

**T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİNCİ KUŞAK GIYDIRILMIŞ İLETKENLERDEN DİZAYN
EDİLEN ÇOK TABAKALI HTSC GÜÇ İLETİM KABLOLARINDA
ALTLIK MANYETİZMASININ AC KAYIPLARA ETKİSİ**

Hüseyin KANBUR

TEZ DANIŞMANI

YRD. DOÇ. DR. NİLAY AKÇAY

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. FEDAİ İNANIR

TEZ JÜRİLERİ

PROF. DR. ZUHAL OKTAY COŞKUN

PROF. DR. MEHMET ŞAHİN

DOÇ. DR. MURAT TOMAKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

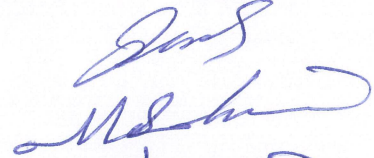
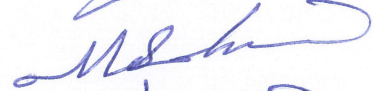


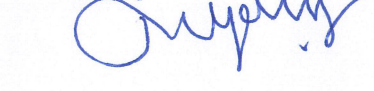
RİZE 2015


Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİNCİ KUŞAK GIYDIRILMIŞ İLETKENLERDEN DİZAYN EDİLEN ÇOK
TABAKALI HTSC GÜÇ İLETİM KABLOLARINDA ALTLIK MANYETİZMASININ
AC KAYIPLARINA ETKİSİ**

Yrd. Doç. Dr. Nilay AKÇAY danışmanlığında ve Doç. Dr. Fedai İNANIR'ın ikinci danışmanlığında, Hüseyin KANBUR tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 28 / 09/ 2015 tarihinde FİZİK Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

| Jüri Üyeleri | Unvanı Adı Soyadı | İmzası |
|---------------------|---------------------------------|--|
| Başkan | : Prof. Dr. Zuhale Oktay COŞKUN |  |
| Üye | : Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN |  |
| Üye | : Doç. Dr. Fedai İNANIR |  |
| Üye | : Doç. Dr. Murat TOMAKİN |  |
| Üye | : Yrd. Doç. Dr. Nilay AKÇAY |  |


Prof. Dr. Selami ŞAŞMAZ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

“İkinci Kuşak Giydirilmiş İletkenlerden Dizayn Edilen Çok Tabakalı HTSC Güç İletim Kablolarında Altlık Manyetizmasının AC Kayıplara Etkisi” başlıklı bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Bu tez çalışması TÜBİTAK-110T876 nolu proje tarafından desteklenerek hazırlanmıştır. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Araştırma konumun seçilmesinde, çalışmaların planlanmasında ve verilerin değerlendirilmesinde her türlü desteğini gördüğüm ve çalışmanın tamamlanabilmesi için her türlü laboratuvar imkânlarını sunan Doç. Dr. Fedai İNANIR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Diğer bir teşekkürümü de, tüm çalışmalarım sırasında yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen Fen Edebiyat Fizik bölümünde görev yapan Yrd. Doç.Dr. Nilay AKÇAY’a, Prof.Dr. Mehmet ŞAHİN’e Doç.Dr. Murat TOMAKİN’e Mühendislik fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliğinde görev yapmakta olan Prof. Dr. Zuhale Oktay COŞKUN’a Doç. Dr. Can Coşkun’a, Merkez Araştırma Laboratuvarında Uzm. Soner TOKÇALAR’a teşekkür ederim.

Çalışmalarımın ve akademik hayatımın her anında, her türlü maddi ve manevi destekleriyle bana her zaman güç veren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin KANBUR

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “İkinci Kuşak Giydirilmiş İletkenlerden Dizayn Edilen Çok Tabakalı HTSC Güç İletim Kablolarında Altlık Manyetizmasının AC Kayıplara Etkisi “ başlıklı bu tezin Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 28/09/2015

Hüseyin KANBUR

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

ÖZET

İKİNCİ KUŞAK GIYDIRILMIŞ İLETKENLERDEN DİZAYN EDİLEN ÇOK TABAKALI HTSC GÜÇ İLETİM KABLOLARINDA ALTLIK MANYETİZMASININ AC KAYIPLARA ETKİSİ

Hüseyin KANBUR

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Yrd.Doç. Dr. Nilay AKÇAY

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, kablounun kesit alanında şeritlerin geometrik düzenlemesi, üstüniletkeni kaplama malzemesinin elektronik ve manyetik özellikleri, sarılma açısı vb. Kablounun üretim aşamasında, akım taşıma kapasitesini 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.. 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 Tez; daha önceki çalışmalarda geliştirilen metodun ferromanyetik malzeme ile kaplanmış şeritlerden oluşan kablolar için akı, akım ve aa kayıplarının hesaplanmasına uygulanmıştır. Bu tez TÜBİTAK 110T876 nolu proje ile desteklenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Üstüniletken, Ferromanyetik Malzeme, Güç iletim Kablosu
2015, 109 sayfa

ABSTRACT

EFFECT OF BASE MAGNETISM TO AC LOSSES ON MULTI-LAYER HTSC POWER TRANSMISSION CABLES DESIGNED WITH SECOND GENERATION COATED CONDUCTORS

Hüseyin KANBUR

**Recep Tayyip Erdoğan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Master Thesis
Supervisor: Assoc. Yrd.Doç.Nilay AKÇAY**

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. 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. 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. This thesis was applied for the loss calculation of cables, which was developed in previous studies, constituted with ferromagnetic coated lines in terms of flux, current and alternative current.

This thesis was supported by TUBİTAK project number: 110T876

2015, 109 pages

Keywords: Superconductor, ferromagnetic substance, Power Transmission Cable

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ÖNSÖZ..... | I |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ..... | II |
| ÖZET..... | III |
| ABSTRACT..... | IV |
| İÇİNDEKİLER..... | V |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | VIII |
| TABLolar DİZİNİ..... | XIV |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1. Giriş..... | 1 |
| 1.2. Türkiye'nin Enerji Arz Güvenliği ve Enerji Senaryoları..... | 1 |
| 1.3. Türkiye'nin ve Dünyanın Enerji Tüketimleri..... | 2 |
| 1.4. Türkiye'nin 2030 İle İlgili Enerji Senaryoları..... | 4 |
| 1.5. Güç Transmisyon ve Dağıtımındaki Kaybolan Elektrik Enerjisi..... | 5 |
| 1.6. Güç Sistemi İçinde Yüksek Sıcaklık SüperiletkenKablo Kullanımı..... | 6 |
| 1.6.1. Süperiletken Materyaller..... | 6 |
| 1.6.2. Kritik Manyetik Alan (H_c) :..... | 6 |
| 1.6.3. Kritik Akım (I_c)..... | 7 |
| 1.6.4. Kritik Sıcaklık (T_c)..... | 7 |
| 1.7. Süperiletkenlerin Sınıflandırılması..... | 8 |
| 1.7.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri..... | 8 |
| 1.7.2. Düşük sıcaklık süperiletkenleri..... | 9 |
| 1.7.3. Tip 1 Süperiletkenler..... | 9 |
| 1.7.4. Tip 2 Süper İletkenler..... | 9 |
| 1.7.5. HTS Kablonun Avantajı..... | 10 |
| 1.7.6. Mevcut Çalışma..... | 10 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 12 |
| 2.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletken Kablo Tasarım Konsepti..... | 12 |
| 2.2. HTS Kabloların Üretimi ve Pratik Kullanımı..... | 15 |
| 2.3. Ac Kaybı ve Hts Kablo Yapısı..... | 16 |
| 2.3.1. HTS Kabloda Ac Kaybı..... | 16 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.3.2. | Histereviz Kaybı | 16 |
| 2.3.3. | Girdap Akım Kaybı | 17 |
| 2.3.4. | Taşıma Akım Kaybı..... | 17 |
| 2.3.5. | HTS Kablo Yapısı..... | 18 |
| 2.3.6. | Çekirdek..... | 19 |
| 2.3.7. | HTS Tel..... | 19 |
| 2.3.8. | Yüksek Gerilim Dielektrik..... | 19 |
| 2.3.9. | Koruyucu Katman..... | 20 |
| 2.3.10. | Soğutma | 20 |
| 2.3.11. | Krisyostat Duvar | 20 |
| 2.3.12. | Isı Süper Yalıtım..... | 20 |
| 2.4. | Sonlu Eleman Tarafından Kısmi Diferansiyel Denklem Yöneten Ayrıklaştırılması Yöntemi Ve Sonlu Farklar Yöntemi | 21 |
| 3. | BULGULAR..... | 30 |
| 3.1. | Üstün iletkenler için kayıp neden önemlidir? | 30 |
| 3.2. | U Profiline Sahip Ferromanyetik Malzeme İle Kaplanmış İkinci Kuşak İletkenlerden Yapılan Güç İletim Kablolarında AA Kayıplar..... | 30 |
| 3.3. | Yüksek Sıcaklık Üstüniletken Kablolarda Ferromanyetik Saptırıcıların Transport Akım Kayıplarına Etkisi | 38 |
| 3.4. | Ferromanyetik Altlıklı İkinci Kuşak Tellerden Şerit-Boşluk Yapısında Dizayn Edilen Kablolarda Kayıplar | 44 |
| 3.5. | Akım Paylaşımının Alternatif Akım Kayıplarına Etkisi..... | 50 |
| 3.6. | Çok Tabakalı Üstüniletken Güç İletim Kablolarında AA Kayıplarının Karşılaştırılması..... | 54 |
| 3.7. | Deneysel Verilerle Karşılaştırma | 60 |
| 3.8. | Çok Tabakalı Silindiriksel Hts Güç İletim Kablolarında Altlık Manyetizmasının Ve Şerit Diziliminin Alternatif Akım Kayıplarına Etkisi ... | 67 |
| 3.8.1. | Sayısal Modellemenin Ana Hatları..... | 69 |
| 3.9. | Manyetik Altlıklı Ve Altlıksız İkinci Kuşak Üstüniletken Şeritlerden Yapılan Güç İletim Kablolarında Akı İndüklemesi Sonucu Oluşan Stresin İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi | 80 |
| 3.9.1. | Modelleme | 81 |

| | |
|--|-----|
| 3.10. İçi Boş Ve İçi Dolu Silindirik Üstüniletkenlerden Yapılan Bobinlerde AA Kayıplarının Karşılaştırılması..... | 91 |
| 3.10.1. Hesaplama Yöntemi..... | 93 |
| 3.10.2. AA kayıp Hesabı..... | 96 |
| 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR | 99 |
| 5. ÖNERİLER..... | 101 |
| KAYNAKLAR | 102 |
| ÖZGEÇMİŞ | 109 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1. Bölgesel Enerji Tüketim Miktarları, 2006–2030 | 2 |
| Şekil 2. Dünya Enerji Tüketim Miktarları, 2006–2030..... | 2 |
| Şekil 3. Yakıt Tiplerine göre Dünya Enerji Tüketim Miktarları, 1980–2030 | 3 |
| Şekil 4. Türkiye'nin Enerji Tüketim Miktarları, 2003–2020 | 4 |
| Şekil 5. Tip 1 ve Tip 2 süper iletkenlerin ana diyagramları | 9 |
| Şekil 6. Yüksek sıcaklık süperiletken kablo çekirdeğinin şematik bir diyagramı | 12 |
| Şekil 7. Multi katman yüksek sıcaklık süperiletken kondüktörü..... | 13 |
| Şekil 8. HTS kablonun mono blok ve çoklu model şematik gösterimi | 14 |
| Şekil 9. a-3 ayrı koaksiyel aşama b-triad koaksiyel kablo c-triaksiyel kablo..... | 14 |
| Şekil 10. Yüksek sıcaklık süperiletken kablonun Nexan tarafından şematik diyagramı | 18 |
| Şekil 11. Doğrusal üçgen elemanı | 24 |
| Şekil 12. (a) Hesaplamalarda dikkate alınan kablo geometrisi (b) kablolarda kullanılacak iletkenlerin biçimi. | 33 |
| Şekil 13. Farklı nispi genlikler için üstüniletkenlerde oluşan kayıpların karşılaştırılması | 35 |
| Şekil 14. (a) Manyetik olmayan yani $\mu_r=1$ ve kuvvetli ferromanyetik malzeme ile kaplanmış $\mu_r=5000$ için üstüniletken etrafındaki manyetik potansiyel dağılımı. Ferromanyetik kısım manyetik alanı üzerine toplamaktadır. Kuvvetli FM yapı için manyetik alanın dik bileşeni artmakta oysa özellikle dıştaki iletken için U'ların arasında kalan bölgede manyetik alanın yatay bileşeni çok daha baskın olmaktadır | 36 |
| Şekil 15. (a) Manyetik olmayan bir malzeme ile kaplanmış ($\mu_r=1$) ve (b) yatık U- biçiminde kuvvetli ferromanyetik ($\mu_r=5000$) malzeme ile kaplanmış üstüniletkenler üzerindeki iki boyutta akım yoğunluğu dağılımları. Manyetik olamayan malzeme ile kaplı kablolarda indüklenen akım numunenin merkezinden akıyorken diğerinde numenin kenarlarından akmayı tercih etmektedir. Dikkat edilirse FM kaplı yapı için hem üstteki iletken de hem de attaki iletkende akım dağılımı daha homojen olmaktadır..... | 37 |

| | |
|---|----|
| Şekil 16. Bir önceki şekil kullanılarak, tek boyutta kablonun dış tabakasında akan akımların ($\mu_r=1$ ve $\mu_r=5000$) karşılaştırılması. | 37 |
| Şekil 17. Benzeşimlerde kullanılan ferromanyetik (FM) saptırıcılı iletken dizilimi. Yan yana iki üstüniletken arasındaki boşluğa gelecek şekilde ferromanyetik saptırıcılar yerleştirilmiştir. wSC, üstüniletkenin eni, hSC üstüniletkenin boyu, wT ferromanyetik şeridin eni ve hT ise FM şeridin boyudur. | 39 |
| Şekil 18. $\mu_r = 1$ ve $\mu_r = 5000$ seçilerek kablo üzerindeki toplam transport akım kayıpları. | 41 |
| Şekil 19. Her iki yapılanma için içteki ve dıştaki iletkenlerde hesaplanan kayıpların karşılaştırılması | 42 |
| Şekil 20. (a) $\mu_r = 1$ (b) $\mu_r = 5000$ için üstüniletken kabloları oluşturan iletkenler etrafındaki manyetik potansiyel dağılımı. | 43 |
| Şekil 21. (a) $\mu_r = 5000$ (b) $\mu_r = 1$ içteki iletkenlerde ve dıştaki iletkenlerde oluşan akım dağılımı | 44 |
| Şekil 22. Hesaplamalarda şerit dizilimi (a) Sırt – Sırta (SS) (b) Yüz-Yüze (YY) yapısı. | 46 |
| Şekil 23. Uygulanan transport akımın maksimum genliğine karşı YY ve SS yapılarında oluşan kayıplar. | 48 |
| Şekil 24. (a) SS yapısı vektör potansiyeli ve içteki iletkenlerden geçen akım profili (b) YY dizilimi vektör potansiyeli ve akım profili. SS yapısında dıştaki iletkenin maruz kaldığı manyetik alanın teğetsel bileşeni YY yapısına göre daha baskındır. Bu manyetik alanın iletken tabakaya daha az nüfuz etmesine dolayısıyla akımın daha az bozulmasına neden olmaktadır. | 49 |
| Şekil 25. Şerit-Şerit yapısında sırt – sırta dizilimi ile yüz – yüze diziliminde oluşan kayıpların karşılaştırılması. | 50 |
| Şekil 26. Hesaplamalarda kullanılan geometri. I_a alttan geçen akımı I_{ii} ise üstteki iletkenlerden geçen akımı göstermektedir. | 49 |
| Şekil 27. Üstteki ve alttaki iletkenlerden geçirilen akımın oranlarına karşı ortaya çıkan kayıp. | 53 |
| Şekil 28. Benzeşimlerde kullanılan 1, 2, 3, ve 5 tabakalı kablolar. Hesaplamalarda yalnızca kabloların kesit alanı dikkate alınmıştır. Bütün kablo modellerinde tabakalar arasındaki mesafe eşit ve 1 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bütün kabloların 20 mm mesafesindeki bir gövde üzerine sarıldığı göz önüne alınmıştır. | 55 |

| | |
|---|----|
| Şekil 29. Tek ve çok tabakalı kablolarda uygulanan akımın maksimum genliğine karşı AA kaybı. Burada akım I_c ile kayıp πd_c^2 ile normalize edilmiştir | 57 |
| Şekil 30. 1, 2, 3 ve 5 tabakalı kablolarda manyetik alan dağılımı (sabit vektör potansiyeli ile temsil ediliyor. Hesaplama 12.5 A akım için yapılmıştır.) | 58 |
| Şekil 31. Beş tabakalı kablo diziliminde uygulanan akıma karşı her bir tabakadaki kayıpların karşılaştırılması | 58 |
| Şekil 32. (a) Beş tabakalı kabloda $I_a=12.5$ A için her bir iletkeninden geçen akım miktarını gösteriyor. Kritik akım yoğunluğuna yakın daha yüksek akım tabakanın daha fazla içine nüfuz etmiştir. (b) iletkenin kenarlarındaki akım dağılımını daha net göstermek için verilmiştir..... | 59 |
| Şekil 33. Hesaplama kullanılan geometrinin şekli..... | 62 |
| Şekil 34. (Bean, 1962) 'de verilen AC kayıp eğrisi..... | 65 |
| Şekil 35. (a)Üstüniletkenlik kaybı, (b) ferromanyetik kaybın (c) toplam kaybın (BEAN vd.,1962) den çıkartılan veriler ile geliştirilen yöntemin karşılaştırılması sonuçlarının karşılaştırılması. | 67 |
| Şekil 36. Hesaplamalarda kullanılan kablo dizilimleri. Soldan itibaren bu dizilimler model A, model B ve model C olarak isimlendirilmiştir. Model A'da altlığın manyetik geçirgenliği $\mu_r=1$, model B ve C ise nisbi geçirgenlik alandan bağımsız ve sabit $\mu_r=1000$ olarak alınmıştır. Burada w_{UI} ve h_{UI} üstüniletken tabakanın sırasıyla genişliği ve yüksekliği; w_T ve h_T altlığın genişliği ve yüksekliği; $d \sim 1$ ise tabakalar arası mesafeyi betimlemektedir..... | 70 |
| Şekil 37. Model A, B ve C için uygulanan akımın genliğine karşı toplam kayıp eğrisi. Sonuçlar ayrıca Norris stripe analitik formülü karşılaştırılıyor. Burada kırmızı çizgilerle gösterilen I1, I2, I3 kaybın nasıl değiştiği gösteren doğrulardır. | 75 |
| Şekil 38. Sırasıyla Model A, B, ve C dizilimleri için, kablonun $2\pi/N$ kadarlık diliminde şeritler üzerinde ve etrafında manyetik alanı temsil eden vektör potansiyeli dağılımı. Her iki kontör arasındaki değer 2×10^{-5} W/m dir. Kabloya uygulanan akımın genliği 75 A ve anlık geçen akımın değeri 46.762 A dir. | 75 |
| Şekil 39. Model B yapısında birbirine bakan iki üstüniletken tabaka etrafında manyetik alan dağılımın şematik gösterimi. | 76 |
| Şekil 40. (a) Model A, (b) Model B ve (c) Model C kablo dizilimleri için tabakalar arası transport alternatif akım kayıplarının karşılaştırılması. | 78 |

- Şekil 41.** Hesaplamlarda kullanılan iki tabkalı kablo yapısı. Hesaplamlarda üç farklı kablo dizaynı göz önüne alınmıştır. Ferromanyetik altlıklı şeritlerden yapılan üstüniletken tabakaların bir birine baktığı yapıya yüz-yüze (YY) (üstteki), ferromanyetik altlığın bir birine baktığı yapıya sırt-sırta (BB) yapısı denilmiştir (alttaki). Ayrıca altlığın ferromanyetik olmadığı yapı (ortadaki)'dir..... 82
- Şekil 42.** Farklı akım değerleri için manyetik olmayan altlıklı ($\mu_r = 1$) üstüniletken tabaka içerisindeki stres dağılımı..... 85
- Şekil 43.** (a) Manyetik olmayan altlık $\mu_r=1$ (b) manyetik altlıklı $\mu_r=5000$ yüz-yüze (YY) yapısı (c) manyetik altlıklı $\mu_r=5000$ sırt-sırta (SS) dizilimleri için iki tabkalı üstüniletken şeritte radyal olarak iç ve dış tabakalarda x-yönündeki stres dağılımı karşılaştırılmalı olarak gösteriliyor. 87
- Şekil 44.** (a) Manyetik olmayan altlıklı $\mu_r=1$ (b) manyetik altlıklı $\mu_r=5000$ yüz-yüze (YY) şerit dizilimli ve (c) sırt-sırta (SS) şerit dizilimli kablo yapıları için yalnızca kablonun $2\pi/N$ diliminde iki tabakanın üst üste geldiği şeritlerin etrafındaki manyetik alanı temsil eden manyetik potansiyel dağılımı. Oklar self manyetik alanın yönünü göstermektedir. Şekil 3'deki ile aynı akım değerinde çizdirilmiştir. Kontörler 6×10^{-5} Wb/m skalasındadır. 89
- Şekil 45.** Üç boyutta manyetik olmayan altlıklı üstüniletken tabakada meydana gelen stress dağılımı. 90
- Şekil 46.** Hesaplamlarda kullanılan iki tür üstüniletken teller 91
- Şekil 47.** Üstüniletken selenoid geometrisi. Hesaplamlarda (r, z, θ silindiriksel koordinat sistemi kullanıldı. silindiriksel simetriden dolayı sonuçlar her θ için özdeş olacaktır. Bu yüzden dairesel koordinat θ ihmal edilebilir. Akım ve alan dağılımı koyulaştırılmış bölge için yapıldı (sağ üst taraf). Selonoidin üst yarısı ($z>0$) için bulunan sonuçlar diğer ($z<0$) alt yarısına genelleştirilebilir. 92
- Şekil 48.** İçi dolu yuvarlak tellerden (İDT) yapılan bobinler (üst taraftaki) ve içi boş tellerden (İBT) yapılan bobinler (alt taraftaki) için hesaplanan akım yoğunluğu dağılımları (siyah ve gri ile birlikte beyaz renkler zıt yönlü akım yoğunluğunu temsil ediyor)..... 94
- Şekil 49.** İçi dolu yuvarlak tellerden yapılan bobinler (üst taraftaki) ve içi boş tellerden yapılan bobinler (alt taraftaki) için hesaplanan akım yoğunluğu dağılımları (siyah ve gri ile birlikte beyaz renkler zıt yönlü akım yoğunluğunu temsil ediyor). Her iki şekilde maksimum akımın genliğinin kritik akımın %98'ine karşılık gelen $I_{max}=98$ A olduğu durumda bobin akımının tam $I_{bobin}=0$ geldiği anda elde edildi. Siyah çizgiler sabit vektör potansiyelini gösteriyor. 96

Şekil 50. Standart içi dolu (kesikli çizgi) ve içi boş (düz çizgi) yuvarlak tellerden dizayn edilen bobinler için hesaplanan AA kayıp davranışlarının karşılaştırılması. Her iki telinde yarı çapı aynıdır, ayrıca içi boş kaplı tel için kalınlık/tel yarı çapı oranı $\eta=0.1$ olarak seçilmiştir. 97

TABLULAR DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 1. Farklı süperiletken malzemelerin geçiş sıcaklıkları | 8 |
| Tablo 2. Hesaplamalarda kullanılan parametreler. | 32 |
| Tablo 3. Benzeşimi yapılan kablonun geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri..... | 47 |
| Tablo 4. Benzeşimlerde kullanılan parametreler | 55 |
| Tablo 5. Kablonun geometrik özellikleri | 61 |
| Tablo 6. Ferromanyetik altlığın geçirgenliği | 62 |
| Tablo 7. Kritik akım yoğunluğu parametreleri | 64 |
| Tablo 8. Modelleme hesabında seçilen kabloların parametreleri. Model A, B ve C de daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için bütün parametreler aynı seçildi. | 71 |
| Tablo 9. Hesaplamalarda kullanılan parametreler. | 83 |

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

1.2. Türkiye'nin Enerji Arz Güvenliği ve Enerji Senaryoları

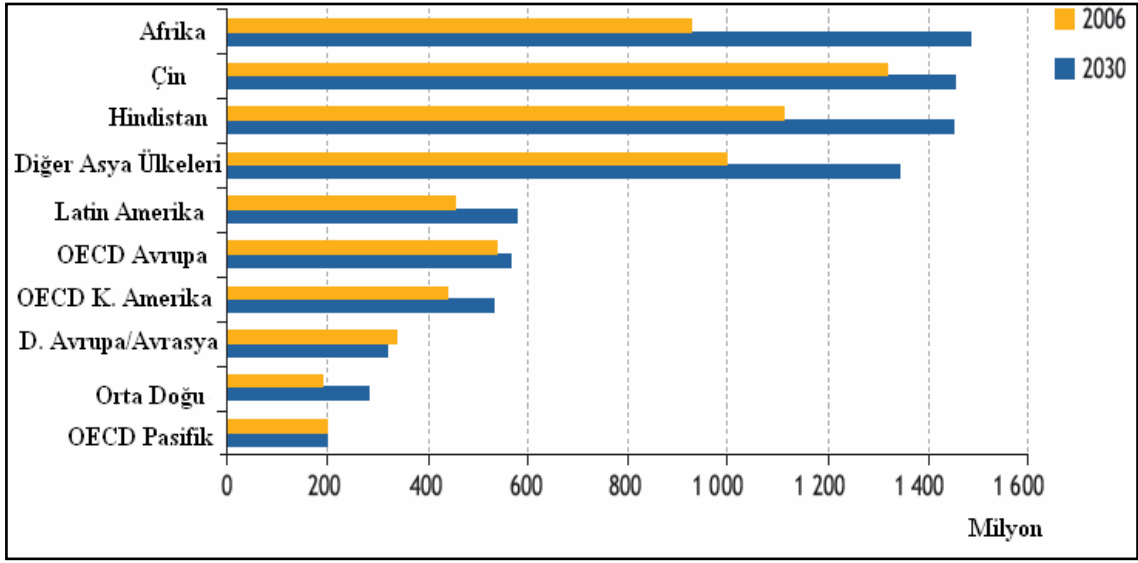
Ülkelerin toplumsal gelişmelerinin getirdiklerinin yanında enerji tüketimi gelmektedir. Ülkelerin gelişmişlik düzeyinin ölçütlerinden biri de kişi başına tüketilen enerji miktarıdır. Bu nedenle, ülkenin ve enerji sektörünün yönetimini üstlenenler toplumun ve ekonominin gereksinim duyduğu enerjiyi yeterli, kaliteli, sürekli, düşük maliyetli ve çevre ile uyumlu bir şekilde tüketicilerine sunmak yükümlülüğündedirler. Ayrıca, ülkenin enerji arz güvenliği açısından da bu kaynakları çeşitlendirmek zorundadırlar.

Enerji, günümüzde siyasi arenada en çok konuşulan kavramların yanında gelmektedir. Enerjinin dünya gündeminde önemini artırması ile birlikte gelecekte enerji ile ilgili karşılaşılabilecek sorunlara verilebilecek yanıtlardan biri de enerji senaryolarıdır. Enerji senaryoları ile gelecek tahmini yapılmayıp, alternatif gelecek kurguları incelenmektedir. Senaryolar; geleceği tahmin etmek yerine, olasılıkları hikâyeler şeklinde incelemek için kullanılır ve onlar sayesinde uygun stratejiler geliştirilir. Senaryolar alternatif gelecek yansımalarını irdelerler. Temelde belirsizlikler incelenir, bu belirsizlikler ekseninde gelecek kurguları çıkarılır ve gelecek politikaları etkileyecek parametrelerin hareket yönleri saptanmaya çalışılır [1]. Ülkemizde 2030 yılına kadar enerji arz güvenliği ve enerji senaryolarını belirleyebilmek için, öncelikle Dünya'nın ve Türkiye'nin enerji ihtiyaçları, birincil enerji kaynaklarının durumu, yeni nesil ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki gelişmeler ve enerji temini ile ilgili teknolojik gelişmeler incelenmiştir.

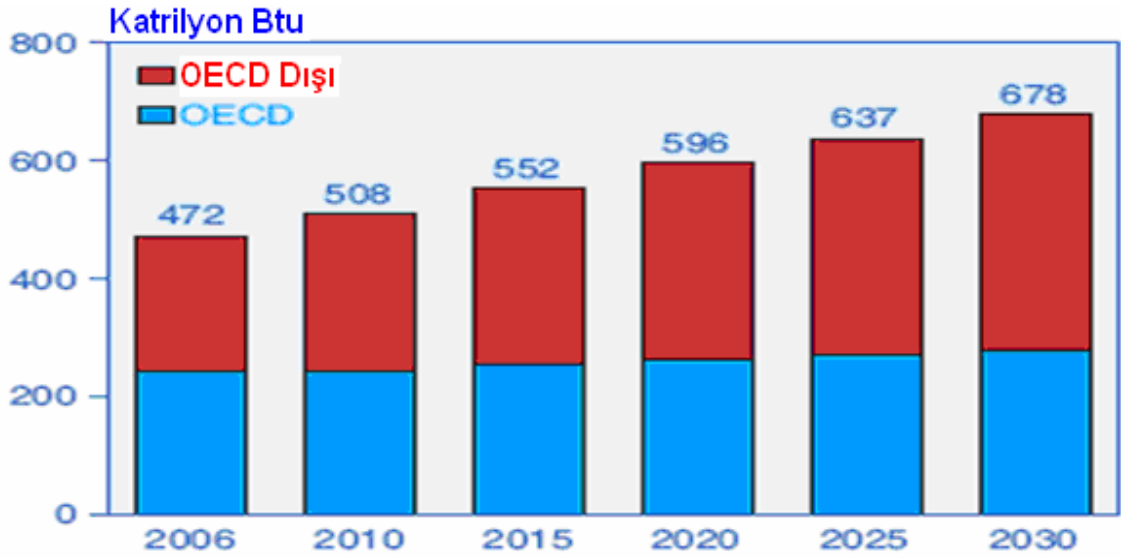
1.3. Türkiye'nin ve Dünyanın Enerji Tüketimleri

Gelişen dünyada ülkelerin enerji ihtiyaçları sürekli artmaya devam etmektedir. Dünya nüfusu her yıl Yaklaşık %1 oranında artmaktadır. Bu tempo ile nüfusun 2030'da %49 büyüyerek 8,2 Milyar olacağı tahmin edilmektedir. Dünya enerji talebi ise, yılda

%1,6 artmaktadır. Bu tempo ile 2030'da %45 büyüyerek 17 Mtep olacağı tahmin düşünülmektedir [2].

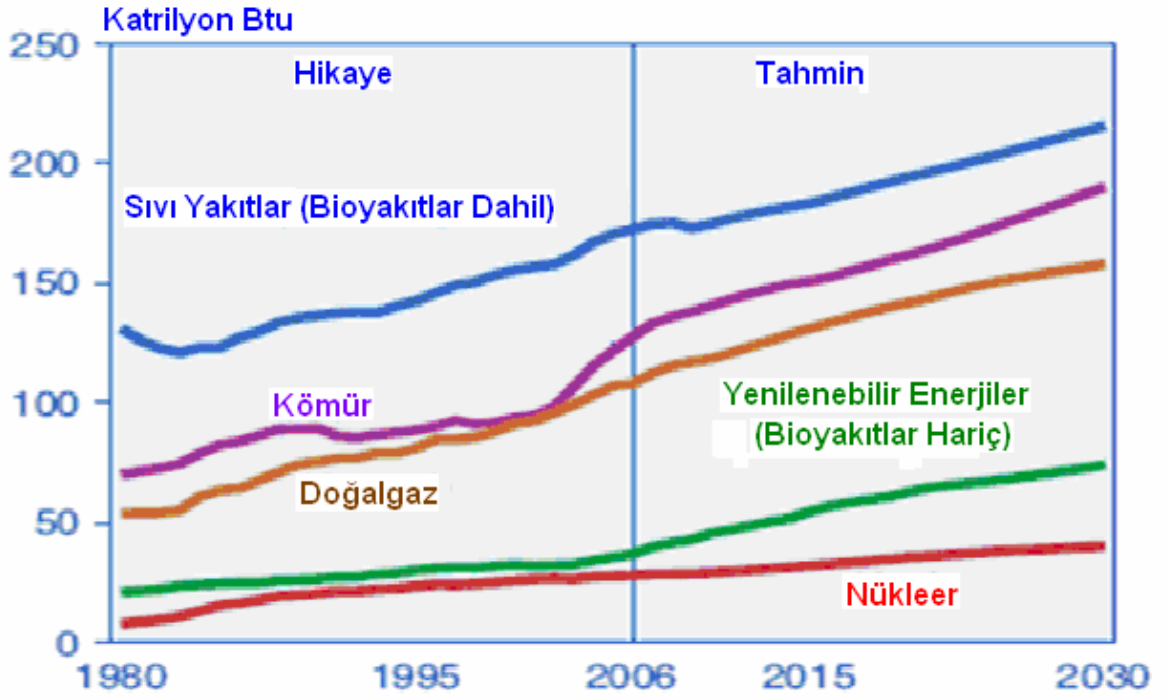


Şekil 1. Bölgesel Enerji Tüketim Miktarları, 2006–2030



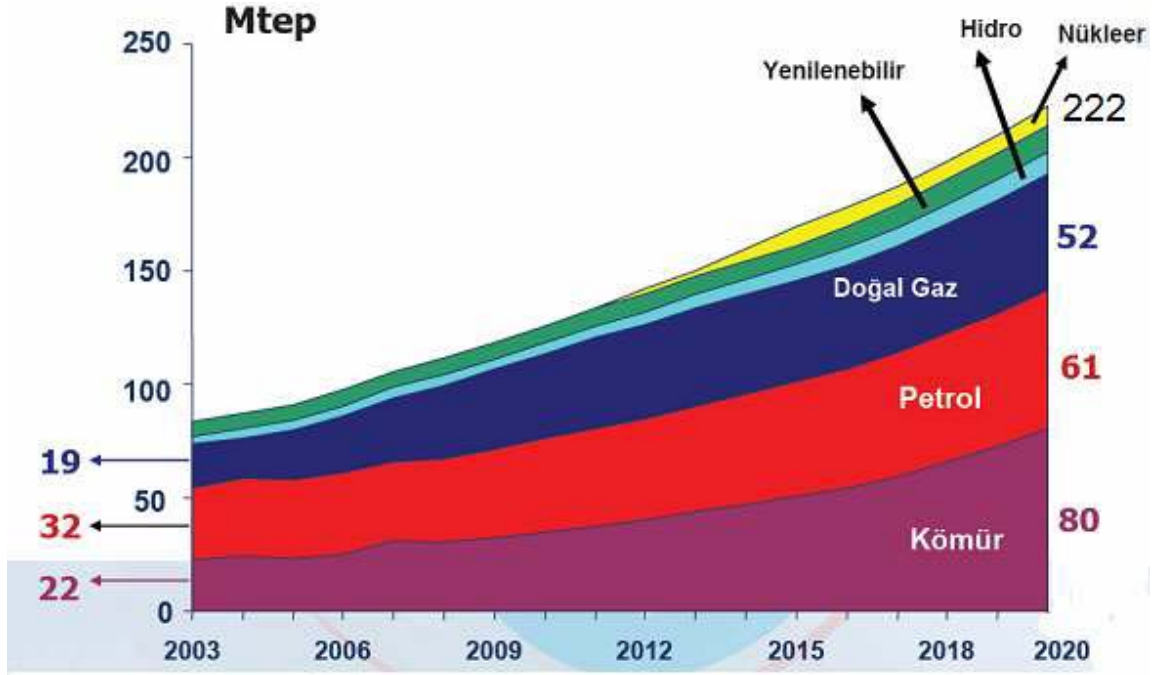
Şekil 2. Dünya Enerji Tüketim Miktarları, 2006–2030

EIA'nın yayınladığı raporunda, 2006 yılında 472 katrilyon Btu olan dünya enerji tüketimi, 2030 yılında yaklaşık %44'lük artışla 678 katrilyon Btu'ya ulaşması tahmin ediliyor. Bu dönemde OECD ülkelerinin tüketimindeki artış %15 iken, OECD dışı ülkelerin enerji tüketimi %73 artacağı öngörülmektedir [3].



Şekil 3. Yakıt Tiplerine göre Dünya Enerji Tüketim Miktarları, 1980–2030

Şekil 3'deki EIA 2006 Uluslararası Enerji Yıllığında görüldüğü gibi petrol önümüzdeki yıllarda da dünyada en fazla tüketilen enerji kaynağı olacaktır. Küresel ısınma sorunu önemini korumasına rağmen, fosil kaynaklardan enerji üretimi, talebin karşılanabilmesi için dünya enerji üretiminde önemli bir paya sahip olmaya devam edecektir. Şekil 4'deki ETBK'nın yayınladığı 2020 tahminine göre ülkemizin 2020 yılında birincil enerji talebi 222 Mtep olacağı tahmin edilmektedir. Yıllık %3.6'lık bir artış öngörüldüğünde 2030 yılında bu talebin yaklaşık 316 Mtep ulaşacağı düşünülmektedir.



Şekil 4. Türkiye'nin Enerji Tüketim Miktarları, 2003–2020

1.4. Türkiye'nin 2030 İle İlgili Enerji Senaryoları

Enerji, ekonomik kalkınmanın ve toplumsal refahın vazgeçilmez bir unsuru olduğundan, toplumun ve ekonominin gereksinim duyduğu enerjiyi yeterli, kaliteli, sürekli, düşük maliyetli ve çevre ile uyumlu bir şekilde sunmak gerekmektedir. Ülkemizde enerji isteğinin güvenilir olarak karşılanmasının, yerli kaynakların geliştirilmesine bağlı olduğu bilinen bir gerçektir. Ülkemizde mevcut linyit, taşkömürü, hidrolik ve yenilenebilir kaynaklar olmak üzere mevcut kaynakların en kısa zamanda geliştirilerek enerji üretimine dahil edilmesi gerekmektedir [4].

Ülkemizin enerji sektöründe dışa bağımlılığı ülke ekonomisine büyük bir yük getirmektedir. Enerji tüketimimizin yaklaşık %74'ü dış kaynaklardan karşılanmaktadır. Enerjide dışa bağımlılık elektrik enerjisi arz güvenliğini de tehlikeye sokmaktadır [5]. Yenilenebilir enerji kaynaklarımızın tamamını devreye sokuncaya kadar, enerjide kaynak ve ülke çeşitlenmesine gidilmesi ihtiyacı sağlaması açısından büyük bir öneme sahiptir.

