

Yüksek Gerilim Kablolarının Farklı Döşeme Koşullarında Isıl Analizi

Thermal Analysis of High Voltage Cables In Case of Different Laying Condition

Celal KOCATEPE¹, Oktay ARIKAN¹, Celal Fadıl KUMRU¹, Alev AKBULUT,¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi

kocatepe@yildiz.edu.tr, oarikan@yildiz.edu.tr, cfkumru@yildiz.edu.tr, yalaz89@hotmail.com

Özet

Son yıllarda artış gösteren nüfus yoğunluğu ve yerleşim alanlarının genişlemesi sebebiyle, yüksek gerilim kablolarının kullanımı artmaya başlamıştır. Yüksek gerilim kablolarının genel olarak orta gerilim seviyelerinde kullanıldığı bilinmektedir. Ancak gelişen teknoloji ve ar-ge çalışmaları ile birlikte, iletim gerilimi seviyelerinde de üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle, hem iletim hem de dağıtım sistemleri içerisinde önemli bir role sahip olan kablolarının, enerji sürekliliğini ve sistem güvenilirliğini sağlayacak biçimde kullanılmaları gerekmektedir. Yüksek gerilim kablolarının işletme ömrünü ve sistem güvenilirliğini etkileyen en önemli parametrelerden biri, döşeme kanalı içerisindeki ısı dağılımıdır. Kablonun ana izolasyon tabakası, kablo bileşenleri arasında sıcaklığa en duyarlı olan tabakadır. Bu tabakanın, farklı döşeme koşullarındaki davranışının incelenmesi, işletme güvenirliliği açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, 154 kV'luk tek damarlı bir yüksek gerilim kablosunun farklı döşeme koşullarındaki ısı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, Finite Element Method Magnetics paket programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, döşeme koşullarındaki değişimlerin, kablounun ısı dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Abstract

The usage of high voltage cables is begun to rise by reason of enlarging settlements and increasing population in recent years. It is known that high voltage cables are generally used for medium voltages. However, along with the developing technology and r&d studies, it is also begin to produce and use at high voltages. Therefore, high voltage cables which have an important role in transmission and distribution system should be used by the way that enabling energy continuity and system reliability. One of the most important parameter which affects the service life and system reliability is the thermal distribution of the cable in the cable duct. The main insulation part of the cable is the most sensitive part to the heating among the other components. It is so important that analyzing the thermal behavior of the insulation layer in different laying condition. In this study, the thermal analyses of a 154 kV, single core high voltage cable in different laying condition is carried out. The analyses are carried out by using

the packaged program named Finite Element Method Magnetics (FEMM). As a result of realized study, it is confirmed that the different laying conditions have an important effect on the thermal distribution of the cable.

1. Giriş

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında sağladığı avantajlar sebebiyle, yüksek kullanım sahası bulunmaktadır. Günümüzde yapılan çalışmalar sonucunda, megavoltlar mertebesindeki yüksek gerilim değerlerine çıkılabilmektedir. Her geçen gün, gerilim seviyesini artırma çalışmaları sürmekte ve bu konuda araştırmalar yapılmaktadır [1]. Bu araştırmaların temel amacı, gerilim seviyesinin güvenli bir şekilde yükselterek ve güç kayıplarını en aza indirmek ve hattın taşıma kapasitesini arttırmaktır [1,2].

Genellikle havai hatlar ile sağlanan enerji iletimi ve dağıtımı, nüfus yoğun olduğu bölgelerde yüksek gerilim kabloları ile sağlanmaktadır [3]. Havai hatlara göre birçok üstünlüğü bulunan bu kabloların, işletme güvenirliliğinin olabildiğince yüksek tutulması gerekmektedir. Yüksek gerilim yeraltı kabloları, çoğunlukla yerleşim bölgelerinde kullanılmakta ve maliyetleri havai hatlara göre daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle, kabloların olabildiğince uzun süre ve güvenilir biçimde optimum kullanımı amaçlanmaktadır. Bu hedefe ulaşabilmek için, işletmeye alınacak yüksek gerilim kablosunun farklı koşullar altındaki davranışlarının incelenmesi büyük önem arz etmektedir [4,5].

