

Güç Kablolarının Elektrik ve Isıl Zorlanmalarının Etkisi Altında Sıcaklık Dağılımlarının ve Ömürlerinin Belirlenmesi

Murat Karahan¹

H. Selçuk Varol²

Özcan Kalenderli³

¹Elektrik Eğitimi Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul

²Elektronik Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul

³Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

¹e-posta: mkarahan@marmara.edu.tr

²e-posta: hselcuk@marmara.edu.tr

³e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, yan yana döşenmiş yeraltı güç kabloları ve çevresinde, sonlu elemanlar yöntemi ile sıcaklık dağılımı hesabından yararlanarak, kabloların akım taşıma kapasitesinin ve ömrünün, toprağın ısı iletkenliğine ve kablolar arası uzaklığa bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Hesaplarda kablodan akan akıma bağlı olarak ortaya çıkan ve ısınma şeklinde kendini belli eden elektriksel kayıplar, ısı iletim denkleminde kullanılarak hem kayıpların sıcaklık dağılımına etkisi göz önüne alınmış hem de sıcaklıkla kablonun akım taşıma kapasitesi arasında ilişki kurulmuştur. Bu koşullarda elde edilen sıcaklık bilgisi, kablolar için verilen sıcaklık-ömrü bağıntısında kullanılarak kablo ömrü kestirilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar, çevre ortamının artan ısı iletkenliği ve artan kablolar arası uzaklıkla kablo ömrünün uzayacağını, bunun da kabloları güvenilir ve ekonomik yapacağını göstermiştir.

1. Giriş

Günümüzde yerleşimin yoğun olduğu yerlerde elektrik enerji dağıtımı, işletme ve can güvenliğini ve çevre görünüm estetiğini sağlamak amacıyla hava hatları yerine yeraltı güç kabloları ile yapılmaktadır. Güç kablolarının maliyeti ve döşenme masrafları hava hatlarına göre yüksektir. Yüksek kapasitede ve kablo ömründen ödün vermeden uzun yıllar bir kablonun kullanılması maliyeti düşürür. Kablonun ömrü ise çalışma koşullarına bağlıdır. Çalışma koşulları içinde en baskın etkenlerden birisi sıcaklıktır. Kablo sıcaklığı, kablodan geçen akıma, kablonun ve yanına döşenen diğer kabloların döşenme şekillerine, kablonun ve çevreleyen ortamın (toprağın) ısı özelliklerine bağlıdır. Bunlar bir kabloda sıcaklık oluşumu ve dağılımı için belirleyici bileşenlerdir. Kablo sıcaklığının ve ona bağlı olarak kablo ömrünün kestirilmesi elektriksel sistem güvenliği ve ekonomik işletme bakımından önemlidir.

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. 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. 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 ta akım taşıma kapasitesinin belirlenmesi gerçeğe daha yakın sonuçlar verecektir. Bu nedenle sunulan bu çalışmada bir yeraltı güç kablosundaki sıcaklık dağılımını belirlemek için birleştirilmiş elektrik-ısı model kullanımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü verilmiş ve çözüm sıcaklık bilgisinden kablo ömrü kestirimine genişletilmiştir.

2. Problemin Formülasyonu

Bu bölümde, bir güç kablosu içinde ve çevresinde sıcaklık dağılımı hesaplayabilmek için gereken teorik temeller verilmiştir. Amaç, kablodan geçen akımı ve elektriksel parametreleri de göz önüne alarak, sıcaklık dağılımı elde edilebilmektir. Bunun için gerekli elektrik-ısı modelin yani elektriksel ve ısı etkenlerin bir arada ortak çözümünün teorik bilgileri verilmiş ve elde edilecek sıcaklık dağılımından kablonun ömrünü kestirebilmek için kullanılacak bir bağıntı sunulmuştur.

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 $R.I^2.t$ enerjisi karşılığı olarak kendini ısı enerjisi olarak belli eder. Bu ısı iletkenin çevreye yayılır. Bu durumda ısı iletimini tanımlayan diferansiyel denklem;

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

şeklinde olur [4]. Bu denklemde θ bağımsız değişken olarak sıcaklığı, k ısı kaynağının çevresindeki ortamın ısı iletkenliğini, ρ ortamın madde olarak yoğunluğunu, c ısıyı iletkenin 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 yoğunluğunu, 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, elektrik ile ısı iletimi arasında bir bağ kurarak ısı analizler yapmak için kullanılmıştır.

