

Ortam Koşullarının Yeraltı Kablolarının Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi

Effects of Ambient Conditions on Temperature and Ampacity of Underground Cables

B. Küçükaydın¹, O. Arıkan²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği
Kırklareli Üniversitesi
bariskucukaydin@klu.edu.tr

²Elektrik Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi
oarikan@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışmada gömülü oldukları ortam koşullarına bağlı olarak yüksek gerilim yeraltı kablolarının ısı performansını ve akım taşıma kapasitesini analiz edilmiştir. Kablo iletkeninde oluşan ısıya dağılmasına etki eden kabloların gömülme derinliği, yatak malzemesinin ısı iletkenliği ve toprağın yüzey sıcaklığı gibi termal etkenler göz önünde bulundurularak farklı durumlar irdelenmiştir. Analizlerde 380 kV' luk, bakır iletkenli, XLPE yalıtımlı, kurşun kılıflı ve HDPE dış kılıfa sahip yüksek gerilim yeraltı kabloları gözönüne alınmıştır. Modelleme ve analiz çalışmalarında "Comsol Multiphysics" programı kullanılmıştır.

Abstract

In this study, thermal performance and current-carrying capacity of underground cables are analyzed with related to ambient conditions of buried cables. The thermal parameters such as buried depth of cables, thermal conductivity of bedding material and ground surface temperature which affect to the conduction of heat that generates by cable conductor are investigated for different situations. In the analyses, 380 kV high voltage power cables that have copper conductor, XLPE insulation, lead sheath and HDPE outer sheath are used. "Comsol Multiphysics" programme is utilized for modelling and analyzing of system.

1. Giriş

Yeraltı kablolarının termal açıdan izlenmesi akım taşıma kapasitesinin (ampasite) belirlenmesi bakımından önemlidir. Güç kablolarının akım taşıma kapasitesi izolasyon malzemesinin dayanabildiği maksimum işletme sıcaklığına göre belirlenmelidir[1]. Akım taşıma kapasitesinin doğru hesaplanması, bir güç kablosunun maksimum verimle kullanılabilmesine olanak sağlar. Yeraltı kabloları üretim ve döşenme maliyetleri açısından havai hatlara göre çok daha

pahalı sistemler olduğundan, iletebilecekleri en yüksek akım değerinde işletilmelidirler[2].

Kabloların akım taşıma kapasitesi sadece kablo yapısı ve kabloda kullanılan malzemelere bağlı değildir, aynı zamanda döşenme biçimine ve ortam koşullarına da bağlıdır[3]. Bu durum da analizlerde birçok ısı parametrenin incelenmesi gerekliliğini ortaya koyar. Bunlardan bazıları; toprağın ve yatak malzemesinin termal iletkenliği, toprağın yüzey sıcaklığı, kabloların döşenme derinliği, döşenme biçimi olarak kabloların boru içerisine alınması veya direkt olarak toprağa gömülmesi olarak sayılabilir.

Kabloların ısı açıdan incelenmesi üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Leon, farklı termal direnç değerlerine sahip yatak malzemesinin miktarını, boyutunu ve yerleşimini değiştirerek kablo ampasitesindeki değişimi incelemiştir[4]. Olsen, toprağın nem oranı ve ısı kapasitesindeki değişimlere bağlı olarak güç kablolarının sıcaklıklarının dinamik olarak hesaplanabilmesi için bir algoritma geliştirmiştir[5]. Paralel yerleştirilmiş yeraltı kablolarının farklı yüklenme durumları ve çeşitli döşenme biçimleri için deneysel ve simülasyon olarak ısı analizi yapılmıştır[6]. Dış ısı kaynağı, kablolar arası açıklık ve kablo sayısının ampasiteye olan etkisi araştırılmıştır[7].

Bu çalışmada kabloların gömülme derinliği, yatak malzemesinin ısı iletkenliği ve toprak yüzey sıcaklığı gibi ısı parametreleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Modelleme ve analizler 380 kV' luk, bakır iletkenli, XLPE yalıtımlı, kurşun kılıflı ve HDPE dış kılıfa sahip yüksek gerilim yeraltı kabloları için gerçekleştirilmiştir.