Yüksek gerilim kablolarının basit yapısı, taşınan güç ve gerilim seviyesi arttıkça yerini, elektriksel zorlanmaların yanında, artan mekanik ve ısı zorlanmalara birlikte karmaşık bir yapıya bırakır. Yalıtkan ve toprak iyi ısı iletkenler olmadıklarından dolayı, yoğunluğunu kablo iletkeninden geçen akımın oluşturduğu kayıpların sebep olduğu ısı, kablodan etkin bir şekilde uzaklaştırılmadığı için ısı delinme ve erken yaşlanma riski oluşturur [6,7]. Bu sebeple, yüksek gerilim kablolarının ısı dağılımının belirlenmesinde, çevresel etmenler, döşeme şartları ve malzeme özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir [8,9,10].

Bu çalışmada, 154 kV nominal gerilimli, XLPE izoleli ve tek damarlı bir yüksek gerilim kablosunun, farklı toprak yapıları ve döşeme derinlikleri için nominal akımda ısı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, sonlu elemanlar metodunu

kullanan Finite Element Method Magnetics paket programı kullanılmıştır.

2. Yöntem

Yüksek gerilim kabloları da dâhil olmak üzere, üzerinde akım taşıyan her iletkende belirli oranlarda ısınma meydana gelir. Özellikle güç kablolarında ısınmaya sebep olan en büyük faktör, kablo iletkeni üzerinde meydana gelen güç kayıplarıdır. Kablolarda ısınmaya sebep olan etkenler,

- İletkende meydana gelen aktif güç kayıpları ($p=I^2 \cdot R$)
- Dielektrik kayıplar ($\tan \delta$)
- Zırh ve kılıf kayıpları

olarak bilinmektedir [6,3].

Herhangi bir yapı içerisindeki ısı dağılımını belirlenmesi için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler içerisinde basit geometriler için kullanılan en uygun metot, kablo iletkeni ile dış ortamın sıcaklık farkından dolayı oluşan ısı akışının, potansiyel fark sebebiyle akan akım akışına benzetimi metodudur. Her bir katmanın, ısı akışına karşı gösterdiği bir ısı direnci mevcuttur. Dolayısıyla, farklı sıcaklıklar arasındaki ısı akışı, farklı potansiyeller arasındaki elektrik akımına benzetilerek çözüm yapılmaktadır. Isıl akış,

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_T} \quad (1)$$

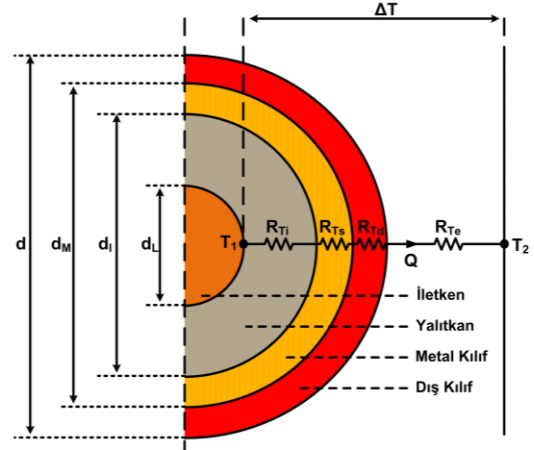
olarak ifade edilmektedir. Burada R_T , tabakanın ısı direncini, T_1 ve T_2 tabakanın uç noktalarındaki sıcaklık değerini ve Q ise ısı akışı ifade etmektedir. Isıl büyüklükler ile elektriksel büyüklükler arasındaki denklem benzerlikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge-1: Isıl büyüklükler ile elektriksel büyüklüklerin denklemleri

Elektriksel Büyüklükler	Isıl Büyüklükler
$\Delta U = U_1 - U_2$ [Volt]	$\Delta T = T_1 - T_2$ [°C, °K]
$R = \frac{\Delta U}{I}$ [ohm]	$R_T = \frac{\Delta T}{Q}$ [°K.m/W]
$U = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot L} \ln \frac{r_2}{r_1}$ [Volt]	$T = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \ln \frac{r_2}{r_1}$ [°K]

Burada ΔU , potansiyel farkını, ΔT , sıcaklık farkını ifade etmektedir. Bu benzetim yönteminde verilen tüm eşitliklerde, devre elemanlarının lineer olduğu kabul edilmektedir. Sistem içerisindeki ısı dirençlerinin sıcaklıkla değişmediği veya değişimin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu durumlarda, devre lineer kabul edilerek çözüm yapılabilir. Ancak devre parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişken olduğu durumlarda, problem nonlineer denklem sisteminin çözümünü gerektirmektedir [6].

