

**T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SONLU ELEMANLAR METODU KULLANILARAK
GÜÇ KABLOLARININ ISIL ANALİZİ VE AKIM
TAŞIMA KAPASİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Murat KARAHAN
(Elektrik Öğretmeni, MSc.)**

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK EĞİTİMİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
Prof.Dr. H. Selçuk VAROL
Yrd.Doç.Dr. Adnan KAKILLI**

İSTANBUL 2007

**T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SONLU ELEMENLAR METODU KULLANILARAK
GÜÇ KABLOLARININ ISIL ANALİZİ VE AKIM
TAŞIMA KAPASİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Murat KARAHAN , MSc.

(Elektrik Teknik Öğretmeni)

(141201219950014)

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK EĞİTİMİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
Prof.Dr. H. Selçuk VAROL
Yrd.Doç.Dr. Adnan KAKİLLİ**

İSTANBUL 2007

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında benden yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen, danışman hocalarım Prof. Dr. H. Selçuk VAROL'a ve Yrd.Doç.Dr. Adnan KAKİLLİ'ye teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışması boyunca çalışmalarımı izleyen yapıcı görüş ve eleştirilerini bildiren sayın Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, deneysel çalışmada gereken malzemeleri sağlayan HES Kablo A.Ş.'ye, ölçümleri yaptığım ALCE Akım Trafosu Fabrikası yetkililerine ve özellikle de Yönetim Sistemleri Sorumlusu Nazmi DEMİRCİOĞLU'na, yardımlarından dolayı Sezai TAŞKIN, Önder DEMİR, Gökhan KARACA ve diğer mesai arkadaşlarıma ve özellikle de bu yoğun çalışma temposunda gösterdiği sabır ve anlayış için sevgili eşim Sinem KARAHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2007

Murat KARAHAN

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
ABSTRACT	VII
YENİLİK BEYANI.....	IX
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ.....	X
ŞEKİL LİSTESİ.....	XIV
TABLO LİSTESİ.....	XVI
BÖLÜM I	1
GİRİŞ VE AMAÇ	1
I.1 GİRİŞ.....	1
I.2 TEZİN BÖLÜMLERİ	3
I.3 TEZİN AMACI	4
I.4 LİTERATÜR.....	4
BÖLÜM II	8
ELEKTRİK GÜÇ KABLOLARI VE STANDART HESAPLAMA YÖNTEMLERİ	8
II.1 GÜÇ KABLOLARINDA ISI TRANSFERİ	9
II.1.1 İletimle Isı Transferi.....	9
II.1.2 Taşınım ile Isı Transferi	10
II.1.3 Işınım ile Isı Transferi	11
II.1.4 Isı Transfer Denklemleri	12
II.2 ISIL DEVRE BENZERLİKLERİ	14
II.2.1 Isıl Direnç	16
II.2.2 Isıl Kapasite.....	17
II.3 AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ	18
II.3.1 Yeraltı Kablolarının Kararlı Hal Denklemleri	18
II.3.2 Havai Hatta Kullanılan Kabloların Kararlı Hal Denklemleri.....	21
II.4 PARAMETRELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	21
II.4.1 Kayıpların Hesaplanması	21
II.4.2 Isıl Dirençlerin Hesaplanması	28
BÖLÜM III	33
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	33
III.1 GİRİŞ.....	33

III.1.1	Sonlu Elemanlar Yönteminden Elde Edilen Bilgi	34
III.1.2	Alternatif Yöntemler	34
III.2	YÖNTEMİN GENEL YAPISI.....	35
III.3	KABLO HESAPLAMALARINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN KULLANIMI.....	40
III.3.1	Ayrıklaştırılacak Bölgenin Seçimi	40
III.3.2	Eleman Boyutları	40
III.3.3	Sınır Koşulları	40
III.3.4	Kablo Kayıpları.....	41
III.4	DENKLEMLERİN TÜRETİLMESİ	42
III.4.1	Isı Transfer Denklemleri	42
III.4.2	Polinom Yaklaşımı.....	43
III.4.3	Sonlu Eleman Denklemleri	45
III.5	YAZILIM	49
III.5.1	Örnek Uygulama	51
BÖLÜM IV		53
GÜÇ KABLOLARININ MODELLENMESİ		53
IV.1	ELEKTRİK - ISIL MODEL.....	54
IV.2	GÜÇ KABLOLARINDA ÖMÜR KESTİRİMİ.....	58
BÖLÜM V		60
UYGULAMALAR		60
V.1	5,8/10 KV XLPE KABLO MODELİ.....	60
V.1.1	Sayısal Çözüm.....	61
V.1.2	Toprağın Isıl İletkenlik Değerinin Sıcaklık Dağılımına Etkisi ..	65
V.1.3	Kabloların Yerleşim Düzeninin Sıcaklık Dağılımına Etkisi.....	66
V.1.4	Tek Kablo Durumu	68
V.1.5	Kablo Sıcaklık Değerlerinin Kablo Ömrü ile İlişkilendirilmesi	71
V.2	10 KV PILC KABLO MODELİ	73
V.2.1	Sayısal Çözüm.....	74
V.3	0.6/1 KV PVC KABLO MODELİ - I	79
V.3.1	DeneySEL Çalışmalar.....	79
V.3.2	Sayısal Çözüm.....	83
V.4	0.6/1KV PVC KABLO MODELİ - II	90
V.4.1	DeneySEL Çalışmalar.....	90
V.4.2	Sayısal Çözüm.....	93
BÖLÜM VI		98
SONUÇLAR VE ÖNERİLER		98
KAYNAKLAR		101
EK-A		105
EK-B		110
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

SONLU ELEMANLAR METODU KULLANILARAK GÜÇ KABLOLARININ ISIL ANALİZİ VE AKIM TAŞIMA KAPASİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Güvenlik, güvenilirlik ve estetik açısından nüfusun yoğun olduğu bölgelerde elektriğin taşınması ve dağıtılması genellikle yeraltı güç kabloları ile yapılır. Güç kabloları deniz aşırı yerlere örneğin anakaralardan adalara deniz altına döşenerek de elektrik enerjisini nakledebilirler. Fabrikalarda yüksek akım gerektiren cihazlarında elektrik ihtiyacını yine bu tip güç kabloları sağlar.

Güç kabloları düşük, orta, yüksek ve çok yüksek gerilim kabloları olmak üzere sınıflandırılabilirler. Döşendikleri ortamların özelliklerine, döşenme koşullarına, taşıdıkları yüksek akım ve gerilime bağlı olarak kabloların hepsi elektrik, ısı, mekanik ve çevresel etkilere maruz kalırlar. Bu zorlanmalar altında güç kablolarında kullanılan yalıtım malzemelerinin ısınarak yaşlanmaları kablo ömürlerinin azalmasına ve bazı durumlarda da devre dışı kalmalarına sebep olur. İmalat ve döşeme maliyetleri havai hatlara oranla daha masraflı olduklarından ömürlerinin yüksek akım taşıma şartlarında da uzun olması beklenir. Kablo yalıtkan malzemeleri genellikle kağıt, sentetik polimer (polietilen PE, çapraz bağlı polietilen XLPE, etilen propilen kauçuk EPR) ve sıkıştırılmış gazlardan (SF_6 , Freon 12, N_2) yapılırlar.

Kablo imalatında kullanılan bu yalıtkan malzemeler kablonun çalışması sırasında iki tip ısı kaynağının etkisinde kalırlar. Bu ısı kaynaklarından birincisi kablo iletkeninde akan akımdan dolayı kablo iletkeninde meydana gelen omik kayıplar ve ikincisi ise uygulanan gerilimin meydana getirdiği yalıtkan içinde oluşan dielektrik kayıplardır. Kablo bu iki ısı kaynağından dolayı meydana gelen ısının bir kısmını kendisi emer, geri kalan kısım ise çevresindeki ortama iletim, taşınım ve ışıma yolu ile aktarılır. Bazı durumlarda kablo sıcaklığı önemli ölçüde yükselerek yalıtkanın fiziksel özelliklerinin değişmesine sebep olur. Yalıtkanın elektriksel dayanımı azalarak kablo görevini yapamaz duruma gelir. Bu olaya “ısı kontrolünden

çıkma” (Thermal Runaway) denir. Kablo yalıtkanı içindeki su miktarı ısı kontrolünden çıkma riskini artıran en önemli etkenlerden birisidir.

Genelde kabloların sıcaklık dağılımı ve akım taşıma kapasitelerinin hesaplanmalarında kullanılan ısı iletim denklemlerinin çözümü Neher-McGrath’ın ve IEC’nin (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) analitik teknikleri kullanılarak yapılır. Ancak analitik tekniklerin kullanımı dielektrik kayıplarının da hesaplara dahil edilmesi ile ısı iletim denkleminin lineer olmayan kuplajlı ikinci dereceden bir diferansiyel denkleme dönüşmesinden dolayı mümkün değildir. Bunun için analitik çözümler yerine sayısal yöntemlerin kullanımı daha gerçekçi ve daha kesin sonuçlar vermektedir. Sayısal hesaplamalarda kablonun elektrik ve ısı özellikleri beraberce hesaplara katılabilmekte ayrıca analitik çözümlerde mümkün olmayan, kablo ve çevresinin fiziksel büyüklüklerinin sıcaklık ve çevresel koşullar ile değişimleri, iteratif olarak hesaplamalara bilgisayar vasıtası ile dahil edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile hazırlanmış Comsol Multiphysics yazılımı kullanılarak kabloların geçici ve sürekli rejimde ısı analizleri yapılmıştır. Comsol Multiphysics yazılımının genelleştirilmiş elektrostatik ve genel ısı transfer modları öngördüğümüz matematik modele uyarlanmıştır. Kablo sıcaklık dağılımı hesaplamaları kablo çevresindeki ortamın ısı iletkenlik sabitinin değişimi, kablo yalıtkanının sıcaklık ve neme bağlı olarak dielektrik sabitinin değişimi, kablo etrafında hava akışı olduğunda hava akış hızının değişimi de göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Bir çok kablo tipi ve değişik döşeme koşullarında kablo içinde ve kablonun çevresindeki sıcaklık dağılımları ve akım taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır.

İlk olarak 10kV orta gerilim kablosu ele alınmış, elektrik-ısıl model sayısal olarak bilgisayar ortamında simule edilmiştir. Sonuçlar analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış, sayısal ve analitik sonuçların uyum içinde oldukları gözlenmiştir. Comsol Multiphysics yazılımının ve geliştirilen modelin güvenle bu amaç doğrultusunda kullanılabileceği saptanmıştır.

İkinci olarak yağ emdirilmiş kağıt yalıtkanlı bir kablo (PILC) ele alınmış, yalıtkan malzemenin içindeki suyun etkileri araştırılmış, su miktarının belirli bir değerin üstüne çıkması halinde dielektrik kayıplarının önemli ölçüde arttığı, dielektrik kayıplarının artmasının kablonun sıcaklığını artırdığı, kablo sıcaklığının artması ile dielektrik kayıplarının daha da arttığı ve bu kısır döngü içinde ısı kontrolünden çıkma olayının kaçınılmaz olduğu gözlenmiştir.

Deneyisel olarak ilk önce bir fabrikanın elektrik besleme kablosu olarak kullanılan 0.6/1 kV gerilimli enerji kablosu üzerinde iki hafta boyunca akım ve sıcaklık ölçümü yapılmış, elde edilen veriler kablonun sayısal modellenmesinde kullanılmıştır. Daha sonra İstanbul Teknik Üniversitesinin Yüksek gerilim laboratuvarında, benzer bir kablonun, hava ve su ortamlarında akım sıcaklık ilişkisi incelenmiş, kablodan geçen akıma bağlı olarak iletken ve kılıf sıcaklıkları takip edilmiştir. Deneyisel veriler bu kablo için de sayısal modellemede kullanılmıştır. Her iki deney için sayısal çözümleme sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri deneyisel çalışmalar ile uyum içerisinde dir.

Sonuç olarak geliştirilmiş olan elektrik-ısı l ikili modelin sonlu elemanlar yöntemi ile her tip kabloda başarı ile kullanılabileceğ i kanaatine varılmış tır.

ABSTRACT

THERMAL ANALYSIS OF POWER CABLES USING FINITE ELEMENT METHOD AND THE CURRENT CARRYING CAPACITY EVALUATION

Transmission and distribution of electricity in densely populated urban areas mostly uses underground power cables due to safety, reliability and aesthetical considerations. Power cables are also used for overseas power transmission, for example for power transmission from the mainland to islands. In factories they supply power to machines which require high currents.

They are classified as low, medium, high and extra high voltage power cables. All types of power cables are subjected to electrical, thermal, mechanical and environmental stresses, due to laying conditions of the cable system, to the external environmental conditions, high currents and voltages. Ageing of the cable insulation under above mentioned stresses limits their lifetime. The installations and manufacturing costs of such cables are very high than aerial cables therefore one expects to have longer lifetimes under high currents. The cable insulations usually consist of impregnated paper, synthetic polymers (polyethylene PE, cross linked polyethylene XLPE, ethylene propylene rubber EPR) and compressed gases (SF₆, Freon 12, N₂).

In a power cable there are two heat sources which degrade the cable insulation. Heat generated in the conductor due to resistive losses caused by the load current and heat generated in the insulation due to dielectric losses. The cable will absorb part of the total heat generated and the rest will be dissipated to the surrounding medium. The insulation might be heated to such a high temperature that it changes physically. The breakdown strength of the insulation is lowered and the cable breaks down. This phenomenon is called thermal breakdown. The moisture content in the cable insulation also increases the risk of thermal breakdown.

Generally in cable rating calculations purely analytical techniques are used to solve the heat conduction equation given by International Electrotechnical Commission (IEC) or Neher- Mc Grath relations. It is very difficult to consider

dielectric losses when analytical techniques are used, since the heat conduction equation becomes nonlinear coupled second order differential equation. Numerical methods provide more accurate modeling than purely analytical techniques. Using numerical methods one can couple electric and thermal properties of the cable in the calculations. It is easier to solve nonlinear coupled differential equations by numerical methods.

In this thesis, transient and steady state heat transfer analysis of power cables are investigated by applying finite element method (FEM) developed under a finite element soft ware Comsol Multiphysics. The generalized electrostatic and the general heat transfer modes of Comsol Multiphysics computation program was modified. Cable temperature dependency to variations in the thermal conductivity of surrounding medium, the change in the dielectric constant of cable insulation with water content and temperature, the change in the air flow rates around the cable have been investigated. For several types of cables the temperature distribution and current carrying capacities has been calculated.

First, 10kV medium voltage power cable has been investigated using electric –thermal model numerically. The numerical results are compared to analytical results. It is seen that the numerically and analytical calculated temperature distributions and current currying capacities match each other.

Secondly a cable with oil impregnated and we showed that if the water content for such cables is increased, the dielectric losses becomes dominant and thermal runaway is unavoidable.

Third a low voltage cable supplying electricity to a factory in İstanbul has been investigated numerically and experimentally. The temperatures and the current flowing through the cable has been recorded for two weeks. Also the same type of cable was investigated at the high voltage laboratory at Istanbul Technical University. The cable has been investigated in air and in water. The cable conductor, insulator and sheath temperatures were detected. The data has been used in the numerical calculations. It has been seen that the experimental and numerical results verify each other.

As a conclusion electric-thermal model using Comsol Multiphysics computation program can be satisfactory used in the evaluation of all types of power cables.

June, 2007

Murat KARAHAN

YENİLİK BEYANI

Güç kablolarının basit yapısı, taşınan güç ve gerilim düzeyi arttıkça yerini, elektriksel zorlanmaların yanında, artan ısı, çevresel ve mekanik zorlanmalarla birlikte oldukça karmaşık bir yapıya bırakır. Bunun yanında güç kablolarının en yüksek akım taşıma kapasitesinde işletilmeleri ekonomik bir sistem tasarımında oldukça önemlidir.

Güç kablolarında kayıp mekanizması ve ısı dağılımı önemli parametrelerdir. Bu parametreler, kabloların yapısı, malzemeleri, yerleşim düzeni ve ortamın ısı iletkenliğine bağlı olarak değişmekte olup kabloların akım taşıma kapasitelerinin hesaplanmasında kullanılırlar.

Sayısal çalışmalarda kayıplar çoğunlukla bilinen değerler olarak varsayılır ya da örneğin uluslararası bir standart olan Uluslararası Elektroteknik Komitesi (International Electrotechnical Comitte (IEC)) standartlarına göre hesaplanır. Hesaplar, genelde, sadece sınır sıcaklık koşulları, geometri ve malzeme bilgisi kullanılarak ısı analiz şeklinde yapılmaktadır. Sıcaklığa elektriksel büyüklüklerin veya elektriksel büyüklüklere sıcaklığın etkisini göz önüne alarak hesap yapmak tanımlanması ve uygulanması zorluk yarattığı için çok az yapılmaktadır. Güç kablolarının daha doğru modellenebilmesi için kayıp ve ısınma mekanizmalarının eş zamanlı belirlenmesi ve buna bağlı olarak ta akım taşıma kapasitesinin hesaplanması gerçeğe daha yakın sonuçlar verecektir.

Bu çalışmada, güç kablolarındaki ısı transferi ve akım taşıma kapasitesinin belirlenmesi için birleştirilmiş elektrik-ısı model önerilmektedir. Öncelikle güç kablolarındaki kayıp mekanizmaları tanımlanmış ve bunların sıcaklık ile bağlantıları ortaya konmuştur. Bulunan denklemler elektrik-ısı modelin temelini oluşturur. Daha sonra oluşturulan bu modelin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözümü gerçekleştirilmiştir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılan çoklu fizik çözümü mevcut var olan tekil çözümlerle karşılaştırıldığında, güç kablolarının çalışma koşullarına daha yakın modellenip incelenmesini sağlamaktadır. Bu durum güç kablolarının akım taşıma kapasitelerinin ve ömürlerinin değerlendirilmesinde büyük önem taşır.

Haziran 2007,

Prof. Dr. H. Selçuk VAROL

Murat KARAHAN

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

AA	: Alternatif akım
AIEE	: Amerikan Elektrik Mühendisleri Enstitüsü (American Institute of Electrical Engineers)
DA	: Doğru akım
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IPCEA	: Yalıtılmış Güç Kablosu Mühendisleri Birliği (Insulated Power Cable Engineers Association)
PILC	: Kağıt yalıtkanlı kurşun kılıflı kablo (Paper insulated lead covered cable)
PVC	: Polivinil Klorür
XLPE	: Çapraz bağlı Polietilen (cross-linked polyethylene)
A_s	: Birim uzunluk başına kablo dış yüzeyinin alanı [m ²]
C	: Damar başına kablo kapasitesi [F/m]
D_a'	: Kablo zırhının dış çapı [mm]
D_e	: Kablonun dış çapı [mm]
D_s	: Metal kılıfın dış çapı [mm]
E	: Elektrik alan şiddeti [V/m]
E_a	: Aktivasyon enerjisi [eV]
H	: Güneş ışınları yoğunluğu [W/m ²]
H	: Sonlu elemanlar analizinde ısı iletkenlik matrisi
I	: Akım [A]
J	: Akım yoğunluğu [A/m ²]
K	: Sonlu elemanlar analizinde sınır koşulları ve ısı kaynağı vektörü
L	: Kablo ekseninin yer yüzeyine göre mesafesi [mm]
P	: Elektriksel güç [W/m]
P_d	: Dielektrik kayıplar [W/m]
Q	: Kablonun toplam ısı kapasitesi [J/m·K]
Q	: Sonlu elemanlar analizinde ısı kapasite matrisi
R	: Maksimum işletim sıcaklığında iletkenin alternatif akım direnci [Ω/m]

- R_s** : Kılıfın direnci [Ω/m]
- R'** : Maksimum işletim sıcaklığında iletkenin doğru akım (DA) direnci [Ω/m]
- R_0** : İletkenin $20^0 C$ deki DA direnci [Ω/m]
- S** : İletkenin kesit alanı [mm^2]
- T** : Kablonun iletkeni ile dış yüzeyi arasındaki toplam ısı direnci [$K \cdot m/W$]
- T_1** : Damar başına iletken ile kılıf arasındaki ısı direnci [$K \cdot m/W$]
- T_2** : Kılıf ile zırh arasındaki ısı direnci [$K \cdot m/W$]
- T_3** : Dış kaplamanın ısı direnci [$K \cdot m/W$]
- T_4** : Çevreleyen ortamın ısı direnci [$K \cdot m/W$]
- T_4^*** : Güneş ışınlarının etkisi ile birlikte kablounun dış ısı direnci [$K \cdot m/W$]
- U_0** : İletken ile ekran arasındaki gerilim [V]
- U_n** : İki faz iletkeni arasındaki gerilim [V]
- U_m** : En yüksek işletme gerilimi [V]
- V** : Elektrik potansiyeli [V]
- V** : Malzemenin hacmi [m^3]
- W** : Üretilen ısı miktarı [W/m]
- W_i** : Birim uzunluk başına iletken kayıpları [W/m]
- W_I** : Her bir kablounun toplam $I^2 \cdot R$ güç kaybı [W/m]
- $W_{iç}$** : İletken içerisinde üretilen ısı miktarı [W/m³]
- W_d** : Her bir faza ait birim uzunluk başına dielektrik kayıplar [W/m]
- W_t** : Birim uzunluk başına kabloda harcanan toplam güç [W/m]
- W_k** : k sırasındaki kabloda birim uzunluk başına harcanan güç [W/m]
- W_k** : Kılıf kayıpları [W/m]
- W_z** : Zırh kayıpları [W/m]
- X** : Kılıf reaktansı [Ω/m]
- X_m** : Düz döşenen kablolar için bir kablounun kılıfı ile diğer iki iletken arasındaki ortak reaktans [Ω/m]
- c** : Malzemenin hacimsel ısı kapasitesi [$J/m^3 \cdot K$]
- c** : Isıyı ileten ortamın ısı kapasitesi [$J/kg \cdot K$]
- d** : Kılıfın ortalama çapı [mm]
- d_c** : İletkenin dış çapı [mm]

- d_{pk} : p'inci kablonun ekseninden komşu k kablosunun eksenine olan uzaklık [mm]
- d'_{pk} : p'inci kablonun ekseninden komşu k kablosunun sanal görüntüsünün eksenine olan uzaklık [mm]
- f : Frekans [Hz]
- h : Taşınım ısı transfer katsayısı [$W/m^2 \cdot K$]
- h^e : Sonlu elemanlar analizinde eleman iletkenlik matrisi
- k : Isıl iletkenlik [$W/K \cdot m$]
- k_B : Boltzmann sabiti [$8.617 \cdot 10^{-5}$ eV/K]
- k^e : Sonlu elemanlar analizinde eleman ısı kaynağı vektörü
- k_p : x_p 'nin hesaplanmasında kullanılan faktör (yakınlık faktörü için)
- k_s : x_s 'nin hesaplanmasında kullanılan faktör (deri etkisi için)
- l : Kablonun uzunluğu [m]
- $\ln$: Doğal logaritma (e tabanında)
- n : Kablodaki iletkenlerin sayısı
- p : $\Delta\theta$ sıcaklık artışındaki ömür [gün]
- p_i : θ_i sıcaklığındaki ömür [gün]
- q : Isı akısı [W/m^2]
- q^e : Sonlu elemanlar analizinde eleman kapasite matrisi
- s : Yüzey uzunluğu [m]
- s : İletkenler arası eksenel açıklık [mm]
- s_1 : Yatay döşenen (birbirlerine dokunmayan) uç kablodan komşu iki kablo arasındaki eksenel açıklık [mm]
- t : Isınmanın başlangıcından itibaren geçen zaman, genel zaman sembolü [s]
- t_1 : İletken ile siper arasındaki yalıtkan kalınlığı [mm]
- t_2 : Yatağın (zırhın altındaki örtünün) kalınlığı [mm]
- t_3 : Kaplamanın kalınlığı [mm]
- u : Rüzgar hızı [m/s]
- v : Kuru ve nemli bölgenin ısıl öz dirençleri oranı
- y_p : Yakınlık etkisi faktörü
- y_s : Deri etkisi faktörü
- α : Isıl yayılım katsayısı [m^2/s]

α : İletken malzemeye ait elektriksel özdirencin sıcaklık katsayısı
 α_{20} : 20°C’de elektriksel özdirencin sıcaklık katsayısı
 δ : Kayıp açısı
tan δ : Kayıp faktörü
 ϵ_0 : Boşluğun dielektrik sabiti [$8.8542 \cdot 10^{-12}$ F/m]
 ϵ_r : Bağlı dielektrik sabiti
 ϵ_r'' : Polarizasyon kayıplarını temsil eden bağlı dielektrik sabiti
 $\epsilon_r''_{App}$: Saf iletim kayıplarını da içeren görünür bağlı dielektrik sabiti
 ϵ : Dielektrik sabiti [F/m]
 ϵ : Yayınım oranı
 λ_1, λ_2 : Sırasıyla metalik kılıf ve zırhın toplam iletken kayıplarına oranı
 ρ_0 : θ_0 referans sıcaklığındaki özdirenç değeri [Ωm]
 ρ_{20} : İletkenin 20°C’deki elektriksel özdirenci [Ωm]
 ρ_s : Toprağın ısıal özdirenci [$K \cdot m/W$]
 ρ : Malzemenin ısıal özdirenci [$K \cdot m/W$]
 ρ : Malzemenin yoğunluğu [kg/m^3]
 σ : Elektriksel iletkenlik [S/m]
 σ : Soğurma katsayısı
 σ_B : Stefan-Boltzmann sabiti [$5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$]
 ω : Açısıal frekans ($2\pi f$) [$1/s$]
 $\omega_i, \omega_j, \omega_m$: Sonlu elemanlar analizinde alan koordinatları
 θ : Sıcaklık [K]
 θ_e : Kablonun dış yüzey sıcaklığı [K]
 θ_{ep} : p kablosunun dış yüzey sıcaklığı [K]
 θ_i : İletken sıcaklığı [K]
 θ_x : x mesafesindeki izoterm sıcaklığı [K]
 $\Delta\theta$: Ortam sıcaklığının üzerinde iletkene ait izin verilen sıcaklık artışı [K]
 $\nabla\theta$: Sonlu elemanlar analizinde sıcaklık gradyanı
 $\Delta\theta_x$: Kritik sıcaklık artış değeri [K]

ŞEKİL LİSTESİ

NO

SAYFA NO

Şekil II.1 Bir duvar içerisindeki bir boyutlu sıcaklık dağılımı, sabit ısı akısı [29] ...	10
Şekil II.2 Zorlamalı taşınım [29]	11
Şekil II.3 Taşınım ve ışınlım ısı transferi [29]	12
Şekil II.4 Isı denklemi için sınır koşulları, (1) Sabit yüzey sıcaklığı, (2a) Sabit yüzey ısı akısı (Sonlu), (2b) Sabit yüzey ısı akısı (yalıtım), (3) Taşınım yüzey koşulu [29]	13
Şekil II.5 Elektrik ve ısı devre arasındaki benzerlik	14
Şekil II.6 Eş potansiyel çizgileri ve elektrik alan çizgileri	15
Şekil II.7 Eş sıcaklık çizgileri ve ısı akışı çizgileri	16
Şekil II.8 Kararlı hal hesaplamaları için ısı eşdeğer devreler (a) Tek damarlı kablo (b) Üç damarlı kablo [26]	19
Şekil II.9 Kayıplı bir kondansatörün paralel eşdeğer devresi ve fazör diyagramı	24
Şekil II.10 Yeraltına döşenmiş bir grup kabloların dış ısı direncinin bulunmasında kullanılan gösterim [26]	31
Şekil III.1 Bir kanat içerisindeki bir boyutlu sıcaklık dağılımı	36
Şekil III.2 Düğüm noktaları ve varsayılan $\theta(x)$ değerleri	37
Şekil III.3 Bölgenin sonlu elemanlara bölünmesi	38
Şekil III.4 Bir boyutlu sıcaklık dağılımı için ayrık modeller	38
Şekil III.5 Üç ya da dörtkenarlı elemanlar kullanılarak iki boyutlu sayısal bir fonksiyonun modellenmesi	39
Şekil III.6 İkinci dereceden üçgen elemanlar kullanılarak iki boyutlu sayısal bir fonksiyonun modellenmesi	39
Şekil III.7 Alan koordinatları	44
Şekil III.8 Bir kablo için tanımlanan bir sonlu elemanlar ağı [34]	50
Şekil III.9 Programın akış diyagramı	51
Şekil III.10 Kablo örneği	51
Şekil IV.1 Elektrik-ısı model	58
Şekil V.1 Kablo kesiti	60
Şekil V.2 Kabloların döşeme koşulları	61
Şekil V.3 Çözüm bölgesinin sonlu elemanlar ağı	63
Şekil V.4 Kablodaki sıcaklık dağılımının gösterimi	64
Şekil V.5 Toprak içerisindeki sıcaklık dağılımının derinliğe bağlı değişimi	64
Şekil V.6 Toprağın ısı iletkenliğindeki değişimin kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi	66
Şekil V.7 Kabloların farklı döşeme koşulları	67
Şekil V.8 Yonca biçimli yerleştirme düzeninde oluşan sıcaklık dağılımı	68
Şekil V.9 Bir güç kablolarının farklı derinliklere gömülmesi	69
Şekil V.10 Kablodaki sıcaklık dağılımının üç boyutlu ve eş sıcaklık çizgileri ile gösterimi	69
Şekil V.11 Kabloda farklı gömülme derinliklerine bağlı oluşan akım sıcaklık ilişkisi	70

Şekil V.12 Rüzgar hızındaki değişime bağlı olarak kablonun yalıtkan sıcaklığının değişimi	71
Şekil V.13 Toprağın farklı ısı iletkenlik değerlerinde kablolar arası uzaklık değişiminin kablo ömrüne etkisi	72
Şekil V.14 Toprağın ısı iletkenliğindeki değişimin kablo ömrüne etkisi	73
Şekil V.15 İki boyutlu model geometrisi	74
Şekil V.16 Model kablo problemi için sonlu elemanlar ağı	76
Şekil V.17 Kablo ve çevresindeki eş sıcaklık çizgileri	76
Şekil V.18 Başlangıçtaki potansiyel dağılımı	77
Şekil V.19 330 saniye sonraki potansiyel dağılımı	77
Şekil V.20 Farklı yük akımı durumlarında kablo yalıtkan sıcaklığının zamanla değişimi	78
Şekil V.21 Farklı yük akımlarında yalıtkindan geçen akımın zamanla değişimi	79
Şekil V.22 0.6/1kV, 3x35/16 mm ² PVC yalıtkanlı güç kablosunun resmi [39]	79
Şekil V.23 0.6/1kV kablo için kurulan deney düzeneği	80
Şekil V.24 Kabloya uygulanan akımın, kablo bileşenlerinin ve ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimleri	81
Şekil V.25 0.6/1kV kablo için kurulan deney düzeneği	82
Şekil V.26 Kabloya uygulanan akımın, kablo bileşenleri ile ortam ve su sıcaklığının zamana bağlı değişimleri	83
Şekil V.27 0.6/1kV, 3x35/16 mm ² PVC yalıtkanlı enerji kablosunun kesit görünümü	84
Şekil V.28 Havanın ısı iletkenlik değerinin sıcaklık ile değişimi	85
Şekil V.29 İncelenen problemin sonlu elemanlar ağı	86
Şekil V.30 Sıcaklık dağılımı	87
Şekil V.31 Eş sıcaklık çizgileri	87
Şekil V.32 Suyun ısı iletkenlik değerinin sıcaklık ile değişimi	88
Şekil V.33 Su içine döşenmiş güç kablosu için akım sıcaklık ilişkisi	89
Şekil V.34 Deney Düzeneği	91
Şekil V.35 Sıcaklık analizinde kullanılan grafik arayüzü, LabVIEW ön paneli	91
Şekil V.36 Deney boyunca ölçülen akım ve gerilim değerlerinin zamanla değişimi (22 Haziran 14:50 – 23 Haziran 15:50, 2006)	92
Şekil V.37 Deney boyunca ölçülen kablo yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi (22 Haziran 14:50 – 23 Haziran 15:50, 2006)	92
Şekil V.38 Deney boyunca nötr iletkeninden geçen akımın zamanla değişimi	93
Şekil V.39 İncelenen problemin sonlu elemanlar ağı	94
Şekil V.40 Eş sıcaklık çizgileri	95
Şekil V.41 Ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri	96
Şekil V.42 Kablo akım taşıma kapasitesinin belirlenmesi	97
Şekil A.1 Yazılan programa ait arayüz	108
Şekil A.2 Yazılan programa ait arayüz (Çözüm ekranı)	109
Şekil B.1 10kW'lık Kaynak Makinası	110
Şekil B.2 İki adet demir çekirdekli 1.5 sınıfı 150A'lık ampermetre	110
Şekil B.3 Çıkış akımının varyak yardımı ile ayarlanması	111
Şekil B.4 Sıcaklık ölçümünde kullanılan dijital termometre	111
Şekil B.5 İletken ve kılıf sıcaklıklarının ölçülmesi	111

TABLO LİSTESİ

<u>NO</u>	<u>SAYFA NO</u>
Tablo II.1 Akışkanlara ait ısı taşınım katsayısı değerleri	11
Tablo II.2 Malzeme Özellikleri.....	23
Tablo II.3 Bakır iletkenlerde deri ve yakınlık etkisinin ks ve kp katsayıları için deneysel veriler	24
Tablo II.4 Şebeke frekansında yüksek gerilim ve orta gerilim kablo yalıtımları için bağıl dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri	25
Tablo II.5 Bazı Malzemelerin Isıl Öz dirençleri	29
Tablo V.1 Kablonun tabaka kalınlıkları	61
Tablo V.2 Modeldeki malzemelerin ısı özellikleri.....	62
Tablo V.3 Toprağın ısı öz direncinin (iletkenliğinin) toprak ve hava şartları ile değişimi	65
Tablo V.4 Kablolar arası uzaklık değişiminin ortadaki kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi	67
Tablo V.5 Model kablo parametreleri	75
Tablo V.6 Kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri.....	84
Tablo V.7 Kablo bileşenlerine ait ısı parametreleri.....	84
Tablo V.8 Havanın ısı iletkenlik değerinin sıcaklıkla değişimi	85
Tablo V.9 Suyun ısı özellikleri	88
Tablo V.10 Kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri.....	90
Tablo V.11 Analizde kullanılan akım ve ortam sıcaklığı değerleri.....	94

BÖLÜM I

GİRİŞ VE AMAÇ

I.1 GİRİŞ

Günümüzde güç kabloları enerji iletim ve dağıtımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Enerji iletimi ve dağıtımında çoğunlukla hava hatları tercih edilirken yerleşimin yoğun olduğu yerlerde elektrik enerji dağıtımı, işletme ve can güvenliğini ve çevre görünüm estetiğini sağlamak amacıyla yeraltı kablolarıyla yapılmaktadır. Güç kablolarının basit yapısı, taşınan güç ve gerilim düzeyi arttıkça yerini, elektriksel zorlanmaların yanında, artan ısı, çevresel ve mekanik zorlanmalarla birlikte oldukça karmaşık bir yapıya bırakır. Bunun yanında mevcut sistemlerden en yüksek kapasitede faydalanılması oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Bu durum ise güç kablolarının akım taşıma kapasitesinin doğru olarak belirlenmesini gerektirir.

Güç kablolarında akım taşıma kapasitesinin tesbit edilebilmesi için analitik ve sayısal yaklaşımlar mevcuttur. Analitik yaklaşımlar IEC 60287 standardına dayanmakta olup sadece basit geometri koşulları ve homojen ortam özelliklerinde uygulanabilmektedir. Örneğin, kabloyu çevreleyen ortamın ısı özellikleri farklı birden fazla malzemedan oluşması, kablo çevresinde yer alan ısı kaynakları ve sabit sıcaklıkta olmayan sınır değerleri analitik yaklaşımlarla çözümü güçleştirmektedir. Bu durumda ancak sayısal yaklaşımlar kullanılabilir. Güç kablolarının yapısına uygun olarak, sayısal yaklaşımlar içerisinde özellikle en fazla tercih edileni sonlu elemanlar yöntemidir [1].

Güç kablolarının akım taşıma kapasitesi ile sıcaklık dağılımları arasında kuvvetli bir bağ vardır. Kabloya uygulanan gerilim ve kablo bileşenlerinde kablo iletkeninden akan akımlara bağlı olarak oluşan kayıplar, kablo içerisinde ısı oluşturur. Kablonun akım taşıma kapasitesi, bu ısının, kablodan çevreleyen ortama etkin bir şekilde dağılımına bağlıdır. Kablo içerisindeki yalıtkan malzemeler ve çevreleyen ortam, yüksek ısı dirençlerinden dolayı, bu dağılımı zorlaştırırlar.

Güç kablolarında akım taşıma kapasitesi, kablo bileşenlerinin, özellikle de yalıtkan malzemenin sınır sıcaklık değerini aşmaksızın, kablo iletkeninin sürekli halde taşıyabileceği en yüksek akım değeri olarak tanımlanır. Bu nedenle sürekli çalışma durumunda kablo bileşenlerinin sıcaklık değerleri belirlenmelidir. Sayısal yöntemler kablo içerisinde üretilen ısı belirtilerek kablo içerisinde ve çevresindeki sıcaklık dağılımını hesaplamakta kullanılırlar. Bunun için belirli bir iletken akımı girilir ve iletken sıcaklığı hesaplanır. Daha sonra akım ayarlanarak yeni hesaplamalar gerçekleştirilir. Kablonun yalıtkan sıcaklığının sınır değeri aşmadığı, kabloun güvenli sınırlar içerisinde çalışabileceği, en yüksek akım değeri o kabloun akım taşıma kapasitesidir.

Isıl analizlerde hesaplamalar, genellikle, sadece sınır sıcaklık koşulları, geometri ve malzeme bilgisi kullanılarak yapılmaktadır. Sıcaklığa elektriksel büyüklüklerin veya elektriksel büyüklüklere sıcaklığın etkisini göz önüne alarak hesap yapmak tanımlanması ve uygulanması zorluk yarattığı için çok az yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmada kayıp ve ısınma mekanizmaları birlikte değerlendirilmiş ve buna bağlı olarak akım taşıma kapasiteleri bulunmuştur. Sayısal yöntemler ve özellikle de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan tekil çözümlemelerde kablo içindeki ısı kaynakları sabit değerler olarak girilir. Bölge ve sınır koşulları da belirtildikten sonra sıcaklık dağılımı hesaplanır. Oysa ki gerçekte bu kayıplar sabit değildir. Kablo sıcaklığındaki artma ve azalmalara bağlı olarak kablo bileşenlerinin elektriksel özellikleri değişmekte, bu durum da kablo kayıplarını değiştirmektedir. Kayıp ve ısınma faktörlerinin eş zamanlı değerlendirilmesi, güç kablolarının gerçeğe daha yakın modellenmesine olanak tanımaktadır.

Sunulan bu çalışmada, kabloların sıcaklık dağılımlarını ve buna bağlı olarak akım taşıma kapasitelerini belirlemek için birleştirilmiş elektrik-ısıl model kullanımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü verilmiştir. Daha sonra sıcaklık dağılımını etkileyen çevresel faktörler modele dahil edilmiş ve bu faktörlerin kabloların akım taşıma kapasitelerindeki etkileri incelenmiştir.

I.2 TEZİN BÖLÜMLERİ

Yapılan çalışma altı bölümden oluşmaktadır;

Birinci bölümde; Güç kablolarının akım taşıma kapasitesi hesabında kullanılan yöntemler tanıtılmış ve benzer konuda yapılmış önceki çalışmalar irdelenmiştir.

İkinci bölümde; Güç kablolarındaki ısı transfer mekanizması tanıtılmış ve akım taşıma kapasitesinin hesaplanması için standartlarda belirtilen hesaplama yöntemleri incelenmiştir.

Sayısal yöntemler özellikle de sonlu elemanlar yöntemi kablo hesaplamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yeraltına döşenmiş güç kablolarında sıcaklık dağılımı ve akım taşıma kapasitelerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunması üzerine IEC tarafından yayınlanan teknik bir raporda bulunmaktadır. Bu rapordan faydalanılarak hazırlanan üçüncü bölümde sonlu elemanlar yöntemi tanıtılmış ve kablo hesaplamalarında kullanımı açıklanmıştır. Bölümde ayrıca kablo hesaplamalarında kullanılacak sonlu eleman denklemlerine de yer verilmiştir

Dördüncü bölümde; Bir güç kablosu içinde ve çevresinde sıcaklık dağılımını hesaplayabilmek için gereken teorik temeller verilmiştir. Bunun için gerekli elektrik ısıl model yani elektrik ve ısıl etkenlerin bir arada ortak çözümü ile ilgili bağıntılar bu bölümde yer almaktadır.

