T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK GERİLİM YER ALTI KABLOLARININ ISIL ANALİZİ

BARIŞ KÜÇÜKAYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI

DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. OKTAY ARIKAN

İSTANBUL, 2015

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK GERİLİM YER ALTI KABLOLARININ ISIL ANALİZİ

Barış KÜÇÜKAYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması 02.06.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Bülent ORAL

Marmara Üniversitesi _____

Bu çalışma, TÜBİTAK 2211 Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek gerilim yer altı kablolarının ısıl analizini gerçekleştirdiğim bu tez çalışmasında, bilgisi ve desteğiyle her zaman çok değerli katkılar sağlamış olan çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım süresince bana destek olan ve önemli yardımlarda bulunan arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 2211 Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

Haziran, 2015

Barış KÜÇÜKAYDIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ xi

ŞEKİL LİSTESİ xii

ÇİZELGE LİSTESİ xiv

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 5

BÖLÜM 2

YÜKSEK GERİLİM YER ALTI KABLOLARI 7

2.1 Kablo Yapısı 7
2.2 İletken 9
2.3 İzolasyon Malzemeleri 10
2.4 Ekran 11
2.5 Yarı İletken Tabakalar 12

BÖLÜM 3

YER ALTI KABLOLARININ AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ VE ISIL ANALİZLERİ 13

3.1 Akım Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması 13
3.2 Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması 15
3.2.1 Kablo İletkeninin AC Direnci 15

3.2.2 Kablo İletkenin DC Direnci 15
3.2.3 Deri Etkisi Faktörü 16
3.2.4 Yakınlık Etkisi Faktörü 16
3.3 Kabloda Oluşan Kayıpların Hesaplanması 16
3.3.1 Dielektrik Kayıpları 16
3.3.2 Ekran ve Kılıf Kayıpları 17
3.4 Kablo Sisteminin Isıl Dirençlerinin Hesaplanması 18
3.4.1 İletken ile Kılıf Arasındaki Isıl Direnç (T_1) 19
3.4.2 Kılıf ile Zırh Arasındaki Isıl Direnç (T_2) 19
3.4.3 Dış kılıfın Isıl Direnci (T_3) 19
3.4.4 Kablo Dışı (Toprak) Isıl Direnç (T_4) 19

BÖLÜM 4

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ 22

4.1 Genel Tanıtım 22
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemini Uygulama Adımları 23
4.3 Kabloların Akım Taşıma Kapasitelerinin Hesaplanmasında Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanımı 25
4.3.1 Ayrıklaştırılacak Alanın Seçimi 25
4.3.2 Elemanların Boyutları 26
4.3.3 Sınır Koşulları 26
4.4 Sonlu Elemanlar Yönteminin Isı Transfer Denklemleri 27
4.4.1 Isı Transfer Denklemleri 27
4.4.2 İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi 28
4.4.3 İletkenlik Matrisi ve Yüklenme Vektörü 29
4.4.4 Sonlu Üçgen Elemanlar 30

BÖLÜM 5

COMSOL MULTIPHYSICS PROGRAMI 35

5.1 AC/DC Modülü 36
5.2 Isı Transfer Modülü 36

BÖLÜM 6

SAYISAL UYGULAMA VE ANALİZLER 43

6.1 Sistem Tanıtımı 44
6.2 Yöntem 46
6.2.1 Isı Transferi ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi 46
6.2.2 Yer altı Kablolarının Akım Taşıma Kapasitelerinin Hesaplanması 48
6.3 Döşeme ve Ortam Koşullarının Kablo Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri 48
6.3.1 Sıcaklık Analizleri 49
6.3.1.1 Yatak Malzemesi Isıl İletkenliğinin Sıcaklığa Etkisi 49
6.3.1.2 Toprak Yüzeyi Sıcaklığının Kablo Sıcaklığına Etkisi 51
6.3.1.3 Kabloların Gömülme Derinliğinin Sıcaklığa Etkisi 52

6.3.1.4 Konvektif Isı Transfer Katsayısının Değişiminin Sıcaklığa Etkisi ... 53
6.3.1.5 Toprağın Isıl İletkenliğinin Sıcaklığa Etkisi ... 54
6.3.1.6 Boru Çapının Sıcaklığa Etkisi ... 55
6.3.1.7 Boru Kalınlığının Sıcaklığa Etkisi ... 56
6.3.2 Akım Taşıma Kapasitesi Analizleri ... 57
6.3.2.1 Yatak Malzemesinin Isıl İletkenliğinin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi ... 57
6.3.2.2 Toprak Yüzeyinin Sıcaklığının Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi ... 57
6.3.2.3 Kabloların Gömülme Derinliğinin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi ... 58
6.3.2.4 Konvektif Isı Transfer Katsayısının Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi ... 59
6.3.2.5 Toprağın Isıl İletkenliğinin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi ... 59
6.3.2.6 Boru Çapının Değişiminin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi ... 60
6.3.2.7 Boru Kalınlığının Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi ... 61
6.4 Ekranlamanın Kablo Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri ... 62
6.4.1 Sıcaklık Analizleri ... 62
6.4.2 Akım Taşıma Kapasitesi Analizleri ... 67
6.5 IEC-60287 Standardında Verilen Analitik Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Ampasite Analizlerinin Karşılaştırılması ... 71

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER ... 76

KAYNAKLAR ... 80

ÖZGEÇMİŞ ... 84

SİMGE LİSTESİ

C	Birim uzunluk başına düşen kapasite (F/m)
D_0	Borunun dış çapı (mm)
$D_0^{''}$	Kablo zırhının dış çapı (mm)
D_d	Borunun iç çapı (mm)
D_e	Kablonun dış çapı (mm)
D_e^*	Kablonun dış çapı (m)
D_i	İzolasyonun dış çapı (mm)
H	Güneş ışınım yoğunluğu
I	Akım taşıma kapasitesi (ampasite) (A)
K_{ij}	Genel iletkenlik matrisi
L	Kablo ekseninin toprak yüzeyine olan uzaklığı (mm)
L_G	Kanal merkezinin toprak yüzeyi ile arasındaki mesafe (mm)
N	Kanal üzerindeki yüklü kabloların sayısı
NP	Toplam bilinmeyen sayısı
Q	Hacimsel ısı üretimi (W/m^3)
R	İletekenin maksimum işletme sıcaklığındaki alternatif akım direnci (Ω/m)
$R^{'}$	İletkenin maksimum işletme sıcaklığındaki DC direnci (Ω/m)
R_0	İletkenin 20 °C'deki DC direnci (Ω/m)
R_s	Kılıf veya ekranın maksimum işletme sıcaklığındaki direnci (Ω/m)
T_1	İletken ile kılıf arasındaki ısıl direnç (K.m/W)
T_2	Kılıf ile zırh arasındaki ısıl direnç (K.m/W)
T_3	Kablonun dış kılıfının ısıl direnci (K.m/W)
T_4	Kablo yüzeyi ile dış ortam arasındaki ısıl direnç (K.m/W)

T_4'	Kablo yüzeyi ile boru arasındaki ısıl direnç (K.m/W)
T_4''	Borunun ısıl direnci (K.m/W)
T_4'''	Boru dışı ısıl direnç (K.m/W)
T_4^*	Güneş ışınlarının etkisinin dahil edildiği kablonun dış termal direnci (K.m/W)
U,V,Y	Döşeme koşullarına göre değişen sabitler
U_0'	Faz-toprak arası gerilimin büyüklüğü (V)
W_i	İletken kayıpları (W/m)
W_d	Dielektrik kayıpları (W/m)
$W_{iç}$	Kabloda üretilen ısı değeri (W/m)
W_k	Kılıf kayıpları (W/m)
W_z	Zırh kayıpları (W/m)
X_s	Deri etkisi için kullanılan Bessel fonksiyonu değişkeni
X_p	Yakınlık etkisi için kullanılan Bessel fonksiyonu değişkeni
X_1	Kılıfın birim uzunluk başına düşen reaktansı (Ω/m)
c	Malzemelerin hacimsel özgül ısı değeri (J/m^3)
c_p	Hacimsel ısıl kapasite (J/kg.K)
d	Kılıfın ortalama çapı (mm)
d_c	İletken çapı (mm)
f_i	Yüklenme vektörü
h	Konvektif (taşınımla) ısı transfer katsayısı ($W/m^2.K$)
k	Malzemelerin termal iletkenlikleri (W/K.m)
k_s	Deri etkisi katsayısı
k_p	Yakınlık etkisi katsayısı
n	Kablodaki yüklü iletenlerin sayısı
p	Özdirenç (Ω/m)
r_b	Kanalın eşdeğer yarıçapı (mm)
s	İletken eksenleri arasındaki uzaklık (mm)
t	Zaman (s)
t_1	İletken ile kılıf arasındaki izolasyon kalınlığı (mm)
t_2	Kablo siperinin kalınlığı (mm)
t_3	Dış kılıfın kalınlığı (mm)
tanδ	Kayıp faktörü
v	Rüzgar hızı (m/s)

w	Açısal frekans (rd/s)
x	Kanalın en kısa kenarı (mm)
y	Kanalın en uzun kenarı (mm)
y_s	Deri etkisi faktörü
y_p	Yakınlık etkisi faktörü
$\lambda_1^{'}$	Kılıfta sirkülasyon akımlarından dolayı oluşan kayıpların iletken kayıplarına oranı
$\lambda_1^{''}$	Kılıfta eddy akımlarından dolayı oluşan kayıpların iletken kayıplarına oranı
λ_1	Metal kılıfta oluşan kayıpların toplam iletken kayıplarına oranı (Kılıf kayıp faktörü)
λ_2	Metal zırhta oluşan kayıpların toplam iletken kayıplarına oranı (Zırh kayıp faktörü)
ρ	Malzemelerin ısıl direnci (K.m/W)
ρ_T	İzolasyon malzemesinin ısıl direnci (K.m/W)
ρ_e	Kanal içerisindeki toprağın termal direnci (K.m/W)
ρ_c	Kanal içerisinde kullanılan malzemelerin termal direnci (K.m/W)
θ	Maksimum işletme sıcaklığı (°C)
$\Delta\theta$	Ortam sıcaklığı üzerinde kablo ileteken sıcaklığındaki artış (K)
θ_m	Kablo ile boru arasındaki bölgenin ortalama sıcaklığı (°C)
θ_{sc}	Kablo ekranı veya kılıfının maksimum işletme sıcaklığı (°C)
θ_B	Sınır sıcaklığı (°C)
$\theta_B(s)$	Yüzey boyunca sınır sıcaklığı
δ	Ortamdaki ısının yayılabilirlik değeri (m^2/s)
α_{20}	İletken malzemesinin 20 °C'deki sıcaklık katsayısı
ε_r	Dielektrik katsayısı
σ	Kablo yüzeyinin güneş ışınımı absorpsiyon katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

AG	Alçak gerilim
EPR	Etilen-propilen kauçuk (Ethylene-Propylene Rubber)
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen (High Density Polyethylene)
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
OG	Orta gerilim
PE	Polietilen (Poly Ethylene)
PVC	Polivinilklorür (Poly Vinyl Choride)
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
XLPE	Çapraz bağlı polietilen (Cross-linked Polyethylene)
YG	Yüksek gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Bakır zırhlı ve alüminyum folyolu kablo 8
Şekil 2.2 Bakır zırhlı ve kurşun kılıflı kablo 8
Şekil 2.3 Kurşun kılıflı kablo 8
Şekil 2.4 Kablo iletkeni şekilleri; a) Tek damarlı, b) Çok telli, c) Daire dilimli 10
Şekil 3.1 Kablo sisteminin ısıl devreleri; a) Tek damarlı kablo b) Üç damarlı kablo 14
Şekil 4.1 Isı transfer hesaplamaları için akış diyagramı 23
Şekil 4.2 Sonlu eleman ağ örgüsünde elemanlar, düğümler ve kenarlar 24
Şekil 4.3 Üçgen eleman 30
Şekil 4.4 Üçgen elemanın alan koordinatı 32
Şekil 5.1 Kullanılabilecek sınır koşulları; a) Elektrik alan, b) Manyetik alan. 36
Şekil 5.2 Koordinat sistemi seçenekleri 37
Şekil 5.3 Isı transfer modeli için çalışma domenleri 37
Şekil 5.4 Isıl modelin oluşturulması 38
Şekil 5.5 Geometrik çizim yüklemek için kullanılabilecek dosya türleri 38
Şekil 5.6 Üç kablonun geometrik çizimi 39
Şekil 5.7 Malzeme özellikleri 39
Şekil 5.8 Isıl analizde kullanılan sınır koşulları 41
Şekil 5.9 Modelin ağ örgüye ayrılması 41
Şekil 5.10 Kablo sisteminin iki boyutlu sıcaklık dağılımı 42
Şekil 5.11 Kablo sisteminin üç boyutlu sıcaklık dağılımı 42
Şekil 6.1 380 kV'luk yüksek gerilim yer altı kablosunun kesiti 44
Şekil 6.2 Kabloların direkt döşenmesi 45
Şekil 6.3 Kabloların boru içerisine alınarak döşenmesi 45
Şekil 6.4 Ekran tipleri; a) Yatay, b) Ters-U , c) Kapalı 45
Şekil 6.5 Elde edilen ağ örgüleri; a) Ekransız durum , b) Ekranlı durum 47
Şekil 6.6 Kabloların sıcaklık dağılımı 49
Şekil 6.7 Yatak malzemesinin ısıl iletkenliğinin kablo iletken sıcaklığı üzerindeki etkisi 50
Şekil 6.8 Üç kablonun x ekseni referans alınarak farklı yatak malzemesi ısıl iletkenlikleri için elde edilen sıcaklık dağılımları 50
Şekil 6.9 Kablo iletken sıcaklığının toprak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişimi 51
Şekil 6.10 Üç kablodan x ekseni referans alınarak farklı toprak yüzey sıcaklıkları için elde edilen sıcaklık dağılımları 51
Şekil 6.11 Kablo ampasitesinin gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi 52

Şekil 6.12 Üç kablonun x ekseni referans alınarak farklı döşeme derinlikleri için elde edilen sıcaklık dağılımları 53
Şekil 6.13 Konvektif ısı transfer katsayısının sıcaklığa etkisi 53
Şekil 6.14 Toprağın ısıl iletkenlik değerinin değişiminin sıcaklığa etkisi 54
Şekil 6.15 Toprağın ısıl iletkenliğinin kablo sisteminin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi 55
Şekil 6.16 Boru çapının kablo iletken sıcaklığına etkisi 56
Şekil 6.17 Boru et kalınlığının kablo iletken sıcaklığına etkisi 56
Şekil 6.18 Yatak malzemesi ısıl iletkenliğinin kablo ampasitesi üzerindeki etkisi 57
Şekil 6.19 Kablo ampasitesinin toprak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişimi 58
Şekil 6.20 Kablo ampasitesinin gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi 58
Şekil 6.21 Konvektif ısı transfer katsayısının ampasiteye etkisi 59
Şekil 6.22 Toprağın ısıl iletkenlik değerinin ampasiteye etkisi 60
Şekil 6.23 Boru çapının ampasite üzerindeki etkisi 61
Şekil 6.24 Boru et kalınlığının ampasite üzerindeki etkisi 61
Şekil 6.25 Kabloların direkt ve boru içerisine alınarak döşenmesinin karşılaştırılması 63
Şekil 6.26 Yatay ekran malzemelerinin sıcaklık üzerindeki etkileri 64
Şekil 6.27 Farklı tiplerdeki bakır ekranların sıcaklık üzerindeki etkileri 65
Şekil 6.28 Direkt ve borulu kablo döşeme durumlarında Al ters-U ekranlamanın sıcaklık üzerindeki etkisi 66
Şekil 6.29 Yatay ekran malzemesinin ampasite üzerindeki etkisi 68
Şekil 6.30 Farklı bakır ekran tiplerinin ampasite üzerindeki etkileri 69
Şekil 6.31 Ekran ile kablolar arasındaki açıklığın ampasiteye etkisi 69
Şekil 6.32 Direkt ve borulu döşeme düzenlerinde Al ters-U ekranın ampasite üzerindeki etkisi 71
Şekil 6.33 Kablolar arası açıklığa bağlı olarak ampasitedeki değişim 73
Şekil 6.34 Dış termal direncin yatak malzemesi ısıl iletkenliğine ve kablolar arası açıklığa bağlı değişimi 73
Şekil 6.35 Farklı yatak malzemeleri için kablolar arası açıklığa bağlı ampasite değişimi 74
Şekil 6.36 Yatak malzemesi termal direncinin ampasite üzerindeki etkisi 74

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Malzemelerin fiziksel özellikleri……9
Çizelge 2.2 İzolasyon malzemelerinin özellikleri……..11
Çizelge 3.1 *U,V* ve *Y* sabitlerinin değerleri……21
Çizelge 6.1 Kablo malzemelerinin ısıl ve geometrik özellikleri…….44
Çizelge 6.2 Ekran malzemelerinin özellikleri……46
Çizelge 6.3 Ekran kalınlığının sıcaklığa etkisi……64
Çizelge 6.4 Ekranlama açısından kablo döşeme şeklinin sıcaklığa etkisi……65
Çizelge 6.5 Farklı ekran malzemelerinin sıcaklık üzerindeki etkileri……67
Çizelge 6.6 Farklı ekran malzemelerinin ampasite üzerindeki etkisi……68
Çizelge 6.7 Ekran kalınlığının ampasite üzerindeki etkisi……70
Çizelge 6.8 Döşeme koşullarının ampasite üzerindeki etkisi……71
Çizelge 6.9 Isıl direnci 0.7 K.m/W olan yatak malzemesi için hesaplanan ampasite değerleri……75
Çizelge 6.10 İki yöntemle hesaplanan ampasite değerleri……75

ÖZET

YÜKSEK GERİLİM YER ALTI KABLOLARININ ISIL ANALİZİ

Barış KÜÇÜKAYDIN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Yüksek gerilim yer altı kablolarının akım taşıma kapasiteleri ısıl analizleri gerçekleştirilerek hesaplanmaktadır. Isıl analizlerde kablo yalıtkanı için izin verilen en yüksek sıcaklık değerinde taşınan akımın değeri belirlenmektedir. İşletme şartları bakımından havai hatlara nazaran farklı etkenlerin göz önünde bulundurulması gereken yer altı kablolarını ısıl açıdan etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, yüksek gerilim yer altı kablolarının farklı ortam koşulları ve farklı döşeme koşulları için sonlu elemanlar yöntemi ile ısıl analizleri gerçekleştirilmiş ve akım taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır.

Birinci bölümde, yer altı kablolarında kullanılan izolasyon malzemelerinin teknolojisinin geliştirilmesinden bahsedilip, bu malzemelerin ısıl özelliklerinin kabloların akım taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Literatürde, yer altı kablolarının çeşitli sayısal ve deneysel yöntemlerle gerçekleştirilen ısıl analizlerine ve akım taşıma kapasitesi hesaplamalarına örnekler verilerek, kabloların ısıl dağılımını etkileyen önemli parametrelere değinilmiştir.

İkinci bölümde, yer altı kablolarını oluşturan temel katmanlar anlatılmıştır. Bu tabakaların hangi malzemelerden üretildiği ve temel görevleri verilip, bazı kablo yapıları örneklendirilmiştir. Sıklıkla kullanılan izolasyon malzemelerinin elektriksel ve ısıl özellikleri ile birbirlerine göre avantajları sıralanmıştır.

Üçüncü bölümde, IEC-60287 standardı referans alınarak deri etkisi ve yakınlık etkisi faktörleri kullanılarak AC direnç hesabı verilmiştir. Yer altı kablo sisteminin ısıl devresini oluşturan farklı tabakalar arasındaki ısıl dirençlerin hesaplanması için kullanılan formülasyon tanıtılmıştır. Dielektrik ile ekran ve kılıf kayıplarını etkileyen parametreler verilip, akım taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan ifade anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılan sayısal yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi ile model oluştururken gerçekleştirilen adımlar anlatılıp, ısı transfer denklemleri ve sonlu üçgen elemanlar için kullanılan eşitlikler verilmiştir.

Beşinci bölümde, Comsol Multiphysics programının kullanım alanlarından AC/DC modülü kısaca tanıtılmış ve ısı transferi modülü detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Programda model oluşturulurken izlenecek adımlar görsel öğeler kullanılarak verilip, tanımlanabilecek sınır koşulları detaylı olarak sunulmuştur.

Altıncı bölümde, sayısal uygulama için kullanılan 380 kV'luk XLPE yalıtkanlı kablo, borulu ve borusuz durumdaki döşenme geometrisi ve analizleri yapılan farklı ekran tipleri ile malzemeleri tanıtılmıştır. Modelde kullanılan sınır koşulu türleri, büyüklükleri ve tanımlandıkları bölgeler açıklanmıştır. İncelenen yüksek gerilim yer altı kablo sisteminin yatak malzemesinin ısıl iletkenliği, toprak yüzeyi sıcaklığı, kabloların gömülme derinliği, konvektif ısı transfer katsayısı, toprağın ısıl iletkenliği, boru çapı ve boru et kalınlığı gibi parametrelerin farklı değer aralıkları için ısıl analizleri gerçekleştirilip, 90 °C (363.15 K)'de iletkendeki hacimsel ısı üretimine bağlı olarak akım taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Borulu ve borusuz döşeme koşulları için bakır, alüminyum ve yapı çeliğinden yapılan yatay, ters-U ve kapalı ekran tiplerinin kablo sıcaklığı üzerindeki etkileri farklı ekran kalınlıkları ve farklı ekran kablo arası uzaklıkları için belirlenmiş ve akım taşıma kapasitesi değerleri bu koşullara göre yeniden hesaplanmıştır. IEC-60287 standardı ve sonlu elemanlar yöntemi ile farklı kablolar arası açıklık ve farklı yatak malzemesi ısıl iletkenlik değerleri için akım taşıma kapasitesi analizleri, dielektrik ve kılıf kayıpları da dikkate alınarak gerçekleştirilmiş ve yatak malzemesi kullanıldığında iki yöntem arasında önemli farkların oluşabileceği ortaya konulmuştur.

Sonuç bölümünde, yüksek gerilim yer altı kablo sistemi için incelenen döşeme koşulları ve ortam parametreleri değerlendirilip, analizlerden elde edilen sonuçlar verilerek, yer altı kablolarının ısıl analizleri ile ilgili öneriler getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer altı kabloları, sıcaklık, ampasite, ekranlama, IEC-60287 standardı.

ABSTRACT

THERMAL ANALYSES OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLES

Barış KÜÇÜKAYDIN

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Current carrying capacities of high voltage underground cables are calculated by performing thermal analyses. In thermal analyses, carried current value at the highest allowed temperature for the cable insulation is determined. In terms of operating conditions, there are several parameters that affect to underground cables in thermally in comparison to overhead lines must be considered. In this thesis, the thermal analyses of high voltage underground cables are realized by finite element method and current carrying capacities are calculated for different ambient conditions and installation formats.

In the first chapter, the development of technologies of the insulating materials that are utilized in underground cables is mentioned and then the effects of the thermal properties of materials on ampacity are underlined. In literature, the examples are given for the thermal analyses and current carrying capacity calculations that are achieved with using experimental and numerical methods and the parameters that influence to the temperature distribution of cables are specified.

In the second chapter, the layers that are composed of underground cables are presented. The materials that this layers are produced and their basic functions and some cable structures are exemplified. Electrical and thermal properties of the

commonly used insulating materials and the advantages relative to one another are enumerated.

In the third chapter, the calculation of AC resistance by using skin effect factor and proximity effect factor is given with taking as a reference the standard of IEC-60287. The used formulation to calculate the thermal resistances between different layers composing the thermal circuit of underground cable system is introduced. The parameters affecting the screen and sheath with dielectric losses is given and expression is described that is used in determining the current carrying capacity.

In the fourth chapter, the applied modeling steps with finite element method is the numerical method that is utilized in this thesis are presented. Heat transfer equations and the equations for finite triangle elements are given.

In the fifth chapter, AC/DC module that is one of the usage areas of Comsol Multiphysics programme is identified briefly and heat transfer module is explained in detail. The followed steps while modeling in programme are given with using visual elements and the boundary conditions are presented in detail.

In the sixh chapter, 380 kV XLPE insulated cable used for numerical application, the geometry of cable laying in the cases of with pipe and pipeless laying conditions and different screen types and materials in used for analyses are presented. Types of boundary conditions, their values and the boundary condition regions on system area are explained. Thermal analyses are performed for different ranges of parameters as the thermal conductivity of bedding material, the temperature of ground surface, the burial depth of cables, the convective heat transfer coefficient, soil thermal conductivity, pipe diameter and pipe wall thickness, later current carrying capacity is calculated according to the volumetric heat generation in the conductor. The effects of the types of screens as horizontal, reverse-U and closed that are made of copper, aluminum and structural steel on cable temperature are determined for different screen thicknesses and different distances between cable and screen in the cases of direct-buried and with pipe. And current carrying capacity values are calculated again in accordance with such conditions. Ampacity analyses are performed with IEC-60287 standard and finite element method for different clearances between cables and different thermal conductivity values of bedding material. In the case of using bedding material, significant differences that can be occurred between the two methods is observed.

In the results chapter, analyzed laying conditions and ambient parameters for high voltage underground cable system are evaluated and the obtained results are given with offering suggestions.

Keywords: Underground cables, temperature, ampacity, screening, IEC-60287 standard.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde hayatın her alanında önemli bir gereksinim haline gelen elektrik enerjisine yönelik talep her geçen yıl önemli bir artış göstermektedir. Ülkemizde ve dünyada bu talebin karşılanabilmesi için önemli enerji yatırımları planlanmakta ve alternatif enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmesine yönelik büyük projeler geliştirilmektedir. Elektrik enerjisi üretim kapasitesinin arttırılmasının yanı sıra mevcut güç sistemlerinde kayıpların ve arızaların azaltılması da enerjinin verimli kullanılması açısından önemlidir. Özellikle arızaların önlenmesi bakımından sistemin iyi analiz edilip, tasarlanması ve tüketiciye ulaştırılabilecek maksimum gücün doğru tespit edilebilmesi önem arz etmektedir.

Güç sistemlerinde enerji iletimi ve dağıtımı amacıyla kullanılan, yapıları ve kullanıldıkları ortam şartları açısından analiz çalışmalarına ihtiyaç duyulan yer altı güç kablolarının kullanımı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Kablo teknolojisinin geliştirilmeye başlanması 1830'lu yıllara dayanmaktadır. Bu tarihten 50 yıl sonra ilk yer altı kablosu Berlin'de döşenmiştir. Bu zaman diliminde kablo iletkeninin ürettiği yüksek ısıya ve kuvvetli elektrik alana dayanabilecek dielektrik malzemeler araştırılmıştır. Bu malzeme 1880 yılında Ferranti tarafından kağıt şeritlerin üst üste birleştirilmesiyle çok tabakalı olarak gerçekleştirilmiştir [1]. 1917 yılında Emanueli, kağıt dielektrik malzemeyi sabit basınçta düşük viskoziteye sahip izolasyon yağında emprenye ederek teknolojiyi geliştirmiştir. Bu sayede, yer altı kabloları ilk kez 100 kV ve üzeri gerilimlerde

kullanılabilmişlerdir. Bir diğer önemli adım daha yüksek işletim sıcaklıklarına çıkmaya imkan tanıyan XLPE dielektrik malzemenin geliştirilmesi olmuştur.

Yüksek gerilim yer altı güç kablolarında en çok kullanılan izolasyon malzemesi XLPE' dir. Dielektrik özelliklerinin yanı sıra yüksek işletme sıcaklıklarına elverişli olmaları tercih edilmelerinde en önemli etkendir. Kablo iletkeninde taşınan akımın büyüklüğüne bağlı olarak bir ısı ortaya çıkmaktadır. Oluşan ısı kablo iletkeninden itibaren kablo katmanları, yatak malzemesi ve toprak üzerinden dış ortama ulaşmaktadır. Kablo iletkeni ve yalıtkanında oluşan ısınma miktarını ve sıcaklığı, kablo malzemelerinin ve döşendiği ortamın ısıl özellikleri belirlemektedir. Yalıtkanın elektriksel izolasyon özelliğini kaybetmemesi için kablonun ve ortamın ısıl parametreleri göz önünde bulundurularak yalıtkan için izin verilen en yüksek sıcaklığın üzerine çıkılmaması gerekmektedir. Yer altı kablosunun izin verilen sıcaklığın üzerinde uzun süre işletilmesi halinde kablonun ömrü kısalmakta ve aşırı ısınmadan dolayı oluşan yalıtım bozulması sebebiyle faz-toprak kısa devre arızaları oluşabilmektedir. Bu nedenle, ömür kısalmasını önlemek ve arızaların önüne geçmek amacıyla döşenme koşullarına ve tiplerine bağlı olarak kabloların taşıyabilecekleri maksimum akım değeri olan akım taşıma kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Yer altı kablolarının akım taşıma kapasiteleri belirlenirken çeşitli analitik ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. IEC-60287 standardı göz önüne alınarak kablo iletkeni ile toprak yüzeyi arasındaki malzemelerin ısıl dirençleri tespit edilip, iletken ile dış ortam arasındaki sıcaklık farkından, kablonun akım taşıma kapasitesi hesaplanabilmektedir [2,3]. Bu dirençler; iletken ile kılıf arasındaki ısıl direnç, kılıf ile zırh arasındaki ısıl direnç, dış kılıfın ısıl direnci ve dış termal dirençtir. Sonlu elemanlar yöntemi ise yer altı güç kablosu problemlerinin çözümünde en çok tercih edilen ve en kolay uygulanabilir sayısal yöntemdir. Bunun haricinde sonlu farklar, sonlu hacimler ve sınır elemanları yöntemleri de diğer sayısal metotlardır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi Comsol Multiphysics programı kullanılarak uygulanmıştır.

