İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABLOLARDA ELEKTRİKSEL VE ISIL ZORLANMALARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ÇOKLU ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Gökhan KARACA

(504041020)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2006

Tez Danışmanı	**Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ**
Diğer Jüri Üyeleri	**Yrd. Doç. Levent OVACIK**
	Yrd. Doç. Lale TÜKENMEZ

MAYIS 2006

ÖNSÖZ

Bana bu çalışmayı yapma olanağı veren, çalışmalarımı büyük bir sabır ve özenle inceleyerek, karşılaştığım zorlukları aşmak için bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, çalışmalarını benimle paylaşarak, tezimin ilerlemesine yardımcı olan Araş. Gör. Murat KARAHAN'a, ayrıca çalışmalarımın her aşamasında bana destek olan arkadaşım Araş. Gör. Suna BOLAT, Zeynep BOZOĞLU ve aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Gökhan KARACA Mayıs, 2006

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR…….. vi
TABLO LİSTESİ…….. vii
ŞEKİL LİSTESİ…….. vii
SEMBOL LİSTESİ…… xii
ÖZET…….. xiii
SUMMARY…….. xv
1 GİRİŞ 1
2 KABLO DİRENÇ VE KAPASİTESİNİN SICAKLIKLA İLİŞKİSİ.....5
2.1 Kablo Direnci 5
2.1.1 DA Direncinin Hesaplanması.....6
2.1.2 DA Direnç Değerinden AA Direnç Değerinin Hesaplanması 7
2.1.2.1 Deri Etkisi.....7
2.1.2.2 Yakınlık Etkisi.....8
2.2 Kablo Kapasitesi.....10
3 KABLO KAYIPLARI 13
3.1 İletken Kayıpları.....14
3.2 Dielektrik Kayıplar.....14
3.2.1 Dielektrik Kayıp Çeşitleri.....15
3.2.1.1 İletim Kaybı (P_R).....15
3.2.1.2 Histerezis Kaybı (P_H).....15
3.2.1.3 Kutuplanma (Polarizasyon) Kaybı) (P_p) 15
3.2.1.4 İyonlaşma Kaybı (P_{iy}).....16
Kablo Tipi 17
3.2.2 Dielektrik Kaybının Sıcaklıkla Değişimi.....18
3.3 Kılıf Kayıpları 20
3.3.1 Kılıfları Her İki Ucundan Bağlı İki Tek Damarlı Kablo ve Üç Tek Damarlı Kablo (Yonca Yaprağı Biçiminde).....21
3.4 Akım Taşıma Kapasitesi.....22
3.4.1 Toprakta Kurumamış Yerde Gömülü Kablolar veya Açık Havadaki Kablolar.....24
3.4.2 Toprakta Kısmen Kurumuş Yerde Gömülü Kablolar.....25
3.4.3 Topraktaki Kurumanın Önlendiği Yerde Gömülü Kablolar.....26
4 ISIL İLETİM.....27
4.1 Kabloların Sınıflandırılması.....27
4.2 Güç Kablolarında Isı İletimi.....28
4.2.1 İletim 28
4.2.2 Taşınım.....29
4.2.2.1 Bir Yüzeyden Geçen Isı 30
4.2.3 Işıma 31
4.3 Enerji Denge Denklemleri.....31
4.4 Isıl Devre Benzerlikleri 32
4.4.1 Isıl Direnç ve Elektriksel Dirençlerin Benzerliği.....32
4.4.2 Isıl Akış ve Yük Akış Çizgilerinin Benzerliği.....35

4.5 Isıl Direnç 36
4.5.1 Isıl Dirençlerin Hesaplanması 37
4.5.1.1 Bir İletken ile Kılıf Arasındaki Isıl Direnç, R_{Td} 37
4.5.1.2 Kılıf ile Zırh Arasındaki Isıl Direnç, R_{Ti} 38
4.5.1.3 Dış Kılıfın Isıl Direnci, R_{Ts} 38
4.5.1.4 Dış ısıl direnç, R_4 38
4.6 Kanallarda Gömülü Kablolar 41
4.6.1 Kablo ile Kanal (veya boru) Arasındaki R'_{Tu} Isıl Direnci 42
4.6.2 Kanalın (veya borunun) kendisinin R''_{Tu} Isıl Direnci 42
4.7 Toprağın Isıl Direnci 44
4.7.1 Saf Toprak 46
4.7.2 Dolgu 47
4.7.3 Yatak Malzemesi 47
5 ISIL DENGESİZLİK 50
5.1 Isıl Dengesizlik 50
6 KABLOLARIN DÖŞENMESİ 56
6.1 Yeraltı Kablolarının Dezavantajları 56
6.1.1 Yüksek Fiyat 56
6.1.2 Teknik Dezavantajlar 56
6.1.3 Sınırlı Güç Taşıma Kapasitesi 57
6.1.4 Sürekli Hata Riski 57
6.2 Kullanım Amacına ve Yerine Göre Kablolar 57
6.2.1 F – Kablolar 57
6.2.2 N – Kablolar 57
6.2.3 Y – Kablolar 57
6.2.3.1 Y – Kablolarının Döşenmesi 58
7 ELEKTROSTATİK 66
7.1 Silindirsel Elektrot Sistemi 66
8 UYGULAMA 69
8.1 Elektrostatik Analiz 69
8.2 Isıl Analiz 75
8.2.1 Bir Kablonun Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları 77
8.2.1.1 K_G = 1 °K.m/W 77
8.2.1.2 K_G = 2,5 °K.m/W 78
8.2.1.3 K_G = 0,7 °K.m/W 80
8.2.2 Yan Yana Döşenen Üç Kablonun Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları 82
8.2.2.1 K_G = 1 °K.m/W 82
8.2.2.2 K_G =,5 °K.m/W 85
8.3 Çoklu Fiziksel Analiz 87
8.3.1 Kabloların Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları 88
8.3.1.1 K_G = 1 °K.m /W 88
8.3.1.2 K_G = 2,5 °K.m / W iken 90
8.3.1.3 K_G = 0,7 °K.m /W iken 93
8.3.2 Yan Yana Döşenmiş Üç Kablonun Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları 97
8.3.2.1 K_G = 1 °K.m/W 97
8.3.2.2 K_G = 2,5 °K.m/W 99
8.3.2.3 K_G = 0,7 °K.m/W 101
8.3.3 Kablodaki Sıcaklığın Kablolar Arası Uzaklıkla Değişimi 104
8.3.3.1 Kablolar Arası Uzaklık 8 cm iken 104
8.3.3.2 Kablolar Arası Uzaklık 9 cm iken 106
8.3.3.3 Kablolar Arası Uzaklık 10 cm iken 108
8.3.4 Kablo Gömülme Derinliği – Sıcaklık Dağılımı 112

8.3.4.1 Gömülme Derinliği 70 cm....112
8.3.4.2 Gömülme Derinliği 90 cm....113
8.3.4.3 Gömülme Derinliği 100 cm....114
8.3.4.4 Gömülme Derinliği 110 cm....114
8.3.4.5 Gömülme Derinliği 120 cm....115
8.3.5 Ortadaki Kablonun Gömüme Derinliği Değiştirilirse....117
8.3.5.1 Ortadaki Kablo 5 cm Yukarıya Döşenirse....117
8.3.5.2 Ortadaki Kablo 5 cm Aşağıya Döşenirse....119
8.3.6 Toprak Yüzey Sıcaklığı – Kabloların Sıcaklık Dağılımı....122
8.3.6.1 Toprak Yüzey Sıcaklığı 15 ºC....122
8.3.6.2 Toprak Yüzey Sıcaklığı 10 ºC....123
8.3.6.3 Toprak Yüzey Sıcaklığı 0 ºC....124
8.3.7 Sadece Dielektrik Kayıplar....126
9 SONUÇLAR VE ÖNERİLER....129
KAYNAKLAR....131
ÖZGEÇMİŞ....135

KISALTMALAR

AA	: Alternatif akım (Alternating current)
DA	: Doğru akım (Direct current)
PVC	: Polivinilklorür (Poly Vinyl Choride)
PE	: Polietilen (Poly Ethylene)
XLPE	: Çapraz bağlı polietilen (Cross-linked Poly Ethylene)
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Kablolarda kullanılan iletken malzemelerin 20°C'deki elektriksel özdirençleri ve sıcaklık katsayıları 5
Tablo 2.2 : Deri etkisi ile yakınlık etkisinin k_s ve k_p katsayıları için bakır iletkenlerde genel olarak izin verilen deneyimsel değerler 10
Tablo 3.1 : Şebeke frekansında yüksek gerilim ve orta gerilim kablolarının yalıtımı için bağıl dielektrik katsayıları ve kayıp faktörleri 17
Tablo 4.1 : Isı ile elektrik arasında analojik büyüklükler.....36
Tablo 4.2 : Malzemelerin ısıl özdirenç değerleri 40
Tablo 4.3 : Toprak bileşenleri ısıl özdirenç değerleri 48
Tablo 4.4 : Deniz seviyesindeki çevre sıcaklıkları 49
Tablo 4.5 : Nem oranına göre toprak ısıl özdirenç değerleri.....49
Tablo 5.1 : Bazı maddelerin öz ısı değerleri 53
Tablo 6.1 : Toprak kablo kanallarının ölçüleri ve kablolar arasındaki en küçük uzaklıklar.....61
Tablo 8.1 : Analizi yapılan kablo örneği için teknik veriler ve boyutlar.....69
Tablo 8.2 : Analizi yapılan kablo örneği için teknik veriler ve boyutlar.....75
Tablo 8.3 : Kablo iletken akımına karşılık yalıtkandaki en yüksek sıcaklık.....90
Tablo 8.4 : Kablo iletken akımına karşılık yalıtkandaki en yüksek sıcaklı°K.....92
Tablo 8.5 : Kablo iletken akımına karşılık yalıtkandaki en yüksek sıcaklı°K.....95
Tablo 8.6 : Kaynak [1]' de bulunan sonuçlar;.....96
Tablo 8.7 : Kablolar arasındaki uzaklıklara göre kabloların sıcaklıkları 110
Tablo 8.8 : Kabloların gömülme derinlileriyle iletken sıcaklıklarının değişimi 116

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Bir dielektriğin basitleştirilmiş eşdeğer devresi. 10
Şekil 2.2 : Kapasitenin frekansla değişimi 11
Şekil 2.3 : Kapasitenin sıcaklıkla değişimi 12
Şekil 3.1 : Kayıp açısı 14
Şekil 3.2 : Emprenye kağıt yalıtkanlı bir kablo için güç faktörünün sıcaklıkla değişimi 18
Şekil 3.3 : Katı yalıtkanlarda kayıp sayısının sıcaklığa göre değişimi 19
Şekil 3.4 : Toprağa gömülmüş tek damarlı kablo için ısıl eşdeğer devre 23
Şekil 3.5 : Toprağa gömülmüş üç damarlı kablo için ısıl eşdeğer devre 24
Şekil 4.1 : Bir boyutlu ısı geçişi 30
Şekil 4.2 : Elektriksel direnç ile ısıl direnç arasındaki benzerlik 32
Şekil 4.3 : Seri bağlı ısıl dirençler 33
Şekil 4.4 : Eş potansiyel çizgileri ve elektrik alan çizgileri 35
Şekil 4.5 : Eş sıcaklık çizgileri ve ısı akış çizgileri 35
Şekil 4.6 : Boru içine döşenen kablo için ısıl dirençler ve kayıplar 43
Şekil 4.7 : Tek damarlı kablonun bölümleri 44
Şekil 4.8 : Isı akışı ve yük akışı arasındaki benzerlik 45
Şekil 4.9 : Toprağa gömülü kablo ve toprağın bölümleri 46
Şekil 5.1 : Isıl dengenin grafiksel gösterimi 51
Şekil 6.1 : Toprak kanalda en küçük yatay ve düşey uzaklıklar 59
Şekil 6.2 : Bir ve iki AG kablosu döşenen toprak kanalın ölçüleri 60
Şekil 6.3 : AG ve YG kablolarının birlikte döşendiği toprak kanalın ölçüleri 61
Şekil 6.4 : Kabloların beton kanalın zeminine döşenmesi 64
Şekil 6.5 : Kabloların beton kanalın yan duvarlarına kelepçeler ve konsollar üzerinde döşenmesi 65
Şekil 7.1 : Eş eksenli silindirsel elektrot sistemi 66
Şekil 8.1 : 8,7 / 15 kV PVC yalıtkanlı bir damarlı OG güç kablosu 69
Şekil 8.2 : Elektriksel ve ısıl analizi yapılacak kablonun görüntüsü 70
Şekil 8.3 : Üçgen elemanlardan oluşan sonlu elemanlar ağı 70
Şekil 8.4 : 8,7 / 15 kV anma gerilimine sahip kablo yalıtkanındaki potansiyel dağılımı 71
Şekil 8.5 : 8,7/ 15 kV anma gerilimine sahip kablodaki eş potansiyel eğriler 72
Şekil 8.6 : 8,7/ 15 kV anma gerilimine sahip kablodaki eş potansiyel eğriler ve onlara dik elektrik alan çizgileri 73
Şekil 8.7 : 8,7/ 15 kV anma gerilimine sahip kablo yalıtkanındaki elektrik alan dağılımı 74
Şekil 8.8 : 20,3 / 35 kV anma gerilimli bir damarlı XLPE yalıtkanlı OG Güç kablosu 75
Şekil 8.9 : K_G = 1 °K.m/W olan toprakta sıcaklık dağılımı 77
Şekil 8.10 : K_G = 1 °K.m/W iken kablo içindeki sıcaklık dağılımı 78
Şekil 8.11 : K_G =2,5 °K.m/W olan toprakta sıcaklık dağılımı 79
Şekil 8.12 : K_G = 2,5 °K.m / W iken kablo içindeki sıcaklık dağılımı 80
Şekil 8.13 : K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta sıcaklık dağılımı 81
Şekil 8.14 : K_G = 0,7 °K.m/W iken kablo içindeki sıcaklık dağılımı 82

Şekil 8.15 : K_G = 1 °K.m/W olan toprakta yan yana gömülen üç kablonun yarattığı sıcaklık dağılımı 83
Şekil 8.16 : K_G = 1 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablonun sıcaklık dağılımı....84
Şekil 8.17 : K_G = 1 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı 84
Şekil 8.18 : K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta yan yana gömülen üç kablonun yarattığı sıcaklık dağılımı 85
Şekil 8.19 : K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablonun sıcaklık dağılımı....86
Şekil 8.20 : K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı 86
Şekil 8.21 : Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 1 olan toprak koşullarında sıcaklık dağılımı 88
Şekil 8.22 : Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 1 °K.m/W olan toprak koşullarında kablo içindeki sıcaklık dağılımı....89
Şekil 8.23 : Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 2,5 °K.m / W olan toprakta sıcaklık dağılımı 91
Şekil 8.24 : Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 2,5 olan toprak koşullarında kablo içindeki sıcaklık dağılımı 92
Şekil 8.25 : Çoklu fiziksel analiz K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta sıcaklık dağılımı 93
Şekil 8.26 : K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta kablonun sıcaklık dağılımı 94
Şekil 8.27 : K_G = 1°K.m/W toprak koşullarında 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç tane kablo durumunda sıcaklık dağılımı....97
Şekil 8.28 : K_G = 1 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablonun sıcaklık dağılımı....98
Şekil 8.29 : K_G = 1 °K.m /W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı 98
Şekil 8.30 : K_G = 2,5 °K.m/W toprak koşullarında 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç tane kablo durumunda sıcaklık dağılımı 99
Şekil 8.31 : K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablonun sıcaklık dağılımı....100
Şekil 8.32 : K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı 100
Şekil 8.33 : K_G = 0,7 °K.m/W toprak koşullarında 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç tane kablo durumunda sıcaklık dağılımı 101
Şekil 8.34 : K_G = 0,7 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablonun sıcaklık dağılımı....102
Şekil 8.35 : K_G = 0,7 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı 102
Şekil 8.36 : Kablolar arasındaki uzaklık 8 cm olduğunda sıcaklık dağılımı....104
Şekil 8.37 : Kablolar arası uzaklık 8 cm iken yan yana üç kablonun sıcaklık dağılımı 105
Şekil 8.38 : Kablolar arası uzaklık 8 cm iken ortadaki kablonun sıcaklık dağılımı .105
Şekil 8.39 : Kablolar arasındaki uzaklık 9 cm olduğunda sıcaklık dağılımı....106
Şekil 8.40 : Kablolar arası uzaklık 9 cm iken sıcaklık dağılım grafiği....107
Şekil 8.41 : Kablolar arası uzaklık 9 cm iken ortadaki kablonun sıcaklık dağılım grafiği 107
Şekil 8.42 : Kablolar arası uzaklık 10 cm iken sıcaklık dağılımı 108
Şekil 8.43 : Kablolar arası uzaklık 10 cm kabloların sıcaklık dağılımı 109
Şekil 8.44 : Kablolar arası uzaklık 10 cm iken ortadaki kablonun sıcaklık dağılımı 109
Şekil 8.45 : Kablo 70 cm derinliğe gömüldüğünde....112
Şekil 8.46 : 70 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı....113
Şekil 8.47 : 90 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı....113

Şekil 8.48 : 100 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı.....114
Şekil 8.49 : 110 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı.....115
Şekil 8.50 : 120 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı.....115
Şekil 8.51 : Ortadaki kablo 5 cm yukarıya gömüldüğünde sıcaklık dağılımı.....117
Şekil 8.52 : Ortadaki kablo 5 cm yukarıya gömüldüğünde alttaki kabloların ısıl dağılımları 118
Şekil 8.53 : Yukarıdaki kablonun ısıl dağılımı 118
Şekil 8.54 : Ortadaki kablo 5 cm aşağıya gömüldüğünde sıcaklık dağılımı.....119
Şekil 8.55 : Ortadaki kablo 5 cm aşağıya gömüldüğü zaman diğer kabloların ısıl dağılımları 120
Şekil 8.56 : Aşağıdaki kablonun ısıl dağılımı 120
Şekil 8.57 : Toprak yüzey sıcaklığı 15 ºC olduğunda kablolardaki sıcaklık dağılım grafiği 122
Şekil 8.58 : Toprak yüzey sıcaklığı 10 ºC olduğunda kablolardaki sıcaklık dağılımları 123
Şekil 8.59 : Toprak yüzey sıcaklığı 5 ºC olduğunda kablolardaki sıcaklık dağılımı124
Şekil 8.60 : Toprak yüzey sıcaklığı 0 ºC olduğunda, kabloları sıcaklık dağılımı 125
Şekil 8.61 : 7 cm yatay açıklıkla yan yana döşenen üç kablonun sadece dielektrik kayıplarının oluşturduğu sıcaklık dağılımı.....126
Şekil 8.62 : Üç kabloda dielektrik kayıpları sonucu oluşan sıcaklık dağılımı 127

SEMBOL LİSTESİ

A, S	: İletkenin kesit alanı, (mm^2)
c	: Kayıp katsayısı
C	: Kapasite (F)
d_l	: Yalıtımın dış çapı (ekran hariç) (mm)
d_M	: Kılıfın dış çapı (mm)
d_z	: Zırhın dış çapı (mm)
D_o	: Kanalın dış çapı (mm)
D_d	: Kanalın iç çapı (mm)
h	: Toprak yüzeyinden kablo eksenine kadar uzaklık (mm)
h_t	: Isı taşınım katsayısı (W/m°K)
I	: Akım (A)
k	: Malzemenin ısıl öz iletkenliği (W/m°K)
K	: Isıl özdirenç (°K.m /W)
K_{die}	: Yalıtkanda kullanılan malzemelerin ısıl özdirenci (°K.m/W)
K_G	: Toprağın ısıl özdirenci (°K.m/W)
K_d	: Kuru toprağın ısıl özdirenci (°K.m /W)
K_w	: Nemli toprağın ısıl özdirenci (°K.m/W)
P_i, P_d, P_s, P_a	: İletken, dielektrik, kılıf ve zırh kayıpları (W)
P_R, P_H, P_P, P_{iy}	: İletim, histeresiz, kutuplanma (polarizasyon), iyonlaşma kaybı (W)
q	: Isı akısı (W/m^2)
Q	: Çevreye verilen veya çevreden alınan ısı (W)
r_m	: Ortalama kılıf yarıçapı (mm)
R_{20}	: İletkenin 20 °C' deki DA direnci
R_i	: İletken çapı (mm)
R_{ac} , R_{dc}	: En büyük çalışma sıcaklığında iletkenin AA ve DA direnci, (ohm)
R_{T1}, R_{T2}	: İletkenin T_1 ve T_2 sıcaklığındaki direnci, (ohm),
R_T	: Isıl direnç, (°K.m/W),
R_{Td}	: Yalıtkanın ısıl direnci (°K.m/W)
R_{TG}	: Yeraltı kablosunun çevresindeki toprağın ısıl direnci (°K.m/W)
R_{Ti}	: İç koruyucu kısımların ısıl direnci (°K.m/W)
R_{Ts}	: Dış kılıfın ısıl direnci (°K.m/W)
R_{Tu}	: Kablonun dış ısıl direnç değeri (°K.m/W)
$\tan\delta$	: Kayıp faktörü
t_1	: İletken ile kılıf arasındaki yalıtımın kalınlığı (mm)
t_2	: Zırhın altındaki tabakanın kalınlığı (mm)
t_3	: Dış kılıfın kalınlığı (mm)
T	: Sıcaklık (°C)
T_0	: Ortam sıcaklığı (°C)

T_s : Yüzeyin sıcaklığı (°K)

T_m : En büyük çalışma sıcaklığı (°C)

ΔT : Ortam sıcaklığı üzerindeki iletken sıcaklık artışı (°K)

T_i, T_s, T_G : İletkenin, kılıfın ve kabloyu çevreleyen toprağın sıcaklıkları (°C)

T_s^* : Yüzeyin mutlak sıcaklığı (°C)

U : Gerilim (V)

k_s : Deri etkisi katsayısı

k_p : Yakınlık etkisi katsayısı,

ε_r : Yalıtımın bağıl dielektrik katsayısı,

λ_1 : Kılıf kayıpların, bütün iletkenlerdeki toplam kayıplara oranı,

λ_2 : Zırh kayıplarının, bütün iletkenlerdeki toplam kayıplara oranı,

λ_1', λ_1'' : Sirkülasyon akımları, fuko akımları nedeniyle oluşan kaybın kablodaki bütün iletkenlerdeki toplam kayıplara oranı,

dT/dx : Sıcaklık gradiyantı,

σ_B : Stefan - Boltzmann sabiti (σ_B = 5,67.10^{-8} W/m^2.K^4),

ε_0 : Kablo yüzeyinin bağıl ısı yayma faktörü,

ρ : Özdirenç (ohm.m),

ρ_{20} : İletkenin 20 °C'deki özdirenci (ohm.m),

ρ_T : Kanal malzemesinin ısıl özdirenci (°K.m / W).

KABLOLARDA ELEKTRİKSEL VE ISIL ZORLANMALARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ÇOKLU ANALİZİ

ÖZET

Yeraltı kabloları son yıllarda hızla havai hatların yerini almaktadır. Özellikle nüfusun yoğun olduğu yerleşim merkezlerinde yeraltı kabloları kullanılmaktadır. Artan önemine karşılık, yeraltı kabloları, yalıtkanının sıcaklık sınırı ve iletkeninin akım taşıma kapasitesi dolayısıyla birçok yönden araştırılması ve kontrol edilmesi gereken bir konudur. Bu tez çalışmasında da kablolardaki elektriksel ve ısıl zorlanmalar hakkında bilgiler verilmiş ve bu zorlanmalar altında kabloların farklı toprak koşulları, yerleşim, gömülme derinlikleri, toprak yüzey sıcaklığı gibi değişkenlere bağlı olarak sıcaklık dağılımları bulunmuştur.

Birinci bölüm, kabloların kullanılma sebeplerinin anlatıldığı, kablolar hakkında analitik ve sayısal yöntemlerle yapılan hesaplama çalışmalarının söz edildiği, giriş niteliği taşıyan bir bölümdür. İkinci bölümde, kablonun elektriksel direncinin doğru akımda ve alternatif akımda hesaplanması hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca kablo kapasitesinin hesabı anlatılmıştır. Bunlara ek olarak, bu bölümde elektriksel büyüklüklerin sıcaklıkla değişimleri hakkında genel bilgiler verilerek, bu bilgiler formüller ve grafiklerle desteklenmiştir.

Üçüncü bölümde, kablonun iletkeninde, yalıtkanında, kılıfında ve zırhında ısı olarak ortaya çıkan kayıplar hakkında bilgiler verilmiştir. Kablo kayıplarının oluşum sebepleri ve değişimleri anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde, yeraltı kabloları için çok önemli olan akım taşıma kapasitesi anlatılmaktadır. Akım taşıma kapasitesini hesaplarken kullanılan formüller, kullanılan formüllerdeki değişkenler ve akım taşıma kapasitesini etkileyen faktörler belirtilmiştir.

Dördüncü bölümde, ilk olarak ısı akışı hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Isının iletim, taşınım, ışıma yollarıyla yayılması hakkında genel bilgiler ve formüller verilmiştir. Özellikle akım taşıma kapasitesinin hesabını kolaylaştıran ısıl devre ve elektriksel devre arasındaki benzerlik hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonraki kısımlarda, doğrudan gömülmüş ve boru içinde gömülmüş kabloların iç ve dış ısıl dirençlerinin hesabı için gerekli formüller verilmiştir. Bu bölümde son olarak, kablonun gömüldüğü toprağın bileşenleri ve ısıl özelliklerinden ve toprağın ısıl özdirencinden söz edilmiştir.

Beşinci bölümde, kabloda üretilen ısının, kablodan çevreye yayılan ısıdan yüksek olduğu kritik durumda ortaya çıkan ısıl dengesizlik hakkında bilgiler verilmiştir. Altıncı bölümde ilk olarak, son yılarda çeşitli sebeplerden dolayı havai hatların yerini almaya başlayan yeraltı kablolarının dezavantajları sıralanmıştır. Daha sonra F, N ve Y – kabloları hakkında genel bilgiler verilmiş ve Y – kablolarının döşenmesinde dikkat edilmesi gereken konular anlatılmıştır. Toprak kanalda ve beton kanalda kabloların döşenmesi anlatılmış, kabloların döşenmesinde ülkemizde ve dünyada uyulması gereken ölçü ve kurallar şekiller ve tablolarla verilmiştir.

Yedinci bölümde, ilk olarak kablo yapısına uygun olduğu için silindirsel elektrot sisteminde potansiyel formülünün çıkarılışı gösterilmiştir. Bunun yanında eş eksenli silinirsel elektrot sisteminde elektrik alan ve kapasite hesabı formüllerle verilmiştir.

Sekizinci bölümde önce sonlu elemanlar yöntemiyle kablonun topraktaki elektrostatik ve ısıl analizi yapılmıştır. Daha sonra 20,3/35 kV XLPE (35 mm^2 kesitli) kablonun kayıplarının ısı kaynağı olarak kullanıldığı çoklu zorlanma koşulları incelenmiştir. Önce tek bir kablonun farklı ısıl özdirence sahip toprak koşullarında sıcaklık dağılımları ve akım taşıma kapasiteleri bulunmuştur. Aynı uygulama aynı boyutlarda yan yana döşenen üç kablonun sıcaklık dağılımlarının bulunması için tekrarlanmıştır. Daha sonra belirli bir toprak ısıl özdirenç değerinde, kablolar arası yatay açıklığa karşılık sıcaklık dağılımındaki değişim araştırılmıştır. Ayrıca kabloların 0,7 – 1,2 m arasında değişen gömülme derinlikleri için sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Buna ek olarak, sadece ortadaki kablonun gömülme derinliği değiştirilerek kablolardaki ve toprak kanaldaki sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Son olarak, kullanılan yalıtkanın özelliklerinden dolayı, düşük olması beklenen dielektrik kayıplarının kabloda ve toprak kanalda yarattığı sıcaklık araştırılmıştır.

Sonuç olarak kullanım alanı her geçen gün artan yeraltı kablolarındaki elektriksel ve ısıl zorlanmaların sonlu elemanlarla ortak çözümü yapılmıştır. Farklı yerleşimler, kablo düzenleri ve derinlikler için zorlanmalar incelenmiştir, sıcaklık dağılımları ve akım taşıma kapasiteleri bulunmuştur. Bulunan değerler, kablo üreticilerinin verdiği değerlerle karşılaştırılmıştır.

MULTI–ANALYSIS OF ELECTRICAL AND THERMAL STRESSES IN CABLES BY FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

Transmission and distribution of electric power through underground cables is a viable alternative to overhead lines nowadays, particularly in residental or highly populated areas. Adding to increasing importance, because of the maximum allowable temperature of the insulation and the current carrying capacity of conductor limitations, underground cables are a very important subject that should be investigated and worked on. In this thesis, general information about electrical and thermal stresses in cables are given and under these stresses, the temperature distribution of cables according to different surrounding soil properties, different cable arrangements, different laying depth and different ground temperature values are found.

The first chapter of this thesis is an introduction in which the advantages of underground cables are presented and the calculation studies on cables by analytical and numerical methods are reviewed.
In the second chapter of this thesis, therotical information is given for the calculation of electrical resistance in alternating current and in direct current. Also in this chapter calculation of cable capacity is explained. Lastly in this chapter, general information about the change in electrical properties as capacity and resistance with the change in temperature is given.

In the third chapter, information is given about the losses generated as heat in conductor, dielectric, sheath and armour of the cable. The causes and changes of cable losses are mentioned. Also in this chapter, current carrying capacity that is very important for underground cables is explained. Formulas used to calculate current carrying capacity are given and variables in the formulas and the factors affecting current carrying capacity are explained.

In the fourth chapter, firstly detailed information about heat transfer is given. Formulas and information about the spread of heat out by conduction, convection and radiation are also given. Also in this chapter, analogy between heat and electric circuit that makes the calculation of current carrying capacity easier is shown. The equations about heat and electric is given together to show the analogy between them. Also to support this analogy, some pictures are given. Later in this chapter, formulas to calculate the inner and outer thermal resistances of the cables that are directly burried and burried in ducts are given. Lastly in this chapter, the thermal properties of soil surrounding the cable and thermal resistivity of the soil according to the components of the soil are mentioned.
In the fifth chapter of this thesis, information about thermal instability that occurs in critical situation when the heat generated in the cable is higher than the heat dissipated is given.

In the sixth chapter, firstly disadvantages of underground cables compared with overhead lines are given. Later, general information about F, N and Y – cables are

given and also subjects that should be cared when laying Y - cables. Laying and installation of cables in soil and concrete trenchs are explained and the measurements and rules that should be obeyed in our country and in the world in laying of cables are given in tables and pictures.
In the seventh chapter, firstly, computation of potential formula in cylindrical electrode system that is suitable to examined cable is shown. Adding that, calculation of electrical field and capacity in co-axial cylindrical electrode system is given with formulas.

In the last chapter, electrostatic and thermal stresses of underground cables by Finite Element Method are analyzed. Later in this chapter, multiphysics analysis of 20,3/35 kV XLPE (35 mm^2 cross section area) using the losses as heat source is done. Firstly, temperature distributions and current carrying capacities of single cable in different soil thermal resistivities are found. The process is repeated to get the temperature distribution of three identical cables laid vertically. Later, for a certain soil thermal resistivity, the change in temperature distribution according to the vertical distances between cables is investigated. Also, the temperature distribution of cables according to depth of laying from 0,7 to 1,2 m is investigated. Adding this, the temperature distribution in cables and trench is found when only the depth of the cable in the middle changes. Lastly in this chapter, the change in channel temperature that is caused by only dielectric losses that is expected to be low because of the insulation material characteristics.

As a result, multi electrical and thermal stresses of underground cables by finite element method are analyzed. Stresses in different laying, arrangements, depths are investigated and temperature distributions and current carrying capacities are found. The values obtained from analysis are compared with values given by cable manufacturers.

1 GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ve sanayileşmenin hızlanması, elektrik enerjisine olan ihtiyacı her zamankinden daha çok arttırmıştır. Günlük hayatta kullanılan birçok araç elektrikle çalışmaktadır. Buna karşılık, elektriğin diğer enerji kaynaklarından farklı olarak, depolanamayan bir enerji olması ve üretim yerlerinin tüketim yerlerine olan uzaklığı yıllar boyunca önemli bir sorun olmuştur. Üretilen enerjinin hızlı ve minimum kayıpla, tüketicilerin değişen talebini karşılaması gerekmektedir. Taşınabilen güç düzeyi ve kayıplar açısından en uygun durum, elektriğin yüksek gerilimle iletilmesidir.

Ülkemizde ve dünyada yüksek gerilim çıplak iletkenlerle, havai hatlarda taşınmaktadır. Bu şekilde enerji iletim ve dağıtımın birçok avantajı vardır. Ancak buna karşılık yeraltından kablolarla iletim ve dağıtımın daha uygun olduğu, hatta zorunlu olduğu durumlar da vardır.

Özellikle nüfusun yoğun olduğu ve yolların, büyük binaların, tren yollarının olduğu büyük şehirlerde, dağlık bölgelerde ve sanayi bölgelerinde, havai hatların kullanılmasının estetik olmayacağı yerlerde yüksek gerilimde de yeraltı kabloları kullanılır. Bunun dışında, sabotaj riskinin olabileceği bazı stratejik bölgelerde, yıldırım düşme ihtimalinin yüksek olduğu bölgelerde ve derin göller, deniz, akarsu geçişlerinde havai hatlar kullanılmaz.

Gerek elektrik ve malzeme tekniğindeki gelişmeler, gerekse diğer teknolojik gelişmeler sonucunda artan elektrik ihtiyacıyla, enerjinin taşındığı gerilim seviyesi yıllar içinde artmıştır ve artmaya da devam edecektir. İlk başlarda 33 kV'luk dağıtım seviyesinde, geleneksel olarak tek ve üç damarlı kâğıt yalıtkanlı kablolar kullanılırdı. Daha sonra 66 kV, 132 kV, 220 kV, 400 kV gibi gerilim seviyeleri için alçak basınçlı ve yüksek basınçlı yağlı kablolar kullanılmaya başlandı. 1980'den sonra ise 33 kV – 800 kV için, tamamen yeni iki tip kablo sistemi geliştirildi. Bunlar; 400 kV'a kadar XLPE (Çapraz bağlı polietilen) yalıtkanlı kablolar ve daha yüksek gerilim seviyeleri için (800 kV), SF_6 gaz yalıtkanlı kablolardır. Teknolojik gelişmelerle birlikte, uygulamadaki karşılaşılan problemler için, her geçen gün kablolar ile ilgili yeni çalışmalar ve gelişmeler sürmektedir.

Elektriğe duyulan artan gereksinim nedeniyle, geçmişte karşılaşılmış ve gelecekte oluşabilecek olası sorunlara karşı çalışmalar devam etmektedir. Yeraltı kablolarının elektriksel, ısıl, mekanik zorlanma koşullarının bilinmesi ve bu zorlanmalara karşı gerekli iletken ve yalıtkan malzemelerinin geliştirilmesi ve bu malzemelerin farklı koşullar altındaki davranışları üzerinde birçok çalışmalar yapılmaktadır. Zorlanmalar sadece kablonun yalıtkanında ve iletkeninde olmadığı için diğer kablo donatıları (kablo ekleri, kablo başlıkları) üzerinde de çalışmalar ayrıca devam etmektedir.

İyi bir elektriksel yalıtkanın yalıtım direncinin ve dielektrik dayanımının yüksek, dielektrik kayıplarının ve dielektrik sabitinin düşük olması gerekmektedir. Bunun yanında ısıl ve mekanik zorlanmalara karşı dayanıklı olmalıdır. En önemlisi ise bu iyi özelliklerini yalıtkanın ömrü boyunca ve çevre koşullarına göre değişmeden, sürekli olarak taşımasıdır. Yalıtkanlarla ilgili çalışmaların amacı da aynı şekilde, artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılarken, yalıtkanda karşılaşılabilecek delinme, kısmi boşalma, ağaçlanma, iz oluşumu problemlerinin en aza indirgenerek, güvenilir, uzun ömürlü ve ekonomik kablo yapılarının elde edilmesidir.

Yeraltı kablolarının basit yapısı, taşınan güç ve gerilim düzeyi arttıkça yerini, elektriksel zorlanmaların yanında, artan mekanik ve ısıl zorlanmalarla birlikte oldukça karmaşık bir yapıya bırakır. Bunun yanında, yeraltı kablolarıyla elektriksel iletim, hava hatlarına göre masraflı olduğu için çoğu zaman en yüksek akım taşıma kapasitesinde işletilirler. Yalıtkan ve toprak iyi ısıl iletkenler olmadıklarından, çoğunluğunu kablo iletkeninden geçen akımın oluşturduğu kayıpların sebep olduğu ısı, kablodan etkin bir şekilde uzaklaştırılamadığı için ısıl delinme riski yaratır [1]. Bütün bunların sonucunda, yeraltı kablolarının ısıl dağılımının belirlenmesi, toprak bileşimi ve nem miktarı, çevresel etmenler, kablo cinsi, kabloda kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin ısıl dirençleri gibi birçok değişkene bağlı olduğu için üzerinde birçok çalışmaların yapıldığı önemli bir konudur.

Yeraltı kablolarında sıcaklık dağılımını ve akım taşıma kapasitesini belirlemek için yapılan ilk çalışmalarda, ampirik yaklaşımlarla beraber sıkça analitik yöntemler kullanılıyordu. 1932 yılında, Simmons, yeraltı kablolarında sıcaklık dağılımının yaklaşık hesabıyla ilgili ayrıntılı bir dizi makale ve yazı yayınlamıştır. İlerleyen yıllarda (1957), bu çalışma Neher ve Mc Grath tarafından farklı kablo geometrileri ve yüklenme koşulları için geliştirilmiştir. Çalışmalarında basit ve büyük yaklaşıklıkta sonuçlar veren toplu parametreli gösterimi kullanmışlardır. Bu çalışma, kum yatak malzemesi ile toprağın ısıl özelikleri arasındaki fark iyi ifade edilememiş olmasına rağmen, bir çok tasarım çalışmasının temelini oluşturmuştur. Kennelly formülünde

ise yeraltı kablosunun ısıl alanındaki sıcaklık dağılımı ile, aynı kablo geometrisi için elektrostatik alandaki potansiyel dağılımı arasındaki benzerlik temel alınmıştır. Birden çok kablonun analizinde Kennely formülü hala süperpozisyon teoreminin yardımıyla kullanılmaktadır [2].

Bilgisayarlardaki gelişmelere paralel olarak, analitik yöntemler, yerini sınır elemanları [3], sonlu farklar [4,5] ve sonlu elemanlar [6,7] gibi sayısal yöntemlere bırakmışlardır. Kullanılan bu sayısal yöntemlerde, sıcaklık dağılımlarının bulunması için ortaya çıkan denklem takımlarının çözümünde Gauss – Seidel [8], Newton Raphson [9] yinelemeli çözüm yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmalarda ve diğer benzeri çalışmalarda, değişik kablo yapıları, geometrileri, çevre ve toprak koşulları, değişik gömülme derinlikleri, farklı geometriler, için kabloların sıcaklık dağılımları ve akım taşıma kapasitesi değerleri araştırılmıştır.

Yapılan çalışmaların bir kısmında, kablonun gömüldüğü toprağın nem değerleri değiştirilerek, yani toprağın ısıl özdirenç değerleri değiştirilerek, kabloların bu durumdaki sıcaklık dağılımları ve bu sıcaklık dağılımlarından hareketle, kabloların taşıyabileceği akım kapasiteleri araştırılmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda, toprak homojen kabul edilmiş, topraktaki nem değişimi göz ardı edilmiştir. Bu çalışmalarda bulunan sonuçlar, kablo üreticilerinin verdiği, toprak ısıl özdirencine göre akım düzeltme katsayılarının temelini oluşturmaktadır.

Bunun yanında, toprak özellikleri sabit olmak üzere, birden çok kablonun birbirleri arasındaki yatay ve düşey açıklıkları, gömülme derinlikleri gibi kablo yerleşimiyle ilgili değişiklikler yapılmış ve bu durumda kablolardaki sıcaklık dağılımları, akım taşıma kapasiteleri ve kabloların soğuyabilme özellikleri araştırılmıştır. Örnek olarak [8] çalışmasında üç kablonun aralarındaki yatay ve düşey açıklıklar değiştirilerek, sonlu farklar yöntemiyle ısıl analizi yapılarak en uygun yerleşim araştırılmıştır. Bu çalışmalarda bulunan sonuçlardan, kablolar arasında olması gereken minimum açıklık ve minimum gömülme derinlikleri değerleri belirlenmiştir.

Geçmişte yapılan çalışmalarda oldukça çok araştırılan bir konu ise, farklı kablo malzemelerinin kıyaslanması ve kullanılmaları durumunda ortaya çıkan sıcaklık dağılımıdır. Kablo iletkeninin ısıl direnci çok düşük olduğu için ihmal edilebilir ancak, özellikle kablo yalıtkanı olarak kullanılan malzemelerin ısıl özellikleri çok önemlidir. Kablolarda kullanılan yalıtkan malzemelerin bazılarının dielektrik özellikleri, bazılarının ise ısıl özellikleri iyidir. Örnek olarak, [1]'de PE ve XLPE yalıtkanlı yeraltı kablolarının ayrı ayrı ısıl analizleri yapılarak akım taşıma kapasiteleri bulunmuştur.

Yapılan bu çalışmalar ve kıyaslamalar sonucunda, malzemelerin zayıf olan özellikleri bulunmaktadır. Bu sonuçlara göre, kablo üreticileri en uygun kablo malzemelerini üretmek için çalışmaktadır.

Bu tez çalışmasında ise, kablolarda elektriksel ve ısıl zorlanmaların sonlu elemanlar yöntemi ile ortak çözümü yapılacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, farklı toprak ısıl özdirenç değerlerinde bir tane tek damarlı kablonun, üç tane tek damarlı kablonun ve üç damarlı kablonun elektriksel ve ısıl zorlanmaları hesaba katılarak kabloda ve toprakta sıcaklık dağılımı analizleri yapılacak, üç kablonun farklı yatay açıklıklarda ve farklı gömülme derinliklerinde oluşan sıcaklık dağılımları bulunacaktır. Bulunan bu sıcaklık dağılımlarından, kablo yalıtkanının dayanabileceği en yüksek sıcaklık değeri de göz önüne alınarak, farklı toprak koşullarında akım taşıma kapasiteleri bulunacaktır. Bunun dışında, farklı yüzey sıcaklıkları, farklı gömülme derinlikleri durumlarında kablolardaki sıcaklık dağılımları incelenecektir.

2 KABLO DİRENÇ VE KAPASİTESİNİN SICAKLIKLA İLİŞKİSİ

2.1 Kablo Direnci

Kablolarda gerilim düzeyine ve amacına göre kullanılan iletken malzemeler farklılık göstermekle beraber, her durumda kablonun iletken direncinin minimum olması istenir. Genellikle kullanılan iletken malzemeler bakır ve alüminyumdur. Bakır, alüminyum ve kablolarda kullanılan diğer iletken malzemelerin 20°C'deki elektriksel özdirençleri ve sıcaklık katsayıları Tablo 2.1'de sıralanmıştır [10].

Tablo 2.1: Kablolarda kullanılan iletken malzemelerin 20°C'deki elektriksel özdirençleri ve sıcaklık katsayıları

Malzeme	**Özdirenç (ρ) 20°C'de (ohm.m)**	**Sıcaklık katsayısı (α_{20}) 20°C'de (1/°K)**
a) İletkenler:		
Bakır	$1,7241\times10^{-8}$	$3,93\times10^{-3}$
Alüminyum	$2,8364\times10^{-8}$	$4,03\times10^{-3}$
b) Kılıflar ve Zırh:		
Kurşun veya kurşun alaşımı	$21,4\times10^{-8}$	$4,0\times10^{-3}$
Çelik	$13,8\times10^{-8}$	$4,5\times10^{-3}$
Bronz	$3,5\times10^{-8}$	$3,0\times10^{-3}$
Paslanmaz çelik		

Öziletkenlik özdirencin tersi olduğuna göre Tablo 2.1'den görüldüğü gibi alüminyumun öz iletkenliği, bakırın öz iletkenliğinin yaklaşık olarak % 60'ı kadardır. Buna göre alüminyum iletkeninin aynı uzunlukta bir bakır iletkenle aynı doğru akım (DA) direncine sahip olabilmesi için kesiti, bakır iletkenin kesitinin yaklaşık 1,6 katı olmalıdır.

İletken seçiminde iletkenlik özelliklerinin iyi olmasının yanında malzemenin ekonomik, dayanıklı ve saf olması da önemlidir. Örnek olarak kablo iletkeni olarak

kullanılabilecek diğer bir malzeme gümüş olmasına rağmen ekonomik olmamasından dolayı pek tercih edilmez. İletken olarak kullanılan bakır ve alüminyum saf olmalıdır. Örnek olarak çok küçük oranlarda da olsa bakırın içinde fosfor ve arsenik bulunması, iletkenliğini saf bakırınkinin % 80'ine düşürebilir. Alüminyum için de aynı durum geçerlidir. ASTM B 233 Standardına göre alüminyumun saflığı % 99,5 ve üstü olmalıdır [11]. Alternatif gerilim kablolarında direncin hesaplanması iki aşamadan oluşmaktadır.

2.1.1 DA Direncinin Hesaplanması

Bir iletkenin 20°C'deki DA direnci,

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}\, l}{S} \qquad \textbf{(2.1)}$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu bağıntıda,

R_{20} : İletkenin 20°C'deki DA direnci [Ω],

ρ_{20} : İletkenin 20°C'deki özdirenci [Ω.m],

S: İletkenin kesit alanıdır [m^2].

Kablonun DA direnci, iletkenin öz iletkenliğine, uzunluğuna ve iletkenin alanına bağlı olduğu kadar sıcaklığa da bağlıdır. Sıcaklık cinsinden direncin ifadesi aşağıdaki şekildedir [12].

$$\frac{R_{T2}}{R_{T1}} = \frac{T_0 + T_2}{T_0 + T_1} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Burada,

R_{T1}: İletkenin T_1 sıcaklığındaki direnci [Ω],

R_{T2}: İletkenin T_2 sıcaklığındaki direnci [Ω],

T_0: İletken malzemesine göre değişen bir sabittir.

T_0 değeri bakır için 234,5, alüminyum için ise 228,1'dir. Buna göre;

Bakır için $R_{T2} = R_{T1}\frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1}$, Alüminyum için $R_{T2} = R_{T1}\frac{228.1 + T_2}{228.1 + T_1}$ yazılabilir.

En büyük çalışma sıcaklığında iletkenin birim uzunluğunun DA direnci ise;

$$R_{dc} = R_0[1 + \alpha_{20}(T_m - 20)] \qquad \textbf{(2.3)}$$

ile verilir. Bu bağıntıda,

α_{20} : 20 C 'de her °K başına kütle sıcaklık katsayısı

T_m : En büyük çalışma sıcaklığıdır. Bu sıcaklık, kullanılacak yalıtımın türüne göre belirlenir [13,14].

2.1.2 DA Direnç Değerinden AA Direnç Değerinin Hesaplanması

İkinci aşamada ise, bulunan doğru akım direnç değerinden, deri etkisi ve yakınlık etkisi de hesaba katılarak alternatif akım direnç değeri elde edilir.

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + k_s + k_p) \quad \textbf{(2.4)}$$

R_{ac} : En büyük çalışma sıcaklığında iletkenin birim uzunluğunun AA direnci (ohm/m)

k_s : Deri etkisi katsayısı

k_p : Yakınlık etkisi katsayısı

İletkenin alternatif akım taşırkenki direnç değeri, doğru akım taşırkenki direnç değerinden büyüktür. Dirençteki bu artışın temel sebepleri, deri etkisi, yakınlık etkisi ve yakındaki ferromanyetik malzemelerde oluşan histerisis ve eddy akımı kayıpları ve kısa devre olan ferromanyetik olmayan malzemelerde oluşan kayıplardır. Büyük kesitli, dilimli yapılı iletkenlerden oluşan çok yüksek gerilim kabloları hariç, sadece deri etkisi ve yakınlık etkisi göz önüne alınır [12].

2.1.2.1 Deri Etkisi

Alternatif akım devrelerinde akım yoğunluğu, iletkenlerin dış yüzeyleri yakınlarında daha yüksektir. Akım, dış yüzeyde toplanma eğilimi göstermektedir. Buna deri etkisi denir. İletken boyutları büyüdükçe deri etkisi de artmaktadır. Bu etki, bir katsayısı ile hesaplara katılır ve deri etkisi katsayısı adı verilen bu katsayı

$$k_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad \textbf{(2.5)}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Bu bağıntıda kullanılan büyüklükler

$$X_s^2 = F_k.k_s \quad \textbf{(2.6)}$$

$$F_k = \frac{8\omega f.10^{-7}}{R_{dc}} \quad \textbf{(2.7)}$$

$$X_s^2 = \frac{8\omega f.10^{-7}}{R_{dc}} k_s \quad \textbf{(2.8)}$$

denklemlerinden hesaplanır. k_s çizelgelerle verilmektedir ve malzemeden malzemeye değişmektedir. Yukarıdaki bağıntı X_s değeri, 2,8'i aşmamak koşuluyla doğrudur, buna rağmen pratikteki durumların çoğunluğuna uygulanmaktadır.

2.1.2.2 Yakınlık Etkisi

Birbirlerine yakın olarak yerleştirilmiş iletkenlerde akım, iletkenin diğer iletkenlerden uzak olan kısmından akma eğilimindedir. Buna yakınlık etkisi denir. Bir iletkende, iletkenin akımını halkalayan akı, yakındaki bir iletkenin akımı tarafından bozulur. Bunun sonucunda yüzey akım dağılımı bozulur [12].

İki damarlı kablolar ile yan yana iki tek damarlı kablo için yakınlık etkisi katsayısı, y_p

$$k_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4}\left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \times 2{,}9 \quad \textbf{(2.9)}$$

Burada;

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_p \quad \textbf{(2.10)}$$

R_i: İletken çapı (mm),

s: İletken eksenleri arasındaki uzaklık (mm),

k_p değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir. X_p değerinin de aynı şekilde 2,8'i aşmaması koşuluyla yukarıdaki formül doğrudur, buna rağmen pratikteki durumların çoğuna uygulanır.

Üç Damarlı Kablolar ile Yan Yana Üç Tek Damarlı Kablo için Yakınlık Etkisini Katsayısı, k_p

Daire Kesitli İletkenli Kablolar

Yakınlık etkisi katsayısı,

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0{,}8X_p^4}\left(\frac{R_i}{s}\right)^2 \times \left[0{,}312\left(\frac{R_i}{s}\right)^2 + \frac{1{,}18}{\frac{X_p^4}{192 + 0{,}8X_p^4} + 0{,}27}\right] \qquad \textbf{(2.11)}$$

formülü ile verilir [15].

Not: Yassı biçimli kablolarda s, bitişik fazlar arasındaki açıklıktır. Bitişik fazlar arasındaki açıklık eşit olmadığında ortalama açıklık, s = $\sqrt{s_1 \times s_2}$ olarak alınmalıdır.

Boru Tipi Kablolarda Deri ve Yakınlık Etkileri

Boru tipi kablolarda, yukarıdaki şekilde hesaplanan deri ve yakınlık etkileri 1,7 kat arttırılmalıdır. Bu kablolar için;

$$R_{ac} = R_{dc}[1 + 1{,}7(k_s + k_p)] \qquad \textbf{(2.12)}$$

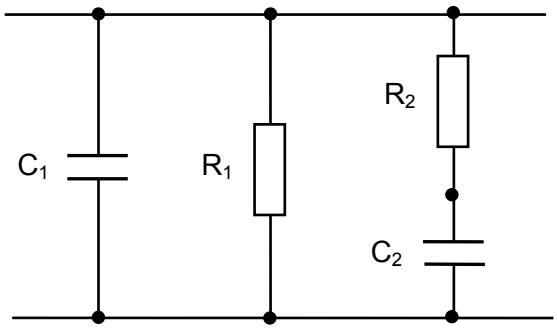
(ohm/m) dır. Tablo 2.2'de çeşitli iletken tipleri için deri etkisi ve yakınlık etkisi katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.2: Deri etkisi ile yakınlık etkisinin k_s ve k_p katsayıları için bakır iletkenlerde genel olarak izin verilen deneyimsel değerler

İletken Tipi	**Kuru ve Emprenyeli Olup Olmadığı**	k_s	k_p
Yuvarlak, çok telli	Evet	1	0,8
Yuvarlak, çok telli	Hayır	1	1
Yuvarlak, sıkıştırılmış	Evet	1	0,8
Yuvarlak, sıkıştırılmış	Hayır	1	1
Yuvarlak, daire dilimi parçalı		0,435	0,37
Ortası boş, helis biçimli çok telli	Evet	2	0,8
Daire dilimi biçimli	Evet	1	0,8
Daire Dilimi biçimli	Hayır	1	0,8

2.2 Kablo Kapasitesi

Herhangi bir malzemenin bağıl dielektrik sabiti, elektrotlar arasındaki ortamın bu malzemeyle doldurulduğundaki kapasitesinin, aynı ortamın havayla doldurulması durumundaki kapasitesine oranıdır. Uygulamada saf bir kapasite yoktur. Bir elektrottan diğerine bütün saf yalıtkan yollar C_1 ile, saf iletim yolları R_1 direnciyle birleşik yollar ise seri R_2 ve C_2 ile gösterilmek üzere Şekil 2.1'deki gibi temsil edilebilir.



Şekil 2.1: Bir dielektriğin basitleştirilmiş eşdeğer devresi.