Beşinci bölüm uygulama bölümüdür. Bu bölümde birbirinden farklı üç kablonun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektrik-ısıl modelleri oluşturulmuş ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Daha sonra sıcaklık dağılım bilgisinden kabloların akım taşıma kapasiteleri tesbit edilmiştir. 10 kV XLPE yalıtkanlı kablo örneğinde, kablonun akım taşıma kapasitesi değerleri çeşitli kablo konfigürasyonları ve çevresel faktörlere bağlı olarak ayrı ayrı incelenmiş, çözüm sıcaklık bilgisinden kablo ömrü kestirimine genişletilmiştir. 10 kV PILC kablo modeli, kablo içerisindeki nem miktarı arttığında dielektrik kayıplarında önemli seviyelerde olabileceğini göstermektedir. Son olarak 0.6/1 kV gerilim seviyesinde çok damarlı ve PVC yalıtkanlı bir alçak gerilim kablosunun elektrik-ısıl modeli oluşturulmuştur. Bu modelde giriş verisi olarak deneysel ölçümden elde edilen akım değerleri ile ortam sıcaklığı değerleri kullanılmış ve kablo bileşenlerindeki sıcaklık değerleri hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, güç kablolarında elektriksel ve ısıl zorlanmaların sonlu elemanlar yöntemi ile ortak çözümü yapılmış ve çevresel faktörlerde hesaba katılarak akım taşıma kapasitesinin değişimleri incelenmiştir.

I.3 TEZİN AMACI

Bu çalışmanın amacı güç kablolarındaki sıcaklık dağılımı ve akım taşıma kapasitesinin, çevresel faktörleri de göz önüne alarak, gerçeğe yakın olarak bulunabilmesidir. Böylece kabloların, uygun şartlarda, en yüksek akım taşıma kapasitesinde kullanılmaları sağlanabilir ve ömürleri uzatılabilir.

Bu hedefi gerçekleştirmek için;

Güç kablolarının elektrik-ısıl modeli oluşturulmuş ve bu modelin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü gerçekleştirilmiştir.

Çözüm sıcaklık bilgisinden kabloların akım taşıma kapasiteleri bulunmuştur.

Çeşitli kablo konfigürasyonları ve çevresel faktörlerin, kablonun akım taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir.

I.4 LİTERATÜR

Güç kablolarındaki sıcaklık artışının hesaplanmasında ilk pratik yaklaşım 1893 yılında Dr. A.E. Kennely tarafından sunulmuştur. 1949 yılında Jack Neher, toprak altına gömülen kabloların eş sıcaklık çizgilerini tanımlamış ve göstermiştir. 1962 yılında ise AIEE (American Institute of Electrical Engineers) ve IPCEA (Insulated Power Cable Engineers Association) tarafından Neher-Mc Grath çalışmasında tanımlanan yöntemler kullanılarak ampasite tabloları hesaplanmıştır [2].

Güç kablolarında sıcaklık dağılımlarının hesaplanması üzerine literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı analitik çözüm yöntemlerine odaklanmışken [3,4], diğer ve önemli bir bölümü sayısal yöntemlerin kullanımına yöneliktir. Sınır elemanları yöntemi [5] ve sonlu farklar yöntemi [6-9] bu alanda kullanılan sayısal yöntemlerden olmakla birlikte, özellikle sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili çalışmaların çok daha fazla olduğu görülmektedir [10-17]. Ayrıca literatürde analitik ve sayısal yaklaşımların bir arada kullanıldığı çalışmalara da rastlanmaktadır [18]. Yapılan bu çalışmaların önemli bir bölümünde, kablo ve çevreleyen ortamdaki sıcaklık dağılımları, kabloların çeşitli döşenme koşulları ve

Çevresel faktörler dikkate alınarak hesaplanmış ve kabloların akım taşıma kapasiteleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Kabloların döşenme koşulları, sıcaklık dağılımları ve akım taşıma kapasitelerinin değerlendirilmesinde oldukça önemlidir. Bir makalede, doğrudan gömülmüş ve PVC kanal içerisine yerleştirilmiş g kablolarının sıcaklık dağılımları hesaplanmış, PVC kanal içerisine yerleştirilen kablolarda sıcaklıkların daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bir kanal içerisine yerleştirilen kabloların sıcaklık dağılımları hesaplanırken sadece iletim ısı transfer modunu kullanmanın yeterli olmayacağı ayrıca vurgulanmıştır [10]. Benzer diğer bir çalışmada kablo kanalı şekli, yataklama malzemesi ve topraktaki kuruma etkisi dikkate alınarak g kablolarının sıcaklık dağılımları belirlenmiştir [13]. Diğer bir çalışmada, boru içine döşenen güç kabloları incelenmiştir. Bu çalışmada, toprak altında gömülü ya da gömülü olmayan metalik boruların ısı iletkenlik değerlerindeki artmaya bağlı olarak kablodaki ısı dağılımının arttığı gözlenmiş, bununla birlikte bu borulardaki kayıpların önemli düzeyde olduğu tesbit edilmiştir. Tek damarlı kablolarda, kabloların akım taşıma kapasitesindeki azalmadan dolayı, eğer zorunluluk yoksa metalik olmayan boruların kullanılması önerilmektedir [17].

Yapılan çalışmaların bir kısmında akım taşıma kapasitesini etkileyen çevresel faktörler araştırılmıştır. Bu çalışmalardan birinde g kablolarının akım taşıma kapasitesini etkileyen en önemli faktörün çevreleyen ortamın ısı iletkenliği olduğu vurgulanmış ve g kablolarının yakınındaki nem içeriğine bağlı olarak sıcaklık dağılımları belirlenmiştir [15]. Benzer bir çalışmada, orta ve yüksek gerilim güç kablolarının döşenmesinde kullanılan dolgu malzemesi ve beton kanalın ısı özellikleri incelenmiştir. Bu makalede kum ve parçalı taşlardan oluşan dolgu malzemeleri için ortamdan nemi uzaklaştıracak olan kritik sıcaklık değeri 30⁰C olarak belirlenmiştir [16].

Çevresel faktörlere bağlı olarak özellikle deniz altına döşenen kablolarda, kablo içerisine su girişi mümkün olabilmekte, bu durum da kablo bileşenlerinin nem miktarını artırmaktadır. Özellikle kağıt yalıtkanlı kablolarda, nem miktarının artmasına bağlı olarak dielektrik kayıplar önemli oranda artmaktadır. Yapılan bir çalışmada, kablo içerisindeki nem seviyesi belirli bir sınırı aştığında, yalıtkan malzemenin elektriksel iletkenliğinin ve buna bağlı olarak ta dielektrik kayıpların önemli bir şekilde arttığı görülmektedir [19]. Yine benzer bir çalışmada, nem

etkisinin yalıtkan malzemenin kayıp faktörünü artırdığı ve bu artmanın belirli sıcaklık seviyelerinden sonra hızlandığı gösterilmiştir [20].

Geçmişte yapılan çalışmalarda oldukça çok araştırılan bir konu ise, farklı kablo malzemelerinin kıyaslanması ve kullanılmaları durumunda ortaya çıkan sıcaklık dağılımıdır. Kablo iletkeninin ısı direnci çok düşük olduğu için ihmal edilebilir ancak, özellikle kablo yalıtkanı olarak kullanılan malzemelerin ısı özellikleri çok önemlidir. Kablolarda kullanılan yalıtkan malzemelerin bazılarının dielektrik özellikleri, bazılarının ise ısı özellikleri iyidir. Örnek olarak bir makalede PE ve XLPE yalıtkanlı yeraltı kablolarının ayrı ayrı ısı analizleri yapılarak akım taşıma kapasiteleri bulunmuş, XLPE yalıtkanlı kabloların daha fazla akım taşıyabileceği tesbit edilmiştir [11].

Güç kablolarının ömürleri çalışma koşullarına bağlıdır. Çalışma koşulları içerisinde en baskın etken ise sıcaklıktır. Literatürde kablo sıcaklıkları ve buna bağlı olarak kablo ömrünün değerlendirildiği çalışmalarda bulunmaktadır [21,22]. Bu çalışmalardan biri güç kalitesindeki bozulmaya bağlı olarak kablonun ısı davranışının ve buna bağlı olarak ömrünün belirlenmesi üzerinedir [21]. Bu makalede IEC 60287’de belirtilen elektrik ve ısı model kullanılmış, ideal ve ideal olmayan kaynak koşullarında kablo sıcaklıkları araştırılarak, bu koşullardaki kablo ömürleri değerlendirilmiştir.

Güç kablolarında, kablo sıcaklığı ve akım taşıma kapasitesini etkileyen parametrelerin birlikte değerlendirildiği çalışmalarda oldukça önemlidir [23,24]. Bu çalışmalarda önerilen yöntem, kablo devre parametrelerindeki dalgalanmaların, izin verilen kablo yükü üzerindeki etkilerini, bütünüyle ısı analizi tekrarlamadan değerlendirmemizi sağlamaktadır. Bu çalışmada, mevcut sistem için bir kez sonlu elemanlar analizi yapılmakta, daha sonra elde edilen duyarlılık değerleri kullanılarak parametre değişimlerine bağlı yeni kablo sıcaklıkları bulunabilmektedir.

Literatürde güç kablolarında kayıp ve ısınma faktörlerinin birlikte değerlendirildiği çok az sayıda makale bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde akıma bağlı kayıplar, filaman yöntemi ile belirlenmiş ve sayısal yöntemler ile sıcaklık dağılımı belirlenirken giriş bilgisi olarak kullanılmıştır [25]. Birleştirilmiş elektrik ısıl modele dayalı bu çalışma, kayıp, ısınma ve akım taşıma kapasitesinin birlikte değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu alanda katkıya değer en önemli çalışmalardan birisi de 1997 yılında George J. Anders’in IEEE makalelerine dayalı olarak yayınladığı kitaptır [26]. Bu kitap güç

kablolarının aşırı ısınma olmaksızın taşıyabilecekleri maksimum akım değerlerinin hesaplanması üzerine yazılmış ilk kitaptır. Elektrik kablolarındaki ısı transfer analizi ile ilgili bir çok kitap ve makale bu kitapta özetlenmiştir. George J. Anders'in 2005 yılında çıkardığı ikinci kitabında ise elverişsiz koşullarda döşenen yeraltı güç kablolarının hesaplamaları yer almaktadır [27].

BÖLÜM II

ELEKTRİK GÜÇ KABLOLARI VE STANDART HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Elektrik güç kablolarının akım taşıma kapasitesi (ampasite) hesabı literatürde geniş ölçüde tartışılmakta olup çeşitli uluslararası ve ulusal standartların konusu olmuştur. Bu konu ile ilgili en önemli standartlar Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission, IEC) ile Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'ne (Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE) aittir. Hesaplama işlemleri temelde her iki standatta da aynıdır. Bununla birlikte IEC 60287 standardı 1957 yılında Neher-McGrath makalesinin yayınlanmasından sonra gerçekleşen yeni gelişmeleri de kapsamaktadır [27].

Ampasite hesaplamaları genellikle iki farklı yolla gerçekleştirilir. Bir taraftan kabloların kararlı hal çalışma durumları belirlenir, diğer taraftan da zamana bağlı (geçici) hesaplamalar gerçekleştirilir. Her iki durumda da yeraltı kabloları için kablonun ürettiği ısının sebep olduğu topraktaki kuruma etkisi dikkate alınmalıdır. Havai hatlarda kullanılan kablolarda ise güneş ışınları ve rüzgar etkisi kablonun akım taşıma kapasitesini önemli düzeyde etkiler. Güç kablolarının ampasite hesaplamaları ısı transfer denklemlerinin çözümünü gerektirir. Bu denklemlerde iletken akımının kablo içinde ve çevresindeki sıcaklık ile ilişkisi tanımlanır [27].

II.1 GÜÇ KABLOLARINDA ISI TRANSFERİ

Güç kablolarının akım taşıma kapasitesi hesaplamalarında en önemli iki iş, verilen bir yük akımı için iletken sıcaklığının ya da verilen bir iletken sıcaklığında yük akımının belirlenmesidir. Bunun için verilen bir iletken malzeme ve belirtilen yük koşullarında kablo içerisinde üretilen ısı ve bu ısının dağılım oranı hesaplanmalıdır. Çevreleyen ortamın ısıyı dağıtma yeteneği hesaplamalarda çok önemli bir role sahip olup toprağın bileşimi, nem içeriği, ortam sıcaklığı ve hava koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir [27]. Isı kablo içerisinde çevresine aşağıda tanımlanan çeşitli yollarla transfer edilir.

II.1.1 İletimle Isı Transferi

Isı transferinin bu şekli atomik ya da moleküler seviyedeki hareketler ile ilişkilidir. İletim bir maddenin parçacıkları arasındaki ilişki esnasında daha fazla enerjiye sahip parçacıklardan daha az enerjiye sahip parçacıklara enerji transferi olarak görülebilir [28]. Yeraltına döşenen kablolarda ısı, iletken, diğer metalik parçalar, yalıtkan ve çevreleyen toprak ortamından iletimle transfer edilir. Fourier yasası olarak bilinen bir duvar (bir tabaka) içerisindeki bir boyutlu ısı iletim denklemi aşağıda belirtilmiştir.

$$q = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (II.1)$$

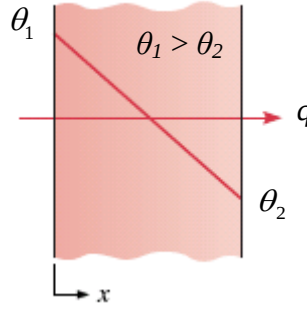
Bu denklemde;

q : Isı akısı [W/m^2]

$d\theta/dx$: x yönündeki sıcaklık değişimi [K/m]

ρ : Isıl öz direnç [$K \cdot m/W$]

olarak ifade edilir. Denklemde yer alan eksi işareti, ısının azalan sıcaklık yönünde transfer edildiğini göstermektedir [27]. Şekil II.1’de bir boyutlu ısı akısı ve x yönündeki sıcaklık değişimi gösterilmiştir.



Şekil II.1 Bir duvar içerisindeki bir boyutlu sıcaklık dağılımı, sabit ısı akısı [29]

II.1.2 Taşınım İle Isı Transferi

Akışkan hareketi ile ilişkili olan ısı transferinin bu şekli esas olarak hem akışkan içinde moleküllerin etkileşmesiyle gerçekleşen iletimle ısı transferi hem de akışkanın hareketi dolayısıyla enerjinin taşınması mekanizmalarının her ikisini de içerir. Eğer akışkanın hareketi yardımcı bir araç vasıtasıyla (fan ya da pompa) sağlanıyorsa, ya da incelenen hacme belli bir hızla giriyorsa zorlanmış taşınım söz konusudur. Diğer taraftan, incelenen hacimde akışkan hareketi yoğunluk farklılığı dolayısıyla oluşuyorsa doğal taşınım ifadesi uygundur. Havai hatlarda kullanılan kablolar için taşınım ve ışıma kablo yüzeyinden çevreleyen hava ortamına önemli ısı transfer mekanizmalarıdır. Newton soğuma yasası olarak bilinen ısı taşınım denklemi (II.2)'de gösterilmiştir.

$$q = h(\theta_{\text{yüzey}} - \theta_{\text{ortam}}) \quad (\text{II.2})$$

Bu denklemde;

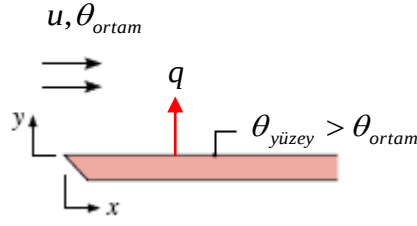
q : Taşınım ısı akısı [W/m^2]

h : Taşınım ile ısı transfer katsayısı [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]

$\theta_{\text{yüzey}}$: Yüzey sıcaklığı [K]

θ_{ortam} : Çevreleyen hava sıcaklığı [K]

olarak adlandırılır. Şekil II.2'de düz bir yüzey üzerinden çevreleyen ortama zorlamalı taşınım gösterilmiştir. Şekilde yer alan u rüzgar hızıdır.



Şekil II.2 Zorlamalı taşınım [29]

Tablo II.1’de bazı akışkanlar için ortalama ısı taşınım katsayıları verilmiştir [28].

Tablo II.1 Akışkanlara ait ısı taşınım katsayısı değerleri

Akışkan ve Taşınım Modu	h (W/m ² K)
a) Doğal Taşınım	
Hava	5-25
Su	500-1000
Yağlar	5-300
b) Zorlanmış Taşınım	
Hava	10-300
Su	100-15000
Yağlar	60-1800

Isı taşınım katsayısı ısı iletim problemlerinde sınır koşulu olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu katsayının doğru olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Beşinci bölümde bu katsayının hesaplanması için ampirik bir bağıntı verilmiştir.

II.1.3 Işınım ile Isı Transferi

Isıl ışıınım kablo ya da kanal yüzeyinden yayılan ısı enerjisidir. Kablo yüzeyinden ışıınım ile yayılan ısı akısı Stefan-Boltzmann yasası ile verilir (II.3).

$$q = \varepsilon \sigma_B \theta_{yüzey}^4 \quad (II.3)$$

Bu denklemde;

$\theta_{yüzey}$: Mutlak yüzey sıcaklığı [K]

σ_B : Stefan-Boltzmann sabiti [$5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m²·K⁴]

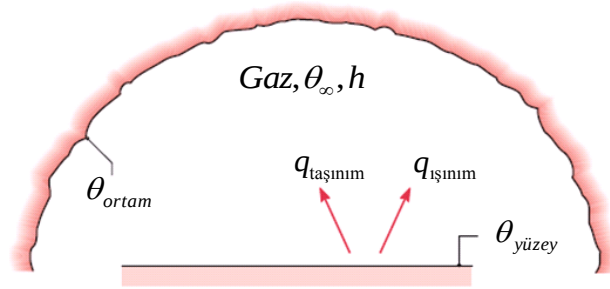
ε : Yayınlam oranı [$0 \leq \varepsilon \leq 1$]

olarak adlandırılır. ε , ideal bir radyatöre göre yüzeyin ne kadar etkili bir yayınlam gücüne sahip olduğunun göstergesidir. Eğer ışıınım yüzey üzerinde bir olay ise birazda soğurma gerçekleşecektir. Hesaplamalarda kablo yüzeyinin küçük, diğer yüzeyin ise uzakta ve çok büyük olduğu varsayılmaktadır. Yayınlam ve soğurma

gücünün eşit olduğu böyle bir yüzey varsayarak, kablo ve çevresi arasındaki ışınlama ısı değişim miktarı, kablo yüzeyinin birim alanı başına aşağıdaki gibi ifade edilir [27].

$$q = \varepsilon \sigma_B (\theta_{yüzey}^4 - \theta_{ortam}^4) \quad (II.4)$$

Şekil II.3’de küçük bir yüzey ile büyük bir eşsıcaklık yüzeyi arasında gerçekleşen taşınım ve ışınlama ısı transferi gösterilmiştir.



Şekil II.3 Taşınım ve ışınlama ısı transferi [29]

II.1.4 Isı Transfer Denklemleri

Yeraltına döşenen kablo içerisinde üretilen ısı, kablo bileşenleri ve toprak içerisinde iletim yolu ile transfer edilmektedir. Isı iletimini tanımlayan diferansiyel denklem aşağıda verilmiştir [30].

$$\nabla \cdot (k \nabla \theta) + W = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (II.5)$$

Bu denklemde;

θ : Bağımsız değişken olarak sıcaklık [K]

k : Isı kaynağının çevresindeki ortamın ısı iletkenliği [W/K·m]

ρ : Ortamın madde olarak yoğunluğu [kg/m³]

c : Isıyı ileten ortamın ısı kapasitesi [J/kg·K]

W : Hacimsel ısı kaynağı şiddeti [W/m³]

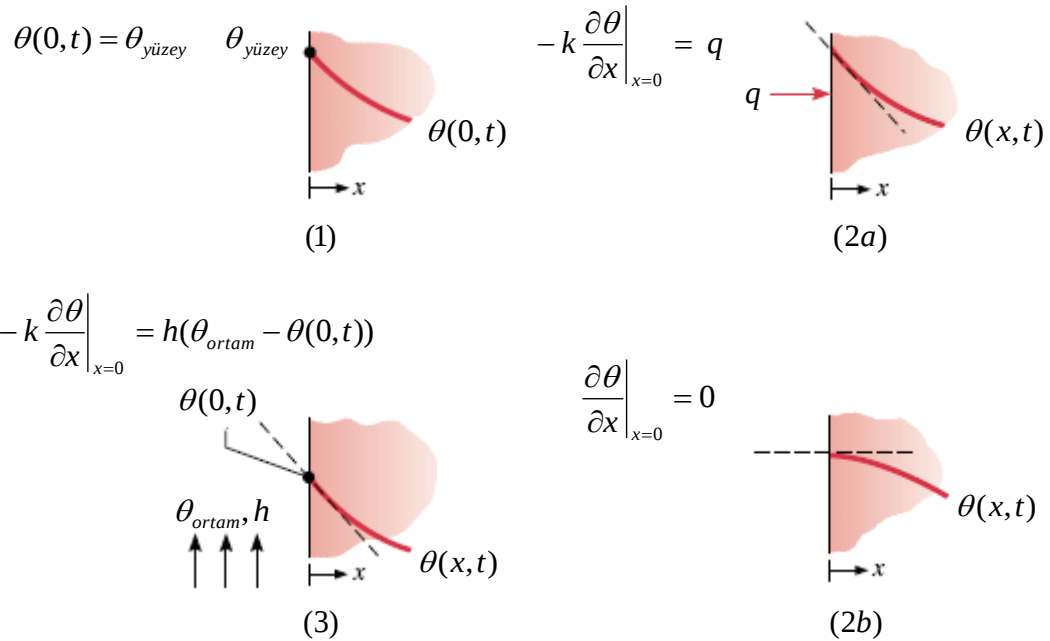
büyükliklerini göstermektedir. Bu denklemin kartezyen ve silindrisel koordinatlarda iki boyutlu açılımı sırasıyla denklem (II.6) ve (II.7)’de verilmiştir [30].

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{W}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \phi^2} + \frac{W}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

Denklemlerde yer alan α , ısı yayılım katsayısı olup $k/\rho c$ formülü ile verilir. Birimi m^2/s 'dir. Kararlı hal çözümü dikkate alındığında her iki denklemde eşitliğin sağ tarafı ihmal edilir.

İletkendeki tek ısı kaynağı $W = I^2 \cdot R$ kabul edildiğinde (II.7) denklemi başlangıç ve sınır koşulları belirtilerek I akımının belirlenmesi için çözülür. Yaygın olarak karşılaşılan üç tip sınır koşulu Şekil II.4'de gösterilmiştir. Bunlardan birincisi; Drichlet tipi sınır koşulu olup sınırdaki sabit θ sıcaklığı belirtilir (Şekil II.4-1). Bu nedenle sabit sıcaklık sınırı olarak adlandırılır. İkinci tip sınır koşulu Neumann sınır koşuludur (Şekil II.4-2a). Bu durumda sınır üzerinde θ sıcaklığının değişimi verilir. Sınırdaki ısı akısı belirtildiğinde böyle bir durum ortaya çıkar. Isı akısının sıfır alındığı yalıtım sınır koşulu ise Neumann sınır koşulunun özel bir durumudur (Şekil II.4-2b). Üçüncü tip sınır koşulu, sınırdaki taşınım olduğunda ortaya çıkar. Bu durumda sınır yüzeyinde taşınım yolu ile ısınma ya da soğuma olduğu varsayılmaktadır (Şekil II.4-3) [30].

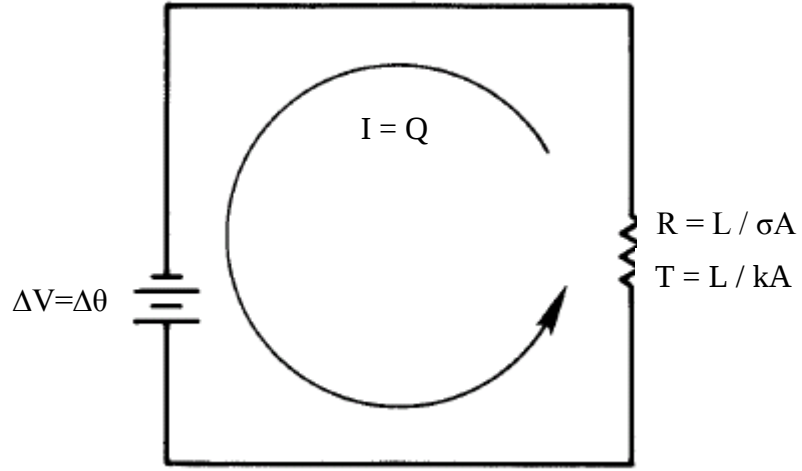


Şekil II.4 Isı denklemleri için sınır koşulları, (1) Sabit yüzey sıcaklığı, (2a) Sabit yüzey ısı akısı (Sonlu), (2b) Sabit yüzey ısı akısı (yalıtım), (3) Taşınım yüzey koşulu [29]

II.2 ISIL DEVRE BENZERLİKLERİ

Isı transfer denklemlerinin analitik çözümleri sadece basit kablo yapıları ve basit döşeme koşullarında mümkündür. Kablodaki ısı dağılım probleminin çözümünde elektrik mühendisleri; kablo ile çevreleyen ortam arasındaki, sıcaklık farkından dolayı oluşan ısı akısı ile potansiyel farkın oluşturduğu elektrik akımı arasındaki temel benzerliği kullanırlar. Bu yöntemde, ısı iletimi incelenecek fiziksel nesne çok sayıda hacime bölünür ve her bir hacimde bir ısı direnç ve bir ısı kapasite tanımlanır. Isıl direnç malzemenin ısı akışına karşı koyma yeteneği, ısıl kapasite ise malzemenin ısıyı depolayabilme yeteneğidir [27].

Elektrik ve ısıl devre arasındaki benzerlik Şekil II.5'te gösterilmiştir [30]. Bu benzerlik ısı transfer problemlerinin çözümünde kolaylık sağlamaktadır.



Şekil II.5 Elektrik ve ısıl devre arasındaki benzerlik

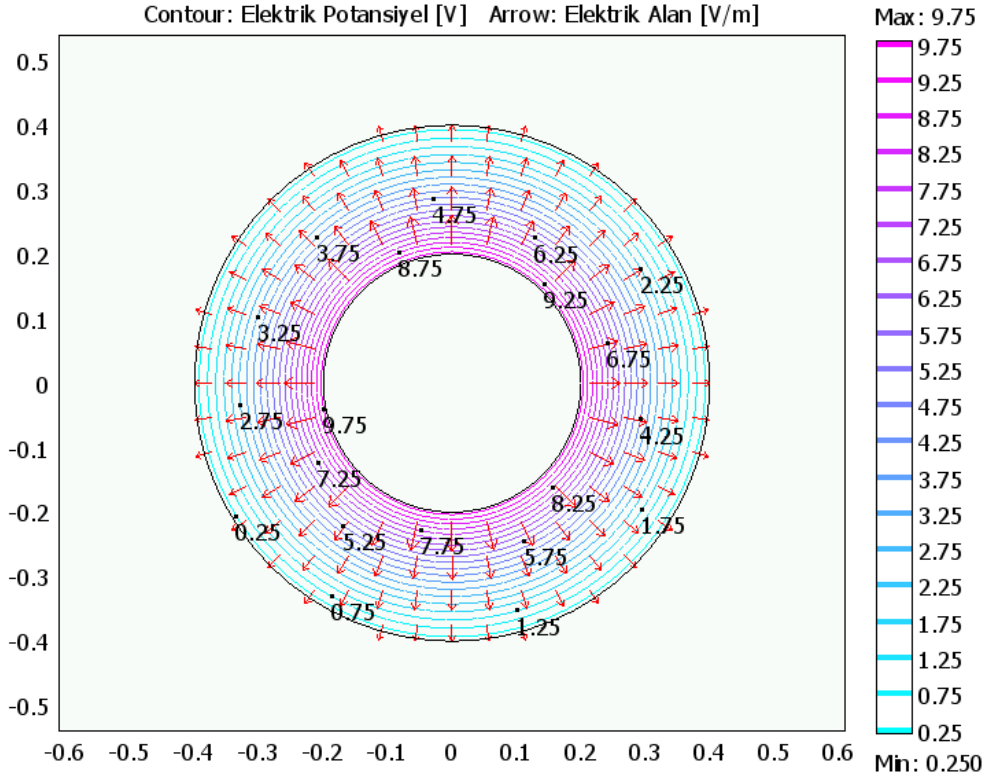
Şekilden görüldüğü gibi elektrik devresindeki potansiyel fark ve yük akımı ısıl devrede sıcaklık farkı ve ısı akışı ile ifade edilmektedir. Isı akışı ile sıcaklık arasındaki ilişki,

$$Q = \frac{\theta_1 - \theta_2}{T} \quad (II.8)$$

şeklinde, elektrik akımı ile potansiyel arasındaki ilişki ise,

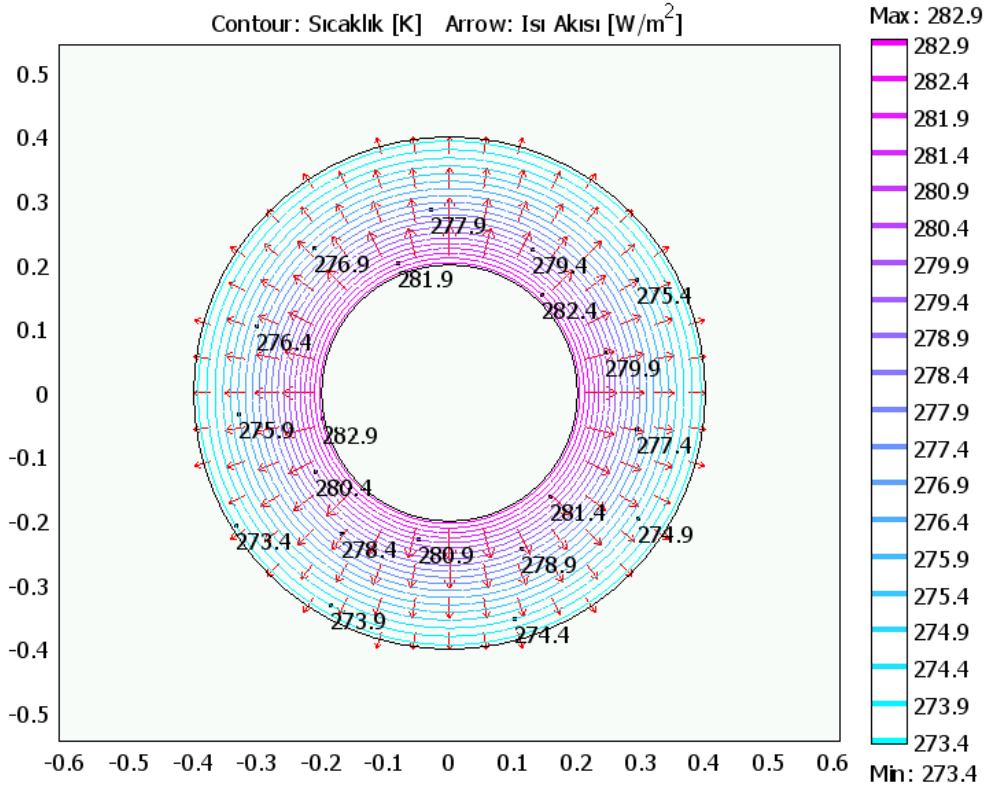
$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad (II.9)$$

olarak verilmektedir. Denklemlerde geçen T ısıl direnç, R ise elektriksel direnç büyüklüklerini göstermektedir. Şekil II.6 ve Şekil II.7’de bu benzerlik, basit geometrili bir kablo durumu için yapılan analizin sonuçlarıyla gösterilmiştir. Bu modelde kablonun iletkeni bakır yalıtkanı ise PVC olarak alınmış, sınır koşulları; elektrostatik problemde 10V ve 0V, ısı iletim probleminde 10°C (283.15°K) ve 0°C (273.15°K) olarak girilmiştir.



Şekil II.6 Eş potansiyel çizgileri ve elektrik alan çizgileri

Şekil II.6’da eş potansiyel çizgileri iletken yüzeyinden yalıtkanın dış yüzeyine doğru logaritmik olarak dağılmaktadır. Şekil II.7’de eş sıcaklık çizgileri için de aynı dağılımın olduğu görülmektedir. Şekillerde ayrıca elektrik alan çizgileri ile ısı akısı çizgileri de gösterilmiştir.



Şekil II.7 Eş sıcaklık çizgileri ve ısı akışı çizgileri

II.2.1 Isıl Direnç

Kablo içerisinde iletken olmayan tüm malzemeler ısının kablodan uzaklaşmasına karşı bir direnç gösterirler. Kablo içerisindeki metalik parçaların ısı direnç değerleri sıfır değildir fakat oldukça küçük olduğu için hesaplamalarda genellikle ihmal edilir. Kablo yalıtkanına ait iç ve dış yarıçap değerleri r_1 ve r_2 olarak verilirse birim uzunluk başına silindirselsel katmanın ısı direnci;

$$T = \frac{\rho_{\text{ısı}}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{II.11})$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde yer alan $\rho_{\text{ısı}}$, kablo yalıtkanının ısı öz direncidir.

Elektrik ve ısı devre analogisine göre;

$$W = \frac{\Delta\theta}{T} \quad (\text{II.12})$$

olarak yazılabilir. Bu denklem Ohm yasasının ısı eşdeğeridir. Denklemde yer alan;

W : İletilen ısıyı [W/m]
 $\Delta\theta$: Sıcaklık farkını [K]
 T : Yalıtkan malzemenin ısıl direnç değerini [K·m/W]

ifade eder.

Taşıyım için ısıl direnç değeri (II.13) denklemindeki Newton soğuma yasası kullanılarak elde edilebilir.

$$W = hA_s(\theta_e - \theta_{ortam}) \quad (II.13)$$

Bu denklemde A_s birim uzunluk başına kablo dış yüzeyinin alanını, h taşıyım ile ısı transfer katsayısını, θ_e kablo yüzey sıcaklığını ve θ_{ortam} kablonun çevresindeki ortamın sıcaklığını göstermektedir. (II.12) denklemindeki analogi kullanılarak taşıyım için ısıl direnç,

$$T = \frac{\theta_e - \theta_{ortam}}{W} = \frac{1}{hA_s} \quad (II.14)$$

şeklinde elde edilir [27].

II.2.2 Isıl Kapasite

Kablo içindeki ve çevresindeki sıcaklık dağılımını zamana bağlı elde etmek için ısı iletim denkleminin uygun formu çözülmelidir. (II.5)'de gösterilen ısı iletim denkleminin analitik çözümünü elde etmek kolay değildir. Bunun için, kablo bileşenlerindeki sıcaklık değişimlerinin küçük olduğu kabul edilerek, basit bir yaklaşım tercih edilir ve kablo sistemindeki bazı bileşenler, örneğin yalıtkan malzeme ve çevreleyen toprak, küçük parçalara ayrılır. Bu durumda ısıl eşdeğer devre yalnızca ısıl direnç ve ısıl kapasiteden oluşmaktadır. Isıl kapasite, ısıyı depolama yeteneği olarak tanımlanır (II.15).

$$Q = V \cdot c \quad (II.15)$$

Bu denklemde;

Q : Birim uzunluk başına ısıl kapasite [J/m·K]
 V : Malzemenin hacmi [m³]
 c : Malzemenin hacimsel ısıl kapasitesi [J/m³·K]

olarak verilir. Örneğin iç ve dış çapı D_1 ve D_2 olan silindirselsel bir yalıtkanın ısıl kapasitesi (II.16) denkleminde verilmiştir.

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) \cdot c \quad (\text{II.16})$$

Isıl kapasite ve direnç değeri kablo ve çevreleyen ortamdaki sıcaklık dağılımını zamanın bir fonksiyonu olarak elde etmek için ısıl devrenin oluşturulmasında kullanılmaktadır [27].

II.3 AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ

Bir kablonun akım taşıma kapasitesi (ampasite), yalıtkan malzeme için verilen sınır sıcaklık değerlerini aşmaksızın, kablonun sürekli halde taşıyabileceği en yüksek akım değeri olarak tanımlanır. Ampasite, kablo içerisinde üretilen ısıya bağlı olduğu kadar bu ısının kablodan çevreleyen ortama dağılım miktarı ile de ilişkilidir. Kablo içerisinde üretilen ısı kablo kayıplarına bağlı iken, kabloda oluşan ısının dağılımı, kablo bileşenleri ile kabloyu çevreleyen ortamın ısıl dirençlerine bağlı olarak değişmektedir [31].

Kablo sisteminin akım taşıma kapasitesi hesabında önemli parametreler aşağıda özetlenmiştir [26]:

1. Farklı kablo tipleri ve kablo sayısı
2. Farklı kablo tipleri için kullanılan malzemeler ve kablo yapısı
3. Kabloların döşendiği ortam
4. Kabloların birbirlerine ve toprak yüzeyine göre konumları
5. Kablo kılıflarının topraklama durumu

II.3.1 Yeraltı Kablolarının Kararlı Hal Denklemleri

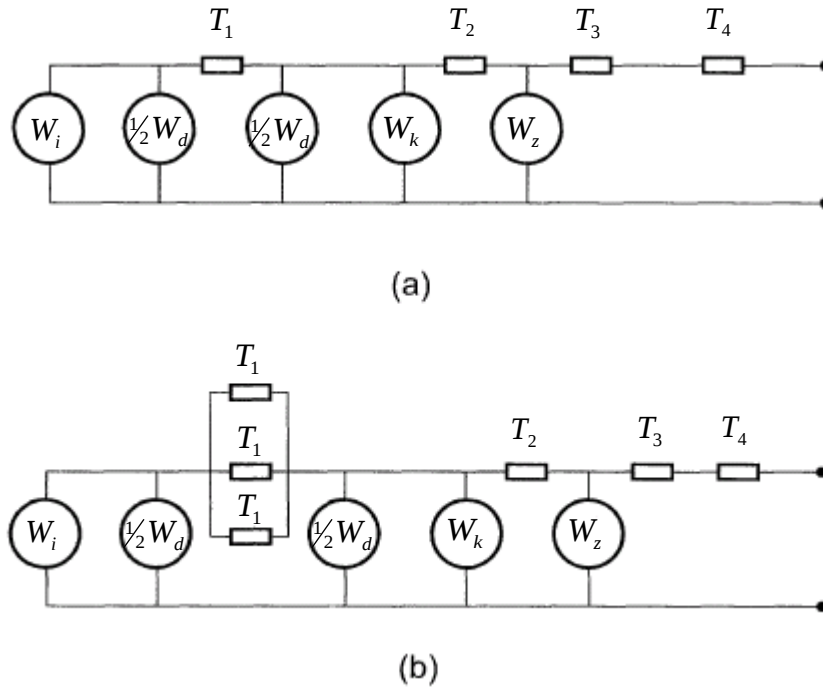
Ortamdaki nem durumunda değişiklik olmaksızın yeraltı kablolarının kararlı hal denklemlerinin çıkartılmasında Şekil II.8’de gösterilen ısıl eşdeğer devreden faydalanılır. Bu şekilde W_i , W_d , W_k ve W_z (W/m) değeri sırasıyla iletken, dielektrik, kılıf ve zırh kayıplarını ve n kablodaki damar sayısını ifade etmektedir. T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 (K·m/W) değeri birim uzunluk başına ısıl direnç değeri olup T_1 iletken ile kılıf arasındaki ısıl direnci, T_2 kılıf ve zırh arasındaki ısıl direnci, T_3

kablonun dış kaplamasına ait ısı direnci ve T_4 kablo yüzeyi ile çevreleyen ortam arasındaki ısı direnci göstermektedir.

Kabloda oluşan toplam Joule kayıpları W_I (II.17) denkleminde ifade edilmiştir [27].

$$W_I = W_i + W_k + W_z = W_i(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (\text{II.17})$$

Bu denklemde yer alan λ_1 , kılıf kayıp faktörü olarak adlandırılır ve metal kılıftaki toplam kayıpların toplam iletken kayıplarına oranı olarak belirtilir. Benzer şekilde λ_2 zırh kayıp faktörü olarak adlandırılır ve metalik zırhtaki toplam kayıpların toplam iletken kayıplarına oranını vermektedir.



Şekil II.8 Kararlı hal hesaplamaları için ısı eşdeğer devreler (a) Tek damarlı kablo (b) Üç damarlı kablo [26]

Elektrik ve ısı devre analogisinden faydalanılarak ortam sıcaklığının üzerindeki iletken sıcaklık artışı aşağıdaki şekilde yazılabilir [27].

$$\Delta\theta = (W_i + \frac{1}{2}W_d)T_1 + [W_i(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2 + [W_i(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4) \quad (\text{II.18})$$

Ortam sıcaklığı kabloların döşendiği çevrenin sıcaklığı olarak alınır. Çevredeki ısı kaynakları bu sıcaklığa dahil edilir. Denklemin çözümünde ilk olarak iletkenin maksimum işletim sıcaklığı verilir. Daha sonra iletken akımı hesaplanır. İletken kayıpları yerine $W_i = I^2 \cdot R$ yazılarak (II.18) denklemi düzenlenirse;

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (II.19)$$

elde edilir [27]. Bu denklemde yer alan R değeri maksimum işletim sıcaklığında birim uzunluk başına iletkenin alternatif akım direnç değeridir.