Bir yüksek gerilim kablosunun, ısı devre elemanlarını gösteren kesiti Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Bir yüksek gerilim kablosunun ısı devre elemanlarını gösteren kesit görünümü

Burada, R_{Ti} , izolasyon tabakasının ısı direncini, R_{Ts} , metal kılıf yada ekranın ısı direncini, R_{Td} , dış kılıf ısı direncini ve R_{Te} ise kablonun içerisinde bulunduğu malzemenin direncini ifade etmektedir. Şekil 1'den de görüleceği üzere iletkenin sıcaklığı T_1 ve dış ortamın sıcaklığı ise T_2 'dir. Bu iki farklı sıcaklık değerinden dolayı, ısı dirençler üzerinden Q ısı akışı gerçekleşmektedir. d_L iletken çapı, d_i izolasyon malzemesinin dış çapı, d_M metal kılıf dış çapı ve d kablo çapı olmak üzere, Şekil 1'de verilen tek damarlı ve metal kılıflı kablonun toplam ısı direnci,

$$R_{toplam} = \frac{K_d}{2\pi} \ln \frac{d_i}{d_L} + \frac{K_s}{2\pi} \ln \frac{d}{d_M} \quad (2)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada K_d , yalıtkan malzemenin ve K_s ise dış kılıf malzemesinin ısı öz direnç değerlerini ifade etmektedir. Denklem 2'de metal kılıfın ısı direnci, yalıtkan malzemelere göre çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Ayrıca, tek damarlı ve toprak içerisinde gömülü bir kablonun ısı direnci denklem 3'te verilmiştir.

$$R_{Te} = \frac{K_G}{2\pi} \ln(2u) \quad (3)$$

Burada, K_G , toprağın ısı öz direncini ifade etmektedir. u değeri ise döşeme derinliğine ve kablo çapına bağlı bir sabit olup,

$$u = \frac{2h}{d} \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte h , toprak yüzeyinden kablo eksenine uzaklığı ve d ise kablonun dış çapını ifade etmektedir.

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak, toprak içerisinde bulunan tek damarlı ve metal kılıflı bir yüksek gerilim kablosunun ısı analizi gerçekleştirilebilmektedir. Kablo yapısı, döşeme şekli ve döşeme malzemesinin değiştiği durumlarda, tüm sistemin geometrisi de değiştiği için, ısı devrenin devre parametreleri de değişmektedir.

3. Analiz

Bu çalışmada, 154 kV nominal gerilimli ve tek damarlı bir yüksek kablosunun, farklı döşeme koşullarındaki analizleri, iki farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sabit döşeme derinliğinde, farklı toprak tipleri için değişen toprak ısı iletkenlik değerinin, kablodaki ısı dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkinci durumda ise, toprak ısı iletkenlik değeri sabit alınarak, farklı döşeme derinliklerindeki ısı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizi yapılan yüksek gerilim kablosuna ait teknik değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge-2: Analizi yapılan yüksek gerilim kablosunun teknik değerleri

Kablo Parametreleri	Değer
Nominal Gerilim	154 kV
İletken Kesiti	1x1000 mm ²
İletken Çapı	39 mm
XLPE İzolasyon Kalınlığı	22 mm
Kurşun Siper Kalınlığı	3 mm
Dış Kılıf Kalınlığı	11 mm
Toplam Çap	111 mm
İletkenin İzin Verilen Sıcaklığı	90 °C
DC Direnç (20 °C)	<0,0176 Ω/km
AC direnç (90 °C)	0,0258 Ω/km
Ağırlık	26600 kg/km

Gerçekleştirilen analizlerde ısı iletkenlik değeri kablo iletkeni için 400 [W/m.°K], XLPE için 0,2857 [W/m.°K], kurşun siper için 35,3 [W/m.°K] ve HDPE dış kılıf için 0,48 [W/m.°K] olarak belirlenmiştir.