2. Matematiksel Formülasyon

İncelenen sistemin sıcaklık dağılımı iki boyutlu ısı transfer modeli kullanılarak elde edilebilir. Kararlı durumda ısı iletim eşitliği,

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + q = c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

şeklinde[8]. Burada “T” sıcaklığı (K), “k” malzemelerin termal iletkenliklerini (W/K.m), “q” üretilen ısıyı (W/m³), “C_p” sabit bir sıcaklık için malzemelerin özgül ısı kapasitelerini (J/m³.K) ve x ile y de sistem koordinatlarını ifade etmektedir. Toprak yüzeyi için sınır koşulları aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir[9].

$$T = T_{soil} \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\infty}) \quad (3)$$

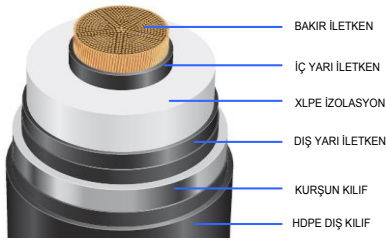
Burada, T yüzey sıcaklığını (K), h konvektif ısı transfer katsayısını (W/m²K), T_∞ da ortam sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Konvektif ısı transfer katsayısı rüzgar hızına bağlı olarak,

$$h = 7.371 + 6.43v^{0.75} \quad (4)$$

ifadesi ile hesaplanır[10]. Toprak yüzeyinde 2,5 m/s rüzgar hızı kabulüyle 20,155 W/m²K olarak belirlenmiştir.

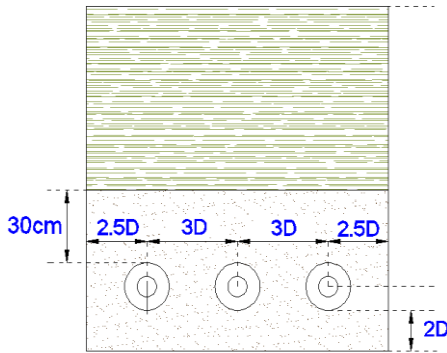
3. Sistem Tanıtımı

Şekil 1’de 380 kV’ luk bakır iletkenli, XLPE yalıtkanlı, kurşun kılıflı ve HDPE dış kılıfa sahip yüksek gerilim yeraltı kablosunun yapısı verilmiştir.



Şekil 1. 380 kV’ luk yüksek gerilim yeraltı kablosu.

Şekil 2’ de 3adet tek damarlı kablounun yan yana diziliminden oluşan yeraltı kablo sisteminin döşenme biçimi gösterilmiştir. Kabloların temas halinde bulunduğu kısım ısınin daha kolay uzaklaştırılabilmesi için ısı iletkenliği yüksek yatak malzemesi ile onun üzerinin ise toprak dolgu malzemesi ile doldurulduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2. Yeraltı kablolarının döşenme şekli.

Çizelge 1’ de incelenen yeraltı kablosunda kullanılan malzemelerin termal ve geometrik özellikleri verilmiştir.

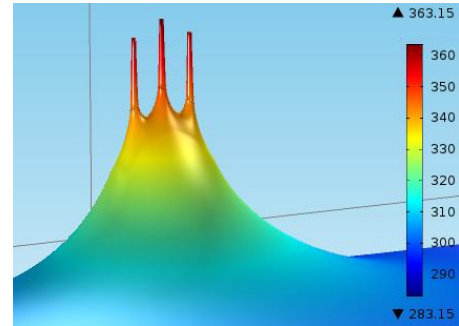
Çizelge 1. Kablonun termal ve geometrik özellikleri[11].

Kablo özellikleri

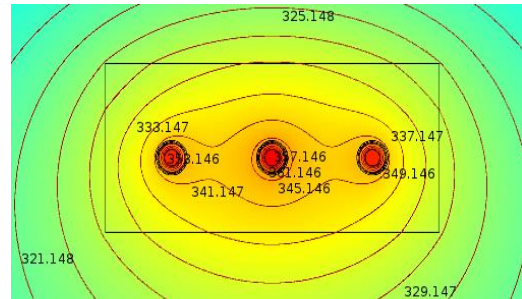
Bakır iletkenin çapı (mm)	63,5
Bakır termal iletkenlik (W/K.m)	400
Mak. DC Cu iletken direnci (ohm/km)	0,0072
XLPE izolasyon kalınlığı (mm)	27
XLPE termal iletkenlik (W/K.m)	0,2857
Kurşun kılıf kalınlığı (mm)	4,4
Kurşun termal iletkenlik (W/K.m)	35
HDPE dış kılıf kalınlığı (mm)	5,5
HDPE termal iletkenlik (W/K.m)	0,48
Kablo çapı (mm)(D)	148