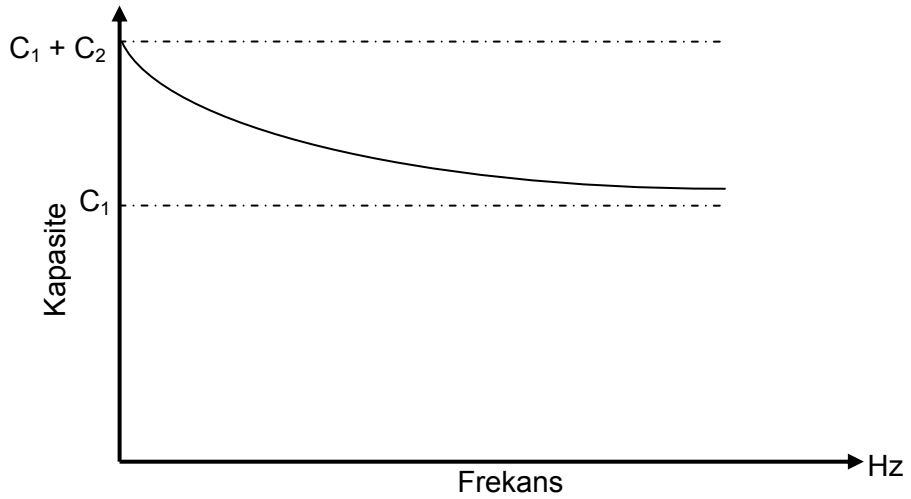
Yalıtkana ilişkin yukarıdaki eşdeğer devreye göre yalıtkandan akacak akımın bağıntısı;

$$I = \frac{U_0}{R_2}\frac{\omega^2}{\omega^2 + \frac{1}{R_2^2 C_2^2}} + \frac{U}{R_1} + j\omega U_0 (C_1 + \frac{C_2}{1 + C_2^2 \omega^2 R_2^2}) \qquad \textbf{(2.13)}$$

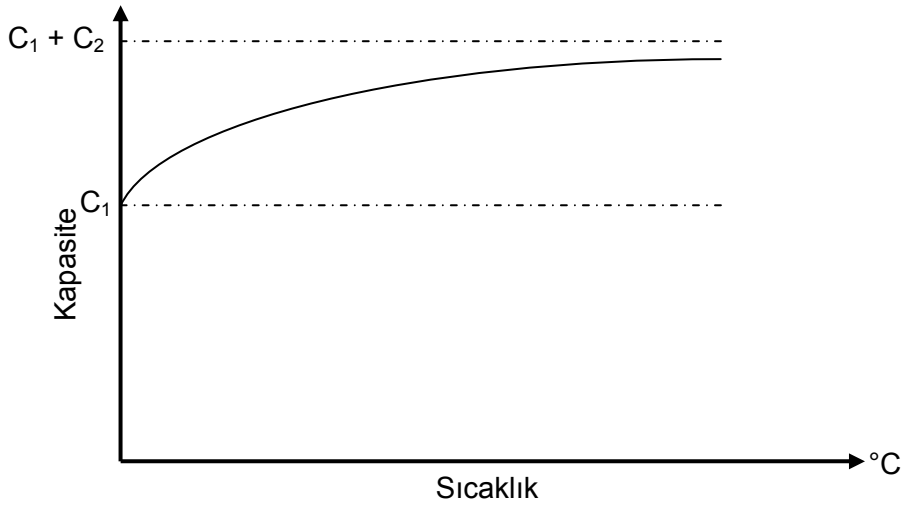
olarak verilmektedir. Aynı şekle göre bir dielektriğin eşdeğer kapasitesi

$$C = C_1 + \frac{C_2}{1 + C_2^2 \omega^2 R_2^2} \qquad \textbf{(2.14)}$$

şeklindedir. C kapasitesi, frekans ve sıcaklıkla değişen bir büyüklüktür. İki bileşenin toplamından oluşmuştur. Frekans ω değerinin içinde ve paydada olduğu için, frekans arttıkça C kapasitesi azalmaktadır. Frekans sıfıra yaklaştıkça paydadaki ikinci terim ortadan kalkar böylece $C = C_1 + C_2$ (Şekil 2.2) olur. Frekans sonsuza yakınsadıkça ikinci terim tamamen ortadan kalkar ve böylece $C = C_1$ olur. Bu sefer frekans sabit tutulup, sıcaklık değiştirilirse Şekil 2.1'deki R_1 ve R_2 değerleri değişecektir. R_1 deki değişme kapasite değerini değiştirmeyecektir, ancak R_2 direncindeki değişimler kapasiteyi değiştirecektir. R_2 direncinin çok yüksek olduğu düşük sıcaklıklarda $C = C_1$ olur. Sıcaklık arttıkça, R_2 azalacaktır ve yukarıdaki eşitlikte paydadaki ikinci terim ortadan kalkacaktır. Böylece $C = C_1 + C_2$ olur.



Şekil 2.2: Kapasitenin frekansla değişimi



Şekil 2.3: Kapasitenin sıcaklıkla değişimi

Şekil 2.3'den görüldüğü gibi belli bir sıcaklık değerine kadar, sıcaklık arttıkça kapasite de artmaktadır. Daha sonra, sıcaklık artsa da, kapasite değeri $C_1 + C_2$ değerini aşamaz [16].

3 KABLO KAYIPLARI

Kablonun iletkeninde, yalıtkanında, kılıfında, ekranında ve zırhında oluşan kayıplara kablo kayıpları denir. İletken kayıplarını (I^2R_{ac}), I ile gösterilen kablo iletkeninden akan akımın etkin değeri ve R_{ac} ile gösterilen etkin alternatif akım direnci değerleri belirler. Dielektrik kayıpları ise kablo yalıtkanındaki sızıntı (kaçak) akımından dolayı oluşan kayıplar ve alternatif akımdaki dielektrik kutuplanma sonucunda oluşan kayıplar oluşturur. Dielektrik kayıpları alçak gerilim ve orta gerilim kablolarında önemli bir değerde olmamalarına karşın, yüksek gerilim ve çok yüksek gerilim kablolarında önemli değerlere ulaşırlar [10].

Kablonun iletkeninden geçen alternatif akım sebebiyle kablonun metalik kılıfında gerilim endüklenir. Topraklama olmadan, bu kılıflar toprak potansiyelinin üstünde bir değerde olup kablonun yalıtkan kılıfının ve diğer malzemelerin bozulmasına sebep olup ömrünü ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkiler. Metalik kılıflar birbirine bağlı olduğunda, içlerinden akan sirkülasyon akımları güç kayıplarına sebep olur. Üç damarlı kablolarda ise bu kayıplar ihmal edilecek düzeydedir. Kablo tek damarlı da olsa üç damarlı da olsa, sirkülasyon akımlarına ek olarak kablo kılıflarında ayrıca eddy akımları da endüklenir. Bu akımlar da çok büyük olmasa da kayba sebep olur.

Tek damarlı kablolarda metalik kılıflar açık-devre ya da kısa-devre olabilir. Kılıflar kısa devre edildiğinde, bunlar genelde birbirine bağlı ve her kablo bağlantı çukurunda da topraklanmışlardır. Bu, kılıf gerilimini sıfır yapar fakat kılıf akımının akmasına izin verir. Kılıflar açık-devre olduğunda akım akmasına izin verilmez fakat kılıfların belli bir potansiyeli olabilir. Bu gerilim değerini güvenli bir sınırda, örneğin 25 V'un altında tutabilmek için kablo kılıfları genelde çaprazlanır (çapraz bağlanır). Açık-devre kılıf durumunda uygulanacak diğer bir yöntem ise kılıfın sadece bir noktadan topraklanması veya kılıfın empedanslar veya transformatörlerle bağlanmasıdır. Topraklama iletkeni ve onun kılıfa tutturulduğu yer öyle tasarlanmalıdır ki, aşırı ısınmaya sebep olmadan hata ve sirkülasyon akımlarını taşıyabilmelidir. Ayrıca zırhta ve kabloyu taşıyan metal borularda da kayıplar olur. Manyetik malzemelerden yapılmış zırhlarda, ek olarak önemli ölçüde manyetik histerezis kayıpları olabilir. Kablo sisteminin tasarımı aşamasında bütün bu kayıplar göz önünde bulundurulmalıdır [10, 12].

3.1 İletken Kayıpları

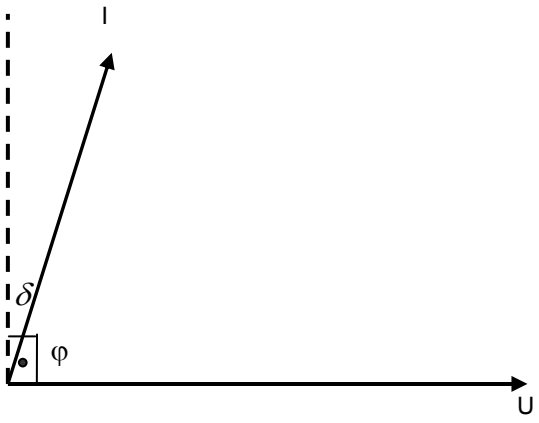
İletken içerisinden akan yük akımının, iletkenin elektriksel direnci ile birlikte sebep olduğu omik kayıplardan dolayı oluşan ve ısı şeklinde kendini belli eden kayıplardır.

3.2 Dielektrik Kayıplar

Yalıtkan malzemeler, alternatif gerilime maruz kalınca kondansatör gibi davranırlar ve içlerinden yük akımları akar. Gerilimin her işaret değiştirmesinde elektronların tekrar düzenlenmesini etkilemek için gerekli olan iş bir ısı çıkışına ve dolayısıyla da bir aktif güç kaybına sebep olur. Alternatif gerilimin frekansı 50 ya da 60 Hz olduğundan saniyede 50 - 60 kez tekrarlanan bu olay reaktif güçle karıştırılmaması gereken bir kayba yol açar.

İdeal yalıtkan için güç faktörünün değeri sıfırdır. Kablo ideal bir yalıtkan olmadığı için güç faktörü de sıfır değildir. Şekil 3.1'deki gibi, akım gerilime göre 90º den biraz az bir açı kadar öndedir ve bu açı farkı kaybı oluşturur.

Şebeke frekansında ve çalışma sıcaklığında yalıtımın kayıp faktörü olan tan δ'nın ve farklı yalıtkan malzemeler için dielektrik katsayısı (ε) değerleri Tablo 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1: Kayıp açısı, δ

C, kablonun kapasitesi, U ise uygulanan gerilim olmak üzere
Dolma (şarj) akımı,

$$I = U.C.\omega \qquad \textbf{(3.1)}$$

$$P_d = U.I.\cos\varphi = U.I.\sin\delta \quad \textbf{(3.2)}$$

$$P_d = U.(I/\cos\delta)\sin\delta = U^2.C.\omega.\tan\delta \ \ (W/m) \quad \textbf{(3.3)}$$

Birim uzunluğa sahip bir kablo için, dolma akımının mutlak değeri, yalıtımın dielektrik sabitinin, kablo boyutlarının ve gerilimin bir fonksiyonudur [17]. Dielektrik kaybı gerilime bağlı olduğundan, sadece kullanılacak yalıtım malzemesiyle ilgili gerilim seviyelerinde önem kazanır. Bazı kablo yapılarında, özellikle de kağıt yalıtımlı yüksek gerilim kablolarında bu kayıplar kablo anma değerlerinde önemli etkiye sahiptir [18].

3.2.1 Dielektrik Kayıp Çeşitleri

Dielektrik kaybı, dört tür kaybın toplamından oluşur. Bu kayıplar, iletim kaybı, histerizis kaybı, kutuplanma kaybı ve iyonlaşma kaybıdır.

3.2.1.1 İletim Kaybı (P_R)

Kaçak akımların iyon veya elektron iletiminin yol açtığı kayıplardır. İletim kaybı yalıtkan malzemenin direncinden ve bu direncin üzerinden akım geçmesiyle olur.

3.2.1.2 Histerezis Kaybı (P_H)

Birden çok yalıtkanın olduğu durumda, iki yalıtkan arasındaki sınır yüzeyinde dielektrikler arası yük dengesi sağlanıncaya kadar gerçekleşen yük hareketlerinden kaynaklanan kayıplardır.

3.2.1.3 Kutuplanma (Polarizasyon) Kaybı) (P_p)

Molekülleri dipol yapıda olan dielektriklerde, dipol moleküllerin kutupları uygulanan alanın zıt kutbuna doğru kayma ve yönlenme hareketi yapar. Bu yönlenme ve kayma sırasında meydana gelen kayıplar kutuplanma (polarizasyon) kaybı ismini alırlar.

3.2.1.4 İyonlaşma Kaybı (P_{iy})

İyonlaşma kayıpları bir yalıtkan ortamda kısmi boşalmaların sebep olduğu kayıplardır. Yalıtkandaki gazların, hava boşluğu gibi boşlukların iyonizasyonu ve yalıtkandaki yabancı maddeler nedeniyle oluşan kayıplardır

Buradan yalıtkandaki toplam dielektrik kaybı;

$$P_d = P_R + P_H + P_P + P_{iy} \quad \textbf{(3.4)}$$

Kayıp faktörü de aynı biçimde

$$\tan\delta = \tan\delta_R + \tan\delta_H + \tan\delta_P + \tan\delta_{iy} \quad \textbf{(3.5)}$$

olmak üzere dört bileşenden meydana gelmektedir [19].

Ekranlanmış çok damarlı kablolarda veya doğru akım kablolarında dielektrik kaybı hesaplamak gerekli değildir.

Dairesel iletkenler için kapasite,

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{d_I}{d_L}\right)} 10^{-9} \quad (F/m) \quad \textbf{(3.6)}$$

formülü ile verilir.

ε : Yalıtkanın bağıl dielektrik katsayısı,

d_I : Yalıtkanın dış çapı, ekran hariç (mm),

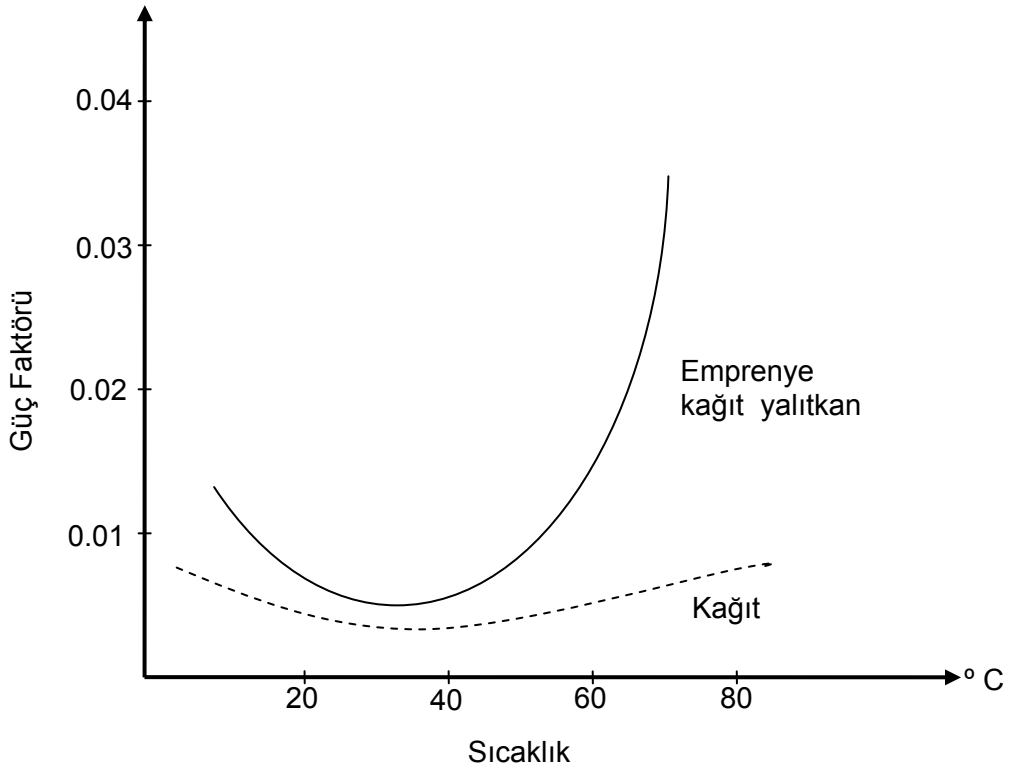
d_L : İletkenin çapı, varsa ekran dahil (mm).

Yalıtkan malzemenin AA iletkenliği, sıcaklığa bağlı olup, sıcaklık arttıkça artar. AA iletkenliğinin artması, yalıtım kayıplarını artıracaktır. Bu da, yalıtkan sıcaklığının artmasına sebep olur. Böylece yalıtkanın AA iletkenliğinin artmasıyla ek bir sıcaklık artışı ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, yalıtkan içerisindeki kayıpların çok yüksek olması, kablonun daha çok ısınmasına ve ısıl bozulmasına yol açar [18].

Tablo 3.1: Şebeke frekansında yüksek gerilim ve orta gerilim kablolarının yalıtımı için bağıl dielektrik katsayıları ve kayıp faktörleri

Kablo Tipi	ε_r	Tan δ
Emprenye Edilmiş Kağıt Yalıtımlı Kablolar:		
Som, tamamen emprenye edilmiş, ön emprenyeli veya akıtmayan kütle emprenyeli	4	0,01
Yağlı, kendinden muhafazalı	3,6	0,004
Yağ basınçlı boru tipi	3,7	0,0045
Harici gaz basınçlı	3,6	0,0040
Dahili gaz basınçlı	3,4	0,045
Diğer malzemelerle yalıtılmış kablolar		
Butil Kauçuk	4	0,050
EPR:		
18 / 30 (36) kV'a kadar ve 18 / 30 (36) kV dahil kablolar	3	0,020
18 / 30 (36) kV'dan büyük kablolar	3	0,005
PVC	8	0,1
PE	2,3	0,001
XLPE:		
18 / 30 (36) kV'a kadar ve 18 / 30 (36) kV dahil kablolar (dolgusuz)	2,5	0,004
18 / 30 (36) kV'dan büyük kablolar (dolgusuz)	2,5	0001
18 / 30 (36) kV'dan büyük kablolar (dolgulu)	3,0	0,005

Genelde yalıtkanın güç faktörü 40 ºC'den sonra artar. Kablo yalıtkanı hakkındaki tartışmaların çoğu güç faktörü – sıcaklık eğrisini göz önüne alarak başlar [20, 21]. Emprenye kağıt yalıtkanlı bir kablo için güç faktörü – sıcaklık ilişkisi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2: Emprenye kağıt yalıtkanlı bir kablo için güç faktörünün sıcaklıkla değişimi

3.2.2 Dielektrik Kaybının Sıcaklıkla Değişimi

Yalıtkanın ε, C ve $\tan\delta$ değerleri sıcaklıkla değişir. Bu büyüklüklerin sıcaklıkla değişiminin bileşkesi de dielektrik kaybının sıcaklıkla değişimidir. Örnek olarak düzlemsel elektrot sisteminde güç kaybı;

$$P_d = \omega.\varepsilon.\frac{S}{a}\tan\delta.U^2 \qquad \textbf{(3.7)}$$

Yalıtkan için özgül güç kaybı (birim hacimdeki dielektrik kaybı) değeri ;

$$p = \frac{P}{S.a} = \omega.\varepsilon.\tan\delta.\left(\frac{U}{a}\right)^2 = 2\pi\varepsilon f\tan\delta E^2 \ (W/cm^3) \qquad \textbf{(3.8)}$$

olur. Burada

$$c = 2\pi\varepsilon f\tan\delta \qquad \textbf{(3.9)}$$

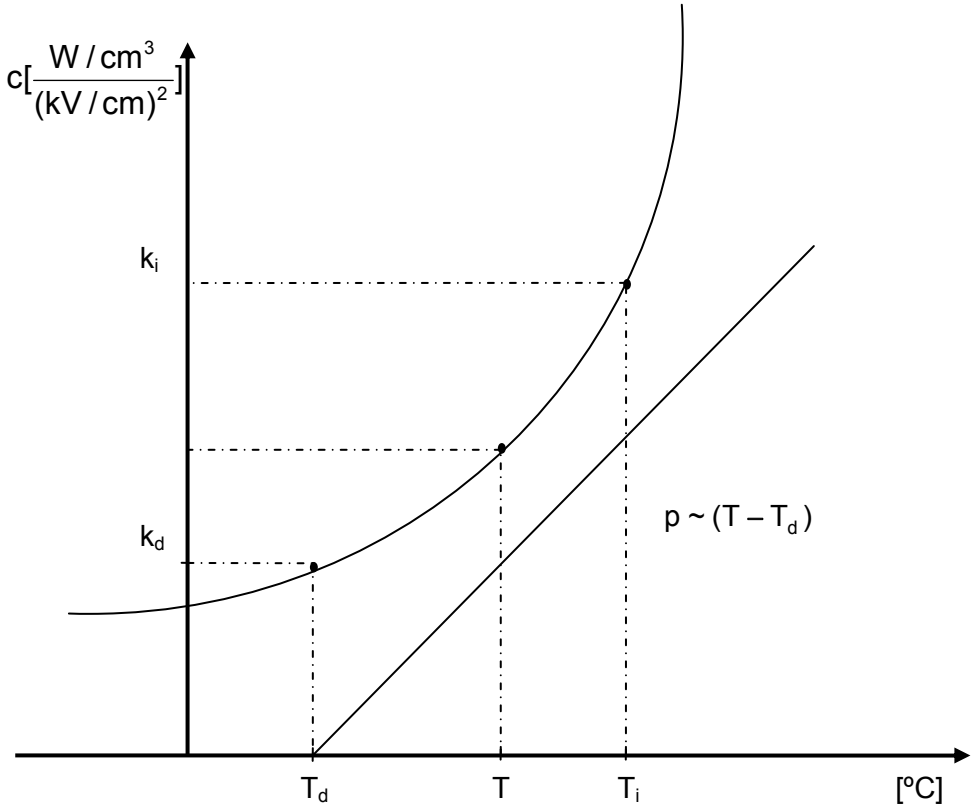
konursa, özgül güç kaybı,

$$p = cE^2 \qquad \textbf{(3.10)}$$

şekline girer. Burada c'ye kayıp katsayısı denir. Birimi ise $(W/cm^3)/(kV/cm)^2$ dir. Örnek olarak sert kağıdın kayıp sayısı sıcaklığa göre

$$c = c_d e^{\beta(T-T_d)} \qquad \textbf{(3.11)}$$

şeklinde değişir. Burada c_d, T_d sıcaklığındaki kayıp katsayısını, β da katı yalıtkanın cinsine bağlı bir sabiti gösterir. Şekil 3.3'de katı yalıtkanların sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Katı yalıtkanlarda kayıp sayısının sıcaklığa göre değişimi

Eğer yalıtkanın T_i iç sıcaklığındaki kayıp sayısı c_i ile gösterilirse, β sabiti

$$\beta = \frac{\ln \frac{c_i}{c_d}}{T_i - T_d} \qquad \textbf{(3.12)}$$

formülünden kolayca hesaplanır [22].

Kablo yalıtkanındaki kayıplar üç açıdan değerlendirilmelidir.

- Enerjiyi sağlamanın maliyeti açısından (Bu enerjinin tamamı ısı olarak kaybolur)

- İzin verilen en yüksek akımdaki düşüş açısından (İzin verilen en yüksek akım değeri en yüksek bakır sıcaklığı değeri için hesaplanır. Bu değer, bakır iletkende açığa çıkan ısının yanında yalıtkanda da kayıplar olursa, azalır.

- İşletme güvenilirliği açısından (Örneğin ısıl dengesizlik durumu ortaya çıkabilir) düşünülmelidir [20].

İdealde yalıtkandan istenen, çalışma sıcaklığı sınırları içinde güç faktörünün mümkün olduğu kadar düşük olması özellikle sıcaklık artınca birden artmaması ve bu özelliklerinin bütün çalışma süresi boyunca bozulmadan kalmasıdır

3.3 Kılıf Kayıpları

Kılıf kayıpları akıma bağlıdır ve kılıf bağlantılarına göre iki sınıfa ayrılır. Bunlar, eğer kılıflar iki noktadan bağlı ise tek damarlı kabloda kılıftan akan sirkülasyon akımlarından dolayı olan kayıplar ve deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı eddy akımlarının sebep olduğu kayıplardır. Bağlantı yönteminden bağımsız olarak hem tek damarlı hem üç damarlı kablolarda eddy akımlarından kaynaklanan kayıplar olur. Tek damarlı kablolarda sirkülasyon akımına kıyasla eddy akımları düşüktür ve büyük kesitli, dilimli yapıya sahip iletkenli kablolar dışında ihmal edilebilirler [10].

Kılıf kayıpları dışında koruyucu zırhta da kayıplar oluşur ve bu kayıplar da kablo cinsi, zırh malzemesi ve yerleştirme yöntemine göre değişir. Metalik kılıfı olmayan zırhlı tek damarlı kablolarda genelde zırh manyetik olmayan malzemeden yapılır. Bunun sebebi çelik tel veya şeritteki kayıplar oldukça büyük olur. Bu şekilde manyetik olmayan zırha sahip kablolarda kablo kaybı hesabı sanki kablo kılıfındaymış gibi hesaplanır ve hesaplama yöntemi de gene zırhın tek noktadan doğrudan bağlı olmasına göre değişir. Kablo metal kılıftan ve manyetik olmayan zırhtan oluşuyorsa, kayıp hesabı aynı şekilde kablo kılıfı için hesaplanır ama bu sefer kılıfın direnci, kılıf ve zırhın dirençlerinin paralel değeri olarak alınır ve çap için ise kılıf ve zırh çaplarının efektif değerlerine karşılık düşen ortak bir değer alınır. Aynı yöntem metal kılıflı ve manyetik olmayan zırha sahip iki ve üç damarlı kablolar için de geçerlidir. Metal siperli ve manyetik zırhlı iki ve üç damarlı kablolar için, eddy akımı kayıpları da dikkate alınmalıdır. İki ve üç damarlı çelik şeritli kablolar için zırhın kılıf kayıplarına etkisi olarak hem eddy akımlarından dolayı olan kayıplar hem de histerezis kayıpları beraber dikkate alınmalıdır [10].

Kılıf veya ekrandaki güç kaybı (λ_1), sirkülasyon akımları (λ_1') ve Fuko akımları (λ_1'') nedeniyle oluşan kayıpları içerir:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \qquad \textbf{(3.13)}$$

Kılıf kayıpları genelde kablo kayıplarının % 2 – 5 i arasındadır. Kılıfta oluşan kayıplar genel olarak Arnold'un ampirik formülüyle hesaplanır. Kılıf kayıpları için Arnold'un ampirik formülü şu şekildedir.

$$P_s = 7{,}7 \times 10^{-3} \frac{I^2}{R_s}\left(\frac{r_m}{d}\right)^2 \text{ Watt} \qquad \textbf{(3.14)}$$

Burada;

r_m : Ortalama kılıf yarıçapı (mm)

d: Kablo merkezleri arasıdaki uzaklık (mm)

R_s: En büyük çalışma sıcaklığında kablonun birim uzunluğu başına kılıfın veya ekranın direnci (ohm/m)

Farklı bağlama şekilleri için kılıf kayıplarının değeri değişim gösterir [17].

3.3.1 Kılıfları Her İki Ucundan Bağlı İki Tek Damarlı Kablo ve Üç Tek Damarlı Kablo (Yonca Yaprağı Biçiminde)

Her iki ucunda kılıfları bağlı olan iki tek damarlı kablolar ve üç tek damarlı kablolar için kayıp faktörü,

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1+(\frac{R_s}{X})^2} \qquad \textbf{(3.15)}$$

formülü ile verilir. Burada;

X: Kablonun birim uzunluğu başına kılıf veya ekranın reaktansı = $2\omega 10^{-7}$ ln(2s/d) (ohm/m)

s: göz önüne alınan elektriksel bölümde iletken eksenleri arasındaki uzaklık (mm),

(λ_1'') = 0, Daire dilimi kesitli büyük iletkenleri bulunan kablolar hariç, fuko akımı kaybı ihmal edilmektedir.

Kılıfları tek noktada bağlı olan tesislerde, kılıfları çapraz bağlı olan ve her ana bölümü elektriksel olarak aynı üç küçük bölüme ayrılan tesislerde ise bu sefer sirkülasyon akımı kaybı sıfırdır [15].

3.4 Akım Taşıma Kapasitesi

Bir kablonun akım taşıma kapasitesi, kablonun yalıtımı için belirlenmiş maksimum sıcaklık değerini geçmeden sürekli olarak taşıyabileceği akım değeridir. Akım taşıma kapasitesi, kabloda üretilen ısı seviyesine bağlı olduğu kadar kablodan çevreye yayılan ısı seviyesine de bağlıdır. Kablodan çevreye yayılan ısının derecesi ise farklı kablo malzemelerinin ısıl dirençlerine ve kabloyu çevreleyen ortama bağlıdır [23]. Bu yüzden, kablonun akım taşıma kapasitesi, malzemeler, kablonun iletken, yalıtkan, siper ve zırh kalınlıkları, kablonun döşenme biçimi, kabloyu çevreleyen ortamın ısıl karakteristikleri, diğer ısı kaynaklarının karakteristikleri ve kablonun döşendiği yerdeki çevresel etkenler olmak üzere birçok etmenden etkilenir [10,12]. Bazı kablo yapıları için, işletme gerilimi de hesaplarda önemli yere sahiptir. Kablonun akım taşıma kapasitesinin bulunması oldukça zordur. Bunun için çeşitli sayısal yöntemler ve bilgisayar programları gerekmektedir. Hesapların temelinde kabloda üretilen ısının, yalıtkan malzemeye bağlı olan izin verilen maksimum iletken sıcaklığı T_m'yi aşmayacak şekilde çevreye yayılması vardır [10]. PE ve XLPE kablolar için normal koşullarda T_m 75 °C ve 90 °C, acil durumlarda ise 90 °C ve 130 °C'dir.

Homojen toprağa gömülmüş bir kablo için akım taşıma kapasitesi hesaplanırken kablonun tek damarlı veya üç damarlı olmasına göre Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'teki ısıl devreler kullanılabilir. Şekillerde $R_{Td}, R_{Ti}, R_{Ts}, R_{TG}$ sırasıyla; bir iletkenle kılıf arasındaki, kılıf ile zırh arasındaki tabakaların, kablonun dış tabakası ve kablo yüzeyiyle onu çevreleyen ortamın ısıl dirençleridir (°K.m/W). P_i, P_d, P_s, P_a ise sırasıyla iletken, dielektrik, kılıf ve zırh kayıplarını (W) temsil etmektedir. Ayrıca T_i, T_s, T_G de sırasıyla iletkenin, kılıfın ve kabloyu çevreleyen toprağın sıcaklıklarıdır.

$$P_i = I^2 R_{ac} \qquad \textbf{(3.16)}$$

İletken kayıpları maksimum işletme sıcaklığında hesaplanmıştır. P_s ve P_a ile gösterilen kılıf ve zırh kayıpları ise iletken kayıpları cinsinden yazılırlar.

$$P_s = \lambda_1 P_i \qquad \textbf{(3.17)}$$

$$P_a = \lambda_2 P_i \qquad \textbf{(3.18)}$$

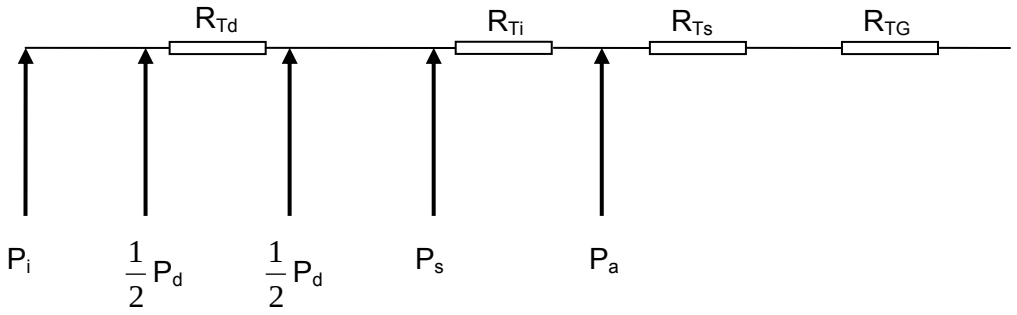
olmak üzere kablodaki toplam Joule kayıpları;

$$P_T = P_i + P_s + P_a = P_i(1+\lambda_1+\lambda_2) \qquad \textbf{(3.19)}$$

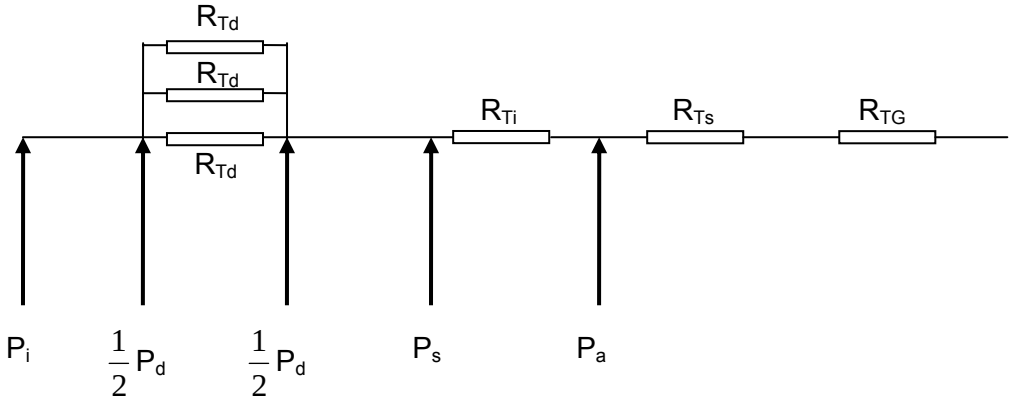
olur. Burada, λ_1 metalik kılıftaki toplam kayıpların, toplam iletken kayıplarına oranını ifade eden kılıf kayıp faktörü, λ_2 ise zırhtaki toplam kayıpların iletken kayıplarına oranını ifade eden zırh kayıp faktörüdür.

Kablonun akım taşıma kapasitesi, Şekil 3.4'teki devreye Ohm yasasının ısıl biçimi uygulanarak hesaplanır.

$$\Delta T = (P_i + \frac{1}{2}P_d)R_{Td} + [P_i(1+\lambda_1)+P_d]nR_{Ti} + [P_i(1+\lambda_1+\lambda_2)+P_d]n(R_{Ts}+R_{TG}) \qquad \textbf{(3.20)}$$



Şekil 3.4: Toprağa gömülmüş tek damarlı kablo için ısıl eşdeğer devre



Şekil 3.5: Toprağa gömülmüş üç damarlı kablo için ısıl eşdeğer devre

Ortam sıcaklığı kabloyu çevreleyen ortamın, çevredeki bölgesel ısı kaynaklarının da hesaba katıldığı sıcaklık değeridir [12].

Bilinmeyen değer ya iletkenin akımı I, ya da iletkenin çalışma sıcaklığıdır. İlk durumda en yüksek çalışma sıcaklığı verilirken, ikinci durumda ise iletken akımı belirlidir. $P_i = I^2 R_{ac}$ olmak üzere şekle göre;

$$R_{Tt} = \frac{R_{Td}}{n} + (1+\lambda_1)R_{Ti} + (1+\lambda_1+\lambda_2)R_{Ts} \qquad \textbf{(3.21)}$$

Düzenli bir ortama gömülmüş bir kabloda, ısıl dirençler kolayca hesaplanabilir. Ancak kuşaklı kablolar veya homojen olmayan çok katmanlı toprakta bu ısıl dirençlerin hesaplanması oldukça zordur [14].

3.4.1 Toprakta Kurumamış Yerde Gömülü Kablolar veya Açık Havadaki Kablolar

Bir AA kablosunun izin verilen akım değeri, ortam sıcaklığının üzerindeki sıcaklık artışı için aşağıdaki bağıntıdan elde edilebilir:

$$\Delta T = (I^2 R_{ac} + \frac{1}{2}P_d)R_{Td} + [I^2 R_{ac}(1+\lambda_1) + P_d]nR_{Ti} + [I^2 R_{ac}(1+\lambda_1+\lambda_2) + P_d]n(R_{Ts} + R_{TG})$$

(3.22)

Burada;

I: Bir iletkenden geçen akım (A),

ΔT : Ortam sıcaklığı üzerindeki iletken sıcaklık artışı (°K),

R_{ac} : En büyük çalışma sıcaklığında iletkenin birim uzunluğunun AA direnci (ohm/m),

P_d : İletkeni çevreleyen yalıtkanın birim uzunluğunun dielektrik kaybı (W/m),

R_{Td} : Yalıtkanın ısıl direnci (°K.m/W),

R_{Ti} : İç koruyucu kısımların ısıl direnci (°K.m/W),

R_{Ts} : Dış kılıfın ısıl direnci (°K.m/W),

R_{TG} : Yeraltı kablosunun çevresindeki toprağın ısıl direnci(°K.m/W),

λ_1 : Metal kılıftaki kayıpların, kablodaki bütün iletkenlerdeki toplam kayıplara oranı,

λ_2 : Zırhtaki kayıpların, kablodaki bütün iletkenlerdeki toplam kayıplara oranı,

İzin verilen akım değeri yukarıdaki formülden aşağıdaki gibi elde edilir [15],

$$I = \left[\frac{\Delta T - P_d[0{,}5R_{Td} + n(R_{Ti} + R_{Ts} + R_{TG})]}{R_{ac}R_{Td} + nR(1+\lambda_1)R_{Ti} + nR_{ac}(1+\lambda_1+\lambda_2)(R_{Ts} + R_{TG})}\right]^{1/2} \quad \textbf{(3.23)}$$

3.4.2 Toprakta Kısmen Kurumuş Yerde Gömülü Kablolar

Toprağa gömülü kablolarda, kablodaki kayıplardan dolayı ortama bir ısı çıkışı meydana gelir. Bu ısı nedeniyle, kabloyu çevreleyen toprakta kuruma meydana gelir ve kuruyan bölgenin ısıl özdirenci artar. Bu da kabloyla çevresi arasındaki ısı alışverişini güçleştirir.

Tek bir kablonun veya devrenin civarındaki kuru bölgenin oluşumu sonucu ortaya çıkan dış ısıl dirençteki değişmeler, aşağıdaki formülden elde edilmelidir:

$$I = \left[\frac{\Delta T - P_d[0{,}5R_{Td} + n(R_{Ti} + R_{Ts} + R_{TG})] + (v-1)\Delta T_x}{R_{ac}[R_{Td} + n(1+\lambda_1)R_{Ti} + n(1+\lambda_1+\lambda_2)R_{Ts} + vR_{TG})}\right]^{1/2} \quad \textbf{(3.24)}$$

Burada;

v: Kuru ve nemli toprak bölgelerinin ısıl özdirençlerinin oranı ($v = \frac{K_d}{K_w}$),

K_d : Kuru toprağın ısıl özdirenci (°K.m /W),

K_w : Nemli toprağın ısıl özdirenci (°K.m/W),

T_x: Toprağın kritik sıcaklığı ve kuru bölgeler ile nemli bölgeler arasındaki sınırın sıcaklığı (°C),

T_0: Ortam sıcaklığı (°C),

ΔT_x: Toprağın kritik sıcaklık artışı ve toprağın ortam sıcaklığı üzerinde kuru bölgeler ile nemli bölgeler arasındaki sınırın sıcaklık artışı ($T_x - T_0$) (°K),

T_x ve K_d toprak koşullarına göre belirlenmelidir.

3.4.3 Topraktaki Kurumanın Önlendiği Yerde Gömülü Kablolar

Kablo yüzeyinin sıcaklık artışı, ΔT_x'den büyük olmayacak biçimde sınırlandırılarak nem hareketinin önlenmesi amaçlanan yerdeki akım değeri,

$$I = \left[\frac{\Delta T_x - nP_d R_{TG}}{nR_{ac}R_{TG}(1+\lambda_1+\lambda_2)}\right]^{1/2} \quad \textbf{(3.25)}$$

formülünden elde edilmelidir. İletken direnci (R), izin verilebilen en büyük değerden daha küçük olabilen uygun iletken sıcaklığı için hesaplanmalıdır. Çalışma sıcaklığı tahmin edilmeli ve gerekirse daha sonra düzeltilmelidir [15].

4 ISIL İLETİM

4.1 Kabloların Sınıflandırılması

Kablolar bir çok parametreye bağlı olarak sınıflandırılabilirler. Bunlar;

Gerilim kademelerine göre; alçak gerilim, orta gerilim, yüksek gerilim ve çok yüksek gerilim kabloları,

Damar sayılarına göre; tek damarlı, iki damarlı ve üç damarlı kablolar,

Yalıtkanlarına göre; örneğin XLPE (Çapraz bağlı polietilen), PVC (Polivinilklorür), EPR (Etilen propilen kauçuk) ve yağlı kağıt yalıtkanlı kablolar,

Yağlı kablolarda yağ basıncı seviyesine göre, örneğin yağlı kablolar (OF) ve basınçlı yağlı kablolar (POF),

Kablo yalıtkanının üzerinde metalik siper bulunup bulunmamasına göre*;* siperli kablolar, sipersiz kablolardır [10].

Kabloların tasarımı ve boyutlandırılması sırasında ortam koşulları ve oluşabilecek elektriksel zorlanmalar da hesaba katılmak zorundadır. Ortam koşulları, doğru tip koruyucu kılıflar ve zırhların seçiminde önem taşırken, kabloda oluşacak elektriksel zorlanmaların bilinmesi ise yalıtım kalınlığı ve doğru tip ekran malzemesinin belirlenmesini sağlar. Kablo seçimi, anma gerilim değerlerine, kullanım alanlarına ve ekonomiklik ölçütlerine göre yapılmalıdır.

Kablonun tipi, sınıfı, kullanım alanı ne olursa olsun tüm kablolarda kayıplar ve buna bağlı olarak belli bir düzeyde ısınma gerçekleşir [24].

Kablolardaki ısınmanın sebepleri, kullanılan malzemeler ve gerilim kademesine göre;

- İletkendeki I^2R_{ac} kayıpları
- Dielektrik kayıplar
- Kılıf ve zırh kayıplarından biri veya birkaçıdır.

Bu üç kaynaktan açığa çıkan ısı, kablodan dışarıya atılmalıdır. Bunun için de, bir yerden diğerine ısı iletimini sağlamak için gerekli olan sıcaklık farkının yaratılması gerekmektedir [16]. Güç kablolarında akım taşıma kapasitesinin hesabı da iletken

akımıyla, kablo ve çevre sıcaklığı arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tanımlayan ısı iletim eşitliklerinin çözülmesini gerektirmektedir [12].

Yeraltı kablolarıyla iletim ve dağıtım, özellikle yerleşik ve çok nüfuslu bölgelerde havai hatlara çok uygun bir alternatif durumundadır. Estetik açıdan sorun yaratmaması ve havai hatlara göre çevresel etkilere daha az maruz kalmaları ve bu sebeple daha güvenilir olmaları, yeraltı kablolarının kullanılmasında teknik olmayan sebeplerdir [9, 25].

Enerjinin yeraltından iletimi, hava hatları ile iletime göre daha maliyetli olduğu için yeraltı kablo sistemleri sıklıkla maksimum izin verilen iletken akımında işletilir. Bunun için kablo yalıtımının dayanabileceği en yüksek sıcaklık değeri ve kabloda oluşan ısının kablo içinde ve çevresine yayılma yöntemleri belirlenmelidir [4, 9].

Kablodan toprağa yayılan ısı akısı, topraktaki nemin büyük ölçüde çevreye taşınmasına ve kablo çevresinde kurumuş bir bölge oluşmasına sebep olur. Topraktaki bu kuruma sonucunda, ısıl direnci artar ve kablonun dayanabileceği en yüksek akım değeri azalır. Bu durum sonucunda kabloda üretilen ısı, çevreye etkin bir şekilde yayılamadığı için yalıtkan sıcaklığı artar ve bu kablonun zarar görmesine sebep olabilir. Bu yüzden özellikle son yıllarda yeraltı kablolarının ısıl analizi çok önemli hale gelmiştir [23].

4.2 Güç Kablolarında Isı İletimi

Kabloların akım taşıma kapasitesinin hesabında iki önemli yol vardır. Belli bir akım yüklenme değeri için iletken sıcaklığının bulunması, ya da tersi biçimde belli bir iletken sıcaklığı değeri için izin verilen yük akımının bulunmasıdır. Bu hesapları yapabilmek için kabloda kayıplardan dolayı ortaya çıkan ısı ve belirli bir iletken malzeme ve belli bir yük akımı için, bu ısının kablodan yayılma hızı hesaplanmalıdır. Kabloyu çevreleyen ortamın ısıyı yayabilme yeteneği bu hesaplarda önemli rol oynar. Bu yetenek, toprağın bileşimi, nemliliği, ortam sıcaklığı ve rüzgara bağlıdır. Isı kablodan çeşitli yollarla transfer edilebilir. Hava hatlarında bu taşınım ve ışıma yoluyla olmakla beraber yeraltı kablolarında bu transfer iletimle olur [12].

4.2.1 İletim

Yeraltına döşenen kablolarda ısı iletimi yalıtkandan, iletkenden ve diğer metalik bölümlerden iletimle gerçekleşir. Isı iletim yöntemlerini uygun enerji ve güç alışverişi eşitlikleri cinsinden yazmak mümkündür. Bu eşitlikler, belli bir zaman aralığında

transfer edilen ısıyı hesaplayabilmek için kullanılabilir. İletimle ısı iletiminde, ısı alışveriş eşitlikleri Fourier Yasası olarak bilinir [26].

Sıcaklık dağılımı T(x) olan bir duvar için denklemler,

$$q = -\frac{1}{K}\frac{dT}{dx} \qquad \textbf{(4.1)}$$

şeklindedir. Burada;

q, birimi W/m^2 olan ısı akısını temsil etmektedir. Isı akısı, ısı iletimine dik doğrultuda birim alandaki, x yönündeki ısı iletim hızıdır. Bu doğrultudaki $\frac{dT}{dx}$ ile gösterilen sıcaklık değişimiyle orantılıdır.

K, ısıl özdirençtir. Eşitlikten görüldüğü gibi, ısı akısıyla, sıcaklık gradiyantı arasındaki oranı belirler. Isıl özdirencin birimi °K.m/W olmakla beraber, değeri malzemenin karakteristik özelliği olan sabit bir değerdir. Formüldeki eksi işaretinin sebebi ısının azalan sıcaklık yönünde iletilmesidir [27].

4.2.2 Taşınım

Yalıtılmamış yüzeyden çevresine veya çevresinden yüzeye geçen ısı, sistemde bir ısıl yük oluşturur. Sıcak veya soğuk yüzey ile çevre arasındaki ısı geçişi Isaac Newton tarafından matematiksel olarak ifade edilmiştir. Taşınımla geçen ısı;

$$Q = h_t A(T_s - T_\infty) \qquad \textbf{(4.2)}$$

ifadesi ile verilir (Newton Yasası). Burada,

Q : Çevreye verilen veya çevreden alınan ısı (W)

h_t : Isı taşınım katsayısı (W/m°K)

A : Yüzeyin kesit alanı (m^2)

T_s : Yüzeyin sıcaklığı (°K)

T_∞ : Yüzeyden çok uzak (sonsuz uzak) noktanın veya çevrenin sıcaklığıdır (°K).

Yüzeysel ısıl direnç kavramı R ile taşınımla ısı transfer denklemi

$$Q = \frac{(T_s - T_\infty)}{R} \qquad \textbf{(4.3)}$$

olur [27]. Yüzeysel ısıl direnç ise

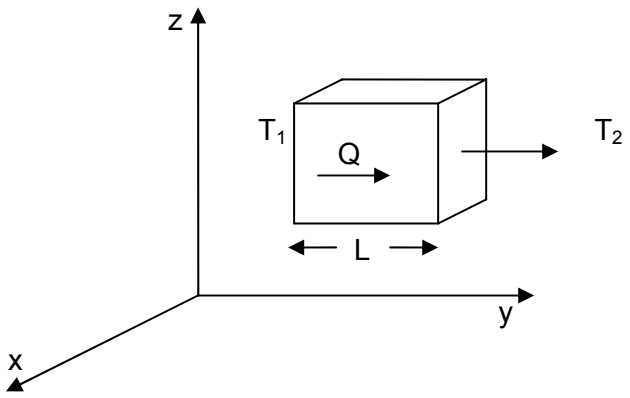
$$R = \frac{1}{h_t A} \tag{4.4}$$

dır. Taşınımla ısı iletimi, ısı akışının doğasına göre sınıflandırılabilir. Akış, dış kaynaklarla, örneğin pompalar, fanlar ve rüzgar yardımıyla sağlanıyorsa zorlamalı (cebri) taşınım adını alır. Doğal taşınım ise, sadece sıcaklık farkından doğan yoğunluk farkından dolayı çıkan taşıma kuvvetleriyle olur. Isı taşınım katsayısının (h) belirlenmesi hava hatları için belki de en önemli ve en zor kısımdır. Bu katsayının değeri doğal taşınım için 2 - 25 $W/m^2.°K$ arasındayken, zorlamalı taşınım için ise bu değer 25 - 250 $W/m^2.K$ arasında değişmektedir [12].

4.2.2.1 Bir Yüzeyden Geçen Isı

Bir yüzeyden çevreye veya çevreden yüzeye geçen ısı, yüzeyden taşınımla ve iletimle geçen ısıların toplamına eşittir.

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{L}{kA} + \frac{1}{hA}} = \frac{A.\Delta T}{\frac{L}{k} + \frac{1}{h_t}} \tag{4.5}$$



Şekil 4.1: Bir boyutlu ısı geçişi

Burada Q yüzeyden geçen ısı (W), k malzemenin ısıl öz iletkenliği (W/m°K), h_t ısı taşınım katsayısı (W/m°C), A yüzeyin kesit alanı (m^2), L ise malzemenin boyu (m), ΔT iç ve dış taraf arasındaki sıcaklık farkıdır (°K). Şekil 4.1'de sıcaklık farkından doğan bir boyutlu ısı akışı görülmektedir [10, 28].

4.2.3 Işıma

Isıl ışıma, kablo veya kablonun içinde bulunduğu borunun yüzeyinden çevreye ısı yayılmasıdır. Bir kablo yüzeyinden çevresine yayılan ısı akısı Stefan-Boltzmann yasasıyla şu şekilde verilmektedir;

$$q = \varepsilon_0 \sigma_B T_s^{*4} \qquad \textbf{(4.6)}$$

Burada;

T_s^*: Yüzeyin mutlak sıcaklığı

σ_B: Stefan - Boltzmann sabiti (σ_B = 5,67.10^{-8} W/m^2.K^4)

ε_0: Kablo yüzeyinin bağıl ısı yayma faktörüdür. Yüzeyin yayılım özelliğidir. $0 \le \varepsilon \le 1$ arasında değer alan bu büyüklük, yüzeyin ideal ısı yayıcıya göre ne kadar etkin olarak ısı yaydığının ölçüsüdür. Kablo ısıyı hem yaydığı hem de emdiği için, ışınımla ısı alışverişi iki yüzey arasındaki etkileşimle modellenebilir. Kablo sınıflandırma hesaplarında kablo yüzeyinin küçük ve diğer yüzeyin ise uzak ve daha büyük olduğu varsayılabilir.

4.3 Enerji Denge Denklemleri

Isı iletim denklemlerinin analizinde, enerjinin korunumu yasası önemli rol oynar. Bu yasa enerji alışverişine uygulanırsa, herhangi bir zamanda J.s (W) birimiyle gösterilen bütün enerji miktarları arasında bir denge vardır. Enerji korunum yasası şu şekilde ifade edilebilir.

$$P_{ent} + P_{int} = P_{out} + \Delta P_{st} \qquad \textbf{(4.7)}$$

Isı alışverişleri P ile sembolize edilmektedir. Burada;

P_{ent}: Kabloya giren enerji miktarıdır. Bu enerji kablosunun çevresindeki diğer kablolar sebebiyle veya güneş enerjisiyle kabloya girmektedir.

P_{int} : Kablonun içinde joule kaybı ve dielektrik kaybıyla meydana gelen ısı miktarıdır.

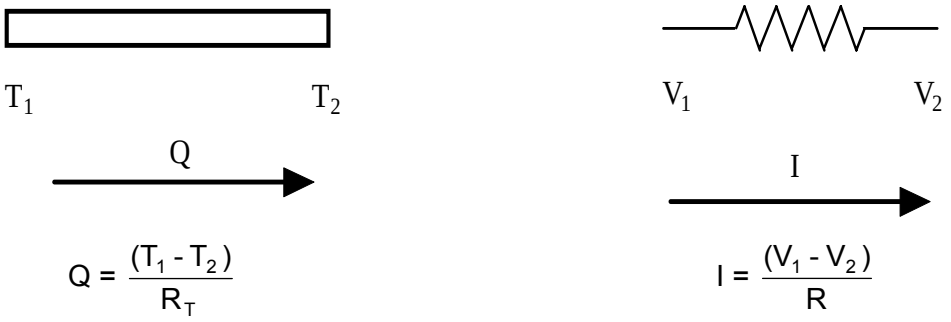
ΔP_{st} : Kablo içinde depolanan enerji miktarındaki değişimdir.

P_{out} : Kabloda iletim, taşınım veya ışıma yoluyla çevreye yayılan enerji miktarıdır. Yeraltı tesisatlarında kablo sistemi ayrıca kendini çevreleyen toprağı da içerir [12].

4.4 Isıl Devre Benzerlikleri

4.4.1 Isıl Direnç ve Elektriksel Dirençlerin Benzerliği

Isı iletim denklemlerinin analitik çözümleri sadece basit kablo yapıları ve döşeme durumları için mümkün olabilir. Isı dağılım probleminin çözümünde elektrik mühendisleri, iletken ve çevresi arasındaki sıcaklık farkından dolayı gerçekleşen ısı akışıyla, potansiyel fark dolayısıyla oluşan elektrik akımının akışı arasındaki temel benzerliği kullanırlar. Potansiyel farka maruz kalmış madde içindeki akımı temsil eden toplu parametreli diferansiyel denklemleri çözerkenki aşinalıklarından dolayı aynı yöntemi ısı iletim probleminin çözümüne uyarlarlar. Yöntem, ısı iletimi incelenecek fiziksel nesnenin belli hacimlere bölünüp, her bir hacmin de ısıl direnç ve ısıl kapasiteyle temsil edilmesiyle başlar. Isıl direnç, malzemenin ısı akışına karşı koyma yeteneği olarak tanımlanır. Aynı şekilde, ısıl kapasite de malzemenin ısı depolayabilme yeteneğidir. Isıl direnç ve kapasiteler belirlendikten sonra, gerilimin karşılığı olarak sıcaklık ve akımın karşılığı olarak ısı akışının olduğu elektrik devresine benzer ısıl devre modellenir. Elektriksel devre ile ısıl devre arasındaki bu benzerlik Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Eğer ısıl karakteristikler sıcaklıkla değişmiyorlarsa, eşdeğer devre lineerdir ve süperpozisyon ilkesi herhangi bir çeşit ısı akışı problemine uygulanabilir.



Şekil 4.2: Elektriksel direnç ile ısıl direnç arasındaki benzerlik

Isıl devrede, yük, ısıya karşılık gelmektedir. Böylelikle, Ohm Yasası, Fourier Yasasına benzerdir. Isıl benzeşme elektrik şebekesindeki elektriksel direnç ve kapasite gibi, ısıl direnç ve kapasite için aynı formülasyonu kullanmaktadır. Isıl şebekenin toplu parametreli ifadesi kompleks kablo yapıların analizi için de basit bir

yöntem olmasından dolayı, kablo sistemlerinin ısıl analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Isıl direnç;

$$R_T = \frac{L}{k.A} \tag{4.8}$$

olarak ifade edilir. Isı geçişi ile sıcaklık farkı arasındaki ilişki

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_T} \tag{4.9}$$

veya,

$$(T_1 - T_2) = R_T.Q \tag{4.10}$$

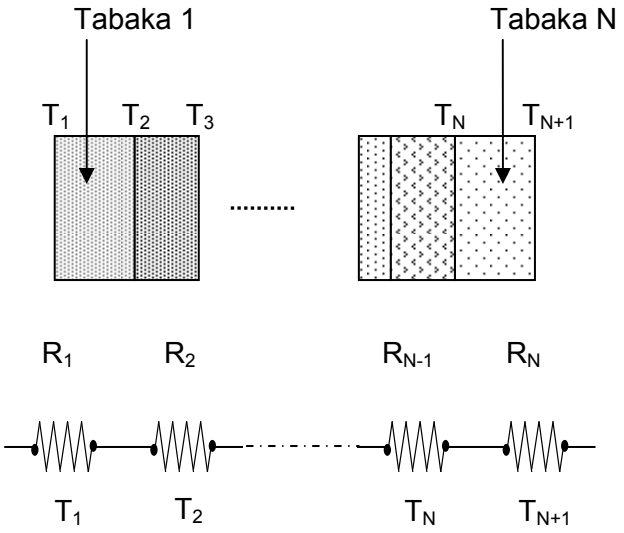
elektrik akımı ile potansiyel farkı (gerilim) arasındaki

$$I = \frac{(V_1 - V_2)}{R} \tag{4.11}$$

veya

$$(V_1 - V_2) = R.I \tag{4.12}$$

ilişkisine benzer [28]. Isıl dirençler birbirlerine seri veya paralel olabilirler.