AB ülkeleri, Türkiye'yi doğu, güney ve kuzeyimizde yer alan petrol ve doğalgaz zengini komsularımızın enerji kaynaklarının kendilerine boru hatlarıyla ulaştırılmasında bir geçiş ülkesi görmektedir. Türkiye ise bu tür boru hatlarından gelen petrol ve doğalgazla artan enerji ihtiyacının bir kısmını sağlamayı ve arz güvenliğini geliştirmeyi planlamaktadır. Bu noktada, dışa bağımlı olduğumuz fosil kaynakların başında gelen doğalgazda depolama sistemine geçilmesi ülke açısından büyük önem taşımaktadır.

Kesikli kaynaklar oldukları için elektrik şebekesine giriş bazı sorunlara yol açan güneş ve rüzgâr enerjilerinden, 21.yy'ın enerji taşıyıcısı olarak kabul edilen hidrojen enerjisi kullanılarak en verimli şekilde yararlanmak gereklidir. Hidrojen enerjisi ve hidrojen pilleri teknolojilerine özel bir önem verilmeli ve AR-GE çalışmaları teşvik edilmelidir. Öte yandan ülkemizin arz güvenliği ve enerji kalitesinin sağlanması açısından gelişmiş teknoloji imkânlarına sahip nükleer santrallerin kurulması kaçınılmazdır. Gelecekte enerji alanda sıkıntıya düşmemek için ülkemizde var olan bütün enerji çeşitlerini sisteme dâhil etmemiz gerekmektedir. En pahalı enerji var olmayan enerjidir.

Türkiye biomas materyal üretimi açısından, güneşlenme ve alan kullanılabilirliği, su kaynakları, iklim koşulları gibi özellikleri uygun olan ülkedir. Atık potansiyelimiz yaklaşık 8,6 Milyon TEP olup bunun 6 milyon TEP'i ısınma amaçlı kullanılmaktadır. Tarıma elverişli olup da kullanılmayan alanların değerlendirilmesi ile 1,7 milyon ton biyodizel, pancar alanlarının kullanımı ile 3,5 milyon ton biyoetanol üretilenilecektir. Biokütlede 6 MW, biyogazda 13 MW'lık üretim tesisi inşa halindedir [6].

1.5. Güç Transmisyon ve Dağıtımındaki Kaybolan Elektrik Enerjisi

Güç istasyonundan tüketici sonuna kadar büyük miktarda enerji boşa harcanır. Transmisyon işlemi sırasında kayıplar meydana gelir.

a) Akım büyük miktarda ısı taşıyan konveksiyonel kabloyu takip ederken Joule etkisi yüzünden harcanır.

b) Enerji manyetik alana doğru harcanır.

c) Yalıtım materyali hem de di-elektrik kayıp olarak bilinen enerji miktarını emer.

1.6. Güç Sistemi İçinde Yüksek Sıcaklık Süperiletken Kablo Kullanımı

Konveksiyonel kablo kullanımında tüketici işini bitirene kadar %8 ile %12 arasında enerji kaybolur. Güç dağıtımı ve transmisyon alanındaki bu problem çoğunlukla yüksek sıcaklık süperiletken kablo olarak bilinen süperiletken kabloyla konveksiyonel kablonun değiştirilmesiyle üstesinden gelinebilir. Bu kablolar konveksiyonel iletkenler yerine YBCO, BSCCO gibi yüksek sıcaklık süperiletken materyallerden oluşur.

1.6.1. Süperiletken Materyaller

Belli bir sıcaklıkta soğutulduğunda bazı metallerin elektrik direnci azalır fakat sıcaklık tam 0 derecenin birkaç değer üstündeyse elektrik direnci aniden azalır. Sonra süperiletken duruma geçer. Bu durumda iyon kafesinde çok düşük enerji vardır ve değer elektronlarının çoğu atomlarla kalır ve kafes titreşimi son derece sessizdir. Metaller, alaşımlar veya metal bileşimler süperiletken olarak bilinen tuhaf elektrik davranışını gösterir. Metalik elementlerin yarısı süperiletken olarak bilinir ve alaşımların içinde de süperiletkenler vardır. Niyobyum, molybden, iridyum gibi metaller süper iletkenliğe sahiptir. Nb_3Sn , $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$, $SmFeAs$, $YBa_2Cu_3O_7$ da süper iletkenliğe sahiptir. Bakır, demir sodyum ve diğer metaller düşük sıcaklıklarda süperiletkenlik göstermezler. Bazı süperiletkendeki kısıtlamalarla süperiletken durumuna ulaşabiliriz. Bu kısıtlamalar takip edilerek;

1.6.2. Kritik Manyetik Alan (H_c)

Büyük bir manyetik alan uygulandığında süperiletken normal bir iletken olur. Süperiletkenden normal iletkene geçiş manyetik alan oryantasyonuna, süperiletken şekline ve materyal tipine dayanır. Sıcaklık sabit tutularak süperiletkendeki kritik manyetik alan olarak bilinen manyetik alan yıkılır.

1.6.3. Kritik Akım (I_c)

Kritik akım manyetik alanın ve sıcaklığın belirli değerlerinde süperiletkenle 0 dirençte akan maksimum akım değeridir. Akım kritik akımdan büyükse süperiletken normal iletken gibi davranır. Süperiletkendeki sıcaklık artışı kritik akım değerini azaltır. Kritik akım ve kritik manyetik alandaki ilişki şöyle ifade edilir.

$$I_c = 2\pi H_c r \quad (1)$$

I_c = Kritik akım

H_c = Kritik manyetik alan

r = Silindirik telin yarıçapı

1.6.4. Kritik Sıcaklık (T_c)

Sıcaklığın geçiş sıcaklığı veya kritik sıcaklık olarak bilindiği bu sıcaklıkta süperiletken materyal elektrik direncini kaybeder. Farklı süperiletken materyallerin kritik sıcaklık değerleri tablodaki gibi farklıdır.

Tablo 1. Farklı süperiletken malzemelerin geçiş sıcaklıkları

| Geçiş Sıcaklığı (Kelvin) | Malzeme | Sınıf |
|-------------------------------|----------------------------------|--|
| 110 | $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (BSCCO) | Bakır oksit süperiletkenleri |
| 92 | $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) | |
| 77 | Sıvı Azot | |
| 43 | SmFeAs(O,F) | Demir esaslı süperiletkenler |
| 41 | CeFeAS(O,F) | |
| 26 | LaFeAS(O,F) | |
| 18 | Nb_2Sn | Metalik düşük sıcaklık süperiletkenler |
| 10 | Nb_3Ti | |
| 4,2 | Hg(Mercury) | |

1.7. Süperiletkenlerin Sınıflandırılması

Kritik sıcaklıklara göre süperiletken materyalleri iki tipe ayrılır.

1.7.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

Yüksek sıcaklık süperiletken materyalleri 30K üstünde geçiş sıcaklığına sahip olan süperiletken materyallerdir. 1960-1980 esnasında en yüksek kritik sıcaklığa ulaşıldığı sayılabilir. Fakat 1 günün 254 kısı HTS materyallerinin en yüksek kritik sıcaklık olduğu düşünülebilir. İlk yüksek süperiletken 1986'da keşfedildi. 2008'de, Fe tabanlı süperiletken keşfedildiğinde yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin uygulamalarındaki faydaları daha çok gelişti.

En iyi bilinen yüksek sıcaklık süper iletkenleri bismuth strontium calciumcopper oxide (BSCCO) and yttrium barium copper oxide (YBCO) dir.

1.7.2. Düşük sıcaklık süperiletkenleri

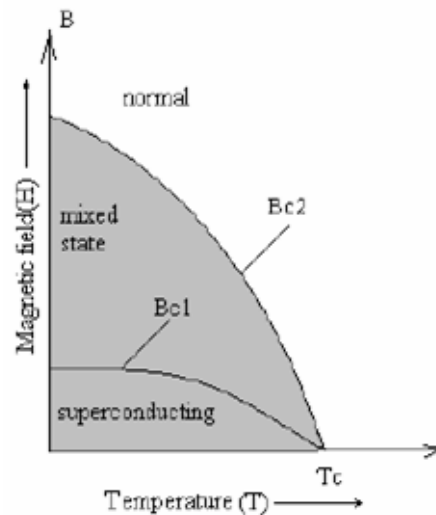
İki ortak düşük süperiletken kurşun ve cıvadır. LTS'de kritik sıcaklık 30K'dan azdır. Düşük sıcaklık süperiletkenleri ilk 1911'de keşfedildi. Süper iletkenler ayrıca Ginzburg Landau Constant'a dayanarakta sınıflandırılabilir. Bu penetrasyonun uygun uzunluğa oranıdır.

1.7.3. Tip 1 Süperiletkenler

Titanyum, alüminyum, cıva, kurşun

1.7.4. Tip 2 Süper İletkenler

Niyobyum, Vanedyum gibi metaller, bazı metal alaşımlar ve bazı oxid bileşimler Ginzburg değerine sahiptir. Tip 2 süperiletkenler olarak sınıflandırılırlar. Tip 2 süperiletkenler 1957'de Abrikosov tarafından icat edilmiştir. Tip 1 ve Tip 2'nin ana diyagramları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Tip 1 ve Tip 2 süper iletkenlerin ana diyagramları

1.7.5. HTS Kablonun Avantajı

Yüksek sıcaklık süperiletken materyalleri yüksek sıcaklık süperiletken kabloları yapmada kullanılır. HTS kablolar LTS kablolarla karşılaştırıldığında belirtildiği gibi bazı ekonomik ve işlevsel avantajları vardır.

1) Sıvı nitrojen ve sıvı helyum HTS ve LTS kabloları için kriyojen olarak kullanılır. Sıvı nitrojen sıvı helyumdan daha ucuzdur bu yüzden HTS kabloları LTS kablolarından daha ucuz maliyetlidir.

2) HTS'nin kritik sıcaklığı LTS' ninkinden daha yüksektir. Dahası HTS kabloları güç sistemindeki uygulama için daha uygundur.

3) HTS kabloyu daha sağlam yapan yalıtım katmanlarındaki termal stres daha düşüktür.

HTS kablolarının konveksiyonel bakır tel ve yeraltı kablolarında yüksek akım taşıyan kapasitesi ve düşük empedansı yüzünden daha çok faydası vardır.

1) HTS kabloları konveksiyonel kablolardan 10 kat daha fazla güç taşıyabilir.

2) Akım taşıma kapasitesi konveksiyonel kablolardan 150 kat daha fazladır.

3) HTS kablo kullanımı ağdaki kondüktör kullanımını azaltır ve diğer kullanıcılar için boşluklar tutar.

4) Telekomünikasyon sistemine müdahale olasılığı yoktur.

5) Elektromanyetik radyasyon yaymazlar.

6) HTS kablo kullanımı elektrik şebekesinde dayanıklılık ve güvenliği artırır.

1.7.6. Mevcut Çalışma

Yüksek sıcaklık süperiletken kablolarının büyük avantajlarını konveksiyonel kondüktör ve güç sistemindeki uygulamalardan daha yüksek tutarak mevcut çalışma HTS kablolarının AC simülasyonu kaybı üzerinde yoğunlaşmıştır. Mono block ve poliganel tek katman HTS kablolarının kaybı MATLAB 7,8 ve COMSOL Multiphysics gibi ev programları kullanılarak taklit edilebilir.

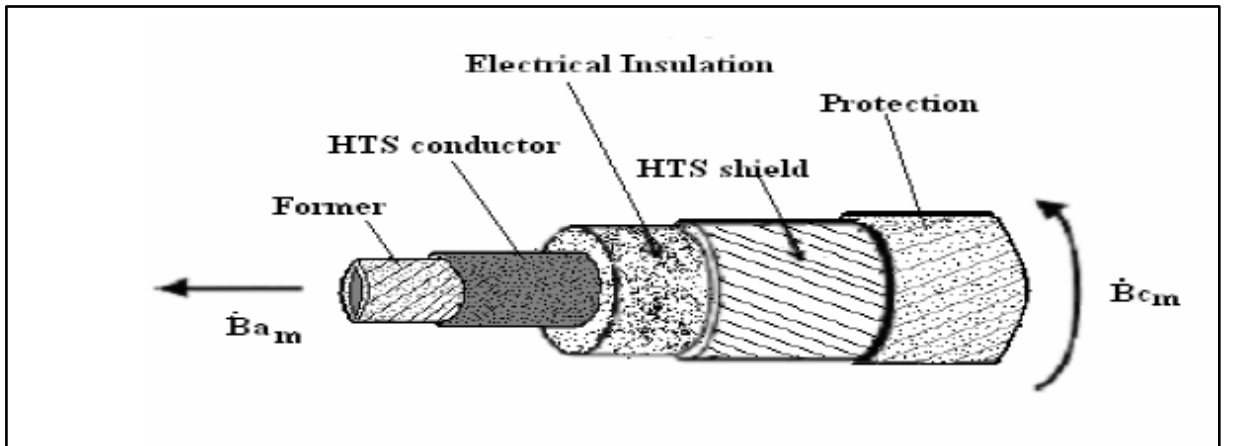
Süperiletken materyalleri çok pahalıdır. Bi-2223'ün fiyatı 175-200\$/kA-m alanındadır. Ayrıca HTS kabloları deney düzeneği çok pahalıdır. Bu yüzden deney çalışması yerine HTS kablosunun AC kaybının simülasyonu seçilir. Simülasyon kullanılarak HTS kablosundaki değişiklikler akım yoğunluğu manyetik alanlar gibi çeşitli koşullar altında çalışılabilir. Farklı boşluk uzunluğundaki AC kaybı karşılaştırması, HTS kablolarının bant sayısında bu çalışmada incelenebilir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

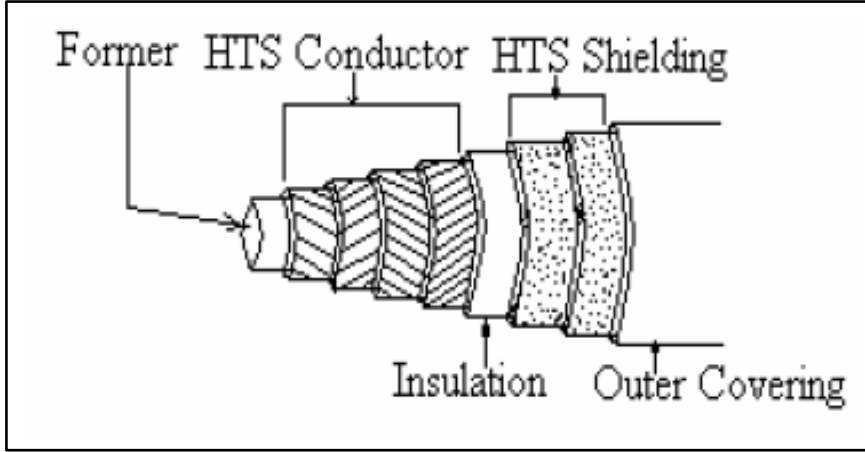
2.1. Yüksek Sıcaklık Süperiletken Kablo Tasarım Konsepti

Dünya 19.yyda süperiletken konsepti ile tanıştı. 1911’de Hollandalı adı Heike Kamerlingh Onnes olan fizikçi çok düşük sıcaklıkta soğutulduğunda elektrik direncini kaybeden materyalleri icat etti. 1986 yılında işlem sıcaklığı 77K olan yeni seramik süperiletken materyal icat edildi. Bu materyaller bir kablo oluştururken 77K olan sıcaklığı korumak çok önemlidir. Süperiletken materyalleri doğada çok hassastır. İstenilen şekli vermek için biçimlendiriciye ihtiyaç vardır. HTS materyalleri bu yapıda doldurulur ve sağlam bir yapı oluşturulur. BSCCO ve YBCO bantları sarıldığında genellikle bakır oluşur. Bu biçimlendiricinin işlevi arzu edilen şekli vermek, mekanik baskıya dayanmak ve en önemlisi kısa devre akımına baypas yapmasıdır.

Elektrik izolasyon HTS sargısına yerleştirilir. Bunlar polipropilen lamine kâğıdından yapılır ve bazen sıvı nitrojen lamine kağıdına emdirilir. Sonraki HTS koruyucusudur(Şekil6). Bu Ag/Bi-2223 bantlarının tek katmanını oluşturur. Bu katman bakır tel örgülü tel korumayla takip edilir.



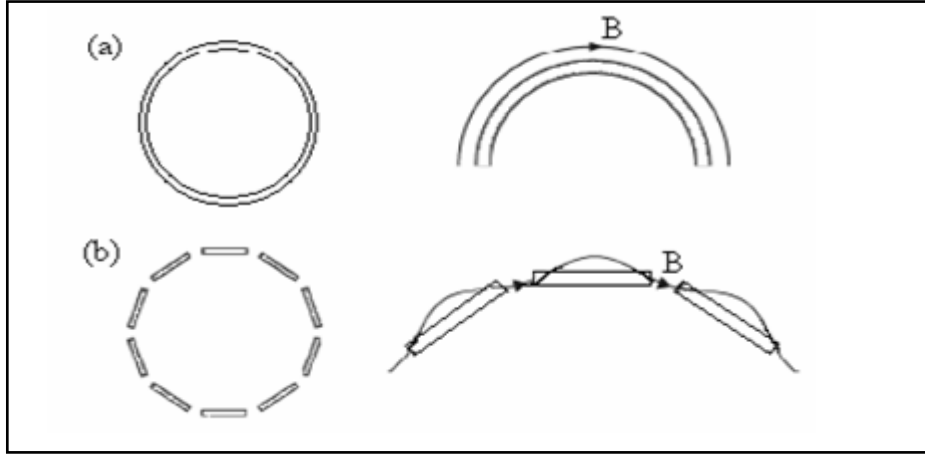
Şekil 6. Yüksek sıcaklık süperiletken kablo çekirdeğinin şematik bir diyagramı



Şekil 7. Multi katman yüksek sıcaklık süperiletken kondüktörü

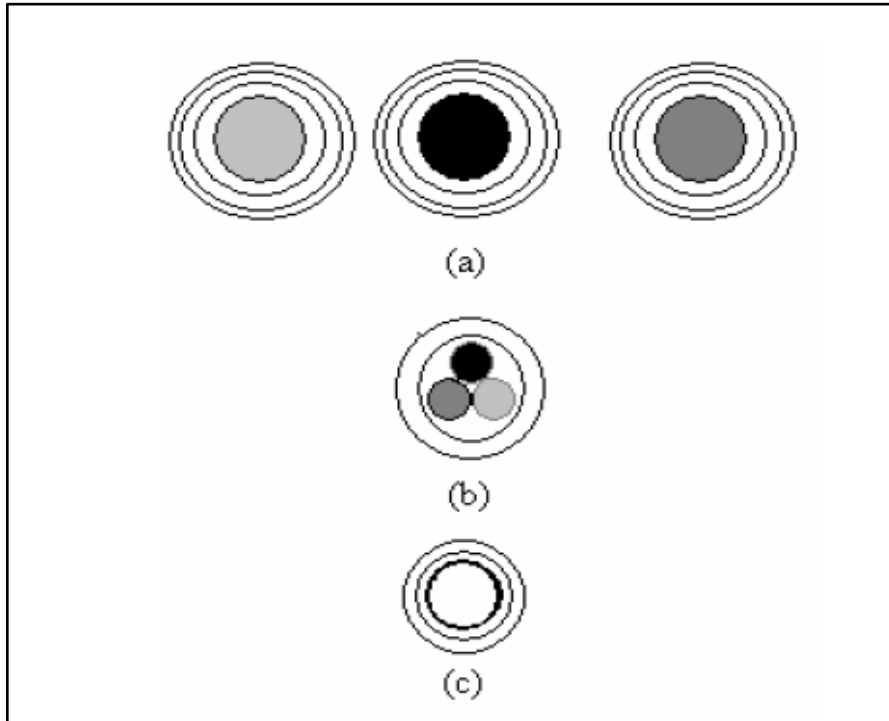
HTS kablosunun farklı özelliklerini analiz ederken görülür ki multikatman kondüktörlerde öz alan kaybı tek izole edilmiş telden daha küçüktür. Daha sonralarda bazı deneysel sonuçlar HTS kablolarının tek katman ve çoklu katman fikrini verdi. Tek katman HTS kablosunda, süperiletken materyal biçimlendiriciyi çevreleyen bir katmana doldurulur. HTS katmanını çevreleyen biçimlendirici birkaç tipe ayrılır. HTS katmanındaki iki bant ve bant tipleri arasındaki boşluk kablodaki AC kaybını azaltmayı değiştirebilir. Bant tiplerinin artışı AC kaybını ve iki bant arasındaki boşluğu azaltır. Akım dağıtımını HTS kablolarının pratik kondüktörlerinde standartlaştırılmaz. Bu her katmanın spiral adımına dayanır. Bu ilkeye dayanarak AC kaybı azaltılabilir. HTS bant tipleri, boşluğu, kalınlığı ve bant tipleri arasındaki geometrik ilişki, bitişik bantlar arasındaki boşluk, katmanın yarıçapı şöyledir.

$$\left(R_1 + d_1 + \frac{d_2}{2}\right) \tan \frac{\pi}{N} = \frac{g_i}{2 \cos \frac{\pi}{N}} + \frac{W}{2} \quad (2)$$



Şekil 8. HTS kablonun mono blok ve çoklu model şematik gösterimi

3 aşamayı kurmak için HTS kablosunun farklı teknikleri kullanılır. 3 ayrı koaksiyel kablo 3 aşama sistemini oluşturur. Triad koaksiyel kablo da aynı amacı karşılayabilir ve triaksiyel kablolar da 3 aşamalı HTS kabloyu oluşturmada kullanılabilir. Triaksiyel kabloda 3 ortak merkezli aşama kondüktörü vardır. Bu kondüktörler sıvı nitrojen katmanıyla birbirine ayrılır.



Şekil 9. a-3 ayrı koaksiyel aşama b-triad koaksiyel kablo c-triaksiyel kablo

Başka bir deney analizi gösteriyor ki AC kaybı frekans sağlamaya dayanıyor. Frekans değiştiğinde doğrusal olarak kayıp da değişir. Histeriziz kaybının tüm kayba hakim olduğu gösterilmiştir.

AC kaybı alternatif manyetik alan etkisi ve akım taşımanın birleşmesidir. AC kaybı mıknatıslanma kaybı olarak bilinen alternatif manyetik alan ve taşıma kaybı olarak bilinen akım taşıma yüzünden meydana gelir. Belli derecede bant filameni kıvrılması mıknatıslanma kaybını azaltır. Gözlenmiştir ki aynı boyut ve aynı kritik akım için BSCCO/Ag bantında kıvrılmış filamende kayıp paralel alandaki kıvrılmamış filamen bantın %39udur. Öz alan kaybı Knın değerinin 3 ve 4 olduğu yerde ve geçiş akımıyla kritik akımın olduğu yerde orantılıdır. Düşük değerli akım oranıyla çalışılmasıyla taşıma akım biraz daha azaltılabilir. Ayrıca AC kaybının koruma akımın çoğunun kablunun iç koruma katmanına aktarılmasıyla azaldığı görülmüştür. HTS kablolarının da akım dağıtımının AC kaybının oluşmasında bazı etkileri vardır.

2.2. HTS Kabloların Üretimi ve Pratik Kullanımı

HTS kabloların buluşu ve kullanımı güç sektöründe bir devrimdir. HTS kabloların kullanımı elektrik gücünün kayıpsız aktarılmasını sağlar. HTS kabloları bazı pratik uygulamalar için kullanılır. American Superconductor Corporation, Nexans ve birçok diğer şirket HTS kablo üretimine önem vermeye başladı.

Önemli Şirketler ;

1. Super Power Inc. (Schenectady, New York, U.S.).
2. Sumitomo Electric Industries Ltd. (Osaka, Japan).
3. National Grid (Westborough, Massachusetts, U.S.).
4. The BOC Group (Surrey, England) of The Linde Group.
5. Tokyo Electric power(Japan).
6. Sumitomo Electric Industries (Japan).

22 Nisan 2008 de ticari elektrik şebekesinde dünyanın ilk yüksek sıcaklık süperiletken güç aktarım kablo sistemi Long Island, New York, USA da bulunan

Holbrookda kuruldu. Dünyadaki en uzun süperiletken kablo sistemi 138 kV kapasiteye ve yaklaşık 609 metre kablo uzunluğuna sahip. Long Island PowerAuthority ile HTS kabloları gibi uygulanan diğer farklı projelerde vardır.

a. Almanya’da 100 km kablo dolaşımı ve 220 kV voltaj kullanılır. 4500 km kablo dolaşımı için voltaj 36-110 kV ve 3080000 km kablo dolaşımı içinse 36 kVdir.

b. Japonya’da 1500 km kablo dolaşımı için 220 kV voltaj, 12.500 km dolaşım için 66-77 kV voltaj ve 65.000 km için 55 Kv’den daha az montaj kullanımdadır.

Süperiletken kablonun konveksiyonel kablo kullanımından daha büyük avantajları olmasına rağmen biçimlendiricinin ana problemi süperiletken kablonun AC kaybı tasarımının üretiminde yatar. İleriki bölümde kablo tasarımı ve AC kaybı hakkında bazı detaylar verilecektir.

2.3. Ac Kaybı ve Hts Kablo Yapısı

2.3.1. HTS Kabloda Ac Kaybı

Süperiletkenlerde sıfır direnç vardır ve DC akımı kritik değeri geçtiğinde güç dağıtılmaz. Fakat AC akımı uygulaması veya değişen manyetik alan normal bölgede meydana gelen kayıpların ve süperiletkende dağıtılan ısının sonucunda emf ve akımın uyarılmasına sebep olan vortex hareketini yönetebilir. Bu yüksek sıcaklık süperiletkende AC kaybı olarak bilinir. Şöyle sınıflandırılabilir:

2.3.2. Histereziz Kaybı

Süperiletken araçlardaki AC kaybının ana kaynağı histererizdir. Dış manyetik alan süperiletken katmanına uygulandığında tuzak alanı oluşturulur çünkü histerezis kaybı olarak bilinen alan kaybı oluşur. Dış manyetik alanda uygulanan hitereziz kaybı çoğu zaman mıknatıslanma kaybı olarak bahsedilir.

2.3.3. Girdap Akım Kaybı

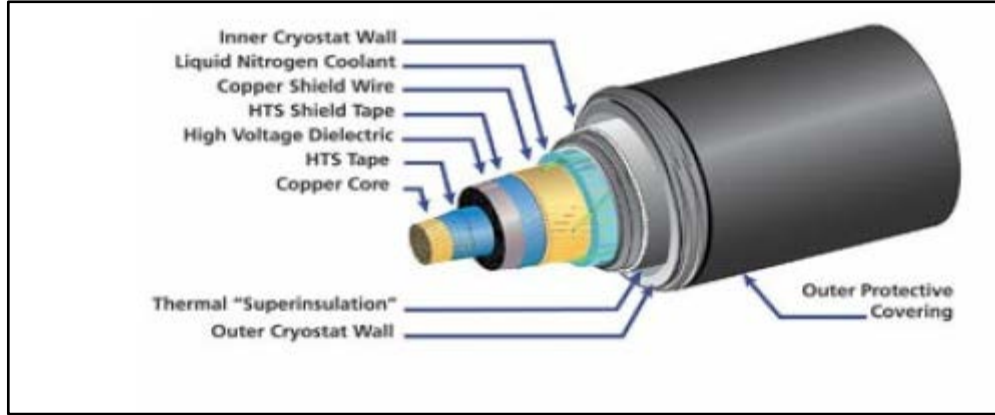
Girdap akım kaybı HTS materyallerini saran normal metalde uyarılmış akımlar yüzünden meydana gelir. Normal materyalin direnci süperiletkenin çekirdeğinden daha yüksek olduğu için girdap akımlarının istenmeyen akışı HTS materyallerinin ısınmasına sebep olan normal metalde sürtünme ve elektron hareketi üretir.

2.3.4. Taşıma Akım Kaybı

Süperiletken bandından geçen akım taşıma akım olarak bilinir. Öz alan taşıma akım sayesinde oluşur ve taşıma kaybı meydana gelir. Yüksek sıcaklık süperiletken kablolardaki uygulamalar için taşıma akım kaybı çok önemlidir. Çünkü çoğu uygulamadaki kayıplar taşıma akım yüzünden meydana gelir.

Kablonun içindeki yüksek sıcaklık süperiletken bandındaki AC kaybı yüzünden sıcaklık artabilir ve bu termal geçişi yönetebilir, süperiletken durumu yıkılabilir. Ama uygun bir soğutma ile HTS kablo içinde üretilen ısı kontrol edilir bu yüzden HTS bantlarındaki sıcaklık kritik değerde kalmaya devam eder. Dahası HTS kablosundaki AC kaybının azalması ve analizi çok önemlidir. Farklı HTS kablolarında konveksiyonel kabloları göre AC kaybının seviyeleri daha düşüktür. Bu yüzden tüm bu kayıplara rağmen yüksek sıcaklık süperiletken kabloları güç transmisyonu ve dağıtımında çok faydalıdır. Bu kablonun tasarım konsepti tasarımcıya daha düşük seviyede kayıplar yapmasını başarması konusunda yardım eder.

2.3.5. HTS Kablo Yapısı



Şekil 10. Yüksek sıcaklık süperiletken kablonun Nexan tarafından şematik diyagramı

Şekil.10'a göre süperiletken kablo parçalara sahiptir. Bunlar;

- 1) Dış Koruyucu Kaplama
- 2) Dış Kriyostat Duvar
- 3) Isı Süper Yalıtım
- 4) İç Kriyostat duvar
- 5) Sıvı Azot Soğutucu
- 6) Bakır Kalkan Tel
- 7) HTS Kalkan Tel
- 8) Yüksek Gerilim Dielektrik
- 9) HTS kablo
- 10) Bakır Çekirdek

2.3.6. Çekirdek

Kabloya temel yapısını veren ana katman çekirdektir. Bu çekirdeği oluşturmak için genelde kullanılan materyal bakır ya da gümüştür. Nexanın HTS kablosunda bakır çekirdek kullanıldı. Çekirdeğin işlevleri şunlardır:

- a-)** Kabloya mekanik dayanıklılık sağlar.
- b-)** Kısa akım dolaşımına bypass yolu sağlar, hem gümüş hem bakır ikisi de güzel kondüktörlerdir. Kısa devre oluştuğunda fazla akım onunla gider.
- c-)** Gümüş ve bakır ikisi de iyi termal kondüktörlerdir. Elektriksel kısa devre oluştuğunda aşırı sıcaklık süperiletken alandan kaldırılabilir.
- d-)** Bu esnada HTS bantları düzgün çalışmaz, güç normal kondüktörlerde olduğu gibi düşük seviyede akar. Dahası gücü kesmeden hata düzeltilebilir.

2.3.7. HTS Tel

HTS kablonun ana parçasıdır. HTS teli özellikle iki tip süperiletken materyalden yapılır. (Bismuth strontium calcium copper oxide (BSCCO) and Yttriumbarium copper oxide (YBCO)).Bu materyaller HTS bantı biçimlendirmek için gümüş biçimlendiricinin içinde bulunur. Her HTS tel katmanı birçok HTS bant tipi içerir ve HTS tel birden fazla HTS bant katmanı içerir. Bu geçiş akımını taşır.

2.3.8. Yüksek Gerilim Dielektrik

Bu kabloyu elektrik yalıtımı sağlar. Elektrik yalıtımı kablo içindeki kondüktörleri birbirinden ayırır. HTS kablolarının çoğu tasarımı sağlam bantla yapılır. Bu amaç için polipropilen lamine kâğıtları kullanılır. Bazen sağlam dielektrik ve HTS telleri arasındaki boşluğu dolduran sıvı nitrojen emilir.

2.3.9. Koruyucu Katman

Bu katman ekstra mekanik güç ve dışarıdan gelecek her türlü baskıya karşı koruma sağlar. Ayrıca kabloyu daha sağlam yapar. Genel olarak iki tip koruyucu katman vardır. HTS tel koruma, burada HTS tel kullanılır ve bakır tel koruma yapar.

2.3.10. Soğutma

HTS kablosunun en önemli parçalarından biri soğutmadır. Normalde sıvı nitrojen soğutma olarak kullanılır ve sürekli olarak kabloda dolaşır. Sıcaklığı 77K'dir. Nitrojen akımını ve nitrojen sıcaklığını 77K'de korumak için ara soğutma istasyonu kullanılır. Bu günlerde nitrojen zeminin üstünde bulunan ve tavana yakın olan soğutucularla sağlanır.

2.3.11. Kriyostat Duvar

Kriyostat soğutucu maddeyi tutmada kullanılır. Kriyostat duvarı iki bölümden oluşur, ilki iç kriyostat duvarı diğeri ise dış kriyostat duvarıdır. Dış kriyostat duvarı vakum yardımıyla termal yalıtkan gibi hareket eder. İç kriyostat duvarı soğutucu madde içerir ve dış kriyostat duvarının düşük iletken yapısıyla desteklenir.

İki duvar arasındaki ara kalkan dış katmandan yayılan ısıyı gönderir ve ısı kriyojenik ile kaldırılır. Bu günlerde araştırmacılar tüm sıcaklıkta bulunup kriyokorlerle kaldırılan soğutucu madde kriyostatlarını oluşturmayı deniyorlar.

2.3.12. Isı Süper Yalıtım

Sirojenik uygulamalar için çalışma sıcaklığına eşit veya daha azsa 150 ° F (-101 ° C)'den süper yalıtım gereklidir. Vakum koşulları altında ısı süper yalıtımı yüksek sıcaklık yansıtıcı şeyler kullanılarak yapılır. Materyal birçok küre yerleştirilerek veya yüzeydeki öz kütledeki tellerin yalıtılarak sıcak bariyer oluşturulmasında kullanılır.

Mevcut durumda AC kaybının simülasyonu ve yüksek sıcaklık süperiletken kablodaki düşüşü HTS kablonun katmanındaki bazı değişikliklerle yapılır. Sonraki

bölümde formülasyon, ölçülebilir elementlerin ayrıklaştırılması ve hesaplanması ile ilgili detaylar verilecek

2.4. Sonlu Eleman Tarafından Kısmi Diferansiyel Denklem Yöneten Ayrıklaştırılması Yöntemi Ve Sonlu Farklar Yöntemi

Bu çalışmada HTS kablosunun AC kaybı hesaplaması ölçülebilir element metodu kullanılarak yapılabilir. Manyetik alan ve taşınan akım yüzünden mevcut HTS kablosunda süperiletken bantlarda AC kaybı meydana gelir. A-V formülasyonu elektrodinamiği açıklayan kısmi diferansiyel denklem oluşturmak için en uygun methoddur. Manyetik vektör potansiyeli kullanılarak temel elektromanyetik denklem şöyle

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \vec{A} + \sigma \nabla \nabla V = -\sigma \nabla V \quad (3)$$

A Z eksenini boyunca manyetik vektör potansiyelinin nerede olduğunu, V uygulanan gerilimi ve σ süperiletkenliği gösterir.

$$\vec{J} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \quad (4)$$

$$E = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \quad (5)$$

Bir HTS bantın iletkenliği doğrusal olmayan Ej güç yasası kullanılarak ifade edilir.

$$\sigma = \frac{J_c}{E_c^n} |E|^{\frac{1-n}{n}} \quad (6)$$

N gücün nerede olduğunu, Jc kritik elektrik alanı, Ec kritik akım yoğunluğunu gösterir ve E süperiletken alanı içinde oluşan elektrik alanıdır.

HTS katmanı içindeki bütün AC kaybı şöyle bulunur:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_S \vec{j} \cdot \vec{E} \cdot ds \quad (7)$$

T sinüs ulaşım akımının süresi ve S süper iletkenin yüzey alanıdır.

Yöneten kısmi diferansiyel denklem ile kesikli hale getirmek için ölçülebilir element metodu bu işte kullanılır. 3 denkleminin alan ve zaman ayrıklaştırması ölçülebilir element metodu ve ölçülebilir farklı metot kullanılarak yapılır. Geometri boşlukta ayrıklaştırıldığında dikkatlice yapılmalıdır çünkü ayrıklaştırma yapının maksimum alanını kaplar. Bu ölçülebilir element metodu eşit olmayan alanların ölçümünü belirlemede örneğin iki boyutlu boşlukta üçgen veya dörtgen olabilir bunları ölçmede kullanabilir. Ayrıca materyalin anizotropik doğası yapının farklı bir kısmında veya geometride bu metot kullanılarak uygulanabilir. Zaman ayrıklaştırması ölçülebilir farklı methodla yapılır. Bu metotta tüm zaman küçük parçalara ayrılır.

Alan ayrıklaştırmasında değişen miktar bu küçük zaman sırasındaki statik miktar olarak düşünülebilir. Geçici zaman denklemi olmazsa Poissonun denklemi kullanılır.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = g(x, y) \quad (8)$$

U bağımlı değişkendir. Diferansiyel denkleminin ağırlıklı entegrasyonu ve sınır koşulları şöyledir:

$$I = \int_{\Omega} m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - g(x, y) \right) d\Omega - \int_{\Gamma_e} m \frac{\partial u}{\partial n} d\Gamma \quad (9)$$

M ağırlık fonksiyonunu gösterir.

Zayıf formülasyonu geliştirmek için integral farklılığını azaltmak için entegrasyon uygulanır.

$$\int_{\Omega} w \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) d\Omega = - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) d\Omega + \oint w \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (10)$$

$$I = - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial m}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial m}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) d\Omega - \int_{\Omega} m g(x, y) \partial\Omega + \int_{\Gamma_e} m \frac{\partial u}{\partial n} \partial\Gamma \quad (11)$$

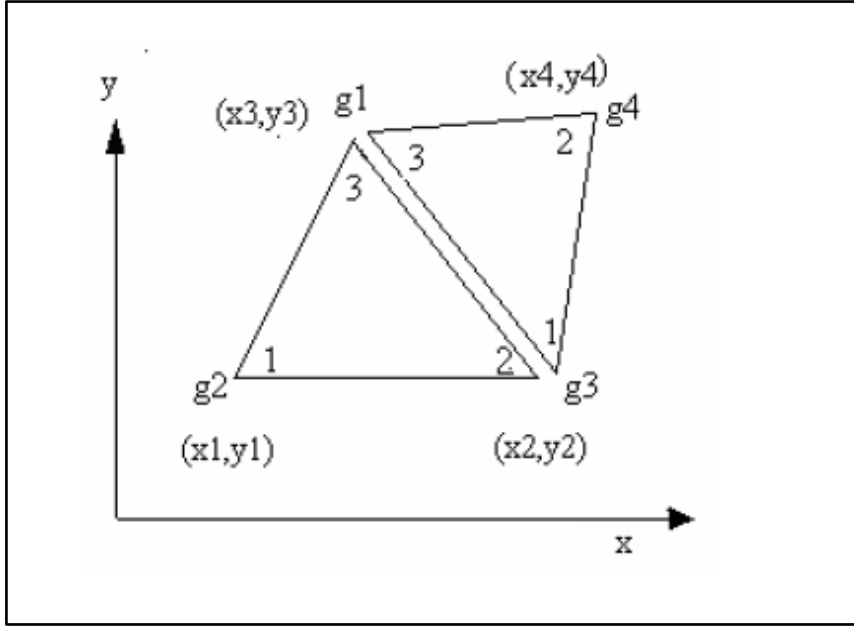
$$I = - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial m}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial m}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) d\Omega - \int_{\Omega} m g(x, y) \partial\Omega + \int_{\Gamma_e} m \frac{\partial A}{\partial n} \partial\Gamma \quad (12)$$

Temel denklem (A-V formulation) $g(x, y)$ kullanılarak ifade edilir.

$$g(x, y) = \mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla V \quad (13)$$

$$I = - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) d\Omega - \int_{\Omega} w \left(\mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla V \right) \partial\Omega + \int_{\Gamma_e} w \frac{\partial A}{\partial n} \partial\Gamma \quad (14)$$

İki boyutlu elementler kullanılarak etki alanı ayrıklaştırılır.