Elverişsiz koşullarda kablodan ayrılan ısı akısı topraktaki nem miktarını önemli ölçüde azaltabilir. Bu durumda kablonun çevresinde ısı iletkenliği diğer bölgelere göre iki üç kat azalan kuru bir bölge şekillenecektir. Yeraltına döşenen kabloların akım taşıma kapasitesi büyük ölçüde kabloları çevreleyen ortamın ısı iletkenliğine bağlıdır. Toprağın ısı iletkenliği ise sabit olmayıp ortamdaki nem miktarına bağlı olarak değişir.

Kablo hesaplamalarında nem etkisi için basit iki bölgeli bir model önerilmiştir. Bu modelde nemli toprağın düzenli bir ısıl öz dirence sahip olduğu kabul edilir. Eğer kablodan yayılan ısı ve kablonun yüzey sıcaklığı belirli bir kritik sınırın üzerinde artarsa toprak kuruyacaktır. Sonuçta orijinaline göre daha yüksek bir ısıl öz direnç değerine sahip bölge oluşur. Topraktaki kurumamanın başlaması için kritik koşullar toprak tipine, orijinal nem içeriğine ve sıcaklığa bağlıdır. (II.20) denklemi ortamdaki kurumaya bağlı olarak kablonun akım taşıma kapasitesini vermektedir [27].

$$I = \left[\frac{\theta_i - \theta_{ortam} - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + vT_4)] + (v-1)\Delta\theta_x}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + vT_4)} \right]^{0.5} \quad (II.20)$$

Bu denklemde;

θ_{ortam} : Ortam sıcaklığı [K]

θ_x : x mesafesindeki izoterm sıcaklığı [K]

v : Kuru ve nemli bölgenin ısıl öz dirençleri oranı [$v = \rho_2 / \rho_1$]

$\Delta\theta_x$: Kritik sıcaklık artış değeri [K]

büyükliklerini göstermektedir.

II.3.2 Havai Hatta Kullanılan Kabloların Kararlı Hal Denklemi

Havai hatta döşenen kablolar için dış ısı direnç değerine ışıınım ve taşınım ısı kayıpları eklenir. Güneş ışınlarına maruz kalan kablolarda, kablonun dış kaplaması tarafından emilen ısı ek bir sıcaklık artışına sebep olacaktır. (II.19) denkleminde gerekli düzenlemeler yapılarak havai hatta döşenen kablolar için akım taşıma kapasitesi;

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*)] + \sigma D_e H T_4^*}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4^*)} \right]^{0.5} \quad (II.21)$$

olarak elde edilir [27]. Bu denklemde;

- D_e : Kablonun dış çapı [m]
 σ : Kablo yüzeyinin güneş ışınlarını soğurma katsayısı
 H : Güneş ışınlarının yoğunluğu [W/m^2]
 T_4^* : Güneş ışınlarında etkisi göz önüne alınarak kablonun dış ısı direnci
[K·m/W]

olarak ifade edilir.

II.4 PARAMETRELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde kabloların izin verilebilir akım değerlerinin hesaplanması için gereken kayıp ve ısı direnç hesaplamaları yer almaktadır.

II.4.1 Kayıpların Hesaplanması

II.4.1.1 İletken Kayıpları

Güç kablolarındaki kayıpların önemli miktarı kablo iletkenlerinde oluşmaktadır. Joule kayıpları olarak anılan bu kayıplar (II.22) denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$W_i = I^2 \cdot R \quad (II.22)$$

Bu denklemde I iletken akımını, R işletim sıcaklığında iletkenin alternatif akım direncini göstermektedir.

Alternatif akım taşıyan bir iletkenin direnci doğru akım taşıyan iletkene göre daha fazladır. Bu artmanın sebepleri deri etkisi, yakınlık etkisi, ferromanyetik malzemelerin yakınındaki histerezis ve eddy akım kayıpları ile ferromanyetik olmayan malzemelerin yakınında indüklenen kayıplardır. Çok yüksek gerilime sahip kablolar haricinde yaygın olarak sadece deri ve yakınlık etkisi dikkate alınmaktadır [27].

En büyük çalışma sıcaklığında iletkenin birim uzunluk başına alternatif akım (AA) direnci boru tipi kablolar hariç (II.23) denkleminde verilmiştir. Boru tipi kablolar için benzer eşitlik (II.24) denkleminde yer almaktadır [32].

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (II.23)$$

$$R = R'(1 + 1.7(y_s + y_p)) \quad (II.24)$$

Bu denklemlerde;

R : En büyük çalışma sıcaklığında AA direnci [Ω/m]

R' : En büyük çalışma sıcaklığında doğru akım (DA) direnci [Ω/m]

y_s : Deri etkisi faktörü

y_p : Yakınlık etkisi faktörü

olarak ifade edilir.

İletkenin en büyük çalışma sıcaklığında birim uzunluk başına DA direnci (II.25) denkleminde verilmiştir.

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (II.25)$$

Bu denklemde

R_0 : 20°C sıcaklıkta iletkenin DA direnci [Ω/m]

α_{20} : Sıcaklık katsayısı [$1/^\circ C$]

θ : En büyük çalışma sıcaklığı [$^\circ C$]

büyükliklerini göstermektedir. Kablolarda kullanılan metallerin elektrik özdirençleri ve sıcaklık katsayıları Tablo II.2’de verilmiştir [32].

Tablo II.2 Malzeme Özellikleri

Malzeme	Özdirenç (ρ_{20}) (Ωm)	Sıcaklık katsayısı (α_{20}) 20°C de (1/K)
a) İletkenler		
Bakır	$1.7241 \cdot 10^{-8}$	$3.93 \cdot 10^{-3}$
Alüminyum	$2.8264 \cdot 10^{-8}$	$4.03 \cdot 10^{-3}$
b) Kılıflar ve zırh		
Kurşun veya kurşun alaşımı	$21.4 \cdot 10^{-8}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$
Çelik	$13.8 \cdot 10^{-8}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$
Bronz	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$3.0 \cdot 10^{-3}$
Paslanmaz çelik	$70 \cdot 10^{-8}$	İhmal edilebilir.
Alüminyum	$2.84 \cdot 10^{-8}$	$4.03 \cdot 10^{-3}$

Deri etkisi faktörü (II.26) denklemi ile verilir.

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 \cdot x_s^4} \quad (\text{II.26})$$

Bu denklemde yer alan x_s katsayısı iletken malzemenin DA direnci ve frekans ile değişmektedir (II.27). k_s katsayısı için değerler Tablo II.3’de verilmiştir [32].

$$x_s^2 = \frac{8\pi \cdot f}{R'} 10^{-7} k_s \quad (\text{II.27})$$

Daire kesitli iletkenlere sahip üç damarlı kablolar ile üç tek damarlı kablolar için yakınlık etkisi faktörü (II.28) denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \cdot \left[0.312 \cdot \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} + 0.27} \right] \quad (\text{II.28})$$

Bu denklemde;

d_c : iletkenin çapı [mm]

s : iletken eksenleri arasındaki uzaklık [mm]

olarak ifade edilir. x_p katsayısı (II.29) denkleminde, k_p katsayısı için değerler Tablo II.3’de verilmiştir [32].

$$x_p^2 = \frac{8\pi \cdot f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (\text{II.29})$$

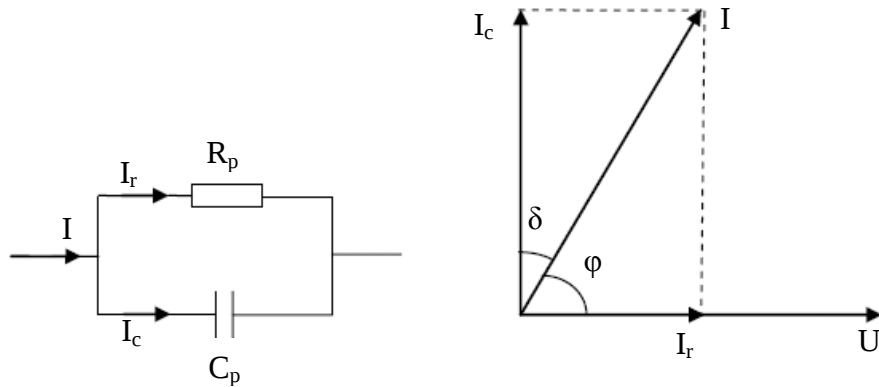
Tablo II.3 Bakır iletkenlerde deri ve yakınlık etkisinin k_s ve k_p katsayıları için deneysel veriler

İletken Tipi	Kuru ve emprenyeli olup olmadığı	k_s	k_p
Yuvarlak, çok telli	Evet	1	0.8
Yuvarlak, çok telli	Hayır	1	1
Yuvarlak, sıkıştırılmış	Evet	1	0.8
Yuvarlak, sıkıştırılmış	Hayır	1	1
Yuvarlak, daire dilimi parçalı		0.435	0.37
Ortası boş, helis biçimli, çok telli	Evet	2	0.8
Daire dilimi biçimli	Evet	1	0.8
Daire dilimi biçimli	Hayır	1	0.8

II.4.1.2 Dielektrik Kayıplar

Uygulanan gerilim seviyesine bağlı olarak dielektrik malzemeden bir akım akacaktır. Dielektrikten geçen bu akım bir güç kaybı meydana getirir. İdeal bir dielektrikte, üzerinden geçen akım reaktif bir akım olup güç olarak sadece reaktif güce karşılık düşerken gerçek (ideal olmayan) bir dielektrikte reaktif gücün yanında aktif güçte meydana gelir. Dielektrikte meydana gelen bu aktif güç ısı şeklinde kendini gösterir ve “dielektrik kayıp” olarak adlandırılır [33].

İdeal olmayan gerçek bir dielektrik, ideal bir kondansatöre seri ya da paralel bağlı bir dirençten oluşan eşdeğer devre ile gösterilir. Şekil II.9’da paralel eşdeğer devre ile bu devreye ait fazör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil II.9 Kayıplı bir kondansatörün paralel eşdeğer devresi ve fazör diyagramı

Gerçek kondansatörde akım ile gerilim arasındaki açı 90° 'nin altındadır. Faz açısının 90° 'den sapma açısı δ ile gösterilir ve kayıp açısı olarak adlandırılır. Bu

açının tanjantı ise dielektrik kayıp faktörüdür. Her bir faz için birim uzunluk başına dielektrik kaybı (II.30) denkleminde verilmiştir.

$$P_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad [\text{W/m}] \quad (\text{II.30})$$

Bu denklemde;

U_0 : İşletim gerilimi [kV]

ω : Açısal frekans [1/s]

C : Kablonun kapasitesi [$\mu\text{F/km}$]

olarak isimlendirilir. Dairesel iletkenler için kapasite

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \ln(D_i / d_c)} 10^{-9} \quad (\text{II.31})$$

formülü ile hesaplanır. Denklemden yer alan ϵ_r , yalıtkanın bağıl dielektrik sabitini, D_i yalıtkanın ekran hariç dış çapını, d_c ise ekran dahil iletken çapını ifade eder. Şebeke frekansında yüksek gerilim ve orta gerilim kablo yalıtımları için bağıl dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri Tablo II.4’de verilmiştir [32].

Tablo II.4 Şebeke frekansında yüksek gerilim ve orta gerilim kablo yalıtımları için bağıl dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri

Kablonun Tipi	ϵ_r	$\tan \delta$
Emprenye edilmiş kağıt yalıtımlı kablolar:		
Som, tamamen emprenye edilmiş, ön emprenyeli veya akıtmayan kütle emprenyeli	4	0.01
Yağlı, kendinden muhafazalı, $U_0 = 36$ kV’a kadar	3.6	0.0035
Butil kauçuk	4	0.05
EPR:		
18/30(36) kV’a kadar ve 18/30(36) kV dahil kablolar	3	0.02
18/30(36) kV’dan büyük kablolar	3	0.005
PVC	8	0.1
PE (HD ve LD)	2.3	0.001
XLPE:		
18/30(36) kV’a kadar ve 18/30(36) kV dahil kablolar	2.5	0.004
(dolgusuz)		
18/30(36) kV’dan büyük kablolar (dolgusuz)	3	0.001
18/30(36) kV’dan büyük kablolar (dolgulu)	3	0.005

Genellikle yağ emdirilmiş kağıt yalıtkanlı kablolarda $\tan \delta$ değeri XLPE yalıtkanlı kablolarla nazaran oldukça yüksektir. Kablolarda kullanılan çoğu dielektrik malzeme için $\tan \delta$ değeri elektrik alan, frekans ve sıcaklık büyüklüklerine bağlıdır.

Bununla birlikte yağ emdirilmiş kağıt yalıtkanlı kablolar için $\tan \delta$ nem içeriğinden önemli miktarda etkilenir. Bu nedenle yüksek gerilim kablolarında, dielektrik kayıplarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması için nem seviyesi % 0.05'in altında olmalıdır. Bunun dışında malzeme içerisindeki boşluklar da dielektrik kayıplarını etkileyebilir. Bu boşluklarda gerçekleşen kısmi boşalmalar $\tan \delta$ değerini artıracaktır [31].

Dielektrik kayıplar dört tür kaybın toplamından oluşmaktadır. Bu kayıplar iletim kaybı, histerezis kaybı, kutuplanma kaybı (polarizasyon) ve iyonlaşma kaybıdır. Bu kayıplar kısaca şöyle açıklanabilir; İletim kaybı kaçak akımların iyon ve elektron iletiminin yol açtığı kayıplardır. Yalıtkan malzemenin direncinden ve üzerinden geçen akımdan kaynaklanır. Histerezis kaybı, birbirine komşu birden fazla dielektriğin, elektrik alanı altında kaldıklarında, ara kesit yüzeylerinde dielektrikler arası yük dengesi kurulana kadar gerçekleşen yük hareketlerinden ortaya çıkan kayıplardır. Bu kayıplar, dielektriklerin elektriksel iletkenliklerine ve dielektrik sabitlerine bağlıdır. Kutuplanma (polarizasyon) kaybı dipol moleküler yapıları dielektriklerde, dipol moleküllerin kutuplarının uygulanan alanın zıt kutbuna doğru yönelme veya kayma hareketlerinden (polarizasyon akımlarından) meydana gelen kayıplardır. İyonlaşma kaybı ise bir yalıtkan ortamda kısmi boşalmaların yol açtığı kayıptır. Yalıtkanlardaki gazların, hava boşluğu gibi boşlukların iyonizasyonu ve yalıtkanlardaki yabancı maddeler nedeniyle oluşan kayıplardır [33].

II.4.1.3 Kılıf Kayıpları

Her bir kablo iletkeninden geçen akım kablonun metalik kılıflarında bir gerilim indükler. Topraklama yapılmadığı zaman kılıflardaki bu gerilim tehlikeli olabilir. Bununla ötesinde diğer kablo bileşenlerini etkileyerek kablonun ömrünü ve güvenilirliğini azaltır. Metalik kılıflar birbirine bağlı olduğunda içlerinden akan sirkülasyon akımları güç kaybına sebep olur. Üç damarlı kablolarda ise bu kayıplar ihmal edilebilir. Kablo tek damarlı da olsa üç damarlı da olsa sirkülasyon akımlarına ek olarak kablo kılıflarında ayrıca eddy akımları indüklenecektir. Bu kayıplar genellikle daha küçük değerlerdedir.

Tek damarlı kablo kılıfları açık devre ya da kısa devre olabilir. Kılıflar kısa devre olduğu zaman genellikle birbirlerine bağlanıp her bir bağlantı çukurunda topraklanırlar. Bu durum kılıf gerilimini sıfır yapar fakat kılıf akımlarının akmasına izin verir. Kılıflar açık devre olduğunda bir akım dolaşmayacaktır. Fakat bu sefer de

kılıfların belirli bir potansiyeli olabilir. Bu gerilim seviyesini güvenli bir sınırdan, örneğin 25V'un altında tutmak için kablo kılıfları genellikle çaprazlanır [31].

Kılıf ve ekrandaki güç kayıpları (II.32) denkleminde verilmiştir.

$$\lambda = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (\text{II.32})$$

Bu denklemde λ_1' sirkülasyon akımları, λ_1'' ise fuko akımları nedeniyle meydana gelen kayıpları göstermektedir. Bir elektriksel bölümün her iki ucunda kılıfları bağlı olan tek damarlı kablolarda, sirkülasyon akımları nedeniyle meydana gelen kayıplar göz önüne alınmalıdır [32].

Bir elektriksel bölümün her iki ucundan kılıfları bağlı, konumu değişmeyen yanyana düzenlenmiş üç tek damarlı kablolarda, en büyük kaybın meydana geldiği kablonun kayıp faktörü;

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + Q^2)(R_s^2 + P^2)} \right] \quad (\text{II.33})$$

diğer dıştaki kablonun kayıp faktörü;

$$\lambda'_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + Q^2)(R_s^2 + P^2)} \right] \quad (\text{II.34})$$

ve ortadaki kablonun kayıp faktörü;

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} = \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \quad (\text{II.35})$$

formülleri ile verilir. Formüllerde yer alan R_s değeri kılıf malzemesinin direncini ifade eder. P ve Q sabitleri ise $P = X + X_m$ ve $Q = X - X_m/3$ şeklinde yazılabilir. Burada;

X : Bitişik iki tek damarlı kablolarda, kablonun birim uzunluğu başına kılıfın veya ekranın reaktansını $(2\omega \cdot 10^{-7} \ln(2s/d)) [\Omega/\text{m}]$,

X_m : Yanyana düzenlenmiş kablolarda, bir dış kablonun kılıfı ile diğer ikisinin iletkenleri arasında birim kablo uzunluğu başına karşılıklı reaktansını $(2\omega \cdot 10^{-7} \ln(2)) [\Omega/\text{m}]$ göstermektedir.

Kılıf reaktanslarında geçen s , iletken eksenleri arasındaki mesafeyi [m], d ise kılıfın ortalama çapını [mm] ifade eder.

Daire dilimi kesitli büyük iletkenleri bulunan kablolar hariç, fuko akımı kayıpları ihmal edilmektedir [26][32].

II.4.2 Isıl Dirençlerin Hesaplanması

Kablonun akım taşıma kapasitesi, kablo bileşenleri ve dış ortamın ısı dirençlerinin bir fonksiyonudur. T_1 , iletken ile kılıf arasındaki, T_2 kılıf ve zırh arasındaki, T_3 dış kaplamanın ve T_4 kablo dışındaki ortamın ısı direnç büyüklüklerini göstermektedir. Yalıtım ve koruyucu örtüler için kullanılan malzemelerin ısı öz direnç değerleri Tablo II.5’de verilmiştir. Ekranlama tabakaları bulunduğu, ısı hesaplamalar için, yarı iletken tabakalar yalıtımın bir bölümü olarak, metalik şeritler ise iletkenin veya kılıfın bir bölümü olarak düşünülür. Hesaplamalarda ısı direnç değerlerinin sabit olduğu ve sıcaklık ile değişmediği varsayılmaktadır. Dış ısı dirençlerin hesaplanması için gereken bağıntılar aşağıda verilmiştir [26][32].

Tek damarlı kablolarda iletken ve kılıf arasındaki ısı direnç değeri T_1 (II.36) denklemi kullanılarak hesaplanır [26].

$$T_1 = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) \quad (\text{II.36})$$

Bu denklemde yer alan ρ yalıtkanın ısı öz direncini [$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$], t_1 iletken ile kılıf arasındaki yalıtkanın kalınlığını [mm], d_c iletkenin çapını [mm] ve T_1 yalıtkanın ısı direncini [$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$] göstermektedir.

Tablo II.5 Bazı Malzemelerin Isıl Öz dirençleri

Malzeme	Isıl Öz direnç (ρ) (K·m/W)
a) Yalıtım malzemeleri	
Som tip kablolardaki kağıt yalıtım	6.0
Yağlı kablolardaki kağıt yalıtım	5.0
PE	3.5
XLPE	3.5
PVC (3 kV'a kadar)	5.0
PVC (3 kV'dan büyük)	
EPR (3 kV'a kadar)	3.5
EPR (3 kV'dan büyük)	5.0
Butil kauçuk	5.0
Kauçuk	5.0
b) Koruyucu örtüler	
Polikloroplen	5.5
PVC (35kV'a kadar)	5.0
PVC (35kV'dan büyük)	6.0
PE	3.5

Ortak metalik kılıfa sahip tek damarlı, iki damarlı ve üç damarlı kablolar için kılıf ile zırh arasındaki ısı direnç değeri T_2 (II.37) denklemi kullanılarak hesaplanır [26].

$$T_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \ln \left(1 + \frac{2t_2}{D_s} \right) \quad (\text{II.37})$$

Bu denklemde yer alan ρ yatağın ısı öz direncini [K·m/W], t_2 yatağın (zırhın altındaki örtünün) kalınlığını [mm], D_s ise kılıfın dış çapını [mm] göstermektedir.

Dış kaplamanın ısı direnci T_3 'ün hesaplanmasında (II.38) denkleminde faydalanılır [26].

$$T_3 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right) \quad (\text{II.38})$$

Bu denklemde ρ kaplamanın ısı öz direncini [K·m/W], t_3 kaplamanın kalınlığını [mm] ve D'_a zırhın dış çapını [mm], eğer zırh yoksa kılıf, ekran ya da yataklama malzemesinin hemen altındaki dış çapı ifade eder.

Kabloların maksimum akım taşıma kapasitesi büyük ölçüde kabloyu çevreleyen ortamın ısı direncine bağlıdır. Toprak altına gömülü kablolarda iletkendeki sıcaklık artışının en az %70'i bu dirençlerde düşer. Dış ısı direnç

toprağın ısı karakteristiklerine, kablonun çapına, gömülme derinliğine, döşeme şekline (direkt gömülü, dolgu malzemesi içerisinde, boru içerisinde ya da kanal içerisinde) ve yakındaki kabloların ürettiği ısı alanlara bağlıdır. Havai hatlarda kullanılan kablolarda dış ısı direncin etkisi oldukça düşüktür.

Eşit yüklü benzer kablolardan oluşan grup döşemelerinde en çok ısınan kablonun ampasitesi belirlenir. Genellikle döşeme koşullarından hangi kablonun daha çok ısınacağını belirlemek mümkündür. Aksi takdirde her bir kablo içinde hesaplama yapmak gerekebilir. Dış ısı direnç değerine (T_4) gruptaki karşılıklı ısı etkileri katılmalıdır.

Grup olarak gömülü (birbirine dokunmayan) eşit olarak yüklenmiş kablolarda dış ısı direnç (II.39) denklemi ile bulunur [26]. Bu denklemde kullanılan değişkenler Şekil II.10'da gösterilmiştir.

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \cdot \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\} \quad (\text{II.39})$$

Köşeli parantez içerisinde $(q-1)$ adet çarpan bulunmaktadır (d'_{pp} / d_{pp} hariç). Bu denklemde;

$$u = 2L / D_e$$

ρ_s toprağın ısı öz direnci [K·m/W]

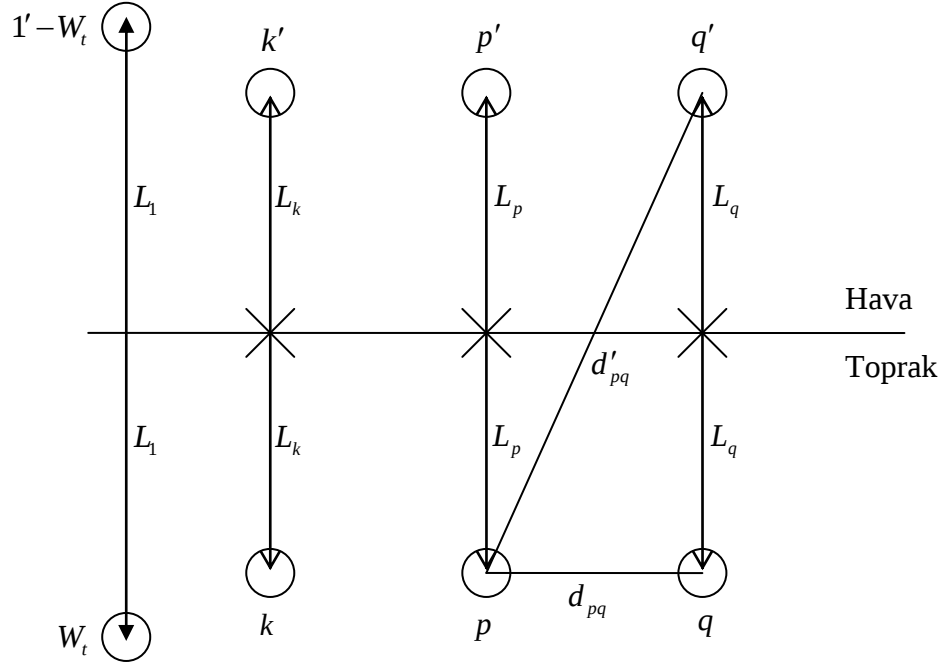
D_e kablonun dış çapı [mm]

L kablo ekseninin yer yüzeyine göre derinliği [mm]

d'_{pq} ısı direnci belirlenecek p'inci kablonun ekseninden bitişindeki q kablusunun görüntüsünün eksenine olan uzaklığı [mm]

d_{pq} ısı direnci belirlenecek p'inci kablonun ekseninden bitişindeki q kablusunun eksenine olan uzaklığı [mm]

olarak ifade edilir.



Şekil II.10 Yeraltına döşenmiş bir grup kablounun dış ısıl direncinin bulunmasında kullanılan gösterim [26]

Çaprazlama yapılmamış, iki taraftan topraklanan tek damarlı kablo kılıfındaki kayıplar önemli oranda ise kayıplardaki farklılık ortadaki kablounun dış ısıl direncini etkileyecektir. Bu durumda en fazla ısınacak olan ortadaki kablo için dış ısıl direnç (II.39) denklemi düzenlenerek;

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \left\{ \ln \left[u + \sqrt{u^2 - 1} \right] + \left[\frac{1 + 0.5(\lambda'_{11} + \lambda'_{12})}{1 + \lambda'_{1m}} \right] \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (\text{II.40})$$

şeklinde yazılır [26]. Bu denklemde yer alan s_1 bitişik iki kablo arasındaki eksenel aralıktır (mm).

Eşit olarak yüklenmemiş farklı kablolardan meydana gelen gruplar için önerilen yöntem, incelenmekte olan kablounun yüzeyinde, grubun diğer kablolarının meydana getirdiği sıcaklık artışını hesaplamak ve bu artışı iletkenin izin verilebilir sıcaklık artışından çıkarmaktır. Her kablounun birim uzunluğu başına yayılan güç önceden tahmin edilmeli ve gerekli olduğunda sonradan hesaplama sonunda bu değer düzeltilmelidir. Böylece p sırasındaki kablounun yüzeyinde, gruptaki diğer (q-1) adet

kablonun yaydığı gücün neden olduğu, ortam sıcaklığının üzerindeki $\Delta\theta_p$ sıcaklık artışı,

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp} \quad (\text{II.41})$$

şeklinde verilir. Bu denklemde $\Delta\theta_{kp}$, k sırasındaki kabloda, birim uzunluk başına yayılan W_k gücünün, kabloun yüzeyinde meydana getirdiği sıcaklık artışını göstermektedir (II.42).

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{\rho_s}{2\pi} W_k \ln \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \quad (\text{II.42})$$

(II.42) denkleminde d_{pk} ve d'_{pk} uzunlukları, sırasıyla, p sırasındaki kablonun ekseninden k sırasındaki kablonun eksenine ve k sırasındaki kablonun toprak yüzeyi üzerindeki görüntüsünün eksenine olan uzaklıklardır. Daha sonra iletkenin izin verilebilir sıcaklık artışı $\Delta\theta$, $\Delta\theta_p$ kadar azaltılmalı ve p sırasındaki kablonun akım değeri, p konumundaki ayrı bir kabloya karşılık olan bir T_4 değeri kullanılarak belirlenmelidir. Bu hesaplama, gruptaki bütün kablolar için yapılmalı ve aşırı ısınmış herhangi bir kablo bulunması ihtimalini önlemek için gerektiğinde hesaplama tekrarlanmalıdır.

Bu durumda p kablosunun dış ısı direnci (II.43) denklemi kullanılarak hesaplanabilir [26].

$$T_4^p = \frac{\theta_{ep} + \Delta\theta_p - \theta_{ortam}}{W_p} = \frac{\rho_s}{2\pi} \left(\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{W_p} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^q W_k \ln \frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \quad (\text{II.43})$$

Bu denklemde yer alan θ_{ep} , p kablosunun dış sıcaklığını göstermektedir.

BÖLÜM III

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için sayısal bir tekniktir. Elektrik güç kablolarının akım taşıma kapasitelerinin tesbit edilebilmesi ısı transfer denkleminin çözümü ile mümkündür. Bu konu ile ilgili sayısal yöntemler [26]'da ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca yeraltına döşenmiş güç kablolarında sıcaklık dağılımı ve akım taşıma kapasitelerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunması üzerine IEC tarafından yayınlanan bir teknik raporda bulunmaktadır. Bu bölüm bu teknik rapordan [1] faydalanılarak hazırlanmıştır.

III.1 GİRİŞ

Klasik kablo hesaplamalarında ısı iletim denklemi çeşitli basitleştirilmiş varsayımlar altında çözülür. Bu durum analitik yöntemlerin uygulama alanını sınırlandırmaktadır. IEC 60287, IEC 60853-1 ve IEC 60853-2'de tanımlanan analitik yöntemlerde kablo grubu süperpozisyon uygulamasına dayalı olarak ele alınır. Bu prensibi uygulamak için diğer kablonun varlığının ilk kablonun ısı akısı yolunu ve ısı üretimini bozmadığı kabul edilir. Bu durum her bir kablo için ayrı ayrı hesaplamaların gerçekleştirilmesine izin verir. Sıcaklık artış değeri kablonun kendisinin ve diğer kabloların sebep olduğu sıcaklık artışlarının cebirsel toplamıdır. Böyle bir yöntem kablolar birbirlerinden ayrı döşendiğinde doğrudur. Bu durumun gerçekleşmediği kabloların birbirlerine dokunduğu durumda ise bütün kabloların eşzamanlı işletimlerinden doğan sıcaklık artışı dikkate alınır. Bu durumda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ısı iletim denkleminin direkt çözümü yapılabilir.

Sayısal yöntemler ayrıca yer yüzeyindeki taşınım sınırı, kablo yakınındaki ısı ya da su boruları için sabit dairesel ısı akısı sınırları gibi bölgesel sınırların daha doğru modellenmesine olanak tanır. Bir eşsıcaklık sınırının belirtilmediği örneğin kabloların toprak yüzeyine göre yakına gömüldüğü durumlarda sonlu elemanlar yöntemi ısı analiz için uygun bir araçtır.

Analitik yaklaşımlarla çözülemeyen en açık durum kabloyu çevreleyen ortamın farklı ısı dirençlere sahip çeşitli malzemelerden oluşmuş olmasıdır. Bu durum sadece çeşitli toprak karakteristiklerinin değil aynı zamanda dikey taşınım sınırının da ele alınması gereken gerçek bir kablo tesisidir. Düzenli olmayan toprak koşulları ve eş sıcaklıkta olmayan sınırlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kolaylıkla ele alınabilir. Bu yaklaşımın sayısal verimliliği oldukça tatmin edicidir. Mevcut kişisel bilgisayarların var olmasıyla birkaç bin düğümden oluşan ağlar birkaç dakika içinde çözülebilmektedir.

Toprağın sıcaklığı ve ısı direnci için seçilen değerlerin kablo sıcaklığı ve akım miktarı hesabında önemli bir etkiye sahip olduğu dikkate alınmalıdır. Çoğu durumda eğer toprak koşulları kesin olarak bilinmiyorsa daha doğru bir hesaplama yöntemi kullanmanın kazancı az olmaktadır.

III.1.1 Sonlu Elemanlar Yönteminden Elde Edilen Bilgi

Çoğu kablo probleminde, izin verilen maksimum iletken sıcaklığı değerini aşmasına yol açmayacak iletken akım değeri hesaplanır. Bunun yanında sayısal yöntemler kablo içerisinde üretilen ısı miktarı belirtilerek, kablo içerisinde ve çevresindeki sıcaklık dağılımını hesaplamakta kullanılırlar. Özellikle kablo çevresindeki sıcaklık alanının ve eş sıcaklık çizgilerinin belirlenmesi istendiğinde bu durum oldukça faydalıdır. Bununla birlikte sayısal yöntemler kullanıldığında tekrarlanan bir yaklaşım kullanılmak zorundadır. Bunun için belirli bir iletken akımı girilir ve iletken sıcaklığı hesaplanır. Daha sonra akım ayarlanır ve hesaplamalar, sıcaklık değeri belirli bir tolerans içerisinde kalana kadar tekrarlanır.

III.1.2 Alternatif Yöntemler

Toprak altında gömülü kabloların çevresindeki ısı transferini hesaplamak için sonlu elemanlar yönteminden başka sayısal yöntemlerde mevcuttur. Bu yöntemler sonlu farklar yöntemi, sınır elemanları yöntemi ve Electra 87'de tanımlanan süperpozisyon yöntemi olarak özetlenebilir.

Sonlu farklar yöntemi, kablo bağlantıları ve uç noktalarındaki elektriksel zorlanma dağılımı çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem üç boyutlu kablo problemlerinde sonlu elemanlar yöntemine göre daha uygundur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak üç boyutlu uzun ve ince nesneleri modellemek zordur. Bununla birlikte sonlu farklar yöntemi dikdörtgen gözlü ağlar ile kullanım için tasarlanmıştır. Eğri yüzeylerin modellenmesinde kullanışlı değildir.

Sınır elemanları yönteminde giriş verilerini tanımlamak daha kolay olup sonlu elemanlar yöntemine göre daha az bir çözüm zamanı gerektirir. Bununla birlikte geçici durum analizi sınır elemanları yöntemi ile gerçekleştirilemez.

Electra 87 de tanımlanan süperpozisyon yöntemi ise tek damarlı kabloların geçici ısı durumlarının hesaplanmasında sonlu elemanlar yöntemine göre birçok avantaja sahiptir. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- a) Daha az bir modelleme verisi gerektirir (1000 düğüm noktasına sahip sonlu elemanlar yöntemi ile kıyaslandığında 100 düğümden daha azı modelleme için yeterlidir). Bununla birlikte bu yöntem gerçek zamanlı sistemler için daha uygundur. Bir boyutlu sıcaklık alanı sayısal yöntemler kullanılarak türetilir. Bu nedenle daha büyük zaman adımları önemli hatalar oluşturmaksızın kullanılabilir.
- b) İki farklı kablo dolgu malzemesi olduğunda yaklaşım yöntemleri bu yöntem kullanılarak geliştirilebilir.
- c) Yöntem üç boyutlu problemlerde kablo bağlantı bölümlerinde oluşan geçici sıcaklıkların hesaplanmasında kullanılabilir.
- d) Yöntem kesişen kabloların karşılıklı ısılarını hesaplamak için kullanılabilir.
- e) Bu yöntem iletkenin direnci, dielektrik kayıpları ve toprağın ısıl öz direnci gibi malzeme özelliklerine bağlı sıcaklık etkisini araştırmak için uygundur.

Süperpozisyon yöntemi çoğu kablo problemi için uygun olmasına rağmen çok sayıda kablo içeren karmaşık geometriye sahip problemlerde kullanışlı değildir.

III.2 YÖNTEMİN GENEL YAPISI

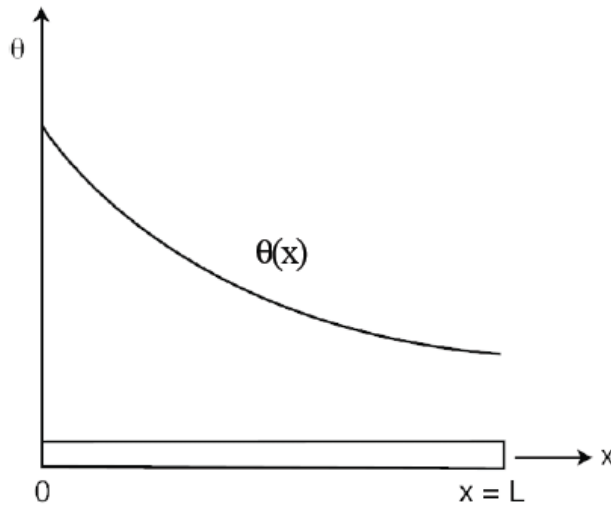
Sonlu elemanlar yönteminin temel fikri; sıcaklığın, sonlu sayıda alt bölgede tanımlanan sürekli fonksiyonların oluşturduğu ayırık bir modele

yaklaştırılabilmesidir. Parçalı sürekli fonksiyonlar sonlu sayıdaki noktanın sıcaklık değeri kullanılarak tanımlanır.

Ayrık çözüm şu şekilde oluşturulur;

- a) Çözüm bölgesinde sonlu sayıda nokta tanımlanır. Bu noktalar düğüm noktaları olarak adlandırılır.
- b) Her bir düğümdeki sıcaklık değeri belirlenmesi gereken bir değişken olarak gösterilir.
- c) Mevcut bölge elemanlar olarak adlandırılan sonlu sayıdaki alt bölgelere ayrılır. Bu elemanlar ortak düğüm noktalarında birbirlerine bağlanır ve birleşerek bölgenin şeklini oluştururlar.
- d) Her bir elemandaki sıcaklık, düğüm sıcaklıkları kullanılarak tanımlanan bir polinom ile gösterilir. Her bir eleman için farklı bir polinom tanımlanır ve elemanlara ait polinomlar eleman sınırlarında süreklilik sağlayacak şekilde seçilir. Düğüm değeri doğru sıcaklık dağılımını en iyi sağlayacak şekilde hesaplanır. Oluşan matrise ait çözüm vektörü polinomların katsayılarını içermektedir. Cebirsel denklemlerin çözüm vektörü ise düğüm sıcaklıklarını verir.

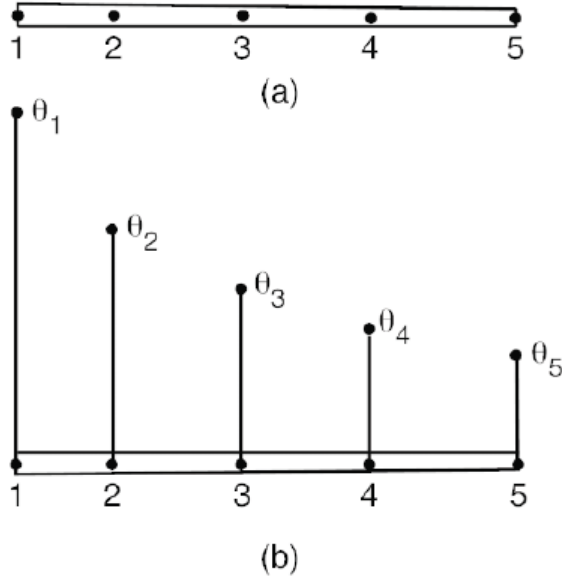
Bir kanat içerisinde bir boyutlu sıcaklık dağılımı Şekil III-1’de gösterilmiştir. Bu örnek için ayrık bir çözüm şu şekilde oluşturulabilir.



Şekil III.1 Bir kanat içerisindeki bir boyutlu sıcaklık dağılımı

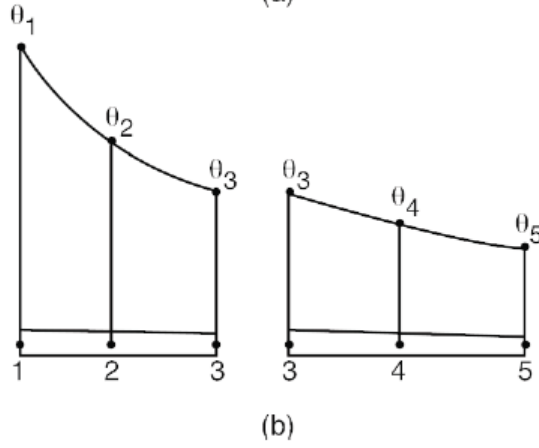
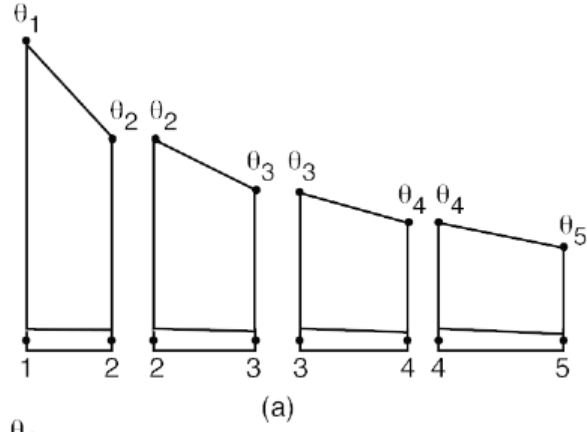
Sıcaklık dağılımı $\theta(x)$ sürekli bir fonksiyon olup x-ekseni boyunca $[0-L]$ aralığındaki bölge dikkate alınmıştır. Düğüm noktaları Şekil III-2 (a)’da

gösterilmiştir (aralıklar eşit değildir). Daha sonra her bir düğüm noktası için $\theta(x)$ değerleri belirtilir (Şekil III-2 (b)). Bu değerler düğüm numaralarına uygun isimlendirilmiştir ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_5$).