Şekil 4.3: Seri bağlı ısıl dirençler

Seri ve paralel eşdeğerleri aynı elektriksel dirençlerde olduğu gibi hesaplanır. Birbirine seri olan m tane tabakadan ısı geçişi varsa, toplam ısıl direnç bu m tane ısıl direncin toplamına eşittir.

Örnek olarak Şekil 4.3'teki kablodan çevresine ısı iletimi problemi incelenirken kabloyu oluşturan malzemeler birbirine seri, kablonun dış ısıl direnci ise bunlara seridir.

Herhangi bir tabakanın ısıl direnci,

$$R_k = \frac{L_k}{k_k A_k} \qquad \textbf{(4.13)}$$

olmak üzere her bir tabaka için,

$$T_k - T_{k+1} = Q.R_k \qquad \textbf{(4.14)}$$

dır. Tabakalardaki toplam sıcaklık düşümü her bir tabakanın sıcaklık düşümlerinin toplamından bulunur. Buna göre;

$$T_1 - T_2 = Q.R_1 \qquad \textbf{(4.15)}$$

$$T_2 - T_3 = Q.R_2 \qquad \textbf{(4.16)}$$

$$\vdots$$

$$T_{N-1} - T_N = Q.R_{N-1} \qquad \textbf{(4.17)}$$

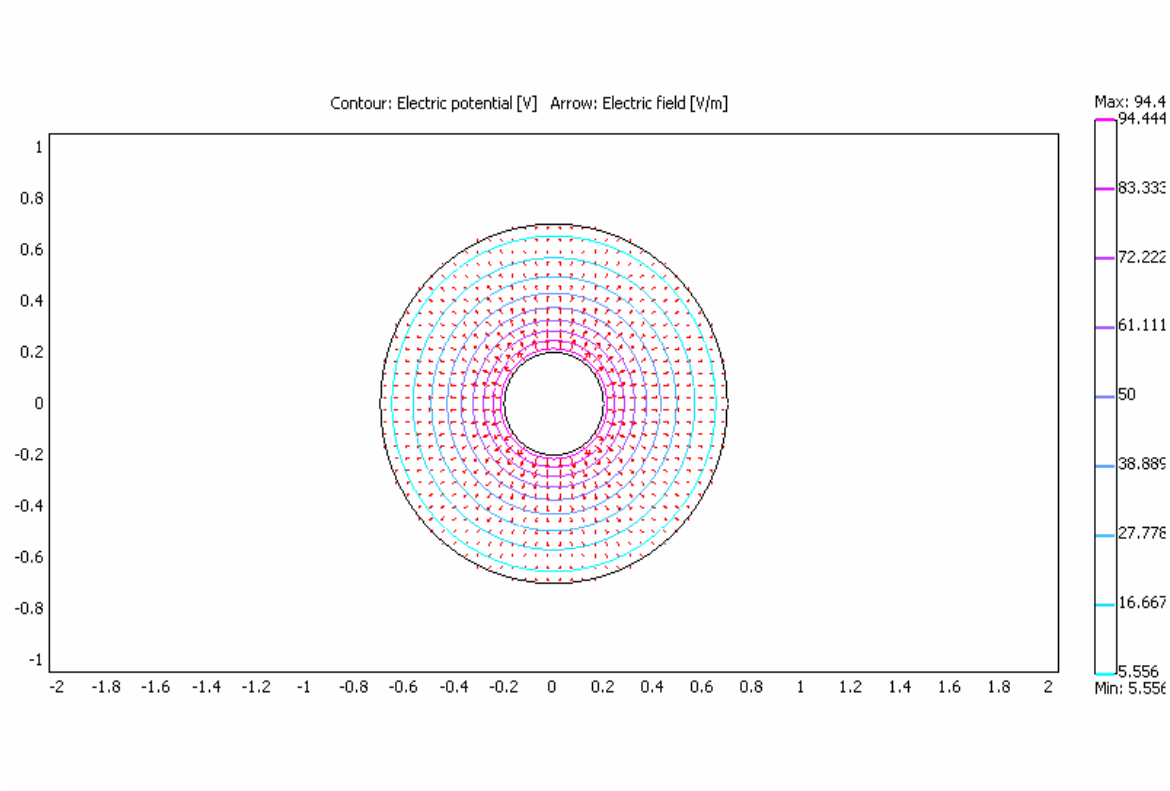
$$T_N - T_{N+1} = Q.R_N \qquad \textbf{(4.18)}$$

toplanırsa

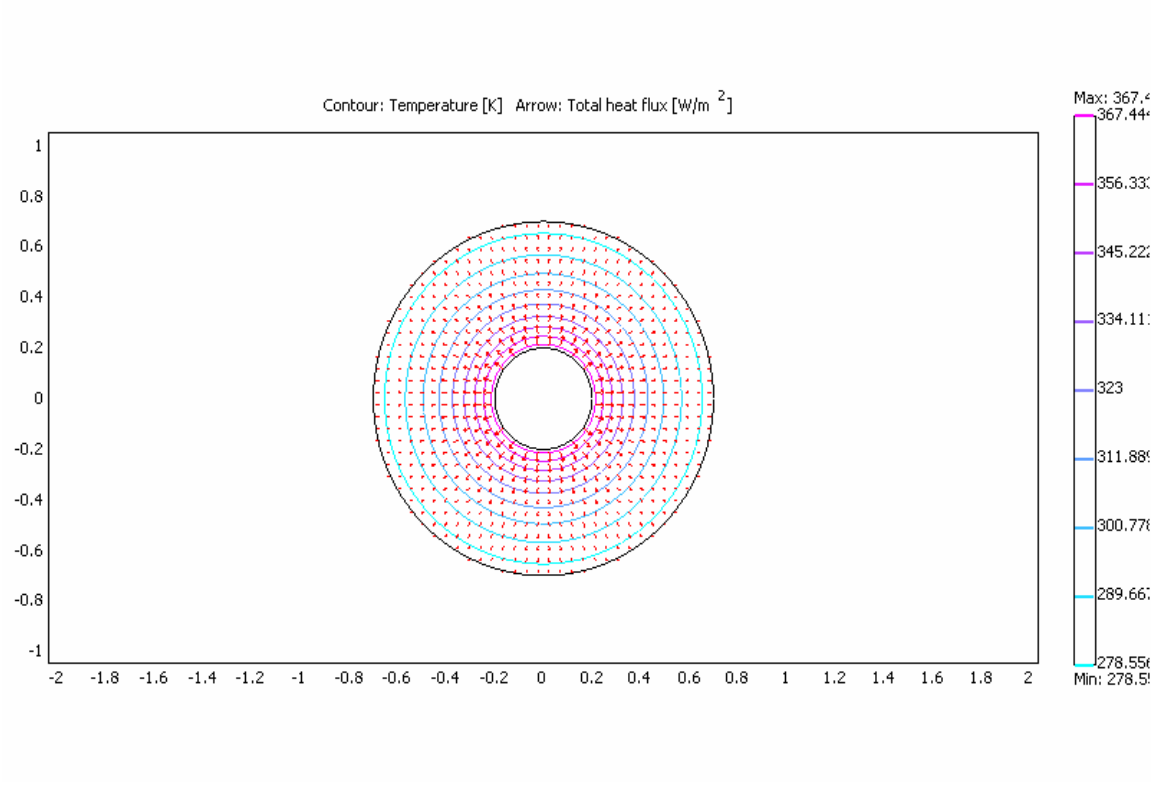
$$T_1 - T_{N+1} = Q.(R_1 + R_2 + ... + R_{N-1} + R_N) \qquad \textbf{(4.19)}$$

$$\Delta T = Q.R_e \qquad \textbf{(4.20)}$$

4.4.2 Isıl Akış ve Yük Akış Çizgilerinin Benzerliği



Şekil 4.4: Eş potansiyel çizgileri ve elektrik alan çizgileri



Şekil 4.5: Eş sıcaklık çizgileri ve ısı akış çizgileri

Eş sıcaklık eğrileri, eş potansiyel çizgileriyle, ısı akış çizgileri ise elektrik alan çizgileriyle benzerlik göstermektedir. Aynı geometriler ve aynı ölçüler kullanıldığı zaman gerilimin ve sıcaklığın aynı değişimi gösterdiği açıkça görülmektedir. Örnek olarak aynı ölçülerde silindirsel yapıların potansiyel ve sıcaklık dağılımları;

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'den görüldüğü gibi, içteki silindirlere sırasıyla 100 V ve 100 °C, dıştaki silindirlere de 0 V ve 0 °C değerleri verildiğinde eş potansiyel ve eş sıcaklık çizgileri birebir aynıdır.

4.5 Isıl Direnç

Kablonun içindeki iletken olmayan bütün malzemeler, kablodan ısı akışına karşı koyarlar. Kablo içindeki metallerin ise ısıl dirençleri sıfır olmasa da çok küçük değerde olduğu için genelde hesaplarda ihmal edilirler. Değişik geometriler için ısıl dirençlerin hesabı farklıdır. Kablonun ısıl direncinin hesabı için özellikle silindirik tabakalı durumdaki direnç hesabı kullanılacaktır. °K ısıl özdirenç, r_1 ve r_2 sırasıyla iç ve dış tabakaların yarıçapları olmak üzere, birim uzunluklu silindirsel tabaka için iletimle ısı iletimine karşı ısıl direnç;

$$R_T = \frac{K}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \qquad \textbf{(4.21)}$$

ile ifade edilir.

Tablo 4.1: Isı ile elektrik arasında analojik büyüklükler

Isıl büyüklükler	**Elektriksel büyüklükler**
$J_{ısı} = \sigma_{ısı}.E$	$J = \sigma_{elk}.E$
Sıcaklık farkı $\Delta T = T_1 - T_2$	Potansiyel farkı $\Delta U = U_1 - U_2$
$T = \frac{Q}{2\pi k L} \ln \frac{r_2}{r_1}$	$U = \frac{q}{2\pi \varepsilon L} \ln \frac{r_2}{r_1}$
Isıl direnç $R_T = \Delta T / Q$	Direnç $R = \Delta U / I$

Tablo 4.1'de ısıl büyüklüklerle elektriksel büyüklükler arasındaki benzerlikler özetlenmiştir.

4.5.1 Isıl Dirençlerin Hesaplanması

Kabloda ortaya çıkan ve çevreye yayılması gereken ısıya karşı kablonun farklı bölümleri ve kabloyu çevreleyen ortam farklı dirençler gösterirler [12].

Kablolarda yalıtım ve koruyucu örtüler için gerilim kademesi ve kullanım alanına bağlı olmak üzere farklı malzemeler kullanılmaktadır. Kablo yalıtımları genel olarak, kağıt, sentetik polimerler ve sıkıştırılmış gazdan oluşmaktadır. Günümüzde yaygın olarak polimerler kullanılmaktadır. Alçak gerilimlerde polivinilklorür (PVC), orta gerilimlerde polietilen (PE), etilenpropilen (EPR), çapraz balı polietilen (XLPE) ve yüksek gerilimlerde XLPE ve EPR en çok kullanılan yalıtım malzemeleridir. Kabloda kullanılan malzemelerin ısıl özdirenç değerleri Tablo 4.2'de verilmektedir [28].

Akım değeri hesaplamalarında, yarı iletken ekranlama malzemelerinin ısıl özelliklerinin, bitişik dielektrik malzemelerin ısıl özdirençleriyle aynı değer olduğu varsayılır.

Koruyucu örtüler için plastik veya elastomerik malzemeler kullanıldığında, bunların ısıl özdirençleri, bu tabloda verilen malzemelerin yalıtım derecesi ile aynı olacak biçimde alınmalıdır.

Ekranlama tabakaları bulunduğunda, ısıl hesaplamalar için, yarı iletken tabakalar yalıtımın bir bölümü olarak düşünülürken metalik şeritler, iletkenin veya kılıfın bir bölümü olarak düşünülür. Bu nedenle bileşenlerin boyutlarında uygun biçimde değişiklik yapılmalıdır [15].

4.5.1.1 Bir İletken ile Kılıf Arasındaki Isıl Direnç, R_{Td}

Tek Damarlı Kablolar

Bir iletken ile kılıf arasındaki ısıl direnç (R_1),

$$R_{Td} = \frac{K_d}{2\pi} \ln[1 + \frac{2t_1}{d_L}] \qquad \textbf{(4.22)}$$

formülüyle verilir. Burada;

K_d : Yalıtkanda kullanılan malzemelerin ısıl özdirenci (°K.m/W),

d_L : İletken çapı (mm),

t_1: İletken ile kılıf arasındaki yalıtkanın kalınlığıdır (mm) [3].

4.5.1.2 Kılıf ile Zırh Arasındaki Isıl Direnç, R_{Ti}

Ortak Metalik Kılıflı Tek Damarlı, İki Damarlı ve Üç Damarlı Kablolar

Kılıf ile zırh arasındaki ısıl direnç (R_{Ti}),

$$R_{Ti} = \frac{K}{2\pi} \ln(1 + \frac{2t_2}{d_M}) \quad \textbf{(4.23)}$$

formülü ile verilir. Burada;

t_2: Zırhın altındaki tabakanın kalınlığı (mm),

d_M : Kılıfın dış çapıdır (mm).

4.5.1.3 Dış Kılıfın Isıl Direnci, R_{Ts}

Dış kılıflar genellikle eşmerkezli tabakalar biçimindedir ve R_3 ısıl direnci,

$$R_{Ts} = \frac{K_s}{2\pi} \ln(1 + \frac{2t_3}{d_z}) \quad \textbf{(4.24)}$$

formülüyle verilir. Burada,

K_s: Dış kılıfta kullanılan malzemelerin ısıl özdirenç değerleridir,

t_3: Dış kılıfın kalınlığı (mm),

d_z : Zırhın dış çapı (mm),

Not: Zırhsız kablolar için d_z dış örtünün hemen altındaki bileşenin, yani kılıfın, ekranın veya yatağın dış çapına eşit alınır [15].

4.5.1.4 Dış ısıl direnç, R_4

Tek Olarak Gömülü Kablo

$$R_{TG} = \frac{K_G}{2\pi} \ln(u + \sqrt{u_2 - 1}) \quad \textbf{(4.25)}$$

Burada,

K_G : Toprağın ısıl özdirenci (°K.m/W),

h: Toprak yüzeyinden kablo eksenine kadar uzaklık (mm),

d: Kablonun dış çapı (mm),

$$u = \frac{2h}{d} \qquad \textbf{(4.26)}$$

dir. u değeri 10'u geçtiğinde,

$$R_{TG} = \frac{K_G}{2\pi} \ln(2u) \qquad \textbf{(4.27)}$$

İyi bir yaklaşımdır (1/1000 den daha büyük).

Tablo 4.2: Malzemelerin ısıl özdirenç değerleri

Malzeme	Isıl Özdirenç (°K.m / W)
Yalıtkan Malzemeler:	
Som tip kablolardaki kağıt yalıtım	6,0
Yağlı kablolardaki kağıt yalıtım	5,0
Harici gaz basınçlı kablolardaki kağıt yalıtım	5,5
Dahili gaz basınçlı kablolardaki kağıt yalıtım:	
a) Ön emprenyeli	5,5
b) Kütle emprenyeli	6,0
PE	3,5
XLPE	3,5
Polivinil klorür (PVC):	
3 kV'a kadar (3 kV dahil) kablolar	5,0
3 kV'dan büyük kablolar	6,0
EPR:	
3 kV'a kadar (3 kV dahil) kablolar	3,5
3 kV'dan büyük kablolar	5,0
Butil kauçuk	5,0
Kauçuk	5,0
Koruyucu Örtüler:	
Jüt ve lifli malzemeler	6,0
Sandviç biçiminde kauçuk koruma	6,0
Polikloropren	5,5
PVC:	
35 kV'a kadar (35 kV dahil) kablolar	5,0
35 kV'tan büyük kablolar	6,0
Oluklu alüminyum kılıflar üzerindeki PVC/bitüm	6,0
PE	3,5
Kanal Tesisatları İçin Malzemeler:	
Beton	1,0
Fiber	4,8
Amyant (Asbest)	2,0
Topraktan yapılmış malzeme	1,2
PVC	6,0
PE	3,5

Yan yana Döşenmiş Tek Damarlı İki Kablo

$u \geq 5$ için,

$$R_{TG} = \frac{K_G}{\pi} \ln((2u) - 0{,}451) \qquad \textbf{(4.28)}$$

Yan yana Döşenmiş Tek Damarlı Üç Kablo

Yan yana döşenmiş tek damarlı kablolar için

$u \geq 5$ olduğunda,

$$R_{TG} = K_G \, [0{,}475 \ln(2u) - 0{,}346] \qquad \textbf{(4.29)}$$

4.6 Kanallarda Gömülü Kablolar

Kablolar genel olarak kanallar veya borular içine yerleştirilirler. Kablonun ve ekipmanlarının ısıl dirençlerinin yanında, kablonun içine koyulduğu kanalların ve boruların da bir ısıl direnci vardır. Bu ısıl direnç iki kısımdan oluşur. Birincisi kablonun içine konulduğu borunun ısıl direnci, diğeri de kablo ile boru arasındaki boşluğun ısıl direncidir. Eğer boru metalden yapılmışsa sadece aradaki boşluğun ısıl direnç değeri hesaplanır. Kablonun dış ısıl direncini hesaplarken bu iki değere ek olarak kanalın dış ısıl direnci de gelir. Bu değer kablonun gömülü olduğu ortamın bileşenlerine göre değişir [15].

Kablonun dış ısıl direnç değeri R_{Tu} ile gösterilir.

$$R_{Tu} = R'_{Tu} + R''_{Tu} + R_{TG} \qquad \textbf{(4.30)}$$

eşitliğinden bulunur.

Not: Kanalı çevreleyen toprak ya kuru durumdayken ya da dolgu malzemesinin nemini muhafaza etmek için sızdırmaz duruma getirildiğinde, çevreleyen toprağınkini aşmayan bir ısıl özdirenci bulunan emici bir malzeme ile tamamen doldurulmuş kanaldaki kablolar, doğrudan doğruya gömülmüş kablolar gibi işlem görebilir.

4.6.1 Kablo ile Kanal (veya boru) Arasındaki R'_{Tu} Isıl Direnci

Kablo çapları 25 mm -100 mm arasındaki kanal içine alınmış kablolar ve boru içindeki üç damarının eşdeğer çapı 75 mm – 125 mm arasında olan boru tipi bir kablonun damarları ile yüzeyi arasındaki boşluğun ısıl direnci şu şekilde verilmektedir.

$$R'_{Tu} = \frac{U}{1 + 0.1(V + YT_m)d} \qquad \textbf{(4.31)}$$

Burada,
U, V, Y: Tesis etme durumuna göre çizelgelerden bulunan sabitler
d: Kablonun dış çapı (mm),

Formül boru tipi kablolar için kullanıldığında, damar grubunun d_e eşdeğer çapı aşağıdaki gibi olur:

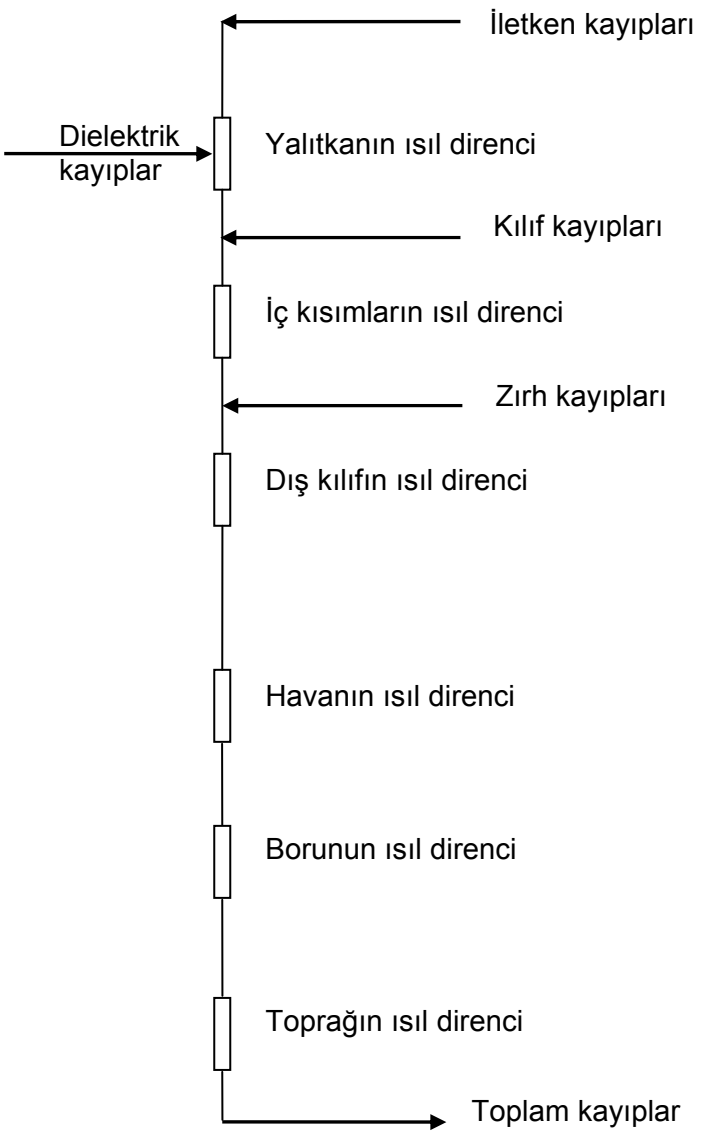
- İki damar: d_e = 1,65 x Damar Dış Çapı (mm),
- Üç damar: d_e = 2,15 x Damar Dış Çapı (mm),
- Dört damar: d_e = 2,50 x Damar Dış Çapı (mm).

T_m: Kablo ile kanal arasındaki boşluğu dolduran ortamın ortalama sıcaklığıdır (°C).

4.6.2 Kanalın (veya borunun) kendisinin R''_{Tu} Isıl Direnci

$$R''_{Tu} = \frac{1}{2\pi}\rho_T \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \qquad \textbf{(4.32)}$$

formülü ile hesaplanır. Burada:
D_o : Kanalın dış çapı (mm),
D_d: Kanalın iç çapı (mm),
ρ_T: Kanal malzemesinin ısıl özdirenci (°K.m / W). Bu değer metal malzemeler için sıfırdır. Diğer malzemeler için ise değerler Tablo 4.1'den alınabilir.
Kanalın veya borunun ölçüleri ve kullanılan malzemeler farklılık göstermekle beraber kanal veya boru içine döşenen kablolar için ısıl dirençler ve kayıplar Şekil 4.6'daki deki gibidir [15].



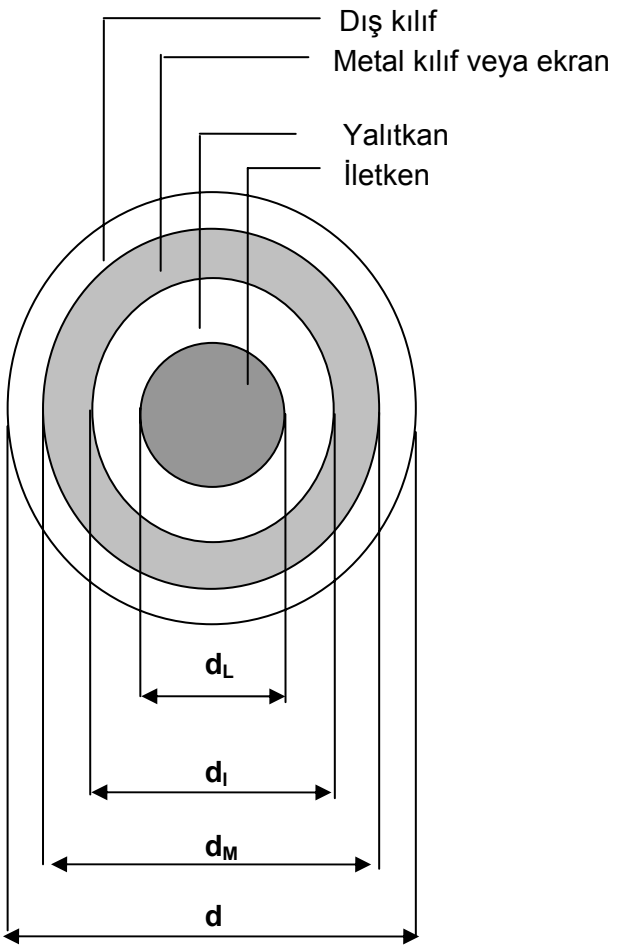
Şekil 4.6: Boru içine döşenen kablo için ısıl dirençler ve kayıplar

Kablonun ısıl direnci bulunurken, elektriksel yalıtkanın, ısıl yalıtkanlık etkisi ve kablo kılıfları hesaba katılmalı ve bu kısımların ısıl özdirenç değerleri bilinmelidir.

Örnek olarak Şekil 4.7'de gösterilen tek damarlı metal kılıflı kablo için ısıl direnç değeri,

$$R_{Tc} = R_{Td} + R_{Ts} = \frac{K_d}{2\pi} \ln \frac{d_I}{d_L} + \frac{K_s}{2\pi} \ln \frac{d}{d_M} \qquad \textbf{(4.33)}$$

formülünden bulunur.



Şekil 4.7: Tek damarlı kablonun bölümleri

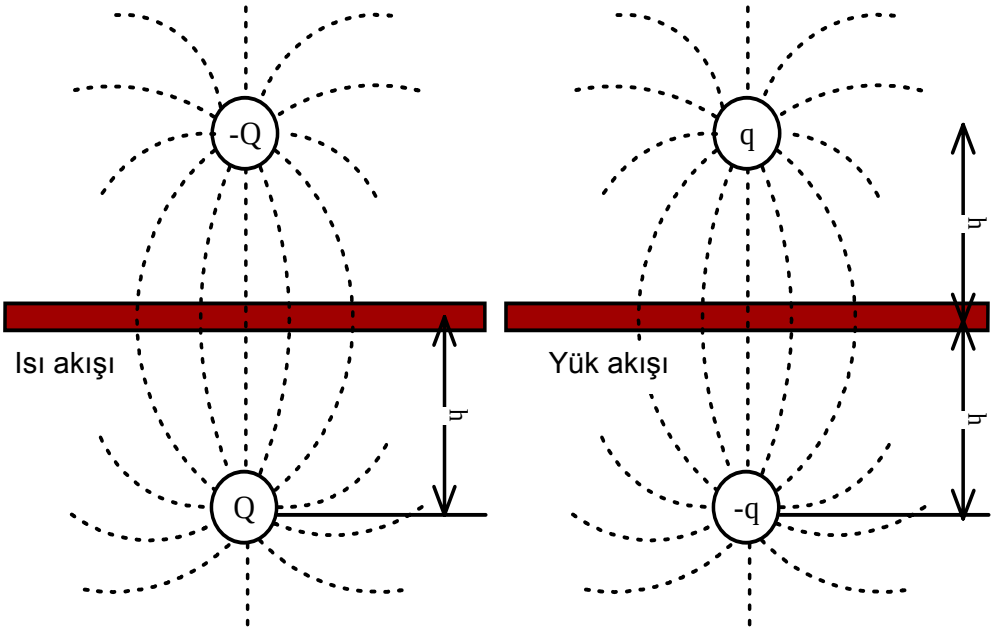
Kabloda kullanılan malzemelerin ısıl özdirenç değerlerinin verildiği Tablo 4.1'deki değerlerin izin verilen en yüksek sıcaklık değerine kadar sabit kaldığı kabul edilmektedir [24].

4.7 Toprağın Isıl Direnci

Dış kurşun kılıf ısıl bir iletken olduğu için ve kayıplardan dolayı oluşan ısıyı dışarıya ilettiğinden, kablonun içerisinde eş sıcaklık çizgileri eş merkezli silindirler şeklindedirler.

Ancak kablonun dışında eş sıcaklık eğrileri artık eş merkezli değillerdir ve kablo yüzeyinden zemine doğru radyal yönde ısı akışı olur. (Zeminde sıcaklık sabit kabul edilmiştir.)

Yeraltı kablosunun çevresindeki toprağın ısıl direncinin bulunması için birim uzunluk başına + q yükü taşıyan sonsuz uzunluktaki iletken göz önüne alınır ve aralarındaki benzerlik kullanılır.



Şekil 4.8: Isı akışı ve yük akışı arasındaki benzerlik

Şekil 4.8'de görülen toprağın h kadar üzerindeki + q yükünün etkisi, toprağın altındaki – q yünün etkiyle aynıdır. Böylece toprağın etkisi, ters yükle yüklenmiş, toprağa olan uzaklığı aynı olan – q yükü alınarak hesaba katılabilir. + q ve – Q yüklerinin etkisi ayrı ayrı hesaplanıp, süperpozisyon ilkesine göre birlikte hesaba katılabilir. Bir yükten dolayı yükler arasında oluşan potansiyel farkı

$$V = \frac{q}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{2h}{r} \qquad \textbf{(4.34)}$$

olur. İki yükten dolayı oluşan potansiyel farkı ise;

$$V = \frac{q-(-q)}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{2h}{r} = \frac{2q}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{2h}{r} \qquad \textbf{(4.35)}$$

şeklindedir. Analojiden ısı kaynağından toprak yüzeyine kadar olan uzaklıktaki sıcaklık farkı

$$T = \frac{KQ}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \qquad \textbf{(4.36)}$$

olur. Bu durumda toprağın ısıl direnci;

$$R_G = \frac{T}{Q} = \frac{K}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \qquad \textbf{(4.37)}$$

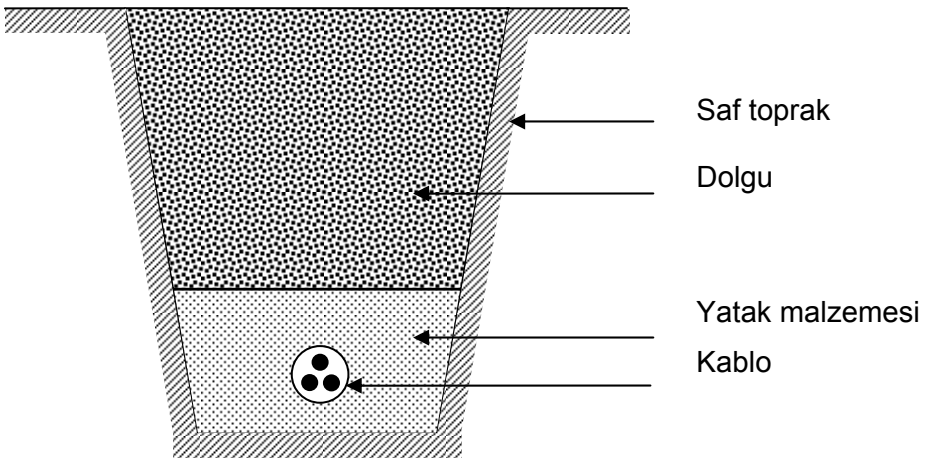
olarak bulunur [17].

Toprağın ve yatak malzemesinin ısıl direncinin doğru olarak bilinmesi, sadece kablonun izin verilen maksimum çalışma sıcaklığına kadar en verimli şekilde kullanılmasını sağlamaz, aynı zamanda erken yaşlanmaları ve aşırı ısınma sebebiyle oluşacak bozulmaları önler. Zemindeki kurumanın sonucu olarak oluşan yüksek toprak ısıl direnci, özellikle elverişsiz zemin şartlarında sürekli olarak aşırı yükte çalışan kablolar için zararlıdır [24, 29].

Eğer kablonun gömüldüğü yer etrafındaki hafif geniş bir bölüm dikkate alınırsa, farklı ısıl özdirençte üç bölge göze çarpar. Şekil 4.9'da görülen bu bölgeler;

4.7.1 Saf Toprak

Herhangi bir işlem yapılmamış, humus veya benzeri malzemeler eklenmemiş topraktır. Toprağın bu kısmında eğer belirgin biçimde humus yoksa Avrupa Standartlarına göre ısıl özdirenci 1 Km/W'den yüksek değildir. Zemin civarı, özellikle mıcırla, külle ve benzeri şekilde sağlamlaştırılmış bölgeler ayrıca incelenmelidir. Bu gibi durumlar söz konusu ise toprağın ısıl ve fiziksel özelliklerinin ölçülmesi tavsiye edilir [24].



Şekil 4.9: Toprağa gömülü kablo ve toprağın bölümleri

4.7.2 Dolgu

Kablo yapısına zarar verecek durumları önlemek için inşaat molozları, tuğla parçaları içermeyen düzgün bir zemin olmalı ve yeterince sıkıştırılmalıdır. Normalde, kazılmış toprak, örneğin kabloyu gömmek için açılan çukurdan çıkan toprak, bu iş için uygundur. Isıl ve fiziksel özellikleri, saf toprakla yaklaşık olarak eşit olabilir ancak eğer çıkan toprak moloz ve tuğla parçaları gibi maddeleri içeriyorsa ısıl özdirenci hesaplanmalıdır [30].

4.7.3 Yatak Malzemesi

Yatak malzemesi taşlardan ayrıştırılmış, kum veya en büyük parça boyutu 10 mm olacak şekilde sıkıştırabilecek toprak içermelidir. 10 cm'lik katmanlar halinde döşenmeli ve kablonun 30 cm üzerine kadar sıkıştırılmalıdır. Kablonun altındaki taş, kaya gibi sert parçacıkların yerine dolgu malzemesi gelmelidir. Kimyasal olarak kirletilmiş toprak, kül, bina molozları, çürümüş bitkilerden oluşmuş yer kömürleri dolgu malzemesiyle 20 cm den uzak mesafeye uzaklaştırılmalıdır [24, 30]. Burada, uygun özellikleri sağlayabilmek için ayrıca daha önceden kazılmış toprak ta kullanılabilir.

Tablo 4.3: Toprak bileşenleri ısıl özdirenç değerleri

Temel Eleman veya Malzeme	Kuru özgül ağırlık (t/m^3)	Isıl özdirenç (°K.m/W)
Granit	2.5 – 3,0	0,32 – 0,25
Bazalt	2,9	0,6
Mika		1,7
Gnays	2,4 – 2,7	0,29
Kireçtaşı (Limeston)	2,5	0,78
Kuvarts	2,5 – 2,8	0,11
Kum taşı	2,2	0,54
Cüruf	0,3 – 1,1	7 – 3,5
Organik maddeler, nemli		4
Organik maddeler, kuru		7
Su	1	1,68
Hava		40

Kablonun akım taşıma kapasitesi ve kablodan uzaklaştırılan ısı miktarı, kablonun ve kabloyu çevreleyen ortamın yani toprağın özellikleriyle belirlenir. Isıl direnç, topraktaki ve zemindeki temel elemanların cinsine, bileşimine ve toprağın nem derecesine göre değişiklik gösterir [2]. Tablo 4.3'te kabloyu çevreleyen toprağı oluşturan bileşenler ve bu bileşenlerin özgül ağırlık ve ısıl özdirenç değerleri verilmiştir.

Toprağı oluşturan bileşenlerin, toprak ısıl özdirencine etkisi yukarıdaki tabloda görülmektedir. Bunun yanında toprağın içindeki nem oranı ve iklim, hesaplamalarda kullanılan ısıl direnç ve ortam sıcaklığı değerlerini etkilemektedir. Ülkemizde toprak sıcaklığına ait veriler bulunmadığından Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'de önerilen değerler hesaplamalarda kullanılır. Bu değerlerin, günün birkaç saatinden veya yılın birkaç gününden daha fazlasında aşılmadığından emin olunmalıdır [24, 30].

Toprak ısıl direnci sabit olmamakla beraber, toprağın yoğunluğuna ve özellikle de toprağın içerdiği nem miktarına oldukça bağlıdır. Değişik toprak türlerinde yüzey suyunun oranı, iklim koşullarıyla ve mevsimler etkilerle değişiklik gösterdiğinden, mevsimsel ve yerel koşullar beraber göz önüne alınır [23, 31].

Tablo 4.4: Deniz seviyesindeki çevre sıcaklıkları

İklim	Ortam Sıcaklığı			
	Hava		Toprak (1 m derinlik)	
	Minimum (°C)	Maksimum (°C)	Minimum (°C)	Maksimum (°C)
Sıcak	25	55	25	40
Sıcak – ılık	10	40	15	30
Ilık	0	25	10	20

Tablo 4.5: Nem oranına göre toprak ısıl özdirenç değerleri

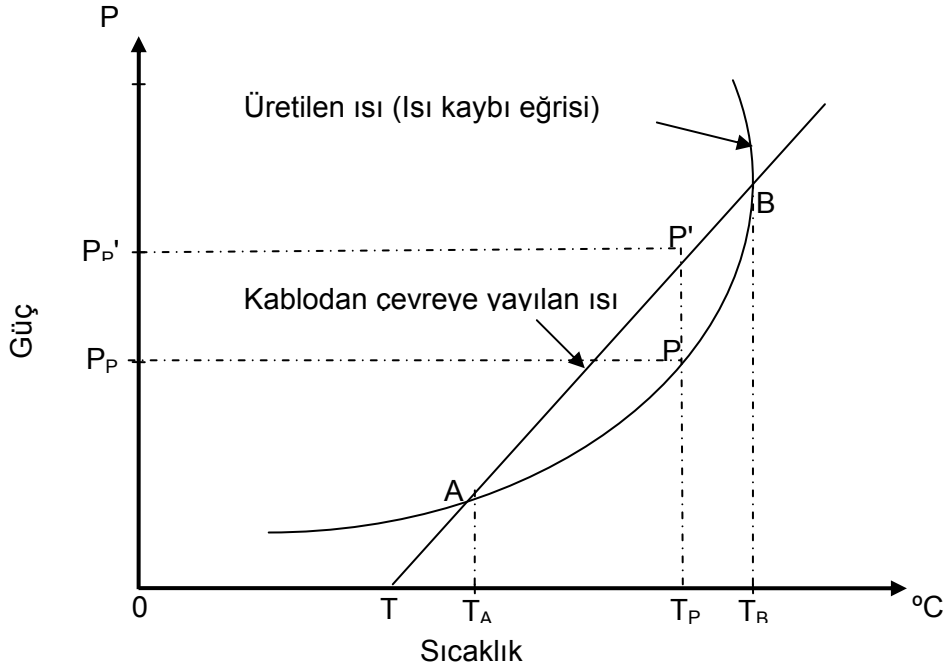
Hava Koşulları	Toprak Koşulları	Toprağın Isıl Özdirenci (°K.m/W)
Sürekli nemli	Çok nemli	0.7
Düzenli yağışlı	Nemli	1
Az yağışlı	Kuru	2
Az yağışlı veya yağışsız	Çok kuru	3

5 ISIL DENGESİZLİK

Kablo iletkeninden geçen elektriksel akımdan dolayı bir sıcaklık artışı olur. Elektriksel direnç üzerindeki elektriksel enerji, ısı enerjisine dönüşür. Bu ısının bir kısmı, iletken ve yalıtkanda kalırken, geri kalan kısmı ise, yalıtkan üzerinden kablo yüzeyine iletimle, buradan iletim ve ışıma yoluyla toprağa ve havaya ulaşır. İletkenle yalıtkan arasında ve yalıtkanla çevresi arasında ısıl direnç olduğu için, iletkenin sıcaklığı artış gösterir. Sıcaklık artması, iletken direncini arttıracağı için, sistem dengeye ulaşana kadar daha çok ısı oluşacaktır. Bu denge durumunda üretilen bütün enerji çevreye yayılacak ve iletken sıcaklığı sabit kalacaktır. Buna ısıl denge denir [13].

5.1 Isıl Dengesizlik

Kabloyu çevreleyen toprak ve dolgu malzemeleri iyi ısıl iletkenler olmadıkları için, kabloda, iletkende ve yalıtkanda oluşan ısı tamamen dışarıya atılamaz ve dolayısıyla yalıtkanda ısıl dengesizlik durumu ortaya çıkar [2]. Yalıtkanın ısıl dengesizliği, sadece dielektrik kaybı sıcaklıkla artarken olur. Şekil 3.2'deki güç faktörü – sıcaklık eğrisinden de görüldüğü gibi 40 ºC'de güç faktörü bir minimum değerden geçtikten sonra, 60 ºC'den sonra hızla artmaya başlar. Malzeme için güç faktörü – sıcaklık eğrisi, birim alan için kapasite, uygulanan gerilim ve kaynak frekansı bilindikten sonra birim alandaki dielektrik kaybı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bulunabilir. Dielektrik kaybı – sıcaklık eğrisi, güç faktörü sıcaklık eğrisinin bir sabitle çarpılmış hali olduğu için Şekil 5.1'de gösterildiği gibi aynı şekle sahiptir. Yalıtkandan uzaklaştırılabilen ısı miktarı, kaynak sıcaklığındaki artışla doğru orantılıdır. Eğer yalıtkan çok inceyse, tüm ısıl direnç yalıtkanın dışında olarak düşünülebilir ve yalıtkan tabakanın tamamı aynı sıcaklıkta kabul edilir. Kablodan uzaklaştırılabilen ısı miktarı, sıcaklık artışıyla doğru orantılı olduğu için, bu ilişki Şekil 5.1'de, eğimi ısıl dirence karşılık gelen, düz bir doğruyla ifade edilebilir.



Şekil 5.1: Isıl dengenin grafiksel gösterimi

Yalıtkan sıcaklığı çevresiyle aynı değerde olduğunda, doğal olarak ısı akışı olmayacaktır. Dolayısıyla doğru, çevre sıcaklığına karşılık gelen bir değerden geçmelidir. Eğer bu sıcaklık değeri ve ısıl dirençler bilinirse, doğru belirlenebilir. Yalıtkanın yapay olarak T_P sıcaklığına getirilirse üretilen güç P_p, bu sıcaklık değerinde, kablodan dışarıya taşınan ısı miktarı ise $P_{P'}$dir. $P_{P'} > P_P$ olduğu için aradaki $P_{P'} - P_P$ den dolayı sıcaklık düşmeye başlar. Kabloda ortaya çıkan ısı ile dışarıya atılan ısı aynı değerde oluncaya kadar sıcaklık azalır. Bu durum, eğriyle doğrunun kesiştiği nokta olan A noktasında sağlanır. A noktası yalıtkan için kararlı çalışma noktasıdır. Eğer sıcaklık, T_A değerinden aşağı inerse, üretilen güç çevreye taşınan güçten fazla olduğu için sıcaklık artarak tekrar T_A değerine gelir. Tersi durum gerekleşip, sıcaklık T_A değerini aşarsa, bu sefer de kablodan taşınan güç değeri, üretilenden fazla olduğu için sıcaklık azalmaya başlar ve T_A denge noktasına gelir. Eğriyle doğrunun kesiştiği diğer bir nokta ise B noktasıdır. Ancak bu nokta yarı kararlı bir noktadır. Sıcaklık eğer çok hafifte olsa T_B değerinin altına düşerse, taşınan ısı, üretilen ısıdan yüksek olduğundan sıcaklık daha da düşerek denge, T_A sıcaklığında sağlanacaktır. Tersi durum da ise sıcaklık T_B değerini biraz aştığı zaman, üretilen ısı miktarı kablodan dışarıya taşınan ısıdan fazla olduğu için sıcaklık hala artma eğiliminde olur. Eğri yükselmeye devam ettiği için, sıcaklık ta

belirsiz olarak artmaya devam eder. Bu artış tek bir yolla sona erer. Sıcaklık ve üretilen güç yalıtkan harap olana kadar artar. B noktası ısıl dengesizlik için kritik noktadır. Eğer sıcaklık T_B değerini biran bile aşarsa, gerilim uygulanmaya devam ettikçe yalıtkan kesinlikle bozulacaktır. Sıcaklık T_B değerini geçtiğinde eğer gerilim kesilirse, ortam sıcaklığına kadar soğuyacak ve tekrar gerilim uygulandığında, sıcaklık en fazla T_A noktasına kadar artacaktır [20].

Oda sıcaklığında yalıtkana bir gerilim uygulandığı zaman, iletkenlik akımının çok küçük olmasından dolayı kayıplar düşük değerdedir. Ancak, sıcaklık yükseldikçe, iletkenlik akımı da hızlı bir biçimde büyür. Böylece akımın meydana getirdiği ısının bir kısmı çevreye atılırken bir kısmı da yalıtkan içinde kalarak bu sıcaklığı meydana getiren akımı dolayısıyla yalıtkanın sıcaklığını yükseltir. Eğer yalıtkan içinde herhangi bir noktada üretilen ısı, dışarıya atılan ısıdan daha büyük olursa, kararsız durum oluşur ve yalıtkanda termik delinme gerçekleşir.

Enerjinin korunumu ilkesine göre, yalıtkanda üretilen ısı miktarıyla, dışarıya atılan ısı arasındaki fark yalıtkan içinde kalan ısı miktarını verir. Yalıtkan içinde birim hacimde ve birim zamanda üretilen ısı miktarı, p (W/cm^3) ise V (cm^3) hacminde üretilen ısı miktarı

$$\int_V p.dV \qquad \textbf{(5.1)}$$

olur. Yalıtkandan dışarıya atılan ısı miktarı ise; ısı akış vektörü $\vec{I}$, V hacmini sınırlayan S yüzeyinden çıkan ısı miktarı

$$\int_S \vec{I}.dS \qquad \textbf{(5.2)}$$

dir. $\vec{I}$ ısı akış vektörü sıcaklık cinsinden;

$$\vec{I} = -\lambda.\vec{grad}T \qquad \textbf{(5.3)}$$

denklemiyle verilir. Burada $\vec{I}$ (W/cm^2), $\vec{grad}T$ (ºC/cm) cinsinden verildiği zaman λ ısı iletim katsayısının birimi ($W\ cm/cm^2.\ ºC$) olur.

Enerjinin korunumu ilkesine göre üretilen ısı miktarıyla dışarıya atılan ısı miktarı arasındaki fark olan birim zamanda yalıtkan içinde kalarak ısınmasına sebep olan ısı;

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho.c.T.dV = \int_V p.dV - \int_S \vec{I}.d\vec{S} \qquad \textbf{(5.4)}$$

olur. Burada ρ yalıtkanın özgül kütlesi (g/cm^3), c ise özgül ısısını gösterir. Tablo 5.1'de bazı maddelerin z ısı değerleri verilmiştir.

Diverjans teoremine göre

$$\int_S \vec{I}.d\vec{S} = \int_V (div\,\vec{I}).dV \qquad \textbf{(5.5)}$$

Tablo 5.1: Bazı maddelerin öz ısı değerleri

Madde	**Öz ısı [cal/ g ºC]**
Kurşun	0,031
Civa	0,033
Gümüş	0,056
Bakır	0,09
Pirinç	0,094
Cam	0,109
Demir	0,113
Alüminyum	0,217
Buz	0,55
Su buharı	0,48 - 0,5
Etil alkol	0,6
Su	1

olduğundan

$$\rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} + div\,\vec{I} = p \qquad \textbf{(5.6)}$$

veya $\vec{I}$ yerine $-\,gr\vec{a}dT$ konursa,s

$$\rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} - \lambda.div(gr\vec{a}dT) = p \qquad \textbf{(5.7)}$$

denklemi elde edilir. Stasyoner durumda $\frac{\partial T}{\partial t}$ = 0 olduğundan, denklem;

$$\text{div}(\vec{\text{grad}}T) = \nabla^2 T = -\frac{p}{\lambda} \qquad \textbf{(5.8)}$$

şekline girer (Poisson denklemi). Bu denklem yalıtkan kalınlığı a, dış sıcaklığı T_d, ısı iletim katsayısı λ ve T sıcaklığındaki kayıp sayısı da °K olan tabaka şeklindeki bir katı yalıtkan için çözülünce,

$$\nabla^2 T = -\frac{p}{\lambda} \qquad \textbf{(5.9)}$$

denklemi

$$\frac{d^2 T}{dx} = -\frac{p}{\lambda} \qquad \textbf{(5.10)}$$

şeklini alır. Burada p yerine cE^2 ve °K yerine de $c = c_d.e^{\beta(T-T_d)}$ eşitliği konursa, denklem

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + c_d.e^{\beta(T-T_d)}.E^2 = 0 \qquad \textbf{(5.11)}$$

şeklini alır. Bu denklemin çözümü belirli bir T_d sıcaklığı için elektrotlara uygulanabilecek en büyük gerilimi verir. Yalıtkan içinde ısı bakımından kararlı ir durum ancak $T_i - T_d$ sıcaklık farkını, $\frac{1{,}19}{\beta}$ ya eşit yapan gerilimlere kadar mümkündür. Buradan,

$$T_i - T_d = \frac{1{,}19}{\beta} \qquad \textbf{(5.12)}$$

koşulunu sağlayan gerilim.

$$U_{kr} = E.a = 0{,}938\sqrt{\frac{\lambda}{c_d.\beta}} \qquad \textbf{(5.13)}$$

olur. Bunun anlamı, belirli bir dış sıcaklıkta katı yalıtkan için aşılmaması gereken belirli bir U_{kr} gerilimi vardır [22].

6 KABLOLARIN DÖŞENMESİ

Yeraltı kabloları özellikle yerleşimin yoğun olduğu kalabalık bölgelerde kullanılmak zorundadır. Ancak yeraltı kablolarının havai hatlara göre bazı dezavantajları vardır [25].

6.1 Yeraltı Kablolarının Dezavantajları

Genelde yeraltı kabloları ile havai hatlar arasındaki kıyaslama teknik ve ekonomik açıdan yapılır. İki açıdan da havai hatlar daha çok tercih edilirler. Yeraltı kabloları aşağıdaki sınırlandırmalara sahiptir.

6.1.1 Yüksek Fiyat

Yeraltı kabloları aynı düzeyde yüksek gerilim dağıtım havai hatlarına göre 8 -15 kat daha pahalıdır. Daha yüksek gerilim düzeylerinde bu fark daha da fazla olabilir.

6.1.2 Teknik Dezavantajlar

Alternatif akım yeraltı kabloları sürekli şarj akımları taşırlar. Bu akımlar, gerilimle ve uzunlukla doğru orantılıdır. Şarj akımları,

- Daha yüksek iletken kayıplarına ve ısınmaya,
- Daha yüksek reaktif güç akışına,
- Daha yüksek dielektrik kayıplarına sebep olurlar.

Belli bir uzunluğun üzerinde, bu şarj akımları öyle yüksek düzeylere ulaşırlar ki, yük akımı akmasa bile, en yüksek sıcaklık sınırı aşılabilir [32].

6.1.3 Sınırlı Güç Taşıma Kapasitesi

Güç kablolarının iletkenleri, yalıtkan, kılıf, siper, vb. ile sarılırlar. Dielektrik kayıplar, kılıf kayıpları ek ısınmaya sebep olurlar. Kablo ısıl olarak dengede olmalıdır. İletken ve yalıtkan sıcaklık limitleri, kablonun ne kadar akım taşıyabileceğini tayin eder.

Havai hatlarda ise böyle bir sınırlama yoktur. Havai hatların güç taşıma ise yetenekleri güç dengesi limitiyle sınırlanır.

6.1.4 Sürekli Hata Riski

Havai hattın çevresindeki yalıtkan ortam hava olduğu için, herhangi bir hata durumunda, sürekli bir sorun olmaz. Taze hava hattın etrafını sarar ve dielektrik dayanım etkilenmemiş olur.

Yeraltı kablosunda ise durum farklıdır. Yalıtkandaki çatlaklar, boşluklar, nem ve ısıl dengesizlik kalıcı, sürekli hatalara sebep olur.

Hasarlı bir kabloyu onarmak hem masraflı, hem de zaman alıcı bir iştir. Hata yerinin saptanması da zor bir iştir [32].

6.2 Kullanım Amacına ve Yerine Göre Kablolar

Kablolar işletme koşullarına, kullanma amacına ve yerine göre üç sınıfa ayrılır.

6.2.1 F – Kablolar

F – kablolar normal ve hafif işletme koşullarına dayanıklı, devinen ve taşınan elektrik aygıtlarında kullanılan, serbest olarak salınan bükülgen kablolar veya kordonlardır

6.2.2 N – Kablolar

N – kablolar normal ve hafif işletme koşullarına dayanıklı, boru içinde sıva altına veya borusuz olarak duvara sabit döşenen iç döşem kablolarıdır

6.2.3 Y – Kablolar

Y – kablolar yeraltı, maden ocağı gibi mekanik ve kimyasal etkilerin fazlaca bulunduğu yerlerde kullanılan, ağır işletme koşullarına dayanıklı, yeraltına, beton

kanala veya duvara sabit döşenen güç kablolarıdır. Bu kablolara yeraltı kablosu da denir.

VDE 0250 de kablolar, F ve N – kablolar bir sınıfta toplanarak iç döşem kabloları (F ve N – kablolar) ve güç kabloları (Y – kablolar) olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır.

İç döşem kabloların ve güç kablolarının döşenmesi birbirinden farklılıklar gösterir. Bu çalışma yeraltı kabloları üzerine olduğu için Y – kablolarının döşenmesinden bahsedilecektir [30].

6.2.3.1 Y – Kablolarının Döşenmesi

Güç kablolarının yeraltına döşenmesine başlamadan önce, araziye ilişkin tüm ayrıntıları içeren güzergah tasarımı ve kablo listeleri elde bulunmalıdır. Kablonun döşenmesi sırasında, döşenen kabloların markası, türü, gerilimi, kesiti, makara numaraları, makaralardaki kablo uzunlukları, döşenen kablo sayısı ve uzunlukları ile eklerin yerleri tasarımın üzerine işlenir. Bu kayıtlar ileride döşemin genişletilmesine ilişkin tasarımların hazırlanması ve çaparız yerlerinin saptanması için çok gereklidir [29].

