (32)$$

Burada j_c kritik akım yoğunluğu ve E_c elektrik alanı ölçeklendirme parametresidir ve değeri genellikle $10^{-4} V/m$ olarak alınmaktadır. Düşük frekanslarda elektrostatik gradyent ∇V ve manyetik alanın değişimi ile meydana gelen elektrik alan E için ifade elektrik alan denklemini çözmek için nokta eşdizimlilik metodunu (Brant-tipi formülasyon) kullandık. Bu metoda göre iki boyutta kablonun kesit alan denklemi,

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} V, \quad (33)$$

olarak alınabilir. Burada \vec{E}, \vec{A} ve $\vec{\nabla} V$ 'nin yani elektrik alan, manyetik potansiyel ve potansiyel gradyenti vektörlerinin z bileşenleri sıfırdan farklıdır. Denklem 30 ve denklem 31 birleştirildiğinde üstüniletken içerisindeki akım yoğunluğu ifadesi,

$$j_{s,z}(x, y) = j_c \tanh \left(\frac{-\frac{\partial A_z(x, y)}{\partial t} - \nabla \varphi(x, y)}{E_c} \right) \quad (34)$$

ile verilebilir. Sonlu elemanlar kodu Comsol Multiphysic koduna bu denklemi yerleştirdik. Hesaplamalarda manyetik potansiyelin sıfırdan farklı bileşeni dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar yazılımı üstüniletken bölge içerisindeki manyetostatik denklemini (Denk 31) çözümünü kartezyen koordinatlarda,

$$-\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial^2 A_z(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z(x, y)}{\partial y^2} \right) = j_{s,z}(x, y) \quad (35)$$

arar. Sonlu elemanlar hesabına uygulanan tek sınırlama “constarin” süperiletken kablonun her bir tabakasından aynı miktar akımın I taşınacağıdır. Bu her tabakada ayrı ayrı potansiyel gradyenti $\nabla \varphi$ ayarlanarak başarılabilir. Bu ayarlama yapmak için iteratif bir yöntem geliştirilmiştir. Her bir tabakadaki sabit toplam akım yoğunluğu sınırlamasını modellemek için, $\int J_z dA = I$ olması gerekir. Bununla beraber her tabakanın kesit alanındaki $\nabla \varphi$ nin değeri sabittir. Bu sınırlama sonlu elemanlar hesabına girildiğinde çözüm işleminde serbestlik derecesini önemli ölçüde artırmadığının nedeni budur. Böyle bir kısıtlama yapmak bir bakıma hesaplamaları da basitleştirmektedir. Böyle bir problemin çözümü için aşağıdaki adımlar takip edilmelidir:

8. İncelenecek kablo geometrisinin Comsol Multiphysics (MP) programına girilmesi
9. Başlangıç yada üstüniletkenlik parametrelerinin girilmesi
10. Subdomain ayarlarının yapılması
11. Sınır şartlarının belirlenmesi
12. Örgüleme “meshing” işleminin yapılması
13. Uygun çözümleyici “solver” in seçimi ve problemin çözümü
14. Problemi farklı şartlar için çözecek matlab kodunun yazılması

Bir önceki yöntemde her bir tabakadan geçen akımı eşitlemek için her bir tabakadaki manyetik potansiyel tabakalara paylaştırılıyordu. Bu işlem her bir tabakadan akan süper akım

$$j_{s,z}(x,y) = J_c \tanh\left(\frac{A_p(x,y) - (A_z(x,y) \mp A_d/2)}{A_n}\right) \quad (36)$$

ifadesindeki A_d parametresinin ayarlanmasına dayanıyordu. Buradaki zorluk A_d parametresinin ayarlanması için oldukça fazla iterasyon gerekmesi idi. Bu yeni geliştirilen yöntemde ise çok daha farklı sonlu elemanlar koduna girilen kısıtlamalar ile denklem 34'deki potansiyel gradyentini ayarlayarak tabakalar arasındaki akım eşitlenmektedir. Yeni yöntemde üstüniletkenlik akımı,

$$j_{s,z}(x,y) = J_c \tanh\left(\frac{A_p(x,y) - (A_z(x,y) + \nabla V)}{A_n}\right) \quad (37)$$

şeklinde tanımlanabilir. Comsol 4.2a' da akım üzerine sınırlama konulabilmektedir. Program bu sınırlamayı gerçekleştirmek için skaler potansiyeli kendisi ayarlayabilmektedir. Ancak burada yeni yöntemde A_n parametresinin çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir. An küçük seçildiğinde program "singular matrix" hatası vermekte büyük seçildiğinde ise yakınsamama hatası vermektedir. Bu yeni geliştirilen yöntemde Denklem 34'deki E_c parametresine karşılık gelen A_n parametresini iteratif olarak ayarlamaktır. Bu ayarlama şu şekilde yapılmaktadır önce bir başlangıç A_{nb} değeri giriliyor bir de son A_{ns} değerleri giriliyor. A_{nb} 'den A_{ns} 'ye kadar değerler adım adım deniyor. Her bir adımdaki üstüniletken tabakadaki vektör potansiyeli değerleri A_p değerleri kaydediliyor ve bir önceki A_p değerlerinden çıkartılarak minimum yapan A_n değeri tespit ediliyor. Programın etkin çalışması için A_{nb} ve A_{ns} değerleri için makul değerler girmek gerekir ($\sim 10^{-4}$ - $\sim 10^{-7}$).

3. BULGULAR

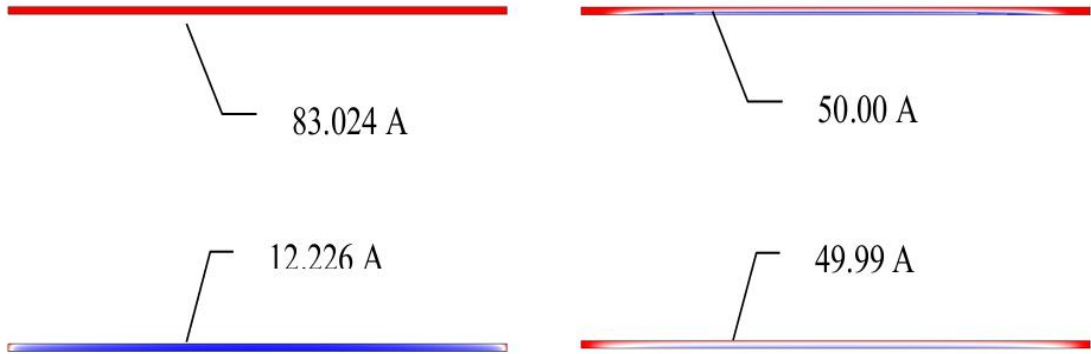
3.1. I. Yöntemin Uygulanması

Bu çalışmada benzeşim için seçilen kablonun geometrik ve üstüniletkenlik özellikleri Tablo 3’de verilmektedir. Burada piyasada ticari olarak satılan ikinci nesil YBCO üstüniletkenlerin geometrik ve üstüniletkenlik özellikleri kullanıldı. Ancak iletken şeritler hiçbir manyetik malzeme ile kaplanmamıştır. Ayrıca iletkenler gövdeye belli bir açı ile sarılmamıştır. Akım $I(t)=I_{max}*\sin(\omega t)$ şeklinde z-yönünde uygulanmaktadır. Akımın I_{max} ile $-I_{max}$ arasındaki yalnızca yarım periyotluk $T/2$ ’lik kısmını hesaplamak yeterlidir. Zira diğer kısım o bölgenin simetriğidir. Bağımsız değişken A_z ’dir. A_z ’nin hesaplanmasından hem akı dağılımı hem de akım dağılımı hesaplanabilir.

Tablo 3. . Benzeşimde kullanılan nicelikler ve değerleri

Nicelik	Değeri
I_c	83 A
A_n	$2.2*10^{-7}$
w_{SC}	4.5 mm
h_{SC}	0.225 μ m
R_i	15 mm
R_d	16 mm
R_{uzay}	10 cm
N (her tabakadaki şerit sayısı)	20

Şekil 21 bu metodun uygulandığı ve uygulanmadığı durumda üstüniletken şeritlerdeki iki boyutta akım yoğunluğu dağılımları gösteriliyor. Şeritlerin kritik akım şiddeti $I_c \approx 83$ A dir. Her bir şeride kritik akım yoğunluğundan daha düşük 50 A lik akım uygulanıyor. Metodun uygulanmadığı durumda üstteki şeritten de 83 A akım geçmekte alttaki şeritten ise 12 A civarında bir akım geçmektedir. Dolayısıyla akımın çoğu üstteki iletkenin çok azı ise alttaki iletkenin geçmektedir ve ayrıca da akım dağılımları yanlış olarak hesaplanmaktadır. Akım dağılımları yanlış hesaplandığı için aa kayıp eğrilerini çıkartıp geliştirilen yöntemin sonuçları ile karşılaştırılmaya ihtiyaç duyulmadı. Bu her şeyden önce mevcut sonlu elemanlar yazılımlarının, yazılımı satın al ve inceleyeceğimiz malzemenin elektromanyetik özelliklerini çıkart basitliğinde olmadığını göstermektedir. İncelenecek her sistem için sonlu elemanlar yazılımı için bir takım uyarlamaların yapılması gerektiğini göstermektedir.



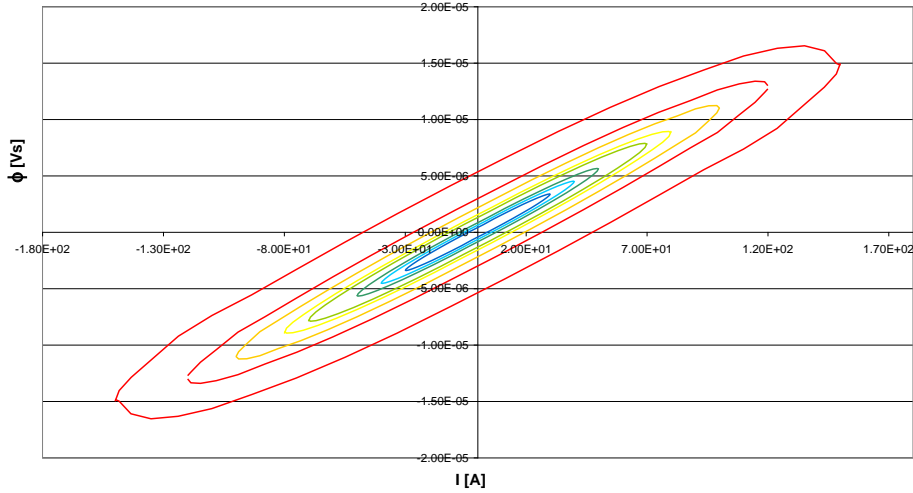
Şekil 21. Mevcut yöntemin uygulanmadığı ve uygulandığı durumda elde edilecek akım dağılımları. Soldaki yöntemin uygulanmadığı dağılımı sağdaki ise uygulandığı akım dağılımını gösteriliyor. $I=50$ A'lik bir akım uygulanıyor ve iletkenler arası mesafe 1mm dir. Kırmızı akımın yüksek olduğu kısmı lacivert daha düşük kısmı, beyaz ise akımın akmadığı kısmı göstermektedir.

Şekil 21 akımın iletkenler arasında eşit bir şekilde paylaşılmasına dayalı yöntem kullanılarak elde edilen alternatif akım kayıp eğrisi gösteriliyor. aa kayıp eğrisi

$$Q = \frac{P}{l} = \int_S J E dS = \int_s \phi dI$$

(38)

integralinden hesaplandı. Manyetik akı ϕ iletkenin iki ucu arasındaki vektör potansiyelin farkından elde edildi. Bu akı transport akım değişimine göre grafiği çizildiğinde şekil 22’ de görüldüğü gibi bir histeresiz meydana getirmektedir.



Şekil 22. Kablodan geçirilen akıma karşı her bir iletkende oluşan akı. Akı kablonun dışındaki bir nokta ile kablonun merkezi arasındaki Az manyetik vektör potansiyeli farkından hesaplanmıştır. Bu histeresizlerin alanı kaybı vermektedir. Histeresizlerin alanını hesaplamak için yamuk “trapezoid” metodu kullanılarak integral alınmıştır.

21 farklı akım değeri için ϕ değeri elde hesaplatılmıştır. Burada toplam kayıp içteki ve dıştaki iletkenlerdeki kayıpların toplamına eşittir: $Q_t = Q_{iç} + Q_{dış}$. Şekil 23’de ayrıca geliştirilen yöntemin nümerik aa kayıp sonucu ile Daumling tarafından ortaya konulan her birinden akım geçen iç içe geçmiş içi boş tüp için hesaplanan teorik ifade karşılaştırılmıştır (Däumling, 2004). Buna “duoblock” model denir. Bu modele göre aa ifadesi

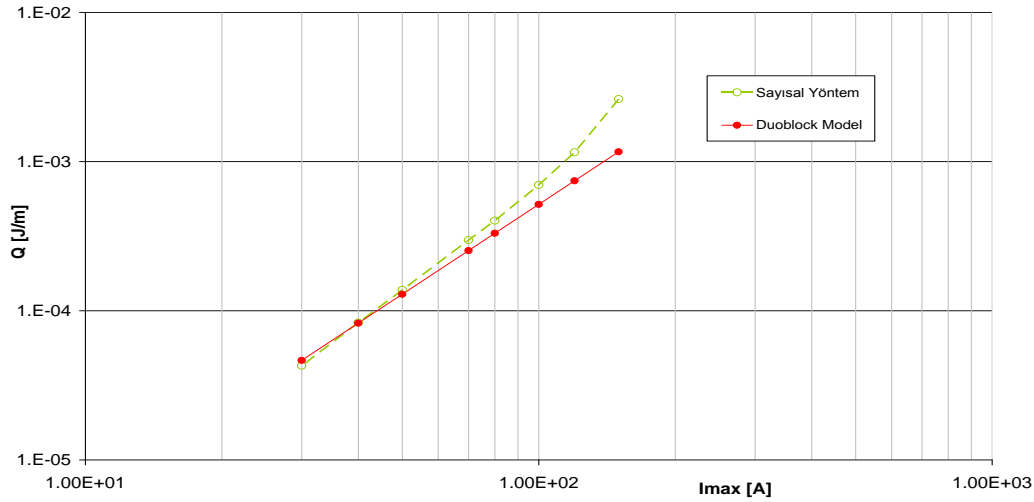
$$Q = \frac{p}{l} = \frac{2\mu_0}{\pi} I_{iç} I_{dış} \ln\left(\frac{R_{dış}}{R_{iç}}\right) \quad (39)$$

Şeklinde verilir burada $I_{iç}$ içteki iletkenin geçen akım, $I_{dış}$ dıştaki iletkenin geçen akım, $R_{iç}$ içteki akım geçen tüpün yarıçapı, $R_{dış}$ dışarıdan akım geçen tüpün yarıçapıdır. Çift blok modeli ile geliştirilen yöntem arasında özellikle düşük akımlarda çok ciddi bir fark yoktur. Yüksek akım bölgesinde kayda değer bir fark vardır. Bize göre bu farkın iki önemli nedeni vardır. Birincisi duoblock modelde iletkenler arasında hiçbir

boşluk yoktur dolayısıyla tüplerden akan akımın oluşturduğu manyetik alan daima tüpün yüzeyine paralel olmaktadır. Manyetik akı dik olmadığı için iletken tarafından çok fazla emilmemekte, dolayısıyla kaybın az almasında çok ciddi bir faktördür. İkincisi ise hesaplamaların çok idealize geometri için yapılmasıdır. Yani gerçek kablo yapısından çok uzaktadır. Ama yine karşılaştırma için çok ciddi bir referanstır. Bir diğer karşılaştırma yaptığımız yapı ise mono yine Noris tarafından ortaya konulan analitik monoblock modeldir. Bu modelde kayıp ifadesi,

$$Q = \frac{P}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_c^2}{h^2} \left\{ (2 - \beta h)\beta h + 2(1 - \beta h)\ln(1 - \beta h) \right\} \quad (40)$$

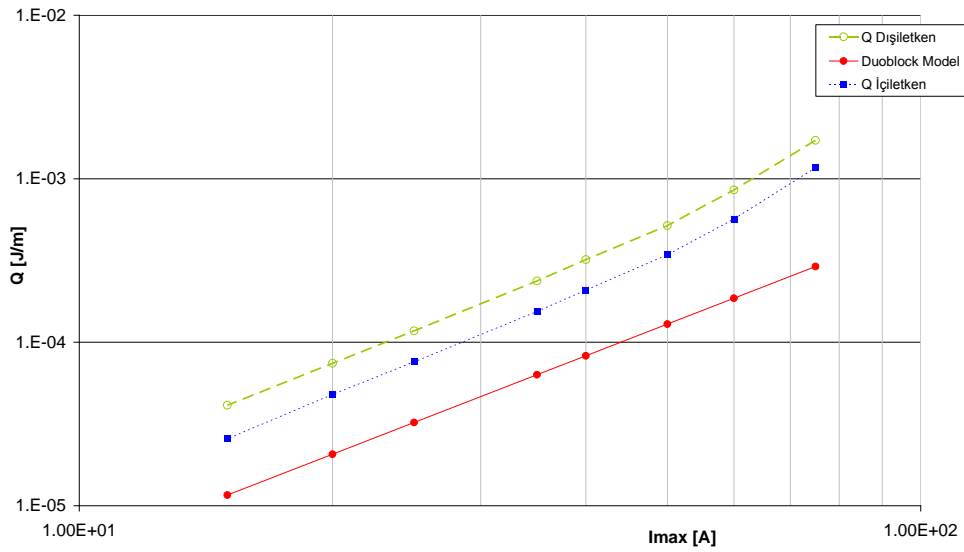
ile verilir. Burada $\beta = I/I_c$ ve $h = 1 - (R_d/R_i)^2$. Ancak bu yaklaşım bizim kablo modelimizi tam olarak betimlemediği için dikkate alınmamıştır.



Şekil 23. Geliştirilen yöntem ile denklem 28 ile analitik olarak hesaplanan “duoblock” modelin karşılaştırılması. Her iki hesaplama yönteminde aynı değerler kullanılmıştır. İçteki iletken ile dıştaki iletken arasındaki mesafe 1 mm dir.

Şekil 24 içteki iletkende meydana gelen kayıp ile dıştaki iletkende meydana gelen kaybı karşılaştırılıyor. Şekilden de açıkça görüleceği üzere dıştaki iletkendeki kayıp içteki iletkendeki kayba göre çok fazladır. Bunun nedeni dıştaki iletken (dıştaki iletkenin iç kısmı) esas itibariyle içteki iletkenin üzerinden geçen akımın oluşturduğu manyetik alana maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 25’ de gösterilen manyetik akı

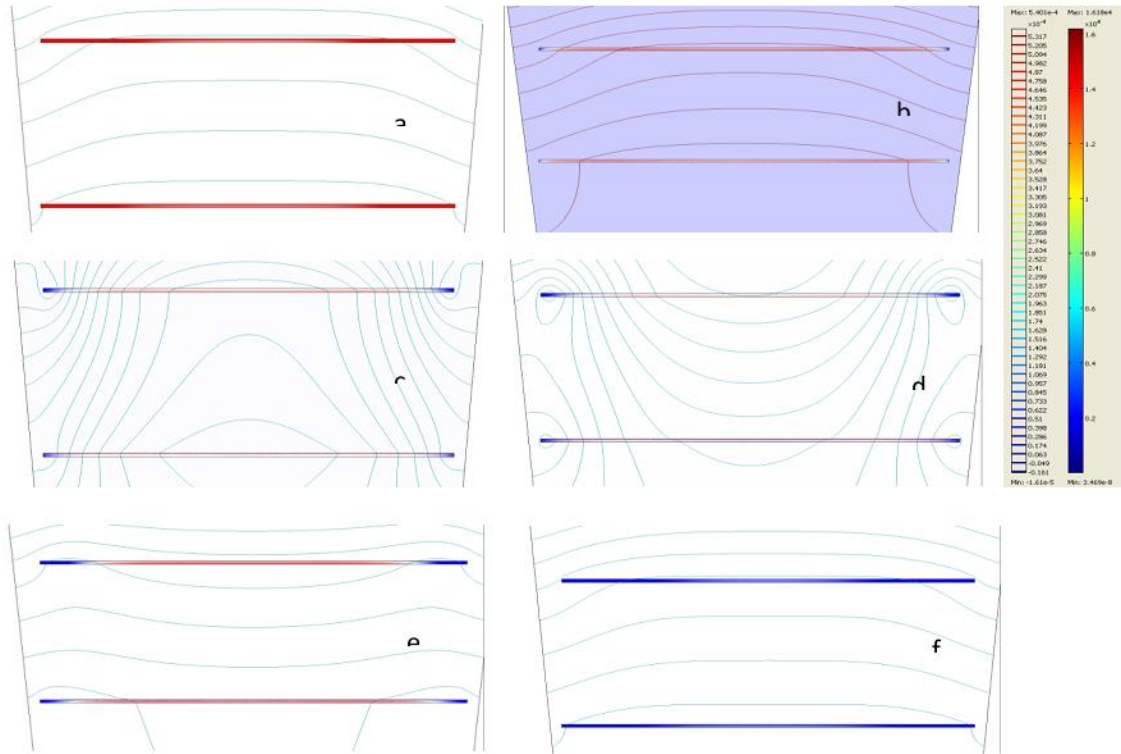
çizgilerinden kolayca görülebilir. Dıştaki iletkenin hem iç yüzeyinde hem de dış yüzeyinde manyetik alan iletkene dik olarak gelmektedir. Bu manyetik alanın iletken tarafından daha çok çekilmesine dolayısıyla kaybın fazla olmasına neden olmaktadır. Bu noktada kayba neden olan fiziği incelemekte yarar vardır. Özellikle akım profilleri yararlı olabilir. Şekil 25’ de farklı akım değerleri için iki boyutta içteki ve dıştaki iletkenlerden geçen akım dağılımları gösteriliyor. Öncelikle dikkat çeken nokta akım değişimlerinin genellikle iletkenin uçlarında meydana gelmesidir. Yüksek akımlarda bile örneğin $I_{max}=75$ A numunenin içerisinde akımın daha az aktığı bir bölge bulunmaktadır. Şekil 25 bu şeklin tek boyutta çizilmiş halini gösteriyor. Daha açıkça görüldüğü gibi numunenin kenarında başlangıçta $I_c=83.02$ A’den daha yüksek bir akım geçmektedir. Bunun nedeni Rostilla vd. (Rostilla vd., 2007) tarafından gösterildiği gibi üstüniletken kabloların kritik akım yoğunluğu kabloyu oluşturan iletkenlerin kritik akım yoğunluklarının tek tek toplanmasından daha büyüktür. Bu, manyetik alan değişimi kablo içerisinde daha elverişli bir yönde özellikle her iletken şeridinin kenarında olmasından kaynaklanır.



