

154 kV XLPE YERALTI GÜÇ KABLO EKİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE ISIL ANALİZİ

Faruk ARAS ve Cüneyt OYSU

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe, 41380, Kocaeli
Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Veziroğlu, 41100, Kocaeli
arasfa@kou.edu.tr, coysu@kou.edu.tr

(Geliş/Received: 22.06.2006; Kabul/Accepted: 31.10.2006)

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek gerilim yeraltı enerji iletim sisteminin en zayıf noktası olarak bilinen kablo ekinin (mufun) ısıl davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmektedir. Bu amaçla, IEC 60287 nolu standarda göre tesis edilen ve ülkemizde kullanılan 154 kV luk çapraz bağlı polietilen (XLPE) kablo ve ekinin ısıl analizi, ANSYS 5.6 sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmaktadır. Bu çalışmanın ilk amacı kablo ekinin katmanlarının sıcaklık dağılımlarını belirlemek, diğer bir amacı ise, Neher-McGrath'ın enerji denge modeline dayanan IEC 60287 nolu standardı temel alan yeraltı kablosunun ısıl analizinin temel bilgilerini ve sınır koşullarını literatürdeki çalışmaların aksine açık bir şekilde vermektir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki yapılan ablo ekinde hacim oldukça fazladır ve iletken tarafından üretilen sıcaklık, muftan dışarı atılamamaktadır. Bu nedenle kablo eki daha fazla bir ısıl strese maruz kalmakta ve daha hızlı yaşlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı kablo mufu, sonlu elemanlar, ısıl analiz..

THERMAL ANALYSIS OF 154 kV UNDERGROUND CABLE JOINT USING FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

In this paper, thermal analysis of high voltage (HV) power cable joint, which is well-known as the hottest point of underground cable route, is investigated using finite element method (FEM). For this purpose, a 154 kV cable and joint, which are installed in underground transmission system in Turkey by TEIAS according to IEC-60287 standard, are used in analyses by using ANSYS 5.6 finite element analysis software. The first aim of this paper is to determine temperature distribution of cable joint and to compare with the cable parts. The second aim of this study is to give fundamentals and boundary conditions to analyse the ampacity of an installed cable considering IEC-287 standard as a basis. This standard uses Neher-McGrath model, which uses a technique based on a simple model of energy balance in the conductor of the cable, and on an analogy between the flow of electric current and the flow of heat. Obtained results indicate that joint layers have a less heat dissipation characteristic than cable parts due to excessive volume. Therefore the joint insulation is exposed to more thermal stresses and its aging process is accelerated.

Keywords: Underground cable joint, finite element, thermal analysis.

1. GİRİŞ

Enerji iletimi ve dağıtımı özellikle yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde gerek estetik gerekse güvenlik nedeniyle yeraltından yapılmaktadır. Yeraltı kabloları, üretim ve tesisi sırasında özel donanım ve malzemeler

gerektirmesi nedeniyle hava hatlarından daha pahalıdır. Bu nedenle, yeraltına tesis edilen kabloların çok uzun yıllar (30-40 yıl) hizmet vermesi beklenmektedir. Bunu sağlamak amacıyla kablo, üretim sırasında özel yalıtkan malzemeler ve katmanlar ile donatılmasına rağmen, tesisi sırasında

ve işletmede karşılaşılan bazı sorunlar nedeniyle bu süreye ulaşmadan devre dışı kalabilmektedir. Kabloda kullanılan yalıtkan malzemeler, belirli bir izin verilebilir sıcaklık sınır değerine sahiptir. Bu değerlerin işletim sırasında aşılması kablunun daha erken yaşlanmasına neden olmaktadır. Kablunun akım taşıma kapasitesini belirleyen en önemli parametrede yalıtkanın bu sınır işletim sıcaklığıdır. Bu sıcaklık değerine göre kablunun amper kapasitesi, kısaca ampasite olarak bilinen akım taşıma kapasitesi, hesaplanmaktadır. Hesaplama süreci, IEC 60287 nolu standartta verilmektedir [1]. Ancak bu yöntem analitik bir yaklaşımı gerektirdiği için bazı özel ve karmaşık durumlar için yetersiz kalmaktadır.

