

Hava ve Su Ortamındaki AG Güç Kablolarında Akım-Sıcaklık İlişkisinin İncelenmesi

Murat KARAHAN, Elektrik Eğitimi Böl., Dumlupınar Üniv. (mkarahan@dumlupinar.edu.tr)

H. Selçuk VAROL, Elektronik Bilgisayar Eğitimi Böl., Marmara Üniv. (hsvarol@marmara.edu.tr)

Özcan KALENDERLİ, Elektrik Mühendisliği Böl., İstanbul Teknik Üniv. (ozcan@elk.itu.edu.tr)

Bu çalışma, güç kablolarında akım ve sıcaklık ilişkisini incelemek amacıyla yapılan deneysel ve kuramsal 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. Hesaplarda kablodan akan akıma bağlı olarak ortaya çıkan ve ısınma şeklinde kendisini belli eden elektriksel kayıplar, ısı iletim denkleminde kullanılmıştır. Böylelikle, hem kayıpların sıcaklık dağılımına etkisi göz önüne alınmış hem de sıcaklıkla kablonun akım taşıma kapasitesi arasında ilişki kurulmuştur.

1. Giriş

Güç kablolarında sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için analitik, deneysel ve sayısal yaklaşımlar sıklıkla kullanılmaktadır [1, 2]. Sayısal çalışmalarda elektriksel kayıplar çoğunlukla bilinen değerler olarak varsayılır ya da örneğin uluslararası bir standart olan Uluslararası Elektroteknik Komitesi (International Electrotechnical Committee (IEC)) standartlarına göre hesaplanır. Genelde hesaplar, 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 yapmanın tanımlanması ve uygulanması zorluk yarattığı için çok az yapılmaktadır. Bununla birlikte kayıp ve ısınma faktörlerinin birlikte değerlendirildiği az sayıda çalışma bulunmaktadır [3]. Güç kablolarının daha doğru modellenebilmesi için kayıp ve ısınma mekanizmalarının ve buna bağlı olarak da akım taşıma kapasitesinin belirlenmesi gerçeğe daha yakın so-

nuçlar verecektir. Bu nedenle sunulan bu çalışmada, farklı ortamlarda yer alan güç kablolarının sıcaklık dağılımlarını belirlemek için birleştirilmiş elektrik-ısı model kullanımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü verilmiştir.

2. Problemin Formülasyonu

Bu bölümde, bir güç kablosunun içinde ve çevresinde sıcaklık dağılımını hesaplayabilmek için gereken teorik temeller verilmiştir. Amaç, kablodan geçen akıma ve elektriksel parametrelere bağlı olarak, sıcaklık dağılımının elde edilmesidir. Bunun için öncelikle gerekli elektrik-ısı modelin, yani elektriksel ve ısı etkenlerinin bir arada ortak çözümünün, teorik bilgileri verilmiştir.

2.1. Güç Kablosunun Elektrik Isıl Modeli

Kablodaki ısınmanın başlıca kaynağı, iletkeninden geçen I akımın, iletkenin R direncinde yarattığı $R.I^2$ elektriksel güç kaybıdır. Bu güç kaybı, akımın aktığı t süresinde $R.I^2.t$ enerjisini harcar. Bu kayıp enerji, kendini ısı

enerjisi olarak belli eder. Bu ısı, iletkenin çevreye yayılır. Bu durumda ısı iletimini tanımlayan diferansiyel denklem;

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

şeklinde olur [4]. Bu denklemde θ , bağımsız değişken olarak sıcaklığı, k ısı kaynağının çevresindeki ortamın ısı iletkenliğini, ρ ortamın madde olarak yoğunluğunu, ısıyı ileten ortamın ısı kapasitesini ve W hacimsel ısı kaynağı şiddetini göstermektedir. Elektrik akımının sebep olduğu W ısı kaynağı şiddeti, elektriksel güçle benzer şekilde ifade edilebilir.

