



## RADYAL ŞEBEKELERDE DESTEK VEKTÖR REGRESYON İLE OPTİMUM KABLO TOPRAKLAMA SİSTEMİ TASARIMI

Bahadır AKBAL

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
Konya, TÜRKİYE  
[bakbal@ktun.edu.tr](mailto:bakbal@ktun.edu.tr)*

**Geliş/Received: 13.03.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.06.2020)**

**ÖZ:** Teknolojinin gelişmesi ile elektrik şebekelerindeki yüklerin çeşitliliği de artmıştır. Bu çeşitli yükler şebekede sıfır bileşen ve harmonik akımlarını artırarak yüksek gerilim yeraltı kablolarında başlık arızalarına neden olmaktadır. Uygulamada kablo başlığı arızalarını önlemek için genellikle IEEE 575-1988 standardında yer alan çift taraflı topraklama (ÇTT) yöntemi kullanılmaktadır. Fakat bu yöntem sıfır bileşen ve harmonik akımlarının neden olduğu kablo başlığı arızalarını önlemek için yeterli değildir. Bu çalışmada yeni bir yöntem olan Parçalı Çift Taraflı Topraklama (PÇT) yöntemi ile ÇTT yöntemi karşılaştırılmıştır. PÇT yönteminin kullanılması için kabloda oluşacak olan kılıf geriliminin bilinmesi gereklidir. Bu yüzden Destek Vektör Regresyon (DVR) yöntemleri ile kılıf gerilimi tahmini yapılmıştır. Daha sonra kablo arızalarını ve elektrik çarpmalarını önlemek için PÇT yöntemi dokunma gerilimine göre optimize edilmiştir. Optimizasyon yöntemleri olarak da Parçacık Sürü Optimizasyonu, İnertia Ağırlıklı Parçacık Sürü Optimizasyonu, Çekimsel Arama Algoritması ve Genetik Algoritma kullanılmıştır. Çalışma sonunda, yüksek gerilim kablosunun topraklamasının ÇTT yöntemi ile yapılması durumunda kılıf geriliminin dokunma gerilimini aştığı görülmüştür. Bu durum dengesiz elektrik alanı nedeniyle kablo arızasına, yüksek gerilim nedeniyle de elektrik çarpılmasına neden olmaktadır. Aynı hat için tasarlanan optimize edilmiş PÇT yöntemlerinde ise kılıf gerilimi aşılamamıştır. Böylece PÇT yöntemi ile hem kablo arızalarının hem de elektrik çarpmalarının önüne geçilecektir.

*Anahtar Kelimeler: Yüksek gerilim kablosu, Topraklama, Regresyon, Optimizasyon*

### Optimum Cable Bonding Design in High Voltage Cables by Regression in Radial Network

**ABSTRACT:** With the development of technology, the variety of loads in electrical networks has also increased. These various loads increase the zero component and harmonic currents in the network and cause cable termination faults in high voltage underground cables. In practice, the solid bonding (SB) method, which is included in the IEEE 575-1988 standard, is generally used to prevent cable termination faults. However, this method is not sufficient to prevent cable termination faults caused by zero component and harmonic currents. In this study, a new method, the sectional solid bonding (SSB) method and the SB method were compared. In order to use the SSB method, it is necessary to know the sheath voltage that will occur in the cable. Therefore, sheath voltage estimation is made with the Support Vector Regression (SVR) methods. Later, the SSB method is optimized with touch voltage to prevent cable failures and electrical distortions. Particle Swarm Optimization, Inertia Weighted Particle Swarm Optimization, Gravitational Search Algorithm and Genetic Algorithm were used as optimization methods. At the end of the study, it has been observed that the sheath voltage exceeds the touch voltage in case the grounding of the high voltage cable is performed by the SB method. This causes cable failure due to unbalanced electric field and electric shock due to high voltage. In the optimized SSB methods designed for the same line, the

sheath voltage is not exceeded. Thus, both cable faults and electrical shock will be prevented by the SSB method.