Yeraltı kabloları belirli bir uzunlukta üretildiği için tesis edilirken birçok noktada ek yapıma zorunluluğu doğmaktadır. Bu ekler yüksek gerilim kablolarında daha kısa mesafelerde ve daha çok sayıda yapılmaktadır. Bu mesafe kablunun çapına bağlı olarak 154 kV için 300–1200 m arasında değişmektedir. Kablo ek noktasının (mufun), yapım sırasında özel malzemeler ve teknikler kullanılmasına rağmen, kablunun ana katmanları ile aynı özellikleri taşıması oldukça zordur. Özellikle ek yapımı sırasında kullanılan aşırı kalınlıktaki malzemeler nedeniyle ek noktasının hacmi artmakta ve iletken üretilen ısının dışarıya atılması zorlaşmaktadır. Bu nedenle ek yerleri, kablo güzergâhının en zayıf ve en sıcak noktaları olarak bilinmektedir. Bir yeraltı kablosu genellikle bu noktalardan arızalandığı için, yapılan önceki çalışmalar ek noktasının sıcaklığını ve buna bağlı olarak işletimdeki ısıl davranışını belirlemeye dönük olarak yoğunlaşmaktadır [2–4].

Nakamura ve arkadaşları [5], yüksek gerilim XLPE kablo ekinin analitik çözümü için ısıl direnç ve ısıl kapasitelerden oluşan tam eşdeğer ısıl devresini çıkarmıştır. Bu modeli kullanarak hesaplanan sıcaklık değerleri, ölçüm değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Ölçüm için iki sistem kullanılmıştır. Bunlar ısıya duyarlı elamanlar (thermo-couple) ve fiberin kendisini algılayıcı olarak kullanan fiber optik sıcaklık algılayıcıdır. Fiber optik sıcaklık algılayıcı çok pahalı bir sistem olmasına rağmen tüm güzergâh boyunca kablo ile birlikte çekilerek çok sayıda noktadan (1m-3m de bir ölçüm) sıcaklık değerleri gözlemek olanağı vermesi açısından önemli bir çözüm getirmektedir. Çalışmada sıcaklık ölçümlerinden muf noktasında ölçülen sıcaklık değerinin kablo kısmına göre yaklaşık 5 °C fazla olduğu görülmektedir. 275 kV luk XLPE kablo eki üretimi ve performansına ilişkin çalışmalarda yapılan elektriksel testler ve analizler oldukça faydalı bilgiler sunmaktadır [6-7]. Bu çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir benzetim (simülasyon) programı ile elde edilen sıcaklık sonuçları, kabloya nazaran muf sıcaklığının değişimi verilmektedir. Ancak çalışmada mufun sınır koşulları ve benzetimden elde edilen sıcaklık sınır değerleri açık değildir. Buna karşın, güvenilirlik için

yapılan elektriksel testler oldukça faydalı bilgiler sunmaktadır. Örneğin yapılan delinme dayanım testlerinde ek noktasının delinme gerilimi, kablo değerinin yarısı olduğu gözlenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi (SEM) analitik yöntem nazaran daha karmaşık sistemleri kolaylıkla çözebilir üstelik ortamdaki sıcaklık dağılımını da verebilir bir yöntemdir[8,9]. Bu nedenle SEM yönteminin karmaşık sistemler için kullanılması daha uygundur ve doğru sonuçlar vermektedir. SEM yöntemi kullanılarak yapılan ısıl analizde; döşenme derinliği, iletken ve ortam sıcaklığı, malzemelerin ısıl iletkenlik katsayıları gibi tesis koşullarının ve kablo özelliklerinin bildirilmesi önemlidir. Ayrıca sınır koşulları ve kullanılan yöntemler de analizi etkileyen önemli unsurlardır[9].

Tüm bu çalışmalara ek olarak kablo mufunun tesis edildiği koşullarda ısıl analizinin incelenmesi önemli ve faydalı olacaktır. Daha önce yapılan analizlerde sınır koşulları ve tesis durumları açıkça belirtilmediği için farklı çalışmaların sonuçları arasında karşılaştırılabilir bir değerlendirme yapmak da oldukça zor olmaktadır.