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

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

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

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde σ kablo iletkeninin elektriksel iletkenlik değeridir ve sıcaklığa bağlı bir büyüklüktür. Bu çalışmada, bu özellik sayesinde elektrik ile ısı iletimi arasında bir bağ kurulmuş ve ısı analizler yapılmıştır.

3. Deneysel Çalışmalar

Deneyde kullanılan kablo; 0,6/1,2 ($U_0/U_n/U_m$) kV gerilimli, 3 x 35/16 mm² kesitli, 3^{1/2} damarlı (3 faz, 1 nötr), PVC yalıtkanlı, galvanizli yassı çelik tel

zırhlı, çapraz tutucu çelik bantlı, PVC iç ve dış kılıflı bir alçak gerilim güç kablosudur (Şekil 1). Kablo, 29,1 mm dış çapa sahiptir. PVC yalıtkanlı bu kablonun kataloğunda 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 1: Deneyde kullanılan kablomun yapısı

Güç kablosunun havada ve su içerisindeki akım sıcaklık ilişkisini incelemek için dıştan çelik malzemeye 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 içine kap tabanından 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 fotoğrafı Şekil 2'de görülmektedir.

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. Çı-

kış 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.



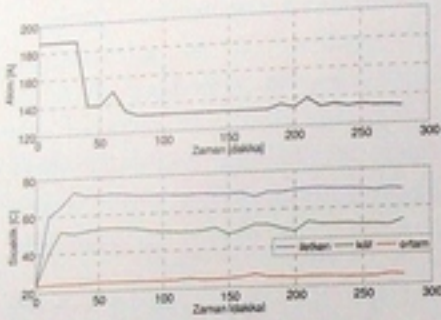
Şekil 2: 0,6/1 kV kablo için kurulan deney düzeneği

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 kullanılabilir ve farklı noktaların sıcaklıkları izlenebilmektedir. Kablounun iletken ve kılıf sıcaklıklarının ölçülmesinde bu termokuplardan yararlanılmıştır.

İletken ve kılıf sıcaklığı, ilgili Türk standardında belirtilen sıcaklık ölçme koşullarına uygun olarak, akım kaynağının her iki ucundan 50 cm uzaklıktaki kablo bileşenleri üzerinden ölçülmüştür [5].

Yapılan deneyde kablounun faz iletkenleri, seri bağlanarak uçlarına alternatif akım uygulanmıştır. Bu şekilde kablounun her bir fazından aynı akımın geçmesi sağlanmıştır. Deney süresince, kablounun akım kaynağına bağlı

olduğu her iki noktada, iletken ve kılıf sıcaklıkları ile ortam sıcaklığı değeri 10'ar dakika ara ile ölçülüp kaydedilmiştir. Şekil 3'te kabloya uygulanan akım değerinin, iletken ve kılıf sıcaklıklarının ve ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 3'teki iletken ve kılıf sıcaklıkları her iki ölçüm noktasından alınan değerlerin aritmetik ortalamasıdır.

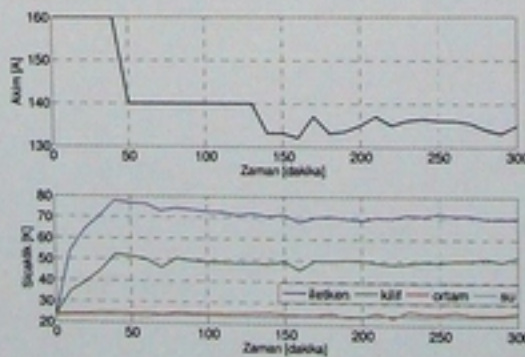


Şekil 3: Kabloya uygulanan akımın, kablo bileşenlerinin ve ortam sıcaklığının zamana bağlı değişimleri