4. Isıl Analiz

Farklı ortam koşullarının birbirleri ile mukayese edilmesini kolaylaştırmak amacıyla bazı referans parametre değerleri belirlenmiştir. Bunlar, kabloların gömülme derinliğinin 1,5 m olması, termal iletkenliklerin toprak için 1 W/K.m ve yatak malzemesi için ise 1.429 W/K.m olmasıdır. Bu şartlar altında ortadaki kablounun maksimum işletme sıcaklığı olan 90 °C’ ye (363.15 K) ulaşması durumunda ürettiği ısıya bağlı olarak ampasite değeri 1775 A olarak hesaplanmıştır. Şekil 3’ te bu akım değerinde kablolarda oluşan sıcaklık dağılımı ve Şekil 4’ te de sıcaklık eğrileri gösterilmiştir. Isıl analiz için ele alınan kabloların gömülme derinliği, yatak malzemesinin ısı iletkenliği ve toprağın yüzey sıcaklığı gibi parametreler aşağıda açıklanmıştır.



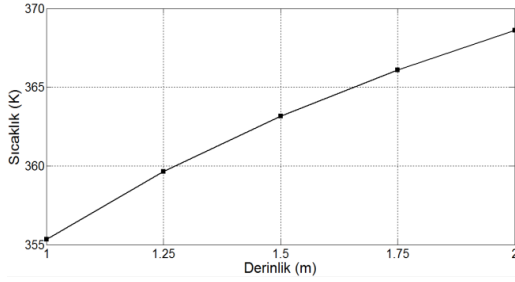
Şekil 3. Kablo sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.



Şekil 4. Akım taşıma kapasitesinde oluşan sıcaklık eğrileri.

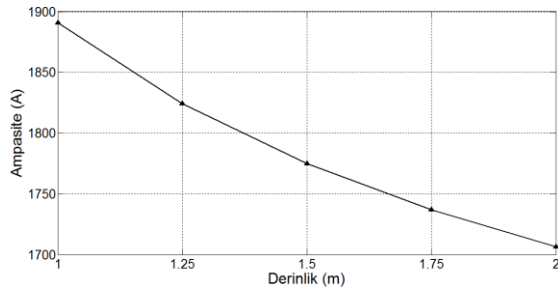
4.1. Kabloların Gömülme Derinliği

Yüksek gerilim yeraltı kablolarının maksimum işletme sıcaklığında iletilebilecekleri akımın büyüklüğünü etkileyen önemli parametrelerden biri kabloların gömülme derinlikleridir. Şekil 5’ te 1,5 m derinlikteki kabloların ampasite değeri olan 1775 A, farklı derinliklerdeki kablo sistemleri için uygulandığında oluşacak sıcaklık değerleri verilmiştir. Buna göre kablo gömülme derinliği 1 m’ den 2 m’ ye çıkarıldığında sıcaklık yaklaşık 13,3 K yükselmiştir. Yeraltı kablolarının gömülü oldukları derinlik arttıkça aynı akım büyüklüğünde iletken sıcaklığında bir artış oluşması beklenmelidir.

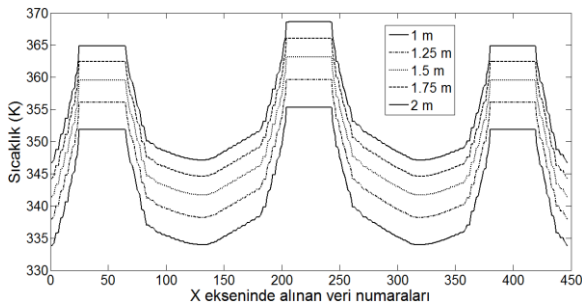


Şekil 5. Kablo iletken sıcaklığının gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi.

Kabloların gömülme derinliği arttıkça kablo ısıal açıdan daha fazla zorlanır. Bundan dolayı da taşınacak akım değerinin yeniden hesaplanması gerekir. Şekil 6’ da farklı kablo derinlikleri için hesaplanan yeni ampasite değerleri verilmiştir. Derinliğe bağlı olarak sıcaklıkta oluşan artış nedeniyle akım taşıma kapasitesinde önemli bir düşüş gerçekleşir. 1 m derinlikteki kablo sisteminde ampasite değeri 1890 A iken derinlik 2 m’ ye çıktığında akım taşıma kapasitesi de 1706 A’ e düşmüştür.