Yer altı güç kablolarının akım taşıma kapasitelerini etkileyen birçok önemli faktör bulunmaktadır. Ortam sıcaklığı, toprağın ısıl direnci, yatak malzemesinin ısıl direnci, kabloların döşenme derinliği, kablo adedi ve kabloların yerleştirilme biçimi ısıl açıdan

en önemli parametrelerdir [4,5]. Literatürde, yer altı kablo sistemlerinin ısıl analizlerinin yapıldığı [6-8] ve ısıl etkenlere bağlı olarak değişen sıcaklık değerleri için akım taşıma kapasitelerinin hesaplandığı birçok çalışma mevcuttur [9-11].

Güç kablolarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde, sabit bir sayısal değer ifade eden Dirichlet sınır koşullarının ve türeve bağlı bir sınır tanımlayan Neumann sınır koşullarının kablodan en uygun mesafede seçilmesi gerekmektedir. XLPE ve PE yalıtkana sahip 35 kV'luk güç kablolarının deneysel ve sayısal olarak analiz edildiği çalışmada, çözüm bölgesinde en doğru sıcaklık dağılımının ancak bu şekilde elde edilebileceği görülmüştür [12]. Ayrıca, incelenen alanın daha fazla elemana ayrılması, alınacak sıcaklık ve akım taşıma kapasitesi verilerinin doğruluğunu arttırmaktadır [13].

Kabloların döşenme biçimlerinin ısıl etkisinin analiz edildiği çalışmada, Hwang ve arkadaşları yer altı kablolarının direkt olarak toprağa döşenmesi ve PVC boru içerisine alınması durumlarının kablo sıcaklığı üzerindeki etkilerinin önemli oranda farklılık gösterdiğini belirlemiştir [14]. Buna göre, kablolar boru kullanılmadan direkt olarak toprağa döşendiğinde 17.7 °C daha az ısınmaktadır. Bir diğer çalışmada, kabloların bulunduğu PVC borunun çapı arttıkça, kabloların daha az ısındığı ve akım taşıma kapasitesinin yükseldiği görülmüştür [15]. Farklı kablolar üzerinde yapılan hesaplamalar neticesinde boru içerisine tesis edilecek yüksek gerilim kablolarının akım taşıma kapasitesi için 0.9 gibi bir indirgeme faktörü önerilmektedir [16]. Brakelmann ve Anders, içi hava dolu olan borunun uçlarının toprak yüzeyine paralel bir şekilde açılmasıyla, ortamda bulunan havayla etkileşim sayesinde kablo ampasitesinde önemli bir artışın sağlanabileceği sonucuna varmıştır [17]. [18]'de kabloların döşendiği tava içerisindeki konumları ve kablo tavasının üstünün kapalı ve açık olması durumlarında değişen ampasite değerleri için indirgeme faktörleri belirlenmiştir.

Yer altı kablolarının adedi, döşenme biçimi ve döşenme derinliği de ısıl açıdan diğer önemli parametrelerdir. Kabloların akım taşıma kapasitelerinin analiz edildiği çalışmada, döşeme derinliği ve toprağın ısıl direnci arttıkça ampasitenin azaldığı belirlenmiştir [19]. Desmet ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yer altı kabloları 420 A ile yüklü iken en yüksek sıcaklık 45 °C ile üç kablolu sistemde oluşurken, en düşük sıcaklık 31 °C ile tek kablolu durumda oluşmaktadır [20]. 110 kV'luk, XLPE yalıtkanlı güç

kablosunun analiz edildiği çalışmada, üç fazlı kablo sisteminde kablolar yan yana dizildiğinde en yüksek iletken sıcaklığı 45.3 °C iken, yonca şeklinde bir dizilim yapıldığında en yüksek sıcaklığın 44 °C olduğu görülmüştür [21].

IEEE ve IEC standartlarında belirtilen yer altı kablolarının dış termal direncini hesaplamak için kullanılan ifadeler sadece belirli döşeme geometrilerinde uygulanabilirdir. Ancak akım taşıma kapasitesini en çok etkileyen ısıl direnç dış termal dirençtir. Dış termal direnç, çeşitli kablo dizayn ve ortam parametrelerine bağlı olarak değişim göstermektedir [22]. Farklı boyutlara ve ısıl iletkenliklere sahip yatak malzemesi ve dolgu malzemesi kullanılması dış termal direnci etkileyen başlıca unsurlardır [23]. Isıl iletkenliği yüksek termal dolgu malzemeleri kullanılarak termal direnç değeri düşürülüp, ampasitede önemli bir artış sağlanabilmektedir [24,25]. Çok tabakalı dolgu malzemlerinin dış termal direnç üzerindeki etkisinin, sayısal yöntemlerle ve deneysel olarak incelendiği çeşitli çalışmalar yapılmıştır [26-28]. Sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılan benzer çalışmalarda, çok tabakalı homojen olmayan toprağa ve içerisinde hava bulunan kanala döşenmiş yer altı kablolarının dış ısıl dirençlerinin hesaplanabilmesi için analitik çözümler geliştirilmiştir [29,30]. El-Kady ve Horrocks, kablo kanalının geometrik faktör aralığını Neher-McGrath'in belirlediği kullanım aralığından genişleterek dış termal direncin daha doğru saptanabilmesi için alternatif bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [31]. Kablo sisteminin ısıl direnç değerlerinin incelendiği çalışmada, IEC-60287 standardında ve Neher-McGrath'in yaptığı çalışmada üç damarlı kablolarda iç termal direncin hesaplandığı ifade [32], kağıt izolasyonlu kablolar için geliştirilmiş ve kablo dolgu malzemesi ısıl direncinin ampasite üzerinde etkili olduğu ortaya konulmuştur [33].

Yer altı kabloları ile birlikte kullanılan ekipmanlar da kablo sisteminin ısıl alanına ve akım taşıma kapasitesine etki etmektedir. Kablonun ürettiği manyetik alanın dış ortama ulaşmasını engellemek için kullanılan ekranların ısıl alan üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Pino Lopez ve arkadaşının çalışmasında, 12 mm kalınlığında bakır ekran kullanılarak akım taşıma kapasitesinin %4'e kadar arttırılabileceği sonucuna varılmıştır [34]. Diğer bir araştırmada, yüksek manyetik kuplajlı pasif devre (HMCPL) ekranın transient ve kararlı durumda ısıl karakteristiği analiz edilmiştir [35].

Li, dağıtılmış sıcaklık algılama sistemini (DTS) kullanarak, kablo yüzey sıcaklığından kablo iletken sıcaklığının ve akım taşıma kapasitesinin belirlenebildiği bir yöntem geliştirmiştir [36,37]. Güç kabloları kısa mesafeler için de olsa ısıl açıdan elverişsiz bölgelerden geçtikleri takdirde, akım taşıma kapasiteleri için indirgeme faktörleri belirlenmelidir [38]. Kablonun ısıl devresini etkileyen parametrelerle ilgili bir belirsizlik varsa mevsimsel ve bölgesel koşullar dikkate alınarak toprağın ısıl direnci ve ortam sıcaklığı gibi ısıl parametrelerin farklı değerlerinin gerçekleşme olasılığı kullanılarak analizler gerçekleştirilebilmektedir [39].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, 380 kV'luk gerilim seviyesinde kullanılan XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim yer altı güç kablolarının ısıl analizlerinin ve akım taşıma kapasitesi analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Yer altı kablolarının ısıl dağılımı ve akım taşıma kapasitesi, döşenme biçimi, bulunduğu ortam koşulları ve sistem içerisinde kullanılan yardımcı malzemelere bağlı olarak değişim göstermektedir. Oluşabilecek arızaların ve ömür kısalmalarının önüne geçebilmek için, bu durumların uygun şekilde analiz edilip optimum çalışma koşullarında işletilmeleri gerekmektedir. Gerçekleştirilen çalışma ile sayısal ve analitik yaklaşımlar kullanılarak, kabloların ısıl dağılımına ve ampasitesine etki eden parametreler incelenerek farklı çalışma koşullarındaki davranışları ortaya konulacaktır.

1.3 Hipotez

Yer altı kabloları ile elektrik enerjisinin taşınması esnasında meydana gelen kayıplar nedeniyle ısı oluşmaktadır. Kullanılan yalıtkan malzeme yapısına bağlı olarak, oluşan ısınmanın belli sınırlar dahilinde kalması istenmektedir. XLPE yalıtkan malzemesi için bu değer 90 °C olarak belirlenmiştir. Isınmanın bu değerin üzerine çıkması yalıtkan malzeme yapısının bozulmasına, arızalara ve ömür kısalmalarına neden olmaktadır.

Bu nedenle, yer altı kablolarının verimli olarak kullanımı ile elektrik enerjisi iletiminin sürekli ve güvenilir biçimde devamının sağlanması için çalışma koşullarına bağlı olarak kablo sistemlerinin ısıl ve akım taşıma kapasitesi analizlerinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç vardır.

Yer altı kablolarında meydana gelen ısınma çeşitli elektriksel ve termal faktörlere bağlıdır. Oluşan ısı sistemin özelliklerine bağlı olarak dış ortama yayılmaktadır. Bu yayılım, sistemin ısıl direnci değiştiği için kabloların yapısına, döşenme koşullarına, kullanılan malzemelere ve ortam şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Isının dağılımı yer altı kablolarının sıcaklığını ve dolayısıyla taşıyabileceği akım kapasitesini belirlemektedir.

Yer altı kabloları için gerçekleştirilen ısıl analizlerde sayısal ve analitik yöntemler kullanılmaktadır. Analitik yöntemler ilgili standartlarda tanımlanmıştır. Kullanılan sayısal yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemidir. Döşeme koşullarına bağlı olarak bu yöntemlerle hesaplanan değerler arasında farklılıklar oluşmaktadır.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Comsol Multiphysics yazılımı kullanılarak çeşitli koşullardaki yer altı kablo sistemi yapıları için ısıl analizler gerçekleştirilmiştir. Isıl analizler sonucu kablonun optimum yüklenme koşullarındaki akım taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Ayrıca, analitik yöntem ile sayısal yöntem arasıdna oluşan farklılıkların belirlenmesi için farklı durumlarda karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

Tez çalışmasının sonucunda, incelenen çalışma şartları için sistemin optimum yüklenme durumları ortaya konulmuştur.

BÖLÜM 2

YÜKSEK GERİLİM YER ALTI KABLOLARI

Yer altı kabloları alçak gerilim (A.G.), orta gerilim (O.G.) ve yüksek gerilim (Y.G.) güç sistemlerinde elektrik enerjisinin taşınması amacıyla kullanılan başlıca yapılardandır. Günümüzde, özellikle yerleşim yerlerinde güvenlik ve estetik açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde Y.G. seviyesinde kullanılan XLPE yalıtkanlı güç kablolarının özellikleri kısaca tanıtılmaktadır.

2.1 Kablo Yapısı

Yer altı kablolarının yapıları gelişen kablo teknolojisi ile birlikte oldukça farklılaşmıştır. Kağıt izolasyona sahip ilk hat, tek fazlı ve 10 kV işletme gerilimine sahip olarak Deptford ve Londra arasında 1890 yılında Ferranti tarafından döşenmiştir. Akabinde, reçinede doygun hale getirilmiş ince kağıt şeritlere ve günümüzde kullanılanlara benzer bir kurşun kılıfa sahip kablolar Amerika'da Norwich Wire Company tarafından üretilmiştir. 1925 yılında, reçine bazlı bileşiğin yerini saf mineral yağ almıştır ve 1983 yılında yağın yerine polibütilen kullanılmaya başlanmıştır. 1970'li yıllarda kullanımı oldukça yaygınlaşan termoplastik polietilen (PE), yüksek frekanslı kablo izolasyonu için 2. Dünya Savaşı döneminde geliştirilmiştir. 1947 itibariyle PE, 15 kV'luk kablolarda izolasyon malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Dolgulu yapıda olan XLPE için ilk patent başvurusu 1959 yılında ve dolgusuz için 1963 yılında yapılmıştır. EPR izolasyon malzemesi de aynı dönemde üretilmiştir [40].

Yüksek gerilim yer altı kablolarının temel katmanları iletken, izolasyon malzemesi, yarı iletken tabaka, ekran, zırh ve dış kılıftan oluşmaktadır. Günümüzde yaygın olarak Cu

veya Al iletkenli yüksek gerilim kablolarında temel yalıtkan malzeme olarak XLPE (çapraz bağlı polietilen) kullanılmaktadır. Kablo ekranı alüminyum, bakır ve kurşundan, kablo zırhı bronz, pirinç, bakır ve alüminyum gibi manyetik olmayan malzemelerden ve kablo dış kılıfı PVC veya HDPE malzemelerden üretilmektedir.

Aşağıdaki şekillerde enerji iletiminde yaygın olarak kullanılan güç kablolarının kesit görünümleri verilmiştir. Şekil 2.1'de bakır zırhlı ve alüminyum folyolu kablo, Şekil 2.2'de bakır zırhlı ve kurşun kılıflı kablo ve Şekil 2.3'te ise sadece kurşun kılıf kullanılan kablo görülmektedir.



Şekil 2.1 Bakır zırhlı ve alüminyum folyolu kablo



Şekil 2.2 Bakır zırhlı ve kurşun kılıflı kablo



Şekil 2.3 Kurşun kılıflı kablo

2.2 İletken

Temel görevleri elektrik akımını taşımak olan iletkenler genellikle bakır veya alüminyumdan üretilmektedirler [1]. İletkenin malzemesine, boyutuna ve dizaynına karar verilirken dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekildedir:

- Akım taşıma kapasitesi,
- Gerilim dayanımı,
- Gerilim regülasyonu,
- İletken kayıpları,
- Kıvrılma yarıçapı ve esneklik,
- Maliyet,
- Mekanik özellikleri.

Kabloda kullanılan iletkenin kesit alanı üzerinden geçen akımın büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Aynı akım büyüklüğünde daha küçük kesite sahip bakır iletken kullanılarak alüminyuma göre daha yüksek gerilme dayanımı ve daha düşük elektriksel direnç sağlanabilir. Alüminyumun yoğunluğu ise bakıra göre daha düşüktür. Aynı akım taşıma kapasitesi büyüklüğünde alüminyum kablonun bakır kabloya göre ağırlığı yaklaşık üçte biridir. Bu nedenle çok uzun kabloların taşınmasında lojistik açısından alüminyum iletkenli kablolar, bakır iletkenli kablolara nazaran daha avantajlıdır. Çizelge 2.1'de bakır ve alüminyum malzemelerin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme / **Özellikler**	Bakır	Alüminyum
20 °C'deki özgül direnç değeri (ρ) (Ω.m)	$1{,}724 \times 10^{-8}$	$2{,}826 \times 10^{-8}$
20 °C'deki sıcaklık katsayısı (α_{20})	$3{,}93 \times 10^{-3}$	$4{,}03 \times 10^{-3}$
Elektriksel iletkenlik (S/m)	$5{,}998 \times 10^{7}$	$3{,}774 \times 10^{7}$
Yoğunluk (kg/m^3)	8700	2700

Büyük kesitli iletkene sahip kablolarda akım taşıma kapasitesini düşüren ek manyetik kayıplar meydana gelmektedir. Kabloda çevresindeki diğer kabloların oluşturduğu manyetik alan nedeniyle yakınlık etkisi faktörü (proximity effect factor) ortaya çıkar ve akım iletkenin sadece belli bir bölümü üzerinden taşınır. Çok telli iletken yapısında, her bir tel tek başına veya grup olarak izole edilirse yakınlık etkisi faktörü azaltılabilir. Diğer bir manyetik etken olan deri etkisi faktörü (skin effect factor) ise bu yöntemle değiştirilemez.

Deri etkisi nedeniyle iletkenlerin merkezinde akım yoğunluğu azalır ve dolayısıyla akım taşınması için kullanılmaz. H. Miliken tarafından deri etkisini azaltmak için tasarlanan daire dilimli iletken yapısı genellikle 5-6 dilimden oluşmaktadır [41]. Şekil 2.4'te kullanılan farklı kablo iletkeni şekilleri gösterilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 2.4 Kablo iletkeni şekilleri; a) Tek damarlı, b) Çok telli, c) Daire dilimli

2.3 İzolasyon Malzemeleri

Yer altı kablolarının en önemli bileşenlerinden biri de temel izolasyon tabakasıdır. İzolasyon malzemesi, iletken ile kablo ekranı arasında elektriksel bir bağlantı oluşmasını engellemek ve düzgün bir elektrik alan dağılımının oluşmasını sağlamak için kullanılır. Bu nedenle, bu tabakada kullanılacak malzeme kararlı durumda ve geçici hal koşullarında kablonun oluşturduğu elektrik alana dayanıklı olmalıdır.

Geçmişte izolasyon malzemeleri sıvı emprenye edilmiş kağıt izolasyon iken son yıllarda bu malzeme çevresel nedenlerle daha az kullanılmaya başlanmıştır ve haddelenmiş polimerler daha çok tercih edilmektedir [41]. Günümüzde yüksek gerilim kablolarında en çok kullanılan polimer XLPE'dir. XLPE izolasyonun kararlı durum işletme sıcaklığı 90 °C iken kağıt izolasyonun 60 °C'dir. İşletme sıcaklığı aynı iletkende daha fazla güç

iletme imkanı tanıdığı için önemlidir. Çizelge 2.2'de PE, XLPE, EPR ve PVC izolasyon malzemelerinin çeşitli özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.2 İzolasyon malzemelerinin özellikleri [40]

İzolasyon malzemesi	**İşletme sıcaklığı**	**Dielektrik katsayısı(ε_r)**	**Kayıp faktörü**	**Temel özellikler**
PE (Düşük yoğunluklu polietilen)	70-80 °C	2.3	0.001	Düşük dielektrik kayıp, gerilim altında neme karşı duyarlılık
XLPE (Çarpraz bağlı polietilen)	90 °C	2.5	0.001	PE'den daha yüksek dielektrik kayıp, ömürleri PE'ye göre daha yüksek
EP (EPR/EPDM)	90 °C	3	0.005	XLPE'ye göre daha yüksek dielektrik kayıp, XLPE ve PE'ye göre daha esnek ve neme daha az duyarlı, inorganik dolgu malzemesi gerektirir
PVC	70 °C	8	0.1	Yüksek dielektrik kayıp, yanmaz ancak zehirli gazlar oluşturur

2.4 Ekran

Metal ekran/kılıfın temel görevi kabloda üretilen elektrik alanın kablo dışındaki etkisini ortadan kaldırmak, şarj akımlarına bir dönüş yolu sağlamak ve arıza akımlarını topraklamaktır. Diğer avantajları ise kablo için bir mekanik koruma sağlaması ve kablolar arasındaki yakınlık etkisini minimize etmesidir. Kullanılan metalik ekranın boyutu kısa devre akımının sıfır bileşeninin büyüklüğüne bağlıdır. Alüminyum, bakır ve kurşun gibi malzemelerden üretilirler. Yüksek gerilim kablolarının metal ekranları bakır ve alüminyum gibi malzemelerden üretilmektedir. Alüminyum folyo ile birlikte bakır tellerin kullanılması şeklinde hazırlandığı kabloalr da mevcuttur.

2.5 Yarı İletken Tabakalar

İletken ve izolasyon malzemesi ile izolasyon malzemesi ve metal ekran arasında yarı iletken tabaka kullanımının amacı silindirik bir elektrik alan oluşturmak ve iletken/ekran/metalik kılıf arasındaki boşlukların ortadan kalkmasını sağlayarak kısmi deşarjların oluşumunu önlemektir. Boşlukları ortadan kaldırabilmek için izolasyon malzemesine benzer bir malzemeden yarı iletken tabakaların kullanılması gereklidir. Yüksek iletkenliğe sahip düzeltilmiş ekstrüde polimerler XLPE izolasyonla birlikte yarı iletken tabakaların üretilmesi için kullanılmaktadır.

Kablo katmanı olarak dış kılıf veya zırh da eğer kablonun döşendiği ortam koşulları zorlayıcı ise kullanılır. Bu tabakalar da ekran ve toprak arasında bir izolasyon görevi görmektedir.

BÖLÜM 3

YER ALTI KABLOLARININ AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ VE ISIL ANALİZLERİ

Yer altı kabloları döşendikleri ortamda elektrik devresine benzer şekilde ısıl bir devre meydana getirirler. Kablo malzemelerinin ve ortamın ısıl özelliklerine bağlı olarak ısıl devre parametrelerinin belirlenmesi, akım taşıma kapasitesinin doğru saptanması bakımından önemlidir. Kablo sistemlerinin akım taşıma kapasiteleri çeşitli parametrelere bağlıdır. Bunlardan en önemlileri aşağıdaki şekilde sıralanabilir [42]:

- Birlikte döşenen kablo sayısı ve kullanılan farklı kablo tipleri,
- Kablonun yapısı ve kabloda bulunan malzemeler,
- Kabloların döşendiği ortam şartları,
- Kabloların birbirlerine ve toprak yüzeyine göre yerleşim biçimleri,
- Kabloların birbirine bağlanma şekli.

IEC-60287 standardında, yer altı kablolarının ısıl devresindeki direnç değerlerinin ve akım taşıma kapasitesinin hesaplanması için detaylı bir formülasyon sunulmaktadır. Bu bölümde, standart referans alınarak incelenen kablo sisteminin ısıl analizi ve ampasite hesabı için gerekli olan eşitlikler verilmiştir.

3.1 Akım Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması

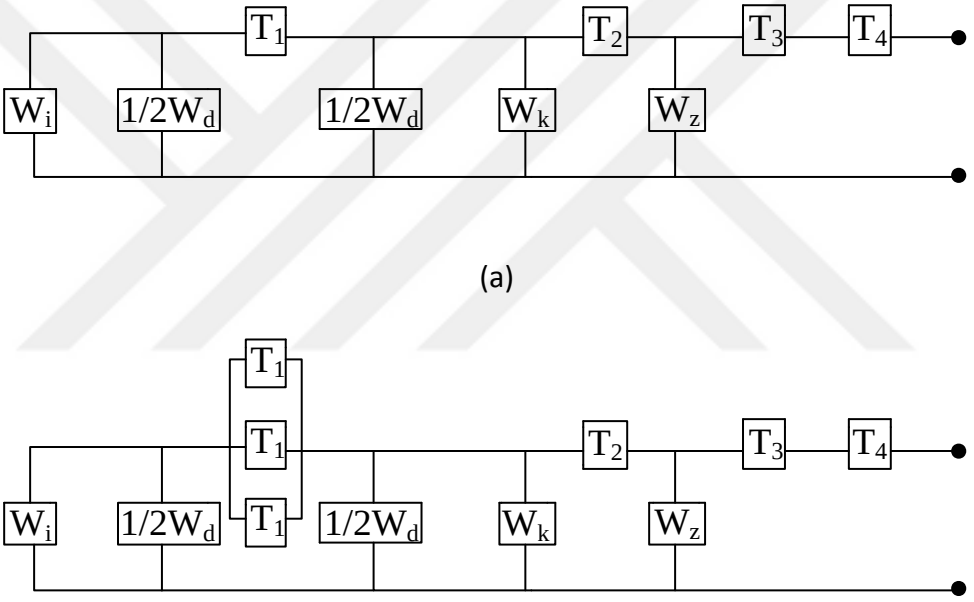
Yer altı kablolarının akım taşıma kapasiteleri hesaplanırken kablo sisteminin Şekil 3.1'de gösterilen ısıl devresi kullanılır. Burada W_i (W/m) iletken kayıplarını, W_d (W/m) dielektrik kayıplarını, W_k (W/m) kılıf kayıplarını ve W_z (W/m) de zırh kayıplarını ifade

etmektedir. Ayrıca T_1 (K.m/W) iletken ile kılıf arasındaki ısıl direnci, T_2 (K.m/W) kılıf ile zırh arasındaki ısıl direnci, T_3 (K.m/W) kablonun dış kılıfının ısıl direncini ve T_4 (K.m/W) de kablo yüzeyi ile dış ortam arasındaki ısıl direnci ifade eder [3].

Bir kablodaki toplam Joule kaybını veren ifade,

$$W_I = W_i + W_k + W_z = W_i(1+\lambda_1+\lambda_2) \tag{3.1}$$

şeklindedir. Bu ifadede λ_1, metal kılıfta oluşan kayıpların toplam iletken kayıplarına oranıdır ve kılıf kayıp faktörü olarak isimlendirilir. λ_2, metal zırhta oluşan kayıpların toplam iletken kayıplarının oranıdır ve zırh kayıp faktörü olarak isimlendirilir.



(a)

(b)

Şekil 3.1 Kablo sisteminin ısıl devreleri; a) Tek damarlı kablo b) Üç damarlı kablo [42]

Ortam sıcaklığı üzerindeki kablo iletken sıcaklığındaki artış olan $\Delta\theta$ (K),

$$\Delta\theta = (I^2R + 1/2W_d)T_1 + [I^2R(1+\lambda_1) + W_d]nT_2 + [I^2R(1+\lambda_1+\lambda_2) + W_d]n(T_3+T_4) \tag{3.2}$$

olarak elde edilir. Burada, I (A) bir iletkenden geçen akımın büyüklüğünü, R (Ω/m), iletkenin maksimum işletme sıcaklığındaki alternatif akım direncini ve n, kablodaki yüklü iletken sayısını ifade eder. Eşitlik 3.2 kullanılarak akım taşıma kapasitesini veren ifade,

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)} \right]^{0,5} \quad (3.3)$$

elde edilir. Eğer kablolar havayla direkt olarak temas edecek biçimde döşenirse, kablo sisteminin dış termal direnci üzerinde ışınım ve taşınım şeklinde ısıl kayıplar oluşur. Bu durumda akım taşıma kapasitesi büyüklüğü Eşitlik 3.4 ile bulunur.

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*)] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4^*)} \right]^{0,5} \quad (3.4)$$

Burada, D_e^* (m), kablonun dış çapını, σ, kablo yüzeyinin güneş ışınımı absorpsiyon katsayısını, H (W/m^2), güneş ışınımı yoğunluğu ve T_4^* (K.m/W), güneş ışınlarının etkisinin de dahil edildiği kablonun dış termal direncini ifade etmektedir.

3.2 Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

3.2.1 Kablo İletkeninin AC Direnci

Kablo iletkeninin izin verilen en yüksek işletme sıcaklığında birim uzunluğunun AC direncini veren ifade,

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (3.5)$$

olarak verilebilir. Burada *R* (Ω/m) iletkenin maksimum işletme sıcaklığındaki direncini, R' (Ω/m), iletkenin maksimum işletme sıcaklığındaki DC direncini, y_s, deri etkisi faktörünü ve y_p, yakınlık etkisi faktörünü ifade etmektedir.

3.2.2 Kablo İletkenin DC Direnci

Kablo iletkeninin izin verilen en yüksek işletme sıcaklığı olan θ için DC direnci,

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta\text{-}20)] \quad (3.6)$$

eşitliği ile bulunur. Bu ifadede R_0 (Ω/m) iletkenin 20 °C'deki DC direncini, α_{20}, iletken malzemesinin 20 °C'deki sıcaklık katsayısını ve θ, maksimum işletme sıcaklığını °C cinsinden tanımlamaktadır.

3.2.3 Deri Etkisi Faktörü

Deri etkisi faktörü olan y_s, (3.7) ve (3.8) ifadeleri kullanılarak hesaplanır.

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \tag{3.7}$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R^{'}} 10^{-7} k_s \tag{3.8}$$

Burada *f*, Hz cinsinden frekansı, k_s, iletken malzemesi ve iletken yapısına bağlı olarak değişen deri etkisi katsayısını ve x_s, deri etkisi için kullanılan Bessel fonksiyonu değişkenini ifade eder.

3.2.4 Yakınlık Etkisi Faktörü

Yakınlık etkisi faktörü olan y_p, (3.9) ve (3.10) ifadeleri kullanılarak hesaplanır.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \tag{3.9}$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R^{'}} 10^{-7} k_p \tag{3.10}$$

Bu ifadelerde, d_c (mm) iletken çapını, s (mm) iletken eksenleri arasındaki uzaklığı, x_p, yakınlık etkisi için kullanılan Bessel fonksiyonu değişkenini ve k_p iletken malzemesi ve iletken yapısına bağlı olarak değişen yakınlık etkisi katsayısını ifade eder.

3.3 Kabloda Oluşan Kayıpların Hesaplanması

3.3.1 Dielektrik Kayıpları

Katı dielektrik malzemeler, alternatif gerilime maruz kaldıklarında büyük kapasitörler gibi karakteristik gösterirler ve üzerlerinden şarj akımı geçirirler. Bu akım sebebiyle izolasyon malzemesinin üzerinde dielektrik kayıp olarak isimlendirilen ve ısınmaya sebep olan aktif güç kaybı oluşur. Şarj akımının büyüklüğü izolasyon malzemesinin

dielektrik sabitine, kablonun boyutuna ve işletme gerilimine bağlıdır [43]. Dielektrik kayıp ifadesi,

$$W_d = wCU_0^2 \tan\delta \tag{3.11}$$

olarak tanımlanır. Bu ifadede w (rd/s) açısal frekansı, C (F/m) birim uzunluk başına düşen kapasiteyi, U_0 (V) faz-nötr geriliminin büyüklüğünü ve $\tan\delta$ güç frekansı ve işletme sıcaklığına bağlı olarak değişen dielektrik kayıp faktörünü ifade etmektedir. Elektriksel kapasitenin büyüklüğü,

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9} \tag{3.12}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Burada ε_r bağıl dielektrik sabitini, D_i (mm) izolasyonun ekran hariç dış çapını ve d_c (mm) ekran dahil iletkenin dış çapını ifade eder.