3.1. Toprak Isıl Özdirenç Değişimi

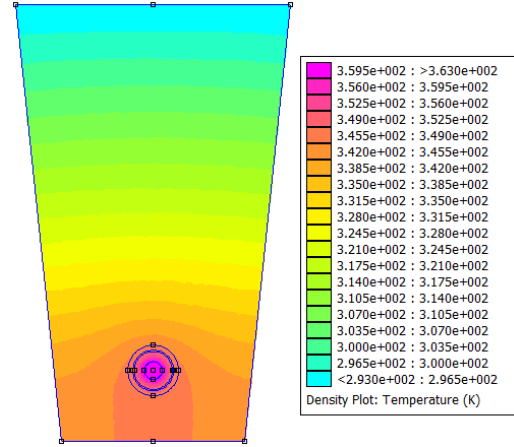
Farklı iklimlere sahip bölgelerdeki toprak yapısının değişikliği gösterdiği bilinmektedir. Dolayısıyla bu farklılık, kablodaki ısı dağılımı üzerinde etkili olmaktadır. Toprak yapılarına ait ısı iletkenlik değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Toprağın ısı iletkenlik değerinin derinliğe bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Ancak yapılan simülasyon çalışmasında, bu değişimin çok az olmasından dolayı, toprak ısı iletkenlik değerleri sabit kabul edilmiştir.

Çizelge-3: Toprağın ısı iletkenliğinin, toprak ve hava şartları ile değişimi

Isıl Özdirenç [m.°K/W]	Isıl İletkenlik [W/m.°K]	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

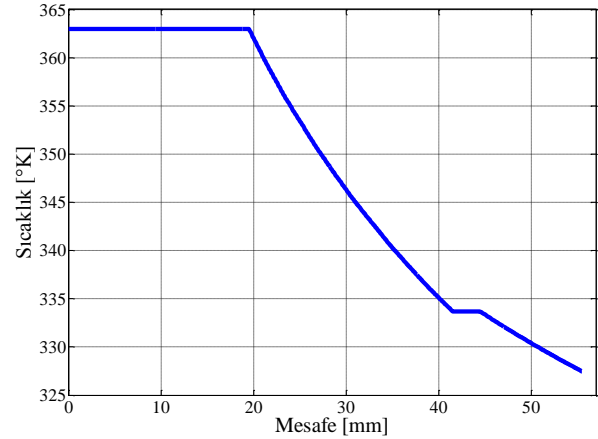
Örnek olarak ele alınan kablo için, gömülme derinliği h=80 cm ve toprak ısı iletkenlik değeri $K_t=0,7$ [m.°K/W] ve toprak yüzey sıcaklığı 293 °K alınarak elde edilen ısı dağılımı Şekil 2'de verilmiştir. Analizler kartezyen koordinat sisteminde gerçekleştirilmiştir. XLPE malzemenin maksimum sıcaklığı 363 °K ve minimum sıcaklığı ise 345,96 °K olarak

hesaplanmıştır. HDPE dış kılıfta ise 2,05 °K'lık bir sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir. HDPE kılıfın toprağa temas ettiği noktadaki en düşük sıcaklık değeri 343,91 °K olarak belirlenmiştir.



Şekil 2: h=80 cm ve $K_t=0,7$ [m.°K/W] için döşeme kanalı içerisindeki kablodaki sıcaklık dağılımı

Şekil 2'de görüldüğü üzere, yüksek sıcaklıktan alçak sıcaklığa doğru bir ısı akışı gerçekleşmektedir. Ancak bu akış değeri, kablodaki toprak yüzeyine yakın olan üst kısmında ve döşemeye yakın olan alt kısmında birbirinden farklıdır. Bu sebeple, her iki taraftaki ısı akışını da değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, toprak yapısının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini analiz edebilmek için, Çizelge 3'te verilen toprak ısı iletkenlik değerleri için de analizler gerçekleştirilmiştir.

