

**ISIL VE ELEKTRİKSEL BÜYÜKLÜKLER ARASINDAKİ ANALOJİDEN
YARARLANARAK YÜKSEK GERİLİM YERALTI KABLOLARINDA
SICAKLIK DAĞILIMININ İNCELENMESİ**

142639

142639

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Engin TOPAL
(504001116)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2003

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Ocak 2004

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Aydoğan ÖZDEMİR (İ.T.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU (K.Ü.)

ARALIK 2003

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ÖNSÖZ

Bu tezin konusunun seçiminden başlayarak tamamlanmasına kadar geçen süre içinde yardımlarını hiç esirgemeyen ve tezin şekillenmesinde büyük rol oynayan Sayın hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ' ye teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen ve daima yanımda olan özellikle anneme, babama, ablama ve abime minnettarım.

Tezin yapımında kaynak olarak kullandığım kitapları temin eden ve tezin yapımında yardımcı geçen Ömer Mutlu YILMAZ 'a , tez için yapılan deneylerde büyük yardımı ve emeği geçen Arş. Gör. Suat İLHAN' a çok teşekkür ederim.

Aralık-2003

Engin TOPAL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 İlk Yeraltı Kablosu	2
1.2 İlk Telgraf Hatları	3
1.3 Gutta Perchanın İlk Kullanımı	4
1.4 Kağıdın Yalıtım Malzemesi Olarak İlk Kullanımı	5
1.5 Süper İletkenler	7
2. KABLOLARDA AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ	10
2.1 Akım Taşıma Kapasitesinin Hesabı	10
2.2 Kablo Malzemeleri.....	12
2.2.1 İletkenler.....	12
2.2.2 Yalıtkanlar.....	13
2.2.3 Ekran (Siper) ve Kılıflar.....	13
2.2.4 Zırh	13
3. ISI ve ELEKTRİK ARASINDAKİ BENZERLİK	15
3.1 İletimle Isı Geçişi	15
3.2 Isıl ve Elektriksel Dirençlerin Benzerliği.....	16
3.3 Yüzeyle Çevresi Arasında Taşınım ile Isı Geçişi.....	19
3.4 Bir Yüzeyden Geçen Isı.....	19
3.5 Silindirsel Yapılarda Isı Geçişi.....	20
3.5.1 Bir tabakalı silindirsel sistemlerde ısı akışı.....	20
3.5.2 Çok tabakalı silindirsel sistemde ısı akışı.....	22
3.6 Yeraltı Kablosunda Kayıplar Nedeni ile Oluşan Isı.....	23
3.7 Isı Akış ve Yük Akış Çizgileri.....	23

3.8 Isıl Alan ile Elektrik Alanı Arasındaki Benzerlikten Yararlanılarak Tek Damarlı Kablonun Isıl (Termal) Direncinin Bulunması.....	24
3.9 Bir Yeraltı Kablosu Çevresindeki Toprağın Isıl Direncinin Bulunması.....	26
4. ISIL DİRENÇLER	28
4.1 Kablonun Dielektrik Isıl Direnci.....	28
4.2 Metal Kısımların Isıl Direnci	28
4.3 Kablodaki Isıl Dirençlerin Hesabı	29
4.4 Toprağın Isıl Özdirenci	30
4.4.1 Toprak	31
4.4.2 Dolgu malzemesi	31
4.4.3 Yatak malzemesi	31
4.5 Toprağın Isıl Direncini Etkileyen Faktörler	31
4.6 Havanın Isıl Direnci	32
4.6.1 Düşey döşeme	36
4.6.2 Atmosferik basınç	36
4.6.3 Güneş radyasyonu	36
4.6.4 Kabloların yerleştirilmesi	37
5. TOPRAĞA GÖMÜLÜ BİR KABLO ÇEVRESİNDEKİ SICAKLIK DAĞILIMININ HESABI	38
5.1 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000 mm ² kesitli) Kablonun Topraktaki Sıcaklık Dağılımının İncelenmesi	43
5.1.1 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000 mm ² kesitli) Kablonun farklı gömülme derinliklerindeki topraktaki sıcaklık dağılımı	43
5.1.2 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000 mm ² kesitli) Kablonun farklı ısıal özdirençlere sahip topraktaki sıcaklık dağılımı	44
5.2 20,3/35 kV 2XSY (240 mm ² kesitli) Kablonun Topraktaki Sıcaklık Dağılımının İncelenmesi	45
5.2.1 20,3/35 kV 2XSY (240 mm ² kesitli) kablunun farklı gömülme derinliklerindeki topraktaki sıcaklık dağılımı	45
5.2.2 20,3/35 kV 2XSY (240 mm ² kesitli) kablunun farklı ısıal özdirençlere sahip topraklardaki sıcaklık dağılımı	46

5.3 Yan Yana Gömülmüş İki Adet 20,3/35 kV 2XSY (240 mm ² kesitli) Kablonun Birbirlerine Etkileri	47
6. ELEKTROLİTİK BANYO YÖNTEMİ İLE STATİK ELEKTRİK ALANI İNCELEMESİ, YAPILAN DENEYLER VE SONUÇLARI	51
6.1 Genel Bilgi	51
6.2 Yapılan Deneyler ve Sonuçları	53
6.2.1 Deney düzenekleri ve deneylerin yapılışı	53
6.2.2 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun benzetimi için yapılan deney	54
6.2.3 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablonun benzetimi için yapılan deney	55
6.2.4 Yan yana gömülmüş iki adet 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun benzetimi için yapılan deney	56
6.2.5 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosunun iç sıcaklık dağılımı benzetimi için yapılan deney	58
7. DENEYSEL VERİLER İLE SAYISAL HESAP VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	60
7.1 20,3/35 kV 2XSY 240 mm ² kesitli Kablo İçin Yapılan Karşılaştırma	60
7.2 89/154 kV 2XS(FL)2Y 1000mm ² kesitli Kablo İçin Yapılan Karşılaştırma	61
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
EK A	68
EK B	71
EK C	76
EK D	80
EK E	84
EK F	91
EK G	95
ÖZGEÇMİŞ	100

KISALTMALAR:

HTS	: High Temperature Superconducting (Yüksek sıcaklıklı süper iletken)
PVC	: Poly Vinyl Chloride (Polivinilklorür)
PE	: Poly Ethylene (Polietilen)
XLPE	: Crosslinked Poly Ethylene (Çapraz bağlı polietilen)
TRXLPE	: Tree-retardant Poly Ethylene (Ağaçlanmaya dayanıklı polietilen)
EPR	: Ethylene Propylene Rubber (Etilen propilen kauçuk)
HMWPE	: High Molecular Weight Poly Ethylene (Yüksek molekül ağırlıklı polietilen)
PCP	: Poly Chloro Prene (Polikloropren)



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa no:</u>
Tablo 3.1 Isıl ve elektriksel dirençler.....	18
Tablo 3.2 Isı ile elektrik arasında analogik büyüklükler.....	24
Tablo 4.1 Bazı kabloların izin verilen en yüksek işletme sıcaklıkları ve dielektrik ısıl öz direnç değerleri.....	28
Tablo 4.2 p değerinin yükseklik ile değişimi.....	36
Tablo 4.3 Kablo kaplamasında kullanılan bazı maddelerin α_0 (soğurma) değerleri.....	37
Tablo 5.1 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablonun özellikleri	40
Tablo 5.2 120 cm'e gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablo için ısı sıcaklık dağılımı hesap tablosu	40
Tablo 5.3 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun özellikleri	45
Tablo 5.4 2XSY 20,3/35 kV (240/25 mm ²) kablonun farklı döşeme şekillerindeki akım taşıma kapasiteleri	50
Tablo A.1 100 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	68
Tablo A.2 80 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	68
Tablo A.3 60 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	69
Tablo A.4 40 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	69
Tablo A.5 20 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	70
Tablo C.1 Toprak ısıl öz direnci $K_G = 0,4^\circ K m/W$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablonun sıcaklık dağılımı hesap tablosu	76
Tablo C.2 Toprak ısıl öz direnci $K_G = 0,6^\circ K m/W$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	76
Tablo C.3 Toprak ısıl öz direnci $K_G = 0,8^\circ K m/W$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	77
Tablo C.4 Toprak ısıl öz direnci $K_G = 1^\circ K m/W$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	77
Tablo C.5 Toprak ısıl öz direnci $K_G = 1,2^\circ K m/W$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	78

Tablo C.6	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 1,4^\circ Km/W$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	78
Tablo C.7	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 1,6^\circ Km/W$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	79
Tablo D.1	70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	80
Tablo D.2	60 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	80
Tablo D.3	50 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	81
Tablo D.4	40 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	81
Tablo D.5	30 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	82
Tablo D.6	20 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	82
Tablo D.7	10 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	83
Tablo F.1	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 0,4^\circ Km/W$, 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	91
Tablo F.2	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 0,6^\circ Km/W$, 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	91
Tablo F.3	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 0,8^\circ Km/W$, 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	92
Tablo F.4	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 1^\circ Km/W$, 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	92
Tablo F.5	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 1,2^\circ Km/W$, 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	93
Tablo F.6	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 1,4^\circ Km/W$, 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	93
Tablo F.7	Toprak ısııl özdirenci $K_G = 1,6^\circ Km/W$, 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu	94

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa no:
Şekil 1.1	Gutta percha bitkisi 4
Şekil 1.2	Ferranti'nin 1890 yılında kullandığı 10 kV'luk kablo..... 6
Şekil 1.3	1892'de Lancashire'de kullanılan 2 kV'luk kağıt yalıtımlı esnek kablo..... 6
Şekil 1.4	1896'da Deptford'da kullanılan 10 kV'luk kağıt yalıtımlı esnek kablo..... 7
Şekil 1.5	Bireysel (damar iletkeni) soğutmalı süper iletkenli kablo..... 8
Şekil 1.6	Ortak soğutmalı süper iletkenli kablo..... 9
Şekil 3.1	Bir malzemeden iletimle ısı geçişi..... 15
Şekil 3.2	Isıl direnç ile elektriksel direnç arasındaki benzerlik..... 16
Şekil 3.3	Seri bağlı ısı dirençler..... 17
Şekil 3.4	Paralel bağlı ısı dirençler..... 18
Şekil 3.5	Taşıyma ısı geçişi..... 19
Şekil 3.6	Bir boyutlu ısı geçişi..... 20
Şekil 3.7	Bir tabakalı silindirselsistem..... 20
Şekil 3.8	Çok tabakalı silindirselsistem..... 22
Şekil 3.9	Isı akış ve yük akış (elektrik alan) çizgileri arasındaki benzerlik..... 24
Şekil 3.10	Isı ve yük akışı arasındaki benzerlik..... 26
Şekil 4.1	Tek damarlı kablonun bölümleri..... 29
Şekil 4.2	Toprağa gömülü bir kablo ve çevresindeki ısı direnç gösteren malzemeler..... 30
Şekil 4.3	Açıkta döşenen (toprağa gömülü olmayan, havadaki) bir kablo için ısı eşdeğer devre..... 32
Şekil 4.4	Kabloda ısıma (radyasyon) ile ısı yayılımı..... 34
Şekil 4.5	Kabloda taşıma (konveksiyon) ile ısı yayılımı..... 35
Şekil 4.6	Temas yüzeyinin ısı yayılımına etkisi..... 37
Şekil 5.1	h derinliğine gömülmüş, r yarıçaplı kablonun sıcaklık dağılımı hesabı için şekil..... 38
Şekil 5.2	120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablo çevresinde sıcaklık dağılımı tablosunu elde etmek için kullanılan şekil..... 41
Şekil 5.3	89/154kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²), 120 cm'e gömülmüş kablonun topraktaki sıcaklık dağılımı..... 42
Şekil 5.4	Farklı gömülme derinliklerindeki 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablonun çevresindeki sıcaklık dağılımı..... 43
Şekil 5.5	89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablonun farklı ısıal öz dirençlere sahip topraklardaki sıcaklık dağılımı..... 44
Şekil 5.6	Farklı gömülme derinliklerindeki 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun çevresindeki sıcaklık dağılımı..... 45
Şekil 5.7	20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun farklı ısıal öz dirençlere sahip topraklardaki sıcaklık dağılımı..... 46

Şekil 5.8	Yan yana döşenmiş iki adet kablo(A ve B) ve G görüntüsü.....	47
Şekil 5.9	Farklı h/a ve kablo sayıları için gruplaşma faktörleri.....	49
Şekil 6.1	Elektrolitik banyo deneyinde kullanılan deney düzeneği.....	52
Şekil 6.2	Toprak altına gömülmüş kabloların benzetimi için kullanılan genel deney düzeneği.....	53
Şekil 6.3	20,3/35kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun benzetimi ile elde edilen eşpotansiyel çizgiler.....	54
Şekil 6.4	89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablonun benzetimi ile elde edilen eş potansiyel çizgiler.....	55
Şekil 6.5	İki adet 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun benzetiminde kullanılan deney düzeneği.....	56
Şekil 6.6	İki adet 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablonun benzetimi ile elde edilen çizgiler.....	57
Şekil 6.7	89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kabloda iç sıcaklık dağılımının deneysel belirlenmesi için deney düzeneği.....	58
Şekil 6.8	89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablusunun deneysel olarak bulunan iç sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 7.1	20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablo için deney ve hesap sonuçlarının karşılaştırılması.....	60
Şekil 7.2	89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablo için deney ve hesap sonuçlarının karşılaştırılması.....	61
Şekil B.1	100 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	71
Şekil B.2	80 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	72
Şekil B.3	60 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	73
Şekil B.4	40 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	74
Şekil B.5	20 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	75
Şekil E.1	70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	84
Şekil E.2	60 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	85
Şekil E.3	50 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	86
Şekil E.4	40 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	87
Şekil E.5	30 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	88
Şekil E.6	20 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	89
Şekil E.7	10 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm ²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil	90

Şekil G.1	Deneyde kullanılan elektrotlar	95
Şekil G.2	Deney düzeneği	96
Şekil G.3	Tek kablo benzetimi deneyi	97
Şekil G.4	İki kablo benzetimi deneyi	98
Şekil G.5	Kablo içi sıcaklık dağılımı deneyi	99



SEMBOL LİSTESİ

A	: Malzemenin ısı geçişine dik yöndeki kesiti (m^2)
b, b'	: Ortamın ortalama sıcaklığı t_m 'den yararlanılarak hesaplanan katsayılar
c_A	: Sıcaklık artışının bulunacağı noktanın kablonun görüntüsüne olan uzaklığı (cm)
c_{A'}	: Sıcaklık artışının bulunacağı noktanın kabloya uzaklığı (cm)
C_b	: Kablonun birim uzunluğunun kapasitesi ($\mu F/m$)
c_{kA}	: Sıcaklık artışının bulunacağı noktanın kabloya ve görüntüsüne olan uzaklıklarının oranı
C₁, C₂	: Diferansiyel denklemin katsayıları
d	: Kablo dış çapı (mm)
D	: Elektriksel akı yoğunluğu (deplasman)
d_i	: Metal kılıf veya ekranın iç çapı (yalıtkanın dış çapı) (mm)
d_L	: Kablo damar iletkeni çapı (mm)
d_M	: Metal kılıf veya ekranın dış çapı (mm)
e	: Kablo eksen kaçıklığı (mm)
e_A	: Kablo eksen kaçıklığı ile eşisıl (izotermal) çemberin merkezi arasındaki uzaklık (mm)
E	: Elektrik alan şiddeti
E_r	: Güneş ışıma (radyasyon) yoğunluğu (W/m^2)
f_c, f_r	: Havanın ısıl direncini hesaplamak için kullanılan katsayılar
h	: Kablo gömülme derinliği (cm)
h'	: Kablonun yeryüzüne göre aksinin yeryüzünden uzaklığı (cm)
h₀	: Kablo eksen kaçıklığının toprak yüzeyine olan uzaklığı (cm)
h_t	: Isı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ K$)
I	: Akım (A)
j	: Akım yoğunluğu (A/m^2)
k	: Malzemenin ısıl iletkenliği
K	: Isıl iletkenlik
K_d	: Yalıtıkanda kullanılan malzemelerin ısıl iletkenlik değerleri ($^\circ K \cdot m/W$)
K_G	: Toprağın ısıl iletkenliği ($^\circ K \cdot m/W$)
K_S	: Dış kılıfta kullanılan malzemelerin ısıl iletkenlik değerleri ($^\circ K \cdot m/W$)
L, l	: İletkenin boyu (m)
n	: Kablodaki iletken sayısı
p	: Hava basıncı (hPa, mmHg, mbar)
P_i	: Kablonun yük akımı ile ilgili olan kayıplar (W)
P_d	: Kablodaki yalıtkan kısımlardan kaynaklanan kayıplar (W)
P_T	: Kabloda oluşan toplam kayıp (W)
q	: Elektriksel akı
Q	: İletilen ısı, ısı geçişi (W)
q_r	: Silindrisel sistemde radyal ısı akış yoğunluğu (W/m^2)
r	: Yarıçap (mm)

r_A	: Sıcaklık artışının bulunacağı noktadan geçen eşıl (izotermal) dairenin yarı çapı (mm)
R_{dc}	: İletkenin doğru akım direnci (Ω)
R_T	: Isıl direnç (genel gösterim)
R_{Ta}	: Havanın ısı direnci ($^{\circ}K \text{ m/W}$)
R_{Tc}	: Kablonun (alternatif akımda R_{Tc}') ile gösterilen ısı direnci ($^{\circ}K \text{ m/W}$)
R_{Td}	: Yalıtımın ısı direnci ($^{\circ}K \text{ m/W}$)
R_{TG}	: Yeraltı kablusunun çevresindeki toprağın ısı direnci ($^{\circ}K \text{ m/W}$)
R_{Ti}	: İç koruyucu kısımların ısı direnci, ($^{\circ}K \text{ m/W}$)
R_{Ts}	: Dış kılıfın ısı direnci ($^{\circ}K \text{ m/W}$)
R_{Tt}	: Omik kayıplar dikkate alınarak hesaplanmış kablounun fiktif ısı direnci ($^{\circ}K \text{ m/W}$)
R_{wr}	: İletkenin alternatif akım direncidir (Ω)
$\tan\delta$	: Dielektrik kayıp faktörü.
t_o	: Kablo yüzeyinin sıcaklığını ($^{\circ}K$)
t_p	: Kablo için izin verilen çalışma sıcaklığı ($^{\circ}K$)
t_v	: Ortamdaki havanın sıcaklığını ($^{\circ}K$)
t_m	: Ortamın ortalama sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}K$)
T_i	: Silindrisel sistemde en içteki ortamın sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T_o	: Dış ortamın sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T_s	: Yüzeyin sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T_{∞}	: Yüzeyden çok uzak (sonsuz uzak) noktanın veya çevrenin sıcaklığı ($^{\circ}K$)
U	: Fazlar arası gerilim
ω	: Açısal frekans ($\omega = 2\pi f$, f frekans)
y_p	: Yakınlık etkisi
y_s	: Deri olayı etkisi
Δt_d	: Dielektrik kayıplardan dolayı iletkenindeki ısı artışı ($^{\circ}K$)
α_c	: Isı transfer katsayı (W/m^2)
α_0	: Kablo dış kılıfının soğurma katsayısı
α_r	: Işıma (radyasyon) ile ısı yayılım katsayısı (W/m^2)
ϵ_0	: Kablo yüzeyinin bağıl ısı yayma faktörü
λ_1	: Metal kılıftaki girdap akımı etkisi
λ_2	: Kablo zırhındaki histeresiz kayıplarının etkisi
σ	: Stephan-Boltzmann sabiti (W/m^2K^4)
$\Sigma\delta$	: Gruplaşma faktörü

ISIL VE ELEKTRİKSEL BÜYÜKLÜKLER ARASINDAKİ ANALOJİDEN YARARLANARAK YÜKSEK GERİLİM YERALTI KABLOLARINDA SICAKLIK DAĞILIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Elektrik enerjisi günümüzün en temel ihtiyaçlarından biri olduğu aşîkardır. Bu enerjinin üretildiğı yerden kullanılacağı yere iletiminde ve dağıtımında enerji iletim hatları kullanılır. Genelde uzak mesafeler için havai hatlar kullanılır. Fakat şehir içlerinde iletim ve dağıtım için yeraltı kabloları kullanılır. Bu çalışmada yeraltı kablolarının üzerinden akım geçmesi sonucu ısınması nedeniyle oluşan ısının kablo içinde ve çevresinde dağılımı incelenmiştir. Ayrıca bu dağılımın deneysel olarak ta bulunabileceğı belirtilmiştir.

İlk bölümde yeraltı kablolarının tarihsel gelişimi hakkında bilgi verilmiştir. Yapılan ilk kablolar ve ilk kablo deneyleri belirtilmiştir. Ayrıca bu bölümde yeraltı kablolarının üretiminde varolan dönüm noktaları tarihleri ve yapan kişilerin isimleri ile yer almaktadır. Bu bölümde son olarak, günümüzde hakkında deneysel araştırmalar yapılan süper iletkenler ile ilgili bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde yeraltı kabloları için hayati önem taşıyan akım taşıma kapasitesi anlatılmaktadır. Akım taşıma kapasitesini hesaplarken kullanılan formüller, kullanılan formüllerdeki değişkenler ve akım taşıma kapasitesini etkileyen faktörler belirtilmiştir. Ayrıca bu bölümde yeraltı kablosunu oluşturan bölümler belirtilmiştir. Bu bölümlerde kullanılan malzemelerin cinsi, boyutları ve kullanım miktarları hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde ilk olarak ısı akışı hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Malzemeler üzerinden akan ısının maruz kaldığı dirençler belirtilmiş ve bu dirençlerin hesaplanması için gerekli denklemler verilmiştir. Daha sonraki kısımlarda elektrik ve ısı arasındaki benzerlik hakkında bilgi verilmiştir. Isıl ve elektriksel bağıntılar bir arada verilerek aralarındaki benzerlik gösterilmiştir. Ayrıca bu benzerlik verilen şekiller ile desteklenmiştir.

Dördüncü bölümde ikinci bölümde sözü edilen kablo kısımlarının, havanın ve toprağın ısı dirençleri hakkında bilgi verilmiştir. Toprağın ısı direncini etkileyen faktörler, toprak cinslerine göre ısı dirençlerin değişimi incelenmiştir. Kablolarının açıkta döşenmesi sonucu kablonun etrafındaki havanın gösterdiği ısı direnç ve bu ısı direnci etkileyen faktörler belirtilmiştir.

Beşinci bölümde kablonun topraktaki ısı alanı incelenmiştir. Isınan bir yeraltı kablosunun çevresine verdiği ısının toprakta nasıl dağıldığı anlatılmıştır. Bu dağılımı örneksel olarak göstermek amacı ile 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000 mm² kesitli) ve 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) iki adet kablo kullanılmıştır. Bu kabloların farklı ısı öz dirençlerine sahip topraklardaki ve farklı derinlerdeki ısı dağılımları grafiksel olarak verilmiştir.

Son iki bölümde daha önceki bölümlerde söz edilen elektrik akımı ve ısı akışı arasındaki benzerlikten yola çıkarak kablonun sıcaklık dağılım çizgilerini, elektrostatik alan çizgileri ile aynı olabileceğini kanıtlamak amacı ile yapılan deneylerden söz edilmiştir.. Yapılan deneylerden elde edilen veriler ile sayısal hesap ile elde edilen verilerin grafiksel olarak karşılaştırılması verilmiştir.

Sonuç olarak kablolar için hayati önem taşıyan ısınmanın bağlı olduğu faktörler ve bu faktörlerin değişimi incelenmiştir. Isınmanın kablonun akım taşıma kapasitesine etkisi ayrıntılı olarak verilmiştir. Ayrıca kabloların topraktaki ısı dağılımının uygun bir benzetim ile deneysel olarak elde edilebileceği, yapılan deneyler ile gösterilmiştir.

ANALYSIS OF THERMAL DISTRIBUTION OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLES BASED ON ANALOGY BETWEEN THERMAL AND ELECTRICAL PARAMETERS

SUMMARY

It's clear that the electric power is the most important necessity nowadays. To deliver and distribute this energy from where it has been produced to it will be used, the transmission lines are used. For long distance usually overhead lines are used. But for deliver and distribute power in cities, underground cables are used. In this study, the distribution of heat generated from loaded underground cable is analysed and also this distribution can be found by experimental tests.

In the first chapter of this thesis, information is given for the historical development of underground cables. The first produced cables and first made experiments are explained. Also in this chapter the turning points for underground cables are given with the dates and names who has made. Lastly in this chapter, some info is given about super conducting which nowadays experimental researchs made.

In the second chapter, the current carrying capacity which is the most important parameter for underground cables is explained. The formulas, the variables in the formulas and the effects affecting on changed current carrying capacity is also mentioned. Also in this chapter, parts of the underground cable structure are given. And for that parts, type of materials, sizes and amount of usage is given

In the third chapter, firstly detailed information is given about heat flow. The resistance subjected to the heat flowing in the material is given and the formulas that will used to find this resistance is also given. Later in this chapter, information is given about analogy between heat and electric. The equations about heat and electric is given together to show the analogy between them. Also to support this analogy some pictures are given.