3.3.2 Ekran ve Kılıf Kayıpları

İletkenin çevresinde oluşan manyetik alan, kablonun metalik ekranı ve zırhı üzerinde akımların indüklemesine sebep olur. Bu akımlar ürettikleri ısı nedeniyle kablo ampasitesini düşürürler.

$\lambda_1^{'}$ kablonun ekranı veya kılıfı üzerinde sirkülasyon akımlarının neden olduğu kayıpları ifade eder. Sirkülasyon akımları, ekran veya kılıfın kablonun her iki tarafından topraklandığı takdirde oluşur. Bu kayıplar ekran/kılıf direncine, ekran/kılıf endüktansına ve kabloların birbirlerine göre olan düzenlerine bağlıdır. Üç tek damarlı, kılıfları her iki tarafta topraklanmış kablonun eşit aralıklı yan yana dizildiği durum için kayıp faktörü $\lambda_1^{'}$'nü veren ifade,

$$\lambda_1^{'} = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1+\left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2} \tag{3.13}$$

olur. Burada X_1 (Ω/m), kılıfın birim uzunluk başına düşen reaktansıdır ve Eşitlik 3.14 kullanılarak hesaplanır.

$$X_1 = 2w10^{-7} \ln\left\{2\sqrt[3]{2}\left(\frac{s}{d}\right)\right\} \quad (3.14)$$

Burada, w (1/s), açısal frekansı, s (mm), kablo eksenleri arasındaki uzaklığı ve d (mm), kılıfın ortalama çapını ifade eder.

Ekran veya kılıfta eddy akımlarının neden olduğu kayıplar λ_1'' olarak isimlendirilir. Alternatif iletken akımı metalik ekran veya kılıf üzerinde bir elektromotor kuvvet (emk) üretir. Emk da eddy akımlarının metalik ekran veya kılıf üzerinde oluşmasına neden olur. Bu akımların büyüklüğü önemli ölçüde ekran/kılıf kalınlığına bağlıdır. Ayrıca, malzemelerin özgül direnci ve geometrik faktörler de bu akımlar üzerinde önemli rol oynar. Birçok durumda λ_1'', λ_1' kayıplarına göre ihmal edilebilirdir. λ_1'' özellikle büyük dilimli iletkenlere sahip AC kablolar ve λ_1' değerinin fazların çarpraz ve tek taraflı bağlanarak azaltıldığı kablolarda dikkate alınmalıdır [41].

Kılıf ve ekranda oluşan kayıpların toplamı olan λ_1, sirkülasyon akımı (λ_1') ve eddy akımı (λ_1'') kayıplarından meydana gelmektedir ve Eşitlik 3.15 ile ifade edilebilir.

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (3.15)$$

Kılıf ve ekranın maksimum işletme sıcaklığını veren ifade,

$$\theta_{sc} = \theta_c - (I^2R + 0,5W_d)T_1 \quad (3.16)$$

şeklindedir. Burada θ_{sc}, kablo ekranı veya kılıfının maksimum işletme sıcaklığını °C cinsinden ifade eder. Kılıf ve ekran sıcaklığı akıma bağlı olduğu için akımın büyüklüğü değiştiği zaman sıcaklık yeniden hesaplanmalıdır [2].

Kılıf ve ekranın maksimum işletme sıcaklığındaki direnci,

$$R_s = R_{s0}[1 + \alpha_{20}(\theta_{sc} - 20)] \quad (3.17)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır. Burada R_{so}, kablo kılıfı veya ekranın 20 °C'deki direncini Ω/m cinsinden ifade eder.

3.4 Kablo Sisteminin Isıl Dirençlerinin Hesaplanması

Yer altı kablolarının akım taşıma kapasitelerinin hesaplanabilmesi için kablo iletkeninden toprak yüzeyine kadar olan malzemelerin ısıl dirençlerinin belirlenmesi

gerekir. Bu kısımdaki ısıl direnç ifadeleri, tez çalışması kapsamında incelenen üç adet tek damarlı kablodan oluşan sistem için verilmiştir.

3.4.1 İletken ile Kılıf Arasındaki Isıl Direnç (T_1)

Kablo iletkeni ile kılıfı arasındaki ısıl direnci hesaplamak için,

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_1}{d_c}\right] \tag{3.18}$$

ifadesi kullanılır. Burada ρ_T (K.m/W), izolasyon malzemesinin ısıl direncini, d_c (mm), iletken çapını ve t_1 (mm), iletken ile kılıf arasındaki izolasyonun kalınlığını tanımlar.

3.4.2 Kılıf ile Zırh Arasındaki Isıl Direnç (T_2)

Kablo iletkeni ile zırhı arasındaki ısıl direnci hesaplamak için Eşitlik 3.19'da verilen ifade kullanılır.

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln\left[1 + \frac{2t_2}{D_s}\right] \tag{3.19}$$

Burada, t_2 (mm), kablo siperinin kalınlığını, D_s (mm), kılıfın dış çapını tanımlar.

3.4.3 Dış kılıfın Isıl Direnci (T_3)

Kablo dış kılıfının ısıl direnci,

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D_a^{'}}\right) \tag{3.20}$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. Burada, t_3 (mm), dış kılıfın kalınlığını ve $D_a^{''}$ (mm), kablo zırhının (dış kılıf) dış çapını belirtir.

3.4.4 Kablo Dışı (Toprak) Isıl Direnç (T_4)

Kablo ile toprak yüzeyi arasındaki ısıl direnci hesaplamak için kullanılan ifade Eşitlik 3.21'de verilmiştir.

$$T_4 = \frac{1}{2\pi}\rho_T \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln\left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.21)$$

Burada, $u=2L/D_e$, L (mm) kablo ekseninin toprak yüzeyine olan uzaklığını, D_e (mm) kablonun dış çapını ve s_1 (mm) bitişik iki kablo arasındaki açıklığı ifade eder. Eğer kablolar bir kanal veya boru içerisine alınarak döşenirse, kablonun dış ısıl direnci üç kısımdan oluşur:

a) Kablo yüzeyi ile boru arasındaki havanın ısıl direnci (T_4')

b) Borunun ısıl direnci (T_4''). Metal bir boru ise bu ısıl direnç ihmal edilir.

c) Boru dışı ısıl direnç (T_4''')

Bu durumda dış ısıl direnç olan T_4, bu üç direncin toplamına eşittir.

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad (3.22)$$

Kablo ile boru arasındaki havanın ısıl direnci,

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0{,}1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (3.23)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. D_e (mm) kablonun dış çapı ve Θ_m (°C) kablo ile boru arasındaki bölgenin ortalama sıcaklığıdır. Çizelge 3.1'de verilen U, V ve Y değerleri IEC 60287 2-1 standardında belirlenmiş döşeme koşullarına bağlı olan sabitlerdir.

Borunun oluşturduğu ısıl direnç olan T_4'',

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi}\rho_T \ln\left(\frac{D_o}{D_d} \right) \quad (3.24)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. Burada D_o (mm) borunun dış çapını, D_d (mm) borunun iç çapını ve ρ_T (K.m/W) borunun imal edildiği malzemenin ısıl direncini tanımlamaktadır.

Boru dışı ısıl direnç olan T_4''', düzeltme faktörü kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{N}{2\pi}(\rho_e - \rho_c)\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (3.25)$$

Burada, N, kanal içerisindeki yüklü kabloların sayısını, ρ_e (K.m/W), kanal dışındaki toprağın termal direncini, ρ_c (K.m/W), kanal içerisinde kullanılan malzemenin termal direncini ifade eder. Eşitlik 3.25'teki "u",

$$u = \frac{L_G}{r_b} \tag{3.26}$$

ile hesaplanır. Bu ifadede, L_G (mm), kanal merkezinin torpak yüzeyi ile arasındaki mesafeyi ve r_b (mm), kanalın eşdeğer yarıçapını belirtir ve Eşitlik 3.27 ile hesaplanmaktadır.

$$\ln r_b = \frac{1}{2}\frac{x}{y}\left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y}\right)\ln\left(1 + \frac{y^2}{x^2}\right) + \ln\frac{x}{2} \tag{3.27}$$

Burada, x (mm), kanalın en kısa kenarını ve y (mm) kanalın en uzun kenarını tanımlar. Bu formül y/x oranının 3'ten küçük olduğu durumlar için kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1 *U,V* ve *Y* sabitlerinin değerleri

Kabloların döşenme şekli	*U*	*V*	*Y*
Metal boru içerisine	5,2	1,4	0,011
Hava ortamında fiber boru içerisine	5,2	0,83	0,006
Fiber boru içerisinde betona	5,2	0,91	0,010
Asbestki çimento içerisine:			
Havayla temas halinde boru içerisine	5,2	1,2	0,006
Beton içerisinde olan boruya	5,2	1,1	0,011
Boru içerisine gaz basınçlı kablo	0,95	0,46	0,0021
Yağ basınçlı boru tipi kablo	0,26	0,0	0,0026
Plastik borular	1,87	0,312	0,0037
Toprak kanallar	1,87	0,28	0,0036

BÖLÜM 4

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerinin çözümünde çok geniş bir kullanım alanına sahip sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi çözüm bölgesinin çok küçük, birbirine bağlı, alt bölgelere veya elemanlara ayrıştırılması ile karmaşık kısmi diferansiyel denklemlerin lineer ya da lineer olmayan eş zamanlı denklemlere dönüştürülerek çözüldüğü bir tekniktir. Genellikle kompleks endüstriyel problemlerin yaklaşık sayısal çözümlerinin elde edilebilmesi için tercih edilir. Bu bölümde sonlu elemanlar yönteminin güç kablolarının sıcaklık ve akım taşıma kapasitesi analizlerinde kullanımı, temel ısı transfer denklemleri ile iki boyutlu sonlu eleman eşitlikleri açıklanmıştır.

4.1 Genel Tanıtım

Günümüzde mühendislik uygulama alanlarında karşılaşılan problemlerin çözümü için geliştirilen pek çok yöntem bulunmaktadır. Sonlu farklar, sonlu hacimler, sınır elemanları ve sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonlu farklar yöntemi temel denklemlere noktasal bir yaklaşım gerektiren, iyi yapılandırılmış ve kavramsal olarak basit bir yöntemdir. Bu yöntemde model, bir dizi örgü noktası için fark eşitliklerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilir ve nokta sayısı arttırılarak ilerletilebilir. Birçok ısı transfer problemi sonlu farklar yöntemi ile çözülebilir ancak düzensiz geometriler ve istisnai sınır koşulların tanımlandığı durumlarda bu tekniğin kullanımı zorlaşır [44].

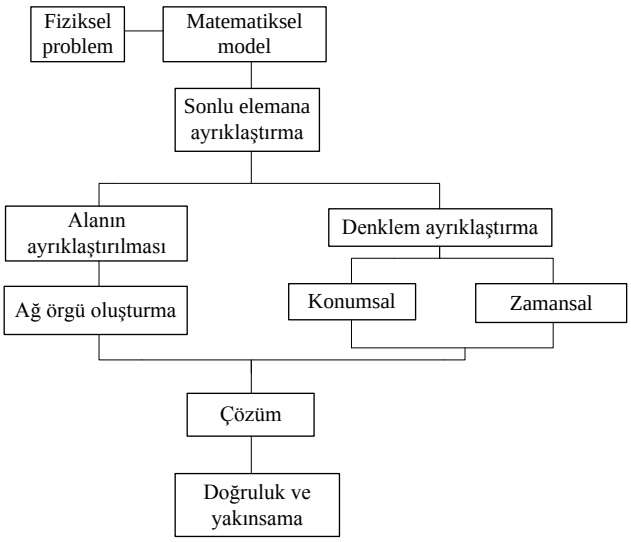
Sonlu hacimler yöntemi, sonlu farklardan daha ileri düzeyde bir tekniktir ve genellikle akışkanlar dinamiği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tepe noktası merkezli bir sonlu hacimler tekniği daha çok lineer sonlu elemanlar yöntemine benzerlik göstermektedir.

Sınır elemanları yönteminde giriş verilerini tanımlamak daha kolaydır ve sonlu elemanlar yöntemine göre daha az bir çözüm zamanı gerektirir. Bununla birlikte sınır elemanları yöntemi geçici durum analizlerinin gerçekleştirilmesinde yetersiz kalmaktadır [45].

Günümüzde, sonlu elemanlar yöntemi mühendislik ve matematik problemlerinin çözümünde çok geniş bir uygulama alanına sahip genel bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Kablo sistemlerinin ısıl alan ve elektrik alan incelemelerinde de en çok tercih edilen sayısal yöntemdir. Bu bölümde sonlu elemanlar yönteminin temel uygulama adımları, kablo sistemlerinin ısıl analizi için sonlu elemanlar yönteminin kullanımı ve iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi eşitlikleri verilmiştir.

4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemini Uygulama Adımları

Herhangi bir mühendislik probleminin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü çeşitli adımların sırasıyla gerçekleştirilmesi ile sağlanmaktadır. Bu tez çalışmasında ısı transfer probleminin çözümü için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çözüm için kullanılan akış algoritması Şekil 4.1'de verilmiştir.

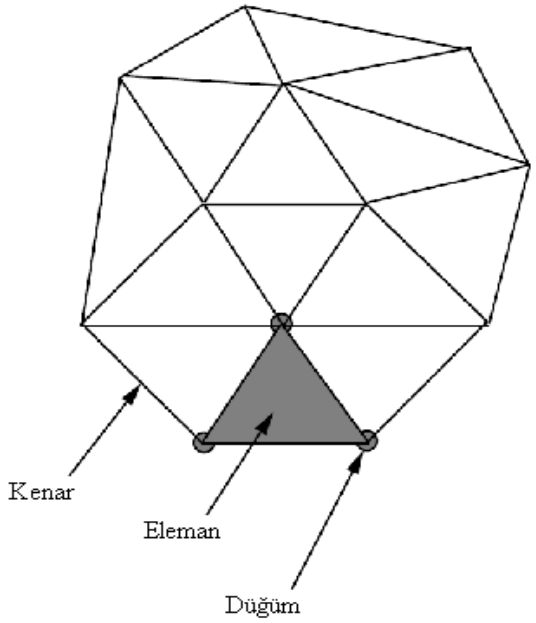


Şekil 4.1 Isı transfer hesaplamaları için akış diyagramı

Bir ısı transfer probleminin sayısal modelinin oluşturulması problemin fiziksel modellenmesi ile başlar. Sonraki temel adımlar ise matematiksel modellenme, çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrıklaştırılması, alanın ayrıklaştırılması, denklem ayrıklaştırma, problemin çözümü ile doğruluk ve yakınsamadır. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesi ile problemin sayısal çözümü elde edilir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak problem çözümünde izlenecek adımlar şu şekildedir [44]:

a) Çözüm bölgesi üst üste gelmeyecek şekilde elemanlara veya alt bölgelere ayrılır. Yöntem, üçgen veya dörtgen gibi çeşitli eleman şekilleri arasında tercih yapmaya imkan sağlar. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere her bir eleman belirli düğüm noktalarında birbirleriyle birleşecek şekilde yerleştirilir. Bir eleman oluşturmak için kullanılacak düğüm sayısı elemanın tipine bağlıdır.



Şekil 4.2 Sonlu eleman ağ örgüsünde elemanlar, düğümler ve kenarlar

b) Bir eleman üzerindeki alan değişkeninin değişimini ifade eden enterpolasyon fonksiyonunun tipi seçilir. Düğüm sayıları bir elemana şekil verir ve her bir düğümdeki bilinmeyen sayısı, elemanın içindeki alan değişkeninin varyasyonunu belirler.

c) Her bir elemanın özelliklerinin tanımlandığı iletkenlik matrisleri belirlenir ve yüklenme vektörleri oluşturulur.

d) Genel sistem özelliklerinin elde edilebilmesi için her bir eleman için oluşturulan eşitlikler toplanır. Her bir elemanın çıktıları toplandıktan sonra sınır koşulları dahil edilir.

e) Elde edilen cebirsel denklemler, sıcaklık gibi alan değişkenlerinin düğüm noktalarındaki değerlerinin hesaplanabilmesi için çözülür.

f) Sıcaklık gibi alan değişkenlerinin düğüm noktalarındaki değerleri bulunduktan sonra ısı akısı gibi ikincil büyüklükler hesaplanabilir.

4.3 Kabloların Akım Taşıma Kapasitelerinin Hesaplanmasında Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanımı

Yer altı kabloları için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde hesaplamaların doğruluğu açısından birçok parametre dikkate alınır. Bunlar:

- Ayrıştırılacak alanın boyutu,
- Ağ örgü üreteci tarafından oluşturulan elemanların boyutları,
- Alan sınırlarının tipi ve konumu,
- Kablo kayıplarının belirlenmesi,

olarak sıralanabilir [46]. Eğer zaman domeninde çalışılıyorsa incelenen zaman aralıklarının tespiti de önemlidir.

4.3.1 Ayrıklaştırılacak Alanın Seçimi

Sayısal çalışmalarda sınırların konumu önemlidir. Toprak yüzeyi belli bir sınır iken alt bölge sonsuzdur. Fiziksel problemde olan değerler ile sınırlar boyunca hesaplanan değerlerin bağdaşması için yeterince büyük bir alan tanımlanmalıdır. Kabloların incelendiği problemlerde, alt ve yan sınırlarda bulunan düğüm noktalarının sıcaklık değerlerinin büyüklüğü aynı olacak şekilde seçilmeli ve sınırlar üzerinde sıcaklık farkı olmamalıdır. Modelleme deneyimleri neticesinde, kabloların merkezde konumlandırıldığı 10 m genişliğe ve 5 m derinliğe sahip bir dikdörtgen alan kullanılarak yapılan analizlerin pratik uygulamaların çoğu için doğruluk düzeyi yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür [46].

4.3.2 Elemanların Boyutları

Ağ üreteci olarak kullanılan ticari programların çoğunda eleman boyutları kontrol edilebilirdir. Aynı zamanda modelin çeşitli bölgeleri için farklı yoğunluklarda eleman da belirlenebilir. Detaylı ve hassas olarak incelenecek kısımlarda eleman sayısının daha fazla olması tercih edilmektedir. Elemanların kabloya yaklaştıkça boyutlarının küçültülmesi daha doğru sonuçların elde edilmesine imkan sağlar. Modelin genelinde de küçük elemanların tercih edilmesi sonuçların hassasiyetini arttırır. Ancak hesaplama zamanının modeldeki eleman sayısına bağlı olduğu unutulmamalıdır. Bu sayı yükseldikçe çözüm süresi de artmaktadır.

4.3.3 Sınır Koşulları

Sonlu elemanlar yöntemi farklı sınır koşulların tanımlanmasına ve modelin herhangi bir bölgesinde rastgele sınır koşulu konumlandırılmasına imkan tanır. Ayrıca, bu yöntemde düz veya eğri sınırlar kullanılabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan kabloların akım taşıma kapasitesi hesaplamalarında üç faklı sınır koşulu uygulanabilir. Eğer sınırın bir kısmı boyunca sıcaklık değeri biliniyorsa bu durumda eş sıcaklık koşulu vardır. Bu sıcaklık yüzey uzunluğunun bir fonksiyonu olabilir. Sınır sıcaklık değerinin bilinmesi sonlu eleman tekniğinin uygulanması için gereklidir. Eğer sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak IEC- 60287'de verilen koşullar modellenecek ise sıcaklık değeri, kablonun gömüldüğü derinlikteki sıcaklıktır.

Diğer bir sınır koşulu ise çizilen bölge sınırda taşınım yoluyla ısı kazancı veya kaybı mevcut ise kullanılır ve taşınım sınırı olarak isimlendirilir. Bu sınır koşulu toprak yüzeyine yakın döşenmiş olan büyük çaplı kablolar için dikkate alınmalıdır. Taşınımla gerçekleşen ısı transferinin büyüklüğünün saptanabilmesi için ısı transfer katsayısı ve hava sıcaklığı değerleri gerekir. Toprak yüzeyinde gerçekleşen taşınımla ısı transferi zorlamalı ve doğal olmak üzere ikiye ayrılır. Kablo hesaplamalarında ısı transfer katsayısının belirlenmesi önemlidir. Bu katsayı 2-25 W/m^2K aralığında ise doğal taşınımın, 25-250 W/m^2K değerleri arasında ise zorlamalı taşınımın olduğu kabul edilir

[46]. Bu da zorlamalı taşınımın, doğal taşınıma göre daha etkili olduğunu gösterir. Isı transfer katsayısı bu değerlerin altında ise toprak yüzeyi daha fazla ısınır.

Sabit ısı akısı sınır koşulu, kablo akımı hesaplamalarında kullanılan üçüncü tip sınır koşuldur. Bu sınır koşulu kabloların etrafında büyüklükleri bilinen ısı kaynakları olduğunda kullanılır.

4.4 Sonlu Elemanlar Yönteminin Isı Transfer Denklemleri

4.4.1 Isı Transfer Denklemleri

Isıl direnç sabit kabul edilirse, katı bir madde için ısı iletim denklemi [46],

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+W_{iç}\rho=\frac{1}{\delta}\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{4.1}$$

şeklinde yazılabilir. Bu iki boyutlu ısı iletim denklemindeki büyüklükler,

θ : Bilinmeyen sıcaklık değeri (°C) ,

$\delta = 1/\rho c$: Ortamda ısının yayılabilirlik değeri (m^2/s) ,

c : Malzemenin hacimsel özgül ısı değeri (J/m^3) ,

ρ : Malzemenin ısıl direnci (K.m/W) ,

$W_{iç}$: Kabloda oluşan ısı değeri (W/m).

olarak ifade edilir. (4.1) denkleminde sınır koşullar iki farklı biçimde ifade edilebilir. Eğer sınırın bir bölümü boyunca sıcaklık değeri biliniyorsa,

$$\theta=\theta_B(s) \tag{4.2}$$

şeklinde olur. Burada θ_B sınır sıcaklığıdır, $\theta_B(s)$ ise yüzey boyunca sınır sıcaklığını ifade eden bir fonksiyondur. Eğer sınırda taşınım $(h(\theta-\theta_{ortam}))$ veya ısı akısı "q" nedeniyle sıcaklık değerinde artış veya azalma oluyorsa sınır koşulu,

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial\theta}{\partial n}+q+h(\theta-\theta_{ortam})=0 \tag{4.3}$$

biçiminde ifade edilir. Burada "h" taşınımla ısı transfer katsayısını, "n" sınır yüzeyine normalin doğrultusunu ve " θ " bilinmeyen sınır sıcaklığını ifade eder.

Akım taşıma kapasitesi hesabında, genellikle iletken sıcaklığına bağlı olarak iletkenden geçebilecek maksimum akım değeri bulunur. Kabloda ısı kaynağı olarak sadece iletken kabul edildiğinde, belirlenen sınır koşullarda "I" değerinin hesaplanabilmesi için (4.1) eşitliği ve Wiç = I^2.R kullanılır.

4.4.2 İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminde eğer incelenen alan iki boyutlu ise üçgen ve dörtgen gibi çokgenlere, üç boyutlu ise piramit, üçgen veya dörtgen prizmalara bölünerek ağ örgüsü oluşturulur. Alan üzerindeki herhangi bir koordinat için sıcaklık değeri ($\bar{T}$) ağ örgüdeki elemanlar kullanılarak hesaplanır. Her bir eleman için yaklaşık çözümün, belirlenen fonksiyonların lineer bir kombinasyonu olduğu kabul edilir. Buradan hareketle $\bar{T}$ için,

$$\bar{T}(x,y) = \sum_{\Omega_1}^{i=1,P} C_i^{(1)} N_i^{(1)}(x,y) + \sum_{\Omega_2}^{i=1,P} C_i^{(2)} N_i^{(2)}(x,y) + \ldots + \sum_{\Omega_M}^{i=1,P} C_i^{(M)} N_i^{(M)}(x,y) \tag{4.4}$$

ifadesi yazılabilir. Burada P, her elemandaki C_i^e parametrelerinin sayısını ve M de toplam eleman sayısını belirtir. Galerkin ağırlıklı kalan yönteminde tanımlanan 2-D ısı iletim eşitliğinde bulunan integrallerin, her bir elemanın katkısının toplanmasıyla basitleşmesi sağlanır [47]. Böylece yeni ifade,

$$\sum_{e=1}^{M} \int_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i^e}{\partial x} k \frac{\partial \bar{T^e}}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} k \frac{\partial \bar{T^e}}{\partial y} \right] dxdy - \sum_{e=1}^{M} \int_{\Omega_e} N_i^e Q dxdy + \sum_{e=1}^{M} \int_{\Gamma_{qe}} N_i^e \bar{q}\, d\Gamma = 0 \tag{4.5}$$

olur. Burada,

$$\bar{T^e}(x,y) = \sum_{\Omega_e}^{i=1,P} C_i^e N_i^e(x,y) \tag{4.6}$$

ve Ω_e bir elemanın alanını, Γ_{q_e} , Ω_e'nin Γ_q ile olan sınır bölgesini tanımlar.

Bir problem için belirlenen eleman şekilleri genellikle aynı seçilir ve her bir eleman için tanımlanan fonksiyonlar tekrarlanabilir şekilde oluşturulabilir. Böylece bir eleman için

formülasyon hazırlanıp, Ω olarak tanımlanan bütün alana uygulanabilir. Bu özellik aynı zamanda sonlu elemanlar yönteminin temel mantığını tanımlamaktadır.

4.4.3 İletkenlik Matrisi ve Yüklenme Vektörü

Her bir eleman için (4.7) integral ifadesi hesaplanmalıdır [47].

$$\int_{\Omega_e}[\frac{\partial N_i^e}{\partial x}k\frac{\partial \bar{T^e}}{\partial x}+\frac{\partial N_i^e}{\partial y}k\frac{\partial \bar{T^e}}{\partial y}]dxdy-\int_{\Omega_e}N_i^e Q dxdy+\int_{\Gamma_{qe}}N_i^e\bar{q}\,d\Gamma \qquad \text{(i=1,P)} \qquad (4.7)$$

(4.7) ifadesinde bulunan üçüncü integral, eğer Ω_e elemanı Ω alanının sınırı olan Γ_q' nun üzerinde ise elde edilecektir. $N_i^e(x,y)$ ifadesinin düşük dereceli polinomlar gibi analitik açıdan basit ve C_i^e ifadesinin bölgesel ve düğüm değerleri olduğu kabulüyle T çözümü,

$$\bar{T^e}(x,y)=\sum_{\Omega_e}^{j=1,P}T_j^e N_j^e(x,y) \qquad (4.8)$$

biçiminde ifade edilir. (4.8) ifadesi (4.7)'de yerine yazıldığında,

$$\int_{\Omega_e}[\frac{\partial N_i^e}{\partial x}k\frac{\partial N_j^e}{\partial x}+\frac{\partial N_i^e}{\partial y}k\frac{\partial N_j^e}{\partial y}]T_j^e dxdy-\int_{\Omega_e}N_i^e Q dxdy+\int_{\Gamma_{qe}}N_i^e\bar{q}\,d\Gamma \qquad (4.9)$$

elde edilir. (4.9) ifadesi aynı zamanda,

$$K_{ij}^e T_j^e - f_i^e \qquad \text{(i,j=1,P)} \qquad (4.10)$$

şeklinde de yazılabilir. Buradan elemanın iletkenlik matrisi,

$$K_{ij}^e=\int_{\Omega_e}[\frac{\partial N_i^e}{\partial x}k\frac{\partial N_j^e}{\partial x}+\frac{\partial N_i^e}{\partial y}k\frac{\partial N_j^e}{\partial y}]dxdy \qquad (4.11)$$

olarak elde edilir. Eleman yüklenme vektörü ise,

$$f_i^e=\int_{\Omega_e}N_i^e Q dxdy-\int_{\Gamma_{qe}}N_i^e\bar{q}\,d\Gamma \qquad \text{(i=1, P)} \qquad (4.12)$$

olur. Yaklaşık ifade,

$$K_{ij}T_j=f_i \qquad \text{(i, j=1, NP)} \qquad (4.13)$$

olarak alınabilir. Burada,

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^{M} K_{ij}^{e} \tag{4.14}$$

$$f_i = \sum_{e=1}^{M} f_i^{e} \tag{4.15}$$

ve *NP* ise toplam bilinmeyen sayısını ifade eder. Genel iletkenlik matrisi olan K_{ij} ve yüklenme vektörü olan f_i her bir eleman için elde edilerek birleştirilir. Eğer sınırda konveksiyon (taşınım) yoluyla ısı tranferi gerçekleşiyor ise eleman iletkenlik matrisi,

$$K_{ij}^{e} = \int_{\Omega_e} [\frac{\partial N_i^e}{\partial x} k \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} k \frac{\partial N_j^e}{\partial y}] dxdy + \int_{\Gamma_{qe}} h N_i^e N_j^e d\Gamma \tag{4.16}$$

halini alır. Bu durumda eleman yüklenme vektörü de değişerek,

$$f_i^{e} = \int_{\Omega_e} N_i^e Q dxdy + \int_{\Gamma_{qe}} h T_f N_i^e d\Gamma \qquad \text{(i=1, P)} \tag{4.17}$$

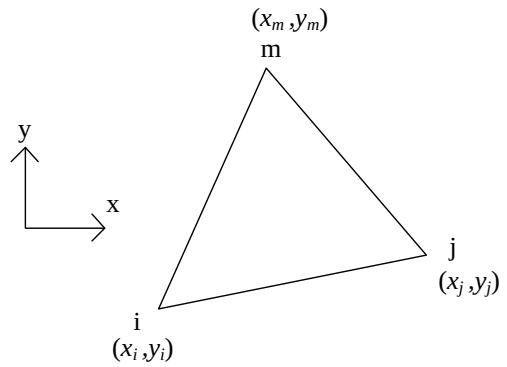
olur. Genel izotropik olmayan durum için eleman iletkenlik matrisi indeks notasyonu ile,

$$K_{ij}^{e} = \int_{\Omega_e} [\frac{\partial N_i^e}{\partial x_l} k_{lm} \frac{\partial N_j^e}{\partial x_m}] d\Omega \tag{4.18}$$

ifadesiyle oluşturulabilir.