Bu çalışma, Türkiye’de kullanılan 154 kV luk XLPE kablo ekinin, IEC 60287 nolu standarda göre tesis edildiği koşullarda, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan ısıl analizini ve elde edilen sonuçların değerlendirmesini sunmaktadır. Bu sayede karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek mümkün olmaktadır. Analizler ANSYS programı ile yapılmıştır. Yapılan analizde sınır koşulları ve kablo ölçüleri önceki yapılan çalışmaların aksine açık bir şekilde verilmektedir. Elde edilen sıcaklık dağılımları ve sonuçlar, kablo kısmı ile karşılaştırılarak değerlendirilmektedir.

2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

SEM ile sürekli ortamlar üzerinde tanımlanmış diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözmek mümkündür. SEM ısı iletimi analizi ile malzeme özelliklerine bağlı olarak sıcaklık dağılımı ile ısı akışı oranları hesaplanabilir. Isı iletimi analizi için başlangıç noktası olarak Fourier ısı denklemi kullanılmaktadır [9];

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q = 0 \quad (1)$$

Denklemden T sıcaklığı, q toplam ısı akışını ve k ise ısıl iletkenliği temsil etmektedir. Varyasyonel yöntemlerin kullanılmasıyla aşağıdaki fonksiyonel elde edilebilir.[7]

$$\Pi = \iint \left(\frac{1}{2} k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{2} k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - qT \right) dx dy \quad (2)$$

Model üzerindeki herhangi bir T'yi nodal sıcaklık T_n olarak gösterebilmek için;

$$T = [N] \{T_n\} \quad (3)$$

x ve y'nin bir fonksiyonu olan [N] şekil fonksiyonunu [7] kullanarak nodal sıcaklıklar bulunur. Sıcaklık kısmi türevleri ise matris işlemleri ile

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \left[\frac{\partial^2 [N]}{\partial x^2} \right] \{T_n\} = \left[\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} \right] \{T_n\}, \quad (4)$$

kullanarak bulunur.

$$\Pi = \iint \left(\frac{1}{2} \{T_n\}^T k \left(\frac{\partial^2 [N]^T}{\partial x^2} \frac{\partial^2 [N]}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 [N]^T}{\partial y^2} \frac{\partial^2 [N]}{\partial y^2} \right) \{T_n\} - \{T_n\}^T [N]^T q \right) dx dy \quad (5)$$

denklemleri düzenlenirse direnç matrisi [K] ve kuvvet vektörü {f}

$$[K] = \iint \left(\frac{\partial^2 [N]^T}{\partial x^2} \frac{\partial^2 [N]}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 [N]^T}{\partial y^2} \frac{\partial^2 [N]}{\partial y^2} \right) k dx dy \quad (6)$$

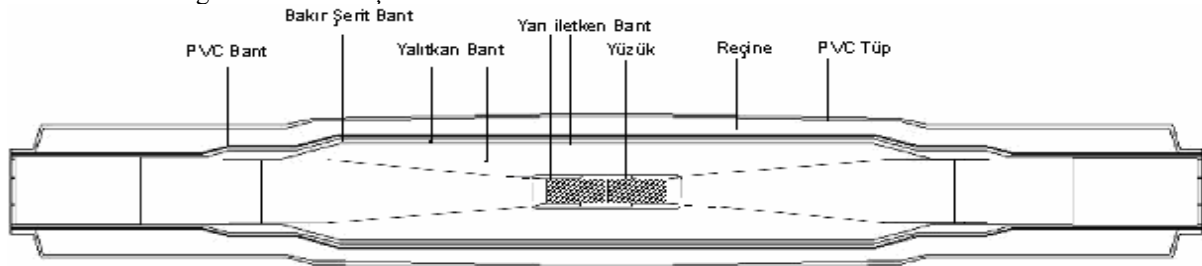
$$\{f\} = \iint [N]^T q dx dy \quad (7)$$

olarak gösterilebilir.