Toprak Kablo Kanalları

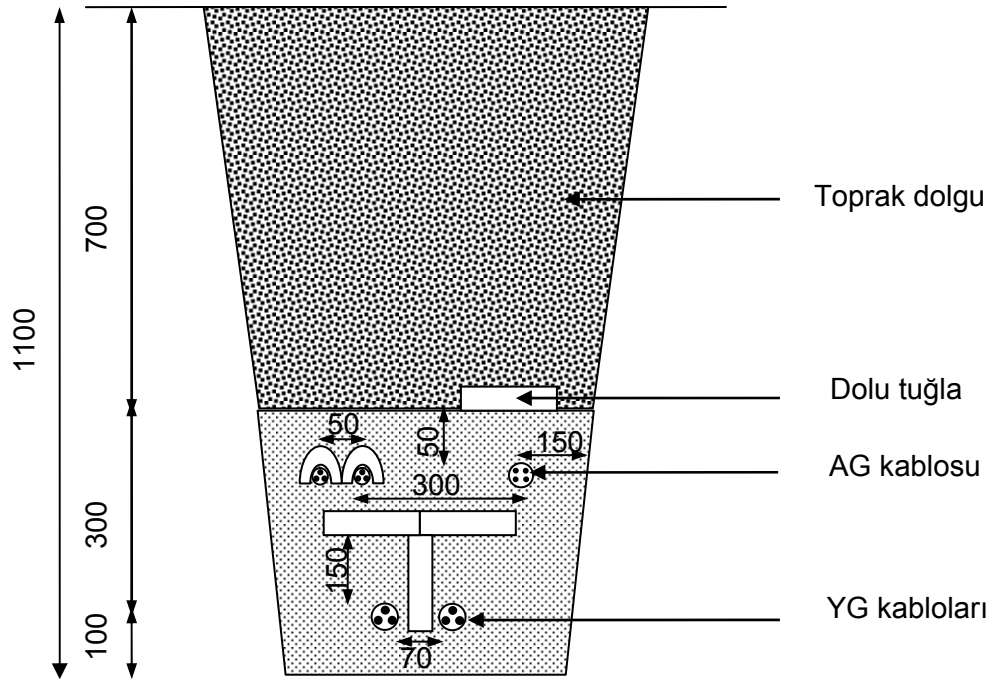
Toprak kablo kanalları, hem ucuz hem de kablonun yüklenme akımı bakımından elverişli olduğundan, kabloların güvenilirliği sağlanabiliyor ve hasarlanmaları veya değiştirilmeleri durumunda kanalın açılması sorun yaratmıyorsa, her zaman tercih edilmelidir.

Kabloların yeraltına döşenecekleri yerler kimyasal, mekanik ve ısıl etkilerden olabildiğince uzak olmalıdır. Kabloda ileride oluşacak sorunlarla ilgili kolay çalışma ortamının uygun olabilmesi için yapılardan en az 70 cm uzakta ve su, gaz ve kanalizasyon boruları ile iletişim kablolarının bulunmadığı güvenli yerlerden geçirilmeye çalışılmalıdır [30].

Döşenme derinliği olarak toprak yüzeyi ile kablonun alt hizası arasındaki yükseklik alınır. Kablonun döşendiği derinlik genelde 0,7 m olarak alınır. Bu derinlik değeri bir kablonun ekseninden veya grup olarak gömülmüş ise kabloların orta noktasından zemine olan uzaklıktır. Kablonun gömüldüğü derinlik arttıkça, sıcaklık ve toprağın ısıl özdirenci sabit kalmak üzere kablonun yük kapasitesi azalır. Bunun yanında, derinlik arttıkça ortam sıcaklığı düşer ve normal olarak toprağın daha derin bölgeleri

daha kararlı ve nemli olduğundan toprağın ısıl özdirenç değeri de azalır. Alçak gerilim ve orta gerilim kabloları için gömülme derinliği 0,7 – 1,2 m arasında değişir. Bu sınırlar arasında, yukarıdaki sebeplerden yük kapasitesindeki düşüş ihmal edilir [24]. Kablolar genelde, bir kum tabakasının veya elenmiş toprak tabakasını içine gömülür ve üzerleri tuğla, künk, beton plaka veya plastik levha ile örtülür. Bu yatak ve örtü malzemeler yük kapasitesini etkilemezler. Döşenme sırasında önemli noktalardan biri kumun sıkıştırılmasıdır. Eğer kum sıkıştırılmasa aralarda hava boşlukları kalır ve bu hava ısıl direncin artmasına neden olur [30].

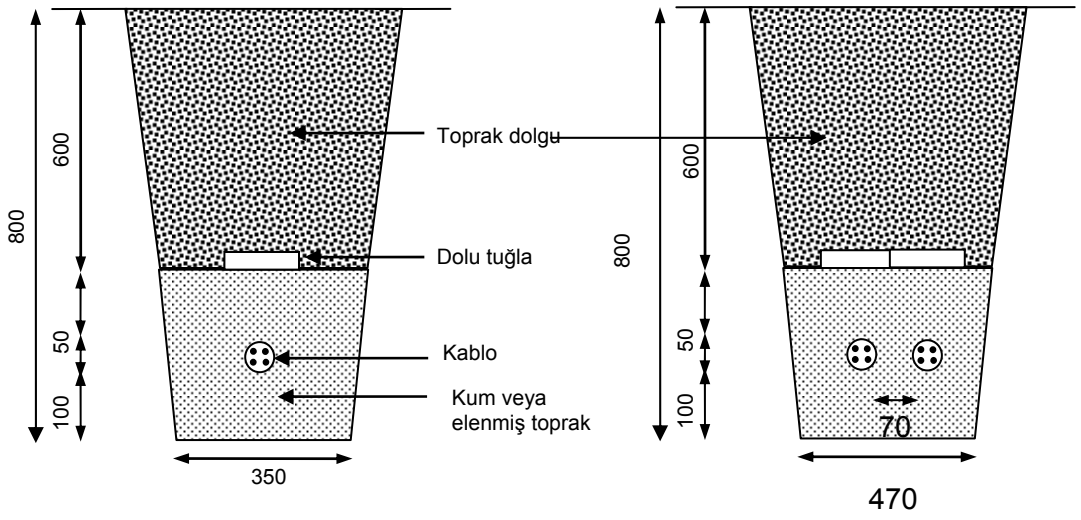
Birden fazla kablo döşenmesi durumunda ise, YG kablolarının patladıklarında birbirlerine ve yakınındaki diğer kablolara zarar vermemeleri için aralarına dolu tuğla konulmalı veya kablolar yarım künk içine alınmalıdır. Şekil 6.1'de AG, YG, kumanda ve iletişim kablolarının birlikte bulunduğu toprak kanalda en küçük yatay ve düşey uzaklıklar gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Toprak kanalda en küçük yatay ve düşey uzaklıklar

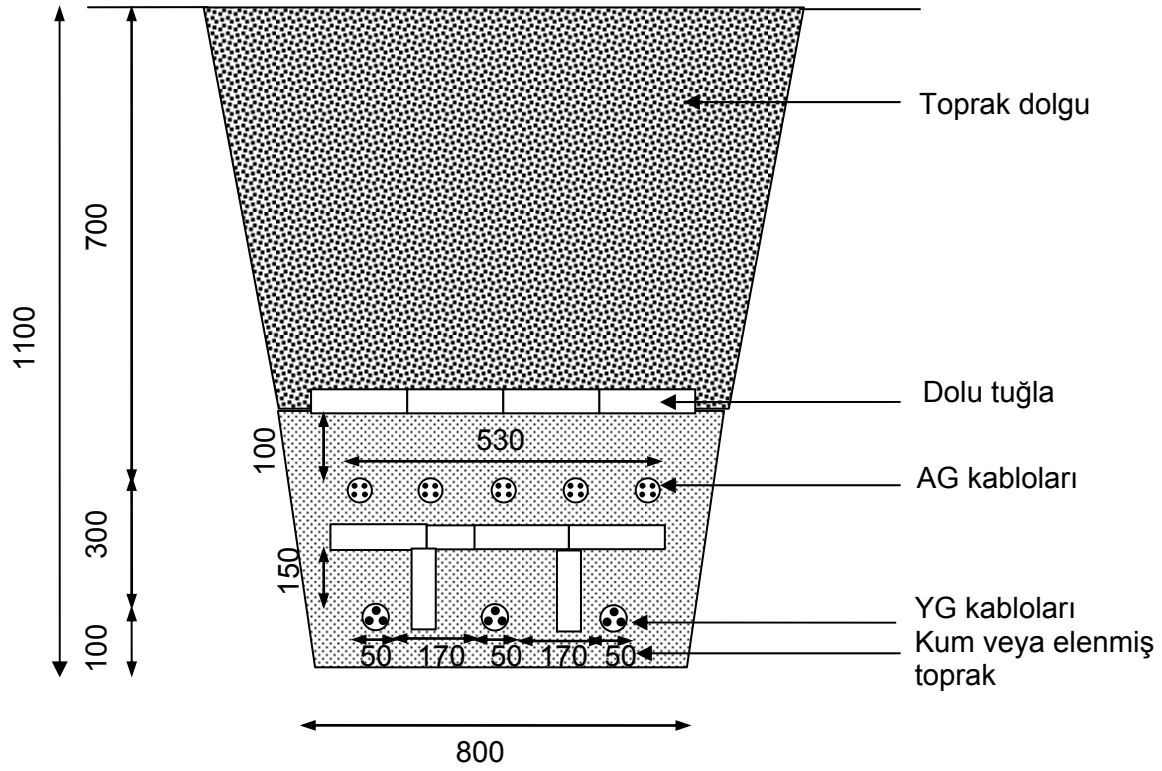
Yukarıdaki şekildeki gibi kumanda ve iletişim kablolarının AG ve YG kablolarıyla birlikte aynı kanala döşenmesi uygulamasında YG kablolar alta, AG kabloları ile kumanda ve iletişim kabloları üste yan yana döşenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yüksek gerilim kablolarının kendi aralarına ve diğer kablolarla aralarına tuğlalar

yerleştirilir. Teknik şartnamelerde ve standartlarda gerilim basamaklarına göre toprak kanal derinlikleri verilmiştir, fakat asıl önemli olan kabloların güvenliği olduğu için derinlik gerime bağlı değildir. Teknik şartnamelerde örneğin 10 – 35 kV kablolar için derinlik 80 -100 cm olarak verilmekle beraber, gerilim dikkate alınmadan toprak derinliği açık arazilerde 80 cm, yollarda 100 cm olarak alınmalıdır. Şekil 6.2'deki örnekteki gibi AG ve YG kablolarının birlikte döşendiği toprak kanallarda derinlik 110 cm'dir. Birden çok kablonun yerleştirilmesi durumunda kabloların birbirlerini etkilememesi için hepsinin belli gömülme derinliği aralıkları ve düzenleri vardır. Birden çok kablonun olduğu durumda yerleşim düzeni Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Bir ve iki AG kablosu döşenen toprak kanalın ölçüleri

Tablo 6.1'de ise kabloların toprak kanala yerleşiminde dikkat edilmesi ve uyulması gereken uzaklıklar sıralanmıştır [24, 30].



Şekil 6.3: AG ve YG kablolarının birlikte döşendiği toprak kanalın ölçüleri

Tablo 6.1: Toprak kablo kanallarının ölçüleri ve kablolar arasındaki en küçük uzaklıklar

Toprak kanalda:		
Dip genişliği	En az 35 cm	Toprak kanalın verilen genişlikleri bir kablo içindir. Birden çok kablo döşenirse genişlikler 12 şer cm arttırılır.
En üstteki AG veya YG kablosunu derinliği - Açık arazilerde, yaya kaldırımlarında, patikalarda - Yollarda	En az 70 cm En az 90 cm	Kablonun üzeri beton plaka ile örtülürse, kanalın derinliği 20 cm azaltılabilir.
Yanlardaki AG veya YG kablolarının kanalın kenarına uzaklığı	En az 15 cm	

Kablolar arasında:		
AG veya YG kabloları arasındaki yatay temiz açıklık	En az 7 cm	
AG veya YG kabloları arasındaki düşey uzaklık	En az 30 cm	
AG kablosu ile iletişim veya kumanda kablosu arasındaki yatay temiz açıklık	En az 30 cm	
İletişim kablosu ile kumanda kablosu arasındaki yatay açıklık		İletişim ve kumanda kablolarının arasında açıklık bulunması gerekmez
Üç fazlı dizge oluşturan bir damarlı AG ve YG kablolarında, - Yan yana döşenirse aralarındaki yatay temiz açıklık - Üçgen bohçalanırsa kümeler arasındaki yatay temiz açıklık	En az 7 cm En az 7 cm veya En az 25 cm	
Kesişen kablolar arasında:		
AG kablosuyla iletişim kablosu arasındaki düşey temiz uzaklık	En az 50 cm	Açıklık ≤ 50 cm ise araya yangın geçirmez levha konur.
Kablo geçişlerinde:		
AG ve YG kablosuyla yapılar ve döşemler arasındaki yatay uzaklık	En az 70 cm	
AG ve YG kablosuyla ısı, gaz ve petrol borusu arasındaki düşey uzaklı°K. - Ana boru - Ayırım borusu	En az 50 cm En az 25 cm	Kablolar gaz ve su borularının altından geçirilir.
AG ve YG kablosuyla ağır araç yolunun yüzeyi arasındaki düşey uzaklık	En az 125 cm	
AG ve YG kablosuyla demiryolu traversinin üstü arasındaki düşey uzaklık	En az 150 cm	

Kablo örtülerinde, çelik borularda ve büzlerde:		
Kabloyla dolu tuğla arasındaki temiz düşey uzaklık, - AG kablolarında - YG kablolarında	 En az 10 cm En az 15 cm	Bu ölçüler yan kenarı olmayan örtüler için de geçerlidir.
Dolu tuğlanın kenarlarının AG ve YG kablosunun kenarından yatay taşması	En az 6,5 - 7 cm	
AG ve YG kablonun içinden geçtiği - Çelik borunun iç çapı - Büzün iç çapı	 En az 1,5d En az 2d	d = Kablonun dış çapı Kabloyla çelik borunun veya büzün iç yüzeyi arasında en az 40 mm boşluk kalmalıdır. Yoksa boru veya büz çapı arttırılmalıdır.

Şekil 6.3'deki toprak kanalın ölçülendirilmesinde, geniş yer kaplayan AG kablolarının bulunduğu düzeydeki kanal genişliği esas alınmıştır.

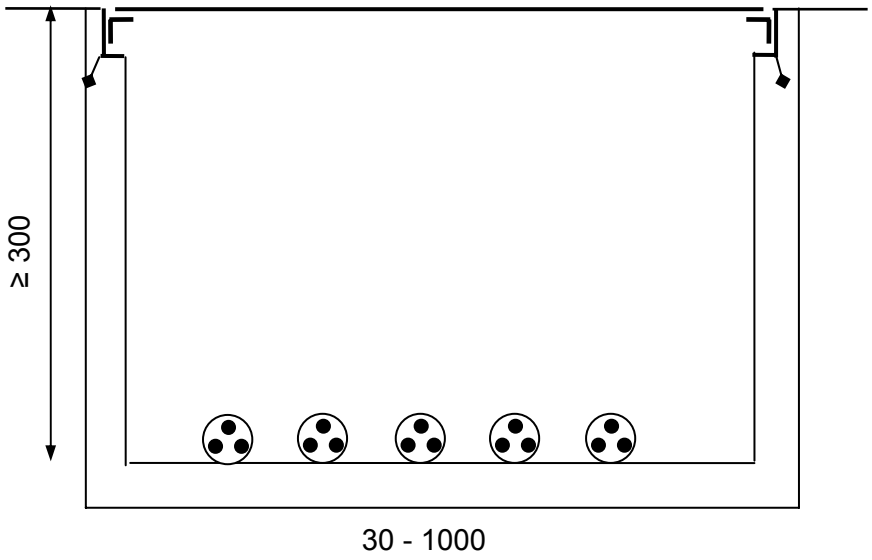
Yukarıdaki durumda AG kablolarının kapladığı genişlik:

En dıştaki kabloların kanalın kenarına olan uzaklığı (2*150) + 5 adet kablo çapının toplam uzunluğu (5*50) + kablolar arasındaki temiz açıklık (4*70) = 830 mm'dir. Kanal kenarlarının eğimi % 5 alınırsa kanalın dip genişliği 790 mm bulunur. Bu genişlikte YG kabloları arasındaki temiz açıklık arttırılarak 170 mm alınır. Buna göre, YG kablolarının kapladığı genişlik 3 * 50 + 2 * 170 = 490 mm ve kenarlardaki kabloların kanalın kenarına uzaklıkları toplamı 300 mm olmak üzere kanal genişliği yaklaşık olarak 800 mm olarak alınabilir [24].

Beton Kanal

Kablolar yapıların içinde ve korunan dış alanlarda üstü kapaklı beton kanallar içine borusuz olarak döşenebilirler. Kablolar Şekil 6.4'de gösterildiği gibi beton kanalın tabanına aralarında d açıklığı bulunmak üzere veya birbirlerine temas edecek şekilde yan yana serilir. Bunun dışında Şekil 6.5'de olduğu gibi kanalın yan duvarlarına kelepçeler veya konsollar üzerinde döşenebilirler.

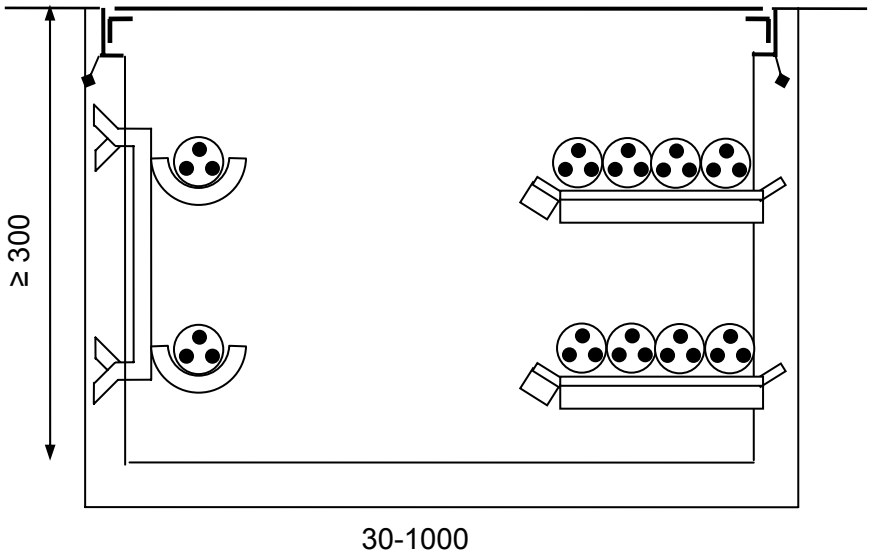
Beton kanalların derinliği en az 30 cm olur. Kanal genişliği ise kablo sayısına ve kabloların döşenme şekline bağlı olmak üzere 30 – 100 cm arasında değişebilir.



Şekil 6.4: Kabloların beton kanalın zeminine döşenmesi

Kanalın kenarlarına 40*40*4 mm köşebent geçirilir ve üzeri en az 5 m kalınlığında baklavalı saç ile kapatılır. Kabloların döşenmesinde konsollar veya kablo rafları kullanılırsa bunların üst üste döşenmeleri durumunda aralarındaki düşey açıklık en az 20 cm olmalı veya kabloların kolaylıkla aktarabilmesi için karşılıklı yan duvarlara döşenen konsollar ve raflar arasında 20 – 25 cm yatay açıklık bulunmalı 50 cm den geniş konsollar veya raflar kullanılmamalıdır. Kablolar kroşeler üzerine döşenirse, kroşeler arasındaki açıklık yaklaşık 40 cm (30 – 60 cm) olmalıdır. Kablolar dikey olarak döşenirse, açıklık en fazla 3 m olmalıdır. Beton kanalların üzeri, baklavalı saç yerine en az 8 cm kalınlığında demirli beton kapaklarla da kapatılabilir [24, 29].

Beton kanalın içinde su havuzlanmaması için kanala eğim verilerek birkaç noktadan pis su kanalına bağlanması sağlanır.

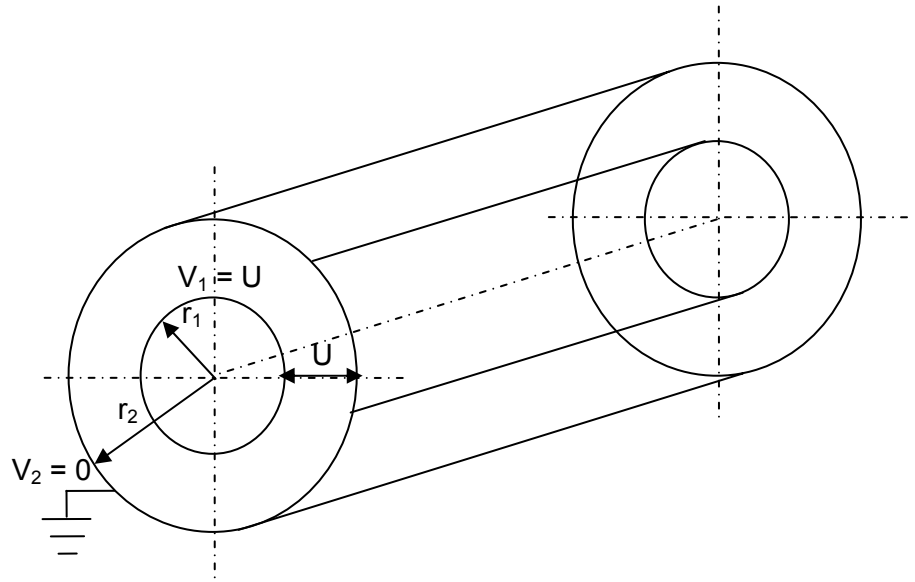


Şekil 6.5: Kabloların beton kanalın yan duvarlarına kelepçeler ve konsollar üzerinde döşenmesi

7 ELEKTROSTATİK

7.1 Silindirsel Elektrot Sistemi

Silindirsel elektrot sistemi, aralarında yalıtkan (dielektrik) bulunan, silindir biçiminde eş eksenli veya kaçık eksenli, iç içe veya karşılıklı, paralel veya çapraz elektrotların oluşturduğu sistemdir. Kablolar, hava hatları ve geçit izolatörleri yaygın kullanılan silindirsel elektrot sistemleridir. Silindirsel elektrot sistemleri birçok uygulaması ve örneği olması sebebiyle elektrik alanı, elektriksel akı yoğunluğu, potansiyeli, kapasitesi ile bilinmesi gereken bir temel elektrot sistemidir [19].



Şekil 7.1: Eş eksenli silindirsel elektrot sistemi

Şekil 7.1'de yarıçapları r_1 ve r_2, uzunluğu l ve elektrotlar arasına uygulanan gerilimi U olan bir eş eksenli silindirsel elektrot sistemi gösterilmiştir. Normalde üç boyutlu olarak değişen V potansiyeli, eksenel simetri nedeniyle yalnızca r' ye bağlı olarak yani bir boyutlu incelenebilir. Buna göre silindirsel koordinat sisteminde r' ye bağlı bir boyutlu Laplace denklemi,

$$\frac{d^2V}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dV}{dr}=0 \qquad \textbf{(7.1)}$$

olur. Laplace denkleminin genel çözümü,

$$V=A+B.\ln r \qquad \textbf{(7.2)}$$

dir. Bu denklemdeki A ve B sabitleri, Şekil 7.1'de gösterildiği gibi r = r_1 değeri için $V=V_1=U$ ve r = r_2 için $V=V_2=0$ sınır koşullarından

$$A=\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln r_2 \qquad \textbf{(7.3)}$$

$$B=-\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \qquad \textbf{(7.4)}$$

olarak bulunur. Bulunan A ve B ifadeleri **(7.2)** denkleminde yerine konursa, potansiyel bağıntısı

$$V=\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln\frac{r_2}{r}=\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}(\ln r_2-\ln r) \qquad \textbf{(7.5)}$$

olarak elde edilmiş olur. Eş eksenli silinirsel elektrot sisteminde elektrik alan şiddeti bağıntısı, potansiyelin türevinden bulunur [19].

Elektrik alan şiddeti;

$$E=-\frac{dV}{dr}=\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\frac{1}{r} \qquad \textbf{(7.6)}$$

r (yarıçap) değişkeni $r_1 \le r \le r_2$ aralığında değiştiğinden alan bağıntısından maksimum ve minimum alan elektrik alan bağıntıları

$$r = r_1 \text{ için } E = E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \textbf{(7.7)}$$

$$r = r_2 \text{ için } E = E_{min} = \frac{U}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \textbf{(7.8)}$$

bulunur. Elektrik alanın ortalama değeri ise;

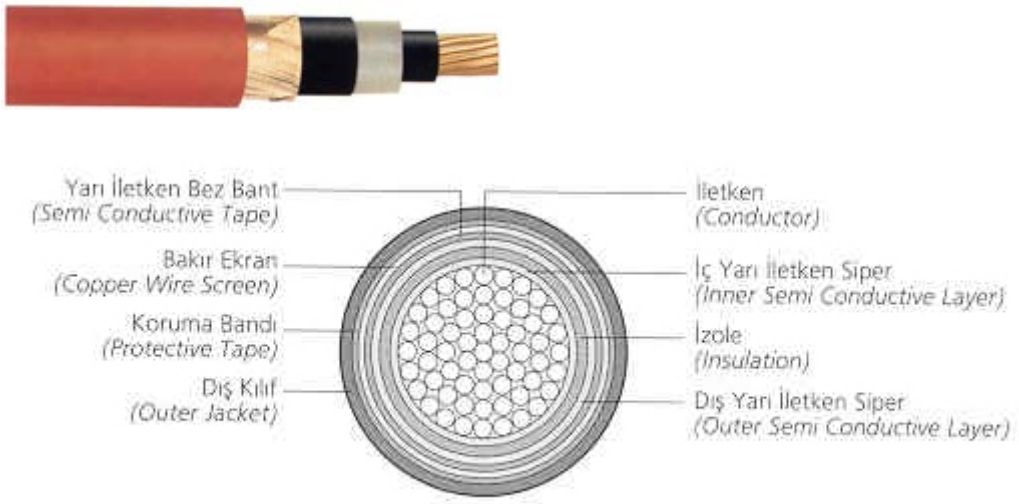
$$E_{ort} = \frac{U}{r_2 - r_1} = \frac{U}{r_{ort} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \textbf{(7.9)}$$

dir. Elektrik alanın, ortalama elektrik alana eşit olduğu r_{ort} yarıçapı,

$$r_{ort} = \frac{r_2 - r_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \textbf{(7.10)}$$

8 UYGULAMA

8.1 Elektrostatik Analiz

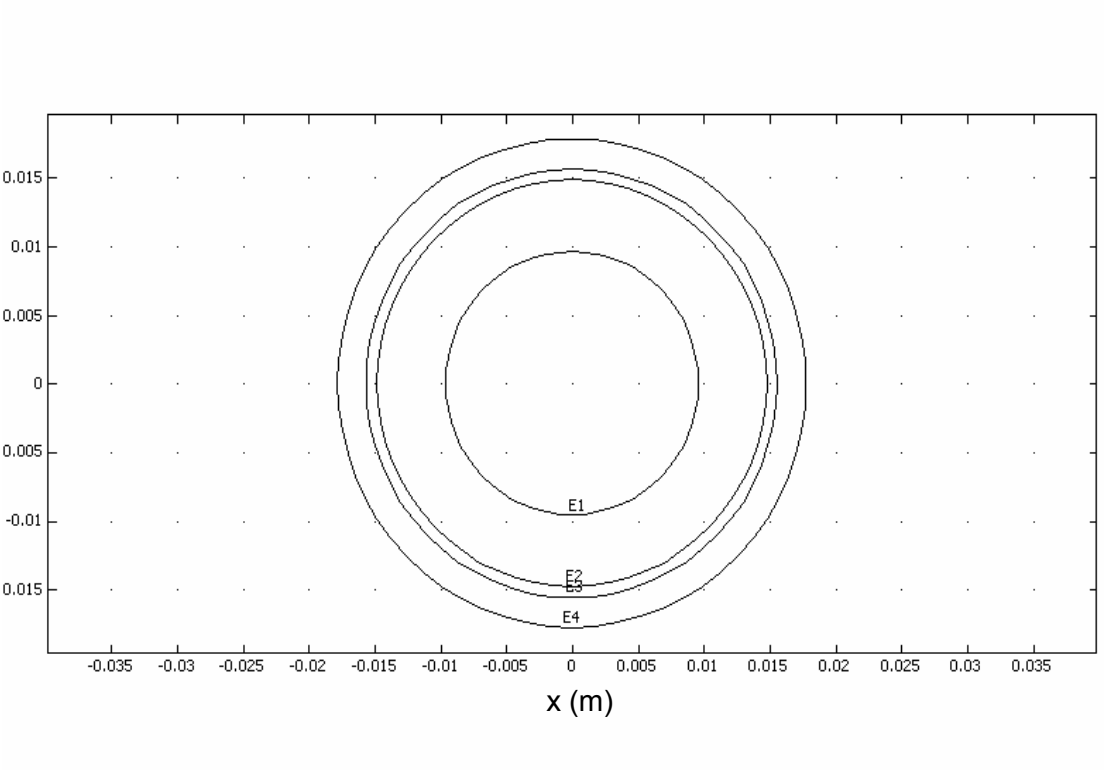


Şekil 8.1: 8,7 / 15 kV PVC yalıtkanlı bir damarlı OG güç kablosu

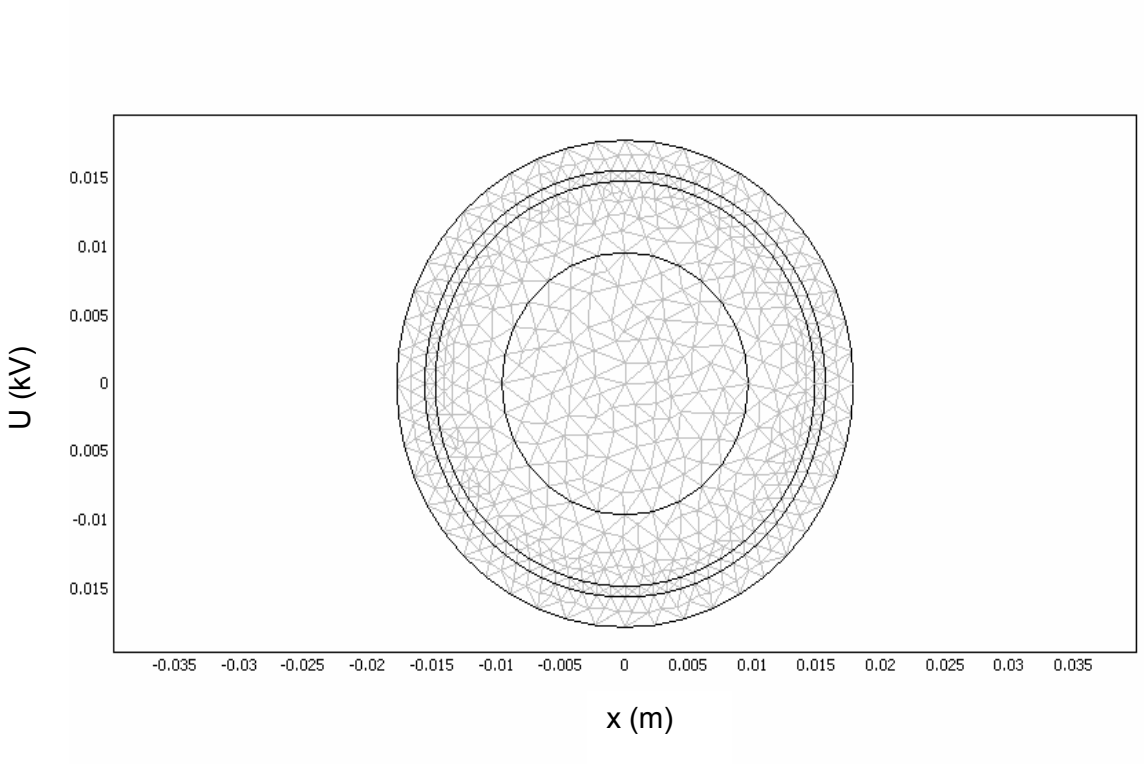
Elektrostatik analizi yapılacak kablo Şekil 8.1'de gösterilen 8,7 / 15 kV anma gerilim değerine sahip PVC yalıtkanlı bir damarlı OG güç kablosudur. Bu kablolar iç ve dış döşemelerde, büküm yarıçapı küçük olduğundan özellikle transformatör ve bağlama merkezlerinde, yeraltında, hafif olduğu için dik eğimli yerlerdeki döşemelerde kullanılır. Bu kabloda hem yalıtkan kılıf hem de dış kılıf malzemesi olarak PVC kullanılmıştır [33].

Tablo 8.1: Analizi yapılan kablo örneği için teknik veriler ve boyutlar

Damar sayısı x Anma kesiti/siper kesiti [mm^2]	1x 240ş/25
İletken çapı (En büyük) [mm]	19,2
Kablo çapı (Ortalama) [mm]	37,5
Yalıtkan kılıf et kalınlığı [mm]	5,2
Dış kılıf et kalınlığı [mm]	2,2
İletkenin izin verilen sıcaklığı [° C]	70
Ağırlık (Yaklaşık) [kg/°Km]	3460



Şekil 8.2: Elektriksel ve ısıl analizi yapılacak kablonun görüntüsü



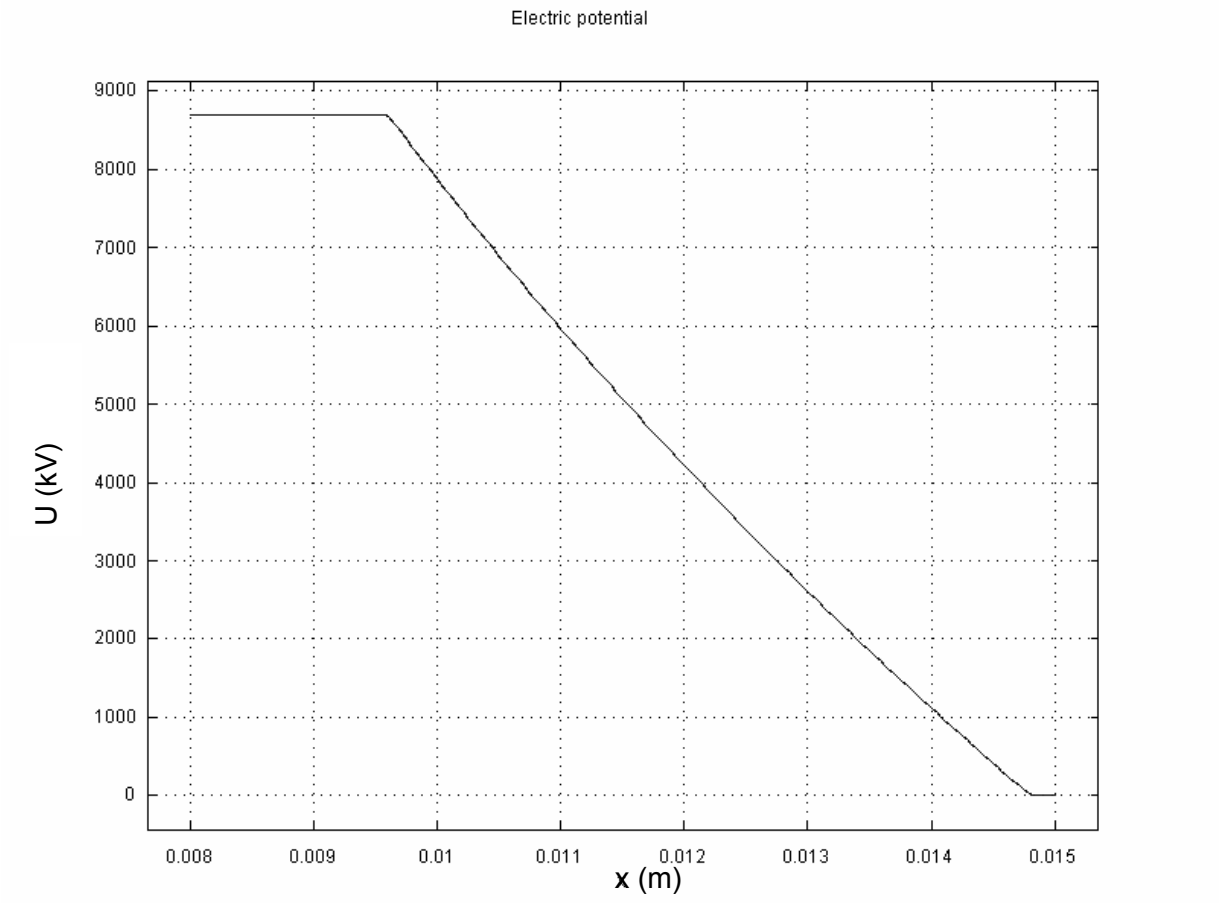
Şekil 8.3: Üçgen elemanlardan oluşan sonlu elemanlar ağı

Analizi yapılacak kablonun boyutlarının verildiği Tablo 8.1'den görüldüğü gibi bakır iletken yarıçapı 19,2 / 2 = 9,6 mm, bakır siperin kalınlığı ise 0,8 mm olarak alınmıştır. Buna göre r_1 = 9,6 mm, r_2 = 14,8 mm olmak üzere yalıtkan kalınlığı 5,2 mm'dir.

Yalıtkan ve dış kılıf malzemesi olarak kullanılan PVC için bağıl dielektrik sabiti (ε_r) 3,4 -10 değerleri arasında değişmektedir. Genelde kullanılan PVC için bağıl dielektrik sabiti değeri 6 olduğu için bu örnekte de ε_r değeri 6 olarak kullanılmıştır.

Şekil 8.2' de bu çalışmada ısıl ve elektriksel analizi yapılacak olan kablo kısımları görülmektedir. Elektriksel ve ısıl analizleri yapılacak bu kablo için üçgen elemanlardan oluşan sonlu elemanlar ağı ise Şekil 8.3' de görülmektedir. Yapılan bütün örneklerde önce sonlu elemanlar ağı oluşturulup, daha sonra istenen büyüklükler elde edilmektedir.

Şekil 8.4'de 8,7/10 kV anma gerilimine sahip kablodaki potansiyel dağılımı görülmektedir. Görüldüğü gibi r_1 = 9,6 mm için potansiyel değeri 8700 V, r_2 = 14,8 mm içinse potansiyel değeri 0 V'dur.



Şekil 8.4: 8,7 / 15 kV anma gerilimine sahip kablo yalıtkanındaki potansiyel dağılımı

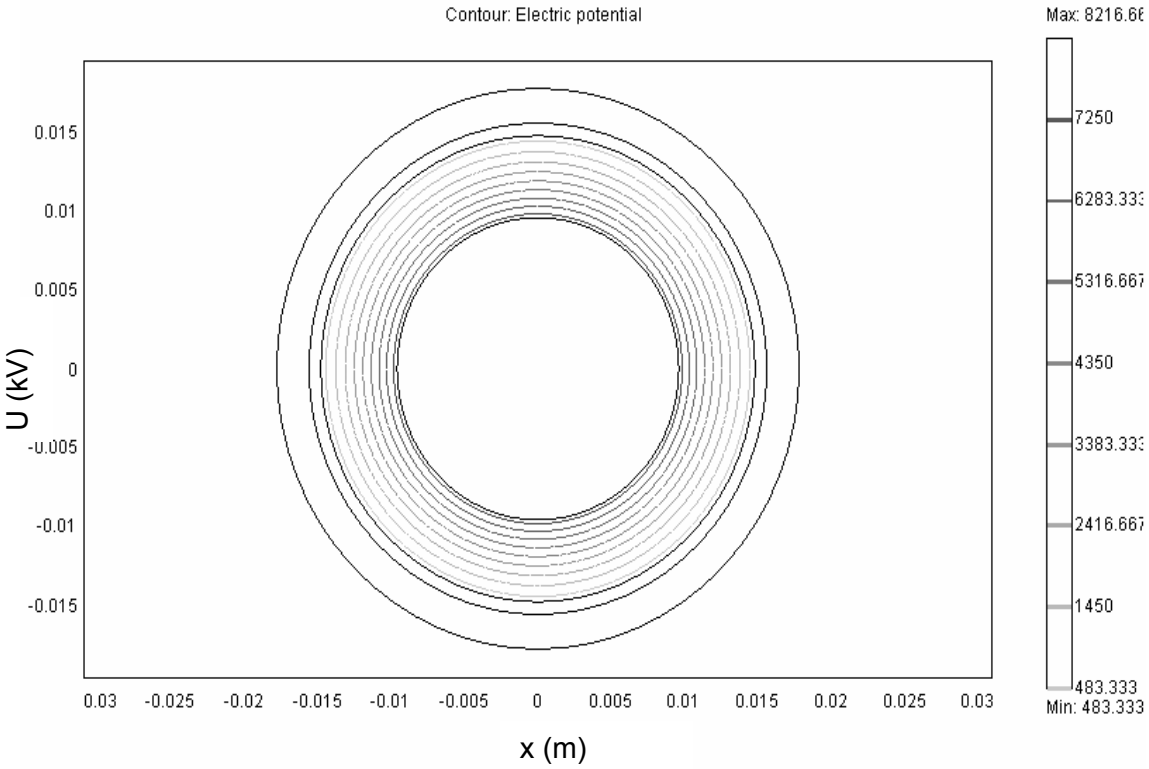
Şekil 8.5'de ise yukarıda potansiyel dağılımı verilen kablonun eş potansiyel eğrileri gösterilmiştir.

Yalıtkan içindeki $9{,}6 \le r \le 14{,}8$ mm sınırları içinde programla bulunan potansiyel değerleri analitik çözümdeki değerlerle karşılaştırılırsa;

SAYISAL (FEMLAB) ANALİTİK

r = 10 mm için 7879,125209 V $\quad \dfrac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln\dfrac{r_2}{r} = \dfrac{8700}{\ln\frac{14{,}8}{9{,}6}}\ln\dfrac{14{,}8}{10} = 7879{,}5312\ \text{V}$

r = 11 mm için 5965,33639 V $\quad \dfrac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln\dfrac{r_2}{r} = \dfrac{8700}{\ln\frac{14{,}8}{9{,}6}}\ln\dfrac{14{,}8}{11} = 5963{,}9217\ \text{V}$



Şekil 8.5: 8,7/ 15 kV anma gerilimine sahip kablodaki eş potansiyel çizgiler

r = 12 mm için 4215,651 V $\quad \dfrac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln\dfrac{r_2}{r} = \dfrac{8700}{\ln\frac{14{,}8}{9{,}6}}\ln\dfrac{14{,}8}{12} = 4215{,}1073\ \text{V}$

r =13mm için 2606,4028 V

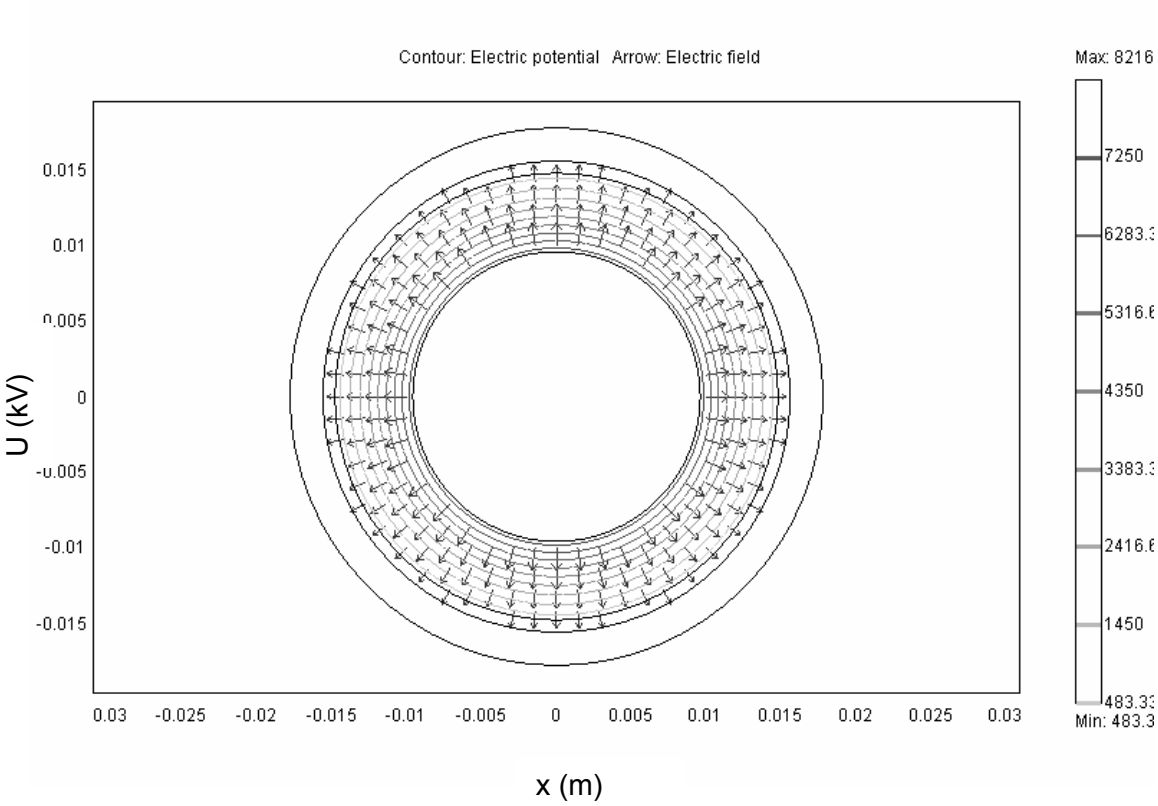
$$\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln\frac{r_2}{r}=\frac{8700}{\ln\frac{14,8}{9,6}}\ln\frac{14,8}{13}=2606,3539\,V$$

r = 14 mm için 1116,632 V

$$\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln\frac{r_2}{r}=\frac{8700}{\ln\frac{14,8}{9,6}}\ln\frac{14,8}{14}=1116,8810\,V$$

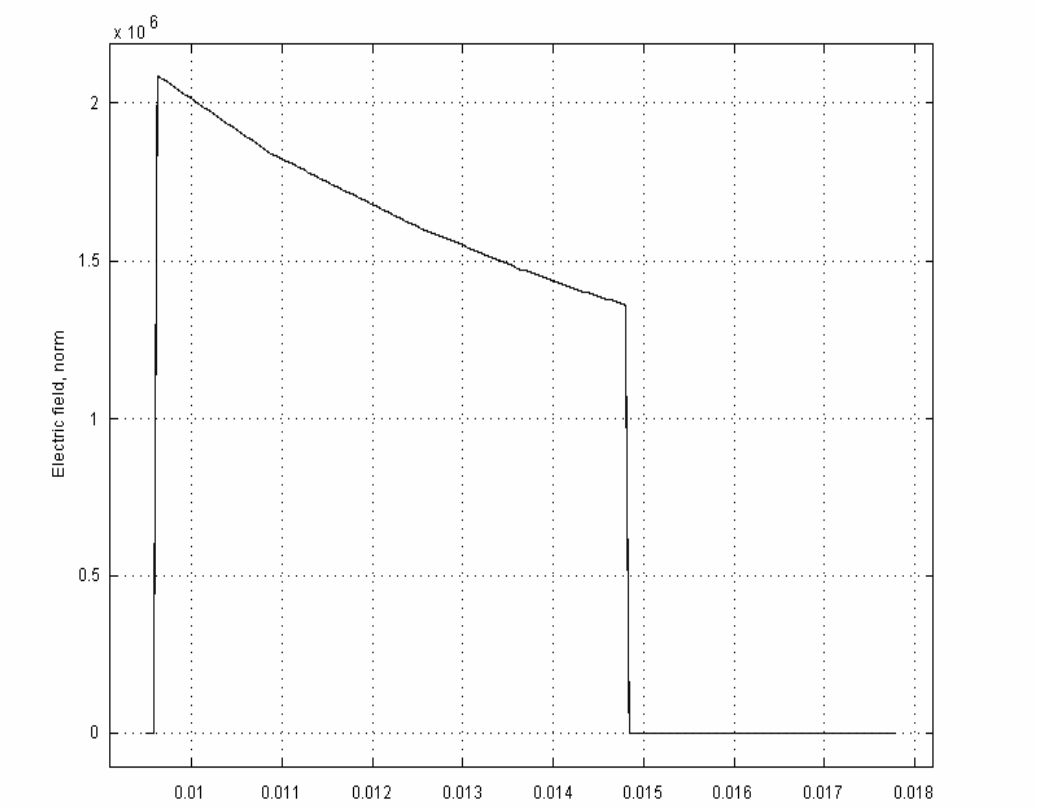
r = 14,5 mm için 411,707 V

$$\frac{U}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln\frac{r_2}{r}=\frac{8700}{\ln\frac{14,8}{9,6}}\ln\frac{14,8}{14,5}=411,5915\,V$$



Şekil 8.6: 8,7/ 15 kV anma gerilimine sahip kablodaki eş potansiyel eğriler ve onlara dik elektrik alan çizgileri

Şekil 8.6, kablonun Şekil 8.3'deki eş potansiyel çizgilerine dik elektrik alan çizgilerinin eklenmiş halidir.

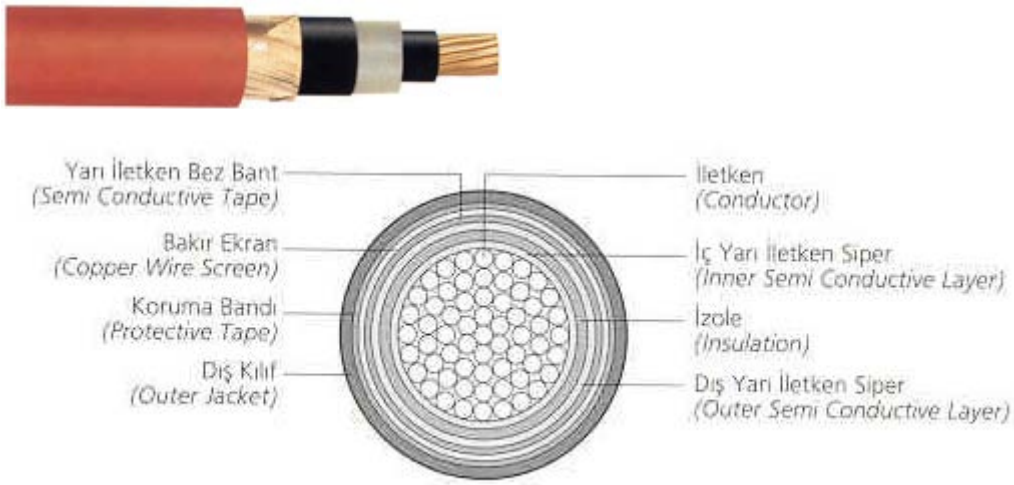


Şekil 8.7: 8,7/ 15 kV anma gerilimine sahip kablo yalıtkanındaki elektrik alan dağılımı

Şekil 8.7'den açıkça görüldüğü gibi elektrik alanın en yüksek olduğu yer r_1 = 9,6 mm, en düşük olduğu yer ise r_2 = 14,8 mm yarıçapıdır.

8.2 Isıl Analiz

Bir damarlı XLPE OG Güç Kablosu



Şekil 8.8: 20,3 / 35 kV anma gerilimli bir damarlı XLPE yalıtkanlı OG Güç kablosu

Isıl analizi yapılacak kablo Şekil 8.8'deki 20,3 / 35 kV anma gerilim değerine sahip XLPE yalıtkanlı bir damarlı OG güç kablosudur. Dielektrik kayıpları düşük olan bu kablolar, ani yük değişimlerinin olduğu şebekeler ile kısa devre akımlarının büyük olduğu yerleşim ve endüstri bölgelerinde, kablo kanallarında, toprak altında ve hariçte kullanılırlar.

Kabloda XLPE yalıtkan kılıf ile PVC dış kılıf kullanılmıştır..

Tablo 8.2: Analizi yapılan kablo örneği için teknik veriler ve boyutlar

Damar sayısı x Anma kesiti/siper kesiti [mm^2]	1x 35ş/16
İletken çapı (En büyük) [mm]	7,5
Kablo çapı (Ortalama) [mm]	35
Yalıtkan kılıf et kalınlığı [mm]	9
Dış kılıf et kalınlığı [mm]	2
İletkenin izin verilen sıcaklığı [°C]	90
Ağırlık (Yaklaşık) [kg/°K m]	1350

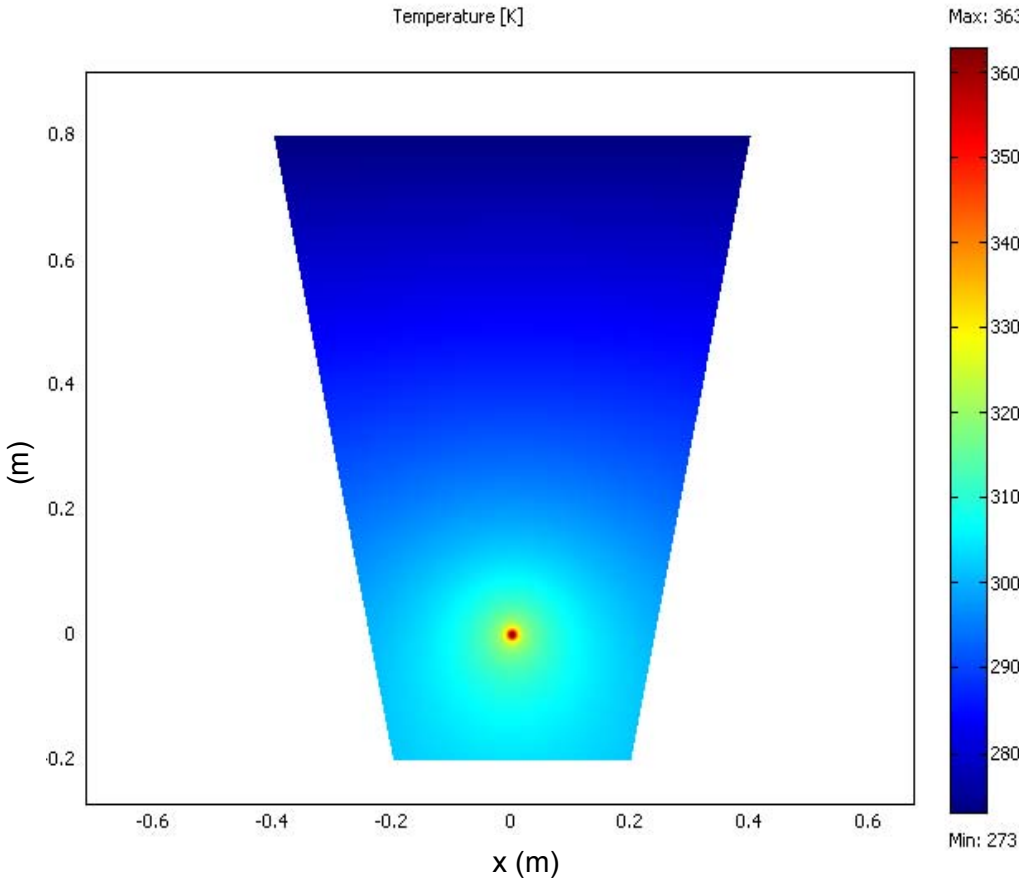
Tablo 8.2'den görüldüğü gibi bakır iletken yarıçapı $\frac{7,5}{2} = 3,75$ mm , XLPE yalıtkanın et kalınlığı 9 mm'dir. Buna göre r_1 = 3,75 mm, r_2 = 12,75 mm'dir. Tablolardaki değerlere göre XLPE'ye ait ısıl öz iletkenlik değeri $1/3,5 = 02857$ W/°K. m, PVC'ye ait ısıl öz iletkenlik değeri ise $1/5 = 0,2$ W/°K.m olarak kullanılmıştır. Bunun dışında, metal kısımların öz iletkenlik değeri (400 W/°K.m) çok büyük olduğu için bu kısımlardan dışarıya ısının iletilmesine karşı direnci ihmal edilebilir. Isıl analizde en önemli konulardan biri de toprağın özelliklerinin belirlenmesidir. Toprak ısıl direnci, topraktaki nem oranına, iklime ve toprağın bileşenlerine bağlı olduğu için değişik değerler alınabilir. Ancak genel olarak toprağın ısıl öz iletkenlik değeri 1 W/°K.m, nemini kaybetmiş toprak için ise bu değer 0,4 W/°K.m olarak alınabilir.

