

Boru İçinde Tesis Edilen Yeraltı Güç Kabloları için Azaltma Faktörünün Belirlenmesi

Faruk ARAS, Yunus BİÇEN, Kenan KELES
Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi
41380 Umuttepe, KOCAELİ

ÖZET

Yeraltı güç kablolarının akım taşıma kapasitesi, kabloların bulunduğu koşullar içerisinde, tesis durumu ve işletme koşulları dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu çalışmada, yüksek gerilim güç kablolarının doğrudan değil, boru içerisinde yeraltına tesis edilmesi durumunda, akım taşıma kapasitesinin yeniden belirlenmesi için kullanılabilir bir azaltma faktörü hesaplanmaktadır. Bu azaltma faktörüne ilişkin olarak, TEAŞ'ın kullandığı standart 154 kV luk kablo özellikleri dikkate alınarak doğrudan toprağa tesis edilmesi ve boru içerisinde tesisi edilmesi durumlarındaki akım taşıma kapasitesi IEC 60287 nolu standartlara göre hesaplanmaktadır. Buna ek olarak gerilim ve özellikleri farklı iki kablo için de benzer çalışma yapılmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki, kablo, aynı koşullarda boru içerisine tesis edildiği zaman, izin verilebilir maksimum işletim sıcaklığı artacağı için, akım taşıma kapasitesi yaklaşık %10 azaltılması gerekmektedir. Bu durumda boru içerisinde tesis edilecek yüksek gerilim kabloları için 0.9 gibi bir azaltma faktörü, farklı kablolar üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda önerilmektedir.

Anahtar kelimeler : Yeraltı güç kablosu, akım taşıma kapasitesi, azaltma faktörü

Derating Factor for Underground Power Cables in Pipes

ABSTRACT

The current carrying capacity (ampere capacity - Ampacity) of underground power cables are calculated according to their installation and operation conditions. In this study, a derating factor is determined for underground power cable which is installed in pipe. The 154 kV XLPE power cable which is used in the underground power transmission in Turkey is considered in computations. In addition the calculations are carried out for different two high voltage underground power cables. First, the ampacity of buried cable system is calculated and then the derating factor is determined for the same cable installed in pipe according to IEC 60287 standards. The results indicate that the permissible maximum conductor temperature of the cable can increase noticeably. Therefore, the ampacity of the cable in pipe should be reduced about %10. According to the results of ampacity calculation for different cable types, a derating factor of 0.9 can be used for high voltage underground power cables which are installed in pipe.

Keywords: underground power cable, ampacity, derating factor.

1. GİRİŞ

Elektrik Enerjisinin yeraltından iletimi ve dağıtımı, görünüm, güvenlik ve enerjini kalitesi gibi üstünlükler getirmekle beraber, çok pahalı bir yatırımdır. Bu nedenle daha çok şehir ve sanayinin yoğun olduğu bölgelerde dağıtım şebekesinde kullanılması tercih edilmektedir. Ancak şehir yakınlarından geçen yüksek gerilim iletim kabloları da güvenlik amacıyla yeraltına tesis edilmektedir. Bu durumda yatırım maliyetini uygun bir değerde tutabilmek için, kablo tipi, ölçüsü ve kablunun ömrü, yüklenme durumu gibi kriterleri, dikkate alınması gerekmektedir.

Yeraltı güç kablolarının akım taşıma kapasitesi, kabloların bulunduğu koşullar içerisinde tesis durumu, işletme koşulları ve yalıtkanın izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplarda kablo içinde ısının nasıl dağıldığı ve çevre etkenleri de göz önünde tutulmalıdır. Bir havai hatta iletkenin ürettiği ısı doğal olarak havaya iletirken, ye-

raltı kablosunda iletken tarafından üretilen ısı öncelikle yalıtkan katmanları geçmeli ve daha sonra kabloyu saran topraktan dışarıya iletilmektedir. Bu iletim, kablo geometrisi ve buna bağlı olarak ısı akım yolu üzerindeki ısı dirençlerinin değerine bağlıdır (1).