In the fourth chapter, the cable parts, as told before in chapter two, knowledge of thermal resistivity of air and soil is given. The effects affecting on changed the

thermal resistivity of soil with change of the soil type is analysed. The air thermal resistance for the cables installed in air and the effects that change this resistance are also explained in this chapter.

In the fifth chapter, the heat field for the cable installed in ground is examined. The heat distribution is told for a heated cable (by loading) which is installed in ground is described. To show this distribution two cables, 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000 mm² cross section area) and 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² cross section area) are used. For this cables, graphical changes are given for different soil thermal resistivities and depths.

In last two chapter, with a starting point by similarity with the electric current and heat flow as mentioned before, the experiments are shown for verifying electrostatic field lines and heat distribution lines are same. The data get from the experiments and the data get from the numerical calculations are compared by graphics.

As a result, heating which is the most important parameter for cables, depends on which factors and changing of this factors is analysed. The effect that affects the current carrying capacity is given by details. Also it is proved that, the thermal distribution of cables in the ground can be get by experimental ways by suitable models.

1.GİRİŞ

Kablo, elektrik devre veya elemanlarını birbirine bağlayan bir elektriksel bağlantı elemanıdır. Elektriğin bulunması ile birlikte günümüze kadar, elektriğin iletilmesi, dağıtılması, kullanılması amacıyla kablo olarak adlandırılabilen değişik bağlantı elemanları kullanılmıştır. Temelde basit gibi görünen yapısıyla kablo, güç ve enerji düzeyi yükseldikçe sadece elektriksel değil aynı zamanda ağırlıklı olarak ısı ve mekanik problemleri ile karmaşık bir özellik göstermektedir. Teknolojideki gelişmelerle uygulamada karşılaşılan problemlere yanıt verecek yeni istekleri karşılayacak kablo geliştirme çalışmaları kesintisiz sürmüştür. Elektriksel, ısı ve mekanik koşulları sağlayacak iletken ve yalıtkan malzeme geliştirme, bu malzemelerin değişik koşullar altında davranışlarını ve özelliklerini belirleme ağırlıklı yapılan çalışmalardandır. Kablo ekleri ve kablo başlıkları gibi kabloyu yakından ilgilendiren kablo donatıları da ayrı bir çalışma odağı olmuştur.

Yalıtımla ilgili araştırmalar, delinme, kısmi boşalma, ağaçlanma, iz oluşumu üzerine yoğunlaşmıştır. Bu araştırmaların hedefi, güvenilir, istenilen nitelikte, uzun ömürlü ve ekonomik kablo yapılarına ulaşmaktır. İyi bir elektriksel yalıtkan iki ana gereksinime uygun olmalıdır. Birinci gereksinim elektriksel direncin ve dielektrik dayanımının yüksek olmasıdır. İkinci gereksinim ise ısı ve mekanik özellikleri ile ilgilidir. Duruma bağlı olarak üçüncü gereksinim de dielektrik kayıp ve dielektrik sabiti olur. Enerji sistemleri için en önemli konu istenen özelliklerin çevre koşulları ile değişmemesi ve bunun ömür boyu sürmesidir.

Enerji iletimi kritik olarak elektriksel yalıtıma bağlıdır. Günümüzde yalıtkan malzeme olarak etilen propilen yerine çapraz bağlı polietilen (XLPE) tercih edilmektedir. Bunun nedeni XLPE'nin dielektrik dayanımının etilen propilene göre daha yüksek olmasıdır. Özellikle su ağaçlanması ve elektriksel ağaçlanma hala büyük bir problemdir. Su ağaçlanmasına dayanıklı ve su geçirmez malzemeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Silikon veya diğer kimyasal katkı maddeleri

emdirilmiş kablo yalıtım malzemeleri ağaçlanmaya karşı daha fazla direnç göstermektedir [1].

Yeraltına döşenen kablolarda baş gösteren arıza sayıları artmaya başladıktan sonra kablo üreticileri sorunu saptamak ve uygun çözümler bulmak için çalışmalar yapmaktadır. Geçen yıllar içinde kablo malzemeleri ve tasarımında sürekli bir gelişme yaşanmıştır. Bu zaman içinde elde edilen gelişmelerden yararlanabilmek için endüstriyel kablo şartnamelerinde revizyonlar yapılmıştır. Bu gelişmeler günümüzde kullanılan çok güvenilir yeraltı kablolarının üretimine ön ayak olmuştur [2]. Gelecekte iletim ve dağıtımda kullanılacak kablolarda oluşacak arızaları, arıza bulucular tespit edecektir. Son teknoloji ile üretilmiş kabloların içine yerleştirilecek mikroskobik sensörler, arızanın yerini saptayacak ve daha da büyümesine izin vermeden arızayı bildirecek; hatta bu arızaları önceden tespit ederek arıza gerçekleşmeden önlemını almayı mümkün kılacaktır.

İletken ile ilgili araştırmalar öncelikle kablodan akan akım ve oluşan sıcaklıkla ilgili olmuş, modelleme, deney ve hesaplama ağırlıklı çalışmalar yapılagelmiştir. Bu tez çalışmasında, kablolardaki ısı sorunlarının incelenmesi amacıyla, sıcaklık dağılımını deneysel incelemeye yönelik elektrik-ısı devre benzerliğini kullanarak çalışmalar yapılması planlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle kısaca kablolardaki gelişmeler ve kabloları tanıtan bilgiler verilmiş, sonrasında kablolarda ısı dağılım problemi incelenerek önerilen modellemenin kuramsal temelleri sunulmuştur. Çalışma verilen modele uygun deneysel çalışmalarla sürdürülmüş ve pratik, ekonomik ve uygulanabilir bir yol önerilmiştir.

1.1 İlk Yeraltı Kablosu

Yeraltı kablolarının geçmişı, telgrafın keşfedildiğı zamana kadar uzanır. Telgraf, elektrik enerjisi kullanımının ticari öneme sahip olmasına neden olan ilk alettir. Telgrafın gelişimi, kablo kullanımını gerekli kılmıştır.

1795’de Barselona Bilim Akademisi dergisinde yayınlanan, Don Francisco Salva (1751-1828) tarafından yazılmış makale, telgraf haberleşmesinde kullanılan kağıt yalıtımlı kablo ile ilgili kayıtlara geçmiş ilk bilgidir [3]. Salva bu makalesinde telgraf haberleşmesi hakkındaki çalışmalarını açıklarken ayrıca kabloların yeraltına döşenebileceğı fikrini ortaya atmıştır. Bu fikir, Madrid ile Aranjuez arasındaki yaklaşık 42 kilometrelik telgraf hattında uygulanmıştır [3].

Kabloların yeraltına döşenmesi düşüncesi, bu konuyla uğraşanların çoğu tarafından benimsenmiştir. Yeraltı kabloları ile başlayan gelişmeleri, sinyal gönderme ve alma aygıtlarındaki gelişmeler izlemiştir. İlk yeraltı hatlarının çoğu ticari amaçlar için yapılmıştır. Bu başlangıç, yeraltı enerji kablolarının gelişimine öncülük etmiştir.

1.2 İlk Telgraf Hatları

1812’de Baron Schilling, St. Petesburg’daki Neva nehrinin altında bir mayını, kauçuk bantlarla yalıtılmış bir kablodan elektrik akımı göndererek patlatmıştır. Bunun kayıtlara geçmiş, tamamen yalıtılmış bir iletkenin kullanıldığı ilk uygulama olduğu sanılmaktadır [3].

Yeraltı hattı kullanılan ilk deneylerden bir diğerini de 1816’da Francis Ronalds yapmıştır. Yaptığı çalışmada yağ emdirilmiş pamuğa sarılmış bir bakır iletkeni cam boru içinden geçirmiştir. Yağlı pamuk ve cam boru yalıtımlı bu yapıyı (kabloyu) da üzerinde 5 cm genişliğinde oluk bulunan ziftlenmiş bir tahtanın oluğuna yerleştirmiş ve bunu da 120 cm derinliğinde ve 135 m uzunluğunda bir kanal içine koymuştur. Bu uygulamada ekler ve uçlar parafin ile yalıtılmıştır. Daha sonraki uygulamalarda yalıtım için yağlı pamuk yerine kauçuk bantlar kullanılmıştır. Bu kablonun çalışması esnasında pek çok yalıtım hatası ile karşılaşılmasına rağmen bu uygulama yeraltı iletiminde yeni ufuklar açmıştır.

1837’de W. R. Cooke ve Charles Wheatstone, Londra’nın Euston ve Camden tren istasyonları arasındaki beş telli bir telgraf sistemi için demir yolu boyunca bir yeraltı kablosu döşemişlerdir. Reçine emdirilmiş pamuk ile yalıtılmış teller ve ziftli tahta üzerindeki kanallara yerleştirilmiştir. Bu hat kısa bir süre için sorunsuz çalışmış, ancak daha sonra yalıtımın nem soğurması nedeniyle yalıtım arızaları ile karşılaşmış ve kullanım dışı kalmıştır.

Cooke ve Wheatstone, Paddigton ve Drayton arasına bir hat daha kurmuşlar ama bu defa hattı nemden korumak için tahta yerine demir borular kullanmışlardır. Ancak kısa süre sonra bu hatta da yalıtım hataları meydana gelmiş ve bu hat ta kullanım dışı kalmıştır.

1842’de S. F. B. Morse, New York limanındaki Governor adası ile Castle Garden arasında zift emdirilmiş hint keneviri ile yalıtılmış ve kauçuk şeritler ile kaplanmış kablo kullanmıştır. Bir sonraki yıl benzer bir hat Washington D.C.’deki bir kanala döşenmiştir.

1.3 Gutta Percha’nın Kullanımı

Gutta Percha nedir? Telgraf kabloları su altında kullanılmadan önce, su ve elektrik yalıtımını sağlayacak yalıtım malzemesine gereksinim vardı. Yapay plastiğin bulunuşundan önceki zamanda bu gereksinimi karşılamak amacıyla Isonandra Gutta ağacının reçinesi olan gutta percha’dan yararlanılmıştır. Gutta percha, gutta percha ağacının (Şekil 1.1) sütlü sıvısının buharlaştırılması ve çıkan buharın yoğunlaştırılması sonucu elde edilen latekstir [4].



Şekil 1.1. Gutta percha bitkisi.

Daha önce kullanılan Hint kauçuğuna göre belirgin üstünlükleri olan bu malzeme, kullanılmadan önce sıcak suda yumuşatılmaktadır. Bu uygulama, malzemenin soğuduğunda kırılgan bir yapıya dönüşmesini engellemektedir. Aksine soğuk ve basınç, malzemenin yalıtım özelliklerini artırmakta ve sualtı kullanımı için uygun hale getirmektedir. Malzemenin su altında kullanılması, malzemenin güneşten

korunmasını ve dolayısıyla güneşin neden olduğu yalıtım zayıflamasından etkilenmemesini sağlamaktadır. Gutta perchanın ilk olarak adının duyulduğu yer, Micheal Faraday'ın 5 Şubat 1848 günkü günlük sayfasıdır. Bu yazı, daha sonra Filozofik Magazinin aynı yılın mart sayısında basılmıştır.

Gutta percha ile yalıtılmış ilk yeraltı kablosu 1848 yazında Berlin'den Gross Beren'e döşenmiştir. Bu kablodan sonra, Siemens ve Halske firmaları tarafından Prusya Posta Kuruluşu için yaklaşık 4500 kilometrenin üzerinde kablo üretilmiştir.

1.4 Kağıdın Yalıtım Malzemesi Olarak Kullanımı

1795'te Salva, telgraf iletkenlerinin yalıtımı için kağıt kullanmıştır. Salva'dan 50 yıl sonraya kadar kağıdın yalıtım malzemesi olarak kullanıldığı bir uygulama literatüre girmemiştir. Bu durum, 1836'da Micheal Faraday'ın Royal Enstitüsündeki bir konferansta kağıdın iyi bir yalıtım malzemesi olduğunu deneysel olarak göstermesiyle değişmiştir.

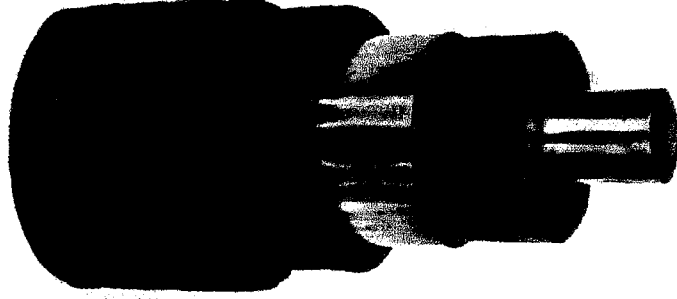
İlk zamanlarda kağıdın nem emici olduğu, bunun telgraf ve aydınlatma hatları için olumsuzluk getireceği, buna karşılık gutta perchanın neme karşı daha dayanıklı olduğu şeklindeki iddialarla yalıtım için kağıt kullanımına karşı çıkmıştır.

1857'de F. M. Baudoin tarafından kağıtla yalıtım için iki yöntem sunulmuştur. Bunlardan birincisi; kabloyu çaprazlanmış sabit kağıt bobinleri çevresinde döndürmek, ikincisi ise kabloyu sabit tutup kağıt bobinleri kablo çevresinde döndürmektir. İki yöntemde de suya karşı yalıtımı sağlamak amacı ile kablo zift banyosundan geçiriliyordu.

1867 yılında A. F. Jaloureau ve C. L. Lardy tarafından kağıt yalıtımına yeni bir yöntem eklenmiştir. Kablo ilk olarak ziftli kağıt ile kaplanmaktaydı. Daha sonra bu yapı sıcak zift içinden geçirilip üzerine tekrar kağıt kaplanmakta ve bu işlem yalıtımın kuvvetlenmesi için birkaç kez tekrarlanmaktaydı. Son olarak kablo tekrar zift ile kaplanıp, kablo bobine sarılırken yapışmayı engellemek için kum ile kaplanmaktaydı.

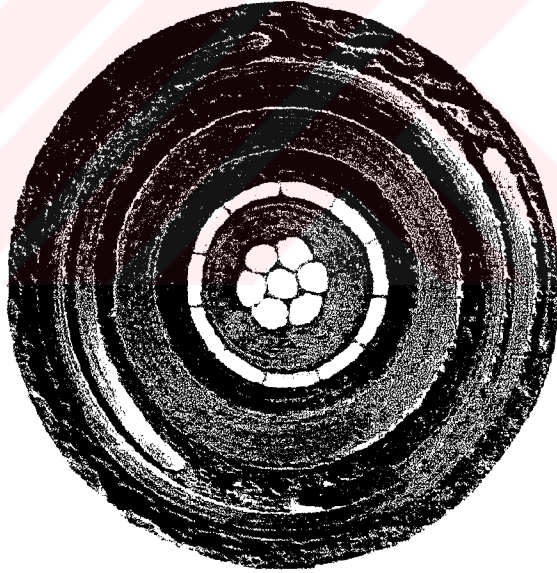
Kağıt yalıtımlı ilk önemli hat, 1890 yılında Ferranti tarafından Deptford ile Londra arasında kurulan 10 kV'luk hattır (Şekil 1.2). Bu hattın bazı bölümleri 50 yıl sonra bile kullanılmaya devam etmiştir. Kabloların yalıtımı, reçineli yağ emdirilmiş geniş kağıt bantların kablo iletkenine helisel olarak sarılmasıyla oluşturulmakta idi.

Yalıtılmış iletkenler kurşun borular içine yerleştirilmekte ve esnek olmayan bu yapı da doğrudan toprağa gömülmekte idi.

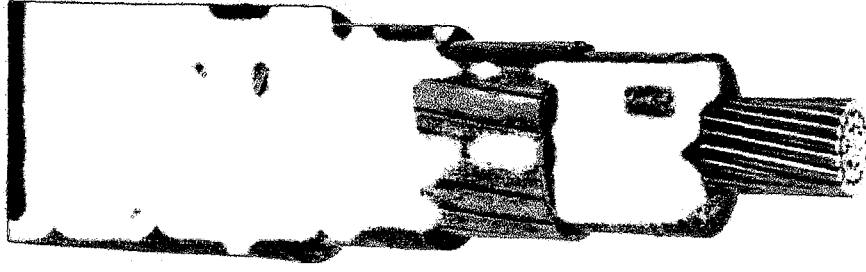


Şekil 1.2 Ferranti'nin 1890 yılında kullandığı 10 kV'luk kablo.

Daha sonraları Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Norwich tel fabrikası tarafından üretilmiş kablolarda reçine emdirilmiş daha dar kağıtlar kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar kağıt yalıtımlı ilk esnek kablolar olmuştur (Şekil 1.3,1.4).



Şekil 1.3 1892'de Lancashire'de kullanılan 2 kV'luk kağıt yalıtımlı esnek kablo.



Şekil 1.4 1896'da Deptford'da kullanılan 10 kV'luk kağıt yalıtımlı esnek kablo.

Kağıt yalıtımlı kabloların gelişimi şu şekilde devam etmiştir:

- 1914'de Martin Hochstadter, çok damarlı zırhlı kabloları tanıtmıştır. Bu kablolar, H tipi kablolar olarak bilinir.
- Luigi Emanuelli, kağıt yalıtımlı kablolarla yağ ve yağ genleşme kaplarının kullanıldığı kablo tasarımını sunmuştur. Bu tasarım, gerilimi 69 kV ve daha yüksek gerilimli kabloların yapılmasına olanak vermiştir.
- 1927'de H. W. Fisher ve R. W. Atkinson tarafından basınç altında yağ emdirilmiş kağıdın delinme dayanımının çok büyük değerlere çıktığı gösterilerek bu uygulamanın patenti alınmıştır.

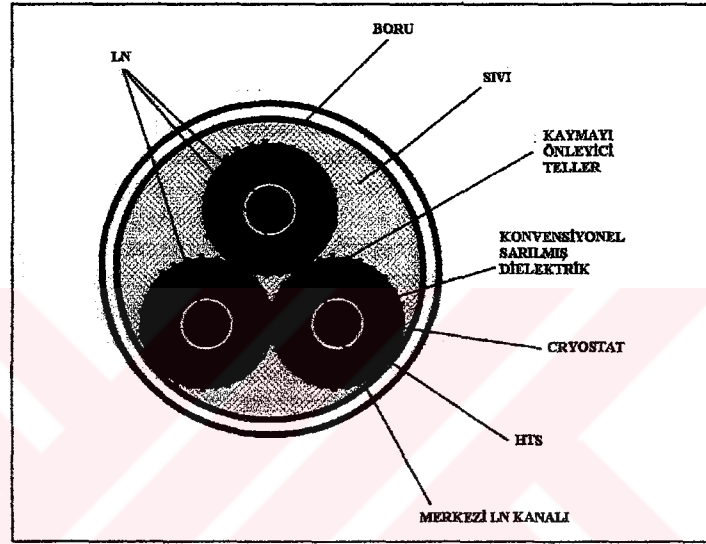
Kağıda emdirme maddesi olarak kullanılan reçineli yağ yerine 1925'de saf bir yağ olan circa kullanılmıştır. Bu uygulama, 1983'te polibütan kullanılmaya başlanıncaya kadar sürmüştür. 1941'de polietilenin bulunuşu, elektrik enerjisinin dağıtımında ve iletiminde önemli değişikliklere neden olmuştur [5].

1.5 Süper İletkenler

Gelecekteki güç gereksinimine bağlı olarak daha çok yer altı kablosu döşenmesine ihtiyaç duyulacaktır. Bununla birlikte büyük şehirlerde döşenecek kablolar için açılacak yeni kanallara yer bulmak zorlaşacaktır. Bu nedenle birçok kablonun taşıyacağı yükü taşıyabilecek tek bir kabloya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç yüksek sıcaklıkta süper iletken (HTS) malzemelerin keşfedilmesini sağladı.

İlk olarak $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ gümüş kaplı tel geliştirildi. Günümüzde yüksek sıcaklıkta süper iletkenli kabloyu üretmek için hala bazı anahtar teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır [6].

Sürekli geliştirilme aşamasında olmasına rağmen, yüksek sıcaklıkta süper iletkenli (HTS) kabloların enerji iletiminde yaygın kullanım olanağı bulacağı umulmaktadır. Böyle bir olanak, aynı işletme geriliminde iletilen güç miktarını en azından ikiye katlayacaktır. Bu kapasiteleri ile süper iletkenli kablolar, halen kullanımda olan şebekelerde ve yeni yapılması düşünülen şebekelerde gelişmelere neden olacaktır.



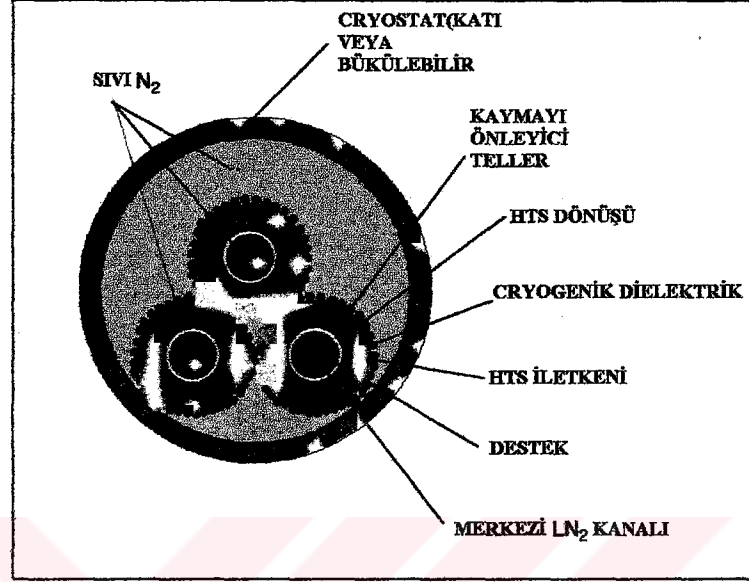
Şekil 1.5 Bireysel (damar iletkeni) soğutmalı süper iletkenli kablo.

Şu an gelişme aşamasında olan iki tip HTS kablo bulunmaktadır. Bunlar, sıcak yalıtımlı ve soğuk yalıtımlı süper iletkenli kablolardır.

Sıcak yalıtımlı kablolarda (Şekil1.5), sadece ana faz iletkeni soğutucu (cryostat) içinde, düşük sıcaklıkta bulunur. Kablonun geri kalan kısmı normal kablolardaki gibidir. Soğuk yalıtımlı tasarımda ise (Şekil1.6), tüm kablo ortak soğutucu (cryostat) içindedir. Bu tasarımda, normal kablodan 5 kat daha fazla akım taşınabilir. Bu kabloların işletme giderleri sıcak yalıtımlı tasarıma göre daha düşüktür ama ilk kurulum maliyetleri daha pahalıdır [7].

Kablolar ile ilgili ana problem, iletim sırasında çoğunlukla iletkenin direnci nedeni ile oluşan ısı ve bu ısının dağıtılmasıdır. Tüm iletkenler sıcaklıkları arttıkça daha küçük öz direnç gösterirler. Süper iletkenler kritik bir sıcaklık değerinin altında hiç doğru akım direnci göstermezler. Bu kritik sıcaklık 20°K 'dir. Bu sıcaklığı elde

etmek için soğutma malzemesi olarak sıvı helyum kullanılır. Helyum ayrıca gereken elektriksel yalıtımı da sağlar. Helyumun kaynama sıcaklığı olan 4°K'de; $1,5 \times 10^{-9}$ ohm.cm doğru akım direnci gösteren %99,999 saflıktaki alüminyum iyi bir süper iletkenidir.



Şekil 1.6 Ortak soğutmalı süper iletkenli kablo.

Niobium ve alaşımları, 4°K kritik sıcaklıkta, üzerinde en çok çalışılan ve deneme kabloları yapılan metallerdir. 20°K kaynama noktasına sahip sıvı hidrojen, sıvı helyumdan daha ucuzdur ve bu olanak iletkenin etrafını saran soğutucu (cryogenik) kılıf maliyetini azaltmak bakımından değerlendirilebilir [7].

2. KABLOLARDA AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ

Düzgün şekilde ısıtılan bir cismin sıcaklığı yükselir. Sıcaklık başlangıçta hızla yükselip ortam sıcaklığını aşar. Cismin sıcaklığı ortam sıcaklığını aştığı andan itibaren cisim ısı kaybetmeye başlar. Bu kaybın büyüklüğü, cisim ile ortam arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır (Newton'nun soğuma yasası). Bu nedenle cismin sıcaklığı arttıkça ısı kaybı da buna bağlı olarak artar. Sonunda, oluşan ve kaybolan ısı oranlarının dengelendiği sıcaklığa gelir. Bu sıcaklık sürekli işletme sıcaklığı olarak bilinir ve büyüklüğü ısıнын geçmek zorunda olduğu yola yani cismin ve ortamın ısı direncine bağlıdır [7].

Bir kabloun sürekli akım taşıma kapasitesi dört ana etkene bağlıdır:

- 1) Kablo için işletme sırasında izin verilen en yüksek sıcaklık,
- 2) Kabloun ısı kaybetme özellikleri
- 3) Tesis şekli ve ortam koşulları
- 4) Gerilim düşümü

2.1 Akım Taşıma Kapasitesinin Hesabı

Kablolar, iletkeninden geçen akım nedeni ile ısınır. Alternatif akımda bu kaybın yol açtığı ısınmaya, metal kılıfta ve dielektrik (yalıtkan) malzemede ortaya çıkan kayıplardan dolayı oluşan ısınma da eklenir.