Yapılan deneyde kablonun akım taşıma kapasitesinin bulunması için önce yüksek bir akım değerinden başlanmıştır. 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 beklenmiştir. Daha sonra su altına gömülmüş kablonun akım sıcaklık ilişkisi araştırılmıştır. Bu aşamada, kablo deney kabı ta-

mamen su ile doldurulmuştur. Tamamı 4 metre olan deney kablosunun 2,5 metrelik bölümü deney kabı içerisine, su yüzeyinden 35 cm aşağıda kalacak şekilde yerleştirilmiştir. 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 4'te kabloya uygulanan akım değerinin, iletken ve kılıf sıcaklıklarının ile ortam ve su sıcaklığı değerlerinin zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi yaklaşık 2 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, ha-



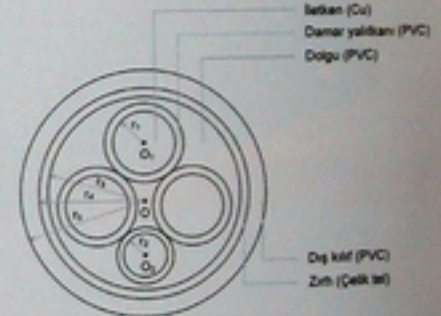
Şekil 4: Kabloya uygulanan akımın, kablo bileşenleri ile ortam ve su sıcaklığının zamana bağlı değişimleri

va ortamında elde edilen değerden bir kaç Amper daha fazladır.

4. Sayısal Çözüm

0,6/1 kV gerilimli güç kablosunun enine kesiti Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekilde O harfi kablonun merkezini, O₁ ve O₂ sırasıyla faz ve nötr iletkenlerinin merkezlerini göstermektedir. Diğer kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri, Tablo 1'de verilmiştir.

Problemin sayısal çözümü 2 aşamalıdır. İlk aşamada hava ortamında; ikinci aşamada ise su içerisinde yer alan güç kablosu için sayısal model oluşturulmuş ve yapılan kararlı hal çözümü ile sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Hava ortamında yer alan güç kablosunda sıcaklık dağılımının belirlenmesinde ilk olarak problemin geometrisi oluşturulur.



Şekil 5: Kablo kesiti

Problem, yukarıda özellikleri belirtilen kablonun içinde bulunduğu 2 x 2 m'lik bir çözüm bölgesinde tanımlanmıştır. Problem geometrisi oluşturulduktan sonra kablo bileşenlerinin ve çevreleyen ortamın elektriksel ve ısı özellikleri tanımlanır. Kablo bileşenleri

Kablo Bileşenleri	Yarıçap (mm)
Faz iletkenleri (r ₁)	3,8
Nötr iletkeni (r ₂)	2,6
Dolgu Malzemesi (r ₃)	11,5
Zırh (r ₄)	12,5
Dış Kılıf (r ₅)	14,5

Tablo 1: Kablo bileşenlerine ait yarıçap değerleri

ile çevreleyen ortamın ısı özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Kablo Malzemeleri	Yoğunluk ρ (kg/m ³)	Isı Kapasitesi c (J/kg·K)	Isıl İletkenlik k (W/K·m)
İletken (Bakır)	8700	385	400
Yalıtıcı (PVC)	1760	385	0,1
Zarh (Çelik)	7850	475	44,5
Hava	1,205	1005	$k_{\text{hava}}(\theta)$
Su	997,1	4181	$k_{\text{su}}(\theta)$

Tablo 2: Kablo bileşenleri ve çevreleyen ortama ait ısı parametreler

Havanın ısı iletkenlik değeri sıcaklıkla değişmektedir. Güç kablusunun artan sıcaklığına bağlı olarak bu durum, ısının çevreleyen ortama daha iyi dağılmasını sağlamaktadır. Tablo 3'te verilen değerler, kablo modeline katılmış ve hava sıcaklığındaki değişime bağlı olarak ara değerlerin bulunması sağlanmıştır [6].