Şekil 11. Doğrusal üçgen elemanı

Doğrusal elementler şekil 11 de gösteriliyor. Her doğrusal köşede 3 düğüm vardır ve elementteki değişken interpolasyon x ve y de doğrusaldır. Sayısal numaralandırma yerel düğümü gösterir ve $g1$, $g2$, $g3$ ve $g4$ tüm alanın küresel düğümünü gösterir. $G1$, $g2$, $g3$ ve $g4$ koordinasyonu $(x1,y1)$, $(x2,y2)$, $(x3,y3)$ ve $(x4,y4)$ ' dir.

$$A = a_1 + a_2x + a_3y \quad (15)$$

$$A = [1 \ x \ y] \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (16)$$

A_i sabit değeri gösterir ve değer x_i ve y_i , i düğümünün koordinasyonu ile belirtilir. A değişen düğümdür. Her elementin düğümü aynı yörünge uzantısında olmalıdır. Değişken düğümler şöyle ifade edilir.

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2a_r} \begin{bmatrix} x_2y_3 - x_3y_2 & x_3y_1 - x_1y_3 & x_1y_2 - x_2y_1 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$a_r = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A'nın büyüklüğü doğrusal üçgenin çevresine eşittir. Eğer element düğüm numaralandırması sayaç saat yönünde alınıyorsa değeri pozitif ve saat yönünde alınıyorsa negatiftir (17) denklemini (15) 'e şöyle değiştiririz.

$$A = S_1(x, y)A_1 + S_2(x, y)A_2 + S_3(x, y)A_3 \quad (20)$$

$S_i(x, y)$ doğrusal üçgen elementinin şekil işlevidir.

$$S_1 = \frac{1}{2a_r} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_1)x + (x_3 - x_2)y] \quad (21)$$

$$S_2 = \frac{1}{2a_r} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (22)$$

$$S_3 = \frac{1}{2a_r} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_3 - y_1)x + (x_2 - x_1)y] \quad (23)$$

Şekil işlevi şöyle karşlanır: Diğer element (Ke) matris şöyle oluşturulur.

$$K^e = \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) d\Omega = \oint_{\Omega^e} \left[\left(\frac{\frac{\partial S_1}{\partial x}}{\frac{\partial S_2}{\partial x}} \right) \left(\frac{\partial S_1}{\partial x} \frac{\partial S_2}{\partial x} \frac{\partial S_3}{\partial x} \right) + \left(\frac{\frac{\partial S_1}{\partial y}}{\frac{\partial S_2}{\partial y}} \right) \left(\frac{\partial S_1}{\partial y} \frac{\partial S_2}{\partial y} \frac{\partial S_3}{\partial y} \right) \right] d\Omega \quad (24)$$

Ω element etki alanını gösterir.

24 denklemindeki şeklin değerleri şöyle bulunur :

$$[K^e] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$k_{11} = \frac{1}{4a_r} [(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2] \quad (26)$$

$$k_{22} = \frac{1}{4a_r} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2] \quad (27)$$

$$k_{33} = \frac{1}{4a_r} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2] \quad (28)$$

$$k_{12} = \frac{1}{4a_r} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \quad (29)$$

$$k_{13} = \frac{1}{4a_r} [(y_2 - y_3)(y_1 - y_3) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)] \quad (30)$$

$$k_{23} = \frac{1}{4a_r} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)] \quad (31)$$

$$k_{21} = k_{12} \quad (32)$$

$$k_{31} = k_{13} \quad (33)$$

$$k_{32} = k_{23} \quad (34)$$

Denklemler kullanılarak (26) – (34) (Ke) hesaplanır. Sonra küresel matris tüm çözüm alanı için belirlenir. Küresel matris elementlerin çevrilmesiyle yapılır. Bu düğümdeki potansiyel değere bağlıdır. Belirli küresel düğümün potansiyel değeri

düzeltilir, potansiyel değer tüm elementlere aynı belirli düğümde bağlılığını sürdürür. Bunun sonucu olarak düğüme bağlı element matrislerinin katsayılar cebirsel toplamı küresel düğümün potansiyelini verir. Bu şekilde tüm elementler birleştirilir ve küresel matris oluşturulur. Örneğin Şekil 11 de dört küresel düğümü ve g1 ve g3' ün ortak olduğu iki elementi gösterir. Element 1 küresel düğüm g1,g2,g3den oluşur ve yerel düğümler 3,1,2 dir. Element 2 g1, g3, g4'den oluşur ve yerel düğümleri 3,1,2 dir. Küresel matrisin elementi;

$$K_{11}^g = K_{33}^1 + K_{33}^2 \quad (35)$$

Benzer olarak k 822 ve k 833 hesaplanır. Fakat k821=k113 çünkü bu elementin branşdır. Benzer olarak k823, k844 ve k841 elde edilir. Fakat k813 için k213=k132=231 çünkü iki komşu elementin ortak alanıdır. Sonra küresel matris oluşturulur. 14 denkleminin ikinci devresinden diğer matrisi çıkarabiliriz.

$$\int_{\Omega} m \mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \partial \Omega = p \int_{\Omega} m \frac{\partial A}{\partial t} \partial \Omega = p \int_{\Omega} \begin{pmatrix} S_1 & & & \\ & S_2 & & \\ & & S_3 & \\ & & & S_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{A}_1 \\ \dot{A}_2 \\ \dot{A}_3 \end{pmatrix} \partial \Omega \quad (36)$$

$$N_{ij} = (p * a_r) / 2 \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} \end{pmatrix} \quad (37)$$

$$N_{11} = N_{22} = N_{33} = 2 \quad (38)$$

$$N_{12} = N_{21} = 1 \quad (39)$$

$$N_{13} = N_{31} = 1 \quad (40)$$

$$N_{ij} = (p * a_r) / 2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

N8 k2yle aynı şekilde hesaplanır.

Ve (14) denkleminin üçüncü devresi :

$$\int_{\Gamma} \frac{\partial A}{\partial n} \partial \Gamma = q \int_{x_i}^{x_j} \left(\frac{\frac{x_j - x}{x_j - x_i}}{\frac{x - x_i}{x_j - x_i}} \right) dx = \frac{ql_{ij}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = C \quad (42)$$

element sınırının uzunluğu olarak belirlenir.

(4) denkleminin üçüncü parçasından şunu anlayabiliriz.

$$[N^g](\dot{A}^t) + (K^g)(A^t) = (C^t) \quad (43)$$

T zaman anını gösterir.

İleri veya geri farklı teknikler kullanılarak 43 denkleminin zaman alanı çözümünü hesaplayabiliriz. Bu ileri farklı tekniğe göre :

$$(\dot{A})^t = \frac{(A)^{t+\nabla t} - (A)^t}{\nabla t} \quad (44)$$

Denklem 44'i, Denklem 43'e şöyle çeviririz:

$$[N^g](A)^{t+\nabla t} + [K^g](A)^t = (F)^t \quad (45)$$

$$[N^g] + \nabla t [K^g](A)^{t+\nabla t} = \nabla t (F)^{t+\nabla t} + [N^g](A)^t \quad (46)$$

A1 ve A2 zamandaki değişen değerlerdir. Bu ayırıklaştırma yöntemi manyetik vektör potansiyeli, elektrik alanı, akım yoğunluğu simülasyonunda, HTS kablodaki AC kaybında MATLAB ev programı olarak kullanılır.

3. BULGULAR

3.1. Üstün iletkenler için kayıp neden önemlidir?

Bilindiği gibi üstüniletkenler DC akımı kayıpsız ya da ihmal edilebilecek kadar düşük kayıplar ile iletebilirler. Ancak bir üstüniletkenden kritik akım yoğunluğu I_c yakın miktarlarda bir akım geçirildiği zaman ya da değişken bir manyetik alana maruz kaldığı zaman, üstüniletkende bir ısı açığa çıkar. Üstüniletkenlerde kayıpları düşürmek ya da en azından kontrol edebilmek üstüniletkenlerin güç uygulamalarında belirleyici faktördür.

3.2. U Profiline Sahip Ferromanyetik Malzeme İle Kaplanmış İkinci Kuşak İletkenlerden Yapılan Güç İletim Kablolarında AA Kayıplar

Üstüniletken güç iletim kablolarının en bilinen kullanım alanları manyetik rezonans görüntüleme ve füzyon reaktörleridir. Bu tip uygulamalar üstüniletken kullanmaksızın yapılamamaktadır. Ancak son zamanlarda güç iletimi, kaçak akım sınırlayıcı, manyetik enerji depolayıcı gibi sistemlerde üstüniletkenler yoğun bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamalarda belirleyici faktör alternatif akım kayıplarıdır. Alternatif akım kayıplarını düşürmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalarda öne çıkan iki yöntem ya iletkenlerin fiziksel parametrelerini etkileyecek şartları değiştirmek ya da kablo üzerine iletkenlerin dizilimini değiştirmek şeklindedir.

Birinci yöntemde üstüniletkenin akım dağılımını ve mekanik özelliklerini değiştirecek şartlar üzerine yoğunlaşmıştır. Örneğin farklı altlıklar üzerinde üstüniletkeni yerleştirmek gibi. Daha önceki çalışmalar da ferromanyetik altlık üzerinde büyütülmüş iletkenlerden yapılan kablolarda oluşan kayıplar incelenmişti. Uçları ferromanyetik malzeme ile kaplanmış iletkenlerden oluşan kablolardaki alternatif akım kayıpları incelenmiştir. Kuriger vd. atnalı biçiminde kaplanmış ikinci kuşak iletkenlerde manyetizasyon kayıplarını incelemiş ve uçları ferromanyetik malzeme ile kaplamanın manyetizasyon kayıplarını azalttığını rapor etmiştir (Krüger vd, 2011). Aynı şekilde (Safran ve Gömory, 2010) birinci kuşak BSSCO şeritlerde ferromanyetik

malzeme ile kaplamanın manyetizasyon kayıplarını önemli ölçüde düşürdüğünü hem deneysel hem de teorik olarak göstermiştir (Gömöry vd, 2007; Safran vd, 2010). Ancak yapılan detaylı literatür incelemesinde gerek tellerde gerekse de tellerden yapılan kablolarda U profiline sahip iletkenlerden yapılan kablolarda oluşan transport akım kayıpları incelenmemiştir. Bu çalışmada U profilinin etkisini detaylı bir biçimde göstermek için iki tabakalı iletkenlerdeki AA kayıpları incelenmiştir.

Bu çalışmada iç yarıçapı R_i ve dış yarıçapı R_d olan yuvarlak bir kablo üzerine kaplı iletken şeritlerin Şekil 12'deki gibi dizilimi göz önüne alınmıştır. Üstüniletkenin yerleştirildiği altlığın etkisi dikkate alınmamıştır. Kablonun geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Hesaplamalarda yapının periyodikliğinden dolayı yalnızca iki tane üstüniletken şerit üst üste geldiği kablonun $2\pi/N_{\text{şerit}}$ kısmı dikkate alınmıştır. Şeritlerin spirale sarılmaları göz ardı ediliyor.

Tablo 2. Hesaplamalarda kullanılan parametreler.

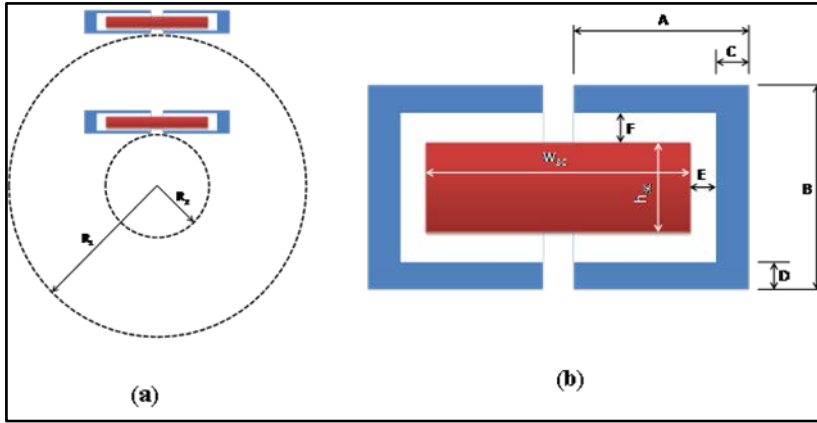
| Nicelik | Değeri |
|---|---------------------|
| I_c | 2400 A |
| A_n | $1,8 \cdot 10^{-7}$ |
| w_{SC} | 4 mm |
| h_{SC} | 2 μ m |
| A (Ualthığın eni) | 20 mm |
| B (FM altlığın boyu) | 25 mm |
| R_i (kablunun iç yarıçapı) | 19,98 mm |
| R_d (kablunun dış yarıçapı) | 20,93 mm |
| R_u (Hesaplama yapılacak uzayın yarıçapı) | 25 cm |
| N (her tabakadaki şerit sayısı) | 15 |
| F | 50 Hz |
| w_T | 4 mm |
| h_T | 80 μ m |
| h_B | 0,1 μ m |
| A | $w_{SC}/4+h_B+h_T$ |
| B | $2(h_B+h_T)+h_{SC}$ |
| E, F | h_B |
| D, C | h_T |

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. 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.

$$A_b = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{r}{R_i + h_{SC}} \right) + \ln \left(\frac{r}{R_d + h_{SC}} \right) + 2 \right) \quad (47)$$

Burada, μ_0 , boşluğun geçirgenliği; I , uygulanan akımın genliği ve h_{SC} üstüniletken tabakanın kalınlığıdır.

Üstüniletken kısmın örgülemesi için örgülemeye en/boy=20/2100 olacak şekilde quadrilateral örgü elamanı kullanılmış, diğer hem uzay hem de ferromanyetik kısımda üçgensel örgü kullanılmıştır. Örgü noktası sayısı: 102715, mesh elemanların sayısı (85361 üçgen ve 60000 quadrilateral):145361, minimum mesh kalitesi: 0.572 çıkmıştır. Üstün iletken ve ferromanyetik bölge dışındaki hesaplamanın yapıldığı uzay üçgenler ile örgülenmiştir.



Şekil 12. (a) Hesaplalarda dikkate alınan kablo geometrisi (b) kablolarda kullanılacak iletkenlerin biçimi. Geometrik parametreler Tablo 2’de verilmektedir

Alternatif akım kayıplarını hesaplamak için iletkene bir tam periyotluk sürede akım uygulamak gerekmektedir. Uygulanan akımın frekansı 1 Hz mertebesindedir. Ancak 50 Hz’lik akım uygulamakta AA eğrilerinin biçimini çok fazla etkilemektedir. Akım $T/4$ ile $3T/4$ arasındaki bir periyotta uygulanmaktadır. 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 vektör potansiyeli ifadesinin zaman türevi şu şekilde yazılabilir:

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

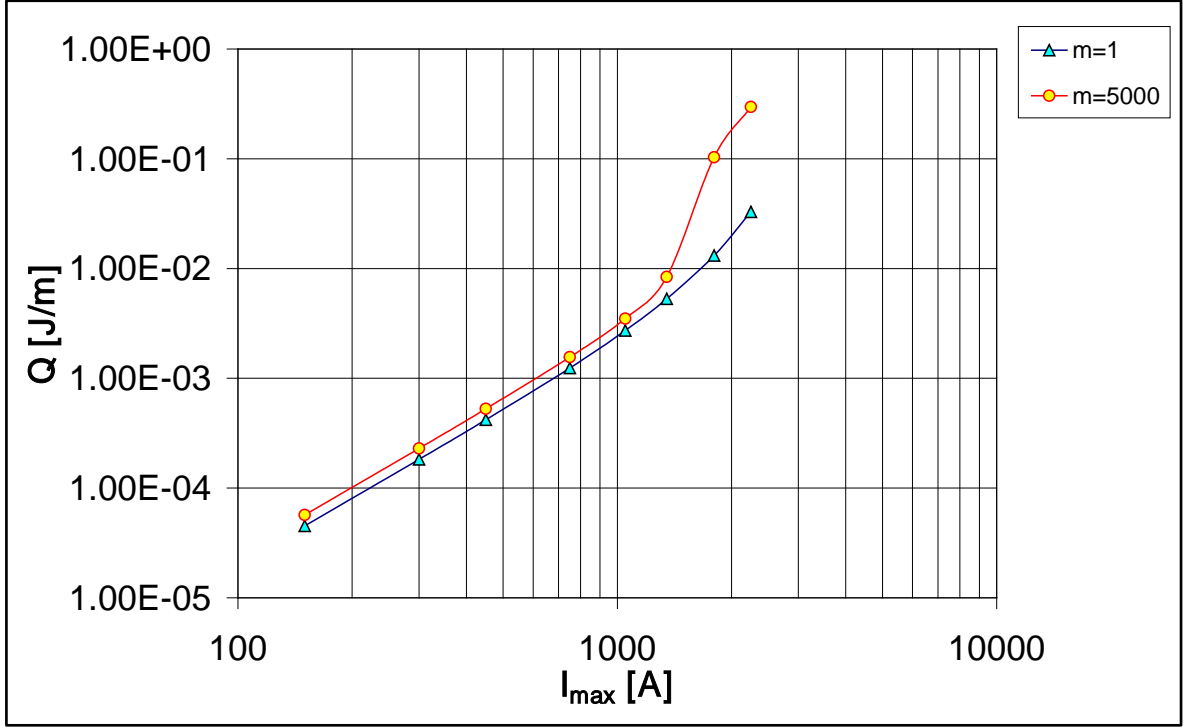
Çevrimin başlangıç kısmı yani $T/2$ ’lik kısmı çevrim rejimi ile temsil edilemez, bu nedenle hesaplama $t=T/2$ ’den başlatılmıştır.

Şekil 13 uygulanan maksimum akımın genliğine karşı daha önceki çalışmalarda geliştirilen yöntem kullanılarak hesaplanan üstüniletken tüplerdeki toplam AA kaybını gösteriyor. Hesaplamalarda ferromanyetik malzeme içerisinde akı ile manyetik alan şiddeti arasında $B = \mu_0 \mu_r H$ biçiminde bağlantıya sahip olduğu kabul ediliyor. Nispi manyetik geçirgenlik μ_r in alan, sıcaklık ve konum bağılıkları ihmal edilmektedir. Bu şekilde sadece üstüniletken üzerindeki kayıplar incelenmektedir. Grafikte ferromanyetik etkinin olmadığı $\mu_r=1$ ve kuvvetli ferromanyetizmayı temsil eden $\mu_r=5000$ olan iki durum karşılaştırılıyor. Ayrıca şekilde daha önceki çalışmalarda 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 ya da 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 kablonun 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 bağıllığı bir histeresiz meydana getirir. Her bir çevrim için üstüniletkende meydana gelen AA kaybı bu histeresizin alanına eşittir (Kovac vd., 2003).

$$Q = \oint \Phi dI \quad (49)$$

Şekilden de görüldüğü gibi kuvvetli ferromanyetik malzeme kullanılmasına karşın üstüniletken üzerindeki kayıplar önemli ölçüde artmamaktadır. Hem yüksek akım

genliklerinde hem de düşük akım genliklerinde kayıp doğrusal olarak azalmaktadır.

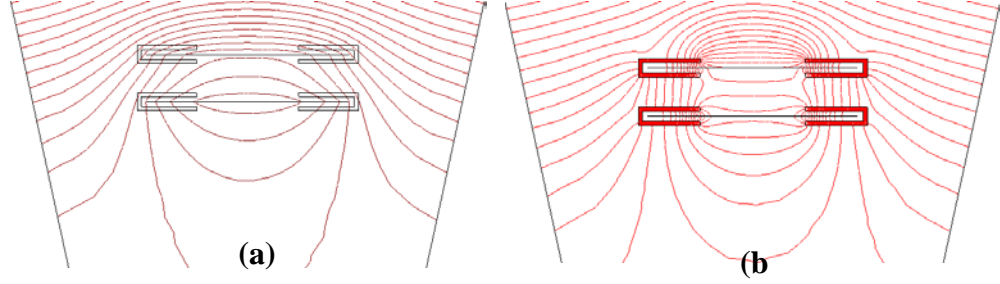


Şekil 13. Farklı nispi genlikler için üstüniletkenlerde oluşan kayıpların karşılaştırılması.

Şekilden de görüldüğü gibi I_c 'ye yakın akım genliklerinde yani yüksek akımlarda manyetizmanın etkisi çok ciddi bir biçimde açığa çıkmaktadır. Fakat düşük akım bölgesinde ise $\mu_r=5000$ olan malzemedeki kayıp $\mu_r=1$ olan manyetik olmayan malzemedeki kayıp arasında %1 gibi bir daha fazladır. Ayrıca yüksek akım ($I_a \sim 0.9 I_c$) bölgesindeki kayıp düşük akım ($I_a \sim 0.1 I_c$) bölgesindeki kayıptan yaklaşık 10 kat daha fazladır. Bu da bu tip bir konfigürasyonun özellikle kablunun kritik akım yoğunluğunun yarısından daha küçük ($I_c/2$) bölgelerde performansının iyi olabileceğini göstermektedir.

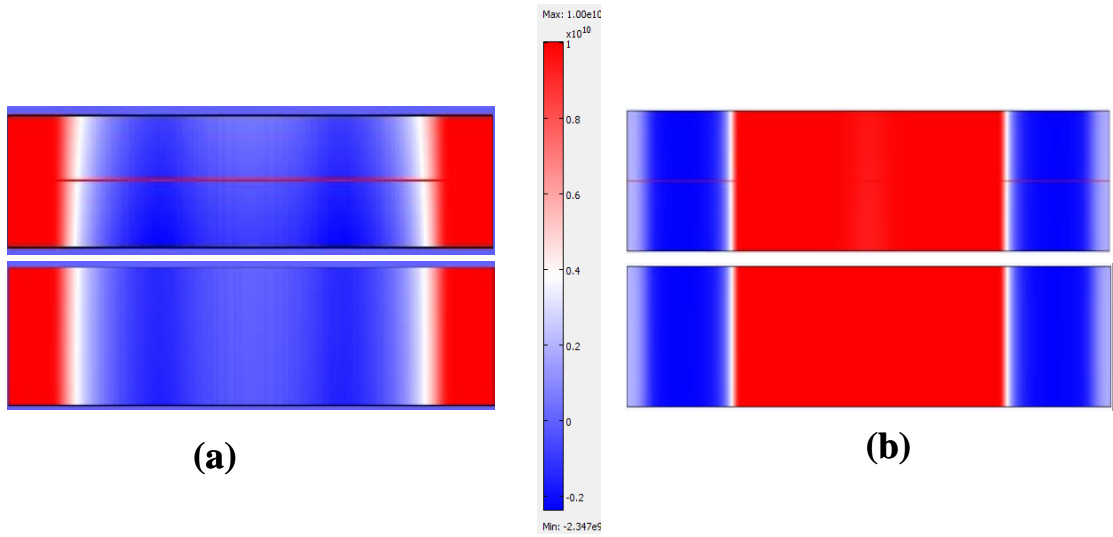
Şekil 14 üstüniletken etrafındaki manyetik potansiyel dağılımını gösteriyor. Şekilden de görüldüğü üzere ferromanyetik kaplamanın olduğu uçlarda manyetik alanın dik bileşeni önemli ölçüde artmakta oysa iletkenin orta kısmında ise akımın yatay bileşeni önemli ölçüde artmaktadır. Dolayısıyla iletkenin ortasında kayıplar azalırken uçlarda artması beklenmektedir.

Şekil 15 iki boyutta ve Şekil 16 tek boyutta üstün üzerindeki akım dağılımını gösteriyor Şekil 14 ile bağlantılı olarak manyetik alanın dik bileşeninin baskın olduğu bölgelerde üstüniletkene daha fazla akı nüfuz etmekte ve daha fazla akım geçmektedir.

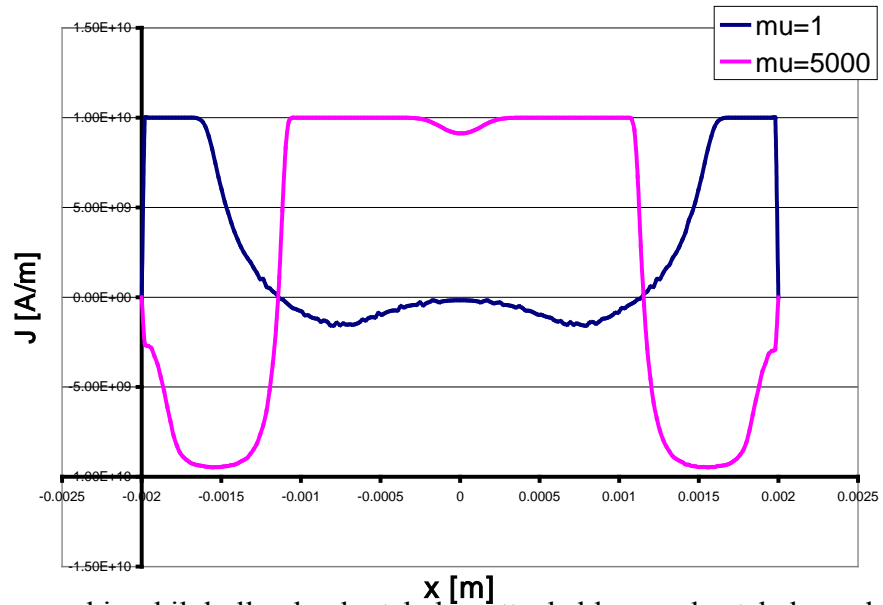


Şekil 14. (a) Manyetik olmayan yani $\mu_r=1$ ve kuvvetli ferromanyetik malzeme ile kaplanmış $\mu_r=5000$ için üstüniletken etrafındaki manyetik potansiyel dağılımı. Ferromanyetik kısım manyetik alanı üzerine toplamaktadır. Kuvvetli FM yapı için manyetik alanın dik bileşeni artmakta oysa özellikle dıştaki iletken için U'ların arasında kalan bölgede manyetik alanın yatay bileşeni çok daha baskın olmaktadır.

Dolayısıyla $\mu_r=5000$ için üstüniletkenin köşelerinde akım ciddi oranda değişim göstermekte oysa diğer kısımlarda akım dağılımı neredeyse hiç etkilenmemektedir. Negatif akım ferromanyetik kaplamanın olduğu bölgede yani üstüniletkenin kenarlar bölgelerinde akmayı tercih etmekte pozitif akım ise iç kısımlardan geçmektedir. $\mu_r=1$ için ise bu durumun tam zıddıdır. Akımın etkilenmediği bölgenin genişliği $A(\mu_r = 5000)/A(\mu_r = 1) \approx 2.51$ civarında olmaktadır. Sonuç olarak bu durum hem üstüniletkenin mekaniksel mukavemetini arttırmak hem de AA akım kayıplarını azaltmak için yeni bir yöntem olabilir.



Şekil 15.(a) Manyetik olmayan bir malzeme ile kaplanmış ($\mu_r=1$) ve (b) yatık U-biçiminde kuvvetli ferromanyetik ($\mu_r=5000$) malzeme ile kaplanmış üstüniletkenler üzerindeki iki boyutta akım yoğunluğu dağılımları. Manyetik olmayan malzeme ile kaplı kablolarda indüklenen akım numunenin merkezinden akıyorken diğerinde numenin kenarlarından akmayı tercih etmektedir. Dikkat edilirse FM kaplı yapı için hem üstteki iletken de hem de alttaki iletkeninde akım dağılımı daha homojen olmaktadır.



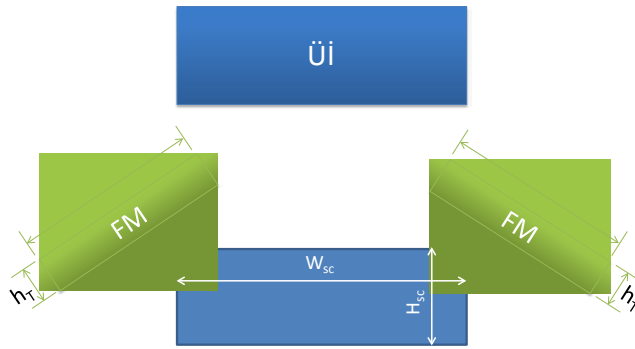
Şekil 16. Bir önceki şekil kullanılarak, tek boyutta kablunun dış tabakasında akan akımların ($\mu_r=1$ ve $\mu_r=5000$) karşılaştırılması.

3.3. Yüksek Sıcaklık Üstüniletken Kablolarda Ferromanyetik Saptırıcıların Transport Akım Kayıplarına Etkisi

Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerin (YSÜİ) gelecek vaat eden uygulamalarından birisi elbette güç iletimidir. Geleneksel kablolarla göre bu kabloların en büyük avantajı yüksek akım taşıyabilme kabiliyetleri ve verimlilikleridir. Bu kablolar genellikle 64 ile 77 K arasındaki sıcaklıklarda işlem görürler. Alternatif akım kayıplarını bilmek hiç şüphesiz güç iletiminde çok önemlidir. Kablolarda meydana gelen alternatif akım kayıplarını etkileyen faktörler şunlardır: (i) kabloyu oluşturan iletkenlerin sayısı ve boyutları (ii) kablo üzerine iletkenlerin geometrik yerleşimi (iii) iletkenin kablo gövdesine sarılma açısı ve uzunluğu “twist-pitch length”. Yüksek sıcaklıklarda YSÜİ lerin kritik akım yoğunlukları yerel manyetik alan dağılımına çok bağlıdır. Güç iletim kablolarının toplam kritik akım yoğunluğu kabloyu oluşturan şeritlerin tek tek kritik akım yoğunluklarının toplamından daha fazladır (Rostilla vd., 2007). Bunun nedeni manyetik alan dağılımındaki değişim daha elverişli bir yönde, özellikle tek bir şeridin kenarları boyunca olmaktadır.

Ferromanyetik saptırıcılar üstüniletken bobinlerde ve pratik uygulamalarda başarılı bir biçimde test edilmiştir (Pardo vd., 2009; Wen vd., 2009). Ferromanyetik kılıfla kaplanmış şeritlerde kritik akım yoğunluğunda bir düzeltme olduğu (Kovac vd., 2003) bildirilmiştir. Ferromanyetik malzeme, iletken içerisindeki filamentlerin birbirleri ile bağlaşımını keseceği ileri sürülmüşlerdir (Glowackı ve Majoros vd., 2000). Bu tabii ki transport AA kayıplarda bir azalmaya neden olacaktır. (Majoros vd., 2009) da filemanları arasındaki boşluklara ferromanyetik malzeme ile doldurularak elektromanyetik olarak birbirleri ile etkileşimi kesilmiş kaplı iletkenlerde AA kayıplarda bir azalma olduğu hesaplanmıştır. Ferromanyetik malzeme ile kaplanmış üstüniletken “stripin” perdelenmesi (Yampolski vd., 2007; Farinon vd., 2005) ve yapılmıştır. Ferromanyetik altlık üzerinde yapıştırılmış üstüniletkenlerde transport akım ve uygulanan manyetik alandan kaynaklanan alternatif akım kayıplarına manyetizmanın etkisi (Seiler ve Gömöry vd., 2006) ve (Suenaga vd., 2008) tarafından incelenmiştir. Kısmi bir ferromanyetik malzeme ile kaplanmış BiSCCO-2223 şeritlerin performanslarında önemli bir düzeltmenin olacağı bildirilmiştir.

Tek tabakalı üstüniletken kablolarda şeritlerin üst kısmına ve iki şerit arasındaki boşluğa denk gelecek şekilde bir ferromanyetik saptırıcı yerleştirildiğinde transport AA kayıplarında bir düşme olacağını hem teorik hem de deneysel olarak göstermişlerdir (Vojenciak vd., 2011). Ancak iki tabakalı kablolarda ferromanyetik saptırıcıların etkisi ne deneysel ne de teorik olarak incelenmiştir. Bu bölümde iki tabakalı kablolarda üst üste konulan iki şerit arasına ve şeritlerin arasındaki boşluğa denk gelecek şekilde yerleştirilmiş ferromanyetik şeritlerin etkisi benzeşimle incelenmiştir. Sonuçta ferromanyetik saptırıcıların toplam transport akım kayıplarını artırdığı görülmüştür.



Şekil 17. Benzeşimlerde kullanılan ferromanyetik (FM) saptırıcı ileten dizilimi. Yan yana iki üstüniletken arasındaki boşluğa gelecek şekilde ferromanyetik saptırıcılar yerleştirilmiştir. w_{sc} , üstüniletkenin eni, h_{sc} üstüniletkenin boyu, w_T ferromanyetik şeridin eni ve h_T ise FM şeridin boyudur.

Bu çalışmada Şekil 17’de kesit alanı verilen kablo yapısı benzeşimle incelenmiştir. Benzeşimde akım z- yönünde uygulandığı kabul edilmekte ve vektör potansiyeli A_z bağımsız değişken olarak alınmıştır. Vektör potansiyelinin rotasyoneli manyetik akıyı verecektir. Seçilen iletenlerde altlığın etkisi hesaplamalarda hiç dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla hesaplamayı basitleştirmek için geometriye konulmamıştır. Bu hesaplamada kablonun iç yarıçapı $R_i=20$ mm dış yarıçapı $R_d=21$ mm olarak seçilmiştir. Üstüniletkenlerin eni ve boyu sırasıyla standart American Superconductors Inc. Firması tarafından üretilen şeritlerin geometrik özellikleri ile aynı $w_{sc} = 4\text{ mm}$ ve $h_{sc} = 2\ \mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Ferromanyetik saptırıcıların eni ve boyu ise sırasıyla $w_T = 5\text{ mm}$ ve $h_T = 80\ \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.

Tabi ki burada bu parametrelerin seçimindeki esas etmen kablonun diğer dizilimlerle bir karşılaştırılma yapılabilmesini sağlamaktır.

Ferromanyetik saptırıcıların manyetik akı bağımlılığı $B = \mu_0 \mu_r H$ biçiminde olduğu kabul edilmiştir ve nispi manyetik geçirgenlik $\mu_r = 5000$ olarak alınmıştır. Bu durum iletkenler üzerine kuvvetli manyetizmanın etkisini açık olarak verecektir. Ferromanyetik kayıplar göz ardı edilmektedir. Her bir şeridin kritik akım yoğunluğu $I_c=80$ A olarak alınmıştır ve kritik akım şiddeti, yoğunluğunun üstüniletkenin kesit alanı A_{SC} üzerinden integrali alınarak,

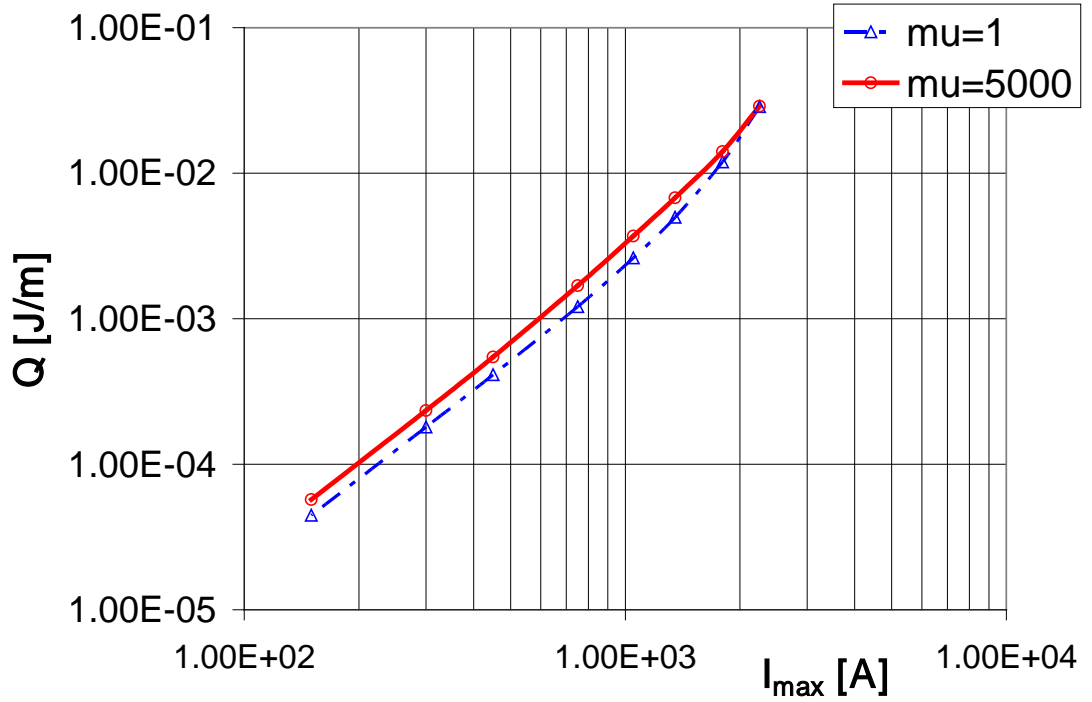
$$I_c = \int_{A_{SC}} J_c dA_{SC} \quad (50)$$

hesaplanmaktadır. Benzeşimlerde kritik akım yoğunluğunun alan ve konum bağılılıkları ihmal edilmiştir. İki tabakalı yuvarlak kablolarda üzerine yapılacak detaylı hesaplamalarda özellikle konum bağılılıkları dikkate almak gerekebilir. Üstüniletkene $I(t) = I_{\max} \sin(2\pi ft)$ biçiminde bir akımın uygulandığı kabul edilmektedir. Burada I_{\max} , uygulanan akımın genliği; f , frekansını göstermektedir. Uygulanan akımın frekansı 1 Hz olarak seçilmiştir. Hesaplamalarda yapının periyodikliği dolayısıyla yalnızca iki şeridin üst üste geldi durum dikkate alınmıştır. Ferromanyetik saptırıcıların yalnızca yarısı dikkate alınmıştır.