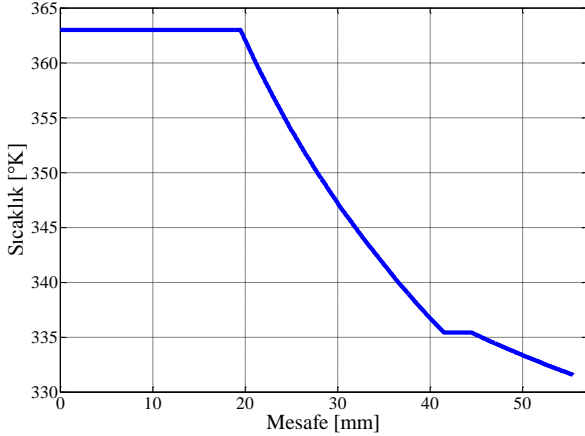


Şekil 3: h=80 cm ve $K_t=3$ [m.°K/W] için kablo içerisinde toprak yüzeyine yakın kısımdaki sıcaklık dağılımı

Şekil 3'de, kablo gömülme derinliği h=80 cm ve toprak ısı iletkenlik değeri $K_t=3$ [m.°K/W] alınarak kablo merkezinden yukarıya doğru kablo dış kılıfına kadar olan sıcaklık değişimi verilmiştir. XLPE malzemenin maksimum sıcaklığı 363 °K ve minimum sıcaklığı ise 357,55 °K olarak hesaplanmıştır. HDPE dış kılıfta ise 1,46 °K'lık bir sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir. HDPE kılıfın toprağa temas ettiği noktadaki en düşük sıcaklık

değeri ise 356,08 °K olarak belirlenmiştir. Kurşun kılıfın boyutlarının ve ısı iletkenlik değerinin XLPE ve HDPE malzemelere göre çok küçük olmasından dolayı, bu tabaka üzerinde herhangi bir sıcaklık değişimi olmamıştır. XLPE malzeme içerisindeki minimum sıcaklık değeri, $K_t=0,7$ [$m.^{\circ}K/W$] seçilen ilk duruma göre 11,59 °K artmıştır. Ayrıca, HDPE dış kılıfın toprağa temas ettiği nokta da ilk duruma göre 12,17 °K daha sıcaktır.

Aynı döşeme derinliği ve toprak ısı iletkenlik değeri için kablo merkezinden döşeme zeminine doğru kablo dış yüzeyine kadar olan sıcaklık dağılımı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: h=80 cm ve $K_t=3$ [$m.^{\circ}K/W$] için kablo içerisindeki döşemeye yakın alt kısımdaki sıcaklık dağılımı

Bu kısımda XLPE malzemenin en düşük sıcaklığı 358,32 °K ve HDPE dış kılıf tabakasının en düşük sıcaklığı ise 357,92 °K olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla aynı şartlar altında, kablunun alt kısmının üst kısmına göre ısı olarak daha çok zorlandığı görülmektedir. Çizelge 3'te verilen farklı toprak yapıları için h=80 cm döşeme derinliğinde gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge-4: Farklı toprak yapılarında ve h=80 cm döşeme derinliğindeki sıcaklık değerleri

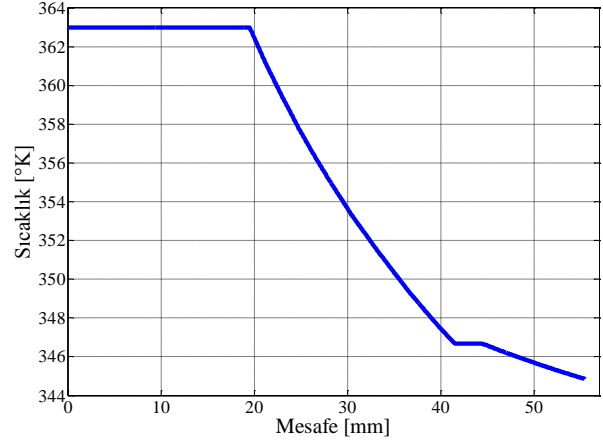
Malzeme	XLPE		HDPE	
	Maks. Sıcaklık [°K]	Min. Sıcaklık [°K]	Max. Sıcaklık [°K]	Min. Sıcaklık [°K]
1,4	363	345,96	345,95	343,91
1	363	349,77	349,76	348,29
0,5	363	355,58	355,57	354,88
0,3	363	358,32	358,32	357,92

Analiz sonuçlarına bakıldığında kablunun, ısı iletkenlik değerinin düşük olduğu kuru toprak içerisinde ısı olarak daha çok zorlandığı görülmüştür. Toprak yapısının nemli ve dolayısıyla ısı iletkenlik değerinin yüksek olduğu bölgelerde ise kablunun üzerindeki ısıyı daha kolay biçimde uzaklaştırdığı tespit edilmiştir.