2.2. Güç Kablolarında Ömür Kestirimi

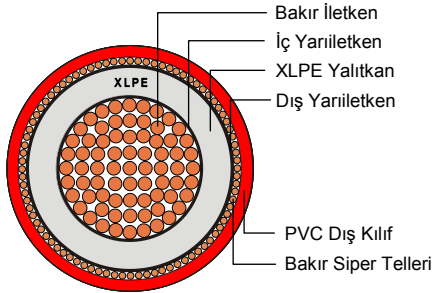
Sıcaklığa bağlı olarak kablo ömrünü yaklaşık olarak kestirmek için (4) denklemi kullanılabilir [5].

$$p = p_i \cdot e^{\left(\frac{-E}{k}\right) \frac{\Delta\theta}{\theta_i \cdot (\theta_i + \Delta\theta)}} \quad (4)$$

Bu denklemde; E : Aktivasyon enerjisi (eV); k : Boltzmann sabiti ($8.617 \cdot 10^{-5}$ eV/°K); p : $\Delta\theta$ sıcaklık artışındaki ömür (gün); p_i : θ_i sıcaklığındaki ömür (gün); $\Delta\theta$: Sıcaklık artış miktarı (°K); θ_i : Kablo işletme sıcaklığı (°K) büyüklüklerini belirtmektedir.

3. Uygulama

Elektrik-ısı analiz üzerine yapılan bu çalışmadaki hesaplamalarda örnek kablo olarak, işletmede yaygın olarak kullanılan ve Şekil 1'de enine kesiti gösterilen 5,8/10 kV'luk, XLPE yalıtkanlı, tek damarlı yeraltı kablosu göz önüne alınmıştır. Bu kabloya ait tüm parametreler [6] numaralı kaynaktan alınmıştır.



Şekil 1: Kablo kesiti.

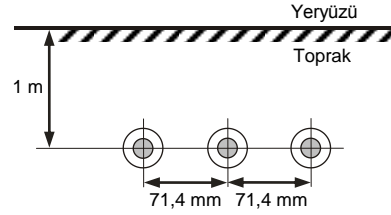
Göz önüne alınan kablunun iletkeni, 300 mm² kesite ve 20,5 mm çapa sahip örgülü bakır iletkenidir. Tablo 1'de model kablunun, iletkenden dışa, tabakalarının sırası ve tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 1: Kablunun 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 döşenme koşulları Şekil 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 ısı öz direnci referans değer olarak 1 K.m/W kabul edilmiştir.



Şekil 2: Kabloların döşenme koşulları.

Güç kablosunun ısı analizinde, sayısal bir yöntem olarak statik ısı-elektrik 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 kablunun 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.

Problemin şekli üzerinde kabloların ve çevresindeki ortamın (toprağın) ısı özellikleri olarak Tablo 2'deki k ısı iletkenlik ve c ısı kapasitesi değerleri kullanılmıştır.

Tablo 2: Modeldeki malzemelerin ısı özellikler

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

Tablo 2'de malzemeler için göz önüne alınan ρ yoğunluk değerleri de gösterilmiştir. Bu büyüklükler, ısı iletim denklemi (1)'de kullanılan büyüklüklerdir. Isı kaynakları da denklem (3)'e göre tanımlanmıştır.

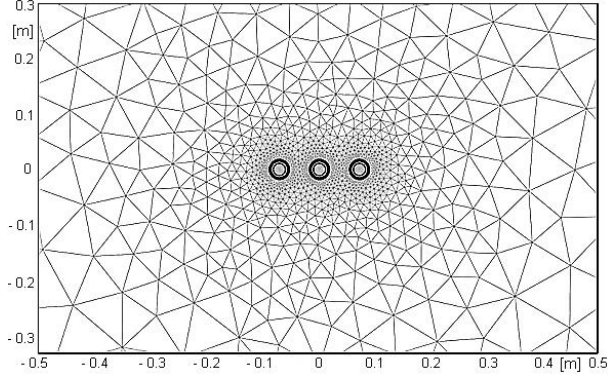
Geometrik ve fiziksel tanımlamalardan sonra problemin sınır koşulları belirtilmiştir. Bölgenin alt ve yan sınırları üzerinde sıcaklık (15°C) sabit olarak kabul edilmiş, üst sınır ise taşınım sınırı olarak alınmıştır. Isı transfer katsayısı h , deneysel olarak elde edilmiş amprik (görgül) bir bağıntı olan (5) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır [1].