Kablo yapısında sınır şartı olarak Denklem 85 'de verilen sınır şartı burada da kullanılabilir. Ayrıca yanal sınır şartları için manyetik alanın dik bileşeninin sürekliliği kabul edilmiştir. Hesaplamalarda üstüniletkenlik akımı,

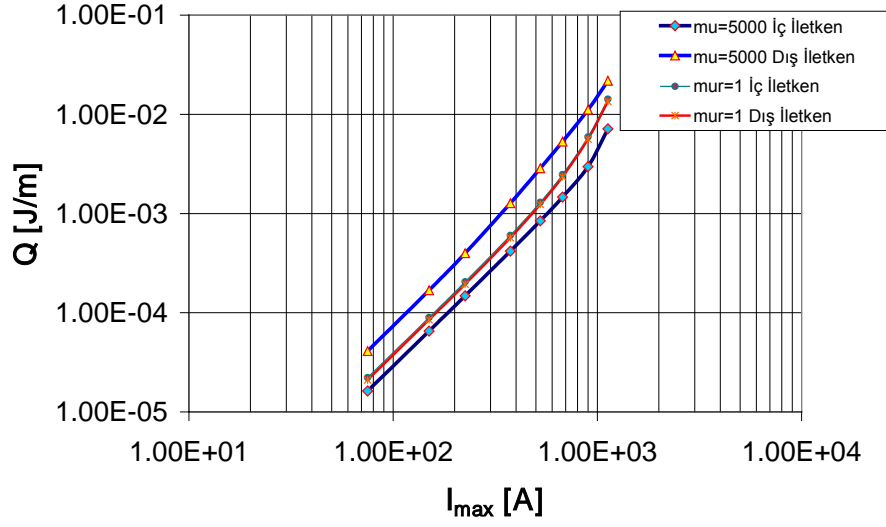
$$j_{s,z}(x, y) = J_c \tanh\left(\frac{A_p(x, y) - (A_z(x, y) + \nabla V)}{A_n}\right) \quad (51)$$

şeklinde alınmıştır. Burada A_p iletken şeritler üzerindeki bir önceki hesaplamada elde edilen manyetik potansiyel ifadesidir. ∇V skaler potansiyel ve A_n ise skalalama parametresidir.



Şekil 18. $\mu_r = 1$ ve $\mu_r = 5000$ seçilerek kablo üzerindeki toplam transport akım kayıpları.

Şekil 18’de ferromanyetik saptırıcıların etkisini düzgün bir şekilde göstermek için manyetik hiçbir malzemenin kullanılmadığı kaplı iletkenlerden yapılmış kablo ile çok kuvvetli ferromanyetik şeritlerin yerleştirilmesi ile yapılmış üstüniletken kablolardaki transport akım kayıpları karşılaştırılıyor. Burada yalnızca iletken şeritler üzerindeki kayıp dikkate alınıyor. Ferromanyetik kayıplar hiçbir şekilde dikkate alınmıyor. Şekilden de görüleceği için kablonun kritik akım yoğunluğuna yakın akım genliklerinde, $\mu_r = 1$ için oluşan kayıp Q_n ile $\mu_r = 5000$ kullanılan yapıdaki kayıp Q_{FM} yaklaşık birbirine eşittir. Ancak düşük akım genliklerinde Q_{FM} kaybı önemli ölçüde artmaktadır. $I_{max} \approx I_c/2$ akım genliklerinde Q_{FM} kaybı diğer yapıya göre yaklaşık % 40 daha fazla çıkmaktadır. Çok düşük akım genliklerinde ise $I_{max} \approx I_c/20$ civarında kayıp oranı bir miktar azalmakta ve ferromanyetik saptırıcıların kullanılmadığı yapıya göre %28 daha fazla çıkmaktadır. Bunun nedeni ilerde tartışılacaktır.

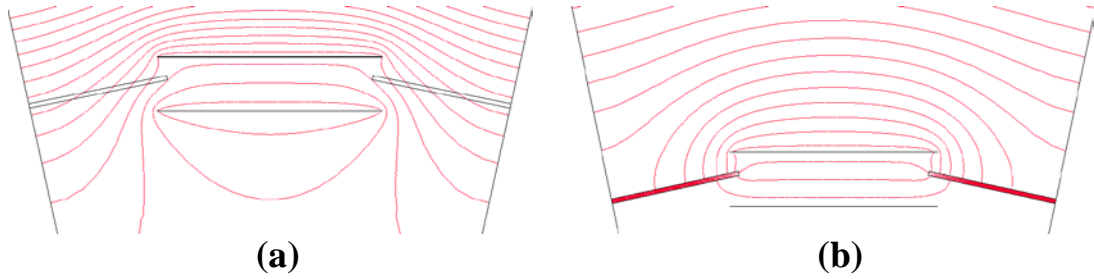


Şekil 19. Her iki yapılanma için içteki ve dıştaki iletkenlerde hesaplanan kayıpların karşılaştırılması.

Burada bir diğer ilginç durum ise Şekil 19’da verilmiştir. Şekil 19’da her iki konfigürasyon için içteki ve dıştaki iletkenler arasındaki kayıplar karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere genel olarak $\mu_r = 1$ yapılanması için içteki iletken ve dıştaki iletkende hesaplanan kayıplar hemen hemen eşittir ancak FM saptırıcıların kullanıldığı yapılanmada içteki iletkende oluşan kayıp dıştaki iletkende oluşan kayıptan önemli ölçüde düşüktür. I_c ’ye yakın akım genliklerinde dıştaki iletkende oluşan kayıp içteki iletkeninde oluşan kayıptan bir miktar düşüktür ancak $3/4 I_c$ civarında ise bu dıştaki iletkendeki kayıp içtekinin yaklaşık dört katına kadar çıkmaktadır. Çok düşük akım genliklerinde ise $I_{max} \approx I_c/20$ civarında $Q_{FM,du}/Q_{FM,iç} \approx 2.5$ kat civarında olmaktadır. Tabii ki buradaki en önemli nokta dış ve içteki iletkenler arasındaki kaybın ferromanyetik saptırıcılar kullanılarak ayarlanabileceğidir. Teknolojide bazı durumlarda işlem ve soğutma maliyetlerini düşürmek için içteki iletkenlerdeki kaybın düşürülmesi gerekebilir.

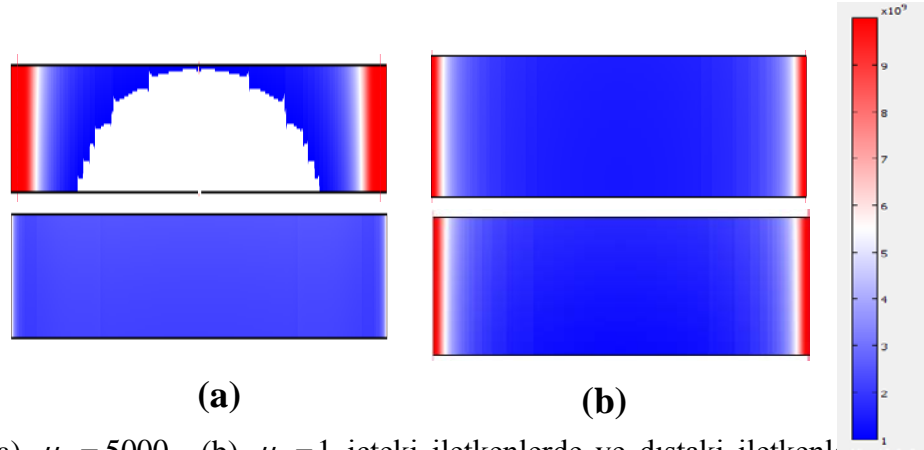
Şekil 20’de her iki kablo yapılanması için manyetik potansiyel dağılımı veriliyor. Manyetik hiçbir malzemenin kullanılmadığı kablolarda hem içteki iletken hem de dıştaki iletken aynı oranda self alana maruz kalmaktadır.

Oysa FM saptırıcıların kullanıldığı yapılanmada FM şeritlerin üzerinde önemli ölçüde manyetik alan birikmekte ve özellikle dıştaki iletkenin daha fazla manyetik alana maruz kalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte bu manyetik alan birikmesi dıştaki iletkenin uçlarında manyetik alanın dik bileşenini daha baskın konuma getirmektedir. Oysa içteki iletkenin ürettiği self alanı üzerinde toplayarak içteki iletkenin daha az alana maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu içteki ve dıştaki iletkenlerde oluşan kaybın neredenli bu kadar büyük olmasını açıklayabilir.



Şekil 20. (a) $\mu_r = 1$ (b) $\mu_r = 5000$ için üstüniletken kabloları oluşturan iletkenler etrafındaki manyetik potansiyel dağılımı.

İncelenmesi gereken bir diğer önemli nokta ise şeritler arasındaki akım dağılımıdır. Şekil 21’de her iki durumda $I=18.5$ A uygulanan akımda şeritlerde oluşan akım dağılımları gösteriliyor. Şekilden de görüleceği üzere $\mu_r = 1$ yapı için hem içteki hem de dıştaki iletkenlerdeki akım dağılımları denktir. Kaplı iletkenin genellikle merkezi bölgelerinde negatif akım akıyorken kenarlarından ise kritik akım yoğunluğu I_c mertebesinde pozitif akım akmaktadır. $\mu_r = 5000$ için ise durum tamamiyle farklıdır. Hem içteki akımın hem de dıştaki akımın deseni birbirinden oldukça farklıdır. Dıştaki iletkenin kenarlarında I_c oranında fakat $\mu_r = 1$ yapısına göre daha geniş bir bölgede pozitif akım akmaktadır. Bu manyetik alanın daha fazla nüfuz ettiği anlamına gelmektedir. Altta iletkeninde ise pozitif akım akan bölge çok çok küçüktür dolayısıyla kayıp daha az çıkmaktadır.



Şekil 21. (a) $\mu_r = 5000$ (b) $\mu_r = 1$ içteki iletkenlerde ve dıştaki iletkenlerde oluşan akım dağılımı.

3.4. Ferromanyetik Altlıklı İkinci Kuşak Tellerden Şerit-Boşluk Yapısında Dizayn Edilen Kablolarda Kayıplar

Üstüniletkenlerdeki kayıp mekanizmasını kavramsal olarak daha iyi kavrayabilmek için altı tipe ayırmak gerekir. Birincisi, Bean yüzey kaybıdır. Bu şekilde isimlendirilmesinin nedeni yüzeyine paralel bir manyetik alana maruz kalmış bir üstüniletken slabın yüzeyinde ilk defa Bean tarafından hesaplanan kayıp ile aynı mekanizmaya sahip olmasıdır (Bean vd., 1972; Campbell ve Evetts vd., 1972). Bu kayıp uygulanan alanın (B_a) küpü ile artar ($Q \propto B_a^3$) ve birinci kuşak BSSCO'dan tellerde bu kayıptan gelen katkı diğerlerine göre çok daha baskındır. En basit yaklaşım (Vellego ve Metra vd., 1995) tarafından “monoblok” modeli olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşımda bütün bir kablo üstüniletken bir tüp gibi ele alınmış ve yüzeyin dışarısında Bean modeli yüzey kayıpları hesaplamışlardır. Şeritlerin helisel bir şekilde sarıldığı ancak komşu iki şerit arasında hiç boşluğun bulunmadığı çok tabakalı kablolar için daha detaylı modeller geliştirilmiştir. Bean modelinde kayıp ifadesi üstüniletkenin kritik akım yoğunluğu ifadesi J_c ile ters orantılı olduğu için ve ikinci kuşak tellerde J_c birinci kuşak tellerdekine göre iki kat fazla olduğu için bu terim genellikle ihmal edilebilir.

Helisel olarak sarılmış faz iletkenlerinde AC kayıplar için ikinci mekanizma komşu teller arasındaki sonlu boşluktan gelir ki bu boşluklar azimutal (dairesel) alanların yolunu bozar ve bu şekilde alanın dik (radyal) bileşenini daha baskın hale getirir. Düzlemsel geometri için aralık kayıpları (gap loss) ilk defa Norris tarafından hesaplandı (Norris vd., 1970) ve daha sonra Majoros tarafından düzeltildi (Majoros vd., 1996). Boşluk kayıpları boşluğun karesi ve uygulanan alanın dördüncü kuvveti ile artmaktadır. Bu model daha sonra Mawatari tarafından silindiriksel bir gövde üzerine

sarılmış tellere uygulandı (Mawatari vd., 2009). Kayıplarla ilgili üçüncü mekanizma, eğer silindiriksel gövde üzerine yerleştirilen teller gövde ile uyumlu olarak yerleştirilmemişse poligonal konfigürasyondan ortaya çıkar. Teller arasındaki açı, boşluk olmasa bile, yüzeye paralel olan alanların yolunu bozar ve manyetik alanın yada self alanın tel düzlemine dik bileşeni daha baskın hale geçer .Bu iki mekanizmadan kaynaklanan AA kayıpları ikinci kuşak tellerden yapılmış tek tabakalı üstüniletken kablolar için hesaplanmış (Mawatari vd., 2009; Malozemoff vd., 2009) ve mertebe olarak Bean yüzey kayıplarından daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Beşinci mekanizma akı kesinimi “flux-cutting” kayıplarıdır. İç yüzeyden ve dış yüzeyden nüfuz eden akının bir birleri ile çarpışmasından ortaya çıkar (Clem vd., 1982). Bu kayıp mekanizması henüz tam olarak ortaya konulmamıştır ve anlamak için daha fazla çalışma gerekmektedir. Beşinci mekanizma belli bir sarım tabakasındaki (genellikle dış tabaka) I_{ct} akım şeridinin toplam kritik akım değerini aştığı zaman ortaya çıkar. Her ne zaman tabakalar arasında bir akım dengesizliği oluşursa bu kayıp ortaya çıkar. Tabakalar arasında (dış tabakadan içerideki tabakalara doğru) akım ve arkasından gelen manyetik akı transferi çok büyük kayıplara neden olabilir. Akı transferi kayıpları için çok basit bir yaklaşım iç içe geçmiş iki üstüniletken silindir için Daeumling tarafından yapılmıştır (Daeumling vd., 2004) .Bu kayıptan kaçınmak için helisel olarak sarılmış tabakalar akım dengesine ulaşmak için gerekli şartların altında olması gerekir. Üstüniletken tabakalar arasında meydana gelen bu kayıplara ilaveten, bazı ticari 2G YSÜİ lerde manyetik altlık olması durumunda ortaya çıkan altıncı bir kayıp mekanizması budur. En geniş ölçüde altlık Ni %5W'dir. Bu bölümde ferromanyetik altlık kullanılan ikinci kuşak tellerden yapılan iki tabakalı kablolarda kayıplar incelenecektir.

Şekil 22 simülasyonlarda kullanılan kablo geometrilerini göstermektedir. İç teki ve dıştaki üstün iletkenlerin bir birine baktığı yapılanma yüz-yüze (YY), Ferromanyetik altlığın bir birine baktığı üstün iletkenlerin dışa baktığı yapılanmaya ise Sırt-Sırta (SS) yapısı olarak isimlendirilmiştir.

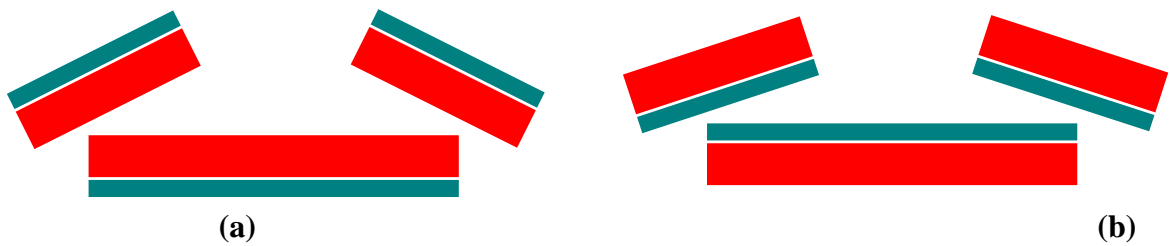
Altteki şeridin üzerine boşluk geldiği için bu kablolama türüne genel olarak şerit-boşluk yapısı olarak isimlendirilmiştir. Burada amaç her iki tür kablolamada oluşabilecek kayıpları hesaplamaktır. Kablo yapısındaki periyodiklikten dolayı

hesaplama bölgesi olarak sadece kablonun iki tane tel üstü üste gelecek kısmı dikkate alınmıştır. Şeritlerin spiral şekilde sarılmaları göz ardı ediliyor. Hesaplamalarda kullanılan parametreler Tablo 3’de veriliyor.

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 (Mawatari vd., 2010).

$$A_z(x, y) = \frac{\mu_0 j}{8\pi} \left\{ 4w_{sc} - 4y(\arctan(G/2y) + \arctan(K/2y)) \right. \\ \left. G \ln(y^2 + D^2/4) - K \ln(y^2 + K^2/4) \right\} \quad (52)$$

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. Hem üstteki iletken kısımlar hem de alttaki iletken kısım için denklem 7’de gerekli dönüşümler yapılmıştır. Her bir yapı için Üstüniletken kısmın örgülemesi için örgülemede en/boy=20/2100 olacak şekilde quadrilateral örgü elmanı 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: 0.6145 çıkmıştır.



Şekil 22. Hesaplamalarda şerit dizilimi (a) Sırt – Sırta (SS) (b) Yüz-Yüze (YY) yapısı.

Kablonun her bir tabakasinda 15 tane şerit kullanılmıştır ancak yapıdaki periyodiklikten dolayı ve hesaplamayı kısaltmak için simülasyonlarda kablonun $2\pi/N_{şerit}$ lik kısmı dikkate alınmıştır. Dıştaki şeritler içteki şeritlerin arasındaki boşluğa gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Kablo xy düzleminde yatmakta ve akım z yönünde yalnızca üstüniletken kısımdan geçmektedir.

Tablo 3. Benzeşimi yapılan kablonun geometrik ve üstüniletkenlik parametreleri.

| Nicelik | Değeri |
|--|-------------------|
| I_c (kablunun kritik akım şiddeti) | 2400 A |
| A_n (vektör potansiyeli ölçeklendirme parametresi) | $3 \cdot 10^{-7}$ |
| w_{SC} (Üstüniletkenin altlığın eni) | 4 mm |
| h_{SC} (Üstüniletkenin altlığın boyu) | 2 μ m |
| w_T (FM altlığın eni) | 4 mm |
| h_T (FM altlığın boyu) | 80 μ m |
| R_i (kablunun iç yarıçapı) | 20 mm |
| R_d (kablunun dış yarıçapı) | 21 mm |
| R_u (Hesaplama yapılacak uzayın yarıçapı) | 15 cm |
| N (her tabakadaki şerit sayısı) | 15 |

Ferromanyetik altlığın etkisini net bir biçimde ortaya koyabilmek için sabit ve kuvvetli geçirgenliğe sahip ferromanyetik malzemeler dikkate alındı. Ferromanyetik altlığın manyetik geçirgenliği $\mu_r = 5000$ olarak seçildi. İyi bir yaklaşıklıkla ferromanyetik kısım için $B = \mu_0 \mu_r H$ 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 daha önceki çalışmalarda kullanılan yöntem kullanılmıştır. Toplam akım zamanın sinüsoidal fonksiyonudur: $I(t) = I_a \sin(2\pi f t)$. Uygulanan dış manyetik alan sıfırdır. 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,

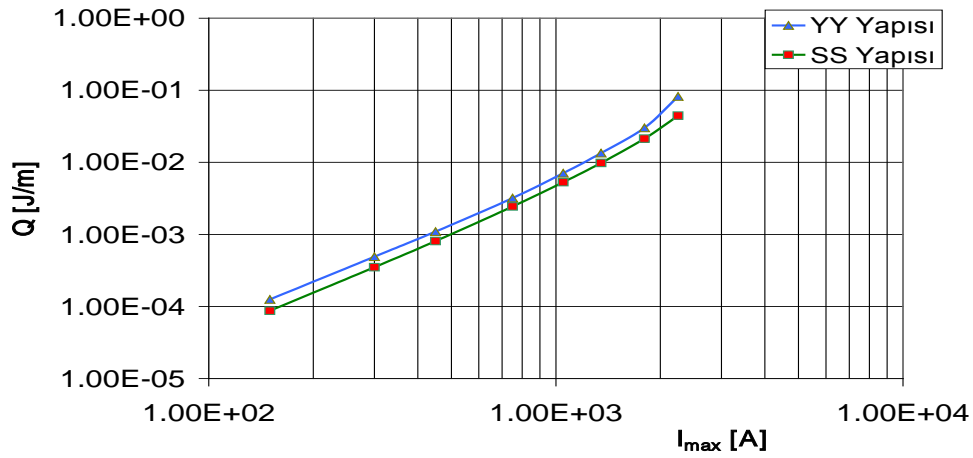
$$J_s(x, y) = j_c \tanh \left(\frac{-\frac{\partial A_z(x, y)}{\partial t} - \nabla \varphi(x, y)}{E_c} \right) \quad (53)$$

ile hesaplanabilir. Üstüniletken tabakalardaki kayıp,

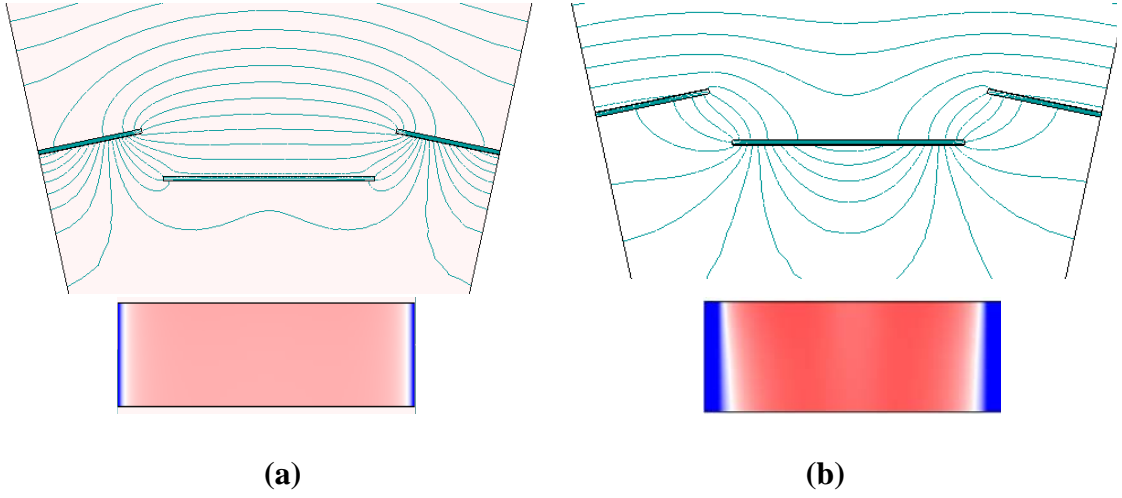
$$Q_{SC} = \frac{P}{l} = \frac{2}{w_{SC} h_{SC}} \int_{t=0}^{1/f} E(t) I(t) dt \quad [J m^{-3}] \quad (54)$$

integrali kullanılarak hesaplandı. İfadenin başındaki 2 çarpanı hesaplamanın yalnızca yarım periyotluk kısmı yapıldığı için gelmiştir. Elektrik alanın zaman bağıllığını ifade edebilmek için zaman adımları çok küçük seçilmiştir. Manyetik geçirgenlik alana bağlı olmadığı için B-H çevrimi histeresiz yapamayacağından ferromanyetik kısımda kayba herhangi bir katkı gelmeyecektir.

Şekil 23 SS ve YY dizilimi için AA kayıplarını karşılaştırılıyor. Her iki kablolama yapılanması için kayıplar benzer davranışı göstermektedir. Yüksek akım genliklerinde kayıp yüksek olmakta düşük akım genliklerine doğru kayıplarda doğrusal olarak azalmaktadır. YY yapısında kayıp miktarı Q_{YY} SS yapısındaki kayıp Q_{SS} miktarından düşük akımlarda ortalama ~1.5 kat yüksek akımlarda ise ~1.85 daha fazladır. Q_{YY} nin daha yüksek çıkması Şekil 25 e bakılarak kolayca anlaşılabilir. Şekilden de görüleceği üzere YY yapısında özellikle dış tabakadaki iletken iç tabakada oluşan alandan dolayı daha fazla self alana maruz kalmaktadır. Bu alan FM altlıklarda tutulmakta ve dıştaki iletkenlere daha fazla manyetik alanın nüfuz etmesine neden olmaktadır.

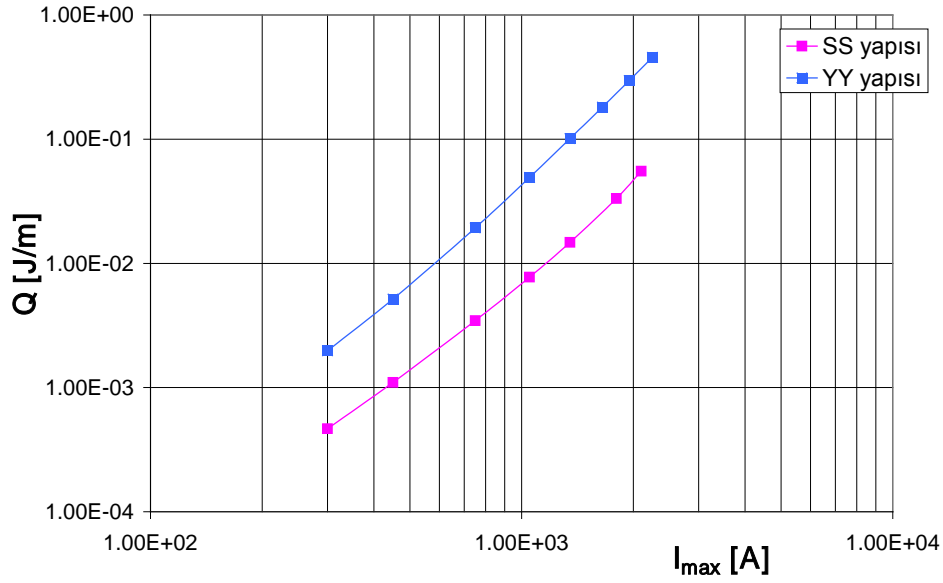


Şekil 23. Uygulanan transport akımının maksimum genliğine karşı YY ve SS yapılarında oluşan kayıplar.



Şekil 24. (a) SS yapısı vektör potansiyeli ve içteki iletkenin geçen akım profili (b) YY dizilimi vektör potansiyeli ve akım profili. SS yapısında dıştaki iletkenin maruz kaldığı manyetik alanın teğetsel bileşeni YY yapısına göre daha baskındır. Bu manyetik alanın iletken tabakaya daha az nüfuz etmesine dolayısıyla akımın daha az bozulmasına neden olmaktadır.

Ferromanyetik altlıklı ikinci kuşak şeritlerden yapılan kablolarda Şerit - Boşluk yapısının mı Şerit – Şerit yapısının mı daha az kayba neden olabileceğini göstermek için Şekil 25 verilmiştir. Şekil daha önceki çalışmada elde edilmiştir ama şerit - boşluk yapısındaki ile aynı geometrik ve birbirine çok yakın fiziksel parametrelere sahiptir. Şekilde de görüleceği üzere şerit – şerit yapısında dizilen YY yapısında oluşan kayıp Q_{YY} SS yapısındaki kayba göre yüksek akımlarda yaklaşık sekiz kat düşük akımlarda ise yaklaşık 12 kat daha fazladır. Oysa Şerit boşluk yapısında bu kayıp 1.5-2 civarındadır. Bunun nedeni aynı şekilde şerit – şerit yapısında dıştaki iletkenin daha ciddi manyetik alana maruz kalması olabilir. Bir diğer dikkate değer nokta ise şerit-şerit yapısındaki SS yapısındaki kayıp Q_{SS} , şerit boşluk kablolamada ki SS dizilimindeki kayıptan çok az bir miktar daha fazladır. Bu bulgular kablo sarım teknolojisinde işe yarayabilir.



Şekil 25. Şerit-Şerit yapısında sırt – sırta dizilimi ile yüz – yüze diziliminde oluşan kayıpların karşılaştırılması.

3.5. Akım Paylaşımının Alternatif Akım Kayıplarına Etkisi

Alternatif akım kayıplarını minimize etmek yüksek sıcaklık üstüniletken kabloların başarılı bir şekilde pratiğe geçirilmesinde çok önemlidir. Bu amaçla, alternatif akım mekanizmasını anlamak ve AA altında kayıpları minimize etmek ve kayıp mekanizmalarını anlamak için çok gayret sarf edilmektedir (Vellego ve Metra vd., 1995; Mukoyama vd., 1997; Campbell vd., 1999; Willis vd., 2001; Levin vd., 2007; Amemiya vd., 2007, Mawatari ve Kajikawa vd., 2008). Ayrıca kayıp mekanizmaları pratik kablo sarım geometrisinde, silindirik bir gövde üzerine şerit şeklindeki teller birkaç katman helisel bir şekilde sarılır, oldukça karmaşıktır.

Genellikle yapılan çalışmalarda şeritlerin enini boyunu veya gövde üzerine yerleşimini değiştirerek AA kayıplarını optimize etmeye çalışılmaktadır. Örnek vermek gerekirse (Amemiya vd., 2007) de araştırmacılar daha dar şeritler kullanarak iletkenin geniş yüzeyine düşen self manyetik alanın dik bileşeninin azaltılabileceğini bu şekilde kayıpların düşebileceğini göstermişlerdir. (Malozemoff vd., 2009) de araştırmacılar şeritler arasındaki boşluğun genişliğinin ve şerit sayısının şeridin fiziksel genişliğinden daha önemli olduğunu göstermişlerdir. (Inada r vd., 2008) de aralık genişliğinin yanında akım yoğunluğunun yanal bileşeninin de önemli olduğunu göstermişlerdir. (Mawatari vd., 2010)' de araştırmacılar teorik olarak düz şerit kullanmak yerine bombeli şerit

kullanılırsa yuvarlak gövdeli kablolarda kaybın daha da optimize edilebileceğini göstermişlerdir. (Klıncok ve Gömöry vd., 2006; Fukui vd., 2006) de araştırmacılar, tek ve çok tabakalı kablolar için yine şerit genişliğinin ve aralık genişliğinin önemini ortaya koymuşlardır. (Rostila vd., 2010) de şeritlerin sarılma açısının kaybı optimize edilebileceğini göstermişlerdir. Kablonun özellikleri üzerine ferromanyetik malzemenin etkisi ikinci kuşak YSÜİ altlıkların alanı bozucu etkisinden dolayı incelenmektedir (Amemiya vd., 2010; Amemiya vd., 2007, Mıyagı vd., 2007). Bütün bu çalışmalar genellikle kablonun geometrik ve manyetik özellikleri üzerine odaklanmıştır. (Jun ogawa vd., 2012)'de araştırmacılar iki tabakalı kablolarda tabakalardan geçirilen akımın oranlarını değiştirerek kaybın optimize edilebileceğini deneysel olarak göstermişlerdir. Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi kullanarak tabakalar arasındaki akım değişiminin kayıp üzerine etkisi incelenmiştir.

Şekil 26'da hesaplamalarda kullanılan şeritlerin yerleşim geometrisi verilmiştir. Hesaplamalarda ikinci kuşak iletken tellerin fiziksel özellikleri kullanılmıştır ancak altlık manyetik değildir, yani $\mu=1$ alınmıştır. Kablonun xy düzleminde yattığı ve akımın z yönünde uygulandığı kabul edilmektedir. Kablonun iç yarıçapı $R_i=20$ mm, dış yarıçapı $R_d=21$ mm ve hesaplama yapılacak uzayın genişliği $R_u=25$ cm olarak alınmıştır. Üstüniletken şeridin genişliği ve yüksekliği sırasıyla $w_{SC}=4$ mm ve $h_{SC}=2$ μ m. Üstüniletken altlığın genişliği ve yüksekliği $w_T=4$ mm ve $h_T=80$ μ m ve altlık ve üstüniletken arasındaki buffer tabakasının yüksekliği $h_B=0.225$ μ m dir. Ancak altlık, manyetik ve iletken olmadığı için altlığı hesaplamalarda kullanmak gerekmemektedir. Şeritlerin her birinin kritik akım yoğunluğu $J_c = 1 \times 10^{10}$ A/m mertebesindedir. İç ve dış tabakada eşit sayıda şerit alınmış ve her bir tabakadaki şerit sayısı 15 tir.



Şekil 26. Hesaplamalarda kullanılan geometri. I_a alttan geçen akımı $I_{\dot{u}}$ ise üstteki iletkenlerden geçen akımı göstermektedir.

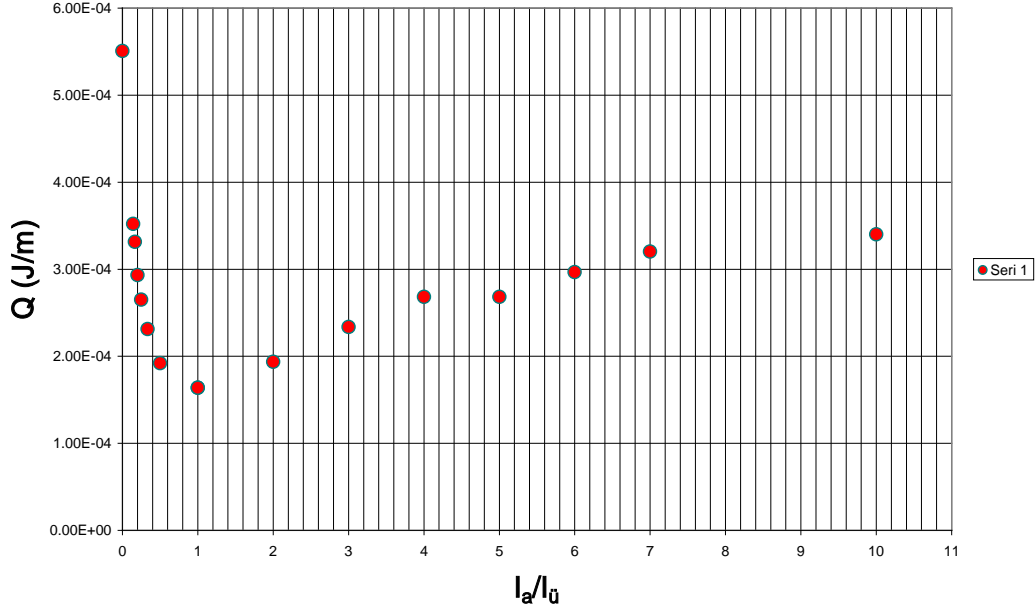
İkinci kuşak iletkenlerin benzeşimindeki en önemli zorluk üstüniletken şeritlerin en boy oranının çok yüksek olmasıdır. Bu sonlu elemanlar yönteminde oldukça fazla örgüleme noktası gerektirmektedir. Fiziksel olarak doğru sonuçlar çıkartmak ve aynı zamanda hesaplama zamanını kısa tutmak için örgülemenin çok dikkatli yapılması gerekir. Bu amaçla en boy oranını dikkate alarak 1:500 ve 1:1500 arasında bir örgüleme dağılımı dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda 69778 örgüleme noktası s, 114446 tane üçgensel ve “quadrilateral” örgü elemanı yapılmıştır. Minimum eleman eleman kalitesi 0.645 civarındadır. Hesaplamalarda sınır şartı olarak bir önceki bölümde verilen sınır şartları kullanılmıştır. Çözümleyici olarak “nonlinear” çözümleyici tipi seçilmiştir.

Bütün hesaplamalar aynı miktar transport akımı altında gerçekleştirilmiştir. Benzeşimlerde akım öncelikle sabitlenmektedir. Ancak her bir tabakadan geçirilecek olan akımın miktarı bir birinden farklı olmaktadır. Bu hesaplamalara sınırlayıcı özellik olarak girilmiştir bunu başarmak için üstteki alttaki iletkenlerin üstüniletkenlik akımları

$$j_{s,a}(x, y) = j_c \tanh \left(\frac{-\frac{\partial A_z(x, y)}{\partial t} - (1/k)\nabla\varphi(x, y)}{E_c} \right) \quad (55)$$

$$j_{s,\ddot{u}}(x, y) = j_c \tanh \left(\frac{-\frac{\partial A_z(x, y)}{\partial t} - (1-1/k)\nabla\varphi(x, y)}{E_c} \right) \quad (56)$$

Şeklinde tanımlanmıştır. Burada k iletkenler arasındaki akımlar arasındaki oranı $I_{\ddot{u}}/I_a$ göstermektedir. Her iki tabakadaki akım oranını ayarlayacak iteratif bir yöntem geliştirilmiş ve matlab kodu yazılmıştır. Başlangıçta akımın maksimum I_m değeri ayarlandı. Akım belli bir maksimum değerden itibaren yavaş yavaş azaltılarak $-I_m$ ye ulaşıldı. Her bir adımda bir önceki adımın vektör potansiyeli ifadesi A_p kaydedildi.



Şekil 27. Üstteki ve alttaki iletkenlerden geçirilen akımın oranlarına karşı ortaya çıkan kayıp.

Şekil 27’de her iki iletkenlerden farklı oranlarda akım geçirildiğinde ortaya çıkan kaybı göstermektedir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere her iki iletkenin eşit oranda akım geçirildiğinde kayıp minimum olmaktadır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere içteki iletkenin ne kadar daha az akım geçirilirse o kadar fazla kayıp ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni iç tabakadaki transport akımın bir AC manyetik alan üretir ve dış tabaka bu manyetik alana maruz kalır ama dış tabakadaki transport akım iç tabakaya daha az bir manyetik alan uygulamaktadır. İdeal iki tabakalı kablolarda AA kayıpları dış ve iç tabakanın transport akım kayıpları meydana gelmekte ancak dış tabaka ilave bir manyetizasyon kaybına uğramaktadır. Eşit akım uygulandığında bile dış tabakadaki transport akım kayıpları iç tabakadakinden daha büyüktür çünkü dış tabaka iç tabakaya göre daha ciddi elektromanyetik şartlara maruz kalmaktadır.

Dış tabakada oluşan manyetizasyon kaybı transport kayıplarından daha düşüktür çünkü tabakalar arasındaki boşluk ve self-manyetik alan iç tabakadaki transport akım tarafından üretilen manyetik alandan daha büyüktür. İki tabakalı iletkenlerde manyetizasyon kayıplarını kontrol edebilmek için tabakalardan geçen akımı eşitlemek çok önemlidir.