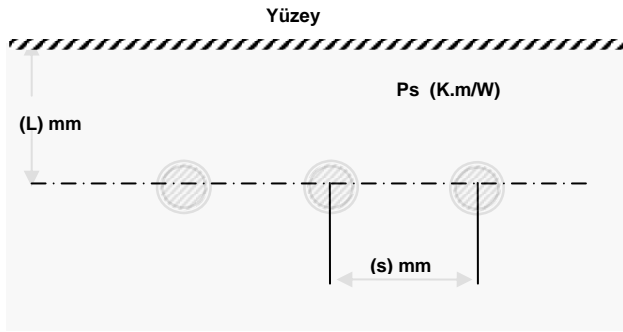
Yeraltı kabloları çoğunlukla doğrudan toprağa tesis edilmektedir. Bu sistem hem ucuz hem de iletken üretilen ısının iletimi için en uygun tesis şekli olduğu için tercih edilmektedir. Ancak kablolar yol geçişlerinde güvenlik amacıyla boru içerisinde tesisi edilmektedirler. Son yıllarda ise tüm güzergah boyunca, özellikle şehir merkezlerinde, boru içerisine tesis edilme şekli tercih edilmektedir. Bu durum kablo iletkeni tarafından üretilen ısının dışarıya iletilmesini daha zorlaştırarak, en yüksek izin verilen kablo sıcaklığının aşılmasına neden olmaktadır. Çapraz bağlı polietilen (XLPE) yalıtkanlı kablolar için bu sıcaklık değeri 90 °C dir. Bu sıcaklık değeri aşıldığı zaman, kablo yalıtkanı daha fazla ısı zorlamaya (strese) maruz kalacağından

kablonun ömrü azalacaktır. Kablo izin verilebilir en yüksek sürekli işletim sıcaklık değeri aşılmak istenmiyorsa, kablunun akım taşıma kapasitesi azaltılmalıdır. Bu nedenle bu gibi durumlarda kullanılmak üzere bir azaltma faktörüne ihtiyaç bulunmaktadır. Bununla ilgili olarak, literatürde kablo kesişimi (2-5) veya köprü geçişlerinde boru içerisindeki kablolar (6) için bir azaltma faktörü önerilmektedir.

Bu çalışmada, TEAŞ'ın kullandığı 154 kVluk standart bir yüksek gerilim kablosu için yapılan hesaplama sonucunda bir azaltma faktörü önerilmektedir. Önerilen bu azaltma faktörünün, başka yüksek gerilim kabloları için de kullanılabilirliği, farklı özelliklere sahip iki kablo (400kV-230kV) için yapılan hesaplamalar sonucunda da anlaşılmaktadır.

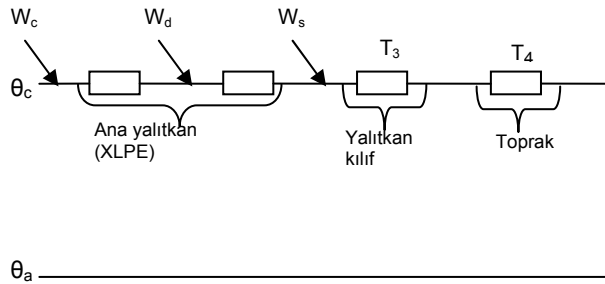
2. AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ MODELİ

İlk başarılı akım taşıma kapasitesi modeli 1957 yılında Neher ve McGrath tarafından ortaya konan ve halen temel alınan ısı devre modelidir (7). Bu modeli temel alan IEC 60287 nolu standartta akım taşıma kapasitesi hesaplama süreçleri ayrıntılı gösterilmektedir (8).



Şekil 1. Doğrudan tesis edilen üç fazlı kablo sistemi

Yeraltı güç kablolarının düz olarak yer altına doğrudan tesis edilme durumu Şekil 1.'de görülmektedir. Doğrudan tesis durumunda kablo ısı devre modeli Şekil 2.'de ki gibi verilebilir



Şekil 2. Doğrudan toprağa tesis edilen kabloların eşdeğer ısı devre modeli

Isıl devrede, W_c iletkende üretilen ısı enerjisi miktarı olup, aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$W_c = I^2 \cdot R_{ac} \quad (1)$$

Burada; I iletken akımını (A) ve R_{ac} ise iletkenin işletme sıcaklığındaki alternatif akım (ac) direncini (Ω/m) göstermektedir.