**Key Words:** *High voltage cable, Bonding, Regression, Optimization*

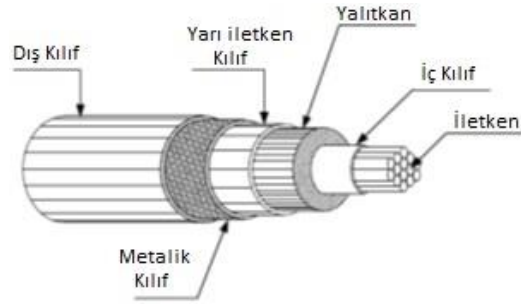
## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında kayıpların düşürülmesi için iletken kesiti artırılmaktadır. Fakat hat uzunluğu veya talep edilen güç yüksek ise kayıpların azaltılması için sadece kesit artırımı yetmez. Bu durumda yüksek gerilimli hatlar kullanılarak kayıplar düşürülmektedir. Yüksek gerilimden dolayı oluşan yüksek elektrik alanı yalıtım sorunlarına neden olur. Bu yüzden elektrik enerjisinin taşınması için kullanılan havai ve yeraltı kablolu hatlar, yalıtım hatalarından dolayı oluşan kısa devreleri önlemek için yüksek elektrik alanına göre tasarlanırlar. Havai hatlarda yalıtkan olarak hava göz önünde bulundurulurken, yüksek gerilim yeraltı kablolarında genellikle PVC (polivinil klorür) veya XLPE (çapraz bağlı polietilen) yalıtkan malzeme olarak kullanılmaktadır.

Havai hatların maliyetinin yeraltı kablolu hatlara göre daha düşük olması uzun hatlarda kullanılma nedenlerinin başında gelmektedir. Fakat havai hat iletkenlerinde herhangi bir yalıtkan malzeme kullanılmaması ve havanın elektrik alan dayanımının diğer yalıtkan malzemelere göre düşük olması, özellikle yerleşim yerlerinde önemli yalıtım sorunlarına neden olmaktadır. PVC ve XLPE yalıtkanlarının elektrik alan dayanımları havaya göre yüksek olması, yüksek gerilim kablolu hatların hem daha güvenli enerji dağıtımına hem de yüksek gerilim tesislerinde daha az yere gereksinim duyulmasına olanak sağlar (Bak ve diğ., 2016). Dolayısıyla şehir merkezlerinde ve kalabalık yerleşim yerlerinde yüksek gerilimli elektrik dağıtımı yeraltı kabloları ile sağlanmaktadır. Ayrıca yüksek gerilim kablolarının yalıtkan özelliğinin iyi olmasından dolayı yüksek gerilimli elektrik tesislerinde birçok bağlantı yüksek gerilim yeraltı kabloları ile sağlanır. Özellikle yüksek gerilim aygıtlarının trafo ve jeneratöre olan bağlantıları da yüksek gerilim yeraltı kabloları ile yapılmaktadır.

Yeraltı kablolu hatlar sadece şehir merkezi gibi kalabalık ortamlarda değil aynı zamanda havai hatların tesis edilemeyeceği deniz aşırı ülkelere elektrik enerjisinin taşınmasında da kullanılmaktadır (Benato ve diğ., 2017). Görüldüğü üzere çoğu kez havai hatlar ile yeraltı kablolu hatlar birlikte kullanılmakta (Shuai ve diğ., 2016; Jittiphong ve diğ., 2017; Jiali ve diğ., 2019; Gatta ve diğ., 2005) ve elektrik şebekelerinde yüksek gerilim yeraltı kablolarının kullanımına olan gereksinim de gün geçtikçe de artmaktadır. Bu yüzden yüksek gerilim yeraltı kablolarının arızalarının önlenmesi enerji sürekliliği açısından önemlidir.

Yüksek gerilim yeraltı kabloları birçok tabakadan oluşmakta ve gerilim seviyesi arttıkça tabaka sayısı da artmaktadır. Özellikle çok daha yüksek gerilimlerde tabakalar arasında düzgün zorlanma koşulu sağlanarak kablo boyutunun aşırı büyümesinin önüne geçilir. Şekil 1’de bir yüksek gerilim kablosunun tabakaları gösterilmektedir. Yalıtkan tabakanın üzeri yarı iletken bir malzeme ile kaplanarak yalıtkan üzerindeki elektrik alanı hem düzgünleştirilir hem de sınırlandırılır (Sachin ve Arun, 2016). Yarı iletken malzemenin üzerinde ise bir metalik kılıf bulunmaktadır. Bu kılıf, kablonun yalıtkan tabakasını dış darbelerle karşı korurken elektrik alanının da düzgün dağılımına yardımcı olur.