3.6. Çok Tabakalı Üstüniletken Güç İletim Kablolarında AA Kayıplarının Karşılaştırılması

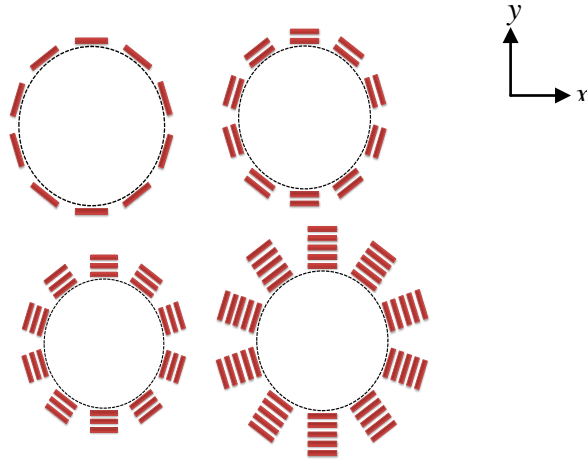
Üstüniletkenlerin alternatif akım kayıpları nitel olarak iyi anlaşılmıştır. Histeresiz, çiftlenim ve matris girdap “eddy” akımı kayıpları iyi bilinmekte ve bu kayıpları azaltmak için bir takım yöntemler geliştirilmiştir (Wilson vd., 2008). Histeresiz kayıplarını azaltmak için iletkenler genellikle küçük flemanlı yada daha ince tabakalı olarak üretilmektedir (Scanlan vd., 2004). Çiftlenim kayıpları sarılarak “twisting”, matris direncini arttırarak ve flemanların etrafında yüksek dirençli bariyerlerle destekleyerek azaltılabilir (Scanlan vd., 2004; Goldacker vd., 2009). Bu bariyerler düşük matris direnci sağlarlar ve dolayısıyla daha iyi bir iletken stabilesi sağlanır (Scanlan vd., 2004; Goldacker vd., 2009; Pol’ak vd., 2009; Wilson vd., 1983). Yüksek akım taşınması gereken durumlarda kablolar kullanmak gerekir. Tabi tellerdeki duruma paralel olarak kablolarda da oluşan kaybı azaltmak gerekir. Kablolarda da histeresiz ve çiftlenim kayıplarını azaltmak için iletkenler iletken bir gövde üzerine bükülerek sarılır ya da iletkenlerdeki yöntemler kablolara uygulanır.

Çok tabakalı kablolar üzerine literatürde çok fazla çalışma yoktur. (Lı q., 2011) de araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 1, 2, 3, ve 6 tabakalı kablolarda komşu şeritler arasındaki boşluğun ve şeritlerde dolaşan kritik akım yoğunluğunun yanıl dağılımının AA kayıplara etkisini incelemişlerdir. Tek tabakalı kablolarda komşu şeritler arasındaki mesafenin AA kayıplarını çok etkilediğini, oysa çok tabakalı kablolarda ise J_c dağılımının kayıpları tek tabakalı kablolara göre daha çok etkilediğini hesaplamalarda göstermişlerdir. Bir diğler çalışmada ise (Amemiya vd., 2011) 1, 2, ve 4 tabakalı kablolarda 4 mm ve 2 mm genişliğindeki iletkenlerden yapılan kabloların alternatif akım kayıplarını incelemişlerdir. Standart 4 mm şeritler yerine 2 mm şeritler kullanılırsa alternatif akımların düşürülebileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmanın amacı öncelikle, iki tabakalı üstüniletkenlerin elektromanyetik analizi için daha önceki çalışmalardaki yöntemin çok tabakalı üstüniletkenler için geliştirilebileceğini göstermek ve bu yöntem kullanılarak en temel soruya çok tabakalı iletken kullanmanın avantajlarını ve bu avantajlara neden olan fiziği göstermektir.

Bu bölümde iki boyutta çok tabakalı güç iletim kabloların elektromanyetik analizi yapıldı ve alternatif akım kayıpları karşılaştırıldı. Kablolar xy düzleminde yatmaktadır

ve z düzleminde sonsuzdur. Akım z yönünde geçirilmektedir. Hesaplamalarda kabloların xy düzlemindeki kesit alanı dikkate alınır. 1, 2, 3 ve 5 tabakalı kabloların analizi yapılmaktadır. İncelenen kablo geometrilerinin kesit alanı şekil 28 de verilmektedir. Modelde boşluk ve üstüniletken bölge olmak üzere iki farklı “subdomain” vardır. Kablolarla ilgili geometrik ve üstüniletkenlik özellikleri tablo 9’da verilmektedir. Çok tabakalı kablolarda iletken tabakalar arasında 1 mm boşluk vardır. İletkenlerin sarılması göz ardı ediliyor.



Şekil 28. Benzeşimlerde kullanılan 1, 2, 3, ve 5 tabakalı kablolar. Hesaplamalarda yalnızca kabloların kesit alanı dikkate alınmıştır. Bütün kablo modellerinde tabakalar arasındaki mesafe eşit ve 1 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bütün kabloların 20 mm mesafesindeki bir gövde üzerine sarıldığı göz önüne alınmıştır.

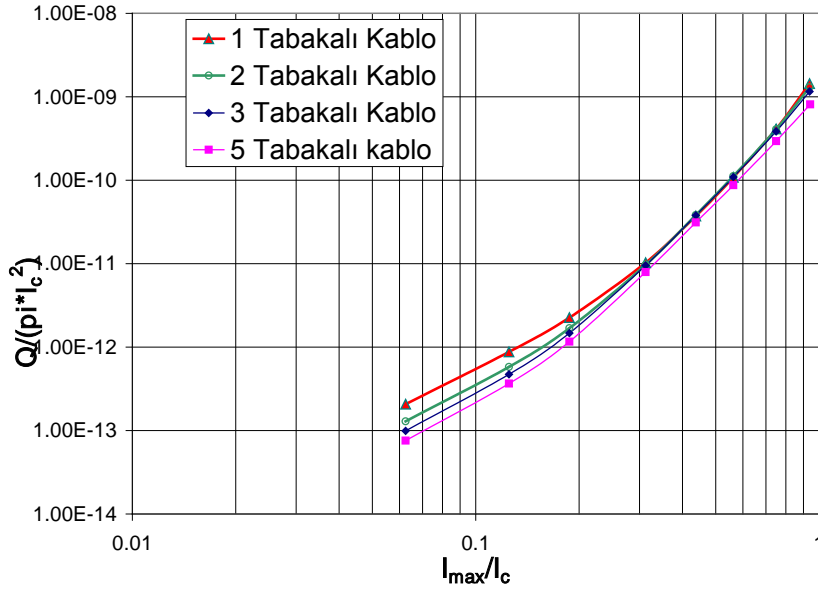
Hesaplamalarda karmaşıklığı önlemek adına ve yalnızca kablo eğriler arasında daha sağlıklı bir nitel analiz yapabilmek için kritik akım yoğunluğunun alan, sıcaklık ve konum bağılılıkları dikkate alınmamıştır. Bu şekilde ayrıca analitik yaklaşımlar ile karşılaştırılabilir. Her bir üstüniletken üzerindeki

Tablo 4. Benzeşimlerde kullanılan parametreler

| Nicelik | Değeri |
|--|---------------------|
| I_c (iletkenin kritik akım şiddeti) | 80 A |
| A_n (vektör potansiyeli ölçeklendirme parametresi) | $8,3 \cdot 10^{-8}$ |
| w_{SC} (Üstüniletkenin altlığı eni) | 4 mm |
| h_{SC} (Üstüniletkenin altlığı boyu) | 2 μ m |
| D (iletkenler arasındaki mesafe) | 1 mm |
| I_{max} (uygulanan akımın max genliği) | 75 A |
| R_i (kablunun iç yarıçapı) | 20 mm |
| N (her tabakadaki şerit sayısı) | 15 |
| f (uygulanan akımın frekansı) | 50 Hz |

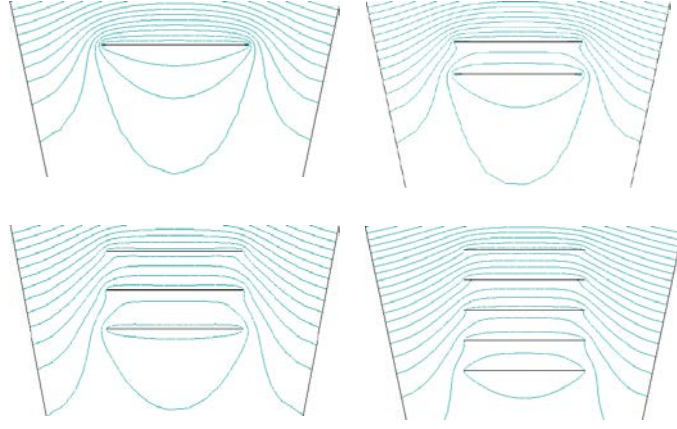
üstüniletkenlik akımı ifadesi Denklem 8 ile verilmektedir. Her bir tabakadaki akımı eşitlemek için daha önceki çalışmada verilen iteratif yöntem kullanılmıştır. Hesaplamaların doğru sonuçlar verebilmesi için uygun sınır şartlarının verilmesi gerekmektedir. Sınır şartları için Nouman sınır şartları uygulanmıştır. Sınır şartları yine önceki çalışmalarda tartışılmıştır. Sınır şartları uygulanırken vektör potansiyelinin süperpozisyonu dikkate alınmıştır. Kablo yapısının simetrikliğinden dolayı yalnızca iletkenlerin üst üste geldiği durum dikkate alınmıştır.

Şekil 29'da farklı akım genlikleri için tek tabakalı ve çok tabakalı kablolardaki kayıpları karşılaştırılıyor. Eğrileri elde etmek için Denklem 9 ile verilen zaman integrali kullanılmıştır. Daha iyi bir nitel analiz yapabilmek için akım kritik akım yoğunluğu I_{max}/I_c ile ve kayıp ise $Q/\pi d_c^2$ ile normalize edilmiştir. Üstüniletken üzerindeki kritik akım yoğunluğu $I_c = \int_{A_{SC}} J_c dA_{SC}$ integrali ile hesaplanmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere I_c 'ye yakın akım genliklerinde özellikle tek, iki ve üç tabakalı iletkenlerde kayıp bir birine eşittir ama beş tabakalı iletkeninde diğerlerine göre ~%13 daha düşüktür. Bu durum $I \approx I_c$ ye kadar devam etmektedir.



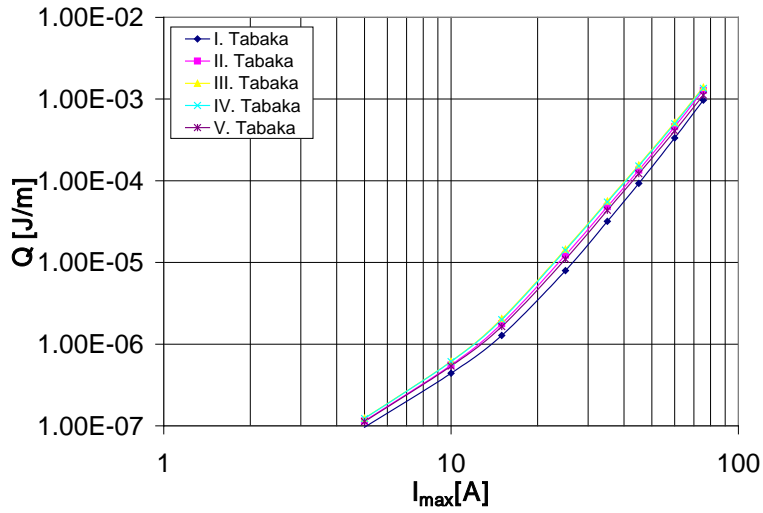
Şekil 29. Tek ve çok tabakalı kablolarda uygulanan akımın maksimum genliğine karşı AA kaybı. Burada akım I_c ile kayıp πI_c^2 ile normalize edilmiştir.

$I_c/2$ den küçük akım genliklerinde kayıplar arasında çok ciddi fark vardır. Örneğin en düşük akım genliğinde $I_{max}/I_c = 0.0625$ beş tabakalı kabloda meydana gelen kayıp tek tabakalı kabloda meydana gelen kayıptan ortalama %60 daha düşüktür. Bunun nedenini açıklaya bilmek için Şekil 30'a bakmak gerekir. Şekil 30'da düşük akım genliğinde dört farklı kablo tipi için manyetik potansiyeller karşılaştırılıyor. Dikkat edilirse özellikle tek tabakalı kabloda iletken hem iç kısımda hem de dış kısmında manyetik alanın radyal bileşeni çok fazladır. Tabakalar fazlaştıkça içteki tabakanın maruz kaldığı manyetik alan azalmakta özellikle 5 tabakalı iletkende en içteki tabaka yalnızca kendi ürettiği self alana maruz kalmaktadır. Tabii ki manyetik alanın dik bileşeni arttıkça iletkende akan akım daha derilere nüfuz edecektir.



Şekil 30. 1, 2, 3 ve 5 tabakalı kablolarda manyetik alan dağılımı (sabit vektör potansiyeli ile temsil ediliyor. Hesaplama 12.5 A akım için yapılmıştır.)

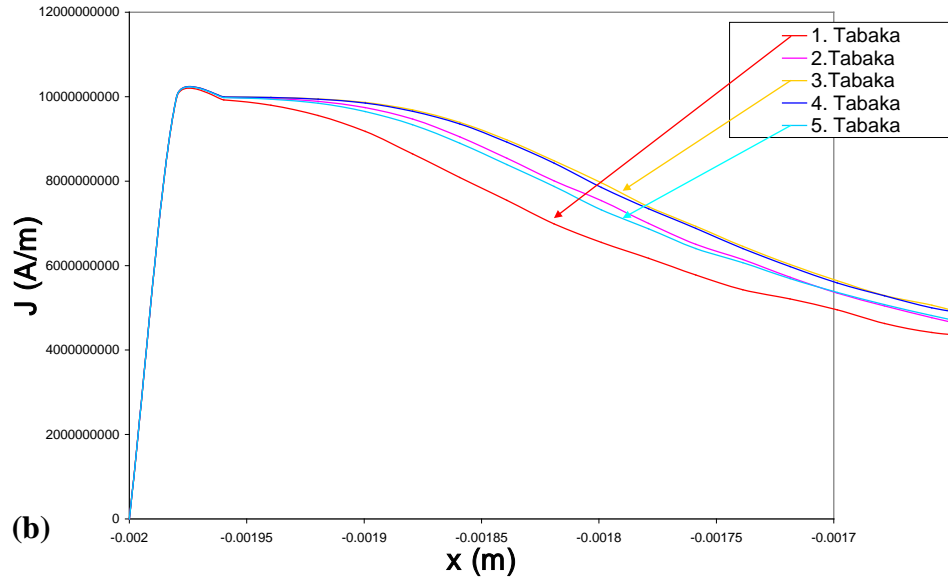
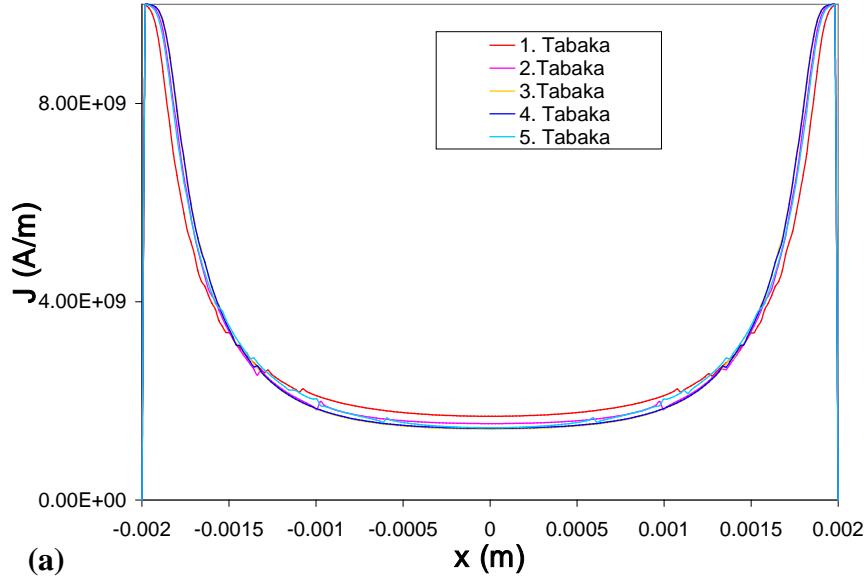
Özellikle 5 tabakalı kablodaki kayıpları detaylı incelemek yerinde olacaktır. Şekil 31 de beş tabakalı iletkenin her bir tabakasındaki kayıpları gösteriliyor. Şekilden de anlaşılacağı üzere en içteki yani birinci tabakada oluşan kayıp en düşüktür. Ondan sonra sırasıyla en dıştaki 5. tabakada, 2. tabakada, 4. tabakada ve en çok kayıpta en ortadaki 3. tabakada meydana gelmektedir. En içteki tabakadaki kayıp ortadaki tabakadaki kayıptan ortalama %50 daha düşük olduğuna dikkat çekmek istiyoruz. Buradaki dikkate değer bir nokta ise bütün akım genlikleri için kayıplar aynı davranışı sergilemektedir.



Şekil 31. Beş tabakalı kablo diziliminde uygulanan akıma karşı her bir tabakadaki kayıpların karşılaştırılması

En içteki tabakada kaybın çok düşük olmasının nedeni dış tabakaların elektromanyetik perdelemesinden dolayı bu tabakanın dış kısmının maruz kaldığı manyetik alanın dik bileşeni diğer tabakalara göre nispeten daha düşüktür.

Oysa ortadaki iletken hem daha içteki iletkenlerden hem de daha dıştaki iletkenlerden geçen akımın oluşturduğu manyetik alan maruz kalmaktadır. Yan yana iki iletken arasındaki boşluktan dolayı bu alanın üstüniletkene dik bileşeni daha baskın olmakta bu tabakanın daha içlerine doğru akımın nüfuz etmesine neden olmaktadır (Şekil 32).



Şekil 32. (a) Beş tabakalı kabloda $I_a=12.5$ A için her bir iletkenin geçen akım miktarını gösteriyor. Kritik akım yoğunluğuna yakın daha yüksek akım tabakanın daha fazla içine nüfuz etmiştir. (b) iletkenin kenarlarındaki akım dağılımını daha net göstermek için verilmiştir.

3.7. Deneysel Verilerle Karşılaştırma

Alternatif akım kayıplarının nicel analizi yüksek sıcaklık süperiletkenlerinden yapılan tel, kablo vs geliştirilmesi için çok önemlidir. Zira güç aygıtlarında kullanılan YSÜİ tellerin ve kabloların elektromanyetik şartları çok karmaşıktır, dolayısıyla AA kayıplarını analitik ifadelerle ya da deneysel yollarla hesaplamak çok zordur. YSÜİ tellerin elektromanyetik tepkisini hesaplamak için iyi bir model ya da yöntem geliştirilebilirse, ve sayısal kodlara uygulanabilirse, hiç şüphesiz bu çeşitli karmaşık elektromanyetik şartlar altında çalışan YSÜİ kablolardaki AA kayıplarını hesaplamak için çok işe yarayacaktır.

Yüksek sıcaklık üstüniletken kablolar keskin bir üstüniletkenlik/normal durum geçişi göstermezler. Transport akım artırıldığında, azar azar artan bir voltaj ortaya çıkar. Voltaj akım eğrisi aşağıda verilen ifade edilmiştir.

$$V = V_0 \left(\frac{I}{I_c} \right)^n, \quad (57)$$

Bura da V_0 karakteristik voltaj, I , geçen akımı; I_c , kritik akım şiddeti; n , fit parametresidir. Keskin üstüniletkenlik / normal durum geçişi küçük n değeri ile karakterize edilebilir. Üstelik kritik akım I_c ve fit parametresi n genellikle dış manyetik alanın bir fonksiyonudur dolayısıyla uygulanan manyetik alandan etkilenmektedir. Şerit tellerde ve tabi şeritlerden dizayn edilen kablolar içinde geçerli olmak üzere şeridin geniş yüzeyine dik olarak gelen manyetik alan dış manyetik alan kritik akım yoğunluğunu azar azar bozmaktadır.

YSÜİ kablolar güç iletiminde ya da aygıtlarda karmaşık elektromanyetik şartlarda kullanılırlar. Üstüniletken kablolar DC ya da AC transport akım taşıyabilirler ya da DC ya da AC manyetik alan altında akıma maruz kalabilirler. Bunların yanında dış manyetik alanın yönü ve büyüklüğü kablolama ve sarılma yapısına göre değişebilir. Bu şartlar YSÜİ tellerin ve dolayısıyla bu tellerin kayıplarındaki elektromanyetik olayı muhakkak etkileyecektir.

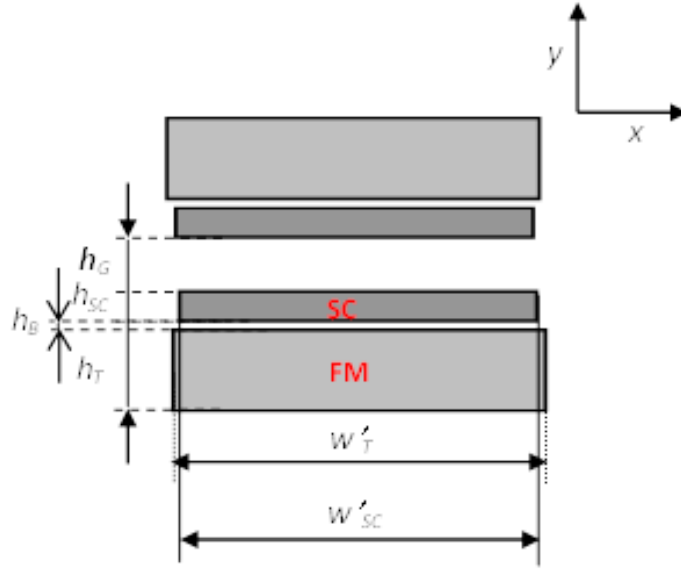
Üstüniletken tel ya da kabloların yukarıda bahsedilen bütün özellikleri muhakkak modellemede ya da yöntem geliştirmede hesaba katılmalıdır. Tabii ki bir modeli yada

yöntemi güçlü kılan yönü modelin deneysel veriyi en azından belli bir doğrulukta türetebilmesidir. Bu bölümde geliştirilen yöntemi deneysel verilerin sonuçlarını türetmede kullandık. İki tabakalı güç iletim kablolarının AC kayıplarının ölçümü ile ilgili literatürde pek fazla deneysel veri bulunmamaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan yöntem deneysel veri ile test edilmiştir.

Bu çalışmada (Vysotsky vd., 2010) de verilen deneysel veriyi daha önceki çalışmalarda geliştirilen yöntem kullanılarak türetilmeye çalışılmıştır. Hesaplamalarda Şekil 33'de verilen geometri kullanılmıştır. Kablo xy- düzleminde yatmaktadır. Akım z yönünde uygulanmaktadır. Kablo 34 tane Amerikan Superconductor firması tarafından üretilen şeritlerden belli bir açıyla sarılmasıyla yapılmıştır. Üstüniletkenlerin ortalama pitch açısı 20.9° dir ve üstüniletkenler birbirlerine bakmaktadır. Kablonun diğer fiziksel özellikleri Tablo 5 de verilmektedir.

Tablo 5. Kablonun geometrik özellikleri

| Nicelik | Değer |
|-------------|---------------------|
| R_{cablo} | 25mm |
| w_{SC} | 3,4 mm |
| h_{SC} | 0,8 μm |
| w_T | 4 mm |
| h_T | 75 μm |
| h_B | 0,225 μm |
| h_G | 150 μm |
| N_{tapes} | 34 |
| α | $20,9^\circ$ |



Şekil 33. Hesaplama için kullanılan geometrinin şekli

Şeritlerin kabloyla sarılma açısı “pitch angle” dikkate alınarak şeritlerin boyu şu şekilde değiştirilmiştir. Ayrıca kritik akım yoğunluğu ise $J_{c0}' = J_{c0} / \cos(\alpha)$ şeklinde değiştirilmiştir. Benzeşimlerde NiW altlığın geçirgenliği tablo 6’da verilmektedir:

Tablo 6. Ferromanyetik altlığın geçirgenliği

| B | $\mu(B)$ |
|------|----------|
| 0 | 65 |
| 0,01 | 115 |
| 0,02 | 160 |
| 0,05 | 290 |
| 0,08 | 380 |
| 0,1 | 370 |
| 0,12 | 200 |
| 0,15 | 60 |
| 0,2 | 20 |
| 0,5 | 5 |
| 1 | 1,5 |
| 10 | 1 |

Comsol Multiphysics programı kullanılarak belli sınır şartları için,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \mu \vec{J} \quad (58)$$

denklemini çözümede kullanıldı. Sınır şartı olarak yarıçapı r olan ve I akımı taşıyan koaksiyal bir kablonun merkezinden R kadar mesafedeki vektör potansiyeli ifadesi sınır şartı olarak seçildi:

$$A_c|_{x^2+y^2=R_c^2} = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(2 \ln \left(\frac{R_c}{r_w} \right) + 1 \right) \quad (59)$$

Sonlu elamanlar hesabında üstüniletkenlerdeki akım yoğunluğunu vektör potansiyeline bağlayan ifade şu şekilde seçilebilir:

$$J_s(x, y) = J_c(B) \tanh \left(\frac{A_p(x, y) \pm (A_z - A_{diff}/2)}{A_n} \right) \quad (60)$$

Burada \pm işareti üstteki ve alttaki üstüniletkenler için kullanılır. A_{diff} her iki şeritteki akımı eşitleyecek dış akıyı temsil eder. Akımı eşitlemek için daha önceki çalışmada verilen iteratif yöntem kullanılmıştır. Kritik akım bağıllığı dikkate alınmıştır ve $J_c(B)$ için şu ifade kullanılmıştır:

$$J_c = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{k^2 B_x^2 + B_y^2}}{B_0} \right)^\beta}, \quad (61)$$

burada J_{c0} sıfır manyetik alana extrapole edilerek bulunan akım yoğunluğu, B_0 alan bağıllığı için ölçeklendirme parametresi, β üst ve k anizotropi parametresi ($k=1$ izotropik materyal).

Kritik akım yoğunluğu parametreleri Tablo 7 de veriliyor.

Tablo 7. Kritik akım yoğunluğu parametreleri.

| Parametre | Değeri |
|-----------|-----------------------|
| J_{c0} | $3,06 \times 10^{10}$ |
| K | 1 |
| β | 1,2 |
| B_0 | 0,36 |
| A_n | 3×10^{-10} |

Örgülemde 94495 “advanced triangular mesh” elemanı kullanılmıştır. Tolerans 1×10^{-6} olarak alınmıştır ve problem çözümleyici modunda “highly non-linear” moda çözülmüştür.

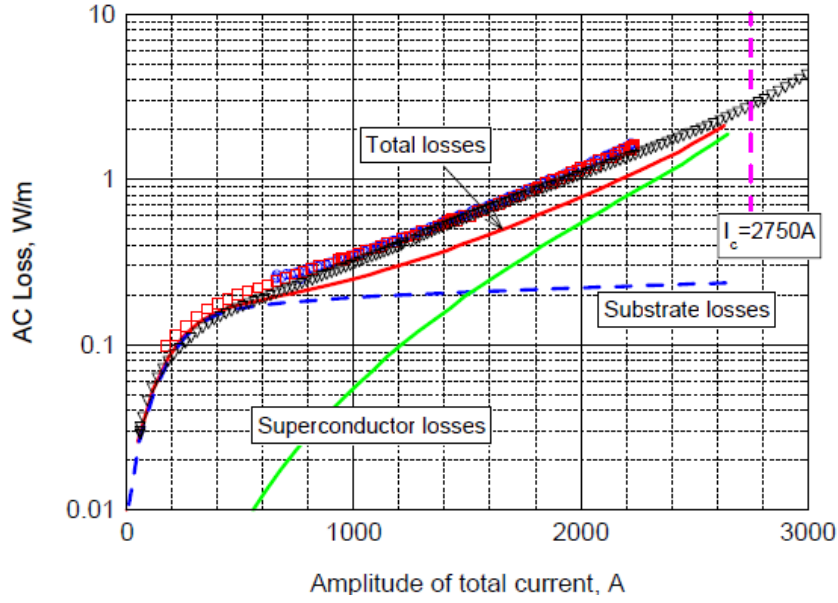
Bir AC çevriminde ferromanyetik kısımdaki kayıp,

$$Q_{hys}(B_m) = Q_{sbs} \times \begin{cases} (B_{sbs}/B_m)^2 & B_m < B_{sbs} \\ 1 & B_m \geq B_{sbs} \end{cases} \quad (62)$$

İfadesi ile hesaplanmıştır. Burada B_m akı yoğunluğu genliği ve $Q_{sbs}=200 \text{ J m}^{-1}$ ve $B_{sbs}=0.15 \text{ T}$ sabitlerdir. İlmeğin alanı transport AA kaybının değerini her birim çevrim ve kablunun birim uzunluğu üzerinden şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q_{SC} = \oint \phi dI_{AC} \cdot \quad (63)$$

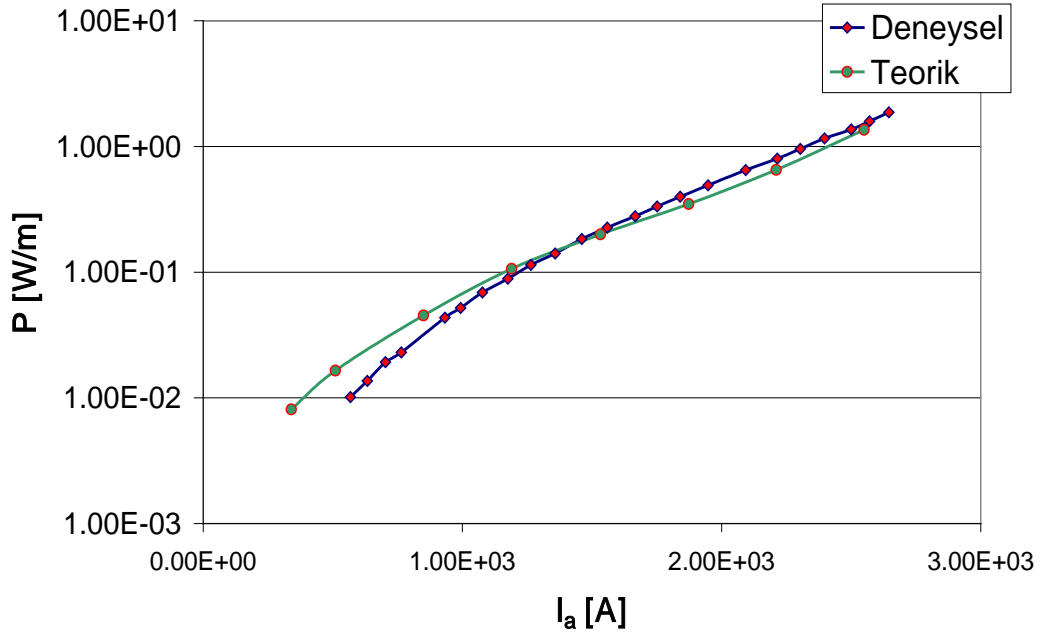
Şekil 33 (Pardo vd., 2009) de yapılan alternatif akım ölçüm sonuçlarını gösteriyor. Ölçümler 77K’de 5 metre uzunluğundaki kablo üzerinde düşük voltajda ve yüksek akım gerçekleştiriliyor. Kablo 34 tane şerit kullanılarak yapılıyor ve kritik akım yoğunluğu $I_c \sim 2750 \text{ A}$ dir.



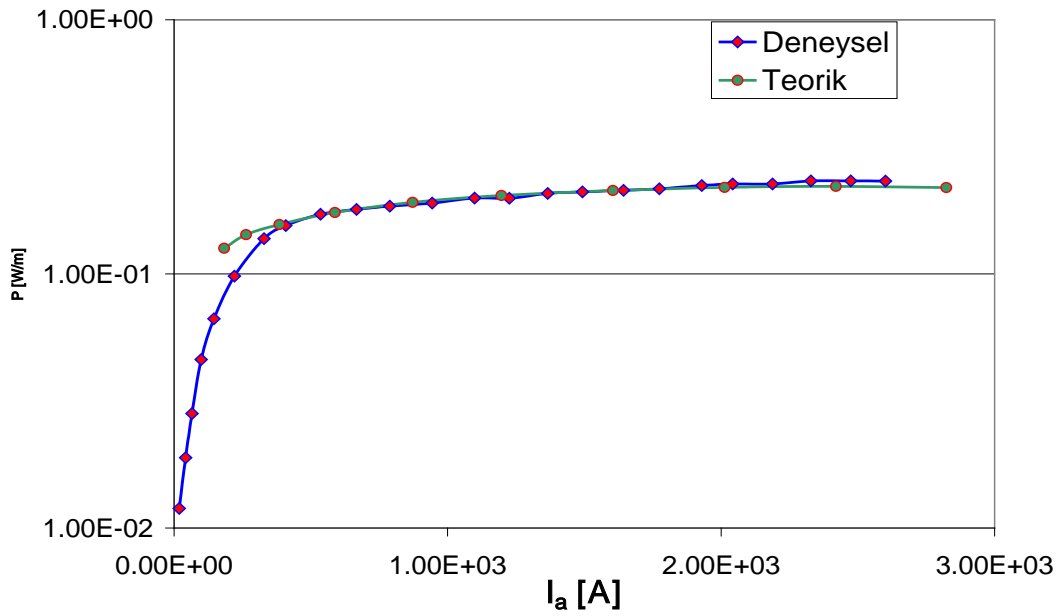
Şekil 34. (Bean, 1962) 'de verilen AC kayıp eğrisi

Şekil 35'de Şekil 14'deki veriler bir bilgisayar programı yardımıyla çıkartılarak elde edilen deneysel veri yukarıda verilen hesaplamaların karşılaştırılması gösteriliyor. Şekil 35(a) süperiletken kısımda meydana gelen kaybı veriyor. Şekilden de görüldüğü gibi yüksek akımlarda deneysel veri ile teorik veri birbiri ile çok iyi uyum göstermektedir. Oysa düşük akımlarda aralarındaki fark gittikçe artmaktadır. Örneğin $I_a \sim 500$ A civarında deneysel veri ile teorik veri arasındaki fark yaklaşık %10 civarındadır. Bu farkın nedeni kritik akımın alan bağıllığının çok iyi seçilmemesinden kaynaklanabilir. Ya da düşük akım bölgesinde başka fiziksel etkiler ortaya çıkabilir. Ancak orta akım bölgesinde uyum gerçekten mükemmeldir. Tabii hesaplamalarda sınırlayıcı faktör olarak her iki şeritten geçen akımın eşit olduğunu kabul edildi ama gerçekte her iki tabakadan geçen akımın miktarı tam olarak eşit olmamaktadır sonuçta bir miktar fazla kayıp ortaya çıkmaktadır. Eddy akım kayıpları hesaplamalarda dikkate alınmadı bu akımlarda hesaplamalardaki farkı artırmış olabilir. Ancak ferromanyetik malzemelerdeki eddy akım kayıplarını hesaplamak son derece zordur. Şekil 35(b) de ferromanyetik kısımda meydana gelen kayıpları gösteriyor. FM kayıpları 11 ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde düşük akım bölgesinde deneysel veri ile teorik veri arasında küçük bir fark ortaya çıkmaktadır. Bu fark Tablo 4'de verilen verilerin özellikle alanlar için çok iyi çıkartılmadığını gösteriyor.

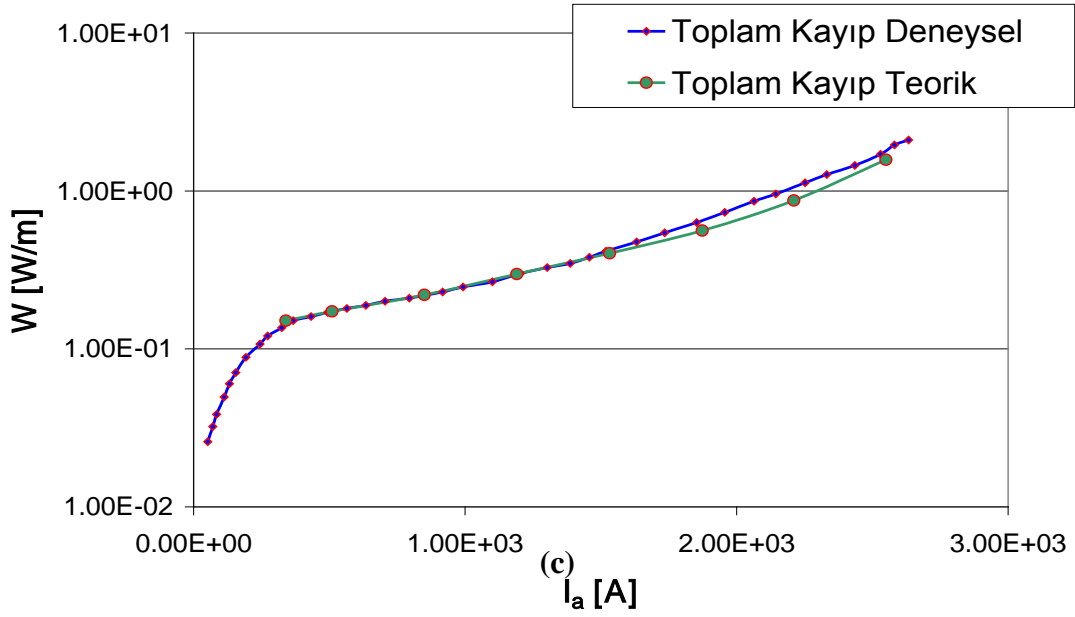
Şekil 35(c) ile verilen toplam kayıp üstüniletkenlik kaybı ile ferromanyetik kaybın toplaması ile elde edilmiştir. Bununla beraber toplam kayba bakıldığında sonuç gerçekten kayda değer oranda iyidir.



(a)



(b)



Şekil 35 (devamı) (a)Üstüniletkenlik kaybı, (b) ferromanyetik kaybın (c) toplam kaybın (BEAN vd.,1962) den çıkartılan veriler ile geliştirilen yöntemin karşılaştırılması sonuçlarının karşılaştırılması.

3.8. Çok Tabakalı Silindiriksel Hts Güç İletim Kablolarında Altık Manyetizmasının Ve Şerit Diziliminin Alternatif Akım Kayıplarına Etkisi

Alternatif akımın (AA) iletiminde karşılaşılan AA kayıplarını daha fazla düşürebilmek için, ikinci kuşak kaplı iletkenlerden yapılan silindiriksel biçime sahip yüksek sıcaklık üstüniletken güç iletim kabloları üzerine yapılan çalışmalar çok yoğun bir biçimde sürdürülmektedir (Sytnikov, 2009; Maguirevd, 2009; Mukoyama, 2010; Souc, 2010). Kablo geometrisinin silindiriksel seçilmesinin bir avantajı, silindiriksel kablolardaki manyetik alanın yatay bileşene sahip olmasının beklenmesindedir. Ancak silindiriksel gövde etrafına kaplı iletken şeritler sarılarak yapılan üstüniletken kablolarında, kablonun kesit alanı “poligonol” olacağı için şerit yüzeyine gelen manyetik alanın dik bileşeni tamamıyla ortadan kalkmaz (Amemiya, 2007; Mawatari ve Jiang, 2008).

Bu tip kablo dizaynlarında esas amaç AA kayıpları düşürülebilmesi için şeritlerin maruz kaldığı, gerek şeridin kendisinin gerekse de komşu şeritler tarafından üretilen, manyetik alanın dik bileşenini ortadan kaldırmaya çalışmaktır (Snitcher, 2008).