3.2. Kablo Döşeme Derinliği Değişimi

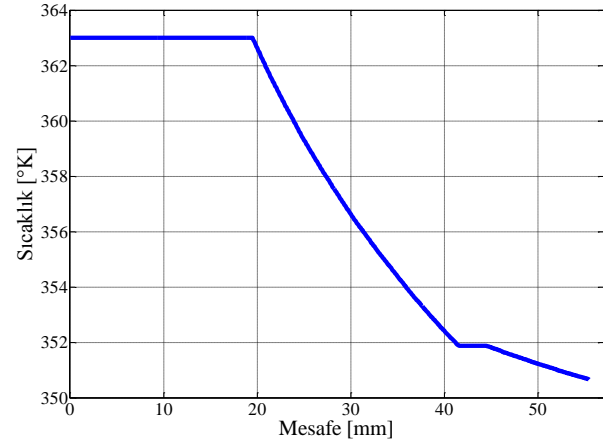
Bu bölümde, ısı iletkenlik değeri $K_t=1$ [$m.^{\circ}K/W$] olduğu durumda, kablunun farklı döşeme derinliklerinde bulunması

için analizler gerçekleştirilmiştir. Standart döşeme derinliği için h=80 cm, yüzeye yakın döşeme derinliği için h=60 cm ve yüzeyden daha uzak döşeme derinliği için h=100 cm olarak belirlenmiştir. Şekil 5'de, toprak ısı iletkenlik değeri $K_t=1$ [$m.^{\circ}K/W$] ve döşeme derinliği h=60 cm için kablo içerisindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 5: h=60 cm ve $K_t=1$ [$m.^{\circ}K/W$] için kablo içerisindeki sıcaklık dağılımı

XLPE malzemenin maksimum sıcaklığı 363 °K ve minimum sıcaklığı ise 346,67 °K olarak hesaplanmıştır ve üzerinde 16,33 °K'lık sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir. HDPE dış kılıfta ise 1,83 °K'lık bir sıcaklık düşüşü meydana gelmiştir. HDPE kılıfın toprağa temas ettiği noktadaki en düşük sıcaklık değeri 344,84 °K olarak belirlenmiştir. Döşeme derinliğinin h=60 cm olduğu durumdaki sıcaklık dağılımı, h=80 cm deki dağılıma göre daha iyidir ve kablo ısı olarak daha az zorlanmaktadır.



Şekil 6: h=100 cm ve $K_t=1$ [$m.^{\circ}K/W$] için kablo içerisindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 6'da, toprak ısı iletkenlik değeri $K_t=1$ [$m.^{\circ}K/W$] ve döşeme derinliği h=100 cm için kablo içerisindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Kablunun daha derine gömülmesiyle birlikte, XLPE üzerindeki minimum sıcaklık değeri 351,88 °K değerine yükselmiştir. HDPE malzemenin maksimum sıcaklık değeri 351,88 °K ve minimum sıcaklık değeri ise 350,66 °K olarak belirlenmiştir. Bu durum, kablunun döşeme derinliği arttıkça ısı olarak daha çok zorlandığını göstermektedir. Bu sebeple, kabloların yüzeye yakın olarak gömülmesi, ısı

dağılım ve kablo ömrü bakımından avantaj sağlamaktadır. Ancak yüzey seviyesine yaklaştıkça, kablunun maruz kalacağı mekanik zorlanma ve çevresel faktörler kablo için risk oluşturmaktadır. Dolayısıyla, yüzeye yakın olarak döşenen kabloların hasar alma ihtimalleri de artmaktadır. Çizelge 5’de, $K_f=1$ [$m.^{\circ}K/W$] ısıl öz dirence sahip toprakta, farklı döşeme derinliklerinde bulunan yüksek gerilim kablosunun, XLPE ve HDPE tabakalarındaki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri verilmiştir.