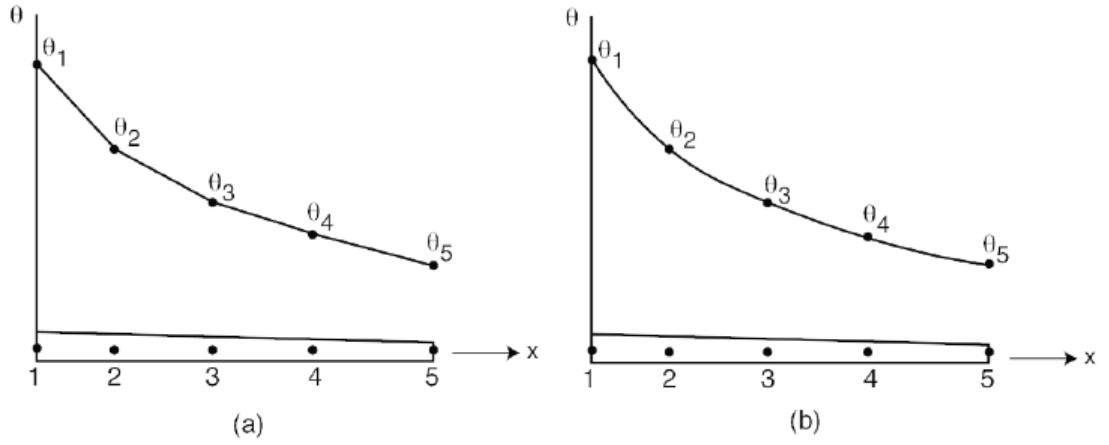


Şekil III.2 Düğüm noktaları ve varsayılan $\theta(x)$ değerleri

Bölgenin elemanlara bölünmesi iki farklı şekilde yapılabilir. Her bir eleman iki düğüm ile sınırlandırılıp dört eleman elde edilebilir (Şekil III-3 (a)) ya da bölge her biri üç düğümünden oluşan iki elemana bölünebilir (Şekil III-3(b)). Eleman polinomu düğüm noktalarındaki $\theta(x)$ değerleri kullanılarak tanımlanır. Eğer bölge dört elemana bölünürse her bir elemanda iki düğüm noktası olacaktır. Bu durumda eleman fonksiyonu x eksenine göre lineer olur. $\theta(x)$ her biri tek bir eleman üzerinde tanımlı lineer sürekli fonksiyonlardan oluşmaktadır (Şekil III-4 (a)). Bölge iki elemana bölünürse eleman fonksiyonu ikinci dereceden bir denklem olur. Bu durumda $\theta(x)$ ikinci derece sürekli fonksiyonlardan oluşur (Şekil III-4 (b)).



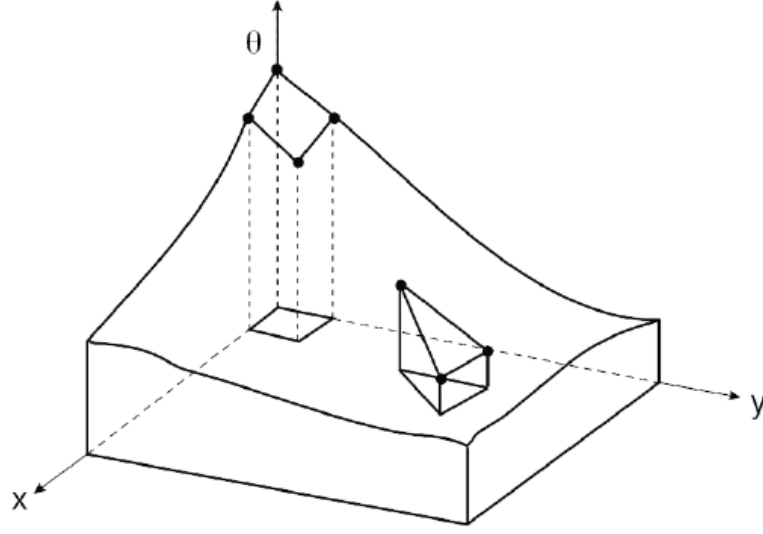
Şekil III.3 Bölgenin sonlu elemanlara bölünmesi



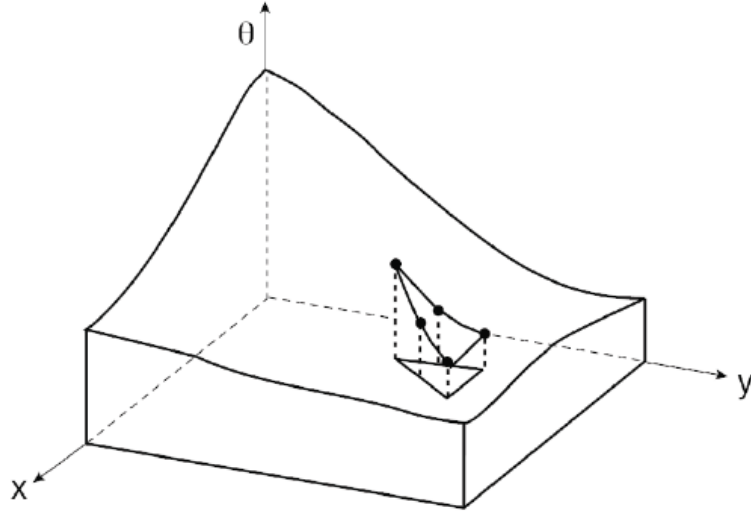
Şekil III.4 Bir boyutlu sıcaklık dağılımı için ayrık modeller

Kablo uygulamalarında yaygın olarak iki boyutlu elemanlar kullanılmaktadır. İki boyutlu bölge içerisindeki elemanlar x ve y nin fonksiyonlarıdır ve genellikle üç kenarlı ya da dörtkenarlı şekildedir. Elemana ait fonksiyon bir düzlem (Şekil III-5) ya da eğri bir yüzey (Şekil III-6) olabilir. Düzlem minimum sayıda eleman düğüm sayısı ile ilişkilidir. Eğer bu sayıdan daha fazlası kullanılırsa eleman fonksiyonu eğri

bir yüzey olacaktır. Fazla düğüm sayısı ayrıca elemanların eğri sınırlara sahip olmasını da sağlar.



Şekil III.5 Üç ya da dörtkenarlı elemanlar kullanılarak iki boyutlu sayısal bir fonksiyonun modellenmesi



Şekil III.6 İkinci dereceden üçgen elemanlar kullanılarak iki boyutlu sayısal bir fonksiyonun modellenmesi

III.3 KABLO HESAPLAMALARINDA SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİNİN KULLANIMI

Yeraltı güç kablolarının analizi için sonlu elemanlar yöntemi kullanıldığında hesaplamaların doğruluğu açısından aşağıdaki parametreler dikkatle ele alınmalıdır. Bu parametreler: (1) Ayırıklaştırılacak bölgenin boyutu, (2) Ağ (mesh) üreticinin oluşturacağı eleman boyutu, (3) Bölge sınırlarının tipi ve konumu, (4) Kablo kayıpları. Bu konular aşağıda incelenmiştir.

III.3.1 Ayırıklaştırılacak Bölgenin Seçimi

Sayısal çalışmalarda sınırlar dikkatle ele alınmalıdır. Toprak yüzeyi belirli bir sınırdır fakat bölgenin altı sonsuzdur. Sınırlar boyunca hesaplanan değerlerin fiziksel problemde var olan değerlerle uyuşması için yeterince büyük bir bölge seçilmelidir. Kablo problemlerinde alt ve yan sınırlar bu sınırlardaki düğüm sıcaklıklarının hepsi aynı değerde olacak şekilde seçilir. Bu durumda sınır üzerindeki sıcaklık değişimi sıfır olacaktır.

Sayısal modelleme deneyimleri kabloların merkezde konumlandığı 10m genişliğinde 5m derinliğinde bir dikdörtgen bölgenin pratik uygulamaların çoğu için tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermektedir.

III.3.2 Eleman Boyutları

Kullanıcı, ağ üretici programların çoğunda eleman boyutlarını kontrol eder. Bu durum ağın çeşitli parçalarında (kablo, dolgu malzemesi, toprak vb.) sınır düğümleri arasındaki aralıklar ayarlanarak gerçekleştirilir. Bu aralık istenilen eleman boyutunu elde etmek için değiştirilebilir (elemanlar kabloya yaklaştıkça daha küçük olmalıdır). Daha küçük eleman boyutu sonuçların daha doğru olması demektir. Bununla birlikte hesaplama zamanı modeldeki eleman sayısının kuvveti şeklinde artar.

III.3.3 Sınır Koşulları

Yer yüzeyinin eş sıcaklık sınırı olarak kabul edildiği klasik kablo hesaplamalarının aksine sonlu elemanlar yöntemi farklı sınır koşullarını ve rasgele seçilmiş sınır konumlarını mümkün kılar. Düz ya da eğri sınırların her ikisi de

kullanılabilir. Özellikle her bir kablo için dairesel sınırlar, su ya da buhar borusu yüzeyleri kolaylıkla ele alınabilir. Bazı uygulamalarda kablonun yalnızca dış ısı direnci önem kazanır. Bu durumda kablonun dairesel sınırları kullanılabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan kablo akımı hesaplamalarında üç farklı sınır koşulundan söz edilir. Eğer sınırın bir parçasında sıcaklık biliniyorsa o zaman eş sıcaklık koşulu vardır. Bu sıcaklık yüzey uzunluğunun bir fonksiyonu olabilir. Sonlu elemanlar programı için gereken bilgi sınırın sıcaklık değeridir. IEC 60287’de gösterilen koşullar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenecekse bu sıcaklık değerinin kablonun gömüldüğü derinlikteki çevreleyen sıcaklık değeri olduğu dikkate alınmalıdır.

Sınırdaki taşınım yoluyla ısı kazancı ya da ısı kaybı varsa taşınım sınırı mevcuttur. Böyle bir sınır koşulu yer yüzeyine yakın döşenen büyük çaplı kablolar için kullanılmalıdır. Bu durumda taşınım ısı transfer katsayısı ve çevreleyen hava sıcaklığı değerleri gerekir. Yer yüzeyindeki taşınım ısı transferi doğal ve zorlamalı olarak ikiye ayrılır. Normalde zorlamalı taşınım doğal taşınıma göre çok daha güçlüdür. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan kablo hesaplamalarında taşınım ısı transfer katsayısının belirlenmesi çok önemlidir. Bu katsayının değeri serbest taşınım için $2 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, zorlamalı taşınım için $25 - 250 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerleri arasında değişmektedir. Bu değerlerin altındaki değerler toprağın daha fazla ısınması anlamına gelir.

Üçüncü tip sınır sabit ısı akısı sınırıdır. Kablonun yakınında başka ısı kaynakları var olduğunda ve bunların ısı üretimi bilindiğinde böyle bir sınıra gereksinim duyulur.

III.3.4 Kablo Kayıpları

İletken, kılıf ve dielektrik kayıpları sonlu eleman çalışmalarında ısı kaynakları olarak değerlendirilir. Bu değerlerin zaman ve/veya sıcaklık ile değişimleri dikkate alınmalıdır. Bu kayıpların değerleri IEC 60287’de verilen yöntemler kullanılarak her bir zaman adımı için hesaplanır.

İletken, kılıf ve zırh kayıpları sıcaklık bağımlıdır. Bu nedenle işlemlerin tekrarlanması gerekir. Genellikle üç dört iterasyon, gereken doğruluğu elde etmek için yeterlidir.

III.4 DENKLEMLERİN TÜRETİLMESİ

III.4.1 Isı Transfer Denklemleri

Isıl direnç sabit kabul edilirse katı bir malzeme için iki boyutlu ısı iletim denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + W_{iç} \rho = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (III.1)$$

Bu denklemde,

- θ : bilinmeyen sıcaklık [K]
- $\alpha = k / \rho c$: ortamın ısıl yayılma gücü [m^2/s]
- c : malzemenin ısı kapasitesi [$kJ/kg \cdot K$]
- ρ : malzemenin ısıl öz direnci [$K \cdot m/W$]
- $W_{iç}$: kabloda üretilen ısı miktarı [W/m^3]

büyükliklerini göstermektedir. (III.1) denklemi için sınır koşulları iki farklı şekilde ifade edilebilir. Eğer sınırın bir parçası boyunca sıcaklık değeri biliniyorsa,

$$\theta = \theta_B(s) \quad (III.2)$$

şeklindedir. Burada θ_B sınır sıcaklığıdır ve yüzey uzunluğunun (s) bir fonksiyonu olabilir. Eğer sınırda taşınım $h(\theta - \theta_{ortam})$ ya da q ısı akısı yoluyla ısı kaybı ya da ısı kazancı varsa,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial n} + q + h(\theta - \theta_{ortam}) = 0 \quad (III.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada n sınır yüzeyine dik yönü, h taşınım ile ısı transfer katsayısını ve θ bilinmeyen sınır sıcaklığını göstermektedir.

Kablo hesaplamalarında iletken sıcaklığı genellikle verilir ve iletkenin geçecek maksimum akım araştırılır. Kablo içerisindeki tek enerji kaynağı iletken ısı kaybı olduğunda $W_{iç} = I^2 \cdot R$ olarak ifade edilir ve (III.1) denklemi belirli sınır koşullarında akımın bulunması için kullanılır.

Kabloyu çevreleyen toprak içerisindeki sıcaklık dağılımını hesaplamak zordur. Bu durum (III.1) denkleminin analitik çözümünü güçleştirmektedir. IEC 60287’de kullanılan analitik yöntemlerde bir kablo grubu süperpozisyon uygulamasına dayalı olarak ele alınır. Bu prensibi uygulamak için diğer kabloların varlığının ilk kablonun ısı akısı yolunu ve ısı üretimini bozmadığı kabul edilir. Böylece her bir kablo için ayrı ayrı hesaplamalar gerçekleştirilir ve toplam sıcaklık artışı kablonun kendisinin ve diğer kabloların sebep olduğu sıcaklık artışlarının cebirsel toplamı olarak bulunur. Böyle bir yöntem teorik olarak doğru değildir. Daha iyi bir sonuç için bütün kabloların eşzamanlı işletimlerinden doğan sıcaklık artışı dikkate alınmalıdır. Bu durumda sayısal yöntemler kullanılarak ısı iletim denkleminin doğrudan çözümü yapılabilir.

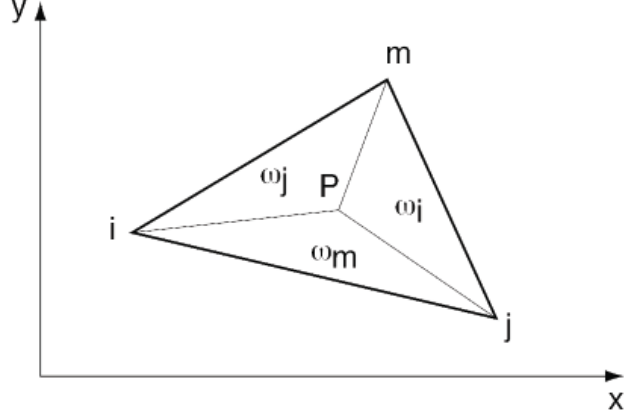
Sayısal yöntemler sadece kabloların karşılıklı ısı etkilerinin bulunmasında değil aynı zamanda yer yüzeyindeki taşınım sınırı, kablo yakınındaki ısı ya da su boruları için sabit dairesel ısı akısı sınırları gibi bölgesel sınırların daha doğru modellenmesine olanak tanır.

Aşağıda (III.1 – III.3) denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü gerçekleştirilmiştir.

III.4.2 Polinom Yaklaşımı

Sonlu elemanlar yönteminin kablo hesaplamalarında nasıl kullanıldığını açıklamak için iki boyutlu elemanlar içinde en basit ve yaygın olarak kullanılan üçgen elemanı dikkate alınmıştır.

Şekil III-7 de gösterilen basit bir üçgen elemanı göz önüne alalım;



Şekil III.7 Alan koordinatları

Bu üçgenin içerisinde herhangi bir noktadaki θ sıcaklığı şu şekilde ifade edilebilir;

$$\theta = A\omega_i + B\omega_j + C\omega_m \quad (\text{III.4})$$

Burada ω_i , ω_j ve ω_m Şekil III.7’de gösterilen alan koordinatlarıdır. Bu alan koordinatları ijm üçgeni içinde herhangi bir P noktasının konumunu tanımlar. A sabitini belirlemek için i düğümündeki sıcaklık şöyle yazılabilir;

$$\theta_i = 1 \times A + 0 \times B + 0 \times C$$

Bu denklem $A = \theta_i$ sonucunu verir. Benzer şekilde j ve m düğümleri için $B = \theta_j$ ve $C = \theta_m$ sonuçları elde edilir. Bu değerler (III.4) denkleminde yerine konulursa;

$$\theta = \omega_i\theta_i + \omega_j\theta_j + \omega_m\theta_m = [\omega_i \ \omega_j \ \omega_m] \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \\ \theta_m \end{bmatrix} = N^e \cdot \Theta^e \quad (\text{III.5})$$

ve her bir eleman için sıcaklığın zamana bağlı türevi alınıp yazılırsa,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + \omega_j \frac{\partial \theta_j}{\partial t} + \omega_m \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = [\omega_i \ \omega_j \ \omega_m] \times \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_j}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_m}{\partial t} \end{bmatrix} = N^e \times \frac{\partial \Theta^e}{\partial t} \quad (III.6)$$

elde edilir. Burada N^e koordinat sisteminin bir fonksiyonu olup zamana bağlı değildir.

Alan koordinatları ile kartezyen koordinatlar arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & x_j & x_m \\ y_i & y_j & y_m \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_j \\ \omega_m \end{bmatrix}$$

Bu eşitlikte matrisin tersi alınarak N^e vektörünün katsayıları bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_j \\ \omega_m \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (y_j - y_m) & (x_m - x_j) & (x_j y_m - x_m y_j) \\ (y_m - y_i) & (x_i - x_m) & (x_m y_i - x_i y_m) \\ (y_i - y_j) & (x_j - x_i) & (x_i y_j - x_j y_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

Burada A üçgenin alanıdır.

Sıcaklığın x ve y koordinatlarına göre lineer bir fonksiyon olduğu (III.5) ve (III.7) denklemlerinden görülmektedir.

III.4.3 Sonlu Eleman Denklemleri

Elemanın düğüm noktalarındaki sıcaklık değerleri biliniyorsa eleman içerisindeki herhangi bir noktada sıcaklığın nasıl hesaplanacağı bir önceki bölümde gösterilmiştir. Düğüm sıcaklıklarını elde etmek için fonksiyonelin minimumunu bulmaya dayanan ve değişimsel hesap olarak bilinen bir özellik kullanılmaktadır;

$$\chi = \int_s \frac{1}{2\rho} \left[(\nabla \theta)^t \nabla \theta + \left(w_{i\zeta} - c \frac{d\theta}{dt} \right) \theta \right] dS + \int_c \left[q\theta + \frac{1}{2} h(\theta - \theta_{ortam})^2 \right] dC \quad (III.8)$$

$$\nabla \theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Bu denklemde χ değerini minimum yapan herhangi bir sıcaklık dağılımı ile diferansiyel denklemin çözümü gerçekleşmiş olur.

(III.8) denklemi her bir düğümdeki sıcaklıkların belirlenmesi için başlangıç noktasıdır. Bu denklem her biri tek bir eleman için tanımlı ve düğüm değerlerine göre yazılmış eleman fonksiyonları kullanılıp minimumlaştırılır. θ_n düğüm değerleri bilinmeyen değerlerdir. Bu değerler χ 'nın her bir θ_n 'e göre türevi alınıp, sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir.

θ fonksiyonları her bir eleman için tanımlanır. (III.8) de yer alan integraller elemanlar için tek tek ayrılır ve her bir eleman için türev hesaplanır. Bu durum

$$\chi = \sum_{e=1}^E \chi^e \quad (III.9)$$

şeklinde ifade edilir. Burada χ^e , e elemanı için tanımlanan fonksiyonel ve E ise toplam eleman sayısıdır.

Her bir eleman düğüm noktaları ile ilgili sadece 3 kısmi türeve sahiptir. Bunlar;

$$\left(\frac{\partial \chi}{\partial \theta_n} \right)^e = \begin{bmatrix} \frac{\partial \chi^e}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial \chi^e}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial \chi^e}{\partial \theta_m} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

şeklinde listelenebilir. Bu türevlerin değerlendirilebilmesi için (III.8) denklemindeki integrallerin Θ^e düğüm değerleri cinsinden yazılmış olması gerekir. Bu durum θ 'nın x ve y 'ye göre türevi alınarak gerçekleştirilir. ω_i ve ω_j alan koordinatları bağımsız kabul edilerek

$$\nabla \theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \omega_i} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \omega_j} \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (y_j - y_m) & (y_m - y_i) \\ (x_m - x_j) & (x_i - x_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \omega_i} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \omega_j} \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j \\ a_i & a_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \omega_i} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \omega_j} \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

yazılır. Bu denklemde yer alan J jakobiyanı (III.7) denkleminin diferansiyeli alınarak elde edilir. (III.5) denklemi ve $\omega_i + \omega_j + \omega_m = 1$ durumu göz önüne alınarak aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \omega_i} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \omega_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \\ \theta_m \end{bmatrix} = V \Theta^e \quad (III.12)$$

Böylece tek bir eleman için,

$$\nabla \theta = J \times V \times \Theta^e \quad (III.13)$$

elde edilmiş olur. Tek bir eleman için uygun S ve C değerleri kullanılarak (III.13) denklemi (III.8) denklemi içine yerleştirilir ve Θ^e 'ye göre türevi alınırsa (III.10) denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$\left(\frac{\partial \chi}{\partial \theta_n} \right)^e = h^e \Theta^e + q^e \frac{\partial \Theta^e}{\partial t} - k^e \quad (III.14)$$

ij , jm ve mi düğümleri arasındaki mesafeler d_{ij} , d_{jm} ve d_{mi} olarak gösterildiğinde elemana ait iletkenlik matrisi;

$$h^e = \frac{1}{4A\rho} \left\{ \begin{bmatrix} a_i^2 & a_i a_j & a_i a_m \\ a_i a_j & a_j^2 & a_j a_m \\ a_i a_m & a_j a_m & a_m^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_m \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_m \\ b_i b_m & b_j b_m & b_m^2 \end{bmatrix} \right\} +$$

$$\frac{hd_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{hd_{jm}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{hd_{mi}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

$$a_i = x_m - x_j, \quad a_j = x_i - x_m, \quad a_m = x_j - x_i$$

$$b_i = y_j - y_m, \quad b_j = y_m - y_i, \quad b_m = y_i - y_j$$

olarak elde edilir. Eğer elemanın herhangi bir parçasında taşınım sınırı yoksa (III.15) denklemindeki ilgili terimler ihmal edilir.

Eleman kapasite matrisi (III.16)'da eleman ısı üretim vektörü ise (III.17)'de gösterilmiştir.

$$q^e = \frac{cA}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

$$k_e = \frac{W_{i\zeta} A}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{(h\theta_{ortam} + q)d_{ij}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{(h\theta_{ortam} + q)d_{jm}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{(h\theta_{ortam} + q)d_{mi}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

(III.17) denklemindeki son üç terim elemanın kenarlarında uygun sınırlar mevcutsa uygulanır. $W_{i\zeta} A$ terimi eleman içerisinde üretilen toplam ısıyı göstermektedir [W/m].

Her bir eleman için (III.14 - III.17) denklemleri ile verilen hesaplamalar gerçekleştirildiğinde bütün bölge için (III.18)'de gösterilen lineer bir denklem kümesi elde edilir.

$$\frac{\partial \chi}{\partial \Theta} = \sum_{e=1}^E \left(\frac{\partial \chi}{\partial \theta_n} \right)^e = H\Theta + Q \frac{\partial \Theta}{\partial t} - K = 0 \quad (\text{III.18})$$

Bu denklemde, H ısı iletkenlik matrisi, Q ısı kapasite matrisi, Θ ve $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ düğüm sıcaklıkları ve onlara ait türevlerin vektörleri, K ise bölgedeki ısı kaynaklarının dağılımını ifade eden bir vektördür.

Kararlı analiz durumunda (III.18) denklemi basitleştirilerek,

$$H\Theta - K = 0 \quad (\text{III.19})$$

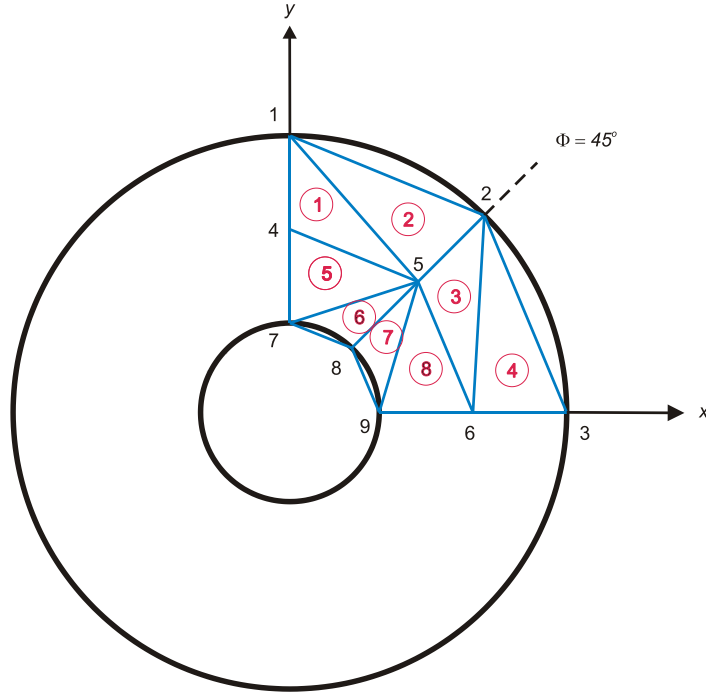
şeklinde yazılabilir.

(III.18) denkleminde yer alan diferansiyel denklem kümesi ayrıklaştırılmış problemi tanımlamakta olup yinelemeli yöntemlerden birisi kullanılarak çözülebilir. Bu denklemi çözerek zamana bağlı olarak her bir noktadaki Θ değerlerini bulmak için iki popüler yöntem vardır. Bunlardan biri bir sonlu fark yöntemi ile zamana bağlı türev yaklaşımı diğeri ise zamana bağlı tanımlanan sonlu elemanlar yöntemi kullanmaktır.

III.5 YAZILIM

Güç kablolarındaki sıcaklık dağılımının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunması için bir program yazılmıştır. Bu program kullanılarak tek damarlı güç kablolarının, sürekli çalışma durumundaki sıcaklık değerleri yaklaşık olarak bulunabilir. Kablo bir iletken ve bir yalıtkan malzemeden oluşmaktadır. Kılıf kalınlığı, genellikle, bu bileşenlere göre oldukça küçük olduğu için geometrik modele dahil edilmemiştir. Hesaplamalarda kablonun dörtte birlik kısmı kullanılmaktadır. Bu bölüm kullanıcı tarafından girilen kablo ölçülerine uygun olarak Şekil III.8’de gösterildiği gibi sekiz üçgen elemandan oluşan bir ağ yapısına bölünmektedir.

Kablo geometrisi ve ağ yapısı oluşturulduktan sonra problemin çözümü için sınır koşulları ve bölge özellikleri tanımlanmalıdır. Kullanıcı tarafından girilen iletken kayıpları, iletken malzemelerin yüksel ısı iletkenlik değerlerinden dolayı, iletken yüzeyinde ısı akısı olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle sadece yalıtkan içerisinde yer alan bir ağ yapısı problemin çözümü için yeterlidir.

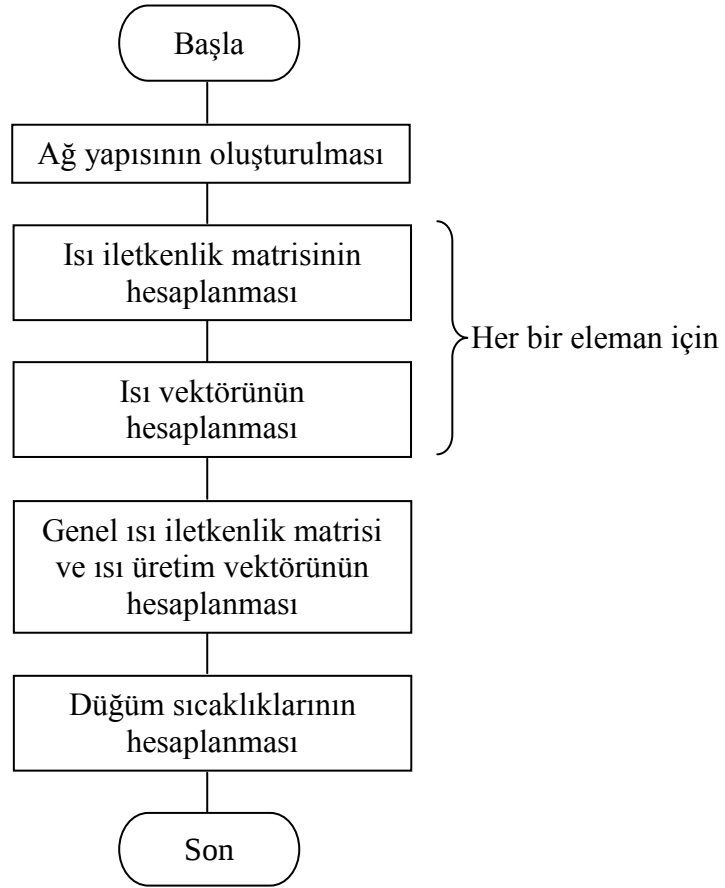


Şekil III.8 Bir kablo için tanımlanan bir sonlu elemanlar ağı [34]

Kullanıcı tarafından girilen taşınım ile ısı transfer katsayısı değeri ile yalıtkan malzemeye ait ısıl öz direnç değeri sırasıyla yalıtkan malzeme yüzeyinde sınır koşulu ve yalıtkan malzemenin bölge özelliği olarak kullanılmaktadır.

İletken malzemede oluşan kayıplar dikkate alınarak, yalıtkan malzeme içerisindeki sıcaklık değerlerini belirlemeye yönelik programın akış diyagramı Şekil III.9’da verilmiştir.

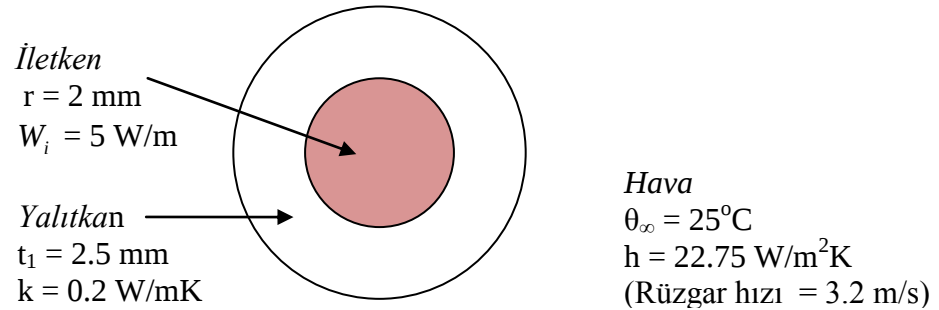
Şekil III.9’da görüldüğü gibi program dört aşamadan oluşmaktadır. Kablo ölçüleri, kablo iletkeninde oluşan omik kayıplar, yalıtkan malzemenin ısıl öz direnci ve kablonun dış yüzeyinden çevreleyen ortama taşınım ile ısı transfer katsayısı değerlerinin girilmesine bağlı olarak çözüm bölgesi sekiz üçgen elemana bölünür. Daha sonra her bir üçgen eleman için düğüm koordinatları belirlenerek sınır değerleri ve malzeme özellikleri atanır. İkinci aşamada her bir üçgen eleman için ısı iletkenlik matrisi ve ısı üretim vektörü hesaplanır. Üçüncü aşamada her bir elemana ait ısı iletkenlik matrisi ve ısı üretim vektörü birleştirilerek genel ısı iletkenlik matrisi ve genel ısı üretim vektörü hesaplanır. Dördüncü ve son aşamada ise düğüm sıcaklıkları belirlenir. Elde edilen düğüm sıcaklıkları yalıtkan malzeme içindeki sıcaklık dağılımını vermektedir. Yazılan programa ait Matlab kodu Ek-A’da verilmiştir. Ayrıca çözüm kolaylığı açısından bir görsel arayüz tasarlanmıştır. Bu arayüze ait iki ekran görüntüsü de Ek-A’da yer almaktadır.



Şekil III.9 Programın akış diyagramı

III.5.1 Örnek Uygulama

Yazılan programın kontrolü çeşitli kablo örnekleri üzerinde yapılmıştır. Şekil III.10'da özellikleri belirtilen kablo örneği de bunlardan bir tanesidir.



Şekil III.10 Kablo örneği

Verilen kablo parametreleri kullanılarak yapılan analiz sonucunda, elde edilen genel iletkenlik matrisi (H), genel ısı vektörü (K) ve düğüm sıcaklıkları (T) değerleri aşağıda verilmiştir.

H =									
0.2808	0.0152	0	-0.2568	0.0000	0	0	0	0	0
0.0152	0.5616	0.0152	0	-0.5136	-0.0000	0	0	0	0
0	0.0152	0.2808	0	0	-0.2568	0	0	0	0
-0.2568	0	0	0.5396	-0.1088	0	-0.1740	0	0	0
0.0000	-0.5136	0	-0.1088	1.0791	-0.1088	-0.0000	-0.3479	-0.0000	0
0	-0.0000	-0.2568	0	-0.1088	0.5396	0	0	-0.1740	0
0	0	0	-0.1740	-0.0000	0	0.3038	-0.1298	0	0
0	0	0	0	-0.3479	0	-0.1298	0.6076	-0.1298	0
0	0	0	0	-0.0000	-0.1740	0	-0.1298	0.3038	0

K =	T =	
11.6807	305.9231	← 1.düğüm noktası
23.3614	305.9231	
11.6807	305.9231	
0	307.1089	← 4.düğüm noktası
0	307.1089	
0	307.1089	
0.3045	308.8594	← 7.düğüm noktası
0.6091	308.8594	
0.3045	308.8594	

Şekil III.8 dikkate alındığında 1, 4 ve 7. düğüm noktaları üç farklı nokta için yalıtkan sıcaklıklarını göstermektedir. 7. düğüm noktası iletken ile yalıtkan malzemenin kesişim noktası olup kararlı hal durumunda bu noktanın sıcaklığı, düğüm sıcaklıkları vektöründen (T) görüldüğü gibi 308.8594°K değerine ulaşmaktadır.

Aynı problemin Comsol Multiphysics programı ile çözümünde iletken malzeme içerisindeki ısı kaynağı şiddeti $5/(\pi \cdot 0.002^2)$ W/m³ olarak tanımlanmış, ve yalıtkan malzemenin dış sınırı taşınım sınırı kabul edilmiştir. İletken ve yalıtkan malzemenin ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 400 ve 0.2 W/K·m, ortam sıcaklığı ise 298.15 °K (25°C) olarak alınmıştır. Kaba bir ağ yapısı kullanılarak yapılan çözümde iletken sıcaklığı 309.151°K bulunmuştur. Bulunan bu değer yazılan program kullanılarak elde edilen değere oldukça yakındır. Bu durum yazılan program kodunun, hava ortamına döşenmiş tek damarlı güç kabloları için kullanılabileceğini göstermektedir.

BÖLÜM IV

GÜÇ KABLOLARININ MODELLENMESİ

Modelleme, bir taraftan, problem içerisinde ilgili faktörlerin azaltılması anlamını taşımaktadır. Fiziksel olayların matematiksel olarak tanımlanması ve çözümü sadece bu şekilde mümkün olabilir. Fiziksel bir olayın hesaplanabilir olması için problemin karmaşıklığı azaltılır. Belirli bir zaman içerisinde, problemi oluşturan parametreler sabit kabul edilerek, çözüm sağlanır. Bir fizik dalını kullanarak yapılan modellemede, faktörlerin azaltılması yaklaşımı Newton tarafından etkili bir şekilde kullanılmış ve büyük başarılar sağlamıştır. Diğer taraftan, birden fazla fizik dalını ilgilendiren problemlerde, doğru çözüme ulaşabilmek için aradaki etkileşimin bilinmesi gerekmektedir. Elektrik motorları, televizyon, radyo ya da cep telefonlarının fonksiyonları, manyetik ve elektrik alan etkileşimi sayesinde bugün daha iyi anlaşılmaktadır. Maxwell tarafından ortaya atılan bu etkileşim dikkate alınmamış olsaydı bu teknolojilere ulaşmak mümkün olmayacaktı. Gelecekte, basit problemleri, hızlı ve yeterince doğru çözebilmek için tekli fizik çözümlemeleri ve karmaşık ilişkileri anlamak ve çözmek için ise çoklu fizik uygulamaları birlikte kullanılmaya devam edecektir [35].

Bu bölümde, bir güç kablosu içinde ve çevresinde sıcaklık dağılımı hesaplayabilmek için gereken teorik temeller verilmiştir. Amaç, kabloya uygulanan gerilimi, kablodan geçen akımı ve elektriksel parametreleri de göz önüne alarak, sıcaklık dağılımı elde edebilmektir. Bunun için gerekli elektrik-ısıl modelin yani elektriksel ve ısıl etkenlerin bir arada ortak çözümünün teorik bilgileri verilmiş ve elde edilecek sıcaklık dağılımından kablonun akım taşıma kapasitesi belirlenmiştir.

IV.1 ELEKTRİK - ISIL MODEL

Güç kabloları, bir çok çeşit ve tipte üretilmekte olup, gerilim seviyesi, iletken ve yalıtkan malzemelerin tipi ve damar sayısı gibi çeşitli özellikleri ile isimlendirilmektedir. Alçak ve orta gerilimde kullanılan güç kablolarının temel parçaları; iletken, yalıtkan, siper ve koruyucu tabakalardır (zırh). İletken malzeme genellikle bakırdır. Geçen akıma bağlı olarak iletken malzemede omik kayıplar oluşur. Yalıtkan malzemeler uygulanan gerilime bağlı olarak bir elektrik alana maruz kalır. Bu nedenle bu bölümde dielektrik kayıpları oluşacaktır. Topraklanan siperde eddy akımları gelişebilir. Koruyucu tabakalar eğer manyetik malzemelerden yapılmış ise bu bölümde de histerezis ve eddy akım kayıpları oluşur.

Kablodaki ısınmanın başlıca kaynağı, iletkeninden geçen I akımın, iletkenin R direncinde yarattığı $R \cdot I^2$ elektriksel güç kaybıdır. Bu güç kaybı, akımın aktığı t süresinde $R \cdot I^2 \cdot t$ enerjisi karşılığı olarak kendini ısı enerjisi olarak belli eder. Bu ısı iletkenin çevreye yayılır. Bu durumda ısı iletimini tanımlayan diferansiyel denklem;

$$\nabla \cdot (k \nabla \theta) + W = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (IV.1)$$

şeklinde olur [30]. Bu denklemde;

θ : Bağımsız değişken olarak sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)

k : Isı kaynağının çevresindeki ortamın ısı iletkenliğini (W/Km)

ρ : Ortamın madde olarak yoğunluğunu (kg/m^3)

c : Isıyı ileten ortamın ısı kapasitesini ($\text{J/kg}^{\circ}\text{K}$)

W : Hacimsel ısı kaynağı şiddetini (W/m^3)

göstermektedir. Elektrik akımının sebep olduğu W ısı kaynağı şiddeti, elektriksel güçle benzer şekilde ifade edilebilir.

$$P = J \cdot E \, dx \, dy \, dz \quad (IV.2)$$

Bu denklemde J akım yoğunluğunu (A/m^2), E elektrik alan şiddetini (V/m), $dx \cdot dy \cdot dz$ de birim malzeme hacmini göstermektedir. Akım yoğunluğu $J = \sigma \cdot E$ yani elektrik alan şiddeti $E = J/\sigma$ olduğundan kablodaki omik kayıplar;

$$P = \frac{1}{\sigma} J^2 dx dy dz \quad (IV.3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde σ kablo iletkeninin elektriksel iletkenlik değeridir ve sıcaklığa bağlı bir büyüklüktür. Bu çalışmada, bu özellik, elektrik ile ısı iletimi arasında bir bağ kurarak ısı analizler yapmak için kullanılmıştır. Kablo iletkenine ait elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklığa bağlı değişimi (IV.4) denkleminde gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0 \cdot (1 + \alpha(\theta - \theta_0))} \quad (IV.4)$$

Bu denklemde ρ_0 , θ_0 referans sıcaklığındaki öz direnç değerini ($\Omega \cdot m$), α ise öz direncin sıcaklık ile değişimini tanımlayan öz dirence ait sıcaklık katsayısını ifade eder.