SEM formülleri Π fonksiyonelinin nodal sıcaklıklara göre minimize edilmesiyle bulunur.

$$\left\{ \frac{\partial \Pi}{\partial T_n} \right\} = 0 \text{ ve } [K] \{T_n\} = \{f\} \quad (8)$$

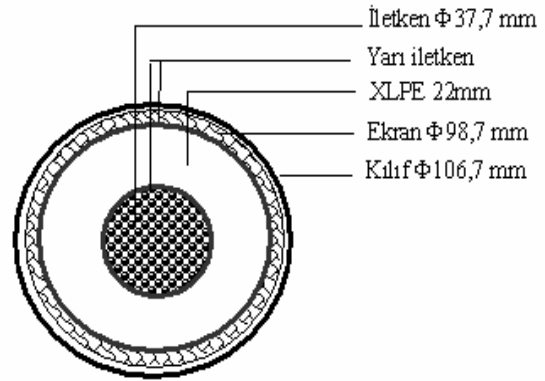
[K] matrisi ve {f} vektörü İntegralleri her eleman üzerinde sayısal olarak (Gaussian Quadrature kullanarak) hesaplanarak, toplam denklem sistemi bulunur ve her düğüm noktasında çözülür.



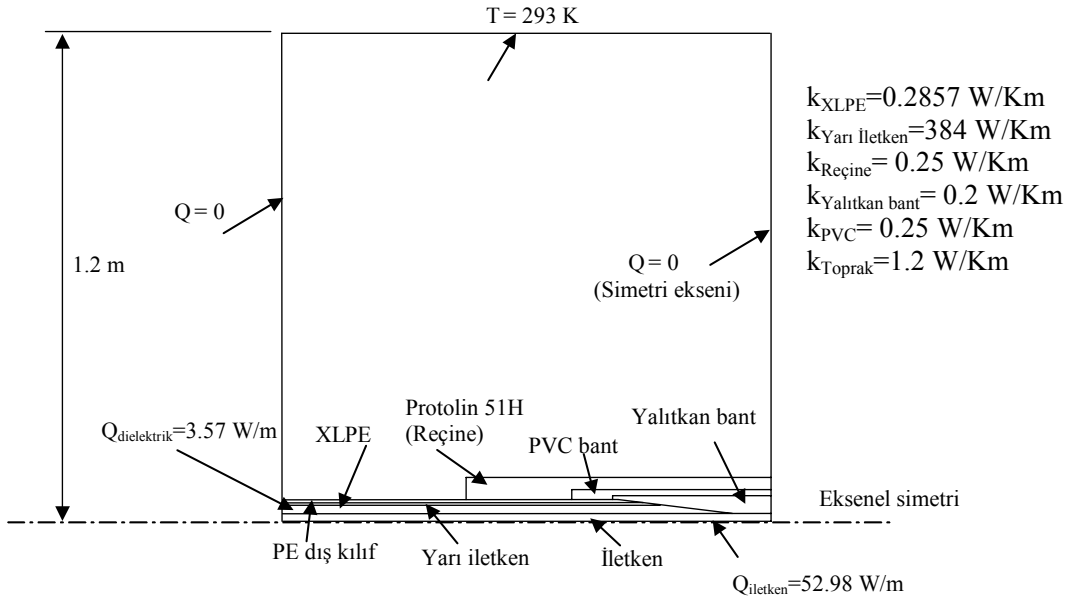
Şekil 2. 154 kV Mufun yapısı

3. 154 KV XLPE KABLO EKİ VE SINIR KOŞULLARI

Şekil-1'de Isıl analizi yapılan 154 kV luk yeraltı kablosu kesiti ve Şekil-2'de ise bu kablunun eki (muf) görülmektedir. Seçilen kablo ve muf, Türkiye'de halen yüksek gerilim çapraz bağlı polietilen (XLPE) yalıtkanlı yeraltı güç kablosu olarak iletim amacıyla kullanılmaktadır. Bu nedenle iletkenin en yüksek sınır işletim sıcaklığı XLPE yalıtkanı için 90 °C alınmaktadır. Kablodan geçen akımın sebep olduğu ısı girişi muf merkezinde en fazla sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Dolayısıyla farklı ısı girişleriyle yapılan analizlerde muf merkezindeki 90°C sıcaklığa 52.98 W/m ısı girişiyle ulaşılmıştır. Isıl analizde kablo iletkenine 52.98 W/m ısı girişi uygulanmıştır. Bir yeraltı kablosunda tek ısı kaynağı akım geçen iletken değildir. Bunun dışında kablunun dielektriği de bir ısı kaynağı gibi davranmaktadır. Üretilen bu ısı kaybı gerilime bağlı olup, kablunun enerjilenmesi ile ortaya çıkmaktadır. IEC 60287 nolu standarda göre dielektrik kaybı 3,57 W/m olarak hesaplanarak girilmiştir.