Isıl devrede görülen W_s metal kılıf/ekran kayıp faktörü olarak adlandırılmakta ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$W_s = W_c \cdot \lambda (w/m) \quad (2)$$

λ kılıf kayıp faktörü olup IEC 60287 nolu standarda göre belirlenmektedir.

W_d ise dielektrik kaybı olup gerileme bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir (9).

$$W_d = w \cdot C \cdot V^2 \cdot \tan \delta \quad (W/m) \quad (3)$$

Burada; V faz-nötr arası gerilim, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ve $\tan \delta$ kayıp faktörü olup, XLPE için 0,08 alınabilir.

Eşitlik (3) 'de yer alan C ise dielektrik malzemenin elektriksel kapasitesi olup, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (8).

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left(\frac{D_y}{d_c} \right)} \cdot 10^{-9} \quad (4)$$

$$D_y = 2 \cdot t_1 + d_c \quad (5)$$

Burada; D_y yalıtkanın dış çapı (mm), t_1 yalıtkanın kalınlığı (mm), d_c iletkenin dış çapı (mm) ve ϵ dielektrik sabiti olup XLPE için 3,5 gibi sabit bir değerdir.

Devredeki T_1 , T_3 ve T_4 katmanların ısı dirençleri ise yine IEC 60287 nolu standarda göre aşağıdaki gibi bulunabilir (8).

$$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_c} \right) \quad (6)$$

$$T_3 = \frac{\rho_j}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \cdot t_3}{D_s} \right) \quad (7)$$

T_4 toprağın ısı direnci hesaplanırken, ortadaki kablo en kötü konumda olduğundan bu kablo için hesaplama yapılır. Buna göre:

$$T_4 = T_{4kendi} + 2 \cdot T_{4diğer} \quad (8)$$

$$T_{A_{kendi}} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left(\frac{2L}{D_e} + \sqrt{\left(\frac{2L}{D_e} \right)^2 - 1} \right) \quad (9)$$

$$T_{4diğer} = \frac{\rho_s}{4\pi} \ln \left(\left(\frac{2L}{s} \right)^2 + 1 \right) \quad (10)$$

Şekil 2'deki devre modeline göre:

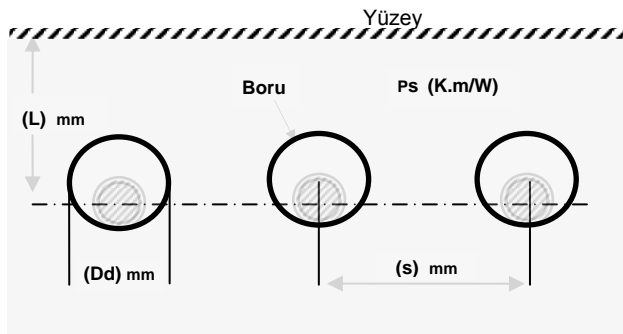
$$\theta_c - \theta_a = W_c(T_1 + T_3 + T_4) + W_d \left(\frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right) + W_s(T_3 + T_4) \quad (11)$$

$$\Delta\theta = W_c \underbrace{\left[T_1 + (1 + \lambda)(T_3 + T_4) \right]}_{T_A} + W_d \underbrace{\left(\frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right)}_{T_B} \quad (12)$$

elde edilir. Burada W_c yerine eşitlik (1) deki ifade yazılacak olursa kablonun akım taşıma kapasitesi;

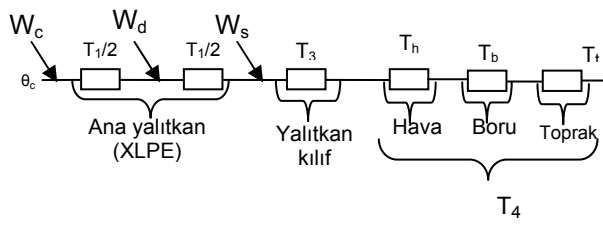
$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot T_B}{R_{ac} \cdot T_A}} \quad (13)$$

olarak belirlenmektedir. Bu değer kablonun sürekli durumda taşıyabileceği maksimum akım değerini göstermektedir.