Çizelge-4: $K_f=1$ [$m.^{\circ}K/W$] için farklı döşeme derinliklerindeki sıcaklık değerleri

Malzeme	XLPE		HDPE		
	Döşeme Derinliği [cm]	Maks. Sıcaklık [$^{\circ}K$]	Min. Sıcaklık [$^{\circ}K$]	Max. Sıcaklık [$^{\circ}K$]	Min. Sıcaklık [$^{\circ}K$]
	60	363	346,67	346,67	344,84
	80	363	349,77	349,76	348,29
	100	363	351,88	351,87	350,66

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 154 kV’luk, tek damarlı bir yüksek gerilim kablosunun farklı döşeme koşullarındaki ısı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sabit döşeme derinliği ve değişken toprak yapısı için gerçekleştirilen analizlerde, topraktaki nem artışının kabloyu olumlu etkilediği görülmüştür. Toprağın kuru olması durumunda ise, kablo tabakalarındaki minimum sıcaklık değerlerinin yüksek olduğu ve kablunun ısı olarak daha çok zorlandığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, kablo döşemesi yapılacak olan bölgelerdeki toprak yapısının, iyi bir ısı dağılımı sağlanması için dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle çok yağış almayan kuru bölgelerde, kablo içerisindeki ısı zorlanmanın, kablo ömrünü ciddi anlamda etkileyeceği unutulmamalıdır. Sabit toprak yapısı ve değişken döşeme derinliği için yapılan analizlerde ise döşeme derinliği arttıkça, kablodaki ısı zorlanma artmıştır. Toprak yüzeyine daha yakın olarak gerçekleştirilen analizlerde, tabakalardaki ısının daha rahat bir şekilde kablo üzerinden atıldığı belirlenmiştir. Bu sebeple kablo derinliğinin yüzeye yakın olması ısı dağılımı bakımından avantaj sağlamaktadır. Ancak yüzeye yaklaştıkça artan mekanik zorlanmalar ve çevresel etmenler, kablo için arıza riski oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, yüksek gerilim kablolarındaki ısı dağılımının farklı döşeme koşullarında incelenmesi, kablo ömrü, sistem güvenilirliği ve enerji sürekliliği açısından önem arz etmektedir. Döşeme şartlarının, aynı gerilim seviyesindeki tüm kablolar için standartlaştırılması yerine, kablo akımı, kablo yapısı ve ortam koşulları da dikkate alınarak yapılması gerekmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda, döşeme malzemesi, yüzey sıcaklığı ve faz sayısındaki değişimlerin, kablodaki sıcaklık dağılımı ve kablo ömrü üzerindeki etkileri incelenebilir.

5. Kaynaklar

- [1] Kalenderli, Ö., Kocatepe, C., Arkan, O., *Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği*, Birsen Yayınevi, 2005.
- [2] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J., *High Voltage Engineering Fundamentals, Second Edition*, Newnes, 2000.
- [3] Karahan, M., *Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Güç Kablolarının Isıl Analizi ve Akım Taşıma Kapasitesinin Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [4] Freitas, D. S, Prata, A. T., Lima, A. J., “Thermal Performance of Underground Power Cables With Constant and Cyclic Currents In Presence Of Moisture Migration In The Surrounding Soil”, *IEEE Transactions of Power Delivery*, Vol 11, No 3, July, 1996.
- [5] Liang, Y., “Steady-state Thermal Analysis of Power Cable Systems in Ducts Using Streamline-upwind/Petroc-Galerkin Finite Element Method”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulations*, Vol 19, No 1, February, 2012.
- [6] Karaca, G., “Kablolarda Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi”, YL Tezi, İTÜ, 2006.
- [7] Garniwa, I., Burhani, A., “Thermal Incremental And Time Constant Analysis On 20 kV XLPE Cable With Current Vary”, *8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, pp 566-569, 2006.
- [8] Koçar, I., Ertaş, A., “Thermal Analysis for Determination of Current Carrying Capacity of PE and XLPE Insulated Power Cables Using Finite Element Method”, *IEEE Melecon*, May 12-15, 2004.
- [9] Anders, G. J., Radhakrishna, H. S., “Power Cable Thermal Analysis With Consideration of Heat and Moisture Transfer in the Soil”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol 3, No 4, pp 1280-1288, October, 1988.
- [10] Al-Saud, M. S., El-Kady, M. A., Findlay, R. D., “A Novel Finite Element Optimization Algorithm with Applications to Power Cable Thermal Circuit Design”, *Power Engineering Society General Meeting*, 2007.
- [11] Kalenderli, Ö., *Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi*, İTÜ, 1997.