Kabloda oluşan ısının kablodan uzaklaşmasında, kabloun içinde bulunduğu ortam büyük rol oynar. Yeraltı kablolarında kabloun içine serildiği toprağın cinsi ısı alışverişini etkiler. İletken sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark toplam kayıp ile orantılıdır. Isı akış yasası (Fourier), Ohm yasası ile benzerlik gösterir [8].

Kablodaki ısı akış miktarı, kabloun yük akımı ile ilgili olan P_i kayıpları ve kablodaki yalıtkan kısımlardan kaynaklanan P_d kayıplarına bağlıdır. Yük akımı ile ilgili olan P_i ısı kaybı, iletken, metal kısımlarda ve zırhta; dielektrik kayıp olan P_d ise kablo yalıtımında oluşur. n iletkenli bir kabloda yük akımından dolayı oluşan kayıp

$$P_i = n \cdot I^2 \cdot R_{wr} \quad (2.1)$$

dir. Burada R_{wr} iletkenin alternatif akım direncidir. İletkenin doğru akım direnci R ise

$$R_{wr} = R + \Delta R \quad (2.2)$$

olur. Buradaki R direncinde ΔR 'lik artışa neden olan sebepler; deri olayı (y_s), yakınlık etkisi (y_p), metal kılıftaki girdap akımı etkisi (λ_I), varsa kablo zırhındaki histeresiz kayıplarının etkisi (λ_2) dir. Bu etkiler (2.2) denkleminde yansıtılırsa

$$R_{wr} = R + \Delta R = R(1 + y_s + y_p) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (2.3)$$

denkleminde elde edilir.

Dielektrik kayıp

$$P_d = n \cdot \omega \cdot C_b \cdot (U/\sqrt{3})^2 \cdot \tan \delta \quad (2.4)$$

formülünden hesaplanır. Burada, n damar sayısı, ω açısal frekans ($\omega = 2\pi f$, f frekans), C_b kablunun birim uzunluğunun kapasitesi, U fazlar arası gerilim, $\tan \delta$ dielektrik kayıp faktörüdür.

Kabloda oluşan toplam kayıp P_T , (2.1) ve (2.4) denklemlerinden yararlanılarak bulunan değerlerle

$$P_T = P_i + P_d \quad (2.5)$$

olarak hesaplanır. Isı akışı, kablodaki toplam ısı kaybının karşılığıdır. Bu ısı, yayılmaya başladığı noktadan dış ortama ulaşmaya kadar kablunun R_{Tc} (alternatif akımda R_{Tc}') ile gösterilen ısı direnci ile ortam ısı direnci (yeraltı kabloları için) toprağın ısı direnci olan R_{TG} 'yi aşmak zorundadır.

Kablodaki toplam ısı direnci:

$$R_{Tc} = R_{Td}/n + R_{Ti} + R_{Ts} \quad (2.6)$$

dir. Burada R_{Td} yalıtımın ısı direnci, R_{Ti} iç koruyucu kısımların ısı direnci, R_{Ts} dış kılıfın ısı direncidir. Toplam ısı direnci, kablunun ısı direnci ile ortamın ısı direncinin toplamından oluşur:

$$\Sigma R_T = R_{Tc} + R_{TG} = R_{Td}/n + R_{Ti} + R_{Ts} + R_{TG} \quad (2.7)$$

R_{TG} kablonun gömülü olduğu toprağın ısı direncidir. Alternatif akımın meydana getirdiği etkiler dolayısıyla ısı direnç de değişir. R_{Tc}' ile gösterilecek olan bu ısı direnç

$$R_{Tc}' = \frac{\frac{R_{Td}}{n} + (1 + \lambda_1) \cdot R_{Ti}}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} + R_{Ts} \quad (2.8)$$

formülü ile hesaplanır. Dielektrik kayıplar ile ilgili ısı direnç ise yalıtkanın ortasından başladığı kabul edilerek

$$R_{Tcd}' = R_{Td}/2n + R_{Ti} + R_{Ts} \quad (2.9)$$

bağıntısından hesaplanır. Buradan bir yeraltı kablosu için ısı yayılım yasası

$$\Delta T = P_i \cdot (R_{Tc}' + R_{TG}) + P_d \cdot (R_{Tcd}' + R_{TG}) \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemde $P_i = n \cdot I^2 \cdot R_{wr}$ yerine konur ve I akımını çekilirse

$$I = \sqrt{\frac{\Delta T - P_d (R_{Tcd}' + R_{TG})}{n R_{wr} (R_{Tc}' + R_{TG})}} \quad (2.11)$$

yeraltı kablosunun ısı dirençli akım taşıma kapasitesi formülü elde edilir [9].

2.2 Kablo Malzemeleri

2.2.1 İletkenler

Kablolarda iletkenleri, yalıtkanları, ekranları ve zırhları için çok çeşitli malzemeler kullanılır. Kablolarda en çok kullanılan iletken malzemesi bakır ve alüminyumdur [5].

Kablolarda iletkenlik hava hatlarına göre daha ön planda olduğundan çoğunlukla bakır iletken kullanılır. Kablolarda iletken malzemesinin mekanik dayanıklılığı önemli değildir. Bu nedenle, elektriksel iletkenlikten kaybetmemek için soğuk

haddeden geçirilmiş bakır yerine iletkenliği ondan daha yüksek olan tavlanmış bakır kullanılır [6]. Bazen nadirde olsa iletken malzemesi olarak sodyum kullanılır.

Son yıllarda yüksek sıcaklıkta süper iletken malzemelerin kullanımı da söz konusudur [4]. Malzeme seçiminde önemli etkenlerden biri de ekonomiktir. Aynı akım taşıma kapasitesine sahip iki kablodan bakır iletkenli olanın iletken çapı alüminyum olanına göre daha küçüktür. Buna karşılık alüminyum bakırdan daha ucuz ve hafiftir.

2.2.2 Yalıtkanlar

Kablo yalıtımları genelde, kağıt, sentetik polimer veya sıkıştırılmış gazdan oluşmaktadır. İlk kablolarda yalıtım malzemesi olarak kağıt kullanılmıştır. Daha sonra bu yağ emdirilmiş kağıda dönüşmüştür. Günümüzde yaygın olarak polimerler kullanılmaktadır. Alçak gerilimlerde polivinilklorür (PVC), orta gerilimlerde polietilen (PE), çapraz bağlı polietilen (XLPE), etilenpropilen (EPR) ve yüksek gerilimlerde XLPE ve EPR çok kullanılan polimerlerdir. Bunların yanında orta gerilimde yüksek yoğunlukta polietilen (HDPE), yüksek moleküler ağırlığa sahip polietilen (HMWPE) ve ağaçlanmaya dirençli XLPE (TRXLPE: Tree Retardant XLPE) de kullanılmaktadır.

Günümüzde gazlı kablolarda yalıtım malzemesi olarak genellikle sıkıştırılmış kükürt heksaflorür (SF_6), freon (CCl_2F_2) ve azot (N_2) gazları kullanılmaktadır [1].

2.2.3 Ekran (Siper) ve Kılıflar

Kağıt yalıtımlı kablolarda, genelde ekran ve kılıf malzemesi olarak kurşun veya alüminyum kullanılır. Metal kılıf kabloyu mekanik darbelere ve dış etkilere karşı koruduğu gibi, kablonun oluşturduğu elektrik ve manyetik alanları da ekranlar.

Ekranı oluşturan bakır tel veya bantların üzerine polietilen kılıf kaplanır. Böylelikle kablo yalıtımına nemin girmesi önlenir ve kablonun mekanik dayanımı artırılır. Bazı kablolarda yarı iletken malzemedan kılıflar kullanılır. Bu tip uygulamaya hem güç hem de haberleşme kablolarında rastlanır [6].

2.2.4 Zırh

Zırhlar kabloyu mekanik zorlamaya karşı korur. Zırhlı kablolarda metal kılıf ile zırh arasına mekanik yastık görevi görmesi amacı ile PVC bir tabaka konur. Zırh genelde

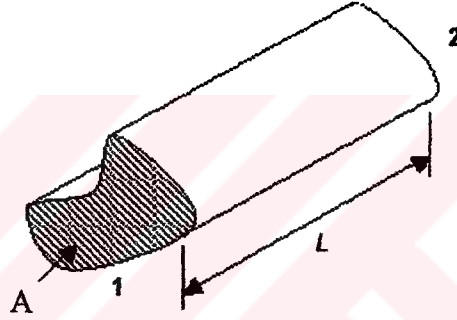
elik bantlar veya tellerden oluşur. Bununla birlikte bazen histeresiz ve girdap akımlarından dolayı oluşan kayıpları önlemek için bronz kullanılır. Zırhtan sonra kablounun en dışında tekrar bir PVC tabaka bulunur. Bu tabaka zırhı korozyona karşı korur [6].



3. ISI ile ELEKTRİK ARASINDAKİ BENZERLİK

3.1 İletimle Isı Geçişi

Bir katı malzemeden geçen ısı, ilk defa 1800'lerin başında J. B. Fourier tarafından matematiksel olarak ifade edilmiştir (Birinci Fourier Yasası). İletimle ısı geçişi, malzemenin geometrisine, ısı iletkenliğine ve malzemedeki sıcaklık dağılımına (gradyanına) bağılıdır. Malzemelerin ısı iletkenliği sıcaklıkla değişmesine rağmen, bu değişim çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.



Şekil 3.1. Bir malzemeden iletimle ısı geçişi.

İletimle ısı geçişini açıklamak için Şekil 3.1'deki gibi L uzunluğu boyunca A kesiti değişmeyen, sıcaklığı her iki ucunda sabit olan ve malzeme yüzeyinden ısı akışına izin verilmeyen bir malzeme göz önüne alınır ve iletimle ısı geçişi matematiksel olarak

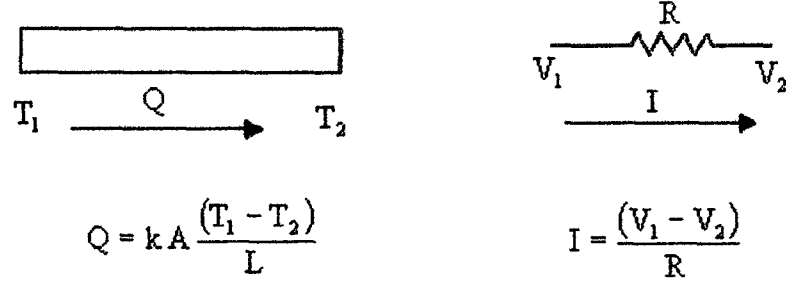
$$Q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (3.1)$$

bağıntısı ile belirtilir (Birinci Fourier Yasası) [12 - 14]. Bu bağıntı, bir boyutlu ısı geçiş denklemidir. Bu bağıntıda, Q birinci uçtan ikinci uca iletilen ısıyı (W), k malzemenin ısı iletkenliğini (W/m °K), A malzemenin ısı geçişine dik yöndeki kesitini (m²), L ise malzemenin boyunu (veya kalınlığını veya ısının geçiği uzunluğu) (m), T₁ 1 ucundaki, T₂ 2 ucundaki sıcaklığı (°K) gösterir. T₁ > T₂ olduğunda ısı akışı pozitifdir. Isı geçişi, iletme neden olan uçlar arasındaki sıcaklık farkına ve çubuğun kesit alanına bağılıdır. Isı geçişinde sıcaklıktaki değişim (sıcaklık

gradyanı), sıcaklık farkından daha önemlidir. Isı geçişi ile sıcaklık arasındaki bu doğrusal (lineer) ilişki nedeniyle ısı geçiş problemlerinin çözümü basittir.

3.2 Isıl ve Elektriksel Dirençlerin Benzerliği

İletimle ısı geçişi, elektrikteki bir malzemedan elektrik akımı geçişine benzer. Elektrik akımı, geçtiği malzemenin direnci ile karşılaşır. Benzer durum ısı geçişinde de vardır [12 – 17]. Bir malzemenin ısı geçişine gösterdiği dirence ısıl direnç denir. Şekil 3.2’de bu benzerlik gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Isıl direnç ile elektriksel direnç arasındaki benzerlik.

Isıl direnç,

$$R_T = \frac{L}{k \cdot A} \quad (3.2)$$

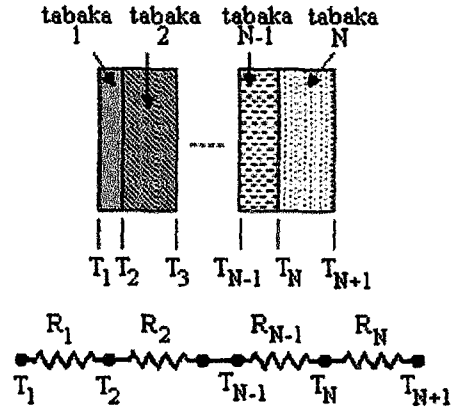
olarak ifade edilir. Isı geçişi ile sıcaklık farkı arasındaki ilişki

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_T} \text{ veya } (T_1 - T_2) = R_T \cdot Q \quad (3.3)$$

elektrik akımı ile potansiyel farkı (gerilim) arasındaki

$$I = \frac{(V_1 - V_2)}{R} \text{ veya } (V_1 - V_2) = R \cdot I \quad (3.4)$$

ilişkisine benzer. Direnç kavramı, ısıl ve elektriksel devrelerin incelenmesinde kolaylık sağlar. Örneğin birbirine seri n tabakadan ısı geçişinde, ısıнын geçtiği yolun toplam ısıl direnci önemlidir. Bir seri ısıl devrede eşdeğer (toplam) ısıl direnci bulmak için seri bağlı tüm dirençler toplanır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Seri bağlı ısı dirençler.

Her bir tabaka için;

$$T_i - T_{i+1} = Q \cdot R_i \quad (3.5)$$

denklemindeki her bir tabakanın ısı direnci R_i ;

$$R_i = \frac{L_i}{k_i A_i} \quad (3.6)$$

olarak tanımlanırsa tabakalardaki sıcaklık düşümü

$$T_1 - T_2 = Q \cdot R_1 \quad (3.7)$$

$$T_2 - T_3 = Q \cdot R_2 \quad (3.8)$$

$$\vdots$$

$$T_{N-1} - T_N = Q \cdot R_{N-1} \quad (3.9)$$

$$T_N - T_{N+1} = Q \cdot R_N \quad (3.10)$$

olur. Toplam sıcaklık düşümü, tüm tabakalardaki sıcaklık düşümlerinin,

$$T_1 - T_{N+1} = Q(R_1 + R_2 + \dots + R_N) \quad (3.11)$$

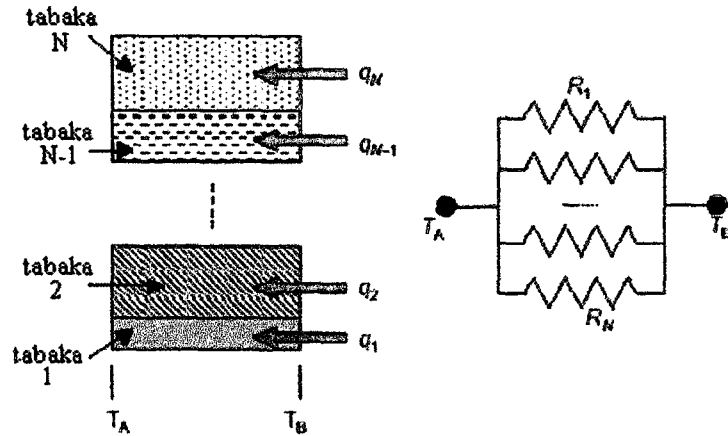
$$\Delta T = Q \cdot R_e \quad (3.12)$$

toplamına eşittir. Burada $\Delta T = T_1 - T_{N+1}$ ve

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{k_i A_i} \quad (3.13)$$

dir. Elde edilen denkleme bakıldığında toplam direnç ifadesi, elektrikteki seri dirençlerin toplamı ifadesi ile aynıdır. Isı akışının gerçekleştiği düzen Şekil 3.4'teki

gibi birbirine paralel tabakalardan oluşuyorsa, toplam (eşdeğer) ısı direnç, elektrikteki benzeri gibi paralel eşdeğer direnç hesabıyla bulunur.



Şekil 3.4. Paralel bağlı ısı dirençler

Tüm sistem için;

$$T_A - T_B = Q_i \cdot R_i \quad (3.14)$$

denkleminde;

$$Q_1 = (T_A - T_B) / R_1 \quad (3.15)$$

$$Q_2 = (T_A - T_B) / R_2 \quad (3.16)$$

denklemleri yazılır. Tüm denklemler taraf tarafa toplanırsa;

$$Q_{toplam} = (T_A - T_B) (1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N) \quad (3.17)$$

toplam ısı geçişi elde edilir. Bu denklemde toplam (eşdeğer) direnç, elektriksel eşdeğeri ile benzer şekilde hesaplanmaktadır [12, 13].

Tablo 3.1 Isıl ve elektriksel dirençler

	Isı	Elektrik
	$\Delta T = QR$ (Fourier)	$\Delta V = IR$ (Ohm)
seri	$R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_N$	$R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_N$
paralel	$R_i = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N)$	$R_i = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N)$

3.3 Yüzeyle Çevresi Arasında Taşınım İle Isı Geçişi

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

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.18)$$

bağıntısı ile verilir (Newton Yasası) [12]. Bu bağıntıda, Q çevreye verilen veya çevreden alınan ısı (W), h_t ısı taşınım katsayısı (W/m² °K), A yüzeyin kesit alanı (m²), T_s yüzeyin sıcaklığı (°K) ve T_∞ yüzeyden çok uzak (sonsuz uzak) noktanın veya çevrenin sıcaklığı (°K) dır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Taşınım ile ısı geçişi.

Yüzeyel ısı direnç kavramı R ile taşınım ile ısı iletim denklemi

$$Q = (T_s - T_\infty)/R \quad (3.20)$$

olur. Yüzeyel ısı direnç

$$R = 1/h_t A \quad (3.21)$$

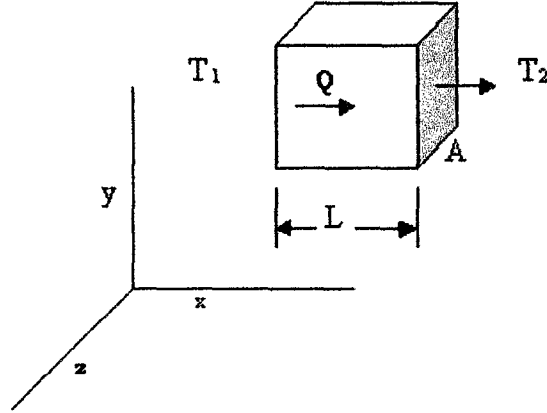
olarak elde edilir [12,13].

3.4 Bir Yüzeyden Geçen Isı

Bir yüzeyden çevreye veya çevreden yüzeye geçen ısı yüzeyden taşınım ile ve iletimle geçen ısıların toplamına eşittir.

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{L}{kA} + \frac{1}{hA}} = \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{L}{k} + \frac{1}{h_t}} \quad (3.22)$$

Burada Q yüzeyden geçen ısı (W), k malzemenin ısı iletkenliği (W/m °K), h_i ısı taşınım katsayısı (W/m °C), A yüzeyin kesit alan (m²), L malzemenin boyu (m), ΔT iç ve dış taraf arasındaki sıcaklık farkı (°K) dır.

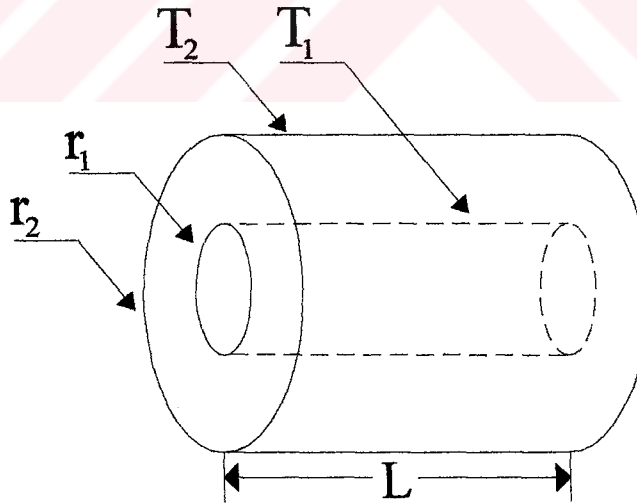


Şekil 3.6 Bir boyutlu ısı geçişi

Şekil 3.6'daki kübün ön, arka, üst ve alt yüzeyleri yalıtılmıştır. Bu sayede ısı geçişi sadece x doğrultusunda gerçekleşmektedir.

3.5 Silindirselsel Yapılarda Isı Geçişi

3.5.1 Bir tabakalı silindirselsel sistemlerde ısı akışı



Şekil 3.7 Bir tabakalı silindirselsel sistem.

İçteki silindiri T_1 sıcaklığında, dıştaki silindiri T_2 sıcaklığında olan bir eş eksenli silindirselsel sistem (şekil 3.7) için silindirselsel koordinatlarda Fourier denklemi

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.23)$$

dir [14]. T sıcaklığı, θ , z ve t zamanı ile değişmediğinden temel diferansiyel denklem

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.24)$$

olur (statik, kararlı hal durumu). Bu denklemin çözümü eş eksenli silindrisel sistemde T sıcaklığının r ile değişim bağıntısını verir. Bunun için $r = r_1$, $T = T_1$ ve $r = r_2$, $T = T_2$ sınır koşulları ile $\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$ denkleminin genel çözümü yapılırsa

$$r \frac{\partial T}{\partial r} = C_1 \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{C_1}{r} \quad (3.26)$$

$$T = C_1 \ln r + C_2 \quad (3.27)$$

elde edilir. C_1 ve C_2 katsayılarını bulmak için sınır koşulları kullanılırsa

$$T_1 = C_1 \ln r_1 + C_2 \quad (3.28)$$

$$T_2 = C_1 \ln r_2 + C_2 \quad (3.29)$$

denklemleri yazılır. Buradan C_1 ve C_2 katsayıları

$$T_1 - T_2 = C_1 (\ln r_1 - \ln r_2) = C_1 \ln(r_1/r_2) \quad (3.30)$$

$$C_1 = \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \quad (3.31)$$

C_1 (3.29) denkleminde yerine konursa;

$$T_2 = \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \cdot \ln r_2 + C_2 \quad (3.32)$$

$$C_2 = T_2 - \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \cdot \ln r_2 \quad (3.33)$$

bulunur. Genel çözümde (3.27) C_1 ve C_2 yerine yazılırsa

$$T = \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \cdot \ln r + T_2 - \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \cdot \ln r_2 \quad (3.34)$$

$$T = \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \cdot \ln(r/r_2) + T_2 \quad (3.35)$$

veya

$$\frac{T - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} \quad (3.36)$$

elde edilir.

Silindrsel sistemde radyal ısı akış yoğunluğu (W/m^2)

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} = -k \frac{1}{r} \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \quad (3.37)$$

olur. $A = 2\pi r \cdot L$ kesitinden geçen toplam ısı,

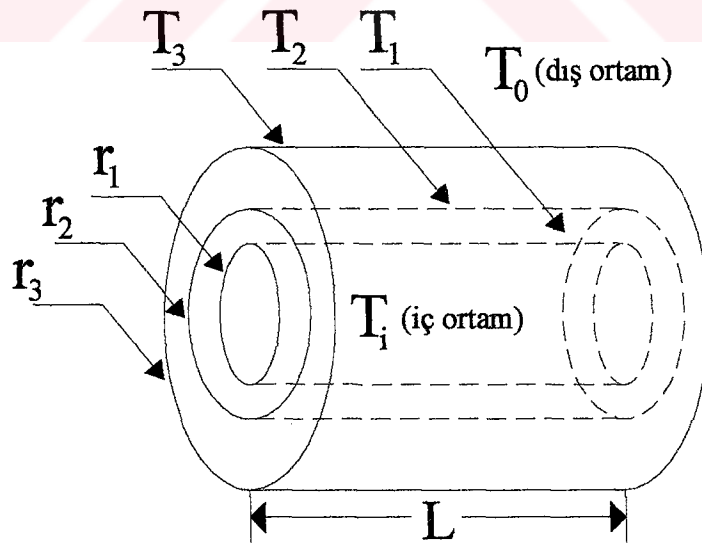
$$Q = q_r \cdot A = 2\pi r L \left[-k \frac{1}{r} \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1/r_2)} \right] = \frac{2\pi k L}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) \quad (3.38)$$

olur [14]. Oluşan sıcaklık farkı

$$(T_1 - T_2) = \Delta T = \frac{Q}{2\pi k L} \ln(r_2/r_1) \quad (3.39)$$

denkleminde elde edilir.

3.5.2 Çok tabakalı silindrsel sistemde ısı akışı



Şekil 3.8 Çok tabakalı silindrsel sistem.