Şekil 1. 154 kV Kablo yapısı

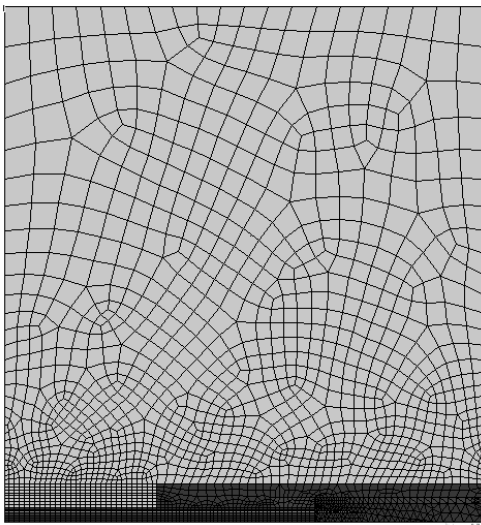


Şekil 3. 154 kV muf ve sınır koşulları

Yeraltı kablolarının ısıl analizinde önemli konulardan birisi de kablunun döşendiği derinliktir. Kablunun 1,2 m ye doğrudan tesis edilmesi ve ortam sıcaklığının da IEC standardına uygun olarak, 20 C olarak alınması ön görülmektedir. Kablunun ve mufun tesis edildiği koşullar Şekil-3'de görülmektedir. Muf eksenine göre olan simetri ayrıca muf merkezinden boyuna göre de simetri bulunmaktadır. Dolayısıyla kontrol alanı olarak 1/4 alan analiz edilmiştir. Her katmandaki malzemenin ısıl iletkenlik katsayıları ayrıca Şekil 3 de verilmektedir.

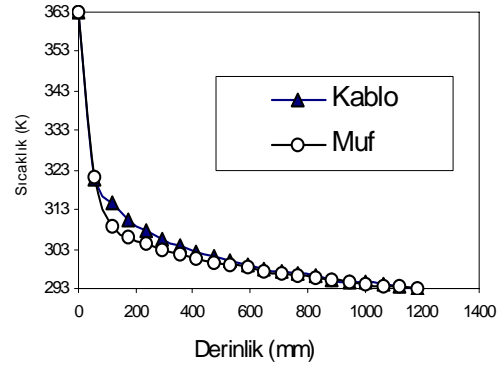
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yukarıda verilen ve bahsedilen değerler yardımıyla, ANSYS programı ile oluşturulan ağ (mesh) yapısı Şekil-4 görülmektedir. Bu ağ, oluşturulan çeşitli ağlar içerisinde en uygunu olarak seçilmiştir.

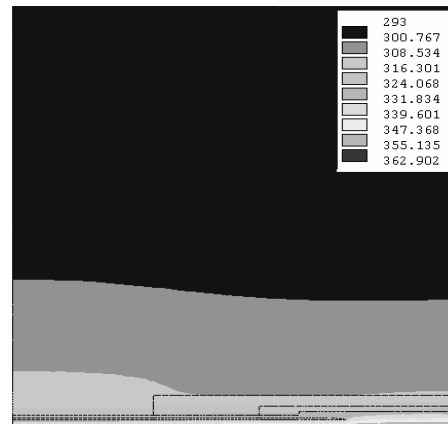


Şekil 4. Muf SEM analizi ağ yapısı

Yapılan analiz sonucunda (Şekil-5) kablo ile muf merkezinden yüzeye olan sıcaklık dağılımından mufda daha az ısı kaçıışı olduğu görülmektedir. Şekil-6'da ise kablo ve mufun sıcaklık dağılımı eşsıcaklık eğrisi olarak görülmektedir. Sıcaklık değerinin mufun merkezinde 363 °K iken yanlara doğru gidildikçe azaldığı ve kablo kısmında yaklaşık 330 °K'e kadar düştüğü görülmektedir.