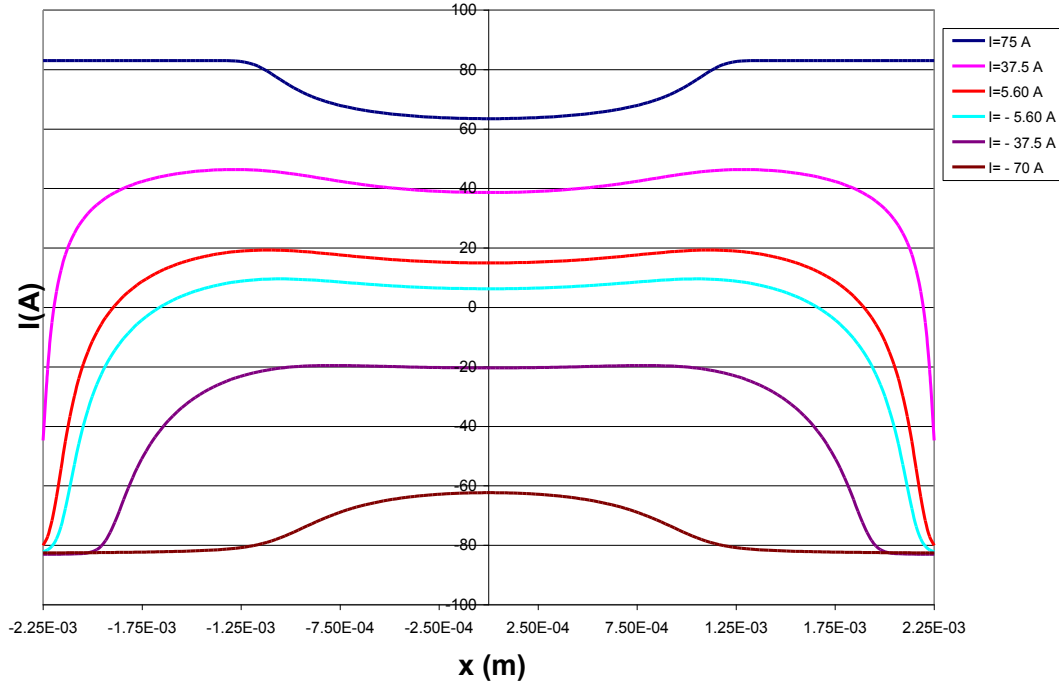
Şekil 24. Dıştaki iletken ve içteki iletkenlerde meydana gelen kayıpların karşılaştırılması.

Bu şekillerde dikkate değer bir önemli nokta ise düşük akımlarda manyetik alanın davranışdır. Düşük akımlarda self alan etkisi daha bir önem kazanmaktadır. Manyetik alanın dik bileşeni her iki iletkene de dik hale gelmektedir. Bu self alanın iletkenler tarafından çekildiği anlamına ayrıca kaybın artacağı anlamına gelmektedir. İletkenlerin manyetik akı davranışı yüksek akımlarda ve düşük akımda birbirinden tamamiyle farklıdır.

Bu aslında şekil 24’de düşük akımlarda analitik değer ile nümerik değer arasındaki farkın açılmasını açıklamaktadır. Şekil 23’de bu self alan etkileri tamamıyla ihmal edilmektedir. Ancak yine de duoblock model herhangi bir madde ile kaplanmamış iletkenler için kaybı çok iyi bir yaklaşıklıkla hesap edebilmektedir. Şekil 26’ de görüldüğü gibi akım akışı numune içerisinde çok simetrik ve homojen bir biçimde gerçekleşmektedir. Bu kaybın azaltılmasında ve dolayısıyla iletkenin akım kabiliyetinin optimize edilmesinde istenilen bir durumdur. Birde belli akım değerlerinde üstüniletken içerisinde akımın hiç akmadığı geniş bir bölgenin oluşmasıdır. Bu istenmeyen bir durumdur ancak bunu gidermenin de pek mümkünatı gözükmemektedir. Daha geniş analiz için tek boyutta üstüniletken içerisindeki akı profillerini çıkartmak gerekir. Ancak iletken içerisinde akı değişimi çok farklılık gösterdiğinden bu daha ileri ki safhalara bırakıldı.



Şekil 25. İçteki ve dıştaki iletkenlerden geçen akım dağılımları ve iletkenler civarındaki manyetik alan dağılımları iki boyutta gösteriliyor. İletken şeritten geçirilen akım (a) 75 A (b) 37.5 A (c) 5.6 A (d) -5.6 A (e) -37.5 A (f) -75 A. Şekilde kabaca kırmızı ile gösterilen akım +z yönünde, lacivertle gösterilen akım -z yönünde ve beyaz ile gösterilen ise akımın akmadığı bölgeleri göstermektedir.



Şekil 26. Tek boyutta üstüniletken şeritlerde akan akım profilleri. Akım değerleri dıştaki iletkenin y eksenin tam ortasına gelecek şekilde x eksenini boyunca alınmıştır.

3.1.1. Alternatif Akım Kayıplarına İletkenler Arasındaki Mesafenin Etkisi

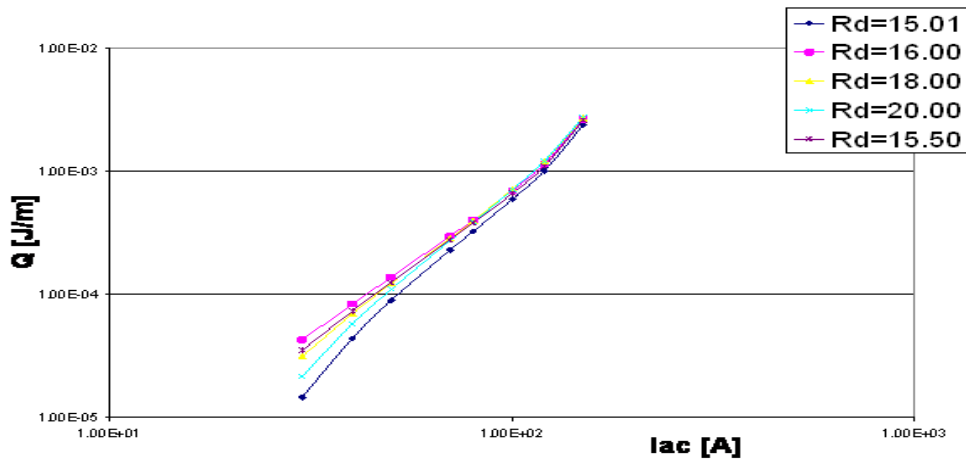
Tezin bu kısmında iletkenler arası mesafenin aa kaybına etkisi araştırmak için dıştaki iletkenin yarıçapı değiştirilerek hesaplama yapıldı. Aslında yarıçap değiştirildiğinde bir bakıma dıştaki komşu iletkenler arasındaki mesafe arttırılmış olmaktadır. Yarıçap değişimi ile komşu iletkenler arasındaki mesafe arasındaki ifade,

$$2g = 2R_d \sin(\pi/N - w_{sc}/R_d) \quad (41)$$

ile kolayca hesaplanabilir. Burada R_d , dıştaki iletkenin yarıçapı; N , kabloyu yapmak için kullanılan şerit sayısı ve w_{sc} ise üstüniletken şeridin genişliğidir. Bu ifade çok sayıda şeridin kullanıldığı kablolar için $2g \cong 2\pi R_d/N - 2w_{sc}$ ($N \gg 1$) ifadesine indirgenir. Komşu iletkenler arasındaki mesafe ile AA kaybın değişmesi tek tabakalı kablolar için genişçe incelenmiştir. Bu olaya literatürde aralık etkisi “gap effect” yada poligon etkisi “polygonal effect” denir. Kablolarda bu aralık etkisi çeşitli şekillerde sağlanabilir: kullanılan

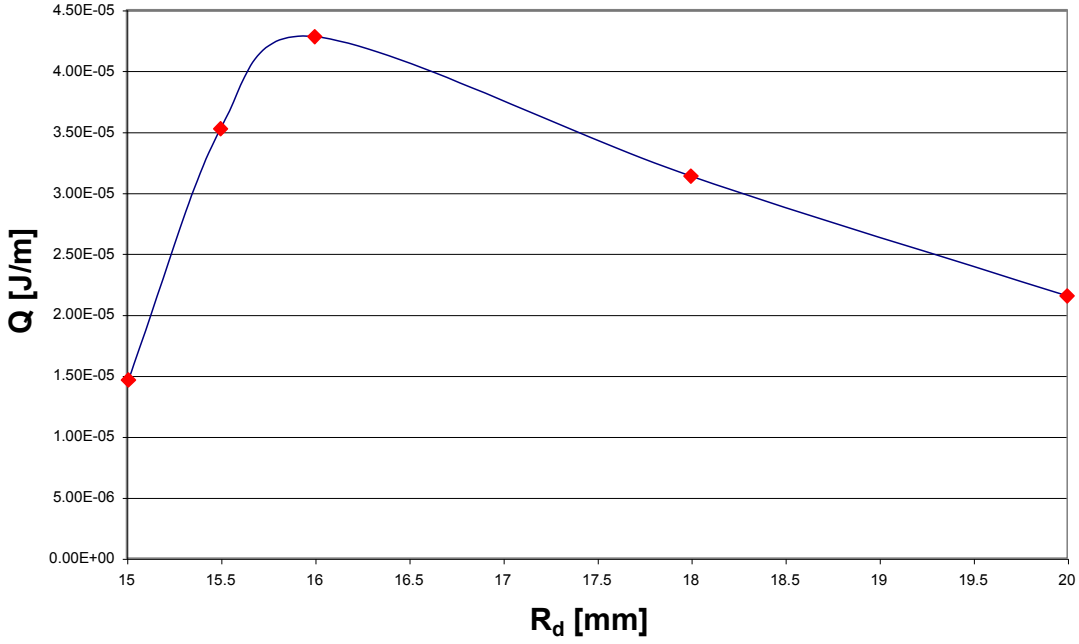
üstüniletken şeridin genişliğini değiştirerek, şeridin biçimini değiştirerek, şeritlerin sarıldığı gövdenin yarıçapını değiştirerek vb. Literatürdeki çalışmalara kısaca değinmek gerekirse. (Malozemof vd., 2007) tek tabakalı kabloda iletkenlerin genişliğini değiştirerek AA kayıplarını incelemiştir. Tek tabakalı kablolarda farklı gövdenin yarıçapını değiştirerek AA kayıpların nasıl değiştiğine sayısal yöntemleri kullanarak bakmıştır (Amemiya vd., 2010). Mawatari vd tek tabakalı üstüniletken kablodaki şeridin biçimini değiştirerek AA kayıp için analitik ifadeler türetmiştir (Mawatari vd., 2010). Amemiya vd çok tabakalı güç iletim kablolarında aralık etkisini yarıçapları değiştirerek bakmıştır (Amemiya vd., 2010). Ancak, *bildiğimiz kadarıyla*, şimdiye kadar hiçbir araştırmacı iki tabaklı üstüniletken güç iletim kablolarında dış yarıçapı değiştirerek alternatif akım kaybının nasıl değişeceğine sistematik olarak ne nümerik ne de deneysel olarak incelememiştir.

Bu çalışmada dıştaki iletkenin yarıçapı sırasıyla $R_d=15,01$ 15.50, 16.00, 18.00 ve 20.00 mm olarak alındı. R_d hariç bir önceki kullanılan parametrelerin aynısı girdi olarak kullanılmıştır. Her bir hesaplamanın sonucunu etkilememesi için yada her hesaplamada aynı şartların uygulandığını göstermek için aynı örgüleme sistemi uygulanmıştır: örgülemde iletkenin en/boy=7/750 aralığa üçgenler yapılarak sağlanmıştır. Mesh noktası sayısı: 78514, mesh elemanların sayısı (üçgen): 156417, sınır elemanlarının sayısı: 7631, minimum mesh kalitesi: 0.4145 olarak alınmıştır. Alternatif akım kayıpları denklem 27 kullanılarak hesaplanmıştır.

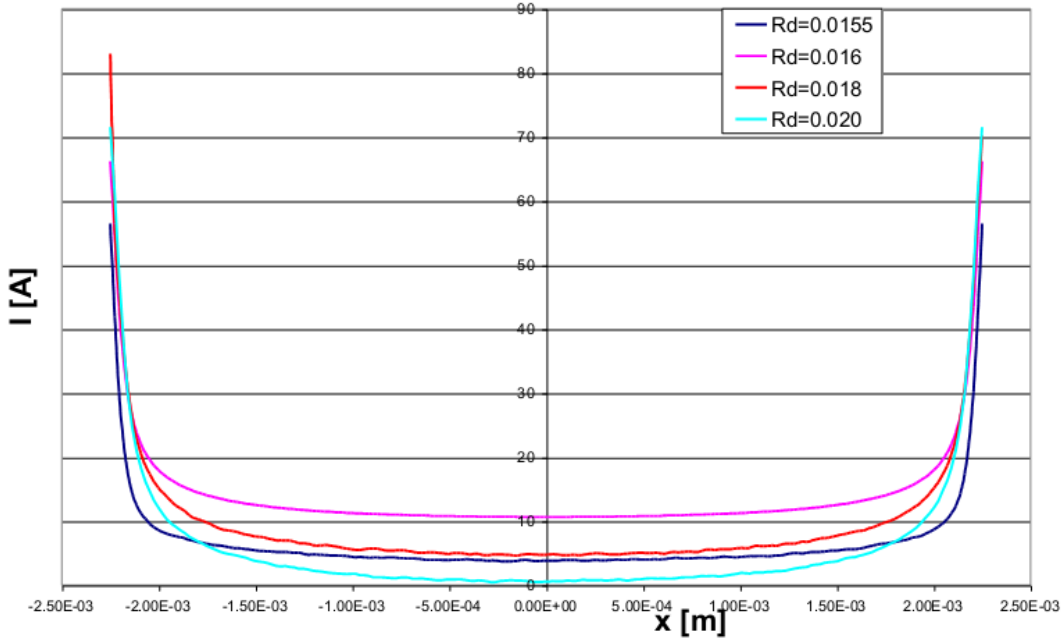


Şekil 27. Kablonun dış yarıçapı değiştirilerek elde edilen AA kayıp eğrisi

Şekil 27 farklı dıştaki iletkenin sarıldığı gövdenin yarıçapları için hesaplanan AA kayıplarını gösteriyor. Sekiz farklı genlikteki akım değeri için sonuç elde edilmiştir. Her bir iletkene $I_{ac} = 75, 60, 50, 40, 35, 25, 20, 15$ A değerinde maksimum akım uygulanmıştır. Bu akım ise $I_T = I_{ac} \sin(\omega t)$ biçiminde değişmekte ve 21 farklı ωt değeri için hesaplama yapılmıştır. Şekilde yalnızca üst üste iki iletken için içteki ve dıştaki iletkenlerden geçen toplam akım ve toplam kayıplar gösteriliyor. Toplam akım ve toplam kayıplar için buradaki ifadeyi şerit sayısı ile çarpmak gerekir. Bu şeklin en çarpıcı sonucu yüksek akımlar için kayıp şeritler arasındaki mesafe arttıkça kabloda akan akımdaki kayıpta artmaktadır. Ama bu artış pek kayda değer bir artış değildir.



Şekil 28. $I_{ac}=15$ A seçilerek kaybın yarıçapa göre değişimi.



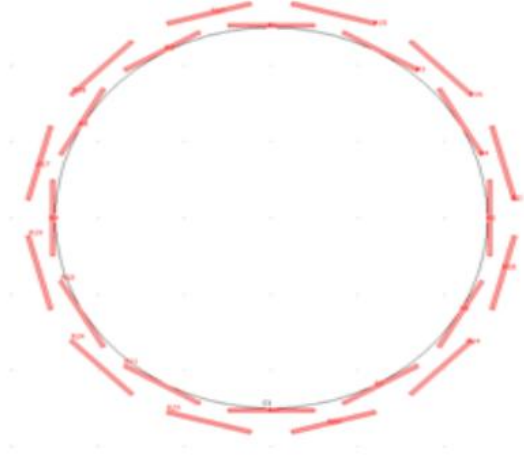
Şekil 29. $I_{max}=15$ A için üstteki iletken içerisindeki akım dağılımı. Düşük akımlarda iletkenin sağında ve solundaki akım dağılımları asimetrik olmaktadır. İletkenler arasındaki mesafe ile oynanarak simetrik hale getirilebilir.

Ancak düşük akımlarda (yani $I_t < I_{ac}/2$) durum biraz enteresandır. Bu durumda kayıp önce artmakta sonra ise belli bir maksimumdan geçtikten sonra azalmaktadır (Şekil 28). Kayıptaki değişimde çok düşük akımlarda kayda değer miktardadır. Bu beklenmeyen bir durumdur. Zira teorik analitik ifadeler bu değişimin çok küçük ve hep aynı sürmesini öngörür. Bunun üstüniletken şeritler etrafındaki manyetik alan dağılımından daha ziyade akım dağılımından kaynaklanabileceğini akla getirmektedir. Bunun için Şekil 29'da gösterilen üstüniletken içerisindeki akım dağılımına bakıldı. Şekilden de görüldüğü gibi aynı bu mesafeler için üstüniletken içerisindeki akım dağılımında benzer özellikleri göstermektedir. Ayrıca akım iletkenin sağında ve solunda asimetrik olarak akmaktadır. Bu asimetri değişimi de kaybı arttırmaktadır.

3.1.2. Şerit – Boşluk Yapısı İçin AA Kayıplarının Hesaplanması

Tezin Projenin bu kısmında farklı bir kablo konfigürasyonunun akım kayıplarını nasıl etkilediği incelenmiştir ve hangi konfigürasyonun daha az kayba neden olacağı sorusuna cevap aranmıştır. Bunun için literatürde “tape-on-gap” şerit boşluk güç iletim

kablosu iki boyutta incelenmiştir (Şekil 30). Aynı bir önceki incelemede kullanıldığı gibi akım z yönünde akıtılmaktadır.