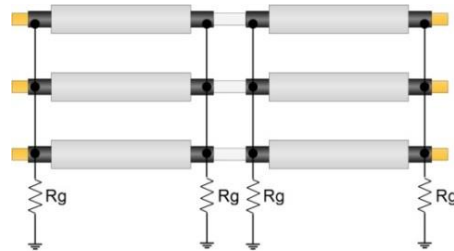


Şekil 1. Yüksek gerilim kablosu (Tziouvaras, 2006)

Figure 1. High voltage cable

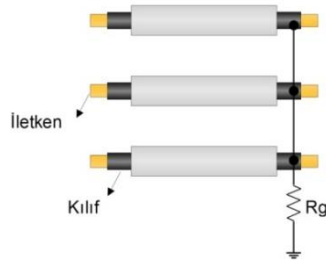
Yüksek gerilim kabloları ile yüksek gerilim ekipmanları arasındaki bağlantı için kablo başlıkları kullanılmaktadır. Kablo başlıkları yüksek gerilim kablolarına monte edilir ve yüksek gerilim ekipmanı ile toprak arası atlamaların engellenmesi için kullanılmaktadır. Kablo başlıkları, dış ortam (harici) ve iç ortam (dâhili) kablo başlıkları şeklinde üretilmektedir. Kablo bağlantı yerine göre iç veya dış ortam kablo başlığı kullanılmaktadır.

Metalik kılıf yalıtkan tabakayı korurken yük akımından dolayı üzerinde gerilim oluşur (Czapp ve diğ., 2014). Eğer metalik kılıf topraklanmazsa, kablo uzunluğunun da artması ile kılıf üzerindeki gerilim büyür (Gouramanis ve diğ., 2011). Özellikle yüksek gerilim kablosuna kablo başlığı takılırken yalıtkan üzerinde bulunan yarı iletken malzeme yalıtkan üzerinden kazındığı için kılıf üzerindeki gerilim artışı kablo başlığı üzerinde dengesiz ve yüksek elektrik alanı oluşmasına neden olur. Bu yüzden yüksek gerilim kabloları kablo başlık noktalarından, kılıf üzerindeki potansiyeli sıfırlamak için topraklanırlar. Metalik kılıf topraklaması genellikle IEEE 575-1988 standardına göre yapılmaktadır (Jung ve diğ., 2007). Bu topraklama yöntemleri tek taraflı, çift taraflı ve çapraz topraklama yöntemleridir ve sıra ile Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir. Uygulamada genellikle kısa hatlarda tek taraflı topraklama, uzun hatlarda ise çift taraflı topraklama kullanılmaktadır. Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilen  $R_g$  dirençleri ise toprak geçiş dirençlerini temsil etmektedir.