Şekil 6. Kablo ampasitesinin gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi.

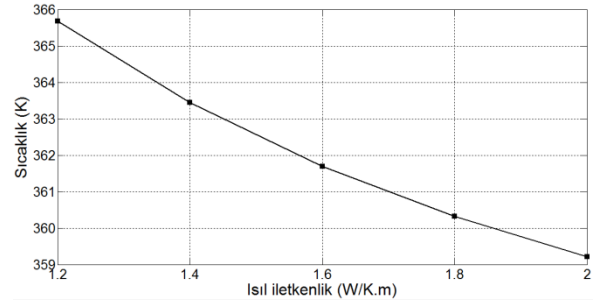


Şekil 7. Üç kablunun x ekseninde referans alınarak farklı döşeme derinlikleri için elde edilen sıcaklık dağılımları.

Şekil 7’ de kablo sisteminin farklı döşeme derinlikleri için sıcaklık değerlerinin değişimi verilmiştir. Buna göre iletken sıcaklığındaki değişimin kablolarla birlikte, kablolar arasında bulunan yatak malzemesi sıcaklığına da önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Kablolar tarafından üretilen ısı toprağın nem oranını azaltarak, ısıal direncinin yükselmesine neden olabilir.

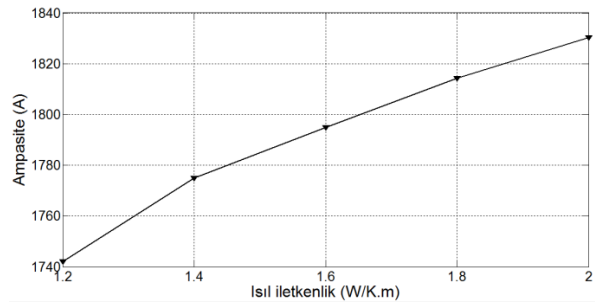
4.2. Yatak Malzemesinin Isıl İletkenliği

Yatak malzemesi, kabloların yerleştirildiği bölümde kullanılan ve kabloda oluşan ısıalın daha kolay uzaklaştırılabilmesini sağlayan bir malzemedir. IEEE 442-1981 standardına göre de yeraltı kablolarının sıcaklık artışı direkt olarak temas halinde bulunduğu toprağın ısıal direncine bağlıdır[12]. Şekil 8’ de kabloların 1,5 m derinliğe gömülü olduğu ve 1775 A akım taşıdığı kabul edilerek, farklı ısıal iletkenlik değerine sahip yatak malzemeleri kullanılması durumları için sıcaklık değişimi verilmiştir. Yatak malzemesinin ısıal iletkenliğindeki 0.8 W/K.m’ lik bir artış ortadaki kablo iletkeninin sıcaklığında yaklaşık 6,5 K’ lik bir azalma sağlamıştır. Bu durum kabloların ısıyı daha iyi transfer ederek XLPE yalıtkanın ısıal açıdan fazla zorlanıp delinmesini önlemek açısından yatak malzemesi iletkenliğinin önemini göstermektedir.



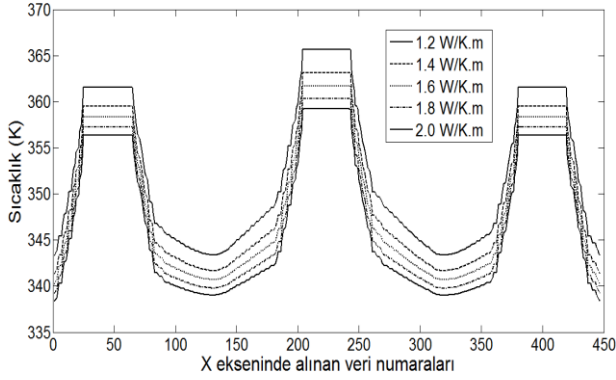
Şekil 8. Yatak malzemesinin ısıal iletkenliğinin kablo iletken sıcaklığı üzerindeki etkisi.