Kablodaki ısınmanın diğer bir kaynağı, kablonun yalıtkan malzemesinde oluşan kayıplardır. Bu kayıplar iki gruba ayrılır: dielektrik kayıplar ve yük akımının sebep olduğu kayıplar. Kablonun, yalıtkan özelliklerine ve gerilimine bağlı olarak ortaya çıkan dielektrik kayıpları, yalıtkanın bağıl dielektrik sabitine, kayıp faktörü $\tan\delta$ 'ya ve gerilime bağlı olarak değişmektedir. Örneğin 5,8/10 kV'luk, XLPE yalıtkanlı, tek damarlı bir yeraltı güç kablosu için XLPE yalıtkanın bağıl dielektrik sabitinin ($\epsilon_{rXLPE} = 2,3$), kayıp faktörünün ($\tan\delta < 10^{-6}$) olması nedeniyle bu kayıplar, akıma bağlı kayıplar yanında çok küçük kalmakta ve ihmal edilebilmektedir. Özellikle yüksek gerilimde bu kayıplar önemli düzeydedir. Bununla birlikte yalıtkan malzemenin artan nem miktarına bağlı olarak iletkenlik değeri artmaktadır [19]. Artan iletkenlik değeri yalıtım kayıplarını artırmakta ve bu durum da yalıtkanın sıcaklığını yükseltmektedir. Yalıtkan malzemenin iletkenlik değeri aynı zamanda sıcaklık bağımlıdır ve artan sıcaklık ile değeri artmaktadır [36]. Yalıtkan sıcaklığının artması ile iletkenlik değeri artacak ve bu durum, kayıpların artması ve yalıtkanın daha fazla ısınması şeklinde devam edecektir. Sonuçta yalıtkan malzeme içerisindeki kayıplar çok fazla artar ve yalıtıkanda oluşan yüksek sıcaklık kablonun bozulmasına yol açabilir.

Yalıtkan malzeme içerisinde akan akımın sebep olduğu kayıplar (IV.2) denklemi ve $J = \sigma \cdot E$ bağıntısı kullanılarak, $\sigma \cdot E^2$ şeklinde yazılabilir. Dielektrik kayıpları ile ilgili bir ifade (IV.5)'de verilmiştir [36].

$$P_{diel} = (\sigma_{DA} + \omega \varepsilon_r''(\omega) \varepsilon_0) E^2 \quad (IV.5)$$

Bu bağıntıda

σ_{DA} : Yalıtkan malzemenin DA iletkenliği [S/m]

ω : Açısal frekans [rad/s]

ε_0 : Boşluğun dielektrik sabiti [$8.8542 \cdot 10^{-12}$ F/m]

ε_r'' : Polarizasyon kayıplarını temsil eden bağıl dielektrik sabiti

olarak ifade edilir. Yalıtkan malzemede bir frekans değeri için DA iletim kayıpları ile polarizasyon kayıplarını ayırt etmek mümkün değildir. Bu nedenle literatürde sıklıkla karşılaşılan AA iletkenliği tanımlanmıştır.

$$\sigma_{AA} = \sigma_{DA} + \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \quad (IV.6)$$

Bu denklemde her iki taraf $\omega \varepsilon_0$ 'a bölünürse;

$$\frac{\sigma_{AA}}{\omega \varepsilon_0} = \varepsilon_r'' + \frac{\sigma_{DA}}{\omega \varepsilon_0} \quad (IV.7)$$

elde edilir. (IV.7) denkleminin ilk terimi $\sigma_{AA}/\omega \varepsilon_0$, görünür dielektrik kayıp faktörüdür ve $\varepsilon_{r,App}''$ ile gösterilebilir. Bu durumda yalıtkan malzemenin AA iletkenlik değeri görünür bağıl dielektrik sabitine bağlı bir büyüklük haline gelir ve yalıtıkandaki kayıplar,

$$\sigma_{AA} E^2 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{r,App}'' E^2 \quad (IV.8)$$

şeklinde yazılır [36].

Yalıtkan malzemenin sıcaklığa bağımlı iletkenlik değeri (IV.9)'da görüldüğü gibi Arrhenius bağıntısı ile verilmektedir.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-E_a}{k_B} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_0} \right)} \quad (IV.9)$$

Bu denklemde

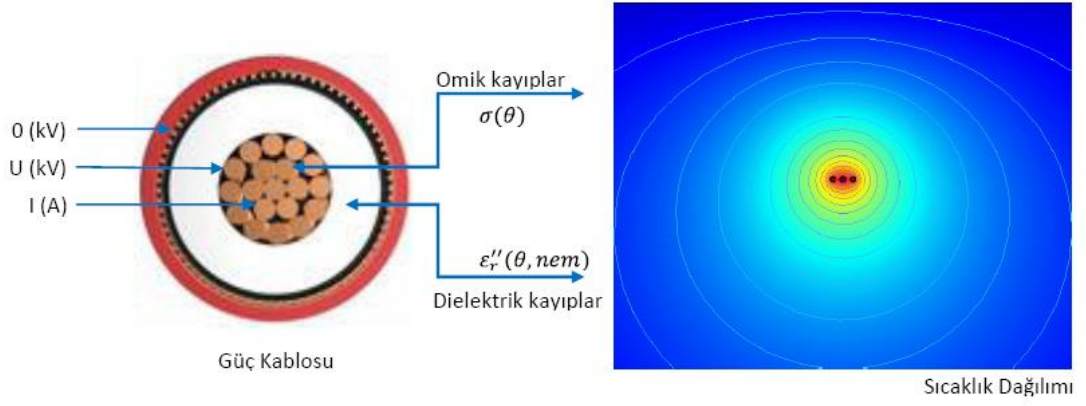
σ_0 : θ_0 sıcaklığındaki iletkenlik değeri [S/m]

E_a : Uyarma (aktivasyon) enerjisi [eV]

k_B : Boltzmann sabiti [eV/K]

olarak ifade edilir. (IV.8) ve (IV.9) denklemlerinden, görünür bağıl dielektrik sabitinin de sıcaklık bağımlı bir büyüklük olduğu ve bu bağıntının Arrhenius denklemi ile verilebileceği görülmektedir. Bununla birlikte dielektrik sabitinin nem bağımlılığı yapılan deneysel çalışmalarda gözlenmiş ve artan nem miktarına bağlı olarak dielektrik sabitinin hızlı bir şekilde arttığı bulunmuştur [19].

Güç kablolarının iletken ve yalıtkan malzemelerinde oluşan kayıp mekanizmaları yukarıda açıklanmıştır. Kablo iletkeninde oluşan kayıplar, akım yoğunluğu ve malzemenin elektriksel iletkenliğine bağlıdır. Yalıtkan malzemede oluşan kayıplar ise kablo malzemesinin ideal olmadığı kabul edilerek bağıl görünür dielektrik sabitine ve elektrik alana bağlı olarak değişmektedir. Şekil IV.1'den görüldüğü gibi elektrik-ısı model kablo bileşenlerindeki bu değişkenlerin sıcaklık bağımlılığını da içermektedir. Her bir kablo iletkeninde oluşan omik kayıplar iletken sıcaklığını artırır. Artan sıcaklık ile malzemenin elektriksel iletkenlik değeri azalır. Bu durum da kablonun omik kayıplarının artmasına ve iletkenin daha fazla ısınmasına yol açar. Benzer şekilde her bir kablo yalıtkanında oluşan kayıplar, omik kayıplara eklenerek kablo sıcaklığını artıracaktır. Yalıtkan malzemenin AA iletkenlik değeri, bağıl görünür dielektrik sabitine, bu değerde nem ve sıcaklığa bağlı bir büyüklüktür. İdeal olmayan dielektrik malzemelerde kablonun artan sıcaklığına bağlı olarak bağıl görünür dielektrik sabiti artmakta ve buna bağlı olarak artan dielektrik kayıplar kablonun daha fazla ısınmasına yol açmaktadır. Özellikle yüksek nem seviyelerinde, artan kablo sıcaklığına bağlı olarak bağıl görünür dielektrik sabitinin daha hızlı arttığı yapılan deneysel çalışmalardan görülmektedir [20]. Bu durum da kablonun ısı kontrolünden çıkmasında önemli bir sebeptir.



Şekil IV.1 Elektrik-ısıl model

Bir sonraki bölümde elektrik-ısıl modelin kullanımına örnekler verilmiştir. Bu bölümde yer alan 10 kV XLPE yalıtkanlı orta gerilim güç kablosu ile 0.6/1 kV dört damarlı PVC yalıtkanlı alçak gerilim güç kablosu sadece omik kayıplar dikkate alınarak, 10 kV kağıt yalıtkanlı orta gerilim güç kablosu ise hem omik hem de dielektrik kayıplar kullanılarak modellenmiştir.

IV.2 GÜÇ KABLolarında ÖMÜR KESTİRİMİ

Güç kabloları, uygulanan gerilim ve geçen akıma bağlı olarak eş zamanlı elektrik, ısı ve mekanik zorlanmalara maruz kalırlar. Bunlara ek olarak dielektrik malzemenin yapısında kimyasal değişimlerde meydana gelmektedir. Dielektrik malzemenin ömrünü belirlemek için güç kablolarında gerilim, frekans ve sıcaklığa bağlı hızlandırılmış yaşlanma testleri uygulanmaktadır. Kısmi boşalmalar ve ağaçlanma kablo ömrünü önemli oranda azaltmaktadır. Kısmi boşalmaların dielektrik malzemede oluşturduğu bozulma özellikle gerilim ve frekansa bağlıdır. Artan sıcaklık ise yalıtkan malzemenin daha hızlı bozulmasına ve kablo kullanım ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Kablolar yüksek sıcaklıklarda işletildikleri için ısı zorlanmalarının yaşlanma üzerindeki etkilerinin dikkate alınması oldukça önemlidir [31].

Elektrikte yalıtkan olarak kullanılan organik ve inorganik malzemelerin ısı bozulması, sıcaklık değerinin nominal değer üzerinde artmasından kaynaklanmaktadır. Kullanım ömrü Arrhenius denklemi kullanılarak elde edilebilir [21].

$$\frac{dp}{dt} = A \cdot e^{\frac{-E_a}{k_B \theta}} \quad (\text{IV.10})$$

Bu denklemde;

dp/dt : Ömrün zamanla değişimi

A : Malzeme sabiti

k_B : Boltzmann sabiti [eV/K]

θ : Mutlak sıcaklık değeri [°K]

E_a : Uyarma (aktivasyon) enerjisi [eV]

olarak ifade edilir. Sıcaklığa bağlı olarak kablo ömrünü yaklaşık olarak kestirmek için (IV.11) denklemi kullanılabilir [21].

$$p = p_i \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{k_B}\right) \frac{\Delta\theta}{\theta_i(\theta_i + \Delta\theta)}} \quad (\text{IV.11})$$

Bu denklemde; p , $\Delta\theta$ sıcaklık artışıdaki ömür [gün], p_i , θ_i sıcaklığındaki ömür [gün], $\Delta\theta$, Sıcaklık artış miktarı [°K] ve θ_i , Kablo işletme sıcaklığı [°K] büyüklüklerini belirtmektedir.

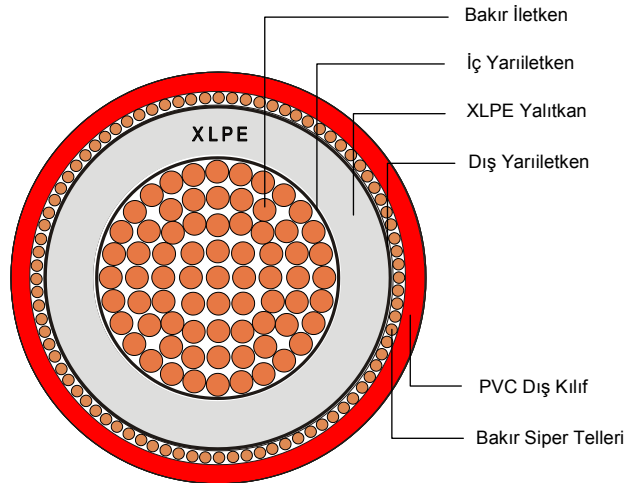
Bu çalışmada elektrik, ısı ve çevresel zorlanmalar (nem) altında güç kablolarının sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve çözüm sıcaklık bilgisinden yukarıdaki bağıntılar kullanılarak kablo ömrü değerlendirilmiştir.

BÖLÜM V

UYGULAMALAR

V.1 5,8/10 KV XLPE KABLO MODELİ

Elektrik-ısı analiz üzerine yapılan bu çalışmadaki hesaplamalarda ilk olarak, işletmede yaygın olarak kullanılan ve Şekil (V.1)'de enine kesiti gösterilen 5,8/10 kV'luk, XLPE yalıtkanlı, tek damarlı yeraltı kablosu göz önüne alınmıştır. Bu kabloya ait tüm parametreler [26] numaralı kaynaktan alınmıştır.



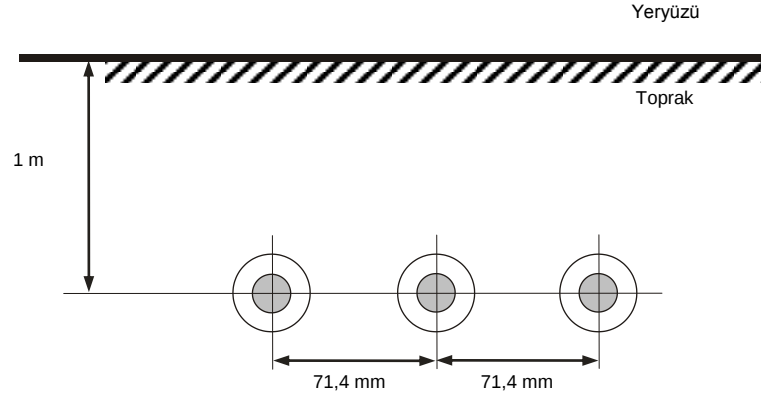
Şekil V.1 Kablo kesiti

Göz önüne alınan kablonun iletkeni, 300 mm^2 kesite ve 20,5 mm çapa sahip örgülü bakır iletkenidir. Tablo V.1’de model kablonun, iletkenden dışa, tabakalarının sırası ve tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo V.1 Kablo tabaka kalınlıkları

Tabaka	Kalınlık (mm)
İç yarıiletken	0,6
XLPE yalıtkan	3,4
Dış yarıiletken	0,6
Bakır tel siper	0,7
PVC dış kılıf	2,3

İncelemede göz önüne alınan kablo döşeme koşulları Şekil V.2’de gösterilmiştir. Burada, yukarıda özellikleri verilen, üç adet benzer kablunun yerin 1 metre altına, yan yana ve yer yüzeyine paralel olarak doğrudan toprak içine döşendikleri kabul edilmiştir. Kablolar arasında bir kablo çapı kadar uzaklık bırakılmıştır. Kabloları çevreleyen toprağın ısıl öz direnci referans değeri olarak $1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ olarak alınmış, kablolardan yeterince uzak sınırlardaki sıcaklık 15°C olarak kabul edilmiştir.



Şekil V.2 Kabloların döşeme koşulları

V.1.1 Sayısal Çözüm

Güç kablosunun ısı analizinde, sayısal bir yöntem olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle çözümün birinci adımı, incelenecek problemin, geometri, malzeme ve sınır koşullarıyla kapalı bir bölge içinde ölçekli olarak tanımlanmasıdır. Buna göre problem, içinde, özellikleri yukarıda verilen üç adet

kablonun yer aldığı 10 m eninde, 5 m boyunda bir dikdörtgen çözüm bölgesinde tanımlanmıştır. Tanımlama ve buna bağlı olarak çözüm, iki boyutlu kartezyen koordinatlarda yapılmıştır. Bu durumda kartezyen koordinat sisteminin üçüncü koordinatı, tanım düzlemine dik doğrultuda olur. Buna göre çözüm bölgesinde enine kesiti ile iki boyutlu olarak tanımlanan kabloların eksenleri üçüncü koordinata paralel olacaktır. Çözümde üçüncü koordinatın ve dolayısıyla kabloların sonsuz uzunlukta oldukları varsayılmıştır.

Problemın şekli üzerinde kabloların ve çevresindeki ortamın (toprağın) ısı özellikleri olarak Tablo V.2'deki k ısı iletkenlik ve c ısı kapasitesi değerleri kullanılmıştır. Aynı tabloda malzemeler için göz önüne alınan ρ yoğunluk değerleri de gösterilmiştir. Bu büyüklükler, ısı iletim denklemi (IV.1)'de kullanılan büyüklüklerdir. Isı kaynakları da denklem (IV.3)'e göre tanımlanmıştır.

Tablo V.2 Modeldeki malzemelerin ısı özellikleri

Malzeme	Isıl iletkenlik k (W/K.m)	Isı kapasitesi c (J/kg.K)	Yoğunluk ρ (kg/m ³)
Bakır iletken	400	385	8700
XLPE yalıtkan	1/3,5	385	1380
Bakır tel siper	400	385	8700
PVC dış kılıf	0,1	385	1760
Toprak	1	890	1600

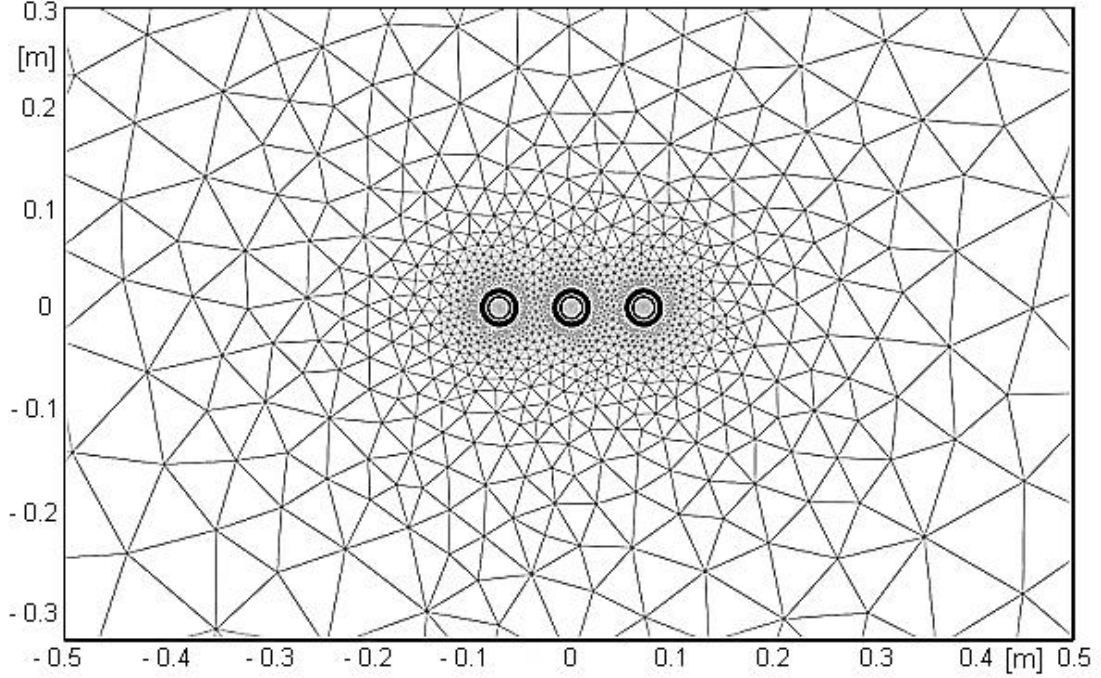
Geometrik ve fiziksel tanımlamalardan sonra problemin sınır koşulları belirtilmiştir. Bölgenin alt ve yan sınırları üzerinde sıcaklık (15°C) sabit olarak kabul edilmiş, üst sınır ise taşınım sınırı olarak alınmıştır. Isı transfer katsayısı h , deneysel olarak elde edilmiş amprik (görgül) bir bağıntı olan (V.1) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır [2].

$$h = 7.371 + 6.43 \cdot u^{0.75} \quad (V.1)$$

Bu denklemde, u kablounun gömülü bulunduğu bölgenin yer yüzeyindeki rüzgar hızıdır ve birimi (m/s) dir. Yapılan analizde rüzgar hızının sıfır olduğu ve taşınımın sıcaklık farkından kaynaklandığı varsayılmıştır

Sonlu elemanlarla problem çözmenin ikinci adımı, çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmasıdır. Bu aşamada kullanılan sonlu eleman sayısı arttıkça problemin çözüm doğruluğunun artacağı bilgisi göz önünde tutulmuştur. Bir-iki denemeden sonra bölge, kablo ve yakın çevresinde doğru sonuç verecek sıklıkta (8519 adet) üçgen sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu elemanlara ayırma işlemi

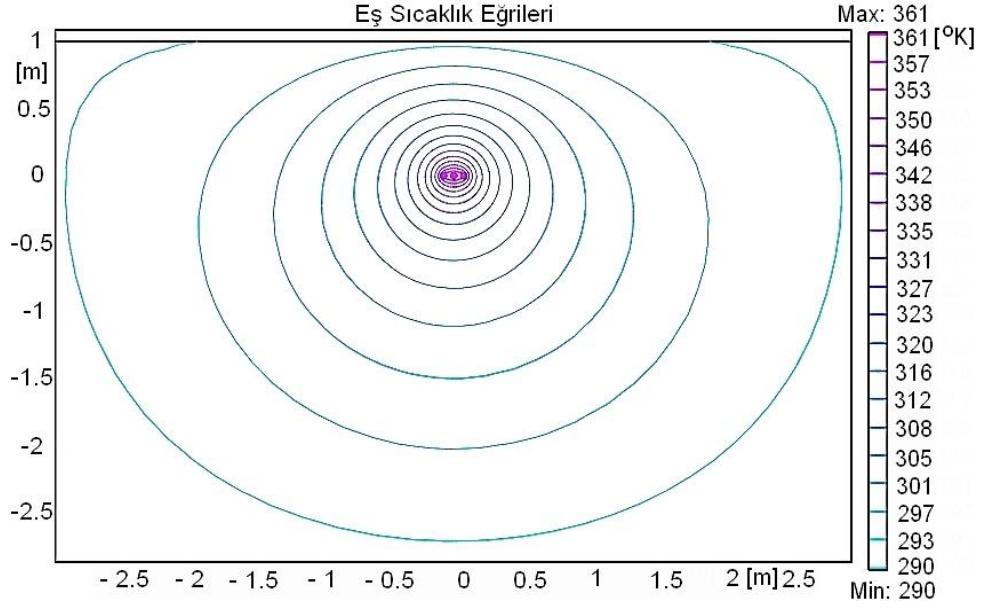
analizde kullanılan programca otomatik ve adaptif olarak yapılmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar ağının, ortasında kabloların yer aldığı 1 m eninde, 0,6 m boyundaki bölümü Şekil V.3'te gösterilmiştir.



Şekil V.3 Çözüm bölgesinin sonlu elemanlar ağı

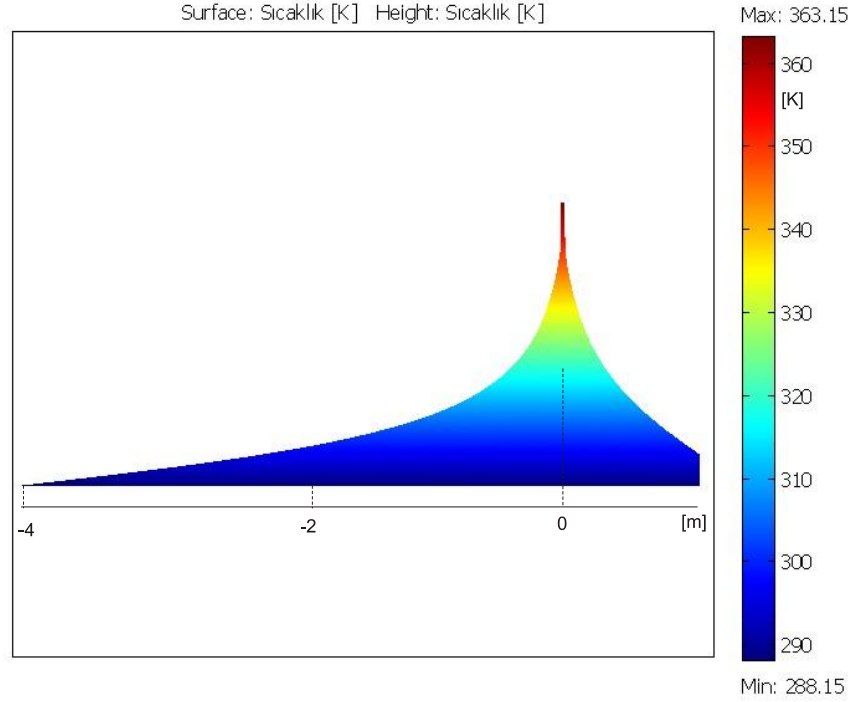
Kablolarda kayıp değerlerinin artan kablo sıcaklığı ile birlikte değişmesi, kayıp ve ısınma mekanizmalarının birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Elde edilen kablo sıcaklığına bağlı olarak ta güç kablosunun akım taşıma kapasitesi belirlenir. Oluşturulan elektrik-ısıl model malzemenin sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenliğinden dolayı lineer (doğrusal) olmayan bir davranış gösterir.

Şekil V.4, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrilerinin (çizgilerinin) dağılımını göstermektedir. Elde edilen bu dağılıma göre en fazla ısınan kablo, yanlardaki kabloların da sıcaklık etkisiyle ortadaki kablodur. Bu kablonun yalıtkan sıcaklığını 90°C değerine ulaştıracak akım değeri 626.214 A olarak hesaplanmıştır. Bu akım değeri, önce 90°C sıcaklığa karşı düşen akım yoğunluğu bulunup bu değer de iletken kesiti ile çarpılmasıyla bulunmuştur. Bu değer kablonun akım taşıma kapasitesi olup aynı problemin analitik olarak çözümünün verildiği [26] numaralı kaynaktaki 629 A değerine oldukça yakındır.



Şekil V.4 Kablodaki sıcaklık dağılımının gösterimi

Şekil V.5’de toprak içerisindeki sıcaklık dağılımının derinliğe bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi kabloda oluşan sıcaklık yer yüzeyine doğru, taşınım sınırının etkisiyle daha hızlı bir azalma göstermektedir. Toprak içerisinde bu durum söz konusu değildir. Kabloların gömülme derinliğinin kablo soğumasında önemli bir etkiye sahip olduğu buradan çıkartılabilir.



Şekil V.5 Toprak içerisindeki sıcaklık dağılımının derinliğe bağlı değişimi

V.1.2 Toprağın Isıl İletkenlik Değerinin Sıcaklık Dağılımına Etkisi

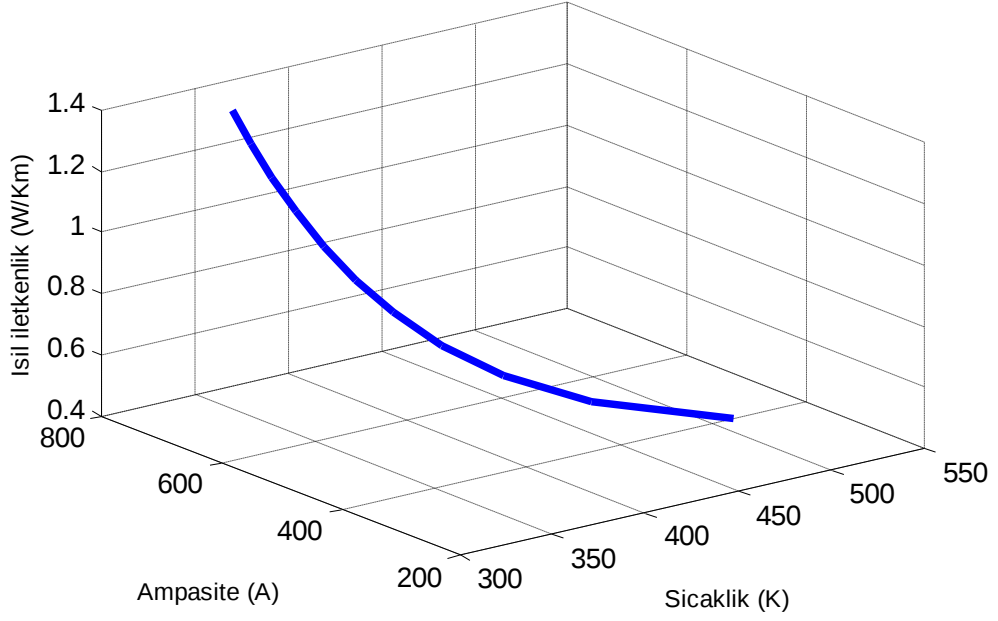
Toprağın ısı iletkenliğı veya ısı ı direnci, mevsimlerle ve iklimle değışen bir büyüklüktür. Kablonun döşendiğı yerdeki toprağın nemi normalin üzerinde olduğı zaman, kablounun ürettiğı ısıyı dışarı atması daha kolay olur. Üretilen ısı aynı kalırsa, enerjinin korunumu prensibine göre, dışarıya atılan ısı arttığı için kabloda kalan ısı ve dolayısıyla kablo sıcaklığı düşer ve bu durumda kablo daha fazla akım taşır. Yağış almayan, toprak sıcaklığı yüksek ve toprakta kurumanın görüldüğü yerlerde toprak ısı iletkenliğı $0.4 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ değerine kadar inebilir. Bu durumda kablounun ürettiğı ısıyı dışarı atması zorlaşacak, kablounun akım taşıma kapasitesi düşecektir. Toprak ve hava şartlarına bağılı olarak toprağın ısı ı özdirenç (iletkenlik) değerinin değışimi Tablo V.3'te verilmiştir [37].

Tablo V.3 Toprağın ısı ı özdirencinin (iletkenliğinin) toprak ve hava şartları ile değışimi

Isıl Özdirenç (K.m/W)	Isıl İletkenlik (W/K.m)	Toprak Şartları	Hava Şartları
0.7	1.4	Çok nemli	Sürekli nemli
1	1	Nemli	Düzenli yağmurlu
2	0.5	Kuru	Seyrek yağmurlu
3	0.3	Çok kuru	Çok az yağmurlu veya kurak

Bu tablodan görüldüğü gibi sürekli yağış alan bölgelerde toprağın nem miktarı ve buna bağılı olarak ısı iletkenlik değeri artmaktadır.

Diğer tüm devre parametreleri ve kablo yükü sabit iken, kabloyu çevreleyen ortamın ısı iletkenliğinin değışiminin kablo sıcaklığına etkisi incelenmiştir. Bunun için toprağın ısı iletkenliğı, normalde karşılaşılan değışim aralığı olan 0,4 ile 1,4 $\text{W/K}\cdot\text{m}$ arasında değıştirilerek kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi çıkarılmış ve sonuçlar Şekil V.6'da verilmiştir. Şekil V.6'da görüldüğü gibi toprağın veya genel olarak kabloyu çevreleyen ortamın ısı iletkenliğinin azalması ile kablo sıcaklığı oldukça fazla artmaktadır. Bu durum kablo yükünün azaltılmasını gerektirir.

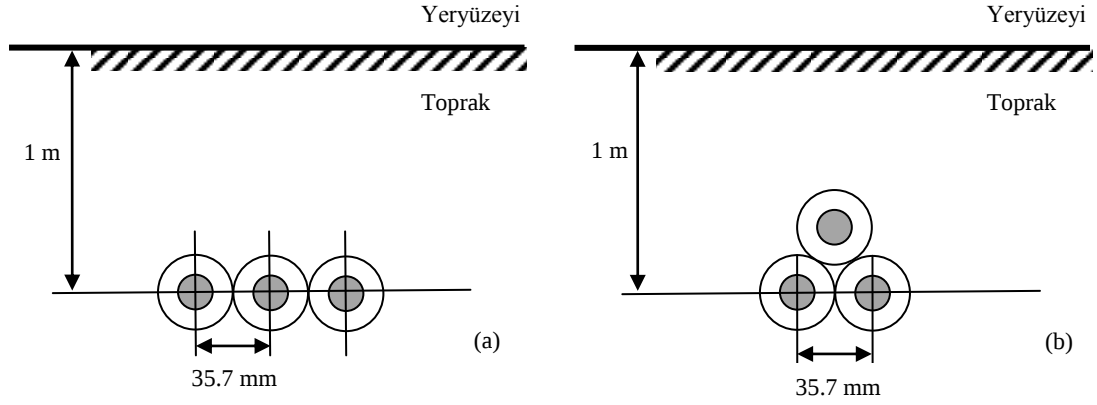


Şekil V.6 Toprağın ısl iletkenliğindeki değişimin kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi

Kablo yükünün 626.214A ve toprağın ısl iletkenliğinin 1 W/K·m olduğu durumda en fazla ısınacak olan ortadaki kablonun sıcaklığı 90°C olarak bulunmuştur. ısl iletkenlik 0.4 W/K·m olduğuunda bu sıcaklık 238°C (511.15°K) seviyelerine çıkmaktadır. Bu durumda kabloların yükü %36 oranında azaltılmalı ve 399.4A'e indirilmelidir. ısl iletkenliğin 1.4 W/K·m olduğu durumda ise kablo sıcaklığı 70.7°C (343.85°K) değerine düşmektedir. Bu değer, kablonun, toprağın ısl iletkenliğinin 1 W/K·m olduğu duruma göre %15 daha fazla yüklenebileceği anlamını taşır (720.23A).

V.1.3 Kabloların Yerleşim Düzeninin Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Yapılan hesaplamalarda kablolar arası uzaklığın bir kablo çapı kadar olduğu kabul edilmiştir. Şekil V.7(a)'da görüldüğu gibi eğer yan yana döşenen üç kablo arasındaki uzaklık azaltılırsa ortadaki kablonun bitişığindeki iki kablo nedeniyle daha çok ısınması beklenir. Bu durumda ortadaki kablonun akım taşıma kapasitesi azalacaktır. Tablo V.4'te sayısal çözümden elde edilen kablolar arası uzaklığın değişimine bağlı olarak ortadaki kablonun sıcaklık değerleri ve buna karşı düşen akım taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir.



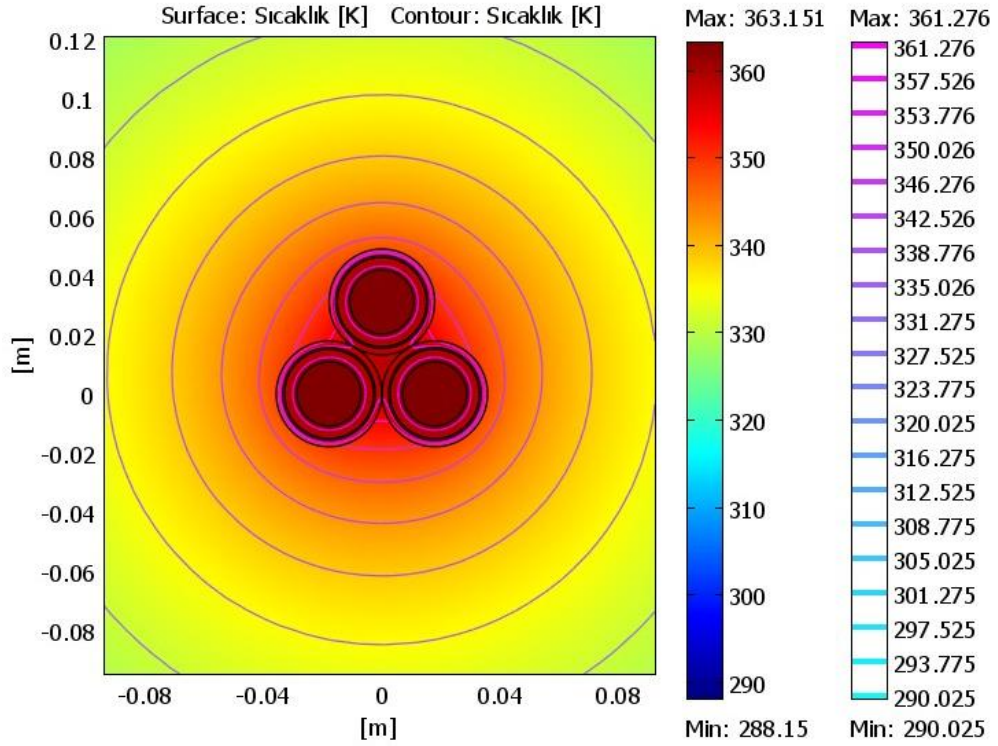
Şekil V.7 Kabloların farklı döşenme koşulları

Tablo V.4'ten görüleceği gibi, kablolar arası mesafenin ortadan kalkması ile ortadaki kablonun sıcaklığı 10°C artmaktadır. Bu durum kablo yükünün yaklaşık % 6 oranında azaltılmasını gerektirir. Kablolar arası aralığın bir kablo çapı kadar olduğu durum, akım taşıma kapasitesi bakımından en uygun durumdur.

Tablo V.4 Kablolar arası uzaklık değişiminin ortadaki kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi

Kablolar arası uzaklık (mm)	Kablo sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Akım taşıma kapasitesi (A)
0	100.03	591.51
10	96.14	604.16
20	93.35	613.85
30	91.12	622.00
36	90.00	626.21

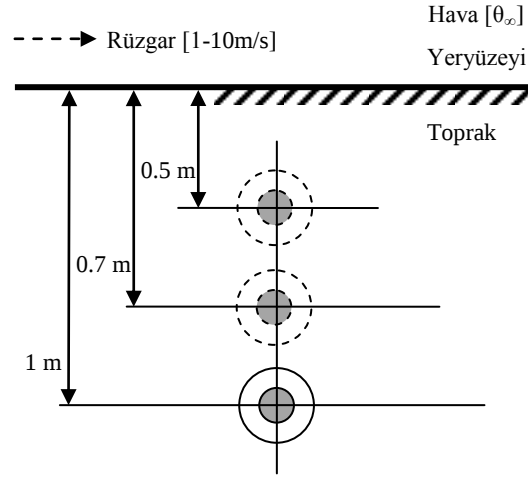
Kabloların üçünde birbirine temas ettiği diğer bir yerleşim düzeni Şekil V.7(b)'de gösterilen yonca biçimli düzendir. Bu yerleştirmede her bir kablo diğer iki kablonun etkisi ile daha fazla ısınacaktır. Bölüm V.1.1'de belirtilen malzeme ve ortam özellikleri aynı bırakılarak yapılan sayısal çözümleme sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımının 0.20 m boyunda ve 0.16 m enindeki bölümü Şekil V.8'de gösterilmiştir. Bu analiz sonucunda alttaki kabloların üstteki kabloya göre biraz daha fazla ısındığı fakat bu farkın oldukça düşük olduğu tesbit edilmiştir. Alttaki kablo sıcaklıklarını 90°C değerine ulaştıracak akım değeri ise 590.63A olarak bulunmuştur. Bu değer yonca biçiminde döşenen kablolar için akım taşıma kapasitesidir.