Şekil 3. Kabloların boru içerisinde tesis edilmesi

Şekil 3.'de görüldüğü gibi kablolar boru içerisinde tesis edilecek olursa, boru ile kablo arasındaki havanın ısıl direnci (T_h) ve polimer borunun ısıl direnci T_b Şekil 4.'de görüldüğü gibi ısıl devreye eklenecektir. Bu durumda iletkende üretilen ısı enerjisinin dışarıya aktarımı daha zorlaşacaktır.



Şekil 4. Boru içerisinde tesis edilen kablonun ısıl devresi

Devredeki T_h ve T_b ısıl dirençler ise aşağıdaki gibi bulunabilir (8,9).

$$T_h = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y \cdot \theta_m) D_e} \quad (14)$$

$$T_b = \frac{\rho_b}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_d}{D_i} \right) \quad (15)$$

$$T_t = \frac{\rho_s}{2\pi} \cdot \ln \left[\left(\frac{2L}{D_d} + \sqrt{\left(\frac{2L}{D_d} \right)^2 - 1} \right) \cdot \left(\left(\frac{2L}{s} \right)^2 + 1 \right) \right] \quad (16)$$

$$T_4 = T_h + T_b + T_t \quad (17)$$

olarak hesaplanır. Burada; D_e kablonun dış çapı, D_i borunun iç çapı, D_d borunun dış çapı, ρ_b borunun ısıl öz direnci, ρ_s toprağın ısıl öz direnci, L döşeme derinliği, s kablo merkezleri arası mesafe, U , V , Y ise malzemeye ve tesis şekline bağlı sabitlerdir ve IEC 60287 nolu standartta verilmektedir (8).

3. AZALTMA FAKTÖRÜNÜN BELİRLENMESİ

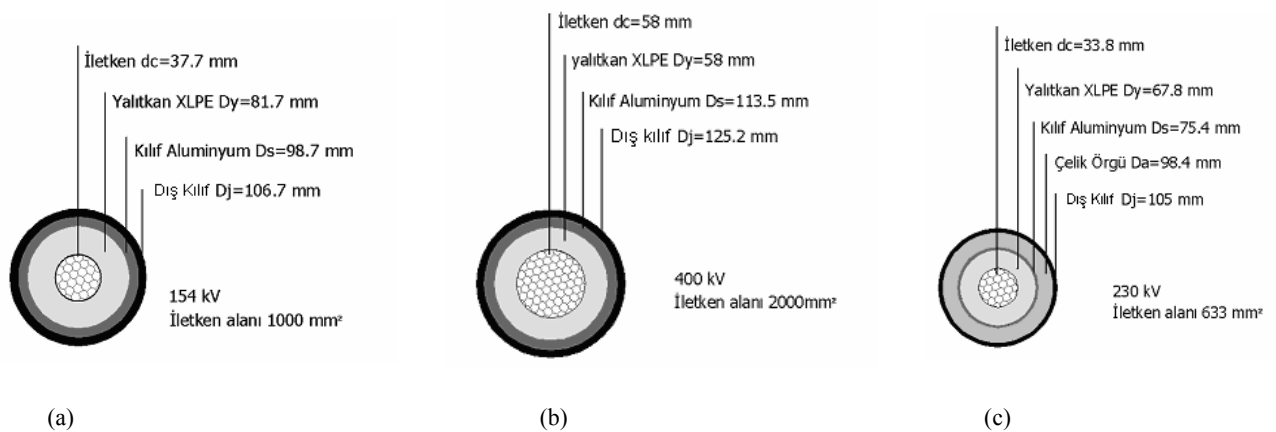
Yukarıda verilen model kullanılarak Tablo 1.'de özellikleri verilen ve Şekil 5 (a), (b), (c) de kesitleri görülen kablolar için yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen akım taşıma kapasiteleri ve ısıl devre parametreleri Tablo 2' de verilmektedir. Her iki tesis durumu için hesaplanan akım taşıma kapasitelerinin aşağıdaki gibi oranlanması ile azaltma faktörleri elde edilebilir.