Yatak malzemesinin ısıal iletkenliğinin yükselmesi daha yüksek akım seviyelerinde maksimum işletme sıcaklığına ulaşılmasına olanak sağlar. Böylece yeraltı kablosu ile daha fazla enerji taşınır ve daha verimli kullanılabilir. Şekil 9’ da sıcaklıkta olduğu gibi 1.43 W/K.m yatak malzemesi ısıal iletkenlik değerinde kablo iletkeninin 363,15 K sıcaklık değerine ulaştığı kabul edilmiş ve buna göre yeni ampasite değerleri hesaplanmıştır. Yatak malzemesi ısıal iletkenliğinin 1.2 W/K.m’ den 2 W/K.m’ ye yükselmesiyle akım taşıma kapasitesinde yaklaşık 88.4 A’ lik bir artış sağlanabileceği görülmüştür.



Şekil 9. Yatak malzemesi ısıal iletkenliğinin kablo ampasitesi üzerindeki etkisi.

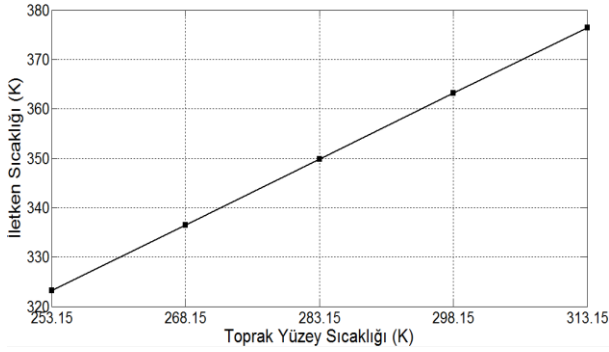
Şekil 10’ da farklı termal iletkenliklere sahip yatak malzemesi kullanılması durumunda x eksenini boyunca elde edilen sıcaklık değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 10. Üç kablunun x eksenini referans alınarak farklı yatak malzemesi ısı iletkenlikleri için elde edilen sıcaklık dağılımları.

4.3. Toprak Yüzeyinin Sıcaklığı

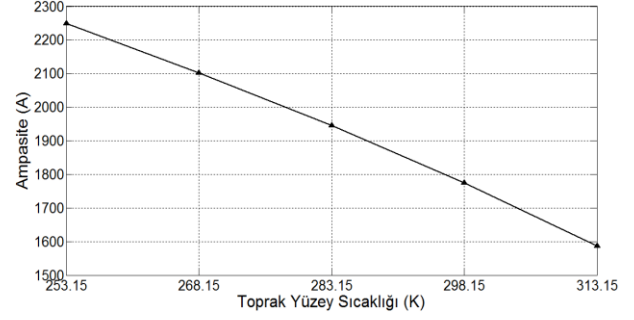
Toprağın yüzey sıcaklığı oluşturulan modelde sınır koşulu olarak kabul edilen bir ısı parametredir. Toprak yüzey sıcaklığı azaldıkça kablo iletkeni üzerinde soğutucu bir etki yaratır. Kablo döşeme derinliği ve yatak malzemesi ısı iletkenliğinin aksine, toprak yüzeyi sıcaklığındaki değişimler kablo üzerinde yaklaşık olarak lineer bir sıcaklık değişimine neden olur. Buna göre toprak yüzeyi sıcaklığındaki her 15 K’ lik azalma, kablunun iletken sıcaklığında da 13.38 K’ lik bir düşüş yaratmaktadır. Şekil 11’ de toprak yüzeyinin sıcaklığına bağlı olarak ortadaki kablo iletkeninin sıcaklığının değişimi verilmiştir.



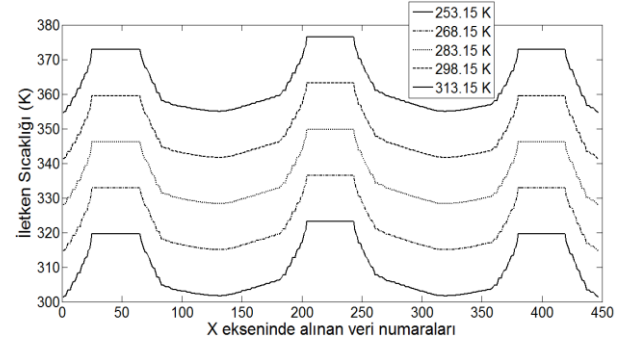
Şekil 11. Kablo iletken sıcaklığının toprak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

Şekil 12’ de toprak yüzeyinin sıcaklığına bağlı olarak kablunun akım taşıma kapasitesinde oluşan değişim verilmiştir. Toprak yüzey sıcaklığı arttıkça ampasite değerinin düştüğü, ancak azalmanın sıcaklıktaki gibi lineer olmadığı görülmüştür. Yüzey sıcaklığı 298.15 K’ den 313.15 K’ e yükseldiğinde akım taşıma kapasitesinde %10,7’ lik bir azalma tespit edilmiştir.