$$h = 7.371 + 6.43 \cdot u^{0.75} \quad (5)$$

Bu denklemde, u kablunun 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

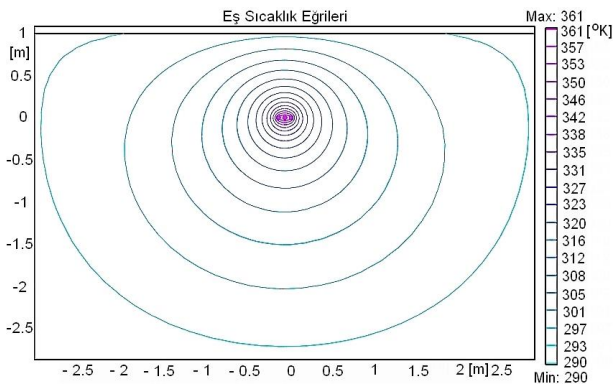
denemeden sonra bölge, kablo ve yakın çevresinde doğru sonuç verecek sıklıkta (8519 adet) üçgen sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu elemanlara ayırma işlemi analizde kullanılan programca otomatik ve adaptif olarak yapılmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar ağıının, ortasında kabloların yer aldığı 1 m eninde, 0,6 m boyundaki bölümü Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 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.

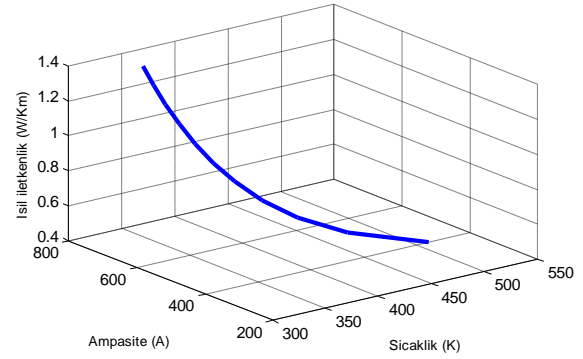
Şekil 4, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrilerinin (çizgilerinin) dağılımını göstermektedir. Elde edilen bu dağılıma göre en fazla ısınan kablo, yanlardaki kabloların da sıcaklık etkisiyle ortadaki kablodur. Bu kabloların yalıtkan sıcaklığını 90°C değerine ulaştıracak akım değeri 626.214 A olarak hesaplanmıştır. Bu akım değeri, önce 90°C sıcaklığa karşı düşen akım yoğunluğu bulunup bu değer den iletken kesiti ile çarpılmasıyla bulunmuştur. Bu değer kabloların akım taşıma kapasitesi olup aynı problemin analitik olarak çözümünün verildiği [1] numaralı kaynaktaki 629 A değerine oldukça yakındır.



Şekil 4: Eş sıcaklık çizgilerinin dağılımı.

Toprağın ısı iletkenliği veya ısıl direnci, mevsimlerle ve iklimle değişen bir büyüklüktür. Kablonun döşendiği yerdeki

toprağın nemi normalin üzerinde olduğu zaman, kablonun ürettiği 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.



Şekil 5: Toprağın ısı iletkenliğindeki değişimin kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi.

Diğer tüm devre parametreleri ve kablo yükü sabit iken, kabloyu çevreleyen ortamın ısı iletkenliğinin değişiminin kablo sıcaklığına etkisi incelenmiştir. Bunun için toprağın ısı iletkenliği, normalde karşılaşılan değişim aralığı olan $0,4$ ile $1,4\text{ W/K}\cdot\text{m}$ arasında değiştirilerek kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi çıkarılmış ve sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi toprağın veya genel olarak kabloyu çevreleyen ortamın ısı iletkenliğinin azalması ile kablo sıcaklığı oldukça fazla artmaktadır. Bu durum kablo yükünün azaltılmasını gerektirir.