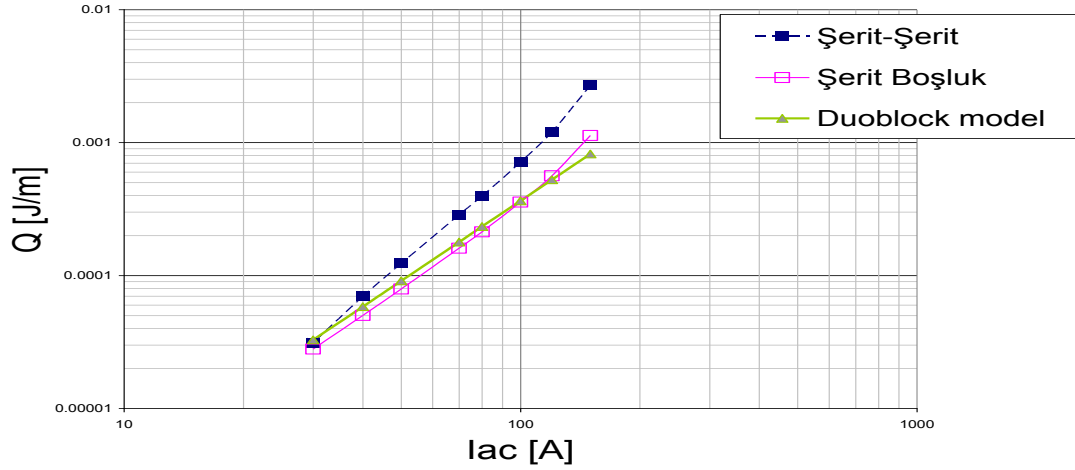
Şekil 30. Şerit-boşluk “tape-on-gap” kablo yapısı

Kablonun iç yarıçapı $R_i=15$ mm sabit olarak alındı ve dıştaki yarıçapı $R_d=18$ mm olarak seçilmiştir. Üstüniletken şeridin eni $w_{sc}=4.5$ mm ve yüksekliği $h_{sc} 22.5$ μm olarak alınmıştır. Şeritlerin kablonun üzerine spiral şekilde sarılması ihmal edildi. Elektromanyetik analiz şekil 29'da gösterilen kesit alanı üzerinden yapılmıştır. İletken şeritler herhangi bir yabancı madde ile kaplanmamıştır. Kesit alanındaki periyodiklik yüzünden yalnızca alttaki şeridin tamamı ve sütteki iki şeridin yarısı dikkate alınmıştır. Sınır şartları için denklem 17 ve 18'de verilen ifadeler kullanılmıştır. 50 Hz lik transport akım transport akım uygulandı ve her iki şeride akımı düzgün olarak dağıtmak ve elektromanyetik analiz için yukarıda anlatılan yöntem uygulandı. Yalnızca üstüniletken şeritlerden kaynaklanan histeretik kayıplar hesaba katıldı çiftlenim ve eddy akımı kayıpları göz ardı edildi. Örgüleme için en/boy oranını alttaki iletken için 600/7 üstteki her bir iletken için 250/4 olarak alınmıştır. 58749 örgü noktası, 117075 üçgen örgü ve sınır elemanlarının sayısı 7319 olacak şekilde örgüleme yapılmıştır. Minimum örgü kalitesi 0.4681 dir. Şekil 31, şerit – şerit (bak, Şekil 17) ve şerit-boşluk (bak, Şekil 30) yapılarının histeresiz Kayıplarının karşılaştırılmasını gösteriyor. Her iki ifadeyi karşılaştırırken en büyük denklem 23 ile verilen subdomain ifadesindeki A_n parametresidir. Bu parametre iletkenin sağında ve solunda akan akımın bir birine nasıl bağlanacağını gösterdiği için çok dikkatlice seçmek gerekmektedir. Ancak birkaç denemeden sonra bu parametreyi her iki

kablo yapısına uyacak şekilde ayarlanmıştır. Her iki iletkeninde de dış iletkenin yarıçapı $R_d=18$ mm olarak seçilmiştir. Kayıp için

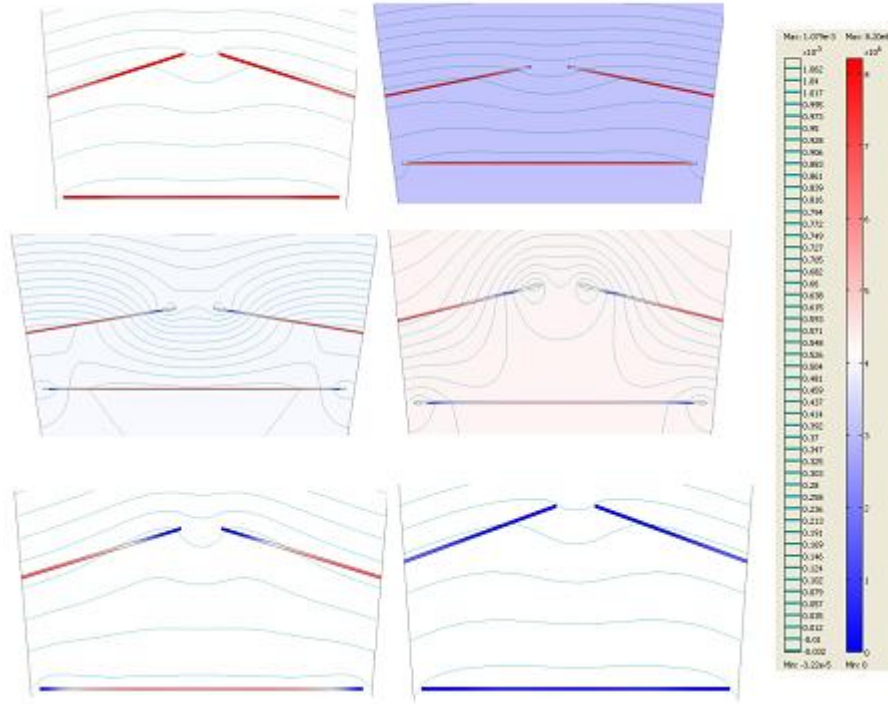
$$p_{sc} = EJ \quad (42)$$

ifadesine eşdeğer olan denklem 43 ifadesi kullanılmıştır. Ayrıca bu ifade ile hesap yapıldığında hemen hemen aynı sonuç elde edilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi özellikle yüksek alanlarda şerit-boşluk yapısının kayıp değeri şerit - şerit yapısından daha düşüktür. Bunun nedeni şekil 32'den de görüleceği üzere içteki bu yapı iletkenin uçlarının maruz kaldığı manyetik alanın dik bileşenini azaltacak şekilde olmasıdır.



Şekil 31. Şerit-Şerit yapısı ile şerit-boşluk yapısının karşılaştırılması.

Manyetik alanın dik bileşenin az olması üstüniletkene daha az manyetik alanın nüfuz etmesi anlamına geliyor. Manyetik alan nüfuzu dış iletkenlerde iletkenlerin kenarlarından olurken içteki iletkeninde iletkenin tam ortasından meydana gelmektedir. Bu akımın daha homojen akmasına neden olabilecek dolayısıyla kaybın azalmasına yol açabilecek bir faktör olabilir. Manyetik alandaki esas değişim içteki iletkenin iç dış yüzü ile dıştaki iletkenlerin iç yüzleri arasında gelmektedir. Bu yüzlerde manyetik alanın dik bileşenleri daha dik olmaktadır. Dolayısıyla esas kayıp iletkenlerin bu bölgelerinde meydana gelmektedir. Kaybı azaltmak için bu bölgeler manyetik alan tutucu ferromanyetik malzemelerle kaplanırsa kaybın azalacağı ön görülememektedir



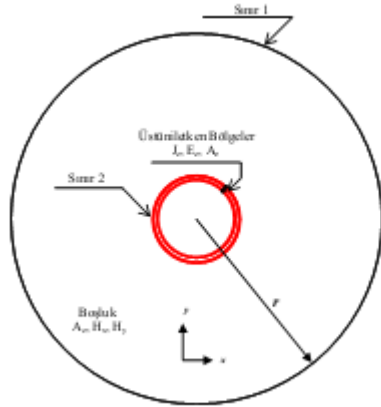
Şekil 32. Şerit-boşluk yapısı için iletkenlerden iletken etrafındaki manyetik potansiyel ve iletkenlerin içerisinde geçen akım dağılımları. Her bir iletkenlerden geçen akım eşittir. Akımlar daha çok iletkenin uçlarından geçmeye meyillidir. Benzeşimlerde kullanılan geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri tablo 1’de veriliyor. Dıştaki iletkenin yarıçapı $R_d=18$ mm dir. Geçirilen akımlar $I =$ (a) 75, (b) 37.5, (c) 5.6, (d) -5.6, (e) -37.5, (f)-75 A dir.

Bir diğer ilginç sonuç ise duobloc model ile bu sonucun karşılaştırılmasıdır. İletkenler etrafındaki manyetik alan dağılımları iletkenler arasındaki mesafenin kayba etkisinin olabileceğini akla getirmektedir. Dıştaki iletkenin yarıçapı artırılarak içteki ve dıştaki iletkenlerde meydana gelen toplam kayıp hesaplandı. Ancak sonuçlar beklediğimizden çok farklı çıktı. Bu sonuç hesapları tekrar yapılarak bir sonraki rapor dönemine bırakıldı. Ancak düşük alanlarda kayıplar hemen hemen aynı olmaktadır. Buradaki bir diğer ilginç nokta ise duoblock model ile şerit-boşluk kablo yapısının sonucunun uyumudur. Bu beklenen bir durumdur zira şerit boşluk yapısı içi içe geçmiş silindirdeki kablo yapısına çok yakın bir yapıdır. İçteki silindirin uçları hemen hemen dıştan gelen manyetik alandan izole olmaktadır. Dolayısıyla içteki iletkenin mazur kalacağı manyetik akı çizgileri mükemmel dairesel yapıdan daha az deforme olacaktır. Dıştaki

iletkenler birbirlerine daha da yaklaştırılırsa analitik sonuca oldukça iyi bir şekilde yaklaşılabacaktır.

3.2. Geliştirilen II. Yöntemin Uygulanması

Bu çalışmanın amacı tüp şeklindeki üstün iletken güç iletim kablolarındaki alternatif akım kayıplarını yeni yöntemle hesaplamak ve sonuçları bir önce geliştirilen yöntemle ve literatürdeki analitik ifadelerle karşılaştırmaktır. Şekil 33’de hesaplama geometrisi gösterilmektedir. Hesaplama geometrisinde üstüniletken bölgenin dışını kaplayan boşluk bölgesinin yarıçapı kablunun dış yarıçapı R_d ’nin yaklaşık 25 katı kadar olmalıdır. Bu hesaplamanın doğruluğu açısından çok önemlidir. Kablonun geometrik özellikleri Tablo 4’de verilmektedir.



Şekil 33. İki boyutta kesit alanı verilen iç içe geçmiş tüp biçimindeki kablodaki alt bölgeler “subdomain” ve sınırlar.

Hesaplamalarda sınır şartı olarak içinden r, ϕ, z silindirik koordinatlarda z yönünde yatan ve üzerinden I akımı geçen iletken silindirik bir kabuğun ekseninden r kadar uzaklıkta oluşturduğu vektör potansiyeli ifadesi kullanıldı. Vektör potansiyelini hesaplamak için R yarıçaplı iletken kabuğun basitçe,

$$\oint B dl = \mu_0 I \quad (43)$$

amper kanunu kullanarak kabuğun dışarısındaki manyetik alan ifadesi,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{\phi} \quad (44)$$

İle hesaplanabilir. $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ bağıntısı kullanılarak silindirik kabuğun dışarısındaki vektör potansiyeli ifadesi şu şekilde çıkartılabilir,

$$A = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 1 \right) \hat{z} \quad (45)$$

Olarak alınabilir. Bizim incelediğimiz sınır 1 için sınır şartı olarak manyetik potansiyelin süperpozisyonu dikkate alınarak şu şekilde yazılabilir:

$$A_b = -\frac{\mu_0 I(t)}{\pi} \left(\ln\left(\frac{r^2}{R_i R_d}\right) + 1 \right) \hat{z} \quad (46)$$

Burada R_i üstüniletken tüpün iç yarıçapı ve R_d ise silindirik tüpün dış yarıçapıdır. Aslında bu sınır şartı manyetik alan değeri olarak da girilebilir ancak incelenecek geometrinin dışarısındaki demanyatizasyon alanından dolayı hesaplamaları oldukça karıştırmakta ve hesaplamaları zorlaştırmaktadır. Bu sınır şartı mevcut geometri için hem Dirichlet hem de Neuman sınır şartlarını kapsamaktadır. Yani biz hesaplamanın yapılacağı sınırdaki manyetik potansiyelin hem değerini biliyoruz hem de $\partial A / \partial n = 0$ şartını sağlıyoruz. Denklem 46'daki r ifadesi $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ biçiminde de girilebilir. R_i ve R_d bir bakıma ölçeklendirme çarpanı olarak görülebilir. Manyetik potansiyelin r 'ye göre değişimine bakıldığında $r \gg R_d$ ve R_i değerleri için logaritmik ifadenin davranışı incelenerek r değeri belirlenebilir. Logaritmik ifadenin eğiminin azaldığı noktalardan birisi r olarak alınabilir. Bu uzayın örgülenmesi için dolayısıyla hesaplama süresinin kısalığı için çok önemlidir. Bu genellikle $r \approx 25 R_d$ gibi çıkmaktadır. Ama yine bu değerlerin denenmesinde fayda vardır.

İkinci sınır şartı sınır 2 ifadesi,

$$\hat{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0, \quad (47)$$

olarak alınabilir bu sınır şartı üstün iletkenin sınırında manyetik alanın dik bileşenin sürekli olacağı anlamına gelir.

Tablo 4. Benzeşimde kullanılan nicelikler ve değerleri

Nicelik	Değeri
I_c	2100 A
R_d	22.6 mm
R_i	21.3 mm
η	0.045 mm
R	50 cm
f	1 Hz

Kısaca örgüleme istatistiğinde bahsedilecek olursa toplamda bu geometri için 29679 örgü noktası için 118667 tane örgü elemanı kullanılmıştır. Örgüleme boşluk için üçgensel örgüleme üstün iletken bölgeler için “quadeilateral” elemanlar kullanılmıştır. Bir önceki raporda detayları verilen R^2 testi bu yapı içinde gerçekleştirilmiştir. Süperiletken bölgenin genişliği ile çevresi arasında örgüleme oranı 7/1800 civarında bulunmuştur. Aslında bu çok çok iyi bir örgüleme sağlamamaktadır ancak yapının büyüklüğüne bakıldığında hesaplama süresi/doğruluğa bakıldığında bu oran çok kötü değildir.

Alternatif akım kayıplarını hesaplamak için iletkene bir tam periyotluk sürede akım uygulamak gerekmektedir. Uygulanan akımın frekansı 1Hz mertebesindedir. Ancak 50 Hz’lik akım uygulamakta AA eğrilerinin biçimini çok fazla etkilemektedir. Akım T/4 ile 3T/4 arasındaki bir periyotta uygulandı. Uygulanan akımın maksimum değerleri kritik

akım yoğunluğunun %90 ile %7'si arasındaki bir bölgede kalmaktadır. herhangi bir t_i zamanında elde edilen çözüm bir önceki t_{i-1} adımında hesaplanan çözümü kullanır, bu durumda denklem 2'deki ifadenin zaman türevi şu şekilde yazılabilir:

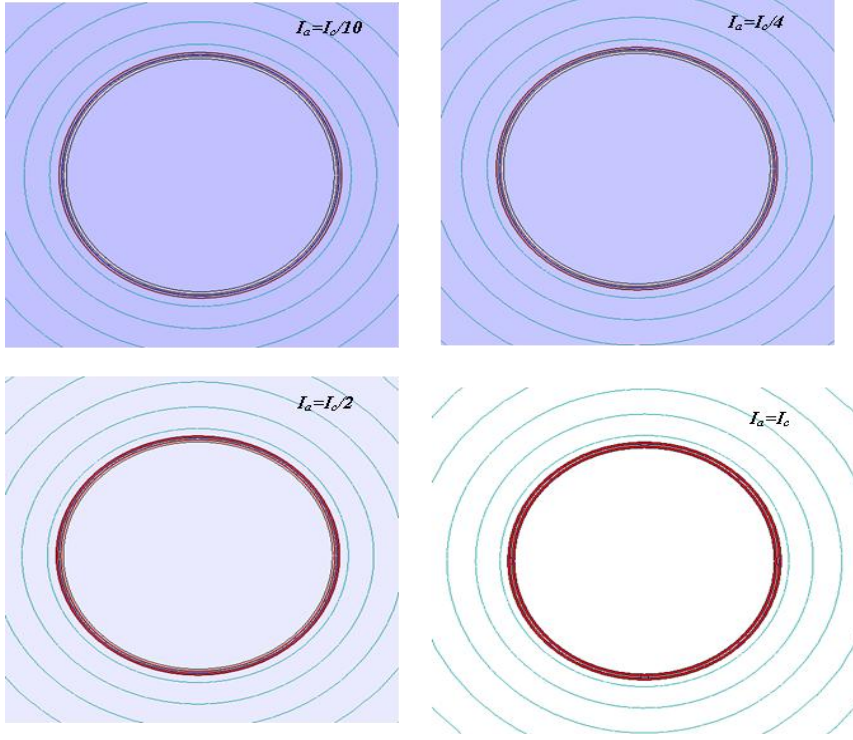
$$\frac{\partial A_z(x, y)}{\partial t} \cong \frac{A_z(x, y, t_i) - A_z(x, y, t_{i-1})}{\Delta t} \quad (48)$$

Çevrimin başlangıç kısmı yani $T/2$ 'lik kısmı çevrim rejimi ile temsil edilemez, bu nedenle hesaplama $t=T/2$ 'den başlatılmıştır. Her bir tabakanın kritik akım yoğunluğu

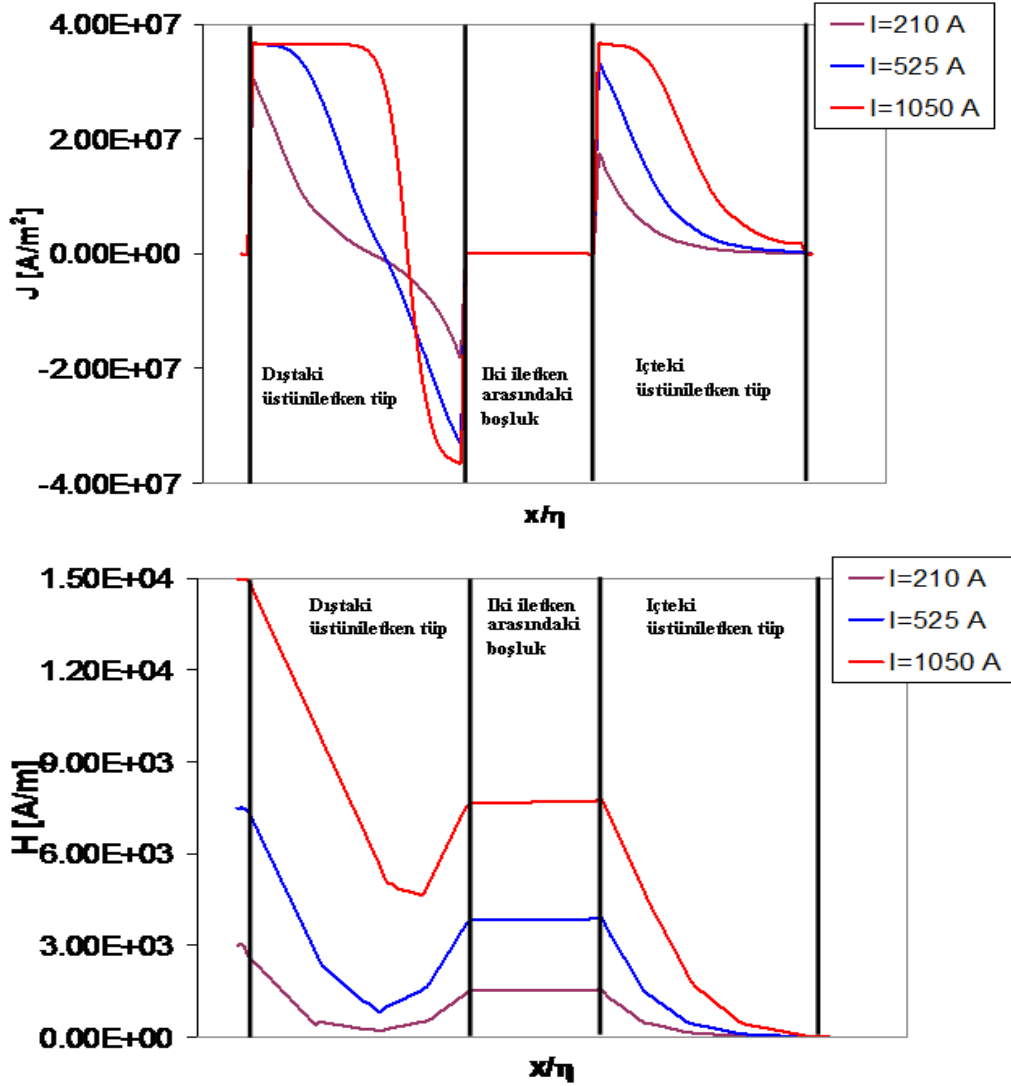
$$I_{c,i} = 2\pi j_c R_i \eta, \quad (49)$$

$$I_{c,d} = 2\pi j_c R_d \eta \quad (50)$$

ile hesaplanabilir. Şekil 34 farklı akım değerleri için üstüniletkenden geçen akımı göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi başlangıçta hiçbir akının bulunmadığı üstüniletkende akım arttırıldıkça iletkenlerin dış tabakasından itibaren akı nüfuz etmeye başlıyor. Dolayısıyla akım ilk önceleri dış tabakadaki çok küçük bir bölgede akmaktadır.