Çalışmanın bu bölümünde, kablo iletkeniyle toprak arasındaki sıcaklık farkından doğan ısı akışı incelenmektedir.

XLPE'nin ısıl özdirenç (K_G) değeri 3,5, PVC'nin ısıl özdirenç değeri 5 °K.m / W alınmıştır. İletken için izin verilen en yüksek sıcaklık değeri 90 °C yani 363 °K'dir. Bu sıcaklık değeriyle toprak yüzey sıcaklığı 293 °K arasındaki farktan dolayı oluşan ısı akışı ve kablo ve toprakta oluşan sıcaklık dağılımları bulunacaktır.

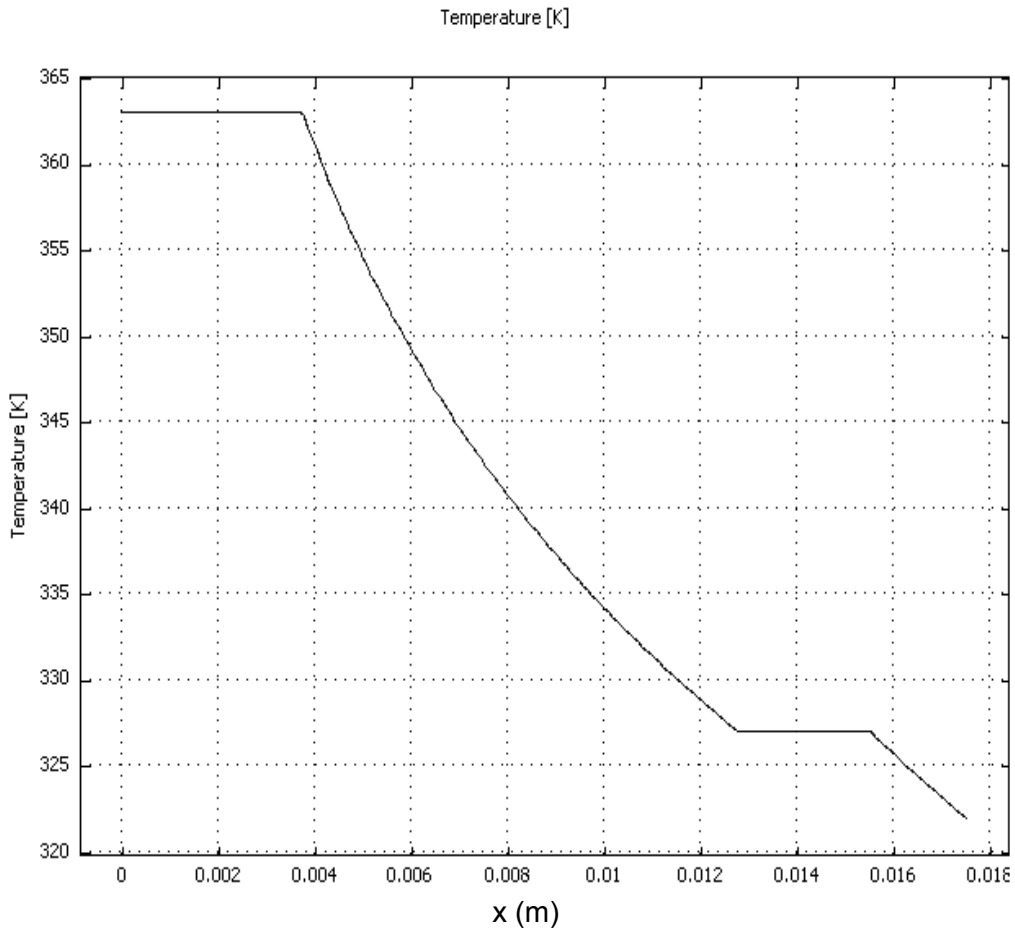
8.2.1 Bir Kablonun Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları

8.2.1.1 K_G = 1 °K.m/W



Şekil 8.9: K_G = 1 °K.m/W olan toprakta sıcaklık dağılımı

Şekil 8.9'da 80 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı verilmektedir. Grafiksel olarak sıcaklık dağılımı ise Şekil 8.10'da verilmiştir. Bu şekle göre, XLPE yalıtkan içinde sıcaklık 363 °K değerinden 327 °K değerine kadar düşmektedir. Bakır siper içinde ise ısıl direnç PVC dış kılıfa göre ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu için sıcaklık değişimi olmamıştır. PVC dış kılıfta ise 5,1 °K'lik bir sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir ve en düşük sıcaklık değeri kılıfın toprağa temas ettiği noktada 321,9 °K olarak bulunur.



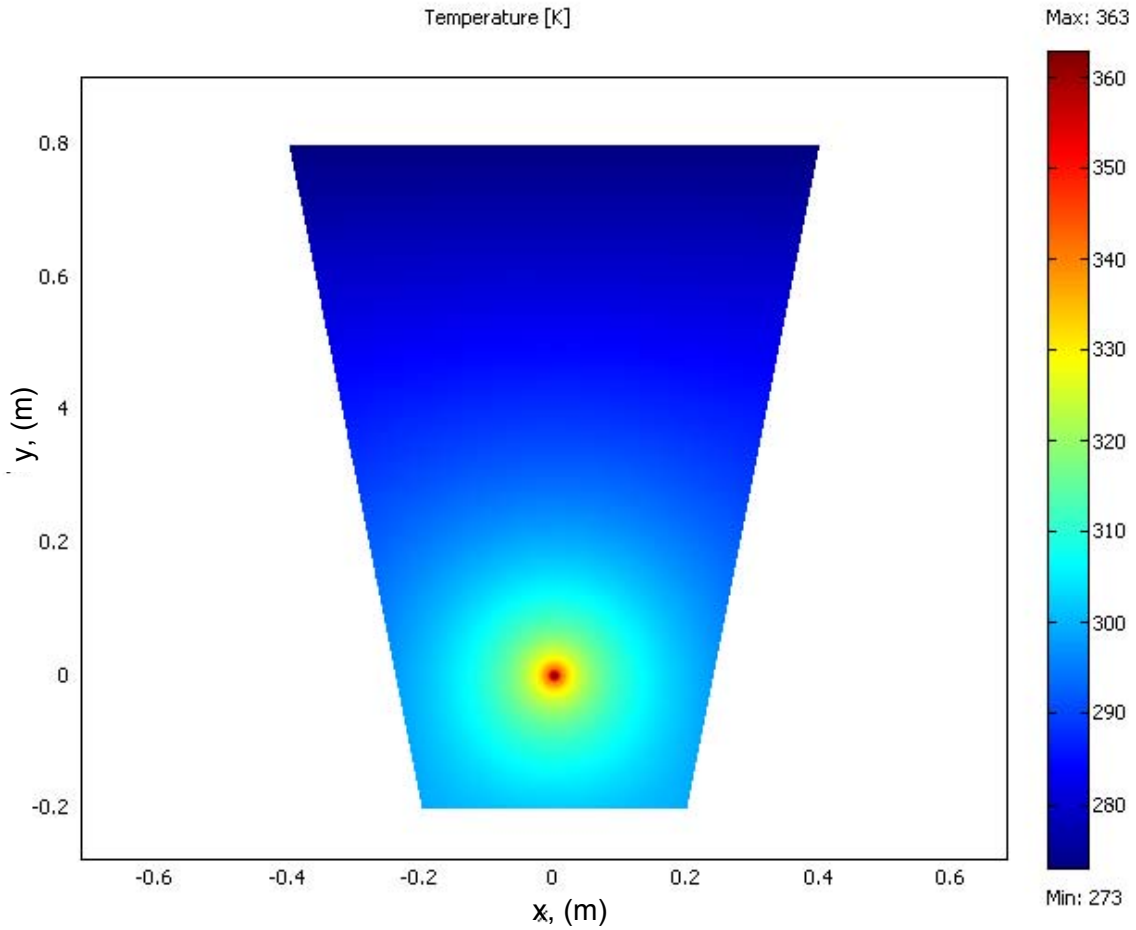
Şekil 8.10: K_G = 1 °K.m/W iken kablo içindeki sıcaklık dağılımı

8.2.1.2 K_G = 2,5 °K.m/W

Kablo iletkeninin ve toprağın sıcaklık değeri ve kablo malzemelerinin ısıl değerleri aynı kalmak üzere, sadece toprağın ısıl özdirenç değeri 2,5 °K.m/W olarak değiştirilirse;

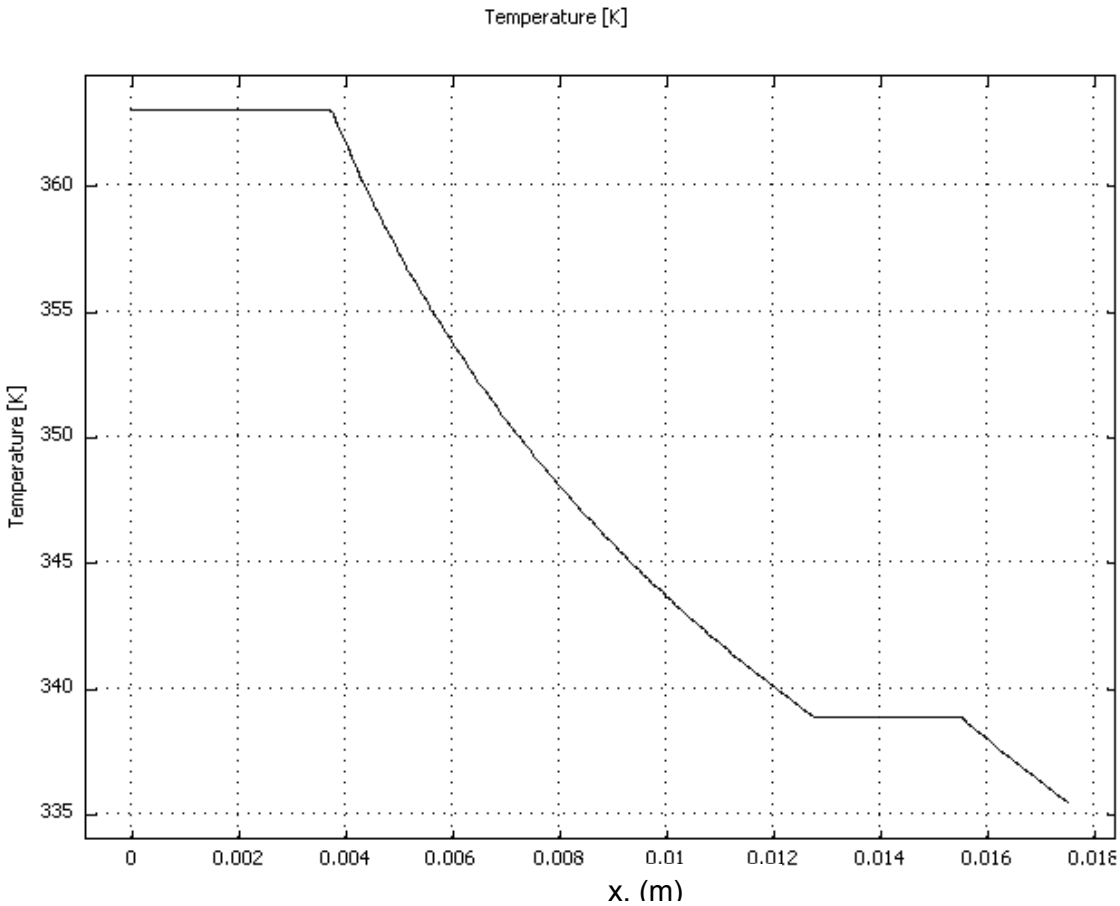
Bu durumda, toprağın ısıl özdirenç değerinin artmasıyla kablodan dışarıya ısı akışı zorlaşır. Enerjinin korunumu ilkesine göre, üretilen ısı değeri sabit kalıp, kablodan çevreye atılan ısı değeri azalınca, kablonun içinde kalan ısı da artış gösterir. Böylece kablo daha çok ısınır ve akım taşıma kapasitesi düşer.

Toprağın ısıl özdirencinin 2,5 °K.m / W olduğu bu durumda kablodaki ve topraktaki sıcaklık dağılımı Şekil 8.11'de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi XLPE yalıtkan içinde sıcaklık değeri 338,84 °K değerine kadar düşebilmektedir. Bakır siperin hem boyutlarının, hem de ısıl özdirenç değerinin çok küçük olmasından dolayı sıcaklık değişimi olmamıştır. PVC dış kılıfta ise sıcaklık kablo içindeki sıcaklık dağılımının verildiği Şekil 8.12'e göre 338,84 °K den 335,41 °K değerine kadar düşebilmiştir.



Şekil 8.11: K_G =2,5 °K.m/W olan toprakta sıcaklık dağılımı

Toprağın ısıl özdirencinin 1 °K.m /W olduğu ilk örneğe göre ve XLPE yalıtkan kılıfının sıcaklığı 11,84 °K daha fazladır. PVC dış kılıfın toprakla temas ettiği nokta ise ilk duruma göre 13,5 °K daha sıcaktır. İkinci durumda toprağın ısıl iletime karşı direnci daha fazladır. Bu sebeple kablodan dışarıya atılan ısı oldukça azalır ve akım taşıma kapasitesi de buna bağlı olarak azalır.

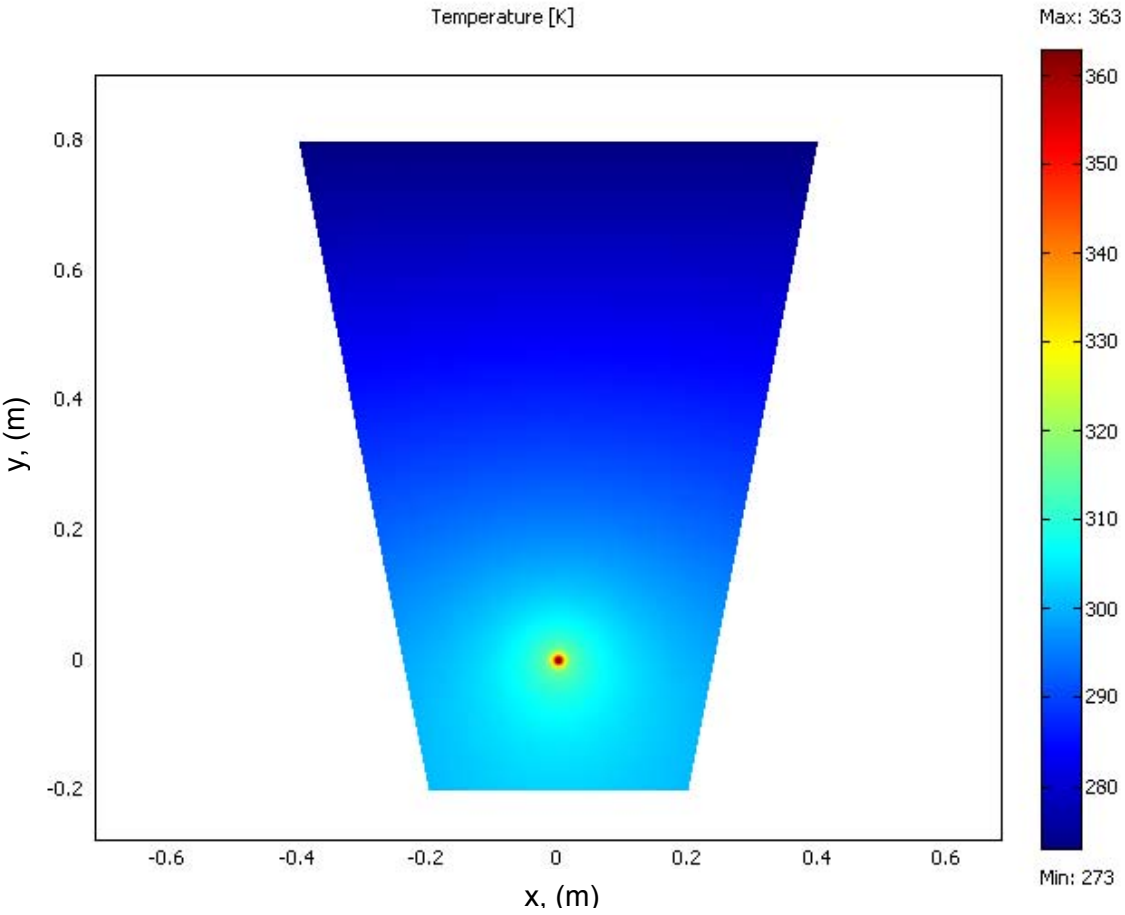


Şekil 8.12: K_G = 2,5 °K.m / W iken kablo içindeki sıcaklık dağılımı

Toprağın ısıl özdirenç değeri mevsimlerle ve iklimle değişen bir büyüklüktür. Örnek olarak ülkemizde yağışların sık görüldüğü Karadeniz Bölgesi'nde toprak ısıl özdirenç değeri 1 °K.m/W değerinin de altındadır. Sürekli nemli hava koşulu durumunda toprak ısıl özdirenç değeri 0,7 °K.m/W olarak alınabilir.

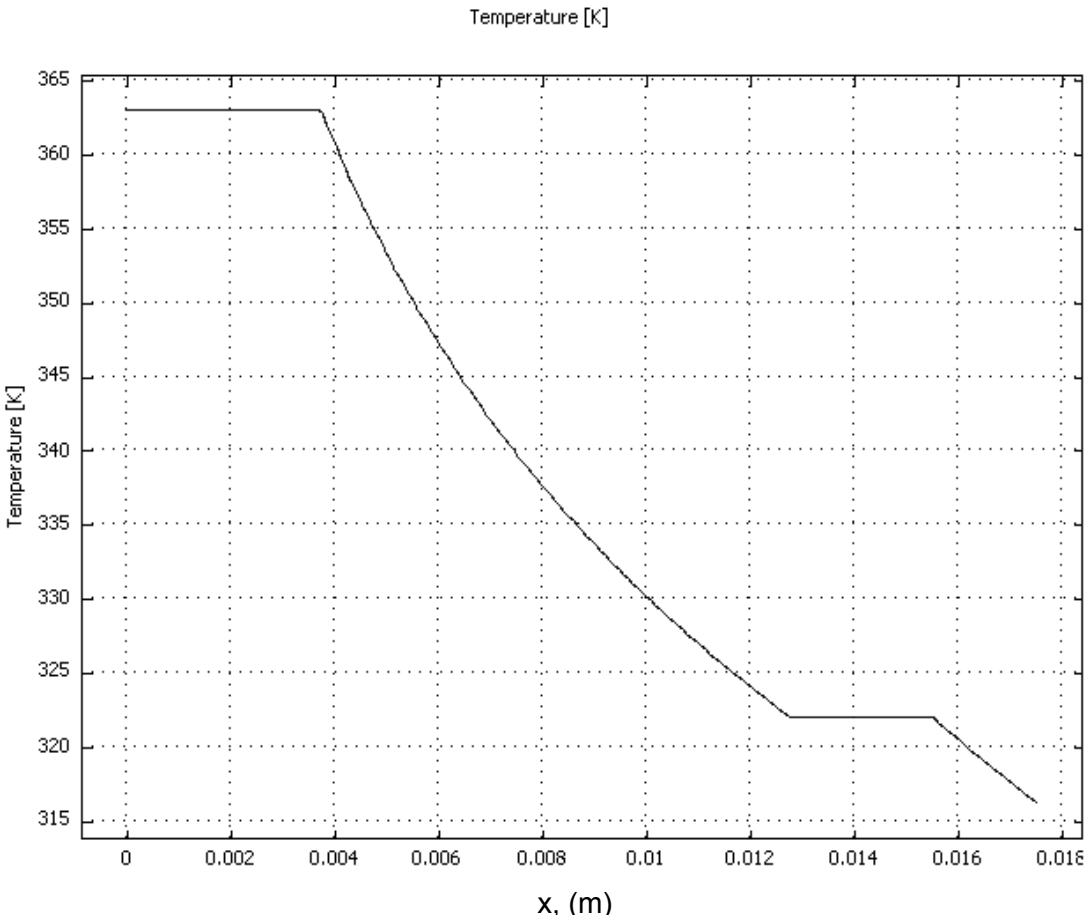
8.2.1.3 K_G = 0,7 °K.m/W

Kablonun boyutları ve malzeme özellikleri aynı kalmak üzere, toprak ısıl özdirenç değeri 0,7 °K.m/W olduğu durumunda toprağın ısıl direnç değerindeki azalmadan dolayı, kablodan dışarıya atılan ısı değeri artış gösterir. Buna göre enerjinin korunumu yasasından, üretilen ısı sabit olmak koşuluyla, kabloda kalan ısı miktarı azalmış olur. Şekil 8.13'de kablonun gömüldüğü toprak ısıl özdirenci 0,7 °K.m/ W olduğundaki sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 8.13: K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta sıcaklık dağılımı

Bunun sonucunda kablo yalıtkan ve kılıfının sıcaklık değeri Şekil 8.14'de verilen kablonun sıcaklık dağılımından görüldüğü gibi her iki durumdan da düşük olur. XLPE yalıtkanın en düşük sıcaklık değeri 321,95 °K'dir. Bakır siper içinde bu sıcaklık değeri korunur. PVC kılıf içinde ise sıcaklık değeri 321,95 °K değerinden 316,13 °K değerine düşer.



Şekil 8.14: K_G = 0,7 °K.m/W iken kablo içindeki sıcaklık dağılımı

8.2.2 Yan Yana Döşenen Üç Kablonun Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları

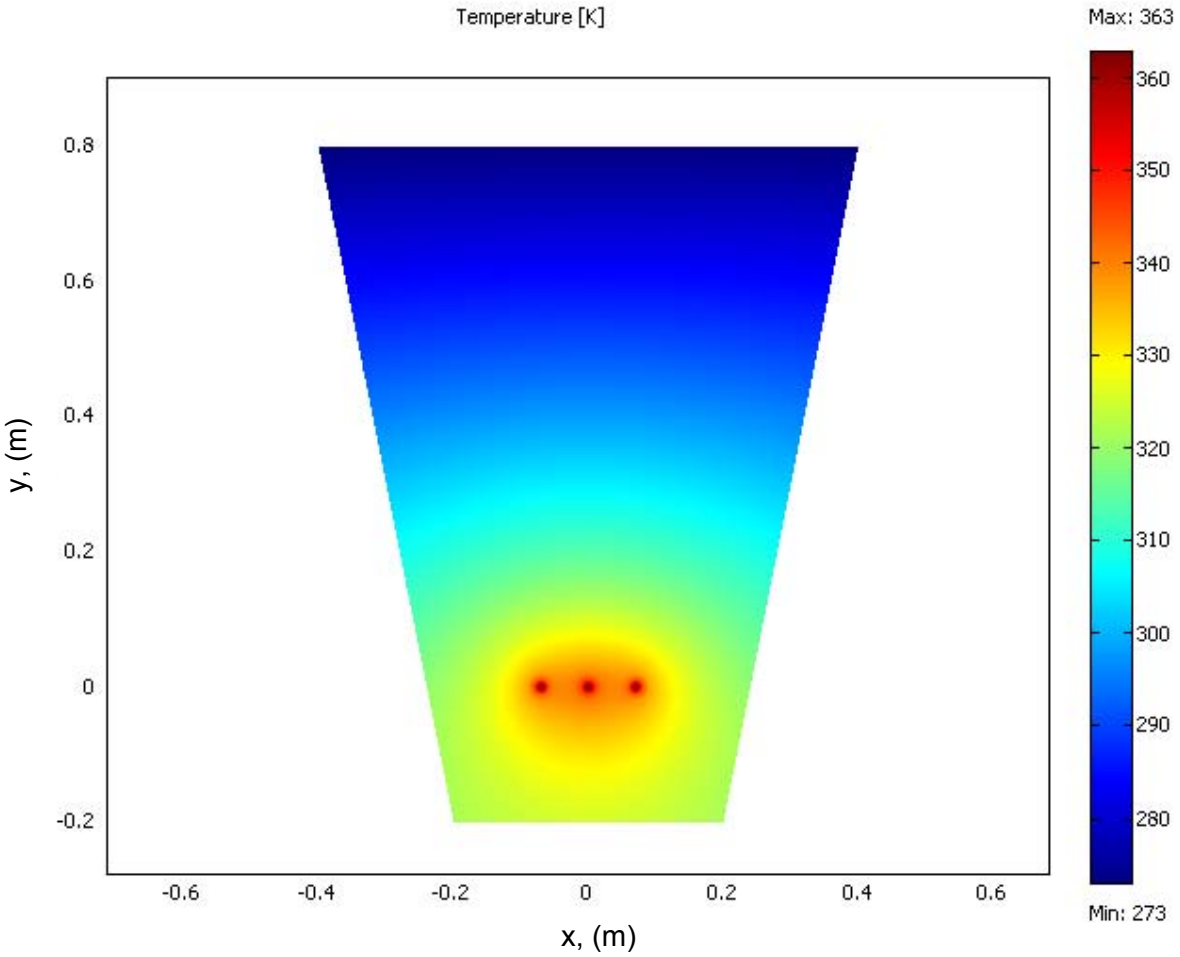
Anma gerilim değerleri 20,3 / 35 kV olan üç tane bir damarlı XLPE OG Güç Kablosu yatayda aralarında 7 ‘şer cm boşluk bırakılarak toprak kanalda 80 cm derinliğe yerleştirildiğinde sıcaklık dağılımı, bir kablonun dağılımına göre farklılık gösterir. Her kablo kendi kayıpları ve diğer kabloların kayıplarından dolayı oluşan ısının etkisiyle ısınır. Bu sebepten, tek kablonun ısıl analizinden farklı sonuçlar ortaya çıkar.

8.2.2.1 K_G = 1 °K.m/W

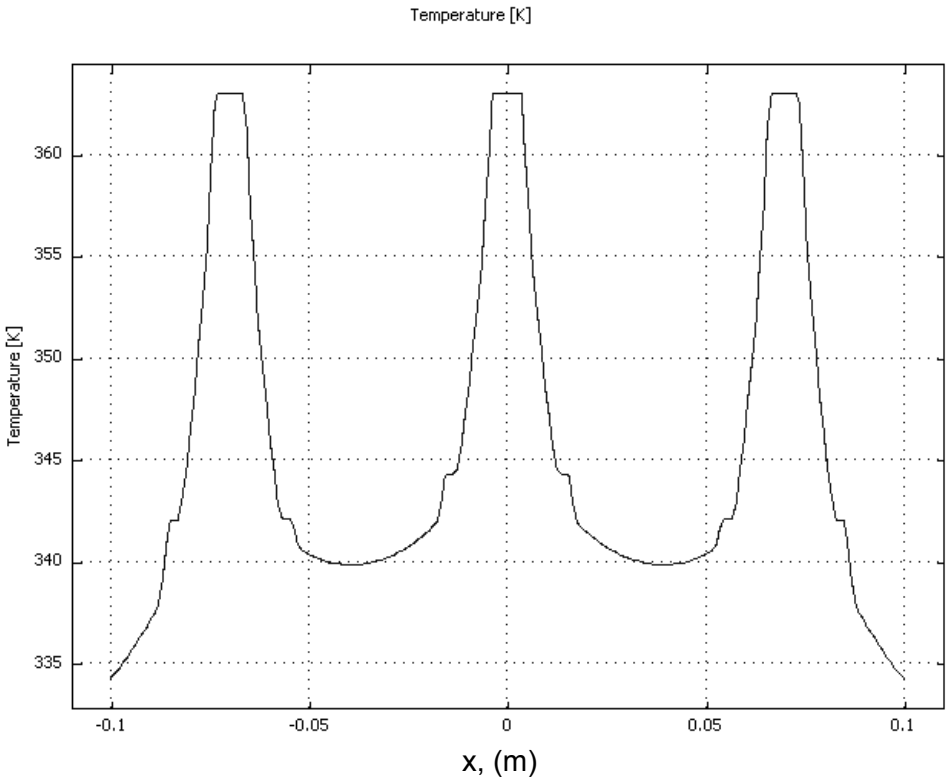
Kablolar kanalın içine 7’şer cm aralıklarla, simetrik olarak yerleştirildikleri için ortadaki kablo Şekil 8.15’deki diğer kabloların ısı etkileriyle daha çok zorlanır.
Şekil 8.16’ya göre, ortadaki kablonun yalıtkan sıcaklığı 363 – 344,25 °K değerleri arasında, sağdaki ve soldaki kabloların yalıtkan sıcaklığı 363 – 342,14 °K değerleri arasında değişir. Ortadaki kablo hem sağındaki, hem de solundaki kablolardaki kayıplar sebebiyle daha çok ısınır. Sağdaki kablo ise, ortadaki kablonun kayıplarının

doğurduğu ısıdan etkilenirken, soldaki kablonun kayıplarının etkisi, kablo boyutlarına göre oldukça büyük olan aradaki 14 cm'lik uzaklıkta toprak içinde azalır. Isıl özdirenci 1 °K.m/W olan toprağa üç tane kablonun yan yana döşendiği durumda, ortadaki kablonun sıcaklık dağılımının verildiği Şekil 8.17 incelendiğinde, yalıtkan sıcaklığının en düşük değerinin 344,25 °K olduğu görülmektedir. PVC dış kılıftaki en düşük sıcaklık değeri ise 341,93 °K'dir.

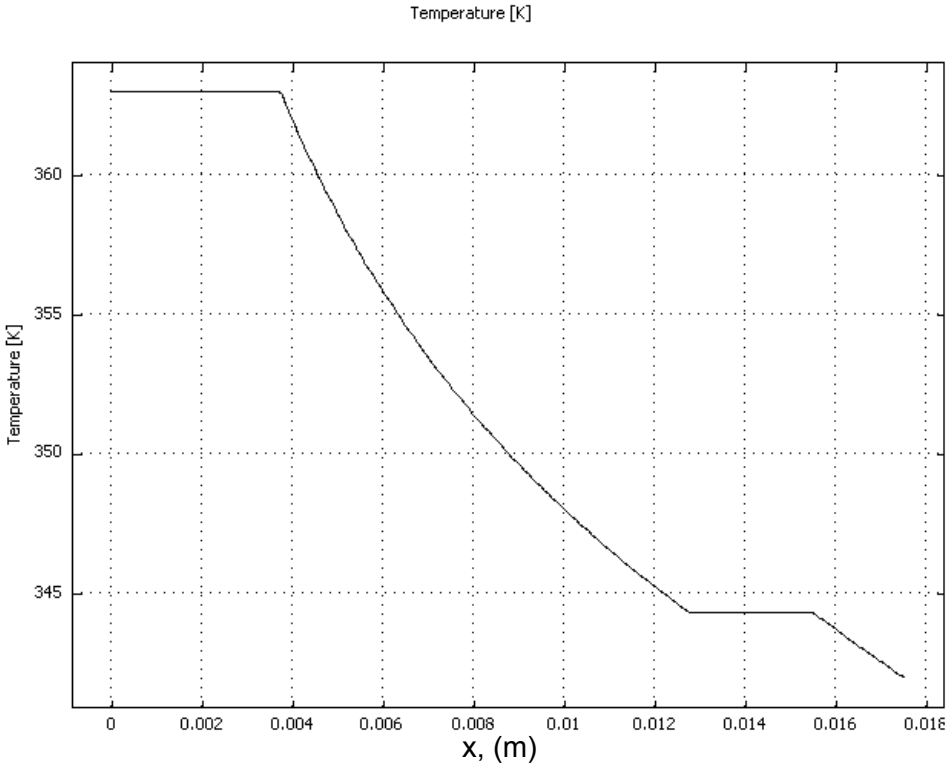
Yan yana gömülmüş üç kablodan ortadaki kablonun yalıtkan sıcaklığı, tek başına aynı derinliğe gömülmüş kabloyla karşılaştırılırsa, sağdaki ve soldaki kabloların 10 °K civarında bir sıcaklık artışına sebep oldukları görülmektedir.



Şekil 8.15: K_G = 1 °K.m/W olan toprakta yan yana gömülen üç kablonun yarattığı sıcaklık dağılımı



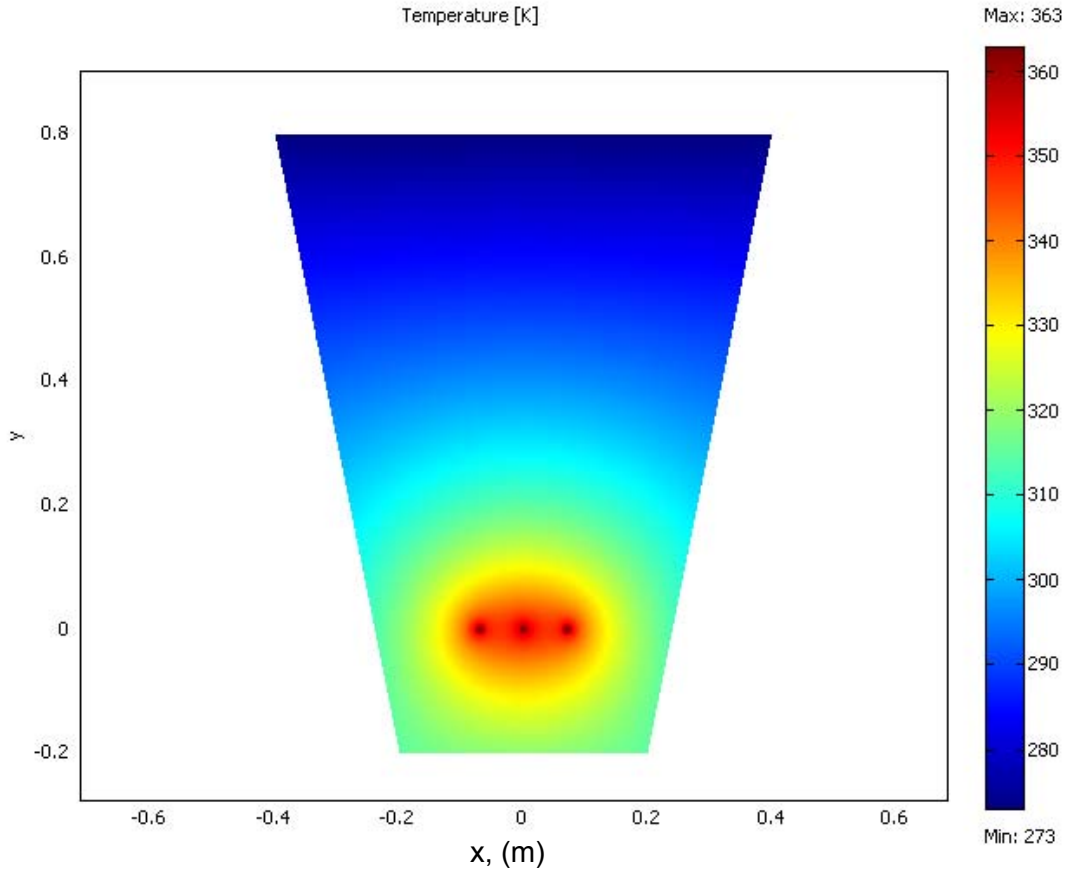
Şekil 8.16: K_G = 1 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablonun sıcaklık dağılımı



Şekil 8.17: K_G = 1 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı

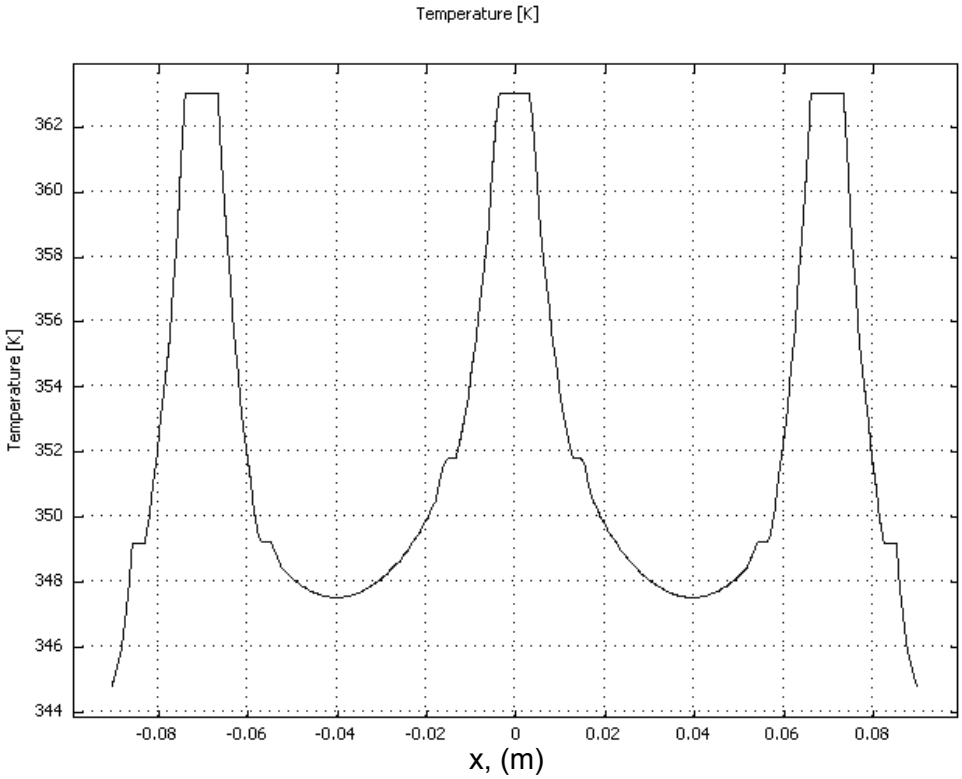
8.2.2.2 K_G = 2,5 °K.m/W

Yağış almayan, toprak sıcaklığı yüksek ve toprakta kurumanın görüldüğü yerlerde toprak ısıl özdirenci 2,5 °K. m / W civarındadır. Bu toprak koşullarında sıcaklık dağılımı Şekil 8.18'de verilmiştir. Bu durumda 7 cm aralıklarla yan yana döşenen kablolardan ortadakinin en düşük yalıtkan sıcaklığı sadece 11,3 °K azalabilmektedir (352,7 K). Bu değer Şekil 8.19'a göre diğer kablolarda 349,17 °K'dir. $\rho_T = 1$ °K.m / W iken ortadaki kablonun en düşük yalıtkan sıcaklığı 344,4 °K ve bir kablonun döşendiği durumda ise, en düşük yalıtkan sıcaklığı 327 °K'dir. Şekil 8.20'de ise K_G = 2,5 °K.m/W olan toprak koşullarında ortadaki kablonun sıcaklık dağılım gösterilmiştir.

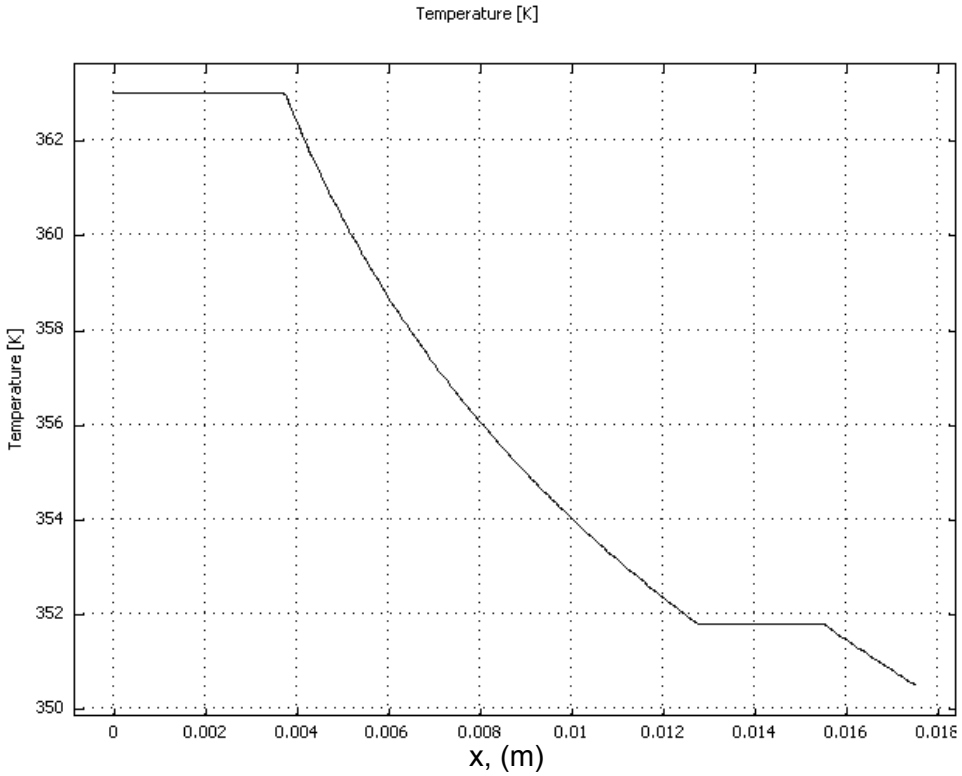


Şekil 8.18: K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta yan yana gömülen üç kablonun yarattığı sıcaklık dağılımı

Bu durum kabloların kendi kayıplarının yanında, diğer kabloların kayıplarının etkisiyle daha çok ısındıklarını ve toprak ısıl direncinin artmasından dolayı bu ısıyı dışarıya atmakta zorlandıklarını gösterir.



Şekil 8.19: K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablonun sıcaklık dağılımı



Şekil 8.20: K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm yatay açıklıklarla döşenen üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı

8.3 Çoklu Fiziksel Analiz

Yeraltı kablosunun ısıl analizi oluşabilecek ısıl zorlanmaların yeri ve miktarı hakkında, elektrostatik analizi ise kablodaki elektriksel zorlanmalar, elektrik alan miktarı, kablonun en çok zorlanacağı kısımlar hakkında bilgi verir. Ancak ikisi de tek başına yeterli değildir. Örnek olarak elektriksel direnç sıcaklık arttıkça artar. Bu artışla birlikte akım azalır. Akımın azalması, sıcaklığın azalmasına sebep olur. Sıcaklıktaki bu düşüşle birlikte direnç azalır ve dolayısıyla akım artar. Elektrostatik ve ısıl analiz tek başlarına yapıldığında, bu değişimler hesaba katılamazlar. Bunun yanında, kablonun ısınmasına sebep olan kayıplar da sıcaklıkla değişirler. Örnek olarak, dielektrik kayıp ifadesindeki kapasite, kayıp açısı ve dielektrik katsayısı sıcaklıkla değişim gösterir. Sadece ısıl analiz yapıldığında, kayıpların her sıcaklık değeri için aynı olduğu farz edilmiş olur. Sonuç olarak, bütün bu değişimler hesaba katıldığı için çoklu fiziksel analiz, kablo üzerindeki termik ve elektrostatik zorlanmalar hakkında daha doğru bilgi sahibi olmamızı sağlar.

Daha önce elektrostatik ve ısıl analizi ayrı ayrı yapılan anma gerilim değeri 20,3 / 35 kV olan bir damarlı XLPE OG güç kablosunun çoklu fiziksel incelemesi yapılacaktır. Kablo boyutları, kabloya ait ısıl ve elektriksel değerler, kablo gömülme derinliği tamamen elektrostatik ve ısıl analizlerde kullanılan değerlerdir.

Çoklu fiziksel analizde önemli olan, kablonun ısınmasına sebep olan kayıpların hesabıdır.

Kullanılan kablo için;

- Kablonun topraktaki akım taşıma kapasitesi (20 ºC): 214 A
- İletken direnci: 0,524 ohm / km olarak verilmiştir. Analizlerde kablonun uzunluğu 1 m olarak alınmıştır.

Buna göre $P_{cu} = I^2R = 214^2 \times (0{,}524 \times 10^{-3}) = 23{,}997W$ 'dır.

Bu kayıp 1 m uzunluğundaki kablonun iletken kayıplarıdır. Bu değer 20 ºC'deki değerler için hesaplanmıştır. Ancak iletkenlik kaybının sıcaklıkla değişimi hesaba katılmalıdır. Direncin sıcaklıkla değişimi $R = R_0(1+\alpha(T - T_0)$ olduğu için bu değişim kayıp ifadesine eklenir.

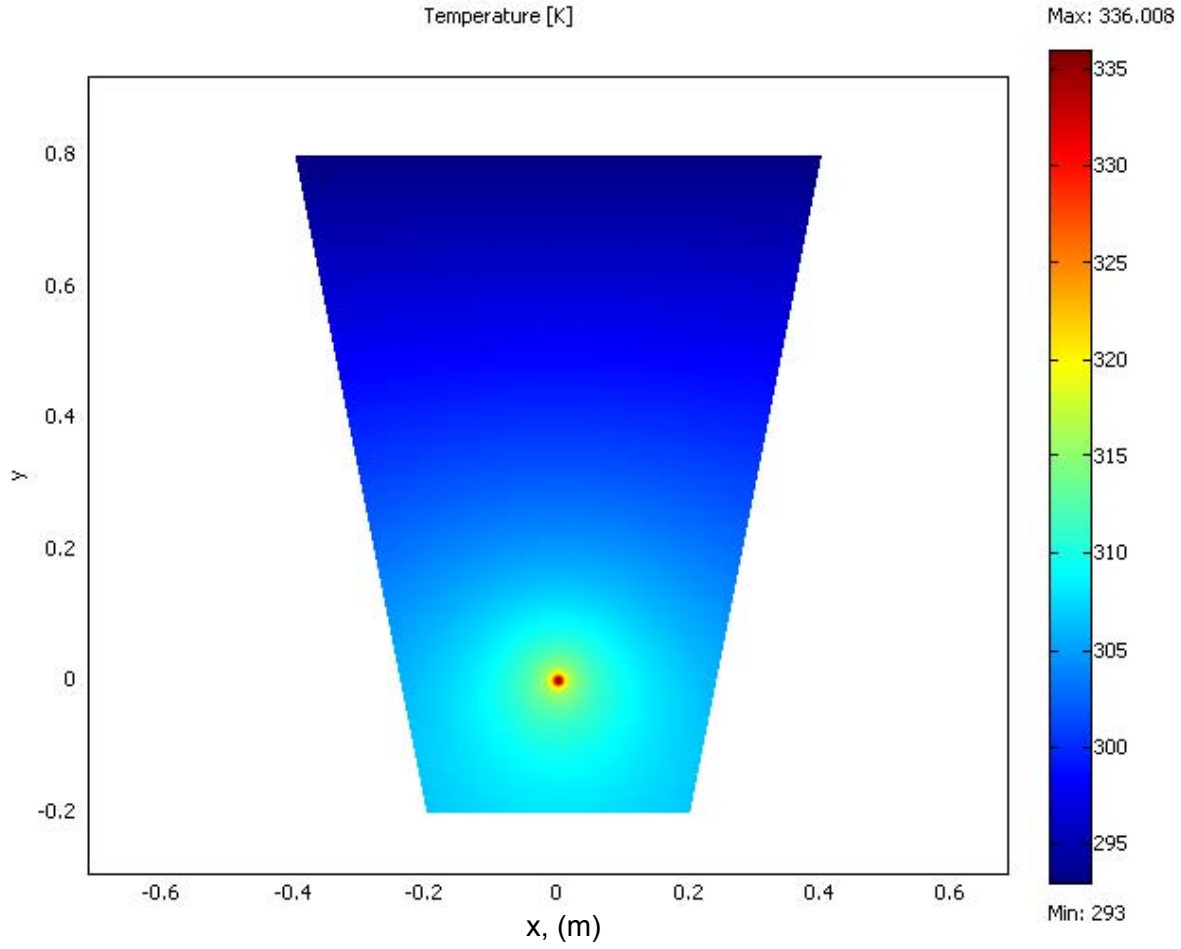
Bunun yanında kablonun yalıtkanında oluşan dielektrik kayıplarda hesaplanmıştır.

Dielektrik kayıplar; $P_d = \omega CU^2 \tan\delta$ = 0,029 W olarak bulunur.

8.3.1 Kabloların Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları

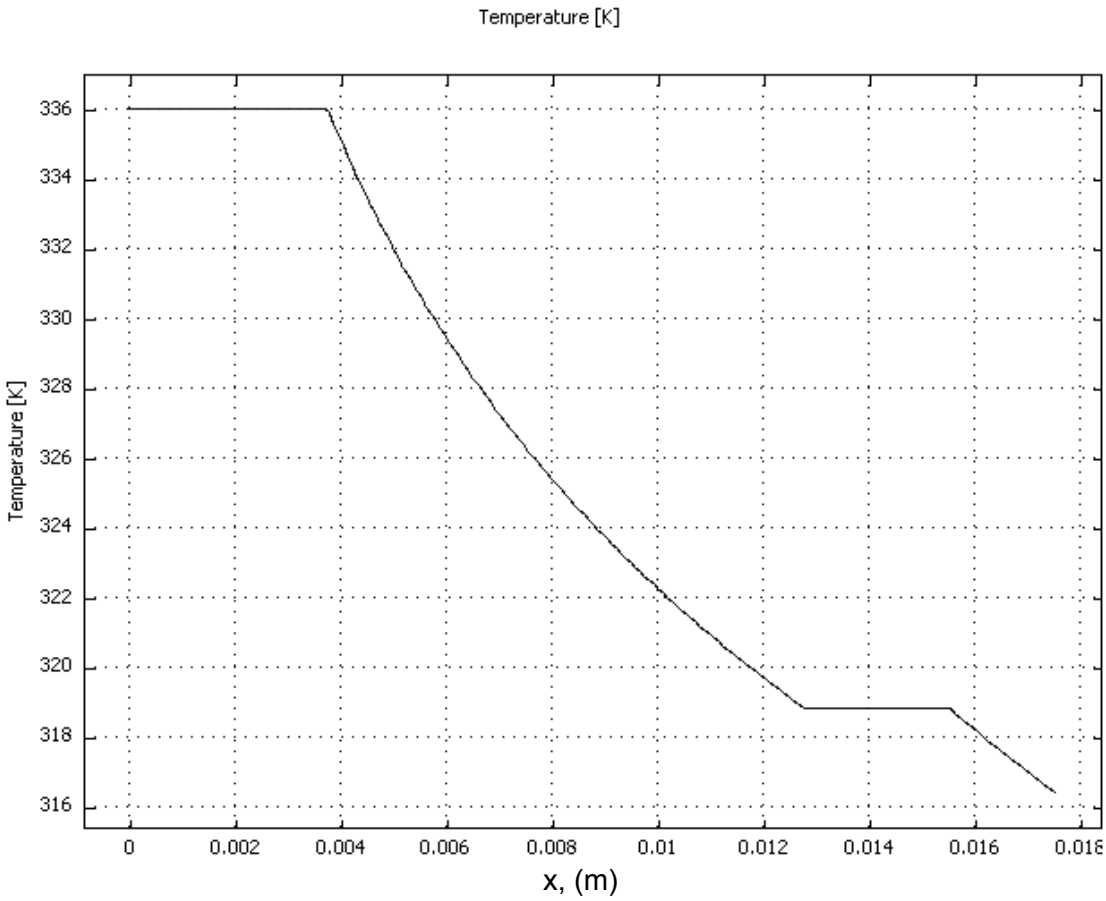
8.3.1.1 K_G = 1 °K.m /W

Bu değerler ısı kaynağı olarak kullanıldığında ve toprak yüzey sıcaklığı 293 °K iken, kablo iletkeninin sıcaklığı 336,08 °K olmaktadır (Şekil 8.21). Bu değer yalıtkanın dayanabileceği en yüksek sıcaklık değeri olan 363 °K (90 ºC) den düşüktür. Bunun anlamı, toprağın ısıl özdirenç değeri 1 °K.m/W olduğunda, akım taşıma kapasitesinin kataloglarda belirtilen 214 A değerinden yüksektir. Analizi yapılan bu kablo 214 A akım taşıdığında termik olarak kritik bir zorlanma altında değildir.



Şekil 8.21: Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 1 °K.m/W olan toprak koşullarında sıcaklık dağılımı

Şekil 8.22'deki sıcaklık dağılımdan görüldüğü gibi, yalıtkanın en yüksek sıcaklığı 336,08 K, en düşük sıcaklığı ise 318,81 °K dir. PVC kılıfın toprakla temas ettiği yerde ise sıcaklık 316,37 °K dir.



Şekil 8.22: Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 1 °K.m/W olan toprak koşullarında kablo içindeki sıcaklık dağılımı

Kablo izin verilen en yüksek yalıtkan sıcaklık değerine 214 A den yüksek bir akım değerinde ulaşacaktır. Tabloda 214 amperin üzerindeki akım değerlerinde kablo iletkenindeki sıcaklık değerleri bulunmuştur. Buna göre, kablo yalıtkanının dayanabileceği en yüksek sıcaklık değerine (90 °C) 290 A civarında ulaşılır. 90 C º yi sağlayan akım değeri tam olarak 292,147 A dir.