Ferromanyetik (FM) altlıklı yüksek sıcaklık kaplı iletkenler şerit üretim maliyetini düşüreceğini beklendiği için üzerinde araştırılmaya ihtiyaç duyulmaktadır, çünkü FM

alaşımın basit bir proses ile iyi “tekstürize” olabilmektedir (Mıyacı, 2007). Kaplı iletkenlerin manyetik altlıklarının AA manyetizasyon kayıplarına etkisi hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir (Mıyacı, 2009). Öte yandan, manyetik altlıklı kaplı iletkenlerden yapılan kabloların sayısal yöntemler kullanılarak elektromanyetik tepkisinin araştırılması ve AA transport kayıplarının hesaplanması üzerine çok fazla çalışma bulunmaktadır. Transport akım geçirilen manyetik altlıklı kaplı iletkenlerden yapılan güç iletim kablolarının elektromanyetik davranışı incelemek ve AA kayıplarını doğru olarak hesaplayabilmek hem bilimsel hem de ticarileşmesi açısından önemli olabilir.

(Gömöry, 1997) de, Gömöry vd iç içe geçmiş iki silindirik üstüniletken silindirde meydana gelen transport alternatif akım kayıplarını alana bağlı olmayan ve her bir kabukta farklı kritik akım yoğunluğu J_c denklemi kullanarak analitik olarak hesaplamışlardır. Daeumling eş merkezli koaksiyel kablolarda akı transfer kayıplarını basit analitik bir yöntemle hesaplanabileceği göstermiştir (Doulombing Physc). (Clem ve Malozemoff) manyetik altlıklı ikinci kuşak kaplı iletkenlerden oluşan iki tabakalı yüksek sıcaklık silindiriksel kablolardaki alternatif akım kayıplarını hesaplayabilecek yeni bir teori ortaya koymuşlardır (Clem, 2010; Guyen, 2010; Vojenciak, 2010; Gömöry, 2010) FM altlıklı şeritlerden yapılan tek tabakalı kablolarda, altlık manyetizmasından dolayı oluşan transport kayıpları ve kayıplara neden olan mekanizma sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. (Fukui, 2010) Yazarlar altlığının manyetik olmadığı kaplı iletkenlerden yapılan iki tabakalı kabloların alternatif akım kayıpları üzerine geometrik konfigürasyonun etkisini sayısal yöntemlerle incelemişler ve özellikle şerit genişliğinin çok tabakalı kablolardaki AA kayıplarını nasıl etkilediğini ortaya koymuşlardır. (Amemiya, 2010) de, ferromanyetik altlıklı şeritler kullanılarak yapılan iki tabakalı güç iletim kablolarının elektromanyetik analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır ve iki tabaka arasındaki boşluğun kayıplara etkisi ortaya konulmuştur. (Li, 2012)

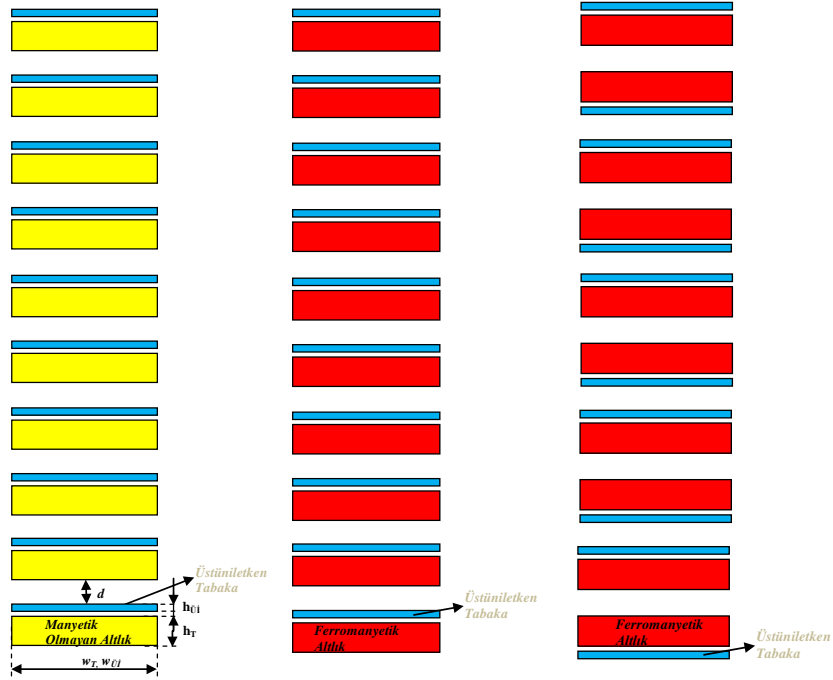
Araştırmacılar sayısal yöntemler kullanarak ferromanyetik altlıklı olmayan şeritlerden dizayn edilen çok tabakalı kablolarda standart 4- mm yerine 2- mm şeritler kullanılırsa kayıpların düşürülebileceğini göstermişlerdir. (Li, 2010) Yazarlar aynı şekilde ferromanyetik olmayan şeritlerden yapılan tek tabakalı ve çok tabakalı (iki, dört ve altı tabakalı) kabloların alternatif akım kayıplarına şeritler arası mesafenin ve J_c nin

biçiminin etkisi sayısal yöntemlerle incelemişler ve her bir tabakada oluşan kayıpları ortaya koymuşlardır.

Bildiğimiz kadarıyla, çok tabakalı kablolarda (iki tabakadan fazla) ferromanyetik altlıklı kaplı iletkenlerden yapılan kablolarda altlık manyetizmasının AA kayıplarına etkisi incelenmemiştir. Bu çalışmada on tabakalı silindiriksel kablolarda altlık manyetizmasının ve şerit yerleşimin etkisi ticari sonlu elemanlar paketi Comsol multiphysics programı kullanılarak incelenmiştir. Altlığın manyetik olması kaybı önemli ölçüde artırdığı ve şerit diziliminin etkisinin çok az olduğu gösterilmiştir.

3.8.1. Sayısal Modellemenin Ana Hatları

Hesaplamalarda kullanılan dikdörtgen biçimindeki şeritlerden yapılan 10 tabakalı kablo yapılarının iki boyutlu kesit alanları şekil 36 da gösteriliyor. Simülasyonlarda üç tip kablo modeli dikkate alınıyor. Şerit altlığının manyetik olmadığı (model A), altlığın kuvvetli manyetik olduğu ferromanyetik kısım radyal olarak kablonun merkezine üstüniletken kısım ise dışına doğru yerleştirildiği (model B), yine altlık kuvvetli ferromanyetik ancak bazı şeritlerin üstüniletken kısımlarının birbirine baktığı dizilim (model C). Hesaplamalarda kullanılan parametreler Tablo 8'de veriliyor. Kablo yapısının periyodikliğinden dolayı hesaplamalarda yalnızca kablonun $2\pi/N$ (N , şerit sayısı) kadarlık şeritlerin üst üste düştüğü kısmı dikkate alınmıştır. Bu modelde şeritlerin helisel sarımı ihmal edilmektedir. Hesaplamalarda z -ekseni poligonal kablo yapısını teşkil eden tek bir şeridin ekseni ile çakışan (x,y,z) ortogonal koordinat sistemi kullanıldı. Şeritler x - y ekseninde yatmakta ve transport akım z -yönünde akmaktadır.



Şekil 36. Hesaplamalarda kullanılan kablo dizilimleri. Soldan itibaren bu dizilimler model A, model B ve model C olarak isimlendirilmiştir. Model A'da altlığın manyetik geçirgenliği $\mu_r=1$, model B ve C ise nisbi geçirgenlik alandan bağımsız ve sabit $\mu_r=1000$ olarak alınmıştır. Burada $w_{ÜI}$ ve $h_{ÜI}$ üstüniletken tabakanın sırasıyla genişliği ve yüksekliği; w_T ve h_T altlığın genişliği ve yüksekliği; $d \sim 1$ ise tabakalar arası mesafeyi betimlemektedir.

Kablodaki manyetik alan dağılımı iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edildi. Hesaplamalar Comsol Multiphysics ticari sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. (www.comsol.com).

A: vektör potansiyeli, V: skaler potansiyel) formülasyonu kullanıldı. A-V formülasyonunda, dinamik analiz için yürütücü denklem amper denklemdir:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{j} = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right), \quad (64)$$

Burada μ manyetik geçirgenlik ve J akım yoğunluğu, A, z-ekseni sürekli olan manyetik vektör potansiyeli, σ üstüniletkenin iletkenliği, V üstüniletkenin kesit alanı boyunca sabit olan skaler potansiyel. Manyetik akı yoğunluğu B vektör potansiyeli A ile $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ ifadesi ile ilişkilidir elektrik alan E ise vektör potansiyeli ile,

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V. \quad (65)$$

ile ilintilidir. Kaplı iletkenin altlığının manyetik özellikleri

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (66)$$

Denklemleri ile tanımlanmaktadır. Bu hesaplamalarda hesaplamaların karmaşıklığını önlemek için μ olarak seçilmiştir.

Tablo 8. Modelleme hesabında seçilen kabloların parametreleri. Model A, B ve C de daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için bütün parametreler aynı seçildi.

| Nicelik | Değeri |
|--|---|
| I_c (iletkenin kritik akım şiddeti) | 12000 A |
| A_n (vektör potansiyeli ölçeklendirme parametresi) | $7,12 \cdot 10^{-7}$ |
| w_{SC} (Üstüniletkenin altlığın eni) | 4 mm |
| h_{SC} (Üstüniletkenin altlığın boyu) | 2 μm |
| d (iletkenler arasındaki mesafe) | 1 mm |
| I_{max}, I_{min} (uygulanan akımın max ve min genliği) | 11250 A, 750 A |
| R_i (kablunun iç yarıçapı) | 20 mm |
| R_d (kablunun dış yarıçapı) | 30 mm |
| N (toplam şerit sayısı) | 150 |
| f (uygulanan akımın frekansı) | 50 Hz |
| μ_r (nispi manyetik geçirgenlik) | Model A için 1, Model B ve C için 1000 |

Üstüniletken kısımdaki akım yoğunluğu dağılımını tanımlamak için şu bağıntı kullanılmıştır (Gömöry f ve Henning a, 2012) :

$$j_s = j_c \tanh\left(\frac{E}{E_c}\right), \quad (67)$$

Burada j_s üstüniletken içerisindeki akım yoğunluğudur, j_c kritik akım yoğunluğudur, E elektrik alan ve E_c elektrik alan kriteri (e.g. $1 \mu V/m$). Bu ifade hesaplamalara “constrain ” girildi.

Hesaplamaların karmaşıklığını önlemek için aynı şekilde sabit j_c kullanıldı. Bundan önceki yapılan hesaplamalarda alana $j_c(B)$ ifadesi kayıp eğrilerinin biçimini çok fazla etkilememektedir. Benzeşimin bir diğer önemli kısmı sınır şartının ayarlanmasıdır. Bütün sınır şartlarının doğru bir biçimde girilmesi hiç şüphesiz hesaplamaların güvenilirliği için son derece önemlidir. Sınır şartları “Comsol Multiphysics with AC/DC module” yazılımında “magnetic potential” sınır şartı kullanılarak çok kolay bir biçimde girilebilir. Bu yazılımda modelin dış sınırındaki vektör potansiyel değerini yada ifadesini girmek gereklidir. Bunu sınır şartını hesaplamak için üzerinden I akımı geçen eni a ve boyu b olan ve uzunluğu sonsuz olan dikdörtgen bir yapının dışında bir noktada oluşturacağı manyetik vektör potansiyeli ifadesi integral formunda (Rhyner, 2002),

$$A = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S \mathbf{j} \frac{1}{r} ds \quad (68)$$

yazılabilir. Burada μ_0 boşluğun geçirgenliği ve j akım yoğunluğudur. Bu ifade analitik olarak hesaplanabilir ifadedir. Tek bir iletken için sınır şartı olarak kullanılacak vektör potansiyeli ifadesi,

$$\begin{aligned} A_B(x, y) = & \frac{\mu_0 I_{set}}{8\pi w_{sc} h_{sc}} \left\{ -12 w_{sc} h_{sc} + (w_{sc}^2 - 2w_{sc}x + 2x^2) \tan^{-1} \left(\frac{w_{sc}-x}{h_{sc}-y} \right) - (w_{sc}^2 + 2w_{sc}x + \right. \\ & 2x^2) \tan^{-1} \left(\frac{w_{sc}+x}{h_{sc}-y} \right) + (-h_{sc}^2 - 2h_{sc}y - y^2 - x^2) \left[\tan^{-1} \left(\frac{h_{sc}-y}{w_{sc}-x} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{h_{sc}-y}{w_{sc}+x} \right) \right] + \\ & (-w_{sc}^2 + 2w_{sc}y - 2x^2) \tan^{-1} \left(\frac{w_{sc}-x}{h_{sc}+y} \right) + (-w_{sc}^2 - 2w_{sc}y - x^2) \tan^{-1} \left(\frac{w_{sc}+x}{h_{sc}+y} \right) + (-h_{sc}^2 - \\ & 2h_{sc}y - y^2 - x^2) \left[\tan^{-1} \left(\frac{h_{sc}+y}{w_{sc}-x} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{h_{sc}+y}{w_{sc}+x} \right) \right] + w_{sc} h_{sc} \ln(2(w_{sc} - x)^2 + 2(h_{sc} - y)^2 + \\ & 2(w_{sc} + x)^2 + 2(h_{sc} + y)^2) - w_{sc} y \ln(2(w_{sc} - x)^2 + 2(h_{sc} - y)^2 - 2(h_{sc} + y)^2) - \\ & \left. h_{sc} x \ln(2(w_{sc} - x)^2 - 2(w_{sc} + x)^2) - w_{sc} y \ln(2(h_{sc} - y)^2 - 2(h_{sc} + y)^2) \right\} \quad (69) \end{aligned}$$

Burada I üstüniletken akan akım w_{sc} ve h_{sc} sırasıyla üstüniletkenin eni ve boyudur. Bu sınır şartının nasıl uygulanacağı ile ilgili detaylı bilgi Comsolun “tutorial” bulunabilir. Hesaplamalardaki en önemli kısıtlamalardan “constrain” birisi üstüniletken tabakaların elektriksel olarak izole olduğu manyetik olarak birbirini etkilediğidir. Yani, sonlu elemanlar hesabına kablonun her tabakasından aynı miktar I_{set} akım geçtiği kısıtlama

olarak girilmesi gerekmektedir. Bunun nasıl sağlanıldığı daha önceki çalışmalarda detaylı olarak verilmiştir. Biz bu modelde ikinci kısımda verilen yöntemi kullandık. Yani her tabakadaki sabit $\nabla\varphi$ skalar potansiyel değeri ayrı ayrı ayarlandı.

Toplam akım, $I(t) = I_{set} \sin(2\pi ft)$ biçiminde zamanın fonksiyonu olarak uygulandı, burada f ve I_{set} sırasıyla uygulanan akımın frekansı ve genliğidir. Alternatif akım kayıpları hesabında $E.J$ nin sayısal integrali kullanıldı. J akım yoğunluklu ve E elektrik alanlı bir sistemin kaybının klasik tanımı her zaman için anlık gücün integrali verir. Dolayısıyla bizim kablo sistemimiz için toplam güç,

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_{\mathcal{E}} \vec{E} \cdot \vec{J} ds, \quad (70)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada T sinüzoidal transport akımın zaman periyodu ve üstüniletken bölgenin yüzey alanıdır.

Kayıbı hesaplatmak için şöyle bir işlem basamakları yapılmıştır. Öncelikle $t=0$ anında $I_{set}=I_{max}$ ve $j_s=j_{c0}$ alınarak Denklem 90 vasıtasıyla vektör potansiyeli A_z değeri hesaplattırıldı ve üstüniletken koordinat sistemindeki dağılımı $A_z(t_i)$ olarak hafızada tutuldu. Δt kadar süre sonra $I_{set}=I_{max}-\Delta I$ (burada ΔI sinüzoidal ifadede t yerine Δt konularak hesaplanan değerdir) kadar azaltılarak, yeni $A_z(t_{i+1})$ değeri hesaplanır. Her bir durum için ∇V skaler potansiyel iteratif şekilde hesaplanır. Denklem 85 ayrık ileri farklar formunda,

$$E = -\frac{A_z(t_{i+1})-A_z(t_i)}{\Delta t} - \nabla V \quad (71)$$

yazılarak kolayca hesaplanabilir. Denklem 88'de yerine konularak denklem 85 ile birlikte eş uyumlu olarak çözdürülür. Bu işlemleri gerçekleştirmek için Matlab'da kod yazıldı.

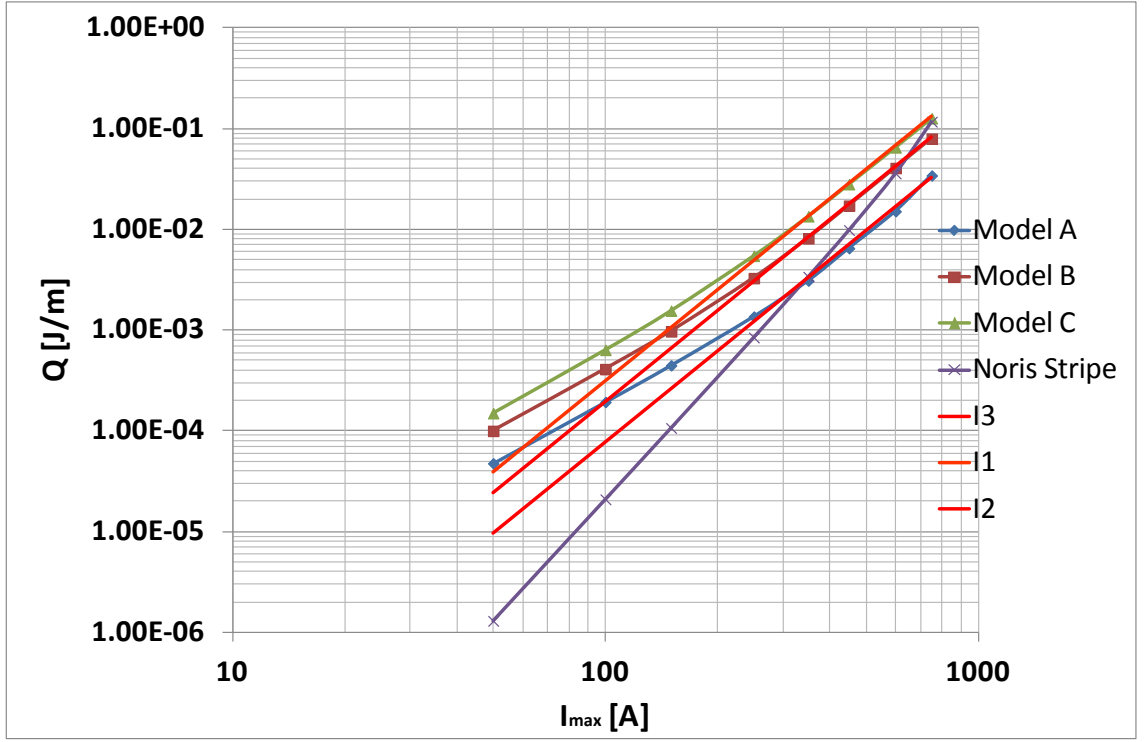
Kablodaki şerit sayısı ile şeritlerin genişliği arasında şöyle bir bağıntı vardır:

$$\left(R_i + h_T + \frac{h_{ij}}{2}\right) \tan\left(\frac{\pi}{N}\right) = \frac{M_i}{2 \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)} + \frac{W_T}{2} \quad (72)$$

Bu bağıntı kullanılarak aynı tabakadaki komşu iki şerit arasındaki mesafe M_i hesaplanabilir. Burada R_i hesaplama yapılacak tabakanın yarıçapıdır.

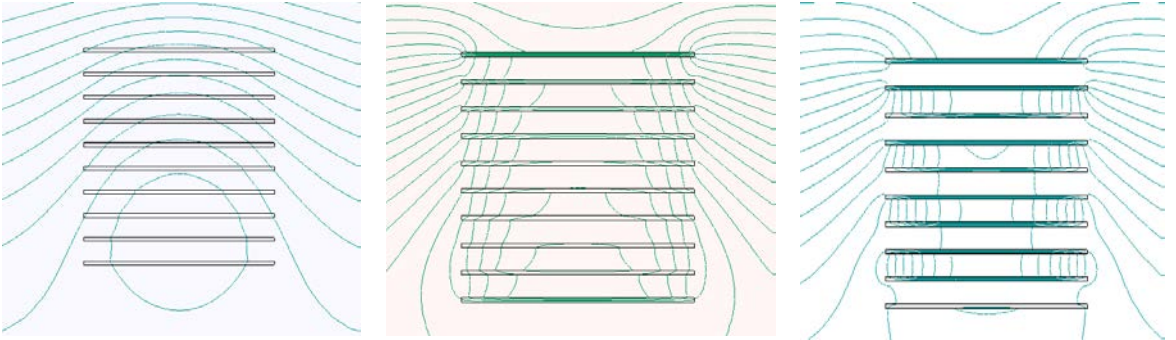
Sonlu elemanlar hesaplamalarında en önemli zorluklardan bir tanesi hiç şüphesiz örgüleme “meshing” çok iyi ayarlanmasıdır. Örgülemenin iyi ayarlanması hem hesapların hızını hem de hassasiyetini doğrudan etkileyen bir faktördür. Örgülemenin iyi gerçekleştirilebilmesi için birçok deneme ve bölüm 1’de anlatılan R^2 testi dikkatli bir biçimde yapıldı. Bu modelde örgüleme ile alakalı iki önemli zorluk vardır. Birincisi, ele alınan kablo yapısının on tabakadan oluşması dolayısıyla yapıda birçok alt alanlar “subdomain” bulunması, diğeri beklide en önemlisi üstüniletken tabakanın en/boy oranının yaklaşık 1000 civarında olması gerekir. İkinci zorluğun üzerinden gelebilmek için Comsol’da yapısal “mapped mesh” seçeneği kullanıldı. Yapısal örgüleme basitçe üstüniletken tabakanın eni 11 parçaya eni ise 1500 parçaya bölünerek dikdörtgensel örgüleme diğer kısımlar ise serbest üçgensel örgüleme yapıldı.

Hesaplamaların hızını ve doğruluğu etkileyen bir diğer işlem ise Comsol’da çözücünün “solver” iyi doğru seçilmesi ve doğru ayarlanmasıdır. Solver tipi olarak “Direct UMPACT” seçildi ve hesaplamanın tolerans değeri olarak ise 10^{-8} alındı. Matlab’de kod yazar iken solverde bir önceki çözümün kullanılacağını ve vektör potansiyelinin yanında potansiyel gradyentinin de çözüleceğini belirtmek çok önemlidir.



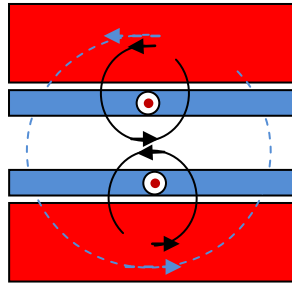
Şekil 37. Model A, B ve C için uygulanan akımın genliğine karşı toplam kayıp eğrisi. Sonuçlar ayrıca Norris stripe analitik formülü karşılaştırılıyor. Burada kırmızı çizgilerle gösterilen I1, I2, I3 kaybın nasıl değiştiği gösteren doğrulardır.

Bu bağlamda, Şekil 37 her üç dizilim için karşılaştırmalı kayıp eğrilerini gösteriyor. Yapıların simetrikliğinden dolayı yalnızca kablunun $2\pi/N$ kadarlık dilimdeki kayıp değerleri alınmıştır. Beklenildiği gibi altlık manyetizması transport kayıplarını önemli ölçüde artırmıştır. Bu sonuç literatürdeki tek tabakalı silindirik kablolar için sunulan hesaplamalar ile uyum içerisindedir [Mıyağı, 2007]. Model A ile model B karşılaştırıldığında $Q_B/Q_A \approx 2$ civarındadır. Kayıptaki artış akımın genliği $I_c/2$ civarında $Q_B/Q_A \approx 2.6$ ile en fazla olmaktadır.



Şekil 38. sırasıyla Model A, B, ve C dizilimleri için, kablunun $2\pi/N$ kadarlık diliminde şeritler üzerinde ve etrafında manyetik alanı temsil eden vektör potansiyeli dağılımı. Her iki kontör arasındaki değer 2×10^{-5} W/m dir. Kabloya uygulanan akımın genliği 75 A ve anlık geçen akımın değeri 46.762 A dir.

Model A ile model C karşılaştırıldığında $Q_C/Q_A \approx 4$ kat bir artış söz konusudur aynı şekilde $I_{\max} \sim I_C/2$ akım genliklerinde bu artış $Q_C/Q_A \approx 4.5$ kat civarındadır. Manyetik altlıklı iki dizilim karşılaştırıldığında model B ve model C, bütün akım genliklerinde hemen hemen sabit $Q_C/Q_B \approx 1.5$ kat bir artış olmaktadır. Bu hesaplamalardan şu aşikâr olarak ortaya çıkmaktadır ki; özellikle çok tabakalı kablolarda altlık manyetizması üstüniletken tabaka üzerindeki kayıpları önemli ölçüde artırmaktadır. Bunun nedeni manyetik altlığın manyetik alanı üzerine toplaması ve üstüniletken tabaka kısmındaki manyetik alanını dik bileşenin artması ile açıklanabilir (Şekil 38). Manyetik alanın dik bileşenin artması üstüniletken tabakaya daha fazla self manyetik alanın nüfuzunu dolayısıyla akımın daha derinlere nüfuzunu sağlayacaktır. Bu altlık manyetizmasının neden daha fazla kayba neden olduğunu açıklamaktadır. Bir diğer önemli nokta ise model C deki kaybın model B'deki kayba göre daha yüksek olmasıdır. Bunun nedeni nitel olarak şu şekilde açıklanabilir: model C'de bazı üstüniletken tabakalar birbirine bakmaktadır. Bu birbirine bakan üstüniletken tabakaların altıklarındaki manyetik alan birikmesi normal dizilime çok daha fazladır (Şekil 39). Bu manyetik alan birikimi yukarıda da belirtildiği gibi daha fazla akımın üstüniletken tabakaya nüfuz etmesine yol açacak ve kaybı artıracaktır.



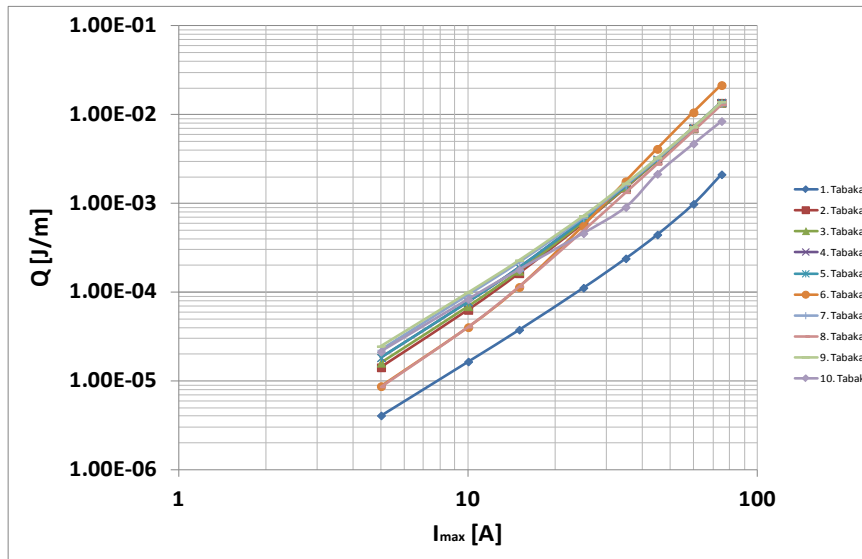
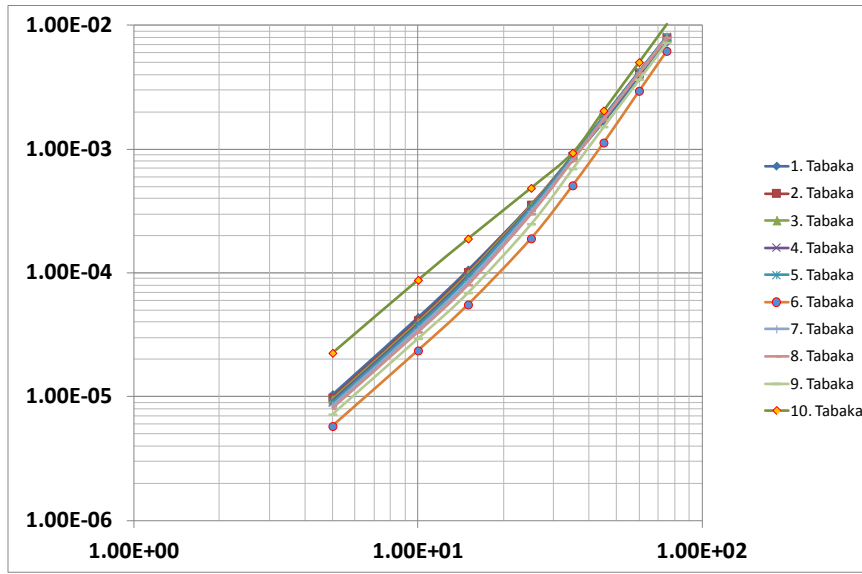
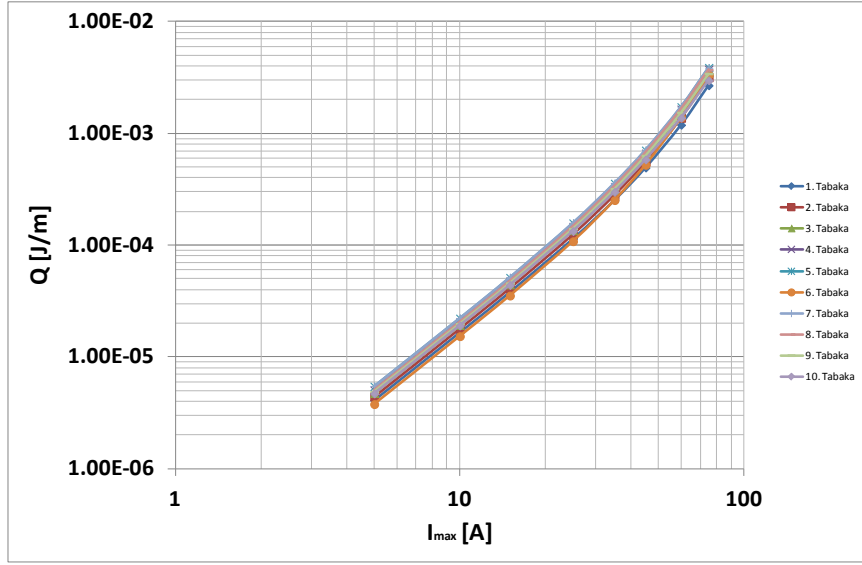
Şekil 39. Model B yapısında birbirine bakan iki üstüniletken tabaka etrafında manyetik alan dağılımının şematik gösterimi.

Altlığın manyetik olması eğrilerinin yalnızca skalasını etkilemektedir eğrilerin biçimi hemen hemen hiç etkilememektedir. $I_C/2$ 'den büyük akım genliklerinde kayıp $Q \propto I_{\max}^3$ orantılı olarak değişmektedir ancak küçük akım genliklerinde I_{\max}^3 bağıntısından önemli ölçüde sapmaktadır. Sonuçlar ayrıca ince dikdörtgenel strip için

çıkartılan analitik ifade ile karşılaştırıldı. Norris stripe için ifade (Hancox, 1966; Norris, 1970)

$$Q_{strip} = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} ((1 - G) \ln(1 - G) + ((1 + G) \ln(1 + G) - G^2)) \quad (73)$$

Burada I_c kritik akım yoğunluğu, μ_0 boşluğun geçirgenliği ve $G = I_{max}/I_c$ normalize edilmiş akım değeridir. Şekil 37'den görüldüğü gibi sayısal sonuçlar analitik sonuçtan oldukça farklıdır. Bu beklenen bir durumdur zira öncelikle Norris formülü çok idealize bir durumu temsil etmektedir, kablonun silindiriksel yapısını dikkate almamaktadır. Bununla beraber yan yana komşu iki şerit arasındaki boşluklardan dolayı oluşan kayıpları, hiç dikkate almamaktadır.



Şekil 40. (a) Model A, (b) Model B ve (c) Model C kablo dizimleri için tabakalar arası transport alternatif akım kayıplarının karşılaştırılması.

Şekil 40’de her üç dizilim için her bir tabakada oluşan kayıpların karşılaştırılması veriliyor. Şekilden de görüldüğü gibi ferromanyetik olmayan altlığı temsil edene model A’da kayıplar arasında çok dikkate değer bir fark olmamakla beraber, en düşük kayıp en içteki yani birinci tabakada en çok kayıp ise içteki tabakalarda beşinci ve altıncı tabakalarda meydana gelmektedir. Birinci tabakada kaybın en olmasının nedeni ilk tabakada komşu şeritler arasındaki mesafenin denklem 73’e göre çok küçük olması ve self manyetik alanın dik bileşeninin daha az olması ile açıklanabilir. Burada ilginç olan nokta aralık etkisinden dolayı dıştaki şeritteki kaybın çok yüksek olmasının beklenmesidir. Ancak en çok kayıp içteki şeritlerde meydana gelmektedir bu durum (L₁, 2012; L₁, 2010) daki sonuçlar ile çelişiyor gibi duruyor. Ancak (L₁, 2012; L₁, 2010) ’da çok tabakalı kablolarda komşu şeritler arasındaki mesafeyi eşit tutabilmek için her bir tabakadaki şerit sayısı bir birinden farklıdır. bizim modelde ise her bir tabakadaki şerit sayısı aynıdır mesafeler bir birinden farklıdır. Kablonun yarıçapı arttıkça kabloyu teşkil eden iletken şeritler bağımsız birer dikdörtgen levha gibi davranmaktadır. Yani dıştaki iletkenler tarafından üretilen self manyetik alan dahi içteki iletkenleri de etkilemekte ve ortadaki iletkenlerin daha fazla manyetik alana maruz kalmasına neden olmaktadır. Model B ve model C’deki kayıp eğrilerinin davranışı model A’daki davranıştan oldukça farklıdır. Öncelikle tabakalar arasındaki kayıp birbirleri ile karşılaştırılabilecek oranda bir birinden farklıdır. Örneğin model B’de düşük akım genliklerinde en dış tabakadaki akım kaybı en iç tabakadakinden %30, yüksek akım genliklerinde ise %100 daha fazla çıkmaktadır. Model C’de ise en düşük akım kaybı ikinci tabakada en yüksek akım kaybı ise $I_c/2$ ’den düşük I_{max} değerlerinde en dış tabakada, $I_c/2$ ’den büyük akım genliklerinde ise altıncı tabakada meydana gelmektedir. En düşük kaybın en içteki tabakada yani birinci tabakada meydana gelmesi şekil 38’ e bakarak kolayca anlaşılabilir. Şekil 38’den de görüleceği üzere birinci tabakada manyetik alan birikmesi diğer tabakalara göre en düşük olmaktadır. Bunun nedeni bu tabaka en içte olduğu için daha çok silindiriksel kablo gibi davranmakta ve manyetik alanın teğetsel bileşeni normal bileşenine göre daha baskın gelmektedir.

3.9. Manyetik Altlıklı Ve Altlıksız İkinci Kuşak Üstüniletken Şeritlerden Yapılan Güçiletim Kablolarında Akı İndüklemesi Sonucu Oluşan Stresin İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi

Güç iletim kabloları, 77K deki self manyetik alanda 250 A cm^{-1} daha fazla akım taşıma kapasitesine sahip paralel şeritlerin belli şekillerde dizilmesi ile oluşturulan yapılardır (Hazelton, 2011). Bu kablolarda şeritler yuvarlak bir gövde üzerine spiral bir biçimde sarılırlar (Takayasu, 2011; Van der laan, 2011). Kablo birden fazla şeritten oluştuğu için, akım taşıyan her şerit yalnızca kendi ürettiği self manyetik alana maruz kalmaz aynı zamanda diğer şeritler tarafından üretilen manyetik alandan da etkilenirler (Lee, 2006). Üstüniletken kablolar transport akım tarafından meydana getirilen çok self yüksek manyetik alana maruz kalacakları için, Lorentz kuvvetinden dolayı kablonun içerisinde çok büyük bir elektromanyetik stresin oluşması kaçınılmazdır. Pek çok çalışma ile gösterildiği gibi bu elektromanyetik stres üstüniletken içerisindeki akım ve akı dağılımı ilişkilidir. Yüksek elektromanyetik stresin, kablonun iç yapısını bozarak akım taşıma, alan tuzaklama gibi özellikle manyetik performansını kötüleştireceği aşikardır. Çok miktarlarda akım taşıyan üstüniletken kabloların hem performanslarını korumak hem de daha uzun ömürlü olmalarını sağlamak için, iç stres ya da manyeto-elastik davranışlarını ön görebilmek çok önemlidir.

Hemen hemen yirmi yıldan beri, manyetik alana maruz kalmış üstüniletken numunelerde *akı indüklenmesi* oluşan manyeto-elastik etkiler üzerine çok yoğun bir biçimde çalışılmaktadır. İlk defa üstüniletken BSCCO numunesinde 10^{-6} mertebesinde numunenin boyutunda nispi bir uzama gözlemlenildi ve bu çok büyük manyetik zorlanmayı açıklamak için kritik hal modeline dayalı bir model geliştirdiler (Ikuta, 2011). (Johansen, 1999; Johansen, 2003; Feng, 2011) elektromanyetik kuvvete maruz kalmış slab, strip, disk gibi çeşitli üstüniletken geometriler için kritik hal modeline dayalı manyeto-elastik problem teorik olarak çözdüler. (Celebi, 2005; Inanır, 2007, Celebi, 2007; Xue, 2010) farklı akı dinamiği etkilerini içerecek şekilde akı çivilenmesi sonucu oluşan zor “stres” ve zorlanma “strain” analizi yapılmıştır. Bunun yanında son zamanlarda lineer elastik kırılma teorisi kullanılarak üstüniletken slab ve silindir malzemelerde akı çivilenmesinden dolayı oluşan kırılmalar çeşitli araştırmacılar tarafından çok ciddi olarak incelemiştir (Zhou, 2007; Zeng, 2010). (Mints, 2000; Gao, 2010) üstüniletken numunelerde yine iç kırılma ve doğrudan kırılma problemlerini

incelemişlerdir. Sonuç olarak bütün bu çalışmaların tamamı, yüzeyine dik ya da paralel manyetik Alana maruz kalmış üstüniletken numunelerin manyeto elastikiyet davranışını yani üstüniletken içerisinde zorlanma dağılımını incelemişlerdir. Transport akım geçirilen üstüniletkenlerdeki manyetoelelastikiyet davranışı üzerine çalışmalar şunlardır: Transport akım geçirilen üstüniletken slab malzemelerde stress dağılımını modellemişlerdir (Inanır, 2008). Aynı şekilde transport akım geçirilen üstüniletken stripte akı çivilenmesi sonucu oluşan zor ve manyetik zorlanmayı hesaplamışlardır (Yong, 2011). Artan ve azalan akım durumları için ikinci kuşak kaplı “coated conductors” iletkenlerde oluşan dik stresi ve makaslama stresi analiz etmede kullanabilecek bir model geliştirmişlerdir (Jing, 2012). Bildiğimiz kadarıyla akım geçirilen üstüniletken kablolarına transport akım ve self manyetik alanın etkileşmesinden doğan Lorentz kuvvetinin oluşturduğu akı çivilenmesinden meydana gelen stres üzerine hiç bir çalışma yoktur. Bu çalışmada sonucu elemanlar yöntemi kullanılarak ferromanyetik altlıklı ve manyetik olmayan altlıklı şeritlerden yapılan iki tabakalı güç iletim kablolarındaki stres dağılımı benzeşimle incelendi.