$$\mu = \frac{I_{boru \text{ içinde}}}{I_{doğrudan}} \quad (18)$$

Tablo 2.'de hesaplanan değerlerden, 230kV luk kablonun gerilimi 154 kV luk güç kablosundan büyük olmasına rağmen, 154kV luk kabloya nazaran daha az akım taşıdığı gözlenmektedir. Bunun nedeni 230 kV luk kablonun iletken kesiti küçük olması ve kablonun katmanlarının yani yalıtkan kalınlıklarının farklılık göstermesidir. Diğer yandan T_4 dış ısıl direncinin önemli ölçüde artış gösterdiği ve bu nedenle hesaplanan yeni akım taşıma kapasitelerinde azalma olduğu görülebilir.

Tablo 1. Kabloların özellikleri

| Parametreler | Kablo 1 | Kablo 2 | Kablo 3 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| İşletim gerilimi faz-faz (V) | 400 000 | 230000 | 154 000 |
| İşletim frekansı (Hz) | 60 | 50 | 50 |
| İletken kesiti (S) (mm) | 2000 | 633 | 1000 |
| Metal kılıf dış çapı (Ds) (mm) | 113,5 | 98,4 | 98,7 |
| Zırh dış çapı (Da) (mm) | 0 | 98,4 | 0 |
| Kablo dış çapı (De) (mm) | 125,2 | 105 | 106,7 |
| İletken çapı (dc) (mm) | 58 | 33,8 | 37,7 |
| Max izin ver. İlet. Sıcaklığı (°C) | 90 | 90 | 90 |
| İletkenin cinsi | Bakır | Bakır | Bakır |
| İletkenin ac direnci (Rac) (Ω/m) | 0,0000126 | 0,0000356 | 0,0000252 |
| Ana yalıtkanın ısı direnci (K.m/W) | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Dielektrik kaybı (Wd) (Watt) | 6,53 | 6,62 | 3,57 |
| Yalıtkan kalınlığı (t_1) (mm) | 18 | 17,6 | 22 |
| Yalıtkanın ısı direnci (K.m/W) | 6,5 | 3,5 | 3,5 |
| Kılıf kalınlığı (t_2) (mm) | 6 | 3,2 | 4 |
| Kılıf kayıp faktörü (λ_1) | 0,14 | 0,325 | 0,035 |
| Zırh kayıp faktörü (λ_2) | 0 | 0,955 | 0 |
| Dış kılıf yalıtkanının ısı öz direnci (K.m/W) | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Dış kılıf kalınlığı (t_3) (mm) | 6 | 3,3 | 4 |
| Kablolar arası uzaklık (s) (mm) | 500 | 500 | 330 |
| Kablo döşeme derinliği (L) (mm) | 1800 | 1400 | 1200 |
| Toprağın ısı öz direnci (K.m/W) | 0,833 | 0,833 | 0,833 |
| Ortam sıcaklığı (°C) | 20 | 20 | 20 |
| Boru dış çapı (Dd) (mm) | 250 | 200 | 200 |
| Boru iç çapı (Di) (mm) | 246 | 196 | 196 |



Şekil 5. Yüksek gerilim yeraltı güç kabloları kesit görünüşleri (a) 154 kV (b) 400kV (c) 230 kV