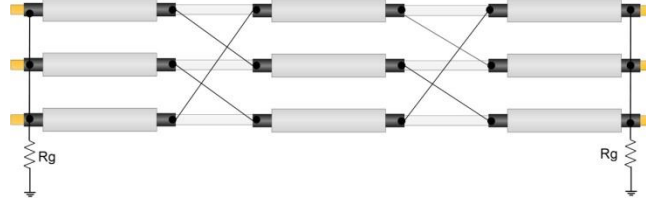
Şekil 2. Tek taraflı topraklama

Figure 2. Single point bonding



Şekil 3. Çift taraflı topraklama

Figure 3. Solid bonding



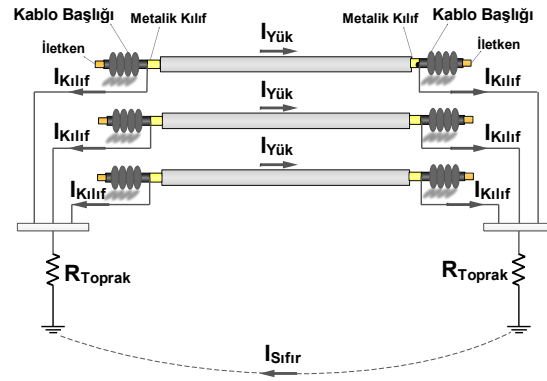
Şekil 4. Çapraz topraklama

Figure 4. Cross bonding

Kablo arızaları genellikle yalıtkan tabakanın zarar görmesi veya dış etkilerden dolayı yaşlanarak yalıtkanlık özelliğini yitirmesinden kaynaklanır. Yalıtkanın yaşlanması yani yalıtkanlık özelliğini yitirmesinde, yüksek elektriksel zorlanma ve sıcaklık artışı en önemli etkenlerdir (Shuai, 2016; Bessissa ve diğ., 2016; Yunus, 2016). Yüksek gerilim kabloları başlık noktalarından topraklandığında kablonun metalik kılıfından kılıf akımı akmaya başlar (Ruiz ve diğ., 2007; Jung ve diğ., 2005; Mingzhen ve diğ., 2019; Xiang ve diğ., 2017). Metalik kılıftan akan akım kablonun yalıtkan tabakası üzerinde hem sıcaklığı hem de elektrik alanını artırarak yalıtkanın yaşlanmasına dolayısıyla arızalanmasına neden olur. Özellikle kablo başlığı yapılırken işçilik hataları da varsa kablo arızaları kaçınılmazdır. Ayrıca yük akımı harmonik içeriyorsa kablonun metalik kılıfı tıpkı bir transformatör gibi çalıştığı için metalik kılıfta aynı zamanda akım harmonikleri de görülür. Bu harmonik akımları ise hem kılıf gerilimini hem de sıcaklığı artırmaktadır (Zhonglei ve diğ., 2012).

Harmonik bozunumu artıran en önemli etken güç elektroniği elemanlarıdır. Güç elektroniği elemanları endüstride ve yenilenebilir enerji kaynaklarında sıkça kullanılmakta olup kullanımı da her geçen gün artmaktadır. Bundan dolayı bu sorun şebeke için daha büyük boyutlara gelecek ve yeraltı kablolu hatlarda bundan olumsuz etkilenecektir.

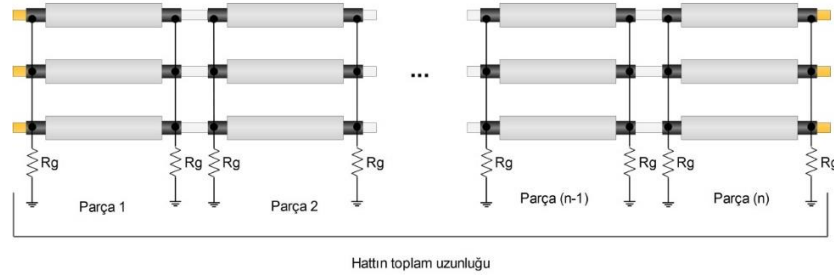
Ayrıca dengesiz yük akımı ve akım harmoniklerinden dolayı güç trafolarının nötründen sıfır bileşen akımı akmaktadır (Zhangping ve diğ., 2015). Bu sıfır bileşen akımları devrelerini kabloların metalik kılıflarından tamamlamaktadır (Jiangchao ve diğ., 2015, Mehdi ve diğ., 2014). Dolayısıyla sıfır bileşen akımı kılıf gerilimini artırarak kablo başlık noktalarındaki dengesiz elektrik alan şiddetini artırdığı gibi harmonikli akım barındırdığı için yalıtkan sıcaklığını da yükseltecektir. Ayrıca şebekedeki yüksek gerilim kablo arızaları incelendiğinde, yüksek gerilim yeraltı kablolu hatlarda arızaların genellikle başlık bölgesinde olduğu görülmüştür. Kabloların başlık noktalarından topraklanmasına rağmen başlık arızalarının görülme nedeni kullanılan topraklama yöntemlerinin günümüz koşullarında yetersiz olmasıdır. Görüldüğü üzere kablo başlığı arızalarının başlıca nedenleri sıfır bileşen akımı, elektrik alan dengesizliği ve akım harmonikleridir. Bu durum Şekil 5'te de gösterilmektedir.



Şekil 5. Metlik kılıf topraklama

Figure 5. Grounding of metallic sheath

Sıfır bileşen akımı ve akım harmonikleri kaynaklı kablo başlığı arızalarını önlemek için Parçalı Çift Taraflı (PÇT) topraklama yöntemi geliştirilmiştir (Akbal, 2018). Bu yöntem Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Parçalı çift taraflı topraklama