Seri durumda çok tabakadan oluşan bir eş eksenli silindrsel sistemde tabakalardan geçen Q ısı her tabakada aynıdır. İlk tabakadaki ısı akış hesabında

kullanılacak denklem bir önceki bölümde verilen tek tabakalı sistem ile aynıdır. (3.18) denklemi kullanılarak

$$Q = h_i(2\pi r_1 L)(T_i - T_1) = \frac{2\pi k_1 L}{\ln(r_2/r_1)}(T_1 - T_2) \quad (3.39)$$

elde edilir. İkinci tabakadaki ısı akışı

$$Q = \frac{2\pi k_2 L}{\ln(r_3/r_2)}(T_2 - T_3) = h_0(2\pi r_3 L)(T_3 - T_0) \quad (3.40)$$

denkleminde hesaplanır. Toplam ısı akışı

$$Q = \frac{T_i - T_0}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_0}} \quad (3.41)$$

$$Q = \frac{2\pi L(T_i - T_0)}{\frac{1}{h_i r_1} + \frac{1}{k} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{h_0 r_2}} \quad (3.42)$$

olarak bulunur [14]. Burada T_i en içteki ortamın sıcaklığı, T_0 dış ortamın sıcaklığı, L sistemin uzunluğu, k ısıl öz direnç, h_i ve h_0 ilgili ortamların ısıl taşınım katsayılarıdır.

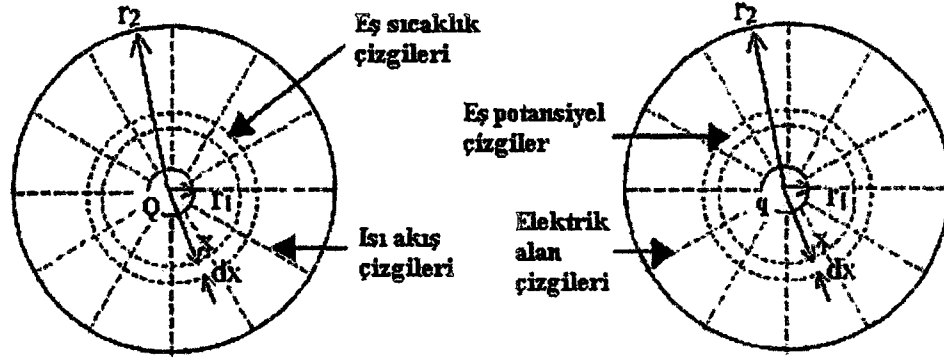
3.6 Yeraltı Kablosunda Kayıplar Nedeni ile Oluşan Isı

Uygulamada bir yeraltı kablosunun iletkeninde, yalıtkanında ve dış kılıfında kayıplar oluşur. Bu oluşan kayıplar kendisini ısı olarak belli eder ve kabloun ısınmasına neden olur. Kablodaki ısı, kablodan çevresine yayılır.

Bir kabloda akım taşıma kapasitesini temel olarak sınırlayan faktör, kabloun maksimum işletme sıcaklığıdır. Bu nedenle kabloda kayıplardan dolayı oluşan ısıнын önemi büyüktür. Kabloda oluşan ısı daha önceki bölümlerde sözü edilen ısıl dirençlerden geçerek kablodan uzaklaşır.

3.7 Isı Akış ve Yük Akış Çizgileri

Isı akış çizgileri ile elektriksel alan (yük akış) çizgileri analogiden kaynaklanan benzer değişim göstermektedir. Bu benzerlik Şekil 3.9'da görülmektedir [18].



Şekil 3.9 Isı akışı ve yük akışı (elektrik alan) çizgileri arasındaki benzerlik

Isı akışı analogik olarak elektriksel yük akışına veya elektrik akımına benzemektedir [18]. Tablo 3.2’de ısı ile elektrik arasındaki benzerlik bakımından birbirine karşı düşen büyüklükler gösterilmiştir [12 - 14].

Tablo 3.2 Isı ile elektrik arasında analogik büyüklükler

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

3.8 Isıl Alan ile Elektrik Alanı Arasındaki Benzerlikten Yararlanılarak Tek Damarlı Kablonun Isıl (Termal) Direncinin Bulunması

Tek damarlı kabloda ısıl direncin bulunması probleminin çözümü elektrostatik durum ile benzerlik göstermektedir. Şekil 3.9’da bu iki durum gösterilmiştir.

Isı probleminde, kablounun birim uzunluğunda üretilen ısı miktarı Q ile gösterilir. Buna karşılık elektrostatik durumda, birim uzunluktan çıkan elektriksel akı miktarı q ’dür. Elektrostatik durum için, yarıçapı r , kalınlığı dr , uzunluğu l olan bir gauss silindirinin yanal yüzeyinden çıkan toplam elektriksel akı;

$$q = D 2\pi r l \quad (3.43)$$

olur. Buradan birim uzunluktaki D elektriksel akı yoğunluğu (deplasman)

$$D = q/2\pi r l \quad (3.44)$$

elde edilir. $D = \epsilon E$ ve $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ olmak üzere elektriksel alan şiddeti

$$E = \frac{q}{\epsilon 2\pi r l} \quad (3.45)$$

ve r_1 ile r_2 arasındaki potansiyel farkı veya U gerilimi ve C kapasitesi

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E dr \quad (3.46)$$

$$U = \int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{2\pi\epsilon l} \cdot \frac{1}{r} \cdot dx = \frac{q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.47)$$

$$\frac{U}{q} = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{C} \quad (3.48)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.49)$$

olur. Yazılanlara benzer olarak ısı akışı durumu için:

- $dT = dr$ parçasına düşen sıcaklık farkı
- $K =$ ısıl öz direnç

$$T = Q \cdot R_T \quad (3.50)$$

$$R_T = \frac{K.L}{A} = \frac{K.L}{2\pi r L} = \frac{K}{2\pi r} \quad (3.51)$$

olduğu göz önüne alınırsa birim uzunluk için sıcaklık farkı

$$dT = \frac{K.Q}{2.\pi.r} dr \quad (3.52)$$

olur. (3.52) denkleminin r_1 ile r_2 aralığında integrasyonu ile

$$T = \int_{r_1}^{r_2} \frac{K \cdot Q}{2\pi r} \cdot dr \quad (3.53)$$

$$T = \frac{K \cdot Q}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.54)$$

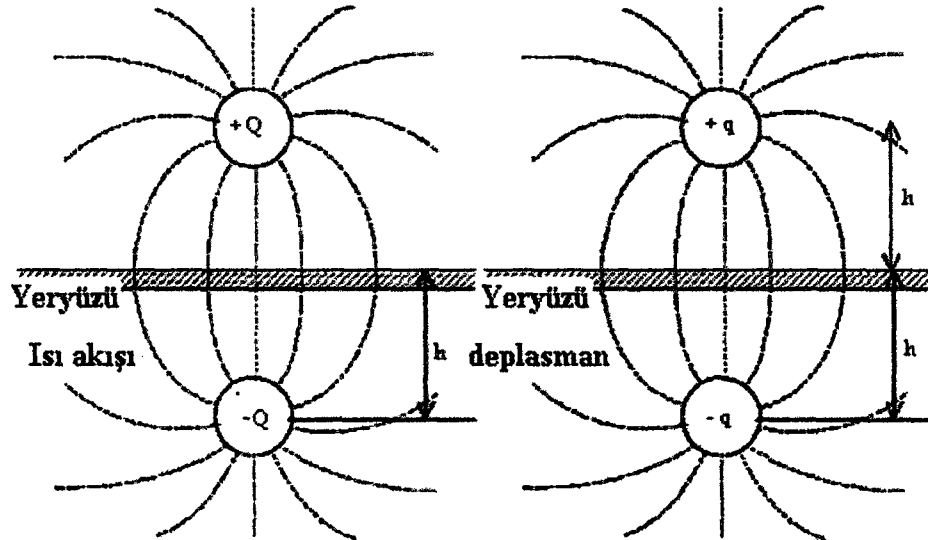
bulunur. Isıl direnç, $R_T = T / Q$ olduğuna göre (3.53) denkleminde ısı direnç

$$R_T = \frac{K}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.55)$$

olarak bulunur.

3.9 Bir Yeraltı Kablosu Çevresindeki Toprağın Isıl Direncinin Bulunması

Kablo dış kılıfı (PE, PVC, kurşun vb) kayıplardan dolayı oluşan ısıyı dışarıya ilettiğinden kabloun içinde oluşan eş sıcaklık çizgileri eş eksenli silindirler şeklindedir. Bu nedenle ısı akışı radyal olur. Bununla birlikte kablo dış kaplamasının dışında oluşacak eş sıcaklık çizgileri eş eksenli olmayacaktır. Bunun nedeni kabloda oluşan ısıнын kablo yüzeyinden yer yüzeyine kadar radyal olarak iletilememesidir.



Şekil 3.10 Isı akışı ve deplasman (elektrik alanı) arasındaki benzerlik

Toprağa gömülü bir kablo çevresindeki toprağın ısı direncinin bulunması probleminin çözümü için yerden h yüksekliğinde bulunan birim uzunluğunda $+q$ yükü taşıyan sonsuz uzunluktaki iletken durumu benzer olarak ele alınır (Şekil 3.10).

Şekil 3.10'daki toprağın üzerindeki q yükünün durumu, toprağın altındaki $-q$ yükünün durumu ile aynıdır. Bu sayede toprağın etkisi, ters yükle yüklenmiş, toprak yüzeyine eşit uzaklıkta bir $-q$ yükü alınarak hesaba katılabilir. Böylelikle $+q$ ve $-q$ yükleri için olan durumlar ayrı ayrı incelenip, sonuçlar birlikte ele alınabilir. Yükler arasında bir yükten dolayı oluşan potansiyel farkı

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{r} \quad (3.56)$$

olur. 2 yükten dolayı oluşan toplam potansiyel farkı

$$V = \frac{2q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{r} \quad (3.57)$$

elde edilir. Analogiden ısı kaynağından toprak yüzeyine kadar olan uzaklıktaki sıcaklık farkı

$$T = \frac{K.Q}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad (3.58)$$

olur. Buradan hareketle toprağın ısı direnci

$$R_{TG} = \frac{K}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad (3.59)$$

olarak bulunur [18].

4. ISIL DİRENÇLER

4.1 Kablonun Dielektrik Isıl Direnci

Kablolarda dielektrik kayıpları, kabloların ısınmasına sebep olur. Dielektrik kayıplardan dolayı oluşan ek ısınma düşük gerilim seviyelerinde küçük olup ihmal edilebilir. Fakat gerilim seviyesi yükseldikçe ısınma artacağından ihmal edilemez duruma gelir. Kablo yalıtkanında oluşacak en yüksek sıcaklığın hesaplanabilmesi için, ısı akışının gerçekleştiği yol üzerindeki ısı dirençlerin hesaplanması gerekir. Bu ısı dirençleri etkileyen iki faktör vardır. Bunlardan birincisi kullanılan yalıtkan malzemenin ısıl öz direnci, diğeri ise kullanılan yalıtkan malzemenin miktarıdır.

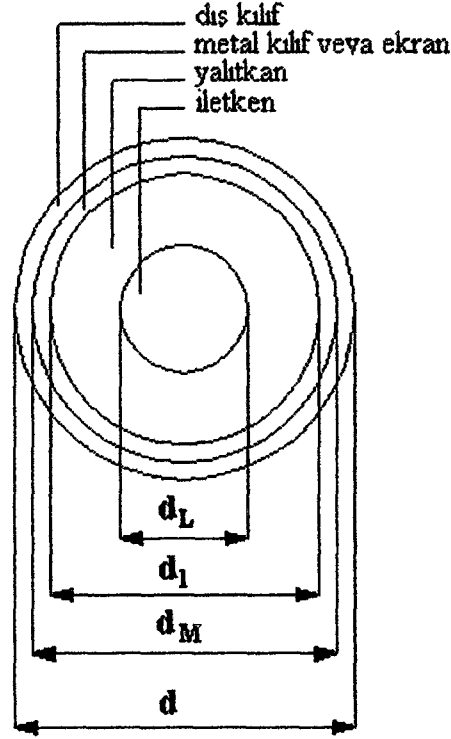
Tablo 4.1 Bazı kabloların izin verilen en yüksek işletme sıcaklıkları ve dielektrik ısıl öz direnç değerleri.

Kablo tipi	İzin verilen en yüksek işletme sıcaklığı (°C)	Dielektrik malzemenin ısıl öz direnci (°K m/W)
XLPE Yalıtkanlı Kablo	90	3.5
PE Yalıtkanlı Kablo	70	3.5
PVC Yalıtkanlı Kablo	70	6.0

Mineral yağ ve yüksek kalitede reçine emdirilmiş kağıt bantla yalıtılmış kablolarda dielektrik ısıl öz direnç emdirilmiş karışımın özelliklerine göre değişir. Bu değişime ek olarak, dielektrik malzemenin içindeki nem ve hava kabarcıkları da ısıl öz direnç değerini etkiler.

4.2 Metal Kısımların Isıl Direnci

Kurşun kılıf, ekran ve metal zırh gibi kablo metal kaplamalarının ısıl öz direnç değerleri oldukça küçüktür. Bu nedenle hesaplamalarda ihmal edilirler.



Şekil 4.1 Tek damarlı kablonun bölümleri.

d_L : kablo damar iletkeni çapı

d_I : metal kılıf veya ekranın iç çapı (yalıtkanın dış çapı)

d_M : metal kılıf veya ekranın dış çapı

d : kablo dış çapı

4.3 Kablodaki Isıl Dirençlerin Hesabı

Tek damarlı bir kablo için toplam ısı direnci R_{Tc}

$$R_{Tc} = R_{Td} + R_{Ts} \quad (4.1)$$

dir. Burada R_{Td} yalıtkan malzemenin ısı direnci, R_{Ts} ise kablo dış kılıf malzemesinin ısı direncidir. Yalıtkan malzemenin ısı direnci R_{Td}

$$R_{Td} = \frac{K_d}{2\pi} \ln \frac{d_I}{d_L} \quad (4.2)$$

bağıntısından, kablo dış kılıf malzemesinin ısı direnci R_{Ts} ise

$$R_{Ts} = \frac{K_s}{2\pi} \ln \frac{d}{d_M} \quad (4.3)$$

bağıntısından hesaplanır [9]. Bu bağıntılarda d_L kablo damar iletkeni çapını, d_I metal kılıf veya ekranın iç çapını (yalıtkanın dış çapını), d_M metal kılıf veya ekranın dış çapını, d kablo dış çapını göstermektedir. K_d ve K_S sırasıyla yalıtkan ve dış kılıfta kullanılan malzemelerin ısıl özdirenç değerleridir.

(4.2) ve (4.3) denklemleri (4.1) denkleminde yerlerine yazılırsa, tek damarlı bir kablo için toplam ısıl direnç

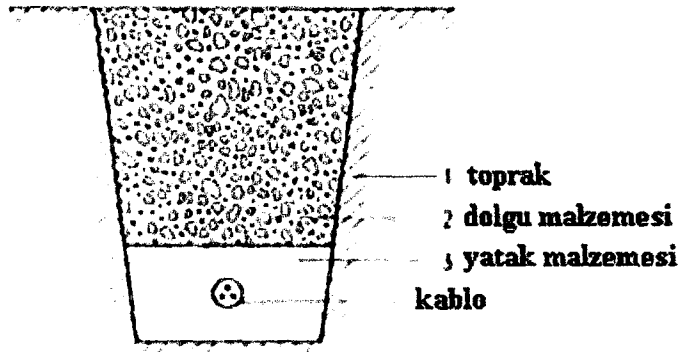
$$R_{Tc} = \frac{K_d}{2\pi} \ln \frac{d_I}{d_L} + \frac{K_S}{2\pi} \ln \frac{d}{d_M} \quad (4.4)$$

olur.

4.4 Toprağın Isıl Özdirenci

Kablonun döşendiği ortamın (yatak) malzemesi, dolgu malzemesi ve toprağın ısıl özdirenci hakkında doğru ve yeterli bilgiye sahip olmak, kablonun izin verilen en yüksek işletme sıcaklığını ve aşırı ısınmaya bağlı olarak oluşan yaşlanma ve yıpranmaları belirlemek bakımından önemlidir.

Toprağın kuruması, ısıl özdirencinin artmasına neden olur. Yüksek toprak ısıl özdirenci, özellikle sürekli işletmede yüksek yüklenme akımlarında çalışan kablolar için tehlikeli olur.



Şekil 4.2 Toprağa gömülü bir kablo ve çevresindeki ısıl direnç gösteren malzemeler.

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kablonun bulunduğu ortam, yatak malzemesi, dolgu malzemesi ve toprak olmak üzere üç bölümden oluşur.

4.4.1 Toprak

Herhangi bir işleme tabi tutulmamış, humus veya benzeri malzemeler eklenmemiş toprak (buna işlenmemiş, ham toprak ta denir), Avrupa standartlarına göre ısıl direnci $1 \text{ }^{\circ}\text{K m/W}$ 'tan daha büyük olamayan bir malzemedir. Bunun dışında kablonun gömüleceği toprak curüf, kül, vb. maddeler içeriyorsa, bu gibi durumlarda toprağın ısıl öz direncinin hesaplanması gerekir.

4.4.2 Dolgu Malzemesi

Genelde kabloyu gömmek için açılan çukurdan çıkan toprak dolgu malzemesi olarak kullanılır. Bu dolgu malzemesinde moloz, tuğla parçaları vb. şeylerin olmamasına dikkat edilmelidir. Eğer çıkan toprak bu tür maddeler içeriyorsa ve bu toprak dolgu malzemesi olarak kullanılacaksa ısıl öz direnci hesaplanmalıdır.

4.4.3 Yatak Malzemesi

Yatak malzemesinin parça büyüklüğü en fazla 10 mm olmalıdır. Bu malzeme kabloyu 30 cm üstüne geçecek şekilde ve iyice sıkıştırılarak doldurulur. Eğer kazılan toprağın öz direnç karakteristiği uygunsa yatak malzemesi olarak kullanılabilir.

4.5 Toprağın Isıl Direncini Etkileyen Faktörler

Isıl direnci etkileyen en önemli büyüklük, K_G ile gösterilen toprağın ısıl öz direncidir. Bu öz direnç, toprağın cinsine ve içindeki nem miktarına bağlıdır.

Toprağın, kablodaki sürekli yükten dolayı ısınması ve ısı nedeni ile kuruması söz konusudur. Ayrıca kablo civarında bitki örtüsünün bulunması su tüketimini artırır ve toprağın kurummasını kolaylaştırır. Bunun yanında toprak cinsinin elverişsiz olması da kurumaya yol açan diğer bir etkidir. Bütün bunlar toprağın ısıl direncinde artışa neden olur ve bu nedenle özellikle yük akımının sabit kalması durumunda tablolardaki kablo akım taşıma değerleri %75'e kadar düşer. Bunun yanında toprak yüzeyinin asfalt, zift ve kaldırım taşıyla örülü olması, Avrupa'da ve yurdumuzda özellikle yaz aylarında toprağın aşırı miktarda olan su kaybını önlemesi nedeniyle yararlıdır [11].

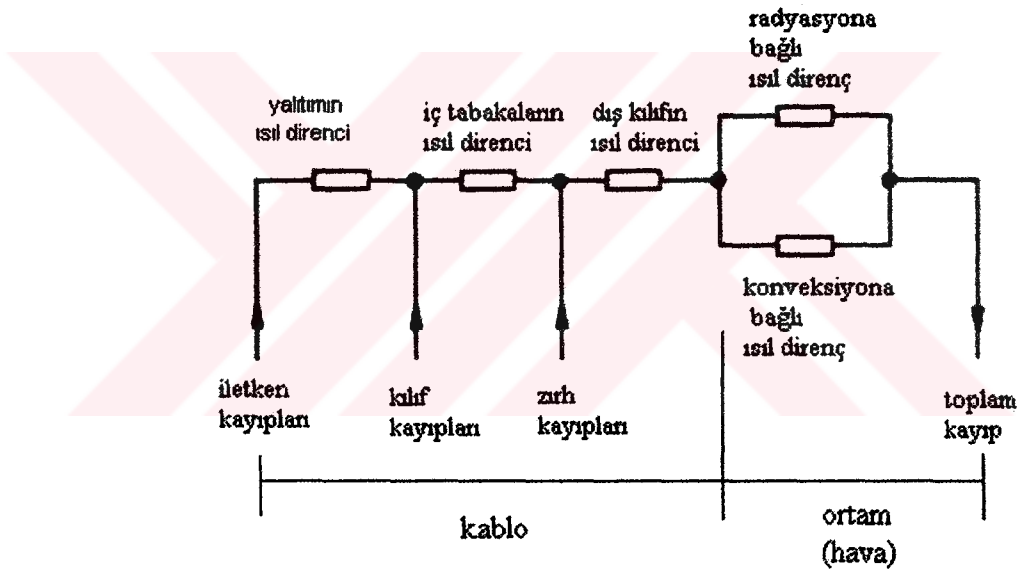
Yeraltı kablusunun çevresindeki toprağın ısıl direnci R_{TG}

$$R_{TG} = \frac{K_G}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d} \text{ [}^\circ\text{K m/W]} \quad (4.5)$$

formülünden hesaplanır [9]. Burada h, kablo ekseninin yeryüzüne (toprak yüzeyine) olan uzaklığı, d kablo çapı ve K_G toprağın ısıl öz direncidir.

4.6 Havanın ısıl Direnci

Toprağa gömülmeyip, açıkta döşenen kablolarda ısı, iletim (konveksiyon) ve ışıma (radyasyon) ile dağılır. Havanın ısıl direnci (R_{Ta}) iki paralel direnç ile temsil edilir. Bunlardan biri ışıma (radyasyon) ile diğeri de iletim (konveksiyon) ile ısı dağılımını ifade eder.



Şekil 4.3 Açıkta döşenen (toprağa gömülü olmayan, havadaki) bir kablo için ısı eşdeğer devre.

Havanın ısıl direnci R_{Ta}

$$R_{Ta} = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot (f_c \alpha_c + f_r \alpha_r)} \quad (4.6)$$

bağıntısından hesaplanır.

(4.6) bağıntısı, kabloya güneşin veya başka bir ısıtıcının etki etmediği durum için geçerlidir. Buradaki α_c ısı transfer katsayı olup

$$\alpha_c = b' \frac{0,0185}{b.d} + b'' \cdot 1,08 \left(\frac{\Delta t_o}{b.d} \right)^{1/4} \quad (4.7)$$

denkleminde hesaplanır. (4.7) denkleminde d kablo çapı; b' ve b'' ise ortamın ortalama sıcaklığı t_m 'den yararlanılarak hesaplanan katsayılardır:

$$b' = 0,919 + \frac{t_m}{396} \quad (4.8)$$

$$b'' = 1,0833 - \frac{t_m}{909} \quad (4.9)$$

Ortamın ortalama sıcaklığı

$$t_m = \frac{t_o + t_v}{2} \quad (4.10)$$

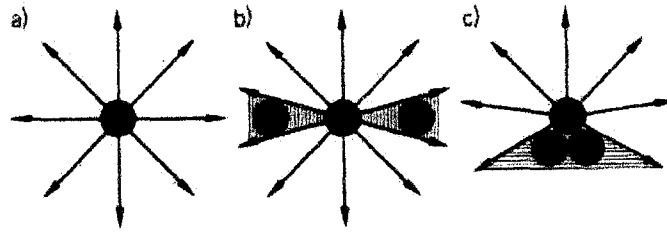
formülü ile bulunur. t_o kablo yüzeyinin sıcaklığını, t_v ortamdaki havanın sıcaklığını göstermektedir. Radyasyon ile ısı yayılım katsayısı α_r

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot [(273 + t_o)^4 - (273 + t_v)^4]}{\Delta t_o} \quad (4.11)$$

ifadesi ile hesap edilir. Burada

$$\Delta t_o = t_o - t_v \quad (4.12)$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (Stephan-Boltzmann sabiti), ε_0 kablo yüzeyinin bağıl ısı yayma faktörüdür.



Şekil 4.4 Kabloda ısıma (radyasyon) ile ısı yayılımı.

α_c ve α_r yatay pozisyonda döşenmiş, kuru havada, $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$ (Pascal) basınçtaki katsayılarıdır. Havanın ısııl direnci R_{Ta} hesaplanırken f_c , f_r ve b katsayılarının değerleri için Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'ten yararlanılır.