Şekil V.8 Yonca biçimli yerleştirme düzeninde oluşan sıcaklık dağılımı

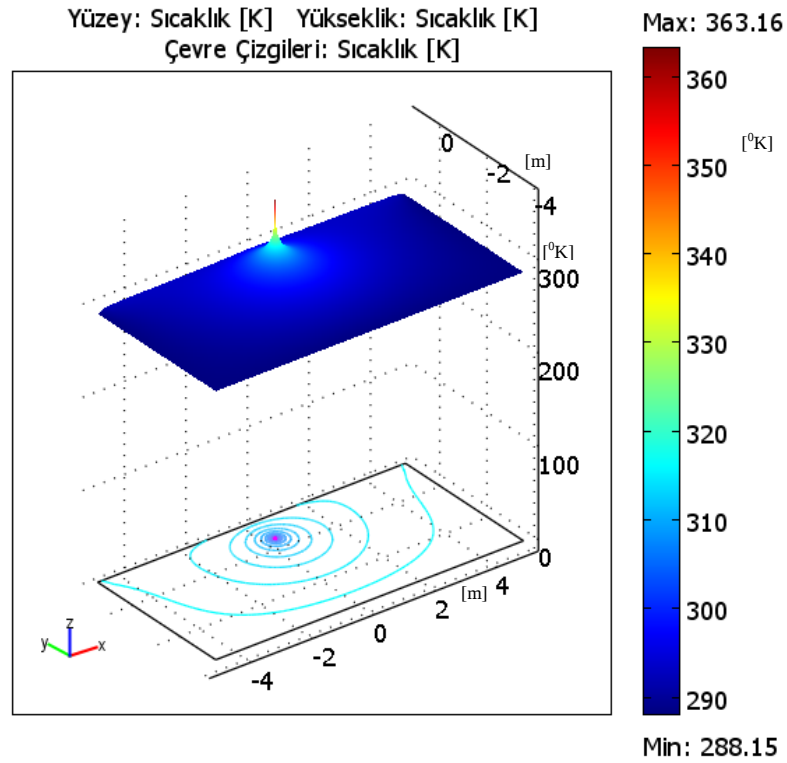
V.1.4 Tek Kablo Durumu

Şu ana kadar yapılan incelemelerde 10kV XLPE yalıtkanlı kabloların, aralarında bir kablo çapı kadar mesafe bırakılarak ve yonca biçimindeki döşeme durumlarında sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve kabloların akım taşıma kapasiteleri tesbit edilmiştir. Kabloların yanlarına döşenen diğer kablolar ya da ısı kaynakları akım taşıma kapasitelerini önemli miktarda azaltmaktadır. Tek bir kablo kullanılması durumunda diğer kabloların bu kablo üzerindeki ısı etkisi ortadan kalkacak ve kablo daha fazla akım taşıyabilecektir. Bu bölümde, Şekil V.9’da görüldüğü gibi bir adet güç kablosunun farklı gömülme derinlikleri için akım taşıma kapasiteleri hesaplanmış ve daha sonra rüzgarın, kabloların akım taşıma kapasiteleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



Şekil V.9 Bir güç kablosunun farklı derinliklere gömülmesi

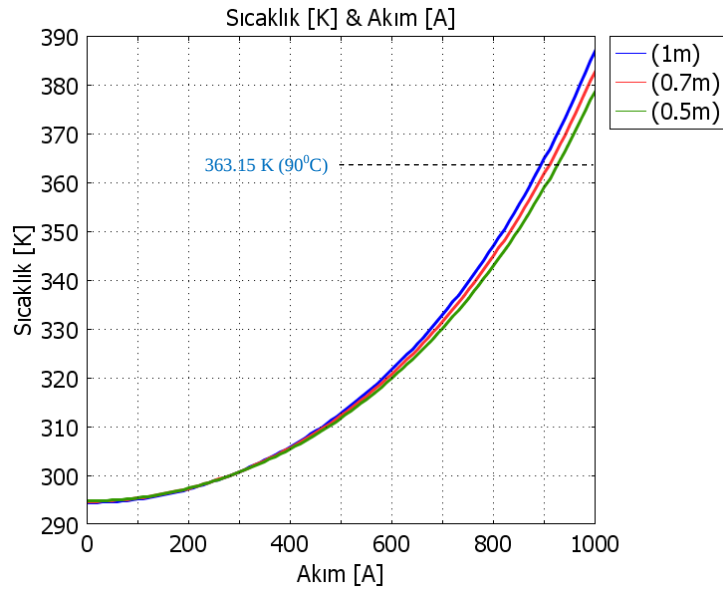
Oluşturulan modelde bir adet 10kV'luk XLPE yalıtkanlı kablonun yerin 1m altına gömüldüğü varsayılmıştır. Fiziksel tanımlamalar ve sınır koşulları V.1.1 bölümünde belirtilen değerlerle aynıdır. Yapılan sayısal çözümleme sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil V.10'da gösterilmiştir.



Şekil V.10 Kablodaki sıcaklık dağılımının üç boyutlu ve eş sıcaklık çizgileri ile gösterimi

Elde edilen bu dağılıma göre kablonun yalıtkan sıcaklığını 90°C değerine ulaştıracak akım değeri 890.97 A olarak hesaplanmıştır. Bu değer, kablonun tek başına döşenmesi durumundaki akım taşıma kapasitesi olup üç adet kablonun düz olarak döşendiği durumdan 264A, yonca şeklindeki döşeme durumundan ise 300A daha fazladır.

Kablonun yeryüzeyine daha yakın döşenmesi kablo içinde ve çevresindeki sıcaklık dağılımını değiştirmektedir. Örneğin kablonun 0.5, 0.7 ve 1m derine gömüldüğü durumda, geçen akıma bağlı olarak kablo yalıtkanının ulaştığı sıcaklık değerleri Şekil V.11’de gösterilmiştir.

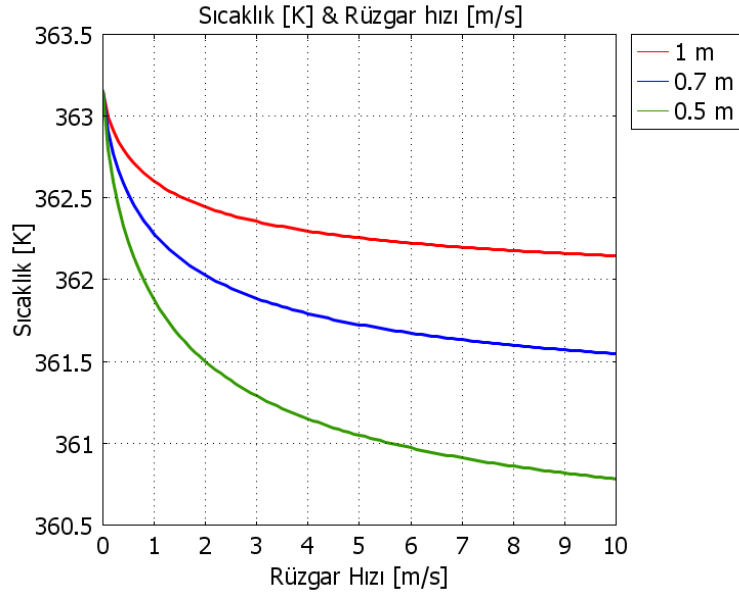


Şekil V.11 Kabloda farklı gömülme derinliklerine bağlı oluşan akım sıcaklık ilişkisi

Şekilde, kablonun yer yüzeyine daha yakın döşenmesi ile akım taşıma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Kablo 0.7m derinliğe döşendiğinde yalıtkan sıcaklığını 90°C sıcaklığa ulaştıracak akım değeri 906.45A olarak bulunmuştur. Bu değer, 0.5m derinlikteki karşılığı 922.63A'dır. 0.5m derine gömülen bir kablonun akım taşıma kapasitesi 1m derine gömülen kablodan yaklaşık 32A daha fazladır.

Şu ana kadar yapılan hesaplamalarda rüzgar hızının sıfır olduğu ve taşınımın sıcaklık farkından kaynaklandığı varsayılmıştır. Bu bölümde ise rüzgar hızındaki değişimin, yeraltına gömülü kablolarda sıcaklık dağılımına etkisi araştırılmıştır. Her üç gömülme derinliğinde, kablonun yalıtkan sıcaklığını 90°C değerine ulaştıracak akım değerleri sabit alınarak, rüzgar hızı 1 ile 10 m/s değerleri arasında değiştirilmiş ve buna bağlı olarak kablo yalıtkan sıcaklıkları belirlenmiştir. Şekil V.12’de

görüldüğü gibi artan rüzgar hızı kabloların soğumasına katkıda bulunmaktadır. Bu durumda kablo sıcaklığı düşecek ve kablonun akım taşıma kapasitesinde küçük artmalar görülebilecektir.



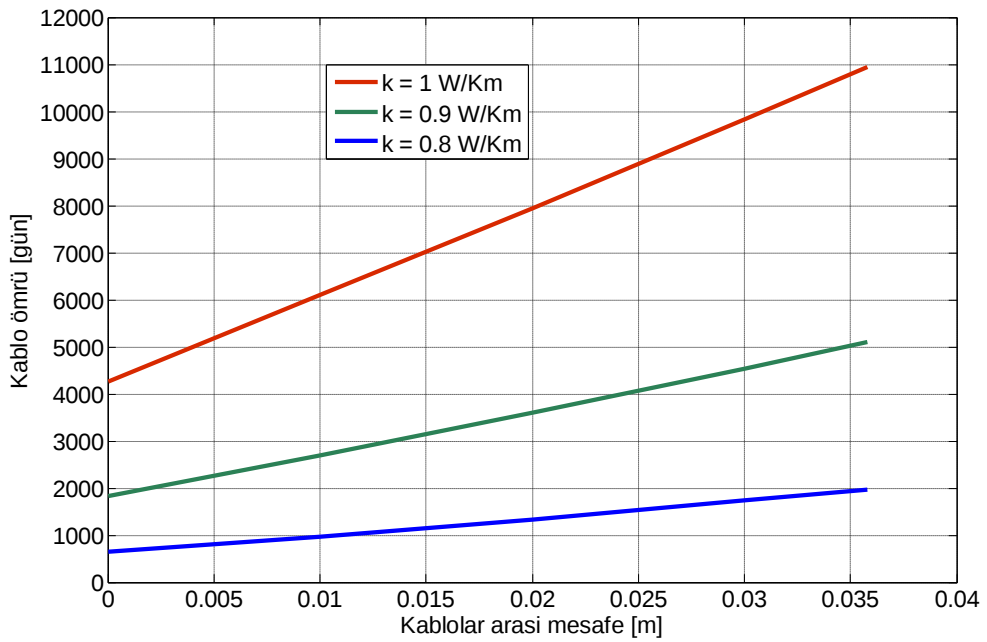
Şekil V.12 Rüzgar hızındaki değişime bağlı olarak kablonun yalıtkan sıcaklığının değişimi

İstanbul için ortalama rüzgar hızı 3.2m/s'dir [38]. Bu değer dikkate alındığında 1m derine gömülmüş kablonun sıcaklığı 0.8 °C, 0.5m derine gömülmüş bir kablonun sıcaklığı ise yaklaşık 2°C azalmaktadır. 0.5m derinliğindeki kablo için bu azalma kablonun 11A daha fazla yüklenebileceği anlamını taşır.

V.1.5 Kablo Sıcaklık Değerlerinin Kablo Ömrü ile İlişkilendirilmesi

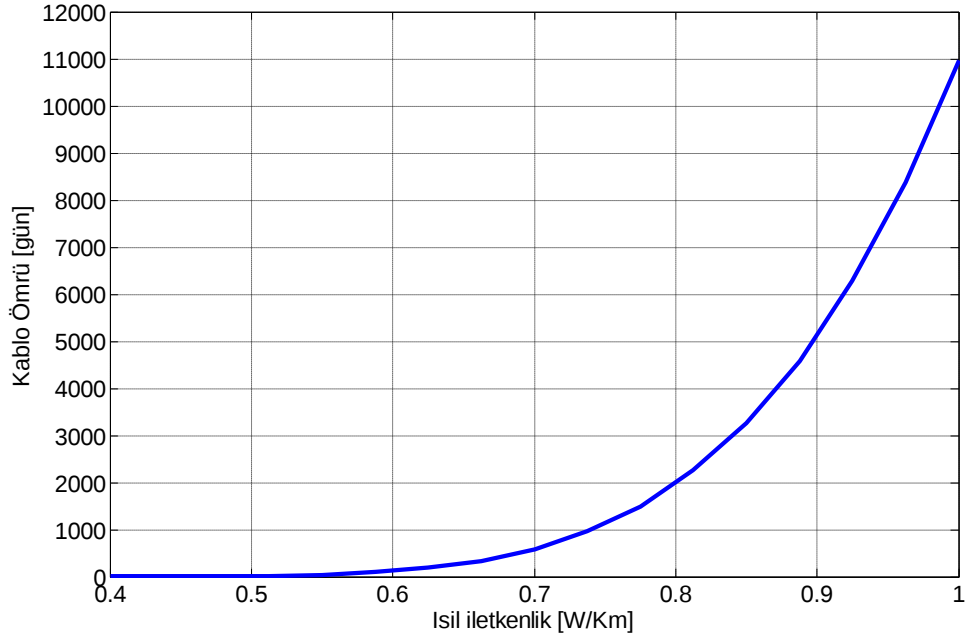
Bu bölümde, yerin 1m altına yan yana döşenmiş benzer üç adet kablonun, Bölüm V.1.2 ve Bölüm V.1.3'te hesaplanan sıcaklık değerleri kullanılarak ömürleri tesbit edilmiştir. Toprağın ısı iletkenlik değerindeki ve kablolar arası uzaklıktaki azalma kablo sıcaklıklarında önemli artmalara ve buna bağlı olarak akım taşıma kapasitesinde önemli azalmalara neden olmaktadır. Bu durum, aynı zamanda kablonun ömrünü de azaltan bir durumdur. Bunun ölçüsünü görmek amacıyla (IV.11) denklemi kullanılarak her iki durum için kablo ömrü hesaplanmış ve sonuçlar Şekil V.13 ve Şekil V.14'de verilmiştir. Hesaplamalarda XLPE malzemesi için aktivasyon enerjisi 1.1 eV, Boltzmann sabiti $8.617 \cdot 10^{-5}$ eV/K alınmış, XLPE yalıtkanlı güç kablosunun 90°C sıcaklıktaki ömrü 30 yıl olarak kabul edilmiştir.

Şekil V.13’de toprağın üç farklı ısı iletkenlik değeri için kablolar arası mesafe ile kablo ömrü arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kablolar arası mesafenin azalmasına bağılı olarak kablo ömrü doğrusal bir şekilde azalmaktadır. Bu analizde kablodan geçen akım değeri sabit kabul edilmiş, kablolar arası mesafenin azalmasına bağılı olarak sayısal çözümden elde edilen kablo sıcaklık değeri kablo ömrünün hesaplanmasında kullanılmıştır. Isıl iletkenliğin 1W/Km olduğu durumda kablolar arası mesafedeki 0.5 cm’lik bir azalmanın, kablo ömründe 1000 günlük bir kayba karşılık geldiği şekilden görülmektedir.



Şekil V.13 Toprağın farklı ısı iletkenlik değeri içinde kablolar arası uzaklık değışiminin kablo ömrüne etkisi

Diğer bir analizde, aralarında bir kablo çapı kadar boşluk bırakılarak yan yana döşenmiş kabloların ömürleri, toprağın ısı iletkenlik değeri içindeki değışime bağılı olarak bulunmuş, sonuçlar Şekil V.14’de gösterilmiştir. Akım değeri sabit kabul edilerek yapılan bu analiz sonucunda, toprağın ısı iletkenlik değeri içindeki artmaya bağılı olarak kablo ömrü logaritmik şekilde artmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi toprağın ısı iletkenlik değeri içindeki %10’luk bir azalma eğer yük koşulları ayarlanmazsa kablo ömrünü yarı yarıya düşürmektedir.



Şekil V.14 Toprağın ısıl iletkenliğindeki değişimin kablo ömrüne etkisi

V.2 10 KV PILC KABLO MODELİ

Bu bölümde kağıt yalıtkanlı kurşun kaplamalı bir kablonun (PILC) elektrik-ısı modelini oluşturulmuştur. Model kablonun gerilimi 10kV alınmış, kablonun toprağa gömülü olduğu kabul edilmiştir. Kablo içerisinde iki ısı kaynağı göz önüne alınmıştır. Bunlardan biri yük akımının sebep olduğu omik kayıplardan dolayı oluşan ısı, diğeri ise dielektrik kayıplarının (omik ve polarizasyon) yalıtkan malzemede oluşturduğu ısıdır. Yalıtkan malzemenin alternatif akım iletkenliği ile ilgili bir ifade denklem (IV.6)'da, bağıl görünür dielektrik sabitine bağlı diğer bir ifade ise denklem (IV.7)'de tanımlanmıştır. Yalıtıkandaki kayıplar (IV.8) denkleminde verilmiştir. Bu denklemden görüldüğü gibi yalıtkan malzemenin alternatif akım iletkenliği bağıl görünür dielektrik sabitine bağlıdır. Bağıl görünür dielektrik sabiti ise (IV.9) denkleminde uygun olarak Arrhenius ilişkisi ile tanımlanabilir [36].

$$\varepsilon_{r,App}'' = \varepsilon_{r,App,0}'' \cdot e^{\frac{-E_a}{k_B} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_0} \right)} \quad (V.2)$$

Bu denklemden

$\varepsilon_{r,App,0}''$: θ_0 sıcaklığındaki bağıl görünür dielektrik sabiti

E_a : Uyarma (aktivasyon) enerjisi [eV]

k_B : Boltzmann sabiti [eV/K]

olarak ifade edilir.

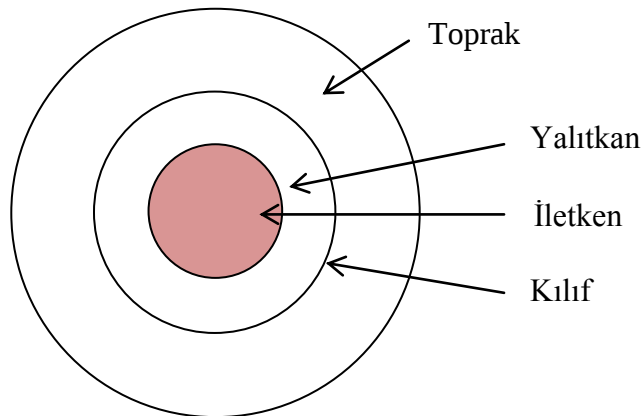
Yapılan deneysel çalışmalardan bu büyüklüğün sıcaklık ve nem bağımlılığı görülmektedir. Bu durumda yalıtkan malzemenin alternatif akım iletkenliği nem ve sıcaklığa bağlı bir büyüklük haline gelmektedir. Oluşturulan bu modelde bu ilişki incelenmiş ve 10kV'luk bir kablo için dielektrik kayıplarının önemli olabileceği gösterilmiştir.

Kağıt yalıtkanlı malzemelerin elektriksel özellikleri nem miktarına bağlı olarak önemli oranda değişmektedir. Bu modelde kablonun kurşun kaplamasının zarar gördüğü ve kablo içerisine su girdiği varsayılmıştır.

V.2.1 Sayısal Çözüm

Kağıt yalıtkanlı kablonun iki boyutlu geometrisi Şekil V.15'de gösterilmiştir. Kablonun dış kaplaması zarar gördüğü için modelde iletken, yalıtkan, kılıf ve çevreleyen ortam (toprak) dikkate alınmıştır.

Kablo iletkeninin yarıçapı ve yalıtkan kalınlığı 5mm alınmıştır. Kabloyu çevreleyen toprağı da içine alan 0.2m yarıçaplı silindrisel bir çözüm bölgesi tanımlanmıştır. Kablodan yeterince uzak sayılabilecek bu bölgenin sınırında toprak sıcaklığı 10°C olarak sabit sıcaklık alınmıştır. Bununla birlikte kablo iletkeni ve kılıfa uygulanan 10kV'luk faz-nötr gerilimi modelin elektriksel sınır koşullarını oluşturmaktadır.



Şekil V.15 İki boyutlu model geometrisi

Kabloya ait elektriksel parametreler; σ iletkenlik ve ϵ_r dielektrik sabiti değerleri ile ısı parametreler; k ısı iletkenlik, ρ malzeme yoğunluğu ve c ısı kapasitesi

değerleri Tablo V.5’de verilmiştir. Tabloda yer alan θ_0 değeri ise kablo ile ısı alışverişi başlamadan önce ortamın ilk sıcaklık değeridir. Kablo ve çevreleyen ortamın bölge özellikleri tanımlanırken bu değerler kullanılmıştır.

Tablo V.5 Model kablo parametreleri

Parametreler	İletken	Yalıtkan	Toprak
σ (S/m)	5.998e7	0	0
ϵ_r	1	ϵ_{rd}	1
k (W/mK)	400	0.2	1
ρ (kg/m ³)	8960	1000	1300
c (J/kgK)	385	1300	870
θ_0 (K)	283.15	283.15	283.15

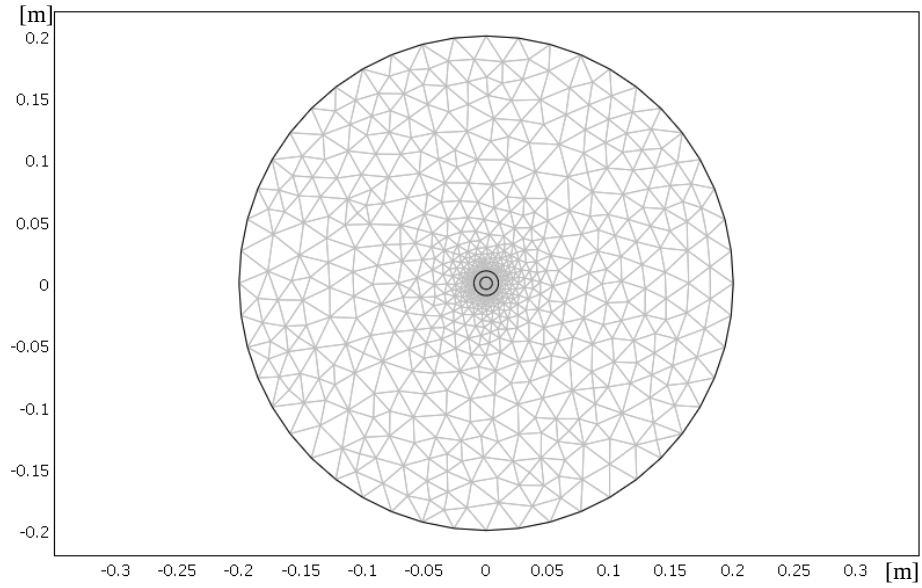
Kablo yalıtkanına ait dielektrik sabiti (ϵ_{rd}) tanımında (V.3) denklemi kullanılmıştır. Denklemden yer alan ϵ_r' kağıt yalıtkanlı kabloya ait bağıl dielektrik sabiti olup değeri 4’dür. ϵ_r'' ise kayıp faktörüdür ve yerine (V.2)’de gösterilen ifade konulmuştur.

$$\epsilon_{rd} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (V.3)$$

[36]’den kağıt yalıtkan malzemesi için aktivasyon enerjisi 0.7eV, 10°C sıcaklık ve %5 nem durumundaki bağıl görünür dielektrik sabiti 0.72 olarak alınmıştır.

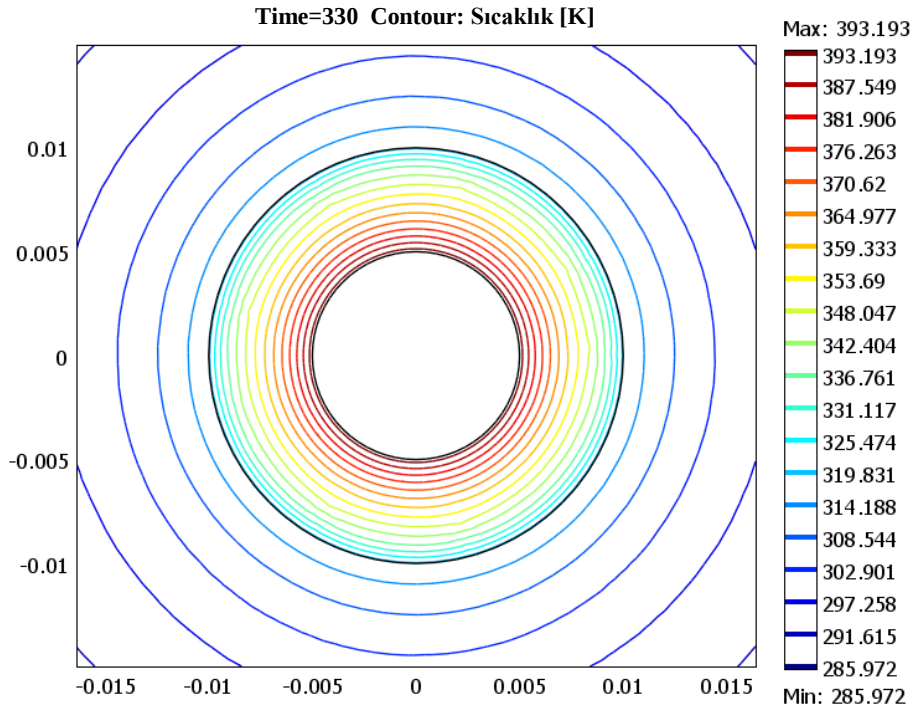
Bölge özelliklerinin tanımlanmasının son adımında kablo içindeki ısı kaynakları tanımlanmıştır. Yalıtkan malzemede oluşan dielektrik kayıpları; yalıtkanın alternatif akım iletkenliğine ve uygulanan elektrik alana bağlı olarak değişmektedir. $\sigma_{AA}E^2$ ile tanımlanan bu kayıplarda iletkenlik değeri (IV.8) denkleminde görüldüğü gibi bağıl görünür dielektrik sabitinin bir fonksiyonudur. İletken malzemede oluşan omik kayıplar ise J^2/σ denklemi ile modele eklenmiştir.

Yapılan bu tanımlamalardan sonra çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış bölümü Şekil V.16’da gösterilmiştir. Kablo ağı 1606 elemandan oluşmaktadır.



Şekil V.16 Model kablo problemi için sonlu elemanlar ağı

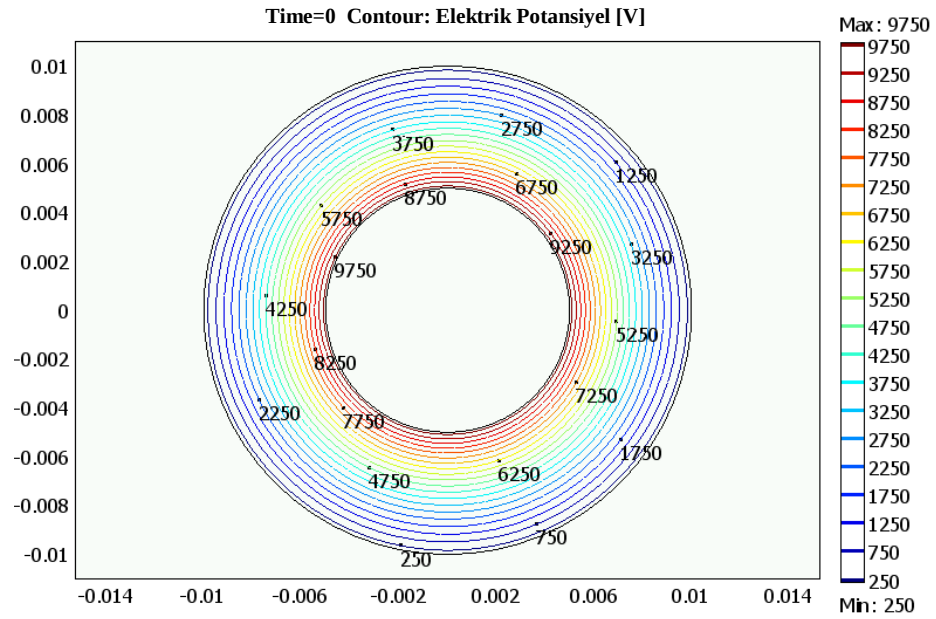
Yapılan sayısal çözümleme sonucunda kablo ve çevresindeki sıcaklık dağılımı, eş sıcaklık çizgileri kullanılarak Şekil V.17’de gösterilmiştir. Zamana bağlı yapılan çözümde 330 saniyelik bir süre sonunda kablo sıcaklığının 120°C değerine ulaştığı görülmüştür. Bu değer kağıt yalıtkanlı kablo için ısıl bozulma sınırındır [36].



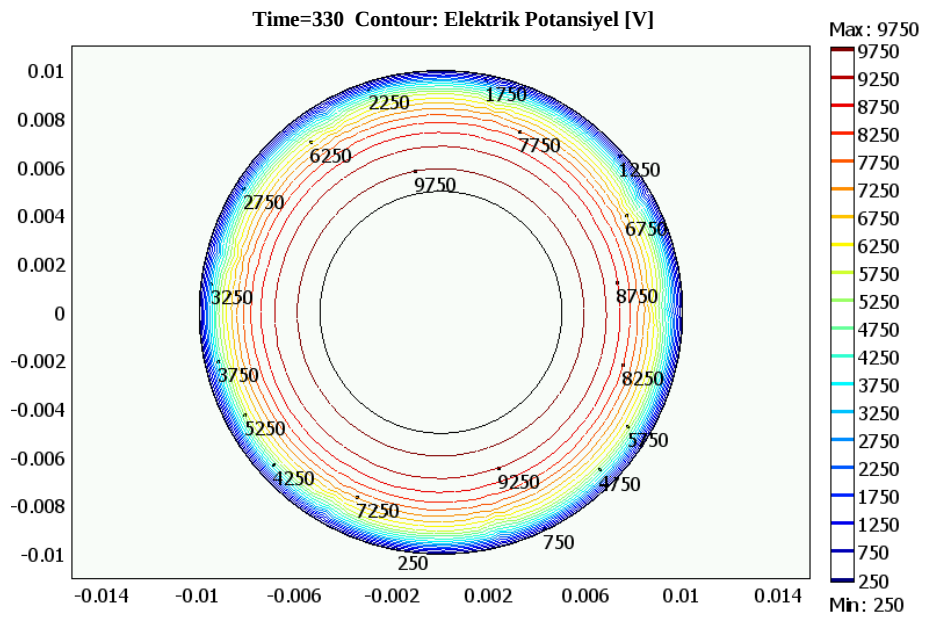
Şekil V.17 Kablo ve çevresindeki eş sıcaklık çizgileri

Dielektrik kayıplarının modelde göz önüne alınmadığı durumda kablo sıcaklığı 111°C değerine düşmektedir. Dielektrik kayıplarının kablodaki sıcaklık artışına

yaptığı bu etki, yalıtkan malzemenin nem içeriğine bağlı olarak sıcaklıkla artan alternatif akım iletkenlik değerinden kaynaklanmaktadır. Artan sıcaklığa bağlı olarak bağlı görünür dielektrik sabitinin artması yalıtkan malzemenin iletkenliğe yakın yüzeyinden başlayarak iletken hale geçmesini sağlamaktadır. İki farklı analiz zamanından elde edilen potansiyel dağılımları bu durumu göstermektedir (Şekil V.18, Şekil V.19). Şekil V.18’de potansiyel dağılımı iletken yüzeyinden başlamış ve kılıfta son bulmuş iken Şekil V.19’da bu dağılımın yalıtkan içerisinden başladığı görülmektedir.

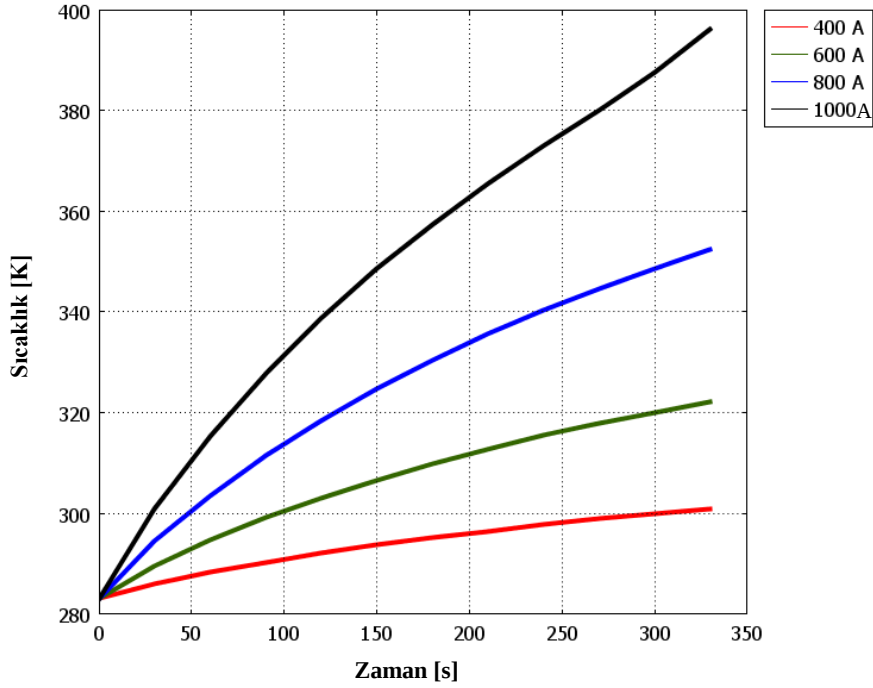


Şekil V.18 Başlangıçtaki potansiyel dağılımı



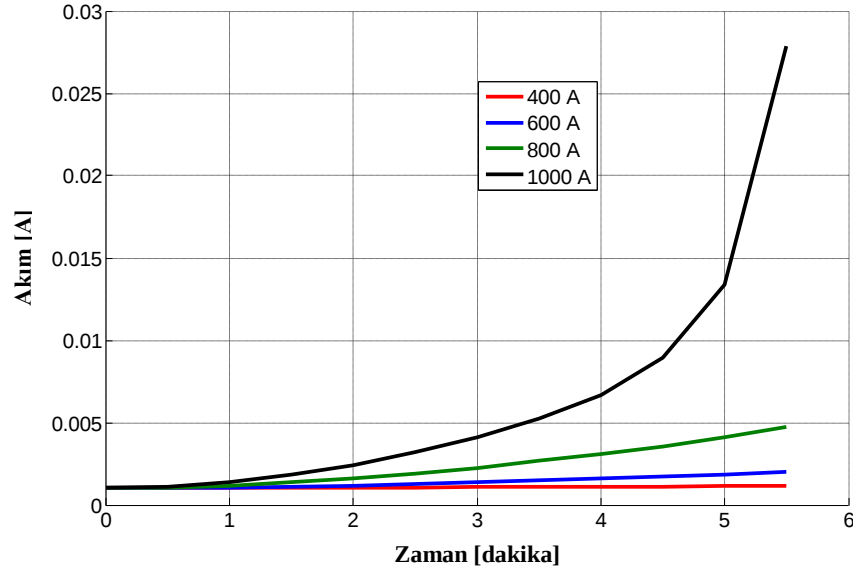
Şekil V.19 330 saniye sonraki potansiyel dağılımı

İncelemenin bu aşamasında kablodan geçen akıma bağlı olarak kablo yalıtkan sıcaklığının değişimi araştırılmış ve yine aynı akım değerlerinde yalıtkan malzemeden geçen akım; yalıtkan malzeme ve toprak arasındaki sınırın yüzey yük yoğunluğu integre edilerek hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil V.20 ve Şekil V.21’de gösterilmiştir.



Şekil V.20 Farklı yük akımı durumlarında kablo yalıtkan sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil V.20’de görüldüğü gibi akım akma süresi arttıkça kablo sıcaklığı artmaktadır. Ayrıca artan yük akımı ile kablo sıcaklığı yükselmektedir. Özellikle 1000A seviyesinde bu artış daha da hızlanmaktadır. Bunun sebebi Şekil V.21’de görüldüğü gibi yalıtkindan geçen akımın belirli bir sıcaklıktan sonra hızla artmaya başlamasıdır.



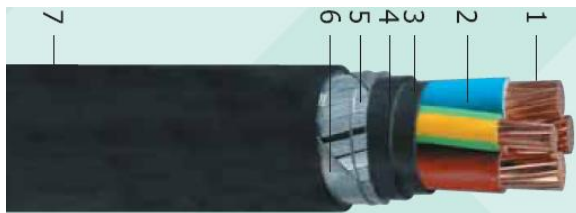
Şekil V.21 Farklı yük akımlarında yalıtkindan geçen akımın zamanla değişimi

V.3 0.6/1 KV PVC KABLO MODELİ - I

V.3.1 Deneysel Çalışmalar

Bu bölüm, güç kablolarında akım ve sıcaklık ilişkisini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışmaları içermektedir. Bu amaçla deneysel olarak laboratuvar koşullarında içinden akım akıtılan alçak gerilim güç kablosunda akımla beraber iletken ve kılıf sıcaklıkları takip edilmiş, elde edilen deneysel veriler kablonun sayısal modellenmesinde kullanılmıştır.

Deneyde kullanılan ilk kablo 0.6/1/1.2 ($U_0/U_n/U_m$) kV gerilimli 3x35/16 mm² kesitli, 3^{1/2} damarlı (3 faz, 1 nötr), PVC yalıtkanlı, galvanizli yassı çelik tel zırlı, çapraz tutucu çelik bantlı, PVC iç ve dış kılıflı bir alçak gerilim güç kablosudur (Şekil V.22). 29.1 mm dış çapa sahip PVC yalıtkanlı bu kablonun katalogunda, 20°C sıcaklıkta iletken DA direnci 0.524 Ω /km, izin verilen en yüksek işletme sıcaklığı 70°C olarak verilmektedir.



- 1: Bakır iletken
- 2: PVC yalıtkan
- 3: Dolgu
- 4: PVC iç kılıf
- 5: Galvanizli yassı çelik tel zırh
- 6: Helisel, galvanizli çelik şerit
- 7: PVC dış kılıf

Şekil V.22 0.6/1kV, 3x35/16 mm² PVC yalıtkanlı güç kablosunun resmi [39]

Güç kablosunun havada ve su içerisindeki akım sıcaklık ilişkisini incelemek için, dıştan çelik konstrüksiyonla desteklenmiş, 1 cm kalınlığında polyesterden yapılmış ve boyutları 0.5 x 170 x 0.5 m (en x boy x derinlik) olan tekerlekli bir deney kabı kullanılmıştır. Ölçümler sırasında kablo, deney kabı içinde ortada ve tabandan 15 cm yukarıda tutacak şekilde hazırlanmış polyester destekler üzerine yerleştirilmiştir.

İlk aşamada hava ortamında döşenen güç kablosunun akım-sıcaklık ilişkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kurulan deney düzeneğinin resmi Şekil V.23’de görülmektedir.



Şekil V.23 0.6/1kV kablo için kurulan deney düzeneği

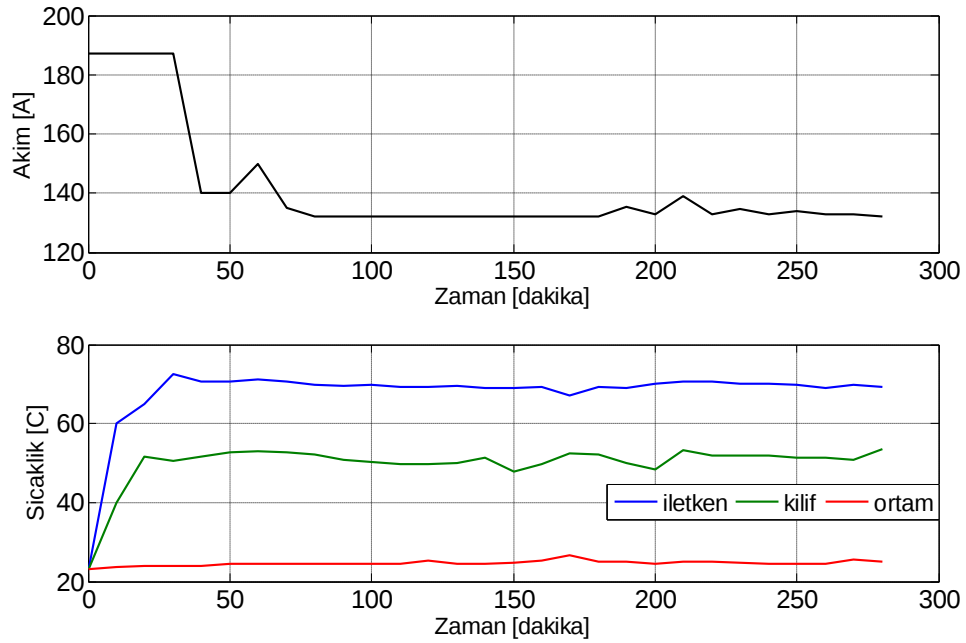
Güç kablosu için gereken akım, 10 kW’lık Westinghouse marka bir kaynak makinasının alternatif akım çıkış uçlarından sağlanmıştır. Kaynak makinası, üç fazlı olarak 380 V ile beslenmiştir. Çıkış gerilimi 32 V ve verebileceği en yüksek akım değeri 300 A’dır. Kablodan geçen akım paralel bağlanmış Helios marka, demir çekirdekli, 1,5 sınıfı, 150 A’lık iki adet ampermetre ile izlenmiştir. Çıkış akımı, makina üzerindeki bir varyak yardımıyla ayarlanmıştır.

Kablo bileşenlerindeki sıcaklık ölçümü için Escort-26 marka, çift girişli, -200 ile 1370 °C arasındaki sıcaklıkları ölçebilen, $\pm (\%0.1 \text{ rdg} + 0,7^\circ\text{C})$ duyarlıklı bir dijital termometre kullanılmıştır. Termometre ile iki adet K tipi termokupl aynı anda

kullanılabilmekte ve farklı noktaların sıcaklıkları izlenebilmektedir. Kablonun iletken ve kılıf sıcaklıklarının ölçülmesinde bu termokupllardan yararlanılmıştır.

İletken ve kılıf sıcaklığı, Türk standardında belirtilen sıcaklık ölçme koşullarına uygun olarak akım kaynağının her iki ucundan 50 cm uzaklıktaki kablo bileşenleri üzerinden ölçülmüştür [40].

Yapılan deneyde kablonun faz iletkenleri seri bağlanarak uçlarına alternatif akım uygulanmış ve bu şekilde kablonun her bir fazından aynı akımın geçmesi sağlanmıştır. Deney boyunca, kablonun akım kaynağına bağlı olduğu her iki noktada iletken ve kılıf sıcaklıkları ile ortam sıcaklığı değeri 10’ar dakika ara ile kaydedilmiştir. Şekil V.24’de kabloya uygulanan akım değerinin, iletken ve kılıf sıcaklıklarının ve ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil V.24 Kabloya uygulanan akımın, kablo bileşenlerinin ve ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimleri

Şekildeki iletken ve kılıf sıcaklıkları her iki ölçüm noktasından alınan değerlerin ortalamasıdır. Güç kablosunun deney aşamasında kullanılan cihazlar, deney montajı ve sıcaklık ölçümü ile ilgili resimler Ek-B’de gösterilmiştir.