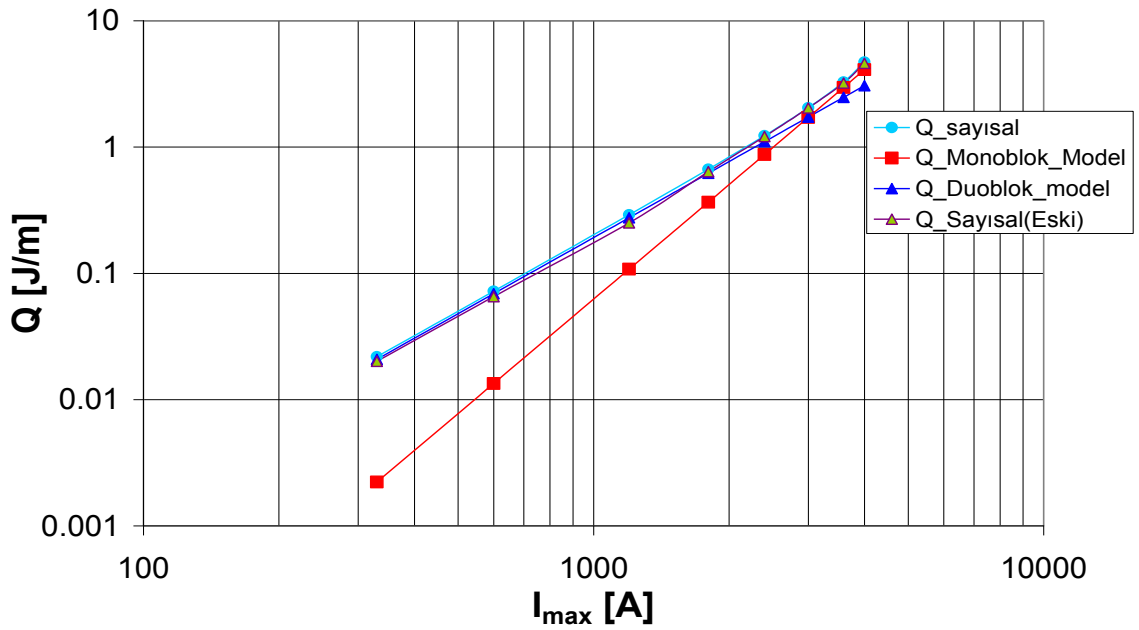
Şekil 34. Artan akım durumu için içi içe geçmiş kabloda akım dağılımı. Küçük akım genliklerinde $I_a = I_c/10$ dış iletkenin dış yüzeyinde pozitif akım iç yüzeyinde ise negatif akım akmaktadır. Uygulanan akımın genliği arttıkça negatif akım değeri azalmaktadır.



Şekil 35. Tek boyutta içi içe geçmiş kablo modelinin kesit alanını farklı akım genlikleri için (a) akım dağılımı (b) manyetik alan dağılımını gösteriyor. Akım ortamında hiç manyetik alan yokken alansız soğutma işleminden sonra sıfırdan itibaren artırılıyor. Dıştaki üstüniletken tüpte iki farklı zıt akımın aktığı görülmektedir. Uygulanan akımın genliği arttıkça zıt akım daha dar bölgede akmaktadır. Bu akımın nedeni iki ara bölgede meydana gelen manyetik alan olabilir.

Burada ilginç olan nokta örneğin uygulanan akımın değeri kritik akım değerinin %25'i kadar olduğu zaman $I=425$ A için içteki tabakadan yalnızca pozitif akım akarken dıştaki tabakanın dış kısmından pozitif akım akıyorken içteki kısmından zıt yönde akım akmaktadır. Bunun nedeni iletkenin en iç kısmındaki manyetik akı yoğunluğu sıfır iken dış tabaka ile iç tabaka arasındaki kalan bölgede sabit bir manyetik akı nüfuz etmiştir. Ancak içteki iletken akı nüfuz etmiştir içteki iletken hem nüfuz eden akıdan dolayı hem self

alandan dolayı bir akı artışı olmuştur. Dıştaki iletkenin iç kısmı bu akı artışını düşürmek için zıt yönde akım indükleyerek tepki vermektedir. Bu durum tüp şeklindeki tek tabakalı kablunun manyetik alan davranışını açıklamak Ref. (Mawatari, 2011) ile verilen sonuca çok benzemektedir. Fakat her iki iletkenden geçen akımın miktarı bir birine eşittir. Şekil 35 (a) bir boyutta her iki tabakada akımı göstermektedir. Uygulanan akım genliği artırıldıkça dıştaki tabakadan akan pozitif akımın bölgesi artarken negatif akımın bölgesi çok az değişmektedir. Buradaki bir diğer önemli nokta ise manyetik alanın nüfuzudur (Şekil 35(b)) . Manyetik alan kablunun dışından içeriye doğru nüfuz etmektedir. Küçük akım değerlerinde iki iletken arasındaki bölgenin akım değeri dıştaki iletkenin iç kısmının akı değerinden daha yüksek iken akım arttıkça akı değerleri eşitlenmektedir. Yani akım arttıkça geçen akımdan dolayı dıştaki iletkene sürekli akı girişi olmaktadır fakat bu akı girişi dıştaki iletkenin içerisinde pozitif bir gradyent oluşturmaktadır.



Şekil 36. Çeşitli akım genliklerine karşı alternatif akım kaybı. Grafikte yeni geliştirilen yöntem ile analitik yöntemler ve bir önce raporda sunulan yöntemin sonucu karşılaştırılıyor. Burada her iki tabakada oluşan toplam kayıp hesaplanmıştır.

Şekil 36 uygulanan maksimum akımın genliğine karşı yukarıda anlatılan yöntem kullanılarak hesaplanan üstüniletken tüplerdeki toplam kaybı gösteriyor. Ayrıca şekilde daha önceki rapor döneminde geliştirilen ve teorik metotlarla geliştirilen kayıplar karşılaştırma yapılması maksadıyla veriliyor. AA çevriminin her bir zaman değerinde

hesaplanan akım, elektrik alan dağılımlarından veya vektör potansiyeli değerleri kullanılarak alternatif akım kayıpları hesaplanabilir. En bilinen yada en yaygın olarak kullanılan bir yöntem yerel güç kaybından, yani elektrik alan ile akım yoğunluğunun çarpımından $p = JE$, AA kayıplarının hesaplanmasıdır. Kablonun kesit alanı üzerinden sadece tek bir zaman dilimi için bu niceliklerin integralini alarak ve daha sonra bütün zaman periyodu için AA çevrimler boyunca zaman integralini alarak Q_{kablo} kablodaki kayıp hesaplanabilir. Bir diğer yöntem ise skaler potansiyel ∇V nin ortalamasını alarak kabloun üzerindeki toplam voltaj düşmesini hesaplamaktır. Yeni yöntemde kayıp önce belli bir maksimumdan itibaren I_a akımı $-I_a$ değerine kadar azaltılıyor her bir adımda üstüniletken tüp kablolar üzerindeki ∇V potansiyel gradyenti değerleri alınıyor. Potansiyel gradyenti her bir tüp kesit alanı üzerinde sabittir ve kesit alanının herhangi bir noktasındaki değer alınabilir. İlk olarak akı hesabı için üstüniletken tarafından kapatılan alan içerisindeki bir noktanın potansiyel gradyenti manyetik akıyı Φ hesaplamak için kullanıldı. Bir çevrimde toplam transport akımın anlık değerine manyetik akının bağlılığı bir histeresiz meydana getirir. Her bir çevrim için üstüniletkende meydana gelen AA kaybı bu histeresizin alanına eşittir (Vojenciak, 2011):

$$Q = \oint \Phi dI \quad (51)$$

Şekil 37 her bir akım genliğinde elde edilen manyetik akı histeresizlerini göstermektedir. Bu histeresizlerin alanını hesaplamak için Simpson integral metodu kullanılmıştır. Akım genliğine yakın değerlerde histeresizin uçlarında bir bozulma ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni bu noktalarda meydana gelen nümerik hatalardan kaynaklanmaktadır. Tabii bu hesaplamaların sonucuna etkisi dikkate alınmayacak kadar küçüktür.

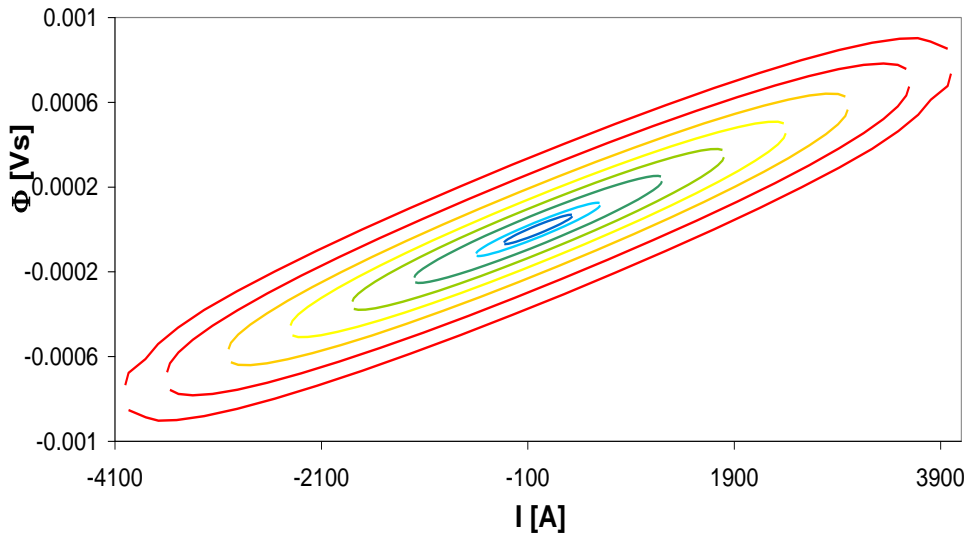
Buradaki bir diğer önemli nokta ise AA akım kayıplarını hesaplamak için önceki yöntem ile şimdi geliştirilen yöntem arasındaki uyumdur. Yani her iki yöntemde aynı sonucu vermektedir ancak yeni geliştirilen yöntemin uygulanması çok daha kolaydır. Bir diğer dikkate değer nokta ise analitik olarak hesaplanan AA kayıp eğrisi ile sayısal olarak hesaplanan eğri arasındaki uyumdur. Analitik eğrilerin hesabı için “duoblock” yöntem ve monoblock yöntem kullanılmıştır. Doublock yöntem iç içe geçmiş iki silindirik üstüniletken tüpte meydana gelen kayıpları vermektedir. Bu yöntemde göre kayıp ifadesi (Daumling, 2004):

$$Q = \frac{P}{l} = \frac{2\mu_0}{\pi} f I_{iç} I_{dış} \ln\left(\frac{R_{dış}}{R_{iç}}\right), \quad (52)$$

ile verilir. Bu ifade de μ_0 boşluğun geçirgenliği, f uygulanan akımın frekansı, $I_{iç}$ iteki iletkenin geçen akım, $I_{dış}$ dıştaki iletkenin geçen akım, $R_{iç}$ içteki iletkenin yarıçapı, $R_{dış}$ dıştaki iletkenin yarıçapıdır. Bir diğer karşılaştırılan analitik yöntem ise monoblock yöntemidir. Bu yöntem içinden akım geçen üstüniletken bir tabakadan I_t akımı geçirildiğinde her birim çevrim ve her birim uzunluk için AA kayıp enerjisi ifadesini (Vellego ve Metra, 1995),

$$Q = \frac{I_c^2 \mu_0}{2\pi h^2} f \left\{ \left(2 - \frac{I_t}{I_c} h \right) \frac{I_t}{I_c} h + 2 \left(1 - \frac{I_t}{I_c} h \right) \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c} h \right) \right\} \quad (53)$$

ile hesaplanabilir. Burada I_c kritik akım yoğunluğu, I_t üstüniletken tabakadan geçirilen transport akımın pik değeri ve $h = (R_1^2 - R_2^2)/R_1^2$ olarak tanımlanır, R_1 ve R_2 sırasıyla dış taraftaki üstüniletken tüpün dış ve yarıçapıdır yani $R_1 = R_1 + \eta$ olarak tanımlanabilir. Elbette “monoblock” yöntemi ile sayısal yöntem arasındaki fark oldukça büyüktür. Bunun nedeni “monoblock” yöntemin ele alınan geometriyi tanımlamasından oldukça uzak olmasıdır. Yine de literatürde bu tip kıyaslamalar yapılmaktadır.



Şekil 37. Uygulanan akımın genliğine karşı üstüniletkenlerde hesaplan toplam manyet

Denklem 52 kullanılarak iki tabakalı yada çok tabakalı üstüniletken kabloların kayıplarının kıyaslanmasının ne derece sağlıklı olduğunu göstermesi açısından önemli olabilir.

Burada bir diğer önemli gözden kaçmaması gereken nokta ise $I_a \approx I_c/2$ değerine kadar $Q_{\text{sayısal}}$ ile Q_{duob} arasındaki uyum son derece iyidir. “Duoblock” yöntemi son derece basit bir yöntemdir ve geometrik etkiler gibi pek çok etkiyi hiç dikkate almamıştır. Düşük akım değerlerinde özellikle geometriden kaynaklanan etkiler çok ortaya çıkmaması olabilir. Bir diğer nedeni ise analitik yöntemlere göre akım üstüniletken tüplerin içerisinde homojen bir biçimde dağıldığını kabul etmektedir. Oysa iki boyutlu akım dağılımlarından görülüyor ki yüksek akımlarda transport akım hala numunenin dış yüzeyinden akmayı tercih etmektedir. Bu durumda üstüniletkende ilave bir kayba neden olabilir. Kayıp eğrisi yüksek akım değerlerine kadar tek düze olarak değişiyorken yüksek akım değerlerinde değişim hızı ciddi manada artmaktadır. Bir diğer dikkat edilmesi gereken nokta şu an endüstride dizayn edilen silindirik kablo modellerinde üstüniletken şeritlerin silindirik bir gövde üzerine sarılmasıdır. Bu tür yapılar üstüniletken şeritlerin uçlarında manyetik alanın dik bileşeni artırmakta dolayısıyla daha fazla akımın nüfuz etmesine neden olmaktadır. Ancak kablolar tek blok halinde iç içe geçmiş tüpler şeklinde yapılabilirse kayıplar önemli ölçüde azaltılabilir.

Sonuç olarak bu ilk bölümde iç içe geçmiş silindirik üstüniletken güç iletim kablosunda meydana gelen alternatif akım kayıpları bir önceki rapor döneminde geliştirilen yöntem ile ve bu rapor döneminde geliştirilen yöntem ile karşılaştırıldı. Her iki yöntemde hemen hemen aynı sonucu verdiği görüldü. Böyle bir problemin seçilmesinin nedeni bu tip bir geometrinin daha önce Daumling tarafından kayıp ifadesinin analitik olarak türetilmesi idi. Yani geliştirilen sayısal yöntem ile analitik bir ifadenin sonucu karşılaştırılma imkânı oldu. Sonuçların oldukça makul bir birine oldukça yakın sonuçlar verdiği görüldü. Bir diğer önemli husus ise bu tip geometriye sahip kabloların alternatif kayıplarının endüstride üretilen güç iletim kablolarının kayıplarından çok düşük olacağı görülmektedir. Gelecekte eğer bu tip kablolar üretilebilirse kayıplar ciddi oranda düşürülmüş olacaktır. Bu tip bir probleme eğilimin yararlı olabileceği kanaatindeyiz.

3.2.1. Kritik Akım Yoğunluğunun Alan Bağlılığının Alternatif Akım Kayıp Eğrilerine Etkisi

Gerek manyetik alana gerekse transport akıma maruz kalan üstüniletken bir kablunun nasıl davranacağını öngörebilmek için kritik akım yoğunluğunu bilmek çok önemlidir. Kritik akım yoğunluğu j_c , hem konumun hem manyetik alanın hem zamanın hem de sıcaklığın bir fonksiyonudur. Kritik akım yoğunluklarında bütün bu bağılıkları dikkate alındığında oldukça doğru hesaplamalar yapılabilmektedir. Ancak hesaplama hem çok karışmaktır hem de çok uzamaktadır. Bu yüzden hem analitik hesaplamalarda hem de sayısal hesaplamalarda genellikle kritik akım yoğunluğunun bütün bağılıklarını ihmal edilir ve sabit olarak alınır, klasik Bean yaklaşımı. Bununla beraber yüksek sıcaklık üstüniletkenlerin deneysel sonuçlarının değerlendirilmesinde genellikle kritik akımın alan bağılılığı dikkate alınır. Çünkü kritik akımın alan bağılılığı diğer bağılıklara göre daha baskın bir faktördür. İnce üstüniletken tellerde j_c ' nin konum bağılılığının AA kayıp hesaplamaları hem analitik hemde sayısal olarak Kajikawa tarafından yapılmıştır (Kajikawa vd., 2004). Gömory konuma bağlı kritik akım yoğunluğu kullanarak ikinci kuşak tellerden yapılmış tek tabakalı üstüniletken kabloların alternatif akım kayıplarını sayısal yöntemleri kullanarak gerçekleştirmiştir (Gömory vd., 2009). Miyagi j_c nin konum bağılılığının manyetizasyon kayıplarına etkisi yine Sekine vd tarafından nümerik yöntemlerle incelenmiştir (Miyagi vd., 2007; Skine vd., 2005). Tek tabakalı ve çok tabakalı üstüniletken kablolarda j_c dağılımının etkisi sayısal olarak incelenmiştir (Quan, 2010) ve göstermişlerdir ki tek tabakalı kablolarda j_c dağılımı alternatif akım kayıp eğrilerinin hem biçimini hem de skalasını etkileyirken çok tabakalı kabloların kayıp eğrilerini hemen hemen hiç etkilememektedir. Ancak şimdiye kadar yapılan çalışmalarda iki tabakalı üstüniletken kabloların alternatif akım kayıplarının hesabında kritik akımın alan bağılılığı dikkate alınmamıştır. Bu çalışmanın amacı $j_c(B)$ bağılılığının aa kayıp eğrilerinin biçimini veya skalasını etkileyip etkilemediği araştırmaktır.

Bu hesaplamada kritik akım şiddeti $I_c=80$ A, eni $w_{sc}=4$ mm ve yüksekliği $h_{sc}=2$ μ m olan her bir tabakasinda 15 tane ikinci kuşak kaplı “2G-coated conductors” üstüniletken şeritlerden yapılmış güç iletim kablosu dikkate alınmıştır. Şeritlerde altlık olarak genişliği $w_T=4$ mm ve $h_T=80$ μ m manyetik olmayan ($\mu_r=1$) bir malzeme kullanılmıştır. Kablonun iç yarıçapı $R_i=19.98$ mm ve dış yarıçapı $R_d=20.93$ mm olarak seçildi. Bu geometrik özellikler tipik bir kablunun özellikleridir. Şeritlerin kablunun gövdesine helisel olarak sarılması dikkate alınmıyor. Tabii ki şeritler arasındaki boşlukların genişliği kablunun manyetik akı

dağılımı, kritik akım yoğunluğu üzerine ve dolayısıyla AA kayıpları üzerine çok önemli bir etkisi vardır. Bu aralık küçültülürse genellikle kablonun performansı artmaktadır. Hesaplamayı basitleştirmek için yalnızca iki şeridin üst üste geldiği kısım dikkate alınmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi alana bağlı kritik akım yoğunluğunun üstüniletken kabloların AA eğrilerinin biçimini nasıl etkilediğini incelemek için kullanıldı. Üstüniletkenin alana bağlı kritik akım yoğunluğu ifadesi şu denklemlerle tanımlanabilir:

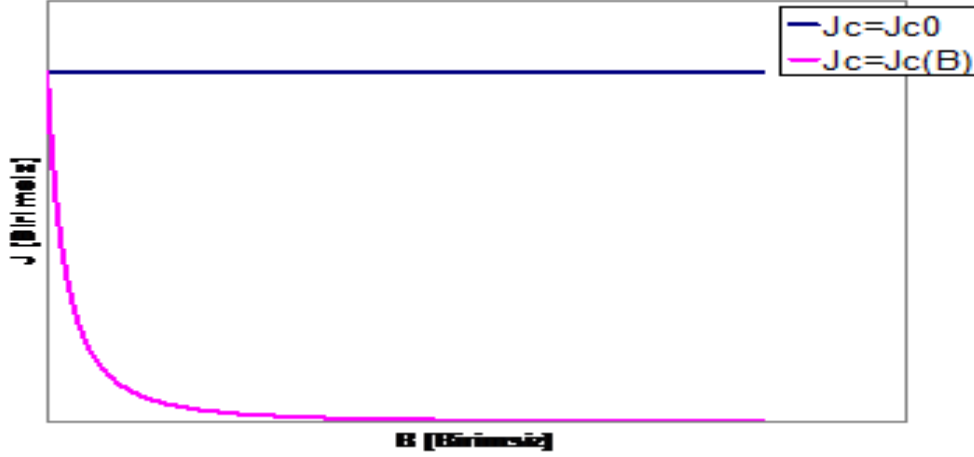
$$j_c(B) = \frac{J_{co}}{\left(1 + \frac{k^2 B_{//}^2 + B_{\perp}^2}{B_0}\right)^{\beta}} \quad (54)$$