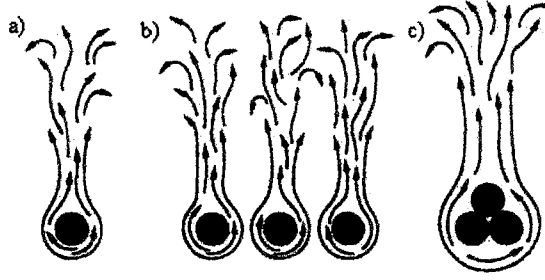
Şekil 4.4.a'da gösterilen kablo her yönde ısıma (radyasyon) ile ısı yaymaktadır. Bu durum için $f_c = 1$ 'dir. Isı kablo yüzeyinden bulunduğu ortamın duvarlarına doğru yayılmaktadır. Sabit kayıpta kablo yüzeyinin ısıısının artışıındaki önemli faktörlerden biri de duvarların ısıısıdır. Bu ısı, genelde ortam ısıısı ile aynı kabul edilir. Aynı durum Şekil 4.4.b ve c için de geçerlidir. Fakat bu iki durumda ısı transferini engelleyen faktörler göz önüne alınmalıdır. Şekil 4.4.b'de üç tek damarlı kablo yan yana dizilmiş olarak gösterilmiştir. Burada sadece ortadaki kablonun ısııl dağılımı çizilmiştir. Bu şekilde açıkça görülüyor ki komşu kablolar ortadaki kablonun ısı transferini taralı alanlarda etkilemektedir. Bu durumda dıştaki (yanlardaki) kablolar için

$$f_c = 1 - \arcsin(d/2a)/180^\circ \quad (4.13)$$

içteki (ortadaki) kablo için

$$f_c = 1 - 2\arcsin(d/2a)/180^\circ \quad (4.14)$$

formülünden hesaplanır. Aynı durumda Şekil 4.4.c incelenirse, (b)'deki duruma göre taralı alan büyümüş ve bu nedenle ısı transferi azalmıştır. Şekil 4.4.c'deki durumda $f_c = 2/3$ alınır [9].



Şekil 4.5 Kabloda iletim (konveksiyon) ile ısı yayılımı.

Şekil 4.5 iletim (konveksiyon) ile serbest ısı yayılımını göstermektedir. Isınan hava ilk olarak kablo çevresinde dolaşır ve daha sonra kablo yüzeyinden yükselir. Bu durumda kablo yüzeyindeki ısı artışı, kablo çapı ve kayıplardan ayrı olarak, kablo çevresindeki havanın ısisına bağlıdır. Kablodan yükselen sıcak hava ortamda bulunan soğuk hava ile karışarak ufak çaplı türbülans oluşturur. Bu nedenle ortam sıcaklığı iletim (konveksiyon) için önemlidir. Şekil 4.5.a'da $f_r = 1$, $b = 1$ dir. Şekil 4.5.b'de kablolar arasındaki a uzaklığı, kablo çapı (d) kadardır ve görüldüğü üzere kablolarda oluşan iletim ile (konveksiyonla) ısı dağılımı birbirlerini etkilememektedir. Şekil 4.5.b'de $f_r = 1$, $b = 1$ 'dir. Şekil 4.5.c'de gruplama da kabloların ısı iletim yüzeyi yaklaşık $2/3$ oranında azalmıştır. Isı iletim yüzeyinin azalması sonucu, kablonun ısı direnci artmaktadır. Bu nedenle Şekil 4.5.c'de $f_r = 2/3$ $b = 2$ 'dir [9].

Kablonun yüzeyindeki ısı artışı Δt_o ,

$$\Delta t_o = \frac{(t_p - t_v - \Delta t_d) R_{Ta}}{R_{Ti} + R_{Ta}} + P_d \cdot R_{Ta} \quad (4.15)$$

bağıntısından yararlanılarak hesaplanır. Bu bağıntıda t_p kablo için izin verilen çalışma sıcaklığı, R_{Ti} omik kayıplar dikkate alınarak hesaplanmış kablonun fiktif ısı direncidir. Dielektrik kayıplardan dolayı iletkendeki ısı artışı Δt_d ,

$$\Delta t_d = P_d (R_{Tc} + R_{Ta}) \quad (4.16)$$

denkleminde hesaplanır [9].

4.6.1 Düşey döşeme

Kablo ile ilgili yapılan tüm hesaplamalarda kablonun yatay olarak döşendiği kabul edilir. Düşey olarak döşenmiş kablolar için teorik olarak ya da deneysel olarak bir çalışma yapılmamıştır. Düşey veya yatay döşemede ısıma (radyasyon) ile ısı yayılımında bir fark oluşmaz.

Uzunluğu l çapı d olan düşey durumdaki bir silindirin, diğer tüm koşullar aynı olmak şartı ile yatay durumdaki bir silindire göre iletim (konveksiyon) ile ısı dağılımı daha fazla olmaktadır.

4.6.2 Atmosferik basınç

İletim (konveksiyon) yoluyla ısı dağılımı hava basıncının düşmesi ile azalır. Deniz seviyesinden yukarı çıktıkça hava basıncındaki azalma nedeniyle ısı yayılım katsayısı olan α_c değişmektedir. Bu değişim,

$$\alpha_c = b' \frac{0,0185}{b.d} + b'' \cdot 1,08 \left(\frac{\Delta t_o}{b.d} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{p}{1013 \text{ hPa}} \right)^{1/4} \quad (4.17)$$

denkleminde hesaplanmaktadır [9]. Burada p hava basıncıdır. Yükseklikle p hava basıncının değişimi, Tablo 4.2’de verilmiştir. 2000 m’ye kadar olan yüksekliklerde bu faktör ihmal edilebilir.

Tablo 4.2 (4.17) denklemindeki p değerinin yükseklik ile değişimi.

Yükseklik (m)	0	1000	2000	3000	4000
p (Atmosferik basınç) (hPa)	1013	899	795	701	616

4.6.3 Güneş radyasyonu

Güneş ışınlarına maruz kalan kablolar da ek bir sıcaklık artışı meydana gelir. Δt_s ile gösterilen bu ek sıcaklık artışı,

$$\Delta t_s = \alpha_0 \cdot d \cdot E_r \cdot R_{Ta} \quad (4.18)$$

denkleminde hesaplanır. Burada E_r güneş radyasyon yoğunluğunu, yani birim yüzeye düşen ışımayı belirtir. Yatay konumda bu değer en çok (maksimum) 1,35 kW/m² olur. Bu değer normal hava koşullarında 1 kW/m² alınabilir. (4.18)

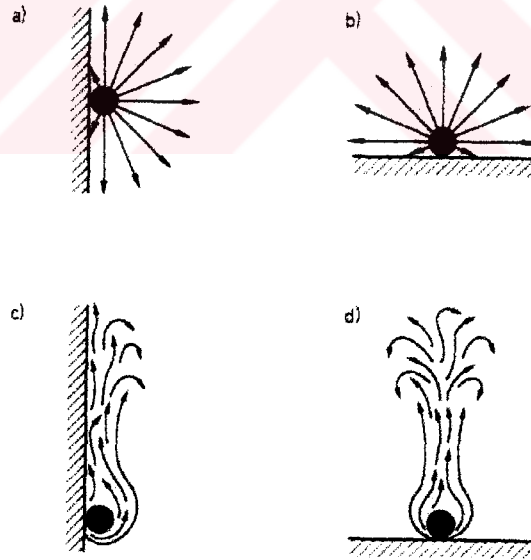
denklemindeki α_0 kablo dış kılıfının soğurma katsayısıdır. Bazı maddeler için α_0 değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir [9].

Tablo 4.3 Kablo kaplamasında kullanılan bazı maddelerin α_0 (soğurma) değerleri.

Madde	α_0
PVC	0,6
PE	0,4
PCP	0,8
Kurşun	0,6

4.6.4 Kabloların yerleştirilmesi

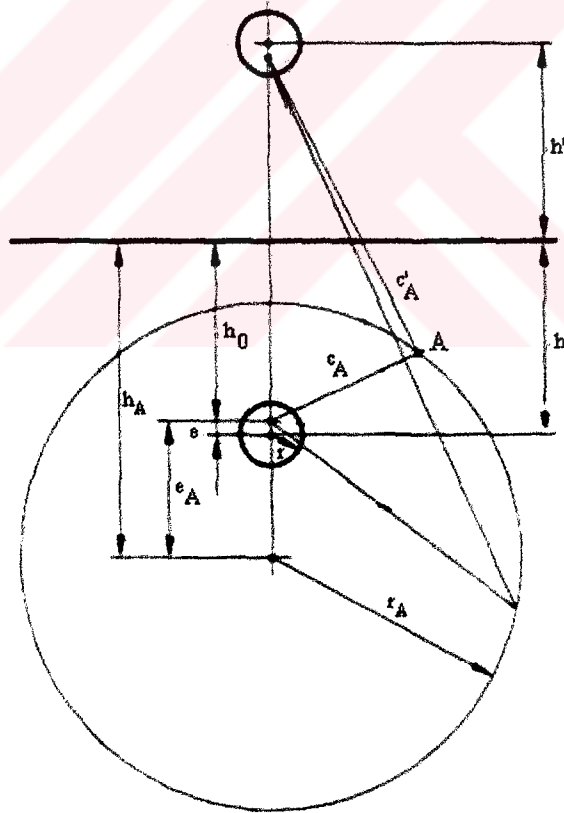
Kablolar duvar, yer, tavan gibi yüzeylere temas ettiğinde ısı dağılımları değişir (Şekil 4.6). Temasın olduğu noktada hava akışı engellendiğinden iletim (konveksiyon) ile olan ısı yayılımı azalır. Işıma (radyasyon) ile ısı yayılımı temas eden yüzeyin soğurma katsayısı ve ısısı ile değişir. Doğrudan temasta ısı yayılımı, doğrudan iletim ile de olur. Bu durumda temas yüzeyinin ısıl iletkenliği de önemlidir [9].



Şekil 4.6 Temas yüzeyinin ısı yayılımına etkisi.

5. TOPRAĞA GÖMÜLÜ BİR KABLO ÇEVRESİNDEKİ SICAKLIK DAĞILIMININ HESABI

Kabloda kayıplardan dolayı oluşan ısı, kabloyu çevreleyen topraktan, toprak yüzeyine doğru geçer ve daha sonra atmosfere dağılır. Topraktaki kablonun ısıtılmasının tanımlanabilmesi için ilk olarak toprak sıcaklığının ve toprağın ısıtılma katsayısının sabit olduğu kabul edilir. Bu hesaba yaparken toprak altındaki kablonun yeryüzeyinde aynadaki aksi gibi bir görüntüsünün olduğu varsayılır.



Şekil 5.1 h derinliğine gömülmüş, r yarıçaplı kablonun sıcaklık dağılımı hesabı için şekil.

A noktasındaki sıcaklık artışı (toprağın ısisına göre) ΔT_A ;

$$\Delta T_A = P_T \cdot \frac{K_G}{2\pi} \cdot \ln \frac{c'_A}{c_A} \quad (5.1)$$

formülünden hesaplanır [9]. Bu formüldeki P_T (2.5) formülünden kabloda oluşan toplam kayıp, K_G (4.5) formülünden, toprağın ısıl öz direnci, c'_A ve c_A sıcaklık artışının bulunacağı noktanın kabloya ve görüntüsüne olan uzaklıklarıdır (Şekil 5.1). Eş ısı çizgileri (izotermal çizgileri) bulmak için kullanılacak, c'_A ve c_A sıcaklık artışının bulunacağı noktanın kabloya ve görüntüsüne olan uzaklıklarının oranı olan c_{kA} ;

$$c_{kA} = \frac{c'_A}{c_A} \quad (5.2)$$

sıcaklık artışının bulunacağı noktadan geçen eş ısıl (izotermal) dairenin yarı çapı r_A ;

$$r_A = \frac{2h_0 c_{kA}}{c_{kA}^2 - 1} \quad (5.3)$$

kablo eksen kaçıklığı e ;

$$e = h - h_0 \quad (5.4)$$

kablo eksen kaçıklığının (e) toprak yüzeyine olan mesafesi h_0 ;

$$h_0 = \sqrt{h^2 - r^2} \quad (5.5)$$

sıcaklık artışının bulunacağı noktadan geçen eş ısıl (izotermal) dairenin merkezinin toprak yüzeyine olan mesafesi h_A ;

$$h_A = h_0 \cdot \frac{(c_{kA}^2 + 1)}{(c_{kA}^2 - 1)} \quad (5.6)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır [9].

5.1 89/154 kV 2XS(FL)2Y Kablonun Topraktaki Sıcaklık Dağılımının İncelenmesi

Kullanılan kablounun özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

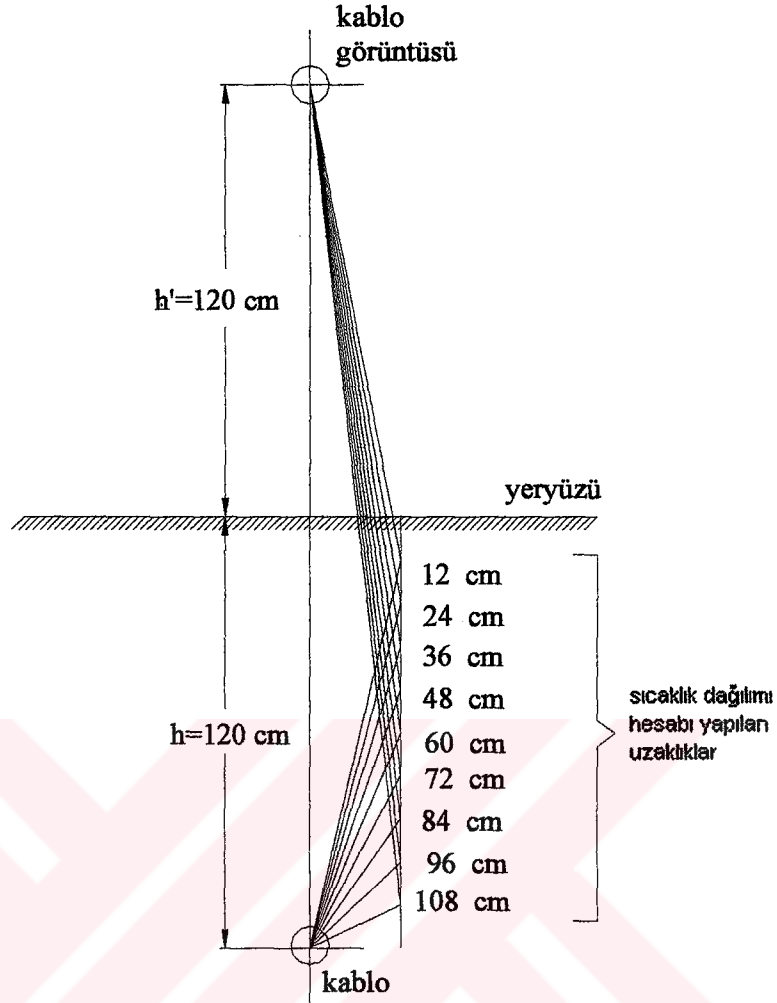
Tablo 5.1 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablounun özellikleri.

Anma kesit	Kablo dış çapı	20°C’de iletken DA direnci (R_{wr})	Kablounun kilometrik indüktansı	Kablounun kilometrik kapasitesi	Kablounun toprakta akım taşıma kapasitesi
mm ²	mm	Ω/km	mH/km	$\mu\text{F}/\text{km}$	A
1x1000/135	105,6	0,0176	0,663	0,186	1354

Tablo 5.2 120 cm’e gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablo için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

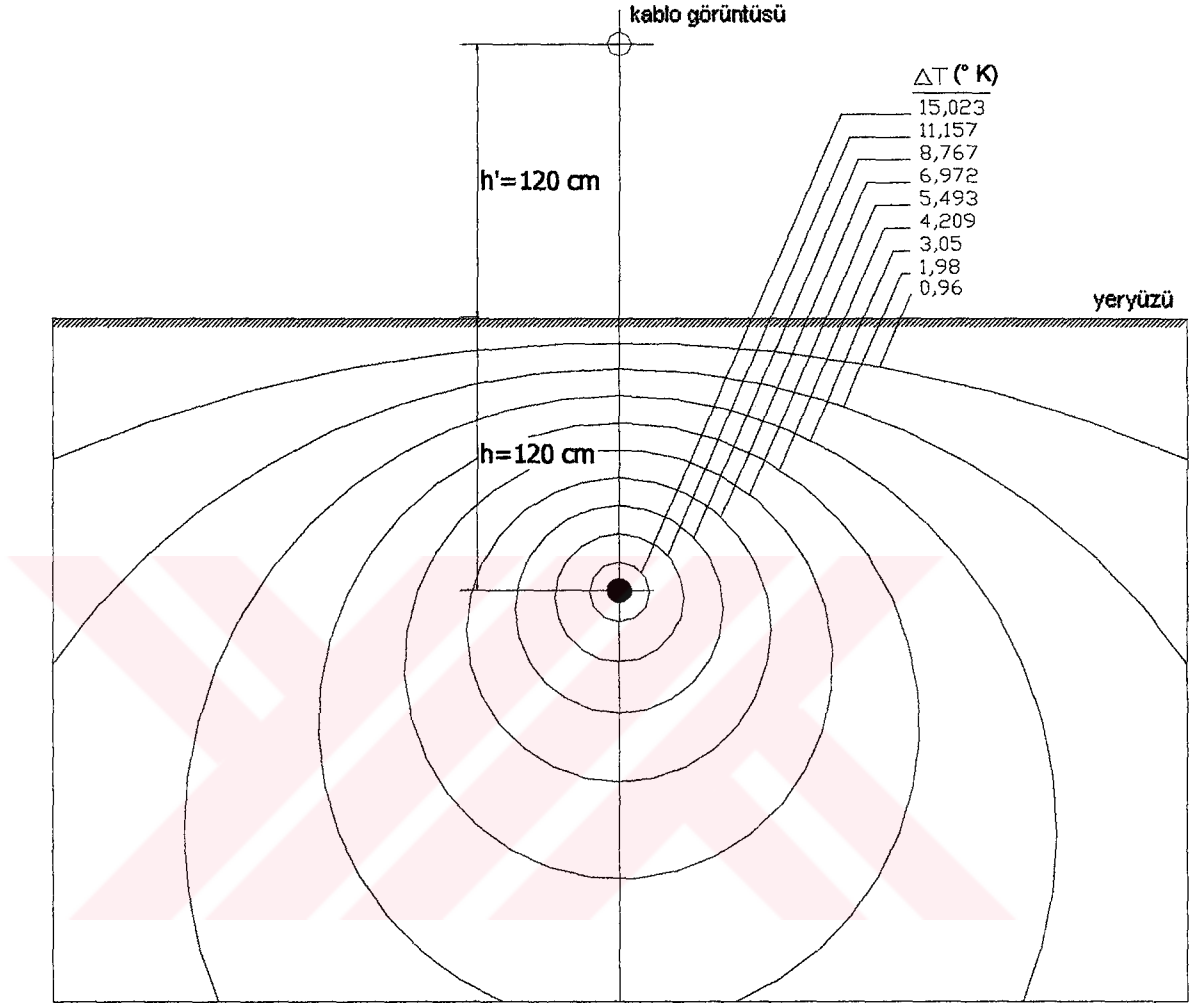
ΔT	P_T	K_G	c_k	P_i	I	R_{wr}	P_d	C_b	c'	c
(°K)	(W/m)	(°K m/W)	-	(W)	(A)	(Ω/m)	(W/m)	($\mu\text{F}/\text{m}$)	-	-
15,023167	32,5204	1	2,90259	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
11,157918	32,5204	1	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
8,7677289	32,5204	1	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
6,9720454	32,5204	1	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
5,4939994	32,5204	1	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
4,2094857	32,5204	1	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
3,0516605	32,5204	1	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
1,9801705	32,5204	1	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
0,9688172	32,5204	1	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	135,683	112,521

Tablo 5.2’de yer alan değişkenleri elde etmek için kullanılan denklemler; ΔT için (5.1), c_k için (5.2), P_i için (2.1), P_d için (2.4)’dur. P_T , P_i ve P_d toplamıdır. Ayrıca R_{wr} , C_b , I değerleri Tablo 5.1’den alınmıştır. c' ve c değerleri Şekil 5.2’den AutoCAD programı kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 5.2 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablo çevresinde sıcaklık dağılımı tablosunu elde etmek için kullanılan şekil.

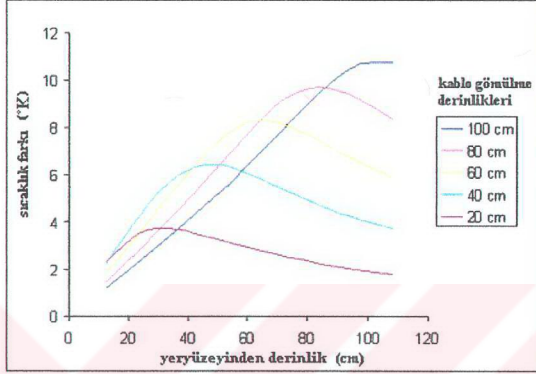
Tablo 5.2'den elde edilen ΔT değerleri Şekil 5.3'te görülmektedir. ΔT değerleri bulundukları yerlerdeki toprağın, kablonun ısınmasından dolayı oluşan ısı farkları göstermektedir. Uygulama için kablo ekseninden toprak yüzeyine kadar olan mesafe 10 eşit parçaya bölünmüş ve ölçüm yapılacak 9 nokta bulunmuştur. Şekil 5.3 incelenirse kablonun yakınında sıcaklık farkları büyük, kablodan uzaklaştıkça da küçüldüğü açıkça görülmektedir. Bunun nedeni ise ısıнын toprakta ilerledikçe toprağın ısıl direncine maruz kalması sonucu ile azalmasıdır.



Şekil 5.3 89/154kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²), 120 cm'e gömülmüş kablonun topraktaki sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.3 incelenecek olursa, eşısıl (izotermal) çizgilerin toprak yüzeyine yaklaştıkça sıklaştığı görülmektedir. Sıcaklık farklarına bakıldığında açıkça görülüyor ki toprak yüzeyine yaklaştıkça kablonun ısınmasından dolayı oluşan sıcaklık farkları azalmakta ve toprak yüzeyine geldiğinde bu fark 0 değerine çok yaklaşmaktadır.

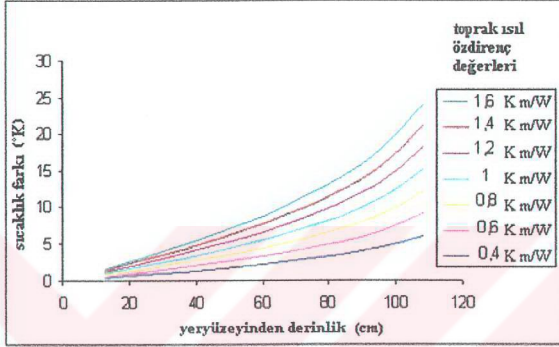
5.1.1 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablunun farklı gömülme derinliklerindeki topraktaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.4 Farklı gömülme derinliklerindeki 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablunun çevresindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.4'deki grafiklerin elde edilmesinde kullanılan değerlerin hesaplanması EK A ve EK B'de verilmiştir. Şekil 5.4 'teki grafiklerin elde edilmesi için yapılan hesaplamalarda toprak ısıl öz direnç değeri 1 Km/W olarak alınmıştır. Şekil 5.4 incelenirse, görülüyor ki derinlik azaldıkça kabloda oluşan ısı toprakta daha az yayılmaktadır. Yani kablo yeterince soğuyamamaktadır. 20 cm derinlikte sıcaklık farkı en fazla 4 °K'ye kadar çıkmaktadır. 100 cm derinlikteki kabloya baktığımızda ise bu fark 10-11 °K'ye kadar çıkmaktadır. Bu nedenle kablunun gömülme derinliği kablunun soğutulması açısından çok büyük önem taşımaktadır.

5.1.2 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablonun farklı ısıl özdirençlere sahip



topraktaki sıcaklık dağılımı

Şekil 5.5 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablonun farklı ısıl özdirençlere sahip topraklardaki sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.5'deki grafiklerin verilerinin elde edilmesi ile ilgili bilgi EK C'de verilmiştir. Topra a gömülmüş kablonun çevresindeki toprağın ısıl özdirenci kabloda oluşan ısının iletilmesinde en önemli faktördür. Şekil 5.5 incelenirse, 80 cm derinlik göz önüne alındığında 0,4  K m/W ısıl özdirenç değerinde sıcaklık farkı yaklaşık 4  K iken 1,6  Km/W sıcaklık farkı 14  K civarındadır. Kablo etrafındaki toprak ne kadar çok ısınırsa o kadar çok kuruyaca ından kablonun soğuması azalacaktır. Çünkü toprak ısındıkça içerdiği nemi kaybeder ve bu nedenle ısıl özdirenç değeri artar. Bu direnç değeri arttıkça sıcaklık farkı b y yece inden belli bir süre sonra kablo artık toprağa ısı veremez duruma gelecektir. Bunun sonucu olarak ta kablonun akım taşıma kapasitesi düşecektir. Sürekli işletmede akım değeri sabit olduğundan kablo yalıtımı bu sıcaklık a dayanamayaca ından faz toprak arızaları meydana gelecektir.