Tablo 2. Hesaplanan değerler

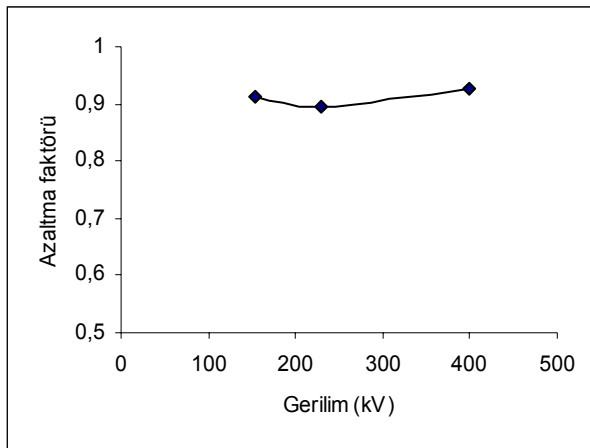
| Kablo akım taşıma kapasitesi (A) | | | Isıl Dirençler | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | Doğrudan Gömülü | | | Boru İçerisinde Gömülü | | | | | |
| Kablolar | Doğrudan | Boru İçinde | T ₁ (Km/W) | T ₃ (Km/W) | T ₄ (Km/W) | T ₁ (Km/W) | T ₃ (Km/W) | T ₄ (Km/W) | T _b (Km/W) | T _b (Km/W) | T _i (Km/W) |
| Kablo 1 | 1855 | 1718 | 0,264 | 0,0546 | 0,972 | 0,264 | 0,0546 | 1,153 | 0,257 | 0,0154 | 0,879 |
| Kablo 2 | 834 | 747 | 0,397 | 0,0362 | 0,896 | 0,397 | 0,0362 | 1,135 | 0,305 | 0,0193 | 0,8112 |
| Kablo 3 | 1399 | 1278 | 0,431 | 0,0434 | 0,835 | 0,431 | 0,0434 | 1,0708 | 0,300 | 0,0193 | 0,75 |

Tablo 3. Kabloların azaltma faktörleri

| Ortalama (μ) | Kablo 1 (μ_1) | Kablo 2 (μ_2) | Kablo 3 (μ_3) |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0,911 | 0,926 | 0,896 | 0,914 |

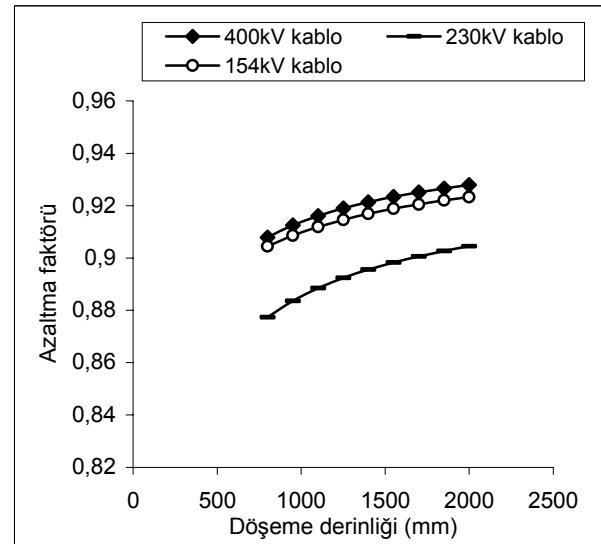
Tablo 3.'den görülebileceği gibi, her üç kablo için de azaltma faktörleri yaklaşık değerlerdir. Bu nedenle, boru içerisine tesis edilen yüksek gerilim kabloları için ortalama 0.9 gibi bir azaltma faktörü kullanılabilir. Bu değer, kablunun boru içerisinde tesis edilmesi durumunda akım taşıma kapasitesinin yaklaşık % 10 azaltılmasını ifade etmektedir.

Şekil 6.'da azaltma faktörünün gerilim ile çok fazla değişmediği görülmektedir. Bu nedenle ortalama 0.9 gibi bir azaltma faktörü kullanılabilir. Ancak bu değer yüksek gerilim kabloları için geçerlidir.