Yapılan deneyde kablonun akım taşıma kapasitesinin bulunması için önce yüksek bir akım değerinden başlanmış, daha sonra iletken sıcaklığını 70°C değerinde sabit tutabilmek için kablo akımında ayarlamalar yapılmıştır. Yaklaşık 3 saat sonunda akım ve kablo sıcaklığı değerlerinde kararlı hale ulaşılmıştır. Bu durumda da kablo 2 saat daha çalıştırılmıştır. Kablonun kararlı hal durumunda taşıyabileceği

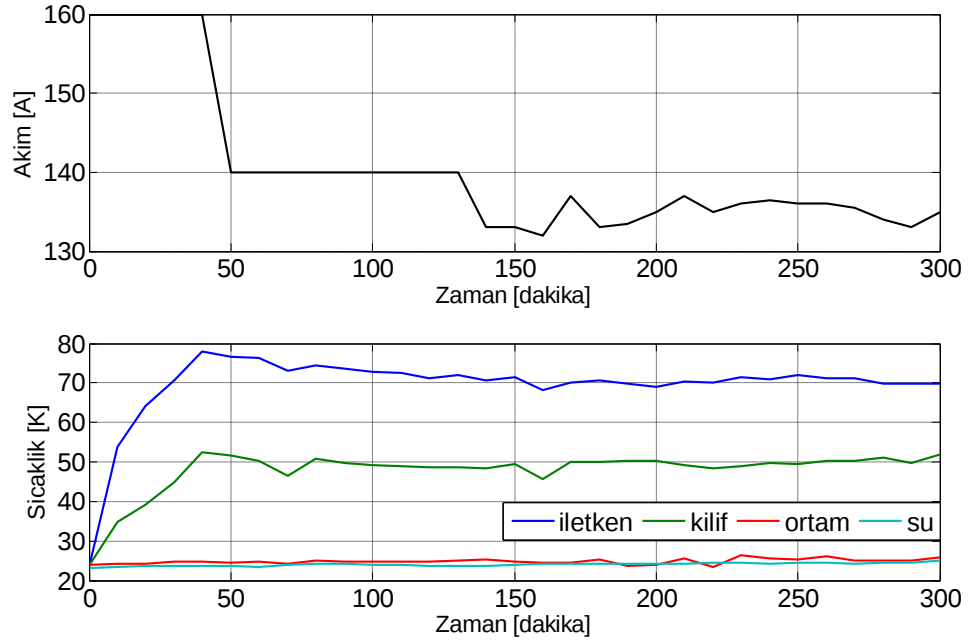
en yüksek akım değeri katalogda belirtilen değerlere uygun olarak 132 A bulunmuştur.

İkinci aşamada öncelikle birinci deney sırasında ısınan güç kablosunun 3 saat kadar soğuması beklenmiş daha sonra su altına gömülmüş kablonun akım sıcaklık ilişkisi araştırılmıştır. Bu aşamada kablo deney kabı tamamen su ile doldurulmuş ve tamamı 4 metre olan deney kablosunun 2.5 metrelik bölümü deney kabı içerisine, su yüzeyinden 35 cm aşağıda kalacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil V.25).



Şekil V.25 0.6/1kV kablo için kurulan deney düzeneği

Deney sırasında hava ortamında döşenen güç kablosunda yapıldığı gibi kablonun iletken sıcaklığını 70°C değerine ulaştıracak akım değeri araştırılmış ve bu değerlerde kablonun belirli bir süre çalışması sağlanmıştır. İletken ve kılıf sıcaklığı kablonun su dışında kalan bölümlerinden, yukarıda anlatıldığı gibi akım kaynağının 50 cm uzağından ölçülmüştür. Kablodan geçen akımın çevreleyen ortam üzerindeki etkilerini görmek amacı ile su sıcaklığı da izlenmiştir. Şekil V.26'da kabloya uygulanan akım değerinin, iletken ve kılıf sıcaklıklarının ile ortam ve su sıcaklığı değerlerinin zamana bağlı değişimleri verilmiştir.

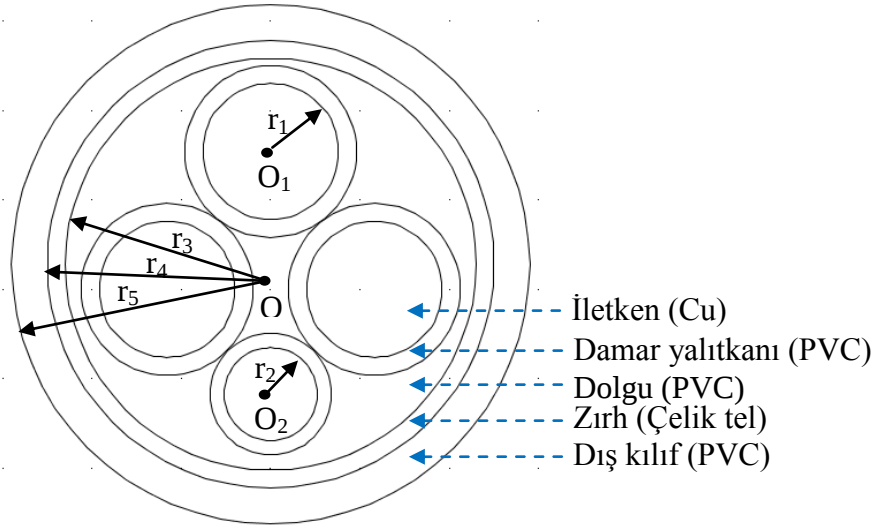


Şekil V.26 Kabloya uygulanan akımın, kablo bileşenleri ile ortam ve su sıcaklığının zamana bağlı değişimleri

Şekilden görüldüğü gibi yaklaşık iki saatlik bir çalışma süresinin sonunda iletken ve kılıf sıcaklığı değerleri kararlı duruma ulaşmıştır. Kararlı çalışma durumu için ortalama akım değeri yaklaşık olarak 135 A'dır. Kablonun önemli bir bölümünün su içinde kaldığı durumda elde edilen bu akım değeri, hava ortamında elde edilen değerden bir kaç amper daha fazladır.

V.3.2 Sayısal Çözüm

0.6/1 kV gerilimli güç kablosunun kesiti Şekil V.27'de gösterilmiştir. Şekilde O kablounun merkezini, O1 ve O2 sırasıyla faz ve nötr iletkenlerinin merkezlerini göstermektedir. Diğer kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri Tablo V.6'da verilmiştir.



Şekil V.27 0.6/1kV, 3x35/16 mm² PVC yalıtkanlı enerji kablosunun kesit görünümü

Problemin sayısal çözümü iki aşamalıdır. İlk aşamada hava ortamında, ikinci aşamada ise su içerisinde yer alan güç kablosu için sayısal model oluşturulmuş, yapılan karalı hal çözümü ile sıcaklık dağılımları belirlenmiştir.

Tablo V.6 Kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri

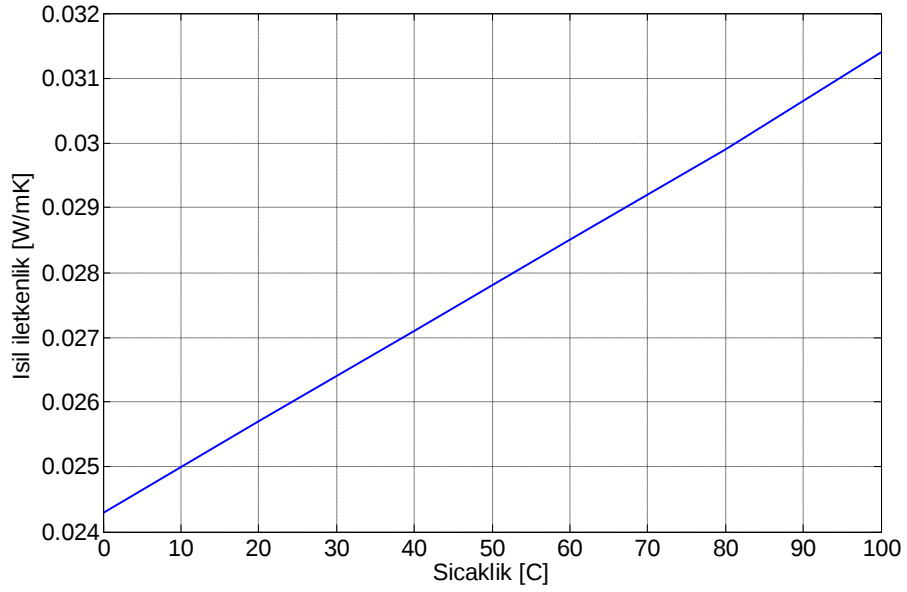
Kablo Bileşenleri	Yarıçap (mm)
Faz İletkenleri (r_1)	3,8
Nötr İletkeni (r_2)	2,6
Dolgu Malzemesi (r_3)	11,5
Zırh (r_4)	12,5
Dış Kılıf (r_5)	14,5

Hava ortamında yer alan güç kablosunda sıcaklık dağılımının belirlenmesinde ilk olarak problemin geometrisi oluşturulur. Problem yukarıda özellikleri belirtilen kabloun içinde bulunduğu 2x2m'lik bir çözüm bölgesinde tanımlanmıştır. Problem geometrisi oluşturulduktan sonra kablo bileşenlerinin ve çevreleyen ortamın elektriksel ve ısı özellikleri tanımlanır. Kablo bileşenleri ile çevreleyen ortamın ısı özellikleri Tablo V.7'de verilmiştir.

Tablo V.7 Kablo bileşenlerine ait ısı parametreleri

Kablo Malzemeleri	Yoğunluk ρ (kg/m ³)	Isı Kapasitesi c (J/kg·K)	Isıl İletkenlik k (W/K·m)
İletken (Bakır)	8700	385	400
Yalıtkan (PVC)	1760	385	0.1
Zırh (Çelik)	7850	475	44.5
Hava	1.205	1005	$k_{\text{hava}}(\theta)$

Havanın ısı iletkenlik değeri sıcaklıkla değışmektedir. Şekil V.28’den görüldüğü artan sıcaklığa bağı olarak havanın ısı iletkenliği artmaktadır [41].



Şekil V.28 Havanın ısı iletkenlik değeri sıcaklık ile değışimi

Güç kablosunun artan sıcaklığına bağı olarak bu durum, ısının çevreleyen ortama daha iyi dağılmasını sağlamaktadır. Tablo V.8’de verilen değeri kablo modeline dahil edilerek hava sıcaklığındaki değışime göre ara değeri bulunması sağlanmıştır.

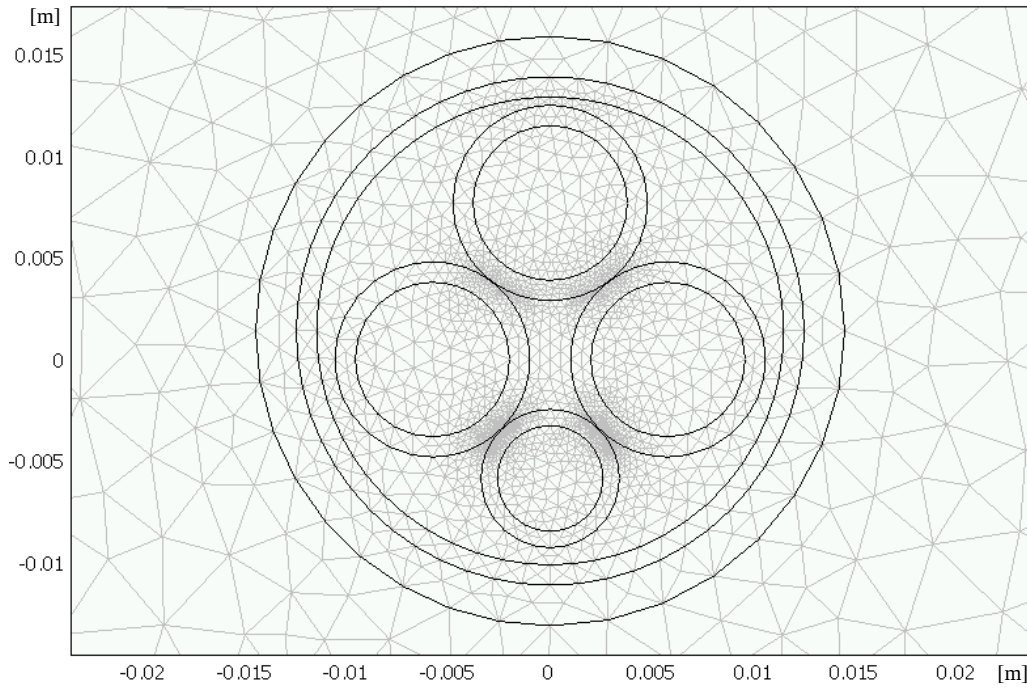
Tablo V.8 Havanın ısı iletkenlik değeri sıcaklıkla değışimi

Sıcaklık (°C)	Isıl İletkenlik (W/mK)
0	0.0243
20	0.0257
40	0.0271
60	0.0285
80	0.0299
100	0.0314

Mevcut kablo için en önemli ısı kaynağı kablo iletkenlerinden geçen akımın oluşturduğu omik kayıplardır. Bu kayıpların hesaplanmasında $P = J^2 / \sigma$ denklemi kullanılmış, iletken malzemelerdeki omik kayıplar “ $(132 / (\pi * 0.0038^2))^2 / \text{condCu}$ ”... (W/m³) şeklinde tanımlanmıştır. Bu denklemde yer alan *condCu* ifadesi iletken malzemenin elektriksel iletkenlik değeri olup, (IV.4) denkleminde belirtildiği gibi sıcaklık bağımlıdır.

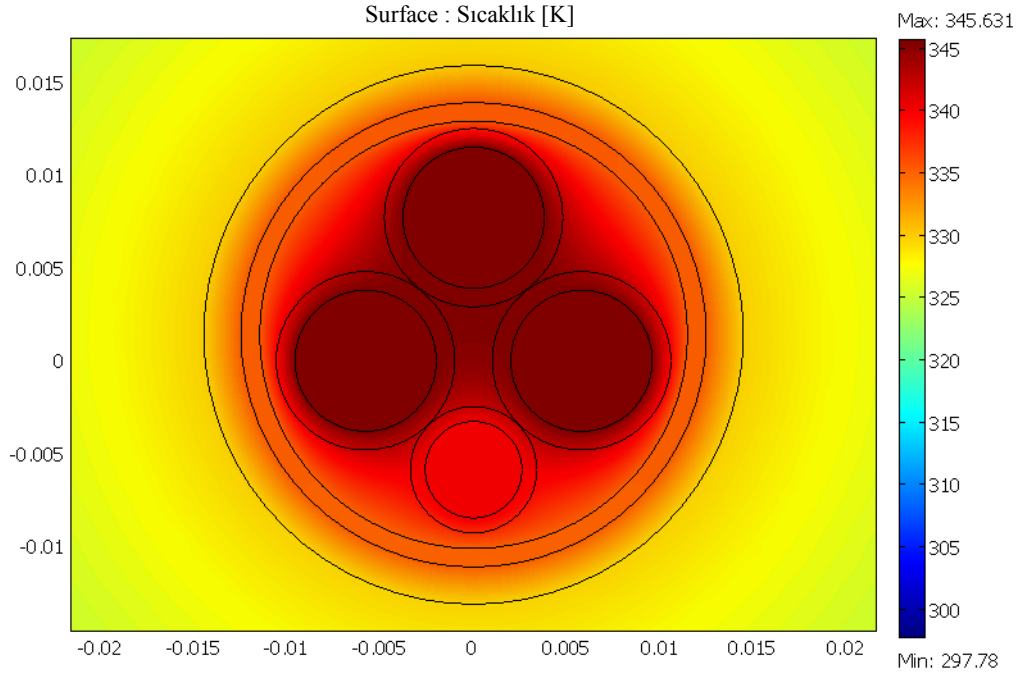
Sayısal çözümlemenin son adımında sınır koşulları belirtilir. Kablo kapalı bir ortam içerisinde yer aldığı için kablo yüzeyinde serbest taşınım mevcuttur. Isı transfer katsayısının hesaplanmasında (V.1) denkleminden faydalanılmış ve rüzgar hızının sıfır olduğu kabul edilmiştir. Çözüm bölgesinin dış sınırı sabit sıcaklık sınırı olarak tanımlanmıştır. Bu değer, deney anında ölçülen ortam sıcaklığı değerlerinin ortalaması olup 297.78°K olarak modele eklenmiştir.

Bütün bu tanımlamalardan sonra bölge elemanlara bölünür ve sayısal çözüm gerçekleştirilir. Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış $0.05 \times 0.03 \text{ m}$ boyutundaki bölümü Şekil V.29’da gösterilmiştir. Tüm bölge 7212 elemana bölünmüştür.

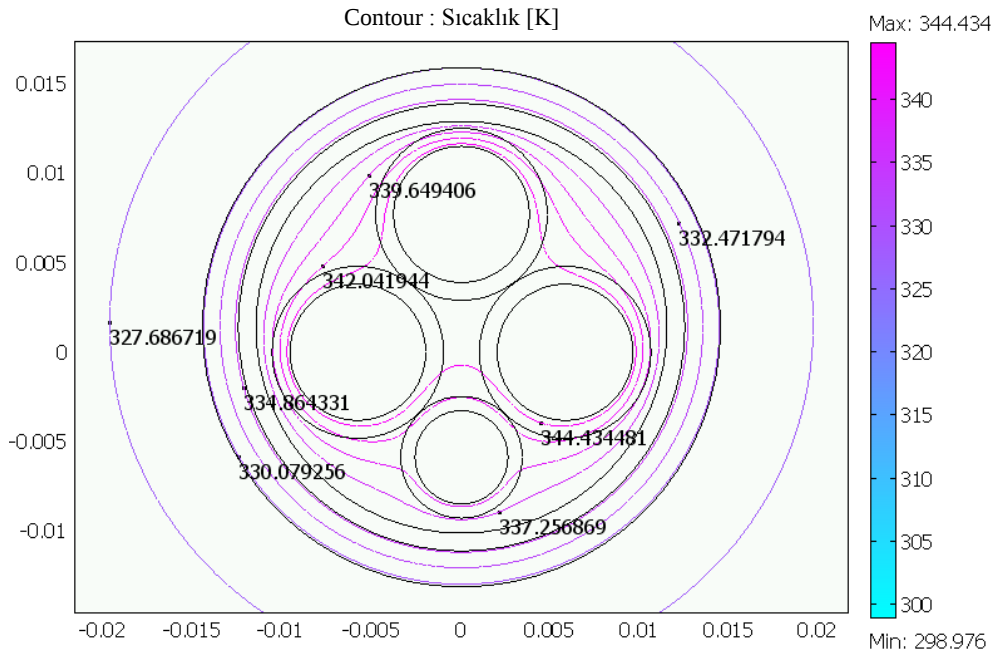


Şekil V.29 İncelenen problemin sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sayısal çözümleme sonucunda kablo ve çevresinde oluşan sıcaklık dağılımı Şekil V.30’da, eş sıcaklık çizgileri ise Şekil V.31’de gösterilmiştir.



Şekil V.30 Sıcaklık dağılımı



Şekil V.31 Eş sıcaklık çizgileri

Şekillerde kabloun dengeli yüklenmesi durumunda oluşan sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bu durumda nötr iletkeninden bir akım geçmeyecek, üç faz iletkeninden geçen akımların oluşturduğu ısı kablo içerisinde çevreleyen ortama yayılacaktır. Şekil V.30'da görüldüğü gibi kablo iletkeninin ulaştığı en yüksek sıcaklık değeri 345.631°K (72.4°C) olarak bulunmuştur. Kararlı hal durumunda

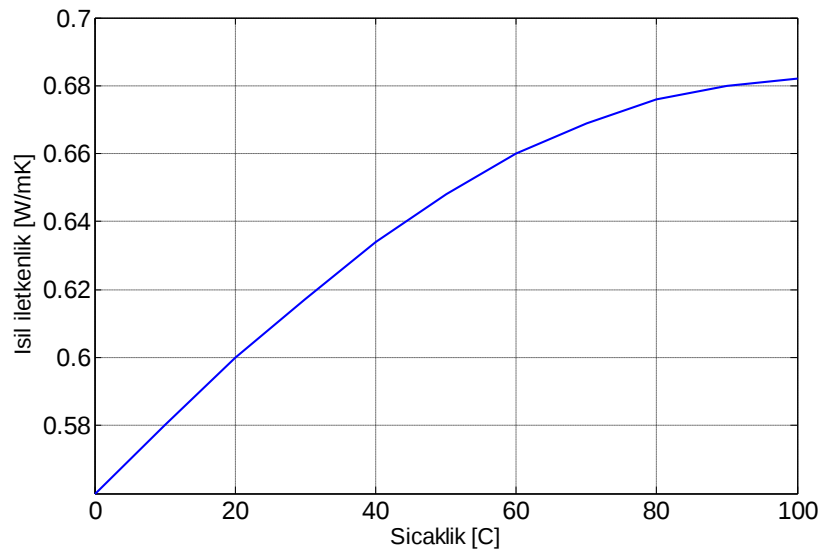
deneysel ölçümden elde edilen ortalama iletken sıcaklığı değeri 70.1°C'dir. Sayısal çözümleme ile dış kılıf sıcaklığı 329 °K (55.8°C) bulunmuştur. Deneysel ölçümden elde edilen ortalama kılıf sıcaklığı ise yaklaşık olarak 52°C'dir. Elde edilen sayısal çözümleme sonuçları deneysel sonuçlara oldukça yakındır.

Sayısal modelin ikinci aşamasında aynı güç kablosunun su içinde yer aldığı durum göz önüne alınmıştır. Bu durumda oluşturulan model, sadece kabloyu çevreleyen ortam özelliği dışında yukarıda açıklanan model ile aynıdır. Bununla birlikte sayısal modelde kablonun tamamının su içinde olduğu varsayılmıştır. Suyu ait ısı özellikler Tablo V.9'da verilmiştir.

Tablo V.9 Suyun ısı özellikleri

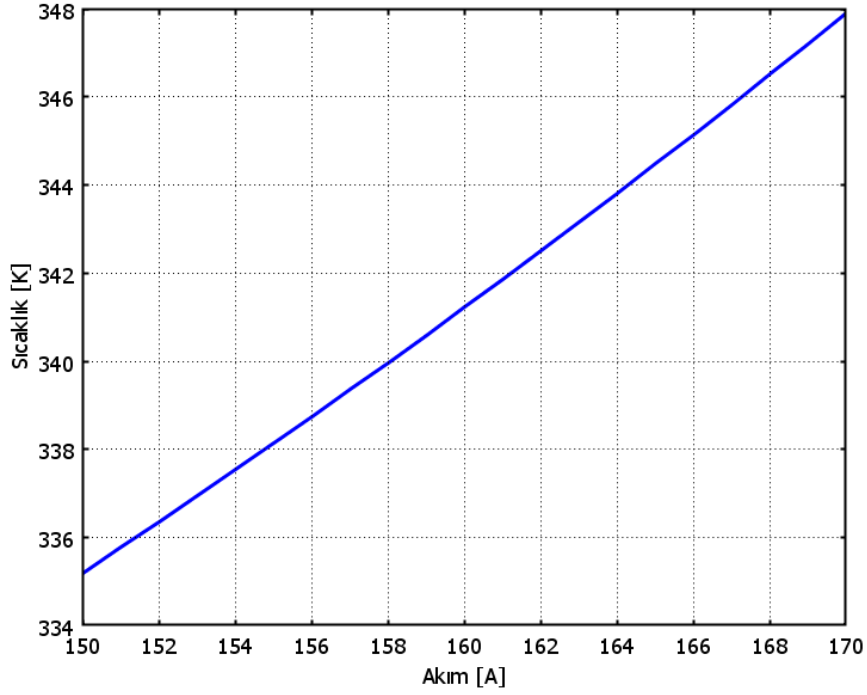
Kablo Malzemeleri	Yoğunluk ρ (kg/m ³)	Isı Kapasitesi c (J/kg·K)	Isıl İletkenlik k (W/K·m)
Su	997.1	4181	$k_{su}(\theta)$

Suyun ısı iletkenlik değeri de Şekil V.32'de görüldüğü gibi sıcaklık bağımlıdır [41]. Bu bağımlılık hava ortamında ki güç kablosunda açıklandığı şekilde modele dahil edilmiştir. Ek olarak su sıcaklığı, ölçülen değerlerin ortalaması hesaplanarak 24.1°C alınmıştır. Bu tanımlamalardan sonra çözüm bölgesi önce sonlu elemanlara ayrılmış daha sonra da sayısal çözüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal çözümleme sonucunda su ortamında döşenen güç kablosu için akım sıcaklık eğrisi Şekil V.33'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi geçen akıma bağlı olarak iletken sıcaklığı artmaktadır. PVC malzemesine ait 70°C'lik dayanım sıcaklığı dikkate alındığında kablonun akım taşıma kapasitesi 162.9A olarak bulunmuştur.



Şekil V.32 Suyun ısı iletkenlik değerinin sıcaklık ile değişimi

Bu değer laboratuvar koşullarındaki su ve ortam sıcaklığı değerleri dikkate alınarak, kablonun tamamının su içinde bulunduğu durumda ki akım taşıma kapasitesi değeridir. Su ortamında yapılan deneysel çalışmada kablonun iletken sıcaklığını 70°C değerine ulaştıracak akım değeri 135 A olarak bulunmuştur. Bu deneyde kablonun % 60'lık bölümü su içinde yer almaktadır.



şekil V.33 Su içine döşenmiş güç kablosu için akım sıcaklık ilişkisi

Bu nedenle yapılan deneysel çalışmanın, su altına döşenmiş g kablolarının gerçek davranışını vermesi beklenemez. Bununla birlikte su ortamında yapılan deneysel çalışmada, kablo iletken sıcaklığını 70°C değerine ulaştıracak akım değerinin hava ortamında yapılan deneye göre fazla çıkması, su içine döşenmiş g kablolarının, suyun havaya göre yüksek ısı iletkenliğinden dolayı, daha iyi soğuma imkanı bulunduğunu göstermektedir. Sayısal zmlleme sonucu da bunu doğrulamaktadır.

Sayısal zmlleme ile elektrik ve ısı etkenlerin bir arada ortak çözümü yapılmıştır. İletken malzemenin elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklık bağımlı olması, sayısal çözümlleme sonucunda iletken sıcaklığını yaklaşık 7°C artırmaktadır. Benzer şekilde çevreleyen ortamın ısı iletkenlik değeri sayısal modelde sıcaklığa bağlı bir büyüklük olarak tanımlanmıştır. Su ortamındaki güç kablosu için yapılan sayısal zmllemede, suyun ısı iletkenliğinin 20°C'de sabit değer olarak alındığı duruma göre iletken sıcaklığında yaklaşık 0.6°C'lik bir azalma görülmüştür. Bunun

sebebi artan kablo sıcaklığı ile kablo çevresindeki suyun ısı iletkenliğinin artması ve ısının kablodan çevreye ortama daha etkin bir şekilde dağılmasıdır.

V.4 0.6/1KV PVC KABLO MODELİ - II

V.4.1 Deneysel Çalışmalar

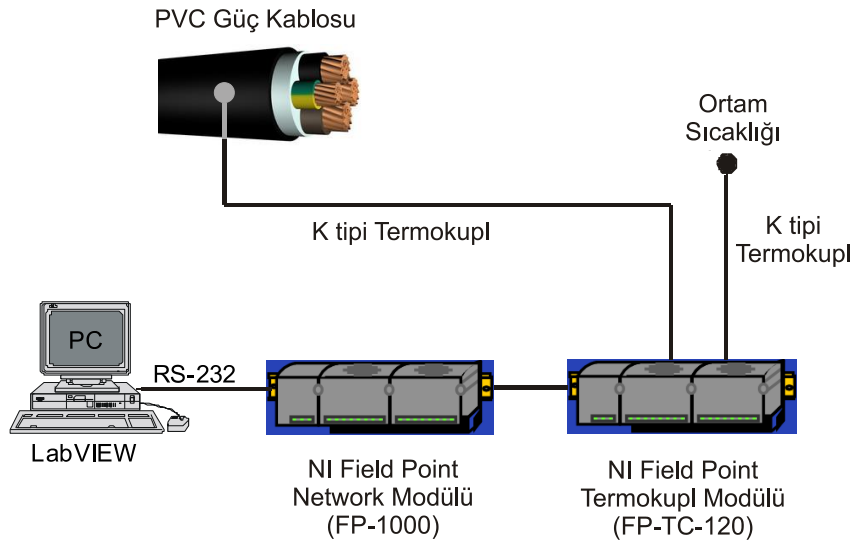
Güç kablolarında akım ve sıcaklık ilişkisini incelemek amacıyla yapılan diğer bir deneysel çalışmada, akım trafosu üretimi yapan bir fabrikanın elektrik besleme kablosu olarak kullanılan 0.6/1 kV gerilimli $3 \times 70/35 \text{ mm}^2$ 'lik çok damarlı PVC yalıtkanlı bir alçak gerilim enerji kablosu dikkate alınmıştır. Kablonun çalışma koşullarında içinden akan akımla beraber kılıf sıcaklığı takip edilmiş, elde edilen deneysel veriler kablonun sayısal modellenmesinde kullanılmıştır.

Bu bölümde modellenen kablonun bir önceki bölümde kullanılan kablodan tek farkı zırhının olmamasıdır. 33.1 mm dış çapa sahip PVC yalıtkanlı bu kablonun katalogunda, 20°C sıcaklıkta iletken DA direnci $0.268 \Omega/\text{km}$, izin verilen en yüksek işletme sıcaklığı 70°C olarak verilmektedir. Şekil V.27'ye uygun olarak kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri Tablo V.10'da verilmiştir.

Tablo V.10 Kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri

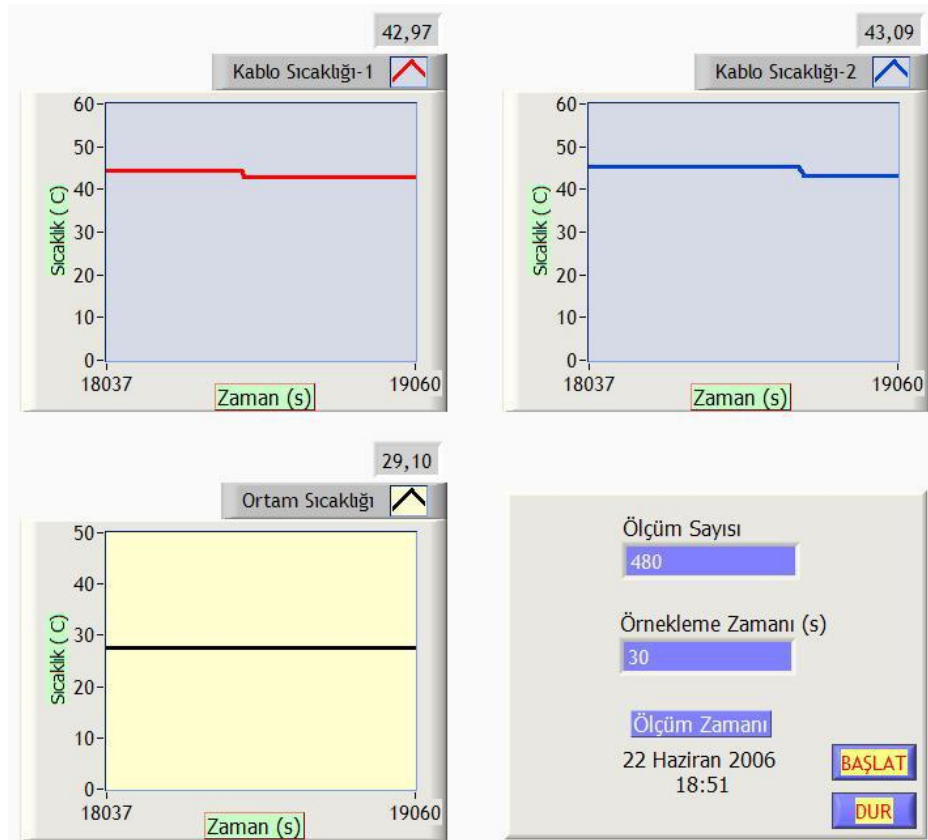
Kablo Bileşenleri	Yarıçap (mm)
Faz İletkenleri (r_1)	5
Nötr İletkeni (r_2)	3,4
Yalıtkan Malzeme (r_3)	13,4
Dış Kaplama (r_5)	16,5

Transformatörden çıkan güç kablosu yerin 30cm altında 10m uzunluğundaki bir kanal içerisinden gelip fabrikanın dağıtım merkezine girmektedir. Kablonun yüzey sıcaklığı ölçümü fabrikaya girdiği bu kapalı ortamda yapılmıştır. Şekil V.34'de fabrikada kurulan deney düzeneği görülmektedir. Kablo yüzey sıcaklığı ve hava sıcaklığı iki adet termokupl kullanılarak National Instruments firmasına ait Field Point termokupl modülü ile alınmış ve LabView programında yazılan bir arayüz ile bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil V.35).



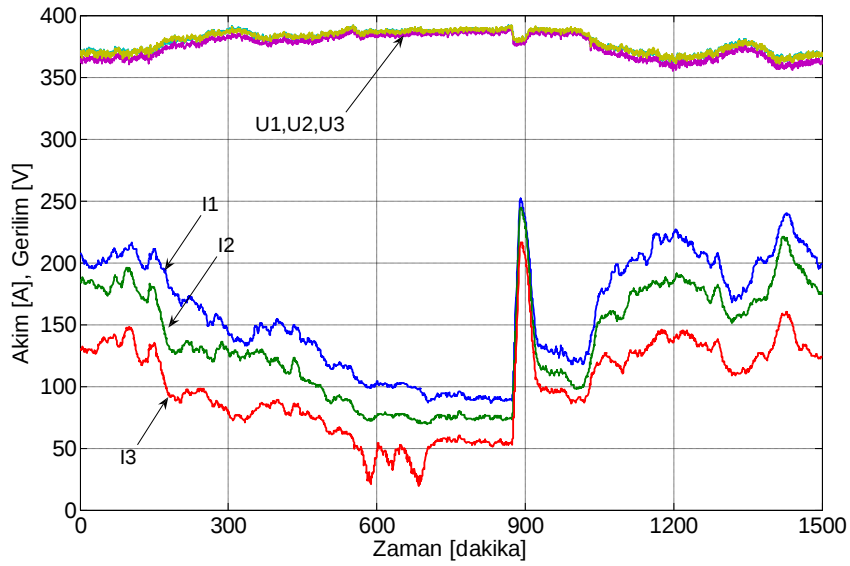
Şekil V.34 Deney Düzeneği

Ayrıca kabloya ait faz-nötr / faz arası gerilim değerleri ile hat akımı değerleri KBR marka Multilog Şebeke Analiz Cihazı kullanılarak çeşitli zaman aralıklarında (10s, 30s, 60s) kaydedilmiştir.

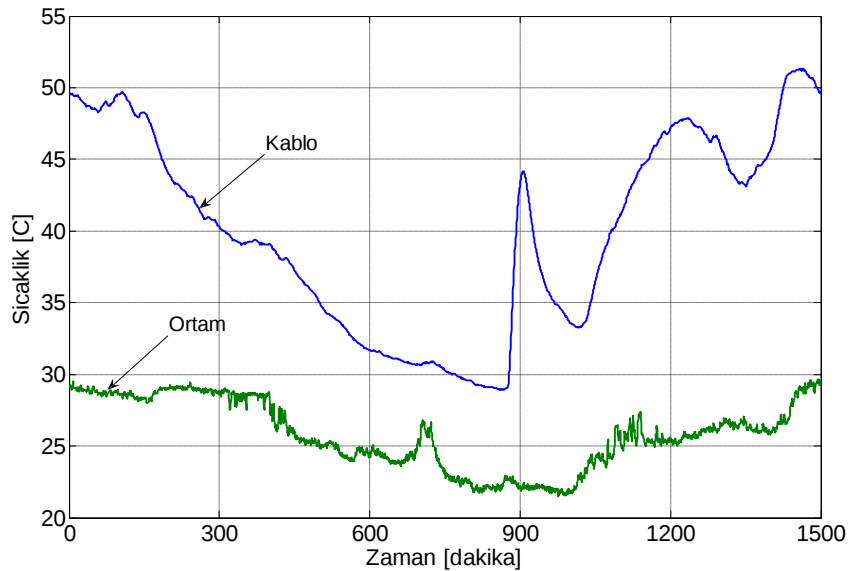


Şekil V.35 Sıcaklık analizinde kullanılan grafik arayüzü, LabVIEW ön paneli

PVC yalıtkanlı kablo 380V gerilimde işletilmektedir. Kablonun her bir fazındaki akım değerleri gün boyunca 50-250A değerleri arasında, kablo yüzey sıcaklığı ise 30-50°C değerleri arasında değişmektedir. Şekil V.36’da iki günlük periyotta ölçülen kablo akım ve gerilimi, Şekil V.37’de ise bu zaman diliminde ölçülen kablo yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığı değerleri görülmektedir. Her iki durumda ölçüm aralığı 30s olarak ayarlanmış ve 3000 adet veri kaydedilmiştir. Şekil V.36’dan görüldüğü gibi akımlar arasında bir dengesizlik söz konusudur. Bu durum kablo yüzey sıcaklığını da sürekli değiştirmektedir.



Şekil V.36 Deney boyunca ölçülen akım ve gerilim değerlerinin zamanla değişimi (22 Haziran 14:50 – 23 Haziran 15:50, 2006)

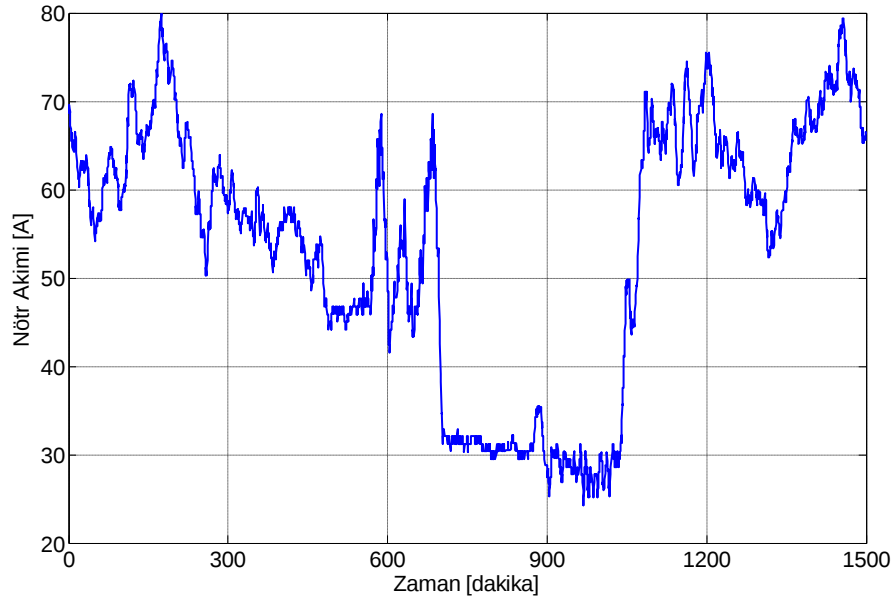


Şekil V.37 Deney boyunca ölçülen kablo yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığı değerlerinin zamanla değişimi (22 Haziran 14:50 – 23 Haziran 15:50, 2006)

V.4.2 Sayısal Çözüm

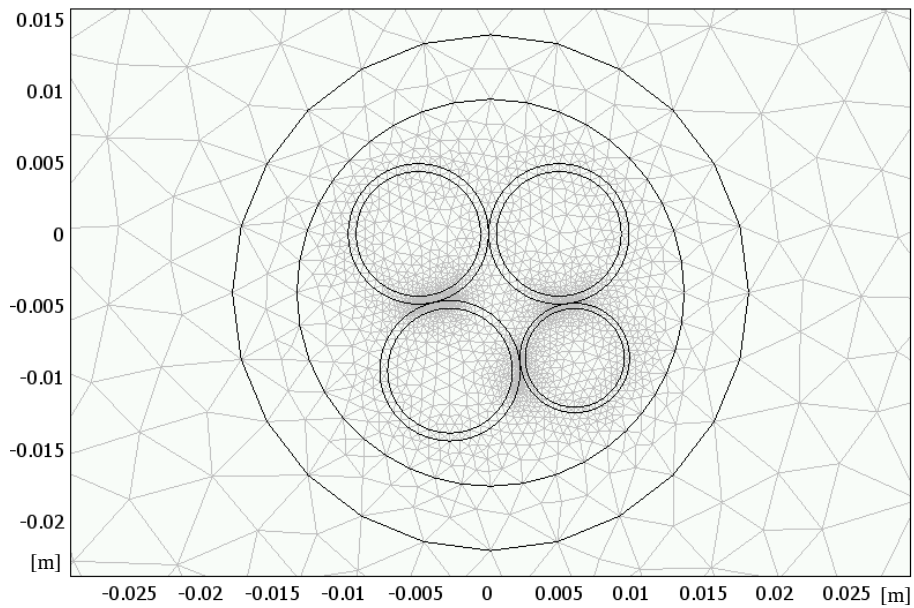
Kablo yüzey sıcaklığı yük akımına, ortam sıcaklığına ve kablo malzemeleri ile dış ortamın ısı iletkenliğine bağı olarak değişmektedir. Şekil V.36 ve Şekil V.37 birlikte değerlendirildiğinde kablo yüzey sıcaklığında özellikle yük akımının etkili olduğu söylenebilir. Hava ortamında döşenen kablolar eğer açıkta güneşin radyasyon etkilerine maruz kalmıyorsa yüzey sıcaklığı için birinci etken yük akımı olmaktadır. Oysa yeraltına döşenen kablolar için birinci etken toprağın ısı direncidir. Toprağın ısı direnci de mevsim şartlarına göre farklılıklar göstermektedir.