Buna göre analizi yapılan bu kablo için (Toprak ısıl özdirenci 1 °K.m/W iken) akım taşıma kapasitesi 292,147 A olarak belirlenmiş olur. Yeraltı kabloları, havai hatlara göre daha pahalı olduğu için genellikle taşıyabileceği en yüksek akım miktarı civarında, işletilirler. Buna göre toprağın bu özelliklerinde, bu kablo 292,147 A civarında yüklenir

Tablo 8.3: Kablo iletken akımına karşılık yalıtkandaki en yüksek sıcaklık

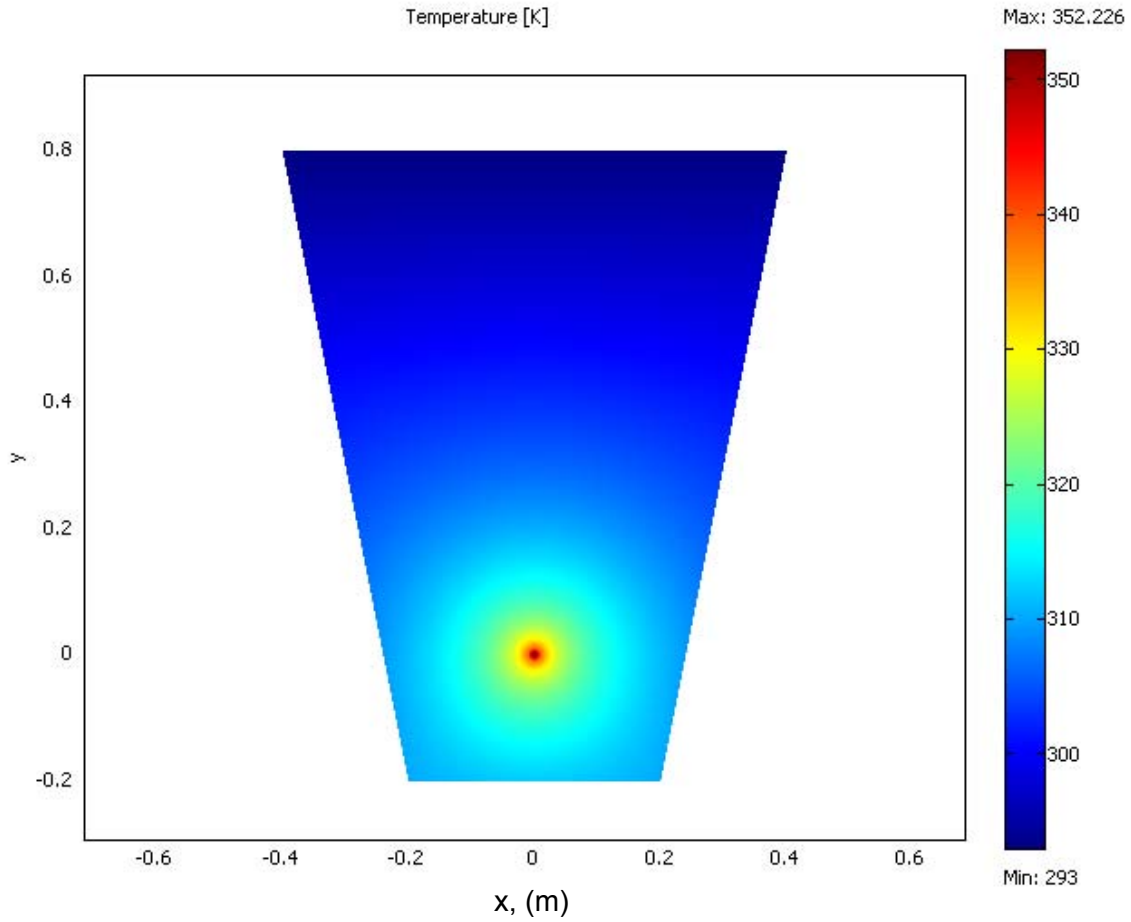
AKIM	YALITKAN SICAKLIĞI	
A	K	C
220	337,993	64,993
225	339,720	66,720
230	341,412	68,412
235	343,125	70,125
240	344,822	71,822
245	346,55	73,550
250	348,303	75,303
255	350,036	77,036
260	351,780	78,780
265	353,512	80,512
270	355,270	82,270
275	357,030	84,030
280	358,759	85,759
285	360,487	87,487
290	362,237	89,237

.

8.3.1.2 K_G = 2,5 °K.m / W iken

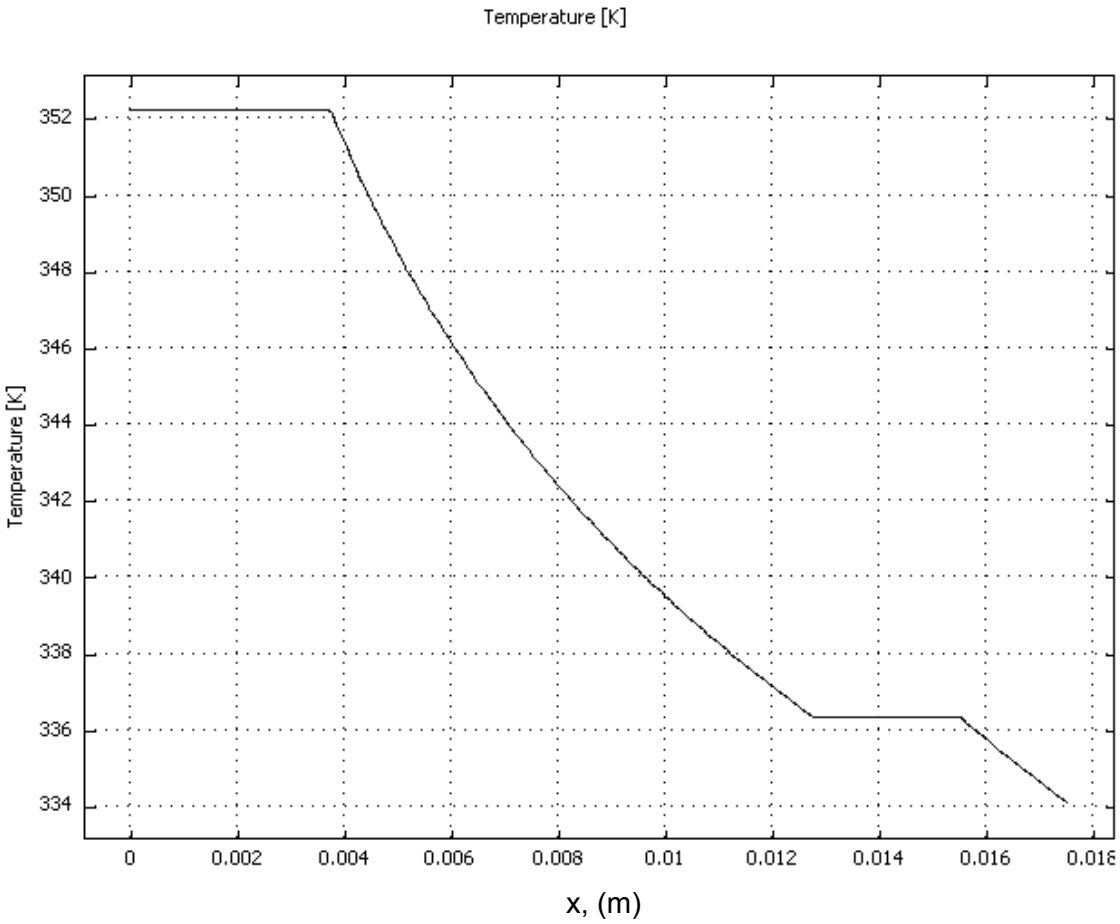
Yağışın az görüldüğü, kurak bölgelerde toprağın ısıl özdirenci 2,5 °K.m/W değerine kadar çıkabilir. Bu durumda çoklu fiziksel analiz yapıldığı zaman, XLPE yalıtkandaki en yüksek sıcaklığın bir önceki duruma göre artış gösterip 352,226 °K değerine çıktığı gözlenir (Şekil 8.23). Yalıtkandaki en düşük sıcaklık ise Şekil 8.24'de görüldüğü gibi 336,33 °K dir. PVC dış kılıfta ise, kablonun toprakla temas ettiği noktada sıcaklık değeri yüksek ısıl direnç sebebiyle 334,085 °K gibi yüksek bir sıcaklık değerindedir.

Toprağın ısıl özdirenç değeri arttığında, kablonun taşıyabileceği en yüksek akım değeri olan 214 A, kablo yalıtkanının termik zorlanma sınırına yakındır.



Şekil 8.23: Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 2,5 °K.m / W olan toprakta sıcaklık dağılımı

Yukarıdaki sıcaklık dağılımından görüldüğü gibi kablonun toprak ısıl direnci arttığı için kablodaki soğuma miktarı azalmıştır. Bu durumda akım taşıma kapasitesi, bir önceki duruma göre daha düşüktür.



Şekil 8.24: Çoklu fiziksel analiz sonucunda K_G = 2,5 °K.m / W olan toprak koşullarında kablo içindeki sıcaklık dağılımı

Tablo 8.4: Kablo akımına karşılık yalıtkandaki en yüksek sıcaklık.

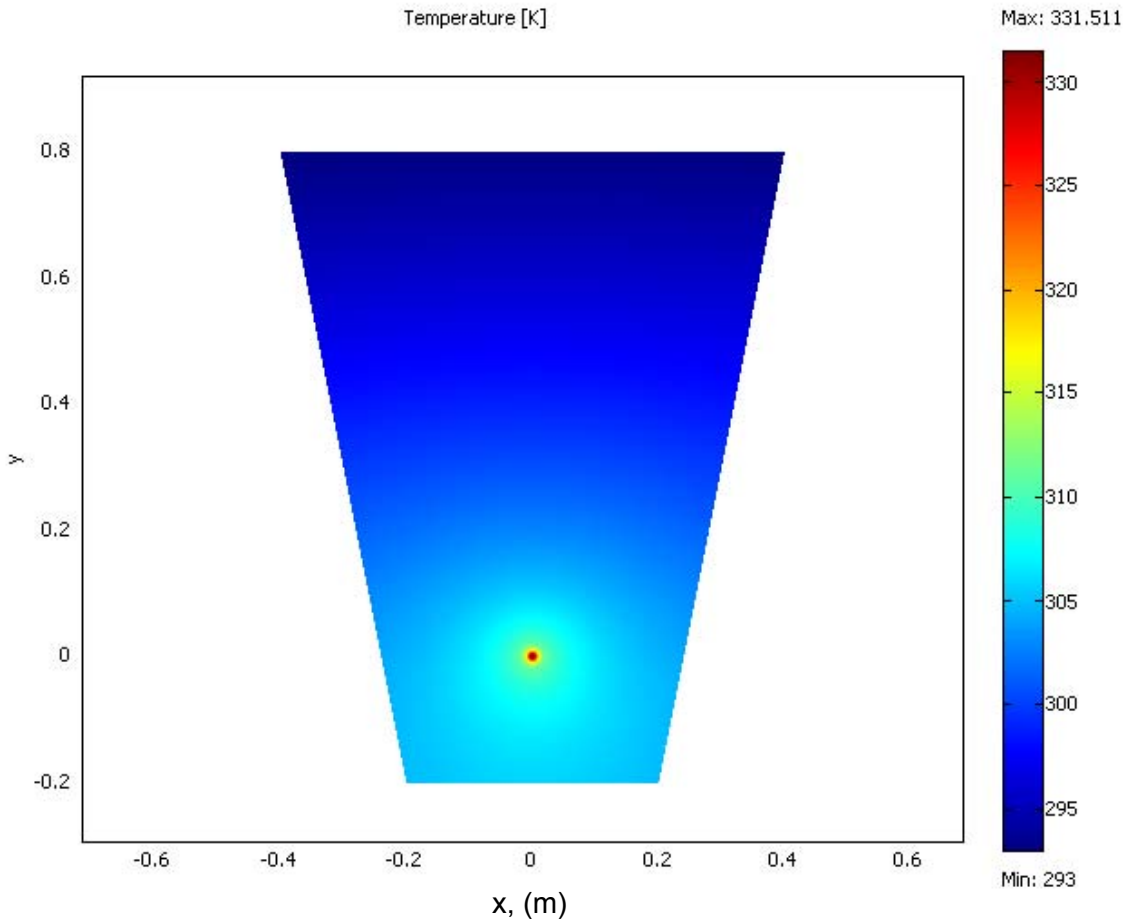
AKIM	**YALITKAN SICAKLIĞI**	
A	**K**	**C**
214	352,226	79,226
218	353,895	80,895
222	355,625	82,625
226	357,333	84,333
230	359,045	86,045
234	360,740	87,74
238	362,412	89,412

Buna göre izin verilen en yüksek yalıtkan sıcaklığı değeri 90 º C olmak üzere, bu kablo için akım taşıma kapasitesi Tablo 8.4'e göre 238 A civarındadır. Kablo yalıtkanının dayanabileceği sıcaklık değeri (90 º C), tam olarak 239,354 A değerinde sağlanır.

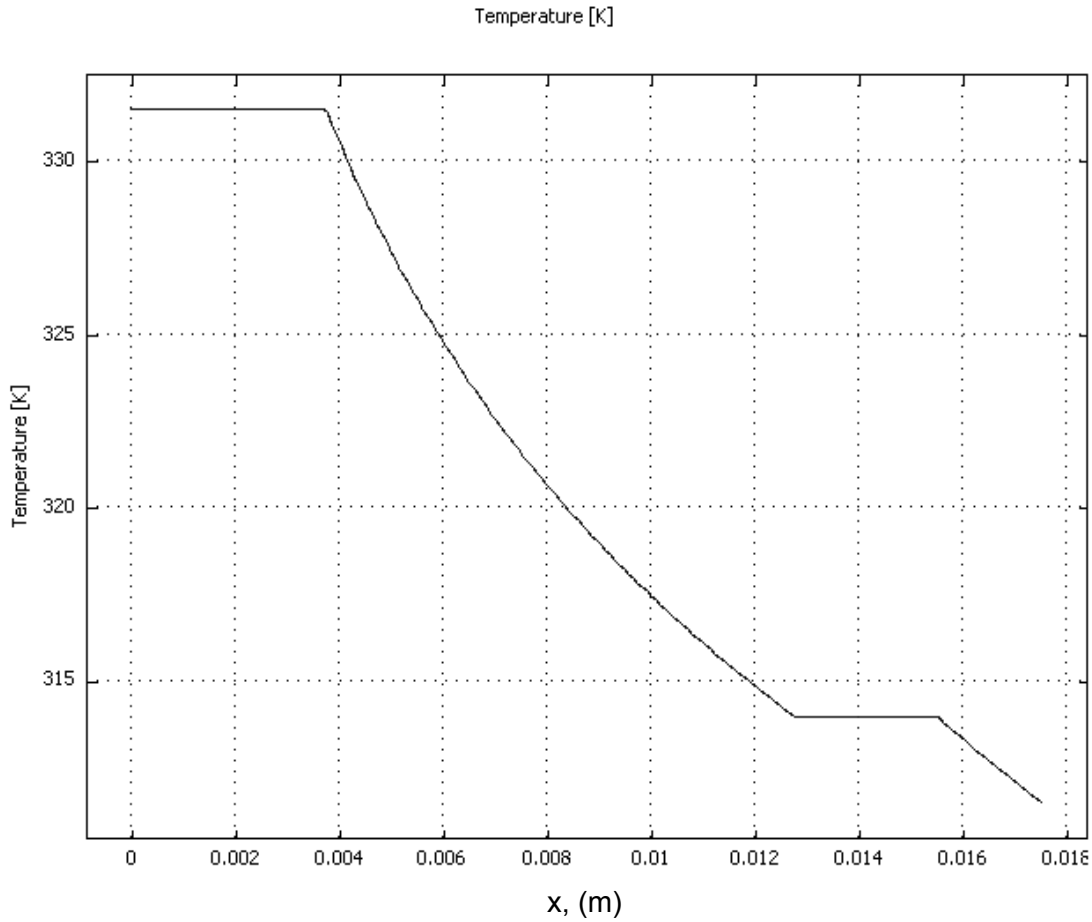
Kablo, yağışın az görüldüğü nemini kaybetmiş (K_G = 2,5 °K.m / W) toprağa gömüldüğünde sıcaklık dağılımının ve akım taşıma kapasitesinin bulunması oldukça önemlidir. Bir önceki toprak koşullarıyla kıyaslandığında akım taşıma kapasitesi 52,793 A düşüş göstermiştir.

8.3.1.3 K_G = 0,7 °K.m /W iken

Kablonun döşendiği yerdeki toprağın nem değeri normalin üzerinde olduğu zaman, kablonun ürettiği ısıyı dışarı atması daha kolay olur. Üretilen ısı aynı kalırsa, enerjinin konumu prensibine göre, dışarıya atılan ısı arttığı için kabloda kalan ısı ve dolayısıyla kablo sıcaklığı düşer.



Şekil 8.25: Çoklu fiziksel analiz K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta sıcaklık dağılımı



Şekil 8.26: K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta kablonun sıcaklık dağılımı

Şekil 8.25'den görüldüğü gibi, kablonun gömüldüğü toprak normalden daha nemli ise, kablonun sıcaklık değeri, daha kuru topraktaki sıcaklığına göre daha azdır. Kablo termik açıdan daha az zorlanır. Kablo yalıtkanının en yüksek sıcaklığı 331,511 °K'dir. XLPE yalıtkanın sıcaklığının en düşük değeri ise 313,952 °K'dir (Şekil 8.26). PVC dış kılıfın, toprakla temas ettiği yerdeki sıcaklık ise 311,46 °K dir.

Kataloglarda 35 mm^2 için verilen akım taşıma kapasitesi değeri olan 214 A, bu toprak koşulları için kablonun taşıyabileceği akım değerinin altında kalmaktadır. Yeraltı kabloları en yüksek akım değeri civarında yüklendikleri için, bu toprak koşullarında kablo 214 A den daha yüksek akım değerlerinde çalıştırılır (Tablo 8.5).

Tablo 8.5: Kablo iletken akımına karşılık yalıtkandaki en yüksek sıcaklık.

AKIM	YALITKAN SICAKLIĞI	
A	K	C
214	331,511	58,511
224	334,592	61,592
234	337,724	64,724
244	340,900	67,900
254	344,106	71,106
264	347,314	74,314
274	350,581	77,581
284	353,859	80,859
294	357,128	84,18
304	360,368	87,368
314	363,634	90,634

Buna göre K_G = 0,7 °K.m / W olduğunda kablonun taşıyabileceği en yüksek akım değeri 312,198 A dir.

Toprak ısıl direncinin üç farklı değeri içi yapılan analizler sonucunda, kablonun taşıyabileceği en yüksek akım değerleri

- K_G = 0,7 °K.m/W için 312,198 A,
- K_G = 1 °K.m/W için 292,147 A,
- K_G = 2,5 °K.m/W için 239,354 A olarak bulunmuştur.

Kaynak [1]' de, PE ve XLPE yalıtkanlı güç kablolarının sonlu elemanlar yöntemiyle, akım taşıma kapasitelerini belirlemek için ısıl analizler yapılmıştır. Bu çalışmada XLPE yalıtkanlı 95 mm^2 kesitli, 35 kV anma gerilimindeki kablo kullanılmıştır. Farklı toprak ısıl özdirençleri için düzeltme faktörleri [34]'te verilmiştir Sadece kablonun gömüldüğü toprak ısıl özdirençleri ve bunlara karşılık gelen, akım düzeltme faktörleri değerlerinde değişim olduğunda kablo iletkenindeki sıcaklık değerleri bulunmuştur.

Tablo 8.6 incelenirse, bulunan sonuçların, benim çalışmamla benzerlik gösterdiği ve ısıl direnç arttıkça kablodaki soğumanın azaldığı, üretilen ısının kabloda kalan miktarının arttığı söylenebilir.

Tablo 8.6: Kaynak [1]' de bulunan sonuçlar;

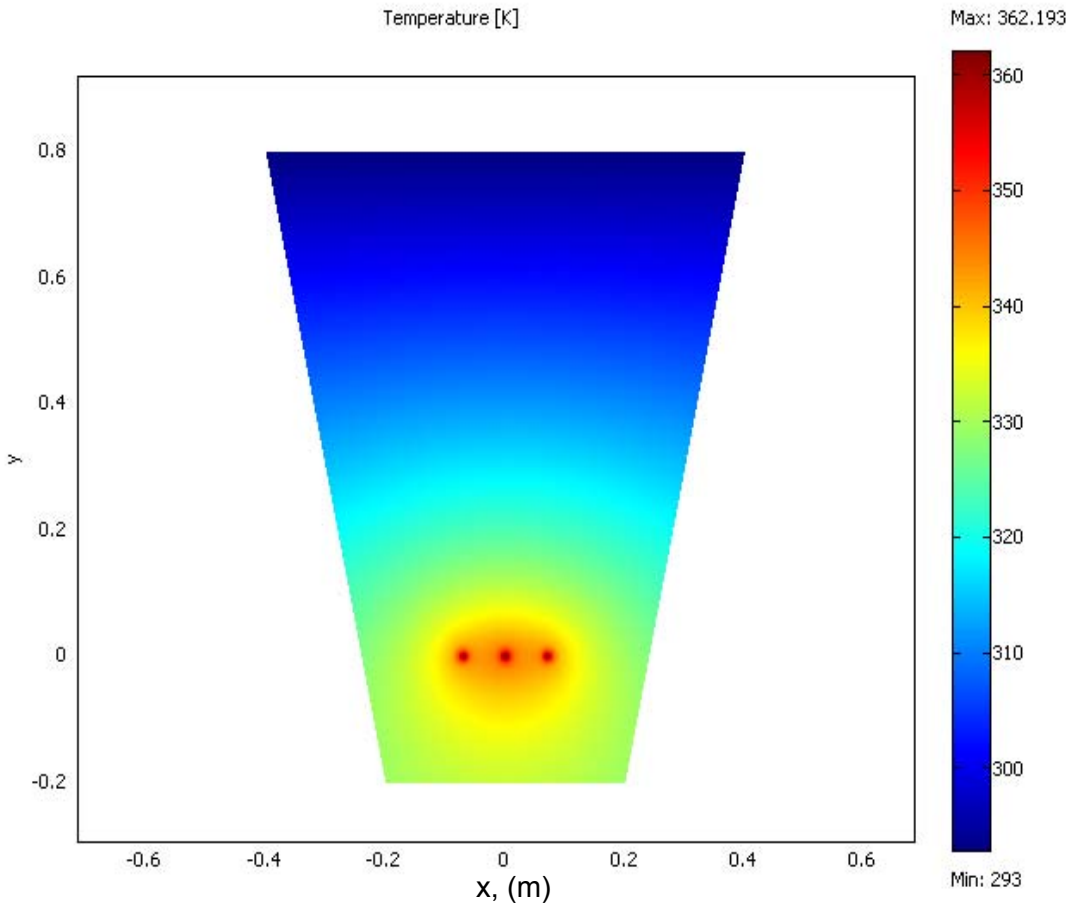
Toprağın ısıl öziletkenliği (W /°K.m)	**Toprağın ısıl özdirenci (K m / W)**	**Kablo İletken Sıcaklığı (C)**
0,27	3,73	97,29
0,4	2,5	78,33
0,5	2	70,8
0,67	1,5	63,49
1	1	56,09
1,43	0,7	51,33

Sonuç olarak kablonun ısıl özellikleri ve boyutları aynı kalmak üzere, aynı gömülme derinliğinde, topraktaki nem miktarı azaldıkça, akım taşıma kapasitesinin düştüğü görülmektedir. Yağışın az görüldüğü, kurak bölgelerde kablonun yüklenebileceği akım değeri, nemli bölgelere göre daha düşüktür. Bu sebepten, özellikle bu bölgelerde yapılan kablo döşemelerinde, akım taşıma kapasitesi hesabı oldukça önemlidir.

8.3.2 Yan Yana Döşenmiş Üç Kablonun Farklı Isıl Özdirençli Topraklarda Sıcaklık Dağılımları

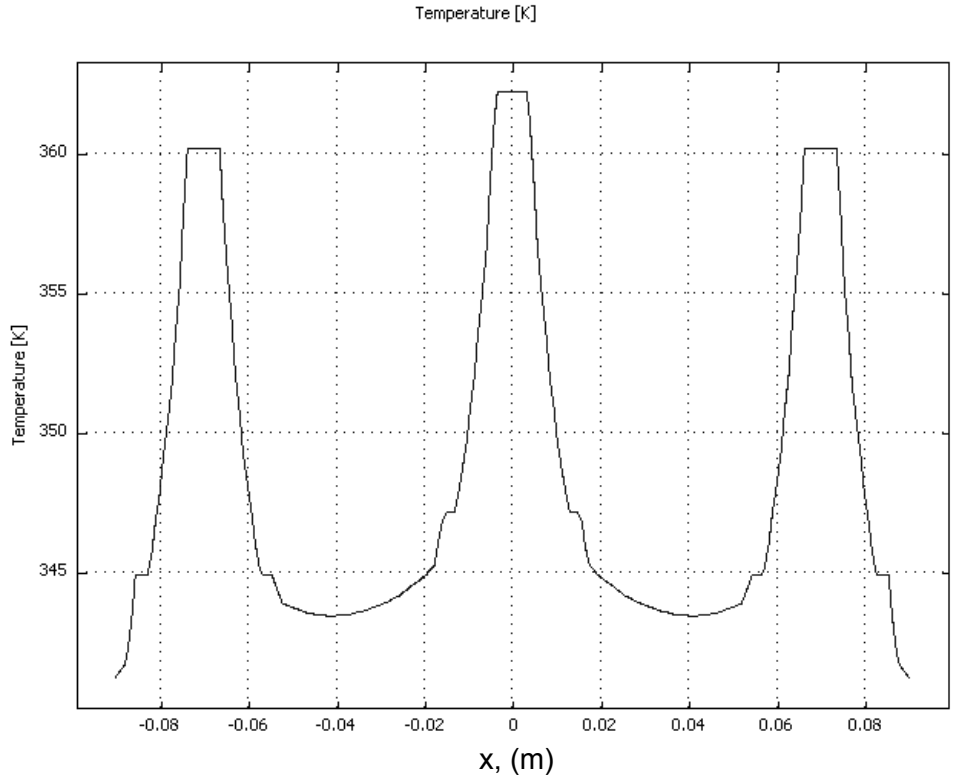
8.3.2.1 K_G = 1 °K.m/W

Kablo boyutları, elektriksel ve ısıl özellikleri aynı olan, anma gerilimi 20,3 / 35 kV olan üç tane bir damarlı XLPE OG Güç Kablosu 7 şer cm aralıklarla yerleştirildiği zaman oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 8.27'de görülmektedir.

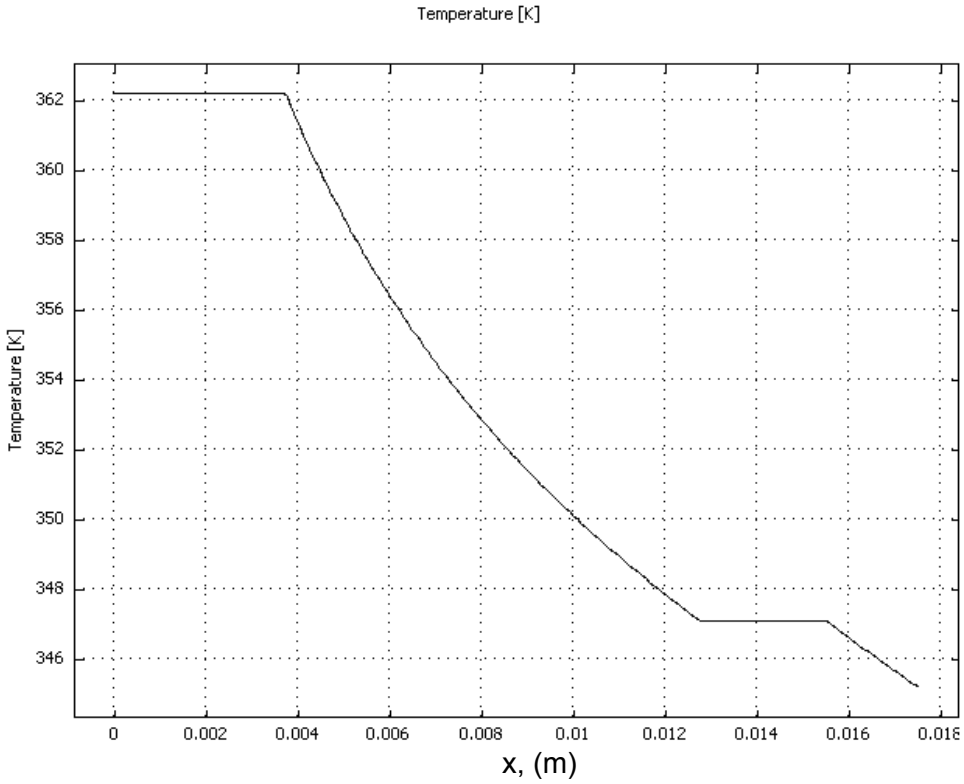


Şekil 8.27: K_G = 1°K.m/W toprak koşullarında 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç tane kablo durumunda sıcaklık dağılımı

Ortadaki kablo hem sağındaki ve solundaki kabloların kayıplarından dolayı ortaya çıkan ısının etkisiyle, hem de kendi iletkeninden geçen akım ve dielektrik kayıplarından dolayı, diğer kablolardan daha çok ısınır (Şekil 8.28).



Şekil 8.28: K_G = 1 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablonun sıcaklık dağılımı



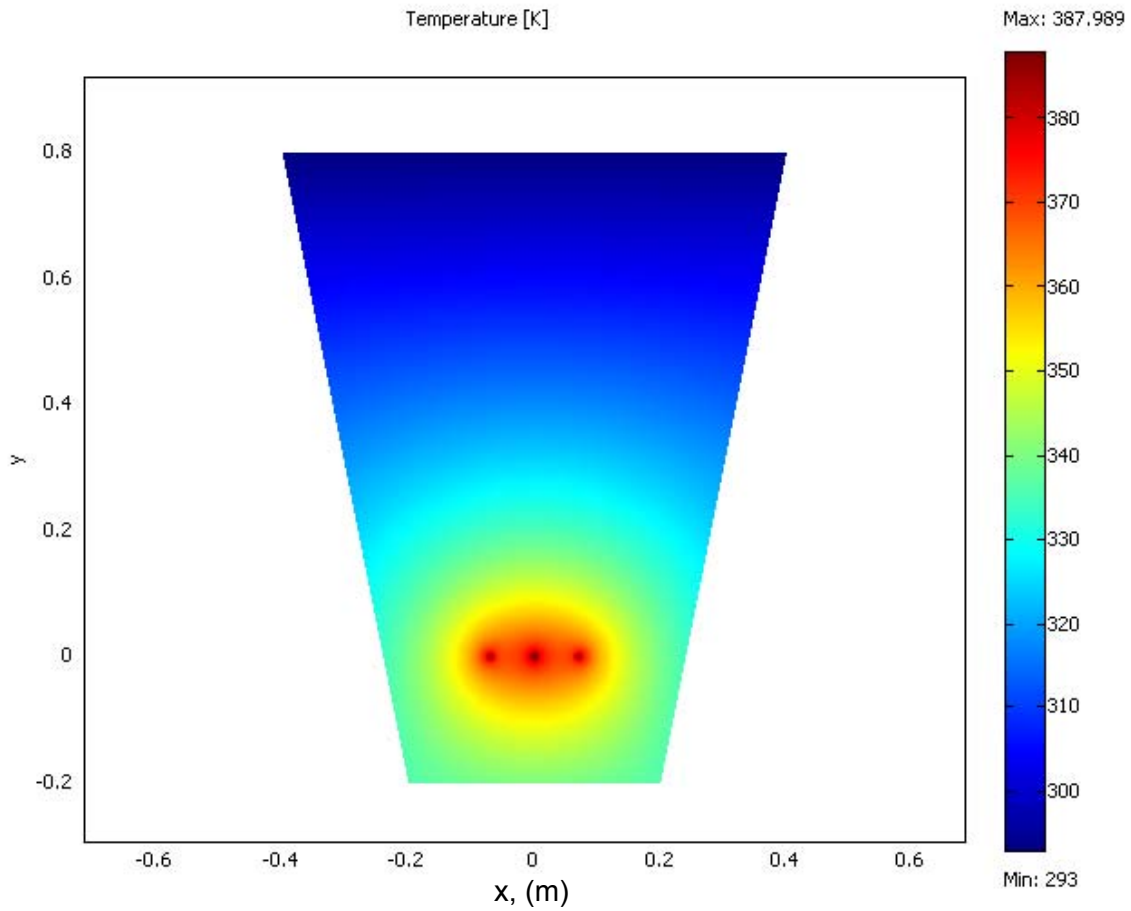
Şekil 8.29: K_G = 1 °K.m /W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı

Simetrik yerleşimden dolayı sağdaki ve soldaki kablolar aynı ısıya maruz kalırlar ve aynı yalıtkan sıcaklığına sahiptirler. Şekil 8.28 ve Şekil 8.29'daki sıcaklık dağılımlarına göre, ortadaki kablonun iletken sıcaklığı 362,193 °K, sağdaki kablonun iletken sıcaklığı ise 360,11 °K'dir.

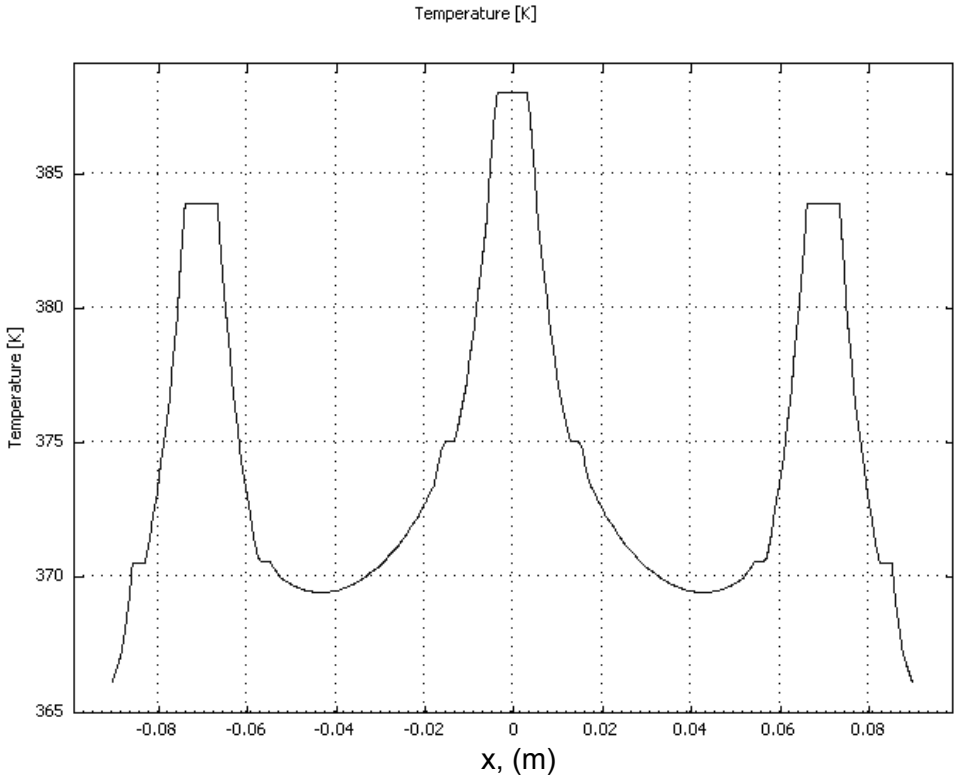
Görüldüğü gibi üç kablonun yan yana döşenmesi durumunda kablolardaki ısınma tek bir kablodaki ısınmadan oldukça fazladır. Ortadaki kablonun sıcaklık dağılımının verildiği yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi XLPE yalıtkandaki en düşük sıcaklık değeri 347,107 °K iken sağdaki ve soldaki kablolar için bu değerler 344,8 °K dir. Sağdaki ve soldaki kabloların, ortadaki kablo tarafındaki yalıtkan sıcaklığı ise bu değerden 0,3 °K daha yüksektir.

PVC yalıtkanın toprakla temas ettiği noktadaki sıcaklık değeri, ortadaki kablo için 345,2 °K iken diğer kablolar için, ortadaki kablo tarafında 343,8 K, diğer tarafta ise 341,8 °K dir.

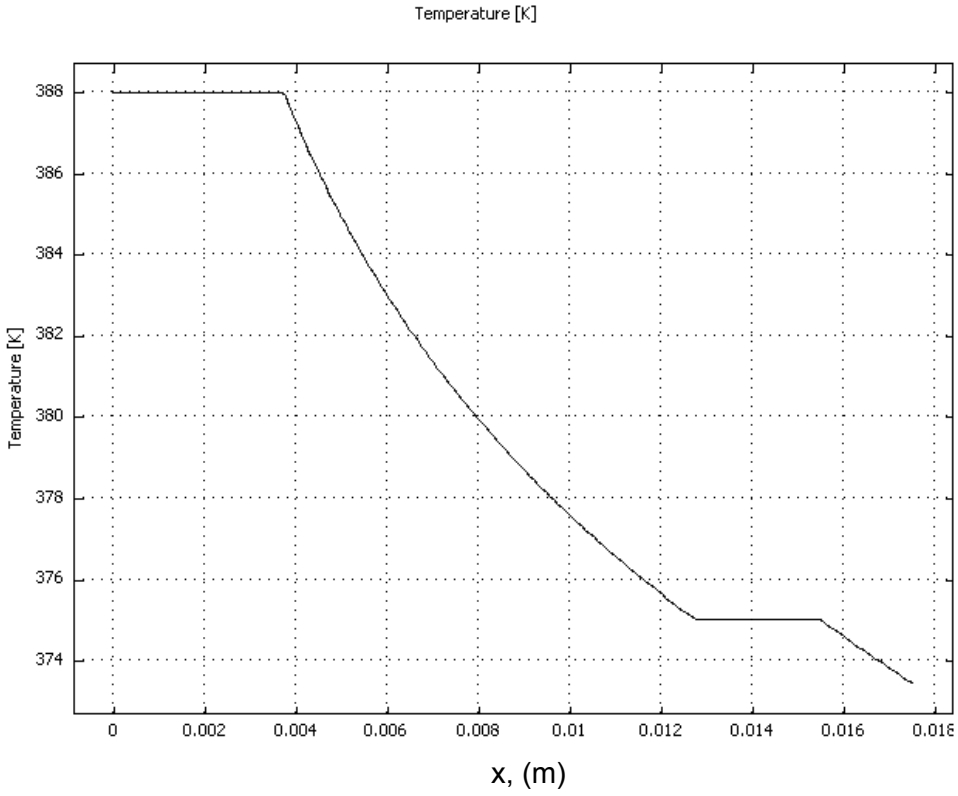
8.3.2.2 K_G = 2,5 °K.m/W



Şekil 8.30: K_G = 2,5 °K.m/W toprak koşullarında 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç tane kablo durumunda sıcaklık dağılımı



Şekil 8.31: K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablonun sıcaklık dağılımı



Şekil 8.32: K_G = 2,5 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı

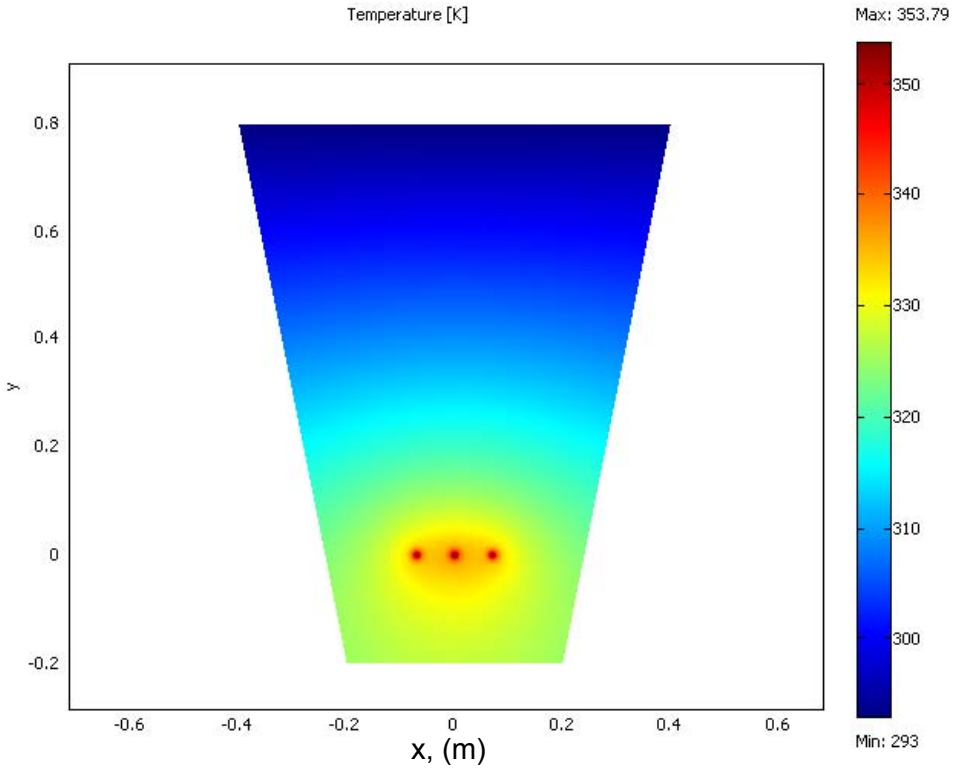
Kablolar, nem oranı az olan bir toprağa gömüldüğünde, kablonun dış ısıl direnci artacağından, çevreye atılan ısı miktarı da azalır ve kablo sıcaklık değeri yükselir.

Şekil 8.31'e bakıldığında kablolara ait en yüksek sıcaklık değerinin, beklendiği gibi ortadaki kablonun iletkeninde olduğu görülür. Ortadaki kablonun sıcaklık dağılımının verildiği Şekil 8.32'ye göre, iletken sıcaklığının 387,98 °K, yalıtkan sıcaklığının ise bu değerle 374,98 °K değerleri arasında değiştiği görülür. Sağdaki ve soldaki kablolar ise 383,83 °K iletken sıcaklığına sahiptirler.

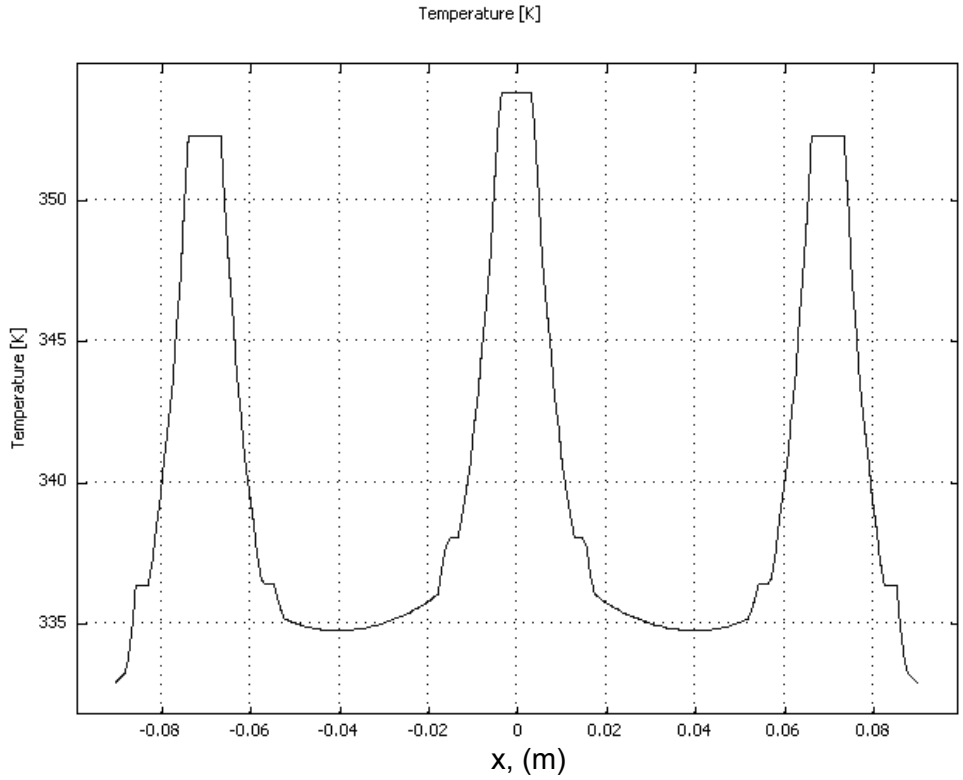
Sağdaki ve soldaki kablo yalıtkanlarının ortadaki kablo tarafındaki en düşük sıcaklıkları 370,5 °K dir. Diğer tarafta ise bu sıcaklık 0,1 °K daha düşüktür. PVC dış kılıfın toprakla temas ettiği nokta sıcaklıklarına bakılırsa, ortadaki kablo için 373,42 °K, diğer kabloların ortadakine yakın tarafında 369,7 °K iken, öbür taraflarında 367,62 °K'dir.

Ortadaki kablonun yalıtkanının sıcaklığı olan 387,98 °K, izin verilen en yüksek sıcaklık değerinin oldukça üzerindedir. Dolayısıyla kablolar eğer 7 cm aralıklarla bu özelliklerde toprağa yerleştirilirse 214 A ile yüklenmesi ısıl delinmeye sebep olur.

8.3.2.3 K_G = 0,7 °K.m/W

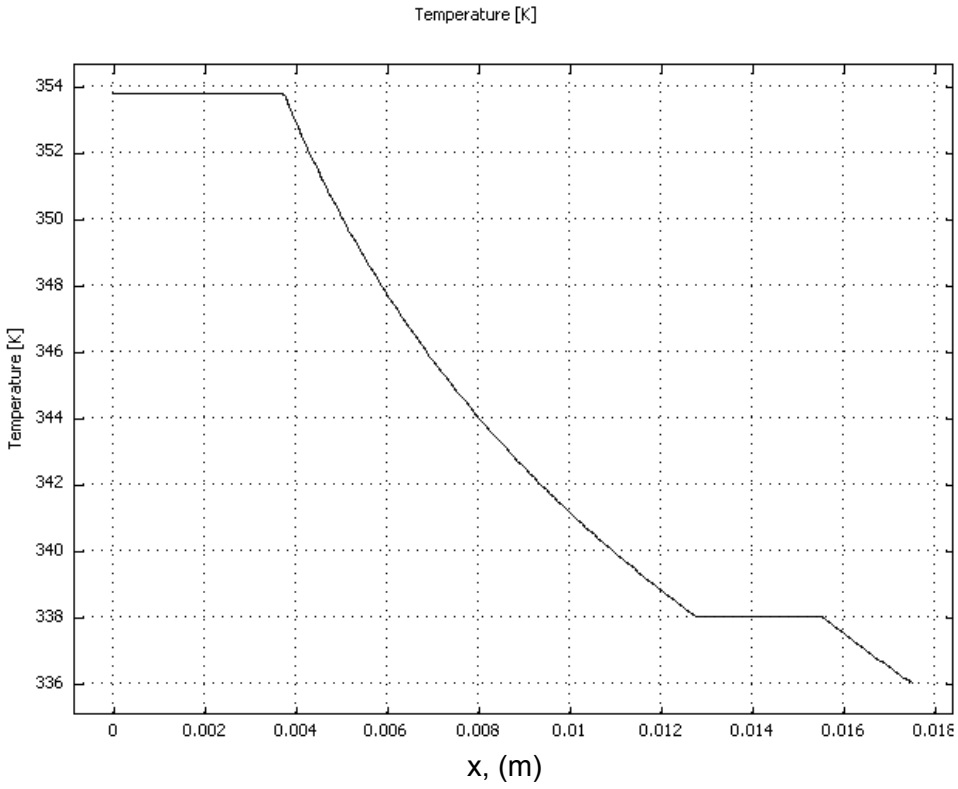


Şekil 8.33: K_G = 0,7 °K.m/W toprak koşullarında 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç tane kablo durumunda sıcaklık dağılımı



.

Şekil 8.34: K_G = 0,7 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablonun sıcaklık dağılımı



Şekil 8.35: K_G = 0,7 °K.m/W olan toprakta 7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş üç kablodan ortadakinin sıcaklık dağılımı

Kabloların gömüldüğü toprak oldukça nemli ise, ısıl direnci düşük olacağı için akım değeri aynı olduğunda, kablolardaki termik zorlanma ve sıcaklık daha az olur (Şekil 8.33).

Şekil 8.34'deki sıcaklık dağılımından görüldüğü gibi, kablolar arasındaki yatay uzaklık 7 cm ve K_G = 0,7 °K.m/W durumunda, en yüksek sıcaklık ortadaki kablonun iletkenindedir ve 353,79 °K'dir. Bu kablonun yalıtkan sıcaklığı bu değerle 338 °K arasındadır (Şekil 8.35). Diğer kablolarda ise iletken sıcaklıkları 352,22 °K'dir. Sağdaki ve soldaki kablolarda yalıtkandaki en düşük değer 336,32 °K dir. Ortadaki kablonun PVC dış kılıfının toprakla temas ettiği noktada sıcaklık 336 K, diğer kablolarda ise bu değer, ortadaki kablo tarafında 335,1 diğer tarafta ise 333,3 °K'dir

7 cm aralıklarla yan yana döşenmiş kabloların farklı toprak ısıl özdirenç değerine sahip topraklardaki ısıl dağılımları bulunmuştur.

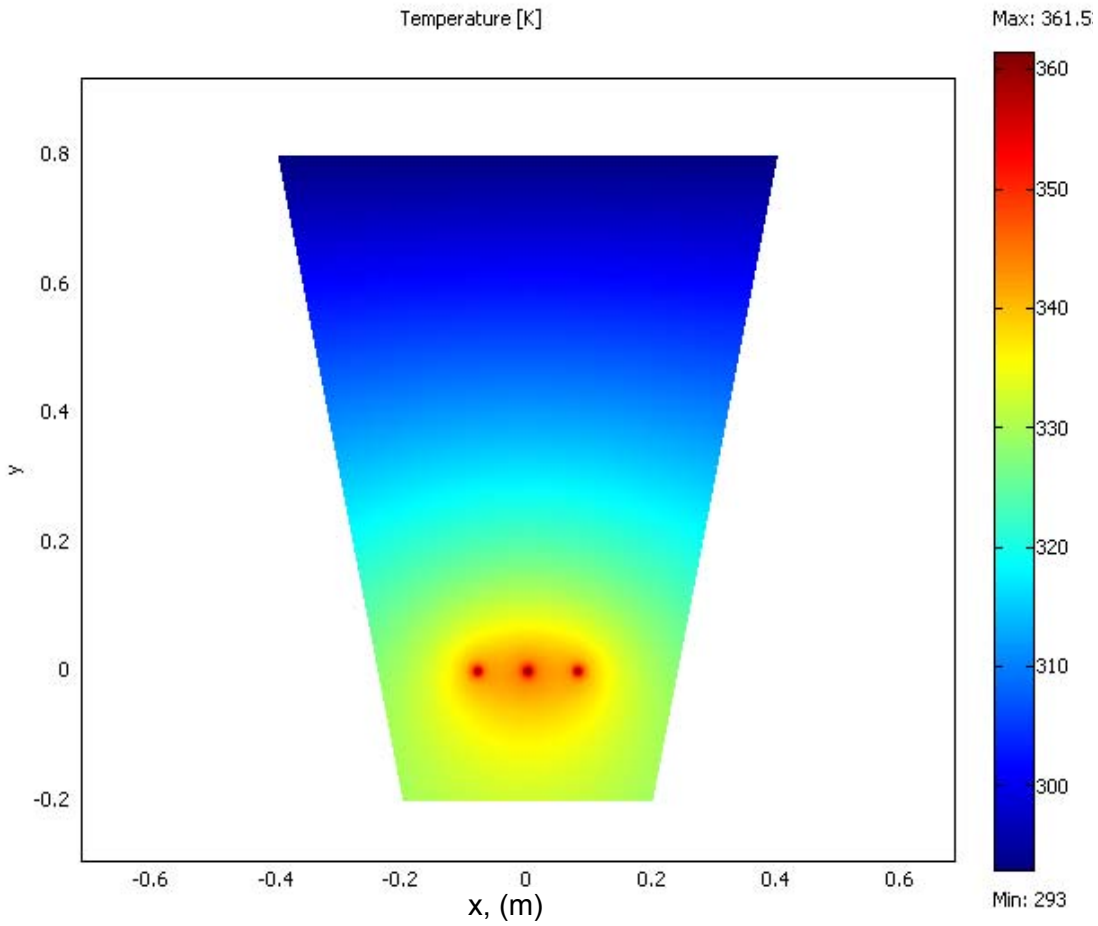
Buna göre bu kabloların K_G = 2,5 °K.m / W olan toprakta yüksek değerde termik zorlamaya sebep olduğu için akım taşıma kapasitesi olarak verilen 214 A in altında, K_G = 1 °K.m / W olan toprakta 214 A civarında, K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta ise bu değerin üstünde yükleneceği bulunmuş olur.

8.3.3 Kablodaki Sıcaklığın Kablolar Arası Uzaklıkla Değişimi

Birden fazla kablo döşenmesi durumunda, kablolar hem kendi kayıpları hem de diğer kabloların etkileri sebebiyle ısınırlar. Isıl direnç, uzunlukla arttığı için, kablolar arasındaki açıklığın arttırılması durumunda artması ve kabloların daha az ısınması beklenir.

Kablolar arasındaki açıklık 7 cm iken (K_G = 1 °K.m/W) ortadaki kablo iletken sıcaklığı 362,193 °K olarak bulunmuştu.