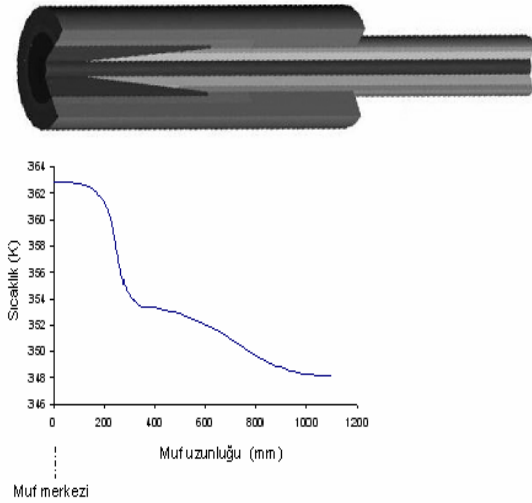


Şekil 5. Tesis derinliğine kadar sıcaklık dağılımı.



Şekil 6. Muf SEM analizi sıcaklık dağılımı

Yine Şekil-7’de kablo eki boyunca merkezden itibaren sıcaklık değişimi görülmektedir. Burada, 200 mm mesafeye kadar ısı kaçışının çok az olduğu görülmektedir. Bu mesafe tamamen kablo ana yalıtkanı XLPE yerine sarılan yalıtkan bandın bulunduğu bölgeyi göstermektedir. Bu noktadan sonra ısı kaçışının hızlandığı Kablo kısmına gidildikçe arttığı görülmektedir. Bu analiz, kullanılan yalıtkan bandın kablo ana yalıtkanın görevini elektriksel olarak yerine getirse bile ısıl olarak uygun olmadığı görülmektedir. Bunun yanında bu noktada bandın sarılması nedeniyle de hacim fazlalığı olduğunda görülmektedir. Bant daha az sarılarak bu hacim zaltılabilir ve böylece ısı kaçıışı da artırılmış olur. Ancak bunu yaparken yüksek gerilim kablolu olduğundan elektriksel dayanımının da göz önünde tutulması gerekir.



Şekil 7. Muf boyunca iletken sıcaklık değişimi

Muf merkezinde oluşan yaklaşık 15 °K sıcaklık farkı bu noktadan kablunun erken yaşlanması ve devre dışı kalmasına neden olacaktır. Çünkü XLPE yalıtkanlı kablolar için sürekli durumda % 100 yük faktörü için en yüksek işletim sıcaklığı 90 °C dir. Ancak, geçici olarak aşırı yüklenme durumunda 105 °C ve acil durumda ise sınır işletim sıcaklığı 130 °C dir.

Yapılan analize göre kablo 90 °C normal işletim sıcaklığında tam yüklenirken muf aşırı yüklenme durumunda kalmaktadır. Bu durumda işletme süresi ve sıcaklığına bağlı olarak meydana gelen binde ($^{0}/_{100}$) ömür kaybı aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir [10].

$$L(\theta, t) = [d(\theta_z) / d(\theta)] t \cdot 1000 / d(\theta_z) \quad (9)$$

$$L(\theta, t) = C_{tr} \cdot t \cdot 1000 / d(\theta_z) = C_{tr} \cdot L_z \cdot \%_{100}$$

Burada,

θ_z : İletken izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığı (XLPE kablo için 90 °C)

θ : iletken sıcaklığı °C

$d(\theta)$: θ işletim sıcaklığındaki kablo ömrü (saniye)

$d(\theta_z)$: kablunun θ_z işletim sıcaklığındaki normal ömrü (saniye)

$L(\theta, t)^{0}/_{100}$: θ sıcaklığında t süresince çalışan kablunun binde ömür kaybı

$L(\theta_z, t)^{0}/_{100}$: θ_z sıcaklığında t süresince çalışan kablunun binde ömür kaybı

olarak verilmektedir. $C_{tr}(\theta, \theta_z)$ ise bağlı zaman katsayısı olup aşağıdaki gibi bulunabilir [10].

$$C_{tr}(\theta, \theta_z) = 10^{\{b \cdot (\theta - \theta_z) / [(\theta + 273) \cdot (\theta_z + 273)]\}} \quad (10)$$

burada, b Arrhenius parametresi olup orta gerilim kabloları için 6127, yüksek gerilim 154 kV kabloları için ise 7820 olarak bulunmuştur [10,11].