4.4.4 Sonlu Üçgen Elemanlar

İki boyutlu ısı iletim problemleri için en basit sonlu eleman geometrisi, incelenen bölge olan Ω'nın düğüm noktaları köşeleri olan üçgen elemanlara ayrıştırılmasıdır.



Şekil 4.3 Üçgen eleman

Şekil 4.3'te gösterilen üçgen eleman özellikle iki boyutlu analizlerde oluşturulan ağ örgünün isteğe bağlı olarak değiştirilebilmesine ve alanın geometrik açıdan ideal hale getirilmesine imkan sağlaması açısından önemlidir [47].

İki boyutlu sonlu eleman analizinin temel özellikleri doğrusal üçgen eleman yapısı için aşağıda verilmiştir. Üçgen eleman genellikle 1, 2, 3 veya i, j, m olarak isimlendirilen üç düğüm noktasına sahiptir. Eleman içerisindeki herhangi bir x, y koordinatındaki sıcaklığı veren ifade,

$$T^e = a_1 + a_2 x + a_3 y \tag{4.19}$$

şeklindedir. Buradan,

$$T^e(x_1, y_1) = T_1^e \tag{4.20}$$

$$T^e(x_2, y_2) = T_2^e \tag{4.21}$$

$$T^e(x_3, y_3) = T_3^e \tag{4.22}$$

ifadeleri yazılır. Bu ifadeler temel denkleme göre düzenlenirse,

$$T_1^e = a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 \tag{4.23}$$

$$T_2^e = a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 \tag{4.24}$$

$$T_3^e = a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3 \tag{4.25}$$

elde edilir. a_1, a_2 ve a_3'ü hesaplamak için (4.5), (4.6) ve (4.7) denklemleri çözülürse,

$$a_1 = \frac{1}{2A}[(x_2 y_3 - x_3 y_2)T_1^e + (x_3 y_1 - x_1 y_3)T_2^e + (x_1 y_2 - x_2 y_1)T_3^e] \tag{4.26}$$

$$a_2 = \frac{1}{2A}[(y_2 - y_3)T_1^e + (y_3 - y_1)T_2^e + (y_1 - y_2)T_3^e] \tag{4.27}$$

$$a_3 = \frac{1}{2A}[(x_3 - x_2)T_1^e + (x_1 - x_3)T_2^e + (x_2 - x_1)T_3^e] \tag{4.28}$$

eşitlikleri elde edilir. Burada,

$$A = \frac{1}{2}\det\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad = \text{ Eleman alanı} \tag{4.29}$$

olarak ifade edilmektedir. Ayrıca belirlenen üçgen yapı için,

$$T^e = N_1^e T_1^e + N_2^e T_2^e + N_3^e T_3^e \tag{4.30}$$

$$N_1^e = \frac{1}{2A}(b_1 + c_1 x + d_1 y) \tag{4.31}$$

$$N_2^e = \frac{1}{2A}(b_2 + c_2 x + d_2 y) \tag{4.32}$$

$$N_3^e = \frac{1}{2A}(b_3 + c_3 x + d_3 y) \tag{4.33}$$

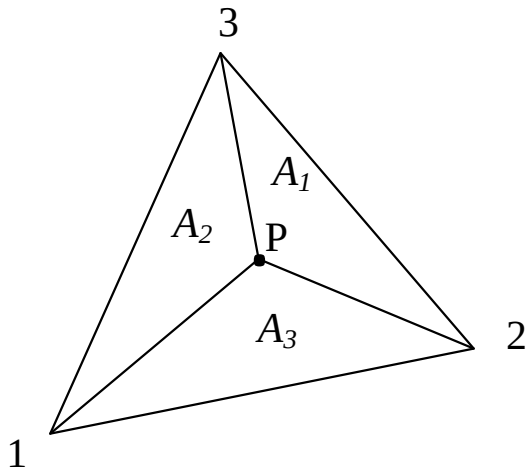
ifadeleri yazılabilir. Eşitliklerdeki b_i, c_i ve d_i,

$$b_i = x_j y_m - x_m y_i \tag{4.34}$$

$$c_i = y_j - y_m \tag{4.35}$$

$$d_i = x_m - x_j \tag{4.36}$$

şeklindedir. Buradaki i, j ve m 1, 2 ve 3 olarak alınmıştır. N_i^e elemanın şekil fonksiyonu olarak isimlendirilir. N_i^e, i düğümünün bulunduğu (x_i, y_i) koordinatında bir birim değere sahiptir, ancak j (x_j, y_j) ve m (x_m, y_m) düğümlerinde sıfırdır.



Şekil 4.4 Üçgen elemanın alan koordinatı

Alternatif olarak lineer üçgen eleman için şekil fonksiyonu alan koordinatları kullanılarak basitleştirilebilir. Şekil 4.4'e göre L_1, L_2 ve L_3 koordinatları,

$$L_1 = \frac{A_1}{A} \tag{4.37}$$

$$L_2 = \frac{A_2}{A} \tag{4.38}$$

$$L_3 = \frac{A_3}{A} \tag{4.39}$$

eşitlikleri kullanılarak belirlenir. Burada "A" 123 üçgeninin alanını, "A_1" P23 üçgeninin alanını, "A_2" P31 üçgeninin alanını ve "A_3" de P12 üçgeninin alanını ifade etmektedir. Üç alanın koordinatının toplamı 1'e eşittir.

$$L_1 + L_2 + L_3 = 1 \tag{4.40}$$

L_i, i düğümünde bir birim değere sahiptir ancak diğer düğümlerde lineer bir değişimle değeri sıfır olmaktadır. Buradan hareketle, alan koordinatları olan L_1, L_2 ve L_3'ün lineer şekil fonksiyonları olan N_1^e, N_2^e ve N_3^e ile özdeş olduğu görülmektedir. Kartezyen koordinat sisteminde (x, y) için diğer bir ifade,

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \tag{4.41}$$

şeklindedir. Üçgen elemanlar kullanılarak yapılan sonlu elaman analizinde üçgen üzerinde entegrasyon sağlayan ifade,

$$\int_\Omega L_1^a L_2^b L_3^c d\Omega = \frac{a!b!c!}{(a+b+c+2)!} 2A \tag{4.42}$$

olmaktadır. Her bir eleman için iletkenlik matrisi,

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega e} [\frac{\partial N_i^e}{\partial x} k \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} k \frac{\partial N_j^e}{\partial y}] dxdy = \int_{\Omega e} \frac{k}{4A^2} [c_i c_j + d_i d_j] d\Omega = \frac{k}{4A} [c_i c_j + d_i d_j] \tag{4.43}$$

ifadesi kullanılarak belirlenir. Eleman matrisinin tam ifadesi,

$$K^e = \frac{k}{4A} \begin{bmatrix} c_1c_1 + d_1d_1 & c_1c_2 + d_1d_2 & c_1c_3 + d_1d_3 \\ c_2c_1 + d_2d_1 & c_2c_2 + d_2d_2 & c_2c_3 + d_2d_3 \\ c_3c_1 + d_3d_1 & c_3c_2 + d_3d_2 & c_3c_3 + d_3d_3 \end{bmatrix} \tag{4.44}$$

olur. Burada K^e matrisinin simetrik olduğu açıkça görülmektedir. Elemanın yüklenme vektörü iki kısımdan oluşur. Bunlar,

$$f^e = f_Q^e + f_q^e \tag{4.45}$$

şeklinde gösterilir. Burada,

$$f_Q^e = Q\int_{\Omega e}\begin{bmatrix} N_i^e \\ N_j^e \\ N_m^e \end{bmatrix} d\Omega = \frac{QA}{3}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.46}$$

ve

$$f_q^e = -q\int_{\Gamma_q^e} N^e d\Gamma \tag{4.47}$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Üçgenin ij kenarında ısı akısı şeklinde ve q büyüklüğünde bir sınır koşulu varsa,

$$f_q^e = f_{q_{ij}}^e = -q\int_{\Gamma_{ij}^e}\begin{bmatrix} N_i^e \\ N_j^e \\ 0 \end{bmatrix} d\Gamma = \frac{-qL_{ij}}{2}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.48}$$

eşitliği yardımıyla ifade edilir. Burada L_{ij} elemanın ij kenarının uzunluğunu göstermektedir.

BÖLÜM 5

COMSOL MULTIPHYSICS PROGRAMI

Comsol Multiphysics programı, birçok bilim ve mühendislik dalında kullanılan, çeşitli problemlerin modellendiği ve çözümlerinin yapılabildiği bir fiziksel simülasyon programıdır. Programın kullanıldığı bazı alanlar şu şekilde sıralanabilir:

- Akustik
- Biyomühendislik
- Elektrokimya
- Elektromanyetik
- Jeofizik ve jeomekanik
- Isı transferi
- Mikro elektromekanik sistemler (MEMS)
- Mikrodalga mühendisliği
- Optik
- Yarıiletken cihazlar

Birçok farklı alanda modelleme yapma imkanı sunan programda çok sayıda fiziksel arayüz bulunmaktadır. Elektrik mühendisliği alanında gerçekleştirilen çalışmalar için daha çok “AC/DC” ve “Heat Transfer” gibi modüller kullanılmaktadır.

5.1 AC/DC Modülü

Bu modülde bulunan model seçeneklerinden “Electrostatics” ile elektrik alan analizi ve “Magnetic Fields” ile de manyetik alan analizi yapılabilir. Oluşturulan fiziksel modellerin frekans domeninde, zamana bağlı veya statik durumları için analizleri gerçekleştirilebilir.

Her model seçeneğinde farklı malzeme özellikleri ve sınır koşullarının belirtilmesi gerekmektedir. Elektrik alan analizinde tanımlanan malzemelerin bağıl dielektrik sabitlerinin programa girilmesi yeterli olmaktadır. Manyetik alan analizinde ise malzemelerin bağıl dielektrik sabiti, elektriksel iletkenliği (S/m) ve bağıl manyetik geçirgenliği değerleri istenmektedir. Program, modellerin detaylı bir biçimde incelenebilmesi için birçok ayrıntılı sınır koşulu tanımlama imkanı sunmaktadır. Şekil 5.1’de elektrik alan ve manyetik alan analizlerinde kullanılabilecek sınır koşulları verilmiştir.



(a) (b)

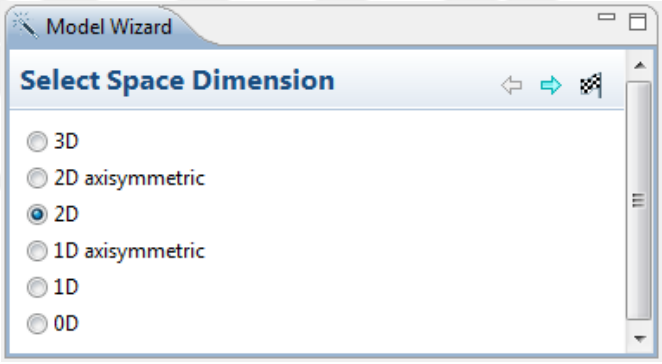
Şekil 5.1 Kullanılabilecek sınır koşulları; a) Elektrik alan, b) Manyetik alan.

5.2 Isı Transfer Modülü

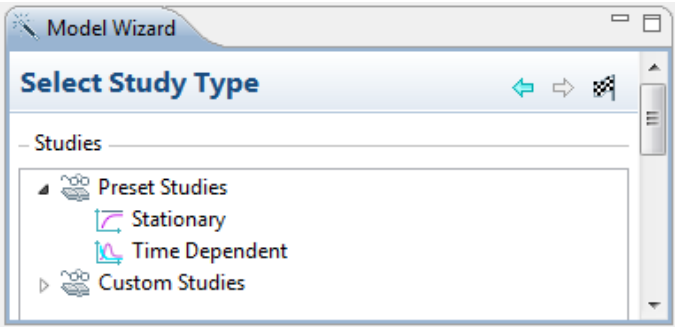
Isı transfer modülü, ısı kaynağında üretilen ısının modelde bulunan malzemelerin ısıl özelliklerine bağlı olarak oluşturduğu sıcaklık dağılımının incelenmesi için kullanılır. Bu

modül ile bir kablodan iletilen akımın neden olduğu ısı üretim miktarının değeri programa girilerek kablo sisteminin sıcaklık dağılımı veya belli bir sıcaklık değerindeki ısı üretim değeri programdan alınarak kablo akımı hesaplanabilir. Akımın oluşturduğu ısı kablo iletkeninde maksimum işletme sıcaklığının oluşmasını sağlıyor ise bu akım değeri akım taşıma kapasitesidir. Yüksek gerilim yer altı kablolarının ısıl açıdan incelediği bu çalışmada, programın ısı transfer modülü kullanılmıştır.

Comsol Multiphysics programında model oluşturulurken ilk olarak incelenecek geometrinin boyutu tanımlanır. Şekil 5.2'de programda kullanılabilecek model boyutları verilmiştir. Modelin boyutu belirlendikten sonra modül ve modül alt seçeneği tanımlanır. Isıl modelleme iki boyutlu (2D) koordinat sisteminde gerçekleştirilmiştir. Isı transfer modülünün kararlı ve zamana bağlı değişmeyen sıcaklık verilerinin alındığı seçenek olan "Stationary" kullanılmıştır. Bu seçeneğin nasıl atanacağı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



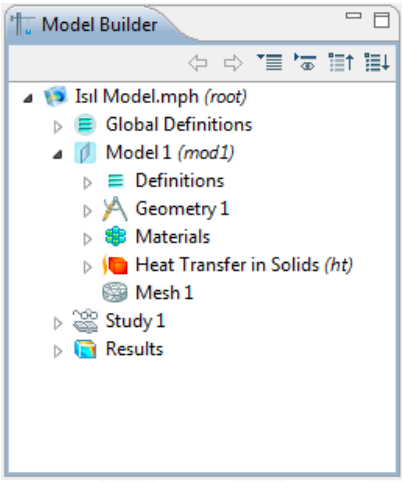
Şekil 5.2 Koordinat sistemi seçenekleri



Şekil 5.3 Isı transfer modeli için çalışma domenleri

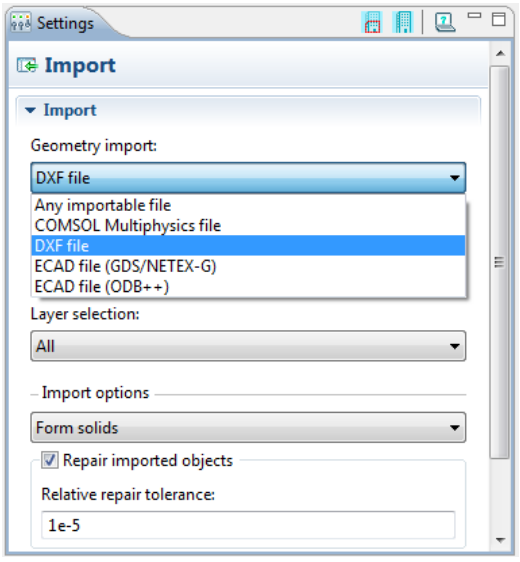
Koordinat sistemi ve çalışma domeni belirlendikten sonra modelin malzeme, geometrik ve fiziksel özelliklerinin tanımlanacağı sekme açılır. Şekil 5.4'te ısıl modeli oluşturmak

için tanımlanacak parametreler verilmiştir. Burada, “Definitions” kullanılarak modelin fiziksel özellikleri için kullanılacak değişkenler ve fonksiyonlar tanımlanabilir.



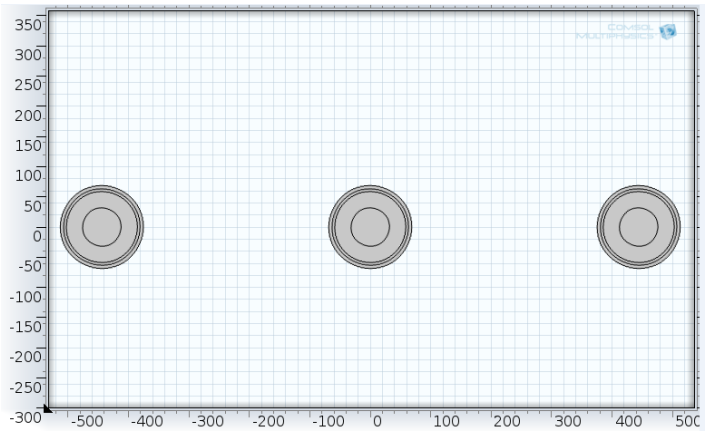
Şekil 5.4 Isıl modelin oluşturulması

Modelin geometrisi Comsol Multiphysics programında çizilebildiği gibi başka çizim programlarında oluşturulan geometriler de programa yüklenebilir. Şekil 5.5’te Comsol Multiphysics programına geometrik çizim yüklemek için kullanılabilecek dosya türleri verilmiştir. Geometri yüklenirken tolerans değeri çalışma hassasiyetinin yükseltilmesi amacıyla mümkün olduğunca küçük seçilmelidir.



Şekil 5.5 Geometrik çizim yüklemek için kullanılabilecek dosya türleri

Model için kablo kesit değerleri ve incelenen sistem alanının boyutları girilerek kablo sisteminin geometrisi tanımlanır. Şekil 5.6’da yatay olarak yan yana yerleştirilmiş üç adet tek damarlı kablodan oluşan sistemin geometrik çizimi verilmiştir.



Şekil 5.6 Üç kablonun geometrik çizimi

Oluşturulan kablo sisteminde kullanılmak üzere malzemelerin özellikleri girilir. Şekil 5.7'de gösterildiği üzere analiz için gerekli malzeme özellikleri ısıl iletkenlik (W/K.m), yoğunluk (kg/m^3) ve sabit basınçtaki ısıl kapasite değeri (J/kg.K)'dir.

Material Contents

	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Heat capacity at constant pr...	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Basic
✓	Density	rho	8700[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
✓	Thermal conductivity	k	400[W/(m*K)]	W/(m·K)	Basic

Şekil 5.7 Malzeme özellikleri

Comsol Multiphysics programı sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapmaktadır. Bu nedenle ısıl modelde sınır koşulları belirlenir. Isıl analiz için sistemin yan ve alt sınırlarına sabit sıcaklık değerleri, toprak yüzeyi için ise konvektif ısı transferi tanımlanmıştır. Sıcaklık ve konvektif ısı transferi sınır koşullarının dışında özel durumlarda kullanılabilecek sınır koşulları da bulunmaktadır. Kablo iletkenleri de ısıl kaynak olarak alınmıştır. Bu modülde kullanılabilecek sınır koşulları:

- Isıl kaynak (Heat source) : Modelin bir bölgesindeki ısı üretimini tanımlamak için kullanılır ve üç farklı şekilde uygulanabilir:

  a)Genel kaynak: [W/m^3] cinsinden "Q" büyüklüğünde hacimsel ısı üretimi.

  b)Lineer kaynak: $Q = q_s.T$ (q_s: Absorbsiyon katsayısı [W/m^3.K]).

  c)Toplam güç: Girilen kalınlığa bağlı olarak hacimsel ısı üretimini hesaplar.

  $Q = P_{tot}/V$ [W] (d_z: Kalınlık [m])

- Isıl izolasyon (Thermal insulation) : Bütün ısı transferi modelleme seçeneklerinde kullanılan bir sınır koşuludur. Bu sınır koşulu sınırdan dışarıya herhangi bir ısı akısının olmadığını tanımlar.

  $n.(k\nabla T) = 0$ (n: Sınırın normal vektörü, k: Isıl iletkenlik (W/m.K))

- Sıcaklık (Temperature) : Model üzerinde seçilen bir bölgede sınır koşulu olarak bir sıcaklık (T) değeri uygulamak için kullanılır.

- Outflow (Dış sınır) : Bu koşul daha çok taşınımla ısı transferinin gerçekleştiği modellerde dış sınırlar için kullanılır. Belirtilen sınır için sadece konveksiyon yoluyla ısı transferinin gerçekleştiğini tanımlar. Sıcaklığın büyüklüğü sıfırdır ve ışınımla ısı tranferi yoktur. Sıvı akışının olduğu bir ısı transfer incelemesinde iyi bir sınır koşulu yaklaşımıdır.

  $-n.(-k\nabla T) = 0$

- Simetri (Symmetry) : Simetrik sınırların bulunduğu durumda bir sınır koşulu sağlar. "Isıl izolasyon" sınır koşuluna benzer, ancak sınırda hiçbir ısı akısının olmadığını gösterir.

- Isı akısı (Heat flux) : Sınırda bir ısı akısı tanımlar. Modelin iç sınırları için uygun bir sınır koşulu değildir. Üç farklı şekilde tanımlanabilir:

  a)İçe dönük oluşan genel ısı akısı (General inward heat flux) [W/m^2]

  b)İçe doğru ısı akısı (Inward heat flux) : $q_0 = h.(T_{ext} - T)$

  (h: Konvektif ısı transfer katsayısı [$W/(m^2.K)$], T_{ext}: Dış sıcaklık [T])

  c)Toplam ısı akısı (Total heat flux) : [W] cinsinden toplam ısı akısının büyüklüğü (q_{tot}) girilir.

  $-n.(-k\nabla T)=q_0$ (q_0: Isı akısı (W/m^2))

- Yüzey-ortam arasında oluşan ışınımla ısı transferi (Surface-to-ambient radiation): Modelin yüzeyinden dış ortama ışınım (radyasyon) yoluyla gerçekleşen sınır koşulu tanımlanır. Yüzeyden ortama net ısı akısı,

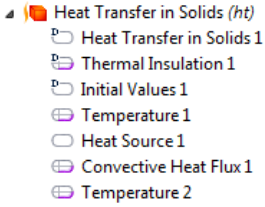
$q=\varepsilon\sigma(T_{amb}^4-T^4)$ (ε : Yüzey emisyonu (0-1), σ : Stefan-Boltzman sabiti (5.67×10^{-8} W/m^2K^4), T_{amb} : Ortam sıcaklığı)

- Isıl kaynak (Boundary heat source) : Sınırda bulunan bir ısı kaynağı veya soğutucu etki yapan bir kaynak tanımlanabilir. Tanımlama iki şekilde yapılabilir:

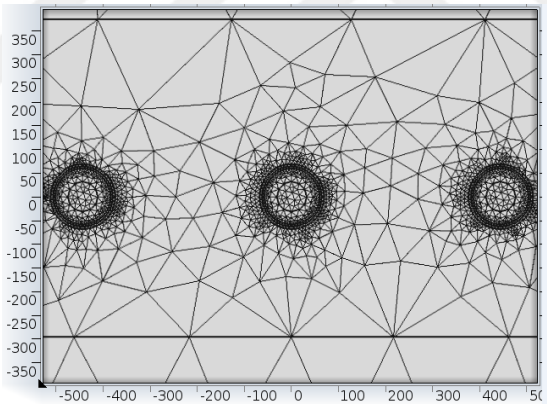
  a)Genel kaynak (General source) : W/m^2 cinsinden ısı üretimi girilir.

  b)Toplam güç (Total boundary power) : [W] cinsinden toplam güç ve dz kalınlığı da [m] cinsinden girilir ve buna göre hacimsel ısı üretimi hesaplanır.

Şekil 5.8'de ısı transferi için temel kabuller ve tanımlanan sınır koşullar gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Isıl analizde kullanılan sınır koşulları

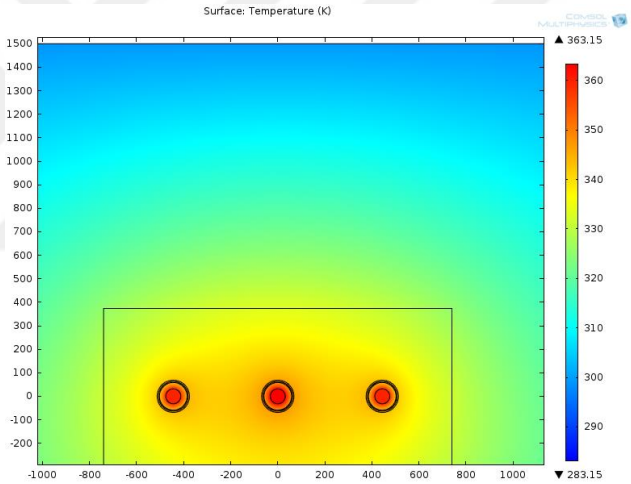


Şekil 5.9 Modelin ağ örgüye ayrılması

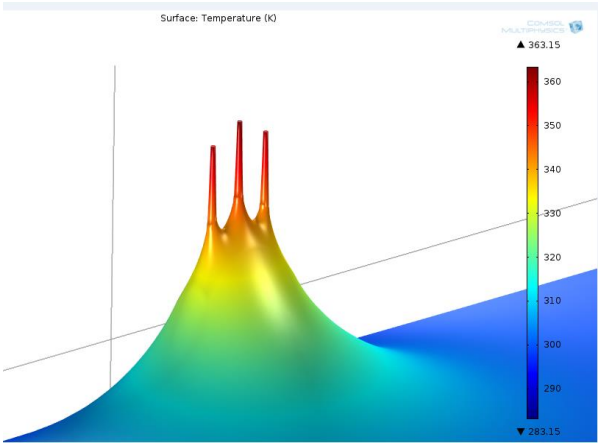
Tüm sistem alanı üçgen elemanlardan oluşan ağ örgüye ayrıştırılır. Ağ örgüdeki eleman sayısı alınacak verilerin doğruluğunu etkilemektedir. Bu nedenle yeterli sayıda elemana ayrılmış sık bir ağ örgüsü oluşturulmalıdır. Aynı zamanda, geometri üzerindeki herhangi bir bölgenin eleman yoğunluğu da bölgesel olarak ayarlanabilir. Ancak, eleman sayısı arttıkça, bununla doğru orantılı olarak çözüm süresi de uzamaktadır. Bu nedenle, büyük geometrilerde üçgen eleman yoğunluğunu önemli bölgelerde sık kullanırken, diğer kısımlarda yoğunluğu azaltmak süre ve alınacak verilerin hassasiyeti bakımından elverişli olacaktır. Kablo sistemlerinin ısıl analizinde, kablonun sıcaklık değişiminin

incelenmesi ve kablonun ısıl kaynak olması nedeniyle kablo katmanlarında ve kablo civarında sık bir ağ örgü oluşturulmalıdır. Dış sınırlara yakın bölümlerin büyük üçgen elemanlara ayrılması ise alınacak verilerin değerini kayda değer bir biçimde değiştirmemektedir. Şekil 5.9'da oluşturulan ağ örgü gösterilmiştir. Oluşturulan modelde sistem alanı 11552 üçgen elemana ayrılmıştır.

Program belirtilen sınır koşullara ve ısı üretimine bağlı olarak ısıl problemi çözümler ve sistemin sıcaklık dağılımını verir. Şekil 5.11'de iki boyutlu ve Şekil 5.12'de 3 boyutlu olarak kablo sisteminin yüzey sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Programda oluşturulan modelden elde edilen ve ihtiyaç duyulan verilerin iki ve üç boyutlu grafiksel çizimleri veya skaler olarak değerleri alınabilir. Aynı zamanda model geometrisi üzerindeki herhangi bir noktadan, bölgeden veya kenardan elde edilen veriler de statik olarak veya zamana bağlı olarak incelenebilir.



Şekil 5.10 Kablo sisteminin iki boyutlu sıcaklık dağılımı



Şekil 5.11 Kablo sisteminin üç boyutlu sıcaklık dağılımı

BÖLÜM 6

SAYISAL UYGULAMA VE ANALİZLER

XLPE yalıtkanlı yer altı kabloları için maksimum işletme sıcaklığı 90 ˚C (363.15 K)'dir. Bu sıcaklık seviyesinde kabloların taşıdığı akım değeri kablonun akım taşıma kapasitesi (ampasite) olarak isimlendirilmektedir. Yüksek gerilim yer altı kablolarının akım taşıma kapasiteleri kablo malzemelerinin ve kablo aksesuarlarının ısıl özellikleri, kabloların döşenme biçimi ve çeşitli ortam koşullarına bağlı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada, kablo iletken sıcaklığını değişen ortam ve döşeme koşulları ile farklı ekranlama durumlarında karşılaştırabilmek amacıyla bazı referans parametre değerleri belirlenmiştir. Kabloların döşeme derinliğinin 1.5 m, ısıl iletkenliklerin toprak için 1 W/K.m ve yatak malzemesi için ise 1.429 W/K.m olması referans koşulu oluşturmaktadır. Bu koşullar altında ortadaki kablo iletkeninin maksimum işletme sıcaklığı olan 363.15 K'e ulaşması durumunda ürettiği ısıya bağlı olarak akım taşıma kapasitesi 1775 A olarak hesaplanmıştır.