Bura J_{co} , B_0 , k ve β üstüniletkenin materyal özelliklerini tanımlayan parametreler ve $B_{//}$ ve B_{\perp} yerel manyetik alan yoğunluğunun, üstüniletken şeritlerin geniş yüzlerine göre sırasıyla paralel ve dik bileşenleridir. Sonlu elemanlar modeli çözümü üstüniletkenin kesit alanındaki j_c dağılımına göre çözüm sunar. Kritik akım yoğunluğu I_c üstüniletkenin kesit alanı S_{ii} üzerinden akım yoğunluğunun integrali alınarak hesaplanabilir:

$$I_c = \int_{ii} j_c(B) dS_{ii} \quad (55)$$

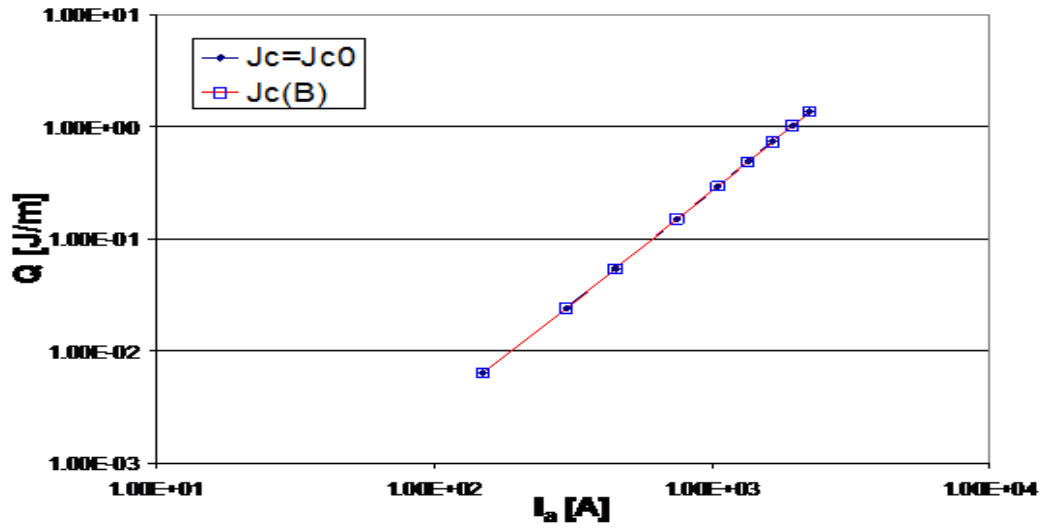
Hesaplamalarda B_0 , k ve β parametreleri kritik akım yoğunluğunun alana bağlılığının etkisini çok iyi betimleyebilmek için oldukça dikkatli seçilmiştir (Şekil 38). Şeritlerin elektriksel olarak çok iyi yalıtıldığı göz önüne alındı dolayısıyla her bir şeritten aynı akımın taşınacağı sınırlaması konuldu. Bu sınırlamayı sağlayabilmek için bir önceki rapor döneminde geliştirilen algoritma kullanılmıştır. Bu araştırma döneminde geliştirilen yöntem ile ayrıca karşılaştırılmıştır. Her iki yönteminde aynı sonucu verdiği test edilmiştir. Akım z yönünde uygulanmaktadır. Uygulanan akımın genliği I_c den daha düşük ve $I(t) = I_a \sin(2\pi t)$ biçimindedir. Akımın periyodunun ilk çeyreğinin kayba etkisi sayılmadığı için $T/4$ ile $T/2$ 'lik kısmında akım uygulanmakta. $T/2$ ile T diğer kısmı hesaplamaya gerek yoktur, çünkü bu periyotlarda aynı davranışı sergileyecektir. Her bir periyot 28 adıma bölünmüştür ve her bir t anında elde edilen vektör potansiyeli $A_{z,i}$

kaydedilerek, bir sonraki $t_{i+1}=t_i + \Delta t$ adındaki hesaplamalarda kullanılmıştır. Burada $\Delta t = T/2N$ ($N = 28$) olarak alınmıştır. Uygulanan akımın frekansı $f=50$ alınmıştır. Düşük frekanslarda frekansın etkisi çok sınırlı olduğunu belirtmek gerekir.



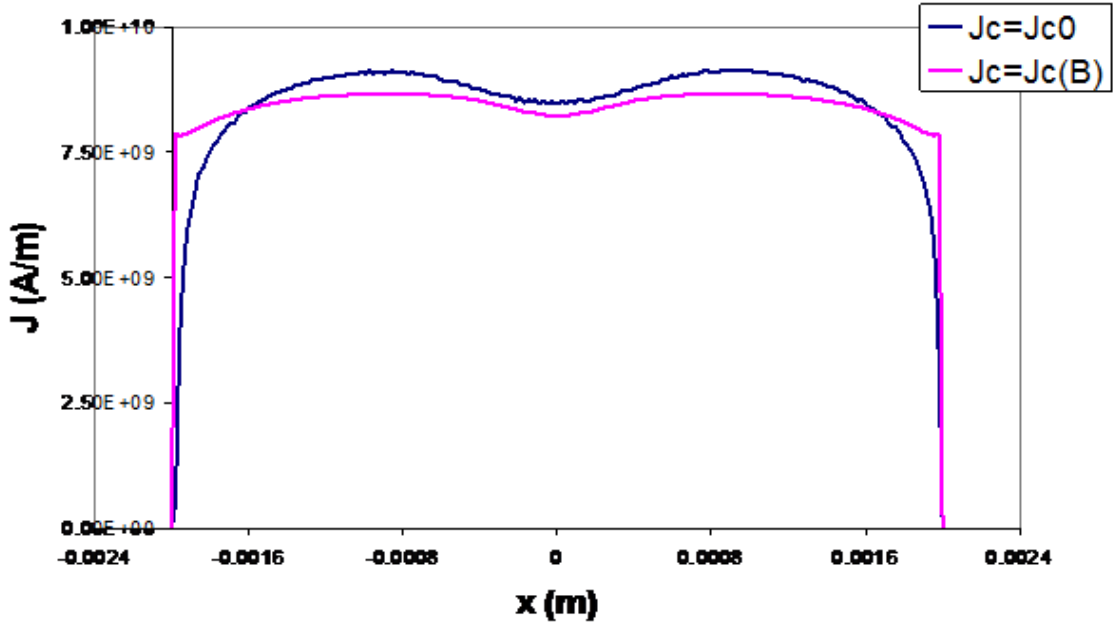
Şekil 38. Uygulanan alana karşı olarak denklem 17 ile verilen kriitik akım yoğunluğu fonksiyonu. Manyetik alan bağıllığını artırmak için $J_{c0}=1 \times 10^{10}$ A/m, $B_0=0.5$, $k=1$ ve $\beta=2$ değerleri kullanılmıştır.

Şekil 39 de $j_c=\text{sabit}$ ve $j_c=j_c(B)$ seçilerek hesaplanan AA kayıp eğrilerini karşılaştırılıyor. Her iki eğriyi elde etmek için kritik akım yoğunluğu parametreleri hariç bütün parametreler aynı seçilmiştir. Ayrıca geometri aynı olduğu için örgüleme “meshing” aynı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kayıp hesaplamaları için öncelikle AA karşılık gelen manyetik akı φ hesaplandı. Kayıbı %10’dan dahi iyi bir doğrulukla hesaplayabilmek için bir ucu iletkenin içerisinde akımın geçmediği bir nokta ile üstüniletken şeridin enin en az üç katı olduğu noktanın sınırladığı bölge içerisindeki akı değeri alınmalıdır. Burada kablonun merkezi ve kablonun dışarısında üstüniletken şeridin eninin 4 katı ($4 \times 4 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$) olan bir noktayı referans olan bölgedeki akı hesaplandı. Akı hesaplamak için seçilen bölgenin iki ucundaki vektör potansiyellerinin farkı olarak φ manyetik akısı hesaplandı, daha sonra akımın anlık değeri üzerinden denklem 15’deki gibi integre edildi.



Şekil 39. Alana bağlı $j_c(B)$ ve alandan bağımsız j_{c0} için Transport akımın genliğinin fonksiyonu olarak kabloda meydana gelen kayıp.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta hem alandan bağımsız j_c için hemde alana bağlı j_c için kayıp eğrilerinde hemen hemen hiçbir farkın bulunmayışıdır. Her ikisinde de aynı kayıp değeri elde edilmektedir. Hesaplama birkaç farklı kritik akım yoğunluğu parametresi için hesaplandı ve aynı sonuç alınınca daha fazla deneme yapılmadı. Kritik akım yoğunluğu parametreleri için bir optimizasyon yapılması düşünülüyordu ancak kayıplar için aynı sonuçlar elde edilince bu fikirden vaz geçildi. Her ikisinin de aynı sonucu vermesi aslında Şekil 40 a bakıldığında anlaşılabilir. Şekilden de görüldüğü gibi akım yoğunluğu yalnızca üstüniletken şeridin kenarlarında küçük bir farklılık göstermektedir. Diğer bölgelerde hem alana bağlı hem de alandan bağımsız durum için aynıdır. Bu yüzden bu bölgedeki farklılığın kayıp eğrilerine etkisi çok çok az olmaktadır. Ancak şunu belirtmek gerekir ki iterasyon için kullanılan A_d , A_u veya A_n başlangıç parametreleri her iki yaklaşımda da farklı değerler almaktadır. Yani farklı başlangıç şartları ile hesaplamaya başlamak gerekiyor daha sonra aynı değere yaklaşıyorlar.



Şekil 40. Alana bağlı ve alandan bağımsız kritik akım yoğunlukları için iletken kablonun dış takasındaki şeritler akan transport akımların dağılımlarının karşılaştırılması.

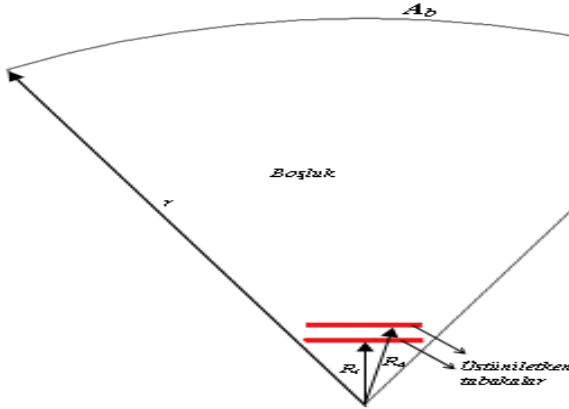
Sonuç olarak hesaplamalarda j_c 'nin alana bağlı olup olmaması iki tabakalı manyetik olmayan altlık üzerinde büyütülmüş ikinci kuşak kaplı iletkenlerden yapılmış kabloların kayıp eğrilerinin davranışını üzerine eklisi olmadığı görülmüştür. Kayıp hesaplamaları yapılırken kritik akım yoğunluğunun alan bağıllığını dikkate almak ancak hesaplamaların süresini uzatabilir denebilir.

3.2.2. Güç İletim Kablolarının İşlem Gördüğü Sıcaklığın Kayıplar Üzerine Etkisi

Üstüniletkenlerin teknolojik uygulamalarında işlem göreceği akımın, manyetik alanın ve sıcaklığın değerleri performansları açısından çok önemlidir. Üstüniletken kablolar gerek birinci kuşak iletkenlerden gerekse de ikinci kuşak tellerden yapılmış olsun genellikle sıvı azot sıcaklığında 77 K de işlem görmektedirler. Operasyon gördüğü sıcaklığın düşürülmesi hiç şüphesiz kablonun performansını olumlu yönde etkilemektedir yani kablonun akım taşıma kapasitesini artırmaktadır. Bir diğer önemli nokta ise üstüniletken kabloda alternatif akım taşınmasından ortaya çıkan kayıp ısıya dönüşmekte ve ortamın sıcaklığını değiştirmektedir. Ortamın sıcaklığının iyi ayarlanması hem kablonun performansını, hem mekanik kararlılığını, kablonun kullanım ömrünü hemde toplamda

işletim maliyetini ciddi manada etkilemektedir. Üstüniletken kabloların sıcaklık altındaki davranışları çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Wesche vd., 1999). İncelemeler genellikle tek tabakalı üstüniletken kablolar üzerinde olmaktadır. İncelediğimiz kadarıyla iki tabakalı üstüniletken kabloların kayıplarına kablonun işlem gördüğü sıcaklığın etkisi ile ilgili hiçbir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bölümde farklı sıcaklık şartlarında üstüniletken kabloların alternatif akım kayıpları incelenecek ve en iyi çalışma bölgesi belirlenmeye çalışılacaktır.

Bu çalışmada genişliği hesaplamalarda kablonun geometrik özellikleri için Tablo 5’de gösterilen parametreler kullanılmıştır. Ortamın sıcaklığının kablonun yapısındaki sadece üstüniletkenin akım yoğunluğuna etkisi araştırılacağı için sıcaklığın yapının diğer bileşenleri üzerine yapacağı etki ihmal edilmiştir. Ayrıca yuvarlak kablonun yapısının periyodikliği yüzünden yalnızca üst üste gelen iki şeridin manyetik özelliklerini hesaplamak yeterlidir (Şekil 41). Ortamın sıcaklığını değiştirmek üstüniletkenin akı sürüklenmesi, akı atlaması gibi akı dinamiği etkilerini değiştirecektir. Burada yüksek



Şekil 41. Üstüniletken kablolarında çalışma sıcaklığının akım kayıplarına etkisi hesaplamalarında kullanılan geometri.

tersinmezliğe sahip üstüniletkenin özellikleri kullanıldığı için bu etkiler göz ardı edilmektedir. Hesaplamalarda iletken kısmın eni bakımından bu yarıçapa sığabilecek maksimum sayıda şerit alındığı için içi içe girmiş silindirik tüp yaklaşımı yapılabilir. Hesaplamalarda dış yüzey ve yan yüzeyler için şu sınır şartları kullanılmıştır:

$$A_b = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{r}{R_i + h_{SC}} \right) + \ln \left(\frac{r}{R_d + h_{SC}} \right) + 2 \right), \quad (56)$$

$$\vec{H} \times \hat{n} = 0 \quad (57)$$

olarak alınabilir burada r hesaplama yapılan uzayın yarıçapı, R_i kablunun iç yarıçapı ve R_d kablunun dış yarıçapıdır. Örgüleme için 156560 üçgensel örgüleme elemanı kullanılmıştır.

Üstüniletken kablolarında çalışma sıcaklığının etkisini araştırmak için hiç şüphesiz sıcaklık iletken tabaklardaki akımı değiştirebileceği için kritik akım yoğunluğunun sıcaklık bağıllığı (Clem ve Hao, 1993),

$$J_c(B, T) = j_c(B) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right)^\alpha \quad (58)$$

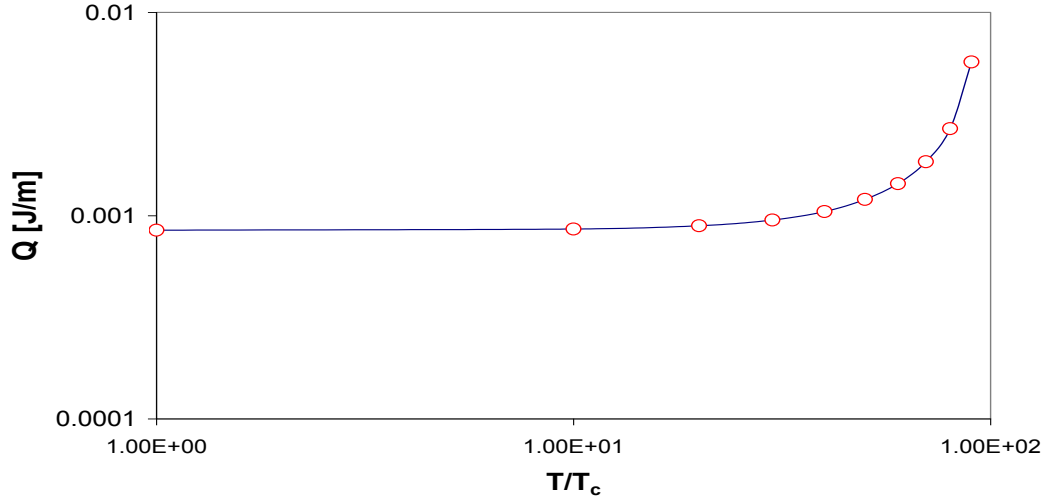
ifadesi kullanılmıştır. burada T_c iletken şeritlerin üstüniletkenliğe geçiş sıcaklığı bu hesaplama için YBCO'nun geçiş sıcaklığı olan $T_c = 92$ K alındı, T kablunun işlem gördüğü sıcaklık, α penomolojik parametre genellikle değeri $1 \leq \alpha \leq 2$ arasından değerler alır ve $j_c(B)$ kritik akım yoğunluğudur. İki tabakalı üstün iletken kabloların hesaplamalarında kritik akım yoğunluğunun manyetik alan bağıllığının hesaplamalar üzerine hiçbir etkisi olmadığı için kritik akım yoğunluğunun alan bağıllığı dikkate alınmamıştır.

Tablo 5. Benzemişimde kullanılan geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri

Nicelik	Değeri
I_c	1660 A
A_n	$2.2 \cdot 10^{-7}$
w_{SC}	4.5 mm
h_{SC}	0.225 μ m
R_i	15 mm
R_d	16 mm
R_{uzay}	10 cm
N (her tabakadaki şerit sayısı)	20
T_c	92 K
f	Değeri
Nicelik	1660 A

Şekil 42 $I_a=75$ A için sıcaklığı karşı kayıp eğrisini gösteriyor. Kayıp eğrisini elde etmek için programa başlangıç ve bitiş sıcaklıkları belirlendi. Başlangıç sıcaklığı için $T_b=90$ K ve bitiş sıcaklığı için ise $T_s=4$ K girildi. Sıcaklıkların bu şekilde seçilmesinin nedeni 90K'den yüksek sıcaklıklarda YBCO iletkenlerde akı sürüklenme etkisinin çok baskın

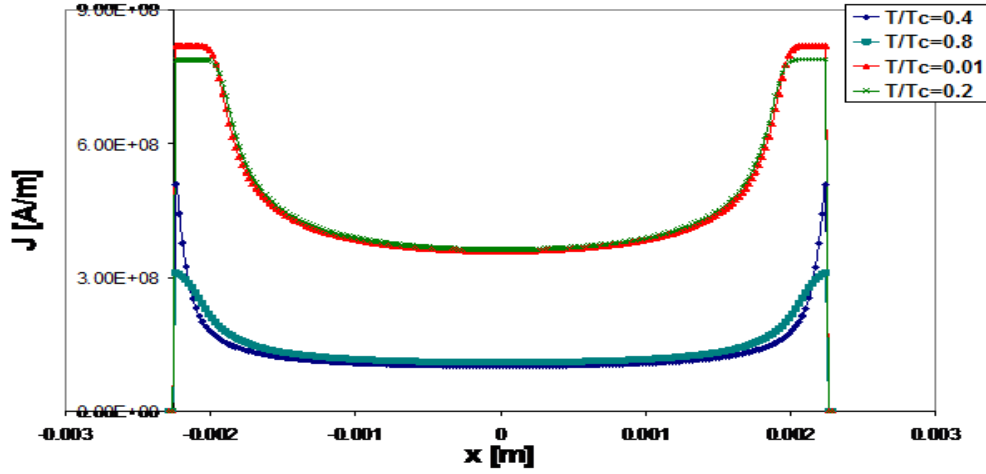
olması düşük sıcaklıklarda ise $T < 4K$ akı atlama etkisinin ortaya çıkmasıdır. 4K ile 90K arasında hemen hemen kararlı bir sıcaklık bölgesinde çalışıldı. $\Delta T = (T_s - T_b)/N$ ($N=10$ adım) adımlarla sıcaklık değiştirildi. Öncelikle çalışılarak sıcaklık ve bir I_m maksimum akım değeri belirlendi. Sıcaklık bütün proses boyunca sabit tutularak akım $I = I_m \sin(2\pi ft)$ şeklinde yarım periyot boyunca azaltıldı. Her bir adımda akıma karşı manyetik akı değeri kaydedildi. Daha sonra iletkenlerin sıcaklık ve manyetik geçişleri silindikçe (bu işlem kabloya hiçbir manyetik alan ve akım uygulanmadan çalışma sıcaklığı T_c 'nin üzerine çıkartılarak yapılabilir) sonra $T=T_b-\Delta T$ kadar ortam soğutulduktan sonra aynı şekilde I akımı I_m den itibaren yarım periyotluk $-I_m$ ye kadar azaltılır. Bu işlem $T=T_s$ 'ye kadar devam eder. Kayıp Q denklem 15 integrali kullanılarak hesaplandı. Şekilden de görüleceği üzere $T \approx T_c/2$ bölgesine kadar kablonun kaybında ciddi bir artış bulunmamaktadır. Bu sıcaklık değerlerinden yüksek sıcaklıklarda ise kayıp hızlı bir şekilde artmaktadır. $T \approx T_c$ yakın sıcaklıklarda kayıp en yüksek değerlerine çıkmaktadır bunun nedeni bu bölgede başka akı dinamiği etkilerinin artık baskın olmaya başlamasından kaynaklanabilir.



Şekil 42. Uygulanan akımın genliği 75 A seçilerek hesaplanan T_c kritik sıcaklıkla normalize edilmiş ortam sıcaklığının karşı kabloda ortaya çıkan toplam kayıp. YBCO için $T_c=92K$ kullanılmıştır

Şekil 43, farklı sıcaklıklar için kablonun dışındaki iletkende dolanan akımını iletkenin kesit alanı boyunca tek boyutlu olarak göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda üstüniletke üzerindeki akım dağılımı $T_c/2$ ' ye kadar olan sıcaklıklarda çok az değişim olmaktadır. $T_c/2$ ' den sonraki sıcaklıklarda akım genellikle iletkenin uçlarından

akmaya çalışıyor. Bu durum kaybı ciddi oranda artırmaktadır.



Şekil 43. Farklı sıcaklıklar için üstüniletken şeritlerdeki akım dağılımı.