Kablo tam kapasite ile (% 100 yük faktöründe) günde 1 saat çalıştığı zaman, aşırı yüklenme durumunda kalacağı için mufun ömür kaybı yukarıdaki eşitlikler kullanılarak, $^{0}/_{100}$ 18,25 olarak hesaplanabilmektedir. Eğer günde 6 saat tam kapasite ile çalışırsa bir yıldaki ömür kaybı yaklaşık %10 olmaktadır.

5. SONUÇ

Yapılan analizler sonucunda yeraltı kablo ekinin, kablunun ana kısımlarına nazaran yaklaşık 15 °C yakın daha sıcak olduğunu göstermektedir. Bu sıcaklık artışı, kablunun en yüksek işletme sıcaklığı 90 °C çalışırken, kablo ekinin aşırı yüklenme sıcaklığı olan 105 °C de çalışması anlamına gelmektedir. Bu nedenle muf bölgesi daha hızlı yaşlanarak beklenmeyen arızalara neden olabilmektedir. Bu sorunu önlemenin bir yolu kablunun ampasitesini (% 100 yük faktöründeki akımını) yeniden belirlemek ve bunun için bir azaltma faktörü kullanmak olabilir. Bunun yanında kablo eki yapımında kullanılan malzemelerin özelliklerinin ve yapım tekniklerinin de yeniden gözden geçirilmesi diğer bir çözüm yolu olabilir. Buna karşın sürekli (geçici) akım yükselmelerinin zamana bağlı SEM analizleri, kablo ve muf için ayrıca yapılması ilerisi için düşünülebilir.

KAYNAKLAR

1. **IEC Publication 60287**, “Calculation of the continuous current ratings of cables”, 1982 3. Edt. 1995.
2. Dang, C., Chaaban, M., “Thermal performance modeling of power cable joints”, **Third International Conference on Power Cables and Accessories 10kV - 500kV**, 130 – 134, 1993.
3. Amyot, N. ve Fournier, D., “Influence of thermal cycling on the cable-joint interfacial pressure”, **IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics**, 35 – 38, 2001.
4. Fournier, D. and Amyot, N., “Diagnostic of overheating underground distribution cable

- joints”, **Electricity Distribution, Contributions. CIREN**, vol.1, pp, 10, 2001.
5. Nakamura, S., Morooka, S., Kawasaki, K., “Conductor temperature monitoring system in underground power transmission XLPE cable joints”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol.7, No.4, pp:1688 – 1697, 1992.
 6. Nakanishi, Y., Fujimori, A., Fukunaga, S., Tanabe, T., Kobayashi, M., Shiseki, N., Ando, K., “Development of prefabricated joint for 275-kV XLPE cable”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol.10, No.3, pp:1139 – 1147, 1995.
 7. Ishihara, J., Suzuki, H., Sakuma, S., Ban, S., Shiseki, N., Yamaguchi, M., “Improvement in reliability of extrusion type molded joint for 275 kV XLPE cable”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol.7, No.4, pp:1735 – 1744, 1992.
 8. **IEC Technical report TR-62095** “Electric cables-current rating-finite element method”, 2003.
 9. Aras, F., Oysu, C. ve Yılmaz, G., “An Assessment of the Methods for Calculating Ampacity of Underground Power Cables” **Electric Power Components and Systems**, 33, 1385-1402, 2005.
 10. Parise, G.; Rubino, G.; Ricci, M., “Life loss of insulated power cables: an integrative criterium to improve the ANSI/IEEE and the CENELEC/IEC method for overload protection, **IEEE, Thirty-First IAS Annual Meeting Industry Applications**, Vol.4, pp:2449 – 2454, 1996.
 11. Aras, F., “**Elektrik ve ısı gerilimler altında 154kV XLPE yer altı güç kablosunun yaşlanma davranışının deneysel incelenmesi ve ampasite ile ilişkilendirilmesi**”, Doktora Tezi, KOU, 2000.