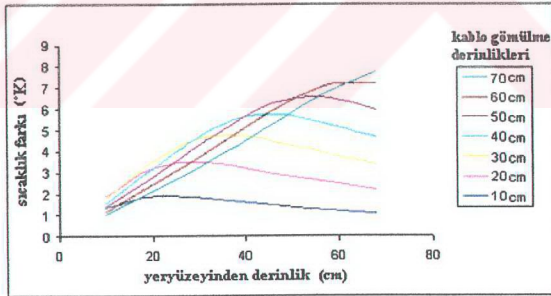
5.2 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) Kablonun Topraktaki Sıcaklık Dağılımının İncelenmesi

Kullanılan kablunun özellikleri Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablunun özellikleri

Anma kesit	Kablo dış çapı	20°C’de iletken DA direnci (R_{wr})	Kablunun kilometrik indüktansı	Kablunun kilometrik kapasitesi	Kablunun toprakta akım taşıma kapasitesi
mm ²	mm	Ω/km	mH/km	$\mu\text{F}/\text{km}$	A
1x240/25	45,4	0,0754	0,603	0,206	576

5.2.1 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablunun farklı gömülme derinliklerindeki topraktaki sıcaklık dağılımı



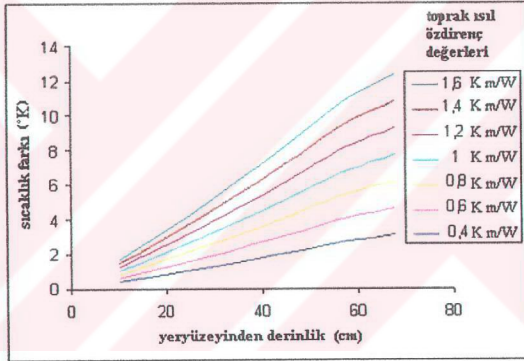
Şekil 5.6 Farklı gömülme derinliklerindeki 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablunun çevresindeki sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.6’daki grafiklerin verilerinin elde edilmesine ilişkin bilgiler EK D ve EK E’de verilmiştir. Şekil 5.6 ‘daki grafiklerin elde edilmesi için yapılan hesaplamalarda toprak

ısıl özdirenç değeri 1 Km/W olarak alınmıştır. şekil 5.6, şekil 5.4 ile karşılaştırılacak olursa benzerlik açıkça görülmemektedir.

Fakat grafiğin çizilmesi için elde edilen değerlere bakılacak olursa farklı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise kabloların kesitlerinin ve tiplerinin birbirinden farklı olmasıdır. Isıl dağılımın en önemli bileşeni şüphesiz kabloda oluşan ısı kaybıdır. Farklı tip ve kesitteki kablolarda kayıplar farklı olacağından, grafiklerdeki sayısal farklar ortaya çıkmaktadır.

5.2.2 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablonun farklı ısıl özdirençlere sahip topraklardaki sıcaklık dağılımı



şekil 5.7 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablonun farklı ısıl özdirençlere sahip topraklardaki sıcaklık dağılımı.

şekil 5.7'deki grafiklerin verilerinin elde edilmesine ilişkin bilgiler EK F'de verilmiştir.

nedenle de yan yana döşenmiş kablolarda bu ek ısınma hesaba katılmalı ve gerekli akım değerine göre kablo tayini yapılmalıdır.

Şekil 5.8’de A ve B olarak iki adet kablo yan yana gömülmüştür. (5.1) bağıntısı kullanılarak A kablosu yüklü iken B kablodaki ısı artışı

$$\Delta T_B = P_A \cdot \frac{K_G}{2\pi} \cdot \ln \frac{c'}{c} \quad (5.7)$$

denkleminde bulunur. Şekil 5.8’ den kablonun görüntüsüne olan uzaklığı c' ;

$$c' = \sqrt{a^2 + 4h^2} \quad (5.8)$$

elde edilir (kablo eksen kaçıklığı ihmal edilerek $c=a$ alınmıştır). Buna göre (5.7) denklemi,

$$\Delta T_B = P_A \cdot \frac{K_G}{2\pi} \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \quad (5.9)$$

halini alır. Burada ,

$$\Sigma\delta = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \quad (5.10)$$

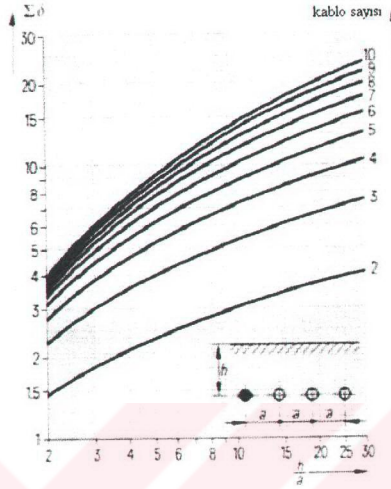
konarak elde edilen $\Sigma\delta$ değeri, gruplaşma faktörü adını alır. Şekil 5.9’da farklı h/a ve kablo sayıları için gruplaşma faktörleri verilmiştir. (5.9) denkleminin son hali,

$$\Delta T_B = P_A \cdot K_G \cdot \Sigma\delta \quad (5.11)$$

şeklını alır [9].

B kablosu için akım taşıma kapasitesi (2.11) denkleminde yararlanarak,

$$I = \sqrt{\frac{\Delta T - P_d(R_{Tcd}' + R_{TG}) - \Delta T_B}{nR_{wr}(R_{TG}' + R_{TG})}} \quad (5.12)$$



Şekil 5.9 Farklı h/a ve kablo sayıları için gruplaşma faktörleri.

(5.12) denkleminde bakılacak olursa daha önce verilen akım taşıma kapasitesi formülünden (2.11) farkı ΔT_B değişkenidir. Bu değişken (5.11) denkleminde hesaplanmaktadır. ΔT_B değişkenini etkileyen faktörlere bakılacak olursa kayıp güce, toprağın ısıl öz direncine ve $\Sigma\delta$ ile gösterilen gruplaşma faktörüne bağlı olduğu görülmektedir. Yan yana gömülmüş kablolarda bu üç faktörde akım taşıma kapasitesini doğrudan etkilemektedir. $\Sigma\delta$ ile gösterilen gruplaşma faktörü Şekil 5.9'daki grafik kullanılarak bulunur. Yeraltı kabloları genelde sabit derinliklere gömülürler. Bu nedenle h/a oranındaki h değeri sabit kabul edilir ise, kablo arası açıklık (a) arttıkça h/a oranı düşmekte ve bu oran düştükçe $\Sigma\delta$ değeri de azalmaktadır. Bunun sonucu olarak ΔT_B değişkeninin değeri de düşmekte, bu değere bağlı olan akım taşıma kapasitesi ise artmaktadır. Sonuç olarak yan yana döşenmiş kablolarda kablolar arası uzaklık akım taşıma kapasitesi için önemli bir faktördür.

Tablo 5.4 2XSY 20,3/35 kV (240/25 mm²) kablonun farklı döşenme şekillerindeki akım taşıma kapasiteleri.

Akım taşıma kapasitesi		
		
(A)	(A)	(A)
510	541	576

Tablo 5.4 incelenecek olursa, en yüksek akım taşıma kapasitesini elde etmek için kabloların yan yana ve aralıklar ile döşenmesi gerektiği görülmektedir. Fakat kablo seçimi yapılırken tek kriter akım taşıma kapasitesi değildir. Ekonomiklik, kablonun döşeneceği yer gibi kriterlerde göz önüne alınmalıdır.

6. ELEKTROLİTİK BANYO YÖNTEMİ İLE STATİK ELEKTRİK ALANI İNCELEMESİ, YAPILAN DENEYLER VE SONUÇLARI

6.1 Genel Bilgi

Elektrolitik banyo yöntemiyle statik elektrik alanın incelenmesi, iletken ortamda akım yoğunluğu vektörü $\vec{j}$ ile elektrik alanı vektörü $\vec{E}$ arasındaki bağıntının

$$\vec{j} = \chi \cdot \vec{E} \quad (6.1)$$

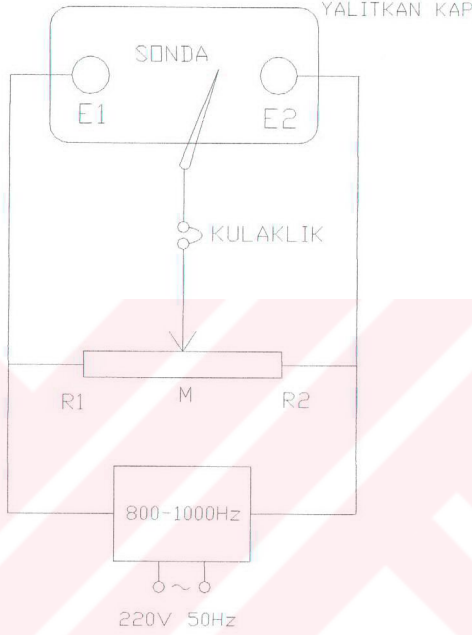
şeklinde ve yalıtkan ortam da elektriksel akı yoğunluğu (deplasman) vektörü $\vec{D}$ ile elektrik alanı vektörü $\vec{E}$ arasındaki bağıntının

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (6.2)$$

şeklinde olmasına dayanır. Bu denklemlerde χ iletken ortamın öziletkenliği, ϵ da yalıtkan ortamın dielektrik katsayısını gösterir. Elektrotlar arası ortamın izotrop olması durumunda χ ve ϵ skaler büyüklük olacağından $\vec{j}$ ile $\vec{E}$ ve $\vec{D}$ vektörleri yön ve doğrultu bakımından aynı özellikte olurlar. Dolayısıyla akım yoğunluğu çizgileri ile elektrik alanı çizgileri çakışır. Bir elektrot sisteminde elektrotlar arası ortama yalıtkan madde yerine elektrolitik sıvı madde konursa bu sistemlerin eşpotansiyel çizgileri benzer kalır.

Bu yöntemle özellikle düzlemsel alanlar deneysel olarak çok kolay incelenir. Bu deneysel yöntemde elektrolitik sıvının ve elektrotların içine konulduğu kap mümkün olduğu kadar büyük ve bir yalıtkan maddeden, örneğin camdan, plastikten veya, pleksiglastan yapılmış olmalıdır. Elektrolit olarak çeşme suyu veya içine biraz tuz katılmış damıtık su kullanılır. Elektrolitin iletkenliği çok küçük olmalıdır, aksi halde kaçak kapasiteler deney sonuçlarına etki edebilir, çok büyükte olmamalıdır, çünkü bu durumda elektrotlarda polarizasyon (kutuplanma) etkisi kendini göstermeye başlar.

Polarizasyon etkisini azaltmak için elektrotların çok temiz olması gerekir [19]. Şekil 6.1 elektrotlar arasındaki eşpotansiyel çizgileri bulmaya yarayan elektrolitik banyo yöntemi deney montajını göstermektedir.



Şekil 6.1 Elektrolitik banyo deneyinde kullanılan deney düzeneği.

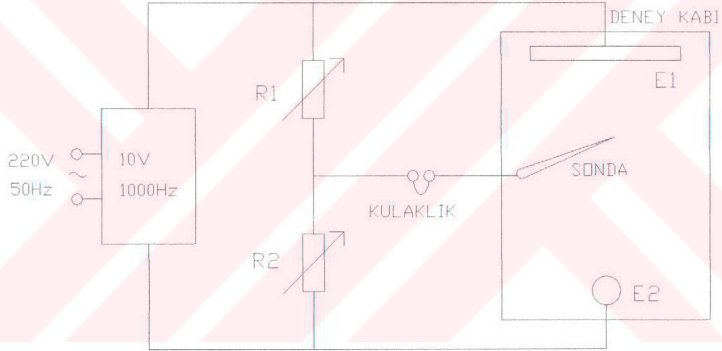
E1, E2: Model elektrotlar, R1, R2: Potansiyometre

Aranan potansiyel çizgiye karşılık gelen potansiyel, R1 ve R2 dirençleri değiştirilerek potansiyometreden ayarlanır. Sondanın elektrolit içinde gezdirilmesiyle köprü devre oluşturan devrenin denge kolundaki sıfır aletinin sıfır akım gösterdiği nokta bulunur. Bu şekilde bulunan nokta, üzerine model elektrotların da çizildiği bir milimetrik kağıda işaretlenir. Elektrotlara normal olarak 2,5 ile 10 Voltluk, denge konumu akım ölçerek yapılacaksa 50 Hz'lik veya bir kulaklıktan geçen akıma bağlı olarak ses dinleyerek yapılacaksa 1000 Hz'lik bir alternatif gerilim uygulanır. Frekans yükseldikçe elektrolitik sıvının polarizasyon olasılığı azalır fakat buna karşılık kaçak kapasitelerin etkisi büyür. Sonda ile kuvvetlendirici arasındaki

bağlantı iletkeninin toprak kapasitesi köprünün potansiyometre ucunun topraklanması ile giderilir. Polarizasyon kapasitelerinden dolayı potansiyometredeki gerilim ile sonda ucu gerilimi arasında küçük bir faz farkı meydana gelebilir ve bu köprünün dengeye getirilmesini güçleştirir. Elektrolitik banyo yönteminin sonuçlarının doğruluğuna etki eden bir hata kaynağı vardır. Örneğin sondanın boyutları, duruşu, potansiyometre dirençlerinin doğruluğu (toleransı), kullanılan elektrolitin ve elektrotların deney için uygunluğu gibi. Bunlar dışında deney kabının boyutlarının belirlenecek alana etki etmeyecek büyüklükte olması da önemlidir [19].

6.2 Yapılan Deneyler ve Sonuçları

6.2.1 Deney düzenekleri ve deneylerin yapılışı



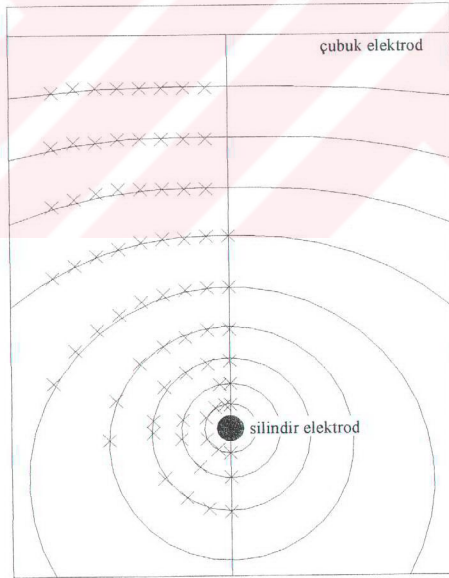
Şekil 6.2 Toprak altına gömülmüş kabloların benzetimi için kullanılan genel deney düzeneği.

Şekil 6.2’de R1 ve R2 dirençleri, 100 k Ω ’luk ayarlı dirençler olup, her biri 0-100 k Ω değeri arasında ayarlanabilmektedir. Güç kaynağı olarak 10 V, 1000 Hz çıkışı olan bir kaynak kullanılmıştır. E1 ile gösterilen elektrot dikdörtgen biçiminde çubuk elektrot (toprak yüzeyinin benzetimi), E2 ile gösterilen elektrot ise silindirik elektrottur (kablo benzetimi). Sonda olarak alüminyumdan yapılmış sivri uçlu bir elektrot kullanılmıştır. Yapılan deneyde, deney kabı olarak derinliği 2,6 cm, eni 26 cm ve boyu 38 cm olan bir pleksiglas kap kullanılmıştır.

R1 ve R2 dirençleri ayarlanarak 1 V ile 10 V arasında gerilimler elde edilmiştir. Örnek olarak 1 V değerini elde etmek için R1 ayarlı direnci 90 k Ω 'a, R2 ayarlı direnci 10 k Ω 'a ayarlanmıştır. Bu sayede kulaklığın bağlı olduğu noktada 1 V elde edilmiş olur. Sonda kap içinde gezdirildiğinde kulaklıktan akan akımın yarattığı ses duyulur. Bunun nedeni sondanın bağlı olduğu devre ile elektrolit sıvı içindeki elektrotların oluşturduğu devre arasındaki potansiyel farkıdır.

Sonda deney kabı içinde elektrotlar arasında dolaştırılırken duyulan sesin kesildiği noktada az önce sözü edilen iki devre arasında potansiyel farkı olmadığı, bu nedenle kulaklığın bulunduğu koldan akım akmadığı anlaşılar. Bu durumda kulaklık uçlarındaki potansiyel farkı sıfırdır veya birbirine eşittir yani bulunan nokta ayarlanan gerilim kademesi için eşpotansiyel noktadır. Aynı gerilim kademesi için farklı noktalar bulunup eş potansiyel çizgiler çizilir. Daha sonra gerilim kademesi değiştirilerek farklı potansiyeller için eşpotansiyel çizgiler bulunur.

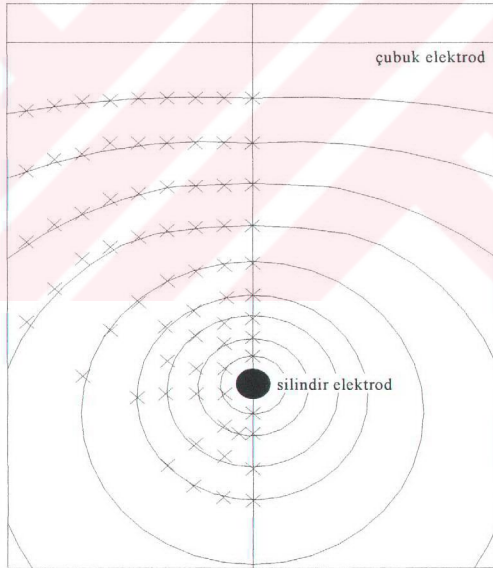
6.2.2 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablunun benzetimi için yapılan deney



Şekil 6.3 20,3/35kV 2XSY (240/25 mm²) kablunun benzetimi ile elde edilen eşpotansiyel çizgiler (x: ölçme noktaları).

İlk benzetimi yapılan kablo 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kesitlidir. Bu kablounun dış çapı 45,4 milimetredir. Kullanılacak olan elektrodun çapı ise 12 milimetredir. Bu iki değerin birbirine oranı 3,784 dir. Bu değeri, yapılan benzetimin ölçeğidir. Normal koşullarda bu kablo 70 cm derinliğe gömölür. 70 cm derinlik, benzetim ölçeğİ olan 3,784 sayısına bölünerek 18,5 cm benzetim derinliğİ edilmiştir. Bu benzetim ölçeğinin kullanılma nedeni elektrolitik banyo deneyinin yapılacağı kabın sınırlı boyutlarda olmasıdır. Şekil 6.3’de çarpı ile belirtilen noktalar deneyde bulunan noktalardır. Çizgiler ise bu noktalardan geçen eğriler olarak çizilmiştir. Eğri uydurma AutoCAD R14 programı yardımı ile yapılmıştır. İçteki daire kullanılan elektrodu göstermektedir.

6.2.3 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablounun benzetimi için yapılan deney

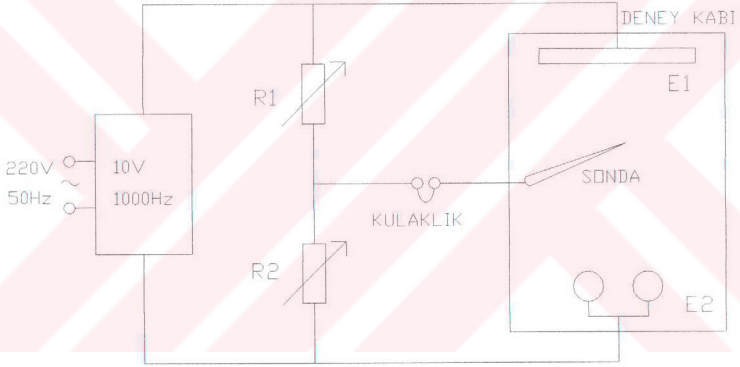


Şekil 6.4 89/154 kV 2XS(FL)2Y kablounun benzetimi ile elde edilen eş potansiyel çizgiler (x: ölçme noktaları).

Bu deneyde, 89/154 kV 2XS(FL)2Y 1000 mm² kablo kullanılmıştır. Kullanılan kablunun dış çapı 105,6 milimetredir. Deney için kullanılan elektrodun çapı 12 milimetredir. Bu iki değerin oranı 8,8 dir. 154 kV kabloların gömülme derinliği 120 cm' dir. Bu deneyde de kullanılacak deney kabının sınırlı boyutları nedeni ile bir benzetim yapılmıştır. Kablunun normal gömülme derinliği olan 120 cm değeri, elde edilen ölçek değeri olan 8,8'e bölünürse 13,6 cm değeri elde edilir.

6.2.2 bölümünde belirtilen tüm işlemlerin aynıları yapılmak koşulu ile 89/154 kV 2XS(FL)2Y 1000 mm² kablo için Şekil 6.4 elde edilir.

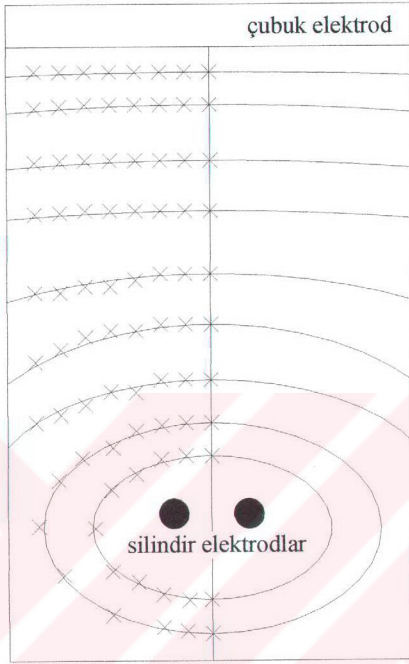
6.2.4 Yan yana gömülmüş iki adet 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablunun benzetimi için yapılan deney



Şekil 6.5 İki adet 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablunun benzetiminde kullanılan deney düzeneği.

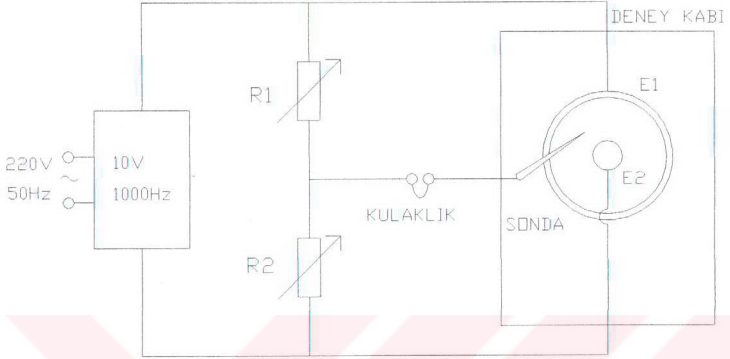
Bu deneyde de kablo benzetimi için 12 mm çaplı elektrotlar kullanılmıştır. Benzetim ölçeği, 6.2.2'de olduğu gibi 3,784'tür. Yapılan işlemler önceki deneyler ile aynıdır. Buradaki fark tek elektrot yerine çift elektrot (iki kablo benzetimi için) kullanılmasıdır. İki elektroda da 10 V gerilim uygulanmıştır. Buradaki amaç kabloların aynı yükü taşıdığını benzetmektir.

Deneyden elde edilen veriler ile çizilen eğriler Şekil 6.6'de görülmektedir.



Şekil 6.6 İki adet 20,3/35 kV 2XSY (240/25 mm²) kablonun benzetimi ile elde edilen çizgiler (x: ölçme noktaları).

6.2.5 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablusunun iç sıcaklık dağılımı benzetimi için yapılan deney



Şekil 6.7 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kabloda iç sıcaklık dağılımının deneysel belirlenmesi için deney düzeneği.

Bu deneyde kullanılan elektrodun yarıçapı 15 milimetredir. Benzetimi yapılan kablonun anma kesiti 1000 milimetrekaredir. Bu verilerden kablo iletkenin yarıçapının 17,84 milimetre olduğunu hesaplarız. Kablo çapı ile elektrot çapının oranı 1,189'dur. Kullanılan kablonun dış yarıçapı 52,8 milimetredir. Bu değer benzetim ölçeği olan 1,189 ile çarpılarak 44,4 milimetre değeri elde edilir. Deneyde kullanılan ve kablo dış çapını temsil eden çember elektrodun çapı 50 milimetredir. Görüldüğü gibi 44,4 mm değeri 50 mm değerine yakındır. Bu deneyde de daha önceki deneylerdeki adımlar izlenmiştir. Elde edilen veriler, Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

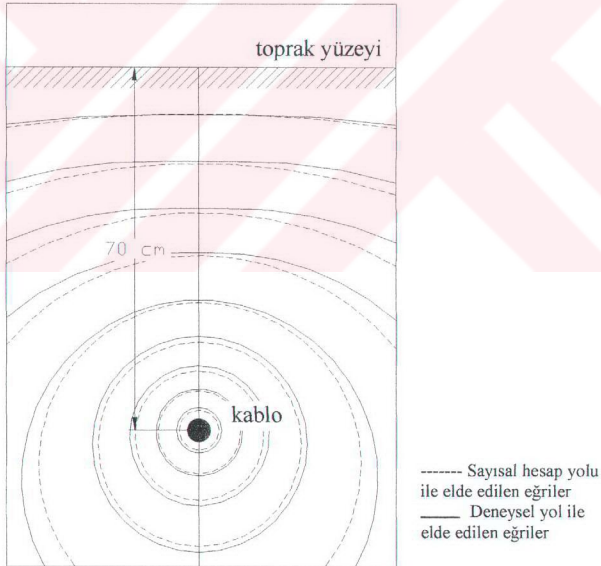


Şekil 6.8 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablusunun deneysel olarak bulunan iç sıcaklık dağılımı (x: ölçme noktaları).

7. DENEYSEL VERİLER İLE SAYISAL HESAP VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bölüm 3’de, analogiden ısı akışının, yük akışına ve elektrik akımına eşdeğer olduğu ve akım için geçerli olan elektriksel bağlantıların ısı akışı için de geçerli olacağı verildi. Buradan yola çıkarak elektrolitik banyo deneyinde elde edilen eşpotansiyel çizgilerin, benzetimi yapılan kablolar için eş sıcaklık dağılım çizgileri olduğu ortaya çıkar.