Çok iyi bilindiği gibi güç iletim kablolarının hem akım taşıma kapasitesi hem de kayıpları ortamın sıcaklığına çok bağlıdır. Sonuç olarak bu hesaplamalarda şu söylenebilir: $\sim T_c/2$ 'den düşük sıcaklıklarda kayıp çok önemli oranda düşmektedir. $\sim T_c/2$ 'den yüksek sıcaklıklar da ise ortamın sıcaklığı çok iyi ayarlanmalıdır. Sıcaklıktaki çok küçük artışlar bile kablolarla önemli kayıplara neden olabilir.

3.2.3. İçi Boş Ve İçi Dolu Silindirik Tellerden Yapılmış Kabloların Kayıplarının Karşılaştırılması

Üstüniletkenlik güç iletim teknolojisindeki en büyük uğraşlardan birisi şüphesiz alternatif akım kayıplarını azaltarak güç iletim aygıtlarının performansını yükseltmektir. Bu amaçla özellikle kablo gibi aygıtların bileşenlerini oluşturan tellerin geometrilerinin iyi ayarlanması gerekmektedir. Mevcut güç iletim kabloları kablolar dikdörtgen biçimindeki şeritler yuvarlak bir gövde üzerine birkaç katman sarılarak yapılmaktadır. Ancak kabloların hala AA kayıpları çok yüksektir. Bu nedenle, kablo yapım teknolojisinde giydirilmiş şerit iletkenler kullanmak yerine giydirilmiş yuvarlak tel şeklindeki iletkenler kullanmak fikri oldukça ilgi çekmektedir. Yarıçapı \sim mm boyutunda yuvarlak metalik altlık üzerine üstüniletken bir tabaka ile kaplanmış teller yapılmıştır (Ma ve Balachandran, 2006; Ferrando, 2005) ve bunlara alternatif olarak yuvarlak esnek bir gövde üzerine şeritleri helisel olarak sararak kompozit yuvarlak teller yapılmıştır (Mokoyama vd., 2010; Siahtrang

vd., 2010). Odier ve arkadaşları, içi boş silindirik teller elde etmeyi başarmıştır (Odier vd., 2009).

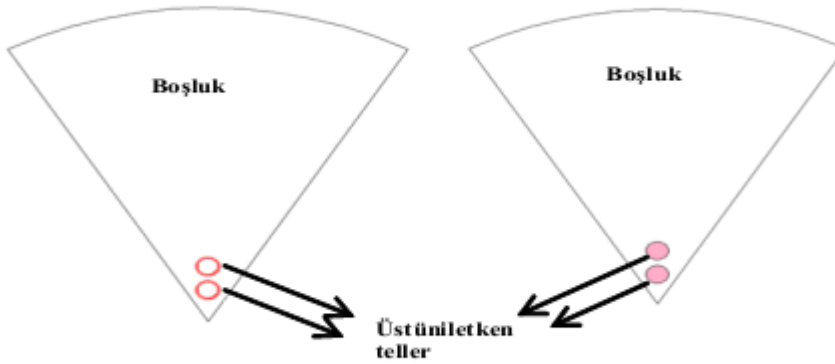
Transport akıma veya manyetik akıma maruz kalmış yuvarlak içi boş ve içi dolu üstüniletken tellerin manyetik tepkisi sahip oldukları geometriden dolayı üstüniletken şerit tellerinkinden çok farklıdır. Son zamanlarda yuvarlak iletkenlerin manyetik davranışını çok ilgi çekmektedir. Mawatari manyetik alana maruz kalmış içi boş üstüniletken tellerin manyetik davranışlarını ve AA kayıplarını teorik incelemiştir (Mawatari, 2011). Gömory ve İnanır içi boş iletken ve içi dolu iletken yapılmış bobinlerin AA kayıplarını sayısal yöntemle incelemiştir (Gömory ve İnanır, 2011). Pi Wei akım geçen içi boş üstüniletken kabuğa manyetik alan uygulandığında ortaya çıkan alternatif akım kayıpları sayısal yöntemlerle incelenmiştir (Pi vd., 2010). Bu çalışmada hem içi boş hem de içi dolu üstüniletken tellerden dizayn edilmiş güç iletim kablolarının bir akıma maruz bırakıldığında elektromanyetik tepkileri incelenecek ve AA kayıpları karşılaştırılacaktır.

Tablo 6. içi boş ve içi dolu tellerden yapılmış kablonun geometrik özellikleri

Nicelik	Değeri
I_c	3000 A
A_n	$2.2 \cdot 10^{-7}$
w_{SC}	4.5 mm
h_{SC}	0.225 μ m
R_i (kablunun iç yarıçapı)	20 mm
R_d (kablunun dış yarıçapı)	25 mm
R_w (telin yarıçapı)	1 mm
η (içi boş telin çeper kalınlığı)	0.1 mm
R_{uzay}	10 cm
N (her tabakadaki şerit sayısı)	20
F	50 Hz

Bu çalışmada Şekil 44 de görüldüğü gibi içi boş ve içi dolu iletkenlerden yapılmış iki tabakalı üstüniletkenlik güç iletim kablosu göz önüne alındı kablo yapısındaki periyodiklikten dolayı hesaplama bölgesi olarak sadece kablunun iki tane tel üstü üste

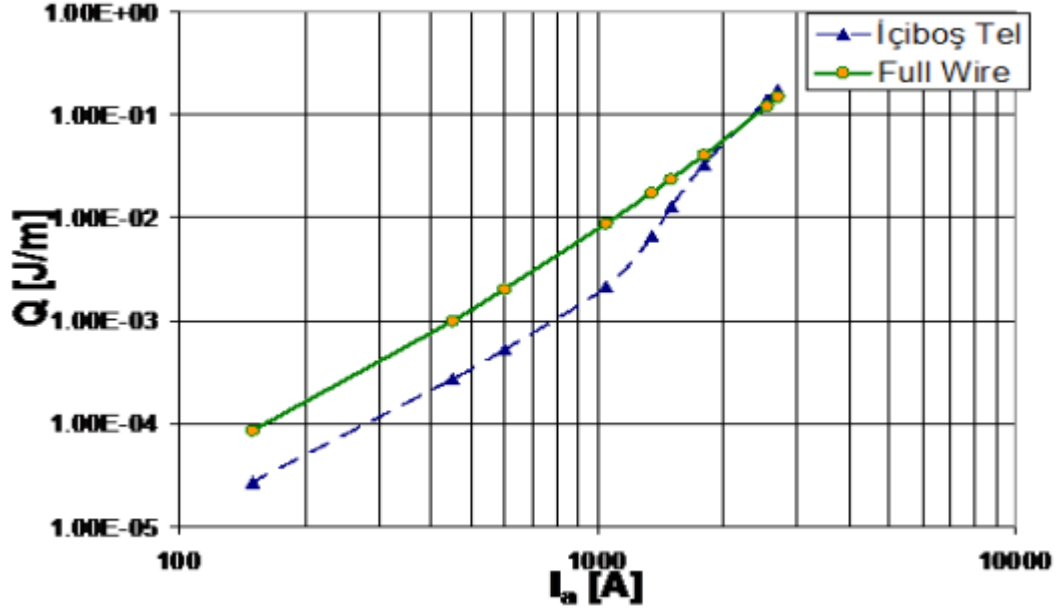
gelecek kısmı dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan parametreler Tablo 6'de veriliyor. Hesaplamalarda sınır şartı olarak denklem 45 ve denklem 46 ile verilen sınır şartları kullanılmıştır ayrıca örgüleme için 75252 tane üçgen eleman kullanılmış ve minimum eleman kalitesi 0.6 civarındadır. Kablodan z yönünde genliği kritik akım yoğunluğu I_c den küçük sinüzoidal olarak değişen bir akım geçiriliyor. Akımın manyetik alan, sıcaklık ve konum bağıllığı ihmal ediliyor. Uygulanan akımın frekansı 50 Hz olarak seçilmiştir. Hesaplamaların detayları yukarıda açıklandığı için burada çok fazla bir ayrıntıya girilmeyecektir.



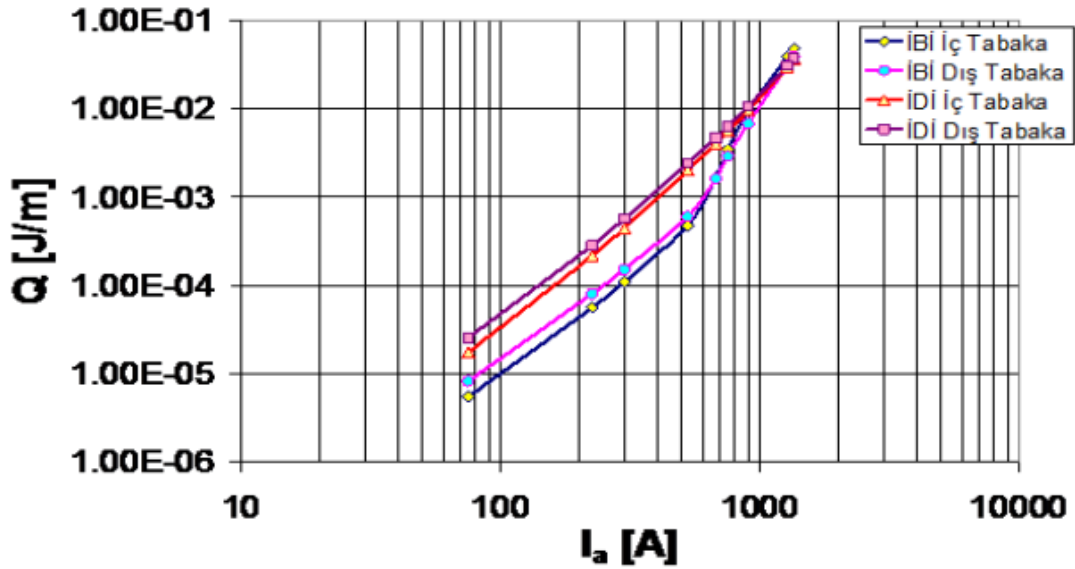
Şekil 44. Hesaplamalarda kullanılan kablo modeli

Şekil 45 içi boş ve içi dolu silindirik tüp biçimindeki tellerden yapılmış kabloların alternatif akım kayıplarını karşılaştırılıyor. Eğrileri elde etmek için üstüniletken tellerin her birinin üzerindeki bir noktada skaler potansiyel cinsinden manyetik akı değerleri elde ediliyor ve denklem 51 kullanılarak manyetik akı histeresizinin alanından her bir akım genliği için kayıp eğrisi elde edilir. Şekilden de görüldüğü gibi düşük akım genliklerinde içi boş iletken (İBİ) meydana gelen kayıp içi dolu iletken (İDİ) meydana gelen kayıptan çok daha düşüktür. Kritik akım yoğunluğunun %5'i kadar küçük olan I_a akım değerinde içi dolu silindirik kabloya içi boş olandan yaklaşık üç kat daha fazladır. Akım artıkça bu fark giderek azalmakta kritik akımın yarısı kadar olan akım değerinde ise bu oran iki katın altına kadar gerilemektedir. Oysa uygulanan akımın genliği kritik akımın %90'ına ulaştığında içi boş tellerden yapılan kablolarda kayıp diğerine göre %16'dan daha fazladır. Şekil 46 her iki kablonun da hem iç tabakalarında hem de dış tabakalarında oluşan kaybı karşılaştırıyor. Tabii beklenildiği gibi içi dolu telin hem iç hem de dış tabakasında oluşan akım kayıpları içi boş telde iletken oluşmuş kayıptan daha büyüktür. I_c ye yakın

akımlarda İDİ deki kayıp değerine



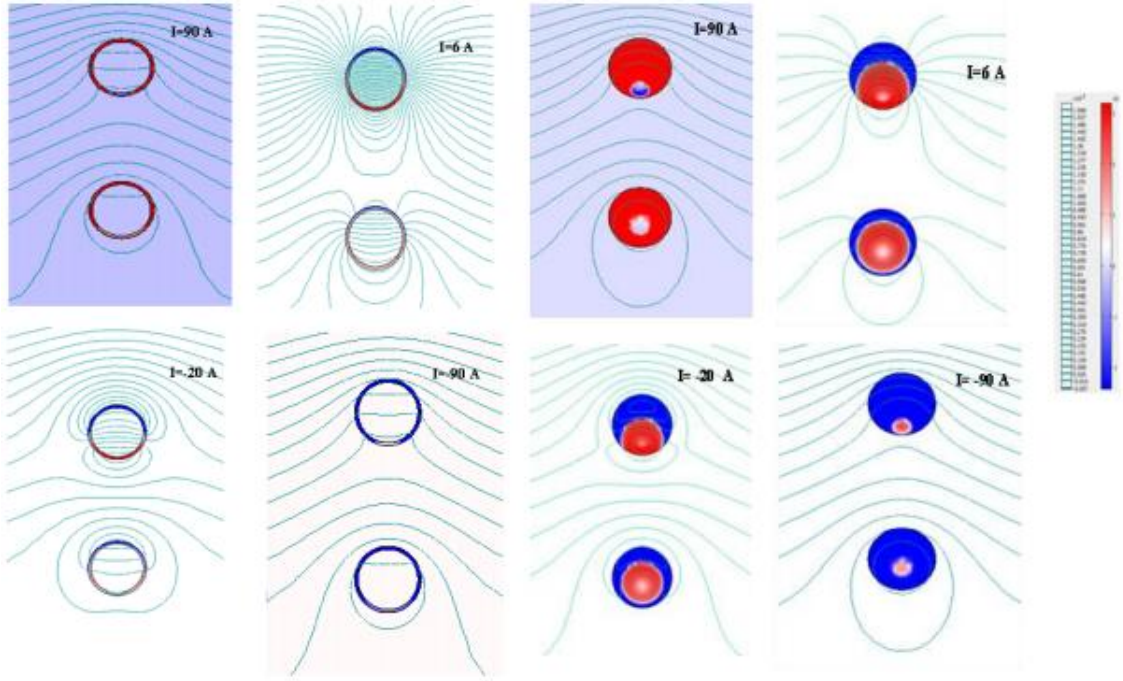
Şekil 45. İçi boş ve içi dolu tellerden dizayn edilen kabloların toplam transport akım kayıplarının karşılaştırılması.



Şekil 46. İçi boş iletken telden ve içi dolu iletken telden yapılan kabloların iç ve dış takalarında oluşan AA kayıplarının karşılaştırılması.

göre azalıyor. Her iki kablo modelinde de dıştaki $I_a \leq I_c/2$ akım genliklerinde dıştaki tabakada oluşan kayıp içteki tabakada oluşan kayıptan daha fazladır. Her iki konfigürasyonda da dış tabakada oluşan kayıp içtekine göre ~%60 oranında daha fazladır. Ancak içi İBİ nin dış tabakasında oluşan kayıp $I_c/2=750$ A akımdan sonra içteki iletkenin daha düşük bir kayba neden olmaktadır.

Şekil 47 farklı akım genlikleri üstüniletken kabloların iç tabakasındaki ve dış tabakasındaki akım ve manyetik potansiyel dağılımlarını iki boyutlu olarak gösteriyor. Dikkat çekici en önemli nokta düşük akımlarda İBİ den akan akım İDİ den akan akıma göre daha homojen olmaktadır ve manyetik alan daha derine nüfuz etmektedir (Şekil 47). Bu durum İBİ'de neden daha az kayıp olduğunu açıklamaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi dıştaki tabakanın tellerin bir birine bakan yüzlerinde maruz kaldığı alanın dik bileşeni içteki tabakaya göre daha fazladır. Bu dıştaki tabakada neden daha fazla kayıp olduğunu açıklayabilir.



Şekil 47. $I_{max}=90A$ 'dan itibaren alan azalırken çeşitli alan değerleri için içi dolu iletken ve içi boş iletkenlerdeki akım ve manyetik alan dağılımı. Kırmızı bölgeler $+z$ yönünde geçen akımı lacivert olan bölgeler ise $-z$ yönünde geçen akımı gösteriyor. Kötörler sabit vektör potansiyelini gösteriyor.

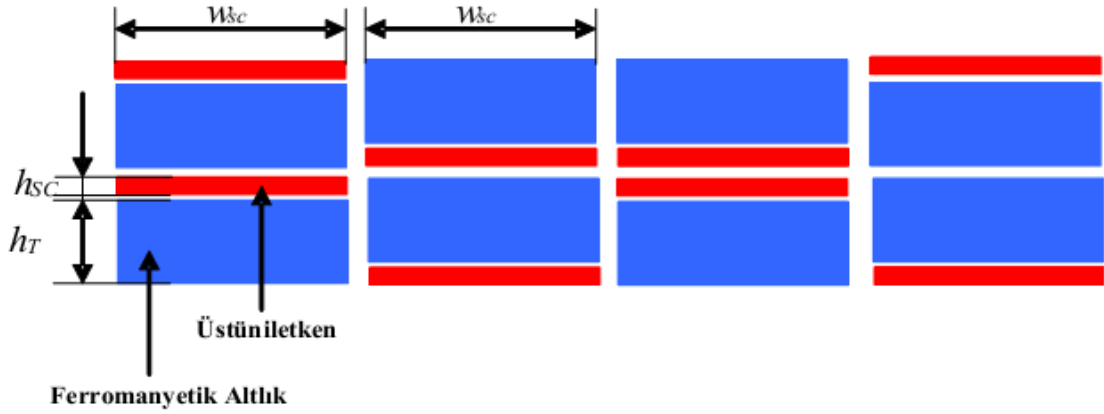
Bu bölümde iki farklı üstüniletken güç iletim kablosu konfigürasyonu incelendi transport akım altında en iyi performans sağlayabilecek yapılandırma belirlenmeye çalışıldı. Sonuç olarak içi boş iletken yapıları düşük akım genlikleri için iki dolu iletken yapılarına göre çok daha iyi performans gösterebilirler. Aksine yüksek akımlarda içi dolu iletken yapıları içi boş iletken yapılarına göre biraz daha yüksek olabilir.

3.2.4. Ferromanyetik Altlıklı İkinci Kuşak Giydirilmiş İletkenler Kullanılarak Dizayn Edilmiş İki Tabakalı Güç İletim Kablolarında Alternatif Akım Kayıplarının Karşılaştırılması

Ferromanyetik altlıklı ikinci kuşak giydirilmiş iletkenler üretim maliyetleri düşük olduğu için üstüniletken teknolojisinde gelecekte önemli bir yer tutacağı öngörülmektedir. Ancak altlık olarak kullanılan ferromanyetik malzemeler üstüniletkenin etrafındaki manyetik alan dağılımı değiştirdikleri ve iletken şeritlerin etrafındaki manyetik alanın dik bileşenlerini arttırdıkları için AA kayıplarını artırmaktadır. Tek tabakalı üstüniletken kablolarında ferromanyetik altlığın alternatif akım kaybına etkisi çok yoğun bir biçimde

incelenmiştir (Gömöry vd., 2010; Miyagi vd., 2007). Amemiya vd alana bağlı manyetik geçirgenliğe sahip manyetik altlık üzerine büyütülmüş iki tabakalı kabloların kayıplarının iki farklı konfigirasyon için transport akım kayıplarını incelemiştir (Amemiya vd., 2010). Ancak yaptığımız araştırmada ferromanyetik altlığın etkisi detaylı bir biçimde incelenmemiştir. En iyi kablo konfigirasyonunun nasıl olabileceği henüz ortaya konulmamıştır. Bu çalışmada ticari olarak bulunan ikinci kuşak şeritlerden yapılmış şeritlerin farklı yerleştirilmeleri ile elde edilen manyetik alan kayıpları karşılaştırılacaktır ve en iyi performansa sahip dizilim ortaya konulacaktır.

Hesaplamalarda iç yarı çapı R_i ve dış yarı çapı R_d olan yuvarlak bir kablo üzerine kaplı iletken şeritlerin Şekil 48' deki gibi dört farklı dizilimi göz önüne alınmıştır. Bu dizilimler sağdan itibaren M1 yapısı, M2 yapısı, yüz-yüze (YY) yapı ve sırt sırta (SS) yapısı şeklinde isimlendirilmiştir. Kablonun geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri Tablo 7'de veriliyor. Hesaplamalarda yapının periyodikliğinden dolayı yalnızca iki tane üstüniletken şerit üst üste geldiği kablonun $2\pi/N_{\text{şerit}}$ kısmı dikkate alınmıştır. Şeritlerin spirale şeklinde sarılmaları göz ardı ediliyor. Bütün şeritlere sinüzoidal şekilde değişen ve genliği aynı olan aynı miktar akım uygulanıyor. Kritik akımın alan bağıllığı ihmal ediliyor. Kablo xy- düzleminde yatmaktadır ve akım z-yönünde uygulanıyor. Böylece bağımsız değişken J_z ve A_z olur. Her hesaplamanın sonucunu karşılaştırabilmek için her tasarımda da aynı örgüleme metodu uygulanmıştır.



Şekil 48. Ferromanyetik altlık üzerine büyütülmüş kaplı iletkenlerden dizayn edilecek kablo yapıları.