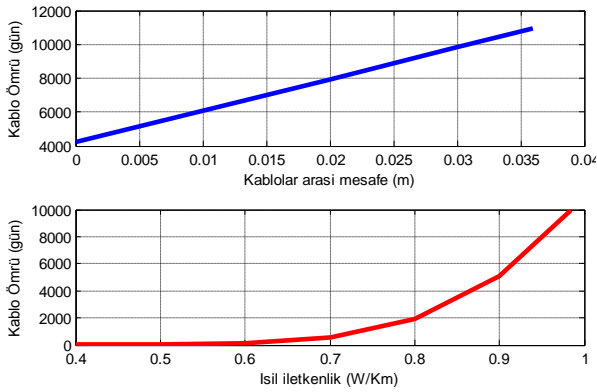
Yapılan hesaplamalarda kablolar arası uzaklığın bir kablo çapı kadar olduğu kabul edilmiştir. Eğer yan yana döşenen üç kablo arasındaki uzaklık azaltılırsa ortadaki kablonun bitişiğindeki iki kablo nedeniyle daha çok ısınması beklenir. Bu durumda ortadaki kablonun akım taşıma kapasitesi azalacaktır. Tablo 3'te sayısal çözümden elde edilen kablolar arası uzaklığın değişimine bağlı olarak ortadaki kabloların sıcaklık değerleri ve buna karşı düşen akım taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir. Tablo 3'ten görüleceği gibi, kablolar arası uzaklığın bir kablo çapı kadar olduğu durum, akım taşıma kapasitesi bakımından en uygun durumdur.

Tablo 3: 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
20	96.14	604.16
40	93.35	613.85
60	91.12	622.00
72	90.00	626.20

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 (4) denklemi kullanılarak her iki durum için kablo ömrü hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü gibi toprağın ısı iletkenlik değerindeki

%10'luk bir azalma eğer yük koşulları ayarlanmazsa kablo ömrünü yarı yarıya düşürmektedir.



Şekil 6: Toprağın ısıl iletkenliğindeki ve kablolar arası uzaklıktaki değişimin kablo ömrüne etkisi.

4. Sonuçlar

Akıma ve akım yoğunluğuna bağlı elektriksel kayıpları ısı iletim denkleminde göz önüne alarak sıcaklık dağılımının incelendiği bu çalışmada, alışlagelmiş sadece sıcaklık koşulları içinde çözüm değil aynı zamanda elektriksel koşullar da göz önüne alınarak çözüm yapılmıştır. İncelemede, kablunun, yalıtkan özelliklerine ve gerilimine bağlı olarak ortaya çıkan dielektrik kayıpları, XLPE yalıtkanın bağıl dielektrik sabitinin ($\epsilon_{r, XLPE} = 2,3$), kayıp faktörünün ($\tan\delta < 10^{-6}$) ve gerilimin 5,8/10 kV olması nedeniyle akıma bağlı kayıplar yanında çok küçük kalacağı için ihmal edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle bulunan sıcaklık dağılımlarından kablunun akım taşıma kapasitesi değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar, akımın sıcaklığı arttırdığını, 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 ulaşılabileceği görülmüştür.

Bir kablunun akım taşıma kapasitesi kabloyu çevreleyen ortamın, çalışmada göz önüne alındığı gibi örneğin toprağın, ısıl iletkenliğine yakından bağlıdır. Çünkü kabloda oluşan ısının çevreye iletilebilmesinde bu direncin de rolü vardır. Çalışmada, uygulamada karşılaşılan toprak ısıl iletkenlikleri aralığında ısıl iletkenlik değiştirildiğinde beklendiği gibi artan ısıl iletkenliği ile kablunun akım taşıma kapasitesi artmakta, tersine azalan ısıl iletkenlikle akım azalmaktadır. Bu arada ısıl iletkenliğin artması kabloda tutulan ısıyı dolayısıyla kablo sıcaklığını azaltmaktadır.

Kablolar genellikle yalnız başına bulunmazlar. Yanlarında, çevrelerinde diğer kablolar bulunur. Her bir kabloda ortaya çıkan ısı, komşu kabloların ısı alışverişini genelde olumsuz etkiler. Bu çalışmada olduğu gibi üç adet kablo yan yana döşendiğinde ortadaki kablo, yanlardaki kabloların varlığı nedeniyle hem kendi ısısını rahatça çevreye iletmediği için hem de yanındaki kablolardan ısı aldığı için daha fazla ısınır. Bu da ortadaki kablunun akım taşıma kapasitesini düşürür. Bu etkiyi azaltmak için kabloların birbirinden uzaklaştırılması, kablolar arası uzaklığın artırılması gerekir. Bu çalışmada, 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.

Kabloların ömrü, çalışma koşullarına yakından bağlıdır. Özellikle sıcaklık, kablo ömrünü etkileyen baskın etkenlerden birisidir. Bu çalışmada, 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. 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.

5. Kaynakça

- [1] 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, 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] 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, 9th International Conference, 2000*, pp. 893-898.
- [6] Anders, G. J., "Rating of Electric Power Cables", IEEE Press and McGraw-Hill, New York, 1997.