Sıcaklık (°C)	Isıl İletkenlik, hava (W/mK)	Isıl İletkenlik, su (W/mK)
0	0.0243	0.56
20	0.0257	0.6
40	0.0271	0.635
60	0.0285	0.66
80	0.0299	0.675
100	0.0314	0.682

Tablo 3: Hava ve suya ait ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Mevcut kablo için en önemli ısı kaynağı, kablo iletkenlerinden geçen akımın oluşturduğu omik kayıplardır. Bu kayıpların hesaplanmasında $P=I^2/\sigma$ denklemi kullanılmıştır. İletken malzemelerdeki omik kayıplar;

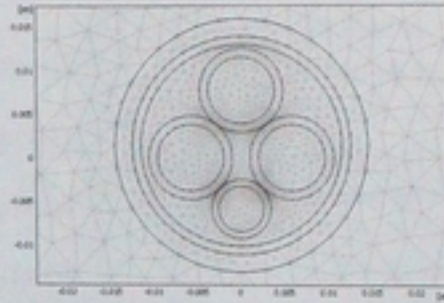
$(132/(\pi \cdot 0.0038^2)) / \text{condCu} \dots$ (W/m³) şeklinde tanımlanmıştır. Bu denklemde yer alan condCu ifadesi, iletken malzemenin elektriksel iletkenlik değeri olup, sıcaklık bağlıdır. Sayısal çözümlemenin son adımında sınır koşulları belirtilir. Kablo kapalı bir ortam içerisinde yer aldığı için kablo yüzeyinde serbest taşınım mevcuttur. Isı transfer katsayısı

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

h, deneysel olarak elde edilmiş ampirik (görgül) bir bağıntı olan (4) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır [1,7].

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

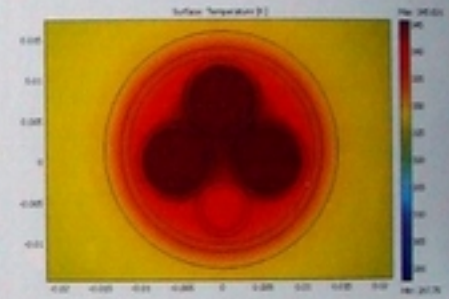
Bütün bu tanımlamalardan sonra bölge elemanlara bölünür ve sayısal çözüm gerçekleştirilir. Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış 0,05 x 0,03 m boyutundaki bölümü Şekil 6'da gösterilmiştir. Tüm bölge 7212 elemana bölünmüştür.



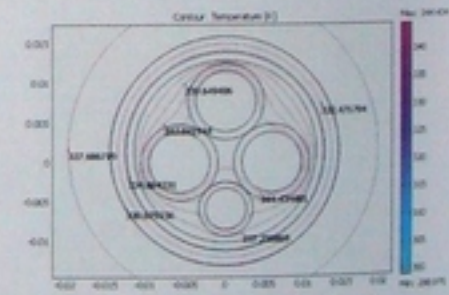
Şekil 6: İncelenen problemin sonlu elemanlar ağı.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sayısal çözümleme sonucunda kablo ve çevresinde oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 7'de, eş sıcaklık çizgileri ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 7 ve 8'de kablonun 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 7'de 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 yakındır.



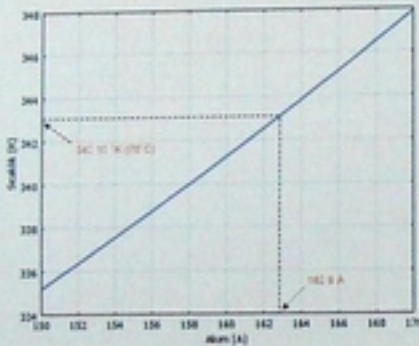
Şekil 7: Sıcaklık dağılımı



Şekil 8: Eş sıcaklık çizgileri.

Sayısal modelin ikinci aşamasında aynı güç kablusunun 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. Suyun ısı iletkenlik değeri Tablo 3 dikkate alınarak modele katılmıştır. 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.