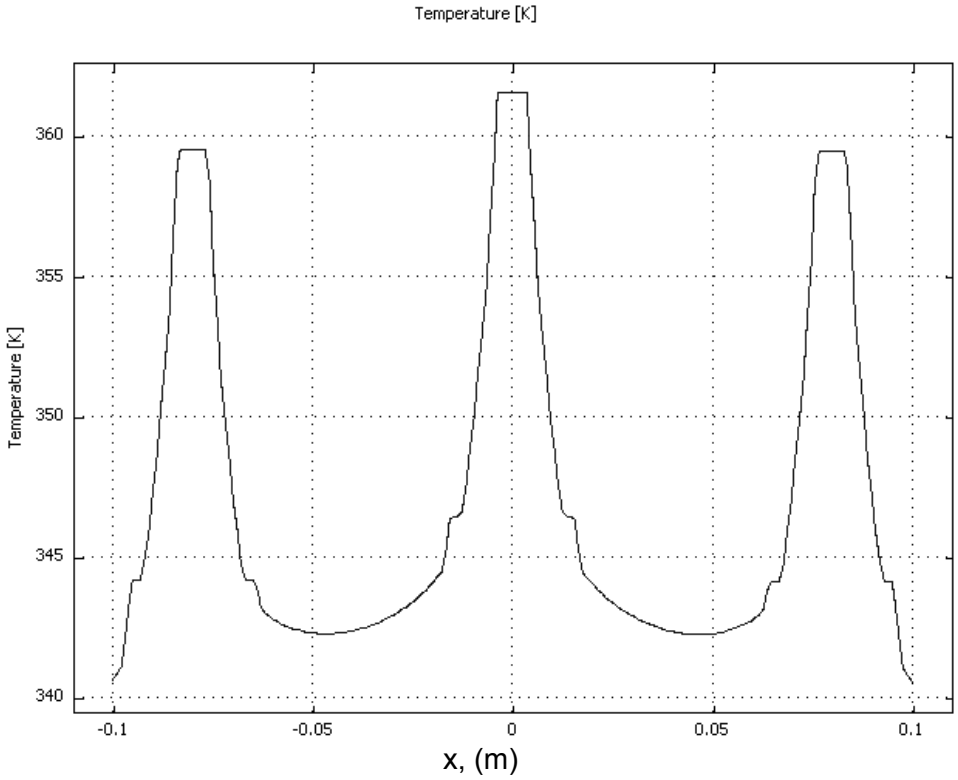
8.3.3.1 Kablolar Arası Uzaklık 8 cm iken



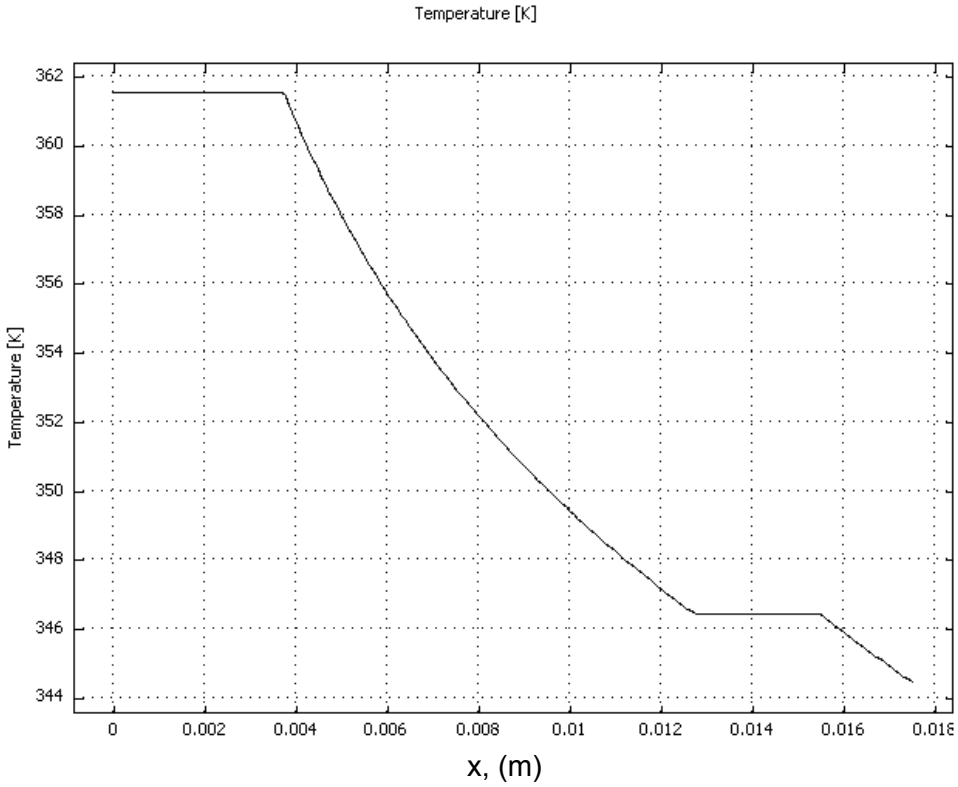
Şekil 8.36: Kablolar arasındaki uzaklık 8 cm olduğunda sıcaklık dağılımı

Kablolar arasındaki açıklık 8 cm olduğunda, ortadaki kablodaki en yüksek sıcaklık Şekil 8.36'ya göre 361,59 °K'dir. Sağdaki ve soldaki kabloların en yüksek iletken sıcaklıkları ise 359,6 °K dir (Şekil 8.37).

.



Şekil 8.37: Kablolar arası uzaklık 8 cm iken yan yana üç kablonun sıcaklık dağılımı

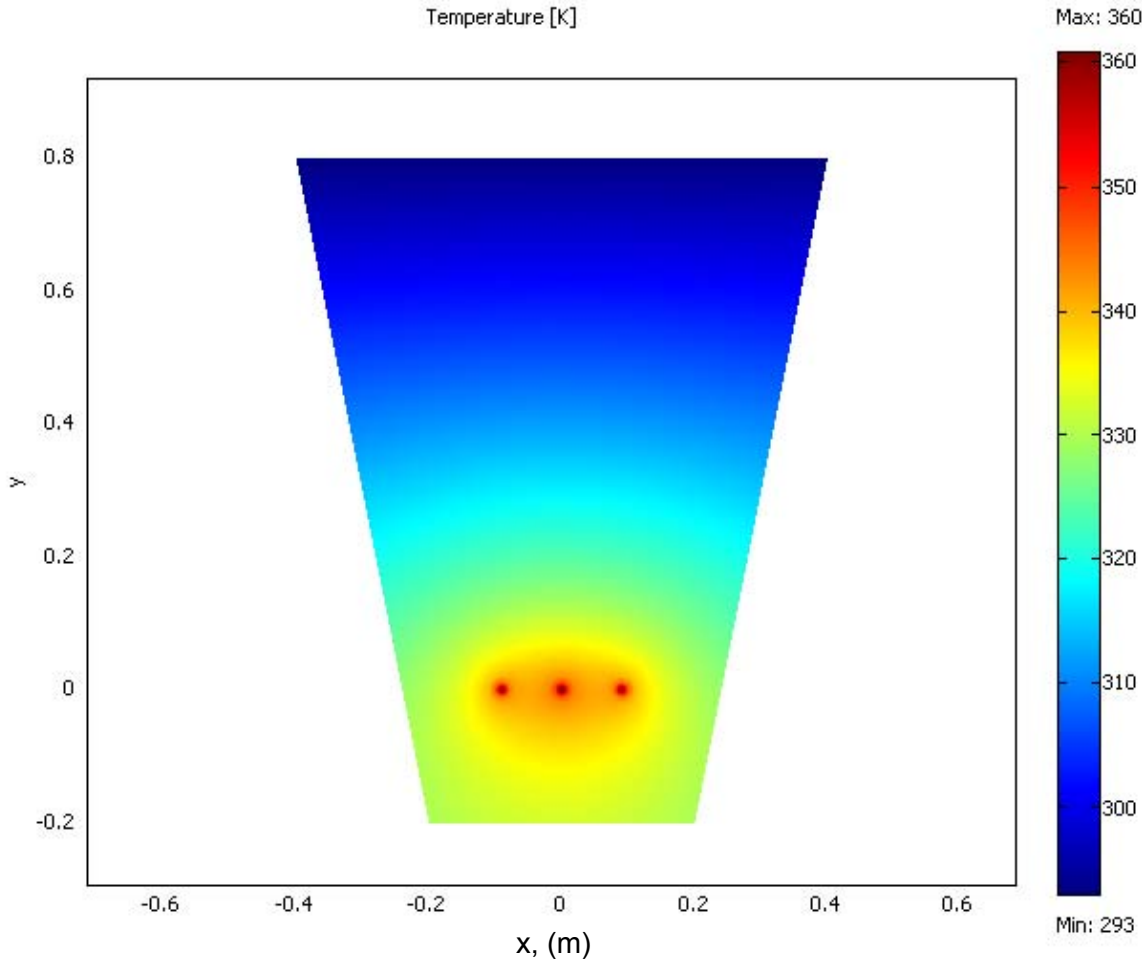


Şekil 8.38: Kablolar arası uzaklık 8 cm iken ortadaki kablonun sıcaklık dağılımı

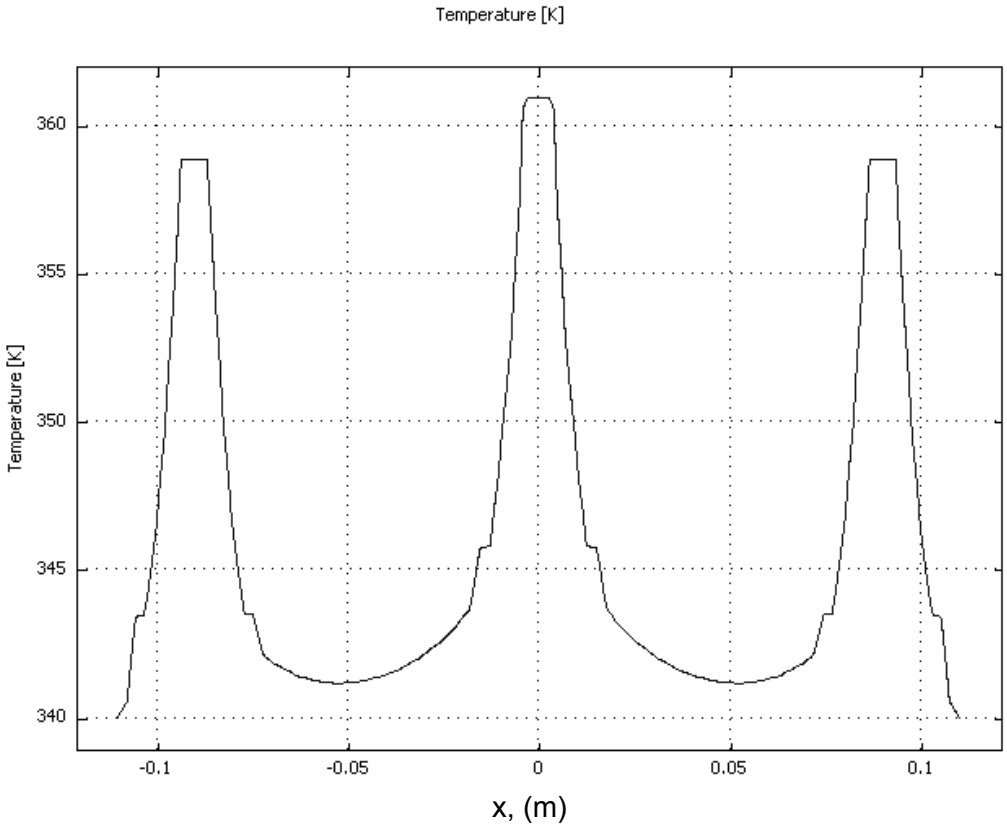
Şekil 8.38'de sıcaklık dağılımı verilen ortadaki kablo yalıtkanının en düşük sıcaklığı 346,4 °K iken, diğer kabloların en düşük yalıtkan sıcaklığı, ortadaki kablo tarafında 344,12 °K iken, diğer tarafta ise sıcaklık bu değerden çok az daha düşüktür.
Ortadaki kablonun PVC dış kılıfının toprakla temas ettiği noktada sıcaklık değeri, 344,42 °K iken, diğer kabloların ortadaki kablo tarafında sıcaklık 342,94 K, diğer taraflarında ise 341,15 °K'dir. Kablolar arasındaki uzaklık 7 cm olduğunda, ortadaki kablonun iletkeni diğer kablolardan 2,083 °K daha sıcakken, kablo açıklığı 8 cm yapılınca kablo sıcaklıkları arasındaki fark 2 °K'e düşmüştür. Kablolar arasındaki uzaklık arttıkça birbirlerine olan ısıl etkileri azalmaktadır.

8.3.3.2 Kablolar Arası Uzaklık 9 cm iken

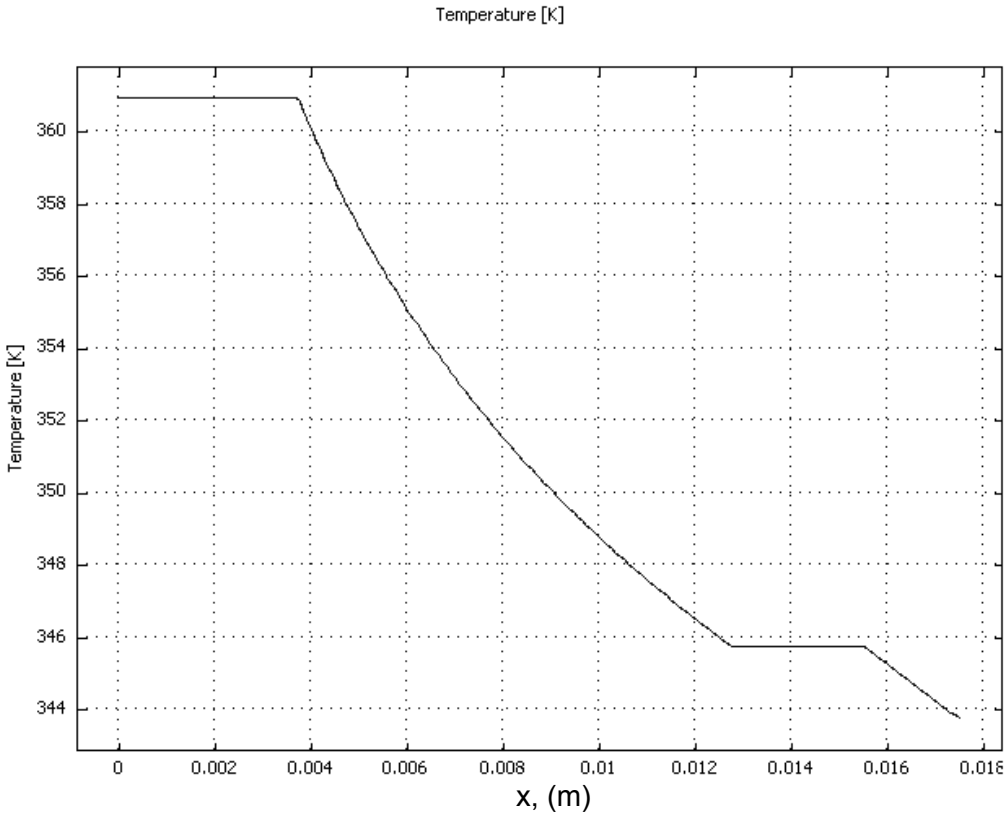
Kablolar arasındaki açıklık 1 cm daha arttırılarak 9 cm olduğunda, kablolardaki en yüksek sıcaklık değeri ortadaki kablo iletkeninde 360,8 °K dir (Şekil 8.39).



Şekil 8.39: Kablolar arasındaki uzaklık 9 cm olduğunda sıcaklık dağılımı



Şekil 8.40: Kablolar arası uzaklık 9 cm iken sıcaklık dağılım grafiği

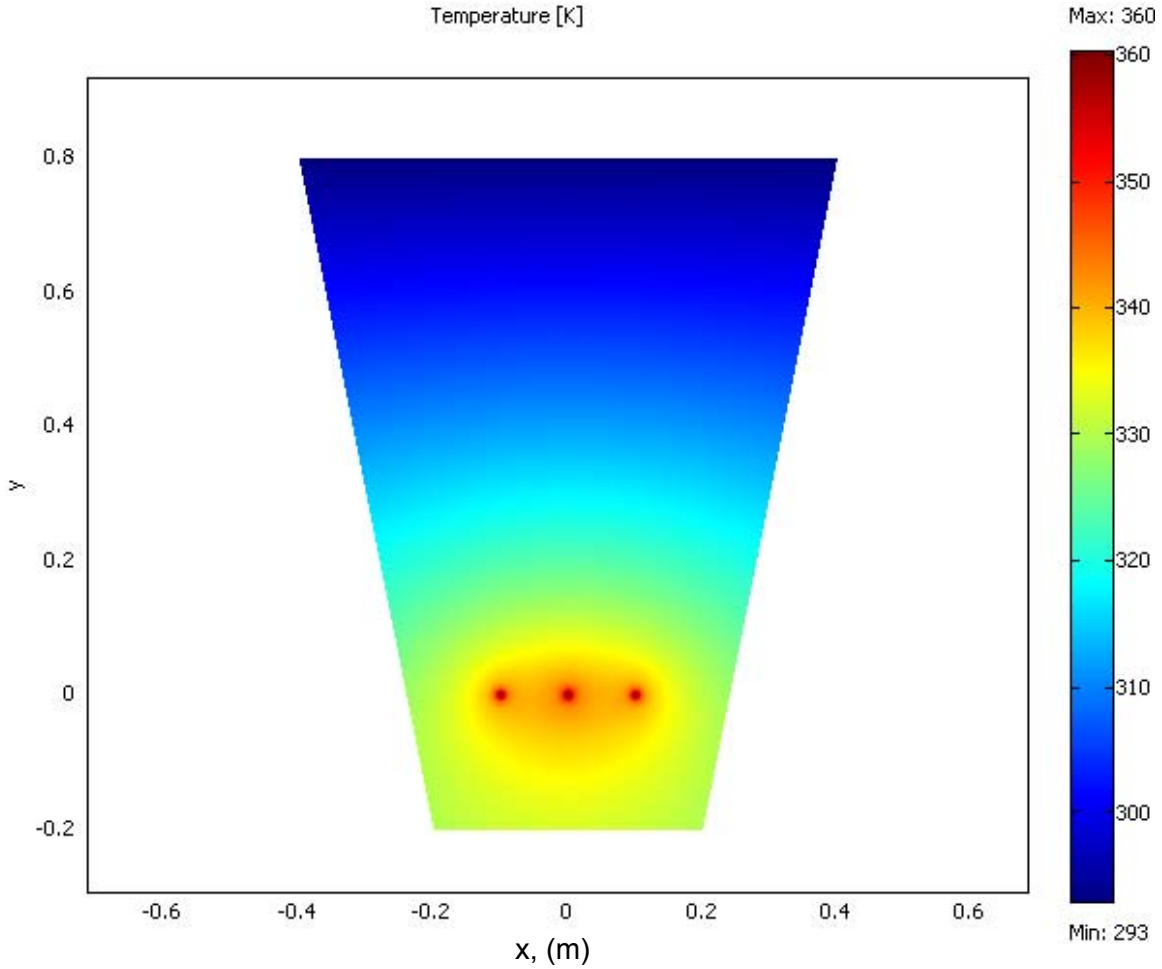


Şekil 8.41: Kablolar arası uzaklık 9 cm iken ortadaki kablonun sıcaklık dağılım grafiği

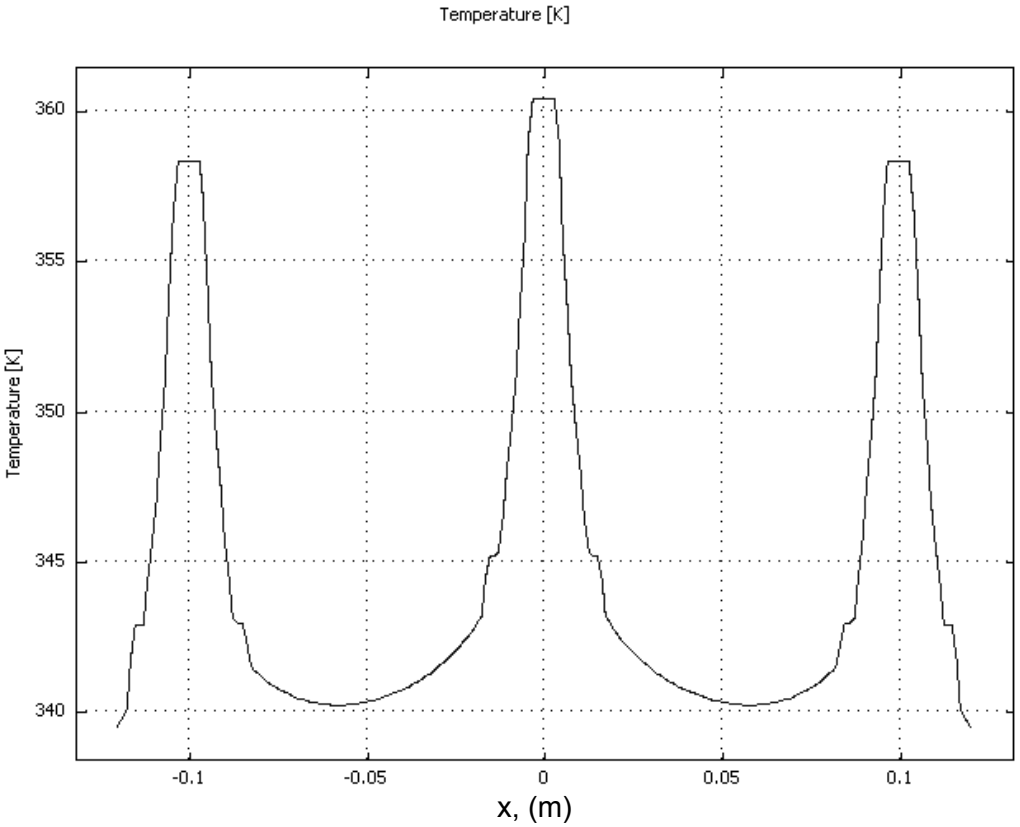
Sağdaki ve soldaki kablolardaki iletken sıcaklıkları ise 358,9 °K dir (Şekil 8.40). İletken sıcaklıkları arasındaki fark biraz daha azalarak 1,9 °K olmuştur. Ortadaki kablonun yalıtkan sıcaklığı 360,8 – 345,74 °K arasında değişmektedir. Ortadaki kablonun PVC dış kılıfının toprakla temas ettiği noktada sıcaklık 343,73 °K diğer kabloların ortadakine yakın tarafında bu sıcaklık 342,1 °K iken diğer tarafta ise 340,6 °K dir (Şekil 8.41). Kablolar arası uzaklık 1 cm daha arttırıldığında kabloların birbirleri üzerindeki ısıl etkileri daha da azalmış, iletken sıcaklıkları arasındaki fark 1,9 °K e inmiştir.

8.3.3.3 Kablolar Arası Uzaklık 10 cm iken

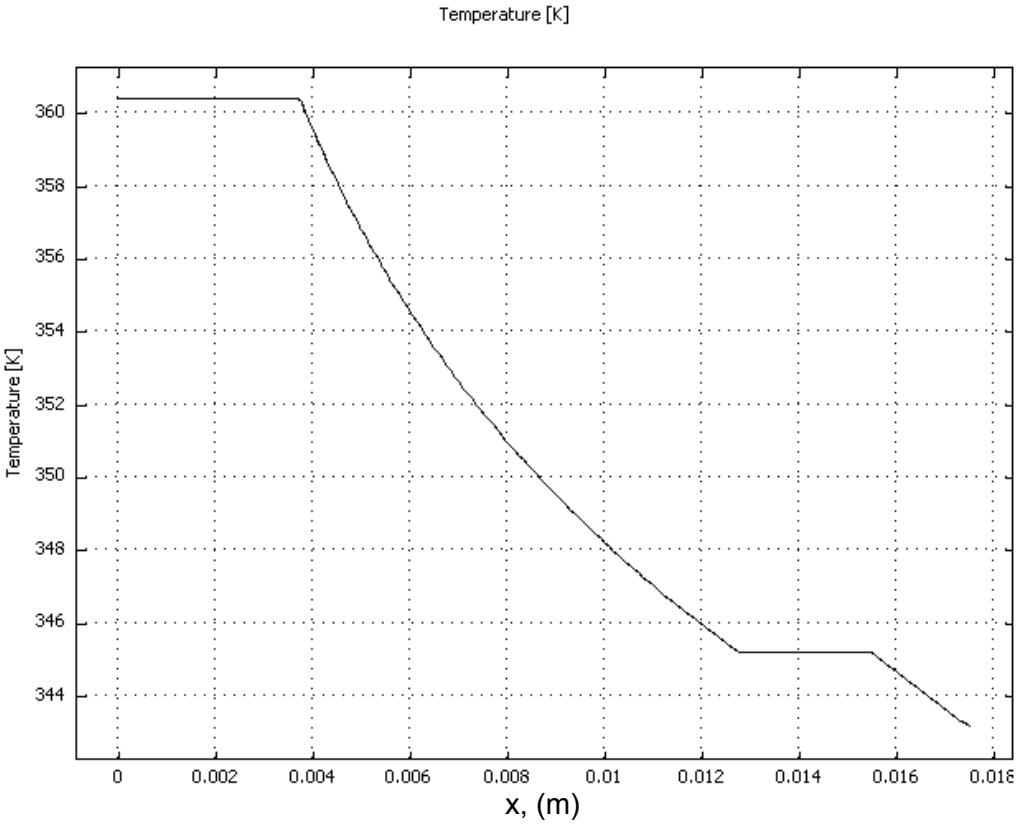
K_G = 1 °K.m/W olan toprakta kablolar arasındaki uzaklık 1 cm daha arttırılıp 10 cm olduğunda, Şekil 8.42' den görüldüğü gibi ortadaki kablonun iletkenindeki sıcaklık 360,3 K, diğer kabloların iletken sıcaklıkları ise 358,45 °K dir.



Şekil 8.42: Kablolar arası uzaklık 10 cm iken sıcaklık dağılımı



Şekil 8.43: Kablolar arası uzaklık 10 cm kabloların sıcaklık dağılımı



Şekil 8.44: Kablolar arası uzaklık 10 cm iken ortadaki kablonun sıcaklık dağılımı

Şekil 8.43'ten görüldüğü gibi kablolar arasındaki uzaklık 10 cm olduğunda, sağdaki ve soldaki kabloların iletken sıcaklıkları, ortadaki kablodan 1,85 °K daha düşüktür. Daha önceki kablo açıklıklarıyla kıyasla ortadaki kablonun sıcaklığı ve diğer kablolarla arasındaki sıcaklık farkı daha da azalmıştır.

Ortadaki kablonun yalıtkanındaki en düşük sıcaklık değeri 345,16 K,diğer kabloların ortadakine yakın tarafında sıcaklık 342,9 °K iken diğer tarafında bu değerden çok az daha düşüktür (Şekil 8.44).

Ortadaki kablo için PVC dış kılıfının toprakla temas ettiği noktadaki sıcaklık ise 343,12 °K dir. Bu değer de kabloların birbirleri üzerindeki ısıl etkileri uzaklık arttıkça azaldığı için kablolar arasındaki uzaklığın daha az olduğu yerleşimlere göre daha düşüktür.

Tablo 8.7: Kablolar arasındaki uzaklıklara göre kabloların sıcaklıkları

	Kablo İletken Sıcaklıkları				
Kablolar arası uzaklık	**Ortadaki kablo**		**Sağ ve soldaki kablolar**		**Sıcaklık farkı**
cm	K	ºC	K	ºC	ºC
7	362,193	89,193	360,11	87,11	2,08
8	361,59	88,59	359,6	86,6	2
9	360,8	87,8	358,9	85,9	1,9
10	360,3	87,3	358,45	85,45	1,85

Tablo 8.7'deki değerlerden görüldüğü gibi kablolar arasındaki uzaklık arttıkça, kablo üzerinde diğer kabloların ısı etkisi azalır ve bu sebeple kabloların sıcaklıkları düşer.

Bunun göstergesi ise, uzaklık arttıkça, ortadaki kabloyla diğer kablolar arasındaki sıcaklık farkının azalmasıdır. 7 cm için bu fark 2,08 ºC iken 10 cm için 1,85 ºC e düşmüştür.

Sonuç olarak malzeme özellikleri, ısıl ve elektriksel özellikler ve toprağın özellikleri aynı kalmak üzere, kablolar gömülürken aralarında bırakılan uzaklık arttıkça, kabloların sıcaklıkları ve ortadaki kablonun diğer kablolarla arasındaki sıcaklık farkı azalır.

Kablolar arasındaki yatay açıklık daha da arttırıldığında ortadaki kablo sıcaklığı, azalmaya devam edecek ve diğer kabloların sıcaklıkları bu kablonun sıcaklığına yaklaşacaktır. Sonunda üç kablonun da sıcaklıkları aynı olacaktır.

2003 yılında C. C. Hwang'ın yaptığı [9] çalışmasında doğrudan toprağa gömülmüş kablo ile PVC boru içine gömülmüş kablonun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak

ısıl analizi yapılmıştır. Isıl analiz, kablonun dış yüzeyiyle, borunun iç yüzeyi arasında ışımayla ısı transferi dolayısıyla lineer değildir. Bu yüzden, problemin sonlu elemanlar çözümü için Newton – Raphson iterasyon yöntemi kullanılmıştır. Yapılan ısıl analiz sonucunda, yatay olarak yan yana döşenmiş kabloların birbirlerine olan ısıl etkilerinden dolayı hem doğrudan gömülmüş, hem de PVC boru içine gömülmüş kablolarda ortadaki kablonun diğer kablolardan daha yüksek sıcaklıkta olduğu görülmektedir. Diğer bir sonuç ise, PVC borunun getirdiği ek ısıl direnç dolayısıyla, doğrudan gömülmüş kabloya göre soğumasının daha zor olduğu ve 17,7 ºC daha sıcak olduğudur.

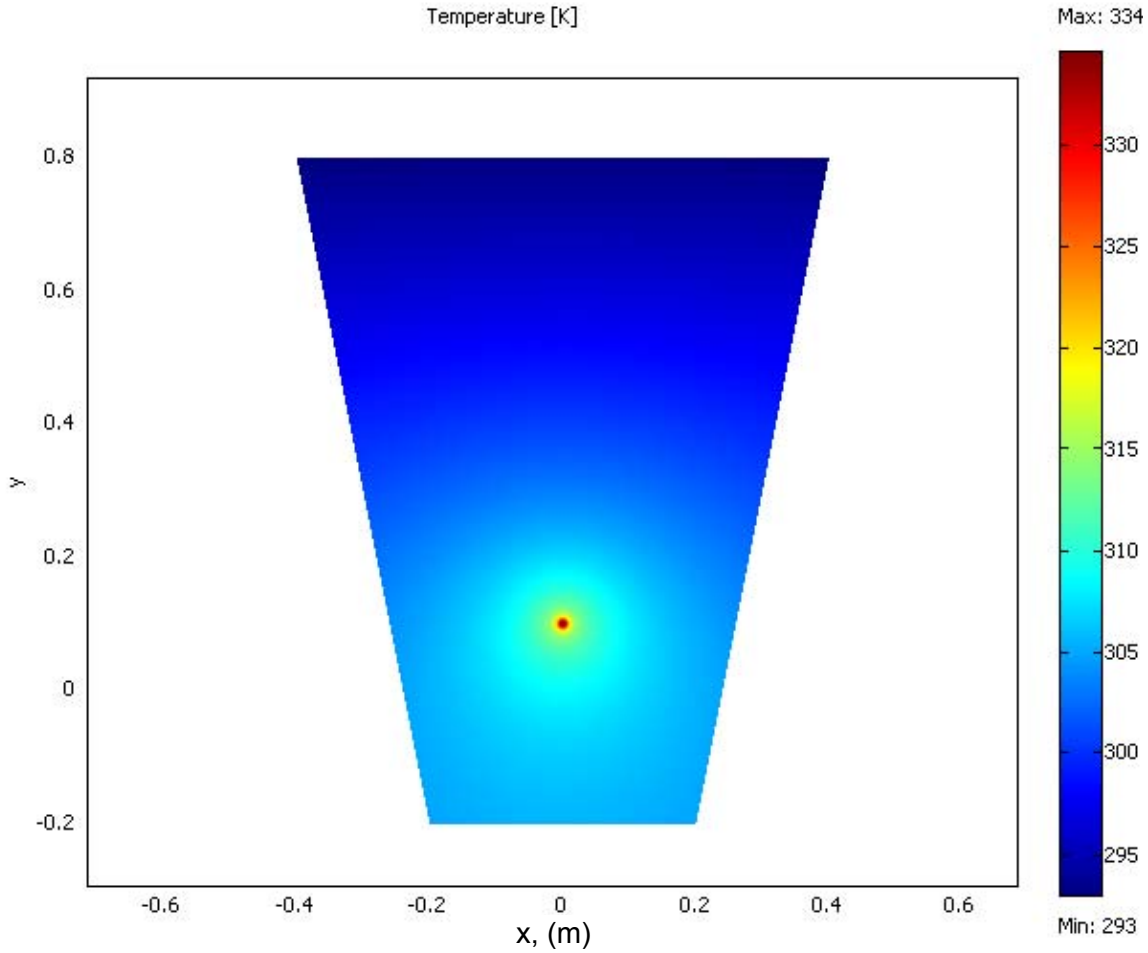
Benzer bir çalışmada ise kablolar arasındaki yatay uzaklığın ve kablo çapının ısıl dağılımı ne şekilde değiştirdiği araştırılmıştır. Buna göre aynı kablo boyutları için ortadaki kablo diğerlerinden daha az soğuyabilir. Ortadaki kablo çapının büyütülmesi, bu kablodan dışarıya atılan ısıyı arttırırken, diğer kablolar daha az soğuyabilir. Sağdaki ve soldaki kabloların çapları arttığında ise ortadaki kablonun sıcaklığı artar [35].

8.3.4 Kablo Gömülme Derinliği – Sıcaklık Dağılımı

Kabloların gömülme derinliği genel olarak 0,7 – 1,2 m arasındadır. Çalışmanın buraya kadarki bölümünde, kablolar hep 80 cm derinlikteyken, sıcaklık dağılımları incelendi.

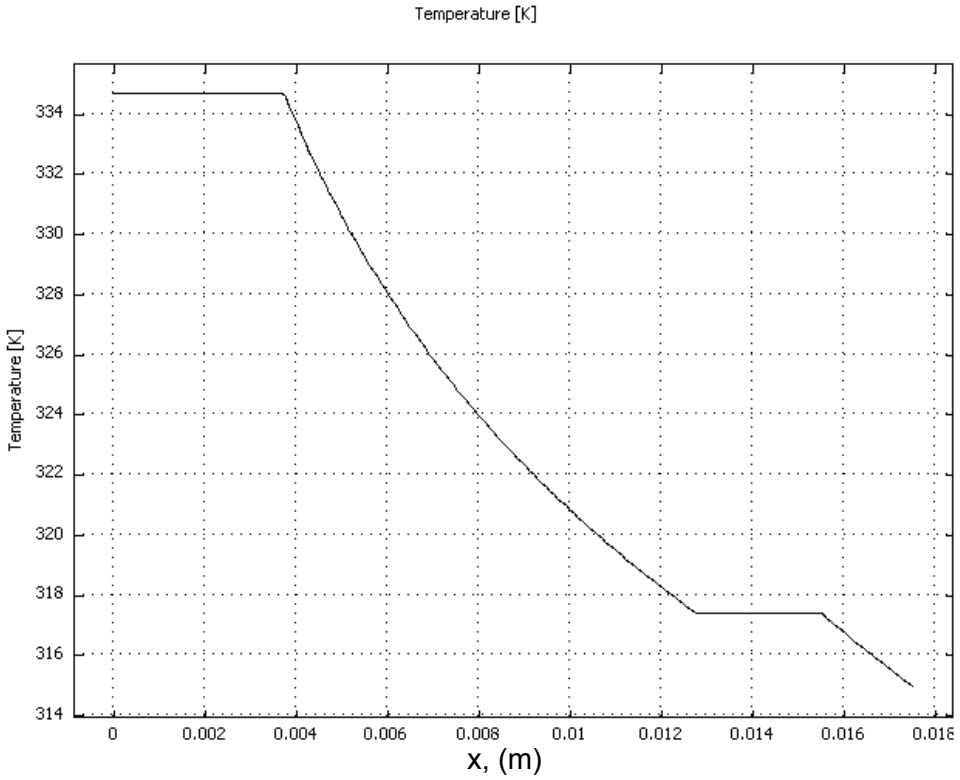
Kablo tek olarak 80 cm derinlikteyken, 1 °K.m/W ısıl özdirençli toprakta en yüksek iletken sıcaklığı 336 °K olarak bulunmuştu. Kablonun elektriksel, ısı özellikleri ve toprağın özellikleri aynı kalmak üzere, sadece kablonun gömülme derinliği değiştirilecektir.

8.3.4.1 Gömülme Derinliği 70 cm



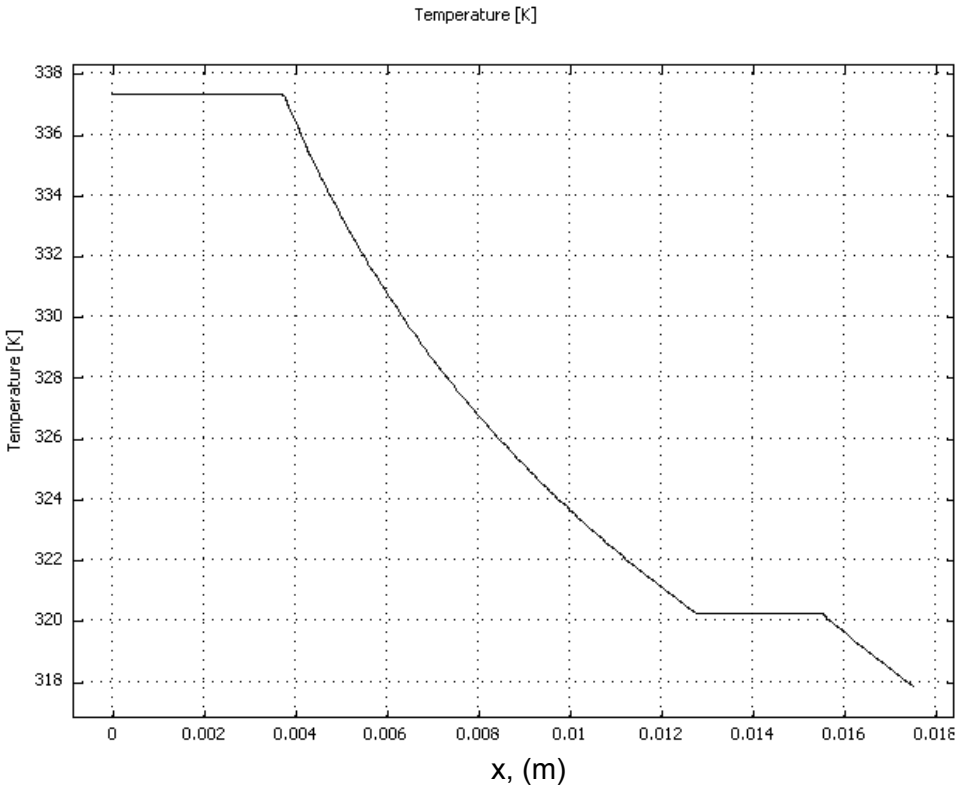
Şekil 8.45: Kablo 70 cm derinliğe gömüldüğünde

Kablo 70 cm derinliğe gömüldüğünde, iletken sıcaklığı 334,676 °K olarak bulunur (Şekil 8.45). En düşük yalıtkan sıcaklığı ise Şekil 8.46'dan görüldüğü gibi 317,33 °K'dir. PVC dış kılıfın toprakla temas ettiği noktada ise sıcaklık 314,9 °K dir. Sonuç olarak, kablo 10 cm daha yukarı gömüldüğünde, sıcaklığı azalmıştır.



Şekil 8.46: 70 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı

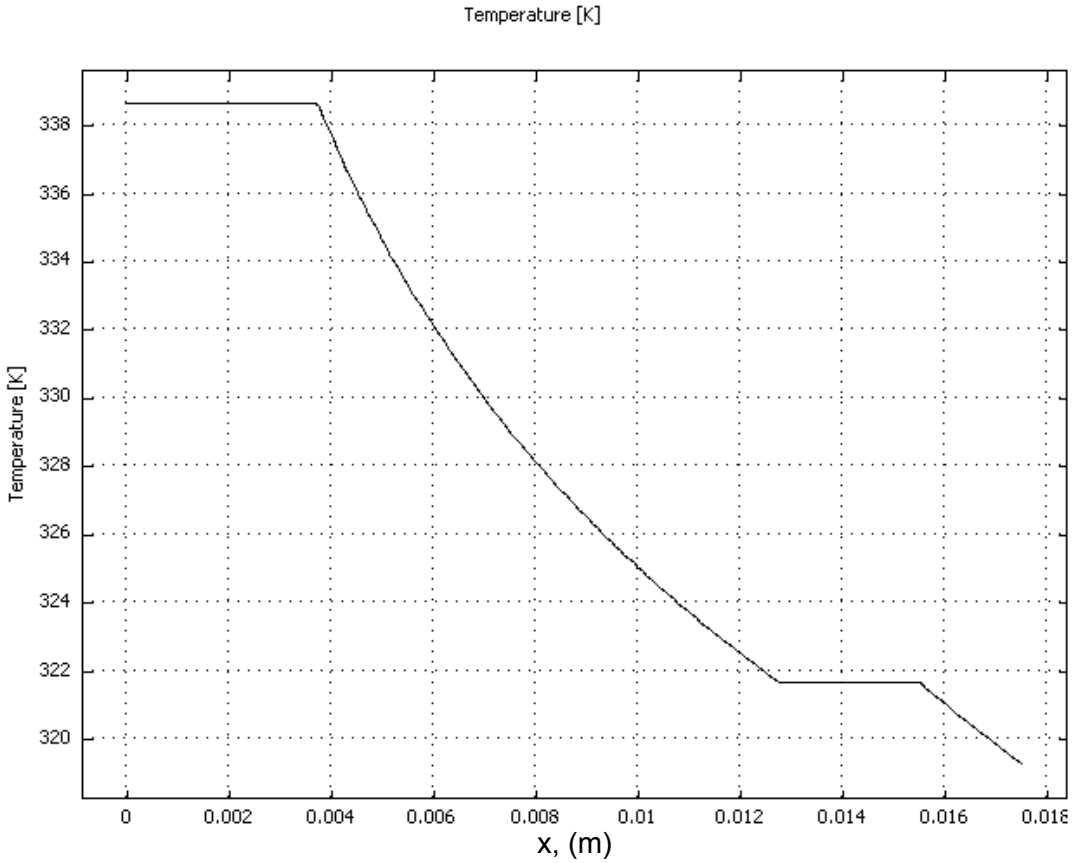
8.3.4.2 Gömülme Derinliği 90 cm



Şekil 8.47: 90 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı

Kablo 90 cm derinliğe gömüldüğünde, kablo iletken sıcaklığı 337,324 °K'e yükselmiştir. En düşük yalıtkan sıcaklığı 320,23 K, PVC dış kılıfın toprakla temas ettiği noktada sıcaklık ise, 317,8 °K'dir (Şekil 8.47). Buna göre, kablo 80 cm yerine 90 cm derinliğe gömülürse, sıcaklığı artar.

8.3.4.3 Gömülme Derinliği 100 cm

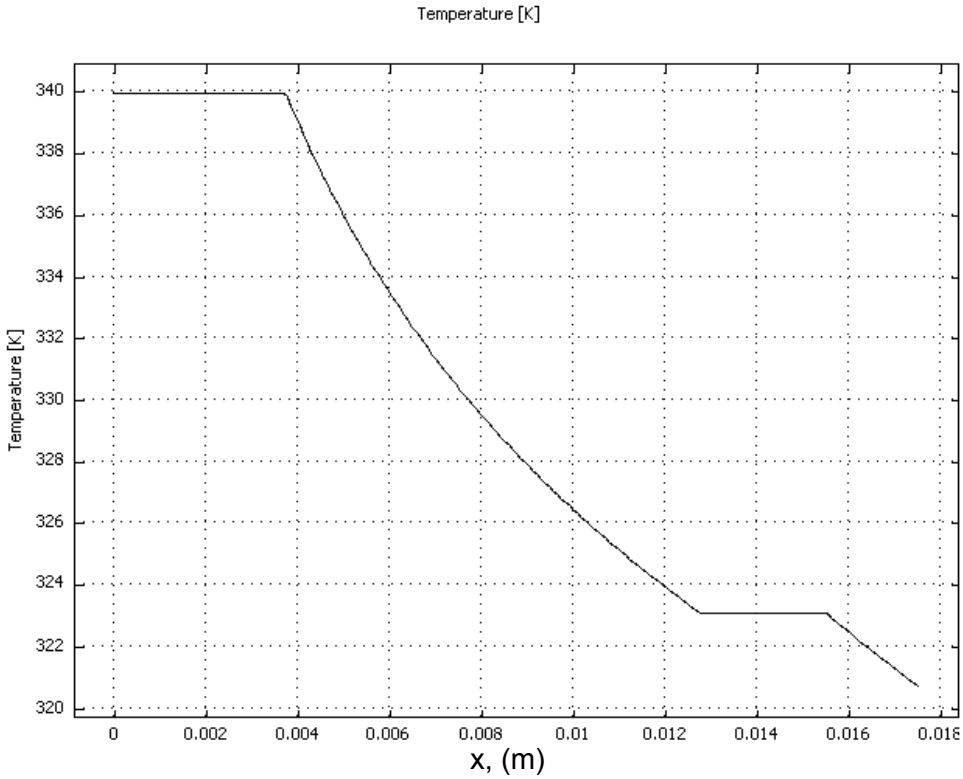


Şekil 8.48: 100 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı

Kablo gömülme derinliği 10 cm daha arttırılarak 100 cm olduğunda, sıcaklık biraz daha artarak kablo iletkeninde 338,62 °K olur. Yalıtkanın en düşük değeri Şekil 8.48'e göre 321,6 °K, PVC kılıfın toprakla temas ettiği noktada ise sıcaklık 319,23 °K olarak bulunur.

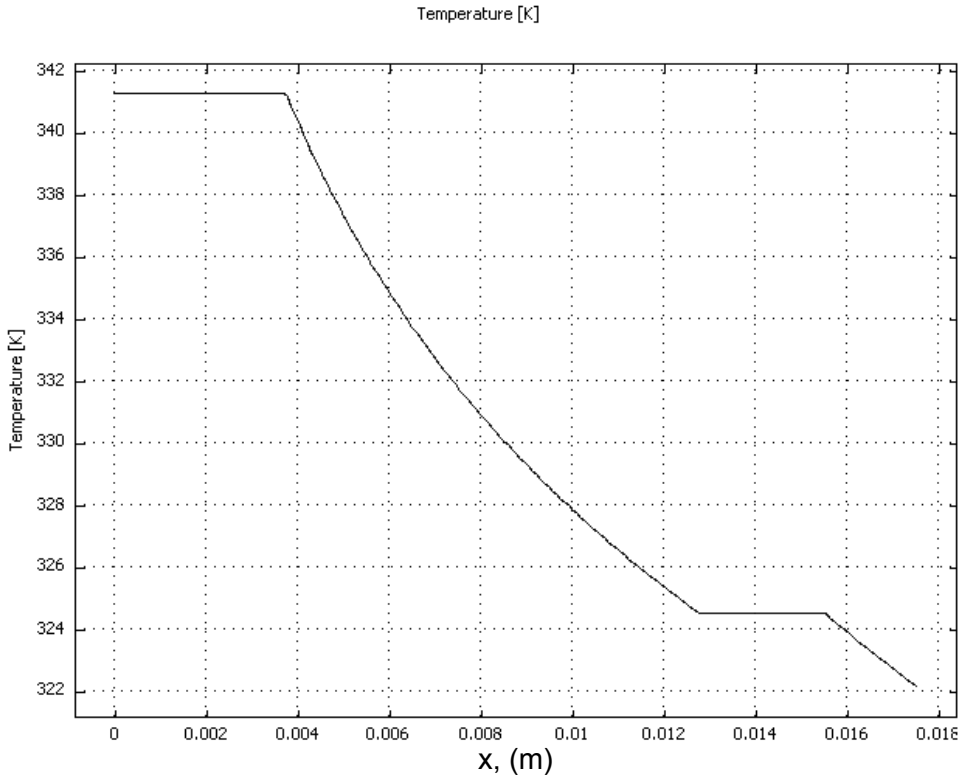
8.3.4.4 Gömülme Derinliği 110 cm

Kablo 10 cm daha derine gömüldüğünde, kablo iletken sıcaklığının 339,94 °K olduğu görülür. Kablo bu derinliğe gömüldüğü zaman en düşük yalıtkan sıcaklığı 323 °K, PVC kılıftaki en düşük sıcaklık ise 320 °K değerine yükselmiştir. Şekil 8.49'da kablo 110 cm derinlikteyken, kablodaki sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 8.49: 110 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı

8.3.4.5 Gömülme Derinliği 120 cm



Şekil 8.50: 120 cm derinliğe gömülmüş kablonun sıcaklık dağılımı

Kablolar en fazla 120 cm derinliğe gömülürler. Ancak, kablonun bu derinliğe gömülmesi pek kolay olmadığı için, genelde bu derinliğe döşeme yapılmaz.
Analiz sonucunda, bu gömülme derinliğinde, kablo iletken sıcaklığı 341,275 °K olarak bulunur. En düşük yalıtkan sıcaklığı 324,5 °K, PVC yalıtkanın en düşük sıcaklığı ise 322,12 °K dir (Şekil 8.50).

Tablo 8.8: Kabloların gömülme derinlileriyle iletken sıcaklıklarının değişimi

Kablo Gömülme Derinliği	**Kablo İletken Sıcaklığı**	
cm	**°K**	**°C**
70	334,676	61,676
80	336	63
90	337,324	64,324
100	338,62	65,62
110	339,94	66,94
120	341,275	68,275

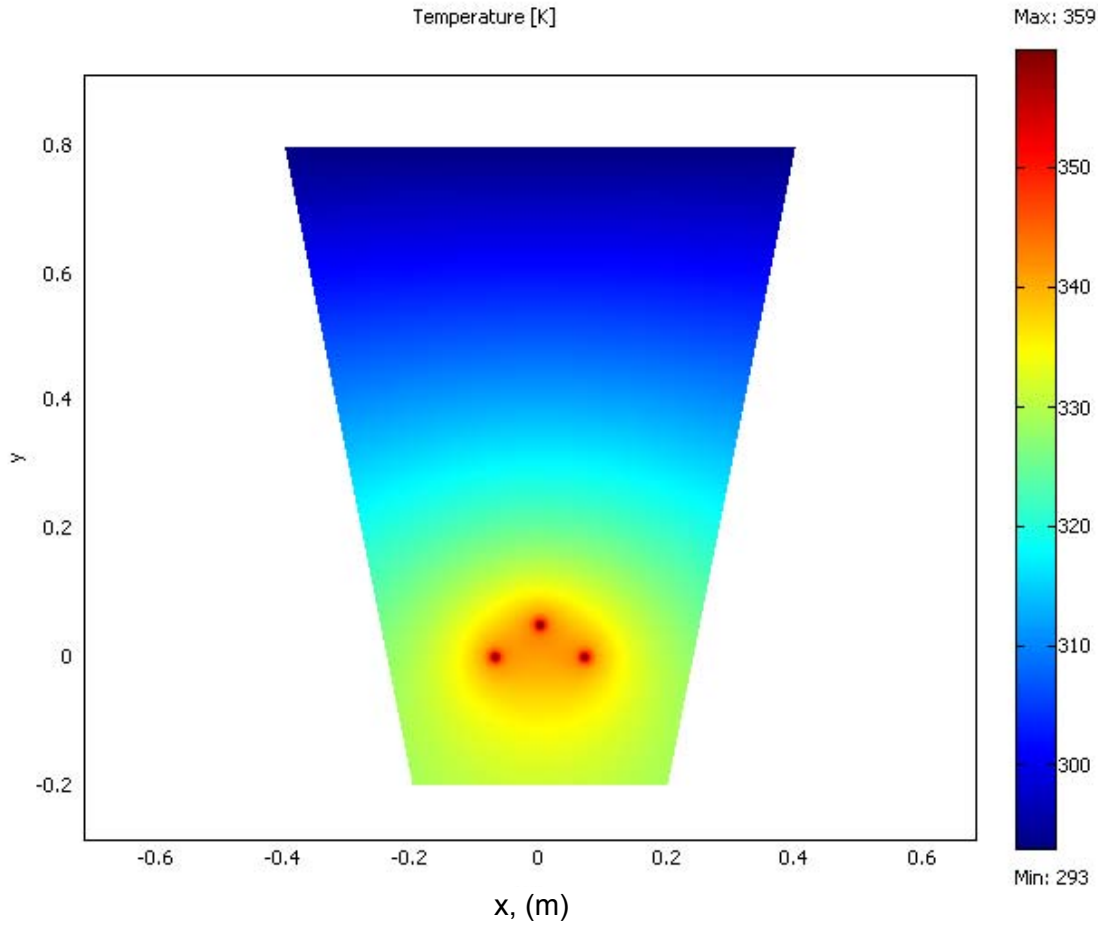
Kabloların gömülme derinliğindeki değişime karşılık, sıcaklık dağılımındaki dağılımın araştırıldığı bu bölümde bulunan değerlere göre (Tablo 8.8), kablonun gömülme derinliği arttıkça sıcaklığının arttığı bulunmuş olur.
Sadece ısıl olarak düşünülürse, kablonun gömülme derinliğinin az olması daha uygundur. Ancak, bu durumda kablolar özellikle mekanik olarak, risk altında kalırlar. Dış etkilere daha çok maruz kalırlar. Kablolardaki hasarlar artar.

8.3.5 Ortadaki Kablonun Gömüme Derinliği Değiştirilirse

8.3.5.1 Ortadaki Kablo 5 cm Yukarıya Döşenirse

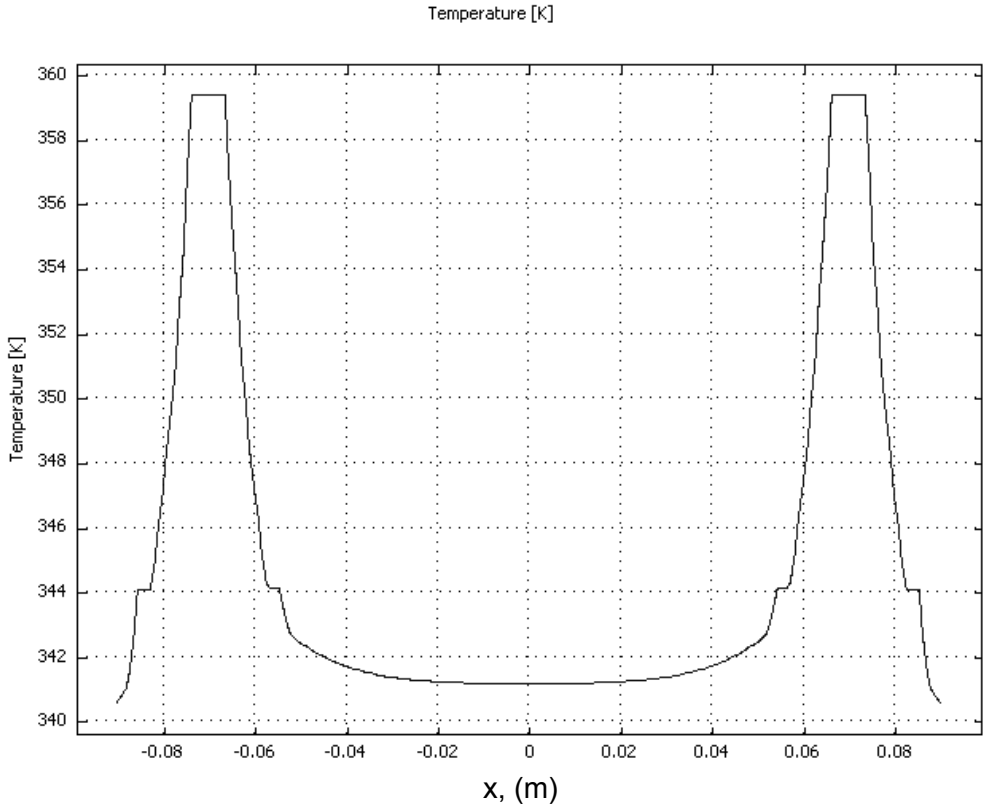
Tablo 8.29'dan görüldüğü gibi, kablolar arasında 7 cm yatay uzaklık olduğu zaman ortadaki kablonun sıcaklığı 362,193 °K iken, diğer kabloların sıcaklıkları 360,11 °K olarak bulunmuştur.