Şekil 13’ te farklı toprak yüzeyi sıcaklık değerleri için x eksenini boyunca elde edilen üç kablunun sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 12. Kablo ampasitesinin toprak yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişimi.



Şekil 13. Üç kablunun x eksenini referans alınarak farklı toprak yüzey sıcaklıkları için elde edilen sıcaklık dağılımları.

5. Sonuçlar

Güç kablolarında kullanılan yalıtkan malzemeler, kablo iletkeni belli bir sıcaklığın üzerine çıktığında izolasyon özelliğini kaybeder. Bunun için kabloda farklı akım kademeleri için oluşacak sıcaklık dağılımı iyi takip edilmeli ve analizi yapılmalıdır.

Gerçekleştirilen çalışma ile kabloların gömülme derinliği arttıkça iletken sıcaklığının yükseldiği ve dolayısıyla akım taşıma kapasitesinin düştüğü belirlenmiştir. Bu yüzden kabloları en verimli şekilde kullanabilmek için, ideal derinlik diğer ısı etkenleri de göz önünde bulundurularak tespit edilmelidir.

Yatak malzemesi iletkende üretilen ısı kablodan dış ortama doğru kolay uzaklaştırılabilmesi için ısı iletkenliği yüksek malzemelerden seçilerek kullanılmalıdır. Isı iletkenlik yükseldikçe kablo ampasitesinin de yükseldiği ve kablunun daha verimli kullanılabileceği görülmüştür.

Yüzey sıcaklığının etkisini belirlemek için gerçekleştirilen çalışmada, yüzey sıcaklığındaki değişimin kablo iletkeninin sıcaklığı üzerindeki etkisinin lineer olduğu görülmüştür. Modelleme sonuçları, yüzey sıcaklığı eşit aralıklarla arttırıldığında iletken sıcaklığının da sabit bir yükseliş gösterdiğini ortaya koymuştur.

İncelenen kablo sistemi için en uygun gömülme derinliği 1 m ve yatak malzemesi ısı iletkenliği 2 W/K.m olarak belirlenmiştir. Bu döşeme koşullarında kablodan en yüksek akım toprak yüzey sıcaklığının en düşük olduğu durumda taşınabilmektedir.

6. Kaynaklar

- [1]Yanmu, L. ve Wenrong, S., “Coupled Electromagnetic-Thermal Modeling the Temperature Distribution of XLPE Cable”, Power and Energy Engineering Conference, 2009, 1-4.
- [2]S. Al-Saud, M., “Improved Assessment of Power Cable Thermal Capability in Presence of Uncertainties”, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012, 1-4.
- [3]Shen, Y. ve Niu, H., “Promoting Cable Ampacity by Filling Low Thermal Resistivity Medium in Ducts”, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013, 1-4.
- [4]Leon, F. ve Anders, G., “Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method”, IEEE Transactions on Power Delivery, 23, 537-543, 2008.
- [5]Olsen, R. ve Anders, G., “Modelling of Dynamic Transmission Cable Temperature Considering Soil-Specific Heat, Thermal Resistivity, and Precipitation”, IEEE Transactions on Power Delivery, 28, 1909-1917, 2013.
- [6]Desmet, J. ve Putman, D., “Thermal Analysis of Parallel Underground Energy Cables”, 18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 2005, 1-4.
- [7]Wang, Y. ve Grzybowski, S., “Analysis of Influential Factors on the Underground Cable Ampacity”, Electrical Insulation Conference (EIC), 2011, 430-433.
- [8]Huang, H.C. ve Usmani, A.S., “Finite element analysis for heat transfer: theory and software”, Springer-Verlag, Londra, 1994.
- [9]Hwang, C.C. ve Chang, J.J., “Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements”, Electric Power Systems Research, 54, 75-81, 2000.
- [10]Hanna, M.A. ve Chikkani, A.Y., “Thermal analysis of power cables in multi-layered soil-part I: theoretical model”, IEEE Transactions, 8, 761-771, 1993.
- [11]<http://www.demirerkablo.com>
- [12]IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements, IEEE Std 442-1981, 1996.