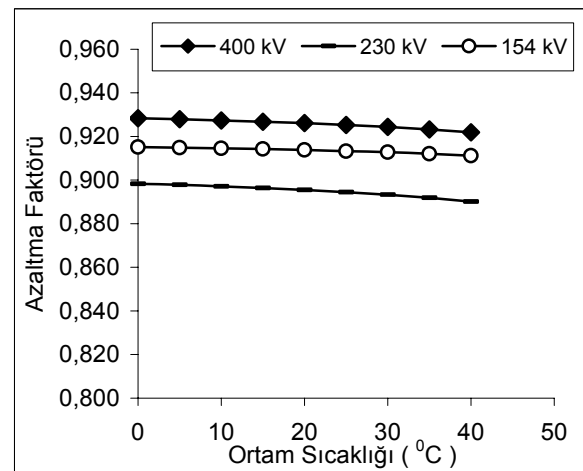


Şekil 6. Azaltma faktörünün gerilime ile değişimi

Şekil 7. de görülen azaltma faktörünün döşeme derinliği ile değişimi incelendiğinde, azaltma faktörünün derinlik arttıkça arttığı görülmektedir. Bu durumda, doğrudan tesis durumuna göre eklenen ısı dirençlerin yani borunun etkisinin derinlik arttıkça etkisinin azaldığı söylenebilir.



Şekil 7. Azaltma faktörünün döşeme derinliği ile değişimi



Şekil 8. Azaltma faktörlerinin ortam sıcaklığı ile değişimi

Şekil 8.'de ise azaltma faktörüne ortam sıcaklığının etkisi incelenmektedir. Görüldüğü gibi, ortam sıcaklığı ile azaltma faktörü çok fazla değişmemektedir. Çünkü her iki durum için de ortam sıcaklığı yakın etkiyi göstermektedir.

4. SONUÇ

Güç kablolarının akım taşıma kapasitesi, kablunun tesis edilme durumu ve işletme koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Ancak kablunun boru içerisinde tesis edilmesi durumunda, akım taşıma kapasitesi yeniden belirlenmelidir. Bunun için bir azaltma faktörü yaklaşık 0,9 olarak hesaplanmıştır. Bu değer oldukça önemlidir ve yüksek gerilim kabloları için kullanılması uygun görülmektedir. Çünkü ısının atılmaması nedeniyle kablo yalıtkanının izin verilebilir en yüksek sıcaklık değeri aşılsa kablo beklenenden daha kısa sürede devre dışı kalabilir. Kablunun akım taşıma kapasitesi bu değer dikkate alınarak yeniden belirlenmesi, aşırı yüklemeler gibi durumların ortaya çıkacağı işletme koşullarından da kablunun zarar görmesini (ömür kaybını) önleyecektir. Bununla birlikte, yaklaşık % 10 kadar kablo akım taşıma kapasitesinin azaltılması nedeniyle, kabloların boru içerisinde tüm güzergâh boyunca tesis edilmesinin hem maliyet hem de kablo işletimi için uygun olmadığı söylenebilir.

5. KAYNAKLAR

- Hana M.A Chikhani A.Y , Salama M.M.A , “Effect of Geometry Between Cables the Heat Dissipation From Underground Cable Systems”, Proc., Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp.433-436, 1993.
- Sahin, M. , Brakelmann ,H., “Transient Temperature Rise of Cable Crossings” ETEP Vol.8, No.3, 1998, pp.217-220.
- Anders, G.; Brakelmann, H. “Cable crossings-derating considerations. I. Derivation of derating equations” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, No:3, 1999 pp:709 – 714.
- Anders, G.; Brakelmann, H. “Cable crossings-derating considerations. II. Example of derivation of derating curves” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, No:3, 1999, pp: 715 – 720.
- Brakelmann, H, Anders, G.;. “Ampacity reduction factors for cables crossing thermally unfavorable regions ” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No: 4, 2001 pp:444 - 448.
- Kazama Y., Ichiyanaği N., Kasura M. , Fujui O. , “Method for Calculating Temperature Rise in Cables in Bridge Ducts ”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, No:1, 1991, pp. 8-14.
- Neher. J. H. And McGrath, M.H., “ The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems ”, AIEE Trans. V:76, 1957, pp. 752-772.
- IEC Publication 60287, “ Electric Cables-Calculation of The Current Rating-Part 2-1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance ” ,Ed. 1.1, 2001
- Anders, G.J. “Rating of Elektrik Power Cables. Ampacity Computations for Transmission, Distribution and Industrial Applications”, IEEE Press, New York, 1997