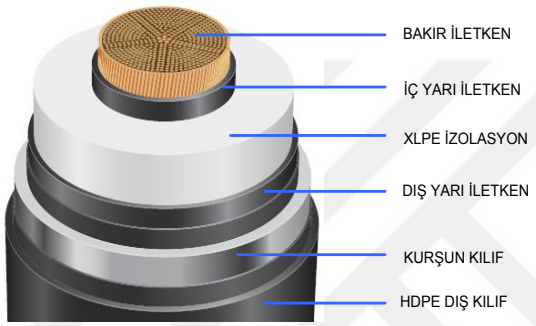
Yer altı kablolarından geçen akımla birlikte bir manyetik alan oluşmaktadır. Güç kablolarının oluşturduğu bu manyetik alanı azaltmak için kabloların çevresinde çeşitli ekranlama teknikleri ve ekran tipleri kullanılır. Ekranlamanın temel amacı oluşan manyetik alanı azaltmak olsa da, kablo etrafındaki ekranın meydana getirdiği ısıl etki de yer altı kabloları açısından incelenmesi gereken önemli konulardan biridir.

Kullanılan ekranlama tipi, ekran malzemesi ve malzemenin et kalınlığının yanı sıra yer altı kablosunda kullanılan malzemeler, kablonun geometrik özellikleri ve döşenme biçimi ekranlamanın oluşturduğu ısıl etki açısından farklılıklar oluşturan parametrelerdir.

Bu bölümde, yatak malzemesinin ısıl iletkenliği, toprağın yüzey sıcaklığı, kabloların gömülme derinliği gibi ortam parametreleri ve farklı ekran tiplerinin kablolar üzerindeki ısıl etkisi analiz edilmiş ve sıcaklığa bağlı olarak kabloların ampasite değerlerinde gerçekleşen değişimler belirlenmiştir.

6.1 Sistem Tanıtımı

Şekil 6.1'de analizlerde kullanılan bakır iletkenli, XLPE yalıtkanlı, kurşun kılıflı ve HDPE dış kılıfa sahip 220/380 (420) kV'luk bir yüksek gerilim yer altı kablosunun kesiti gösterilmiştir.



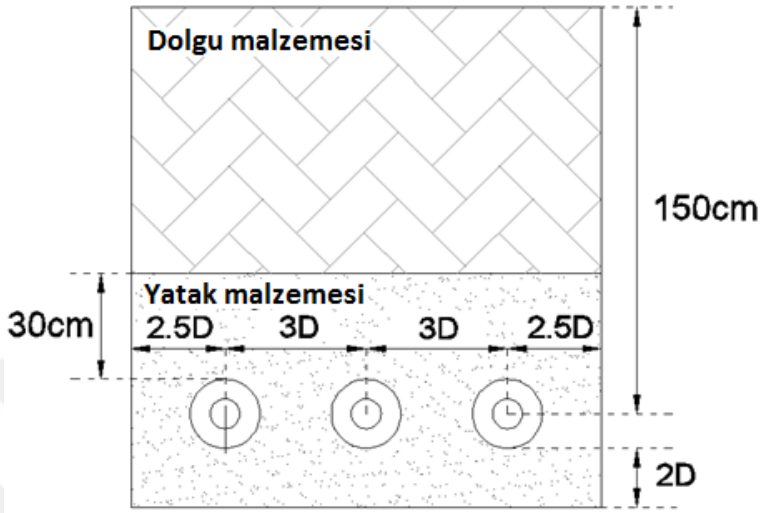
Şekil 6.1 380 kV'luk yüksek gerilim yer altı kablosunun kesiti

Çizelge 6.1'de incelenen yer altı kablosunun katmanlarının termal ve geometrik özellikleri verilmiştir.

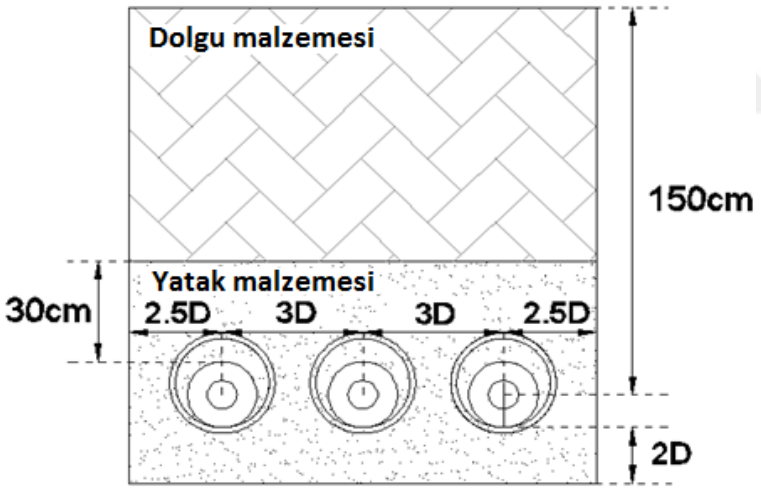
Çizelge 6.1 Kablo malzemelerinin ısıl ve geometrik özellikleri

Kablo özellikleri	
Bakır iletkenin çapı (mm)	63.5
Bakır termal iletkenlik (W/K.m)	400
Mak. DC Cu iletken direnci (ohm/km)	0.0072
XLPE izolasyon kalınlığı (mm)	27
XLPE termal iletkenlik (W/K.m)	0.2857
Kurşun kılıf kalınlığı (mm)	4.4
Kurşun termal iletkenlik (W/K.m)	35
HDPE dış kılıf kalınlığı (mm)	5.5
HDPE termal iletkenlik (W/K.m)	0.48
Kablo çapı (mm)(D)	148

Şekil 6.2'de 3 adet tek damarlı, 220/380 kV'luk yer altı kablosunun yatak malzemesinin içerisine direkt olarak döşendiği durum gösterilmiştir. Şekil 6.3'te ise kabloların her birinin 275 mm dış çapa ve 250 mm iç çapa sahip HDPE borular içerisine yerleştirildiği durumdaki kablo sisteminin döşenme şekli verilmiştir.

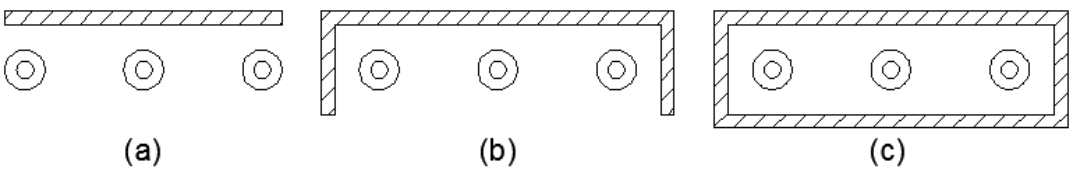


Şekil 6.2 Kabloların direkt döşenmesi



Şekil 6.3 Kabloların boru içerisine alınarak döşenmesi

Şekil 6.4'te kablolar üzerindeki ısıl etkileri incelenen farklı tipteki ekranların geometrik yapıları gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Ekran tipleri; a) Yatay, b) Ters-U, c) Kapalı

Farklı ekran tipleri ile birlikte farklı ekran malzemeleri için de analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.2'de gerçekleştirilen çalışmada incelenen ekran malzemelerinin ısıl direnç, hacimsel ısıl kapasite ve yoğunluk gibi ısıl alana etki eden özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.2 Ekran malzemelerinin özellikleri

Malzeme	*p*(K.m/W)	C_p(J/kg.K)	rho(kg/m^3)
Bakır	0.0025	385	8700
Alüminyum	0.00625	900	2700
Yapıçeliği	0.02247	475	7850

6.2 Yöntem

6.2.1 Isı Transferi ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, kablo sisteminde oluşan ısıl dağılım iki boyutlu ısı transfer modeli kullanılarak elde edilmiştir. Kararlı durumdaki ısı iletim eşitliği [48],

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+Q=\rho C_P\frac{\partial T}{\partial t} \tag{6.1}$$

olarak verilmektedir. Burada Q(W/m^3) hacimsel ısı üretimini, T(K) sıcaklığı, *p*(kg/m^3) malzemelerin yoğunluklarını, C_p(J/kg.K) malzemelerin sabit basınçtaki özgül ısıl kapasitelerini, t(s) zamanı, k(W/m.K) malzemelerin termal iletkenliklerini ve x ile y ise koordinatları ifade etmektedir.

Kablo sisteminin sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile ısıl analizinin yapılabilmesi için belirlenen sınır koşulları,

$$T=T_{soil} \tag{6.2}$$

$$k\frac{\partial T}{\partial n}=h(T-T_\infty) \tag{6.3}$$

ifadeleri yardımıyla belirlenmektedir. Burada, h konvektif ısı transfer katsayısını (W/m^2.K), T(K) toprak yüzeyinin sıcaklık değerini ve T_∞ konvektif ısı değişimini ifade etmektedir.

Hesaplama, modelleme ve analizlerin sağlıklı yapılabilmesi için bazı kabullere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

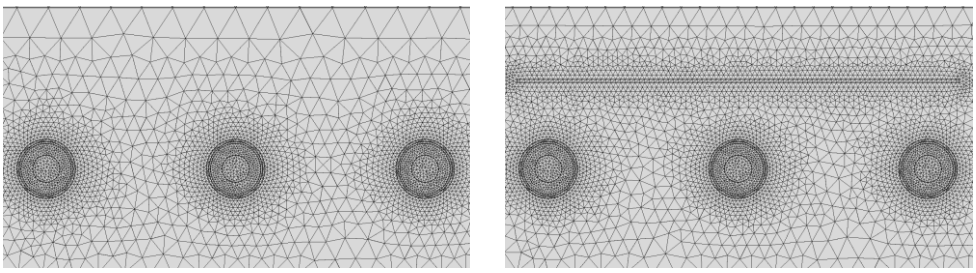
- Işınım(radyasyon) yoluyla oluşan ısı transferi ihmal edilmiştir.
- Bütün malzemeler sabit ısıl iletkenlik ve hacimsel ısıl kapasite değerlerine sahiptir.
- İki boyutlu kablo sisteminin alt ve yan sınırları için kablolardan 15 m uzaklıktaki sıcaklık değeri 15 C˚(288.15 K) olarak belirlenmiştir.
- Toprak yüzeyinde konvektif ısı transferinin oluştuğu ve dış sıcaklığın 25 C˚ (298.15K) olduğu kabul edilmiştir.

ısı transfer katsayısı [14],

$$h = 7,371 + 6,43v^{0,75} \tag{6.4}$$

ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır. Burada v (m/s) rüzgar hızını ifade etmektedir. Rüzgar hızının 2.5 m/s olduğu kabul edilerek, ısı transfer katsayısı 20.155 W/m^2.K olarak belirlenmiştir.

Sınır koşullarının model üzerinde ilgili bölgelere tanımlanmasının ardından ağ örgü üreteci ile sistem alanı üçgen elemanlara ayrılmıştır. Elemanların boyutu ve geometrinin farklı bölgelerindeki eleman sıklığı değiştirilebilmektedir.



(a) (b)

Şekil 6.5 Elde edilen ağ örgüleri; a) Ekransız durum, b) Ekranlı durum

Yukarıda belirtilen kabuller yapılarak oluşturulan modelde, ekransız durumda sistem alanı 11552 üçgen elemana ayrılmıştır. Eleman sayısı arttıkça, alınacak sıcaklık verilerin

hassasiyeti artmaktadır. Ancak aynı zamanda çözüm süresi de uzamaktadır. Bu nedenle eleman sayısı belirlenirken bu iki parametre göz önüne alınarak optimum sayı belirlenmeye çalışılmıştır. Farklı tip ve ölçülerde ekranlar uygulandığında aynı çözüm bölgesindeki toplam eleman sayısı değişkenlik göstermektedir. Şekil 6.5'te ekransız durum ve kabloların merkezinin 10 cm üzerinde 8 mm kalınlığında yatay ekran kullanıldığı durum için elde edilen ağ örgüler gösterilmiştir.

6.2.2 Yer altı Kablolarının Akım Taşıma Kapasitelerinin Hesaplanması

Gerçekleştirilen çalışmada, kabloların akım taşıma kapasitesi (ampasite) farklı döşeme koşulları ve farklı ekran tiplerinin kullanıldığı durumlar için hesaplanmıştır. Bunun için maksimum işletme sıcaklığında kablo iletkeninin hacimsel ısı üretim verileri kullanılmıştır. Gerekli olan kablo iletkeni AC direnç değerleri IEC 60287 1-1 standardına göre belirlenmiştir. Kablo iletkeninin maksimum işletme sıcaklığındaki DC direnç değeri,

$$R^{'} = R_0[1+\alpha_{20}(\theta-20)] \tag{6.5}$$

ifadesi ile elde edilir. Burada R_0 (Ω/m) iletkenin 20 C°'deki DC direnç değerini, α_{20} (1/K) sıcaklık katsayısını ve θ (C°) ise maksimum işletme sıcaklığını ifade etmektedir. AC direnç değerini hesaplamak için kullanılan ifade,

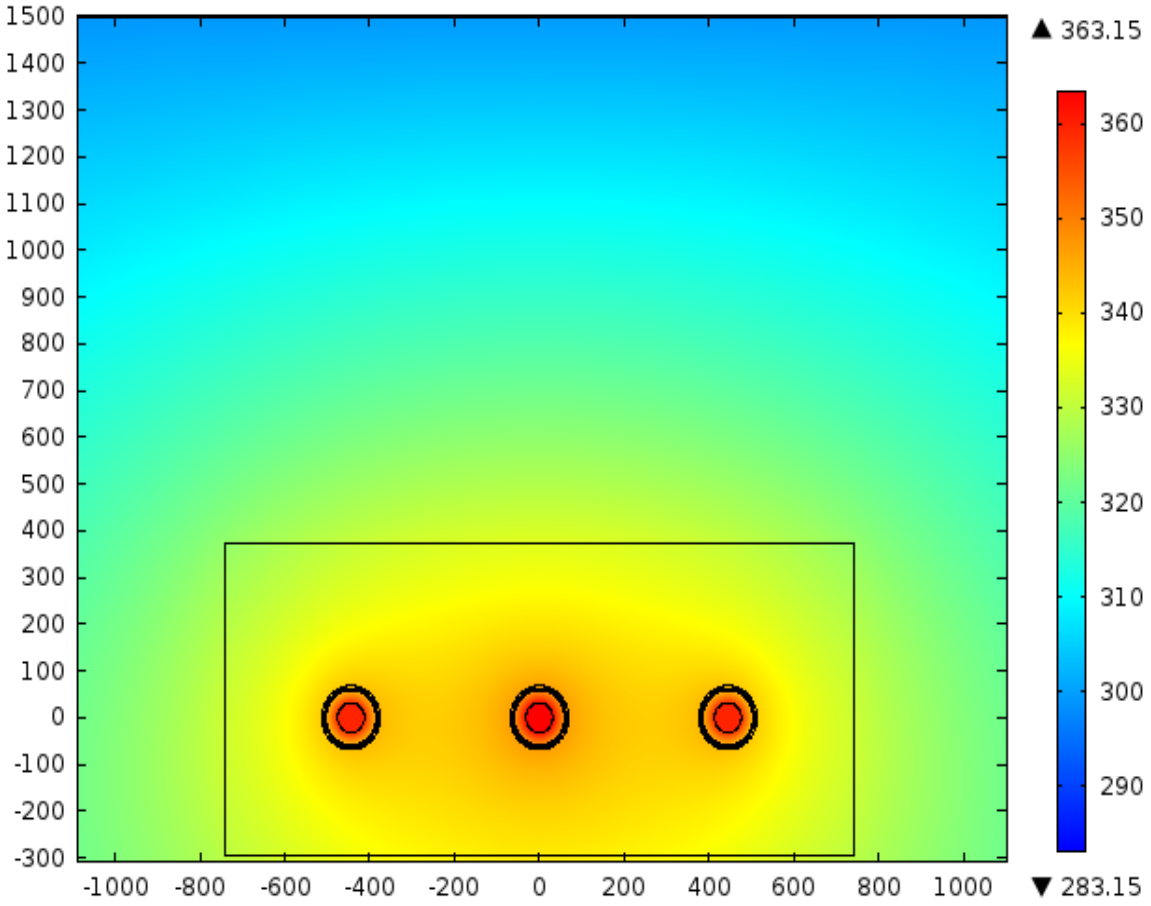
$$R = R^{'}(1+y_s+y_p) \tag{6.6}$$

şeklindedir. Burada y_s deri etkisi faktörünü ve y_p yakınlık etkisi faktörünü göstermektedir. Dielektrik ve kılıf kayıpları, joule kayıplarına göre oldukça küçük değerlerde olmalarından dolayı hesaplamalarda ihmal edilmiştir.

6.3 Döşeme ve Ortam Koşullarının Kablo Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri

Genellikle kablo iletken sıcaklığı akımın büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. İzolasyon malzemesi olarak XLPE kullanılan yer altı kablolarında maksimum işletme sıcaklığı 363.15 K (90 ˚C) olarak kabul edilmektedir. Bu sıcaklık değeri, izolasyonun en çok ısınan bölgesi olan iletkenle temas noktası için belirlenmiştir. Bundan dolayı kablo izolasyonu zarar görmeden, taşınabilecek en yüksek akım değerini arttırabilmek için bu sıcaklık değeri düşürülmelidir. Şekil 6.6'da kablolardan ekransız durumdaki akım taşıma

kapasitesi olan 1775 A büyüklüğünde bir akım geçtiğinde sistemde oluşan sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



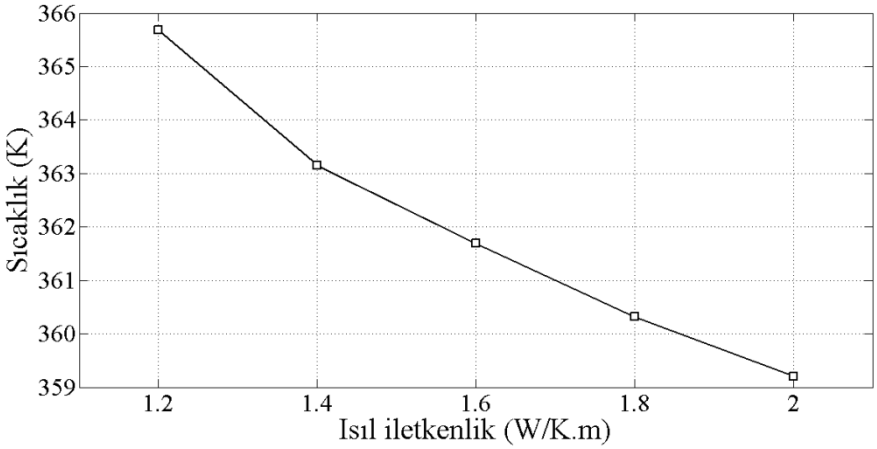
Şekil 6.6 Kabloların sıcaklık dağılımı

Gerçekleştirilen analizlerde, yan yana yerleştirilmiş üç kablodan, ortadaki kablonun aynı akım büyüklüğünde diğerlerine göre daha fazla ısındığı görülmüştür. Bu nedenle güçkabloları için yapılan ısıl analizlerde ortadaki kablo referans olarak alınmıştır.

6.3.1 Sıcaklık Analizleri

6.3.1.1 Yatak Malzemesi Isıl İletkenliğinin Sıcaklığa Etkisi

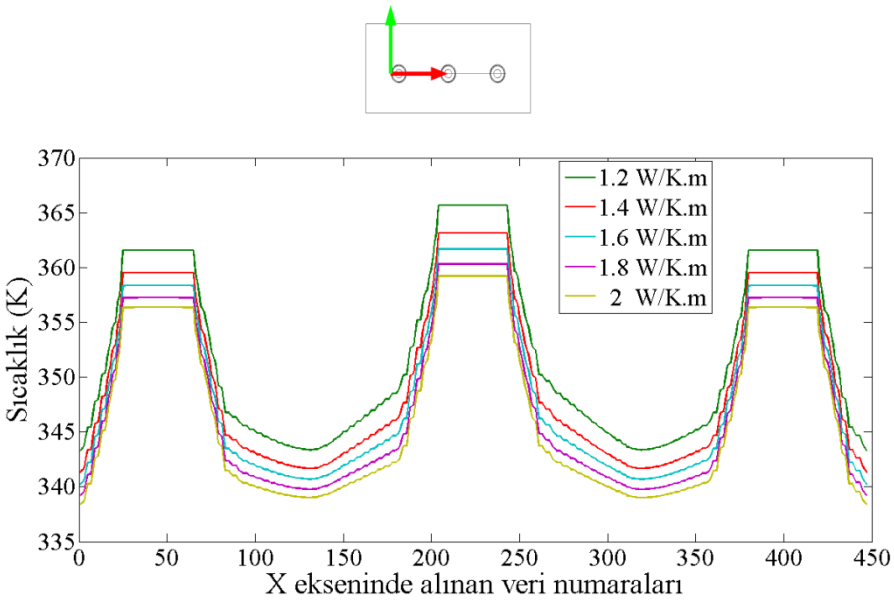
Yatak malzemesi kabloların döşenme düzeni bakımından kablolar ile direkt temas halindedir. Bu yüzden yatak malzemesinin ısıl iletkenliği, kablo sıcaklığı üzerindeki etkisi sebebiyle oldukça önemlidir. Şekil 6.7'de kabloların 1775 A akım taşıdığı kabul edilerek, ısıl iletkenlikleri farklı olan yatak malzemeleri kullanılması durumlarında oluşan sıcaklık değerleri verilmiştir.



Şekil 6.7 Yatak malzemesinin ısıl iletkenliğinin kablo iletken sıcaklığı üzerindeki etkisi

Yatak malzemesinin ısıl iletkenliği arttıkça kablo iletken sıcaklığı azalmaktadır. Isıl iletkenliği 1.2 W/K.m olan bir yatak malzemesi yerine, ısıl iletkenliği 2 W/K.m olan bir yatak malzemesi kullanılması durumunda kablo iletken sıcaklığı yaklaşık olarak 6.5 K azalacaktır. Bu durumda kablonun XLPE yalıtkanı daha az zorlanır ve kablonun akım taşıma kapasitesi yükselir.

Şekil 6.8'de farklı yatak malzemesi ısıl iletkenlik değerleri için üç kablonun x eksenine göre kesitinden elde edilen sıcaklık değerleri verilmiştir. Buna göre en çok ısınan kablo diğer iki kablonun etkisiyle ortadaki kablodur. Kablo iletken sıcaklığının yanı sıra kabloların çevresi de üretilen ısıya bağlı olarak ortam koşullarından etkilenmektedir.

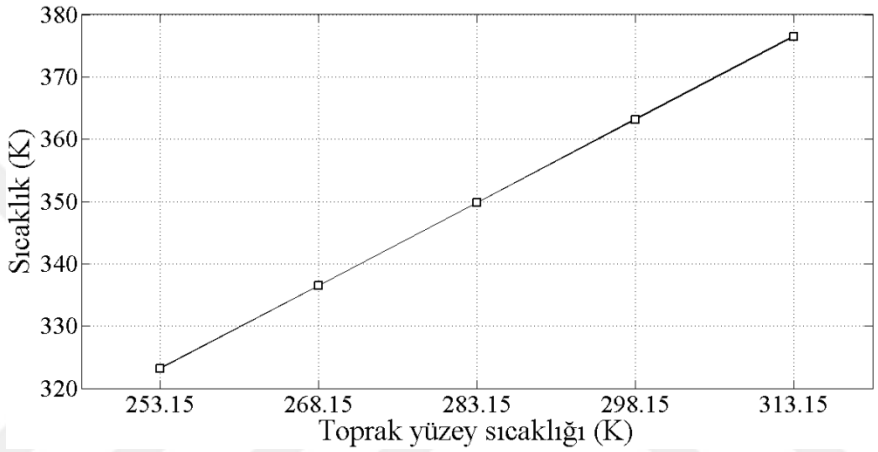


Şekil 6.8 Üç kablonun x ekseni referans alınarak farklı yatak malzemesi ısıl iletkenlikleri için elde edilen sıcaklık dağılımları

6.3.1.2 Toprak Yüzeyi Sıcaklığının Kablo Sıcaklığına Etkisi

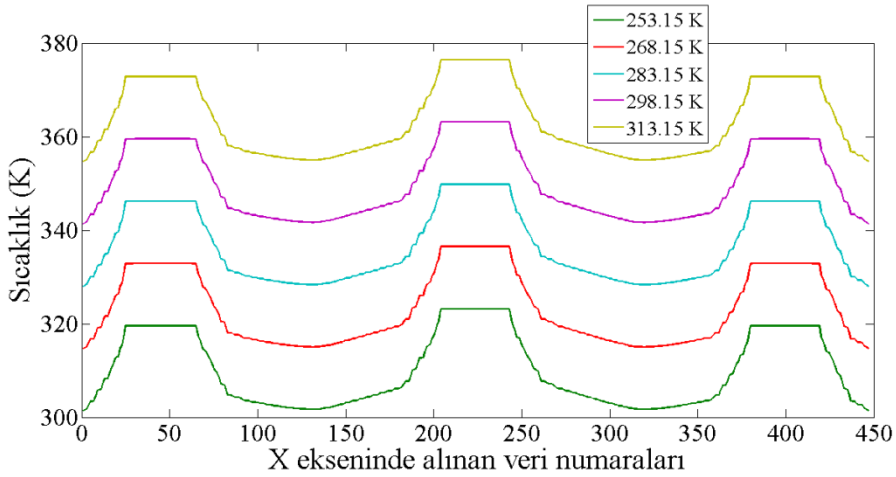
Toprak yüzeyinin sıcaklığı mevsimsel ve bölgesel koşullara göre değişkenlik gösteren bir ısıl parametredir. Bu nedenle yer altı kablolarının verimli bir şekilde işletilebilmesi için bu koşullar iyi analiz edilmelidir. Şekil 6.9'da kablolardan 1775 A akım taşınırken, farklı toprak yüzeyi sıcaklık değerlerinde elde edilen iletken sıcaklıkları verilmiştir.

Toprak yüzeyi sıcaklığındaki değişimlerin kablo iletken sıcaklığı üzerindeki etkisi yaklaşık olarak lineerdir. Buna göre toprak yüzeyi sıcaklığındaki her 15 K'lik azalma, kablonun iletken sıcaklığında da 13.38 K'lik bir düşüşe neden olmaktadır.



Şekil 6.9 Kablo iletken sıcaklığının toprak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişimi

Şekil 6.10'da üç kablonun merkezinden geçen x ekseni referans alınarak farklı toprak yüzeyi sıcaklık değerleri için elde edilen sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.

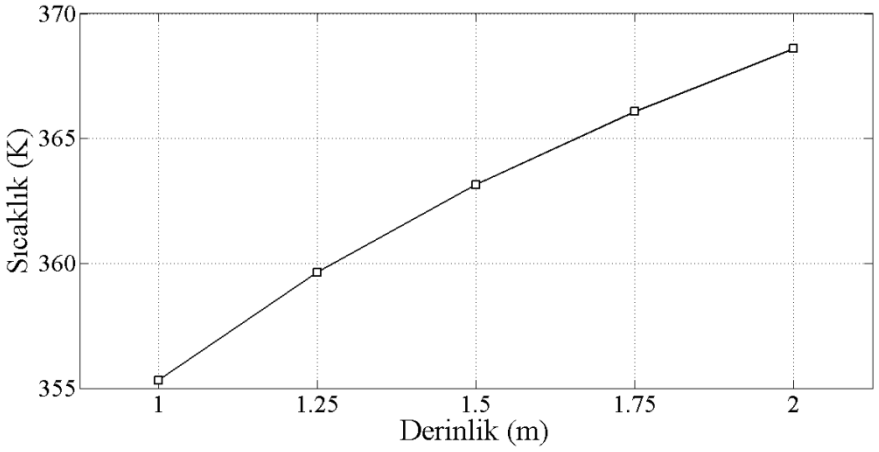


Şekil 6.10 Üç kablodan x ekseni referans alınarak farklı toprak yüzey sıcaklıkları için elde edilen sıcaklık dağılımları

Gerçekleştirilen bu çalışma, yer altı kablo sistemlerinde taşınabilecek akım/güç değerinin mevsimsel şartlardan etkilendiğini göstermektedir. Bu nedenle, kablo ömür kısalmalarının ve arızalarının önüne geçmek için yükleme değerlerinin mevsimsel şartlara göre kontrol edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yüksek gerilim, orta gerilim ve alçak gerilim yer altı kablo sistemlerinde gerçekleştirilecek analizler ile mevsimlere göre akım taşıma değerlerinin belirlenmesi ve sistemin elde edilen değerlere göre işletilmesi güç sistemlerinin sürekliliği, güvenirliliği ve ekonomik işletim açısından büyük önem arz etmektedir.