Sağdaki soldaki kabloların yerleri değiştirilmeden, ortadaki kablonun gömüldüğü derinlik değiştirilirse, örnek olarak 5 cm daha yukarı gömülürse, yukarıdaki kablonun iletken sıcaklığı,

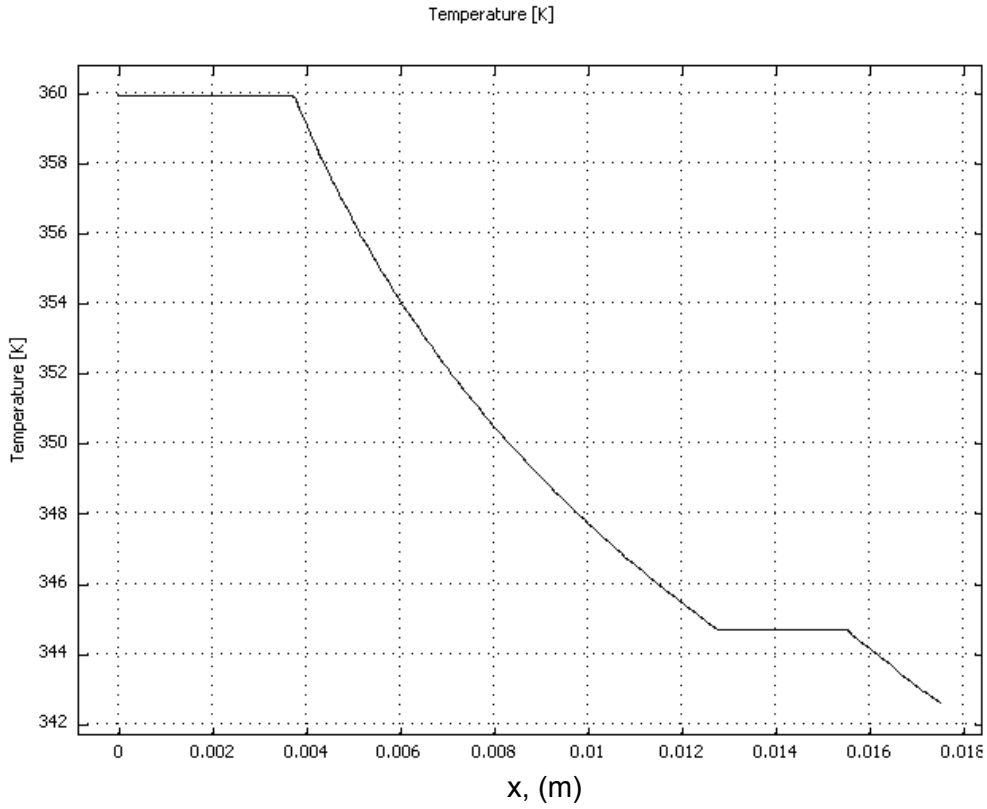


Şekil 8.51: Ortadaki kablo 5 cm yukarıya gömüldüğünde sıcaklık dağılımı

359,94 °K olur (Şekil 8.51). Diğer kabloların iletkenleri ise Şekil 8.52'ye göre 359,38 °K sıcaklığa sahiptirler. Bu durumda üç kablo da daha çok soğuma imkanı elde etmiştir.



Şekil 8.52: Ortadaki kablo 5 cm yukarıya gömüldüğünde alttaki kabloların ısıl dağılımları



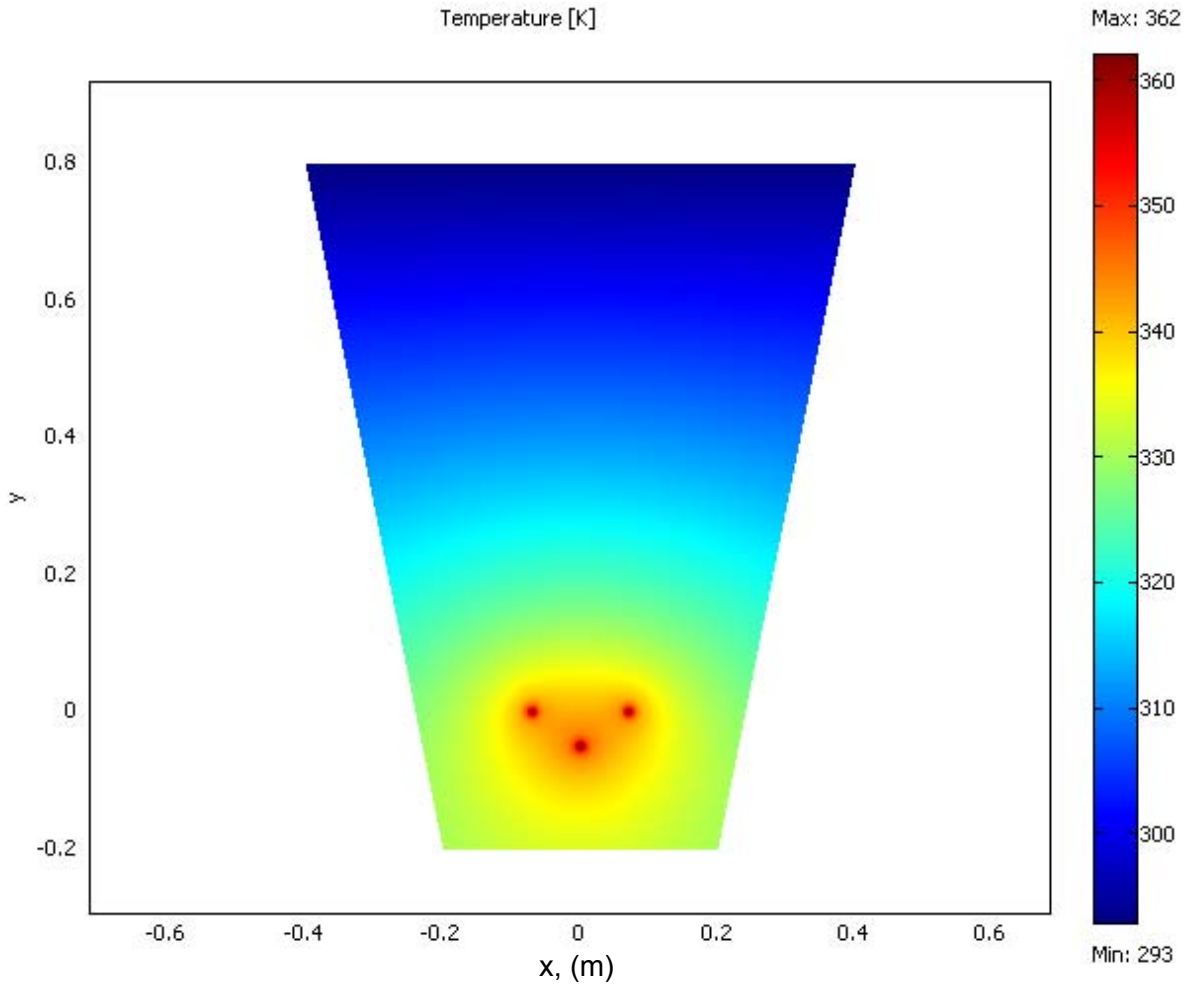
Şekil 8.53: Yukarıdaki kablonun ısıl dağılımı

Bu yerleşimde, sağdaki ve soldaki kablonun yalıtkanları 359,3 – 344 °K sıcaklıkları arasındadır. Kabloların PVC dış kılıflarının toprakla temas ettiği noktada ise sıcaklık değeri 342,7 °K'dir.

Şekillerden anlaşıldığı gibi ortadaki kablo 5 cm yukarıya gömüldüğünde, kablo merkezleri arasındaki uzaklıklar artmıştır. Buna bağlı olarak kabloların birbirleri üzerindeki karşılıklı ısıl etkileri de azalmıştır. Sonuç olarak kabloların sıcaklıkları düşmüştür (Şekil 8.53). Akım taşıma kapasiteleri artmıştır.

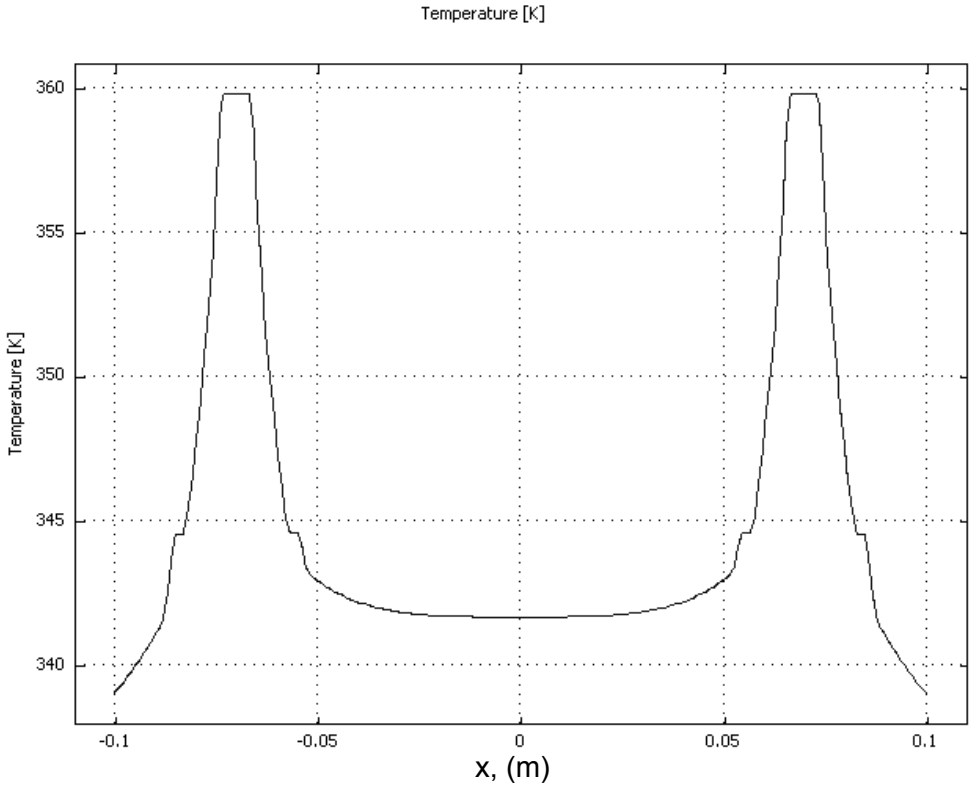
Diğer dikkat çekici durum ise, sağdaki ve soldaki kabloların diğer kabloyla aralarındaki sıcaklık farkının azalmış olmasıdır. Bu da aynı durumun sonucudur.

8.3.5.2 Ortadaki Kablo 5 cm Aşağıya Döşenirse

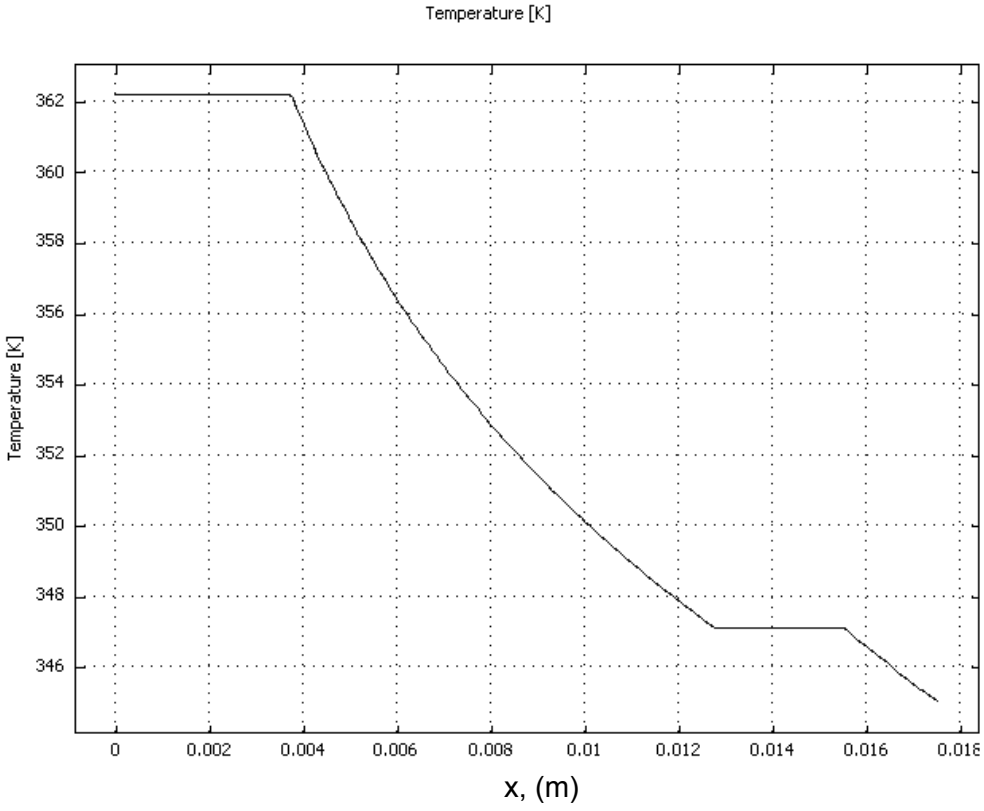


Şekil 8.54: Ortadaki kablo 5 cm aşağıya gömüldüğünde sıcaklık dağılımı

Sağdaki soldaki kabloların yerleri değiştirilmeden, ortadaki kablo, bu sefer diğerlerinden 5 cm aşağı gömüldüğünde, bu kablonun sıcaklığı 362,18 °K olarak bulunmuştur (Şekil 8.54).



Şekil 8.55: Ortadaki kablo 5 cm aşağıya gömüldüğü zaman diğer kabloların ısıl dağılımları



Şekil 8.56: Aşağıdaki kablonun ısıl dağılımı

Diğer kabloların iletkenleri ise Şekil 8.55'den görüldüğü gibi 359,81 °K sıcaklığa sahiptirler. Aşağıya gömülen kablo, toprak yüzeyine olan uzaklığın artmasından dolayı daha yüksek sıcaklığa ulaşmıştır (Şekil 8.56).

Bu yerleşimde sağdaki ve soldaki kablonun yalıtkanları 359,81 – 344,5 °K sıcaklıkları arasındadır. Kabloların PVC dış kılıflarının toprakla temas ettiği noktada ise sıcaklık değeri 343,1 °K'dir.

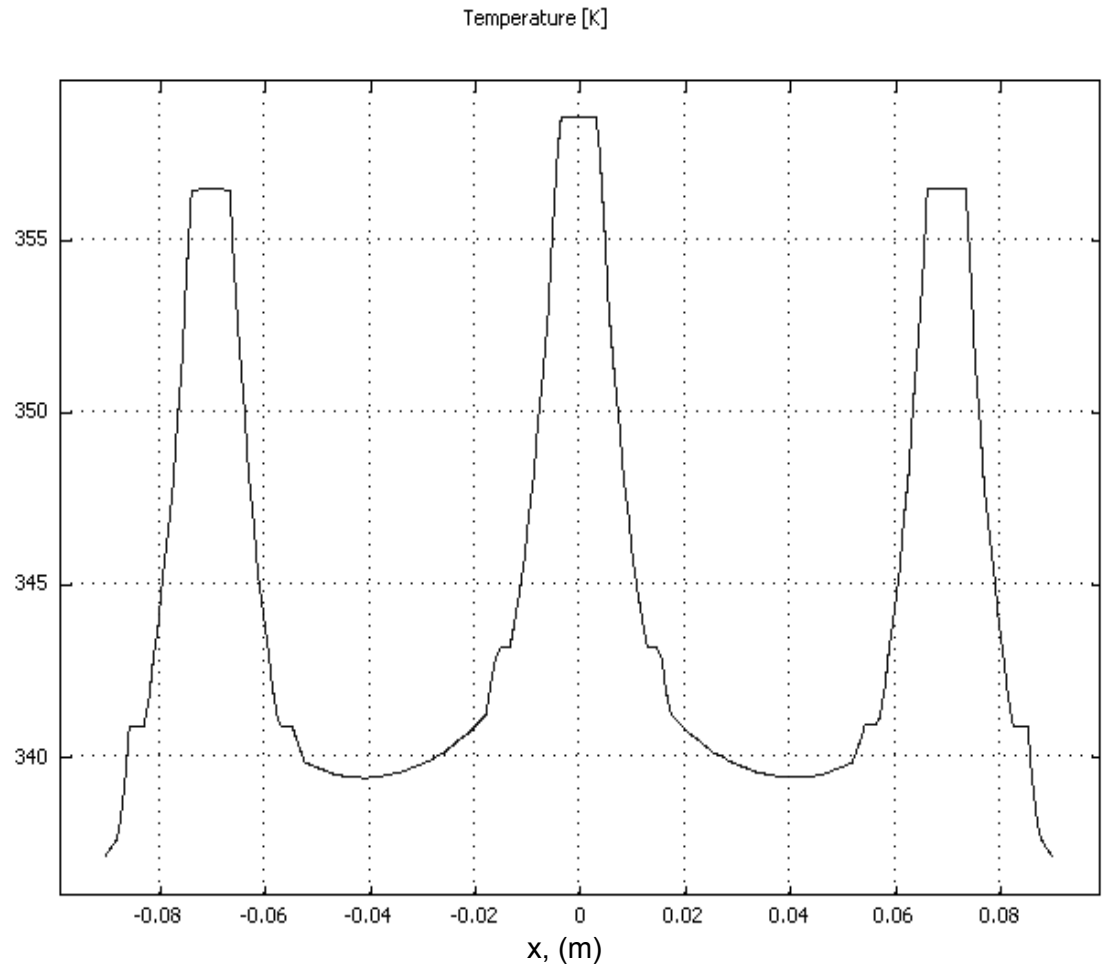
Sağdaki ve soldaki kablolar sabit kalıp ortadaki kablo diğerlerinden aşağıya gömüldüğünde, derinliğin artmasına bağlı olarak bu kablonun diğerlerinden daha sıcak olduğu görülmektedir. Kaynak [8]' de, sonlu farklar yöntemi kullanılarak kabloların yatay, düşey açıklıkları değiştirildiğinde akım taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Kabloların yerleşimleriyle ilgili en uygun durum bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, kablolar birbirlerine temas ederken, ortadaki kablonun yeterince soğuyamadığı ve akım taşıma kapasitesinin düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda ortadaki kablonun, kendi çapı kadar yukarıya taşınması durumunda akım taşıma kapasitesinin neredeyse iki katına çıktığı görülmüştür.

8.3.6 Toprak Yüzey Sıcaklığı – Kabloların Sıcaklık Dağılımı

Kabloların gömüldüğü derinlik 80 cm, aralarındaki yatay açıklık 7 cm olacak şekilde kablolar yerleştirildiğinde, toprak ısıl özdirenci 1 °K.m / W ve toprak yüzey sıcaklığı 20 ºC olan toprak koşullarında, ortadaki kablonun sıcaklığı 362,193 °K (89,193 ºC) bulunmuştu. Bu kısımda, sadece toprak yüzey sıcaklığı değiştirildiği zaman kabloların sıcaklık dağılımı bulunacaktır.

8.3.6.1 Toprak Yüzey Sıcaklığı 15 ºC

Toprak yüzey sıcaklığı 15 ºC olduğu zaman kablolardaki sıcaklık dağılımları Şekil 8.57'deki gibi olur.

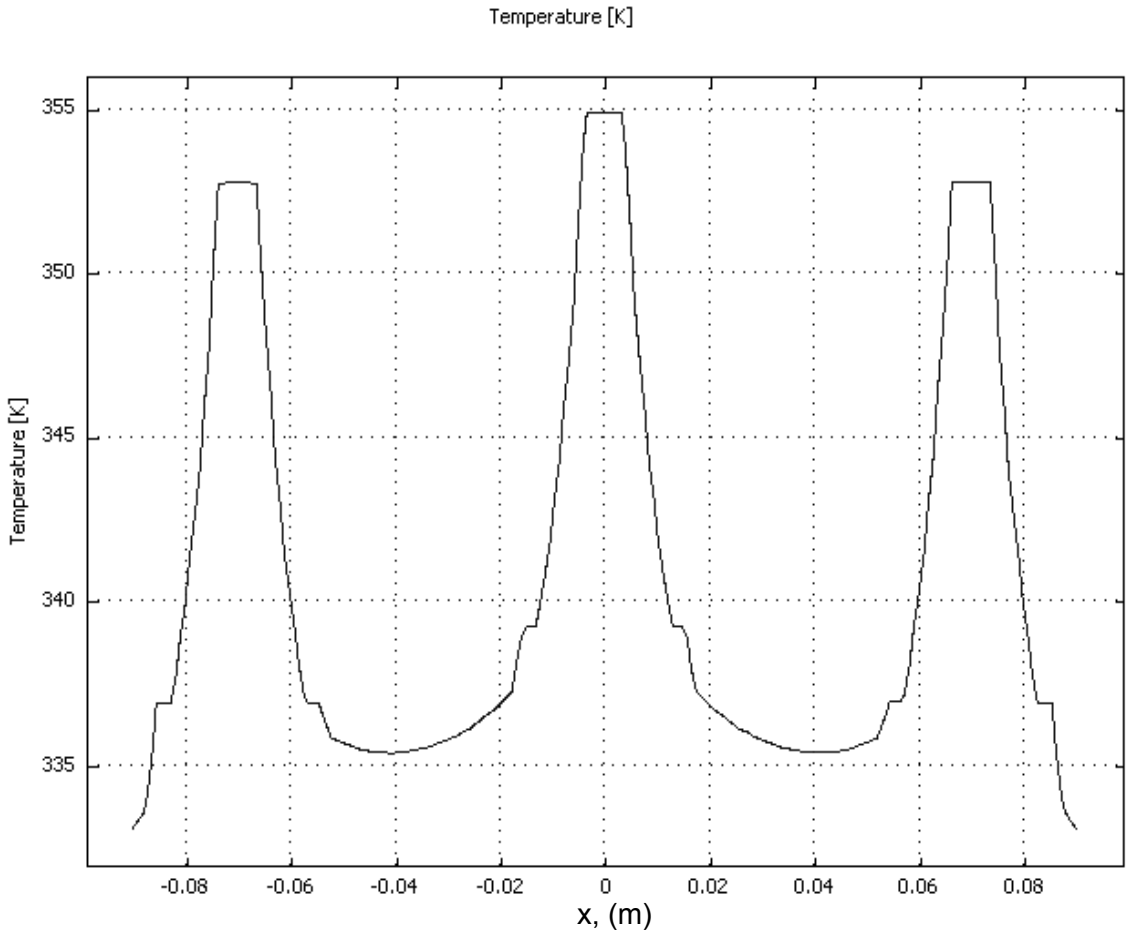


Şekil 8.57: Toprak yüzey sıcaklığı 15 ºC olduğunda kablolardaki sıcaklık dağılım grafiği

Toprak yüzeyindeki sıcaklık 15 ºC olduğu zaman şekilden görüldüğü gibi ortadaki kablonun iletken sıcaklığı 358,541 °K, diğer kabloların sıcaklıkları ise 356,42 °K dir.

8.3.6.2 Toprak Yüzey Sıcaklığı 10 ºC

Toprak yüzey sıcaklığı 10 ºC olduğunda ise, kabloların sıcaklık dağılımları Şekil 8.58'deki gibi olur.

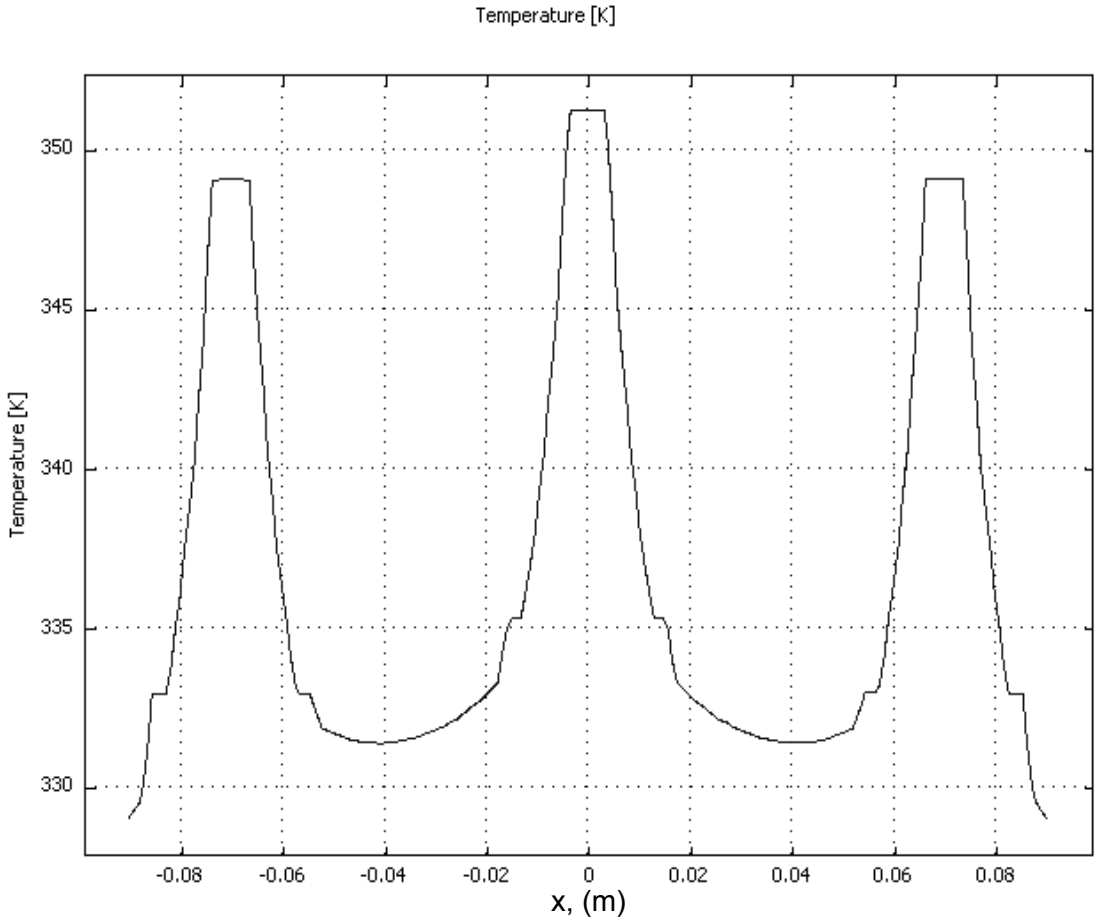


Şekil 8.58: Toprak yüzey sıcaklığı 10 ºC olduğunda kablolardaki sıcaklık dağılımları

Şekil 8.58'den görüldüğü gibi, toprak yüzey sıcaklığı 10 ºC olduğu durumda, ortadaki kablo iletkenin sıcaklığı 354,88 °K, diğer kabloların sıcaklıkları ise 352,737 °K dir.

Toprak Yüzey Sıcaklığı 5 ºC

Toprak yüzey sıcaklığı 5 °C olduğunda ise, ortadaki kablo sıcaklığı 351,237 °K, diğer kabloların sıcaklıkları ise 349,04 °K'dir (Şekil 8.59).



Şekil 8.59: Toprak yüzey sıcaklığı 5 ºC olduğunda kablolardaki sıcaklık dağılımı

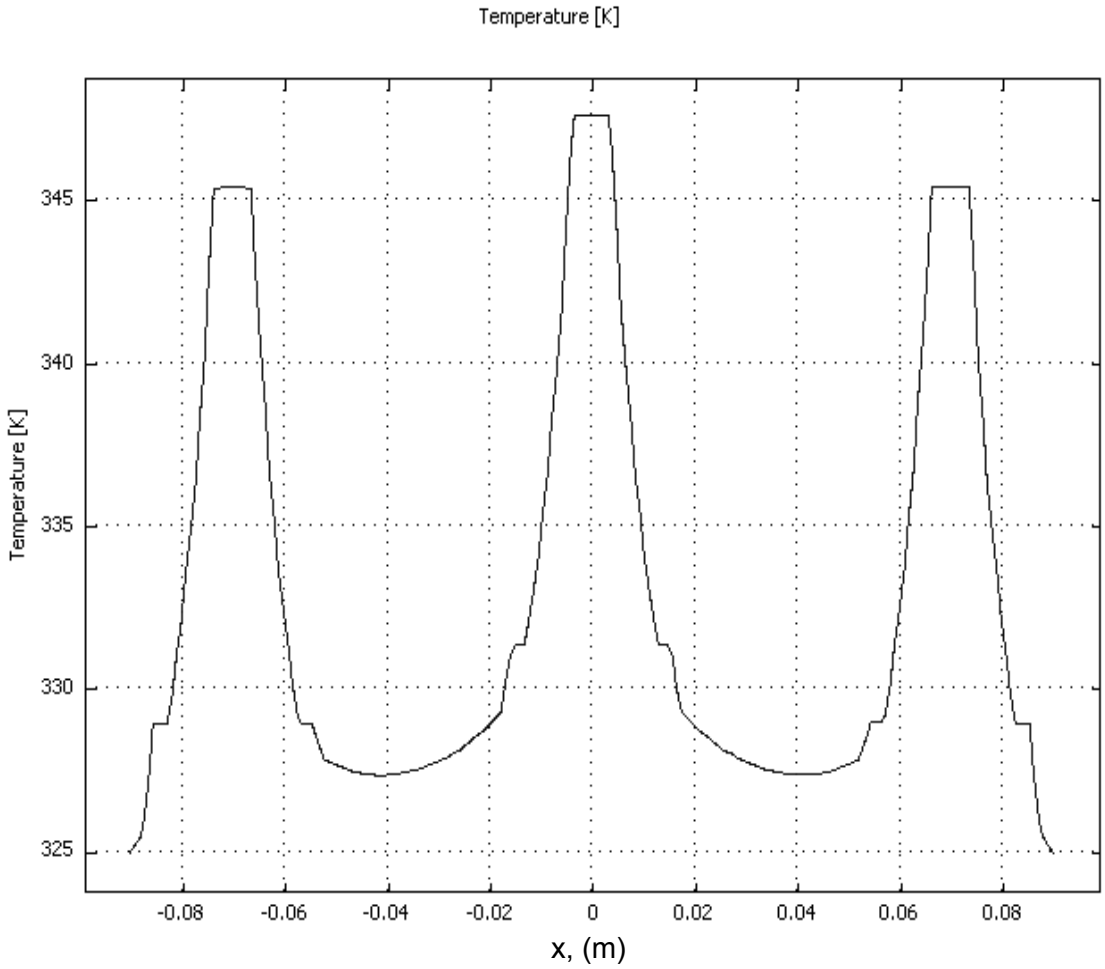
Doğal olarak kış mevsiminde toprak yüzey sıcaklığı yaz aylarındaki değerde olmaz. Bulunan sonuçlardan da görüldüğü gibi, bu durumda kablolardaki ısıl zorlanma daha az olur.

8.3.6.3 Toprak Yüzey Sıcaklığı 0 ºC

Şekil 8.60'da toprak yüzey sıcaklığının 0 ºC olması durumunda kablolardaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Buna göre ortadaki kablonun iletken sıcaklığı 347,58 °K, diğer kablolarda ise bu değer 345,35 °K'dir.

Toprak yüzey sıcaklılarının değiştirilerek, buna karşılık kablolardaki sıcaklık dağılımının araştırıldığı bu bölümde, dikkati çeken bir sonuç ortaya çıkmıştır. Kablo boyutları, malzemeleri, ısıl özelliklerinde ve kabloların birbirleriyle olan yatay uzaklıklar değiştirilmemiş ve toprağın ısıl özdirenci ve kanal boyutları da sabit tutulmuştur. Bu durumda, toprak yüzey sıcaklığı 20 ºC olduğunda ortadaki kablo sıcaklığı 89,113 ºC, 0 ºC olduğunda ise bu sıcaklık 74,58 ºC olarak bulunmuştur.

Toprak yüzey sıcaklıkları arasındaki fark 20 ºC iken, kablo sıcaklıkları arasındaki fark 14,6 ºC olarak bulunmuştur.



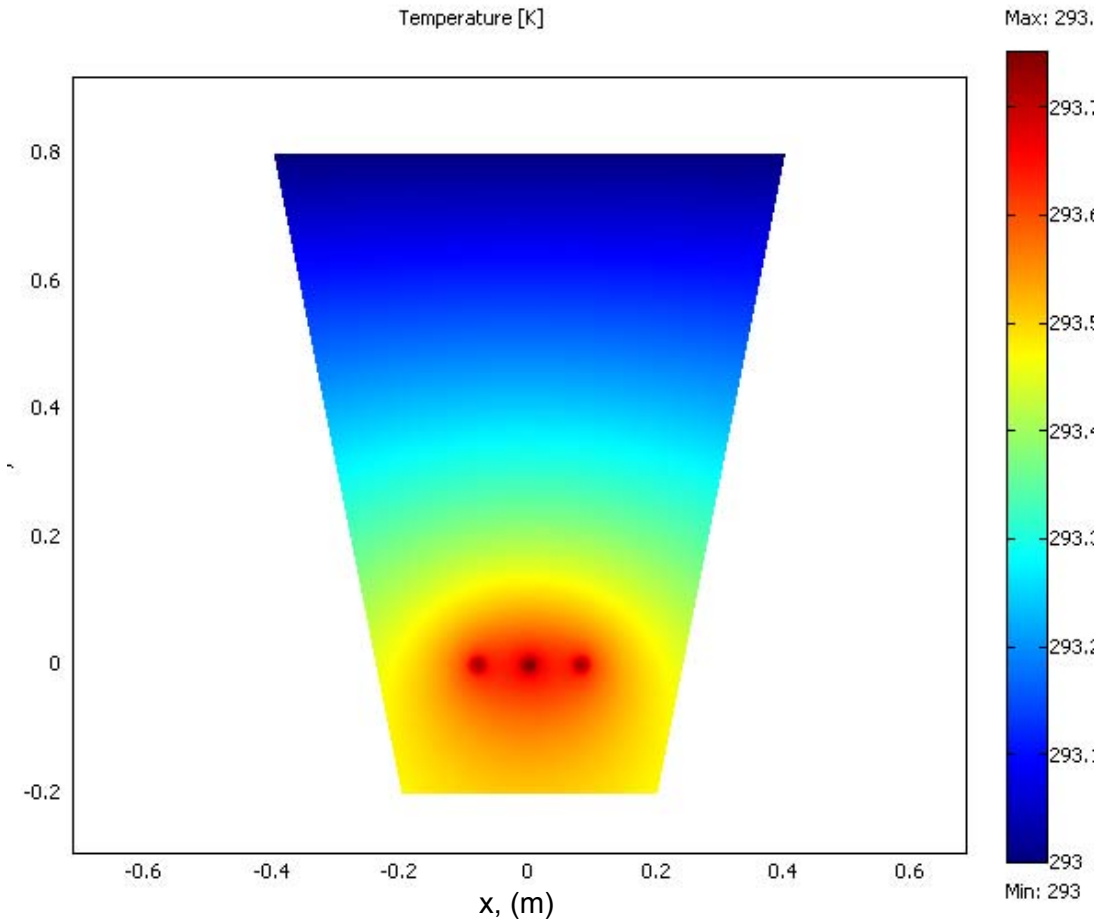
Şekil 8.60: Toprak yüzey sıcaklığı 0 ºC olduğunda, kabloları sıcaklık dağılımı

Eğer sadece ısıl analiz yapılsaydı, bu aradaki fark olmayacaktı. Çoklu fiziksel sayesinde, kayıplara neden olan kablo iletken direncinin sıcaklıkla değişmesi, ve buna karşılık akımdaki düşüş şeklinde devam eden zincirleme ilişki de hesaba katılabilmiş ve bunun sonucunda toprak yüzey sıcaklığındaki 20 ºC azalma sonucu, kablolardaki sıcaklık düşüşü 14,6 ºC olarak bulunmuştur.

8.3.7 Sadece Dielektrik Kayıplar

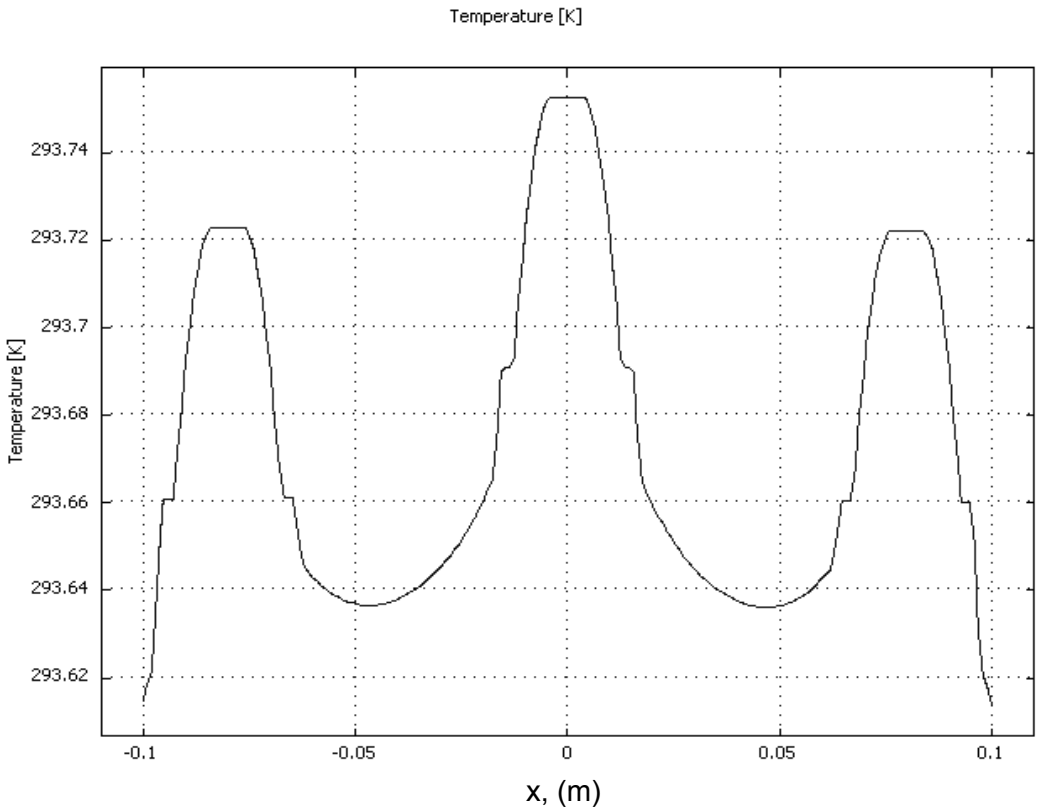
Aralarında 7 cm yatay açıklık bulunan üç kablonun çoklu fiziksel analizi sonucunda en yüksek ısınmanın ortadaki kabloda gerçekleştiği ve bu kablonun sıcaklığının 362,193 °K olduğu görülmüştü. Bu ısınmanın kaynağı olan kayıpların neredeyse tamamının iletkendeki direnç üzerinde oluştuğu bilinmektedir. Ancak bunun yanında incelenmesi gereken diğer bir kayıp türü de dielektrik kayıplardır.

İletken kayıplarını yok sayarak, sadece dielektrik kayıpların sebep olduğu ısınma, aynı kanal genişliği, aynı toprak özellikleri (toprak yüzeyinde sıcaklık 20 ºC, $\rho_T = 1$), aynı kablo özellikleri ve boyutları için analiz edilirse, Şekil 8.61'deki sıcaklı dağılımı elde edilir.



Şekil 8.61: 7 cm yatay açıklıkla yan yana döşenen üç kablonun sadece dielektrik kayıplarının oluşturduğu sıcaklık dağılımı

Üç kablonun sadece dielektrik kayıplarının oluşturduğu ısınma sonucunda kablolardaki ortalama sıcaklık artışı 0,752 ºC civarındadır (Şekil 8.61). Şekil 8.62'de ise x ekseni üzerinde kablolarda ve topraktaki sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 8.62: Üç kabloda dielektrik kayıpları sonucu oluşan sıcaklık dağılımı

Şekil 8.62'den görüldüğü gibi, ortadaki kabloda dielektrik kayıplar sonucunda oluşan sıcaklık 20,75 ºC'dir.

Bulunan sonuç, toprak ısıl özdirenç değerinin 1 °K.m / W olması durumundaki sıcaklık değeridir. Daha önceki analizlerden bilindiği gibi, kayıplar aynı olsa da, toprak ısıl direnci bu değerden yüksek olduğunda kabloların soğuması zorlaşacak ve sıcaklıkları yükselecektir. Tersi durumda, yani toprak ısıl özdirenci 1 °K.m / W değerinden düşük olduğu zaman, kablolar daha fazla soğuyabilecekler ve kablo sıcaklık değerleri 20,75 ºC 'den düşük olacaktır.

Sonuç olarak, ısınmaya sebep olan tek kayıp dielektrik kayıpları olduğunda,

- K_G = 2,5 °K.m / W olan toprakta ortadaki kablo sıcaklığı 21,258 ºC,
- K_G = 1 °K.m / W olan toprakta 21,3 ºC ve
- K_G = 0,7 °K.m / W olan toprakta ise 20,614 ºC.

Analizi yapılan kablo yalıtkanı XLPE olduğu için, dielektrik kayıplar düşüktür. Bunun sebebi dielektrik kayıplar hesaplanırken kullanılan dielektrik sabitinin, diğer yalıtkanlardan daha düşük olmasıdır. Eğer kablo yalıtkanı, örnek olarak PVC olsaydı, dielektrik kayıplar, bu duruma göre 4 - 5 kat daha fazla olacaktı.

Benzer bir kıyaslama [1]' de XLPE ile PE arasında yapılmıştır. Bu çalışmada XLPE ve PE yalıtkanlı orta gerilim yeraltı kablolarının geçici hal ısıl analizleri sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenmiştir. XLPE ve PE yalıtkanlı kablolar ısı

transferi açısından kıyaslanmış ve değerlendirilmiştir. Bir fazlı 95 mm^2 iletken kesitli 35 kV anma gerilim değerine sahip XLPE ile PE aynı kesite sahip olmakla beraber, XLPE yalıtkanlı kablonun dış çapı daha küçük, akım taşma kapasitesi daha yüksektir. Dış çapın daha küçük olmasının sebebi, XLPE yalıtkanının üretim teknolojisindeki gelişmelerdir. Her iki kablo da 300 A ile yüklenirse, PE yalıtkanlı kablo sıcaklığı 67,86 ºC, XLPE yalıtkanlı kablo sıcaklığı ise 5 ºC daha az, 62,86 ºC olarak bulunur.

Bu çalışmada yapılan bütün analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Günümüzde birçok elektrik ve ısıl hesaplama da sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. SEY ile ilgili yapılan birçok çalışmanın sonucunda akım taşıma kapasitesin hesabı için [36] teknik raporu standart niteliği taşımaktadır. Bu teknik rapor bu tez çalışmasında olduğu gibi birçok çalışmada temel kaynak olarak kullanılabilir.

9 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizde ve dünyada son yıllarda nüfusun ve şehirleşmenin hızla artması, hem birçok ihtiyacı karşılayabilmek için elektrik enerjisine olan gereksinimi arttırmış, hem de bu enerjinin yeraltı kablolarıyla taşınması zorunluluğunu beraberinde getirmiştir.
Her geçen gün evlerde kullanılan elektrikli aletlerin, dolayısıyla talep edilen güçlerin artması yüksek gerilimle iletimi zorunlu kılmıştır. Yüksek gerilim ile enerji iletimi ile kayıplar daha az, verim daha çok olmaktadır. Bu sayede elektrik iletimi daha ekonomik olur.
Yüksek gerilimle güç taşımasında amaç, aynı akım değeriyle, yani aynı kesitle, gerilimin artmasına bağlı olarak daha çok gücün taşınmasıdır. Yüksek gerilimin kullanılması daha ekonomik güç iletimi sağlaması yanında, daha yüksek güçler için de aynı miktarda bakır ve alüminyumun kullanılmasını da sağlar. Ancak akımın artmasının getirdiği avantajın yanında, gerilimin artmasının getirdiği bazı dezavantajlar da vardır. Uygulanan yüksek gerilim nedeniyle dielektrik dayanım düzeyinin artması gerekir. Bunu sağlamak için de kablolarda hem kullanılan dielektrik yalıtım malzemesi miktarı hem de zırh ve ekran malzemesi miktarları artmaktadır.
Yeraltı kablolarında araştırılması ve kontrol edilmesi gereken en önemli konu akım taşıma kapasitesidir. Bu çalışmanın üçüncü bölümünde farklı kablo tipleri için akım taşıma kapasitesinin hesabı formüllerle verilmiştir. Üzerinden akım geçen iletkende, iletkenin direncinden dolayı kayıp bir güç oluşur. Kabloda ayrıca gerilim kademesine ve kablo tipine göre dielektrik, kılıf ve zırh kayıpları da olur. Ancak kaybın büyük bir bölümü iletken kayıplarıdır. Kabloda ortaya çıkan toplam kayıp güç, kablodan ısı olarak ayrılır. İletken kayıplarının oluşturduğu ısı ilk olarak yalıtkana gelir. Burada dielektrik kayıpların sebep olduğu ısıyla birleşir. Isı akışı sırasında malzemeler ısı akışına direnç gösterirler. Bu direncin fazla olması ısı akışının az olmasına, dolayısıyla kabloda kayıp güç sebebiyle oluşan ısının dışarı atılamamasına sebep olur. Kabloda iletken kısımların ısıl direnci ihmal edilecek kadar düşüktür. İç ısıl dirençler olarak genellenebilecek kablonun kısımlarından en önemlisi dielektrik malzemenin ısıl direncidir.
Kabloyu terk eden ısı toprağa geçer. Bu sefer de toprağın ısıl direnci ile karşılaşır. Yeraltı kablosunun gömüleceği kanalın dolgu malzemesi mümkün olduğunca ısı

akışını kolaylaştıran, ısıl özdirenci düşük olacak şekilde seçilmelidir. Böylece kabloda oluşan ısı kolayca kablodan uzaklaştırılmış olur. Tersi durumda kablonun çevresindeki ortamın ısıl direncinin yüksek olması sonucunda, oluşan ısı kabloda kalacak ve toprağın kuruyarak ısıl direncinin daha da artmasına ve kablonun daha da ısınmasına sebep olacaktır. Bu ısınma kablo yalıtımının özelliğini kaybedeceği ısı değerine ulaşıncaya kadar devam edecek ve bu sınır aşıldığında yalıtım malzemesi eriyerek veya termik delinmeye uğrayarak faz toprak arızasına sebep olacaktır ve kablo ve bağlantısını sağladığı sistem devre dışı kalacaktır.

Bu çalışmada, yeraltı kablosunun ısıl dengesinin bozulmaması için önemli olan dış ısıl dirençler değiştirilerek, kablodaki zorlanmalar, sıcaklık dağılımı ve akım taşıma kapasitesi bulunmuştur. Toprak ısıl özdirenç değerinin değişimine karşılık kablo yalıtkanında oluşan sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Kuru toprakta kablonun beklendiği gibi ısıl olarak daha çok zorlandığı görülmüştür. Isıl özdirenç değerinin yüksek olduğu kuru toprakta kablonun akım taşıma kapasitesinin, daha nemli topraktakine göre daha düşük değerde olduğu yapılan analizler sonucunda bulunmuştur. Bunun yanında kablo gömülme derinliğinin, kablodaki sıcaklık dağılımına etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık dağılımını ve akım taşıma kapasitesini etkileyebilecek bütün faktörler sabit kalmak üzere, kabloların gömülme derinlikleri arttıkça, kablodaki en yüksek sıcaklık değerlerinin de arttığı, kabloların ısıl olarak daha çok zorlandığı bulunmuştur. Buna rağmen, kabloların dış etkilerden daha az etkilenmeleri için kablolar 0,7 metreden daha derine gömülürler.

Birden çok kablonun yan yana döşenmesi durumunda kablolarda, kablonun kendi oluşturduğu ısının yanında komşu kabloların oluşturduğu ısı nedeniyle ek bir ısınma gerçekleşir. Bu ısınma miktarı kablo döşenme şekilleri ve kablolardaki yüklenme durumlarına göre farklılık göstermektedir. Yan yana aralıklarla döşenmiş kablolarda, birbirini ısıl, elektriksel ve manyetik alan yönünden etkilemeyecek şekilde standartlarda belirtilen kablolar arası mesafelere uyulması önemlidir. Bu çalışmada da yan yana döşenen üç kablonun farklı açıklıklarda sıcaklık dağılımları ve birbirleri üzerindeki ısıl etkileri incelemiştir. Ortadaki kablonun diğer kabloların ısıl etkilerinden dolayı daha çok ısındığı ve kablolar arası mesafeler arttırıldıkça, kablolar arasındaki sıcaklık farkının azaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak yeraltı kabloları özellikle estetik açıdan ve güvenlik açısından her geçen gün daha çok tercih edilmelerine karşın, akım taşıma kapasitesi sınırlamasından dolayı arıza yapma olasılığı yüksek yapılardır. Kullanılacak olan kablolar için akım taşıma kapasiteleri iyi hesaplanmalıdır. Ayrıca farklı toprak ve iklim koşulları ve farklı yerleşim durumları için iyice incelenmeli ve kabloların tasarımı, boyutlandırılması ve seçimi bu incelemelere göre yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Koçar, I., Ertaş, A.,** *2004*. Thermal Analysis for Determination of Current Carrying Capacity of PE and XLPE Insulated Power Cables Using Finite Element Method, *IEEE Melecon,* pp. 905-909.

[2] **Gela, G., Dai, J. J.,** 1988. Calculation of Thermal Fields of Underground Cables Using the Boundary Element Method, *IEEE Transactions on Power Delivery,* **Vol.3** No. 4, October, pp. 1341-1347.

[3] **Anders, G. J., Napieralski A.,** 1999. Calculation of the Internal Thermal Resistance and Ampacity of 3-core Screened Cables with Fillers, *IEEE Transactions on Power Delivery,* **Vol. 14**, No. 3, July.

[4] **Hiranandani, A.,** 1991. Calculation of Conductor Temperatures and Ampacities of Cable Systems Using a Generalized Finite Difference Method, *IEEE Transactions on Power Delivery,* **Vol. 6**, No. 1, January, pp. 15-24.

[5] **Haskew, T. A., Carwile, R. F., Grigsby, L. L.,** 1994. An Algorithm for Steady – State Therma Analysis of Electrical Cables with Radiation by Reduced Newton – Raphson Techniques, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 1, January, pp. 526-533.

[6] **Anders, G. J., Chaaban, M., Bedard, N., Ganton, R. W. D.,** 1987**,** New Approach to Ampacity Evaluation of Cables in Ducts Using Finite Element Technique*, IEEE Transactions on Power Delivery* – 2.

[7] **Hwang, C. C.,** 1997. Calculation of Thermal Fields of Underground Cable System with Consideration of Structural Steels Constructed in a Duct Bank, *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* **Vol 144**, pp. 541-543.

[8] **Hanna, M. A., Chikhani A. Y., Salama M. M. A.,** 1993. Effect of Geometry Between Cables on the Heat Dissipation from Underground Cable Systems, *IEEE CNF,* pp. 433-436.

[9] **Hwang, C. C., Jiang, Y. H.,** 2003**.** Extensions to the Finite Element Method for Thermal Analysis of Underground Cable Systems, Electric Power System Research 64.

[10] **Malik, N. H., Al–Arainy, A. A., Qureshi, M. I.,** 1998. Electrical Insulation in Power Systems, Marcel Dekker, Inc., New York.

[11] **Thue, W. A.,** 1999. Eletrical Power Cable Engineering, Marcel Dekker, Inc., New York.

[12] **Anders, J. G.,** 2005. Rating of Power Cables In Unfavourable Thermal Environment, John Wiley & Sons., New York.

[13] **Ghariban, N.,** 2003. Temperature Rise at Electrical Wires with Non Homogenous Current Density or Boundary Conditions, IASTED International Conference.

[14] **Anders G. J., Brakelmann, H.,** 2004. Improvement in Cable Rating Calculations by Consideration of Dependence of Losses on Temperature, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **Vol. 19**, No. 3, July, pp. 919-925.

[15] **TS 11598,** Nisan 1995. Kablolar-Sürekli Akım Değerlerinin Hesaplanması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[16] **Dunsheath, P.,** 1930. High Voltage Cables, Theory and Practice of Their Design and Operation, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd, London.

[17] **Lucas, J. R.,** 2001. High Voltage Engineering, Department of Electrical Egineering, University of Moratuwa, Sri Lanka.

[18] **Freitas, D. S., Prata, A. T., De Lima, A. J.,** 1996. Thermal Performance of Underground Power Cables with Constant and Cyclic Currents in Presence of Moisture Migration in the Surrounding Soil*, IEEE Transactions on Power Delivery*, **Vol. 11**, No. 3, July, pp. 1159-1170.

[19] **Kalenderli, Ö., Kocatepe, C., Arıkan, O.,** 2005. Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[20] **Robinson, D. M.,** 1936. Dielectric Phenomena in High Voltage Cables, Chapman & Hall Ltd., London.

[21] http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_3/backbone/r3_4_1.html.

[22] **Özkaya, M.,** 1996. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[23] **Anders, G. J., Radhakrishna, H. S.,** 1988. Power Cable Thermal Analysis with Consideration of Heat and Moisture Transfer in the Soil, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **Vol. 3**, No. 4, October, pp. 1280-1288.

[24] **Heinhold, L.,** 1990. Power Cables and Their Applications, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich.

[25] **Rabinowitz, M.,** 2000. Power System of the Future (Part 1), *IEEE Power Engineering Review,* January.

[26] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatra.html#c2

[27] http://www.eng.usf.edu/crane/heat_tran/HT%20Lecture%20I.doc College of Engineer-ing, University of South Florida.

[28] **Topal, E.,** 2003. Isıl ve Elektriksel Büyüklükler Arasındaki Analojiden Yararlanarak Yüksek Gerilim Yeraltı Kablolarında Sıcaklık Dağılımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

[29] **IEEE Guide** for Soil Thermal Resistivity Measurements, *IEEE Std.* 442-1981.

[30] **Saner, Y.,** 1998. Güç (Enerji) Dağıtımı, Cilt 5, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[31] **Anders, G. J., Radhakrishna, H. S.,** 1988. Computation of Temperature Field and Moisture Content in the Vicinity of Current Carrying Underground Power Cables, *IEEE Proceeings*, **Vol. 135**, Pt. C, No. 1, January, pp. 51-62.

[32] **Rao, S.,** 1996. EHV-AC and HVDC Transmission Engineering and Practice, Khanna Publishers, Delhi.

[33] http://www.hes.com.tr/tr/index.asp.

[34] Türk Pirelli Cable & Systems, Insulated Wires and Power Cables, TPK2000-2 Bursa: Pireli 2000.

[35] **Hanna, M. A., Chikhani, A. Y., Salama, M. M. A.,** 1998. Thermal Analysis of Power Cable Systems in a Trench in Multi – Layered Soil, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **Vol. 13**, No. 2, April, pp. 304-309.

[36] Electric Cables, Calculations for Current Rating by Finite Element Method, IEC TR 62095, 2003-6.

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan Karaca 1981 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta eğitimini sırasıyla Lütfi Banat İlkokulu ve İzmir Bornova Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1999 – 2004 yılları arasında, bir yıl hazırlık sınıfı dahil, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde tamamlayarak Elektrik Mühendisi unvanını aldı. 2004 yılından beri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda lisansüstü eğitimini sürdürmektedir. Şubat 2005 tarihinden itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Ana Bilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.