Şekil 9: Su içine döşenmiş güç kablosu için akım sıcaklık ilişkisi

Yapılan sayısal çözümleme sonucunda su ortamında döşenen güç kablosu için akım sıcaklık eğrisi Şekil 9'da verilmiştir.

Şekil 9'dan görüldüğü gibi, geçen akıma bağlı olarak iletken sıcaklığı artmaktadır. PVC malzemesine ait 70 °C'lik dayanım sıcaklığı dikkate alındığında, kablonun akım taşıma kapasitesi, 162,9 A olarak bulunmuştur. Bu değer, laboratuvar koşullarındaki su ve ortam sıcaklığı değerleri dikkate alınarak, kablonun tamamının su içinde bulunduğu durumdaki 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.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, akıma ve akım yoğunluğuna bağlı elektriksel kayıpları, ısı iletim denkleminde göz önüne alarak sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Sadece sıcaklık koşulları değil, aynı zamanda elektriksel koşullar da göz önüne alınarak çözüm yapılmıştır. Sonuçlar, akımın sıcaklığı artırdığını; artan sıcaklığın ise akım taşıma kapasitesini düşürdüğünü göstermiştir. Bu durumda artan sıcaklıkla iletken direncindeki artış nedeniyle akım düşer.

Bu durumda akım azaldığı için sıcaklık azalır. Bunun sonucunda akım yeniden artar ve sonunda sıcaklık ve akım bakımından kararlı değerlere ulaşılır. Bir kablonun akım taşıma kapasitesi, kabloyu çevreleyen ortamın ısı iletkenliğine yakından bağlıdır. Çünkü, kabloda oluşan ısı, ısı çevreye iletilebilmesinde, bu direncin de rolü vardır.

Su ortamında yapılan deneysel çalışmada, kablo iletken sıcaklığını 70 °C değerine ulaştıracak akım değeri, hava ortamında yapılan deneye göre yüksek çıkmıştır. Bu durum su içine döşenmiş güç kablolarının suyun havaya göre yüksek ısı iletkenliğinden dolayı daha iyi soğuma olanağı bulunduğunu göstermektedir. Sayısal çözümleme sonucu da bunu doğrulamaktadır. Sayısal modelde çevreleyen ortamın ısı iletkenlik değeri, sıcaklığa bağlı bir büyüklük olarak tanımlanmıştır. Su ortamındaki güç kablosu için yapılan sayısal çözümlemede, 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 ısı kablodan çevreleyen ortama daha etkin bir şekilde dağılmasıdır. Sonuç olarak, kabloları uygun ortam ve yerleşim düzeninde çalıştırmak, uygun çalışma koşullarında işletmek, kablo ömrünü ve verimini artırmakta, 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.

6. Kaynakça

- [1] Huang, 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, 2003, pp. 159-164.
- [2] 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 2004*, May 12-15, 2004, Dubrovnik, Croatia, pp. 905-908.
- [3] Kovac, N., Sarajcev, I., Poljak, D., "Nonlinear-Coupled Electric-Thermal Modeling of Underground Cable Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 4-14.
- [4] Lienhard, J. H., *A Heat Transfer Text Book*, Third Ed., Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, 2003.
- [5] TS EN 50393, Türk Standardı, "Kablolar - Beyan gerilimi 0,6/1,0 (1,2) kV olan dağıtım kablolarında kullanılan yardımcı donanımlar için deney metodları ve özellikler", Nisan 2006.
- [6] Remsburg, R., *Thermal Design of Electronic Equipment*, CRC Press LLC, 2001.
- [7] Karahan, M., Varol, H. S., Kalenderli, Ö., "Güç Kablolarının Elektrik ve Isıl Zorlanmaların Etkisi Altında Sıcaklık Dağılımlarının ve Ömürlerinin Belirlenmesi", *Elektrik - Elektronik - Bilgisayar - Biyomedikal Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Eskişehir, Bildiri No. 152*, 14-18 Kasım 2007.