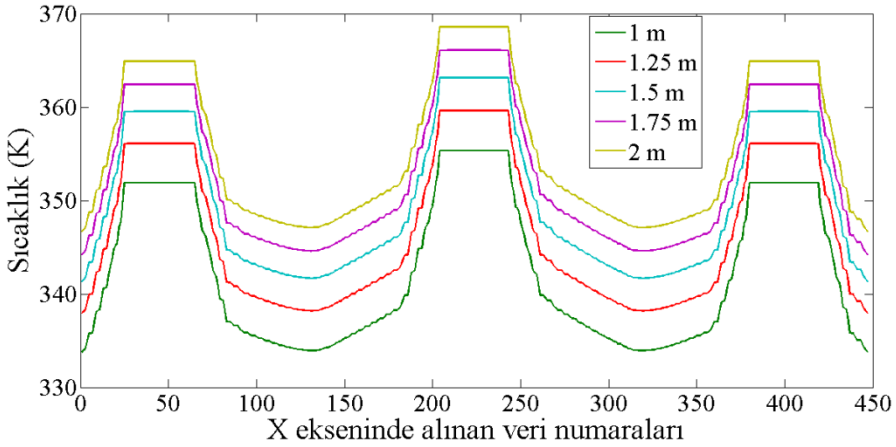
6.3.1.3 Kabloların Gömülme Derinliğinin Sıcaklığa Etkisi

Yüksek gerilim yer altı kablolarının gömülme derinliği kabloların ısınması bakımından önemli bir etkendir. Yer altı kabloları güvenlik sebebiyle toprak yüzeyine çok yakın seviyedeki derinliklere döşenmezler. Ancak, akım taşıma kapasitesinin saptanması açısından bu döşeme koşulu iyi analiz edilmelidir. Şekil 6.11'de akımın büyüklüğü 1775 A iken iletken sıcaklığının kablonun gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Kablo sisteminin gömülme derinliği arttıkça iletken sıcaklığı yükselmektedir. Kabloların 1 m ve 2 m derinliklere gömülmesi arasındaki sıcaklık farkı yaklaşık 13.3 K'dir.



Şekil 6.11 Kablo ampasitesinin gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi

Şekil 6.12'de kabloların merkezinden geçen x ekseni referans alınarak üç kablodan farklı döşeme derinliklerinde elde edilen sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.

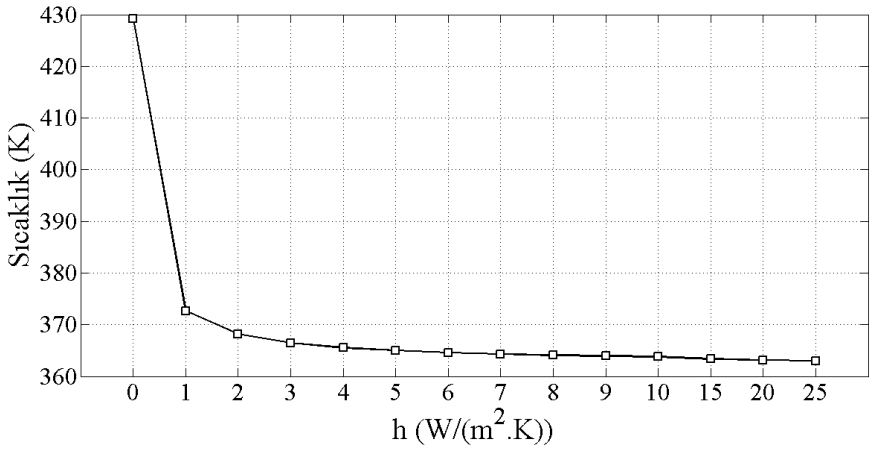


Şekil 6.12 Üç kablonun x ekseni referans alınarak farklı döşeme derinlikleri için elde edilen sıcaklık dağılımları

Çalışma sonucu elde edilen verilerden görüleceği üzere döşeme derinliğinin kablo sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır. Dış etkilere karşı daha derine gömülme sıcaklığı arttırmaktadır. Bu nedenle, dış etkilere karşı güvenlik ve sıcaklık değişimi göz önüne alınarak yer altı kablolarının optimum döşeme derinliğine gömülmesi gerekmektedir.

6.3.1.4 Konvektif Isı Transfer Katsayısının Değişiminin Sıcaklığa Etkisi

Oluşturulan modelde konvektif ısı transferi sınır koşulu toprak yüzeyi için belirlenmiştir. Toprak yüzeyinde rüzgarın hareketliliğinden etkilenerek gerçekleşen konvektif ısı transferinin büyüklüğü konvektif ısı transfer katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Toprak yüzeyindeki rüzgar hızına bağlı olarak hesaplanan bu katsayı değeri ise kablo sıcaklığının belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.

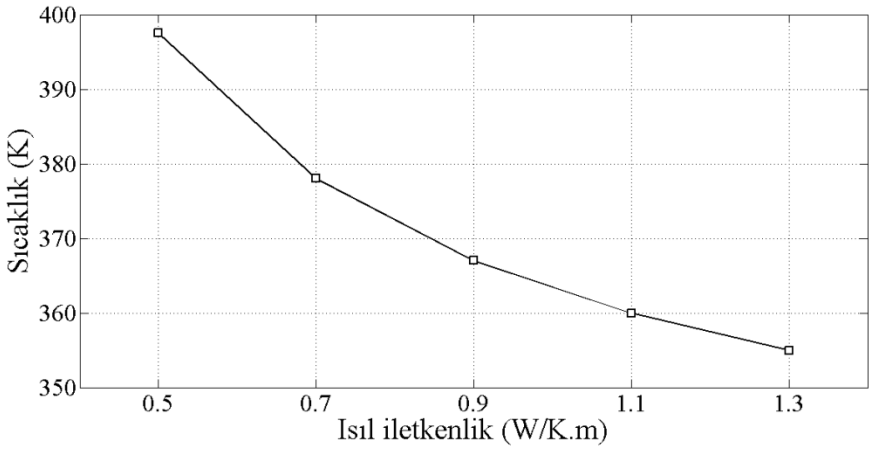


Şekil 6.13 Konvektif ısı transfer katsayısının sıcaklığa etkisi

Şekil 6.13'te kablodan 1775 A akım taşınması durumunda, farklı konvektif ısı transfer katsayıları için kablo iletken sıcaklığındaki değişim verilmiştir. Isı transfer katsayısının yükselmesi, kablo iletken sıcaklığını düşürmektedir. Kablo iletken sıcaklığındaki en önemli değişim ısı transfer katsayısının 0 değerinden 1 W/(m^2.K) değerine yükselmesi sırasında gerçekleşmektedir. Konvektif ısı transfer katsayısı yükseldikçe, kablo sistemi ve iletken sıcaklığı üzerindeki ısıl etkisi azalmaktadır. Öyle ki, katsayının 9 W/(m^2.K) değerinden 25 W/(m^2.K) değerine yükselmesi iletken sıcaklığını sadece 0.9 K azaltmaktadır.

6.3.1.5 Toprağın Isıl İletkenliğinin Sıcaklığa Etkisi

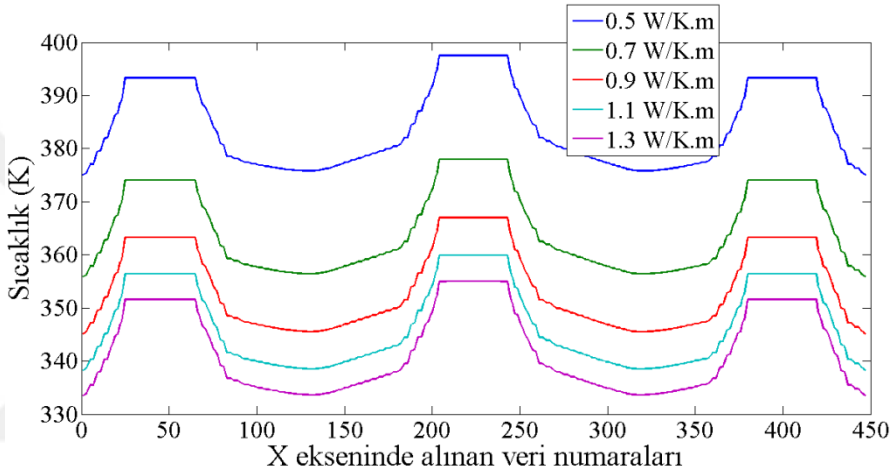
Kablolar döşenirken çıkan dolgu toprağı yatak malzemesinin üzerinde kullanılmaktadır. Toprağın ısıl iletkenlik değeri nem miktarına ve yapısına göre değişmektedir. Kabloların termal devresinde kabloların ürettiği ısının yatak malzemesinden sonra dış ortama ulaşmasını sağlayan bu tabakanın ısıl özelliklerinin kabloların maksimum sıcaklığı üzerinde kayda değer bir tesiri bulunmaktadır. Şekil 6.14'te kablolar 1775 A akım ile yüklü iken farklı ısıl iletkenlik değerlerine sahip toprak kullanılması durumları için kablo iletken sıcaklığındaki değişim verilmiştir.



Şekil 6.14 Toprağın ısıl iletkenlik değerinin değişiminin sıcaklığa etkisi

Toprağın ısıl iletkenlik değerinin yükselmesi, kablo iletken sıcaklığının düşmesini sağlamaktadır. Sıcaklıkta görülen bu azalmanın büyüklüğü, 0.5 W/K.m ısıl iletkenliğe sahip toprak yerine sırasıyla 0.7 W/K.m, 0.9 W/K.m, 1.1 W/K.m ve 1.3 W/K.m ısıl iletkenliği olan toprak kullanıldığında 19.5 K, 30.48 K, 37.56 K ve 42.52 K olmaktadır.

Ancak ilk duruma göre ısıl iletkenliği daha yüksek toprak kullanıldığında sıcaklıkta daha fazla azalma görülse de ısıl iletkenliğin 0.2 W/K.m az olduğu bir önceki duruma göre toprağın ısıl iletkenliğinin sıcaklık üzerindeki etkisi giderek azalmaktadır. Toprağın ısıl iletkenliğinin yüksek olması kablo iletken sıcaklığının yanı sıra kablo sisteminin genel sıcaklık dağılımını da etkilemektedir. Şekil 15'te kabloların X ekseni referans alınarak, Şekil 6.14'te belirtilen sıcaklık değerlerinin elde edildiği durumlar için üç kablonun genel sıcaklık dağılımı verilmiştir. Buna göre ısıl iletkenliği yüksek toprak kullanıldığında kablo iletken sıcaklığına bağlı olarak kablolar arasındaki yatak malzemesinin sıcaklığı da önemli oranda değişmektedir.



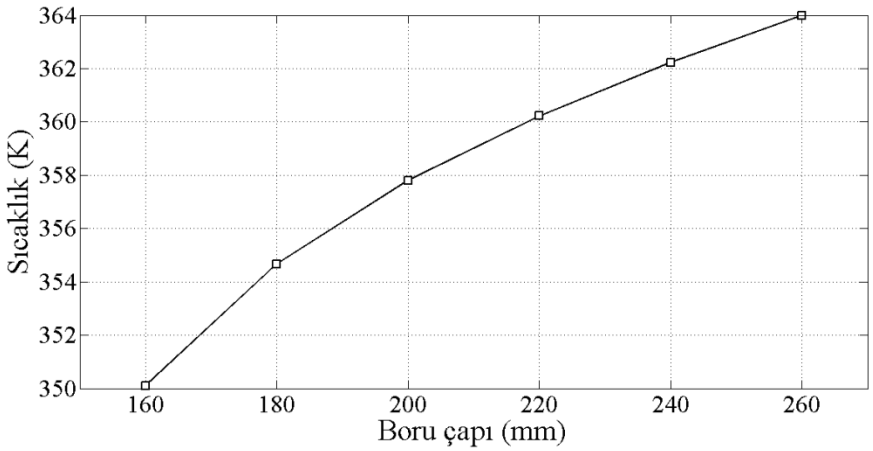
Şekil 6.15 Toprağın ısıl iletkenliğinin kablo sisteminin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi

6.3.1.6 Boru Çapının Sıcaklığa Etkisi

Yer altı güç kabloları direkt olarak toprakla temas edecek biçimde döşenebildikleri gibi boru içerisine alınarak da döşenmektedirler. Kabloların boru içerisine yerleştirilmesinin kablo iletken sıcaklığı üzerindeki etkisi incelenirken, borunun HDPE malzemeden yapıldığı ve kablo ile boru arasında hava olduğu kabul edilmiştir. Şekil 6.16'da her bir kablonun ayrı ayrı HDPE boru içerisine alındığı sistemde, farklı boru çapları için kablo iletken sıcaklığı değerlerinin değişimi verilmiştir.

Boru çapı arttıkça, kablo iletken sıcaklığı yükselmektedir. Boru çapı 160 mm'den 180 mm'ye yükseltildiği takdirde maksimum kablo iletken sıcaklığı 4.57 K artmaktadır. Bu çalışmada referans alınan HDPE boru çapı olan 250 mm, 10 mm arttırıldığında kablonun iletken sıcaklığı 0.85 K yükselirken, 10 mm azaltıldığında ise sıcaklık 0.92 K

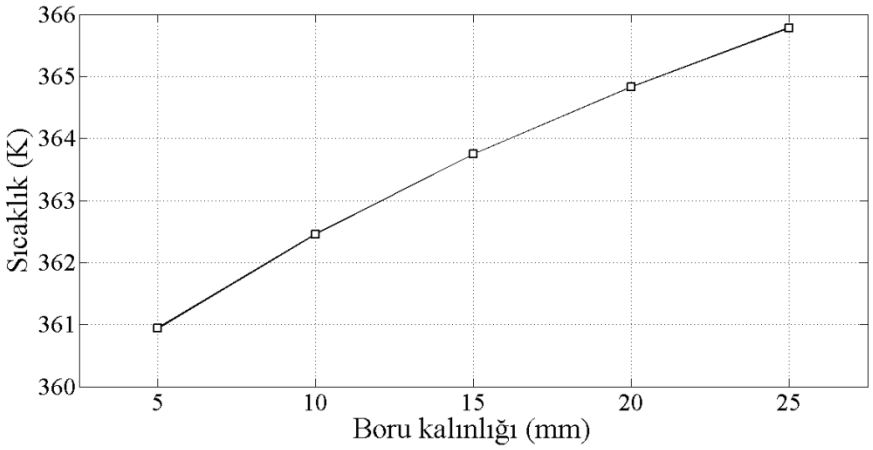
azalmaktadır. Bu durum boru çapının eşit aralıklarla arttırıldığında kablo iletken sıcaklığındaki değişimin lineer olmadığını göstermektedir.



Şekil 6.16 Boru çapının kablo iletken sıcaklığına etkisi

6.3.1.7 Boru Kalınlığının Sıcaklığa Etkisi

Kabloların borulu döşeme biçiminde sistemin sıcaklık dağılımını etkileyen bir diğer parametre kullanılan borunun et kalınlığıdır. Isının borudan yatak malzemesine ulaşmasında ısıl direnç gösteren bu tabakanın kalınlığı ve malzemesinin ısıl iletkenliği kablo iletken sıcaklığı üzerinde etkilidir. Şekil 6.17'de 250 mm iç çapa sahip borunun farklı et kalınlıkları için belirlenen kablo iletkeninin sıcaklık değerinin değişimi verilmiştir. Kullanılan borunun et kalınlığı arttıkça, kablo iletkeninin sıcaklığı yükselmektedir. Yapılan incelemelerde 12.5 mm olarak kullanılan boru et kalınlığı, 5 mm olduğunda sıcaklık 2.21 K azalırken, 20 mm alındığında ise sıcaklık 1.68 K artmaktadır.



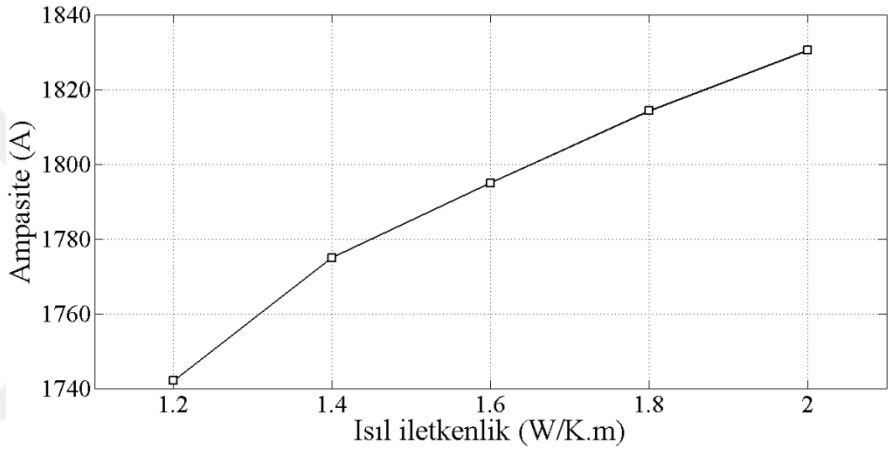
Şekil 6.17 Boru et kalınlığının kablo iletken sıcaklığına etkisi

6.3.2 Akım Taşıma Kapasitesi Analizleri

Isıl analizi gerçekleştirilen kablo sisteminin farklı koşullar altındaki ampasite değerleri, iletken sıcaklığını 90 °C'ye (363.15 K) ulaştıran hacimsel ısı üretimine bağlı olarak hesaplanmıştır.

6.3.2.1 Yatak Malzemesinin Isıl İletkenliğinin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi

Bu bölümde, ısıl iletkenliği farklı olan yatak malzemelerinin kullanılmasının akım taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 6.18'de farklı yatak malzemesi ısıl iletkenlik değerleri için hesaplanan yeni akım taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir.

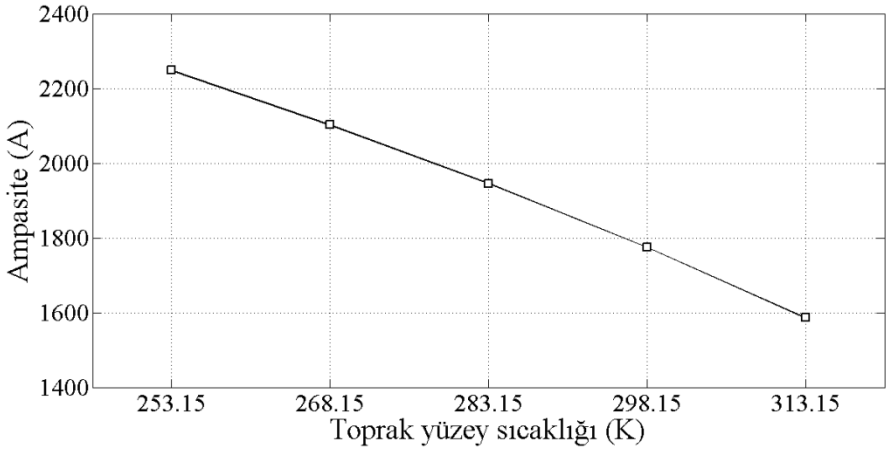


Şekil 6.18 Yatak malzemesi ısıl iletkenliğinin kablo ampasitesi üzerindeki etkisi

Buna göre yatak malzemesi ısıl iletkenliğinin 1.2 W/K.m'den 2 W/K.m'ye yükselmesiyle akım taşıma kapasitesinde yaklaşık olarak 88.4 A'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. İncelenen yatak malzemesi ısıl iletkenlik değer aralığında her 0.2 W/K.m'lik artış, ampasitede sırasıyla %1.89, %1.12, %1.08 ve %0.089'luk yüzdesel artış sağlamaktadır.

6.3.2.2 Toprak Yüzeyinin Sıcaklığının Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi

Kabloların döşendiği toprak yüzeyinin sıcaklığındaki artış kablo sisteminin akım taşıma kapasitesini düşürmektedir. Ancak, kabloların akım taşıma kapasitesindeki yüzey sıcaklığına bağlı değişim iletken sıcaklığındaki değişim gibi lineer değildir. Şekil 6.19'da değişen toprak yüzeyi sıcaklık değerlerine göre belirlenen akım taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir.

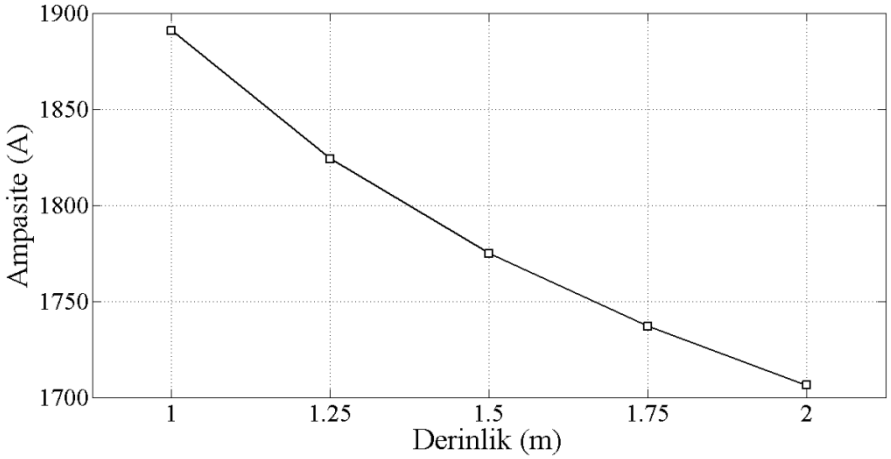


Şekil 6.19 Kablo ampasitesinin toprak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişimi

Toprak yüzeyi sıcaklığı 253.15 K'den 313.15 K'e kadar 15 K'lik aralıklarla arttırıldığında akım taşıma kapasitesinde, bir adım önceki duruma göre yüzdesel azalma miktarlarının sırasıyla %6.5, %7.46, %8.78 ve %10.64 olduğu tespit edilmiştir.

6.3.2.3 Kabloların Gömülme Derinliğinin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi

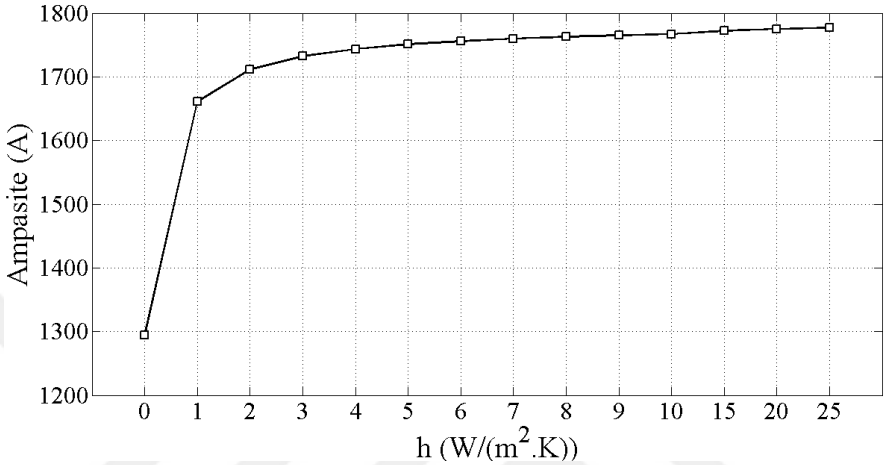
Kabloların gömülme derinliği arttıkça akım taşıma kapasitesi azalır. Akım taşıma kapasitesindeki değişim, gömülme derinliğinin 1 m ile 2 m arasında olması durumu için 0.25 m'lik artışlar dikkate alınarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.20'de verilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma gömülme derinliğinin 1 m'den 2 m'ye çıkarılmasıyla ortadaki kablonun sıcaklığında oluşan 13.3 K'lik artışın, ampasitede %9.76'lık bir düşüşe neden olduğunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 6.20 Kablo ampasitesinin gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi

6.3.2.4 Konvektif Isı Transfer Katsayısının Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi

Konvektif ısı transfer katsayısının artması kablo ampasitesinin yükselmesini sağlamaktadır. Ancak farklı konvektif ısı transfer katsayılarının kablo üzerindeki ısıl etkilerinin farklı olması sebebiyle kablo ampasitesi hesaplanması her katsayı değişiminde tekrarlanmalıdır. Şekil 6.21'de çeşitli konvektif ısı transfer katsayısı değerleri için hesaplanan yeni ampasite değerleri verilmiştir.

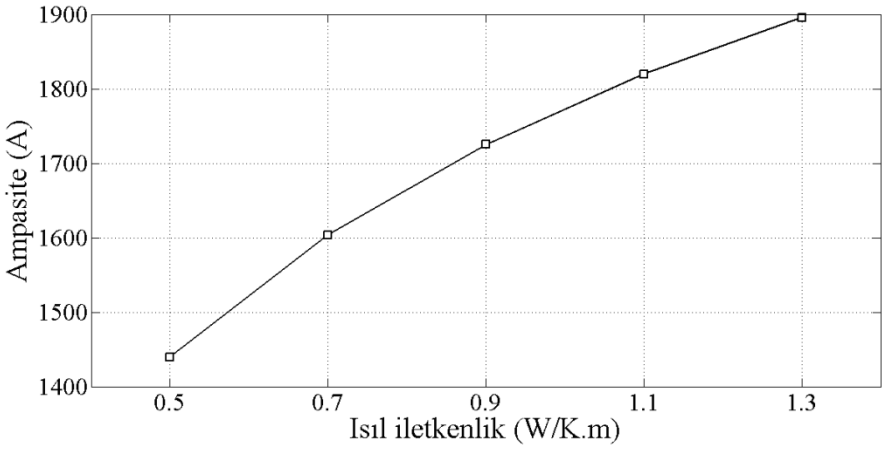


Şekil 6.21 Konvektif ısı transfer katsayısının ampasiteye etkisi

Kablo iletken sıcaklığının değişim karakteristiğine paralel olarak ampasitede en önemli artış ısı transfer katsayısının 0'dan 1 W/(m^2.K) değerine yükselmesi esnasında oluşmaktadır. Bu değişimle birlikte ampasitede yaklaşık olarak %28.3'lük bir artış gerçekleşmektedir. Isı tranfer katsayısının artan değerlerine bağlı olarak kablo ampasitesini yükseltici etkisi giderek azalmaktadır. Bu katsayının 9 W/(m^2.K) değerinden 25 W/(m^2.K) değerine yükselmesi, ampasitede sadece 11.9 A'lik bir artış sağlamaktadır.

6.3.2.5 Toprağın Isıl İletkenliğinin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi

Kabloların döşendiği ortamda bulunan toprağın ısıl iletkenliği kablo ampasitesini değiştirmektedir. Şekil 6.22'de farklı ısıl iletkenliğe sahip toprak kullanılması durumları için hesaplanan yeni ampasite değerleri verilmiştir.

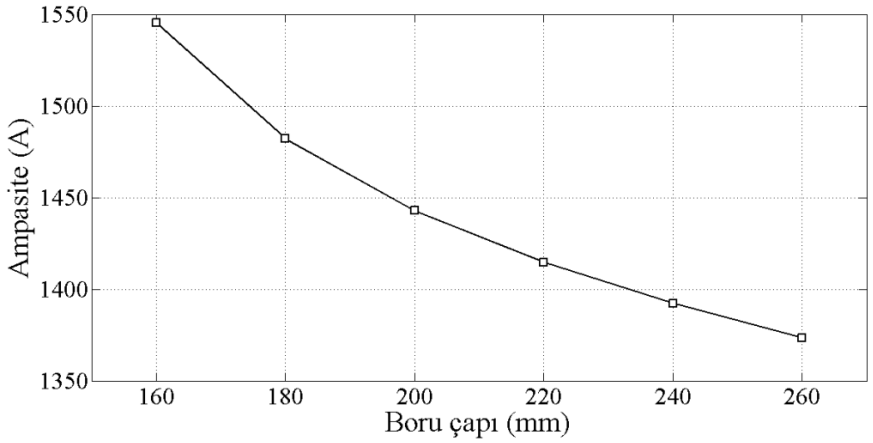


Şekil 6.22 Toprağın ısıl iletkenlik değerinin ampasiteye etkisi

Isıl iletkenliği yüksek toprak kullanılması kablonun ampasitesini arttırmaktadır. Isıl iletkenliği 0.5 W/K.m olan bir toprak yerine, 0.7 W/K.m ısıl iletkenliğe sahip bir toprak kullanıldığında kablo ampasitesi yaklaşık olarak %11.4 artış göstermektedir. Bu oran 0.9 W/K.m, 1.1 W/K.m ve 1.3 W/K.m ısıl iletkenliğe sahip toprak kullanılması durumları için sırasıyla %19.8, %26.4 ve %31.7 olmaktadır. Isıl iletkenliğin 0.2 W/K.m daha düşük olduğu bir önceki durumlara göre hesaplanan yeni ampasite değerlerinde görülen artışlar 164.1 A, 121.4 A, 94.4 A ve 76.2 A olmaktadır. Buna göre toprağın ısıl iletkenliği yükseldikçe, kablo iletken sıcaklığında olduğu gibi ampasite üzerindeki etkisinin de azaldığı görülmektedir.

6.3.2.6 Boru Çapının Değişiminin Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi

Kabloların boru içerine alınarak döşenmesi tercih edilen bir döşeme biçimidir. Bu döşeme biçiminde direkt olarak yatak malzemesi veya toprağa döşenen kablo sistemlerine göre yeni bir ısıl parametre ortaya çıkmaktadır. Kablo ile boru arasında bulunan havanın ısıl iletkenliğinin düşük olması sebebiyle havanın miktarı ve dolayısıyla boru çapı ampasiteye etki eden önemli bir parametredir. Şekil 6.23'te farklı çaplara sahip boruların içerisine kabloların ayrı ayrı döşenmesi durumları için hesaplanan yeni ampasite değerleri verilmiştir.