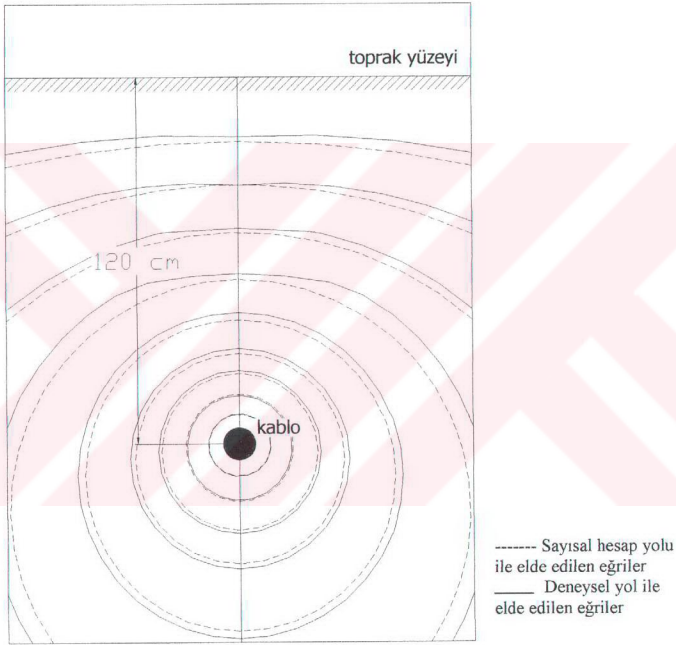
7.1 20,3/35 kV 2XSY 240 mm² Kablo İçin Yapılan Karşılaştırma



Şekil 7.1 20,3/35 kV 2XSY 240 mm² kablo için deney ve hesap sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 7.1’de düz çizgiler ile çizilmiş eğriler deneysel yol ile elde edilen eşpotansiyel çizgilerdir. Kesikli çizgiler ile çizilmiş olan eğriler ise sayısal yolla hesaplanıp çizilen sıcaklık dağılımı çizgileridir. Şekil 7.1’de görüldüğü üzere iki eğri grubu birbirine çok yakındır. Varolan küçük farklar deneysel hatalardan kaynaklanmıştır.

7.2 89/154 kV 2XS(FL)2Y 1000 mm² Kablo İçin Yapılan Karşılaştırma



Şekil 7.2 89/154 kV 2XS(FL)2Y 1000 mm² kablo için deney ve hesap sonuçlarının karşılaştırılması.

Bölüm 7.1’de olduğu gibi burada da düz çizgiler ile çizilmiş eğriler eşpotansiyel, kesikli çizgiler ile çizilmiş eğriler ise sayısal yolla hesaplanıp çizilen eğrileri göstermektedir.

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'ye bakılırsa, daha önce elde edilen Şekil 6.6 ve Şekil 6.8 benzetimi yapılan kablolar için sıcaklık dağılımı eğrilerini vermektedir.

Normal koşullarda tek bir kablo için topraktaki sıcaklık dağılımını elde etmek sayısal olarak mümkündür fakat farklı sayılarda ve farklı düzenlerde döşenmiş kablolar için sıcaklık dağılımını hesaplamak çok zordur. Bu benzetim yöntemi ile istenilen tüm kablo sayısı ve dizilimi için sıcaklık dağılımını elde etmek mümkündür.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüzde kablolar, çok geniş kullanım alanı içinde, farklı ihtiyaçları karşılamak için üretilip kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi ihtiyacı arttıkça elektrik akımını taşıyan kablolar da gereksinim artmaktadır.

Yeraltı kablolarında yüksek ve daha yüksek gerilimlere duyulan ihtiyaç teknik ve ekonomik düşünceden ortaya çıkmaktadır. Yüksek gerilim ile yapılan iletimde kayıpların az olması bu sayede verimin artması söz konusudur. Bununla birlikte talep edilen güçlerin gün ve gün artması, yüksek gerilimde iletimi zorunlu kılmıştır.

Kablolarda yüksek gerilim kullanılarak taşınan gücün gerilim bileşeni artırılır. Buna karşılık gücün akım bileşenini az arttırmak veya arttırmamakla istenen güç iletebilir. Bu durum, kablo iletkeni için kullanılan bakır veya alüminyum miktarının az olmasını sağlar. Fakat uygulanan yüksek gerilim nedeni ile kullanılan dielektrik yalıtım malzemesi miktarı ve dolayısıyla kablo boyutlarındaki artış nedeniyle de zırh ve ekran malzemesi miktarları artmaktadır.

Yeraltı kablosu için önemli bir konu ise akım taşıma kapasitesidir. Üzerinden akım geçen iletkende, iletkenin öz direnci sebebiyle kayıp bir güç oluşur. Ayrıca kablonun dielektrik kısımlarında oluşan kayıplarda vardır. Bu toplam kayıp güç kablodan ısı yolu ile ayrılır. Kablolarda iletkenin üzeri yalıtkan malzeme ile kaplı olduğundan iletkenin üzerinde oluşan ısı ilk olarak yalıtkan maddeye daha sonrada toprağa geçer. İşte burada az önce sözü edilen dielektrik malzeme miktarının rolü büyüktür. Çünkü ısı akışı sırasında malzemeler ısı akışına direnç gösterirler. Bu direncin fazla olması ısı akışının az olmasına, bu nedenle kablo başarımını düşüren ısı artışına neden olur. Kabloda kullanılan dielektrik malzemenin ısı direnci, ısı akışını etkileyen önemli faktördür.

Kablo yalıtımını terk eden ısı, toprağa geçer. Burada da toprağın ısı direnci ile karşılaşır. Yeraltı kablosunun gömüleceği kanalın dolgu malzemesinin ısı direnci mümkün olduğunca düşük seçilmelidir. Bu sayede kabloda oluşan ısı kolay bir şekilde kablodan uzaklaşır. Aksi durumda, oluşan bu ısı toprağın kurumasına neden

olacaktır. Kuruyan toprak normal koşullarda gösterdiği ısıl öz dirençten daha fazla bir direnç gösterecektir. Soğuma işlemini gerçekleştiremeyen kablo daha fazla ısınacaktır. Bu ısınma kablo yalıtımının özelliğini kaybedeceği ısı değerine ulaşınca kadar devam edecek ve bu sınır aşıldığında yalıtım malzemesi eriyerek veya ısıl delinerek faz toprak arızasına neden olacaktır ve kablo devre dışı kalacaktır.

Ekonomiklik ve ihtiyaç nedeni ile kablolar bazı durumlarda yan yana döşenirler. Yan yana döşenmiş kablolarda, kablonun kendi oluşturduğu ısıdan ayrı olarak komşu kabloların oluşturduğu ısı nedeni ile ek bir ısınma gerçekleşir. Bu ısınma miktarı kablo döşenme şekilleri ile farklılık göstermektedir. Yan yana aralıklar ile döşenmiş kablolarda, birbirini ısıl, elektriksel ve manyetik alan yönünden etkilemeyecek aralıklarla döşenmesi bakımından kablolar arası mesafe önemli bir faktördür.

Tek bir yeraltı kablosunun topraktaki sıcaklık dağılımını, teorik olarak kolaylıkla bulmak mümkündür. Fakat kablo sayısı arttıkça ve döşeme şekilleri değiştikçe sıcaklık dağılımını teorik olarak bulmak oldukça zorlaşır. Bu gibi durumlarda analogiden yararlanarak teorik ve deneysel çalışmalar yapılabilir. Tezde, elektrik ile ısı arasındaki benzerlikten yararlanılarak elektrolitik banyo deneyi adı verilen deneysel bir yöntem kullanılmıştır. Elektrikteki akım ile ısıdaki ısı akışı benzerlik göstermektedir. Bu nedenle elektrik akımı için geçerli tüm formüller ısı akışı içinde benzer olacaktır. Buradan yola çıkarak, statik elektrik alan dağılımı ile ısı alan dağılımının benzer olacağı açıktır.

Tezde uygun bir modelleme ile bir kablonun veya farklı yerleşim şekillerinde döşenmiş çok sayıda kablonun çevresindeki veya içindeki sıcaklık dağılımlarının elektrolitik banyo yöntemi ile gerçek ve teorik sıcaklık dağılımlarına benzer olarak bulunabileceği gösterilmiştir. Bölüm 6 da bu konu ile ilgili örnekler yapılmıştır. Bu sayede bir yeraltı kablosunun sıcaklık dağılımının deneysel olarak elde edilebileceği gösterilmiştir.

Sonuç olarak yeraltı kabloları için ısınma hayati önem taşımaktadır. Belirtilen sınırlardan daha fazla ısınan bir kablonun arıza yapma olasılığı çok yüksektir. Kullanılacak olan kablolar için akım taşıma kapasiteleri iyi hesaplanmalıdır. Ayrıca bu kapasiteye etki eden çevresel koşullar (toprak ısıl öz direnci, yan yana döşeme, ek ısı kaynakları vs.) iyice incelenmeli ve buna göre kablolar yapılmalı, seçilmeli, döşenmeli ve işletilmelidir.

KAYNAKLAR:

- [1] **Rabiowitz, M.**, 2000. Power System of the Future, *IEEE Power Engineering Review*, **0272**, 10-15.
- [2] **Dudas, J. H.**, Technical Advances in the Underground Medium-Voltage Cable Specification of the Largest Investor Owned Utilities in the U.S., *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **Nov/Dec 1999, Vol.15, No.6**, 29-37.
- [3] **Black, M. R.**, 1983. *The History of Electric Wires and Cables*, Peter Peregrinus, London.
- [4] <http://collections.ic.gc.ca/cable/gutta.htm>, Transatlantic Cable Communications.
- [5] **Rosevear, D. R.**, 2000. Power Cables in 21st Century Energy Development, *IEEE Power Engineering Review*, **0272**, 8-10.
- [6] **Shibita, T., Watabe, M., Suzawa, C., Ishii, H., Honjo, S., Iwata, Y.**, 1998. Development of High Temperature Superconducting Power Cable Prototype System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **Vol. 14, No. 1, Jan**, 182-187.
- [7] **McAllister, D.**, 1987. *Electric Cables Handbook*, Granada Technical Books Ltd., Great Britain.
- [8] **Barnes, C. C.**, 1966. *Power Cables, Their Design and Installation*, Butler & Tanner Ltd, Frome and London.
- [9] **Heinhold, L.**, 1990. *Power Cables and Their Applications*, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich.
- [10] **Malik, N. H., Al-Araïnsy, A. A., Qureshi, M. I.**, 1998. *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker, inc., King Saud University, Riyadh.
- [11] **Dağlar, H. Y.**, 1991. *Yeraltı Kablolarının Akım Taşıma Kapasitesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [12] **Quinlan, N.**, 2001. *Heat Transfer*, National University of Ireland, Galway
- [13] http://www.eng.usf.edu/~crane/heat_tran/HT%20Lecture%20I.doc
College of Engineering, University of South Florida,

- [14] <http://140.116.35.25/~wshwang/powerpoint/Lecture-transport-ht2.ppt>
Weng-Sing Hwang, Department of Materials Science and Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan,
- [15] <http://www.me.tulane.edu/Faculty/Tran-cong/Courses/Me467/Chapter2E-Fluid-&Heat-FlowSystems.ppt>, Department of Mechanical Engineering, Tulane University.
- [16] <http://www.min.uc.edu/nuclear/ibt/heattranshx.html#Resistance%20to%20Heat%20Transfer>, Department of Mechanical Industrial and Nuclear Engineering, University of Cincinnati.
- [17] <http://www.tak2000.com/data/faq/faq1.htm#a>
K&K Associates, 1995-2003.
- [18] **Lucas, J. R.**, 2001. *High Voltage Engineering*, University of Moratuwa, Srilanka.
- [19] **Özkaya, M.**, 1984. *Yüksek Gerilim Tekniğinde Ölçme*, İTÜ Yayını, İstanbul.
- [20] **Weedy, B. M.**, 1988. The Analogy between Thermal and Electrical Quantities, *Electric Power Systems Research*, April 26, 197-201.
- [21] **Buonanno, G. and Carotenuto, A. and Dell’Isola, M. and Villacci, D.**, 1995. Effect of Radiative and Convective Heat Transfer on Thermal Transients in Power Cables, *IEEE Proceedings on Transmission and Distribution*, Vol. 142, No. 4, July, 436-444.
- [22] **Chikhani, A. Y., Hanna, M. A. and Salama, M. M. A.**, 1997. Thermal Analysis of Power Cable Systems in a Trench in Multi-Layered Soil, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, April, 304-309.
- [23] **Dağsöz, A. K.**, 1990. *Isı Geçişi*, Emre Matbaacılık, İstanbul
- [24] **Kreith, F. and Bohn S. M.**, 1993. *Principles of Heat Transfer*, West Publishing, USA.
- [25] **Prata, T. A., Freitas, D. S. and 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, 1159-1170.
- [26] **Saner, Y.**, 1998. *Güç (Enerji) Dağıtımı*, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- [27] **Thue, A. W.**, 1999. *Electrical Power Cable Engineering*, Marcel Dekker, inc. New York.
- [28] **TS 11598**, Nisan 1995. *Kablolar-Sürekli Akım Değerlerinin Hesaplanması*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tablo A.1 100 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
10,735898	32,5204	1	-	2,07425	32,2664	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	-	-
10,632312	32,5204	1	2,05424	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	209,244	26,2915
9,4960812	32,5204	1	1,83471	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	197,335	25,2964
7,9393422	32,5204	1	1,53394	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	185,438	29,6069
6,3891035	32,5204	1	1,23442	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	173,555	37,4331
4,9509658	32,5204	1	0,95656	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	161,689	47,0521
3,6202218	32,5204	1	0,69945	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	149,845	57,5722
2,3816169	32,5204	1	0,46015	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	138,028	68,5801
1,1695083	32,5204	1	0,22596	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	126,545	79,8742
									114,507	91,3485

Tablo A.2 80 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
8,3584598	32,5204	1	1,61492	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	-	-
9,2396058	32,5204	1	1,78516	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	189,368	37,6666
9,7149417	32,5204	1	1,877	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	177,48	29,7758
9,1598455	32,5204	1	1,76975	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	165,608	25,3461
7,7248444	32,5204	1	1,4925	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	153,756	26,1963
6,0452191	32,5204	1	1,16798	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	141,929	31,9072
4,4139891	32,5204	1	0,85282	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	130,134	40,4709
2,8788474	32,5204	1	0,55621	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	118,38	50,4551
1,4172869	32,5204	1	0,27383	32,2664	1,354	1,8x10 ⁻⁵	0,25407	1,9x10 ⁻¹⁰	106,681	61,1681
									95,0564	72,2867

Tablo A.3 60 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
5,8795135	32,5204	1	-	1,13597 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
6,5914785	32,5204	1	1,27352 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,505	54,43
7,4007345	32,5204	1	1,42988 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,646	44,1163
8,1250986	32,5204	1	1,56983 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	145,81	34,898
8,2138327	32,5204	1	1,58697 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	134,004	27,8836
7,1840417	32,5204	1	1,38801 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	122,235	25,0024
5,461813	32,5204	1	1,05526 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	110,516	27,5816
3,6006941	32,5204	1	0,69568 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	98,8641	34,4147
1,7792904	32,5204	1	0,34377 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	87,3069	43,543
							0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	75,8872	53,8109

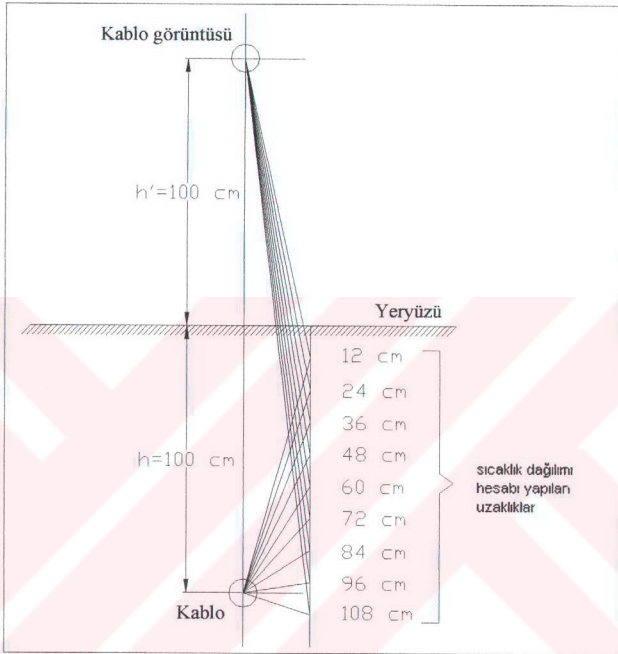
Tablo A.4 40 cm derinliğe gömülmüş 89/154 Kv 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
3,734606	32,5204	1	-	0,72155 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
4,1683592	32,5204	1	0,80536 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	149,751	72,7786
4,6965631	32,5204	1	0,90741 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	137,935	61,6468
5,3263164	32,5204	1	1,02908 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	126,152	50,9109
6,0010944	32,5204	1	1,15946 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	114,415	40,8843
6,4216067	32,5204	1	1,2407 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	102,773	32,2354
5,9251752	32,5204	1	1,14479 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	91,1456	26,3576
4,3524879	32,5204	1	0,84093 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	79,3769	25,265
2,2327123	32,5204	1	0,43138 32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	68,3836	29,4944
							0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	57,3822	37,2763

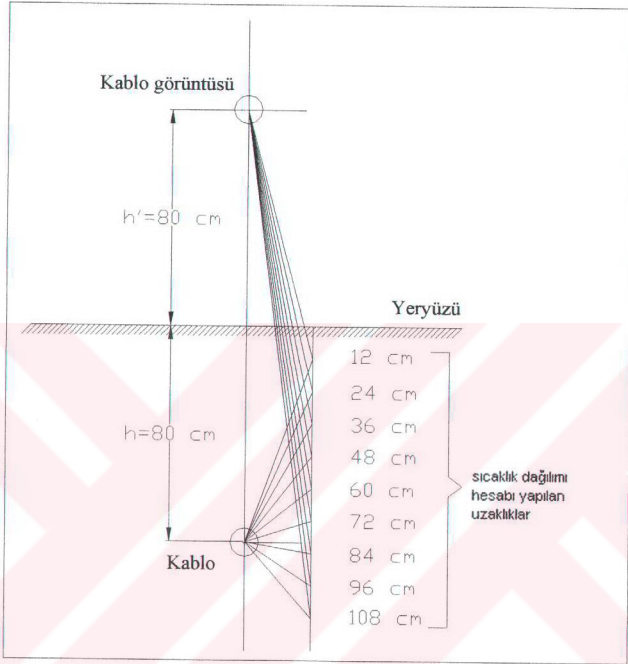
Tablo A.5 20 cm derinliğe gömülmüş 89/154 Kv 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablo için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT	P_T	K_G	c_k	P_I	I	R_{wr}	P_d	C_b	c'	c
(°K)	(W/m)	(°K m/W)	-	(W)	(A)	(Ω/m)	(W/m)	(μF/m)	-	-
1,7963667	32,5204	1	0,34707	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	130,088	91,9402
1,9966548	32,5204	1	0,38577	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	118,334	80,4586
2,2415758	32,5204	1	0,43309	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	106,635	69,1531
2,5432103	32,5204	1	0,49137	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	95,0111	58,1268
2,9112795	32,5204	1	0,56248	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	83,4937	47,5742
3,3319455	32,5204	1	0,64376	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	72,1338	37,893
3,6849863	32,5204	1	0,71197	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	61,0194	29,9409
3,5382955	32,5204	1	0,68362	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	50,3136	25,3975
2,2524254	32,5204	1	0,43519	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	40,3429	26,1077

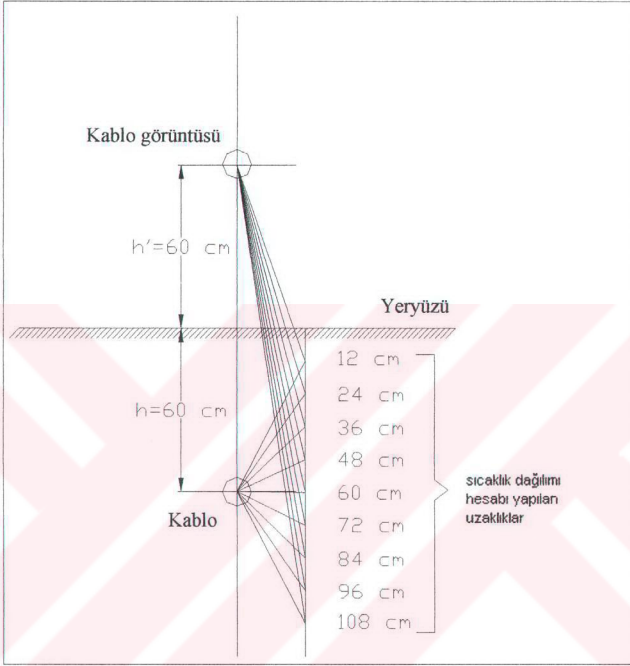
EK B



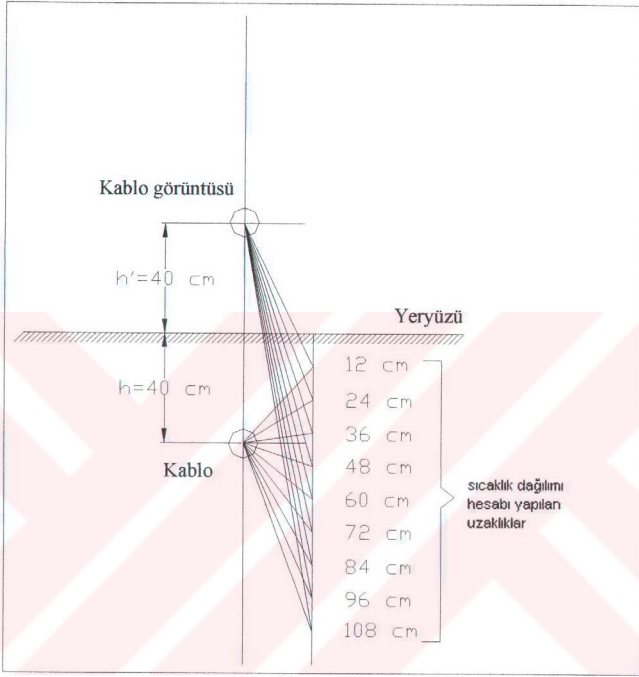
Şekil B.1 100 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



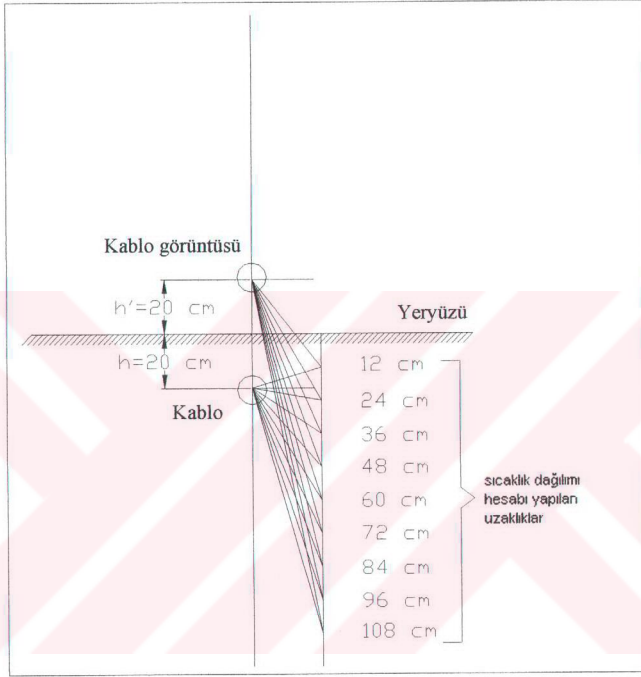
Şekil B.2 80 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



Şekil B.3 60 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



Şekil B.4 40 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



Şekil B.5 20 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.

Tablo C.1 Toprak ısıt öz direnci $K_G = 0,4 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
6,0092667	32,5204	0,4	2,90259	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
4,4631671	32,5204	0,4	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
3,5070916	32,5204	0,4	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
2,7888182	32,5204	0,4	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
2,1975997	32,5204	0,4	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
1,6837943	32,5204	0,4	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
1,2206642	32,5204	0,4	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
0,7920682	32,5204	0,4	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
0,3875269	32,5204	0,4	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
									135,683	112,521

Tablo C.2 Toprak ısıt öz direnci $K_G = 0,6 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
9,0139001	32,5204	0,6	2,90259	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
6,6947507	32,5204	0,6	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
5,2606374	32,5204	0,6	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
4,1832273	32,5204	0,6	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
3,2963996	32,5204	0,6	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
2,5256914	32,5204	0,6	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
1,8309963	32,5204	0,6	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
1,1881023	32,5204	0,6	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
0,5812903	32,5204	0,6	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
									135,683	112,521

Tablo C.3 Toprak ısıt öz direnci $K_G = 0,8 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
12,018533	32,5204	0,8	2,90259	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
8,9263343	32,5204	0,8	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
7,0141831	32,5204	0,8	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
5,5776363	32,5204	0,8	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
4,3951995	32,5204	0,8	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
3,9675886	32,5204	0,8	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
2,4413284	32,5204	0,8	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
1,5841364	32,5204	0,8	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
0,7750538	32,5204	0,8	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
									135,683	112,521

Tablo C.4 Toprak ısıt öz direnci $K_G = 1 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
15,023167	32,5204	1	2,90259	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
11,157918	32,5204	1	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
8,7677289	32,5204	1	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
6,9720454	32,5204	1	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
5,4939994	32,5204	1	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
4,2094857	32,5204	1	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
3,0516605	32,5204	1	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
1,9801705	32,5204	1	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
0,9688172	32,5204	1	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
									135,683	112,521

Tablo C.5 Toprak ısı öz direnci $K_G = 1,2 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120 cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y(1000/135 mm²) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
18,0278	32,5204	1,2	-	2,90259	32,2664	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
13,389501	32,5204	1,2	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
10,521275	32,5204	1,2	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
8,3664545	32,5204	1,2	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
6,5927992	32,5204	1,2	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
5,0513829	32,5204	1,2	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
3,6619926	32,5204	1,2	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
2,3762045	32,5204	1,2	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
1,1625807	32,5204	1,2	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
									135,683	112,521

Tablo C.6 Toprak ısı öz direnci $K_G = 1,4 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
21,032434	32,5204	1,4	-	2,90259	32,2664	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
15,621085	32,5204	1,4	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
12,27482	32,5204	1,4	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
9,7608636	32,5204	1,4	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
7,6915991	32,5204	1,4	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
5,89328	32,5204	1,4	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
4,2723247	32,5204	1,4	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
2,7722386	32,5204	1,4	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
1,3563441	32,5204	1,4	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
									135,683	112,521

Tablo C.7 Toprak ısıt öz direnci $K_G = 1,6 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 89/154 kV 2XS(FL)2Y (1000/135 mm²) kablounun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
24,037067	32,5204	1,6	2,90259	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	-	-
17,852669	32,5204	1,6	2,15579	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	228	12,5023
14,028366	32,5204	1,6	1,69399	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	215,908	25,0046
11,155273	32,5204	1,6	1,34705	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	204,081	37,5069
8,790399	32,5204	1,6	1,06148	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	192,339	50,0092
6,7351772	32,5204	1,6	0,8133	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	180,699	62,5115
4,8826568	32,5204	1,6	0,5896	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	169,182	75,0138
3,1682727	32,5204	1,6	0,38258	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	157,815	87,5161
1,5501076	32,5204	1,6	0,18718	32,2664	1354	$1,8 \times 10^{-5}$	0,25407	$1,9 \times 10^{-10}$	146,634	100,018
									135,683	112,521

Tablo D.1 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
7,720098	25,08631	1	-	1,933597/25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	139,1745
6,852225	25,08631	1	1,716227/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	129,6067	23,2959
5,610259	25,08631	1	1,405161/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	120,0562	29,4531
4,354023	25,08631	1	1,09052/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	110,5274	37,1418
3,176586	25,08631	1	0,795616/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	101,0266	45,5936
2,074788	25,08631	1	0,519657/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	91,5624	54,4544
1,024653	25,08631	1	0,256637/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	82,1475	63,5533

Tablo D.2 60 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
7,173471	25,08631	1	-	1,796687/25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	129,2863
7,126216	25,08631	1	1,784851/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	119,7364	20,0944
6,233212	25,08631	1	1,561187/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	110,2085	23,1313
4,940935	25,08631	1	1,23752/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	100,7088	29,2159
3,618066	25,08631	1	0,906191/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	91,246	36,8689
2,360917	25,08631	1	0,591322/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	81,8331	45,3024
1,164355	25,08631	1	0,291627/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	72,4893	54,1529

Tablo D.3 50 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
5,976657	25,08631	1	1,49693	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	-
6,502344	25,08631	1	1,628595	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	119,4167	26,7274
6,428364	25,08631	1	1,610066	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	109,8896	21,5609
5,493401	25,08631	1	1,375892	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	100,391	20,0656
4,129203	25,08631	1	1,034211	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	90,9296	22,9701
2,711651	25,08631	1	0,679168	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	81,5186	28,9804
1,338442	25,08631	1	0,33523	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	72,1777	36,5969
									62,938	45,0116

Tablo D.4 40 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
4,649944	25,08631	1	1,164638	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	-
5,238928	25,08631	1	1,312156	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	109,5708	34,19
5,709519	25,08631	1	1,430022	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	100,0732	26,9436
5,586213	25,08631	1	1,399138	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	90,6133	21,6841
4,581527	25,08631	1	1,147502	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	81,2043	20,042
3,109197	25,08631	1	0,778738	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	71,8662	22,8124
1,549534	25,08631	1	0,388101	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	62,6306	28,7465
									53,5507	36,3258

Tablo D.5 30 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
3,387533	25,08631	1	-	0,848451	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$1,86 \times 10^{-10}$	-	99,7555
3,846854	25,08631	1	0,963494	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	90,297	34,4535
4,357026	25,08631	1	1,091273	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	80,8901	27,162
4,743325	25,08631	1	1,188026	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	71,5548	21,8115
4,533311	25,08631	1	1,135425	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	62,3234	20,0236
3,411942	25,08631	1	0,854564	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	53,25	22,6562
1,770866	25,08631	1	0,443536	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	44,4315	28,5145

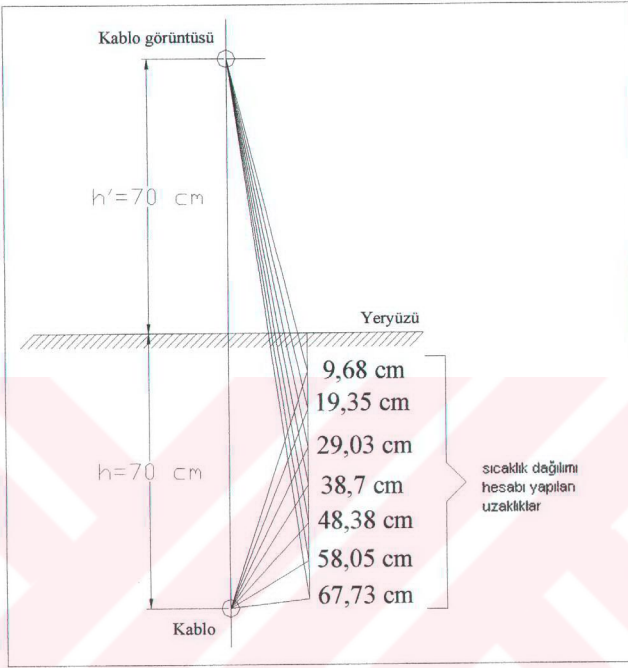
Tablo D.6 20 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
2,20853	25,08631	1	0,553154	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	-	89,9808
2,508295	25,08631	1	0,628234	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	80,5759	42,9899
2,870052	25,08631	1	0,718841	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	71,2434	34,7181
3,263946	25,08631	1	0,817497	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	62,0163	27,3824
3,517078	25,08631	1	0,880897	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	52,9496	21,9429
3,15879	25,08631	1	0,791159	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	44,1422	20,0105
1,851399	25,08631	1	0,463707	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	35,7861	22,5076

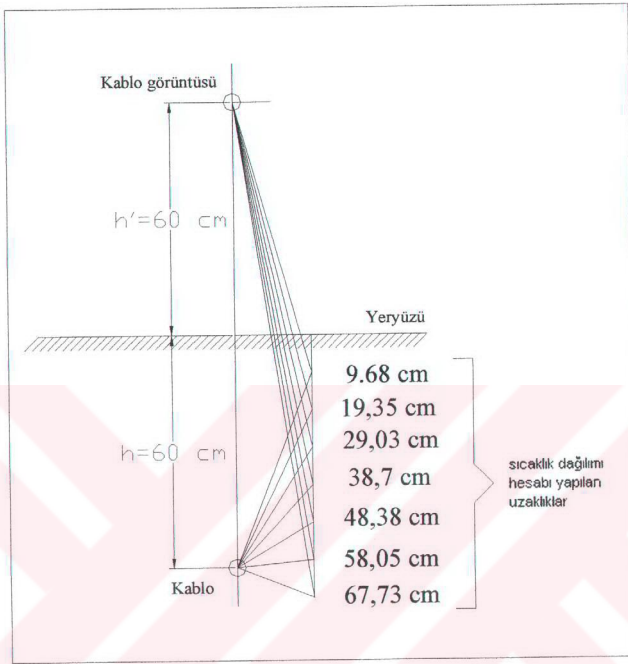
Tablo D.7 10 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_l (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b (μ F/m)	c'	c
1,089354	25,08631	1	-	0,272842/25,07319	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	-
1,235789	25,08631	1	0,309519/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	80,2618	61,0963
1,416626	25,08631	1	0,354812/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	70,9323	52,0501
1,632089	25,08631	1	0,408777/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	61,7095	43,2772
1,848015	25,08631	1	0,462859/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	52,6495	34,9836
1,897556	25,08631	1	0,475267/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	43,8534	27,6049
1,350846	25,08631	1	0,338337/25,07319	503	503	$9,91 \times 10^{-05}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	35,5117	22,0783
									28,0559	20,0026

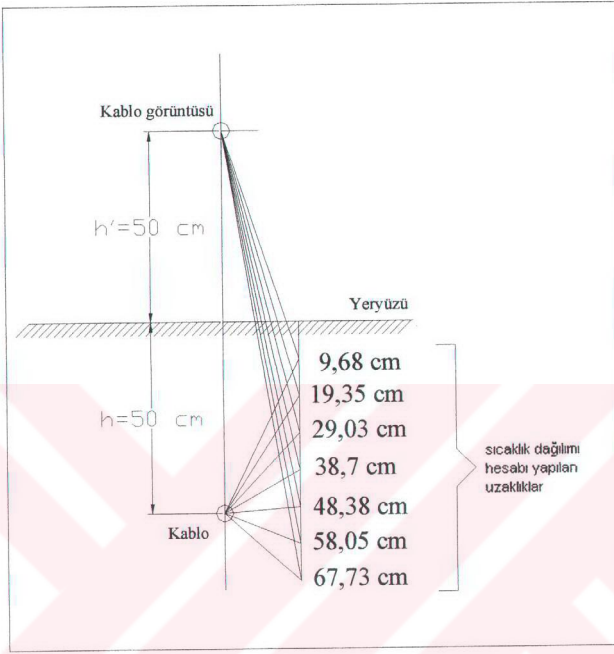
EKE



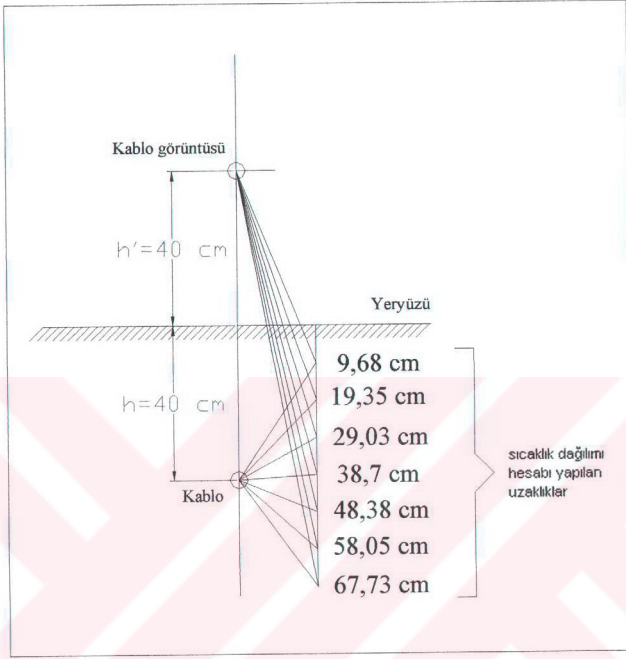
Şekil E.1 70 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



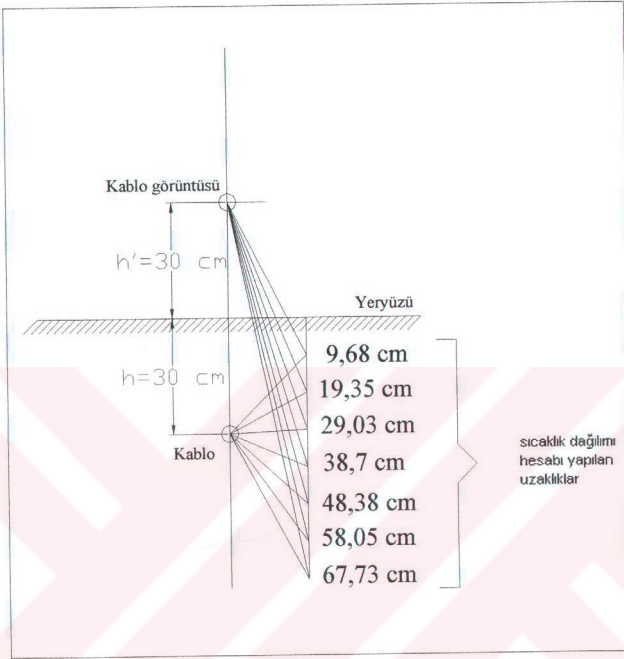
Şekil E.2 60 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm^2 kesitli) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



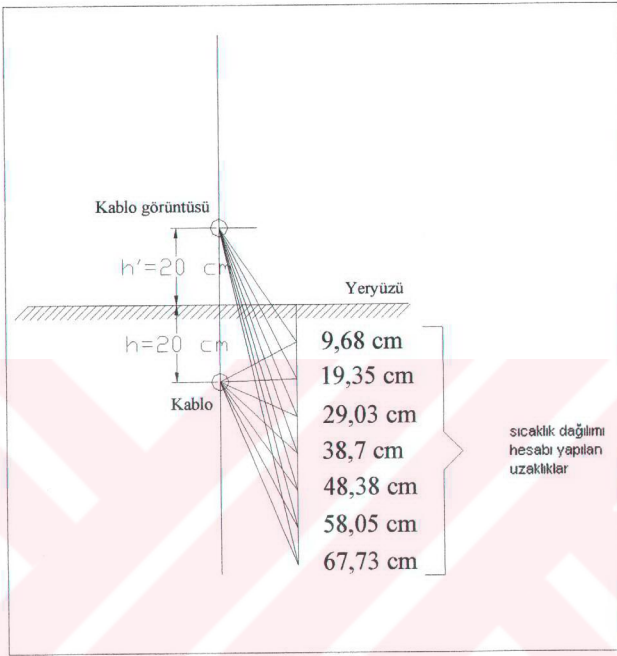
Şekil E.3 50 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



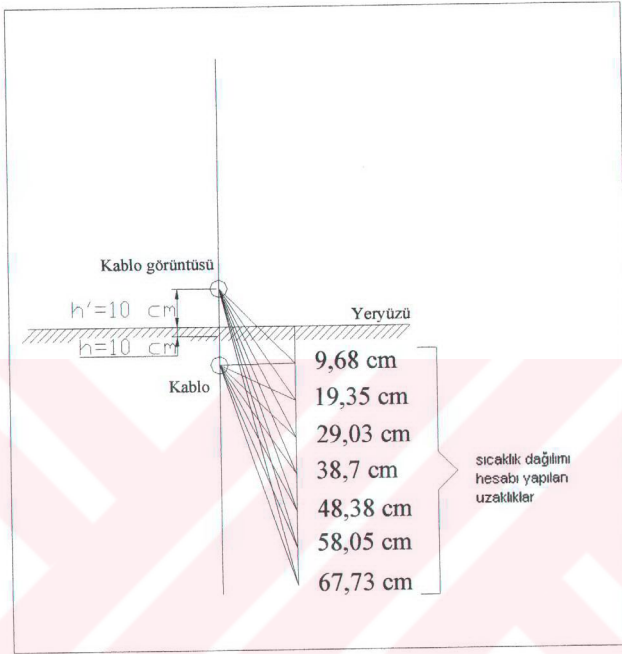
Şekil E.4 40 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



Şekil E.5 30 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm^2 kesitli) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



Şekil E.6 20 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm^2 kesitli) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.



Şekil E.7 10 cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm^2 kesitli) kablosu için c ve c' değişkenlerinin bulunmasında kullanılan şekil.

Tablo F.1 Toprak ısı öz direnci $K_G = 0,4 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XS Y (240 mm² kesitli) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b ($\mu\text{F}/\text{m}$)	c'	c
3,088039	25,08631	0,4	1,933597	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	-
2,74089	25,08631	0,4	1,716227	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	139,1745	20,1284
2,244104	25,08631	0,4	1,405161	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	129,6067	23,2959
1,741609	25,08631	0,4	1,09052	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	120,0562	29,4531
1,270635	25,08631	0,4	0,795616	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	110,5274	37,1418
0,829915	25,08631	0,4	0,519657	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	101,0266	45,5936
0,409861	25,08631	0,4	0,256637	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	91,5624	54,4544
									82,1475	63,5533

Tablo F.2 Toprak ısı öz direnci $K_G = 0,6 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XS Y (240 mm² kesitli) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b ($\mu\text{F}/\text{m}$)	c'	c
4,632059	25,08631	0,6	1,933597	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	-
4,111335	25,08631	0,6	1,716227	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	139,1745	20,1284
3,366155	25,08631	0,6	1,405161	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	129,6067	23,2959
2,612414	25,08631	0,6	1,09052	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	120,0562	29,4531
1,905952	25,08631	0,6	0,795616	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	110,5274	37,1418
1,244873	25,08631	0,6	0,519657	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	101,0266	45,5936
0,614792	25,08631	0,6	0,256637	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	91,5624	54,4544
									82,1475	63,5533

Tablo F.3 Toprak ısıt öz direnci $K_G = 0,8 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablolon sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b ($\mu\text{F}/\text{m}$)	c'	c
6,176078	25,08631	0,8	-	1,933597	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	-
5,48178	25,08631	0,8	1,716227	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	139,1745	20,1284
4,488207	25,08631	0,8	1,405161	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	129,6067	23,2959
3,483218	25,08631	0,8	1,09052	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	120,0562	29,4531
2,541269	25,08631	0,8	0,795616	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	110,5274	37,1418
1,65983	25,08631	0,8	0,519657	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	101,0266	45,5936
0,819723	25,08631	0,8	0,256637	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	91,5624	54,4544
									82,1475	63,5533

Tablo F.4 Toprak ısıt öz direnci $K_G = 1 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablolon sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω /m)	P_d (W/m)	C_b ($\mu\text{F}/\text{m}$)	c'	c
7,720098	25,08631	1	-	1,933597	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	-
6,852225	25,08631	1	1,716227	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	139,1745	20,1284
5,610259	25,08631	1	1,405161	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	129,6067	23,2959
4,354023	25,08631	1	1,09052	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	120,0562	29,4531
3,176586	25,08631	1	0,795616	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	110,5274	37,1418
2,074788	25,08631	1	0,519657	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	101,0266	45,5936
1,024653	25,08631	1	0,256637	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	$0,013117$	$1,86 \times 10^{-10}$	91,5624	54,4544
									82,1475	63,5533

Tablo F.5 Toprak ısı öz direnci $K_G = 1,2 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XS_Y (240 mm² kesitli) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
9,264117	25,08631	1,2	1,933597	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	139,1745 20,1284
8,222671	25,08631	1,2	1,716227	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	129,6067	23,2959
6,732311	25,08631	1,2	1,405161	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	120,0562	29,4531
5,224827	25,08631	1,2	1,09052	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	110,5274	37,1418
3,811904	25,08631	1,2	0,795616	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	101,0266	45,5936
2,489746	25,08631	1,2	0,519657	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	91,5624	54,4544
1,229584	25,08631	1,2	0,256637	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	82,1475	63,5533

Tablo F.6 Toprak ısı öz direnci $K_G = 1,4 \text{ } ^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XS_Y (240 mm² kesitli) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT (°K)	P_T (W/m)	K_G (°K m/W)	c_k	P_i (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b (μF/m)	c'	c
10,80814	25,08631	1,4	1,933597	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	-	139,1745 20,1284
9,593116	25,08631	1,4	1,716227	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	129,6067	23,2959
7,854363	25,08631	1,4	1,405161	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	120,0562	29,4531
6,095632	25,08631	1,4	1,09052	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	110,5274	37,1418
4,447221	25,08631	1,4	0,795616	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	101,0266	45,5936
2,904703	25,08631	1,4	0,519657	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	91,5624	54,4544
1,434515	25,08631	1,4	0,256637	25,07319	503	$9,91 \times 10^{-5}$	0,013117	$1,86 \times 10^{-10}$	82,1475	63,5533

Tablo F.7 Toprak ısı özdirenci $K_G = 1,6 \text{ }^\circ\text{K m/W}$, 120cm derinliğe gömülmüş 20,3/35 kV 2XSY (240 mm² kesitli) kablunun sıcaklık dağılımı hesap tablosu.

ΔT ($^\circ\text{K}$)	P_T (W/m)	K_G ($^\circ\text{K m/W}$)	c_k	P_I (W)	I (A)	R_{wr} (Ω/m)	P_d (W/m)	C_b ($\mu\text{F/m}$)	c'	c
12,35216	25,08631	1,6	-	1,933597	25,07319	503	9,91x10 ⁻⁵	0,013117	1,86x10 ⁻¹⁰	-
10,96356	25,08631	1,6	1,716227	25,07319	503	9,91x10 ⁻⁵	0,013117	1,86x10 ⁻¹⁰	139,1745	20,1284
8,976414	25,08631	1,6	1,405161	25,07319	503	9,91x10 ⁻⁵	0,013117	1,86x10 ⁻¹⁰	129,6067	23,2959
6,966436	25,08631	1,6	1,09052	25,07319	503	9,91x10 ⁻⁵	0,013117	1,86x10 ⁻¹⁰	120,0562	29,4531
5,082538	25,08631	1,6	0,795616	25,07319	503	9,91x10 ⁻⁵	0,013117	1,86x10 ⁻¹⁰	110,5274	37,1418
3,319661	25,08631	1,6	0,519657	25,07319	503	9,91x10 ⁻⁵	0,013117	1,86x10 ⁻¹⁰	101,0266	45,5936
1,639445	25,08631	1,6	0,256637	25,07319	503	9,91x10 ⁻⁵	0,013117	1,86x10 ⁻¹⁰	91,5624	54,4544
									82,1475	63,5533



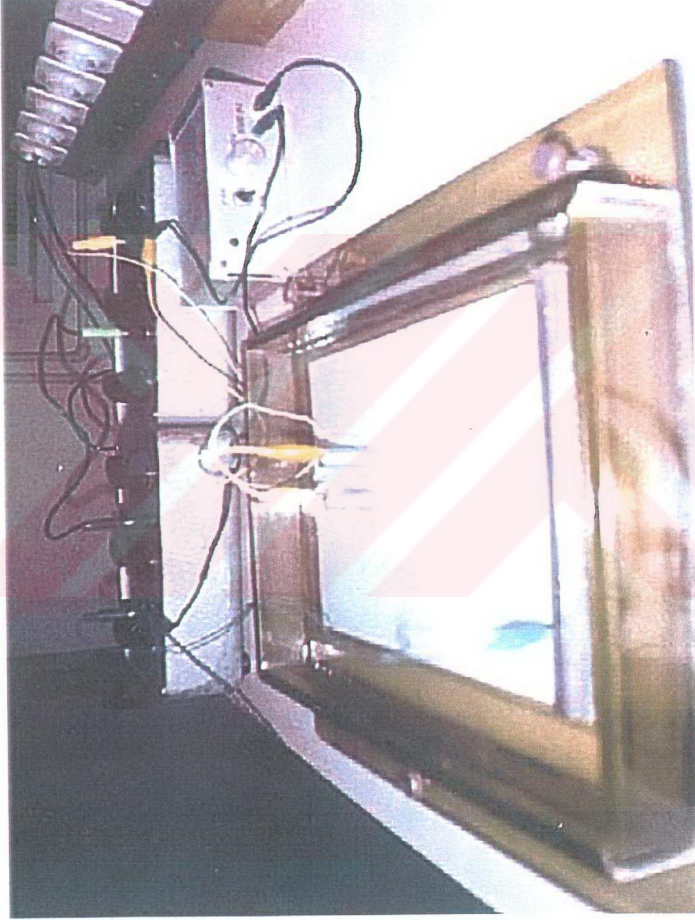
Şekil G.1 Deneyde kullanılan elektrotlar.



Şekil G.2 Deney düzeniği.



Şekil G.3 Tek kablo benzetimi deneyi.



Şekil G.4 İki kablo benzetimi deneyi.



Şekil G.5 Kablo içi ısı dağılım deneyi.

ÖZGEÇMİŞ

Engin Topal 1978 yılında İstanbul'da doğdu. Lise eğitimini Özel Kültür Fen Lisesinde 1996 yılında tamamladı. Aynı sene Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. 2000 yılında bu bölümden mezun oldu ve aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı. İlgi alanları içinde bilgisayar ağları ve internet yer almaktadır.

İTÜ YÜKSEKÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