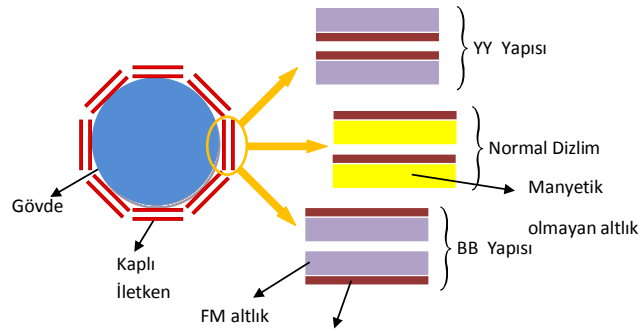
3.9.1. Modelleme

Modelleme çalışmasında, dikdörtgen kesit alanına sahip kaplı iletken şeritlerden dizayn edilen iki tabakalı kablo yapıları incelenmiştir (Şekil 40). Ferromanyetik altlıklı şeritlerin kablo üzerine yerleşimine göre iki farklı dizilim dikkate alınmıştır. Manyetik olmayan altlıklı dizilimde üstüniletken tabakaların bir birinin üstüne gelmesi AA kayıpları çok çok az etkileyeceği için farklı bir dizilime kurgulanmamıştır. Burada ferromanyetizmanın stres dağılımına etkisini net bir biçimde ortaya koyabilmek için altlığın geçirgenli kuvvetli ferromanyetizmayı temsilen $\mu_r=5000$ alınmıştır. Manyetik olmayan altlık $\mu_r=1$ ile betimlenmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler Tablo 9’da verilmektedir. Şeritler z - eksenini boyunca yatmaktadır ve akımda aynı şekilde z - eksenini yönünde akmaktadır. Şeritlerin gövde üzerine belli bir aralıkla konulduğu kabul edilmektedir, yani şeritlerin sarılması ihmal edilmektedir. Manyetik alanın z yönünde tek düze olduğu, bu nedenle, elektrik alan, akım yoğunluğu ve manyetik vektör potansiyelinin x ve y bileşenlerinin olmadığı kabul ediliyor. Hesaplamalar AC/DC modülü ile birlikte Comsol Multiphysics programı kullanılarak yapıldı (URL-4). AC/DC modülünde Maxwell denklemleri **A-V** formülasyonu

biçiminde işlev görmektedir. \mathbf{A} - \mathbf{V} formülasyonunda elektromanyetik potansiyel ve vektör potansiyeli durum değişkenleridir ve dinamik analizde kullanılacak Ampere denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{j} \quad (74)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V. \quad (75)$$



Şekil 41. Hesaplamalarda kullanılan iki tabkalı kablo yapısı. Hesaplamalarda üç farklı kablo dizaynı göz önüne alınmıştır. Ferromanyetik altlıklı şeritlerden yapılan üstüniletken tabakaların bir birine baktığı yapıya yüz-yüze (YY) (üstteki), ferromanyetik altlığın bir birine baktığı yapıya sırt-sırtta (BB) yapısı denilmiştir (alttaki). Ayrıca altlığın ferromanyetik olmadığı yapı (ortadaki)'dir.

Burada μ manyetik geçirgenlik; A , z eksenini boyunca vektör potansiyeli; j , akım yoğunluğu; ∇V , numune kesit alanında sabit olan şeridin birim uzunluğundaki potansiyel farkını temsil ediyor. Kabloyu oluşturan şeritlerden herhangi birinden I akımı geçirilirse, şeridin etrafındaki toplam manyetik vektör potansiyel ifadesi şeridin kendisinin oluşturduğu self manyetik alanın katkısı ve komşu şeritlerin oluşturduğu dış manyetik alanın katkısı biçiminde düşünülürse ifadesi iletkenin kesit alanı üzerinden integrali formunda şu şekilde yazılabilir (Fukuı, 2009; Rhyner, 2002):

$$A = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_0 I}{8\pi w_{SC} h_{SC}} \int_S \ln(r) dS \quad (76)$$

Burada μ_0 , boşluğun manyetik geçirgenliği; N , kablodaki şerit sayısı; I , şeritlerden geçirilen akımın şiddeti; r , akım kaynağının dışındaki mesafe. Burada integral şeritlerin kesit alanı üzerinden alınmaktadır. Denklem 85 ile tanımlanan vektör potansiyeli ifadesi sınır (Gömöry ve İnanır, 2012; Henning, 2012) olduğu gibi sınır şartı olarak kabul

edildi. Sınır şartı AC/DC modüllü Comsol Multiphysics programında “magnetic potential” sınır şartı kullanılarak, modelin dış sınırındaki vektör potansiyelinin değerini belirlemek suretiyle, kolay bir biçimde tanımlanabilmektedir.

Tablo 9. Hesaplamalarda kullanılan parametreler.

| Nicelik | Değeri |
|--|---------------------|
| I_c (kablunun kritik akım şiddeti) | 2400 A |
| A_n (vektör potansiyeli ölçeklendirme parametresi) | $1,3 \cdot 10^{-8}$ |
| w_{SC} (Üstüniletkenin altlığın eni) | 4 mm |
| h_{SC} (Üstüniletkenin altlığın boyu) | 2 μ m |
| w_T (FM altlığın eni) | 4 mm |
| h_T (FM altlığın boyu) | 80 μ m |
| μ_r (FM altlığın manyetik geçirgenliği) | 5000 |
| R_i (kablunun iç yarıçapı) | 20 mm |
| R_d (kablunun dış yarıçapı) | 21 mm |
| R_u (Hesaplama yapılacak uzayın yarıçapı) | 15 cm |
| N (her tabakadaki şerit sayısı) | 15 |
| f (uygulanan akımın frekansı) | 50 Hz |

Üstüniletken kısımda akan süper akımın karakteristiği şu ifade ile girilebilir. Bu denklemin detayları için (Gömöry, 2008; Gömöry ve Inanir, 2012) bakılabilir.

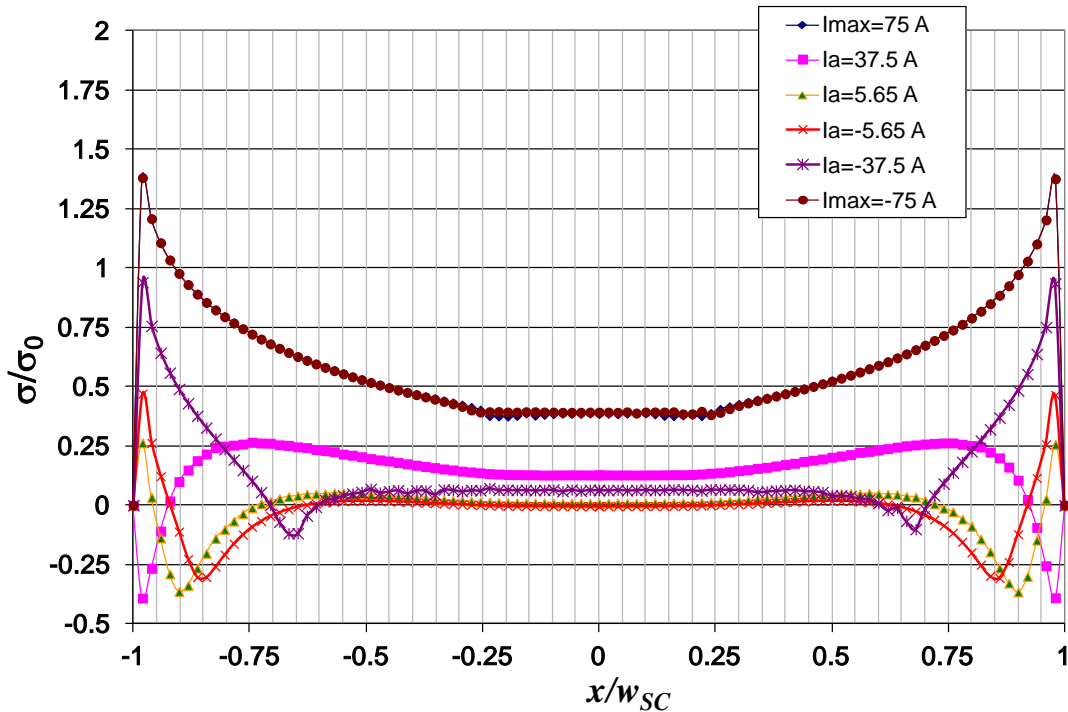
$$j_s = j_c \tanh\left(\frac{E}{E_c}\right) , \quad (77)$$

Burada j_s , üstüniletkendeki akım yoğunluğu; j_c , kritik akım yoğunluğu; E , denklem 80 ile tanımlanan elektrik alan ve elektrik alan kriteri ($1 \mu V/m$). Bu denklem hesaplamalara sınırlama “constrain” olarak katıldı. Kablo yapısının simetrikliğinden dolayı, hesaplamaları periyodik sınır şartını işin içine dâhil ederek yalnızca iki şeridin üst üste düştüğü ve yapı için yapmak yeterlidir.

Üstüniletken tabaka izotropik ve elastik olarak kabul edildi. Akım geçirilen giydirilmiş iletkenindeki stres dağılımını hesaplamak için zaten (Jing, 2012) de

denklemler çıkartılmıştı. (Jing, 2012; Erdem alaca, 2002) da verilen denklemler kullanılarak üstüniletken tabakadaki stres dağılımı hesaplandı.

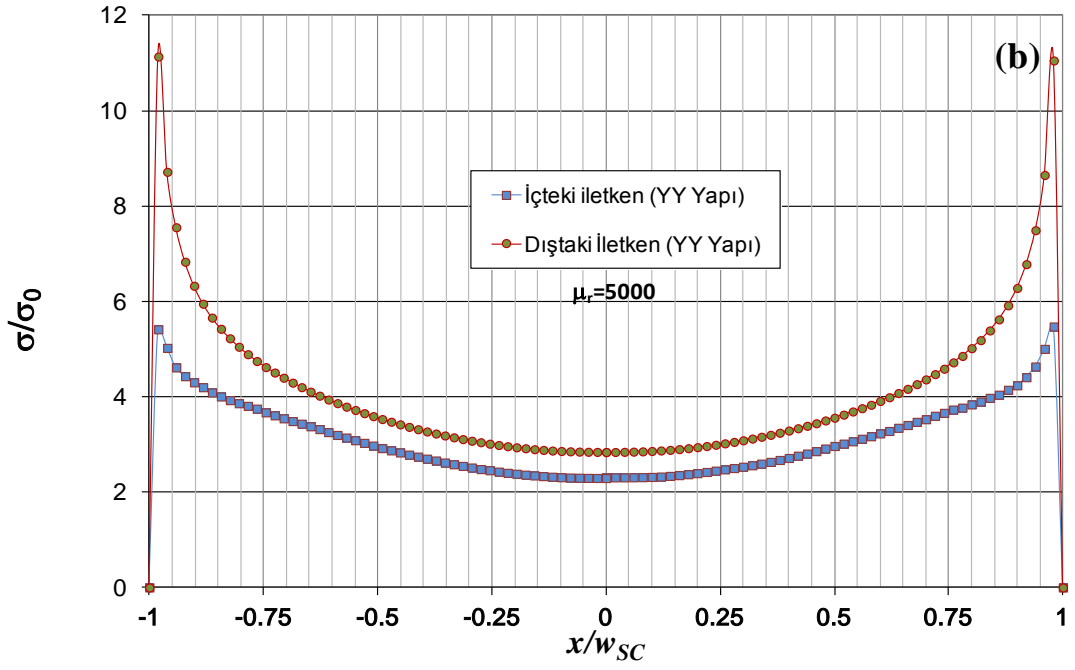
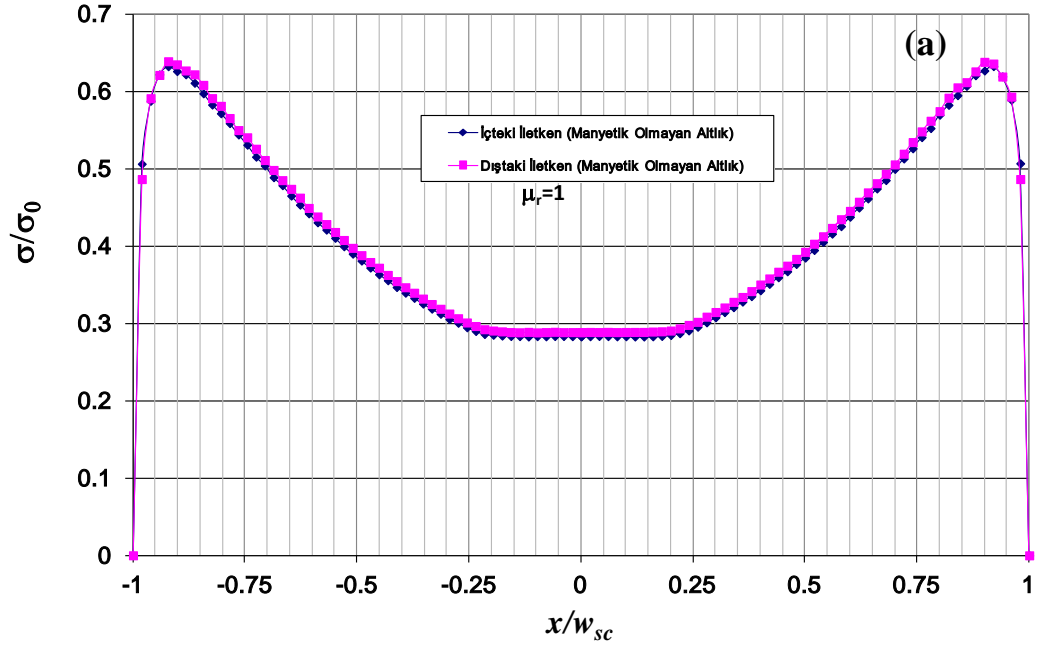
Bu bağlamda; Şekil 41 farklı akım genlikleri dıştaki üstüniletken tabaka içerisinde yatay ekseninde indüklenen bir boyutlu stresi göstermektedir. İçteki tabakada da benzer davranış gösterileceği için yalnızca dıştaki tabaka ile yetinilmiştir. Akım $I_a=75$ A'den itibaren $I_a=-75$ A kadar sinüzoidal azaltılmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi akım maksimum olduğunda üstüniletken tabakanın yan kenarlarından içe doğru sıkıştırıcı "comprehensive" elektromanyetik stres oluşmaktadır. İletken tabakanın yan kenarlarına yakın bölgede stres maksimum olmakta numunenin içlerine doğru tekdüze doğru azalmakta ve numunenin merkezini yakın bölgelerde sabit olmaktadır. İletkenin kenar bölgesinde stresin maksimum olmasının nedeni, komşu iletkenlerin oluşturduğu manyetik alanların ve iletkenin kendi self manyetik alanın bu bölgede manyetik akıyı maksimum yapmasından ve numunenin geometrisinden kaynaklanan demanyetizasyon etkisi ile açıklanabilir. Numunenin yüzeyine yakın bölgede iletkenlere girdapların nüfuzundan dolayı oluşan Lorentz kuvveti $\vec{F}_L = \vec{B} \times \vec{J}$ maksimum olmaktadır.

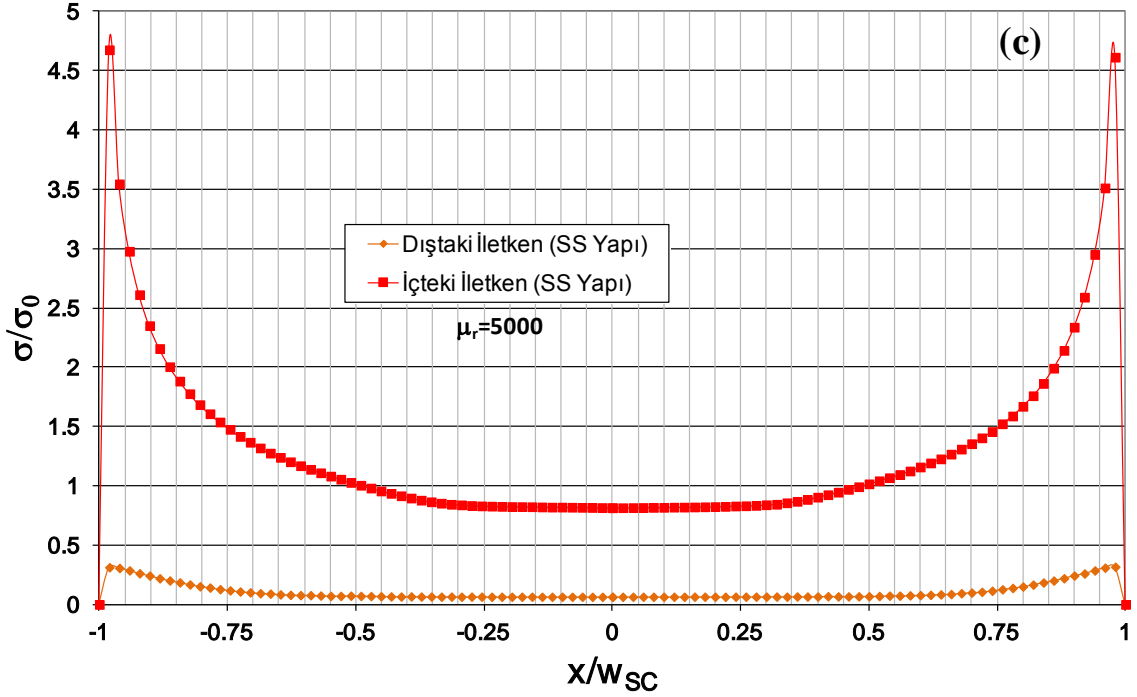


Şekil 42. Farklı akım değerleri için manyetik olmayan altlıklı ($\mu_r = 1$) üstüniletken tabaka içerisindeki stres dağılımı.

Daha rahat bir kıyaslama yapabilmek için oluşan stres $\sigma_0 = B_p^2/(2\mu_0)$ ile normalize edilmiştir. Akım $I_{max}=75$ A'den itibaren sinüzoidal olarak -75 A kadar 21

adımında uygulanmakta burada bu aralıkta çeşitli I_a akım değerleri için ortaya çıkan Numunenin merkezine yakın bölgelerde stresin sabit olmasının nedeni, numunenin sağından ve solundan nüfuz eden girdapların meydana getirdiği bir birine zıt iki yapısal kuvvetin bir birini dengelemesinden kaynaklanabilir. Yani iç tarafta net kuvvet sıfırdır denilebilir. Akım azaldıkça sıkıştırıcı stres çok hızlı bir biçimde azalarak numune kenarına yakın bölgelerde hemen gerilme “tensile” stresine dönüşmekte ve numune en az iki farklı strese maruz kalmaktadır. Örneğin akım $I_a=37.5$ A kadar azaltıldığında numunenin kenar bölgelerinde negatif yani dışa doğru (gerileme), iç kısımlarında ise pozitif yani içe doğru (sıkışma) bir stres oluşmaktadır. Bunun nedeni tamamıyla indüklenen akımın yönü ile alakalıdır. Ayrıca, numunenin kesit alanı üzerinden büyük bir kısmı pozitif strese maruz kalıyorken kenarlara yakın daha küçük bir bölge negatif stres oluşmaktadır. Akım yarıya düştüğünde stres de mertebe olarak en az 50% oranında azalmaktadır. Bir diğer ilginç nokta ise çok düşük akımlarda numune oluşan stres dağılımında iki farklı pik ortaya çıkmaktadır. Bu pikler yine numunedeki akım dağılımı ile alakalı olabilir. Uygulanan akım $I_a=-I_{max}$ olduğunda baştaki stres dağılımı ile aynı elde edilmektedir.

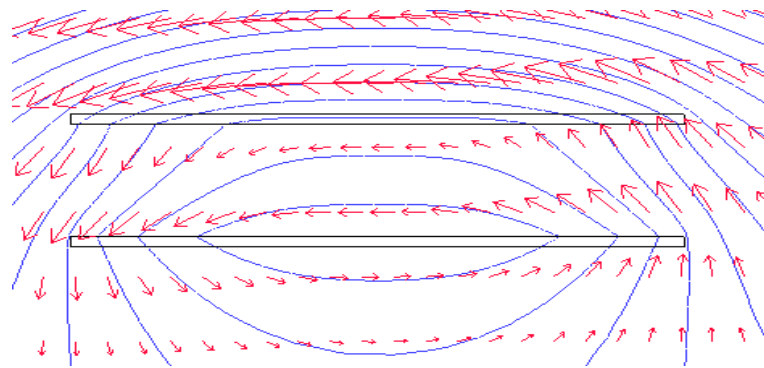




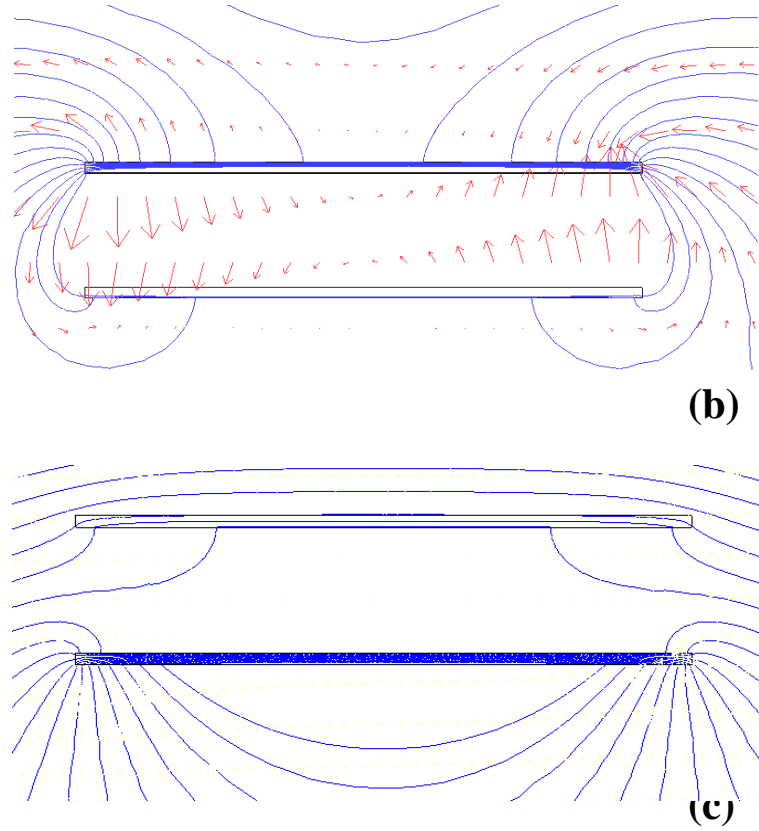
Şekil 43(devam).(a) Manyetik olmayan altlık $\mu_r=1$ (b) manyetik altlıklı $\mu_r=5000$ yüz – yüze (YY) yapısı (c) manyetik altlıklı $\mu_r=5000$ sırt-sırta (SS) dizilimleri için iki tabakalı üstüniletken şeritte radyal olarak iç ve dış tabakalarda x-yönündeki stres dağılımı karşılaştırılmaları olarak gösteriliyor. Hesaplamalar $I_{max}=60$ A'da gerçekleştirildi. Üstün iletken tabakaların tam ortasından geçen bir doğru boyunca alınmıştır.

Şekil 43. (a) Manyetik altlığın kullanılmadığı ($\mu_r = 1$) için iç ve dış iletkenlerde meydana gelen stresi gösteriyor. Burada uygulanan alanın miktarı 60 A olarak seçilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi her iki tabakada oluşan stres hemen hemen bir birine eşittir. Ayrıca burada dikkate değer nokta, numunenin kenarlarından itibaren stres hızlı bir şekilde artmakta belli bir maksimumdan geçerek numunenin içine doğru yaş bir şekilde azalarak numunenin merkezi civarında sabit olmaktadır. Buradaki stresin yönü numunenin merkezine doğrudur. Şekil 43. (a)'dan görüldüğü gibi her iki tabaka etrafındaki alan dağılımı hemen hemen homojendir. Bu durum eşit miktarda manyetik alanın ve akımının tabakalara nüfuz etmesini dolayısıyla eşit miktarda yapısal kuvvetin ve stresin oluşmasına neden olmasından kaynaklanmaktadır. Stresteki maksimum üstüniletken tabakaların sağ ve sol kenarlarından, numunenin yaklaşık %10'luk kısmına karşılık gelen bir bölgede meydana gelmektedir. Stres pikindeki maksimum alan gradyentinin yön değiştirdiği yani akımın maksimum olduğu yerde gerçekleşmektedir.

Bu durumun nedeni iletken tabakanın uçlarında manyetik alanın dik bileşeninin daha baskın olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 43(a)). Maksimum civarında stres dağılımında meydana gelen değişim diğer manyetik altlıklı şeritlerde oluşan stres değişimine göre daha yayvandır. Bu durum, manyetik altlıklı olmayan şeritlerin akım taşıma sürecinde daha az mekaniksel değişimlere maruz kalacağını dolayısıyla üstüniletken tabakalardaki mekaniksel deformasyonun daha düşük olacağı anlamına gelebilir. Şekil 43. (b) ferromanyetik altlıklı ($\mu_r = 5000$) şeritlerden dizayn edilen yüz – yüze yapısı için içteki ve dıştaki şeritte meydana gelen stresi karşılaştırılıyor. Şekilden de görüldüğü gibi $\mu_r = 1$ 'den farklı olarak $\mu_r = 5000$ 'de dıştaki şeritte meydana gelen stres içteki şerittekiye göre yaklaşık %80 daha fazladır. Bu mevcut konfigürasyonun dıştaki şeridin altlığında daha fazla manyetik alan toplanmasına dolayısıyla özellikle dıştaki iletkenin uçlarında manyetik alanın dik bileşeninin artması olabilir (Şekil 43 (b)). Bu ekstra alan, üstüniletken tabakaya daha fazla akının nüfuz etmesine dolayısıyla daha fazla yapısal kuvvete maruz kalmasına neden olabilir. Ayrıca manyetik olmayan altlıklı yapıda olduğu gibi numunenin uçlarında streste bir maksimum ortaya çıkmaktadır. Ancak YY yapısında ortaya çıkan stresteki maksimum numune genişliğinin ~ %5 bölgesinde ortaya çıkmakta ve daha keskin bir pik şeklindedir. Bunun nedeni aynı şekilde iletken tabakanın uçlarının maruz kaldığı manyetik alanın dik bileşeninin daha çok olmasından kaynaklanabilir (Şekil 43(b)). YY kablo dizilimi ile manyetik olmayan kablo diziliminde ortaya çıkan stresler karşılaştırıldığında, YY kablo diziliminin dış iletkeninde oluşan stres manyetik olmayan şeritlerden yapılan kablodaki dış iletkende oluşan stresten numunenin kenarlarında yaklaşık 20 kat numune merkezinde ise yaklaşık 10 kat daha fazladır. Oysa iç iletkendeki stres dağılımı karşılaştırıldığında, manyetik altlıklı YY yapısında manyetik olmayan altlıklı yapıya göre ortalama kabaca 7.5 kat daha fazla iç stres meydana gelmektedir.



(a)

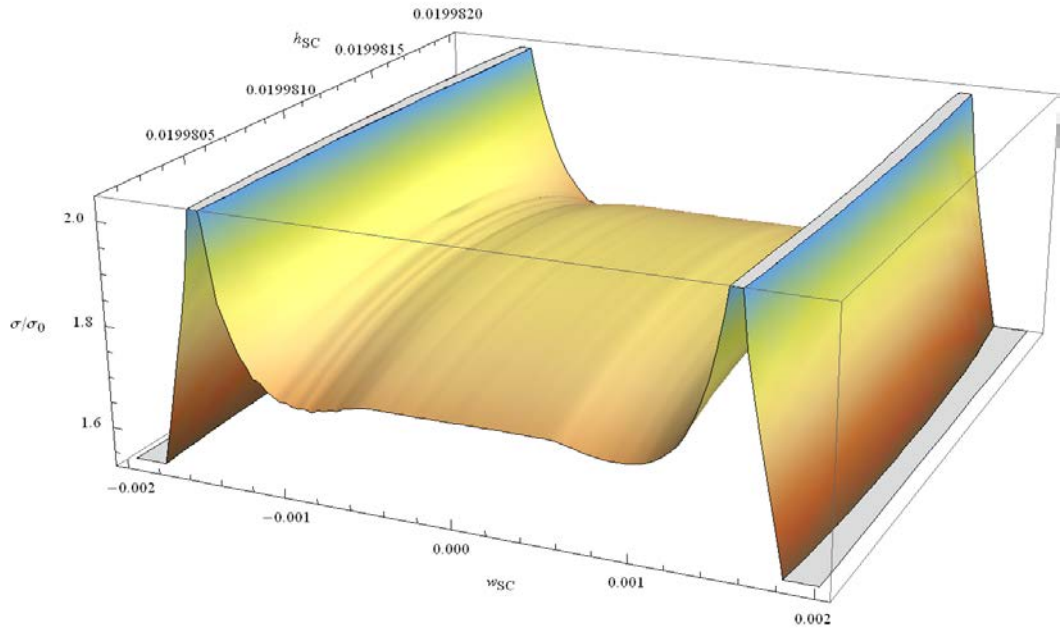


Şekil 44(devam). (a) Manyetik olmayan altlıklı $\mu_r=1$ (b) manyetik altlıklı $\mu_r=5000$ yüz-yüze (YY) şerit dizilimli ve (c) sırt-sırta (SS) şerit dizilimli kablo yapıları için yalnızca kablonun $2\pi/N$ diliminde iki tabakanın üst üste geldiği şeritlerin etrafındaki manyetik alanı temsil eden manyetik potansiyel dağılımı. Oklar self manyetik alanın yönünü göstermektedir. Şekil 3'deki ile aynı akım değerinde çizdirilmiştir. Kontörler 6×10^{-5} Wb/m skalasındadır.

Sırt sırta yapısında dış iletkende meydana gelen stres iç iletkende meydana gelen stresten çok daha düşüktür (Şekil 43. (c)). Dış iletken tabakada oluşan stres iç iletken tabakadakinden iletkenin merkezi civarında yaklaşık 12 kat uçlarında ise kabaca 10 kat daha azdır. Şekil 43 (c)'den görüleceği üzere dış iletkenin altlığında iç iletkenin altlığına göre daha fazla manyetik alan toplanmakta ve dolayısıyla iç iletkendeki dış tabakasının maruz kaldığı self manyetik alanın dik bileşeninin iç tabakadakine göre daha yüksek olması olabilir. Burada bahsedilmesi gereken en önemli nokta üstüniletkenin en düşük yapısal strese maruz kaldığı dizilim sırt sırta yapısıdır. Bunun nedeni nitel olarak şu şekilde açıklanabilir. Sırt sırta yapısında içteki ve dıştaki şeritler tarafından meydana getirilen self manyetik alan zıt yönlüdür, oysa yüz yüze yapısında aynı yönlüdür.

Bu zıt yönlü manyetik alan iki tabaka arasında kalan manyetik altlıkların daha zayıf alana maruz kalmasına neden olur. Bu zayıf alan yüzünden ferromanyetik kısımda daha az alan toplanmakta ve üstüniletken tabakanın dış yüzeyine gelen manyetik alanın dış bileşenini zayıflatmaktadır. Yüz yüze yapısında ise self alan aynı yönlü olduğu için altlıklar daha güçlü manyetik alana maruz kalıyorlar. Ferromanyetik altlıklarda daha fazla alan birikiyor ve özellikle iletkenin uç kısımlarında bu biriken alanın dik bileşeni artıyor.

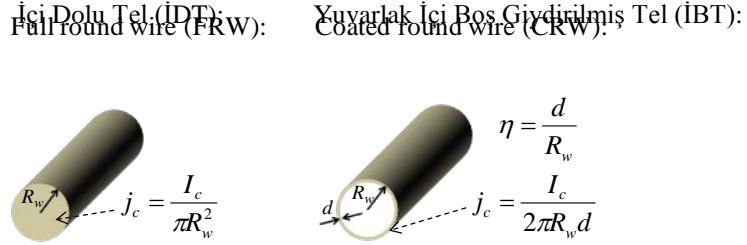
Şekil 45’de Üç boyutta üstüniletken tabakadaki stres dağılımını gösteriyor. Şekilden de görüleceği üzere iletkenin y eksenı boyunca stres homojen değildir ve numunenin merkezinde kenarına göre daha fazla ortaya çıkmaktadır. Bu durum üstüniletken tabakanın merkezinde daha fazla akı toplanmasından kaynaklanabilir. Stresin dik bileşeni yine gerilme olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 45. Üç boyutta manyetik olmayan atıklı üstün iletken tabakada meydana gelen stress dağılımı.

3.10. İçi Boş Ve İçi Dolu Silindirik Üstüniletkenlerden Yapılan Bobinlerde AA Kayıplarının Karşılaştırılması

Kaplı iletkenlerin pratik kullanımlarının önündeki en önemli engellerden birisi geleneksel tellere göre biçimlerindeki farklılıklardır (Stenvall, 2011). Genellikle kaplı iletkenler metalik bir şerit üzerine çok ince bir tabaka üstüniletkenle kaplanması ile elde edilirler. Bu nedenle, üstüniletken elektromagnetler için yeni kablolama ve sarım teknolojisi geliştirmek gereklidir (Weijers, 2010). Bu nedenle düz şerit biçiminde iletkenler yerine mknatıslarda yuvarlak iletkenler kullanmak önemli olabilir. Bu amaçla literatürde zaten ~mm yuvarlak metalik altlık üzerine üstüniletken kaplanması üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur (Ma, 2006; Ferrando, 2005). Buna alternatif olarak birkaç tane düz şeridi esnek yuvarlak bir gövde üzerine helisel sararak kompozit yuvarlak teller yapılmıştır (Van der laan, 2009; Šouc, 2010). Üretim basamakları açısından olaya bakıldığında içi boş silindirik kaplı iletkenlerin üretiminin çok zor olmayacağı gözükmemektedir. Ancak bu iletkenlerin elektromanyetik davranışının aygıtların ortalama işlevlerini nasıl etkileyeceği henüz tam olarak anlaşılamamıştır.



Şekil 46. Hesaplamalarda kullanılan iki tür üstüniletken teller

Bu bölümde içi dolu ve içi boş silindirik tellerden yapılan bobinlerin AA kayıplarının nasıl hesaplanabileceği üzerine teorik bir çalışmanın sonucunu veriliyor. İçi dolu üstüniletken tellerin AA kayıplarının araştırılması üzerine zaten birçok çalışma mevcuttur (Carr, 1983; Norris, 1970). Yarıçapı R_w olan içi boş ve aynı şekilde yarıçapı R_w ve kabuk kalınlığı d olan ayrıca $\eta = d/R_w$ ile karakterize edilen içi dolu üstüniletken tellerden yapılan bobinlerde meydana gelen AA kayıpları karşılaştırıldı. Her iki kabloda aynı kritik akım yoğunluğuna ve aynı yarıçapa sahiptir. (Bean, 1962)'da, üstüniletken slab biçimindeki külçe “bulk” malzemeler için sabit kritik akım yoğunluğu için kritik hal modeline dayalı hesaplamalar alternatif akım çevrimi boyunca

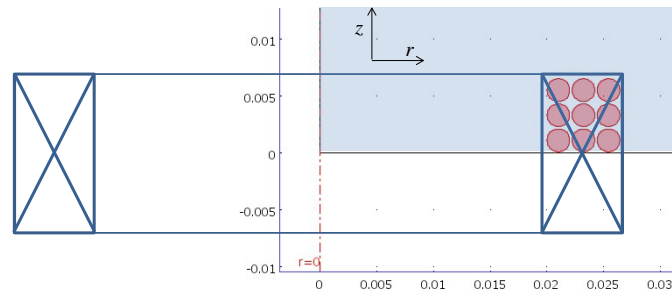
manyetik alan ve akım yoğunluğu dağılımlarını çıkarmak için gerçekleştirilmiştir.

İçi boş silindirik tellerin AA kayıpları analitik olarak çıkartılmıştır. İçi boş tellerin AA transport akım kayıpları içi dolu tellere göre yaklaşık 2η kat daha düşük olarak hesaplanmıştır (Vellego, 1995). Manyetizasyon kayıplarında durum daha karmaşıktır. Düşük alanlarda içi boş tellerde AA manyetizasyon kayıpları içi dolu tellere göre aynı şekilde 2η kadar düşük, fakat yüksek alan genliklerine çıktığında içi boş teldeki kayıp artarak içi dolu teldeki kaybın bir miktar üzerine çıkmaktadır. Bu geçiş, dış alanın genliği içi boş telin B_p tam nüfuz alanına tekabül ettiği değerde meydana gelmektedir:

$$B_p = \mu_0 j_c d \quad (78)$$

Bura da j_c is üstüniletken tabakanın kritik akım yoğunluğu, ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Bu durum gerçekten bizim hesaplamalarda elde ettiğimiz kayıp davranışı ile son derece uyumludur.

Hesaplama prosedürünün sonuçları bir sonraki bölümde verilecektir. AA kayıp benzeşimi 3 tabakadan oluşan ve toplam 18 tane sarımı olan selenoid bir bobin için gerçekleştirildi. Yapının simetrisinden dolayı hesaplama bölgesi olarak yalnızca Şekil 46'da gösterildiği gibi bobin sarımının yarısının üst kısmı için ifade edildi. Telin yarıçapı $R_w = 1$ mm ve kritik akım yoğunluğu $I_c = 100$ A olarak seçildi. Selenoidin iç yarıçapı 40 mm ve teller arasındaki boşluk hem radial hem de aksel yönde 0.2 mm olarak alındı.



Şekil 47. Üstüniletken selenoid geometrisi. Hesaplamalarda (r, z, θ) silindirik koordinat sistemi kullanıldı. silindirik simetriden dolayı sonuçlar her θ için özdeş olacaktır. Bu yüzden dairesel koordinat θ ihmal edilebilir. Akım ve alan dağılımı koyulaştırılmış bölge için yapıldı (sağ üst taraf). Selenoidin üst yarısı ($z>0$) için bulunan sonuçlar diğer ($z<0$) alt yarısına genelleştirilebilir.