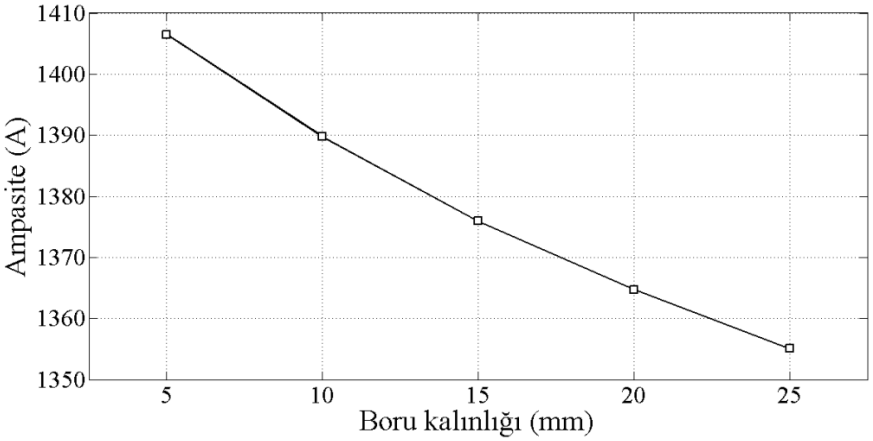


Şekil 6.23 Boru çapının ampasite üzerindeki etkisi

Kabloların yerleştirildiği borunun çapının artması ampasite değerini düşürmektedir. Boru çapının 160 mm'den 180 mm'ye yükseltilmesi ampasitede yaklaşık olarak %4.09'luk bir düşüşe sebep olmaktadır. Referans boru çapı olan 250 mm, 10 mm arttırıldığında ampasitede %0.62'lik bir azalma olurken, 10 mm azaltıldığında ise %0.74'lük bir bir artış görülmektedir.

6.3.2.7 Boru Kalınlığının Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi

Kabloların döşeneceği borunun çapının yanı sıra boru et kalınlığının da kablo sisteminin sıcaklık dağılımına ve ampasiteye etkisi göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Ortam koşullarına bağlı olarak güvenlik ve çeşitli nedenlerle yapılan borulu döşemede kablo ampasitesi farklı boru et kalınlıklarına göre yeniden hesaplanmalıdır. Şekil 6.24'te 250 mm iç çapa sahip HDPE kablonun farklı et kalınlıklarına sahip olması durumları için ampasite değerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.24 Boru et kalınlığının ampasite üzerindeki etkisi

Boru et kalınlığının artması kablonun ampasite değerini düşürmektedir. Et kalınlığı 5 mm olan boru yerine 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm kalınlıklara sahip boru kullanılması durumunda ampasitede gerçekleşen düşüş sırasıyla 16.7 A, 30.5 A, 41.7 A ve 51.4 A olmaktadır.

6.4 Ekranlamanın Kablo Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri

6.4.1 Sıcaklık Analizleri

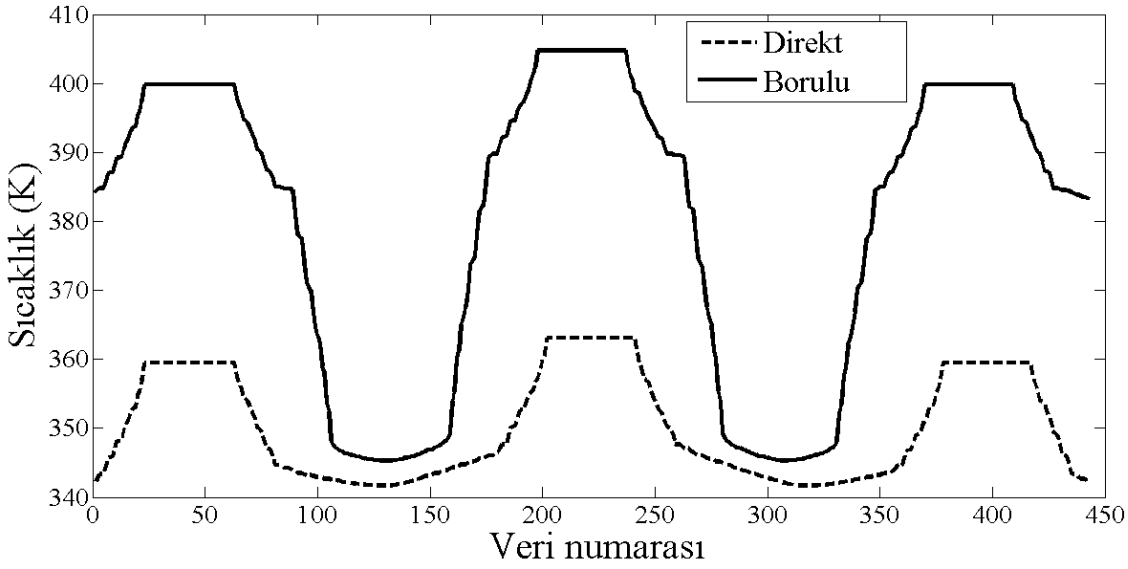
Ekran malzemesi, kablolar ile ekran arası uzaklık, ekran tipi ve ekran boyutu gibi ekranlama parametreleri kablonun ısıl dağılımı ve akım taşıma kapasitesi üzerinde değişime sebep olmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma ile bahsedilen parametrelerin değişiminin incelenen kablo sistemi üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Yapılan analizlerde yatay olarak yerleştirilmiş üç kablodan, ortadaki kablonun aynı akım büyüklüğünde diğerlerine göre daha fazla ısındığı görülmüştür. Bu nedenle güç kabloları için yapılan ısıl analizlerde ortadaki kablo referans olarak alınmıştır.

Yüksek gerilim yer altı kabloları direkt olarak veya boru içerisine alınarak döşenebilmektedirler. Kabloları dış fiziksel etkilere karşı korumak için genellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borular tercih edilmektedir.

Modelleme çalışmaları ile 380 kV'luk güç kablosunun ampasite değerleri, direkt döşeme ve boru içerisinde döşeme durumları için belirlenmiştir. Maksimum işletme sıcaklığına ekransız durumda kabloların direkt gömülü olduğu durum için 1775 A ve ekransız durumda boru içerisine alınarak döşendiği durum için de 1382 A değerlerinde ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.25'te yatay olarak yan yana yerleştirilmiş kabloların her iki döşeme biçimi için hesaplanan ampasite değerlerinde elde edilen sıcaklık eğrileri verilmiştir. Buradan hareketle aynı akım büyüklüğü için kabloları boru içerisine alarak döşemenin, direkt döşemeye göre kablo iletkeninin ve dolayısıyla izolasyon malzemesinin çok daha fazla ısınmasına neden olduğu ortaya çıkmaktadır.



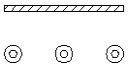
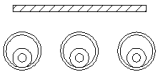
Şekil 6.25 Kabloların direkt ve boru içerisine alınarak döşenmesinin karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlara göre kabloları boru içerisine almak kablo sıcaklığını yükseltirken, kablo ampasitesini ise düşürmektedir. Buna rağmen sistem güvenliği açısından boru kullanılan döşeme biçimleri birçok uygulamada tercih edilmektedir. Yer altı kablo sistemlerinde meydana gelebilecek arızaları ve ömür kısalmalarını engelleyebilmek için bu durumun göz önüne alınması ve boru içerisine alınan kabloların yüklenmesine dikkat edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

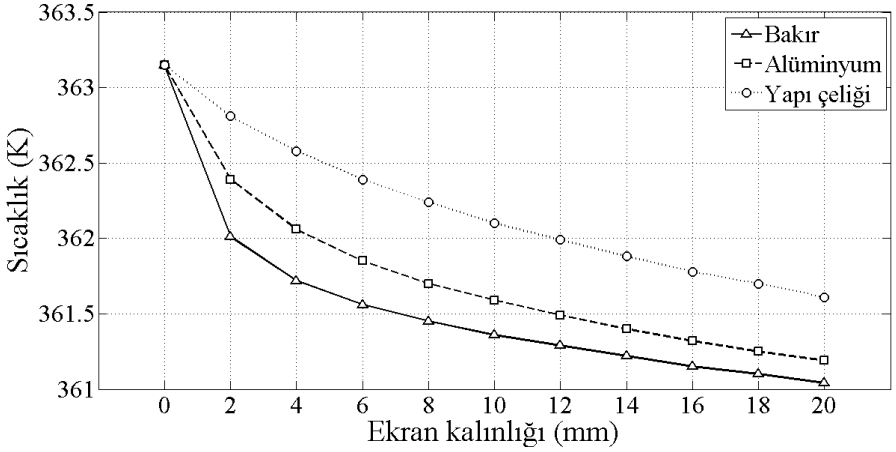
Ekranlanan kablo sistemi için ısıl analiz; yatay, ters-U ve kapalı tip ekranların uygulandığı durumlar için yapılmıştır. Farklı kalınlıklardaki ekranlar için bakır, alüminyum ve yapı çeliği gibi ekran malzemeleri analiz edilmiştir.

Çizelge 6.3'te ekransız durum için hesaplanan ampasite değerinde, güç kablolarının merkezinin 20 cm üzerinde farklı kalınlıklarda bakır yatay ekranlar kullanılması durumunda oluşan kablo iletkeni sıcaklık değerleri verilmiştir. Sonuçlar yer altı kablo sistemlerinde kullanılan ekranlamanın, iletken sıcaklığını azaltıcı yönde etkili olduğunu göstermiştir. Ekran kalınlığı arttıkça, ekranın sıcaklığı düşürme kapasitesi yükselmektedir. Kabloların direkt gömüldüğü ve boru içerisine alındığı sistemler karşılaştırıldığında, ekranın kablo sıcaklığını düşürücü etkisinin boru kullanılmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür.

Çizelge 6.3 Ekran kalınlığının sıcaklığa etkisi

	Sıcaklık (K)	
Ekran Kalınlığı (mm)	 Direkt	 Borulu
0	363.15	363.15
2	362.46	362.69
4	362.27	362.61
6	362.16	362.56
8	362.09	362.53
10	362.02	362.51
12	361.97	362.49
14	361.92	362.47
16	361.88	362.45
18	361.83	362.43
20	361.79	362.42

Ekranlama için kullanılan malzemelerin sıcaklık üzerindeki etkileri farklıdır. Bu etkiyi belirleyebilmek için bakır, alüminyum ve çelik gibi iletken malzemeler kullanılması durumları için analizler yapılmıştır. Şekil 6.26'da kablo merkezinin 10 cm üzerinde yatay konumlandırılmış ve farklı malzemeden yapılmış ekranlar kullanılması durumları için değişen ekran kalınlıklarına bağlı olarak elde edilen sıcaklık verileri gösterilmiştir.

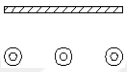
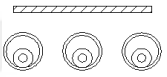


Şekil 6.26 Yatay ekran malzemelerinin sıcaklık üzerindeki etkileri

İncelenen ekran malzemeleri arasında bakır, kablo sıcaklığını düşürmede en etkili malzeme iken, çelik ise diğerlerine göre en az etkili malzeme olarak tespit edilmiştir. Ekran kalınlığı arttıkça, ekranın kablo sıcaklığı üzerindeki etkisinin her üç malzemede de azalarak devam ettiği görülmüştür.

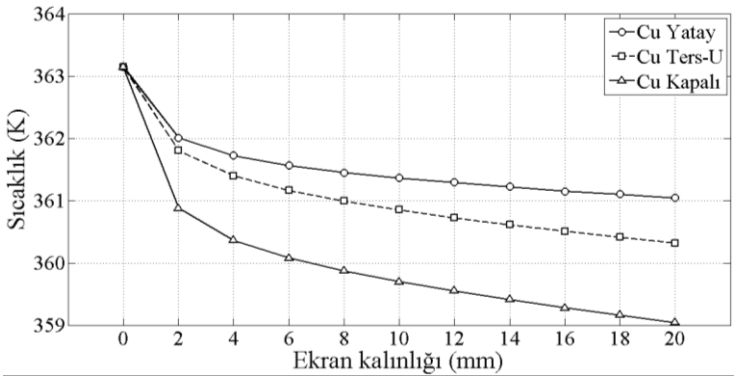
Kablo ile ekran arası açıklık da sıcaklık açısından kabloyu önemli derecede etkileyen bir faktördür. Çizelge 6.4'te farklı kablo merkezi ile ekran arası açıklıkları için ekransız durum ve 4 mm bakır yatay ekran olduğu durumlarda elde edilen sıcaklık değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.4 Ekranlama açısından kablo döşeme şeklinin sıcaklığa etkisi

Döşeme şekli				
Kablo-ekran arası uzaklık (cm)	-	10	20	20
Sıcaklık (K)	363.15	361.72	362.27	362.61

Elde edilen değerler, ekran ile kablo arası açıklık arttıkça, bütün ekran tipleri ve malzemeleri için ekranlamanın soğutucu etkisinin azaldığı görülmüştür.

Farklı malzeme ve ekran tipleri için yapılan bütün analizler, kullanılan ekran tipinin, kabloda oluşacak termal etki açısından en önemli olduğunu göstermiştir. Ekran malzemesi, kalınlığı ve kablolar ile ekran arasındaki mesafenin dışında, ekran yapısı da sıcaklık ve ampasite değerlerini etkileyen durumlardan birisidir. Şekil 6.27'de Cu'dan yapılmış farklı ekran tiplerinin termal etkinliği verilmiştir.

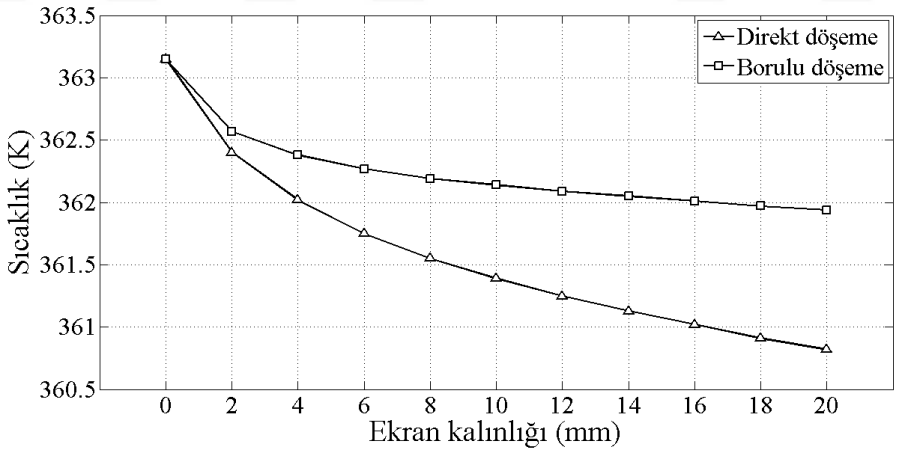


Şekil 6.27 Farklı tiplerdeki bakır ekranların sıcaklık üzerindeki etkileri

Buna göre ekran kalınlığının artması ısıl verimliliği her ekran tipi için değişen oranlarda etkilemektedir. İncelenen ekran kalınlıklarında kablo ile ekran arası açıklığın 10 cm olması durumunda, bakır yatay, ters-U ve kapalı ekranların kablo sıcaklığı üzerinde sağladıkları ortalama düşüş sırasıyla 1.76 K, 2.27 K ve 3.42 K olarak belirlenmiştir.

Çalışmada, kabloların boru içerisine alınması ve direkt döşenmesi durumlarında ekranlamanın sıcaklık üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Borusuz döşeme durumunda, kablo ile kapalı bakır ekran arası açıklık 10 cm iken değişen ekran kalınlıkları için ortadaki kablo iletkeninin sıcaklığı ekran kalınlığı sırasıyla 2 mm iken 360.88 K, 10 mm iken 359.70 K ve 20 mm iken de 359.04 K'dir. Bundan dolayı kalın ekranlama yapıldığında kablonun daha az ısınacağı söylenebilir. Ayrıca, kapalı ekran diğer ekran tiplerine göre termal açıdan kabloyu daha fazla etkilemektedir ve bu durum incelenen tüm ekran malzemeleri için geçerlidir.

Kabloların döşenme biçimine göre ısıl alanları üzerinde önemli farklılıklar oluşmaktadır. Şekil 6.28'de kabloların borulu ve borusuz döşenme durumlarında, kabloların merkezlerinden 20 cm yukarıda değişen kalınlıklarda Al ters-U ekran kullanılması durumunda elde edilen sıcaklık eğrileri verilmiştir.



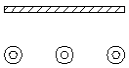
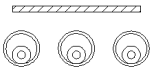
Şekil 6.28 Direkt ve borulu kablo döşeme durumlarında Al ters-U ekranlamanın sıcaklık üzerindeki etkisi

Borusuz döşemede alüminyum ters-U ekran kalınlıkları 2 mm, 10 mm ve 20 mm olduğu durumlardaki maksimum iletken sıcaklığı değerleri sırasıyla 362.4 K, 361.39 K ve 360.82 K olmaktadır. Kablolar boru içerisine alındığında ise ekran kalınlığı arttığında sıcaklık değerleri sırasıyla 362.57 K, 362.14 K ve 361.94 K olarak elde edilmiştir. Bu

sıcaklık verilerine göre boru kullanılmasının, ekranın kablo üzerindeki soğutucu etkisini azalttığı belirlenmiştir.

Çizelge 6.5'te borulu ve borusuz döşeme biçimlerinde, kablo merkezlerine 20 cm mesafede yatay 4 mm kalınlığında farklı malzemelerden yapılmış ekran kullanılması durumunda elde edilen sıcaklık değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.5 Farklı ekran malzemelerinin sıcaklık üzerindeki etkileri

	Sıcaklık (K)	
Ekran Malzemesi	 Direkt	 Borulu
Cu	362.27	362.61
Al	362.49	362.71
St	362.82	362.90

Çizelge 6.5'te verilen sonuçlardan borulu ve borusuz döşemede Cu malzemenin ısıl etki açısından en uygun malzeme olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca, yatay ekranla birlikte boru kullanılmasının ekranın ısıl verimliliğini düşürdüğü görülmüştür. Aynı çalışma kapsamında farklı ekran tiplerinin etkileri de analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kapalı ekranın her iki döşeme biçimi için de sıcaklık açısından en etkili ekran tipi olduğu sonucuna varılmıştır.

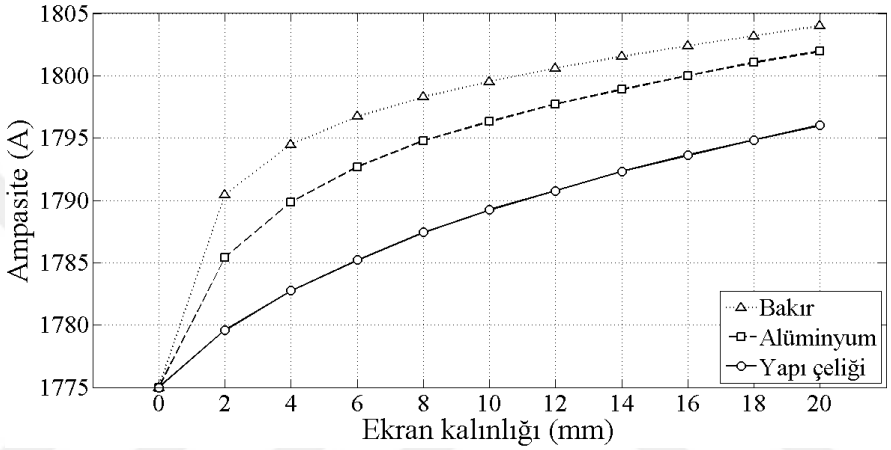
6.4.2 Akım Taşıma Kapasitesi Analizleri

Yer altı kablolarının ekranlanması, kablo iletken sıcaklığını düşürücü yönde bir etki göstermektedir. Kullanılan ekran malzemesi, kalınlığı ve şekline göre oluşan sıcaklık düşüşü, kablonun ampasitesini farklı oranlarda değiştirir. Kablo iletken sıcaklığındaki azalma ile birlikte akım taşıma kapasitesi yükselir. Bu bölümde ekran tiplerinin kablo ampasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Şekil 6.29'da farklı malzemelerden yapılmış yatay ekranlama için elde edilen kablo ampasitesi değişimleri verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda bakırın sıcaklıkta olduğu

gibi kablo ampasitesi açısından da en iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Ekran kalınlıkları arttıkça alüminyum, ampasite seviyesi açısından bakıra yaklaşmaktadır.

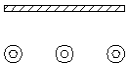
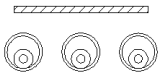
Bakır yatay ekranın kabloların 10 cm üzerinde, 2 mm, 10 mm ve 20 mm kalınlıklarda uygulanması durumunda ampasitede gerçekleşen artışlar sırasıyla %0.87, %1.38 ve %1.63'tür. Kullanılan ekran kalınlığı arttıkça, ampasitelerdeki artış oranı yavaşlamaktadır. Bu yüzden bir kablo sisteminin ekranlaması yapılırken, ekran maliyeti ve ekran kullanıldığında iletilebilecek enerjide sağlanacak artış iyi analiz edilerek optimum durumun sağlanması gerekir.



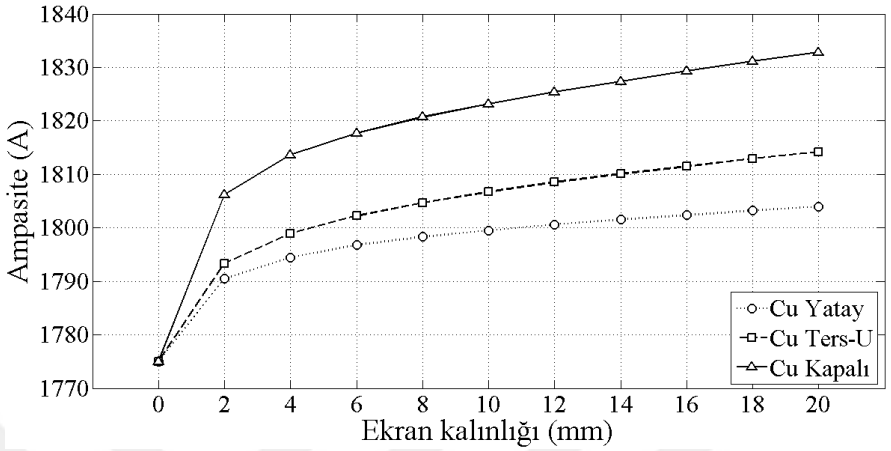
Şekil 6.29 Yatay ekran malzemesinin ampasite üzerindeki etkisi

Çizelge 6.6'da kablolara 20 cm mesafede farklı malzemelerden 4 mm kalınlığında yatay ekranlama yapılması durumunda elde edilen ampasite değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre borulu ve borusuz döşeme biçimleri için bakır, ampasite açısından en iyi ekran malzemesidir.

Çizelge 6.6 Farklı ekran malzemelerinin ampasite üzerindeki etkisi

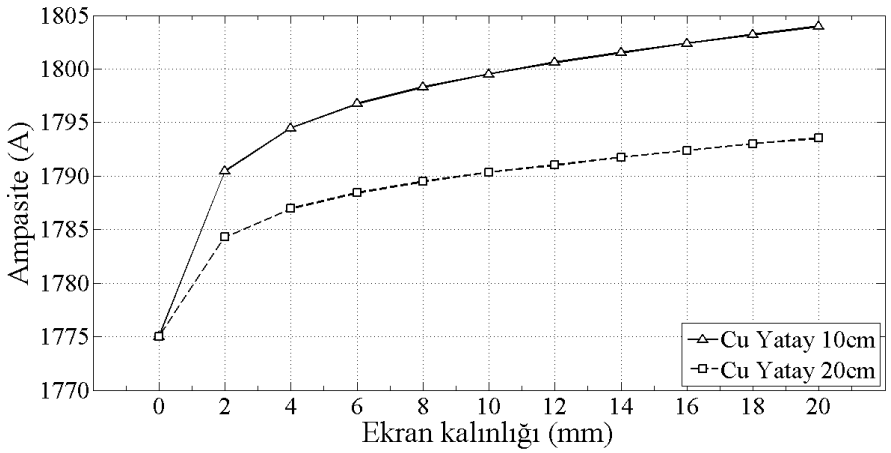
	Ampasite (A)	
Ekran Malzemesi	 Direkt	 Borulu
Cu	1787.0	1388.2
Al	1783.9	1387.1
St	1779.5	1385.0

Ekran tipinin kablo ampasitesine etkisi Şekil 6.30'da görülmektedir. Kablo sistemine yatay, ters-U ve kapalı ekran tipleri uygulandığında ampasitede sağlanan artışlar 2mm için %0.87, %1.03, %1.76; 10 mm'de %1.38, %1.79, %2.71 ve 20 mm için %1.63, %2.21 ve %3.26 olmaktadır.



Şekil 6.30 Farklı bakır ekran tiplerinin ampasite üzerindeki etkileri

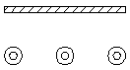
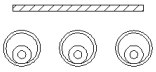
Şekil 6.31'de ekran ile kablo arası uzaklığın ampasite üzerindeki etkisini göstermek amacıyla bakır yatay ekranlama yapılması durumunda elde edilen sıcaklık değişimleri verilmiştir. Analizler ekran ile kablo merkezi arasındaki açıklığın 10 cm ve 20 cm olduğu durumlar için yapılmıştır. Kabloların 20 cm üzerinde ekranlama yapıldığında 2 mm, 10 mm ve 20 mm ekran kalınlıkları için ampasitede sağlanan yüzdesel artışlar sırasıyla %0.52, %0.86 ve %1.05 olmaktadır. Kablo-ekran arası mesafe 10 cm iken ampasitede sırasıyla %0.87, %1.38 ve %1.63 artış sağlanır. Bu durum kablo ile ekran arası uzaklığın ampasite üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 6.31 Ekran ile kablolar arasındaki açıklığın ampasiteye etkisi

Çizelge 6.7'de borulu ve borusuz döşeme koşullarında güç kablolarının merkezinin 20 cm üzerinde farklı kalınlıklarda bakır yatay ekranlar kullanılması durumları için akım taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir.

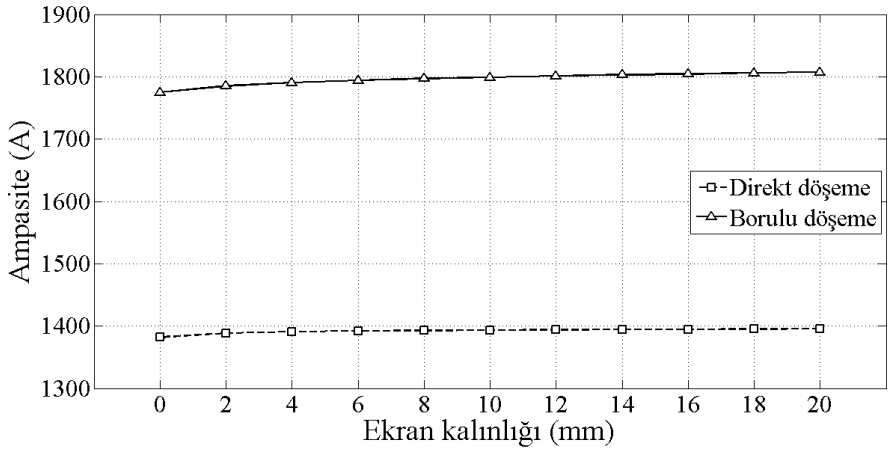
Çizelge 6.7 Ekran kalınlığının ampasite üzerindeki etkisi

	Ampasite (A)	
Ekran Kalınlığı (mm)	 Direkt	 Borulu
0	1775.00	1382.00
2	1784.29	1387.21
4	1786.95	1388.16
6	1788.43	1388.64
8	1789.48	1388.96
10	1790.35	1389.20
12	1791.02	1389.44
14	1791.76	1389.67
16	1792.38	1389.91
18	1793.00	1390.07
20	1793.55	1390.23

Kablolardan 20 cm uzaklıkta yapılan yatay ekranlamada, ampasite değerinde 2 mm, 10 mm ve 20 mm ekran kalınlıkları için borusuz durumda sırasıyla %0.52, %0.86 ve %1.05 artış sağlanırken, boru kullanıldığında ise %0.38, %0.52 ve %0.60 artış olmaktadır.

Şekil 6.32'de kabloların direkt döşenmesi ve HDPE boru içerisinde döşenmesi durumları için alüminyum ters-U ekranlama kullanılması halinde, kablo ampasitesinde oluşan değişimler karşılaştırılmıştır. Ekransız durumda her iki döşeme biçimi için ampasiteler karşılaştırıldığında, aradaki fark 393 A'dir. Ekranlama hem borulu hem borusuz döşemede ampasiteyi arttırmıştır. Ancak, ekran kalınlığı 10 mm iken aradaki fark 405.9 A iken 20 mm de 411.7 A'e yükselmiştir. Karşılaştırma ayrı ayrı yapıldığında,

direkt kablo döşeme düzeninde ampasitedeki artışlar 10mm ve 20 mm kalınlıklarda %0.86 ve %1.05 iken borulu döşemede %0.52 ve %0.59 olmuştur.



Şekil 6.32 Direkt ve borulu döşeme düzenlerinde Al ters-U ekranın ampasite üzerindeki etkisi

Farklı açıklıklarda oluşan ampasite değerleri, farklı döşeme biçimlerinde ekransız ve 4 mm bakır yatay ekranlı durumlar için Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8 Döşeme koşullarının ampasite üzerindeki etkisi

Döşeme şekli				
Ekran-kablo arası uzaklık (cm)	-	10	20	20
Ampasite (A)	1775.0	1794.5	1787.0	1388.2

Ekranlamanın kabloya yakın yapılması, ampasitede artış sağlayacağından dolayı kablodan daha fazla gücün iletilmesi bakımından avantaj sağlar.