Sistemin sınır şartı için üzerinden I_a akımı geçen üstüniletken dilimin kendisinden $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ noktasında oluşturacağı vektör potansiyeli ifadesi kullanıldı (Siahrang ve Sirois, 2011):

$$A_z(x, y) = \frac{\mu_0 j}{8\pi} \{4w_{sc} - 4y(\arctan(G/2y) + \arctan(K/2y)) + G \ln(y^2 + D^2/4) - K \ln(y^2 + K^2/4)\} \quad (59)$$

Burada, akım yoğunluğu $j = I_a / (w_{sc} h_{sc})$, $K = 2(w_{sc}/2 - x)$ ve $D = 2(w_{sc}/2 + x)$, w_{sc} akım geçen üstüniletken tabakanın genişliği ve h_{sc} üstüniletken tabakanın kalınlığıdır.

Tablo 7. Hesaplamlarda kullanılan parametreler.

Nicelik	Değeri
I_c	2400 A
A_n	$1.8 \cdot 10^{-7}$
w_{SC}	4 mm
h_{SC}	2 μ m
w_T (FM altlığın eni)	20 mm
h_T (FM altlığın boyu)	25 mm
R_i (kablunun i yarıçapı)	1 mm
R_d (kablunun dış yarıçapı)	0.1 mm
R_u (Hesaplama yapılacak uzayın yarıçapı)	10 cm
N (her tabakadaki şerit sayısı)	20
F	50 Hz

Üstüniletken kısmın örgülemesi için örgülemede en/boy=20/2100 olacak şekilde quadrilateral örgü elamanı kullanılmış, diğer hem uzay hem de ferromanyetik kısımda üçgensel örgü kullanılmıştır. Örgü noktası sayısı: 54471, mesh elemanların sayısı (144859

üçgen ve 32000 quadrilateral): 176859, sınır elemanlarının sayısı: 7631, minimum mesh kalitesi: 0.8145 çıkmıştır.

Ferromanyetik altlığın etkisini araştırmak için kuvvetli ferromanyetizmaya karşılık gelen ve alandan bağımsız bir manyetik geçirgenlik $\mu = 5000$ seçildi. İyi bir yaklaşıklıkla ferromanyetik kısım için $B = \mu_0 \mu H$ yaklaşıklığı yapıldı. Ferromanyetik kısım hariç diğer bölgeler için $\mu=1$ alındı. Hesaplamalarda ayrıca her bir iletkenin aynı akımın geçtiği kabul edildi. Bu sınırlamayı gerçekleştirmek için bölüm 6.1’de anlatılan yöntem kullanılmıştır.

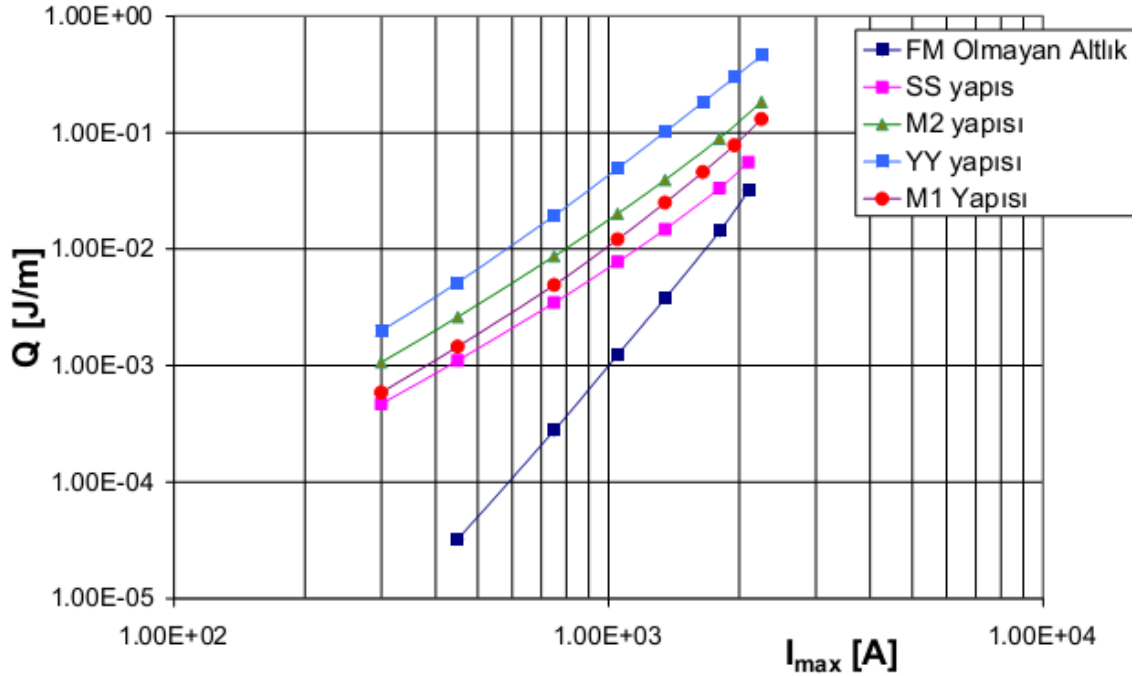
Alternatif akım kayıplarını hesaplamak için zamana bağlı akım belli bir maksimumdan itibaren adım adım azaltılıyor. Her bir t_i zamanında hesaplanan vektör potansiyeli $A_z(t_i)$ kaydedilir ve bir sonraki $t_{i+1}=t_i+\Delta t$ adımında hesaplanan vektör potansiyeli ifadesi, $\partial A/\partial t = (A_z(t_{i+1}) - A_z(t_i))/\Delta t$ hesaplanmasında kullanıldı $\Delta t=1/(2fn)$, $n=25$. üstüniletken iletken üzerindeki akım dağılımı denklem 39 ile hesaplanmaktadır. Her bir üstüniletken üzerindeki kayıp,

$$Q_{SC} = \frac{P}{l} = 2 \int_{-l_a}^{l_a} \vec{E} \cdot \vec{J} dt \quad (60)$$

integrali kullanılarak hesaplandı. İfadenin başındaki 2 çarpanı hesaplamanın yalnızca yarım periyotluk kısmı yapıldığı için gelmiştir. Manyetik geçirgenlik alana bağlı olmadığı için $B-H$ çevrimi histeresiz yapamayacağından ferromanyetik kısımda kayıba herhangi bir katkı gelmeyecektir.

Şekil 49 karşılaştırmalı olarak ferromanyetik olmayan altlığı temsil eden $\mu=1$ ve kuvvetli ferromanyetizmayı betimleyen $\mu=5000$ için dört farklı yapı için toplam üstüniletkenlik kaybını gösteriyor. Şekilden de hemen görüleceği üzere ferromanyetik olmayan altlık kullanılan yapıda oluşan kayıp ferromanyetik altlık için öngörülen kayıptan oldukça düşüktür. Özellikle bu fark düşük akım genliklerinde oldukça belirgindir. Bunun nedeni ferromanyetik altlığın olduğu yapılar için yüksek geçirgenlikten dolayı altlıkların yüksek B manyetik akı yoğunluğuna sahip olmasıdır. Üstüniletkenin temas ettiği yüzeyde akı yoğunluğunun yüksek olması aynı akım değeri için üstüniletkene daha fazla manyetik alanın nüfuz etmesine dolayısıyla o bölgede zıt yönlü akımın akmasına ve bir bütün olarak üstüniletkendeki akım dağılımının bozulmasına ve kayıpların artmasına neden olmaktadır.

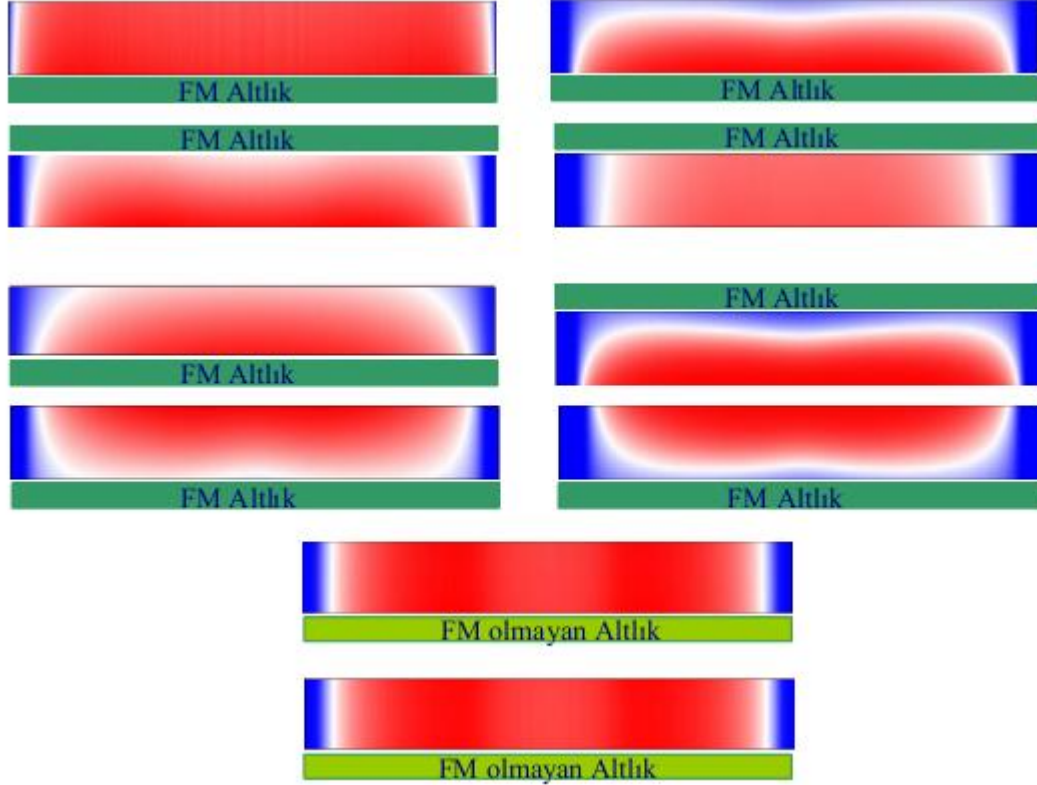
Bir diğer önemli nokta ise altlığın manyetik alanın dik bileşenini artırmasıdır. Geometrik dizilimin alternatif akım kayıplarına üzerine etkisine dikkat etmek gerekir. YY konfigürasyonunda kayıp en fazla iken BB yapısında kayıp en düşüktür. Bunun nedeni Şekil 50'ye bakılarak kolayca anlaşılabilir. BB yapısında üstüniletken tabakalarda geçirilen akım tarafından oluşturulan self alan içteki ve dıştaki iletkende bir birine göre zıt yönde olacağı için bu dizilimde ferromanyetik tabakalarda diğer tabakalara göre daha az manyetik akı tutulacaktır. Dolayısıyla ferromanyetik altlığın kullanıldığı diğer yapılara göre kayıp daha az olmaktadır.



Şekil 49. Ferromanyetik altlık kullanılarak yapılan ikinci kuşak kaplı iletkenlerin farklı dizilimleri ile dizayn iki tabakalı üstüniletken kabloların toplam transport akım kayıplarının karşılaştırılması.

Şekilden de görüldüğü ferromanyetik olmayan altlık kullanılan yapıda akım dağılımı diğer yapılara göre hem iç tabakada hem de daha homojen akmaktadır. Bir diğer ilginç nokta ise FM altlık kullanılan yapılarda ters yönde akan akım miktarı (lacivert bölge) daha fazla olmaktadır. YY yapısında zıt yönlü akım daha ziyade FM altlığın olduğu bölgeler akmaktadır. Bunun nedeni FM yapının manyetik alanı üzerinde toplaması ve dolayısıyla bu bölgedeki B manyetik akı yoğunluğunun daha yüksek olması bu duruma neden olmuş olabilir. Tabi manyetik akı yoğunluğundaki bu artış üstüniletkene gene manyetik akının dik

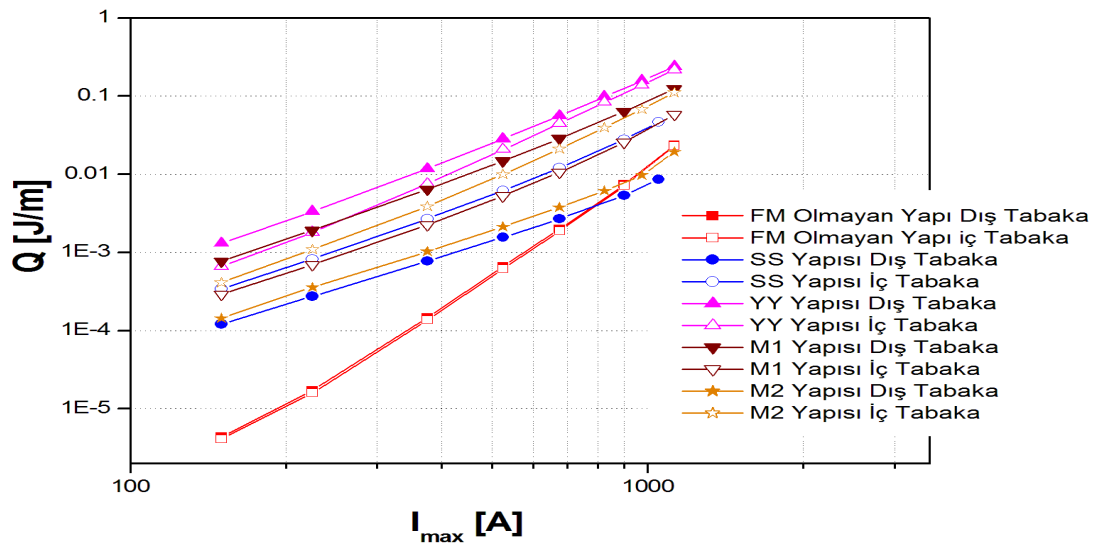
bileşenini artırmış olabilir. Üstüniletkenin yan yüzeylerinde zıt akımın dolanması elbette kablo yapısındaki boşluklardan dolayı self manyetik alanın dik bileşeninin daha yüksek olmasıdır.



Şekil 50. Üstüniletken güç iletim kablosunun yalnızca iki tane şeridin üst üst üste geldiği kısımdaki akım yoğunluğu dağılımı. Geçen akım miktarı $I=16$ A yani kritik akımın %20'si kadardır. Üstteki kısım kablunun dış tabakasını içteki kısım ise iç tabakasını göstermektedir. Görüldüğü gibi akımın büyük bir kısmı şeritlerin merkezinde akmaktadır. Uygulanan akım azaldıkça şeritlerin uçlarından zıt yönde akım indüklenmektedir. Bu şeritlerin uçlarından manyetik akının çıktığını göstermektedir. (a) SS yapısı (b) M1 yapısı (c) M2 yapısı (d) YY yapısı (e) FM olmayan altlığın kullanıldığı yapıları göstermektedir.

Şekil 51 güç iletim kablosunun dış ve iç tabakalarında oluşan akım kayıplarını karşılaştırıyor. Şekilden de görüldüğü gibi YY yapısının ve M1 yapısının dış tabakalarında oluşan AA kaybı iç tabakalarında oluşan kayba göre düşük akımlarda iki kat daha fazladır. Fakat yüksek akımlara çıkıldığında YY yapısında iki tabakada oluşan kayıplar hemen hemen eşitleniyorken M1 yapısında gelişimini aynen devam ettirmektedir. İlginç olarak SS yapısında ve M2 yapısında iç tabakada oluşan kayıplar dış tabakadaki kayıplara göre

birkaç kat daha daha yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni bir önceki şekilden de görüldüğü gibi dış tabakada akan akımın daha homojen olması gösterilebilir. Yada zıt yönlü akımın daha çok iç tabakadan akması gösterilebilir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken nokta ise kritik akıma yakın olan yüksek akımlarda SS yapısının ve M2 yapısının dış tabakasında oluşan kayıp manyetik olmayan altlığın kullanıldığı yapıdan biraz daha düşüktür. Ferromanyetik olmayan altlık kullanılan yapıda kablunun hem dış tabakasında oluşan kayıp hem de iç tabakasında oluşan kayıp bir birine eşittir.



Şekil 51. Hesaplama kullanılan her bir model için üstüniletken kablunun dış ve iç tabakalarında oluşan transport kayıpların karşılaştırılması.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Geliştirilen I. Yöntemin Sonuçları

Geliştirilen yöntem 2. kuşak üstüniletken şeritlerden dizayn edilmiş güç iletim kablolarına uygulandı. İteratif olarak Akım, manyetik alan benzeşimleri çıkartacak ve sonuçta alternatif akım kayıplarını hesaplayacak bir Comsol-Matlab kodu yazıldı. Gerçekleşen çalışmalardan şu orijinal çıktıları alınmıştır:

1. Üstüniletken güç iletim kablolarında kabloyu oluşturan iletken şeritlerde akım dağılımlarını eşit şekilde yapabilecek bir yöntem geliştirildi. Yöntemin sonucu daha önce gerçekleştirilen “duoblock” modelinin analitik yöntemi ile uyumludur. Yöntemin uygulanması son derece basit (yöntemi uygulamak için çok derin matematik ve ileri düzeyde algoritma bilgisine gerek yoktur) ve deneysel ön görüler için kullanılabilir kadar hassastır.
2. Yöntem kullanılarak şeritlerin karşılıklı yerleştirildiği iki tabakalı kablo yapısına uygulandı. Düşük akımlarda çalışacak (Kablonun kritik akım değerinden düşük akımlar) kablolar yapılacaksa en verimli güç iletim kablosunu yapmak için içteki ve dıştaki iletkenler arasındaki mesafe çok dikkatli ayarlanmalıdır.
3. Düşük histeresiz kayıpları için dıştaki iletken, içteki iletkenin orta yeri boş kalacak şekilde, biraz kaydırılarak yerleştirilmelidir. Aynı şekilde içteki iletkenler ile dıştaki iletkenler arasındaki mesafe çok iyi ayarlanmalıdır.
4. Üstüniletken güç iletim kablolarında kayıplar genellikle akımın üstün iletken şeritlerin uçlarından akmayı tercih etmesinden kaynaklanmaktadır. Akımı şeritlerin her tarafına homojen bir biçimde yayacak bir takım teknik yöntemler geliştirmek gereklidir.
5. Geliştirilen yöntem iki tabakalı güç iletim kablolarının elektromanyetik dizaynında çok başarılı bir biçimde kullanılabilir, biraz zorlanırsa üç tabakalı iletkenlere de uygulanabiliyor ancak çok tabakalı iletkenlere uygulamak çok zordur. Bir diğer dezavantajı ise maalesef akım dağılımlarını yapmak için çok fazla iterasyon gerçekleştirilmesi gerekmesi dolayısıyla hesaplama süresinin çok uzun olmasıdır. Bu proje kapsamında çalışırken geliştirilen yönteme göre daha iyi çalışan çok tabakalı iletkenlerde elektromanyetik analiz yapabilen ve çok daha hızlı aynı prensiplere dayalı bir yöntem bulunmuştur.