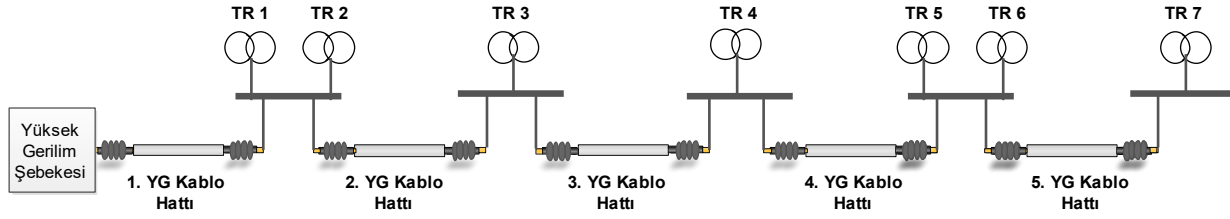
Figure 6. The sectional solid bonding

PÇT yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en önemli özelliği ise bu yöntemin tasarlanırken bu sıfır bileşen ve akım harmoniklerinin göz önünde bulundurulmasıdır. PÇT yönteminde toplam hat uzunluğu parçalara ayrılır ve her parça çift taraflı olarak topraklanır. PÇT yönteminde, yapılacak olan kablo topraklamasının en güvenli ve en ekonomik olması amaçlanmaktadır. Dolayısıyla optimum parça uzunluğu ve toprak geçiş direncinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada PÇT yönteminin optimizasyonu yapılmış ve sonuçları IEEE 575-1988 standardında önerilen çift taraflı topraklama yönteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

PÇT yönteminde uygun bir topraklama için parçaların uzunluğu ve kılıf toprak geçiş dirençlerinin değerleri önemlidir. Materyal ve yöntem bölümünde PÇT parametrelerinin en uygun değerlerinin elde edilmesinde kullanılan algoritma ve önerilen yöntemler tanıtılmıştır.

Elektrik şebekeleri tasarlanırken radyal, ring ya da ağ şebeke yapılarına göre tasarlanırlar. Yük yoğunluğuna göre de kullanılacak şebeke tipi seçilir. Şehir merkezlerinde elektrik enerjisi genellikle alçak gerilimle dağıtılır ve yük yoğunluğu da fazladır. Bu gibi yerlerde ağ tipi şebeke kullanılır. Yüksek gerilimle enerji dağıtımında ise genellikle radyal ve ring şebeke tipleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Şekil 7'de gösterilen radyal tip şebeke yapısında kullanılan yüksek gerilim kabloları için regresyon tabanlı PÇT yönteminin tasarımı ve uygulaması yapılacaktır.



Şekil 7. Radyal şebeke

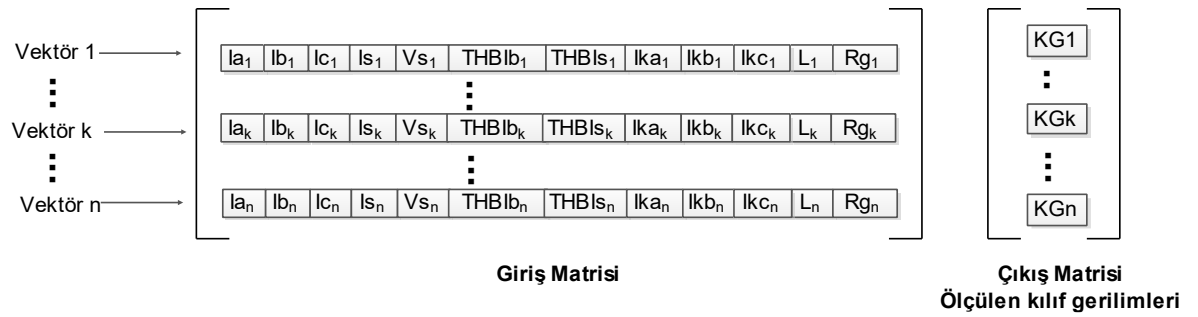
Figure 7. Radial network

Kablo başlığı arızalarının önlenmesi için yeraltı kablolu hattın özelliğine göre PÇT parametrelerinin, hat kurulmadan önce yani proje aşamasında iken belirlenmesi gereklidir. PÇT parametrelerinin optimizasyonunda metalik kılıf üzerinde oluşan kılıf gerilimi kullanılmaktadır. Optimizasyon problemlerinin çözümünde bir amaç fonksiyonu gereklidir. Dolayısıyla kılıf gerilimini belirleyecek bir amaç fonksiyonuna gerek vardır. Bu amaç fonksiyonu çoğu kez bir matematiksel formüldür. Fakat kılıf geriliminin matematiksel formülünün elde edilmesi karmaşıktır. Çünkü kılıf gerilimi üzerinde birçok parametre etkindir. Ayrıca literatürde bunun üzerine yapılan bir çalışmada matematiksel formülün doğruluk değerinin düşük olduğu da belirtilmiştir (Marina ve diğ., 2019). Dolayısıyla bu çalışmada kılıf geriliminin belirlenmesinde Destek Vektör Regresyon (DVR) yöntemleri kullanılmıştır.