6.5 IEC-60287 Standardında Verilen Analitik Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Ampasite Analizlerinin Karşılaştırılması

IEC-60287, yer altı güç kablolarının ısıl analizi ve akım taşıma kapasitelerinin analitik olarak hesaplanması için hazırlanmış bir standarttır. Standartta verilen formülasyon ile kablo iletkeninden toprak yüzeyine kadar olan sistemin ısıl devresini oluşturan bütün termal dirençler hesaplanabilmektedir. Ayrıca kablo iletkeninde akıma bağlı olarak

meydana gelen Joule kayıplarının dışında yalıtkanda oluşan dielektrik kayıpları ve metal ekranda oluşan kılıf kayıpları da belirlenebilmektedir. Bu bölümde yapılan analizlerde Bölüm 3'te IEC-60287 standardı referans alınarak verilen ifadeler kullanılmıştır.

Yer altı kablo sistemlerinde ısıl analizler neticesinde belirlenen ve kabloda oluşan ısının dış ortama daha kolay ulaşmasını sağlayan çeşitli ısıl özelliklere sahip dolgu ve yatak malzemeleri kullanılmaktadır. Genellikle bu malzemeler, maliyetleri ve ortam şartları göz önünde bulundurularak ısıl iletkenlik değerleri mevcut toprağa göre daha iyi olacak biçimde belirlenmektedir. Bu çok tabakalı yapı kablo sisteminin akım taşıma kapasitesini değiştirmektedir.

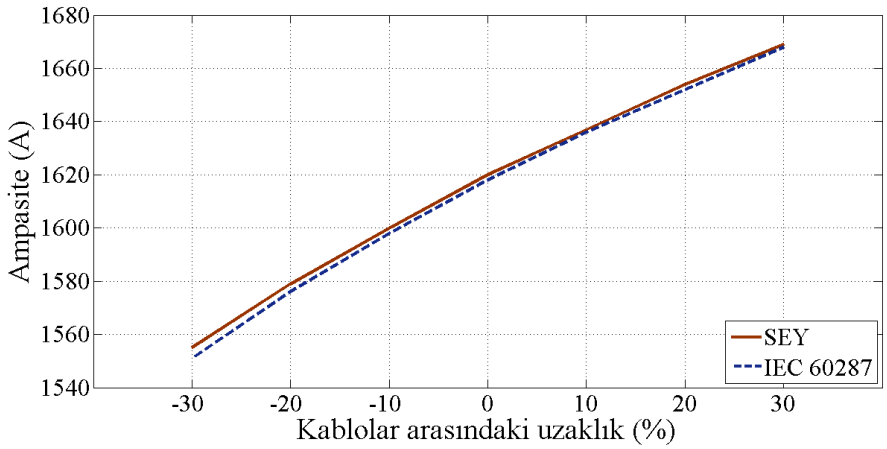
Kablo sistemleri için yapılan ampasite hesaplamalarında kullanılan yöntem elde edilen sonucun farklı çıkmasına sebep olmaktadır. Farklı çalışmalarda IEC-60287'de verilen analitik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmada değişken koşullar altında her iki yöntem de dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Değişken parametre olarak:

- Kablolar arası açıklık,
- Yatak malzemesinin ısıl iletkenliği,

ele alınmıştır.

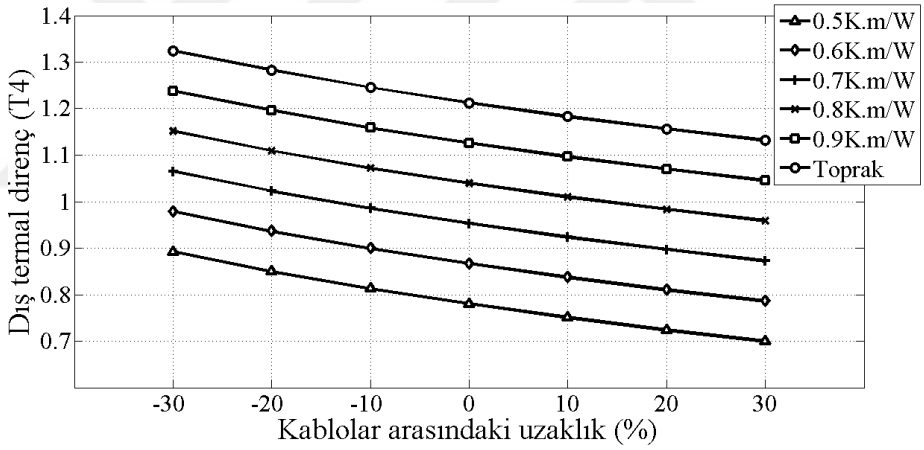
Bölüm 6'da yapılan sayısal uygulamalarda kullanılan ve Şekil 6.2'de verilmiş olan kabloların döşenme geometrisi kullanılmıştır. Kablo eksenleri arasındaki mesafe olan d_r = 3D referans alınarak, kablolar arasındaki mesafe yüzdesel olarak değiştirilmiş ve ampasitedeki değişim belirlenmiştir. Kabloların arasındaki açıklık, elektriksel özellikler açısından AC direnci ve ısıl devre bakımından da dış termal direnci (T_4) etkileyen önemli bir parametredir.

Şekil 6.33'te yatak malzemesi kullanılmadığı, kabloların direkt 1 K.m/W ısıl dirence sahip toprağa döşendiği durum için farklı kablo açıklıklarında hesaplanan ampasite değerleri verilmiştir. Sadece toprak kullanıldığı durumda standart ve sonlu elemanlar yöntemi arasında belirgin bir ampasite farkının oluşmadığı ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 6.33 Kablolar arası açıklığa bağlı olarak ampasitedeki değişim

Isıl direnci toprağa göre daha düşük yatak malzemesi kullanılması durumda kablo dışı termal direnç azalmaktadır. Şekil 6.34'te termal dirençleri farklı yatak malzemeleri ve sadece toprak kullanılması durumları için dış termal direnç değerlerinin değişimleri verilmiştir.

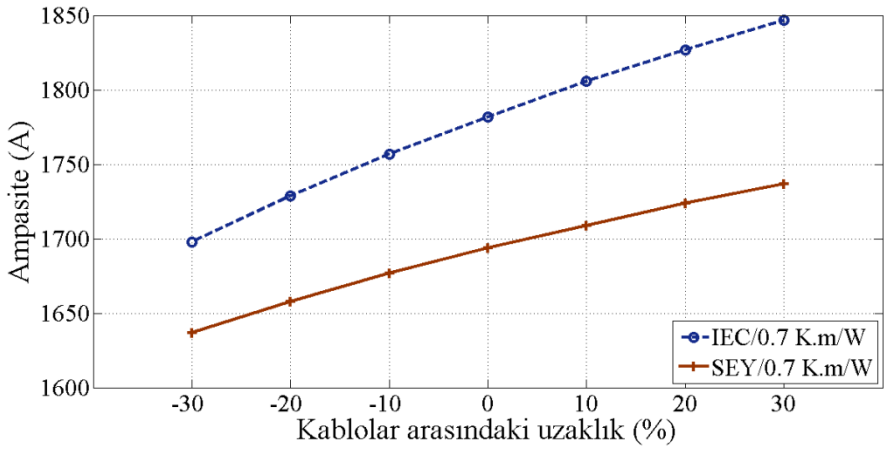


Şekil 6.34 Dış termal direncin yatak malzemesi ısıl iletkenliğine ve kablolar arası açıklığa bağlı değişimi

Elde edilen sonuçlar, yatak malzemesinin ısıl direnci düştükçe, dış termal direncin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, kablolar arası mesafenin artması da dış termal direncin azalmasını sağlamaktadır. Dış termal direncin azalması, kablonun maksimum işletme sıcaklığında taşıyabileceği akım değerini arttırmaktadır.

Yatak malzemesi kullanıldığı durumda ise standart ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen akım değerleri farklılık göstermektedir. Şekil 6.35'te 0.7 K.m/W'lık ısıl dirence sahip yatak malzemesi için sonlu elemanlar yöntemi ve IEC-60287 standardında verilen

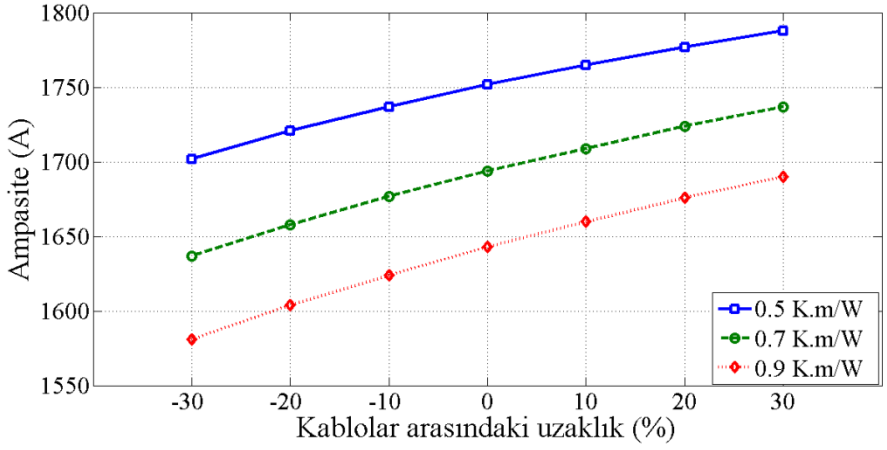
analitik yöntem ile hesaplanan ampasite değerlerindeki değişim kablo açıklıklarına bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 6.35 Farklı yatak malzemeleri için kablolar arası açıklığa bağlı ampasite değişimi

IEC-60287'de verilen yöntemle yapılan hesaplamada ampasite değerinin daha yüksek çıktığı görülmektedir. Kablolar arasındaki açıklık arttıkça, iki yöntem arasındaki farkın daha da yükseldiği sonucuna varılmaktadır. Kablolar arası açıklık 310.8 mm (-%30) iken 61 A'lik fark oluşurken, açıklık 577.2 mm (+%30)'a çıktığında 110 A'lik bir değişim gözlenmektedir.

Şekil 6.36'da farklı ısıl iletkenlik değerlerine sahip yatak malzemeleri için hesaplanan ampasite değerleri verilmiştir. Buna göre ısıl direnci düştükçe, kablonun akım taşıma kapasitesi yükselmektedir. Kabloların arasındaki açıklığın 310.8 (-%30) olduğu durumda akım taşıma kapasitesi değeri 0.5 K.m/W ısıl direnç için 1702 A ve 0.9 K.m/W ısıl direnç için 1581 A olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.36 Yatak malzemesi termal direncinin ampasite üzerindeki etkisi

Çizelge 6.9'da 0.7 K.m/W ısıl dirence sahip yatak malzemesi için hesaplanan ampasite değerleri verilmiştir. Buna gore incelenen kablo açıklıkları için iki yöntem arasındaki fark yüzdesel olarak %3.73 ile %6.33 aralığında değişmektedir.

Çizelge 6.9 Isıl direnci 0.7 K.m/W olan yatak malzemesi için hesaplanan ampasite değerleri

	Ampasite (A)	
Kablolar arası açıklık (mm)	**IEC**	**SEY**
310.8	1698	1637
355.2	1729	1658
399.6	1757	1677
444	1782	1694
488.4	1806	1709
532.8	1827	1724
577.2	1847	1737

Çizelge 6.10'da farklı ısıl dirençlere sahip yatak malzemeleri için iki yöntemle referans kablolar arası açıklıkta hesaplanan ampasite değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.10 İki yöntemle hesaplanan ampasite değerleri

	Ampasite (A)	
Termal direnç (K.m/W)	**IEC**	**SEY**
1 (Toprak)	1618	1620
0.9	1668	1643
0.8	1723	1668
0.7	1782	1694
0.6	1848	1722
0.5	1921	1752

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek gerilim yer altı kablolarının kurulum maliyetlerinin oldukça yüksek olması nedeniyle optimum verimle işletilmeleri gerekmektedir. Verimlilik arttırılırken aynı zamanda çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelen arızalar da en aza indirgenmelidir. Bu sistemlerde en sık karşılaşılan sorunlardan birisi kapasitesinin üzerinde yüklenme durumlarında görülen ve kablo yalıtkanının aşırı ısınmasından kaynaklanan arızalardır. Bu tür arızaların giderilebilmesi için kablo üzerinden taşınabilecek akımın büyüklüğünün doğru tespit edilmesi şarttır. Çünkü yer altı kabloları taşıyabilecekleri akım seviyesinin üzerinde bir yük ile yüklendiklerinde kullanılan dielektrik malzeme zarar görür ve yapısı bozularak ihtiyaç duyulan yalıtkanlık özelliklerini kaybeder.

Yer altı kablolarının katmanlarından biri olan yalıtkan malzeme için izin verilen en yüksek işletme sıcaklığına bağlı olarak kablonun yüklenebileceği en yüksek akım değeri olan akım taşıma kapasitesi, kablo sistemi için gerçekleştirilen ısıl analizler neticesinde belirlenmektedir. Kablo sistemlerinin ısıl analizi için IEEE ve IEC gibi kuruluşların yayınladığı standartlar ile belirlenmiş analitik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal yöntemler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, üç adet tek damarlı 380 kV'luk XLPE yalıtkanlı kablodan oluşan yer altı kablo sistemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Örnek olarak çeşitli durumlar IEC-60287 standardı ile karşılaştırmalı olarak elde edilen sonuçlar ortaya konulmuştur.

Ortam koşulları, kabloların döşenmesinde kullanılan malzemeler ve kablo katmanlarının ısıl özellikleri kablo sisteminin ısıl devresini oluşturmaktadır. Kablo

iletkeninde taşınan akımdan dolayı meydana gelen kayıpların neden olduğu ısı üretimi temel ısı kaynağını oluşturmaktadır. Kabloda üretilen ısı, kablo katmanları üzerinden yatak malzemesi ve toprağa geçerek oradan dış ortama ulaşır. Kabloda oluşan ısıl stresin azaltılabilmesi bakımından yatak malzemesi ve toprağın ısıl iletkenlik değerleri önem teşkil etmektedir.

Gerçekleştirilen analizler, ısıl iletkenliği yüksek yatak malzemesi kullanımının ısı transferini kolaylaştırdığını göstermiştir. 1.2 K.m/W ısıl iletkenliğe sahip malzeme yerine 2 W/K.m olan bir malzeme kullanıldığında, kablo iletken sıcaklığında 6.5 K'lik bir azalmanın oluştuğu ve ampasitede 88.4 A'lik artış sağlandığı saptanmıştır. Benzer bir şekilde, torpağın ısıl iletkenliği 0.5 W/K.m iken 0.7 W/K.m' ye yükseldiğinde iletken sıcaklığı 19.5 K düşmekte ve akım taşıma kapasitesi %11.4 artmaktadır. Elde edilen sonuçlar, yer altı kabloları döşenirken ısıl iletkenliği yüksek yatak malzemesi kullanımının akım taşıma kapasitesini arttırıcı yönde etki ettiğini göstermektedir. Mevsimsel koşullara ve ortam şartlarına bağlı olarak değişkenlik gösteren toprağın ısıl iletkenliğinin yapılacak analizlerde dikkate alınması gerektiği ve hesaplamaların doğruluğunu etkilediği ortaya çıkmaktadır.

Toprak yüzeyindeki sıcaklık değeri sürekli sabit bir değerde kalmamaktadır. Yüzeydeki rüzgarın hızına bağlı olarak konvektif ısı transferinin meydana gelmesi kablo sıcaklığını değiştirmektedir. Rüzgar hızının belli bir değere kadar yükselmesi kablo sıcaklığını düşürüp, ampasitenin yükselmesini sağlamaktadır.

Yer altı kablolarının döşenme biçimi ve çevresinde kullanılan ekipmanlar da sistemin sıcaklık dağılımına etki etmektedir. Kabloların toprak yüzeyine göre döşenme derinliği arttıkça, ısıl açıdan zorlanma artmaktadır. Kabloların 0.25 m daha derine gömülmesi kablo iletken sıcaklığını 2.93 K yükseltmekte ve ampasiteyi %2.14 düşürmektedir. Yer altı kablolarının direkt toprakla temas halinde döşenmesi yerine boru içerisine alınarak döşenmesi bir diğer ısıl faktördür. İçerisinde hava bulunan daha yüksek çaplarda boru kullanılması kabloların sıcaklık seviyesini yükseltmektedir. Kullanılan borunun et kalınlığının fazla olması, ısının dış ortama iletilmesini güçleştirmektedir.

Yer altı kablolarının ürettiği manyetik alanı daha düşük bir seviyeye indirgemek için kullanılan ekranlar aynı zamanda sıcaklık dağılımını da etki etkilemektedir. Ekran

kalınlığına, ekran tipine, ekran malzemesine ve kablo-ekran arası uzaklığa bağlı olarak değişen bu ısıl etki akım taşıma kapasitesinin değişimine sebep olmaktadır.

Analizlerde incelenen ekran tiplerinden kapalı ekran yapısının, kablolar üzerinde en büyük soğutucu etkiyi gösterdiği belirlenmiştir. Bakır ekran, alüminyum ve yapı çeliğinden yapılmış ekranlara göre daha avantajlıdır. Boru içerisinde döşemede, direkt olarak yapılan borusuz döşemeye göre ekranlamanın sıcaklık ve ampasite üzerindeki tesiri azalmaktadır.

Toprak ve yatak malzemesinin birlikte kullanıldığı çok tabakalı yapılar için IEC-60287 standardında tanımlanan analitik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan ampasite analizlerinde sonuçlar arasında farklılık oluştuğu tespit edilmiştir. Tek tabakalı yapıda ise standart ve sayısal yöntem birbirleriyle tutarlı sonuçlar vermektedir. Isıl iletkenliği yüksek yatak malzemesi kullanılması ve kabloların aralarındaki açıklığın arttırılması standartta ifade edilen dış termal direncin (T_4) azalmasını sağlamakta ve buna bağlı olarak akım taşıma kapasitesi yükselmektedir. Ancak, kablolar arası açıklık arttıkça, standartla hesaplanan ampasite değerlerindeki artış hızının sonlu elemanlar yöntemine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle, çok tabakalı döşeme yapısına sahip kablo sistemleri için ampasite hesabında iki yöntemin karşılaştırılarak karar verilmesi fayda sağlayacaktır.

Sonuç olarak, yüksek gerilim yer altı kablolarının akım taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak yapılan ısıl analizlerde, tanımlanan sınır koşullarının konumuna ve büyüklüğüne oldukça dikkat edilmelidir. Eğer analitik bir yöntem kullanılacaksa, ampasitede sayısal metotlarla farklılık oluşturabilecek durumlar belirlenmeli ve karar verme aşamasında dikkate alınmalıdır.

Analizler neticesinde, yatak malzemesi kullanımının sıcaklık dağılımı ve ampasite üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Kullanılacak yatak malzemesinin tercih edilirken özellikle kablo ömrüne sağlayacağı olumlu etki de göz önüne alınarak, maliyet analizi neticesinde ısıl iletkenliği yüksek malzemeler seçilmelidir. Benzer bir şekilde yer altı kablosu ekranları da ekranlama parametreleri doğru saptandığı takdirde ampasiteye önemli katkı sağlamaktadır. Manyetik alana etkilerinin yanında ısıl alana da

tesir ettikleri görülen ekranların malzeme ve boyutlarının tercihinde iki fiziksel olay da birlikte ele alınmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] Silva, F.F. ve Bak, C.L., (2013). Electromagnetic Transients in Power Cables, First Edition, Springer-Verlag, London.

[2] IEC-60287-1-1, 2007. Current Rating Equations (100% load factor) and Calculation of Losses – General, IEC, Second Edition, BSI.

[3] IEC-60287-2-1, 2008. Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance, IEC, Second Edition, BSI.

[4] Gouda, O.E., El Dein, A.Z. ve Amer, G.M., (2011). "Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground PowerCables on Their Ratings", IEEE Transactions on Power Delivery, 26(2): 972-978.

[5] Wang, Y., Chen, R., Li, J., Grzybowski, S. ve Jiang, T., (2011). "Analysis of Influential Factors on the Underground Cable Ampacity", Electrical Insulation Conference (EIC), 5-8 June 2011, Annapolis.

[6] Shwehdi, M.H., AL-Ismail, F.S. ve AL-Nuaim, A.A., (2010). "Investigation and Studying the Thermal Effect of the Underground Cables", IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), 6-9 June 2010, San Diego.

[7] Rajagopala, K., Vittal, K.P. ve Lunavath, H., (2012). "Computation of Electric Field and Thermal Properties of 3-Phase Cable", TELKOMNIKA, 10(2): 265-274.

[8] Al-Saud, M.S., El-Kady, M.A. ve Findlay, R.D., (2007). "A Novel Finite-Element Optimization Algorithm with Application to Power Cable Thermal Circuit Design", Power Engineering Society General Meeting, 24-28 June 2007, Florida.

[9] Nahman, J. ve Tanaskovic, M., (2011). "Evaluation of the Loading Capacity of a Pair of Three-Phase High Voltage Cable Systems Using the Finite-Element Method", Electric Power Systems Research, 81(7): 1550-1555.

[10] Karahan, M., Varol, H.S. ve Kalenderli, Ö., (2008). "Hava ve Su Ortamında Yer Alan Alçak Gerilim Güç Kablolarında Akım-Sıcaklık İlişkisinin İncelenmesi", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), 26-30 Kasım 2008, Bursa.

[11] Shen, Y., Niu, H., You, Y., Zhuang, X. ve Xu, T., (2013). "Promoting Cable Ampacity by Filling Low Thermal Resistivity Medium in Ducts", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 8-11 December 2013, Brisbane.

[12] Kocar, I. ve Ertas, A., (2004). "Thermal Analysis for Determination of Current Carrying Capacity of PE and XLPE Insulated Power Cables Using Finite Element Method", 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 12-15 May 2004, Dubrovnik.

[13] Nguyen, N., Vu, P.T. ve Tlusty, J., (2010). "New Approach of Thermal Field and Ampacity of Underground Cables Using Adaptive hp-FEM", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 19-22 April 2010, New Orleans.

[14] Hwang, C.C. ve Jiang, Y.H, (2003). "Extensions to the Finite Element Method for Thermal Analysis of Underground Cable Systems", Electric Power Systems Research, 64(2): 159-164.

[15] Liang, Y., (2012). "Steady-State Thermal Analysis of Power Cable Systems in Ducts Using Streamline-Upwind /Petrov-Galerkin Finite Element Method", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19(1): 283-290.

[16] Aras, F., Biçen, Y. ve Keles, K., (2006). "Boru İçerisinde Tesis Edilen Yer altı Güç Kabloları için Azaltma Faktörünün Belirlenmesi", Politeknik Dergisi, 9(2): 87-92.

[17] Brakelmann, H. ve Anders, G., (2004). "Increasing Ampacity of Cables by An Application of Ventilated Pipes", 39th Industry Applications Conference (IAS), 3-7 October 2004, Seattle.

[18] Hwang, C.C., Chang, J.J. ve Chen, H.Y., (2000). "Calculation of Ampacities for Cables in Trays Using Finite Elements", Electric Power Systems Research, 54(2): 75-81.

[19] Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Taj, B.N. ve Palizban, O., (2011). "Ampacity Calculation of the Underground Power Cables in Voluntary Conditions by Finite Element Method", 8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 17-19 May 2011, Thailand.

[20] Desmet, J., Putman, D., Vanalme, G., Belmans, R. ve Vandommelen, D., (2005). "Thermal Analysis of Parallel Underground Energy Cables", 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 6-9 June 2005, Turin.

[21] Yanmu, L., Yongchun, L., Yanming, L., Wenrong, S., Peng, Y. ve Junhao, L., (2009). "Coupled Electromagnetic-Thermal Modeling the Temperature Distribution of XLPE Cable", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 27-31 March 2009, Wuhan.

[22] Tarasiewicz, E., El-Kady, M.A. ve Anders, G., (1987). "Generalized Coefficients of External Thermal Resistance for Ampacity Evaluation of Underground Multiple Cable Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 2(1): 15-20.

[23] Leon, F. ve Anders, G.J., (2008). “Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method”, IEEE Transactions on Power Delivery, 23(2): 537-543.

[24] Williams, J.A., Parmar, D. ve Conroy, M.W., (1994). “Controlled Backfill Optimization to Achieve High Ampacities on Transmission Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, 9(1): 544-552.

[25] Oclon, P., Cisek, P., Pilarczyk, M. ve Taler, D., (2015). “Numerical Simulation of Heat Dissipation Processes in Underground Power Cable System Situated in Thermal Backfill and Buried in a Multilayered Soil”, Energy Conversion and Management, 95: 352-370.

[26] Vollaro, R.L., Fontana, L. ve Vallati, A., (2014). “Experimental Study of Thermal Field Deriving From an Underground Electrical Power Cable Buried in Non-Homogeneous Soil”, Applied Thermal Engineering, 62(2): 390-397.

[27] Vollaro, R.L., Fontana, L. ve Vallati, A., (2011). “Thermal Analysis of Underground Electrical Power Cables Buried in Non-Homogeneous Soils”, Applied Thermal Engineering, 31(5): 772-778.

[28] Salata, F., Nardecchia, F., Vollaro, R.L. ve Gugliermetti, F., (2015). “Underground Electric Cables a Correct Evaluation of the Soil Thermal Resistance”, Applied Thermal Engineering, 78(5): 268-277.

[29] Anders, G.J., Coates, M. ve Chaaban, M., (2010). “Ampacity Calculations for Cables in Shallow Troughs”, IEEE Transactions on Power Delivery, 25(4): 2064-2072.

[30] Garrido, C., Otero, A.F. ve Cidras, J., (2003). “Theoretical Model to Calculate Steady-State and Transient Ampacity and Temperature in Buried Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, 18(3): 667-678.

[31] El-Kady, M.A. ve Horrocks, D.J., (1985). “Extended Values for Geometric Factor of External Thermal Resistance of Cables in Duct Banks”, IEEE Transactions on Power Apparatus and and Systems, 104(8): 1958-1962.

[32] Neher, J.H. ve McGrath, M.H., (1957). “The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems”, Transaction of the American Institute of Electrical Engineers Power Apparatus and Systems, 76(3): 752-764.

[33] Anders, G.J., Napieralski, A. ve Kulesza, Z., (1999). “Calculation of the Internal Thermal Resistance and Ampacity of 3-Core Screened Cables with Fillers”, IEEE Transactions on Power Delivery, 14(3): 729-734.

[34] Lopez, J.C. ve Romero, P.C., (2011). “Influence of Different Types of Magnetic Shields on the Thermal Behavior and Ampacity of Underground Power Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, 26(4): 2659-2667.

[35] Canova, A., Freschi, F., Giaccone, L. ve Guerrisi, A., (2012). “The High Magnetic Coupling Passive Loop: A Steady-State and Transient Analysis of the Thermal Behavior”, Applied Thermal Engineering, 37: 154-164.

[36] Li, H.J., (2005). “Estimation of Soil Thermal Parameters from Surface Temperature of Underground Cables and Prediction of Cable Rating”, IEEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, 152(6): 849-854.

[37] Li, H.J., Tan, K.C. ve Su, Q., (2006). “Assessment of Underground Cable Ratings Based on Distributed Temperature Sensing”, IEEE Transaction on Power Delivery, 21(4): 1763-1769.

[38] Brakelmann, H. ve Anders, G., (2001). “Ampacity Reduction Factors for Cables Crossing Thermally Unfavorable Regions”, IEEE Transaction on Power Delivery, 16(4): 444-448.

[39] Al-Saud, M.S., (2012). “Improved Assessment of Power Cable Thermal Capability in Presence of Uncertainties”, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 27-29 March 2012, Shanghai.

[40] Thue, W.A., (2003). “Electrical Power Cable Engineering”, Second Edition, Marcel Dekker, New York.

[41] Worzyk, T., (2009). “Submarine Power Cables - Design, Installation, Repair, Environmental Aspects”, First Edition, Springer-Verlag, Berlin.

[42] Anders, G.J., (1997). “Rating of Electric Power Cables - Ampacity Calculations for Transmission, Distribution and Industrial Applications”, First Edition, IEEE Press, New York.

[43] Anders, G.J., (2005). “Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment”, First Edition, John Wiley&Sons, New Jersey.

[44] Lewis, R.W., Nithiarasu P. ve Seetharamu, K.N., (2004). “Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow”, Second Edition, John Wiley&Sons, Tottenham.

[45] Karahan, M., (2007). “Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Güç Kablolarının Isıl Analizi ve Akım Taşıma Kapasitesinin Değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[46] IEC TR 62095, 2003. Electric Cables – Calculations for Current Ratings – Finite Element Method, IEC, First Edition, Switzerland.

[47] Huang, H.C. ve Usmani, A.S., (1994). “Finite Element Analysis for Heat Transfer – Theory and Software”, First Edition, Springer-Verlag, New York.

[48] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L. ve Lavine, A.S., (2006). “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Sixth Edition, John Wiley&Sons, New York.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Barış KÜÇÜKAYDIN

Doğum Tarihi ve Yeri : 28.08.1990 / Edirne

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : bariskucukaydin@klu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Sayısal	Lüleburgaz Anadolu Lisesi	2008

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-2014	Şahin Asansörleri San. ve Tic. Ltd. Şti.	Asansör SMM
2014-Devam	Kırklareli Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Küçükaydın, B. ve Arıkan, O., (2014). “Ortam Koşullarının Yer Altı Kablolarının Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi”, 8. Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), 27-29 Kasım 2014, Bursa.

2. Arikan, O. ve Kucukaydin, B., (2015). “Current Carrying Capacity Analyses of Power Cables”, 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), 23-28 August 2015, Pilsen.