Kablo sıcaklık alanının sayısal olarak belirlenmesinde kullanılan kablonun elektriksel ve ısı parametreleri bir önceki bölümde tanımlanan parametreler ile aynıdır. Mevcut kablo için tek ısı kaynağı kablo iletkenlerinden geçen akımın oluşturduğu omik kayıplardır. Bu kayıpların hesaplanmasında $P = J^2/\sigma$ denklemi kullanılmıştır. Üç faza ait kablo iletkenlerinden geçen akım değerleri deneysel ölçümden elde edilmiştir. Akımların dengesiz olması nedeniyle nötr iletkeninden geçen akımda hesaplanarak dört damara ait akım yoğunluğu değerleri bulunmuş ve ısı kaynakları olarak modele dahil edilmiştir. Şekil V.38 deney süresince nötr iletkeninden geçen akım değerlerini göstermektedir.



Şekil V.38 Deney boyunca nötr iletkeninden geçen akımın zamanla değişimi

Problemin geometri ve sınır koşulları bir önceki bölümde tanımlanan koşullar ile aynıdır. Ortam sıcaklığı değeri için deneysel ölçümden elde edilen veriler kullanılmıştır.

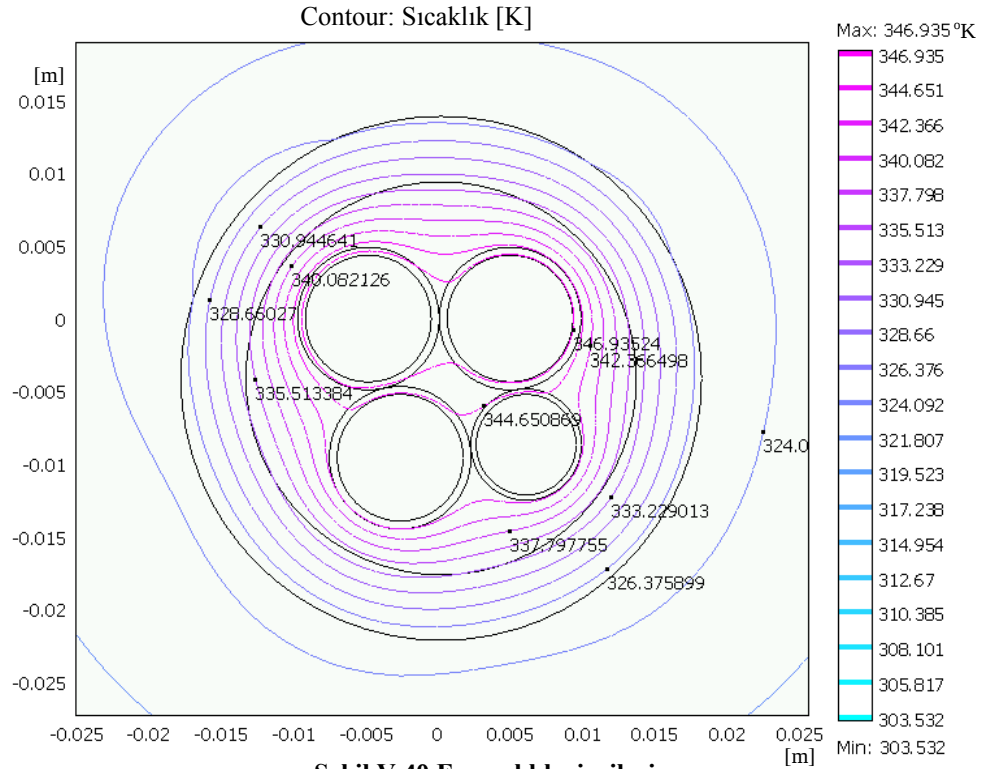


Şekil V.39 İncelenen problemin sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sayısal çözümleme sonucunda kablo ve çevresinde oluşan eş sıcaklık çizgileri Şekil V.40’da gösterilmiştir. Bu analizde Tablo V.11’de verilen akım değerleri ile ortam sıcaklığı değeri kullanılmıştır.

Tablo V.11 Analizde kullanılan akım ve ortam sıcaklığı değerleri

I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	Nötr Akımı (A)	Ortam Sıcaklığı (°C)
208	187	131	68.94	29.24

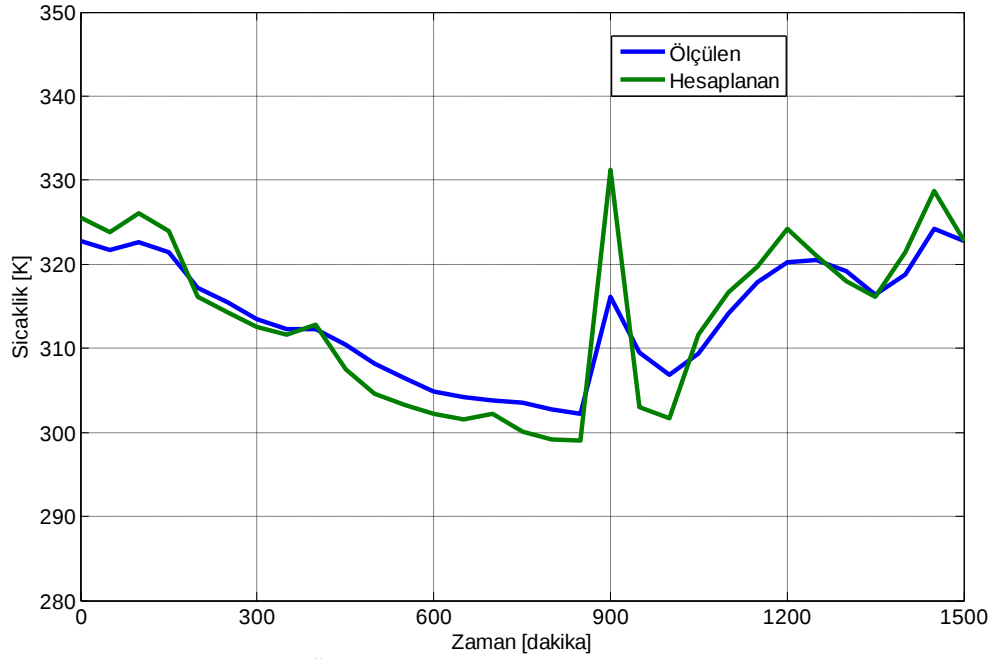


Şekil V.40'dan görüldüğü gibi kablo iletkenlerinden geçen akımların dengesiz olması nedeniyle kablo içindeki sıcaklık dağılımı düzgün değildir. Bu dağılımından kablo yüzey sıcaklığı 325.61°K (52.46°C) olarak bulunmuştur. Deneysel ölçümden elde edilen kablo yüzey sıcaklığı değeri ise 49.65°C olup sayısal çözüm sonucuna yakındır.

Kablo yüzey sıcaklığı değerinin sayısal çözümleme sonucunda belirlenmesi ile kablo bileşenlerindeki sıcaklık değerlerine ulaşılabilir. Kablo iletkenlerinden geçen akımların uygun seviyelerde olup olmadıklarını araştırmak için bu durum oldukça önemlidir. Mevcut kablo için ana yalıtkan malzemesi olan PVC'nin maksimum işletme sıcaklığı 70°C 'dir. Bu değer üstündeki sıcaklık değerleri PVC'nin ısı bozulmasına yol açabilecek ve sistemin fazlar arası ya da faz-toprak kısa devresi ile devre dışı kalmasını sağlayacaktır. Şekil V.40'da görüldüğü gibi ana yalıtkan malzeme içerisindeki sıcaklık değeri 346.93°K (73.78°C) olarak tesbit edilmiştir. Bu değer kablo yüzey sıcaklığının 49.65°C olarak ölçüldüğü durumda sonlu elemanlar metodu ile bulunan, kablonun ana yalıtkan malzemesi üzerindeki sıcaklık değeri olup PVC'nin maksimum işletme sıcaklığı değerinin üzerindedir. Yapılan sayısal hesaplama sonuçları ile fabrikada kullanılan güç kablosunun, deneyin yapıldığı gün

14:00 – 16:00 saatleri arasında, kablonun ana yalıtkan malzemesi için sınır sıcaklık değerinin üzerinde işletildiği tesbit edilmiştir.

Şekil V.36’da verilen akım değerlerinden 50 dakika aralıklı 30 değer alınarak, nötr akımı hesaplanmış ve ortam sıcaklığı değerleri de modele eklenerek kablodaki sürekli hal sıcaklık değerleri tesbit edilmiştir. Şekil V.41’de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanan değerler ölçülen değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

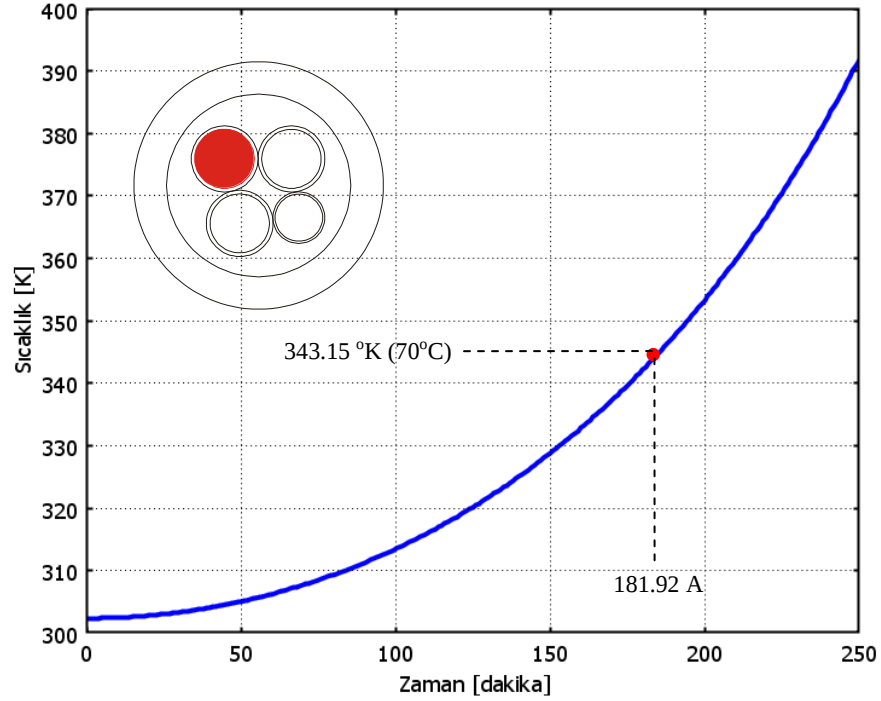


Şekil V.41 Ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri

Şekilden görüldüğü gibi sayısal çözümleme sonucunda elde edilen kablo yüzey sıcaklığı değerleri ölçüm sonuçlarını izlemektedir. Bununla birlikte özellikle akımdaki ani değişimlerin olduğu zamanlarda sayısal çözümleme ve ölçüm sonuçları arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Yapılan sayısal çözümleme her bir ölçüm noktasındaki değerler kullanılarak gerçekleştirilen sürekli hal çözümüdür. Oysaki gerçekte kablo iletkenlerinin akım değerleri bu noktalarda ani değişmekte ve kablo sıcaklığı sürekli hal değerine çıkamamakta veya inememektedir. Bu farkın diğer bir sebebi de ortam sıcaklığının kablodan yeterince uzakta tek bir noktadan ölçülmesi ve modele eklenmesi şeklinde ifade edilebilir.

Mevcut kablo için faz akımlarının dengeli olması durumunda iletkenlerin taşıyabileceği akım değerleri sayısal model kullanılarak hesaplanmıştır. Faz akımlarının dengeli olması durumunda nötr iletkeninden akım geçmeyecektir. Yapılan sayısal analizde üç faz iletkeninin her birinden 0 ile 250A arası akım

geçmesi sağlanmış ve kablo sıcaklığı takip edilmiştir. Şekil V.42’de iletkenlerden geçen akımlara bağlı olarak kablo içinde en fazla ısınan damarın sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil V.42 Kablo akım taşıma kapasitesinin belirlenmesi

Şekilden görüldüğü en fazla ısınan damar içi dolu olarak gösterilmiş ve bu damarın sıcaklığını 70°C değerine ulaştıracak akım değeri 181.92A olarak bulunmuştur. Bu değer kablonun deney koşullarında kullanılması durumunda ki akım taşıma kapasitesidir.

BÖLÜM VI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güç kablo sistemlerinin ısı analizi akım taşıma kapasitelerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Kablo sıcaklığı ise kablodan geçen akıma, kablonun yapısına ve kablonun imalinde kullanılan malzemelerin özelliklerine, kablonun yanına döşenen diğer kabloların döşeme şekillerine, döşendiği ortamın ısı özelliklerine ve kabloyu çevreleyen toprağın nemi gibi bir çok faktöre bağlıdır.

Akım yoğunluğuna ve elektrik alana bağlı elektriksel kayıpları ısı iletim denkleminde göz önüne alarak sıcaklık dağılımının incelendiği bu çalışmada, alışlagelmiş sadece sıcaklık koşulları içinde çözüm değil aynı zamanda elektriksel koşullarda göz önüne alınarak çözüm yapılmıştır.

Örnek olarak ele alınan 10 kV XLPE yalıtkanlı kabloda dielektrik kayıpları, akıma bağlı kayıplar yanında çok küçük kalacağı için ihmal edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan sıcaklık dağılımlarından kablonun akım taşıma kapasitesi değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar akımın sıcaklığı artırdığını, artan sıcaklığın ise akım taşıma kapasitesini düşürdüğünü göstermiştir. Bu durumda artan sıcaklıkla düşen akım nedeniyle bu defa sıcaklığın azalacağı dolayısıyla akımın yeniden artacağı ve sonunda sıcaklık ve akım bakımından kararlı değerlere ulaşılacağı görülmüştür.

Bir kablonun akım taşıma kapasitesi kabloyu çevreleyen ortamın, mevcut kablo örneğinde olduğu gibi örneğin toprağın, ısı iletkenliğine yakından bağlıdır. Çünkü kabloda oluşan ısının çevreye iletilebilmesinde bu direncinde rolü vardır. XLPE yalıtkanlı kablo modelinde, uygulamada karşılaşılan toprak ısı iletkenlikleri aralığında ısı iletkenlik değiştirildiğinde beklendiği gibi artan ısı iletkenliği ile kablonun akım taşıma kapasitesi artmakta, tersine azalan ısı iletkenlikle akım

azalmaktadır. Bu arada ısı iletkenliğin artması kabloda tutulan ısıyı dolayısıyla kablo sıcaklığını azaltmaktadır.

Kabloların yanlarında ve çevrelerinde, genellikle, diğer kablolar bulunur. Her bir kabloda ortaya çıkan ısı, komşu kabloların ısı alışverişini genelde olumsuz etkiler. XLPE yalıtkanlı kablo modelinde görüldüğü gibi üç adet kablo yan yana döşendiğinde ortadaki kablo, yanlardaki kabloların varlığı nedeniyle hem kendi ısını rahatça çevreye iletemediği için hem de yanındaki kablolardan ısı aldığı için daha fazla ısınır. Bu da ortadaki kablonun akım taşıma kapasitesini düşürür. Bu etkiyi azaltmak için kabloların birbirinden uzaklaştırılması, kablolar arası uzaklığın artırılması gerekir. Uzaklık değişiminin sıcaklık dağılımına etkisini görmek için yapılan incelemelerde, beklendiği gibi, artan uzaklıkla kablo sıcaklığında azalma ve akım taşıma kapasitesinde artma görülmüştür. İnceleme sonunda kablolar arasındaki uzaklığın en az bir kablo çapı kadar olmasının sıcaklık ve akım koşulları açısından uygun olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada ayrıca, tek bir XLPE yalıtkanlı kablo kullanılması durumunda, kablonun gömülme derinliğinin sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiş ve yer yüzeyine daha yakın döşenen kabloların akım taşıma kapasitelerinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum yeryüzeyindeki taşınım sınırından kaynaklanmaktadır. Gömülme derinliğinin azalması kabloların daha iyi soğumasını sağlamaktadır. Yine tek kablo örneğinde, rüzgar hızının kablo sıcaklığına etkisini incelemek için yapılan analiz, rüzgar hızındaki artmanın kablo sıcaklığını az da olsa düşürdüğünü göstermiştir. İstanbul için ortalama rüzgar hızı dikkate alındığında 0.5m derine gömülmüş bir kablo için sıcaklık değeri, 1m derine gömülmüş kabloya göre 2°C daha azdır. Bu durumda kablonun 11A daha fazla yüklenebileceği sayısal çözüm sonucundan elde edilmiştir. Buradan, kuvvetli rüzgara sahip bölgelerde, kablonun en yüksek akım taşıma kapasitesinde işletilebilmesi için rüzgar hızının ihmal edilemeyecek bir parametre olduğu görülmektedir.

Kabloların ömrü, çalışma koşullarına yakından bağlıdır. Özellikle sıcaklık, kablo ömrünü etkileyen baskın etkenlerden birisidir. Üç adet XLPE yalıtkanlı kablo modeli için, sıcaklıkla kablo ömrü arasında ilişki kurmaya yönelik bağıntılardan birisinde sayısal yöntemle bulunan sıcaklık değerleri kullanılarak sıcaklığa ve onun da bağlı olduğu büyüklüklere bağlı olarak kablo ömrü değişimleri incelenmiştir. Artan sıcaklık, kablo ömrünü kısaltmaktadır. Sıcaklığın düşük olması kablo ömrünü arttırdığı gibi akım taşıma kapasitesini de arttırmaktadır.

Kablolarda kullanılan çoğu dielektrik malzeme için kayıplar, elektrik alan, frekans ve sıcaklık değerlerine bağlıdır. Bununla birlikte bazı kablolarda, örneğin yağ emdirilmiş kağıt yalıtkanlı kablolar, dielektrik kayıplar kablonun içinde bulundurduğu nem miktarına bağlı olarak artış gösterebilir. 10 kV PILC yalıtkanlı kablo modelinde bu durum gösterilmiştir. Bu modelde, kablo yalıtkanının alternatif akım iletkenliği, bağlı görünür dielektrik sabitine ve oradan da sıcaklık ve nem değerlerine bağlı olarak tanımlanmıştır. Yapılan sayısal çözümleme ile, yalıtkan malzemenin yüksek nem içeriğine bağlı olarak, yalıtkan malzemenin iletkenlik değeri belirli sıcaklık seviyelerinden sonra hızla artmaya başlamaktadır. Artan iletkenlik değeri dielektrik kayıplarını artırmakta, bu durum da kablonun daha fazla ısınmasını sağlamaktadır. Bu model, gerilim seviyesi düşük olmasına rağmen, yalıtkan malzemenin nem içeriğinin artmasına bağlı olarak, kağıt yalıtkanlı kablolarda dielektrik kayıplarının önemli seviyelere çıkabileceğini göstermektedir.

Son olarak güç kablolarında akım sıcaklık ilişkisini incelemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla 0.6/1kV gerilimli, PVC yalıtkanlı enerji kablosunun hava ve su ortamında iletken ve kılıf sıcaklıkları takip edilmiştir. Kablonun sayısal modelinde giriş verisi olarak deneylerden elde edilen akım değeri ile ortam sıcaklığı değerleri kullanılmış, kablo ve çevreleyen ortamın sıcaklığa bağlı olarak değişen elektriksel ve ısı özellikleri de modele eklenerek, kablo bileşenleri ile çevreleyen ortamdaki sıcaklık dağılımı bulunmuştur. Deneysel ölçümden elde edilen sıcaklık değerleri, sayısal çözüm sonuçları ile uyushmaktadır.

Sonuç olarak kabloları, uygun ortam ve yerleşim düzeninde çalıştırmak, uygun çalışma koşullarında işletmek kablo ömrünü ve verimini arttırmakta bağlı olduğu sistemlerin güvenliğine ve ekonomisine olumlu katkıda bulunmaktadır. Bunun da yapılabilmesi, bu çalışmada olduğu gibi, kabloların çalışma koşullarına daha yakın modellenip, incelenip değerlendirilmesine bağlıdır.

KAYNAKLAR

- [1] IEC TR 62095, “Electric Cables – Calculations for current ratings – Finite element method” (2003).
- [2] Thue W.A., *Electrical Power Cable Engineering*, Marcel Dekker, New York (1999).
- [3] Leon, F., “Calculation of underground cable ampacity”, Technical Note, CYME International T&D, Canada (2005).
- [4] Luo, J., Liu, Y., Luo, Y., “Temperature calculation of power cable conductor in real time”, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, pp. 26-29, 23-26 October (2005).
- [5] Gela, G., Dai, J. J., Calculation of thermal fields of underground cables using the boundary element method”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1341-1347, October (1998).
- [6] Hanna, M.A., Chikhani, A.Y., Salama, M.M.A., “Modeling of underground cable systems in non-homogeneous soils”, Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 1, pp. 381-384, 9-12 Aug (1992).
- [7] Hanna, M.A., Chikhani, A.Y., Salama, M.M.A., “Thermal analysis of power cables in multi-layered soil, Part 2: Practical Considerations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 772-778, July (1993).
- [8] Hanna, M.A., Chikhani, A.Y., Salama, M.M.A., “Effect of geometry between cables on the heat dissipation from underground cable systems”, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 433-436, 14-17 Sept (1993).
- [9] Garrido, C., Otero, A.F., Cidras, J., “Theoretical model to calculate steady-state and transient ampacity and temperature in buried cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 667-678, July (2003).
- [10] Hwang, C.C., Jiang, Y.H., “Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems”, Elsevier Electric Power Systems Research, Vol. 64, pp. 159-164 (2003).
- [11] Kocar, I., Ertas, A., “Thermal analysis for determination of current carrying capacity of PE and XLPE insulated power cables using finite element method”, IEEE Melecon, Dubrovnik Croatia, pp. 905-908, May 12-15, (2004).
- [12] Li, H.J., “Estimation of thermal parameters and prediction of temperature rise in crane power cables”, IEE Proceedings Generation Transmission Distribution, Vol. 151, No. 3, pp. 355-360, May (2004).

- [13] Nahman, J., Tanaskovic, M., “Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method”, Elsevier Electric Power Systems Research, Vol. 61, pp. 109-117 (2002).
- [14] Hwang, C.C., Chang, J.J., Chen, H.Y., “Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements”, Elsevier Electric Power Systems Research, Vol. 54, pp. 75-81 (2000).
- [15] Anders, G.J., Radhakrishna, H.S., “Computation of temperature field and moisture content in the vicinity of current carrying underground power cables”, IEEE Proceedings, Vol. 135, No. 1, pp. 51-62, January (1988).
- [16] Millar, R.J., Lehtonen, M., “The effect of moisture migration, native soil environment and trough cement quality on the steady-state rating of HV power cables”, Tesla Report, No: 66, Helsinki University of Technology (2002).
- [17] Feyzi, M.R., Parker, A.M., “A Finite element analysis on the heating of power cables”, Journal of Electrical and Electronics Engineering Australia. Vol. 21, pp. 99-107 (2001).
- [18] Kim, S.W., Kim, H.H., Hahn, S.C., Lee, B.Y., Park, K.Y., Shin, Y.J., Song, W.P., Kim, J.B., Shin, I.H., “Coupled finite-element-analytic technique for prediction of temperature rise in power apparatus”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 921-924, March (2002).
- [19] Bitam-Megherbi, F., Osmani, S., Megherbi, M., “The moisture effect on dielectric losses of insulating paper”, International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, July 5-9 (2004).
- [20] Ul-Haq, S., Govinda Raju, G.R., “Influence of moisture adsorption in high temperature dielectrics”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE (2002).
- [21] Pacheco, R. C., Oliveira, J. C., Vilaca, A. L. A., “Power quality impact on thermal behaviour and life expectancy of insulated cables”, IEEE Harmonics and Quality of Power, Proceedings, Ninth International Conference, pp. 893-898 (2000).
- [22] Pacheco, R.C., Oliveira, J. C., Souto, O.C.N., “Insulated cable thermal and life expectancy estimation under non-sinusoidal operating conditions”, International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 672-677 (2000).
- [23] Al-Saud, M.S., El-Kady, M.A., Findlay, R.D., “Application of finite element sensitivities to power cable thermal field analysis”, Proceedings of the Sixth IASTED International Conference European Power and Energy Systems, Rhodes, Greece, June 26-28 (2006).
- [24] Al-Saud, M.S., El-Kady, M.A., Findlay, R.D., “Accurate assessment of thermal field and ampacity of underground power cables”, IEEE CCECE/CCGEI, Ottawa, pp. 651-656, May (2006).

- [25] Kovac, N., Sarajvec, I., Poljak, D., “Nonlinear coupled electric-thermal modeling of underground cable systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp. 4-14, January (2006).
- [26] ANDERS, G.J., *Rating of Electric Power Cables – Ampacity Calculations for Transmission, Distribution and Industrial Applications*, IEEE Press, New York (1997).
- [27] ANDERS, G.J., *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*, Wiley-IEEE Press, New Jersey (2005).
- [28] Kılıç, M., Yiğit, A., *Isı Transferi*, VİPAŞ A.Ş., Bursa (2000).
- [29] Moran, M.J., Shapiro, H.N., Munson, B.R., DeWitt, D.P., *Introduction to Thermal System Engineering*, John Wiley & Sons Inc. (2003).
- [30] Lienhard, J. H., *A Heat Transfer Text Book*, Third Ed., Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts (2003).
- [31] Malik, N.H., Al-Arainy, A.A., Qureshi, M.I., *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker Inc., New York (1998).
- [32] TS 11598 Türk Standardı, “Kablolar-Sürekli Akım Değerlerinin (%100 Yük Faktörü) Hesaplanması”, Nisan (1995).
- [33] Kalenderli, Ö., Kocatepe, C., Arıkan, O., *Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği*, Birsan Yayınevi, İstanbul (2005).
- [34] Gürdal, O., *Elektromanyetik alan teorisi*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara (2000).
- [35] Dehning, C., Wolf, K., *Why do Multi-Physics Analysis?*, Nafems Ltd, United Kingdom (2006).
- [36] Engdahl, G., Edin, H., Roland E., Hörnfeldt S., Schönborg N., *Electrotechnical modeling and Design*, KTH, October (2005).
- [37] Elektrik dağıtım şebekeleri enerji kabloları montaj (uygulama) usul ve esasları, Tedaş, Haziran (2005).
- [38] istanbul.meteor.gov.tr/marmaraiklimi.htm (Erişim tarihi : 23/4/2007)
- [39] İletkenler ve Enerji Kabloları, Türk Prysmian Kablo ve Sistemleri A.Ş.
- [40] TS EN 50393, Türk Standardı, “Kablolar - Beyan gerilimi 0,6/1,0 (1,2) kV olan dağıtım kablolarında kullanılan yardımcı donanımlar için deney metotları ve özellikler”, Nisan (2006).
- [41] Remsburg, R., *Thermal Design of Electronic Equipment*, CRC Press LLC (2001).
- [42] Hayt, W.H., Buck, J.A., *Engineering Electromagnetics*, McGraw-Hill (2000).

- [43] Grigsby, L.L., *Electric Power Engineering Handbook*, CRC Press (2001).
- [44] Bartnikas, R., *The Electrical Engineering Handbook*, CRC Press (2000).
- [45] Mathew, N.O., *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press (2001).
- [46] Zimmerman, W.B.J., *Process Modeling and Simulation with Finite Element Method*, World Scientific, Singapore (2005).
- [47] Zimmerman, W.B.J., *Multiphysics Modeling with Finite Element Methods*, World Scientific Publishing, Singapore (2006).
- [48] Penney, E., Çeviri Editörü Prof. Dr. Ömer Akın, *Diferansiyel Denklemler ve Sınır Değer Problemleri*, Palme Yayıncılık, Ankara (2006).
- [49] Karaoğlu, B., *Fizik ve Mühendislikte Matematik Yöntemler*, Seçkin Yayınevi (2006).

EK-A

Güç kablolarında sıcaklık dağılımının hesaplanması üzerine üçüncü bölümde verilen programa ait Matlab kodu ile tasarlanan arayüz aşağıda verilmiştir.

```
% Güç Kablolarında Sıcaklık Dağılımının Bulunması
% 18.02.2007

% Bu program, bir iletken ve bir yalıtkan malzemeden oluşan güç
% kablolarının sürekli çalışma durumundaki sıcaklık değerlerinin
% bulunmasında kullanılmaktadır. Hesaplamalarda kablonun dörtte
% birlik kısmı dikkate alınmıştır. Kablonun bu bölümü 8 eleman ve 9
% düğüm noktasından oluşan sonlu elemanlara bölünmüştür. İletkende
% üretilen ısı, iletken yüzeyinde ısı akısı olarak tanımlanmıştır.

% Parametreler
% -----
% ri ..... İletken yarıçapı [m]
% yk ..... Yalıtkan kalınlığı [m]
% theta .. Ortam sıcaklığı [K]
% rho .... Yalıtkan malzemenin ısıl öz direnç değeri [K m/W]
% isi .... İletken yüzeyindeki ısı akısı [W/m^2]
% tk ..... Yalıtkanın dış yüzeyinden çevreleyen havaya taşınım
%           ısı transfer katsayısı [W/m^2 K]
% rx ..... Yalıtkan malzemenin orta noktasının iletken merkezinden
%           uzaklığı
% ry ..... Kablonun yarıçapı

% Parametrelerin Girilmesi
% -----

clc
ri = input('İletken yarıçapı [m] : ');
yk = input('Yalıtkan kalınlığı [m] : ');
theta = input('Ortam sıcaklığı [K] : ');
rho = input('Yalıtkan malzemenin ısıl öz direnç değeri (K m/W) : ');
isi = input('İletken yüzeyindeki ısı akısı [W/m^2] : ');
tk = input('Taşınım ısı transfer katsayısı [W/m^2 K] : ');

% Yalıtkan malzemenin orta noktası ve kablo yarıçapının belirlenmesi

rx = ri + yk / 2;
ry = ri + yk;

% İletken malzeme içerisinde üretilen ısı miktarı sıfırdır.
% (Üretilen ısı iletken malzeme yüzeyinde ısı akısı olarak
% tanımlanmıştır)

W = 0;

% İletkenlik matrisi ve ısı üretim vektörünün oluşturulması

H = zeros(9);
K = zeros(9,1);
```

```

% Herbir eleman için;
% düğüm koordinatlarının ve genel düğüm numaralarının belirlenmesi
% sınırlarda var olan ısı akısı ve taşınım ile ısı transfer
% katsayılarının atanması

for i = 1:8
    switch i
        case 1
            x = [0          0          rx/sqrt(2)]
            y = [ry         rx         rx/sqrt(2)]
            ag = [1 4 5];
            h = [0 0 0];
            q = [0 0 0];
        case 2
            x = [0          rx/sqrt(2) ry/sqrt(2)]
            y = [ry         rx/sqrt(2) ry/sqrt(2)]
            ag = [1 5 2];
            h = [0 0 tk];
            q = [0 0 0];
        case 3
            x = [ry/sqrt(2) rx/sqrt(2) rx]
            y = [ry/sqrt(2) rx/sqrt(2) 0]
            ag = [2 5 6];
            h = [0 0 0];
            q = [0 0 0];
        case 4
            x = [ry/sqrt(2) rx          ry]
            y = [ry/sqrt(2) 0          0]
            ag = [2 6 3];
            h = [0 0 tk];
            q = [0 0 0];
        case 5
            x = [0          0          rx/sqrt(2)]
            y = [rx         ri         rx/sqrt(2)]
            ag = [4 7 5];
            h = [0 0 0];
            q = [0 0 0];
        case 6
            x = [rx/sqrt(2) 0          ri/sqrt(2)]
            y = [rx/sqrt(2) ri         ri/sqrt(2)]
            ag = [5 7 8];
            h = [0 0 0];
            q = [0 isi 0];
        case 7
            x = [rx/sqrt(2) ri/sqrt(2) ri]
            y = [rx/sqrt(2) ri/sqrt(2) 0]
            ag = [5 8 9];
            h = [0 0 0];
            q = [0 isi 0];
        case 8
            x = [rx/sqrt(2) ri          rx]
            y = [rx/sqrt(2) 0          0]
            ag = [5 9 6];
            h = [0 0 0];
            q = [0 0 0];
    end

% Isıl iletkenlik matrisinde kullanılan a ve b katsayılar matrisinin
% oluşturulması

```

```

a1 = x(3) - x(2);    b1 = y(2) - y(3);
a2 = x(1) - x(3);    b2 = y(3) - y(1);
a3 = x(2) - x(1);    b3 = y(1) - y(2);

A = [a1^2 a1*a2 a1*a3; a1*a2 a2^2 a2*a3; a1*a3 a2*a3 a3^2];
B = [b1^2 b1*b2 b1*b3; b1*b2 b2^2 b2*b3; b1*b3 b2*b3 b3^2];

% Üçgen elemanın kenar uzunluklarının hesaplanması

d1 = sqrt((x(1)-x(2))^2+(y(1)-y(2))^2);
d2 = sqrt((x(2)-x(3))^2+(y(2)-y(3))^2);
d3 = sqrt((x(3)-x(1))^2+(y(3)-y(1))^2);

% Üçgen elemanın alanının hesaplanması

aa = ones(3,1);
C = [aa x' y'];
alan = 0.5 * det(C);

% Isı İletkenlik Matrisi Hesabı

he = (1 / (4 * alan * rho)) * (A + B) + h(1) * d1 / 6 * ...
[2 1 0; 1 2 0; 0 0 0] + h(2) * d2 / 6 * [0 0 0; 0 2 1; 0 1 2] ...
+ h(3) * d3 / 6 * [2 0 1; 0 0 0; 1 0 2];

% Isı Üretim Vektörü Hesabı

ke = (W * alan / 3) * [1;1;1] + ((h(1) * theta + q(1)) * ...
d1 / 2) * [1;1;0] + ((h(2) * theta + q(2)) * d2 / 2) * [0;1;1] ...
+ ((h(3) * theta + q(3)) * d3 / 2) * [1;0;1];

% Her bir eleman için hesaplanan ısı iletkenlik matrisinin, genel
% ısı iletkenlik matrisine atanması

for m = 1:3
    for n = 1:3
        H(ag(m),ag(n)) = H(ag(m),ag(n)) + he(m,n);
    end
end

% Her bir eleman için hesaplanan ısı üretim vektörünün, genel ısı
% kapasite vektörüne atanması

for k = 1:3
    K(ag(k),1) = K(ag(k),1) + ke(k,1);
end

end

% Düşüm sıcaklıklarının hesaplanması

T = H \ K;

% Sonuçların yazdırılması
clc
disp('İletkenlik Matrisi'); H;
disp('Isı Kapasite Vektörü'); K;
disp('Düşüm sıcaklıkları'); t = 1:9; [t' T]

```

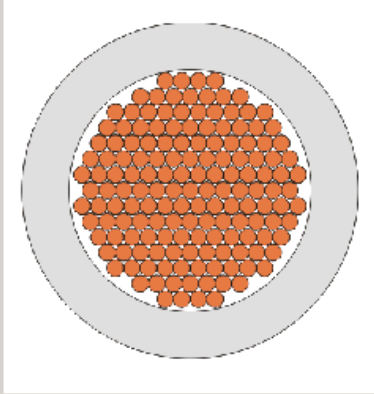
Güç Kablosunda Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sıcaklık Dağılım Hesabı

Değişkenler

İletken Yarıçapı (m)	Yalıtkan Kalınlığı (m)	Ortam Sıcaklığı (K)

Yalıtkan Malzemenin Isıl Öz direnci [K*m/W]	İletken Yüzeyindeki Isı Akısı [W/m^2]	Isı Tasınım Katsayısı [W/m^2*K]

Kablo Kesiti **Ag Yapısı**



ISI İLETKENLİK MATRİSİ

KAPASİTE VEKTORU

----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Çözüm

DÜĞÜM SICAKLIKLARI

----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Şekil A.1 Yazılan programa ait arayüz

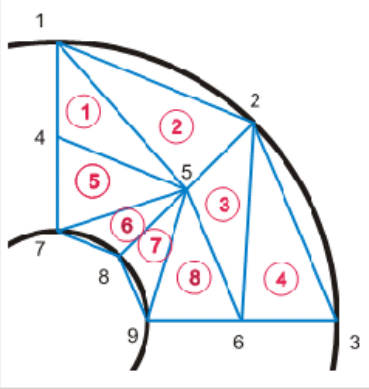
Güç Kablosunda Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sıcaklık Dağılım Hesabı

Değişkenler

İletken Yarıçapı (m)	Yalıtkan Kalınlığı (m)	Ortam Sıcaklığı (K)
0.002	0.0025	298.15

Yalıtkan Malzemenin Isıl Öz direnci [K*m/W]	İletken Yüzeyindeki Isı Akısı [W/m ²]	Isı Tasınım Katsayısı [W/m ² *K]
5	397.8874	22.75

Kablo Kesiti **Ag Yapısı**



ISI İLETKENLİK MATRİSİ

0.280793	0.0151967	0	0.256812	778e-017	0	0	0	0
0.0151967	0.561586	0.0151967	0	0.513625	334e-017	0	0	0
0	0.0151967	0.280793	0	0	0.256812	0	0	0
0.256812	0	0	0.539568	0.108786	0	-0.17397	0	0
778e-017	0.513625	0	0.108786	1.07914	0.108786	778e-017	0.347939	778e-017
0	334e-017	0.256812	0	0.108786	0.539568	0	0	-0.17397
0	0	0	-0.17397	778e-017	0	0.303779	-0.12981	0
0	0	0	0	0.347939	0	-0.12981	0.607559	-0.12981
0	0	0	0	778e-017	-0.17397	0	-0.12981	0.303779

KAPASİTE VEKTÖRÜ

11.6807	23.3614	11.6807	0	0	0	0.30453	0.60906	0.30453
---------	---------	---------	---	---	---	---------	---------	---------

Çözüm

DÜĞÜM SICAKLIKLARI

305.923	305.923	305.923	307.109	307.109	307.109	308.859	308.859	308.859
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Şekil A.2 Yazılan programa ait arayüz (Çözüm ekranı)

EK-B

0.6/1kV PVC yalıtkanlı güç kablosunun deney aşamasında kullanılan cihazlar, deney montajı ve sıcaklık ölçümü ile ilgili diğer resimler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil B.1 10kW'lık Kaynak Makinası



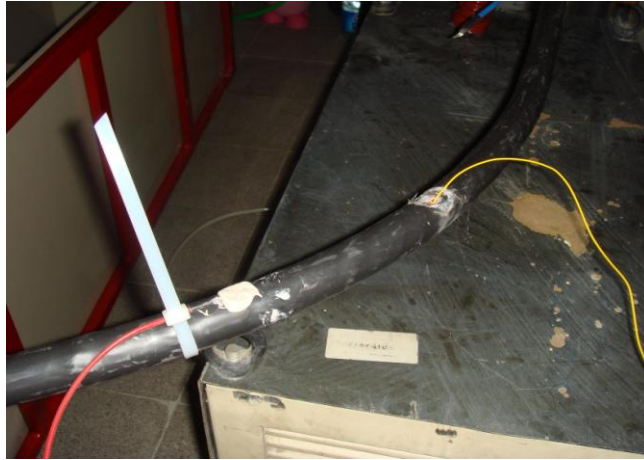
Şekil B.2 İki adet demir çekirdekli 1.5 sınıfı 150A'lık ampermetre



Şekil B.3 Çıkış akımının varyak yardımı ile ayarlanması



Şekil B.4 Sıcaklık ölçümünde kullanılan dijital termometre



Şekil B.5 İletken ve kılıf sıcaklıklarının ölçülmesi

ÖZGEÇMİŞ

Murat KARAHAN, 24.01.1972 yılında Kütahya'nın Emet ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kütahya'ya bağlı Simav ilçesinde, lise öğrenimini ise Kütahya Teknik Lisesi Elektrik bölümünde tamamladıktan sonra 1989 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'ne girdi. Buradan 1993 yılında mezun oldu. 1993-97 yılları arasında M.E.B. Karadeniz Ereğli Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nde teknik öğretmen olarak çalıştı. 26.02.1997 yılında Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Makineleri Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. 1996-1999 yılları arasında M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yaptı. 2000 yılında yine aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2003 yılında doktora çalışmalarını tamamlamak üzere Yüksek Öğretim Kurulunun 35. maddesi uyarınca Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne görevlendirildi. Halen Marmara Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmalarına devam etmekte olup, evli ve bir çocuk babasıdır.

İstanbul, 2007