4.2. Geliştirilen II. Yöntemin Sonuçları

Bu kısımda bir önceki kısımda geliştirilen yönteme alternatif yeni bir yöntem geliştirildi. Yeni geliştirilen yöntem önceki yönteme göre daha hızlı ve daha kararlı çalışmaktadır. Bu yeni geliştirilen yöntemin en önemli avantajı bir kısımda geliştirilen yöntemle yalnızca iki tabakalı ve üç tabakalı güç iletim kablolarının elektromanyetik analizi ve AA kayıpları hesaplanabiliyordu. Bu yeni yöntemle hem çok tabakalı üstüniletken kabloların hem de üstüniletken pancage bobin, motorların vs aygıtlarında elektromanyetik analizinde kullanılabilir. Kodlanması daha kolaydır. Bu rapor döneminin en önemli bulguları şunlardır:

1. Çok tabakalı üstüniletken güç iletim kablolarının dizaynında her telden geçirilen akım aynı olacak şekilde modellenmesi için yeni bir yöntem geliştirildi ve bu yeni yöntem farklı kablo topolojilerine uygulandı.
2. Üstüniletkenlerin elektromanyetik tepkisini modeller iken genellikle kritik akımın alana bağlı olduğu dikkate alınır çünkü alana bağlı kritik akım yoğunluğu ile alandan bağımsız kritik akım yoğunluğu hesaplamalarının sonucu bir birinden tamamıyla farklıdır ve alana bağlı kritik akım yoğunluğu sonuçları deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu durumun iki tabakalı üstüniletken kabloların modellenmesinde geçerli olup olmadığı sayısal olarak test edildi. Sonuçta iki tabakalı kabloların elektromanyetik davranışını modellenmesinde hem alana bağlı j_c hem de alandan bağımsız j_c aynı sonucu verdiği için hesaplamalarda kritik akım yoğunluğunun alana bağlı olmasının gerekmediği sonucuna varıldı.
3. İki tabakalı güç iletim kablolarında kablonun işlem gördüğü sıcaklığın kablodaki kayıpları nasıl etkileyebileceği nümerik olarak araştırıldı. Bunun için kritik akım yoğunluğunun sıcaklığa bağlılığı için fenomenolojik bir bağıntı kullanıldı. Üstüniletkenin geçiş sıcaklığının T_c yarısına kadar olan sıcaklıklara kadar AA kayıplarının çalışma sıcaklığından pek fazla etkilenmediği, bundan sonraki sıcaklıklarda ise sıcaklığın artması ile AA kayıplarının çok hızlı bir biçimde arttığı görüldü.
4. Bir sonraki aşamada içi boş ve içi dolu yuvarlak tellerden dizayn edilen iki tabakalı bir kablonun AA kayıpları karşılaştırıldı. Düşük akım genliklerinde içi boş telde oluşan kayıplar içi dolu tellerdekine göre çok daha düşük. Kritik akıma I_c ye yakın akımlarda ise içi boş tellerdeki kayıplar birazcık daha fazla olmaktadır.
5. Bir sonraki aşama Ferromanyetik altlık üzerinde büyütülen üstüniletken tabakalı

ikinci kuşak giydirilmiş üstüniletken şeritlerin yuvarlak bir gövde üzerine farklı şekillerde yerleştirilmesi elde edilen kablo konfigürasyonlarında oluşabilecek kayıplar karşılaştırıldı. Ferromanyetik altlık kullanılmayan yapılardaki AA kayıpları özellikle düşük akım genliklerinde FM altlık kullanılan yapılara göre çok daha düşük olduğu gösterildi. FM altlık kullanılan yapılarda ise FM yüzeylerin bir birine baktığı sırt sırta yapısındaki kayıp diğerlerine göre oldukça düşük kalmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında akım geçirilen iki tabakalı üstüniletken güç iletim kablolarının elektromanyetik analizi için iki farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler farklı kablo konfigürasyonlarına uygulandı en düşük kayıp verecek dizilim ön görülmeye çalışıldı. Bu yüksek lisans çalışmasının devamında aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilebilir:

1. Alternatif akım kayıplarında çıkan en önemli sonuç, kullanılan altlığın manyetik özelliklerinin histeresiz kayıplarına çok önemli bir etkisi vardır. Altlığın etkisi daha detaylı bir biçimde araştırılabilir.
2. Histeresiz kayıplarının yanı sıra eddy akım kayıplarında araştırılabilir.
3. Bu hesaplama yönteminde akımı eşit paylaşılma soyut olarak tartışıldı. Ancak akımı eşit paylaştırmak için teknik olarak iletken gövde üzerine ikinci kuşak kaplı iletkeni sarmak gerekiyor. Bu tezde geliştirilen yöntem kullanılarak telin hangi açıda sarılacağı hakkında bilgi verebilir.
4. Elektromanyetik davranışının yanında elektromekanik özellikleri de araştırılabilir.
5. Deneysel olarak kablo üretilip sonuçlar denenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Amemiya N , Quan L, Takeuchi K, Taketsune and Fujiwara N. 2010. AC loss characteristics of superconducting power transmission cables: gap effect and J_c distribution effect. *Supercond. Sci .Technol.*, 23:115003
- Amemiya N, Miyamoto K, Murasawa S, Mukai H and Ohmatsu K. 1998. Finite element analysis of AC loss in non-twisted Bi-2223 tape carrying AC transport current and/or exposed to DC or AC external magnetic field. *Physica C: Superconductivity*, 310:30-35.
- Amemiya N, Murasawa S, Banno N and Miyamoto K. 1998. Numerical modelings of superconducting wires for AC loss calculations. *Physica C*, 310:16-29.
- Amemiya N, Murasawa S, Banno N and Miyamoto, Numerical modellings of superconducting wires for AC loss calculations. 1998. *Physica C: superconductivity* 320: 16-29.
- Amemiya N, Nakahata M, Fujiwara N and Shiohara Y. 2010. AC losses in two-layer superconducting power transmission cables consisting of coated conductors with magnetic substrate. *Supercond. Sci. Technol.*, 23:014022(1-8).
- Barambilla R, Grilli F and Martini L. 2007. Development of an edge-element model for AC loss computation of hightemperature superconductors. *Supercond. Sci. Technol.*, 20:16-24.
- Barnes G, Mcculloch M and Dew-Huges D. 1999. Computer modelling of type II superconductors in application. *Supercond. Sci. and Technol.*, 18:518-522.
- Bean CP.1964. Magnetization of High-Field Superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 36:31-39.
- Bednorz JG and Müller KA. 1986. Possible high T_c superconductivity in the balacuo system. *Z. Phys. B Condens. Matter*, 64:189.
- Brambilla R, Grilli F, Nguyen DN, Martini L and Sirois F. 2009. AC losses in thin superconductors: integral equation method applied to stacks and windings. *Supercond. Sci. Technol.*, 22:075018(1-10).
- Brandt HE and Indenbom M. 1993. Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field. *Phys. Rev. B.*, 48:12893-12906.
- Carr WJ Jr. 1979. AC loss from the combined action of transport current and applied field *IEEE Trans. Magn.*, 15: 240-243.
- Choi S and Nah W. 2010. The AC loss estimation of Bi-2223/Ag superconductor tapes in polygonal configuration. *IEEE Trans. On Appl. Supercond.*, 20:2107-2010.

- Clem JR and Hao Z. 1993. Theory for the hysteretic properties of the low-field dc magnetization in type-II superconductors. *Phys. Rev. B* 48 13774-13783.
- Clem JR and Malozemoff AP. 2010. Theory of ac loss in power transmission cables with second generations high temperature superconductor wires. *Supercond. Sci. Technol.* 23:034014(1-6)
- Clem JR, Benkraouda M, Pe T and McDonald J. 1996. Penetration of magnetic flux and electrical current density into superconducting strips and disks. *Chin. J. Phys.*, 34:284-290.
- Coombs T A, Campbell AM, Murpy A and Emmens M. 2001. A fast algorithm for calculating the critical state in super conductors. *The international Journal for Comp. and Math. In Electrical and Elect. Engineer.* 20: 240-252.
- Daeumling M. 1999. A model for the current distribution and ac losses in superconducting multi-layer power cables. *Cryogenics*, 39:p759.
- Daeumling M. 2004. AC loss in two ac carrying superconducting concentric tubes-the duoblock model. *Physica C*, 403:57-59.
- Däumling M. 2001. Electromagnetic behavior an ac loss in a multi-layer superconducting power cable. *Cryogenics*, 41:111-115.
- Däumling M. 2004. Ac loss in two ac carrying superconducting concentric tubes-the duoblock model, *Physica C* 403:57-59.
- Farinon S, Fabbriatore P and Gömöry F. 2010. Critical state and magnetization loss in multifilamentary superconducting wire solved through the commercial finite element code ANSYS. *Supercond. Sci. Technol.* 23:115004.
- Ferrando V, Orgiani P, Pogrebnyakov AV, Chen J, Li Q, Redwing JM, Xi XX, Giencke JE, Eom C, Feng Q, Betts JB and Mielke CH. 2005. High upper critical field and irreversibility field in MgB₂ coated-conductor fibers. *Appl. Phys. Letters*, 87:252509.
- Gerber M, Bussiere JF and Morgan GH. 1976. *AIP Conf. Proc.* 34 :p84.
- Ginzburg VL and Landau L.D. 1957. *Sov. Phys. JETP*.
- Ginzburg VL and Landau LD. 1950. On the theory of superconductivity. *Zh.Eksp. Teor. Fiz.*, Oxford: Pergaman Press., 20:1064-1082.
- Gömöry F , Vojenciak M, Solovyov M and Souc J .2010. AC losses in coated conductors, *Supercond. Sci. Technol.*, 23-034012
- Gömöry F and Klincok B. 2006. Self-field critical current of a conductor with an elliptical cross-section. *Supercond. Sci. Technol.*, 19:732-737.

- Gömöry F and Inanir F. 2011. AC losses in coil wound from round wire coated by a superconducting layer. *IEEE Applied. Supercond.* 99-1.
- Gömöry F, Frolek L, Souc J, Laudis A, Kovac P and Husek I. 2001. Partitoning of transport AC loss in a superconducting tape into magnetic and resistive component. *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 11:2967-2970.
- Gömöry F, Souc J, Seiler E, Vojenciak M, Granados X. 2008. Modification of critical current in HTSC tape conductors by a ferromagnetic layer. *J of Phys.: Conf.*, 97:012096(1-6)
- Gömöry F, Vojenciak M, Pardo E and Souc J. 2009. Magnetic flux penetration and AC loss in a composite superconducting wire with ferromagnetic part. *Supercond. Sci. Technol*, 22:034017(1-10).
- Gömöry F, Vojenciak M, Pardo E and Souc J. 2009. Magnetic flux penetration and Ac loss in a composite superconducting wire with ferromagnetic parts. *Supercond. Sci Technol.*, 22:034017.
- Gömöry F, Vojenciak M, Pardo E, Solovyov M and Souc J. 2010. AC losses in coated conductors. *Supercond. Sci. Technol.*, 23:034012(1-9).
- Hamajima T, Tsuda M, Yagai T, Ozcivan AN, Shimoyama K, Aoyagi K, Soeda S. 2008. AC losses of a tria-axial superconducting cable with balanced three-phase current distributions. *Journal of Physics: Conf. Series*, 97:12253.
- Hashimoto H, Yamada T, Tani K, Honjo S, Sato Y and Ishii H. 2000. Finite element analysis of AC losses in double helix superconducting cables. *IEEE Trans. Magn.*, 36:1205-1208.
- Hong Z, Campbell AM and Coombs TA. 2006. Numerical solution of critical state in superconductivity by finite element software. *Supercond. Sci. Technol*, 19:1246-1252.
- Hong Z, Campbell AM and Coombs TA. 2007. Computer modelling of magnetisation in high temperature bulk superconductors. *IEEE, Applied Supercond.* 17:3761-3764.
- Honjo S, Mimura T, Kitah Y, Naguchi Y, Masuda T, Yumura H, Watanabe M, Ikeuchi M, Yaguichi H and Hara T. 2011. Status of superconducting cable demonstration project in Japan. *IEEE Appl. Supercond.*, 21:67-97
- Ichikawa S. 2001. Analysis of a Bi-2223/Ag multi-layered bulk sample with R-L equivalent circuit. *Physica C (357-360)*:248-251.
- Ishiyama A, Wang X, Ueda H, Yagi M, Mukoyama S, Kashima M, Nagaya S, Shiodara Y. 2008. Over-current characteristics of superconducting model cable using YBCO coated conductors. *Physica C*, 468:2041-2045.

- Jiang Z, Amemiya N and Nakahata M. 2008. Numerical calculation of AC losses in multi-layer superconducting cables composed of coated conductors. *Supercond. Sci. Technol.*, 21:025013(1-8).
- Jinggang Q and Yu W. 2010. A 3D numerical model study for superconducting cable pattern. *Fusion Engineering and Design*, 85, 109-114.
- Kajikawa K, Matawari Y, Hayashi T and Funaki K. 2004. AC loss evaluation of thin superconducting wires with critical current distribution along width. *Supercond. Sci. Technol.*, 17:555-563.
- Klincok B and Gömory F. 2006. Influence of gaps in monolayer superconducting cable on AC losses. *J. of Phys: Conf. Series*, 43 :897-900.
- London F and London H. 1935. The Electromagnetic Equations of the Supraconductor. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A – Mathematical and Physical Sciences*, 149:71–88.
- Ma B and Balachandran U. 2006. Prospects for the fabrication of low aspect ratio coated conductors by inclined substrate deposition. *Supercond. Sci. Technol.*, 19:497-502.
- Maeda H., Tanaka Y, Fukutomi M and Asano T. 1988. A new high T_c oxide superconductor without a rare earth element. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27: 209–210.
- Malozemoff AP, Snitchler G and Matawari Y. 2007. Tape-width dependence of AC losses in HTS cables. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19-3115-3118
- Matthias BT, Geballe TH, Geller S and Corenzwit E. 1954. Superconductivity of Nb₃Sn. *Phys. Rev.*, 95:1435.
- Mawatari Y and John C. 2006. Analytical model of the response of a superconducting film to line currents. *Phys. Rev. B* 74:144523.
- Mawatari Y, Malozemoff AP, Teruo Izumi, Keiich T, Noboru F and Yuh S. 2010. Hysteretic ac losses in power transmission cables with superconducting tapes: effect of tape shape. *supercond. Sci. Technol.*, 23-025031(1-4)
- Mawatari Y. 2008. Magnetic field distributions around superconducting strip on ferromagnetic substrate. *Phys. Rev. B*, 77:104505.
- Mawatari Y. 2009. Field distributions in curved superconducting tapes conforming to carrying transport current. *Phys. Rev. B* 80:184508.
- Mawatari Y. 2011. Superconducting tubular wires in transverse magnetic fields. *Phys Rev. B*, 83:134512.

- Miyagi D, Iwata S, Takahashi N, Tori S. 2007. 3D FEM analysis of effect of current distribution on AC loss in shield layers of multi-layered HTS power cable. *IEEE Trans. On Appl. Supercond.*, 17:1696-1699.
- Miyagi D, Umabuchi M, Takahashi N and Tsukamoto O. 2007. Study of AC transport current loss assembled HTS coated -conductors with ferromagnetic substrate using FEM. *Physica C*, 463-465:785-789.
- Miyagi D, Umabuchi M, Takahashi N and Tsukamoto O. 2007. Study of AC transport current loss of assembled HTS coated-conductors with ferromagnetic substrate using FEM. *Physica C*, 465:785-789.
- Miyagi D, Wakatsuki T, Takahashi N, Nori S and Ueda K. 2004. 3D finite element analysis of current distribution in HTS power cable taking account of E - J power law characteristic. *Trans. Magn.*, 40:908-911.
- Morandi A, Cristofolini A, Fabbri M, Negrini F, Ribani PL. 2001 Current distribution in composite superconducting system by means of an equivalent circuit model based on a smooth E - J equivalent material characteristic. *EUCAS-2001. Copenhagen*. 243-244.
- Mukoyama S, Miyoshi K, Tsubouti H, Mimura M, Uno N, Ichiyanagi N, Tanaka Y, Ikeda M. 1997. 50-m long HTS conductor for power cable. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 7:1069-1071.
- Mukoyama S, Yagi M, Fujiwara N and Ichikawa H. 2010. Conceptual design of 275 kV class high- T_c Superconducting cable. *Physica C*, 470:1563-1566.
- Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, Zenitani Y and Akimitsu J. 2001. Superconductivity at 39K in Magnesium diboride. *Nature*, 410:63-64.
- Nguyen DN, Ashworth SP, Willis JO, Sirois F and Grilli F. 2010. A new finite-element method simulation model for computing AC loss in roll assisted biaxially textured substrate YBCO tapes. *Supercond. Sci. Technol.*, 23:025001(1-5).
- Noji H, Ooyama S and Nakajima K. 2004. Effective helical-pitch adjustment in a high- T_c superconducting cable for reducing AC loss. *Physica C*, (412-414):1206-1211.
- Noji H, Ooyama S and Nakajima K. 2004. Reduction of alternating current loss in a high- T_c superconducting transmission cable by means of helical pitch adjustment, *Cryogenics*, 44:1511-157.
- Noji H. 2009. Numerical study on self-field losses of 30 m BSCCO HTS transmission cable. *Cryogenics*, 49:34-38.
- Norris WT. 1970. Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets. *J. Phys. D.*, 3:p489.

- Odier P, Allais A, Millan C, Morlens S, Ortega L, Jimenez C, Porcar L, Chaud X, Chaudouet P, Pairis S, Tixador P and Soubeyroux JL. 2009. New YBCO superconducting wires obtained from narrow textured tubes. *Supercond. Sci. Technol.* 22-125024.
- Ozawa T and Kuzlarich M. 2008. Chemistry of layered d-metal pnictide oxides and their potential as candidates for new superconductors. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9:03303(1-11).
- Pi W, Yin-Shun W, Jin D and Lei C. 2010. AC alternating-current loss analyses of a thin high-temperature superconducting tube carrying AC transport current in AC external magnetic field., *Chin. Phys. Lett.* 27 37401.
- Portone A, Rubinacci G, Villone F and Zamboni W. 2007. Electromagnetic 3D analysis of an ITER full-size cable –in-conduit conductor samle. *Supercond. Sci. Technol.*, 20 :1032-1045.
- Quan L, Amemiya N, Katsutoku T, Nakamura T and Fujiwara N. 2010. AC loss characteristics of superconducting power transmission cables: gap effect and J_c distribution effect. *Supercond. Sci, Technol*, 23:115003.
- Rossi L and Todesco E. 2006. Electromagnetic design of superconducting quadrupoles. *Phys. Rev. Special topics*, 9:102401(1-20)
- Rostilla L, Lehtonen J, Masti M and Mikkonen R. 2006. Fault current analysis for superconducting 1kA YBCO cable. *J. of Phys: Conf. Series*, 43:865-868.
- Rostilla L, Letonen J, Masti M and Mikkonen R. 2006. Circuit analysis model for AC loss of superconducting YBCO cable. *Cryogenics*, 46:245-251.
- Sato S and Amemiya N. 2005. Elecromagnetic field analysis of an YBCO coated conductor exposed to the non-uniform magnetic field in superconducting cables. *Physica C*, 432:215-222.
- Sekine N, Tsukamoto O, Utsunomiya A and Miyagi D. 2005. Dependence AC magnetization losses in thin film superconductor tape on J_c distribution along tape width. *Physica C*, 426–431:1284–1289.
- Siahrang M and Sirois F. 2011. Reduction of AC losses in HTS power transmission cables made of coated conductors by overlapping the tapes. *Supercond. Sci. Technol.*, 24-015004.
- Siahrang M, Sirois F, Grilli F, Babic S and Brault S. 2010. A new numerical approach to find current distribution and AC losses in coaxial assembly of twisted HTS tapes in single layer arrangement. *Journal of Physics: Conference Series*, 234:022034.
- Sim K, Kim S, Lee S, Cho J and Ko TK. 2010. The estimation of the current distribution on the HTS cable by measuring the circumferential magnetic field. *IEEE Trans. On Appl. Supercond.*, 20:1981-1984.

- Sjöström M. 2001. Hysteresis Modelling of high Temperature Superconductors. Ph.D Thesis No. 2372 Swiss Federal Institute of Technology. Lausanne.
- Soika R. 2010 . Superconducting electrical cable, European Patent EP2234122.
- Stavrev S, Grilli F, Dutoit B and Ashworth S. 2006. Finite-element analysis and comparison of the AC loss performance of BSCCO and YBCO conductors. J. of Phys. Conf Series: 43:581-586.
- Takacs S. 2010. AC loss in superconductors shielded by a normal metal or another superconductor. Supercond. Sci. Technol. 23:65023.
- Terzieva S, Vojenciak M, Pardo E, Grilli F, Drechsler A, Kling A, Kudymow A, Gömöry F and Goldacker W. 2010. Transport and magnetization ac losses of ROEBEL assembled coated conductor cables: measurements and calculations. Supercond. Sci. Technol.. 23:014023(1-8)
- Tominaka T. 2009. Current and field distributions of a superconducting power transmission cable composed of helical tape conductors. Supercond. Sci. Technol., 22:125025(1-10)
- Ueda H, Wang X, Ishiyama A, Mukoyama S, Yagi M, Kashima N, Nagaya S and Shiohara Y. 2008. Overcurrent characteristics of 1m long superconducting model cable using YBCO coated conductors. J. of Phys.: conf. Series, 97:012168(1-6).
- Umabuchi M, Miyagi D, Takahashi N, Tsukamoto O. 2008. Analysis of AC loss properties of HTS coated-conductor with magnetic substrate under external magnetic field using FEM. Physica C, 468:1739-1742.
- URL-1, 2012. <http://www.superpower-inc.com/content/superpower-announces-progress-albany-hts-cable-project>.
- URL-2, 2012. <http://www.superpower-inc.com/files/T365+Peer+Rev+Cable+Status.pdf>.
- URL-3 2012. <http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/aug/24/probing-the-cosmic-ray-climate-link>.
- Vellego G and Metra P. 1995. An analysis of the transport losses measured on HTSC single-phase conductor prototypes. Supercond. Sci. Technol. 8:476-483.
- Vellego G and Metra P. 1995. An analysis of the transport losses measured on HTSC single-phase conductor prototypes. Supercond. Sci. Technol. 6 :p476.
- Vojenciak M, Souc J and Gömöry F. 2011. Critical current and AC loss analysis of a superconducting power, transmission cable with ferromagnetic diverters. Supercond. Sci. Technol., 24:075001.
- Wesche R, Anghel A, Jakob B, Pasztor G, Schindler R and Vecsey G. 1999. Design of superconducting power cables. Cryogenics 39-767-775.

- Wilson MN. 1983. Superconducting Magnets. Oxford Science Publication, Clarendon Press, Oxford.
- Wu G, Xie YL, Chen H, Zhong M, Liu RH, Shi BC, Li QJ, Wang XF, Wu T, Yan YJ, Ying JJ and Chen XH. 2009. Superconductivity at 56 K in Samarium-doped SrFeAsF. Condensed matter, 21:142203.
- Wu MK, Ashburn JR, Torng CJ, Hor PH, Meng RL, Gao L, Huang ZJ, Wang YQ and Chu CW. 1987. Superconductivity at 93 k in a new mixed-phase y-ba-cu-o compound system at ambient pressure. Phys.Rev. Lett., 58:908–910.

ÖZGEÇMİŞ

Mevlüt OKUTAN, 1972 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 1994 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Öğretmenliği Bölümünden mezun oldu. 2009 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans eğitimine başladı.

1994 yılından bu yana Özel Öğretim Kurumlarının her kademesinde görev almış olup yabancı dili İngilizcedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır.