

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABLO EKLERİNİN ELEKTRİKSEL VE ISIL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Hüsnü MOLLAMAHMUTOĞLU

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

OCAK 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABLO EKLERİNİN ELEKTRİKSEL VE ISIL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Hüsnü MOLLAMAHMUTOĞLU
504051011

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Ocak 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Ocak 2009

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER (İTÜ)

Ocak 2009

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu tezin, konusunun seçiminden başlayarak tamamlanmasına kadar geçen süre içinde yardımlarını hiç esirgemeyen ve tezin şekillenmesinde büyük rol oynayan sayın hocam Doç. Dr. Özcan Kalenderli'ye teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca daima yanımda olan, yardımlarını hiç esirgemeyen sevgili babam Süleyman Mollamahmutoğlu ve annem Sadise Mollamahmutoğlu'na minnet duyduğumu belirtmek isterim.

Tez çalışmamda kaynak olarak kullandığım kitap ve makaleleri temin eden, çalışmamda motivasyonumu daima yükselten Sayın Serpil Genç'e, deney aşamalarında sağlamış oldukları olanaklar ve hoşgörülerinden ötürü Sayın Devrim Erçetin ve Sayın Yeşim Erçetin'e ve hesaplamalardaki yardımından ötürü çalışma arkadaşım Ozan Yılmaz'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2009

Hasan Hüsnü MOLLAMAHMUTOĞLU
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
SEMBOL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Kablolar.....	2
1.2 Kabloların Sınıflandırılması.....	2
1.3 Kabloların Tanımlanması.....	3
1.4 Başlangıçtan Günümüze Enerji Kabloları.....	4
1.4.1 Süper iletken kablolarının özellikleri.....	4
1.4.2 Yalıtkan malzemelerdeki gelişmeler.....	5
1.4.3 Bu zamana kadar yapılan çalışmalar.....	6
2. TEMEL KAVRAMLAR.....	9
2.1 Kabloların Normal Koşullarda Akım Taşıma Kapasitesi.....	9
2.1.1 Kabloların yüklenmesi ile ilgili kavramlar.....	9
2.1.2 Kablo malzemelerinin ısınmaya etkileri.....	10
2.2 Isı Geçişi.....	12
2.2.1 İletim.....	13
2.2.2 Taşınım.....	15
2.2.3 Işınım.....	17
2.3 Isı İle Elektrik Arasındaki Benzerlikler.....	18
2.3.1 İletim ile ısı geçişi.....	18
3. İŞLETME KOŞULLARI ve TASARIM ÇİZELGELERİ.....	21
3.1 Kablonun Toprağa Gömülmesi Durumunda.....	21
3.2 Kablonun Havada Bulunması Durumunda.....	24
3.3 Yüklenme Kapasitesi Hesabı.....	30
3.3.1 Kabilonun ısıl direncinin hesaplanması.....	37
4. ORTAM KOŞULLARINA GÖRE ISIL DİRENÇ VE KABLOLARIN AKIM TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESAPLAMALARI.....	43
4.1 Havanın Isıl Direncinin Hesabı.....	43
4.1.1 Yatay montaj şekillerine göre havanın ısıl direnç hesabı.....	43
4.1.2 Dikey montaj şekillerine göre havanın ısıl direnç hesabı.....	58
4.1.3 Farklı yüksekliklerde akım taşıma kapasitesi.....	59
4.1.4 Güneş ışınlarının etkisi ile akım taşıma kapasitesi.....	62
4.1.5 Rüzgârın etkisi ile akım taşıma kapasitesi.....	64
4.2 Toprağın Isıl Direncinin Hesabı.....	67
4.3 Suyun Isıl Direncinin Hesabı.....	75
5. YAPILAN DENEYLER VE SONUÇLARI.....	77
5.1 Genel Bilgi.....	77

5.2.1	Havada ısıt çevrimi deneyi.....	79
5.2.2	Suda ısıt çevrim deneyi.....	84
5.2.3	Deneylerin sonuçları.....	87
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
	KAYNAKLAR.....	93
	EKLER.....	97
	ÖZGEÇMİŞ.....	103

KISALTMALAR

XLPE	: Çapraz Bağlı Polietilen
PE	: Polietilen
PVC	: Polivinilklorür
EPR	: Etilen Propilen Kauçuk
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SFY	: Sonlu Farklar Yöntemi
TS	: Türk Standartları

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Kablolarla Yalıtkan Malzeme Türüne Göre İzin Verilen İşletme Sıcaklıkları (°C) ve Isıl Öz dirençleri (ρ) [21].....	10
Çizelge 2.2: İletkenin Şeklini Açıklayan Harfler	11
Çizelge 2.3: Isı Taşınım Katsayısı için Örnek Değerler [26].....	17
Çizelge 2.4: Elektrik ve Isı Formülleri Arasındaki Benzerlikler.....	19
Çizelge 3.1: IEC 60-287'e Göre Sıcaklık Değerleri [13].....	24
Çizelge 3.2: Oda Tiplerine Göre Sıcaklık Değerleri.....	25
Çizelge 3.3: Toprak Altında Yüklenme Değerlerine Göre Akım Taşıma Katsayısı f_l	28
Çizelge 3.4: Toprak Altında Dizilme Şekline Göre Akım Taşıma Katsayısı f_2	29
Çizelge 3.5: NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Özellikleri.....	32
Çizelge 3.6: IEC 60287-1-1'e göre Elektriksel Öz dirençler ve Sıcaklık Katsayıları.....	33
Çizelge 3.7: IEC 60287-1-1'e Göre k_s ve k_p Katsayıları.....	34
Çizelge 4.1: Örnek 4.1'in Verileri.....	48
Çizelge 4.2: Örnek 4.1'e Göre Hesaplanan Değerler.....	50
Çizelge 4.3: Havada Demet Haldeki NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri.....	51
Çizelge 4.4: Havada Sıralı Haldeki NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri.....	53
Çizelge 4.5: Havada Tek Halde NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri.....	55
Çizelge 4.6: Havada Tek, Demet ve Sıralı halde NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri.....	57
Çizelge 4.7: Havada Demet ve Sıralı Halde NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin, Tek Haldeki NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Akım Taşıma Kapasitesine Oranları.....	58
Çizelge 4.8: Yüksekliklere Göre Açık Hava Basıncı Çizelgesi.....	59
Çizelge 4.9: Örnek 4.4'ün Verileri.....	60
Çizelge 4.10: Farklı Yükseklikler İçin Kablo Akım Taşıma Kapasiteleri.....	61
Çizelge 4.11: Örnek 4.5'in Verileri.....	62
Çizelge 4.12: Bazı Malzemeler İçin Solar Emiş Katsayıları [16].....	63
Çizelge 4.13: Örnek 4.6'nın Verileri.....	65
Çizelge 4.14: Rüzgâr Hızının Akım Taşıma Kapasitesine Etkileri.....	66
Çizelge 4.15: Toprak Isıl Öz direncinin 1,0 K.m/W Olması Durumunda Farklı Yüklenme Katsayıları İçin Karakteristik Çap d_y Değerleri [21]...	70
Çizelge 4.16: Örnek 4.7'nin Verileri.....	73
Çizelge 4.17: Toprakta Farklı Montaj Şekillerine Göre Kablo Akım Taşıma Kapasiteleri.....	75
Çizelge 4.18: Örnek 4.8'in Verileri.....	76

Çizelge 4.19:	Suda Farklı Montaj Şekillerine Göre Kablo Akım Taşıma Kapasiteleri.....	76
Çizelge 5.1:	Isıl Çevrim Deneyinin Birinci Kısımında Ölçülen Akım ve Sıcaklıklar.....	80
Çizelge 5.2:	Isıl Çevrim Deneyinin İkinci Kısımında Ölçülen Akım ve Sıcaklıklar.....	82
Çizelge 5.3:	Isıl Çevrim Deneyinin Üçüncü Kısımında Ölçülen Akım ve Sıcaklıklar.....	83
Çizelge 5.4:	Suda Isıl Çevrim Deneyinin Ölçülen Akım ve Sıcaklık Değerleri..	85

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: İletim ile Isı Geçişinin, Moleküler Harekete Bağlı Olarak Enerji Yayılımıyla İlişkisi.....	14
Şekil 2.2: İletim ile Bir Boyutlu Isı Geçişİ.....	15
Şekil 2.3: Taşınım ile Isı Geçişinde Sınır Tabaka Gelişimi.....	16
Şekil 2.4: Isıl (R_m) ve Elektriksel (R_e) Direnç Arasındaki Benzerlik	19
Şekil 3.1: Kablonun Günlük Yüklenme Faktörü Örneği (m).....	21
Şekil 3.2: Stuttgart'ta, Deniz Seviyesinden 480 m Yükseklikte 1 m Toprak Derinliğinde Yıllık Sıcaklık Değerleri (Ortalama Bir Toprak İçin) [21].....	23
Şekil 3.3: Kuveyt'te, Farklı Derinliklerde Toprak Sıcaklıklarının Aya Göre Değişimi.....	23
Şekil 3.4: Günlük Yüklenme Diyagramı.....	24
Şekil 3.5: Kablolarda Isı Akışı İçin eşdeğer Devre.....	31
Şekil 3.6: NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Kesiti.....	33
Şekil 3.7: Bir Tabakalı Silindirselsistem.....	37
Şekil 3.8: Kabloların Kesitlerine, Yalıtkan Malzemelerine ve Ortam Koşullarına Göre Isıl Dirençleri [21].....	41
Şekil 4.1: Havada Doğal Taşınım ile Isı Geçişleri.....	45
Şekil 4.2: Havanın Isıl Direncinin, Yatay Halde Hava Ortamında Bulunan Kablolar İçin Değerleri [21].....	47
Şekil 4.3: Örnek 4.1 için Birinci İterasyon Seçimi.....	49
Şekil 4.4: Havada Demet Haldeki NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin Grafiği	52
Şekil 4.5: Havada Sıralı Haldeki NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin Grafiği.....	55
Şekil 4.6: Havada Tek Halde NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin Grafiği.....	56
Şekil 4.7: Kablonun Radyal Çizgilerinin Rehberi	67
Şekil 4.8: Sürekli İşletme Koşullarında Toprak Isıl Direnci Hesabı.....	69
Şekil 4.9: Toprak Isıl Direnç Hesaplaması.....	72
Şekil 5.1: Havada Isıl Çevrim Deneyi Düzenegi.....	77
Şekil 5.2: Suda Isıl Çevrim Deneyi Düzenegi.....	78
Şekil 5.3: Hava Ortamında Deney Düzenegi.....	79
Şekil 5.4: Isıl Çevrim Deneyinin Birinci Kısımının İlk Üç Saatlik Bölümünde Ölçülen Akım ve Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri..	81
Şekil 5.5: Isıl Çevrim Deneyinin Birinci Kısımının Son İki Saatlik Bölümünde Ölçülen Akım ve Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri..	82

Şekil 5.6:	Isıl Çevrim Deneyinin Üç Saatlik Üçüncü Kısımında Ölçülen Dış Kılıf ve İletken Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri.....	84
Şekil 5.7:	Suda Isıl Çevrim Deneyinde Ölçülen Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri.....	86
Şekil A.1:	230 V, 10,5 kVA, Tek Fazlı Giriş – Tek Fazlı Çıkışlı Trafo.....	98
Şekil A.2:	NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Her Damarından Eşit Amper Geçmesi İçin Yapılan Bağlantı	98
Şekil A.3:	NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun Su Tankına Monte Hali.....	99
Şekil A.4:	NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablo ve Kablo Ekinin Su Tankına Monte Hali.....	99
Şekil A.5:	NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablo, Akım Ölçü Trafosu, Analog Ampermetre, Dijital Ampermetre ve Termokupl Cihazının Deney Sırasındaki Çekilmiş Fotoğrafı	100
Şekil A.6:	NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun İletken ve Kılıf Sıcaklığının Termokupl Cihazıyla Ölçülebilmesi İçin Kabloda Açılan Delikler....	100
Şekil A.7:	NYY 1 x 25 mm ² 0,6/1 kV Kablonun İletken ve Kılıf Sıcaklığının Termokupl Cihazıyla Ölçülebilmesi İçin Yapılan Bağlantı.....	101

SEMBOL LİSTESİ

U_o	: Faz ile toprak arasındaki gerilim (V)
U	: Fazlar arasındaki gerilim (V)
f_1	: Kabloların toprakta, yüklenme değerlerine göre akım taşıma katsayıları
f_2	: Kabloların toprakta, dizilme şekillerine göre akım taşıma katsayıları
I_r	: Kablonun normal koşullarda akım taşıma kapasitesi (A)
I_z	: Kablonun değişen durumlarda akım taşıma kapasitesi (A)
ρ	: Isıl öz direnç (K.m/W)
q	: Isı akısı (W/m ²)
k	: Isıl iletim katsayısı (W/m.K)
q_x	: Isı aktarımı (W)
A	: Alan (m ²)
u_∞	: Akışkan hızı (m/s)
T_s	: Yüzey sıcaklığı (°C)
T_∞	: Ortam sıcaklığı (°C)
h	: Isı taşınım katsayısı (W/ m ² .K)
E	: Işınım ile aktarılan ısı enerjisi (W/ m ²)
σ	: Stefan Boltzmann sabiti (5,67 x 10 ⁻⁸ W/m ² .K ⁴)
ε	: Yayma oranı (0 < ε < 1)
ε_o	: Kablo ışıma emisyonu
q	: Isı miktarı (W)
I	: Akım (A)
V	: Potansiyel (V)
R	: Elektriksel direnç (Ω)
R_m	: Isıl direnç (°K/W)
T	: Sıcaklık (°K)
R_e	: Elektriksel direnç (Ω)
ρ	: Elektriksel öz direnç (Ω .mm ² /m)
m	: Yüklenme faktörü
ρ_E	: Toprağın ısı öz direnci (K.m/W)
ϑ_e	: Toprak sıcaklığı (°C)
ϑ_L	: Kablo iletken sıcaklığı (°C)
ϑ_o	: Kablo kılıf sıcaklığı (°C)
ϑ_u	: Toprak sıcaklığı (°C)
$\Delta\vartheta_o$	: Ortam sıcaklığı ile kablo kılıf sıcaklığı arasındaki fark (°C)
$\Delta\vartheta_L$	: Ortam sıcaklığı ile iletken sıcaklığı arasındaki fark (°C)
$\Delta\vartheta_u$	: Ortam sıcaklığı ile yalıtkan sıcaklığı arasındaki fark (°C)
$\Delta\vartheta_p$	: Toprak sıcaklığı ile kablo iletken sıcaklığı arasındaki fark (°C)
ϑ_d	: Yalıtkan (dielektrik) sıcaklığı (°C)
U_b	: İşletme gerilimi (V)
S	: Görünen güç (VA)

I_b	: Maksimum yüklenme akımı (A)
N	: Sistem sayısı
I_{bf}	: Farklı ortam koşullarına göre yüklenme akımı (A)
P_d	: Dielektrik kayıp güç (W)
P_i	: İletkende oluşan kayıplar (W)
T_k	: Kablonun ısıl direnci (K.m/W)
T_{ki}	: Kablonun ısıl direnci (K.m/W)
T_{Lu}	: Havanın ısıl direnci (K.m/W)
L	: Kablo uzunluğu (m)
T_L	: Havanın ısıl direnci (K.m/W)
T_E	: Toprağın ısıl direnci (K.m/W)
R_{wr}	: Alternatif akım direnci (Ω)
n	: İletken sayısı
ω	: Açısız frekans
$\tan \delta$	: Dielektrik kayıp faktörü
C_b	: Kablonun birim uzunluğunun kapasitesi
y_s	: Deri etkisi katsayısı
y_p	: Yakınlık etkisi katsayısı
λ_1	: Metal kılıfta oluşan eddy akımları etkisi
λ_2	: Zırhtaki girdap akımları
d_c	: İletken çapı (mm)
α_k	: Kuru (nemsiz) havada ısı transfer katsayısı
α_s	: Işıma için ısı transfer katsayısı
f_k	: Taşıma ile ısı geçiş katsayısı
f_s	: Işıma ile ısı geçiş katsayısı
E	: Solar ışıma şiddeti (k.W/m ²)
α_0	: Solar emiş katsayısı
P	: Kabloda oluşan ısı kaybı (W)
h	: Kablo ekseninin toprak yüzeyine uzaklığı (m)
c_b	: Topraktaki herhangi bir noktanın, kablonun simetri eksenine uzaklığı (m)
c_b	: Topraktaki herhangi bir noktanın kablo eksenine uzaklığı (m)
h'	: Kablonun simetri ekseninin toprak yüzeyine uzaklığı (m)
r_p	: Radyal alanın yarıçapı (m)
r	: Kablonun yarıçapı (m)
d_y	: Karakteristik çap (m)
μ	: Kayıp faktörü
$\Delta \theta_x$	: Sınır güvenlik sıcaklığı (°C)
T'_{xy}	: Karakteristik çapın olması durumunda toprak ısıl direnci (K.m/W)
T'_x	: Karakteristik çapın olmaması durumunda toprak ısıl direnci (K.m/W)

KABLO EKLERİNİN ELEKTRİKSEL VE ISIL ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, enerjinin bir yerden başka bir yere iletilmesinde kullanılan en önemli araçlardan biri olan kablo ve kablo eklerinin akım taşıma kapasiteleri, üzerlerinde biriktirdikleri kayıp güç ve ısı direnç hesaplamaları incelenmiştir.

Kabloların akım taşıma kapasiteleri birden fazla parametreye bağlıdır. Bazı faktörler akım taşıma kapasitesini daha fazla etkilemektedir. Günümüzde elektrik enerjisinin önemi nedeniyle, akım taşıma kapasitesini etkileyen hemen her faktörün ciddi bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak akım taşıma kapasitesini etkileyen en önemli faktör olan ısı iletimi konusu ele alınmıştır. Bu sayede kablo ve kablo eki üzerinde biriken ve dışarı atılan ısı enerjisinin oluşumu ve iletimi incelenmiştir. Isı iletimi konusundan sonra, farklı ortam ve durumlar için ısı hesapları açıklanmıştır.

Kablo ve kablo eklerinde izin verilen işletme sıcaklıklarının, kullanılan yalıtkan malzemeye göre değişimi ve bu bilginin ısı iletimi ile ilişkisi kurulduktan sonra, oluşmasına izin verilen ısı miktarını oluşturan elektrik enerjisi ve dolayısı ile akım taşıma kapasitesi de bulunmuştur.

Kabloların en zayıf yerleri olan kablo eklerinin de hesaplamaları, kablo ile aynıdır. Bu sebepten ötürü, tez çalışmasındaki hesaplamalarda, daha çok kablo üzerinde durulmuştur.

ELECTRICAL AND THERMAL ANALYSIS OF CABLE JOINTS

SUMMARY

In this study, the calculations of the current carrying capacity, the power loss, and the thermal resistance of cable and cable joints, which are used for power transmission, are analysed.

The current carrying capacity of cables changes depending on several parameters. While some factors affect it dramatically, some affects at little rates. Each factor affecting current carrying capacity should be examined due to the continuous increases of electrical energy costs.

In this thesis, heat transmission, one of the most important factors affecting current carrying capacity, is mentioned in order to analyse the calculations of current carrying capacity. Thus, it would be found out that how to calculate the quantity of heat, reserved in the cable and cable joints or coming out from the cable. After defining heat transmission, it is explained that how the calculations vary in different conditions.

Firstly, the relationship between dielectric material and the acceptable operating temperatures are investigated. Then, this relationship and heat transmission is examined together. Finally, the electrical energy which produces the quantity of heat allowed and the current carrying capacity are calculated.

The calculations of the cable joints are the same as the cables. Due to the fact that, in this thesis, the calculations are done according to the cables instead of the cable joints.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi ısı ve mekanik enerji meydana getirmeye çok uygun bir enerji türüdür. Bu özelliği ile insanlık hizmetinde pek fazla kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin kullanılacağı yere taşınabilmesi için iletken malzemeler kullanılmaktadır. Bu iletken malzemeler çoğu zaman bir yalıtkan ile sarılarak kablo haline getirilmektedirler.

Kablolar, elektriğin bulunmasından günümüze kadar elektriğin iletilmesi ve dağıtılmasında bağlantı elemanı olarak kullanılmıştır. Temel olarak kablo yapıları oldukça basittir fakat bu basit yapı ile elektriğin iletilmesi sırasında kabloda ısı ve mekanik sorunlar oluşmaktadır. Hızla ilerleyen teknoloji ile kabloların bu sorunları çözülmeye devam etmektedir.

Kablolarda kullanılan yalıtım malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar, delinme, kısmi boşalma, iz oluşumu üzerine yoğunlaşmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, güvenilir, uzun ömürlü ve en önemlisi ekonomik kablo yapıları geliştirilmiştir. Yalıtkan malzemeler; bulunma hallerine göre katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç ana başlıkta toplanabilirler.

Günümüzde en çok kullanılan yalıtkanlar katı halledirler. Bunlara örnek olarak polimerler ve kâğıt yalıtkanlar gösterilebilir. Sıvı haldeki yalıtkanlara örnek olarak yalıtkan yağlar ve gaz halindeki yalıtkanlara örnek olarak hava, azot (N), kükürt heksaflorür (SF₆) gibi gazlar verilebilir [1].

Kablolarda, yalıtkan ve iletken malzeme seçimi yapılırken, malzemelerin karakteristik özellikleri önceden bilinmelidir. Bu özelliklerden ihtiyaca uygun olanlar dikkate alınmalıdır. Aşağıda bu özelliklerden en önemlileri belirtilmiştir.

1. Elektriksel özellikler,
2. Fiziksel özellikler,
3. Kimyasal özellikler,
4. Isıl ve mekanik özellikler,
5. Maliyet.

Malzemeye karar verme aşamasında, karar verecek olan kişinin bilgisi, deneyimi ve ayırdığı zaman etkili olmaktadır. Karar verme süreci uzun sürebileceği ve günümüzde insan zamanının kıymetli olduğu düşünüldüğünde, bu kararı, içine gerekli bilgiler girilmiş bir bilgisayar programına yaptırmanın daha doğru olacağı görülecektir. Bu sayede, insanların hata yapma faktörleri de etkisiz kalmış olacaktır.

Bilgisayar programlarına bu hesabı yaptırabilmek için, gerekli bütün bilgileri bilgisayar ortamına aktarmak gereklidir. Kablolar hakkında birçok kaynaktan elde edilebilecek bilgi olduğu için, bu tez çalışmasında konuyu genel hatları ile anlatmak yeterli olacaktır.

1.1 Kablolar

Teknoloji geliştikçe ve yaygınlaştıkça, gerekli alt yapı da sürekli gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Bu alt yapının ana bileşenini de kablo oluşturmaktadır. Kablo, farkında bile olmadığımız ama insan yaşamında artık hava kadar, su kadar, yemek kadar önemi olan elektriğin vazgeçilmez taşıma aracıdır [2]. Evimizin her duvarında, tabanında, tavanında, mutfığımızda, banyomuzda, sokakta bastığımız yerin altında, başımızı kaldırdığımızda direkler arasında, kısacası yaşadığımız her yerde kullanım alanı bulmaktadır [3].

Haberleşme gereksinimi arttıkça, iletişim teknolojileri de gelişmektedir. Kablo, artık günlük hayatta kullandığımız hemen hemen her cihazda karşımıza çıkan bir üründür. Büyük enerji taşıma kablolarından, telekomünikasyon optik kablolarına kadar çok geniş bir kullanım alanı vardır.

1.2 Kabloların Sınıflandırılması

Kabloları genel olarak şu şekilde sınıflandırabiliriz [2]:

1. Enerji Kabloları:

1.1 Gerilim Değerine Göre;

1.1.1 Alçak Gerilim Kabloları (0,6 - 1 kV)

- Bina ve Tesisat Kabloları
- Enerji Dağıtım Kabloları
- Enstrümantasyon Kabloları (kontrol, kumanda kabloları)

1.1.2 Orta Gerilim Kabloları (1 - 36 kV)

- Yeraltı Kabloları / Hava Hattı Kabloları

1.1.3 Yüksek Gerilim Kabloları (> 36 kV)

- Yeraltı Kabloları
- Sualtı Kabloları
- Hava Hattı / Çıplak İletken

1.2 İşletme Koşullarına Göre;

- Ağır İşletme Kabloları
- Normal ve Hafif İşletme Kabloları

1.3 Tesis Tipine Göre;

- Sabit Tesisat Kabloları
- Hareketli Tesisat Kabloları

1.4 Kullanım Amacına Göre;

- Hava Hattı Kabloları
- Yeraltı Kabloları

2. Telekomünikasyon / Haberleşme Kabloları:

2.1 Bakır İletkenli Kablolar

- Uzak mesafe kabloları
- Dağıtım kabloları
- Abone bina içi tesisat kabloları
- Veri iletişim kabloları

2.2 Fiber Optik Kablolar

- Uzak mesafe kabloları
- Abone dağıtım kabloları
- Bina içi tesisat kabloları
- Veri iletişim kabloları

1.3 Kabloların Tanımlanması

Bir kablo; tipi, kesiti ve anma gerilimi ile tanımlanır. Bununla birlikte kablonun anma gerilimi de tanımlamada kullanılır. Kablonun teknik özellikleri ve deney yöntemleri standartlar ile belirlenir. Kablonun kesiti, yalıtkan kalınlığı, yalıtkan malzemesinin özellikleri, dolgu, dış kılıf gibi birçok özellik kablo üretim standartları

ile tanımlanır. Kablo üretiminde kullanılan tüm malzemelerin deney yöntemleri ise diğer destekleyici standartlar ile tanımlanır (TS gibi).

Kablonun anma gerilimi ise, kablonun teknik yapısını etkilemektedir (yalıtkan gibi). Kablonun gerilimi U_0/U olarak verilir.

U_0 : Faz ile toprak arasındaki gerilimdir.

U : İki faz arasındaki gerilimdir (300/500 V, 450/750 V, 3,5/6 kV gibi).

1.4 Başlangıçtan Günümüze Enerji Kabloları

Yeryüzünde pek çok üründe olduğu gibi, enerji kabloları da kullanım alanlarındaki koşullara, özelliklere göre çeşitli talepleri karşılamak üzere devamlı bir değişim süreci geçirmektedir. Bu talepler, güvenlik önlemlerine, güvenilirliğe, ekonomikliğe, çevre ile ilgili koşullara, kullanıcıların özel arzularına bağlı olduğu gibi yasal zorunluluklardan da oluşabilmektedir. Gelişen, değişen ortam ve yaşam koşullarına bağlı olarak da devamlı çoğalarak artarlar. Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımının değişmez bir parçası olan enerji kablolarında da zaman içinde oluşan yeni talepleri karşılayabilmek için uygun çözümler bulunup, gerekli değişimlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Üreticiler şehir şebekelerinde, sanayi tesislerinde ve diğer kullanım alanlarında öncelikle kullanıcı ihtiyaçlarına en uygun çözümleri keşfederek, müşteri memnuniyetini sağlamak için devamlı araştırma gayretleri içindedirler [3].

Yerine getirecekleri işlevlere göre çeşitli yapılarda olsalar da, enerji kabloları benzer elemanlardan oluşmuştur. Bunlar akım taşıyan iletken, iletkeni potansiyel farkına karşı koruyan yalıtkan, iletkenin üzerinden akım geçerken oluşan elektrik alanını sınırlayan, kısmi boşalma, yük ve hat akımlarını taşıyan eş eksenli yapıda ekran ve metal veya metal olmayan kılıftır.

1.4.1 Süper iletken kablolarının özellikleri

Genelde iletken malzemesi olarak başlangıçtan beri bakır esas olmuştur. Bazı ülkelerde sadece şehir şebekelerinde alüminyum da tercih edildiği bilinmektedir. Geçen zaman içinde teknik ve özellikle ekonomik üstünlükleri ile bu iki metal, malzeme, iletken olarak enerji kablolarının yapısında yerini korumuştur. Gelişmeler sadece kabloların kullanım koşullarına uygun yuvarlak ve normal sarımlı iletken yerine, bazı kablolarda sektör veya oval kesitli, boş çekirdekli, boş çekirdekli sektör

dilimli ve benzeri gibi iletkenin düzeninde olmuştur. Ancak 20'inci yüzyılın son çeyreğinde keşfedilen 110°K ısı sınırının altında süper iletkenlik özelliği kazanan malzemeler kullanılarak büyük güçlerin iletiminde yeni gelişmeler sağlanmıştır. Günümüzde dıştan soğutmalı yüksek gerilim güç kabloları ile ileride ekonomiklik yönünden rekabet sağlanabilmesi durumunda, süper iletken kabloların uygulamada yaygın olarak kullanılabilmesi beklenmektedir.

1.4.2 Yalıtkan malzemelerdeki gelişmeler

Günümüze kadar enerji kabloları yapısında en büyük değişiklikler ve gelişmeler yalıtkan malzemelerde sağlanmıştır. 19'uncu yüzyılın sonlarında başlayan 20'inci yüzyıla geçiş süresinde işlevine uygun olarak geliştirilen enerji kablolarında ilk önce sırasıyla kâğıt yalıtkanlı, yağ emdirilerek emprenye edilmiş kâğıt ve jüt yalıtkanlı, ortak kurşun kılıflı, metalize edilmiş kâğıt ile damarları ayrı ayrı ekranlanmış, kurşun kılıflı Höchstadter kablolar ve her damarı ayrı ayrı kurşunla kılıflanmış kablolar İkinci Dünya Savaşı'na kadar ağırlıklı olarak kullanılmışlardır [3]. Bu yapının mükemmelliği yağ emdirilerek emprenye edilmiş kâğıt yalıtkanlı kabloların bir asır üretilip kullanılabilmesine olanak vermiştir.

Günümüzde çok sınırlı olarak üretilen bu kabloların birçok tesiste orta gerilim kablosu olarak hala işletmede olduğu bilinmektedir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki teknolojik ilerlemeler çeşitli ihtiyaçlara göre üstün ısı, mekanik ve elektriksel özelliklerde sentetik yalıtkanların geliştirilmesini sağlamıştır. Böylece 20'inci yüzyılın ikinci yarısına girerken sentetik malzemelerin kablo teknolojisine ve yapısına girişi gözlenmiştir.

Önceleri, polivinil klorür (PVC), alçak gerilim kablolarında olmak üzere damar yalıtkanı ve kılıf malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1944 yılında ilk 6 kV ve 1955 yılında ilk 20 kV PVC yalıtkanlı kabloların imal edilerek kullanıldığı bilinmektedir. Bunların ardından 50'li yılların sonunda polietilen (PE), daha sonra da çapraz bağlı polietilen (XLPE) gerilime bağlı enerji kayıpları dikkate alınarak orta gerilim kablolarında yalıtkan olarak kablo yapısına girmiştir.

İlk 20 kV PE yalıtkan kablolar 1951 yılında, ilk 20 kV XLPE yalıtkanlı kabloların da 1968 yılında Almanya'da kullanıldığı görülmektedir. Aynı yıllarda 110 kV PE yalıtkanlı enerji kablolarının da üretildiği bilinmektedir. 70'li yılların başından itibaren yüksek gerilim kablolarında yalıtkan malzemesi olarak XLPE

kullanılmaktadır. PE bu kablolarda sert ve koruyucu özelliği ile dış kılıf malzemesi olarak günümüzde de işlevini sürdürmektedir.

1.4.3 Bu zamana kadar yapılan çalışmalar

George Anders ve Heinrich Brakelmann, çalışmalarında [4], yeraltı kablo akım taşıma kapasitesinin farklı ortamlara geçildiğinde nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Kablo birçok farklı ortamda bulunabileceği için, bu ortamların kısa mesafe ve uzun mesafe olması durumlarını deneysel ve teorik hesaplama olarak ele almışlardır. Hesaplamalarda ısı geçiş denklemlerinden faydalanmışlardır. Sonuç olarak, kısa mesafelerde ciddi bir sorun bulunmadığını ancak uzun mesafelerde kablo ısınmasında ve dolayısı ile akım taşıma kapasitesinde ciddi etkiler oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Dünyada çok yaygın olan iki standart kurumu CIGRE ve IEEE, ısı geçiş denklemlerini kullanarak, farklı yaklaşımlar ile kablo akım taşıma kapasitesini hesaplama yöntemleri belirlemişlerdir [5]. CIGRE hesaplamaları daha ayrıntılı ve uzundur ancak IEEE hesaplamaları ise bazı denklemleri ihmal ederek sonuca daha kısa sürede ulaşılmasını sağlar. Bu iki hesaplama yönteminin sonuçlarına bakıldığında, en tipik montaj şeklinde aradaki fark %1 olarak CIGRE hesaplamalarından yanadır [5]. CIGRE hesaplamaları daha ayrıntılı ve uzun olmasına rağmen, gerçeğe daha uygundur.

Caros Garrido, Antonio F. Otero ve Jose Cidras, kablo akım taşıma kapasitesi ve kabloda oluşan ısıyı hesaplamak için ısı geçiş denklemlerini, sonlu farklar yöntemini (SFY) kullanarak çözmüşlerdir [6]. Bu şekilde iletken, yalıtkan, kılıf ve zırh gibi malzemelerin gerekli bilgilerini hesaba katarak kablo akım taşıma kapasitesini hesaplamışlardır. Hesaplamayı hızlandırmak ve kolaylaştırmak için, değişken bölümlere ayırma yapmışlardır. Sonuç olarak farklı yükleme şekilleri ve farklı ortamlar için hesaplama sürelerini kısaltmışlardır. Bu yöntemin en önemli sorunu sınır koşullarını doğru bir şekilde hesaplara katabilmektir. Bu nedenle de asıl zaman alan durum, sınır koşullarının belirlenmesidir.

Hiranandani'de çalışmalarında SFY'yi kullanmıştır [7]. Bu yöntem ile akım taşıma kapasitesi hesabı yaparken, girdap akımları ve deri etkisini de parametre olarak ele almıştır. Böylece hesaplama sonuçlarının, deneysel sonuçlara daha da yaklaşması sağlanmıştır.

I. Koçar ve A. Ertaş çalışmalarında, hesaplama olarak sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanmışlardır. Hesaplamaların daha hızlı olması ve işlem hatasını küçük tutmak için bir bilgisayar programı geliştirmişleridir. Sınır koşulları için Dirichlet ve Neumann koşullarını ele almışlardır. Daha sonra, hesaplamalarda kullandıkları kablounun akım taşıma kapasitesini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak ise, SEY'in hiçbir zaman deneysel verilerden daha iyi olamayacağını belirtmişlerdir [8].

Olasılık ve istatistik hesaplamalar kullanılarak da kablo akım taşıma kapasitesi hesaplanabilmektedir [9]. Hesaplamalarda kullanılan matematiksel yöntem, Sonlu elemanlar ve hassasiyet analizidir. Bilgisayar programının kullanıldığı yöntemde, giriş verileri olarak toprak sıcaklık bilgisi, sınır koşulları ve yüklenme değerleri kullanılır. Büyük şebeke sistemlerinde, el ile hesaplama mümkün olmadığı için, birçok yerel elektrik idaresi tarafından bilgisayar programları kullanılır [10].

Günümüzde, akım taşıma kapasitesi hesabı yapabilen bilgisayar programları, veri olarak, ortam koşulu, ortam sıcaklığı, deniz seviyesinden yükseklik gibi farklı parametreleri kullanmaktadır [11]. Kullanılan bilgisayar programları, genellikle yeterli olup, değişken durumları dikkate almadığı için kimi zaman tatmin edici olmamaktadır. Ancak kabloların akım taşıma kapasitesi hesabı için her zaman durağan bir ortam koşulu düşünülmemelidir. Bazı durumlarda kablo dışarıdan zorla (cebri yollarla) soğutulur. W. Z. Black bu konuyu çalışmasında kabloların yanına soğuk su taşıyan borular yerleştirerek incelemiştir. Hesaplamalarda ısı geçiş denklemleri kullanmış ve sonuç olarak kablounun yanında cebri bir soğutma olduğunda, kablo akım taşıma kapasitesinde artış olduğunu teorik olarak göstermiştir. Cebri soğutma sadece yeraltı kabloları için değil, aynı zamanda hava ortamında bulunan kablolar için de geçerlidir. Bu tez çalışmasında kablounun havada bulunması durumunda, cebri soğutma durumu da incelenmiştir. Teorik hesaplamaların nasıl yapılacağı örnek ile açıklanmıştır.

Kablounun döşenme şekli ve akım taşıma kapasitesi standartlarda [13-16] bulunan katsayılar göre belirlenir. Bu katsayıların nereden geldiği ve nasıl hesaplandığı Neher & McGrath [17], Morgan [18], Winkler ve Slaninka'nın çalışmalarında farklı formüller ve bilgiler ile açıklanmıştır. Katsayıların, kendilerine has durumlarda kullanılabileceği bilindiğine göre, bu katsayıların kullanılamayacağı durumlarda kablo akım taşıma kapasitesi hesaplamasının bilinmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, katsayıların kullanılamayacağı durumlar için akım taşıma kapasitesi

hesabının nasıl yapılacağı, farklı ortam koşulları ve döşenme şekilleri için incelenmiştir.

Kablolar, belli mesafeler için üretildiklerinden, kabloları birleştirmeye yarayan ek ürünler gerekmektedir. Bu şekilde elektrik enerjisi iletimi kesilmemektedir. Kablo ekleri ise kabloların direnç olarak en yüksek oldukları yerlerdir [19]. Bu nedenle fazla ısınırlar ve akım taşıma kapasiteleri kabloları göre daha azdır. Tez çalışmasının deney bölümünde, konu uygulamalı olarak anlatılmıştır.

2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1 Kabloların Normal Koşullarda Akım Taşıma Kapasitesi

Kabloların akım taşıma kapasitesi ile ilgili olarak terimler, açıklamalar ve tanımlar, ulusal ve uluslararası standartlarda (DIN, VDE, IEC, TSE) ele alınmıştır. Bu terimlerden tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde kullanılacak olanlarının, anlaşılmasını kolaylaştırmak için bu bölümde açıklamaları verilmiştir.

2.1.1 Kabloların yüklenmesi ile ilgili kavramlar

2.1.1.1 Yüklenme kapasitesi

Kablonun bulunduğu ortama göre akım taşıma kapasitesi veya diğer bir deyişle yüklenebilme kapasitesi denklem (2.1) ile tanımlanır.

$$I_z = I_r \cdot \Pi \cdot f \quad (2.1)$$

Burada; I_z , kablonun yüklenmesine ve döşenme şekline göre akım taşıma kapasitesi, I_r , kablonun bulunduğu ortamda normal koşullarda akım taşıma kapasitesi, $\Pi \cdot f$ ise kablonun yüklenmesini ve döşenme şeklini göz önüne alan iki farklı katsayının (f_1 ve f_2) çarpımıdır.

2.1.1.2 İzin verilen işletme sıcaklığı

Kablodan elektrik akımı geçmeye başladığı andan itibaren, oluşan kayıplar sebebiyle kablolar ısınmaya başlar. Bu ısınmanın temel kaynağı, kablo iletkeninin elektriksel direncinde oluşan kayıp güçtür. Isınma sebebiyle oluşan sıcaklık artışı, kablo sıcaklığının, ortam sıcaklığını geçtiği andan itibaren yavaşlar. O andan itibaren, kabloda oluşan sıcaklığın artmasını sağlayan ortam sıcaklığı, artık kablo sıcaklığının azalması yönünde etki etmeye başlar [18].

Kablonun kaybetmeye başladığı ısı, ortam ile arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak değişir. Belli bir süre sonunda bu ısı alışverişi sona erer ve denge sıcaklığına gelir. Bu sıcaklığa sürekli işletme sıcaklığı adı verilir.

Sürekli işletme sıcaklığının bulunabilmesi için, ısı kaynağından kablo dış ortamına kadar olan malzemelerin ısı dirençlerinin bilinmesi gerekir. Ayrıca bu sıcaklığa etki eden diğer faktörlerde göz ardı edilmemelidir. Bunlar, kablonun; yalıtkanının izin verilen işletme sıcaklığı, döşenme şekli, üzerindeki gerilim düşümü ve bulunduğu ortam koşulları olarak özetlenebilir.

Çizelge 2.1’de kabloların kullanılan yalıtkan malzeme türüne göre, ilgili standartları ile birlikte, işletme sıcaklıkları ve bu malzemelerin ısı direnç değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1: Kablolarda Yalıtkan Malzeme Türüne Göre İzin Verilen İşletme Sıcaklıkları (°C) ve Isıl Özdirenç (ρ) Değerleri [21]

Yalıtkan Malzeme	Standart	İşletme Sıcaklığı (°C)	Isıl Özdirenç (K.m/W)
XLPE	DIN VDE 0272-0273	90	3.5
PE	DIN VDE 0273	70	3.5 ¹⁾
PVC	DIN VDE 0265-0271	70	6.0 ²⁾

¹⁾ PE kılıf için de kullanılabilir.

²⁾ PVC kılıf içinde kullanılabilir.

2.1.2 Kablo malzemelerinin ısınmaya etkileri

2.1.2.1 İletken malzemeler

Kablolarda en çok kullanılan iletken malzemesi bakır ve alüminyumdur. Ancak kablolarda kullanılan iletken malzemeler sadece elektrik iletiminde değil, aynı zamanda ekran ve zırh görevi için de kullanılır. Kablolarda ısınma söz konusu olduğu ve ağırlığın hava hatlarına göre önemsiz oluşu sebebiyle, genellikle bakır iletkenler kullanılır. Kablolarda serilme uygulaması olduğu için, bakırın mekanik dayanıklılığı yerine elektriksel iletkenliğinin iyi olması istenir. Bunun sonucu olarak, soğuk haddeden geçirilmiş mekanik olarak dayanıklı bakır yerine, elektriksel direnci değeri ve mekanik dayanımı düşük tavlanmış bakır kullanılır.

Kablolarda iletkenler, damar iletkeninin bir telli, çok telli ve sıkıştırılmış olmasına ve damar iletkeninin kesitine göre bir telli daire kesitli, çok telli daire kesitli, bir telli kesme kesitli ve çok telli kesme kesitli olarak ayrılmaktadırlar. Bunun asıl sebebi yerine göre daha uygun elektriksel iletkenlik ve mukavemet sağlamaktır. Bu ayrımı açıklayan kodlar Çizelge 2.2’de belirtilmiştir. Kablolarda iletken seçimi yapılırken, yukarıda sözü edilenlerin dışında dikkate alınan bir diğer ve çok önemli faktör de maliyettir. Alüminyum bakırdan daha düşük elektriksel iletkenliğe sahiptir

ancak bakır aynı akım için daha ağır ve pahalıdır. Bu parametreler ve burada sözü edilmeyen bir kaç parametre de göz önüne alınarak kablo iletkeninin seçimi yapılmaktadır.

Çizelge 2.2: İletkenin Şeklini Açıklayan Harfler

Harf		Açıklamalar
TS 621	VDE 050	
-	R	Daire Kesitli İletken
S	S	Kesme Kesitli İletken
-	E	Bir Telli İletken
ç	M	Çok Telli İletken
ş	V	Sıkıştırılmış İletken

Çizelge 2.2, örnek ile açıklanırsa; RE: Bir telli daire kesitli iletkeni, RM: Çok telli daire kesitli iletkeni gösterir.

2.1.2.2 Yalıtkan malzemeler

Yalıtkan malzemeler kabloların yapısında yer alan ve kabloyu elektriksel olarak yalıtmak için kullanılan malzemelerdir. İlk kablolarda yalıtkan malzemesi olarak, kâğıt kullanılmasına rağmen günümüzde sadece çok yüksek gerilim kablolarında bu uygulama bulunmaktadır. Son zamanlarda yalıtkan malzeme olarak yapay malzemeler, doğal kauçuk, yağ emdirilmiş kâğıt, polimerler kullanılmaktadır. Gerilim seviyesine göre yalıtkan malzeme de değişmektedir. Alçak gerilim seviyesinde polivinil klorür (PVC) ve çapraz bağlı polietilen (XLPE), orta gerilim seviyesinde polietilen (PE), XLPE ve etilen propilen kauçuk (EPR), yüksek gerilim seviyesinde ise XLPE ve EPR, çok yüksek gerilim seviyesinde ise yağ emdirilmiş kâğıt kullanılmaktadır.

Kullanılacak yalıtkan malzeme, aynı zamanda, kabloda ne kadar işletme sıcaklığına izin verileceğini de belirlemektedir. Bu sınır, yalıtkan malzemenin sıcaklığa dayanma sınırı olduğu için, kablo akım taşıma kapasitesi hesabında ilk dikkat edilmesi gereken konudur [22].

2.1.2.3 Kılıf

Kılıf, iletkeni elektriksel bakımdan yalıtmak ve kabloyu mekanik etkilerden korumak amacı ile kullanılır. İletkeni, damarı veya damarları içine alan bir gömlektir. Kullanılan bu kılıf metalse, kabloyu mekanik darbe ve dış etkilere karşı korumanın dışında, kablonun oluşturduğu elektrik ve manyetik alanları da ekranlar.

Kılıf malzemesi olarak sadece yalıtkan veya iletken malzeme kullanılmaz. Kimi zaman yarı iletken malzemelerde bu işlevi yerine getirir ki bunu hem güç kablolarında hem de haberleşme kablolarında karşılaşılan bir uygulamadır.

2.1.2.4 Ekran

Ekran, kablo yalıtımının içindeki elektrik alanı düzgünleştirmek ve sınırlandırmak görevini görür. Kablodaki her bir damar üzerine veya ortak kılıf üzerine uygulanan metal veya yarı iletken malzeme kullanılarak uygulanır.

2.1.2.5 Zırh

Kabloyu mekanik etkilerden koruma görevi yapan zırh, ortak kılıf üstüne yastık amacı için yerleştirilen PVC bir tabaka yerleştirildikten sonra onun üzerine çelik bantlar veya teller sarılmasıyla oluşur. Zırhın, kablonun en dışında kalıp korozyona uğramamasını sağlamak için, etrafına PVC bir tabaka daha yerleştirilir [18].

2.2 Isı Geçişi

Isı geçişinin kablolardaki etkilerini anlatabilmek için, bu konuyu ayrı bir başlık altında ele almak uygun olur. Elektrik mühendislerinin, denklem (2.1)'de belirtilen katsayılar ile mevcut bir kablo akım taşıma kapasitesi sorusunu çözmeleri mümkündür ancak katsayı seçiminin doğru yapılamayacağı değişik durumlarda bu hesaplama yöntemi çalışmayacaktır. Bu neden ile bu tez çalışmasında, ısı geçişi konusu ayrıntılı olarak ele alınacak ve kabloda oluşan ısının, elektrik hesaplamalarını ne seviyede ve neden bu kadar etkilediğini, sadece katsayıları yerine duruma göre seçerek değil, katsayıların nerelerden geldiğini öğrenerek, daha açık bir şekilde anlatılacaktır. Bu anlatımda ısı geçişinin, sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımı olduğu göz önüne alınacaktır [23].

Bir ortam içinde veya ortamlar arasında, bir sıcaklık farkı var ise, ısı geçişi mutlaka gerçekleşir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, ısı geçişinin gerçekleşmesine yol açan farklı mekanizmalar, ısı geçişinin türleri olarak adlandırılır.

Katı veya akışkan bir durgun ortam içinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı geçişi için, *iletim* terimi kullanılır. Buna karşın bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise, aralarında gerçekleşen ısı geçişi, *taşıyım* terimi ile adlandırılır. Isı geçişinin diğer bir türü ise, *ısıl ışıyım* olarak

adlandırılır ki, sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler, elektromanyetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Dolayısıyla farklı sıcaklıklardaki iki yüzey arasında, birbirlerini görmeye bir engel yoksa ışıınım ile ısı alışverişı gerçekleşir [24].

2.2.1 İletim

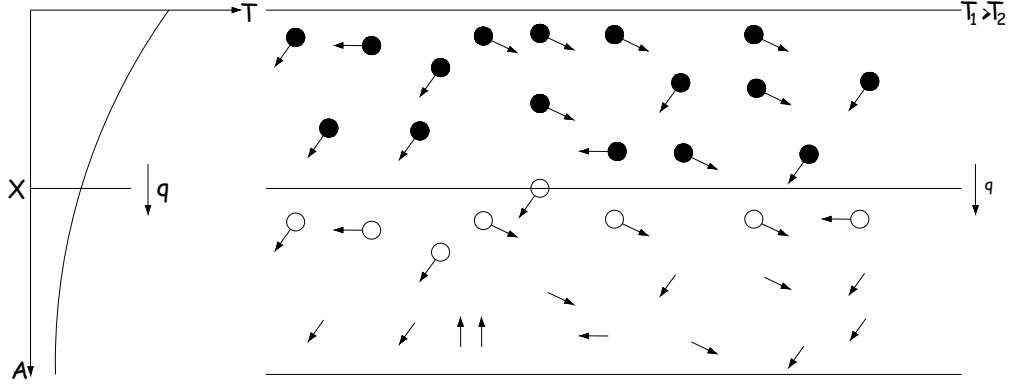
İletim kelimesi atomik ve moleküler hareketi çağrıştırmalıdır, çünkü ısı geçişinin bu türü, atomik ve moleküler düzeyde hareket ile ilişkilidir. İletim, bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklardan, daha düşük enerjili parçacıklarına, bu parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin aktarılması olarak düşünölebilir.

Konu, bir gaz düşünölererek ele alınacak olursa, içinde sıcaklık farkı olan gaz molekülleri ve bu molekülleri çevreleyen bir kutucuk bulunsun. Şekil 2.1’de göröldüğü gibi bu gaz molekülleri, kutucuğun farklı sıcaklıklarda bulunan yüzeylerini kaplasın. Herhangi bir noktadaki sıcaklık, o noktanın yakın çevresinde bulunan gaz moleküllerinin enerjisi ile ilişkilidir. Bu enerji, moleküllerin dönme ve titreşim hareketleriyle olduğı kadar, rasgele ötelenme hareketleri ile de ilgilidir.

Daha yüksek enerjili moleküller, daha yüksek sıcaklıkta bulunurlar ve komşu moleküller sürekli olarak çarpışırken, daha çok enerjili moleküllerden daha az enerjili moleküllere bir enerji aktarımı gerçekleşir [25]. Bu durumda, bir sıcaklık farkı olması durumunda, sıcaklığın azaldığı yönde iletim ile enerji aktarımı gerçekleşmelidir.

Bu aktarım Şekil 2.1’de görölmektedir. x_0 konumundaki yüzey, sürekli bir biçimde, rasgele hareketlere bağılı olarak alttan ve üstten yine moleküller tarafından geçilmektedir. Fakat üstten gelen moleküller, alttan gelenlere göre daha yüksek sıcaklığa sahiptirler. Bu durumda artan x yönünde net bir enerji aktarımı gerçekleşir. Rasgele moleküllerin hareketi ile enerji aktarımı, enerjinin yayılım olarak ifade edilir.

Moleküller arasında daha az aralık olmasına ve moleküller arasındaki etkileşim daha çok olmasına rağmen, sıvılar için de durum aynıdır. Benzer olarak bir katı içindeki iletim de, kafes titreşimleri şeklindeki atomik hareketlere bağlanabilir [27].



Şekil 2.1: İletim ile Isı Geçişinin, Moleküler Harekete Bağlı Olarak Enerji Yayılımıyla İlişkisi

Bir elektrik yalıtkanındaki elektrik aktarımı, tamamen bu kafes dalgaları yoluyla gerçekleşir. Bir iletken de ise, serbest elektronların ötelenme hareketine de bağlıdır. Isı geçişi işlemlerini, uygun an denklemleri ile incelemek mümkündür. Bu denklemler, birim zamanda aktarılan enerji miktarını hesaplamak için kullanılabilir.

Isı iletimi için an denklemleri, *Fourier yasası* olarak bilinir. Bir boyutlu sistemler için aşağıdaki formül ile belirtilir.

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Burada, q_x'' (W/m²) ısı geçiş doğrultusuna dik birim yüzeyden, birim zamanda x doğrultusunda geçen ısıdır. Orantı katsayısı k , ısı iletim katsayısı (W/m.K) olarak adlandırılan bir aktarım özelliğidir. Ortamda bulunan malzemeye göre değişir. Eksi işareti, ısı geçişinin sıcaklığın azaldığı yönde gerçekleştiğini gösterir.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.3)$$

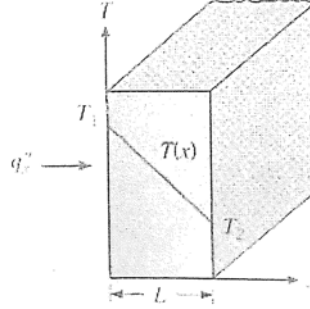
olarak ifade edilir. Denklem (2.3), denklem (2.2)'de kullanıldığında ısı akısı,

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.4)$$

olur. Bulunan bağıntı, ısı akısını yani, birim yüzeyden birim zamanda geçen ısı akısını göstermektedir. Eğer bu, yüzey alanı A olan bir yerden ısı geçişini hesaplamak için kullanılmak istenirse aşağıdaki formülden yararlanılır.

$$q_x = q_x'' * A \quad (2.5)$$

Bu bağıntıda, A ; yüzey alanıdır ve birimi m^2 'dir. q_x ise birim zamanda geçen ısıdır ve birimi Watt (W)'tır.



Şekil 2.2: İletim ile Bir Boyutlu Isı Geçişi

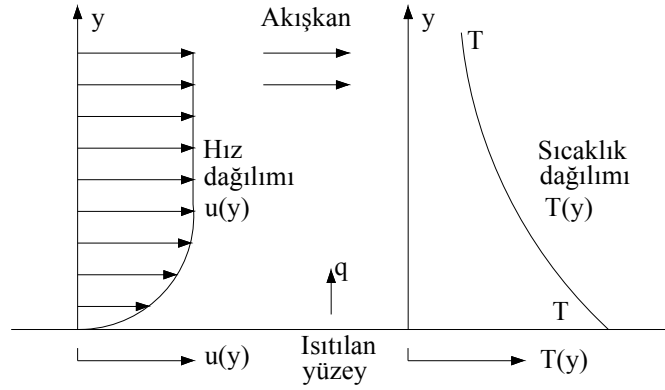
2.2.2 Taşınım

Taşınım ile ısı geçişi, iki mekanizmadan oluşmaktadır. Rasgele moleküler hareket sonucunda enerji aktarımının dışında, akışkanın kitle hareketi ile de enerji yayılır. Bu akışkan hareketi herhangi bir anda, çok sayıda molekülün, topluca veya kümelenmiş olarak hareket etmesi ile ilgilidir. Böylesi bir hareket ısı geçişine katkıda bulunur. Toplam ısı geçişi, moleküllerin rasgele hareketi ile ve akışkanın kitle hareketi ile oluşan enerji aktarımlarının bir toplamıdır. Bu toplam aktarım söz konusu olduğunda, *taşınım* terimi; akışkanın kitle hareketi ile oluşan aktarım söz konusu olduğunda ise *adveksiyon* terimi kullanılır.

Bu tez çalışmasında, hareket halindeki bir akışkan (hava) ile bir yüzey (kablo yüzeyi) arasında sıcaklık farkı olduğu zaman gerçekleşen, taşınım ile ısı geçişi göz önüne alınmıştır. Akışkan-yüzey etkileşiminin bir sonucu olarak, akışkanın hızı yüzeydeki sıfır değerinden, akış ile ilgili bir u_∞ hızına ulaşır. Bu akışkan bölgesi, *hız sınır tabakası* olarak adlandırılır. Bunun yanında, yüzey ve akış sıcaklıkları farklı ise, akışkan içinde sıcaklığın, $y = 0$ 'da T_s değerinden, T_∞ değerine değiştiği bir akışkan bölgesi oluşur. Bu bölgeye ısıl sınır tabaka bölgesi adı verilir. $T_s > T_\infty$ olması durumunda bir ısı geçişi olur.

Taşınım ile ısı geçişi, sınır tabaka içindeki akışkanın hem rasgele hem de kitle hareketi ile olur. Rasgele moleküler hareketin katkısı, akışkan hızını düşük olduğu, yüzeye yakın kısımda etkindir. Hatta yüzey ile akışkan arasındaki ara yüzeyde ($y =$

0'da) akışkan hızı sıfırdır ve ısı geçişi sadece rasgele moleküler hareketle olur. Akışkanın kitle hareketinin katkısı, akış x doğrultusunda gelişirken sınır tabakanın büyümesi olgusuna dayanır. Yani diğer bir deyişle bu tabakaya iletim ile geçen ısı, akış yönünde süpürülür.



Şekil 2.3: Taşınım ile Isı Geçişinde Sınır Tabaka Gelişimi

Taşınım ile ısı geçişi, akışın türüne göre sınıflandırılabilir. Bu tez çalışmasında iki farklı taşınım ile ısı geçişi ele alınacaktır.

- Zorlanmış taşınım:

Herhangi bir malzeme etrafında bulunan havanın, fan, pompa ve/veya rüzgâr ile kendi isteği dışında yer değiştirmesine zorlanmış taşınım denir [22]. Kablo etrafındaki hava için dikkate alındığında, fan veya pompa yerine doğa koşullarındaki rüzgâr bu anlatımın içine girebilir. Rüzgâr kablo etrafındaki havayı süpürerek, kablo etrafına her an yeni T_{∞} sıcaklıklarında hava getirir ki bu da kablonun soğumasını çabuklaştırır. Rüzgâr ne kadar hızlı olursa kablonun soğuması ve bunun sonucunda akım taşıma kapasitesi artmış olur.

- Doğal taşınım:

Herhangi bir malzemenin hava ile doğrudan temasını etkileyen başka etkenlerin olmamasına doğal taşınım denir. Kablo etrafında ki durağan hava bu açıklamaya örnek olarak verilebilir. Bu durumda ortam sıcaklığı ve bu ortam ile kablo arasında kalan yüzey alanına göre ısı alışverişi gerçekleşir.

Çizelge 2.3'de, doğal ve zorlanmış taşınım durumunda ısı taşınım katsayıları verilmiştir.

Çizelge 2.3: Isı Taşınım Katsayısı İçin Örnek Değerler [26]

Isı Taşınımı	h (W/m ² .K)
Doğal Taşınım	
Gazlar	2-25
Sıvılar	59-1000
Zorlanmış Taşınım	
Gazlar	25-250
Sıvılar	50-20000

Taşınım ile ısı geçişinin tüm türleri için denklem (2.6) kullanılır:

$$q_x'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

Burada taşınım sebebi ile oluşan ısı akısı q'' (W/m²), yüzey ve akışkan sıcaklıklarının arasındaki fark ($T_s - T_\infty$) ile doğru orantılıdır. Bu ifade Newton'un soğutma yasası olarak bilinir ve orantı katsayısı h (W/m².K), ısı taşınım katsayısı olarak adlandırılır. Bu değer, kablo ile havanın temas ettiği durumlarda yapılacak hesaplamalar için, yüzey geometrisine, akışkan hareketinin türüne ve akışkanın bazı termodinamik ve aktarım özelliklerine göre belirlenen sınır tabakadaki koşul değerlere bağlıdır.

Kablolarda yapılacak taşınım ile ısı akışı hesaplamalarında, kullanılacak bütün yöntemler sonuç olarak h 'nin bulunabilmesi için kullanılan yöntemlerin incelenmesine indirgenir.

2.2.3 Işınım

Isıl ışıınım, sonlu sıcaklığa sahip bir cismin yaydığı enerjidir. Isı yayma, cismin yapısından bağımsız olarak, cismi oluşturan atomların ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişimler olarak yorumlanabilir. Işınım ile ısı enerjisi, fotonlar ile aktarılır. İletim ve taşınım ile enerji aktarımı, bir maddi ortamın varlığına şart kılarken, ışıınım için böyle bir şart yoktur. Hatta ışıınımla aktarım boşlukta daha da etkili olarak gerçekleşir [22].

Yüzeyin yaydığı ışıınım, yüzeyin sardığı cismin ısı enerjisinden kaynaklanır ve birim yüzeyden birim zamanda serbest bırakılan enerji yüzeyin yayma gücü E (W/m²) olarak adlandırılır. Yayma gücünün Stefan-Boltzmann yasası ile tanımlanan bir üst sınırı vardır [25]:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.7)$$

Burada, T_s , yüzeyin mutlak sıcaklığı (K) olup, σ , Stefan-Boltzmann sabitidir ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$). Böyle bir yüzey, ideal ışıınım yayıcı veya siyah cisim olarak adlandırılır.

Gerçek bir yüzeyin yaydığı ısı akısı, aynı sıcaklıkta bulunan bir siyah cismin yaydığından daha azdır ve denklem (2.8) ile belirtilir:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.8)$$

Burada, ε , yayma oranı olarak adlandırılır ve yüzeyin birim ışıınım özelliğidir. $0 < \varepsilon < 1$ aralığında değerler alan bu özellik, bir yüzeyin, siyah cisme göre ne denli etkin bir enerji yaydığının ölçüsüdür. ε , yüzeyi oluşturan malzemeye ve yüzeyin nasıl işlenmiş olduğuna çok bağlıdır [1].

Bir yüzey üzerine çevresinden gelen ışıınım da söz konusudur. Güneş gibi kaynaklardan da ışıınım gelebilir. Güneşten gelen ışıınım ile oluşan ısı enerjisinin, kablounun akım taşıma kapasitesine etkileri Bölüm 4’de örnek ile anlatılmıştır.

2.3 Isı İle Elektrik Arasındaki Benzerlikler

Fourier’in ısı denklemleri, Ohm’un elektrik temel formüllerine büyük ölçüde benzerlik göstermektedir [28]. Denklemler incelenerek, söz konusu benzerlikler görülebilir.

2.3.1 İletim ile ısı geçişi

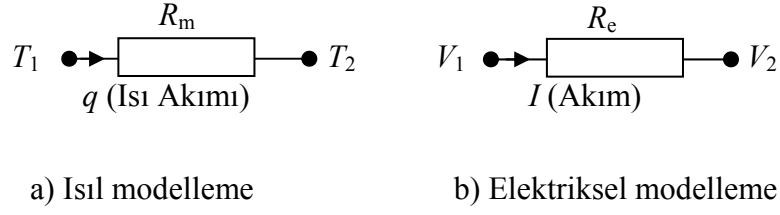
(2.4) denklemi Ohm yasasının temel denklemi ile kıyaslanacaktır.

$$q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)’de q (W) ısı miktarını göstermektedir. Elektrik formüllerinden, Ohm yasası denklem (2.10)’da belirtilmiştir.

$$I = \frac{(V_1 - V_2)}{R} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)’da I akım (A), V_1 ve V_2 potansiyeller (V), R ise elektriksel dirençtir (Ω). Şekil 2.4’de elektriksel ve ısı modelleme gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Isıl (R_m) ve Elektriksel (R_e) Direnç Arasındaki Benzerlik

Şekil 2.4a’da, R_m ısı direnci ($^{\circ}\text{K}/\text{W}$), T_1 yüksek sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$), T_2 düşük sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$), q ise ıslıyı ve yönünü göstermektedir (W). Şekil 2.4b’de, R_e elektriksel direnci (Ω), V_1 yüksek potansiyeli (V), V_2 alçak potansiyeli (V), I ise akımı (A) ve bu akımın yönünü göstermektedir. Bir boyutlu ısı geçiş denklemini, elektriğın bir yerden bir yere iletilmesi için kullanılan denklem ile bire bir benzerlik göstermektedir.

Şekil 2.4’deki benzerlikten yola çıkarak, R_m denklem (2.11)’den elde edilir.

$$R_m = \frac{L}{kA} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)’de L uzunluktur (m). Elektrik mühendisliğinin temel formüllerinden elektriksel direnç formülü denklem (2.12)’de belirtilmiştir.

$$R_e = \frac{\rho L}{A} \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)’de ρ elektriksel özdirençtir ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$). Elde edilen denklemlerden yola çıkarak, elektriksel ve ısı hesaplarından, Ohm yasası ile Fourier yasasının benzerlikleri ile elektrik ve ısı hesaplarının benzerliğı, seri ve paralel bağlantılar için, Çizelge 2.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4: Elektrik ve Isı Formülleri Arasındaki Benzerlikler

Elektrik (Ohm Yasası)	Isıl (Fourier Yasası)	
$\Delta V = I R_e$	$\Delta T = q R_m$	Dirençler
$R_{eT} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$	$R_{mT} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$	Seri bağlantı
$R_{eT} = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N)$	$R_{mT} = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N)$	Paralel bağlantı

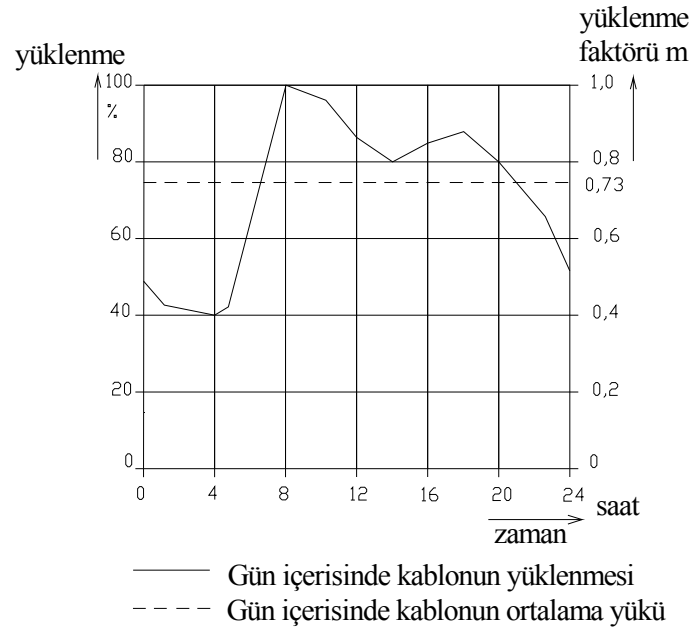
3. İŞLETME KOŞULLARI ve TASARIM ÇİZELGELERİ

Kabloların akım taşıma kapasitesi hesabı yapılırken, bilinmesi gereken en önemli durumlar üç başlık altında toplanır:

- İşletme tipi
- Montaj koşulları
- Ortam koşulları

3.1 Kablonun Toprağa Gömülmesi Durumunda

İşletme tipi: İşletme tipi, bir kablunun, günün kaç saati, yüzde olarak ne kadar yükte çalışacağıdır. Kablunun yüklenme grafiği çizildiğinde, kablodan maksimum ve minimum ne kadar akım geçirileceği, yüklenme faktörünün (m) ne olacağı ve bu yüklenme faktörüne göre ortalama geçirilecek I akımı değeri bulunabilir. Şekil 3.1’de örnek olarak bir kablunun yüklenme faktörünün grafiği çizilmiştir.



Şekil 3.1: Kablonun Günlük Yüklenme Faktörü Örneği (m)

Montaj koşulları: Kablonun toprağa gömülme derinliği, genellikle 0,7 metre olarak alınır ki bu değer kablo ekseninden toprak yüzeyine kadar olan mesafedir [29]. İki kablonun, aynı ortam sıcaklığı ve toprak ısııl özdirencinde, farklı gömülme derinliklerindeki akım taşıma kapasitesi hesabı yapıldığında görülecektir ki derindeki kablo daha az akım taşıma kapasitesine sahip olacaktır. Diğer taraftan, derinlik arttıkça toprak sıcaklığının da azaldığı göz önünde bulundurulmalıdır.

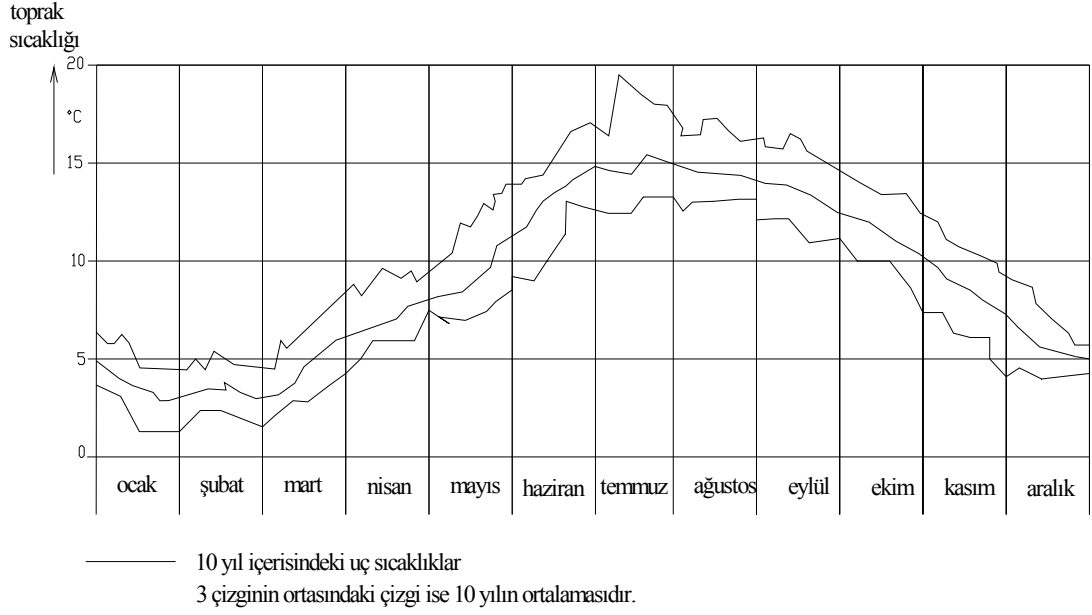
Toprak sıcaklığının azalmasına paralel olarak toprak ısııl özdirenci de azalır. Daha derinlere inildikçe, farklı ortamlara da geçilebileceği ve gereksiz işçilik kaybı da düşünüldüğü için, kablonun 0,7 metre ile 1,2 metre aralıkta döşenmesinin daha doğru olacağı sonucu ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmalarda, 0,7 m ile 1,2 m arasındaki derinlik değişimlerinde, akım taşıma kapasitesinin çok da fazla değişmediği görülmüştür [29].

Kabloların akım taşıma kapasitesine etki eden diğer bir faktörde, kabloların birbirlerine olan yakınlıklarıdır. Kimi zaman çok damarlı bir kablo kullanılsa da, daha fazla akım taşıyabilmek için kabloların tek damarlı olarak ve aralarında belli bir mesafe bırakılarak döşenmeleri de gerekebilir. Bu durumda gerekli olan akım taşıma kapasitesi dikkatlice hesaplanmalı, kablo tipi ona göre seçilmelidir.

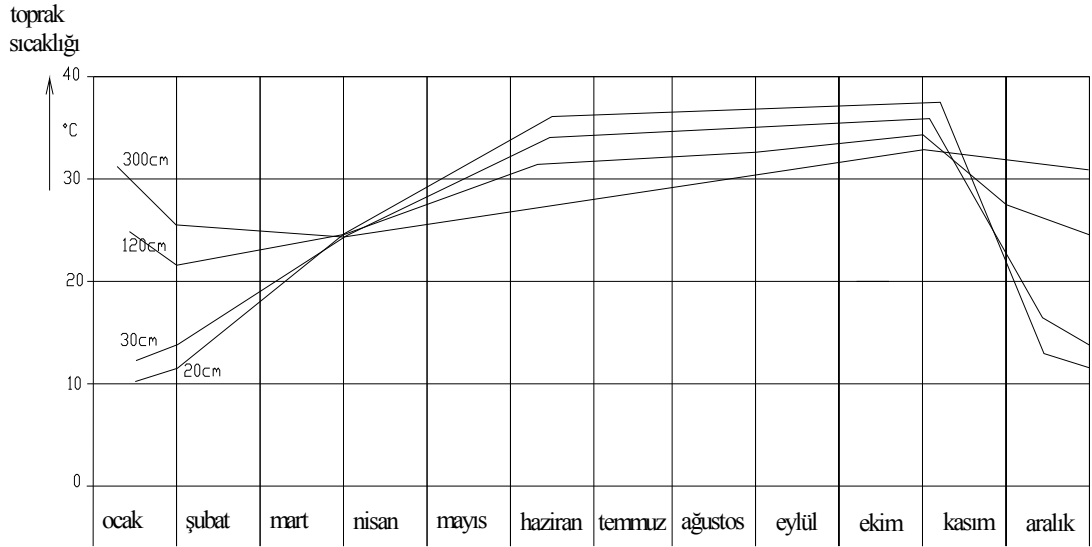
Aynı koşullarda altında kablo yalıtkan malzemesinin türü de akım taşıma kapasitesini etkileyen önemli faktörlerdendir. Günümüzde XLPE yalıtkan malzemesi kullanımının giderek yaygınlaşması ile aynı kesitlerde PVC kabloya göre daha fazla akım taşıma kapasitelerine ulaşılmıştır. Bunun asıl nedeni Bölüm 1’de açıklandığı üzere yalıtkan malzemenin sıcaklık dayanımıdır.

Aslında kullanılan malzeme, montaj derinliği, yüklenme oranı, kablolar arası mesafe bilgilerine göre akım taşıma kapasiteleri hesabı birçok kitapta ve standartta bulunmaktadır. Ancak konunun daha da anlaşılır olması için yeri geldiğinde bu katsayılar, hesaplamaları ispat etmek için kullanılacaktır.

Ortam koşulları: Toprak sıcaklığı (θ_e), kablo henüz yüklenmeden, kablonun gömülü olduğu derinlikte sıcaklıktır. Sıcaklık değeri olarak yıllık sıcaklık verileri elde edilmelidir. Böylece gerçeğe uygun bir grafik elde edilmiş olur. Şekil 3.2 ve 3.3’de farklı iki bölgedeki farklı derinliklerde yıllık sıcaklık değerlerinin deneysel kayıtları bulunmaktadır.



Şekil 3.2: Stuttgart'ta, Deniz Seviyesinden 480 m Yükseklikte 1 m Toprak Derinliğinde Yıllık Sıcaklık Değerleri (Ortalama Bir Toprak İçin) [21]



Şekil 3.3: Kuveyt'te, Farklı Derinliklerde Toprak Sıcaklıklarının Aya Göre Değişimi

Şekil 3.3 ve 3.4'den anlaşılabileceği üzere, sadece yılın bir günü yapılan ölçümlere göre yapılan değerlendirme doğru olmayacaktır. İklim, konu üzerinde ciddi etkilerde bulunmaktadır. Hatta bazen yıllara göre bile değişim olmakta, sadece iklimsel değişimlerde yeterli olmamaktadır.

Kablolardan akım geçmeye başladığı, yani yüklenmeye başladıkları andan itibaren, kablolar etraflarında kuru bir alan oluşturur. Bu alanın ısı iletkenlik katsayısı (k), nemli ortama göre daha düşüktür. Kablo etrafında kurumuş olan alan, belli bir süre sonra kararlı hale gelen akım ile beraber daha fazla genişlemez ve sabit kalır. Bu alanın da genişliği bulunup hesaplara katılması gerekir. Aksi halde kablolarda aşırı yüklenme olabilir.

Toprağın ısı iletkenliği olarak, nemli bir toprak ve referans değeri olarak standartlarda 1.0 K.m/W alınır [21]. Ayrıca bu ortam koşuluna göre sıcaklık değeri de 25°C olarak alınır [18].

Kuru bölgeler için genellikle 2,5 K.m/W ısı iletkenliği değeri kullanılır. Böyle zamanlarda yatak malzemesi kullanılarak, kablonun çevresindeki ısı iletkenliği daha düşük değerlere indirilir.

Toprak sıcaklığının bilinmediği ve toprak iletkenliğinin de bulunamadığı durumlarda ise Çizelge 3.1'den gerekli değerler seçilebilir.

Çizelge 3.1: IEC 60-287'e Göre Sıcaklık Değerleri [13]

a) Deniz seviyesindeki sıcaklıklar

İklim Koşulu	Ortam Sıcaklığı			
	Havada		Toprağın 1 Metre Altında	
	Minimum °C	Maksimum °C	Minimum °C	Maksimum °C
Tropikal	25	55	25	40
Normal	10	40	15	30
Serin	0	25	10	20

b) Toprak ısı iletkenliği değerleri

Hava Koşulları	Toprağın Durumu	Toprak Isıl İletkenliği ρ_E (K.m/W)
Sürekli Nemli	Aşırı nemli	0,7
Düzenli Yağış Alan	Nemli	1,0
Ara Sıra Yağış Alan	Kuru	2,0
Çok Az Yağış Alan	Aşırı kuru	3,0

3.2 Kablonun Havada Bulunması Durumunda

İşletme tipi: Havadaki kablolarda yüklenme değeri pek fazla dikkate alınmamaktadır.

Bunun sebebi, ısınma ve soğuma sürelerinin çok kısa olmasıdır.

Montaj koşulları: Kablolar havada tek damarlı, üç tek damarlı demet halinde, çok damarlı ve üç tek damarlı sıralı halde olmak üzere monte edilirler. Bu montaj şekillerine, kablolar havada oldukları için, ısıma ve taşınım ile ısı geçişi de etki etmektedir.

Kablolar duvara veya zemine değecek durumda olduklarında, akım taşıma kapasiteleri %5 civarında azalmaktadır [21]. Aynı zamanda kabloların gruplanmaları da dikkate alınmalıdır. Kaç grup kablo olduğu, aralarında ne kadar mesafe olduğu hesaba katılmalıdır. Bu hesapların dikkatli bir şekilde yapılması çok önemlidir çünkü kimi zaman akım taşıma kapasiteleri %25'lere kadar düşebilmektedir. %25 değeri, kablonun akım taşıma kapasitesinin ne kadar düşebileceğinin iyi bir örneğidir.

Ortam koşulları: Genelde kabloların havada akım taşıma kapasiteleri ile ilgili çizelgeler, havanın 30°C olduğu varsayılarak yapılır [18]. Diğer sıcaklık koşulları için akım taşıma değerinin yükselip düşeceği için hesap yapılması gerekmektedir.

Kabloların hangi koşullarda çalışacağını bildiren bazı çizelgeler vardır. Çizelge 3.2'de bu çizelgelerden bir tanesi bulunmaktadır. Kablo akım taşıma kapasitesi hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından yararlı olabilecek Çizelge 3.2, sınırlı ortamlar için geçerlidir. Çizelge 3.2'deki değerler orta Avrupa iklim koşulları göz önünde bulunarak verilmiştir.

Çizelge 3.2: Oda Tiplerine Göre Sıcaklık Değerleri

Oda Tipi	Sıcaklık Değeri(°C)
Isıtılmamış Hücreler	20
İklima Göre Değişen Odalar	25
Fabrikalar, Atölyeler	30

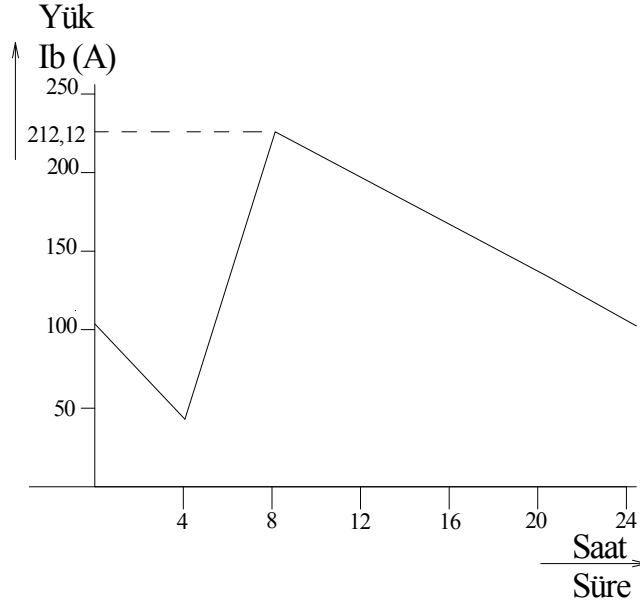
Kablolar; kablo tavası ve/veya kablo kanalı ile taşınması durumunda, bulundukları odalarda ısınmaya yol açarlar. Isınmaya bağlı olarak sıcaklık değişimi olacağı için, Çizelge 3.2'deki değerler bir miktar değişebilir.

Örnek 3.1

3 fazlı bir sistemde, besleme gerilimi $U_b = 380$ V ve iletilen görünen güç $S = 135$ kVA'dır. Bu durumda Şekil 3.4'deki yüklenme çizelgesi de dikkate alındığında, toprakta kullanılması gereken kablonun seçimi:

$$I_b = \frac{S}{\sqrt{3}U_b} = \frac{135 \cdot 10^3 VA}{\sqrt{3} \cdot 380V} = 212,12 A \quad (3.1)$$

I_b ; maksimum yüklenme akımı olarak adlandırılır.



Şekil 3.4: Günlük Yüklenme Diyagramı

Şekil 3.4'e göre günlük ortalama yüklenme akımı;

$$\frac{4s \frac{(100 + 40)A}{2} + 4s \frac{(40 + 212,12)A}{2} + 12s \frac{(212,12 + 165)A}{2} + 4s \frac{(165 + 100)A}{2}}{24s} = 149,04 A \quad (3.2)$$

olarak bulunur. Hesaplanan işletme maksimum akımı denklem (3.1)'den $I_b = 212,12 A$ olarak bulunmuştu. Denklem (3.1) ve (3.2)'den yüklenme faktörü m denklem (3.3)'deki gibi bulunur.

$$m = \frac{149,04}{212,12} = 0,7 \quad (3.3)$$

Kullanılacak kablo NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablodur. Bu kablonun katalog değerlerine bakıldığında [21], toprağa gömülü durumda ve kabloların döşenme şekline göre aralarında 7 cm boşluk bırakılarak, 161 A taşıyabildiği görülmektedir. Bu durumda iki kablo sistemi kullanılacaktır. Ancak iki farklı kablo sistemi kullanılacağına göre bunların birbirlerine ısı etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu ısı etki katsayıları Çizelge 3.3 ve 3.4'de bulunmaktadır.

Yüklenme faktörü denklem (3.3)'den bulunduğuna göre toprak ısı öz direnci $\rho_E = 1$ K.m/W olarak alınarak, Çizelge 3.3'den $f_1 = 1,0$ ve Çizelge 3.4'den $f_2 = 0,85$ olarak bulunur. Denklem (2.1)'den;

$$I_b = NI_{bf}\Pi f \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'de N, kullanılan sistem sayısını ifade eder. Örnek 3.1'de iki sistem kullanılacaktır (N = 2).

$$I_b = NI_{bf}\Pi f \Rightarrow I_{bf} = \frac{212,12}{2 * 1,0 * 0,85} = 124,77 A \quad (3.5)$$

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun mevcut durum için akım taşıma kapasitesi;

$$I_z = I_r \Pi f' \text{ den} \Rightarrow I_z = 161 * 1,0 * 0,85 = 136,85 A \quad (3.6)$$

Sonuç olarak, YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun, iki grup halinde gereken akım değerini taşıyabileceği görülmektedir.

Örnek 3.1'deki hesaplamalarda f_1 , ve f_2 değerleri, kablonun demet halinde dizilmiş ve toprak sıcaklığı 30°C olması durumunda Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'den $f_1 = 0,81$ ve $f_2 = 0,72$ olarak alınacaktı. Bu durumda YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun akım taşıma kapasitesi denklem (3.7) ile bulunur.

$$I_z = 161 * 0,81 * 0,72 = 93,89 A \quad (3.7)$$

İki farklı dizilme şekline ve ortam sıcaklığına göre akım taşıma kapasiteleri arasındaki fark;

$$136,85 - 93,89 = 42,95 A \quad (3.8)$$

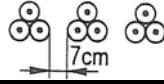
Aradaki farka göre akım taşıma kapasitesindeki düşüşün oranını hesaplayarak, yüzde olarak büyük bir orana sahip bir akım taşıma kapasitesi kaybı ortaya çıkacaktır.

$$\frac{42,89}{136,85} * 100 = \%31,3 \quad (3.9)$$

Çizelge 3.3: Toprak Altında Yüklenme Değerlerine Göre Akım Taşıma Katsayısı f_l

İzin Verilen İletken Sıcaklığı °C	Sıcaklık Değeri °C	Toprak Öz direnci												
		0,7 Km/W				1,0 Km/W				1,5 Km/W				2,5 Km/W
		Yüklenme Faktörü												
		0,50	0,70	0,85	1,00	0,50	0,70	0,85	1,00	0,50	0,70	0,85	1,00	0,5 to 1,00
90	5	1,24	1,18	1,13	1,07	1,11	1,07	1,03	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,89
	10	1,23	1,16	1,11	1,05	1,09	1,05	1,01	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,86
	15	1,21	1,14	1,08	1,03	1,07	1,02	0,99	0,95	0,95	0,92	0,91	0,89	0,84
	20	1,19	1,12	1,06	1,00	1,05	1,00	0,96	0,93	0,92	0,90	0,88	0,86	0,81
	25					1,02	0,98	0,94	0,90	0,90	0,87	0,85	0,84	0,78
	30						0,95	0,91	0,88	0,87	0,84	0,83	0,81	0,75
	35										0,82	0,80	0,78	0,72
	40													0,68
80	5	1,27	1,20	1,14	1,08	1,12	1,07	1,04	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,88
	10	1,25	1,17	1,12	1,06	1,10	1,05	1,01	0,97	0,97	0,94	0,92	0,91	0,85
	15	1,23	1,15	1,09	1,03	1,07	1,03	0,99	0,95	0,94	0,92	0,90	0,88	0,82
	20	1,20	1,13	1,07	1,01	1,05	1,00	0,96	0,92	0,91	0,89	0,87	0,85	0,78
	25					1,03	0,97	0,93	0,89	0,87	0,86	0,84	0,82	0,75
	30						0,95	0,91	0,86	0,85	0,83	0,81	0,78	0,72
	35										0,80	0,77	0,75	0,68
	40													0,64
70	5	1,29	1,22	1,15	1,09	1,13	1,08	1,04	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,86
	10	1,27	1,19	1,13	1,06	1,11	1,06	1,01	0,97	0,96	0,94	0,92	0,89	0,83
	15	1,25	1,17	1,10	1,03	1,08	1,03	0,99	0,94	0,93	0,91	0,88	0,86	0,79
	20	1,23	1,14	1,08	1,01	1,06	1,00	0,96	0,91	0,90	0,87	0,85	0,83	0,76
	25					1,03	0,97	0,93	0,88	0,87	0,84	0,82	0,79	0,72
	30						0,94	0,89	0,85	0,84	0,80	0,78	0,76	0,68
	35										0,77	0,74	0,72	0,63
	40													0,59
65	5	1,31	1,23	1,16	1,09	1,14	1,09	1,04	1,00	0,99	0,96	0,94	0,92	0,85
	10	1,29	1,20	1,14	1,06	1,11	1,06	1,02	0,97	0,96	0,93	0,91	0,89	0,82
	15	1,26	1,18	1,11	1,04	1,09	1,03	0,98	0,94	0,93	0,89	0,88	0,85	0,78
	20	1,24	1,15	1,08	1,01	1,06	1,00	0,95	0,90	0,90	0,86	0,84	0,82	0,74
	25					1,03	0,97	0,92	0,87	0,86	0,83	0,80	0,78	0,70
	30						0,94	0,89	0,83	0,82	0,79	0,77	0,74	0,65
	35										0,75	0,72	0,70	0,60
	40													0,55
60	5	1,33	1,24	1,17	1,10	1,15	1,09	1,05	1,00	0,99	0,96	0,94	0,92	0,84
	10	1,30	1,21	1,14	1,07	1,12	1,06	1,02	0,97	0,96	0,93	0,90	0,88	0,80
	15	1,28	1,19	1,12	1,04	1,09	1,03	0,98	0,93	0,92	0,89	0,87	0,84	0,76
	20	1,25	1,16	1,09	1,01	1,06	1,00	0,95	0,90	0,89	0,86	0,83	0,80	0,72
	25					1,03	0,97	0,92	0,86	0,85	0,82	0,79	0,76	0,67
	30						0,93	0,88	0,82	0,81	0,78	0,75	0,72	0,62
	35										0,73	0,70	0,67	0,57
	40													0,51

Çizelge 3.4: Toprak Altında Dizilme Şekline Göre Akım Taşıma Katsayısı f_2



	Sistem Sayısı	Toprak Öz direnci											
		0,7 Km/W			1,0 Km/W			1,5 Km/W			2,5 Km/W		
		Yüklenme Faktörü											
		0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7
XLPE Kablo 0,6/1 kV ile 18/30 kV arası	1	1,09	1,04	0,99	1,11	1,05	1,00	1,13	1,07	1,01	1,17	1,09	1,03
	2	0,97	0,90	0,84	0,98	0,91	0,85	1,00	0,92	0,86	1,02	0,94	0,87
	3	0,88	0,80	0,74	0,89	0,82	0,75	0,90	0,82	0,76	0,92	0,83	0,76
	4	0,83	0,75	0,69	0,84	0,76	0,70	0,85	0,77	0,70	0,82	0,78	0,71
	5	0,79	0,71	0,71	0,80	0,72	0,66	0,80	0,73	0,66	0,81	0,73	0,67
	6	0,76	0,68	0,68	0,77	0,69	0,63	0,77	0,70	0,63	0,78	0,70	0,64
	8	0,72	0,64	0,58	0,72	0,65	0,59	0,73	0,65	0,59	0,74	0,66	0,59
	10	0,69	0,61	0,56	0,69	0,62	0,56	0,70	0,62	0,56	0,70	0,63	0,57
PE Kablo 6/10 kV ile 18/30 kV arası	1	1,01	1,02	0,99	1,06	1,05	1,00	1,10	1,07	1,01	1,17	1,09	1,03
	2	0,95	0,90	0,84	0,98	0,91	0,85	1,00	0,92	0,86	1,02	0,94	0,87
	3	0,88	0,80	0,74	0,89	0,82	0,75	0,90	0,82	0,76	0,92	0,83	0,76
	4	0,83	0,75	0,69	0,84	0,76	0,70	0,85	0,77	0,70	0,86	0,78	0,71
	5	0,79	0,71	0,65	0,80	0,72	0,66	0,80	0,73	0,66	0,82	0,73	0,67
	6	0,76	0,68	0,62	0,77	0,69	0,63	0,77	0,70	0,63	0,78	0,70	0,64
	8	0,72	0,64	0,58	0,72	0,65	0,59	0,73	0,65	0,59	0,74	0,66	0,59
	10	0,69	0,61	0,56	0,69	0,62	0,56	0,70	0,62	0,56	0,70	0,63	0,57
PVC Kablo 0,6/1 kV ile 6/10 kV arası	1	1,01	1,02	0,99	1,04	1,05	1,00	1,07	1,06	1,01	1,11	1,08	1,01
	2	0,94	0,89	0,84	0,97	0,91	0,85	0,99	0,92	0,86	1,01	0,93	0,87
	3	0,86	0,79	0,74	0,89	0,81	0,75	0,90	0,83	0,76	0,91	0,83	0,77
	4	0,82	0,75	0,69	0,84	0,76	0,70	0,85	0,77	0,71	0,86	0,78	0,71
	5	0,78	0,71	0,65	0,80	0,72	0,66	0,80	0,73	0,66	0,81	0,73	0,67
	6	0,75	0,68	0,62	0,77	0,69	0,63	0,77	0,70	0,64	0,78	0,70	0,64
	8	0,71	0,64	0,58	0,72	0,65	0,59	0,73	0,65	0,59	0,73	0,66	0,60
	10	0,68	0,61	0,55	0,69	0,62	0,56	0,69	0,62	0,56	0,70	0,63	0,57
Yağ Emdirilmiş Kağıt Kablo 0,6/1 kV ile 6/10 kV arası	1	0,94	0,95	0,97	0,99	0,99	1,00	1,06	1,04	1,01	1,15	1,08	1,02
	2	0,88	0,88	0,84	0,93	0,91	0,85	0,97	0,92	0,86	1,01	0,93	0,87
	3	0,84	0,79	0,74	0,87	0,81	0,75	0,90	0,82	0,76	0,91	0,83	0,76
	4	0,82	0,74	0,69	0,84	0,76	0,70	0,85	0,77	0,71	0,86	0,78	0,71
	5	0,78	0,70	0,65	0,79	0,72	0,65	0,80	0,73	0,66	0,81	0,73	0,67
	6	0,75	0,68	0,62	0,76	0,69	0,63	0,77	0,70	0,63	0,78	0,70	0,64
	8	0,71	0,64	0,58	0,72	0,64	0,58	0,72	0,65	0,59	0,73	0,66	0,59
	10	0,68	0,61	0,55	0,69	0,61	0,56	0,69	0,62	0,56	0,70	0,62	0,56
		Yüklenme Faktörü											
	0,85	1,0		0,85	1,0		0,85	1,0		0,85	1,0		
Bütün Kablo Tipleri İçin	1	0,93	0,87		0,93	0,87		0,93	0,87		0,93	0,87	
	2	0,77	0,71		0,77	0,71		0,77	0,71		0,77	0,71	
	3	0,67	0,61		0,67	0,61		0,67	0,61		0,67	0,61	
	4	0,62	0,56		0,62	0,56		0,62	0,56		0,62	0,56	
	5	0,58	0,52		0,58	0,52		0,58	0,52		0,58	0,52	
	6	0,55	0,50		0,55	0,50		0,55	0,50		0,55	0,50	
	8	0,51	0,46		0,51	0,46		0,51	0,46		0,51	0,46	
	10	0,49	0,44		0,49	0,44		0,49	0,44		0,49	0,44	

3.3 Yükleme Kapasitesi Hesabı

Kablolar üzerlerinden geçen akım ile ısınmaya başlarlar. Kablodan alternatif akım geçtiği durumlarda, ısınma ile oluşan kayıplara metal kılıftaki kayıplar da eklenir. Dielektrik kayıpları, gerilimler aşağıda belirtildiği şekilde olduğu durumlarda ihmal edilebilir [30].

- PVC kablolarda $U_0/U = 3,5/6$ kV'ya kadar
- Yağ emdirilmiş kâğıt yalıtımlı kablolarda $U_0/U = 18/30$ kV'ya kadar
- PE veya XLPE kablolar için ise $U_0/U = 64/110$ kV'ya kadar

Normal koşullarda, kablodan çıkan ısı enerjisi, kabloda oluşan kayıplara eşittir. Bu kabul sayesinde ısınma hesaplamaları yapılabilmektedir. Kablo yüzeyde hava ile temas halinde ise, taşıma ve ısıtım ile ısı geçişi gerçekleşir.

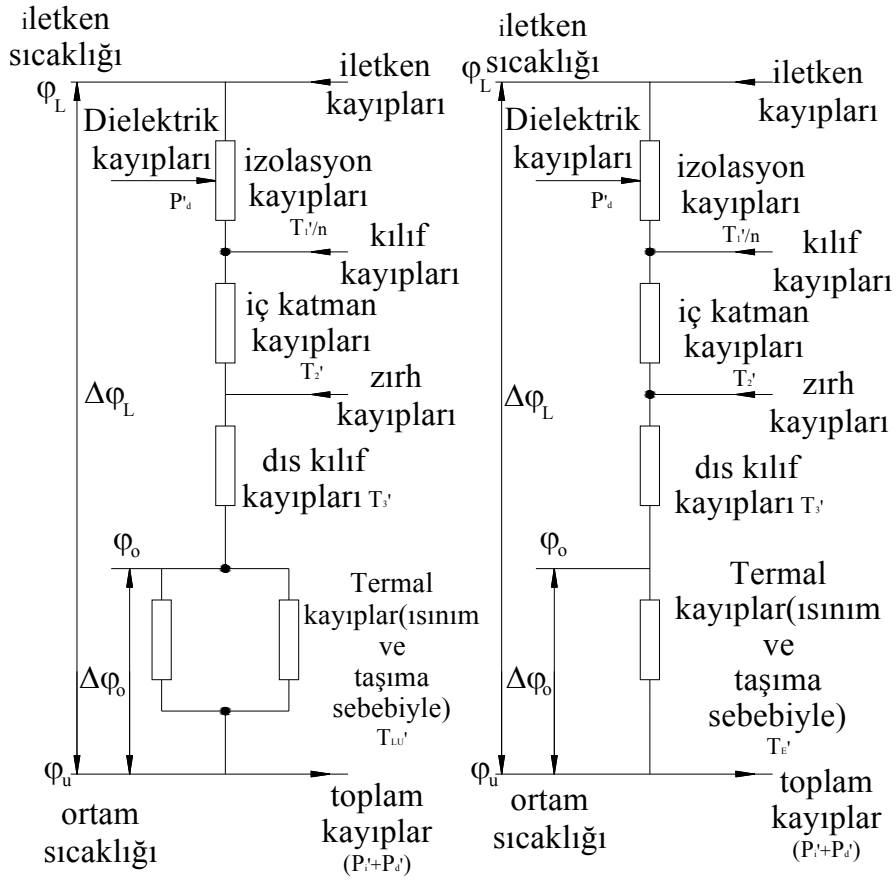
Kablo toprağa gömülü ise, kabloda oluşan ısı enerjisi kablodan toprağa, topraktan da geçerek atmosfere yayılır. Termodinamiğin sıfırıncı yasasına göre, atmosfer çok büyük bir kütle olduğu için (elektrikte toprağın mutlak sıfır olduğu kabulündeki gibi) toprak yüzey sıcaklığı havanın sıcaklığına eşit olarak kabul edilir [22]. Ortam sıcaklığı ile kablo iletkeninin sıcaklığı arasındaki fark, kayıpların büyüklüğü ile orantılıdır.

Gerilimden kaynaklanan dielektrik kayıpları (P'_d) ve iletkeniden geçen akımdan kaynaklanan ısı kayıpları (P'_i), kayıp ısıya eşittir. Kabloda oluşan ısı direnç T'_k ve kablodan çıkan ısı ortam ile arasında oluşturduğu ısı direnç T'_4 olarak adlandırılır.

Kabloda çıkan ısı ortam ile oluşturduğu ısı direnç havada olması durumunda; T'_L , toprakta olması durumunda ise T'_E adını alsın. Elektrik akımı analojisinden yararlanarak Şekil 3.5 oluşturulur. Şekil 3.5 kablolarda oluşan ısı ortam ile dışarı atılması sırasında karşılaştığı dirençlerin anlaşılmasını sağlar.

İletkendeki kayıplar (P'_i) elektrikteki güç kaybı formüllerinden denklem (3.10)'daki gibi bulunur.

$$P'_i = nI^2 R_{wr} \quad (3.10)$$



a) Kablo havada iken

b) Kablo toprağa gömülü halde iken

Şekil 3.5: Kablolarda Isı Akışı İçin Eşdeğer Devre

Bu formülde, I kablodan geçen akımı, n iletken sayısını; R_{wr} ise kabloda oluşan alternatif akım direncini göstermektedir. Dielektrik kayıpları (P_d') ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$P_d' = n\omega C_b' \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \tan \delta \quad (3.11)$$

Formülde; ω açısal frekans ($2\pi f$), C_b' kablonun birim uzunluğunun kapasitesi, U fazlar arası gerilim ve $\tan \delta$ dielektrik kayıp faktörüdür. Hesaplarda kullanılacak NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun gerilim seviyesi, “PVC kablolarda $U_o/U = 3,5/6$ kV’a kadar dielektrik kayıpları ihmal edilebilir” bilgisine uyduğu için, dielektrik kayıpları hesaplarda olmayacaktır.

Kablonun akım taşıma kapasitesi hesaplanırken elektriksel güç formülleri kullanıldığı için kablonun alternatif akım direncinin hesaplanması gerekir. Alternatif akım direnci IEC 60287-1-1’e göre denklem (3.12)’deki gibi hesaplanır [13].

$$R'_{wr} = R'_\theta + \Delta R' = R'_\theta (1 + y_s + y_p)(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.12)$$

Denklemde; R'_θ kablonun θ sıcaklık derecesindeki doğru akım direncidir ve aşağıdaki şekilde bulunur;

$$R'_\theta = R'_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta_L - 20)] \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'de, α_{20} iletkenin 20°C deki sıcaklık katsayısıdır ve bakır için değeri $3.93 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ 'dır. θ_L ise direnç değerinin öğrenilmek istendiği sıcaklık değeridir (K). Hesaplarda kullanılacak NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablo PVC olduğu ve malzemenin en fazla 70°C'ye dayanabildiği için (Çizelge 2.1) θ_L 70°C olarak alınır.

Denklem (3.12)'de y_s deri etkisini, y_p yakınlık etkisini, λ_1 metal kılıfta oluşan eddy akımları etkisini; λ_2 ise zırhtaki girdap akımlarını etkisi ifade etmektedir. Örnek 3.2'de alternatif akım direnci hesabı bulunmaktadır.

Örnek 3.2

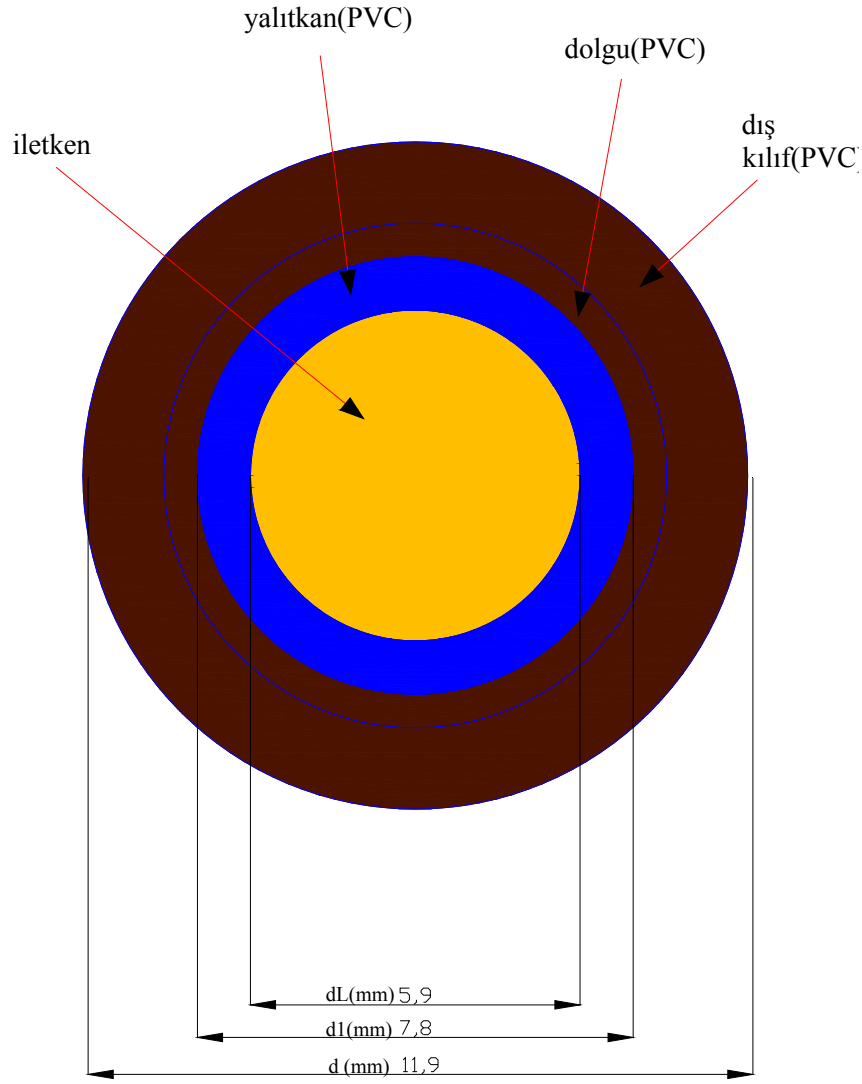
NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV için Alternatif Akım Direnç Hesabı

Hesaba geçilmeden önce, Şekil 3.6'da kesiti gösterilen kablonun özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Özellikleri

Anma Kesiti	25	mm ²
İletkenin Biçimi	RM	çok telli
Yalıtkan	PVC	
Yalıtkan Kalınlığı	1,2	mm
Dolgu Kalınlığı		
Dış Kılıf	1,8	mm
İletken Çapı	6,4	mm
Kablo Referans Çapı (Hesaplarda Kullanılacak Çap)	11,9	mm
Kablo Ağırlığı	395	kg/km
DC Direnci/Birim Uzunluk Başına 70°C de	0,870	Ω/km
DC Direnci/Birim Uzunluk Başına 20°C de	0,727	Ω/km

Kablonun 20°C'deki doğru akım direnç değerini bulmak için denklem (2.11) kullanılmalıdır. Elektriksel direnç ve sıcaklık katsayıları için Çizelge 3.6'daki değerler kullanılacaktır.



Şekil 3.6: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Kesiti

Çizelge 3.6: IEC 60287-1-1'e göre Elektriksel Özdirençler ve Sıcaklık Katsayıları

Malzeme	Özdirenç(ρ) 20°C de (ohm. mm ² /km)	Sıcaklık Katsayısı(°20) 20°C de [°K]
Bakır	17,241	0,00393
Alüminyum	28,264	0,00403

Bu verilere göre ilk olarak 20°C'deki doğru akım direnci denklem (3.14) ile bulunur.

$$R'_{20} = \frac{\rho * l}{s} \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'de ρ Çizelge 3.6'dan alınır (bakır için); l birim uzunluktur (m); s ise kablunun iletken kesitidir (mm²). Kablunun 20°C'deki elektriksel direnci;

$$R'_{20} = \frac{0,01724 * 1}{25} = 0,68 \Omega / km \quad (3.15)$$

olarak bulunur. İletkenin, iletkenlik özelliğın %100 saf olmayışı ve üretim aşamaları da dikkate alındığında %5~10 arasında bir emniyet katsayısı alınır. Emniyet katsayısı %7 alınırsa [31];

$$R'_{20} = 0,68 * 1,07 = 0,727 \Omega / km \quad (3.16)$$

olarak bulunur.

20°C'deki doğru akım direncinden, 70°C'deki doğru akım direncine, denklem (3.13)'e göre geçebilir.

$$R'_{70} = 0,727 [1 + 3.93 * 10^{-3} (70 - 20)] = 0,868 \Omega / km \quad (3.17)$$

olarak bulunur.

Doğru akım direncinde alternatif akım direncine geçebilmek için, y_s (deri etkisini), y_p (yakınlık etkisini), λ_l (metal kılıfta oluşan eddy akımlarının etkisini) ve λ_2 'yi (zırhtaki girdap akımlarının etkisi) bulmak gerekir.

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun yapısında metal kılıf ve zırh bulunmadığı için sadece y_s ve y_p 'yi bulmak yeterli olacaktır. Deri etkisi ve yakınlık etkisini bulmak için k_s ve k_p katsayıları ile ilgili çizelgeden faydalanmak gereklidir.

Çizelge 3.7: IEC 60287-1-1'e Göre k_s ve k_p Katsayıları

İletken Tipi	Kuru veya Değil	k_s	k_p
Bakır			
Yuvarlak Sıkıştırılmış İletken	Evet	1	1
Yuvarlak Sıkıştırılmış İletken	Hayır	1	0,37
Yuvarlak Dilimli		0,435	0,8
Sektör	Evet	1	0,8
Sektör	Hayır	1	1
Alüminyum			
Yuvarlak Sıkıştırılmış İletken	Her ikisi de		
Yuvarlak 4 Dilim	Her ikisi de	1	
Yuvarlak 5 Dilim	Her ikisi de	0,28	
Yuvarlak 6 Dilim	Her ikisi de	0,19	
Sektör	Her ikisi de	0,12	

Deri etkisi:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (3.18)$$

$$x_s^2 = \frac{8 \times \pi \times f}{R'_{70}} 10^{-7} k_s \quad (3.19)$$

k_s değeri Çizelge 3.7'den 1 (bir) olarak seçilir (yuvarlak sıkıştırılmış iletken, kuru), R'_{70} ise 70°C'deki doğru akım direncidir ve denklem (3.17)'de 0,868 Ω/km olarak hesaplanmıştır. Denklem (3.19)'da, denklem (3.17)'deki değer yerine yazılırsa;

$$x_s^2 = \frac{8 \times 3,14 \times 50}{0,868 \times 10^{-3}} 10^{-7} \times 1 = 0,144 \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'de bulunan değer, denklem (3.18)'de yerine yazılırsa,

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} = \frac{0,144^4}{192 + (0,8 \times 0,144^4)} = 0,11 \times 10^{-3} \quad (3.21)$$

olarak bulunur.

Yakınlık etkisi:

Yakınlık etkisi, kabloların demet halinde ve sıralı halde olması durumunda değişir. Bu değişiklik hesaplamalarda belirtilmeyecektir. Hesaplamalarda kabloların demet halinde monte edilmesi göre yakınlık etkisi yapılacaktır. Yakınlık etkisinin, demet halde, sıralı hale göre daha fazla olacağı dikkate alındığında, hesaplamaların güvenilir olduğu anlaşılabacaktır. Demet hale göre yakınlık etkisini hesaplanması, denklem (3.22)'de bulunmaktadır.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (3.22)$$

d_c iletken çapını belirtmektedir.

$$x_p^2 = \frac{8 \times \pi \times f}{R'_{70}} 10^{-7} k_p \quad (3.23)$$

k_p sayısını Çizelge 3.7'den alınacaktır. Denklem (3.23)'teki değeri, Denklem (3.22)'de yerine yazılırsa;

$$x_p^2 = \frac{8 \times 3,14 \times 50}{0,868 * 10^{-3}} 10^{-7} * 1 = 0,144 \quad (3.24)$$

Bulunan değere göre, deri etkisini denklem (3.22)'den aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$y_p = \frac{0,144^4}{192 + (0,8 * 0,144^4)} \left(\frac{6,4}{25} \right)^2 \times \left[0,312 \left(\frac{6,4}{25} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{0,144^4}{192 + (0,8 * 0,144^4)} + 0,27} \right] \quad (3.25)$$

$$= 0,14 * 10^{-3}$$

Denklem (3.21) ve (3.25)'teki değerler, denklem (3.12)'de yerine yazılırsa,

$$R'_{wr} = R'_{70} (1 + y_s + y_p) (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.26)$$

$$= 0,868 * 10^{-3} (1 + (0,11 * 10^{-3}) + (0,14 * 10^{-3})) = 0,870 \Omega / km$$

olarak bulunur. Denklem (3.26)'daki alternatif akım direnci (R'_{wr}) değeri denklem (3.10)'da yerine yazılırsa, NY 1 x 25mm² 0,6/1 kV kablo için elektriksel kayıp gücü olan, diğer bir deyiş ile ısıya dönüşen elektriksel gücü bulunmuş olur.

Kablonun akım taşıma kapasitesi bilinmediği için, elektriksel kayıp gücü de bulunamayacaktır. Elektriksel kayıp gücü, kaybolan ısı enerjisini kullanarak da bulmak mümkündür. Böylece tersten gidilmiş olacaktır.

İlk olarak kablo ve etrafında bulunan ortamın ısı dirençleri hesaplanacaktır. İletkenin çıkabileceği maksimum sıcaklık yalıtkan malzemeye bağlı olduğundan bilinmektedir.

Ortam sıcaklığı da bulunabileceğine göre, iletkenin dışarıya çıkan ısı enerjisi bulunmuş olacaktır. Bu ısı enerjisi aynı zamanda kablodaki ısıya dönüşen kayıp enerjidir. Böylece kayıp güçten, kablonun akım taşıma kapasitesine geçilmektedir. İletken ve ortam sıcaklığı bilindiğine göre, kablo ve etrafındaki ortamın ısı dirençleri bulunmalıdır.

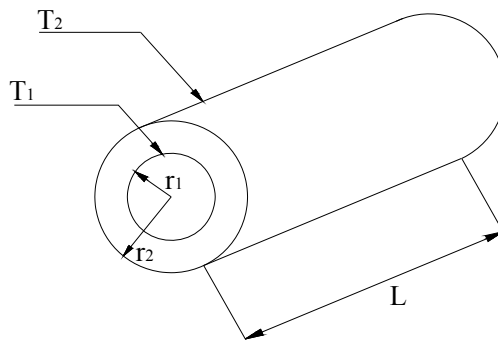
3.3.1 Kablonun ısıl direncinin hesaplanması

Denklem (2.11)'de belirtilen ısıl direnç formülü, düzlemsel yüzeyler için geçerlidir. Kabloların ısıl direncini hesaplarken, radyal ısı dağılımı olacağı için silindirselsel hesaplama formülleri kullanılmalıdır.

3.3.1.1 Silindirselsel formüllerin elde edilmesi

a) Tek tabakalı silindirselsel sistemlerde ısı geçişi

Şekil 3.7'de, bir kablunun basit modellemesi görülmektedir.



Şekil 3.7: Bir Tabakalı Silindirselsel Sistem

Şekil 3.7'de r_1 iç yarıçap (mm); r_2 dış yarıçap (mm), T_1 içteki malzemenin sıcaklığı (C), T_2 dıştaki malzemenin sıcaklığı (C) ve L harfi de uzunluktur (m). Böyle bir sistemin Fourier açılımı denklem (3.27)'deki gibidir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.27)$$

Denklem (3.27)'den anlaşılacağı üzere, T sıcaklığı z , θ , t 'ye göre değişmektedir. Ancak kablolar için bu anlamda bir değişim söz konusu değildir. Hesaplamalarda temel olacak diferansiyel denklem;

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.28)$$

dır. Bu durum statik kararlı hal durumudur. Denklem (3.28)'den çıkarılacak bir sonuç, eş eksenli silindirselsel sistemde T sıcaklığı, r değişkenine bağlıdır. Bu denklemden $r = r_1$; $T = T_1$; $r = r_2$ ve $T = T_2$ sınır koşulları yazılıp genel çözüme geçilirse;

$$r \frac{\partial T}{\partial t} = C_1 \quad (3.29)$$

ise;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{C_1}{r} \quad (3.30)$$

denklemin integrali alınır;

$$T = C_1 \ln r + C_2 \quad (3.31)$$

olarak bulunur. C_1 ve C_2 katsayılarını bulmak için sınır koşulları kullanılırsa,

$$T_1 = C_1 \ln r_1 + C_2 \quad (3.32)$$

$$T_2 = C_1 \ln r_2 + C_2 \quad (3.33)$$

denklemleri elde edilir. Buradan C_1 ve C_2 katsayıları;

$$T_1 - T_2 = C_1 (\ln r_1 - \ln r_2) = C_1 \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (3.34)$$

$$C_1 = \frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \quad (3.35)$$

C_1 , denklem (3.33)'de yerine yazılırsa;

$$T_2 = \frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \ln r_2 + C_2 \quad (3.36)$$

Denklem (3.36)'dan C_2 çekilirse;

$$C_2 = T_2 - \frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \ln r_2 \quad (3.37)$$

olarak bulunur. Denklem (3.31)'de C_1 ve C_2 yerine yazılırsa,

$$T = \frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \ln r + T_2 - \frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \ln r_2 \quad (3.38)$$

devamında ise;

$$T = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln(r/r_2) + T_2 \quad (3.39)$$

Diğer bir yazılışla;

$$\frac{T - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_2}\right)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (3.40)$$

elde edilir. Silindirsels sistemin radyal ısı akış yoğunluğu (W/m²)

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial r} = -k \frac{1}{r} \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (3.41)$$

olarak bulunur. Eğer alan biliniyor ise ($A = 2\pi rL$), kesitten geçen toplam ısıya denklem (3.42) kullanarak bulunabilir;

$$q_x = q_x'' * A = 2\pi rL \left[-k \frac{1}{r} \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \right] = \frac{2\pi kL}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} T_1 - T_2 \quad (3.42)$$

ve denklem (3.42)'de, oluşan sıcaklık farkı;

$$(T_1 - T_2) = \Delta T = \frac{q_x}{2\pi kL} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.43)$$

ile bulunur. Denklem (3.43)'den, radyal sistemlerdeki ısı direnç kısmı çıkartılırsa;

$$R_m = \frac{1}{2\pi kL} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.44)$$

elde edilir.

b) Çok tabakalı silindrsel sistemlerde ısı geçişi:

Birden çok tabakadan geçen ısı, üzerinden geçtikleri tabakalara dik doğrultuda ise, bu tabakaların seri bir şekilde düşünülmesini ortaya çıkarır. Bütün tabakaların ısıl dirençleri ayrı ayrı bulunup, daha sonra seri bir şekilde toplanır. Hesaplamalarda kullanılacak NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablodaki katmanların hepsi PVC olduğu için tek bir ısıl direnç olarak düşünülecektir.

$$T'_{ki} = \frac{1}{2\pi k_{pvc} L} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (3.45)$$

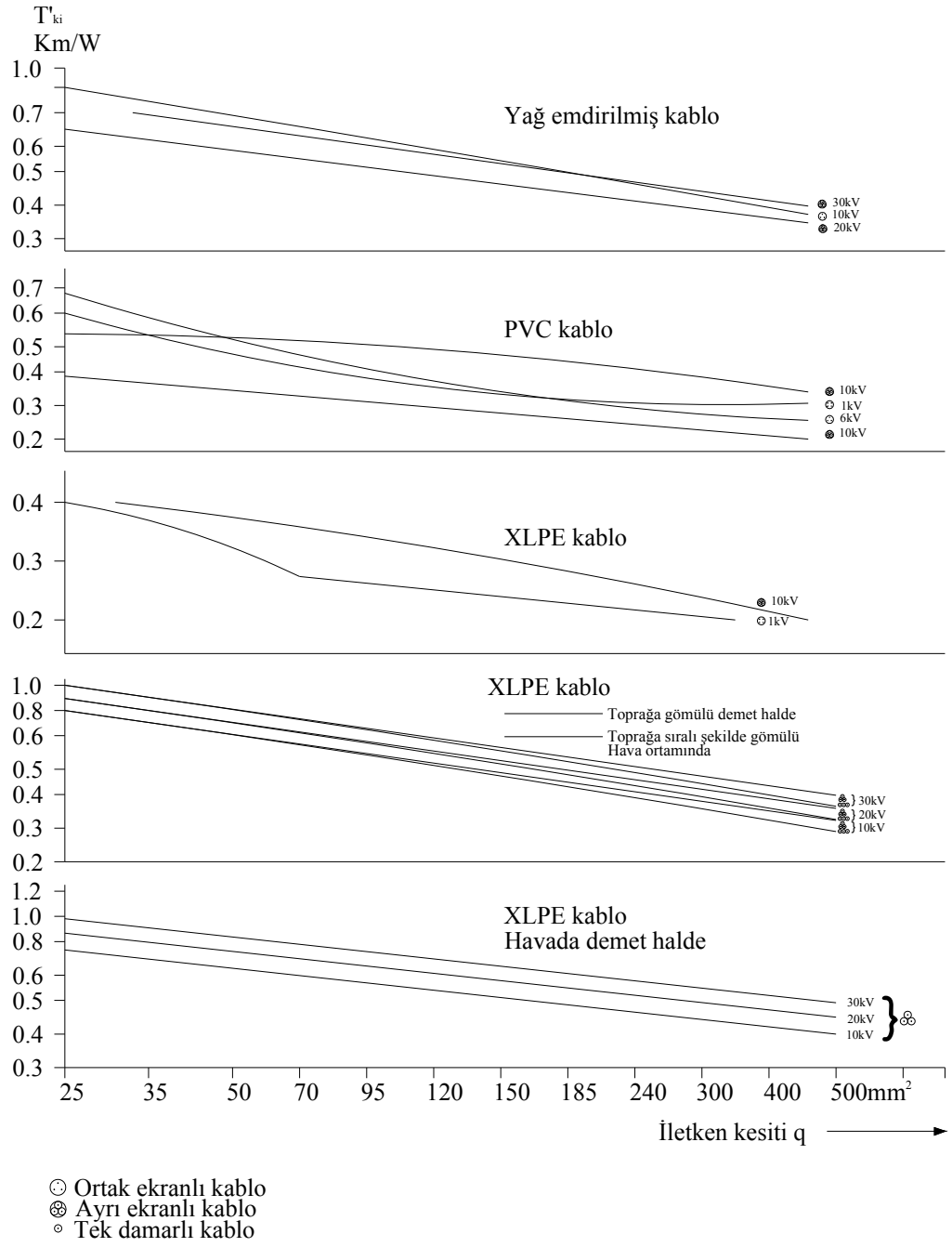
Denklem (3.45)'deki k_{pvc} değeri izelge 2.1'den 6.0 Km/W olarak seçilir. Bu durumda kablonun ısıl direnci;

$$T'_{ki} = \frac{1}{2\pi k_{pvc} L} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \frac{6}{2 * 3,14 * 1} \ln\left(\frac{11,9}{5,9}\right) = 0,670 Km/W \quad (3.46)$$

olarak bulunur.

Denklem (3.46) ile bulunan ısıl direnç değeri, kablonun bulunduğu ortama göre havada veya toprakta, ya da dizilme şekline göre, demet halinde veya sıralı şekilde monte edilmesine göre değişmektedir. Ancak bu değişim çok küçük bir etki oluşturduğu için hesaplamalarda dikkate alınmamıştır [21].

şekil 3.8'de kabloların ısıl dirençlerinin kesite, dizilme şekline, yalıtım malzemesine ve yalıtım gerilimine göre değişimleri gösterilmiştir. şekil 3.8, bu bölümde açıklanan hesaplardan yola çıkılarak bulunmuş değerlerin birleştirilmesinden oluşmuştur. Mühendislerin, hesaplamalarda zaman kazanması açısından şekil 3.8'in kullanılması daha uygundur. Aksi halde, karmaşık hesaplamalar sebebiyle hata yapma olasılığı vardır.



Şekil 3.8: Kabloların Kesitlerine, Yalıtkan Malzemelerine ve Ortam Koşullarına Göre Isıl Dirençleri [21]

4. ORTAM KOŞULLARINA GÖRE ISIL DİRENÇ VE KABLOLARIN AKIM TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESAPLAMALARI

Ortam koşullarına ve montaj şekillerine göre ısı dirençler değişmektedir. Bu değişimin sebebi malzemelerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kimi malzemeler ısıyı kolay geçirirken kimi malzemeler ısıyı iyi muhafaza ederler ve bu malzemelere ısı dirençleri yüksek malzemeler denir [19]. Bu tür malzemeler, genellikle mekanik tesisatlarda makine mühendislerinin işlerine çok ciddi anlamda yarayan, ısı kaçmasını önleyen yalıtım malzemeleridir. Elektrik kabloları için ısının dışarıya kolay atılamaması çoğu zaman gereksiz masraflar ortaya çıkardığı için yalıtım malzemeleri bu açıdan faydasızdır, hatta zararlıdır.

Konuyu açıklamak için ısı dirençlerin havada, toprakta ve suda bulunması gibi değişik koşullarda elde edilmesi ve bu ısı dirençlerin, kablonun akım taşıma kapasitesini ne derece etkilediğinin bilinmesi gerekmektedir.

4.1 Havanın Isıl Direncinin Hesabı

Havanın ısı direnci, birkaç farklı parametreden etkilenmektedir. Belli başlıları, havanın sıcaklığı, nem oranı, rüzgâr hızı, açık hava basıncı, kabloların montaj şekli gibi parametreler olduğunu söylenebilir. Nemin diğer etkilere (havanın sıcaklığı, rüzgârın hızı, açık hava basıncı, kabloların montaj şekli) oldukça düşük bir etkisi olması sebebiyle incelemelerde ihmal edilecektir [30].

4.1.1 Yatay montaj şekillerine göre havanın ısı direnç hesabı

Havada bulunan kablolarda ısı geçişi, taşınım ve ışıma ile gerçekleşir. Şekil 3.5'deki eşdeğer devreden bu açık bir şekilde görülmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus, taşınım ve ışıma ile oluşan direncin seri değil, paralel şekilde düşünülmesi gerektiğidir. Bu durumda havanın ısı direnci denklem (4.1)'deki gibi bulunur.

$$T'_{Lu} = \frac{1}{\pi d(f_k \alpha_k + f_s \alpha_s)} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de f_k taşıma ile ısı geçişi katsayısı ve f_s ışıma ile ısı iletim katsayısıdır (Şekil 4.1). Kabloda güneş ışınlarından kaynaklanan solar radyasyon ile ısı geçişinin olmadığı, sadece taşıma ile ısı geçişine izin verildiği ve 1013 hPa (hektopaskal) basınç altında (deniz seviyesinde) bir ortam düşünölsün. Bu durumda kabloda oluşan ısı, kablodan dışarıya doğru, kablonun nasıl dizildiğine (demet halinde mi, sıralı halde mi yoksa tek halde mi?) ve doğal taşınımına bağılı olarak iletilecektir.

α_k , kuru (nemsiz) havada ısı iletim katsayısıdır.

$$\alpha_k = k' \frac{0,0185}{kd} + k'' 1,08 \left(\frac{\Delta \vartheta_0}{kd} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

$$k' = 0,919 + \frac{\vartheta_m}{369} \quad k'' = 1,033 - \frac{\vartheta_m}{909} \quad (4.3)$$

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_0 + \vartheta_u}{2} \quad \Delta \vartheta_0 = \vartheta_0 - \vartheta_u \quad (4.4)$$

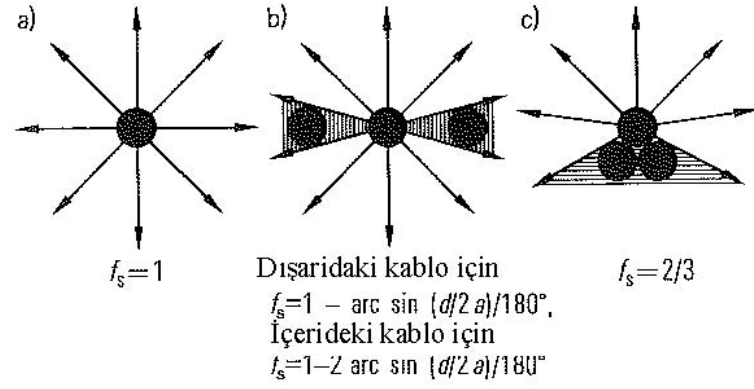
α_s , Işıma için ısı iletim katsayısıdır.

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_0 \sigma [(273 + \vartheta_0)^4 - (273 + \vartheta_u)^4]}{\Delta \vartheta_0} \quad (4.5)$$

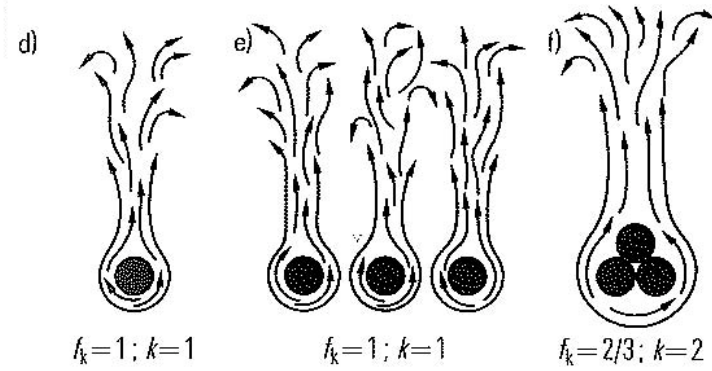
Denklem (4.5)'de; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ (Stefan Boltzmann sabiti) ve ε_0 kablonun emisyonudur. Bu değör, Bölüm 3'ün sonunda açıklanmıştır. Kablolar için bu değör 0,95 olarak seçilir [11]. k' ve k'' faktörleri, ortam sıcaklığına göre değışmektedir.

Denklem (4.1)'deki f_k , f_s ve k değörleri kablonun montaj şekillerine göre değışmektedir. Şekil 4.1'de montaj şekline göre f_k , f_s ve k değörlerinin değışimleri ve değörleri gösterilmektedir.

Şekil 4.1'den anlaşılacağı üzere, kabloların aralarında ne kadar az boşluk bırakılırsa havanın ısıl direnci de o kadar düşük olacaktır. Şekil 4.1a'da tek bir kablonun havada monte edilmiş hali görölmektedir. Isı dışarıya ışıınım ile çıkmaktadır ve kablonun hiçbir yüzeyi kapalı olmadığı için f_s katsayısı 1 olarak kalır. Yani ışıınımın olmasına bir engel yoktur.



İşıma ile ısı Geçişi



Taşıma ile ısı Geçişi

Şekil 4.1: Havada Doğal Taşıma ile Isı Geçişleri

Uygulamada, kabloların etrafında bir duvar ya da başka bir ortam da bulunabilir. Kablonun duvara yakınlığının da etkisini anlatmak faydalı olacaktır. Kablo duvara yaklaştıkça akım taşıma kapasitesi %5 civarında azalmaktadır [21]. Bu değer her türlü montaj şekli için geçerlidir.

Şekil 4.1b ve Şekil 4.1c'yi kıyaslanırsa, ısıtımın etkisinin demet halindeki kabloda daha düşük olduğu görülecektir. Bunun sebebi, kabloların yüzeylerinin büyük kısmının hava ile temasının olmamasıdır. Bu durumda ısıtım ile ısı geçişi ciddi anlamda azalacaktır ve bunun sonucunda havanın ısıl direnci artacaktır. Kabloların sıralı dizilmesi halinde bile, ısıtım çizgileri birbirini engeller ve bunun sonucunda da havanın ısıl direnci artar.

Şekil 4.1d'de tek kablonun taşıma ile ısı geçişi gösterilmiştir. Kablonun etrafında herhangi bir başka ısı kaynağı veya kablo bulunmadığı için, kablonun doğal taşıma

ile ısı geçişi engellenmemiştir. Bu engellenmeme şekil 4.1e’de de grlmektedir. Her ne kadar şekil 4.1e’de f_k , değeri değişmiyor gibi gözükse de, kablo aralarındaki mesafe azaldıkça f_k , değeri de azalacaktır. şekil 4.1f’de demet halinde kablonun etrafındaki sıcak hava dağılımı bulunmaktadır. Oluşan sıcak hava, kabloların üzerine geldiği için, havanın ısıl direncini artırmaktadır. Yüzey alanının açık olmasının önemi gösterilmiştir. Kabloların serinleyebilecekleri alan 1/3 oranında düşmüştür ve bu oran havanın ısıl direncini artırmaktadır.

Bu bilgilere göre kablonun üzerindeki sıcaklık ile ortam koşulu ile arasındaki sıcaklık farkı ($\Delta \theta_0$) denklem (4.6)’daki gibi bulunur.

$$\Delta \theta_0 = \frac{(\theta_L - \theta_u - \Delta \theta_d) T'_{Lu}}{T'_{ki} + T'_{Lu}} + P'_d T'_{Lu} \quad (4.6)$$

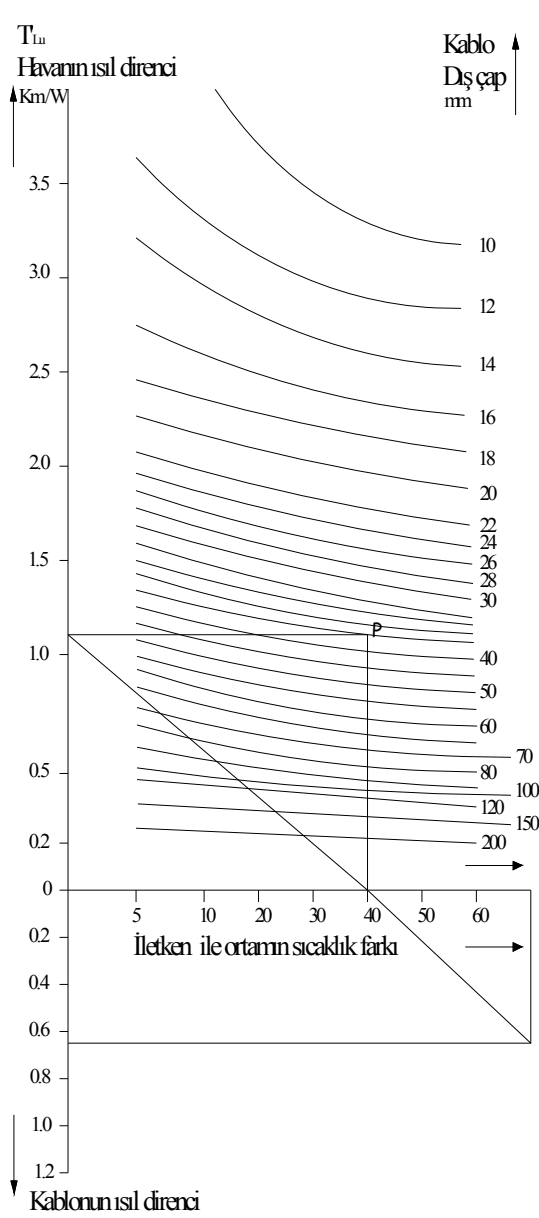
Formülde d indisi ile belirtilen değerler dielektrik kayıpları ile ilgilidir. NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun gerilim seviyesi, 4.3 numaralı başlıkta anlatıldığı üzere, dielektrik ihmal edilebilir. Bu durumda elde edilecek yeni denklem,

$$\Delta \theta_0 = \frac{(\theta_L - \theta_u) T'_{Lu}}{T'_{ki} + T'_{Lu}} \quad (4.7)$$

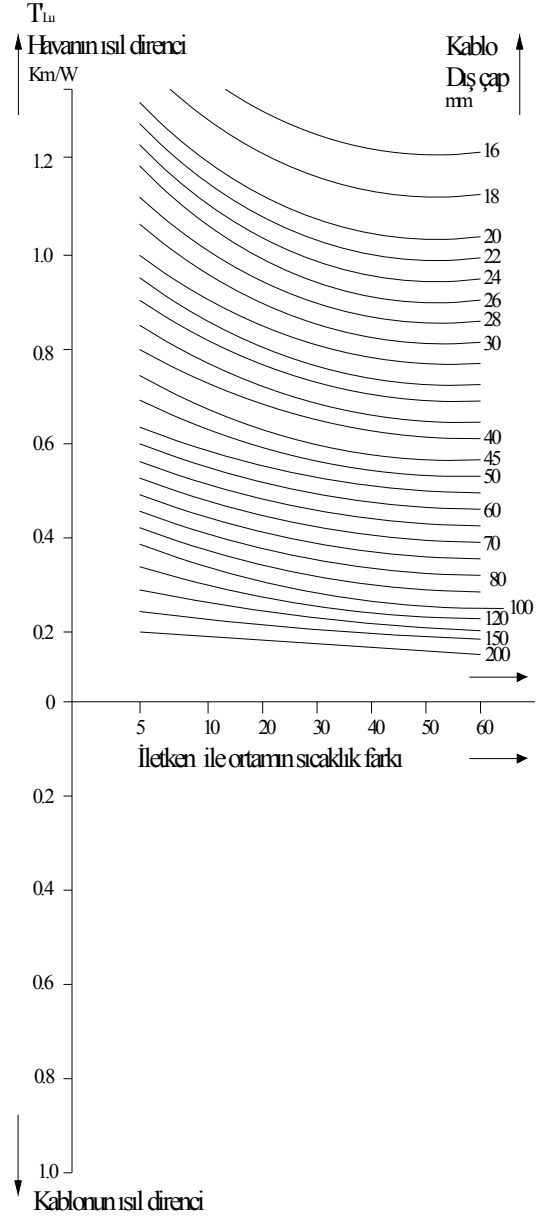
olacaktır.

Havanın ısıl direncini bulabilmek α_k değerinin de bilinmesi gerekmektedir. Denklem (4.3)’den görüleceği üzere, bu değerin bulunabilmesi için θ_m değerinin de bulunması gerekir ki kablo kılıf sıcaklığı (θ_o) bilinmediği için, θ_m değerini bulmak imkansızdır. Bu durumda şekil 4.2 deki grafikler kullanılır ve iterasyon yöntemine geçilir.

Havanın ısıl direncinin, şekil 4.2’den yararlanarak iterasyon da kullanılabilmesi için, ilk olarak kablo kesiti, montaj şekli ve kablonun ısıl direnci bilinmelidir. Bu bilgiler elde edildikten sonra, kablonun iletken sıcaklığı ile ortamın sıcaklığı arasındaki fark bulunmalıdır. İletken ile ortam sıcaklığı bulunduktan sonra, iletken sıcaklığı ile kablonun ısıl direncinin x ve y ekseninde keşiştiği nokta bulunur. Bu noktadan, kablonun kesitine göre değişen eğrilerden, kullanılacak kablonun kesitine göre olan eğri seçilir ve eğrinin havanın ısıl direnci ekseni ile keşiştiği nokta seçilir. Havanın ısıl direnci ekseninde oluşan bu noktadan, P noktasına bir doğru çizilir.



a) Demet halinde



b) Sıralı halde

Şekil 4.2: Havanın Isıl Direncinin, Yatay Halde Hava Ortamında Bulunan Kablolar İçin Değerleri [21]

Bu çizginin x eksenin kestiği nokta kablo yüzeyi ile ortamın arasındaki sıcaklık değeri olarak alınır ve iterasyona sokulur. İterasyona giren sıcaklık değeri ile havanın yeni ısıl direnci hesaplanır ve iterasyona sokulan ile aynı olup olmadığına bakılır. Hemen hemen aynı olana kadar bu işlem tekrar edilir. Böylece hem ortam ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı hem de havanın ısıl direnci bulunmuş olur.

Şekil 4.2'nin daha iyi anlaşılması için Örnek 4.1'in incelenmesi faydalı olacaktır.

Örnek 4.1

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun havada demet halinde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), havanın ısıl direnci (T'_{Lu}) ve hava ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta \vartheta_0$) bulunması.

Çizelge 4.1’de problemin verileri belirtilmiştir.

Çizelge 4.1: Örnek 4.1’in Verileri

Açıklama	Birim	Miktar
Kablonun Isıl Direnci	(K.m/W)	0,670
Kablonun Kesit	(mm ²)	25
Hava Sıcaklığı	(°C)	30
Kablonun İletken Sıcaklığı	(°C)	70
Montaj Şekli		Demet
Rüzgâr Hızı	(m/sn)	0
Güneş Etkisi (Işıma Etkisi E)	(k.W/ m ²)	0
Açık Hava Basıncı	(hPa)	1013

Çizelge 4.1’deki verilere göre denklem (4.7)’de eksik kalan yer olan havanın ısıl direnci, Şekil 4.2’den bulunur. Şekil 2, Örnek 4.1 için çizilirse Şekil 4.3 elde edilmiş olur. Bu durumda havanın ısıl direnci 3.2 K.m/W ve ortam ile kablo yüzeyi arası sıcaklık 32.07°C’dir. Denklem (4.7)’den;

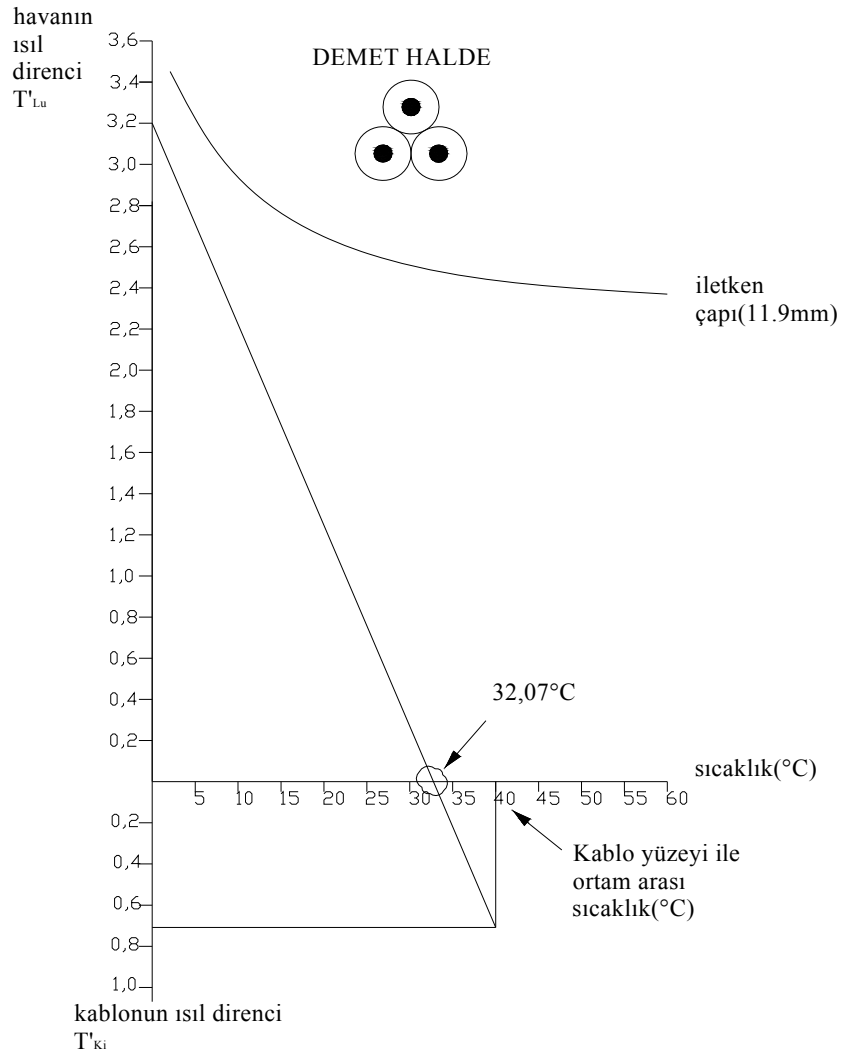
$$\Delta \vartheta_0 = \frac{(\vartheta_L - \vartheta_u) T'_{Lu}}{T'_{ki} + T'_{Lu}} = \frac{(70 - 30) 3,2}{0,67 + 3,2} = 33,07^\circ C \quad (4.8)$$

olarak bulunur. Isıl direnci denklem (4.8)’de bulunan sıcaklık farkına göre tekrar bulunursa;

1. aşama, ϑ_0 ve ϑ_m bulunur;

$$\vartheta_0 = 30 + 33,07 = 63,07^\circ C \quad (4.9)$$

$$\vartheta_m = \frac{63,07 + 30}{2} = 46,535^\circ C \quad (4.10)$$



Şekil 4.3: Örnek 4.1 İçin Birinci İterasyon Seçimi

2. aşama, k' ve k'' bulunur;

$$k' = 0,919 + \frac{46,535}{369} = 1,035 \quad (4.11)$$

$$k'' = 1,033 - \frac{46,535}{909} = 0,981 \quad (4.12)$$

3. aşama, α_k ve α_s bulunur; f_k, f_s ve k değerleri Şekil 4.1'den;

f_k ; Şekil 4.1f'den 2/3;

f_s ; Şekil 4.1c'den 2/3;

k ; Şekil 4.1f'den 2 olarak alınır.

$$\alpha_k = 1,035 \frac{0,0185}{2 * 11,9 * 10^{-3}} + 0,981 * 1,08 \left(\frac{33,07}{2 * 11,9 * 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{4}} = 7,286 \quad (4.13)$$

$$\alpha_s = \frac{0,95 * 5,67 * 10^{-8} [(273 + 63,07)^4 - (273 + 30)^4]}{33,07} = 7,048 \quad (4.14)$$

olarak bulunur. Bulunan değerler denklem (4.1)'de yerlerine yazılırsa;

$$T'_{Lu} = \frac{1}{3,14 * 11,9 * 10^{-3} \left(\frac{2}{3} 7,286 + \frac{2}{3} 7,048 \right)} = 2,800 K.m/W \quad (4.15)$$

olarak bulunur. Bu değer Denklem (4.8)'deki değerden farklıdır. Bu durumda, T'_{Lu} için Şekil 4.2'den bir alt değere (3,1 K.m/W) geçilir ve iterasyona devam edilir. Aynı hesaplamaların tekrar yazılması uzun olacağı için, Çizelge 4.2'deki değerlere bakılır. Bu değerler iterasyonun her aşamasındaki değerleri ve sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.2: Örnek 4.1'e Göre Hesaplanan Değerler

σ	5,67E-08					
ε_o	0,95					
Seçilen T'_{Lu}	3,2	3,1	3	2,9	2,8	2,7
$\Delta \vartheta_0$	33,075	32,891	32,698	32,493	32,277	32,047
ϑ_0	63,075	62,891	62,698	62,493	62,277	62,047
ϑ_m	46,537	46,446	46,349	46,246	46,138	46,024
k'	1,045	1,045	1,045	1,044	1,044	1,044
k''	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
α_k	7,286	7,278	7,269	7,259	7,249	7,238
α_s	7,048	7,042	7,036	7,029	7,021	7,013
Hesaplanan T'_{Lu}	2,800	2,803	2,806	2,810	2,813	2,817

Çizelge 4.2'den, seçilen ile hesaplanan T'_{Lu} değerlerinden birbirine en yakın olan değer olarak 2,8 sayısı alınır ve bu değere göre $\Delta \vartheta_0$ tekrar bulunur.

$$\Delta \vartheta_0 = \frac{(\vartheta_L - \vartheta_u) T'_{Lu}}{T'_{ki} + T'_{Lu}} = \frac{(70 - 30) 2,8}{0,67 + 2,8} = 32,27^\circ C \quad (4.16)$$

Kablo üzerindeki sıcaklık ise Çizelge 4.2den $\vartheta_o = 62,277^\circ C$ olarak alınır. Kablonun akım taşıma kapasitesine, Örnek 2.2'nin son kısmında değinilmişti. Bu açıklama hesap olarak gösterilirse;

$$P_i' = q_s \quad (4.17)$$

$$nI_r'^2 R_{wr} = \frac{\Delta \vartheta_L}{T_{ki}' + T_{Lu}'} \quad (4.18)$$

n ; sistem sayısı vermektedir. Örnekte kullanılan sistem 1 olarak düşünmüştür.

$$I_r = \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_u}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 2,8)}} = \sqrt{\frac{70 - 30}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 2,8)}} = 115,14 \quad (4.19)$$

Aynı hesaplar, ortam sıcaklığının 20°C ve 40°C olması durumunda tekrar yapılacak olursa ve 30°C için bulunan sonuçlarda bu çizelgeye eklenecek olursa aşağıdaki veriler elde edilir.

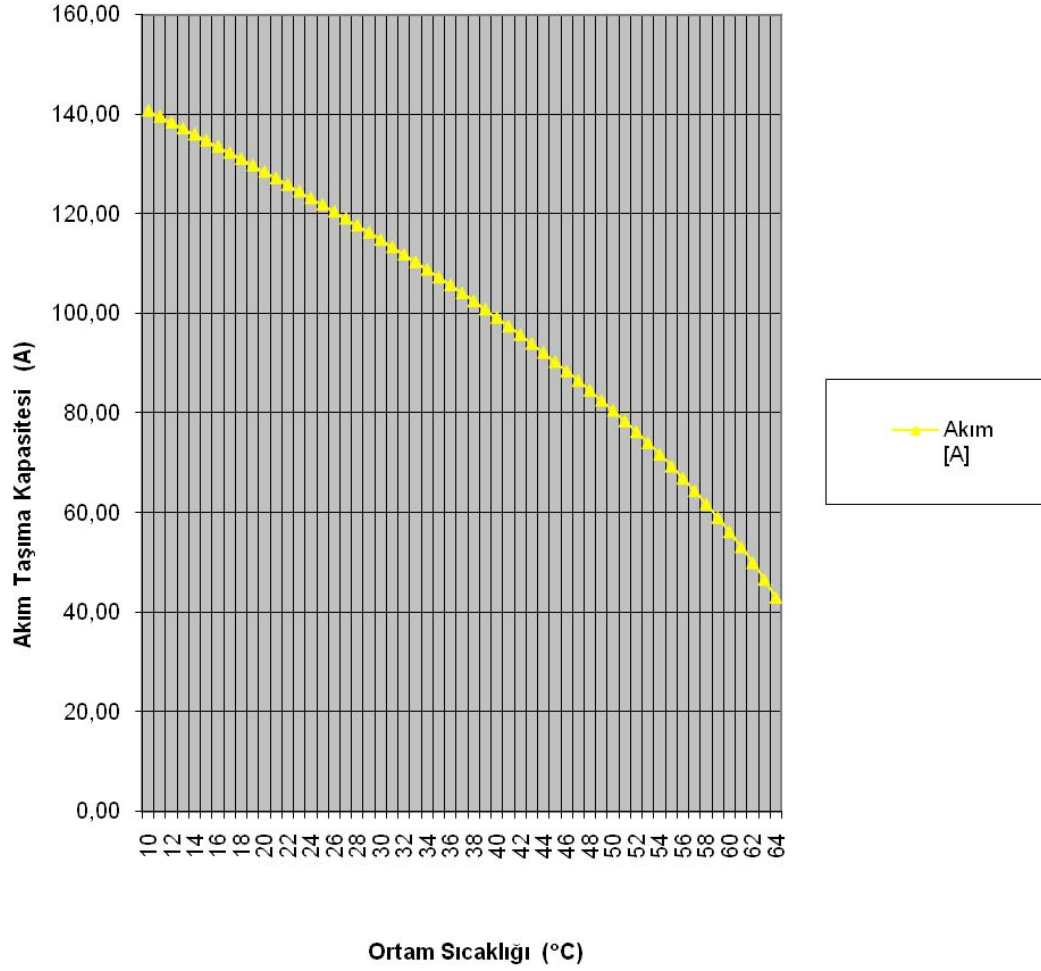
Çizelge 4.3: Havada Demet Haldeki NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri

Açıklama	Birim	Kabuller					
Kablo Sıcaklığı	°C	70	70	70	70	70	70
Ortam Sıcaklığı	°C	10	20	30	40	50	60
		Hesaplamalar					
$\Delta \vartheta_0$	°C	48,41	40,35	32,28	24,21	16,14	8,07
ϑ_0	°C	58,41	60,35	62,28	64,21	66,14	68,07
ϑ_m	°C	34,21	40,17	46,14	52,10	58,07	64,03
k'		1,01	1,03	1,04	1,06	1,08	1,09
k''		1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96
α_k		8,01	7,65	7,25	6,77	6,18	5,31
α_s		6,29	6,65	7,02	7,41	7,82	8,25
Hesaplanan T'_{Lu}	K.m/W	2,81	2,81	2,81	2,83	2,87	2,96
Akım Taşıma Kapasitesi	A	140,79	128,54	114,89	99,26	80,61	56,27

Örnek 4.1'deki kablunun bütün özelliklerini ve ortam özelliklerini sabit tutup, yalıtım malzemesi XLPE yapıldığında kablunun akım taşıma kapasitesinin değişiminin hesabı;

İlk olarak kablunun ısıl direncini yeniden hesaplanmalıdır.

$$T_{ki}' = \frac{1}{2\pi k_{xlpe} L} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \frac{3,5}{2 * 3,14 * 1} \ln\left(\frac{11,9}{5,9}\right) = 0,391 K m / W \quad (4.20)$$



Şekil 4.4: Havada Demet Haldeki NYN 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin Grafiği

T'_{Lu} 'nın da tekrar bulunması gerekir.

$$\Delta\theta_0 = \frac{(\theta_L - \theta_u)T'_{Lu}}{T'_{ki} + T'_{Lu}} = \frac{(90 - 30)3,2}{0,391 + 3,2} = 53,46^\circ C \quad (4.21)$$

olarak bulunur. İşlem aşamaların tekrar yapılması;

1. aşama; θ_0 ve θ_m bulunur;

$$\theta_0 = 30 + 53,46 = 83,46^\circ C \quad (4.22)$$

$$\theta_m = \frac{83,46 + 30}{2} = 56,73^\circ C \quad (4.23)$$

2. aşama; k' ve k'' bulunur;

$$k' = 0,919 + \frac{56,73}{369} = 1,07 \quad (4.24)$$

$$k'' = 1,033 - \frac{56,73}{909} = 0,97 \quad (4.25)$$

3. aşama; α_k ve α_s bulunur. ; f_k, f_s ve k değerleri Şekil 4.1'den;

f_k ; şekil 4.1f'den 2/3;

f_s ; şekil 4.1c'den 2/3;

k ; Şekil 4.1f'den 2 olarak alınır.

$$\alpha_k = 1,07 \frac{0,0185}{2 * 11,9 * 10^{-3}} + 0,97 * 1,08 \left(\frac{53,46}{2 * 11,9 * 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{4}} = 8,05 \quad (4.27)$$

$$\alpha_s = \frac{0,95 * 5,67 * 10^{-8} [(273 + 83,46)^4 - (273 + 30)^4]}{53,46} = 7,07 \quad (4.28)$$

olarak bulunur. Bulunan değerler denklem (4.1)'de yerine yazılırsa;

$$T'_{Lu} = \frac{1}{3,14 * 11,9 * 10^{-3} \left(\frac{2}{3} 8,05 + \frac{2}{3} 7,07 \right)} = 2,536 K.m/W \quad (4.29)$$

Birkaç iterasyondan sonra, T'_{Lu} 2,546 K.m/W olarak seçilir. Akım taşıma kapasitesi ise;

$$I_z = \sqrt{\frac{9_L - 9_u}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 2,8)}} = \sqrt{\frac{90 - 30}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,391 + 2,546)}} = 153,23 A \quad (4.30)$$

olarak bulunur ve bu farkın oranı:

$$100 \frac{I_r}{I_z} = 100 \frac{115,1}{153,23} = \%75,11 \quad (4.31)$$

olur. Denklem (4.31)'de bulunan değer tam olarak aynı özelliklerde iki farklı yalıtıma sahip kablunun akım taşıma kapasitesini ne kadar değiştiğini göstermektedir.

Örnek 4.2

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun havada sıralı halde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), havanın ısıl direnci (T'_{Lu}) ve hava ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta \vartheta_0$) bulunması.

Bu hesaplamalar Örnek 4.1'deki gibi yapılacaktır. Ancak havanın ısıl direnci hesabı yapılırken kullanılacak katsayılar Şekil 4.2a yerine Şekil 4.2b'den alınacaktır.

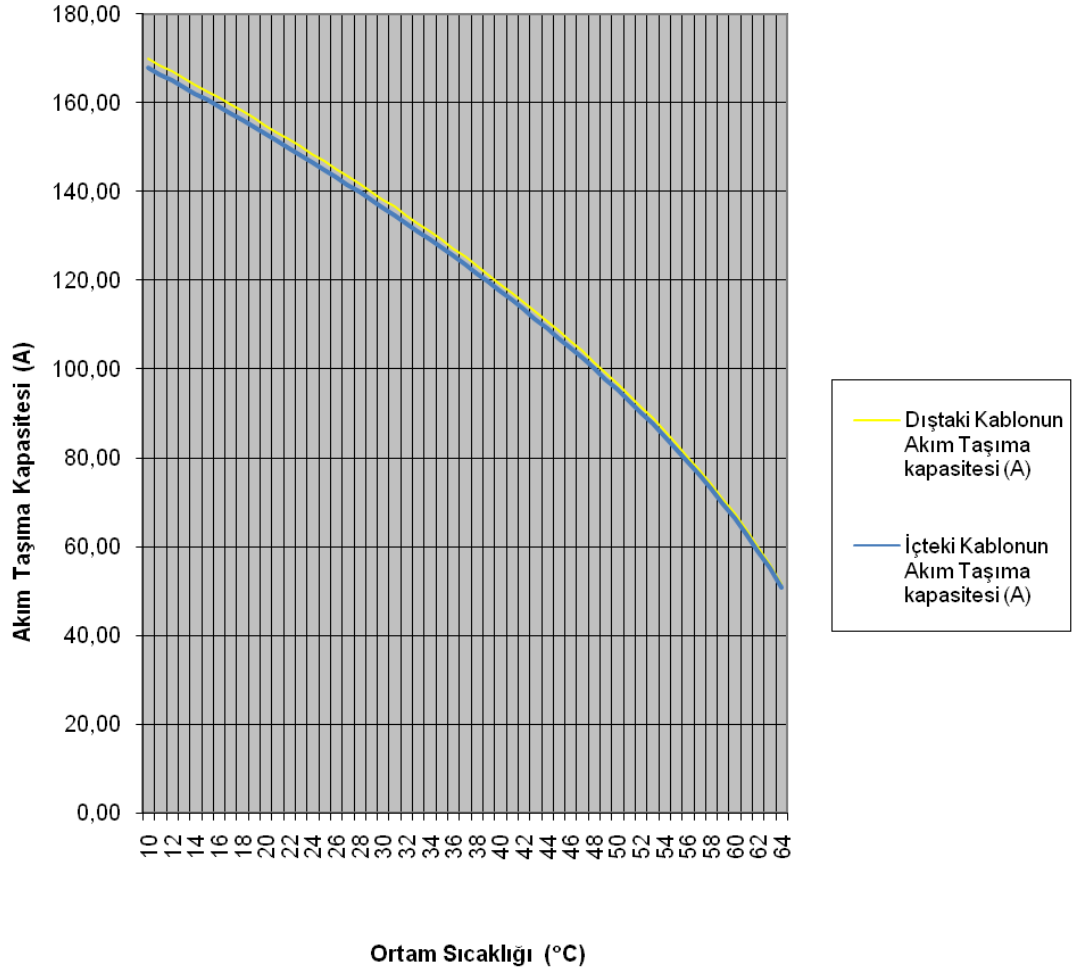
Ayrıca unutulmaması gereken bir başka konu ise; içteki kablo ile dıştaki kabloların akım taşıma kapasitesinin aynı olmamasıdır. Burada değişen f_s katsayısının değeridir. Şekil 4.1 bu değerleri göstermektedir. Bu bilgilere göre yapılan hesaplamaların sonucunda Çizelge 4.4'deki değerler elde edilir.

Çizelge 4.4: Havada Sıralı Haldeki YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri

Açıklama	Birim	Kabuller					
Kablo Sıcaklığı	°C	70	70	70	70	70	70
Ortam Sıcaklığı	°C	10	20	30	40	50	60
		Hesaplamalar					
$\Delta \vartheta_0$	°C	43,16	35,97	28,77	21,58	14,39	7,19
ϑ_0	°C	53,16	55,97	58,77	61,58	64,39	67,19
ϑ_m	°C	31,58	37,98	44,39	50,79	57,19	63,60
k'		1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,09
k''		1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96
α_k		9,93	9,53	9,07	8,53	7,85	6,85
α_s		6,12	6,50	6,90	7,32	7,76	8,22
Dıştaki Kablonun Hesaplanan T'_{Lu}	K.m/W	1,72	1,73	1,74	1,75	1,79	1,86
Dıştaki Kablo İçin Akım Taşıma Kapasitesi	A	169,85	154,87	138,23	119,28	96,74	67,44
İçteki Kablonun Hesaplanan T'_{Lu}	K.m/W	1,78	1,79	1,80	1,82	1,86	1,95
İçteki Kablo İçin Akım Taşıma Kapasitesi	A	167,88	152,96	136,41	117,58	95,25	66,28

Çizelge 4.4'den görüleceği üzere, dıştaki kablolar ile içteki kablo arasında her zaman bir miktar akım farkı oluşmaktadır. Bu fark küçük güçler taşıyan kablolarda çok fazla önemli görülmesi de, yüksek akım taşıyan kablolarda ciddi farklar oluşturmaktadırlar. Şekil 4.5 bu farkı görebilmek açısından faydalı olacaktır. Şekil

4.5'in verdiği diğer bir bilgi ise, ortam sıcaklığının çok yüksek ($50^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$) değerlerde, içteki kablo ile dıştaki kablonun akım taşıma kapasitesinin birbirine çok yakın olduğudur. Bu sonuçtan anlaşılması gereken, ortam sıcaklığının, kabloların sıralı olmalarındaki etkiyi, belli bir değer sonra etkisiz hale getirecek kadar büyük etkisi olmasıdır.



Şekil 4.5: Havada Sıralı Haldeki NYY 1 x 25mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin Grafiği

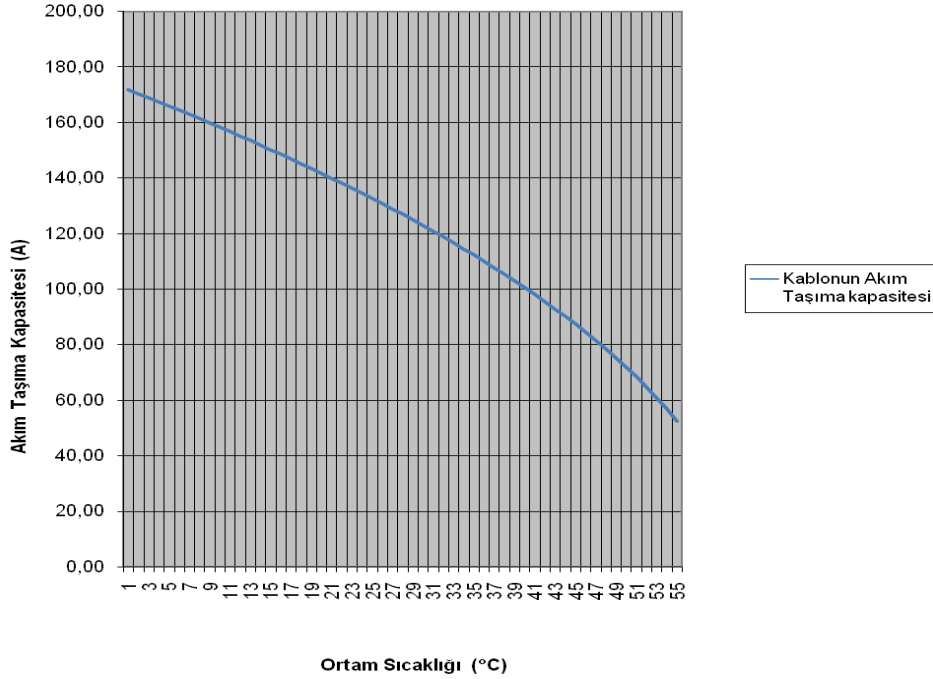
Örnek 4.3

NYY 1 x 25mm² 0,6/1 kV kablonun havada tek halde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), havanın ısıl direnci (T'_{Lu}) ve hava ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta\theta_0$) bulunması.

Soruyu çözmek için 2.aşamadaki değerleri değiştirmek yeterli olacaktır. Çizelge 4.5'de, akım taşıma kapasiteleri ve ilgili değerlerin hesaplamalardan çıkan sonuçlar bulunmaktadır.

Çizelge 4.5: Havada Tek Halde NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri

Açıklama	Birim	Kabuller					
Kablo Sıcaklığı	°C	70	70	70	70	70	70
Ortam Sıcaklığı	°C	10	20	30	40	50	60
		Hesaplamalar					
$\Delta \vartheta_0$	°C	42,87	35,72	28,58	21,43	14,29	7,14
ϑ_0	°C	52,87	55,72	58,58	61,43	64,29	67,14
ϑ_m	°C	31,43	37,86	44,29	50,72	57,14	63,57
k'		1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,09
k''		1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96
α_k		9,91	9,51	9,06	8,52	7,84	6,85
α_s		6,11	6,49	6,90	7,32	7,76	8,22
Hesaplanan T'_{Lu}	K.m/W	1,67	1,67	1,68	1,69	1,72	1,78
Akım Taşıma Kapasitesi	A	171,66	156,65	139,94	120,87	98,15	68,53



Şekil 4.6: Havada Tek Halde NYY 1 x 25mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin Grafiği

Şekil 4.6'dan, kablo yüzey sıcaklığının, demet haldeki ve sıralı haldeki montaj şekillerine göre daha az olduğu görülecektir. Buna göre ısının dışarıya çıkışını önleyen diğer kabloların etkisi ortaya çıkmıştır. Bu etki, ortam sıcaklığı arttıkça

hiperbolik olarak azalacak ve sonra sıfıra inecektir. Bu üç farklı montaj şekli aynı çizelgede ele alınırsa aradaki farkı daha iyi görülecektir.

Çizelge 4.6: Havada Tek, Demet ve Sıralı Halde NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerleri

	Ortam Sıcaklığı	Akım Taşıma Kapasitesi			
		Tek Halde	Demet Halde	Sıralı Halde	
				Dıştaki Kablo	İçteki Kablo
Birim	(°C)	(A)			
Miktar	10	171,66	140,79	169,85	167,88
	15	164,34	134,82	162,53	160,59
	20	156,65	128,54	154,87	152,96
	25	148,54	121,92	146,79	144,92
	30	139,94	114,89	138,23	136,41
	35	130,76	107,37	129,10	127,34
	40	120,87	99,26	119,28	117,58
	45	110,09	90,42	108,58	106,98
	50	98,15	80,61	96,74	95,25
	55	84,59	69,47	83,31	81,96
	60	68,53	56,27	67,44	66,28
	64	52,53	43,10	51,63	50,69

Eğer Çizelge 4.6’da, tek haldeki montaj şeklinin, diğer montaj şekilleri ile oranını yüzdesel olarak incelenirse Çizelge 4.7’deki değerler elde edilir.

Bütün montaj şekillerine göre hesap yapmak yerine, aşağıdaki gibi bir hesaplama mantığı ile doğruya yüzdesel olarak çok yakın bir değer elde etmek mümkündür.

1. Aynı sıcaklıkta (herhangi bir sıcaklık değerinde) bütün montaj şekillerine göre akım taşıma kapasiteleri bulunur.
2. Montaj şekilleri sonucunda hesaplanan akım taşıma kapasitelerinin birbirlerine oranları hesaplanır.
3. Montaj şekillerinden herhangi bir seçilir ve bu montaj şekli için istenilen bütün sıcaklıklarda akım taşıma kapasiteleri hesaplanır.
4. Diğer montaj şekillerinin istenilen bütün sıcaklıklardaki akım taşıma kapasiteleri, 2. aşamadaki oranlara göre bulunur.

Yapılan bu hesaplama, tam olarak doğru olmasa da, kabul edilebilir seviyededir.

Çizelge 4.7: Havada Demet ve Sıralı Halde NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Farklı Ortam Sıcaklıklarına Göre Akım Taşıma Değerlerinin, Tek Haldeki NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Akım Taşıma Kapasitesine Oranları

	Ortam Sıcaklığı	Yüzdesel Oranlar			
		Tek Halde	Demet Halde	Sıralı Halde	
				Dıştaki Kablo	İçteki Kablo
Birim	(°C)	(%)			
Miktar	10	171,66	82,0160	98,9401	97,7970
	15	164,34	82,0381	98,9027	97,7220
	20	156,65	82,0592	98,8637	97,6438
	25	148,54	82,0790	98,8228	97,5615
	30	139,94	82,0970	98,7795	97,4746
	35	130,76	82,1126	98,7334	97,3817
	40	120,87	82,1249	98,6835	97,2812
	45	110,09	82,1327	98,6287	97,1703
	50	98,15	82,1338	98,5666	97,0448
	55	84,59	82,1247	98,4934	96,8963
	60	68,53	82,0980	98,4003	96,7070
	64	52,53	82,0510	98,2955	96,4932

Çizelge 4.7’den, sıcaklık değiştikçe aradaki oranın çok fazla değişmediği hesaplardan ortaya çıkmaktadır.

4.1.2 Dikey montaj şekillerine göre havanın ısı direnç hesabı

Buraya kadar yapılmış bütün hesaplama çalışmaları, kabloların yatay monte edilmeleri düşünülerek yapılmıştır [27]. Dikey montaja göre hesaplamalar ve araştırmalar pek fazla mevcut değildir. Bunun bir kaç nedeni vardır,

1. Uygulamada, montaj şekillerinin genellikle yatay oluşu
2. Işıma ile ısınma hesaplarında, yatay ve dikey montajın bir fark oluşturmayışı
3. Taşıma ile ısı geçişi hesaplarında ise, silindirselsel koordinatlar dikkate alındığında kablo boyunun, kablo çapına oranının 2.77’den daha küçük olduğu zamanlarda etkisi olmasındadır [24].

$$\frac{l}{d} \geq 2,77 \quad (4.32)$$

Denklem (4.32)'de verilen oran, kablolar için çok küçük olduğu için yine hesaplama yapmaya gerek yoktur. Bütün bu nedenlerden ötürü kablonun dikey monte edilmesi durumunda, yatay montaja göre hesap yapılabileceği anlaşılmaktadır.

4.1.3 Farklı yüksekliklerde akım taşıma kapasitesi

Kabloların akım taşıma kapasitesi, farklı yüksekliklerde değişmektedir. Yüksekliğe çıktıkça havanın yoğunluğunu azalması sonucu taşıma ile iletim azalmaktadır [2]. Taşıma ile ısı iletiminin azalması sonucu kablo kolay soğuyamaz ve akım taşıma kapasitesi bir miktar düşer. Konunun daha iyi anlaşılması için Örnek 4.4 incelenmelidir.

Örnek 4.4

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun, deniz seviyesinden 1000, 2000, 3000 ve 4000 metre yükseklikte havada demet halde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), havanın ısıl direnci (T'_{Lu}) ve hava ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta\theta_0$) bulunması. Denklem (4.2)'deki α_k 'nın, deniz seviyesindeki basınç değeri için geçerli olduğu belirtilmişti. Farklı basınç değerleri için denklem (4.2) yeniden düzenlenirse.

$$\alpha_k = k' \frac{0,0185}{kd} + k'' 1,08 \left(\frac{\Delta\theta_0}{kd} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{P}{1013kPa} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.33)$$

olacaktır.

Açık hava basıncının yüksekliğe göre değiştiği bilinmektedir. Açık hava basıncı düştükçe, akım taşınması sebebiyle ısınan kablonun etrafındaki havanın yoğunluğu azalacağı için, kablo etrafındaki taşıma ile ısı geçişi azalacak ve kablo daha az serinleyecektir. Daha az serinleme daha az akım taşıma anlamına gelmektedir. Çizelge 6.8'de farklı yükseklikler için hava basıncı değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.8: Yüksekliklere Göre Açık Hava Basıncı Çizelgesi

Yükseklik	m	0	1000	2000	3000	4000
Basıncı(P)	hPa	1013	899	795	701	616

Örnek 4.4'de ilk olarak 4000 metre için yapılacaktır. Bulunan değerler, daha sonra diğer yükseklikler için yapılacak hesaplamalar Çizelge 4.10'da birleştirilecek ve kıyaslanacaktır. Böylece açık hava basıncının kablo akım taşıma kapasitesine ne

derece etki ettiği incelenmiş olacaktır. Çizelge 4.9’da problemin verileri belirtilmiştir.

Çizelge 4.9: rnek 4.4’n Verileri

Açıklama	Birim	Miktar
Kablonun Isıl Direnci	(K.m/W)	0,670
Kablonun Kesit	(mm ²)	25
Hava Sıcaklığı	(°C)	30
Kablonun İletken Sıcaklığı	(°C)	70
Montaj şekli		Demet
Rüzgâr Hızı	(m/sn)	0
Güneş Etkisi (Işıma Etkisi E)	(k. W/ m ²)	0
Açık Hava Basıncı	(hPa)	616

Çizelge 4.9’daki verilere göre Denklem (4.7)’deki eksik kalan yer olan havanın ısıl direnci şekil 4.2’den bulunur. T'_{Lu} ’nun yeniden bulunması gerekmektedir. Bu durumda yine iterasyon yapılacaktır.

$$\Delta\vartheta_0 = \frac{(\vartheta_L - \vartheta_u)T'_{Lu}}{T'_{ki} + T'_{Lu}} = \frac{(70 - 30)2,95}{0,67 + 2,95} = 32,59^\circ C \quad (4.34)$$

olarak bulunur. Denklem (4.34)’deki sıcaklık değerine göre havanın ısıl direnci tekrar bulunur; 1. aşama; ϑ_0 ve ϑ_m bulunur;

$$\vartheta_0 = 30 + 32,59 = 62,59^\circ C \quad (4.36)$$

$$\vartheta_m = \frac{62,59 + 30}{2} = 46,29^\circ C \quad (4.37)$$

2. aşama; k' ve k'' bulunur;

$$k' = 0,919 + \frac{46,29}{369} = 1,044 \quad (4.38)$$

$$k'' = 1,033 - \frac{46,29}{909} = 0,982 \quad (4.39)$$

3.aşama; α_k ve α_s bulunur. f_k, f_s ve k değerleri şekil 4.1’den;

f_k ; şekil 4.1f’den 2/3;

f_s ; şekil 4.1c’den 2/3;

k ; Şekil 4.1f'den 2 olarak alınır.

$$\alpha_k = 1,044 \frac{0,0185}{2 * 11,9 * 10^{-3}} + 0,982 * 1,08 \left(\frac{32,16}{2 * 11,9 * 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{616}{1013} \right)^{\frac{1}{4}} = 6,489 \quad (4.40)$$

$$\alpha_s = \frac{0,95 * 5,67 * 10^{-8} [(273 + 62,59)^4 - (273 + 30)^4]}{32,59} = 7,03 \quad (4.41)$$

olarak bulunur. Bulunan değerler Denklem (4.1)'de yerine yazılırsa;

$$T'_{Lu} = \frac{1}{3,14 * 11,9 * 10^{-3} \left(\frac{2}{3} 6,489 + \frac{2}{3} 7,03 \right)} = 2,969 K.m/W \quad (4.42)$$

olarak bulunur. Denklem (4.42)'deki değer hesaplamada edilen kabule yakındır o neden ile kabul edilebilir. Bu değere göre akım taşıma kapasitesi denklem (4.19)'dan bulunur.

$$I_z = \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_u}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 2,97)}} = \sqrt{\frac{70 - 30}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 2,97)}} = 112,39 A \quad (4.43)$$

Diğer yükseklikler içinde akım taşıma kapasiteleri Örnek 4.4'deki çözüme göre yapılırsa Çizelge 4.10'daki değerler ortaya çıkacaktır. Yapılacak olan çizelgeye yüzde olarak oranları da koymak faydalı olacaktır.

Çizelge 4.10: Farklı Yükseklikler İçin Kablo Akım Taşıma Kapasiteleri

	Hava Basıncının Kablonun Akım Taşıma Kapasitesine Etkileri				Birim
0	1000	2000	3000	4000	Metre
114,89	114,32	113,72	113,12	112,39	Amper
I_r	I_{z1}	I_{z2}	I_{z3}	I_{z4}	
100,00	99,506	98,963	98,463	97,915	Yüzdesel Oran (I_r/I_z)

Kabloların yükseklerde olduğu zaman, etraflarındaki havanın yoğunluğunun azalması sonucu, kablo akım taşıma kapasitelerinin de değiştiği yüzdesel olarak incelenmiş ve hesaplanmıştır.

4.1.4 Güneş ışınlarının etkisi ile akım taşıma kapasitesi

Güneş ışınları kablo üzerinde sıcaklık artışı yaparlar. Bu artış güneş ışınlarının şiddetine göre değişmektedir. Örnek 4.5’de konu ile ilgili örnek verilmiştir.

Örnek 4.5

NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun güneş ışınlarının da etkisi ile havada demet halde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), havanın ısıl direnci (T'_{Lu}) ve hava ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta\theta_0$) bulunması.

Çizelge 4.11’de problemin verileri belirtilmiştir.

Çizelge 4.11: Örnek 4.5’in Verileri

Açıklama	Birim	Miktar
Kablonun Isıl Direnci	(K.m/W)	0,670
Kablonun Kesit	(mm ²)	25
Hava Sıcaklığı	(°C)	30
Kablonun İletken Sıcaklığı	(°C)	70
Montaj Şekli		Demet
Rüzgâr Hızı	(m/sn)	0
Güneş Etkisi (Işıma Etkisi E)	(k.W/ m ²)	1
Açık Hava Basıncı	(hPa)	1013

Güneşin etkisi, solar ısıma yapan bir kaynaktır. Bu enerji, kablonun ısınması yönünde etki eder. Güneş enerjisinin kabloda oluşturduğu sıcaklık farkı Denklem (4.44)’de bulunmaktadır.

$$\Delta\theta_s = ET'_{ki}d\alpha_0 \quad (4.44)$$

E solar ısıma şiddetidir (k.W/m²). Bu değer mevsimsel olarak değişmektedir. Maksimum alabileceği değer 1,35 k.W/m²’dir. Hesaplamalarda, genellikle kullanılan 1 k.W/m²’ değerini kullanılacaktır [21].

α_0 solar emiş katsayısıdır ve malzemeye göre değişmektedir. Her malzeme aynı şekilde güneş ışınların emmemektedir. Solar emiş katsayısının değişmesiyle, kablo sıcaklığı değişmektedir. Kablo sıcaklığının değişmesiyle, kablonun akım taşıma kapasitesi de değişmektedir. Bu değişimi bulabilmek için solar emiş katsayısını bilmek gerekmektedir. Çizelge 4.12’de bazı malzemeler için solar emiş katsayıları verilmiştir.

Çizelge 4.12: Bazı Malzemeler İçin Solar Emiş Katsayıları [16]

Güneş Işınlara Maruz Kalan Malzeme	Solar Emiş Katsayısı(α_0)
Asfalt	0,8
PVC	0,6
PE	0,4
Polipropilen	0,8
Deri	0,6

Kablo ile ortam arasında olan toplam ısı farkına, solar ışıma sebebiyle olan sıcaklık farkı eklenmelidir.

$$\Delta\vartheta_0 = \frac{(\vartheta_L - \vartheta_u + \Delta\vartheta_s)T'_{Lu}}{T'_{ki} + T'_{Lu}} \quad (4.45)$$

$$\Delta\vartheta_0 = \frac{(70 - 30 + ET'_{ki}d\alpha_0)2,75}{0,67 + 2,75} = \frac{(70 - 30 + (1 \cdot 10^3 * 0,67 * 11,9 * 10^{-3} * 0,6))2,75}{0,67 + 2,75} = 36,01^\circ C \quad (4.46)$$

olarak bulunur. Denklem (4.46)'dan elde edilen değere göre havanın ısıl direnci tekrar bulunur. Aynı iterasyon hesabına girilmeyecektir. Sadece kontrol amaçlı olarak T'_{Lu} değeri bulunacaktır. 1. aşama; ϑ_0 ve ϑ_m bulunur;

$$\vartheta_0 = 30 + 36,01 = 66,01^\circ C \quad (4.47)$$

$$\vartheta_m = \frac{66,01 + 30}{2} = 48,01^\circ C \quad (4.48)$$

2. aşama; k' ve k'' bulunur;

$$k' = 0,919 + \frac{48,01}{369} = 1,049 \quad (4.49)$$

$$k'' = 1,033 - \frac{48,01}{909} = 0,980 \quad (4.50)$$

3. aşama; α_k ve α_s bulunur. f_k, f_s ve k değerleri Şekil 4.1'den;

f_k ; şekil 4.1f'den 2/3;

f_s ; şekil 4.1c'den 2/3;

k ; Şekil 4.1f'den 2 olarak alınır.

$$\alpha_k = 1,049 \frac{0,0185}{2 * 11,9 * 10^{-3}} + 0,980 * 1,08 \left(\frac{36,01}{2 * 11,9 * 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{4}} = 7,415 \quad (4.51)$$

$$\alpha_s = \frac{0,95 * 5,67 * 10^{-8} [(273 + 66,01)^4 - (273 + 30)^4]}{36,01} = 7,149 \quad (4.52)$$

olarak bulunur. Bulunan değerler denklem (4.1)'de yerine yazılacak olursa;

$$T'_{Lu} = \frac{1}{3,14 * 11,9 * 10^{-3} \left(\frac{2}{3} 7,286 + \frac{2}{3} 7,048 \right)} = 2,756 K.m/W \quad (4.53)$$

olarak bulunur. Denklem (4.53)'de bulunan değer kabul edilen değere yakındır o neden ile kabul edilebilir. Bu değere göre akım taşıma kapasitesi;

$$I_z = \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_u - \Delta \vartheta_s}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 2,95)}} = \sqrt{\frac{70 - 30 - 4,7838}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 2,75)}} = 108,697 A \quad (4.54)$$

Bu değeri normal demet halde ve deniz seviyesindeki değer ile oranlanırsa;

$$100 \frac{I_z}{I_r} = 100 \frac{108,697}{115,1} = 94,43 \quad (4.55)$$

olarak bulunur.

4.1.5 Rüzgârın etkisi ile akım taşıma kapasitesi

Rüzgâr veya esinti, ısınmış kablonun etrafındaki sıcak havayı süpürdüğü için, kablonun etrafına yeni bir ortam sıcaklığında hava gelmesine sebep olur. Kablo bu neden ile rüzgârın hızıyla orantılı olarak ortam sıcaklığında hava ile temas halindedir. Kablonun etrafındaki havanın değişimi rüzgâr hızı ile orantılı olduğundan, rüzgâr ne kadar hızlı ise kabloda o kadar serinlemektedir ve daha fazla akım taşıma kapasitesine sahip olmaktadır. Konu örnek 4.6 ile daha da iyi anlaşılacaktır.

Örnek 4.6

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun rüzgârın etkisi ile havada tek halde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), havanın ısıl direnci (T'_{Lu}) ve hava ile kablo

yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta\theta_0$) bulunması. Çizelge 4.13’de problemin verileri belirtilmiştir.

Çizelge 4.13: Örnek 4.6’nın Verileri

Açıklama	Birim	Miktar
Kablonun Isıl Direnci	(K.m/W)	0,670
Kablonun Kesit	(mm ²)	25
Hava Sıcaklığı	(°C)	30
Kablonun İletken Sıcaklığı	(°C)	70
Montaj Şekli		Demet
Rüzgâr Hızı	(m/sn)	10
Güneş Etkisi (Işıma Etkisi E)	(k.W/ m ²)	0
Açık Hava Basıncı	(hPa)	1013

Tez çalışmasının buraya kadarki T'_{Lu} hesaplamalarında, havanın ısıl direncini bulurken montaj şekillerine göre hareket edilmişti. Neher ve McGrath, 1957 yılında, havada rüzgâr olduğu durumlarda, diğer bir deyişle zorlanmış taşınımın olduğu durumlarda T'_{Lu} ’nun farklı bir formül ile bulunacağını göstermişlerdir. 1992 yılında Morgan, doğal taşınım ile ısı geçişinin, rüzgârın 1 m/s’lik hızından sonra ihmal edilebileceğini çalışmalarında göstermiştir. Bu durumda havanın ısıl direnci denklem (4.56) ile bulunur.

$$T'_{Lu} = \frac{1}{2.\pi.r.h_r} \quad (4.56)$$

Burada h_r rüzgârlı havada, ısı iletim katsayısıdır. r kablonun yarıçapıdır (5,95 mm).

$$h_r = 2.87 \sqrt{\frac{w}{d}} \quad (4.57)$$

w ; rüzgar hızıdır (m/s). Soruya geri dönülecek olursa;

$$h_r = 2.87 \sqrt{\frac{10}{11,9 * 10^{-3}}} = 83,19 W / Km^2 \quad (4.58)$$

$$T'_{Lu} = \frac{1}{2.\pi.r.h_r} = \frac{1}{2 * 3.14 * 5,95 * 10^{-3} * 83,19} = 0,321 K.m / W \quad (4.59)$$

Kablonun akım taşıma kapasitesi;

$$I_z = \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_u}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 0,321)}} = \sqrt{\frac{70 - 30}{1 * 0,87 * 10^{-3} (0,67 + 0,321)}} = 215,39 A \quad (4.60)$$

olarak bulunur. Denklem (4.60)'daki değer, kablonun iyi soğutulduğu zaman ne kadar yüksek akımlar taşıyabildiğini göstermektedir.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün, 1975 yılından günümüze kadar yapmış olduğu ölçümlere göre, Türkiye'de en yüksek rüzgâr hızı Tokat ilinde 01.01.1978 tarihinde ölçülmüştür ve 48,9 m/s'dir.

Çizelge 4.14: Rüzgâr Hızının Akım Taşıma Kapasitesine Etkileri

Rüzgâr Hızı	T'_{Lu}	PVC Kablo	XLPE Kablo
		Tek Damar	
m/s	K.m/W	A	
1	1,017	165,070	202,168
10	0,322	215,313	263,703
20	0,227	226,332	277,199
30	0,186	231,787	283,879
40	0,161	235,232	288,099
50	0,144	237,673	291,089
60	0,131	239,525	293,356
70	0,122	240,994	295,156
80	0,114	242,198	296,631
90	0,107	243,209	297,870
100	0,102	244,075	298,930
110	0,097	244,827	299,851
120	0,093	245,489	300,661
130	0,089	246,077	301,381

Kasırgalar ise şiddetlerine göre sınıflanır. Beş kategoriye ayrılırlar. Rüzgâr hızı saatte;

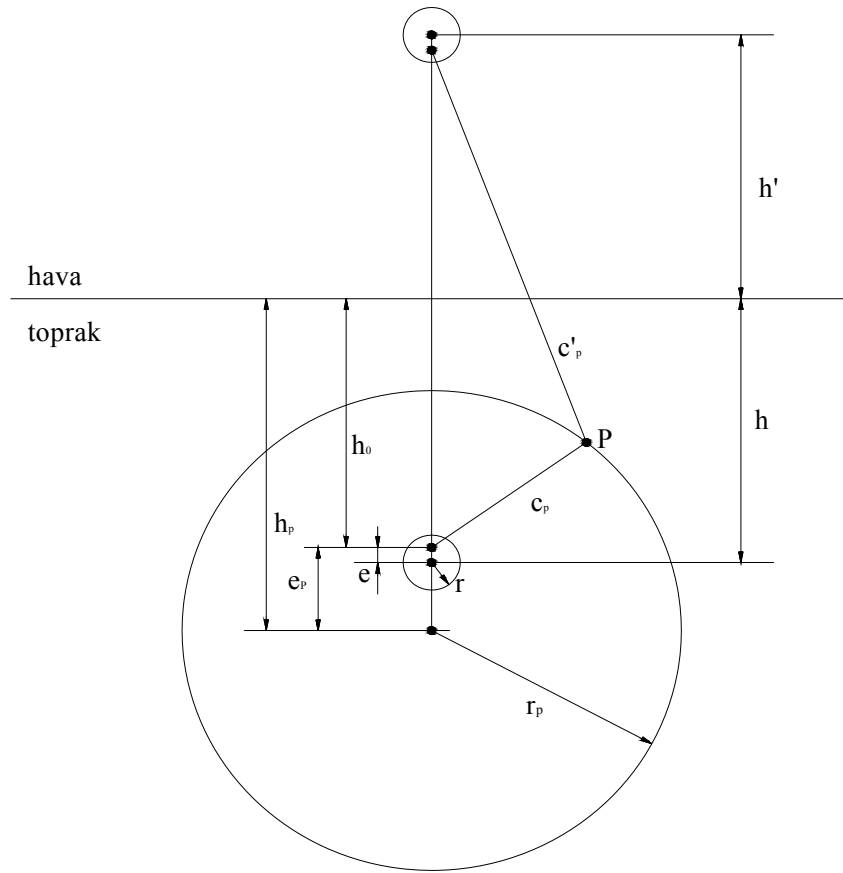
- 119-153 km (33-42,5 m/s) arasındaysa 1. kategori,
- 154-178 km (42,7-49,44 m/s) arasındaysa 2. kategori,
- 179-209 km (49,7-58,05 m/s) arasındaysa 3. kategori,
- 210-250 km (58,33-69,4 m/s) arasındaysa 4. kategori,
- 250 km (69,4 m/s)'yi aşıyorsa 5. kategoride ele alınır.

Hortumların merkezinde 450 km/saat (125 m/s) hız görülebilmektedir.

Rüzgâr hızı değişiminin, kablonun akım taşıma kapasitesine etkilerini Çizelge 4.14'de, denklem (4.56)'dan denklem (4.59)'a kadar ki formüllerden hesaplanarak bulunmuştur.

4.2 Toprağın Isıl Direncinin Hesabı

Kablolarda oluşan ısı kaybı (P'), kablodan dışarıya doğru çıktıktan sonra toprağa radyal olarak yayılır. Bu radyal dalgalanmalar, aynı elektrik alanında olduğu gibi, sıcaklığın aynı olduğu çizgiyi gösterir. Toprağın sıcaklığı ve toprağın ısıl öz direnci, hesaplamalarda kolaylık oluşturması açısından belli bir değer olarak kabul edilir. Gerçekte, toprağın sıcaklığı derinlere inildikçe azalmaktadır. Bunu yanında nem oranı da artmaktadır. Bu konu ile ilgili hesaplamalarda, dikkat edilmesi gereken husus, kabloda oluşan ısının, kablonun toprak üstündeki simetrisinde etkisini yitirdiğidir [13-14].



Şekil 4.7: Kablonun Radyal Çizgilerinin Rehberi

Şekil 4.7’de, P noktasındaki sıcaklık farkı hesabı;

$$\Delta \vartheta_p = P' \frac{\rho_E}{2\pi} \ln \frac{c'_p}{c_p} \quad (4.61)$$

$\Delta \vartheta_p$; P noktası ile kablo iletkeni arasındaki sıcaklık farkıdır;

P' ; kabloda oluşan birim ısı enerjisidir (W/m);

ρ_e ; toprağın ısı transfer katsayısıdır (K.m/W);

c'_p ve c_p mesafelerdir. Denklem (4.61)'den ortaya çıkan bir diğer bilgi ise, toprak yüzeyinde sıcaklık farkının sıfır olması yani sıcaklığın toprak yüzeyinin, hava ortamı sıcaklığına eşit olduğudur.

Kısaltma açısından c'_p ve c_p 'yi denklem (4.62)'deki gibi bir katsayıya dönüştürülür.

$$k_p = \frac{c'_p}{c_p} \quad (4.62)$$

Denklem (4.62), Şekil 4.3'e göre yazılırsa;

$$k_r = \frac{\sqrt{(2.h - e)^2 - r^2}}{\sqrt{e^2 + r^2}} \quad (4.63)$$

$$e = h - h_o = h - \sqrt{h^2 - r^2} \quad (4.64)$$

Denklem (4.63)'de e yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} k_r &= \frac{\sqrt{(2.h - h + \sqrt{h^2 - r^2})^2 + r^2}}{\sqrt{(h - \sqrt{h^2 - r^2})^2 + r^2}} = \sqrt{\frac{(h + \sqrt{h^2 - r^2})^2 + r^2}{h^2 - 2.h.\sqrt{h^2 - r^2} + h^2 - r^2 + r^2}} \\ &= \sqrt{\frac{h^2 + 2.h.\sqrt{h^2 - r^2} + h^2 - r^2 + r^2}{2.h^2 - 2.h.\sqrt{h^2 - r^2}}} = \sqrt{\frac{2.h^2 + 2.h.\sqrt{h^2 - r^2}}{2.h^2 - 2.h.\sqrt{h^2 - r^2}}} \\ &= \sqrt{\frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{h - \sqrt{h^2 - r^2}}} = \sqrt{\frac{(h + \sqrt{h^2 - r^2})^2}{h^2 - (\sqrt{h^2 - r^2})^2}} = \sqrt{\frac{(h + \sqrt{h^2 - r^2})^2}{r^2}} = \frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \end{aligned} \quad (4.65)$$

olarak bulunur ki bu kablo yüzeyi ile toprak yüzeyi arasındaki direncin bulunmasını sağlayacaktır.

Toprak ısı direnci;

$$T'_E = \frac{\rho_E}{2.\pi} \ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right) \quad (4.66)$$

olarak bulunur. Eşsıcaklık çizgilerden yola çıkarak denklem (4.67) elde edilir.

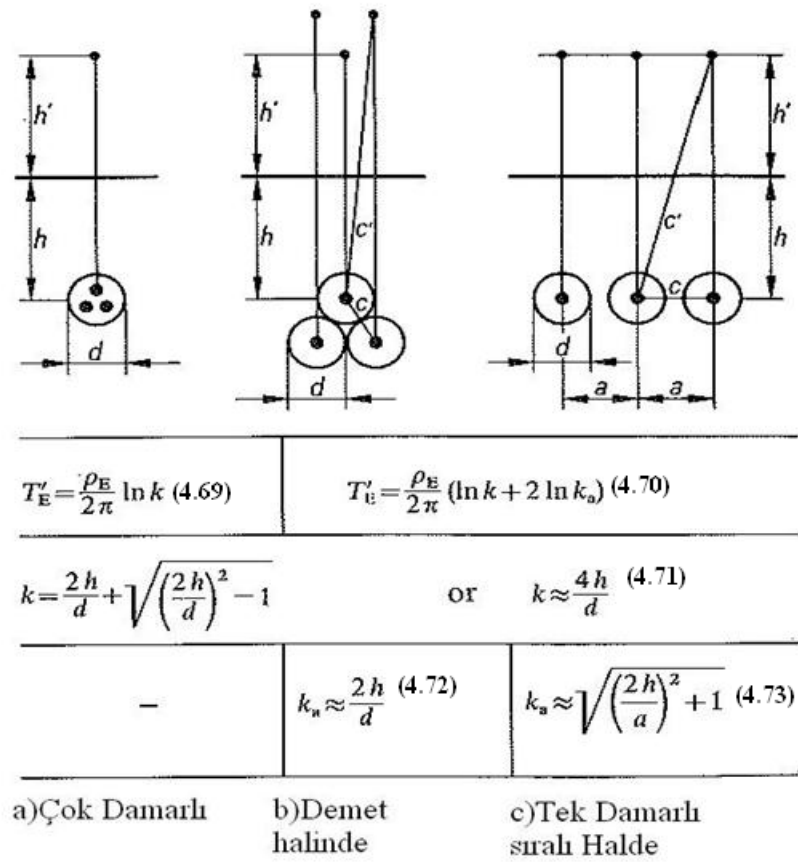
$$h_o = \sqrt{h^2 - r^2} \quad (4.67)$$

Eşsıcaklık çizgisinin çapını hesaplamak için denklem;

$$r_p = \frac{2.h_o.k_p}{k_p^2 - 1} \quad (4.68)$$

bulunur. h_p de bulunduğu takdirde, eşsıcaklık çizgileri bulunabilir.

Kabloların tek döşenmesi durumunda, denklem (4.68) kullanılabilir ancak kabloların yan yana olması ve bunun sonucunda birbirlerine ısı etkileri olduğunda ısı direnç de değişecektir. Şekil 4.8’de bu değişime göre denklemler bulunmaktadır.



Şekil 4.8: Sürekli İşletme Koşullarında Toprak Isıl Direnci Hesabı

Bu denklemler, $m = 1$ olması ve toprak ısı öz direncinin sabit olması durumunda geçerlidir.

Kablonun ısı direnci ise denklem (4.74) ile bulunur.

$$T_E' = \frac{\rho_E}{2\pi} \ln(k + k_a) \quad (4.74)$$

Yüklenme katsayısının değişken olması durumunda toprakta ısıt kapasiteler oluşur. Bu kapasiteler yüklenme katsayısının sabit olduğu zamanda sıfırdır ancak değişken olması durumunda kablonun belli bir uzaklığına kadar ki ısıt direncin daha yüksek olmasını sağlar. Isıl direnç katsayısı yüksek olan çevrenin yarıçapı, karakteristik yarıçap olarak adlandırılır (d_y).

Yüklenme eğrisinin sinüsoidal, dikdörtgen veya başka şekilde olmasına göre karakteristik çap değişir. Denklem (4.75)'de ortalama bir yüklenme eğrisi düşünülmüş hesap bulunmaktadır. Günlük yüklenme katsayısına (m) ve toprak ısıt direnç katsayısına bağlı olan bu alan denklem;

$$d_y = \frac{0,103 + 0,246\sqrt{\mu}}{\sqrt{w} \left(\frac{\rho_E}{K.m/W} \right)^{0.4}} \quad (4.75)$$

w ; 1 olarak alınır. μ ; kayıp faktörüdür ve denklem (4.76)'daki gibi hesaplanır;

$$\mu = 0.3.m + 0.7.m^2 \quad (4.76)$$

Günlük yüklenme katsayısı ve yüklenme eğrisi değiştikçe, karakteristik çap da değişecektir. Toprak ısıt öz direncinin genel olarak hesaplamalarda (aksi belirtilmedikçe) 1,0 K.m/W olduğu düşünülürse [27], çapları farklı yüklenme eğrilerine göre karakteristik çaplar Çizelge 4.15'deki gibidir.

Çizelge 4.15: Toprak Isıl Öz direncinin 1,0 K.m/W Olması Durumunda Farklı Yüklenme Katsayıları İçin Karakteristik Çap d_y Değerleri [21]

Yüklenme Faktörü (m)	Kayıp Faktörü (μ ; Denklem (4.76)'dan)	Karakteristik Çap d_y (m)		
		Sinüsoidal Yüklenme	Dikdörtgen Yüklenme	Ortalama Şekillere Göre Yüklenme
0.5	0.325	0.205	0.281	0.243
0.6	0.432	0.205	0.324	0.265
0.7	0.553	0.205	0.367	0.286
0.8	0.688	0.205	0.409	0.307
0.9	0.837	0.205	0.451	0.328

Ancak kablonun etrafında, toprak ısıt direncini etkileyen başka bir faktör daha vardır ki, bu kablonun bütün yüklenme şekillerinde geçerlidir. Bu faktör kablonun etrafındaki toprağın kuruması etkisidir. Kablo yüklenmeye başladığı andan itibaren

etrafındaki malzemeyi ısıtır. Isıtılma sonucu malzemenin nemi azalır ve malzeme kurumaya başlar. Kuru malzemelerin ısıl direnç katsayısı yüksektir. Normalde aldığımız toprak ısıl direnç katsayısı, bu neden ile kablonun ekseninden belli bir çap (d_x) mesafede daha yüksek olur.

Karakteristik çap, ısıl direnç formülünde;

$$k_y = \frac{4.h}{d_y} \quad (4.77)$$

olarak yerini alır.

Yağ emdirilmiş kâğıt yalıtımlı kablolarda, kablo yüzey sıcaklığı 45°C seviyelerinde olduğu için bu kablolarda fazla önem kazanmayan bu durum, XLPE yalıtımlı gibi yüksek sıcaklıklara ulaşabilen kablolarda, kablo yüzey sıcaklığı kimi zaman 75°C'ye kadar gelebildiği için ciddi önem kazanmaktadır. Bunun sonucunda, kablo etrafındaki malzeme ciddi bir şekilde kurur. Bu durumda kabloya limit sıcaklık adı verilen bir emniyet sıcaklığı eklenir ($\Delta \vartheta_x$). Bu sayede kablonun etrafında oluşturduğu kuru alandaki, ortam sıcaklığından yüksek olan sıcaklık farkı eklenmiş olur.

$$\Delta \vartheta_x = 15 + \frac{(1-m).100}{3} \quad (4.78)$$

$\Delta \vartheta_x$; Devamlı yüklenmede ($m = 1,0$) 15°K;

$\Delta \vartheta_x$; Faydalı yüklenmede ($m = 0,7$) 25°K;

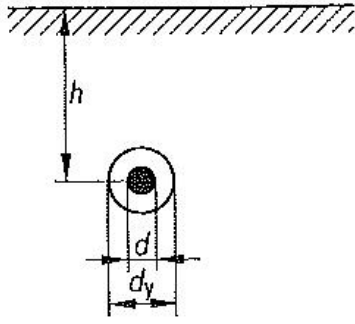
$\Delta \vartheta_x$; Günlük yüklenmede ($m = 0,5$) 32°K;

olarak bulunur.

Avrupa sınırları içerisinde, toprak ısıl öz direnci (ρ_E) 1,0 K.m/W olarak alınabileceği için, d_x çapı içerisindeki toprak ısıl direnç katsayısı (ρ_x) da 2,5 K.m/W olarak hesaplara dahil olabilir.

Toprak ısıl direnci

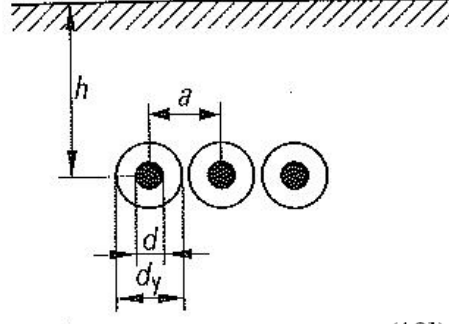
Toprak ısıl direnci karakteristik çap olması ve olmamasına göre iki farklı şekilde hesaplanır. Karakteristik çapın olması durumunda bulunacak toprak ısıl direnci T'_{xy} ve karakteristik çapın olmaması durumunda bulunacak toprak ısıl direnci T'_x denir.



$$T'_{xy} = \frac{Q_x}{2\pi} [\ln k + (\mu-1) \ln k_y] \quad (4.79)$$

$$T'_x = \frac{Q_x}{2\pi} \ln k \quad (4.80)$$

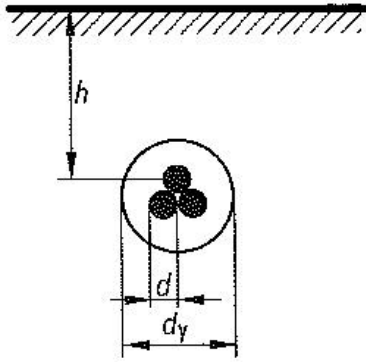
a) Tek damarlı kablo



$$T'_{xy} = \frac{Q_x}{2\pi} [\ln k + (\mu-1) \ln k_y + \mu 2 \ln k_a] \quad (4.81)$$

$$T'_x = \frac{Q_x}{2\pi} (\ln k + 2 \ln k_a) \quad (4.82)$$

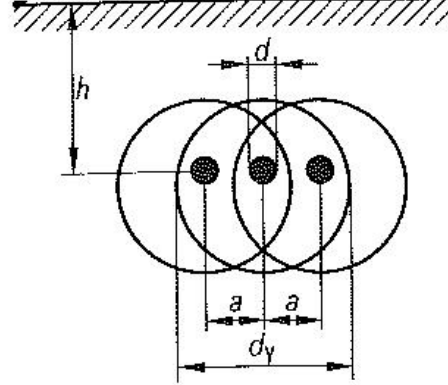
b) Tek damarlı kablo sıralı halde
 $d_y \leq 2a$



$$T'_{xy} = \frac{Q_x}{2\pi} [\ln k + 3(\mu-1) \ln k_y + 2 \ln k_a] \quad (4.83)$$

$$T'_x = \frac{Q_x}{2\pi} (\ln k + 2 \ln k_a) \quad (4.84)$$

c) Tek damarlı kablolar
(demet halinde)



d) Tek damarlı kablo sıralı halde
 $d_y \geq 2a$

Şekil 4.9: Toprak Isıl Direnç Hesaplaması

Akım taşıma kapasitesi ile ilgili yapılmış olan hesaplamalara, toprağın kurumasını ve karakteristik çap da eklenirse denklem (4.85) elde edilir.

$$I_z = \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_U - P'_D (T'_{kd} - T'_x) + [((\rho_x / \rho_E) - 1) \Delta \vartheta_x]}{n \cdot R'_{wr} \cdot (T'_{ki} + T'_{xy})}} \quad (4.85)$$

P'_D dielektrik kayıp güçlerdir; T'_{kd} kablunun dielektrik malzemelerinin ısıl direncidir.

Örnek 4.7

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun toprakta demet halinde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), toprağın ısı direnci (T'_{xy} ve T'_x) ve toprak ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta\theta_o$) bulunması.

Çizelge 4.16'da problemin verileri belirtilmiştir.

Çizelge 4.16: Örnek 4.7'nin Verileri

Açıklama	Birim	Miktar
Kablonun Isıl Direnci	(K.m/W)	0,670
Kablonun Kesiti	(mm ²)	25
Toprak Sıcaklığı	(°C)	20
Kablonun İletken Sıcaklığı	(°C)	70
Montaj Şekli		Demet

Toprağa gömülü haldeki kablolar hakkındaki sorularda yapılması gerekenler aşağıda sıralanmıştır;

1. Yüklenme katsayısı, denklem (4.76) ile bulunur. (μ)
2. Karakteristik çap denklem (4.75) ile bulunur. (d_y)
3. k , k_y ve k_a katsayıları bulunur.
4. T'_{xy} ve T'_x değerleri Şekil 4.9'daki denklemlerden bulunur. (K.m/W)
5. $\Delta\theta_x$ sıcaklığı denklem (4.78) ile bulunur. (°K)
6. Akım taşıma kapasitesi denklem (4.85) ile bulunur. (A)
7. θ_o (kablo yüzey sıcaklığı) kayıp elektriksel güce göre bulunur. (°C)

Çözüm 1: $m = 0,7$ olması durumunda;

$$1. \quad \mu = (0,3 * m) + (0,7 * m^2) = (0,3 * 0,7) + (0,7 * 0,7^2) = 0,553 \quad (4.86)$$

$$2. \quad d_y = \frac{0,103 + 0,246\sqrt{\mu}}{\sqrt{w\left(\frac{\rho_E}{K.m/W}\right)^{0,4}}} = \frac{0,103 + 0,246\sqrt{0,553}}{\sqrt{1\left(\frac{1}{K.m/W}\right)^{0,4}}} = 0,286m \quad (4.87)$$

$$3. \quad k = \frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} = \frac{70}{0,595} + \sqrt{\left(\frac{70}{0,595}\right)^2 - 1} = 235,289 \quad (4.88)$$

$$k_y = \frac{4.h}{d_y} = 9,79 \quad (4.89)$$

$$k_a = \frac{2.h}{d} = 117,647 \quad (4.90)$$

$$\begin{aligned} 4. \quad T'_{xy} &= \frac{\rho_x}{2.h} [\ln k + 3.(\mu - 1) \ln k_y + 2 \ln k_a] = \\ &= \frac{2.5}{2.\pi} [\ln 235,289 + 3.(0.553 - 1) \ln 9,79 + 2 \ln 117,647] = 4,757 K.m/W \quad (4.91) \end{aligned}$$

$$T'_x = \frac{\rho_x}{2.h} [\ln k + 2 \ln k_a] = \frac{2.5}{2.\pi} [\ln 235,289 + 2 \ln 117,647] = 5,969 K.m/W \quad (4.92)$$

$$5. \quad \Delta \vartheta_x = 15 + \frac{(1 - 0,7).100}{3} = 25^\circ K \quad (4.93)$$

6. Hesaplamaları yapılan kablunun dielektrik kayıpları yoktur. Bu nedenle denklem (4.85), denklem (4.94)'e dönüşür.

$$\begin{aligned} I_{z1} &= \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_U - + [((\rho_x / \rho_E) - 1) \Delta \vartheta_x]}{n.R'_{wr}.(T'_{ki} + T'_{xy})}} \\ &= \sqrt{\frac{70 - 20 + [((2.5/1) - 1).25]}{1.0,87 * 10^{-3} .(0,67 + 4,757)}} = 136,13 A \quad (4.94) \end{aligned}$$

$$7. \quad \vartheta_0 = \vartheta_L - P'_i.T'_{ki} = 70 - n.I^2.R'_{wr}.T'_{ki} \quad (4.95)$$

$$= 70 - 1 * 136,13^2 * 0,87 * 10^{-3} * 0,67 = 59,19^\circ C \quad (4.96)$$

Çözüm 2: $m = 1$ olması durumunda;

$$1. \quad \Delta \vartheta_x = 15 + \frac{(1 - 1).100}{3} = 15^\circ K \quad (4.97)$$

2. Hesaplamaları yapılan kablunun dielektrik kayıpları yoktur. Bu nedenle denklem (4.85), denklem (4.98)'e dönüşür.

$$\begin{aligned} I_{z2} &= \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_U - + [((\rho_x / \rho_E) - 1) \Delta \vartheta_x]}{n.R'_{wr}.(T'_{ki} + T'_{xy})}} \\ &= \sqrt{\frac{70 - 20 + [((2.5/1) - 1).15]}{1.0,87 * 10^{-3} .(0,67 + 5,969)}} = 112,03 A \quad (4.98) \end{aligned}$$

$$3. \quad \vartheta_0 = \vartheta_L - P_i' . T_{ki}' = 70 - n . I^2 . R_{wr}' . T_{ki}' \quad (4.99)$$

$$= 70 - 1 \cdot 112,03^2 \cdot 0,87 \cdot 10^{-3} \cdot 0,67 = 62,68^\circ C \quad (4.100)$$

İki farklı yüklenme durumlarındaki akım taşıma kapasiteleri oranlanırsa denklem (4.101) elde edilir.

$$\frac{I_{z2}}{I_{z1}} = \frac{112,03}{136,13} = 0,822 \quad (4.101)$$

Böylece kablonun yüklenme durumuna göre akım taşıma kapasitesi bulunmuş oldu. Toprağa gömülme durumuna göre, kablo akım taşıma kapasiteleri, oranları, kablo yüzey sıcaklıkları ve oranları Çizelge 4.17’de verilmiştir. Hesaplamalar Örnek 4.6’ya göre yapılmıştır.

Çizelge 4.17: Toprakta Farklı Montaj Şekillerine Göre Kablo Akım Taşıma Kapasiteleri

				Demet Halde	Sıralı Halde	Tek Halde
Yüklenme $m = 1,0$	Akım Taşıma Kapasitesi	I_{z1}	A	112,025	126,236	171,173
	Kablo Yüzey Sıcaklığı	θ_0	°C	62,684	60,711	52,920
	Toprak Isıl Direnci	$T'x$	K.m/W	5,970	4,559	2,174
Yüklenme $m = 0,7$	Akım Taşıma Kapasitesi	I_{z2}	A	136,122	163,571	203,027
	Kablo Yüzey Sıcaklığı	θ_0	°C	59,198	54,403	45,971
	Toprak Isıl Direnci	$T'xy$	K.m/W	4,757	3,089	1,770

4.3 Suyun Isıl Direncinin Hesabı

Suyun ısıl direncini bulmak için, suyun durumunun incelenmesi gerekmektedir. Suyun durağan mı yoksa hareketli olması, ısıl direncin hesaplanmasını ciddi bir şekilde değiştirmektedir. Bu tez çalışmasında durağan haldeki suya serilmiş kablonun üzerinden geçen akım taşıma kapasitesi hesabı yapılmıştır.

Topraktaki ısı yayılımı hesapları, su durağan halde olduğu için, suda da geçerlidir. Dikkat edilmesi gereken husus ise, kablonun etrafındaki toprağı kurutması, toprağa döşenme durumunda geçerli iken, suda böyle bir şey söz konusu değildir. Suyu serilmiş kablolarla karakteristik çap geçerliliğini devam ettirmektedir. Karakteristik çapın yüklenme durumuna göre değiştiği bilindiğine göre, yapılacak hesaplamalarda buna da dikkat edilmelidir. Konunun örnek ile anlaşılması daha kolay olacaktır.

Örnek 4.8

YYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablonun suda demet halinde bulunması durumunda akım taşıma kapasitesi (I), suyun ısıl direnci (T'_{xy} ve T'_x) ve su ile kablo yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta\theta_0$) bulunması. Çizelge 4.18'da problemin verileri belirtilmiştir.

Çizelge 4.18: Örnek 4.8'in Verileri

Açıklama	Birim	Miktar
Kablonun Isıl Direnci	(K.m/W)	0,670
Kablonun Kesiti	(mm ²)	25
Su Sıcaklığı	(°C)	20
Kablonun İletken Sıcaklığı	(°C)	70
Montaj Şekli		Demet
Suyun Isıl İletkenliği (ρE) [8]	(K.m/W)	1,12

Toprağa gömülü haldeki kablolar hakkındaki sorularda yapılması gerekenler aşağıda sıralanmıştır;

1. Yüklenme katsayısı, denklem (4.76) ile bulunur (μ).
2. Karakteristik çap denklem (4.75) ile bulunur (d_y).
3. k , k_y ve k_a katsayıları bulunur.
4. T'_{xy} ve T'_x değerleri Şekil 4.9'daki denklemlerden bulunur (K.m/W).
5. Akım taşıma kapasitesi denklem (4.85) ile bulunur (A).
6. θ_0 (kablo yüzey sıcaklığı) kayıp elektriksel güce göre bulunur (°C).

Aşamalar, Örnek 4.7'deki gibi sıralandığında hesap sonuçları elde edilecektir. Hesaplamaların sonuçları, farklı yüklenme ve dizilme şartlarına göre ortaya çıkan hesaplamalar ile birleştirildiğinde Çizelge 4.19'daki veriler ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.19: Suda Farklı Montaj Şekillerine Göre Kablo Akım Taşıma Kapasiteleri

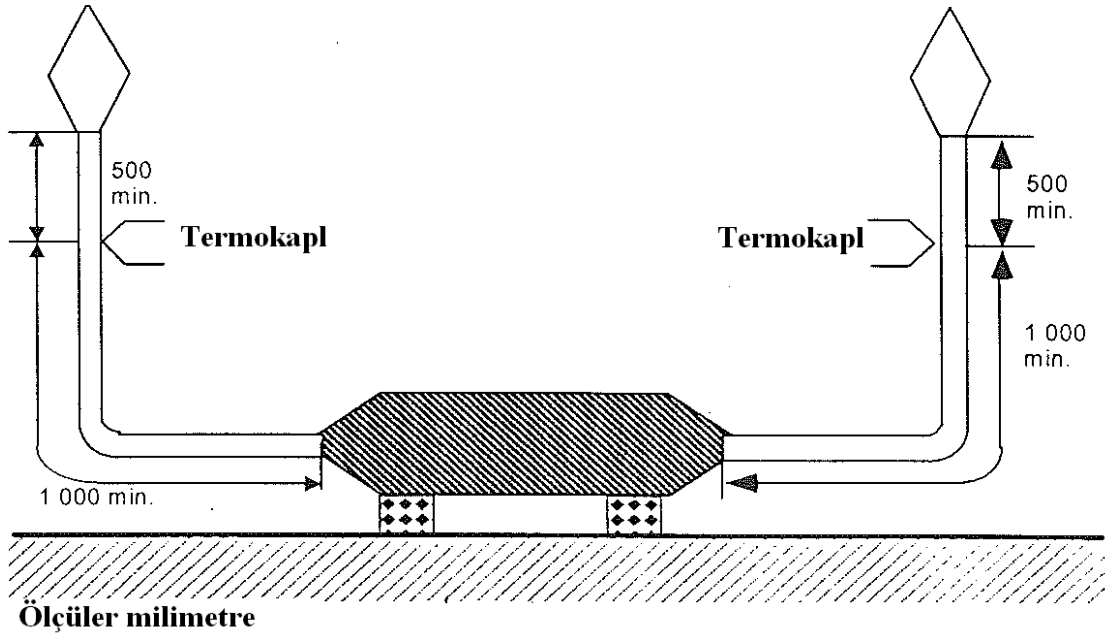
				Demet Halde	Sıralı Halde	Tek Halde
Yüklenme $m = 1,0$	Akım Taşıma Kapasitesi	I_{z1}	A	131,091	159,318	186,978
	Kablo Yüzey Sıcaklığı	Q_0	°C	59,982	55,204	49,620
	Suyun Isıl Direnci	T'_x	K.m/W	2,674	1,594	0,974
Yüklenme $m = 0,7$	Akım Taşıma Kapasitesi	I_{z2}	A	143,413	183,101	198,366
	Kablo Yüzey Sıcaklığı	Q_0	°C	58,010	50,456	47,062
	Suyun Isıl Direnci	T'_{xy}	K.m/W	2,124	1,044	0,790

5. YAPILAN DENEYLER VE SONUÇLARI

Deneylerde NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablo kullanılmıştır. Deneylerde amaç kablo akım taşıma kapasitesinin iletken ve kılıfta sıcaklıklarının standartlarda (EN 50393-2006) belirtilen bir ortamda incelenmesidir.

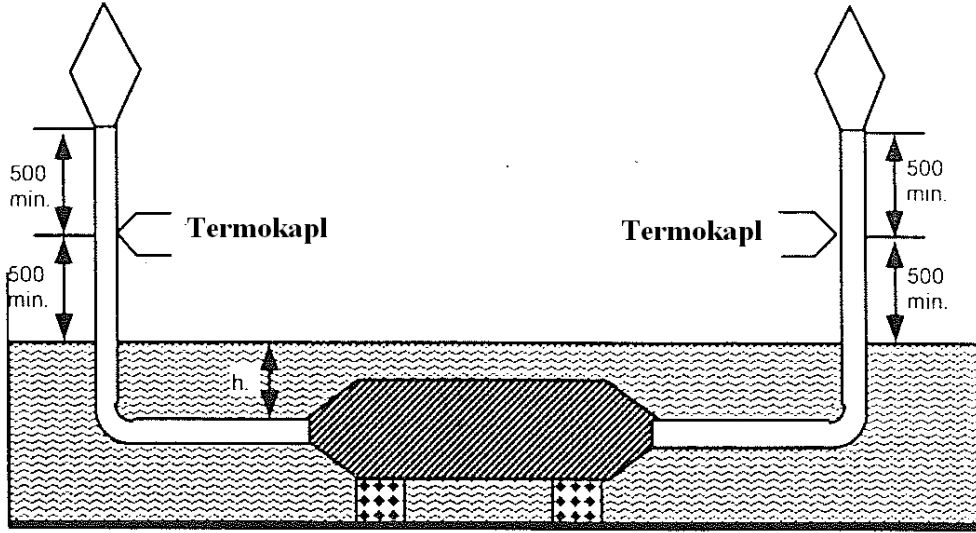
5.1 Genel Bilgi

Isıl çevrim deneylerinde, kablolar 8 saatlik dönemlerle deneylerden geçerler. Bu şekilde yapılan 126 çevrim deneyi sonucunda kablo ekinin yaratılan ısıya ve çalışma koşullarına dayanıp dayanamaması incelenir. 126 çevrim deneyinin 63 tanesinde kablo ve kablo eki havada bulunmaktadır. Bu şekilde yapılan deney düzeneği Şekil 5.1’de bulunmaktadır. Suda ve havada yapılacak ısıl çevrim deney düzeneği ile ilgili resimler Ek A da bulunmaktadır.



Şekil 5.1: Havada Isıl Çevrim Deneyi Düzeneği

Çevrim deneylerinin diğer 63 tanesi ise kablo havada, kablo eki ise suda olacak şekilde yapılır. Suda yapılan ısı çevrim deneylerinin deney düzeneği Şekil 5.2’de bulunmaktadır.



Ölçüler milimetre

Şekil 5.2: Suda Isıl Çevrim Deneyi Düzeneği

Deney düzeneğinde aşağıda ismi ve özellikleri yazılan malzemeler kullanılmıştır.

Kablo: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablo,

Su tankı: 2 m x 1 m x 0,5 m ölçülerinde,

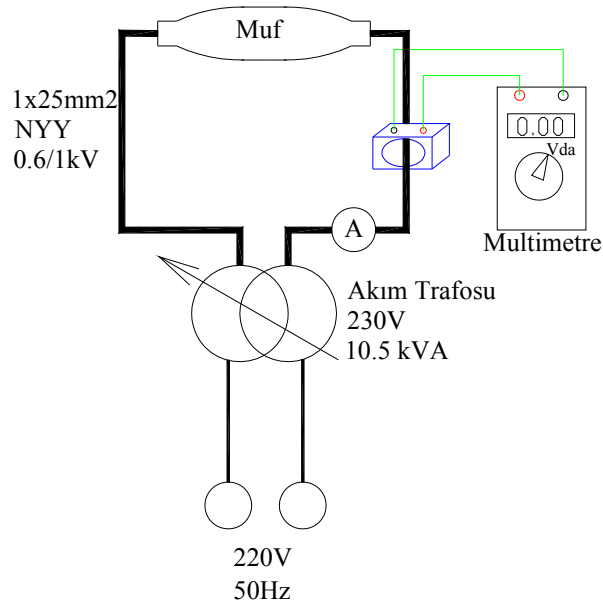
Akım Trafosu: 230 V, 10,5 kVA, tek fazlı giriş – tek fazlı çıkışlı trafo,

Akım ölçü trafosu: 400/5 A akım ölçü trafosu,

Termokupl: K tipi PT100 termokupl (-200~1300°C ± 0.7°C),

Termometre: Escort-26 model dijital termometre (2 kanallı).

Deney düzeneğinin kurulmuş hali Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Şebekeden gelen 230 V alternatif gerilim, oto akım trafosu yardımıyla düşürülür ve akımın yükselmesi sağlanır. Oto akım trafosu şehir şebekesinden gelen 220 V gerilimi, ayarlı olması sebebiyle 3 V ile 7 V arasındaki değerlere düşürür. Gerilim seviyesindeki değişim, enerjinin korunumu yasasına göre akımın yükselmesine sebep olur. Yükselen akım kablo ve kablo ekinde geçer. Kabloya enerji verildikten sonra kablo üzerindeki akım değeri 132 A seviyelerine gelene kadar oto akım trafosu ayarlanır. Akımın istenen değere geldiğini anlayabilmek için, oto akım trafosuna seri olarak bağlı bir ampermetreden akım değeri ölçülmüştür. Akım seviyesi uygun konuma geldiği anda, deneye başlanır.



Şekil 5.3: Hava Ortamında Deney Düzeneği

5.2 Yapılan Deneyler ve Sonuçları

5.2.1 Havada ısıl çevrimi deneyi

5.2.1.1 Isıl çevrim deneyi birinci kısım

Kablo oda sıcaklığında beklerken, deney düzeneği kurulduktan sonra, kablo üzerindeki sıcaklığın üç saat sonunda 70°C olması istenir. Kablo iletken sıcaklığını üç saatin sonunda 70°C 'ye çıkarırken akım seviyesinin sabit olarak kablo işletme akımı olan 132 A'de kalması istenir. Akım değeri daha az olursa kablo iletken sıcaklığı 70°C 'ye çıkamaz, fazla olur ise 70°C 'den fazla olmaya başlar ki bu sıcaklık değerleri PVC malzemenin bozulmasına sebep olabilir. Üç saatin sonunda kablo iletken sıcaklığının 70°C 'ye çıkışının eğrisi Şekil 4.5'de ve her on dakikada bir ölçülen akım ve sıcaklık değerleri ise Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Bu ölçümlerden çıkan sonuçlara göre, NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablunun üç saatlik yüklenme durumunda iletken sıcaklığı $71,6^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkmıştır ve sabit kalmıştır. Deneyde bazı durumlarda kablo akım seviyesinin 132 A'den 129 A'e düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni, kablunun üzerinden geçen akımı sınırlaması ve oto akım trafosunun zaman ilerledikçe akımı aynı seviyede tutamamasıdır.

400/5 A'lik akım trafosunun akım ölçmelerinde %2'lik bir ölçme hatasına yol açtığı görülmüştür. Denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de bu hatanın gösterilmesi için saat 10:00,

11:00 ve 12:00'de, ampermetreden ve akım trafosundan ölçülen değerlerdeki oranlar dikkate alınmıştır. Hata her değerde aynı olduğu için, cihazın ölçümlemesinde bir hata vardır. Bu hata oranı bilindiğinde, cihaz ile yapılan ölçümlerde, cihazdan okunan değerlere hata oranı katılarak kesin sonuçlar elde edilir.

$$\text{Saat 10:00: } 1,66 * \frac{400}{5} = 132,60 A \Rightarrow \frac{132,60}{132,00} = 1,02 \quad (5.1)$$

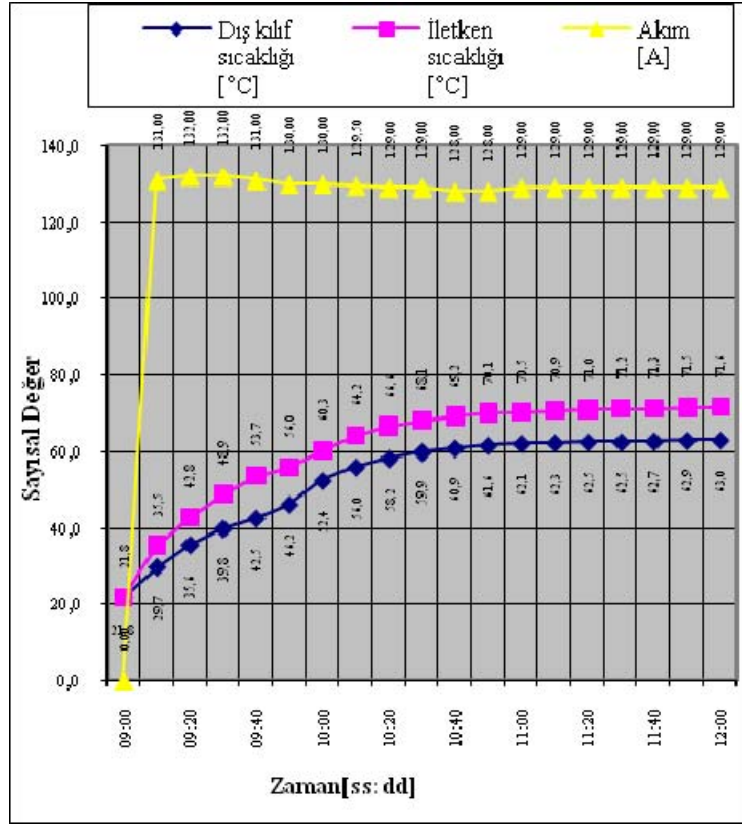
$$\text{Saat 11:00: } 1,64 * \frac{400}{5} = 131,58 A \Rightarrow \frac{131,58}{129,00} = 1,02 \quad (5.2)$$

$$\text{Saat 12:00: } 1,64 * \frac{400}{5} = 131,58 A \Rightarrow \frac{131,58}{129,00} = 1,02 \quad (5.3)$$

Kablo kılıf sıcaklığı, Çizelge 5.1 ve Şekil 5.4'ten görüleceği üzere, 63°C'ye kadar çıkabilmektedir. İletken sıcaklığı ile arasındaki fark, kablo kılıfındaki ısı kaybını göstermektedir. Ortam sıcaklığı, deney bir kapalı laboratuvar ortamında gerçekleştiği için genel olarak sabit kalmıştır. Deneyler, dış ortamda gerçekleşmiş olsa idi, ortam sıcaklığı dışında rüzgâr ve güneş etkisi de dikkate alınacaktı.

Çizelge 5.1: Isıl Çevrim Deneyinin Birinci Kısımında Ölçülen Akım ve Sıcaklıklar

Zaman [ss:dd]	Dış Kılıf Sıcaklığı [°C]	İletken Sıcaklığı [°C]	Akım [A]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Akım Trafosu Akımı [A] 400/5
09:00	21,8	21,8	0,00	19,9	0,00
09:10	29,7	35,5	131,00	19,9	1,67
09:20	35,6	42,8	132,00	19,9	1,68
09:30	39,8	48,9	132,00	19,9	1,68
09:40	42,5	53,7	131,00	19,9	1,67
09:50	46,2	56,0	130,00	19,9	1,66
10:00	52,4	60,3	130,00	20,9	1,66
10:10	56,0	64,2	129,50	20,9	1,65
10:20	58,2	66,6	129,00	20,9	1,64
10:30	59,9	68,1	129,00	20,9	1,64
10:40	60,9	69,2	128,00	20,6	1,63
10:50	61,6	70,1	128,00	20,6	1,63
11:00	62,1	70,5	129,00	20,9	1,64
11:10	62,3	70,9	129,00	20,6	1,64
11:20	62,5	71,0	129,00	20,9	1,64
11:30	62,5	71,2	129,00	20,9	1,64
11:40	62,7	71,3	129,00	20,9	1,64
11:50	62,9	71,5	129,00	20,9	1,64
12:00	63,0	71,6	129,00	20,9	1,64



Şekil 5.4: Isıl Çevrim Deneyinin Birinci Kısımının İlk Üç Saatlik Bölümünde Ölçülen Akım ve Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri

5.2.1.2 Isıl çevrim deneyi ikinci kısım

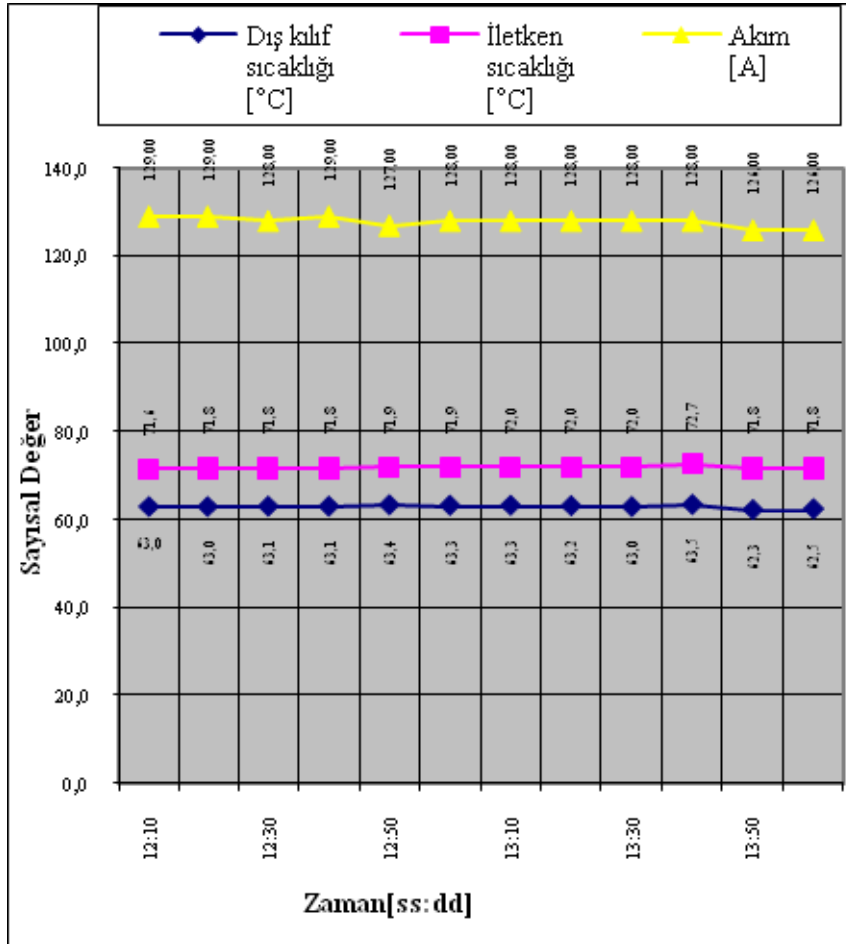
Üç saatin sonunda, iletken sıcaklığının sabit kaldığı gözlenmektedir. Bu durumda iki saat süre daha beklenir ve kablonun sıcaklığının sabit kalması durumu incelenir. Çizelge 5.2'de deney sonuçları verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere, kablo iletken sıcaklığı, üç saatlik akım uygulama deneyindeki değerden az da olsa bir miktar artmıştır. Artışın miktarı çok az olduğu için kablo iletken sıcaklığının PVC malzeme için gerekli sıcaklık sınır koşulunda olduğu gözlenmiştir.

Saat 13:40'dan sonra ortam sıcaklığı 2°C daha artmıştır. Sıcaklık artışı sebebiyle kablo iletkeni sıcaklığı da, azda olsa artmıştır. Daha sonrasında ise, artış sebebiyle oluşan direnç, kablo üzerinden geçen akımı sınırlandırmıştır.

Akım trafosu tarafından verilen akımın, multimetre ile ölçülen değerlerinde, ilk üç saatteki %2 sapma devam etmiştir. Çizelge 5.2 ve Şekil 5.5'de deneyde elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 5.2: Isıl Çevrim Deneyinin İkinci Kısımında Ölçülen Akım ve Sıcaklıklar

Zaman [ss:dd]	Dış Kılıf Sıcaklığı [°C]	İletken Sıcaklığı [°C]	Akım [A]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Akım Trafosu Akımı [A] 400/5
12:10	63,0	71,6	129,00	20,9	1,64
12:20	63,0	71,8	129,00	20,9	1,64
12:30	63,1	71,8	128,00	20,9	1,63
12:40	63,1	71,8	129,00	20,9	1,64
12:50	63,4	71,9	127,00	20,9	1,62
13:00	63,3	71,9	128,00	20,9	1,63
13:10	63,3	72,0	128,00	20,9	1,63
13:20	63,2	72,0	128,00	20,9	1,61
13:30	63,0	72,0	128,00	20,9	1,63
13:40	63,5	72,7	128,00	22,9	1,63
13:50	62,3	71,8	126,00	22,9	1,61
14:00	62,5	71,8	126,00	22,9	1,61



Şekil 5.5: Isıl Çevrim Deneyinin Birinci Kısımının Son İki Saatlik Bölümünde Ölçülen Akım ve Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri

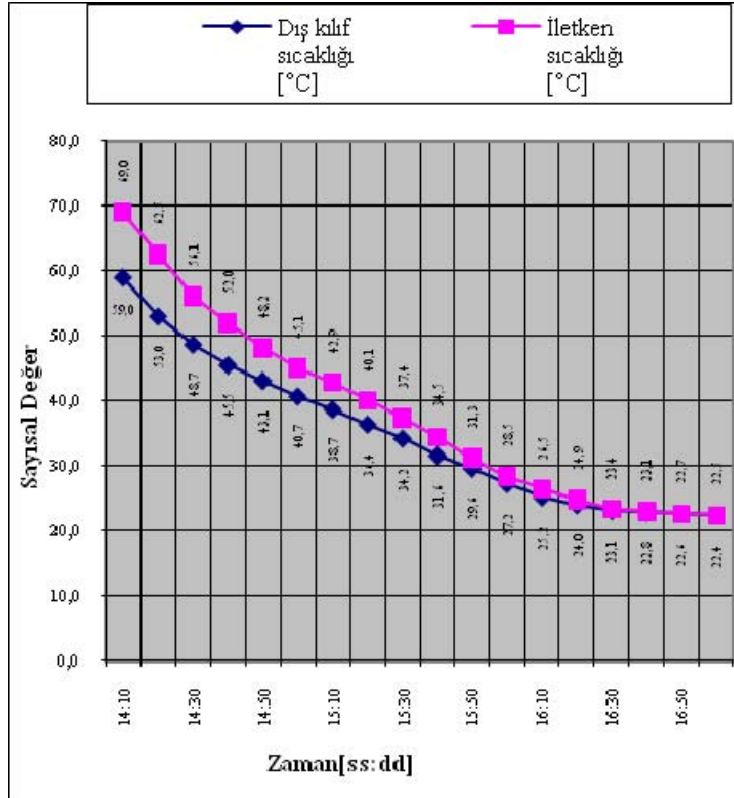
5.2.1.3 Isıl çevrim deneyi üçüncü kısım

Deneyin birinci ve ikinci kısımlar yapıldıktan sonra, deneyin son kısmına geçilir. Beş saat boyunca akım verilen kablonun akımı kesilir ve üç saat boyunca soğuması incelenir. Üç saatlik soğuma sonunda kablo iletken ve kılıf sıcaklığının, deneye başlamadan önceki sıcaklık değerlerine yakın olması gerekmektedir. Eğer sıcaklık değerleri arasındaki fark kabul edilebilir seviyede ise, kablo ve kablo ekinin, standartlarda belirtilen özelliklere sahip oldukları sonuçlarına varılır (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3: Isıl Çevrim Deneyinin Üçüncü Kısımında Ölçülen Akım ve Sıcaklıklar

Zaman [ss:dd]	Dış Kılıf Sıcaklığı [°C]	İletken Sıcaklığı [°C]	Akım [A]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Akım Trafosu Akımı [A] 400/5
14:10	59,0	69,0	0,00	22,9	0,00
14:20	53,0	62,5	0,00	22,9	0,00
14:30	48,7	56,1	0,00	22,9	0,00
14:40	45,5	52,0	0,00	22,9	0,00
14:50	43,1	48,2	0,00	23,9	0,00
15:00	40,7	45,1	0,00	22,9	0,00
15:10	38,7	42,9	0,00	22,9	0,00
15:20	36,4	40,1	0,00	22,9	0,00
15:30	34,2	37,4	0,00	23,9	0,00
15:40	31,6	34,5	0,00	22,9	0,00
15:50	29,6	31,3	0,00	23,9	0,00
16:00	27,2	28,5	0,00	23,9	0,00
16:10	25,2	26,5	0,00	22,9	0,00
16:20	24,0	24,9	0,00	22,9	0,00
16:30	23,1	23,4	0,00	22,9	0,00
16:40	22,8	23,1	0,00	22,9	0,00
16:50	22,6	22,7	0,00	22,9	0,00
17:00	22,4	22,5	0,00	22,9	0,00

Çizelge 5.3'deki sıcaklık değerlerinin sonucunda, saat 17:00'deki kılıf ve iletken sıcaklıklarına bakıldığında, Çizelge 5.1'deki başlangıç değerlerinden 1,5~2,0°C farklılık gözlenmektedir. Ortam sıcaklığı da 2,0°C arttığı için, kablo iletken ve kılıf sıcaklığının istenilen değerde olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.6'da ısı çevrim deneyinin üç saatlik üçüncü kısmında ölçülen akım ve sıcaklıkların zamanla değişimleri gösterilmiştir.



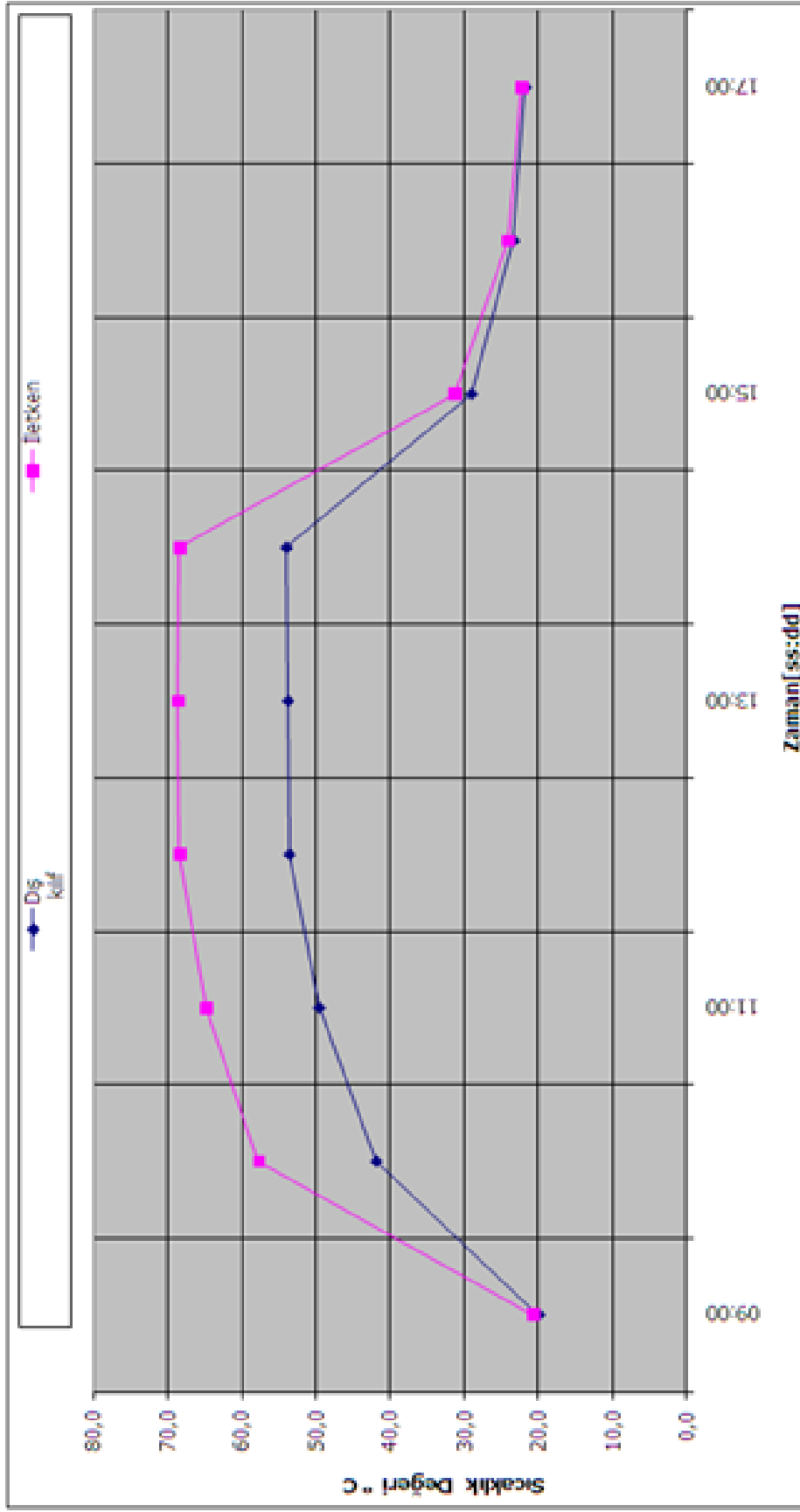
Şekil 5.6: Isıl Çevrim Deneyinin Üç Saatlik Üçüncü Kısımında Ölçülen Dış Kılıf ve İletken Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri

5.2.2 Suda ısıl çevrim deneyi

Çizelge 5.4'den anlaşılabileceği üzere, deneyin suda yapılması sebebiyle, kablo daha fazla serinlemiştir, soğumuştur. Kablo kılıf sıcaklığı maksimum 54,1°C'ye, iletken sıcaklığı ise maksimum 68,8°C'ye kadar çıkmıştır. Havada monte edilmiş kabloya göre, suda monte edilmiş kablonun sıcaklık değerleri daha düşüktür. Bu durumda kablodan daha fazla akım geçirerek, kablo iletken sıcaklığının 70°C olan sınır değere ulaşması sağlanabilir. Sonuç olarak, kablolardan suda monte edilmeleri durumunda daha fazla akım geçirilebileceği ortaya çıkmaktadır. Çizelge 5.4'de suda monte edilmiş kablonun ısıl çevrim deneyi ölçüm değerleri bulunmaktadır. Şekil 5.7'de suda ısıl çevrim deneyinde ölçülen sıcaklıkların zamanla değişimleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.4: Suda Isıl Çevrim Deneyinin Ölçülen Akım ve Sıcaklık Değerleri

Zaman [ss:dd]	Sıcaklık [°C]				Akım Değerleri [A]	
	Dış Kılıf	İletken	Su	Ortam	Kablo Akımı	Akım Trafosu 400/5
09:00	20,0	20,7	18,8	17,9	0,00	0,00
09:10	26,9	35,4	18,9	17,9	131,00	1,97
09:20	33,4	44,4	19,0	17,9	131,00	1,97
09:30	36,3	50,2	19,1	17,9	131,00	1,97
09:40	39,2	54,1	19,2	18,9	131,00	1,97
09:50	40,2	56,5	19,3	18,9	129,00	1,94
10:00	41,9	57,7	19,4	18,9	129,00	1,94
10:10	42,6	59,0	19,4	18,9	129,00	1,94
10:20	43,2	61,4	19,4	18,9	129,00	1,94
10:30	46,0	62,0	19,4	18,9	129,00	1,94
10:40	47,3	62,8	19,5	18,9	129,00	1,94
10:50	48,8	63,7	19,5	18,9	129,00	1,94
11:00	49,6	64,7	19,5	18,9	129,00	1,94
11:10	51,0	65,4	19,5	18,9	129,00	1,94
11:20	51,5	66,0	19,6	18,9	129,00	1,94
11:30	52,3	66,8	19,6	18,9	129,00	1,94
11:40	53,0	67,2	19,6	18,9	128,00	1,92
11:50	53,4	68,0	19,6	18,9	128,00	1,92
12:00	53,6	68,3	19,6	18,9	128,00	1,92
12:10	53,6	68,3	19,6	18,9	128,00	1,92
12:20	53,6	68,3	19,6	18,9	128,00	1,92
12:30	53,6	68,4	19,6	18,9	128,00	1,92
12:40	53,8	68,4	19,6	18,9	128,00	1,92
12:50	53,8	68,6	19,6	18,9	128,00	1,92
13:00	53,8	68,6	19,6	18,9	128,00	1,92
13:10	54,0	68,6	19,6	18,9	128,00	1,92
13:20	54,0	68,5	19,5	18,9	128,00	1,92
13:30	54,1	68,5	19,5	18,9	128,00	1,92
13:40	54,1	68,7	19,4	18,9	128,00	1,92
13:50	54,0	68,8	19,5	18,9	128,00	1,92
14:00	54,0	68,4	19,5	18,9	128,00	1,92
14:10	53,6	58,3	19,2	18,9	0,00	0,00
14:20	45,6	52,4	18,8	18,9	0,00	0,00
14:30	41,7	43,0	18,4	18,9	0,00	0,00
14:40	35,7	38,0	19,0	17,9	0,00	0,00
14:50	33,8	35,4	18,8	17,9	0,00	0,00
15:00	29,1	31,2	18,8	17,9	0,00	0,00
15:10	26,2	28,9	18,6	17,9	0,00	0,00
15:20	24,9	26,4	18,2	17,9	0,00	0,00
15:30	23,8	25,6	18,7	17,9	0,00	0,00
15:40	24,7	24,4	18,7	18,9	0,00	0,00
15:50	23,9	24,8	18,5	18,9	0,00	0,00
16:00	23,4	24,0	18,1	17,9	0,00	0,00
16:10	23,7	23,8	18,7	17,9	0,00	0,00
16:20	22,8	24,1	18,3	17,9	0,00	0,00
16:30	22,7	22,8	18,5	17,9	0,00	0,00
16:40	23,0	23,5	18,0	17,9	0,00	0,00
16:50	21,4	22,3	18,5	17,9	0,00	0,00
17:00	21,8	22,3	18,1	18,9	0,00	0,00



Şekil 5.7: Suda Isıl Çevrim Deneyinde Ölçülen Sıcaklıkların Zamanla Değişimleri

5.2.3 Deneylerin sonuçları

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, kablo eki ve kablunun ısı çevrim deneylerinden başarı ile çıktığını göstermektedir. Kablo ve kablo eki, işletme akımının devamlı bir şekilde verilmesi ve akım kesildikten sonrasındaki süreçte, çalışmaya başlamadan önceki özelliklerini yitirmemiştir. Kablo ve kablo eki, yapılan deneyler boyunca devamlılık özelliklerini de sağlamışlardır.

Bölüm 4’de yapılmış olan hesaplama sonuçlarından, havada demet halde kablo akım taşıma kapasitesi için Çizelge 4.3’deki değerlere bakılır. Çizelge 4.3’de ortam sıcaklığının 20°C olduğu durumda, kablo iletken sıcaklığını 70°C’ye çıkaran akım değeri 128,54 A’dır. Ortam sıcaklığı, deneyin odada olması ve dolayısı ile bir rüzgâr etkisi ve güneş etkisinin olmaması sebebiyle Çizelge 4.3’deki değer ile deneylerde elde edilen sonuçların aynı olması gerekmektedir.

Yapılan deneylerden, havadaki ısı çevrim deneyinde, kablo iletkeninden 132 A geçirilmiştir. Bunun sebebi NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablunun demet halde iken, hava ortamında ve 20°C ortam sıcaklığında iletken sıcaklığını 70°C’ye çıkaran akım değerinin 132 A olmasındandır. Hesaplamalarda ise 128,54 A geçirildiğinde 70°C’ye çıktığı sonucu bulunmuştur. Deneydeki verilerin hesaplama sonuçları ile hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir.

Yapılan deneylerden, sudaki ısı çevrim deneyinde, kablo iletkeninden 132 A geçirilmiştir. Bunun sebebi NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV kablunun akım taşıma kapasitesinin ve sıcaklık değerlerinin, havadaki ortama göre nasıl değiştiğinin incelenmesini göstermek içindir. Yapılan deneyler göstermiştir ki, kablunun suda monte edilmesi durumunda, iletken ve sıcaklık değerleri, havada monte edilmesine göre daha düşüktür. Bu durumda kablo akım taşıma kapasitesi, suda monte edilmesi durumunda daha fazladır. Aradaki fark, Bölüm 4’de Örnek 4.8 ile Örnek 4.1’deki sonuç değerlerinden bulunabilir. Denklem (5.4)’de aradaki fark gösterilmiştir.

Havada demet halde 20°C’de akım taşıma kapasitesi = 128,54 A

Suda demet halde 20°C’de akım taşıma kapasitesi = 131,091 A

$$131,091 - 128,54 = 2,551A \quad (5.4)$$

Giriş bölümünde de anlatıldığı üzere, kablo ekleri, kablonun direnç olarak ve sıcaklık olarak en yüksek değere sahip yerleridir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deneylerde kullanılan kablo ekinin, kablonun akım taşıma kapasitesini etkilemediği gözlenmiştir. Kablo eki, kablonun bir parçası gibi davranmıştır ki, kablo ekleri için istenilen özellik de budur. Bu durumda deneylerde kullanılan kablo ekinin uygun olduğu söylenebilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik enerjisi ihtiyacının gün geçtikçe arttığı düşünüldüğünde, elektrik akımının bir yerden bir yere iletilmesini sağlayan kablolar da gereksinimin de arttığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Çok geniş kullanım alanı içinde, farklı ihtiyaçları karşılamak için kablolar üretilmekte ve yerine göre farklı hesaplamalar yapılarak kullanılmaktadır.

Kablolar da yüksek ve çok yüksek gerilim seviyelerine duyulan ihtiyaç, teknik ve ekonomik düşünceden ortaya çıkmaktadır. Yüksek gerilim ile yapılan iletimde de kayıplar azalmakta ve dolayısı ile verim de artmaktadır. Bununla birlikte talep edilen güçlerin de artması sebebiyle yüksek gerilim ile elektrik iletimi zorunlu hale gelmiştir.

Yüksek gerilimin elektrik enerjisi iletiminde, alçak gerilimin ise tesisatta kullanıldığı bilinmektedir. Tesisatlarda kullanılan kablolar da alçak gerilim kullanılması sonucu kayıplar artmaktadır. Son kullanıcının da alçak gerilim kullanması sebebi ile alçak gerilim tesisatı hesapları yapan elektrik mühendislerinin, yapacakları hesaplamalar da önem kazanmaktadır.

Kablonun üzerinden geçen akım, kablo iletkeninin %100 iletkenliğe sahip bir malzeme olmaması nedeniyle, elektrik akımına karşı bir direnç gösterir. Elektriksel direnç olarak adlandırılan bu engel, kablo iletkeni üzerinde gerilim birikmesine sebep olur. Biriken gerilim ve üzerinden geçen akım sebebiyle kablo iletkeninde bir güç oluşur. İstenmeyen bu güce kayıp güç adı verilir.

Kayıp güç, zamanla kayıp bir enerji ortaya çıkarır. Kaybolan bu enerji, ısı enerjisi olarak kendini belli eder ve dışarıya atılmaya çalışılır. Kabloda kullanılan iletken malzemelerden, üzerinden akım geçen bütün malzemelerde kayıp enerji oluşur ve yalıtkan malzemeler üzerinden geçerek dışarıya ısı enerjisi olarak yayılır. Dışarıya atılamayan ısı enerjisi, nerede engel ile karşılaşılıyor ise o bölgedeki sıcaklığı artırır.

Kabloda kullanılan yalıtkan malzemelerin ısıl geçirgenlikleri ve kalınlıkları, ısıнын iletilmesine etki eder. Yalıtkan malzemenin ısıl direnci ne kadar fazla ise ısı o kadar zor dışarı atılır. Bunun yanında yalıtkan malzemelerin dayanabilecekleri sıcaklık

değerleri de vardır ki, kablonun akım taşıma kapasitesini sınırlandıran en önemli etken de budur. Kullanılan yalıtkan malzeme kaç dereceye kadar sıcaklığa dayanabiliyorsa, iletken sıcaklığı en fazla o dereceye kadar çıkabilme iznine sahiptir. İletkeni, sahip olduğu sıcaklık iznine çıkmasını sağlayan akım değerine, kablonun akım taşıma kapasitesi denir.

Kabloların ısı üreten bir kaynak olduğu düşünülürse, sadece mevcut kablo iletkeni değil, kablonun yanındaki kablonun sıcaklığı da, mevcut kablonun akım taşıma kapasitesine etki eder. Kablonun tek halde bulunması durumunda, sadece iletken üzerinden geçen akımın oluşturduğu sıcaklığa, yanına bir kablo yerleştirildiğinde, sonradan yerleştirilen kablonun oluşturduğu sıcaklık da eklenir ve yalıtım malzemesi için sınır koşul olan değer aşılır. Böyle bir durumun olmaması için, mevcut kablo ve yanına yerleştirilen kablonun akım taşıma kapasiteleri düşürülür.

İletkende oluşan sıcaklık kablo yalıtım malzemesinden geçerek iletkenin dışarıya doğru aktarılırken, yalıtım malzemesini aştıktan sonra, ortamda bulunan malzemenin de üzerinden geçer. Ortamın malzemesinin de ısı geçirgenliği ve ortam sıcaklığı da önem kazanır.

Kablonun içinde bulunduğu ortam sıcaklığı azaldıkça kablo yalıtım malzemesinin sınır koşula çıkması zorlaşır ve kablo iletkeninden daha fazla akım geçirilebilir. Ortam sıcaklığının değişken olabileceği düşünülüp, mevsimsel hatta yıllara bağlı sıcaklık eğrileri dikkate alınmalı, hesaplamalar ona göre yapılmalıdır.

Ortamın ısı geçirgenliği az oldukça kablo yalıtım malzemesi sıcaklığı dışarıya kolay atamaz ve üzerinde biriktirir. Bu durumda sınır koşula olan sıcaklık değerine kolay çıkılır ve kablo akım taşıma kapasitesi düşer.

Kablonun bulunduğu ortamın katı, sıvı veya gaz oluşu ısı iletimin şeklini değiştirir. Ortamın haline göre ısı, farklı yöntemler kullanarak aktarılır. Eğer kablo ortamı açık hava ise, rüzgâr ve güneşin etkisi de dikkate alınmalı hesaplamalar ona göre yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında, seçilen bir kablonun hava, su ve toprak gibi farklı ortamlarda, farklı sıcaklıklardaki akım taşıma kapasitesinin değişimi incelenmiştir. Ortamdaki durumların daha gerçekçi olabilmesi için, rüzgâr, güneş ve açık hava basıncı da dikkate alınmıştır. Bölüm 4’de konu ile ilgili örnekler ve çözümleri bulunmaktadır.

Bölüm 4’de bulunan Örnek 4.1’in değerleri, deneyler yapılarak bulunmuş ve hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.

Enerjinin insanlık için çok büyük bir önemi olduğu günümüzde, elektrik enerjisini iletirken ne kadar az kayıp verirsek o kadar iyi olacağı açıktır. Kablolarında enerji naklini gerçekleştirdiği düşünülürse, kablolarda yapılacak hesaplamaların çok dikkatli yapılması ve enerji kaybının mümkün olduğunca az olması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında ele alınan konuların, bu nedenler düşünülerek iyi bir şekilde anlaşılması ve uygulanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **M. A. Laughton Ceng., D. J. Warne Ceng.,** 2003. Electrical Engineers Reference Handbook. 16th Edition, George Newnes Ltd., London.
- [2] **McAllister, D.,** 1987. *Electric Cables Handbook*, Granada Technical Book Ltd., Great Britain.
- [3] **Malik, N. H., Al-Arainy A. A., Qureshi, M. I.,** 1998. *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker, Inc., King Saud University, Riyadh.
- [4] **Brakelmann H., Anders G.,** 2001. Ampacitiy Reduction Factors For Crossing Thermally Unfavourable Regions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, 444-448
- [5] **Schmidt N.P.,** 1999. Comparison Between IEEE and CIGRE Ampacity Standarts, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 4, 1555-1558
- [6] **Garrido C., Otero A. F., Cidras J.,** 2003. Theoritical Model to Calculate Steady-State and Transient Ampacity and Temperature in Buried Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, 667-678
- [7] **Hiranandani A.,** 1991. Calculation of Conductor Temperatures and Ampacities of Cable Systems Using A Generalised Finite Difference Model, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 15-24
- [8] **Kocar I., Ertaş A.,** 2004. Thermal Analysis for Determination of Current Carrying Capacity of PE and XLPE Insulated Power Cables Using Finite Element Method, *IEEE Melecon*, 905-908
- [9] **El Kady M.A., CHU F.Y.,** 1984. A Probabilistic Approach To Power Cable Thermal Analysis And Ampacity Calculation, *Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas-103, No. 9, 2735-2740
- [10] **Cunnigham B., Zadehgo H.,** 2001. Underground Urban Distribution Cables, Ampacity Analysis And Capacity Improvements in Seattle City Light System, *IEEE Melecon*, 183-188
- [11] **Leon D. F.,** 2001. Major Factors Affecting Cable Ampacity, *IEEE Melecon*, 1-6
- [12] **Black W. Z., Burdick P. A.,** 1982. Ampacities of Underground Electric Power Cables in the Presence of External Forced Cooling, *IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas-101, No. 10, 3810-3819
- [13] **IEC60287-1-1,** 2006. Electric Cables-Calculation of Current Ratings, Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses –General, *IEC International Standard*, Geneva.

- [14] **IEC60287-1-2**, 2006. Electric Cables-Calculation of Current Ratings, Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses, Section 2: Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation, *IEC International Standard*, Geneva.
- [15] **IEC60287-2-1**, 2006. Electric Cables-Calculation of Current Ratings, Part 2-1: Thermal resistance Calculation of thermal resistance *IEC International Standard*, Geneva.
- [16] **IEC60287-1-2**, 2006. Electric Cables-Calculation of Current Ratings, Part 2: Thermal resistance - Section 2: A method for calculating reduction factors for groups of cables in free air, protected from solar radiation *IEC International Standard*, Geneva.
- [17] **Balck, M. R.**, 1983. The History of Electric Wire and Cables, Peter Peregrinus, London.
- [18] **George J. Anders.**, 2005. Rating of Power Cables in Unfavorable Thermal Environment, IEEE Press, Ottawa.
- [19] **Aras F., Oysu C.**, 2007. 154 kV XLPE Yeraltı Güç Kablo Ekinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Isıl Analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **22**, 281-286.
- [20] **Lienhard, John H.**, 2008. A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts.
- [21] **Heinhold L.**, 1990. Power Cables and Their Applications, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich.
- [22] **Incropera, Frank P. and DeWitt, David P.**, 2001. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [23] **DeWitt, David P., Morgan Michael J., Shapiro, Howard N. and Munson Bruce R.**, 2003. Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc, New York
- [24] **Lienhard, John H.**, 2008. A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts.
- [25] **Rohsenow, Warren M., Hartnett, James P., Cho Young I.**, 1998. Handbook of Heat Transfer, McGraw Hill Company, New York.
- [26] **Halıcı F. ve Gündüz M.**, 2001. Örneklerle Isı Geçişi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya
- [27] **Swaffield D. J., Lewin P L., LeBlanc M.**, 2005. Investigation into the conservatism of high voltage cable rating methods: A comparison between IEC60287 and Finite Element Analysis, Proceeding of the XIV International Symposium on High Voltage Engineering. TsingHua University, Beijing, China, August, 25-29.
- [28] **Topal, E.**, 2003. Isıl ve elektriksel büyüklükler arasındaki analogiden yararlanarak yüksek gerilim yer altı kablolarında sıcaklık dağılımının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [29] **Sisaky, A., Golab, F. and Myer, B.**, 1989. Rust resistant potatoes, *United Kingdom Patent*, No: 2394783 dated 23.1.1989.
- [30] **Dağlar, H. Y.**, 1991. Yer altı kablolarının Akımı taşıma Kapasitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Aras, F.**, Kişisel görüşme.
- [32] **Aydın, T.**, 2004. Bulanık mantık sınıflandırmasından yararlanarak kablo malzemesi seçimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

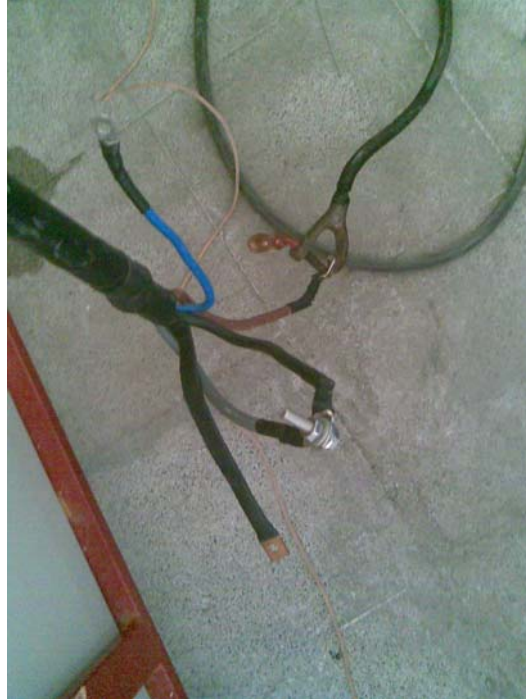
EKLER

EK A : Fotoğraflar

EK A



Şekil A.1: 230 V, 10,5 kVA, Tek Fazlı Giriş – Tek Fazlı Çıkışlı Trafo



Şekil A.2: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Her Damarından Eşit Akım Geçmesi İçin Yapılan Bağlantı



Şekil A.3: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun Su Tankına Yerleşimi



Şekil A.4: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablo ve Kablo Ekinin Su Tankına Yerleşimi



Şekil A.5: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablo, Akım Ölçü Trafosu, Analog Ampermetre, Dijital Ampermetre ve Termokupl Cihazının Deney Sırasındaki Çekilmiş Fotoğrafi



Şekil A.6: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun İletken ve Kılıf Sıcaklığının Termokupl Cihazıyla Ölçülebilmesi İçin Kabloda Açılan Delikler



Şekil A.7: NYY 1 x 25 mm² 0,6/1 kV Kablonun İletken ve Kılıf Sıcaklığının Termokupl Cihazıyla Ölçülebilmesi İçin Yapılan Bağlantı

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Hasan Hüsnü Mollamahmutoğlu
Doğum Yeri ve Tarihi: Çaykara / 08.07.1982
Adres: Büyükturyolu Yanı Mavikent sitesi. B:Blok Daire:28
İdealtepe P.K. 34841 Maltepe / İstanbul
Lisans Üniversite: Yıldız Teknik Üniversitesi