3.10.1. Hesaplama Yöntemi

Burada sunulan sonuçlar, üstüniletkendeki akım yoğunluğunun elektrik alanın yerel değeri ile kontrol edildiği kabulüne dayalı sonlu elemanlar hesabı ile elde edildi. Şekil 47'den görüldüğü üzere problem iki boyutlu hale indirgenebilir: bobin sarımları kapalı bir halka ile temsil edilebilir, manyetik alan ve akım yoğunluğu dağılımları elektrik akımın aktığı yöne dik yöne dik yöndeki telleri kesen düzlemde çözüldü. Hem elektrik alanın hem de akım yoğunluğunun sıfır olamayan bileşeni telin uzun eksenine paralel olan eksendir. Şekil 47'de verilen $\vec{x} = (r, z, \theta)$ silindiriksel koordinat sistemine yerleştirilen selenoidal bobin dönme eksenini ihtiva eden herhangi bir düzlem için özdeşdir ve dolayısıyla bunun yerine $\vec{x} = (r, z)$ kullanılabilir. Üstüniletken tabakadaki akım-voltaj bağıntısı için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır (Gömöry, 2010):

$$j_{s,\theta}(r, z) = j_c \tanh\left(\frac{E_\theta(r, z)}{E_c}\right). \quad (79)$$

Bura da j_c kritik akım yoğunluğu ve E_c ölçeklendirme parametresidir.

Bu kısıtlama “constrain” üstüniletken tabakanın uçlarında akım yoğunluğunun doyuma ulaşmasını kontrol eder. Manyetik alan değişiminin yanında $\nabla\phi$ elektrostatik gradyent tarafından da meydana getirilen elektrik alan hesaba katılırsa Denklem 85 aşağıdaki şekilde yazılabilir (Pardo, 2007):

$$j_{s,\theta}(r, z) = j_c \tanh\left(\frac{-\nabla\phi(r, z) - \frac{\partial A_\theta(r, z)}{\partial t}}{E_c}\right). \quad (80)$$

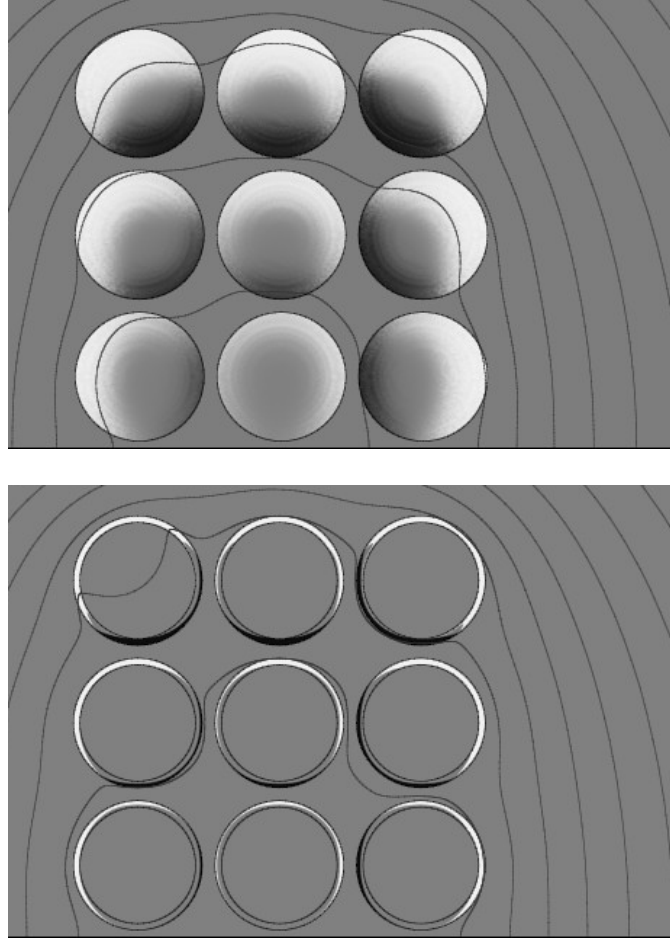
bu hesaplama manyetik potansiyelin sıfırdan farklı dairesel bileşeni dikkate alınmıştır.

Comsol Multiphysic sonlu elemanlar yazılımı üstüniletken kısım içerisindeki manyetostatik denklemin

$$-\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial^2 A_\theta(r, z)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 A_\theta(r, z)}{\partial z^2} \right) = j_{s,\theta}(r, z) \quad (81)$$

çözümünü bulur. Bu denklemin sağ tarafı boşluk için sıfırdır. Sonlu elemanlar hesabına uygulanan ikinci bir kısıtlama her bir bobin sarımından aynı miktar I_{set} akımının aktığıdır. Bu kısıtlama, bu raporun ikinci bölümünde detaylı olarak verilen, her bobin

sargısı (tel) için $\nabla\varphi$ manyetik potansiyeli ayarlatarak başarıldı. Birde her bir sargıdaki $\nabla\varphi$ değeri sabittir. Bu kısıtlama çözüm işlemindeki serbestlik derecesinin sayısını önemli ölçüde düşürmektedir. Sınır şartı olarak Şekil 46' daki koyu olarak çizilen hesaplama kutusunun alt sınırı için *periyodik sınır şartı*, sağ ve üst sınırı için *manyetik izalasyon* ve sol kenarı için ise *eksenel simetri* kullanıldı.



Şekil 48. İçi dolu yuvarlak tellerden (İDT) yapılan bobinler (üst taraftaki) ve içi boş tellerden (İBT) yapılan bobinler (alt taraftaki) için hesaplanan akım yoğunluğu dağılımları (siyah ve gri ile birlikte beyaz renkler zıt yönlü akım yoğunluğunu temsil ediyor).

Bu şekil kritik akımın %40 ına karşılık gelen $I_{bobin}=I_{max}=40A$ maksimum akım genliğinde alınmıştır. Açıkça görüldü üzere hem içi boş tellerden yapılan sarımlarda hem de içi dolu sarımlarda dış kaynak tarafından uygulanan akıma zıt yönde akan önemli bir miktardaki akımın olduğu akım dağılımının histeresizi aşikâr olarak gösteriliyor. Siyah eğriler sabit vektör potansiyeli çizgileridir.

Hesaplanan akım yoğunluğu ve manyetik alan dağılımları Şekil 47’de verilmiştir. Bu, bobin akımının I_{bobin} sıfırdan kritik akımın %40’da kadar tek düze artışında alınan bir görüntüdür. Burada dikkate değer nokta bobin akımına zıt yönde akan bir akımın var oluşudur. Bu durum başka üstüniletken bobinlerde de gözlemlenmiştir (Šouc, 2009; Prigozhin, 2011).

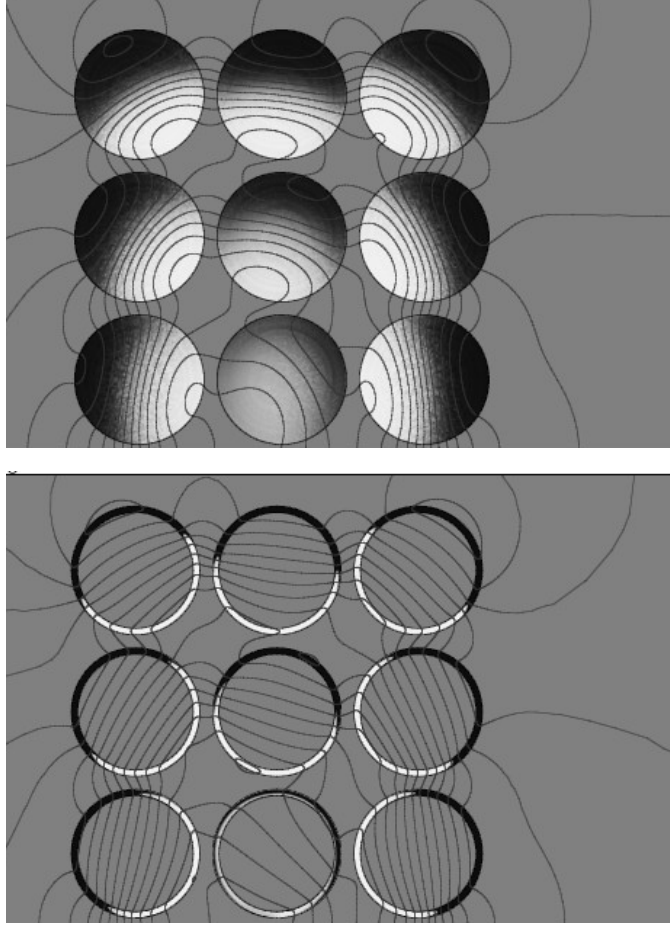
AA kayıplarının hesabına geçmeden önce frekansı f , genliği I_{max} ve $I_{bobin} = I_{max} \sin(2\pi ft)$ biçiminde akım geçirilen bobin üzerinde bir dizi hesaplama yapmak gerekmektedir. Hesaplamalar $\Delta t=1/(f N)$ ($N=36$) dilime bölünen zaman aralıkları için gerçekleştirildi. Sonuçlar $E_c = 10^{-4}$ V/m alındığı zaman frekans seçimine duyarsız olduğu gözlemlendi. Dolayısıyla $f= 50$ Hz ile $f=1$ Hz arasında hiçbir fark yoktur. Bunun nedeni yukarıda seçilen kısıtlamalar olabilir.

Her hangi bir t_i zamanındaki dağılımı hesaplamak için bir önceki t_{i-1} inci adımda hesaplanan dağılımın sonucu kullanılıyor, bu durumda Denklem 85’in zaman türevi ileri farklar formunda,

$$\frac{\partial A_\theta(r, z)}{\partial t} \cong \frac{A_\theta(r, z, t_i) - A_\theta(r, z, t_{i-1})}{\Delta t}, \quad (82)$$

şeklinde yazılabilir. Çevrimin ilk çeyreği çevrim rejimi içerisinde temsil edilemeyeceği için, AA kayıpları $t_0=3/4f$ den başlayan yarım periyot için yapıldı. Diğer yarısı zaten bu hesabın simetriği olacağı için sonuç 2 ile çarpıldı.

AA kayıp olayı akım dağılımının histeresizi ile alakalı olduğu için bunu net bir şekilde gösterebilmek için net akımın sıfır olduğu yani $I_{bobin}=0$ ana bakmak önemlidir. Bu durum Şekil 49 ’da gösterilmektedir. Bu durumda toplam net akımı sıfır yapacak şekilde iki zıt yönde akan akım yoğunlukları donmuştur. İki grafikte de tel bölgesinin dışındaki manyetik vektör potansiyeli dağılımındaki (siyah çizgiler) benzerliğe dikak çekmek istiyoruz. Bu incelenen iki bobinin de elektromanyetik davranışının birbirine benzer olduğunu gösterilmektedir.



Şekil 49. İçi dolu yuvarlak tellerden yapılan bobinler (üst taraftaki) ve içi boş tellerden yapılan bobinler (alt taraftaki) için hesaplanan akım yoğunluğu dağılımları (siyah ve gri ile birlikte beyaz renkler zıt yönlü akım yoğunluğunu temsil ediyor). Her iki şekilde maksimum akımın genliğinin kritik akımın %98'ine karşılık gelen $I_{max}=98$ A olduğu durumda bobin akımının tam $I_{bobin}=0$ geldiği anda elde edildi. Siyah çizgiler sabit vektör potansiyelini gösteriyor.

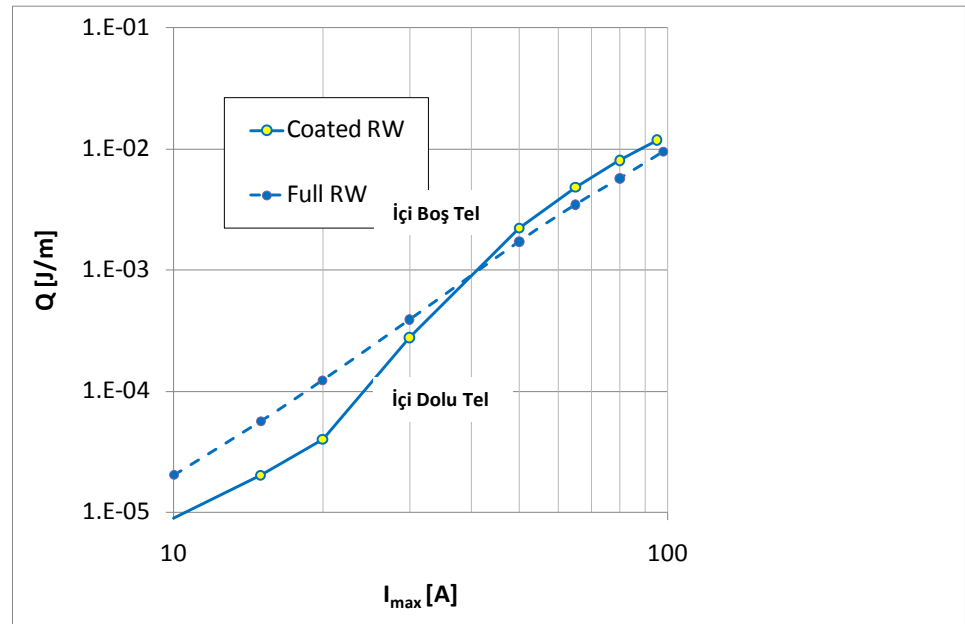
3.10.2. AA kayıp Hesabı

AA çevrimin herbir anında hesaplanan akım ve alan dağılımları kullanılarak AA kayıp kolay bir biçimde hesaplanabilir. Yani akım yoğunluğu ile elektrik alan çarpılarak yerel güç kaybını hesaplayabiliriz. Bu çarpılan nicelik üstüniletken bölgenin kesit alanı üzerinden integralini alarak ve bu alınan integralinde tüm AA çevrimi boyunca zamana göre integre ederek Q_{bobin} bobinin tüm çevrim üzerinden kayıp elde edilmiş olur. Diğer bir yöntem ise $\nabla\varphi$ değerlerinin ortalaması alınarak bobin sarımının iki ucundaki voltaj düşmesi hesaplanabilir (Pardo, 2008).

Bir periyot boyunca $I_{bobin} V_{bobin}$ çarpımının integrali voltaj düşmesinden elde edilen Q_{bobin} değeri ile aynı sonucu vermelidir. İki yöntemle hesaplanan sonuçlar

arasında, muhtemelen sayısal hatalardan dolayı, çok az bir gözlemledik. Şekil 49’da her iki yöntem kullanılarak içi boş ve dolu tellerden yapılan kayıp eğrileri karşılaştırılmalı olarak veriliyor.

İçi dolu yuvarlak tellerden (İDT) yapılan bobinler ile içi boş yuvarlak tellerden (İBT) yapılan bobinler için hesaplanan AA kayıp eğrileri arasındaki en önemli fark şudur; İDT lerin kayıp eğrisi akımın genliği arttıkça tek düze olarak artmakta, oysa İBT lerin kayıp eğrileri ise düşük akımlarda ve yüksek akımlarda iki farklı rejim göstermektedir. İBT ler ara durum akım değerlerinde yumuşak bir geçiş sağlamaktadır. İçi boş tellerden yapılan bobinlerin kayıp değerleri düşük akım genliklerinde içi dolu tellerden yapılan bobinlerin kayıp değerlerinden düşüktür ancak yüksek akım genliklerinde bu durum tam tersidir. Bu giriş bölümünde bahsedilen manyetizasyon kayıpları için elde edilen sonuca çok benzemektedir.



Şekil 50. Standart içi dolu (kesikli çizgi) ve içi boş (düz çizgi) yuvarlak tellerden dizayn edilen bobinler için hesaplanan AA kayıp davranışlarının karşılaştırılması. Her iki telinde yarı çapı aynıdır, ayrıca içi boş kaplı tel için kalınlık/tel yarı çapı oranı $\eta=0.1$ olarak seçilmiştir.

Denklem 1’de $d=10^{-4}$ ve $j_c=6.75 \times 10^8$ A/m² değerleri yerine konulursa, içi boş telin üstüniletken tabakasına nüfuz eden B_c manyetik alanı için

$$B_c = \mu_0 \times 1.675 \cdot 10^8 \cdot 10^{-4} \text{ T} = 0.0211 \text{ T} \quad (83)$$

elde edilir. Bobin sarımında en dıştaki tellere manyetik akıyı iten alan değeri, bütün 18 sarımı (şekil 46 de sadece yarısı gösteriliyor) çevreleyen yol takip edilerek kolayca hesaplanabilir. Bu yolun uzunluğu yaklaşık $2 \times (6 + 3) \times 1.1 \times 2 \times R_w \cong 40 \times R_w$ ve toplam kapalı akım $18 \times I_{bobin}$ olarak hesaplanır. Şimdi bu değerler kullanılarak en dış sarıma self manyetik alanın hangi akım değerinde sağlanacağı şu şekilde hesaplanabilir:

$$I_c = \frac{40 \times R_w}{18 \mu_0} B_c = 37 \text{ A} \quad (84)$$

Bu değer şekil 49 ile verilen sonuç ile tam uyum içerisindedir.

Önceki çalışmalarda kullanılan denklemler aşağıda gösterilmektedir.

$$J(x) = \begin{cases} 0 & B(x) = 0 \\ \mu_o J_c & B(x) \neq 0 \end{cases} \quad (85)$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \mu_o \vec{J} \quad (86)$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (87)$$

$$\nabla^2 (A + xB_a) = -\mu_o J \quad (88)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{B} &= \mu_o \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (89)$$

$$B = \mu_o (H + M) \quad (90)$$

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çok Tabakalı Silindiriksel HTS Güç İletim Kablolarında Altlık Manyetizmasının Ve Şerit Diziliminin Alternatif Akım Kayıplarına Etkisi kapsamında akım geçirilen kabloda altlık manyetizmasının etkisini net bir biçimde ortaya koyabilmek için, ferromanyetik altlıklı ve altlıksız kaplı iletken şeritlerden yapılmış 10 tabakalı silindiriksel güç iletim kablolarında üstüniletken tabakada transport histeresiz AA kayıpları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelendi. Ferromanyetik altlık şeritlerde, üstüniletken tabakaların radyal olarak dışa baktığı ve 1., 3., 5., ve 7. tabakaların dışı 2., 4., 6., ve 8. tabakaların içe baktığı şeklinde iki farklı şerit dizilimi için sayısal hesaplama yapıldı. Aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

- (1) 10 tabakalı kablolarda kuvvetli ferromanyetik altlık üstüniletken bölgelerdeki histeresiz kaybını önemli ölçüde artırmaktadır.
- (2) FM altlıklı kaplı iletkenler için, bazı üstüniletken tabakaların içe baktığı kablo dizilimindeki kayıp, hepsinin dışa baktığı dizilime göre bir miktar daha fazladır.
- (3) FM altlıksız yapıda tabakalar arasındaki kayıp hemen hemen eşit iken, m FM altlıklı yapılarda tabakalar arasındaki kayıp önemli ölçüde bir birisinden farklıdır.

Manyetik Altlıklı Ve Altlıksız İkinci Kuşak Üstüniletken Şeritlerden Yapılan Güç İletim Kablolarında Akı İndüklemesi Sonucu Oluşan Stresin İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak manyetik altlıklı ve altlıksız kaplı iletken şeritlerden dizayn edilen iki tabakalı güç iletim kablolarında akım uygulandığında iletken şeritlerin üstüniletken tabakalarındaki stres dağılımları sayısal olarak incelendi. Stres dağılımının üstüniletken tabaka etrafındaki ve içerisindeki manyetik alan dağılımı ile ilişkisi ortaya konuldu.

Aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

- (1) Üstüniletken tabakanın uçlarında streste bir maksimum meydana çıkmaktadır. Bu bölgelerde akım aktivasyonu süresince kırılma olma olasılığı yüksektir.
- (2) Manyetik altlıksız şeritlerde iç ve dış tabakada stres dağılımı bir birine eşittir.
- (3) Manyetik altlıksız ($\mu_r=1$) üstüniletken tabakadaki stres, kuvvetli manyetik altlıklı ($\mu_r=5000$) üstüniletken tabakadaki stresten oldukça düşüktür.
- (4) Kuvvetli ferromanyetik altlıklı ($\mu_r=5000$) yüz-yüze yapısında dıştaki tabakada ortaya çıkan stres, iç tabakadakine göre oldukça fazladır.
- (5) Sırt-sırta yapısı için iç tabakadaki stres dış tabakadakine göre oldukça yüksektir.

İçi Boş ve İçi Dolu Silindirik Üstüniletkenlerden Yapılan Bobinlerde Aa Kayıplarının Karşılaştırılması kısmında bir yuvarlak yüzey üzerine üstüniletken kaplanarak yapılan içi dolu boş -diye isimlendirilebilecek- teller den (İBT) yapılan bobinlerin AA kayıp davranışlarını ön görebilmek için çeşitli sayısal hesaplamalar geliştirildi. Aynı yarıçapa sahip içi dolu ve aynı zamanda yarıçapının %10'u kadar kalınlığa sahip içi boş tellerden sarılan bobinlerin AA kayıpları karşılaştırıldı. İçi boş kaplı tellerden yapılan bobinlerin AA kayıpları düşük akım genliklerinde içi dolu tellerdekine göre oldukça düşük, yüksek akım genliklerinde ise daha yüksektir.

5. ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında “İkinci Kuşak Giydirilmiş İletkenlerden Dizayn Edilen Çok Tabakalı HTSC Güç İletim Kablolarında Altlık Manyetizmasının AC Kayıplara Etkisi” incelendi. Bu yüksek lisans çalışmasının devamında aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilebilir.

- 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.
- Deneysel olarak kablo üretilip sonuçlar denenebilir.

KAYNAKLAR

- Amemiya, N., Jiang, Z., Nakahata, M., Yagi, M., Mukoyama, S., Kashima, N., Nagaya, S. and Shiohara, Y., 2007.** AC Loss Reduction of Superconducting Power Transmission Cables Composed of Coated Conductors , IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1712- 1717.
- 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. Superconductor Science and Technology, 23, 1-8.
- Amemiya, N., Li, Q., Ito, K., Takeuchi, K., Nakamura, T. and Okuma, T., 2011.** AC loss reduction of multilayer superconducting power transmission cables by using narrow coated conductors. Superconductor Science and Technology, 24, 065013.
- Bean, C. P., 1962.** Magnetization of hard superconductors. Physical Review Letters, 8, 250-253.
- Campbell, A. M. and Evetts, J. E., 1972.** Flux vortices and transport currents in type II superconductors , Advances in Physics, 21, 199-428.
- Campbell, A., 1999.** Flux-transfer losses in helically wound superconducting power cables. Superconductor Science and Technology, 2137.
- Carr, W. J. Jr., 1983.** Carr W J, AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors. Gordon and Breach, New York, 393.
- Celebi, S., Inanir, F., LeBlanc, MAR., 2005.** Contribution of the Meissner current to the magnetostriction in a high T_c superconductor, Science and Technology, 18, 14-17.
- Celebi, S., Inanir, F., LeBlanc, M. A. R., 2007.** Coexistence of critical and normal state magnetostrictions in type II superconductors: A model exploration Journal of Applied Physics, 101, 13906-13909.
- Clem, J. R., 1982.** Flux-line-cutting losses in type-II superconductors, Physical Review Letters, B 26, 2463–2473.
- Clem, JR. and Malozemoff, A.P., 2010.** Theory of ac loss in power transmission cables with second generations high temperature superconductor wires. Superconductor Science and Technology, 23, 034014, 1-6.
- Daeumling, M., 2004.** AC loss in two ac carrying superconducting concentric tubes-the duoblock model. Physica C, 403, 57-59.

- Erdem alaca, B., Saif, M. and Sehitoglu, H., 2002.** On the interface debond at the edge of a thin film on a thick substrate, *Acta Mater*, 50, 1197-1209.
- Farmon, S., Fabbriatore, P., Gömöry, F., Greco, M. and Seiler, E., 2005.** Modeling of current density distributions in critical state by commercial FE codes, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15, 2867–2870.
- Feng, W., Han, X. and Ma, P., 2011.** Flux-pinning-induced stress and magnetostriction in functionally graded long rectangular superconductor slab *Journal of Applied Physics*, 110, 063917.
- Ferrando, V., Orgiani, P., Pogrebnyakov, A. V., Chen, J. Q. and Redwing, J. M., Xi. X. X., Giencke, J. E., Eom, C. B., Feng, Q. R., Betts, J. B., Mielke, C. H., 2005.** High upper critical field and irreversibility field in MgB₂ coated-conductor fibers. *Applied Physics Letters*, 87, 252509.
- Fukui, S., Ogawa, J., Suzuki, N., Oka, T., Sato, T., Tsukamoto, O. and Takao, T., 2009.** Numerical Analysis of AC Loss Characteristics of Multi-Layer HTS Cable Assembled by Coated Conductors *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 1714–1717.
- Fukui, S., Suzuki, N., Ogawa, J., Oka, Sato, T. T. and Tsukamoto, O., 2010.** Numerical Analysis of Relation Between AC Loss Characteristics and Geometrical Parameters of Multi-Layer Polygonal Conductor Assembled by HTS Coated Conductor *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 20, 2138-2141.
- Gao, Z. W., Zhou, Y. H. and Lee, K.Y., 2010.** The interaction of two collinear cracks in a rectangular superconductor slab under an electromagnetic force. *Physica C*, 470, 654-658.
- Glowacki, B. A. and Majoros, M., 2000.** A method to decrease transport ac losses in multifilamentary and multistrip Superconductor *Science and Technology*, 13, 971–973
- Goldacker, W., Frank, A., Kudymow, A., Heller, R., Kling, A., Terzieva, S. and Schmidt, C., 2009.** Status of high transport current ROEBEL assembled coated conductor cables. *Superconductor Science and Technology*, 22, 034003.
- Gömöry, F. and Gherardi, L., 1997.** Transport AC losses in round superconducting wire consisting of two concentric shells with different critical current density. *Physica C*, 280, 151-157.
- Gömöry, F., Souc, J., Vojenciak, M., Alangir, A., Han, Z. and Gu. Ch., 2007.** Reduction of ac transport and magnetization loss of a high-T_c superconducting tape by placing soft ferromagnetic materials at the edges. *Applied Physics Letters*, 90, 092506.

- Gömöry, F., Souc, J., Seiler, E., Vojenciak, M. and Granados, X., 2008.** Modification of critical current in HTSC tape conductors by a ferromagnetic layer. *Journal of Physics: Conference Series*. 97, 012096, (1-6).
- Gömöry, F. and Inanir, F., 2012.** AC Losses in Coil Wound From Round Wire Coated by a Superconducting Layer , *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22, 4704704.
- Hancox, R. 1966.** Calculation of a.c. losses in a type II superconductor. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 113, 1221-1228.
- Hazelton, D.W., Roy, F. and Brownsey, P., 2011.** Recent developments in 2G HTS coil technology SuperPower 2G HTS architecture European Conference. on *Applied Superconductivity*, 19, 2218.
- Henning, A., Lindmayer, M. and Kurrat, M., 2012.** Simulation setup for modeling the thermal, electric, and magnetic behavior of high temperature superconductors. *Physica Procedia*, 36, 1195-1205.
- Ikuta, H., Hirota, N., Nakayama, Y., Kishio, K. and Kitazawa, K., 2011.** Giant magnetostriction in Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ single crystal in the superconducting state and its mechanism. *Physical Review Letters*, 70, 2166-2169.
- Inada, R., Nakamura, Y. and Oota, A., 2008.** Numerical analysis for AC losses in single-layer cables composed of rectangular superconducting strips with various lateral J_c distributions. *Journal of Physics: Conference Series*. 97, 012324.
- Inanir, F., Celebi, S., Altunbaş, M., Okutan, M. and Erdogan, M., 2007a.** Critical state magnetostriction of type II superconductors under viscous flux flow. *Physica C*, 459, 11-17.
- Inanir, F. and Celebi, S., 2007b.** Model calculations for high-field peak of the fish-tail effect in the magnetostriction of type-II, superconductors. *Journal of Alloys and Compounds*, 427, 1-4.
- Inanir, F. and Erdogan, M., 2008.** Effect of transport current on the pinning induced magnetostriction of type-II superconductors. *Acta Physica Polonica A*, 113, 741-752.
- Jiang, Z., Amemiya, N. and Nakahata, M., 2008.** Numerical calculation of AC losses in multi-layer superconducting cables composed of coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 21, 1-8.
- Jing, Z., Yong, H. and Zhou, Y., 2012.** Flux-pinning induced interfacial shearing and transverse normal stress in superconducting coated conductor long strip. *Journal of Applied Physics*, 112, 043908.
- Johansen, T. H., 1999.** Flux-pinning induced stress and strain in superconductor: Case of a long circular cylinder. *Physical Review B*, 60, 9690-9703.

- Johansen, TH. and Shantsev, D. V., 2003.** Magnetostrictive behavior of thin superconducting disks. *Superconductor Science and Technology*, 16, 1109-1114.
- Jun, ogawa., Satoshi, Fukui., Tetsuo, Oka., Takao, Sato., Akihiro, Tamura., Eisuke, Kasuga. and Kyung. Woo, Ryu., 2012.** Influence of AC Transport Current Balance on AC Loss in a Two Layered Polygonal YBCO Assembled Conductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22, 1353-1357.
- Klincok, B. and Gömöry, F., 2006.** Influence of gaps in monolayer superconducting cable on AC losses. *Journal of Physics: Conference Series*, 43 , 897-900.
- Kovac, P., Husek. I., Melisek. T., Ahoranta. M., Souc. J., Lehtonen, J. and Gömöry, F., 2003.** Magnetic interaction of an iron sheath with a superconductor. *Superconductor Science and Technology*, 16, 1195–201.
- Krüger, P.A.C., Grilli, F. and Farinon, S., 2011.** Compliance of numerical formulations for describing superconductor/ferromagnet heterostructures. *Physica C*, 471, 1083-1085.
- Lee, J., Park, M., Lim, H. and Lee, H. G., 2006.** Magnetization loss and shield effect in multi-stacked tapes with various stacking configurations. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 16, 131-134.
- Li, Q., Amemiya, N., Takeuchi, K., Nakamura, T. and Fujiwara, N., 2010.** AC loss characteristics of superconducting power transmission cables: gap effect and J_c distribution effect. *Superconductor Science and Technology*, 23, 115003.
- Li, Q., Amemiya, N., Takeuchi, K., Nakamura, T. and Fujiwa, N., 2011.** AC loss reduction of multilayer superconducting power transmission cables by using narrow coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 24, 065013.
- Li, Q., Amemiya, Nishino, N., Nakamura, R. T. and Okuma, T., 2012.** AC loss reduction of outer-diameter-fixed superconducting power transmission cables using narrow coated conductors. *Physica C*, 484, 217-222.
- Ma, B. H. and Balachandran, U., 2006.** Prospects for the fabrication of low aspect ratio coated conductors by inclined substrate deposition. *Superconductor Science and Technology*, 19, 497-502.
- Majoros, M., Sumption, M. D. and Collings, 2009.** Transport AC Loss Reduction in Striated YBCO Coated Conductors by Magnetic Screening. *E W IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 3352–3355.
- Malozemoff, A.P., Snitchler, G. and Mawatari, Y., 2009.** Tape-Width Dependence of AC Losses in HTS Cables. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 19, 3115–3118.

- Mawatari, Y. and Kajikawa, K., 2008.** Hysteretic ac loss of polygonally arranged superconducting strips carrying ac transport current. *Applied Physics Letters*, 92, 012504.
- Mawatari, Y., Malozemoff, AP., Teru Izumi., Keiic, T., Noboru, F. and Yuh, S., 2010.** Hysteretic ac losses in power transmission cables with superconducting tapes: effect of tape shape. *Superconductor Science and Technology*, 23, 1-4.
- Mints, R. G. and Brandt, E. H., 2000.** Buckling instability in type-II superconductors with strong pinning. *Physical Review B*, 61, 11700–11703.
- Miyagi, D., Umabuchi, M. and 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., 2009.** Numerical Evaluation of AC Magnetization Loss Characteristics of HTS Coated Conductor With Magnetic Substrate Using FEM *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 3336-3339.
- Mukoyama, S., Miyoshi, K., Tsubouti, H. and Mimitra, M., 1997.** 50-m long HTS conductor for power cable *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7, 1069 – 1072.
- Mukoyama, S., Yagi, M., Fujiwara, N. and Ichikawa, H., 2010.** Conceptual design of 275 kV class high-Tc Superconducting cable, *Physica C*, 470, 1563-1566.
- Nguyen, D. N., Ashworth, S. P., Willis, J. O., R, Sirois. and F, Grilli., 2010.** A new finite-element method simulation model for computing AC loss in roll assisted biaxially textured substrate YBCO tapes. *Superconductor Science and Technology*, 23, 025001.
- Norris, W. T., 1970.** Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets. *Journal of Physics D*, 3, 489-507.
- Pardo, E., Gömöry, F., Šouc, J. and Ceballos, J. M., 2007.** Current distribution and ac loss for a superconducting rectangular strip with in-phase alternating current and applied field. *Superconductor Science and Technology*, 20, 351–364.
- Pardo, E., 2008.** Modeling of coated conductor pancake coils with a large number of turns, *Superconductor Science and Technology*, 21, 065014.
- Pardo, E., Sou, J. and Vojenciak, M., 2009.** AC loss measurement and simulation of a coated conductor pancake coil with ferromagnetic parts. *Superconductor Science and Technology*, 22, 75007.
- Prigozhin, L. and Sokolovsky, V., 2011.** Computing AC losses in stacks of high-temperature superconducting tapes. *Superconductor Science and Technology*, 24, 075012.

- Rhyner, J., 2002.** Vector potential theory of AC losses in superconductors *Physica C*, 377, 56-66.
- Rostilla, L., Söderlund, L., Mikkonn, R. and Lehtonen, J., 2007.** Modelling method for critical current of YBCO tapes in cable use. *Physica C*, 467, 91-95.
- Safran, S., Vajenciak, M., Gencer, A. and Gömöry, F., 2010.** Critical Current and AC Loss of DI-BSCCO Tape Modified by the Deposition of Ferromagnetic Layer on Edges *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 20, 2294-2230.
- Scanlan, R. M., Malozemoff, AP. and Larbalestier, D. C., 2004.** Superconducting materials for large scale applications, *IEEE Proceedings*. 92, 1639-1654.
- Seiler, E. and Gömöry, F., 2006.** AC loss of YBCO coated tape prepared by laser ablation. *Journal of Physics: Conference Series*, 43, 9–13.
- Suenaga, M., Iwakuma, M., Sueyoshi, T., Izumi, T., Mimura, M., Takahashi, Y. and Aoki, Y., 2008.** Effects of a ferromagnetic substrate on hysteresis losses of a YBa₂Cu₃O₇ coated conductor in perpendicular ac applied magnetic fields. *Journal of Physics: Conference Series*, 97, 012025.
- Šouc, J., Pardo, E., Vojenčičak, M. and Gömöry, F., 2009.** Theoretical and experimental study of AC loss in high temperature superconductor single pancake coils. *Superconductor Science and Technology*, 22, 15006.
- Souc, J., Vojenciak, M. and Gömöry, F., 2010.** Supercond. Experimentally determined transport and magnetization ac losses of small cable models constructed from YBCO coated conductors. *Science & Technology*, 23, 045029.
- Stenvall, A., Grilli, F. and Vojenciak, M., 2011.** On the role of a tape's aspect ratio in the hysteresis losses of round superconducting cables. *Superconductor Science and Technology*, 24, 085016.
- Sytnikov, V. E., Vysotsky, V. S., Rychagov, A. V., Polyakova, N. V., Radchenko, I. P., Shutov, K. A., Fetisov, S. S., Nosov, A. A. and Zubko, V. V., 2009.** 30 m HTS Power Cable Development and Witness Sample Test. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 19, 1702-1705.
- Takayasu, M., Chiesa, L., Bromberg, L. and Minervini, J.V., 2011.** Cabling method for high current conductors made of HTS tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21, 2340- 2344.
- Van der laan, D. C., 2009.** YBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications. *Superconductor Science and Technology*, 22, 1-5.

- Van der laan, D.C., Lu, X. F. and Goodrich, L. F., 2011.** Compact GdBa₂Cu₃O₇ coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications. *Superconductor Science and Technology*, 24, 042001.
- Vellego, G. and Metra, P., 1995.** An analysis of the transport losses measured on HTSC single-phase conductor prototypes. *Superconductor Science and Technology*, 8, 476-483.
- Vojenciak, M., Souc, J. and Gömöry, F., 2010.** Critical current and AC loss analysis of a superconducting power transmission cable with ferromagnetic diverters. *Superconductor Science and Technology*, 24, 75001.
- Vysotsky, V. S., Shutov, K. A., Nosov, A.A., Polyakova, N.V., Fetisov, S.S., Zubko, V.V. Sytnikov, V.E., Carter, W. L., Fleshler, S., Malozemoff, A. P. and Snitchler, G., 2010.** AC loss of a model 5m 2G HTS power cable using wires with NiW substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 234, 3-5.
- Wen, H., Bailey, W., Goddard, K., Al-Mosawi, M., Beduz, C. and Yang, Y., 2009.** Performance Test of a 100 kW HTS Generator Operating at 67 K–77 K, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19, 1652-1655.
- Weijers, H. W., Trociewitz, U. P., Markiewicz, W. D., Jiang, J., Myers, D., Hellstrom, E. E., Xu, A., Jaroszynski, J., Noyes, P., Viouchkov, Y., D. and Larbalestier, C., 2010.** High Field Magnets With HTS Conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 20, 576-582.
- Wilson, M. N 2008.** Cryogenics, NbTi superconductors with low ac loss: A review 48, 381–395.
- Xue, F., Yong, H. and Zhou, Y., 2010.** Effect of flux creep and viscous flux flow on flux-pinning-induced stress and magnetostriction in a long rectangular slab superconductor. *Journal of Applied Physics*, 108, 103910.
- Yampolski, S. V., Genenko, Y. A. and Rauh, H., 2007.** Penetration of an external magnetic field into amultistrip superconductor/soft-magnet heterostructure. *Physica C*, 460–462, 1262–1263.
- Yong, H. and Zhou, Y., 2011.** Stress distribution in flat superconducting stripe with transport current. *Journal of Applied Physics*, 109, 73902.
- Zeng, J., Zhou, Y. H. and Yong, H D., 2010.** Fracture behaviors induced by electromagnetic force in a long cylindrical superconductor. *Journal of Applied Physics*, 108, 033901.
- Zhou, Y. H. and Yong, H. D., 2007.** Crack problem for a long rectangular slab of superconductor under an electromagnetic force. *Physical Review Letters*, B 76, 094523.

ÖZGEÇMİŞ

10.11.1989 tarihinde Rize Merkez'de doğdu. İlköğretimini Atatürk İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Hasan Sağır Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında Rize Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde lisans eğitimine başlayıp 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesinde Fizik bölümünde pedagojik formasyon eğitimini aldı. 2012 yılından itibaren, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.