DVR yöntemi doğrusal olmayan problemlerin çözümünde, özellikle tahmin ve tanıma çalışmalarında kullanılmaktadır (Alex,2004). DVR yöntemi de kendi içinde kollara ayrılmaktadır. Bunlar, Linear DVR (LDVR), Quadratic DVR (QDVR), Cubic DVR(CDVR), Fine Gaussian DVR (FGDVR), Medium Gaussian DVR (MGDVR), Coarse DVR (CoDVR) şeklindedir. Bu çalışmada kılıf geriliminin tahmini için sayılan DVR yöntemlerinin eğitim sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda eğitim hatası en düşük olan DVR yöntemi PÇT yönteminin optimizasyonunda amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

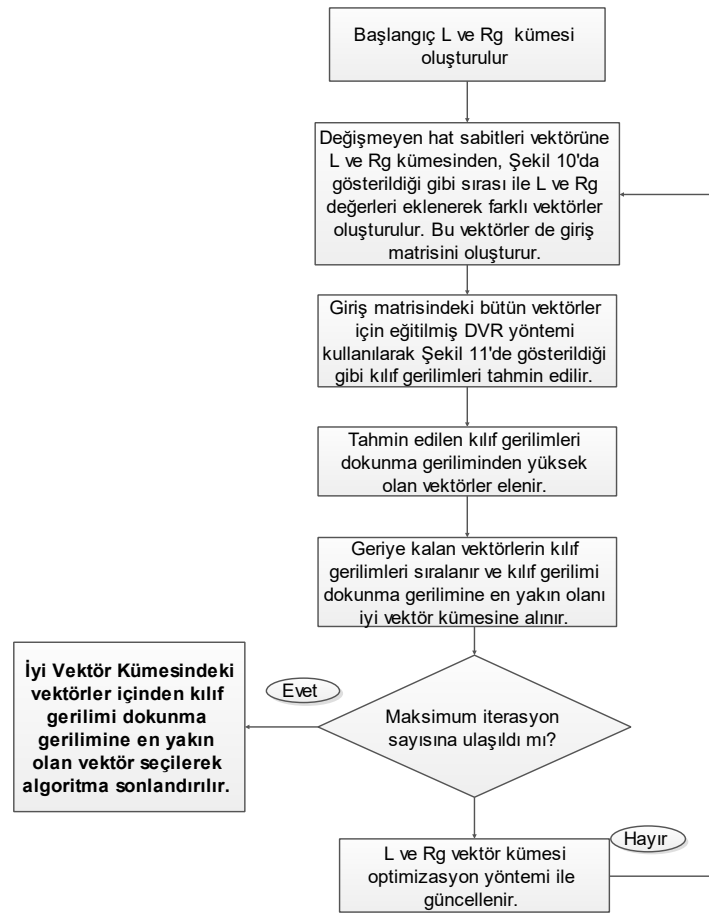
DVR yöntemi ile yüksek gerilim yeraltı kablolu hatlarda oluşacak olan kılıf gerilimini tahmin etmek için öncelikle bu yöntem eğitilmelidir. Eğitim işlemi için de giriş ve çıkış verileri gereklidir. Bu çalışmada eğitim parametrelerinin belirlenmesi için literatür araştırması, benzetim çalışmaları ve uygulamada karşılaşılan kablo başlığı arızalarının incelemesi yapılmıştır.

Benzetim çalışmaları için PSCAD/EMTDC benzetim programı kullanılmış ve farklı yüksek gerilim yeraltı kablolu hatlar oluşturularak, bu hatlarda oluşan kılıf gerilimleri üzerindeki etkili parametreler belirlenmiştir. Literatürden, benzetim çalışmalarından ve uygulamadan görüldüğü üzere kılıf gerilimi üzerinde hat uzunluğu (L), kılıf toprak geçiş direnci (Rg), hat akımları (Ia, Ib, Ic), sıfır bileşen akımı (Is) ve gerilimi (Vs), hat başı toplam akım harmoniği bozunumu (THBIb), hat sonu toplam akım harmoniği bozunumu (THBI), her bir faza ait kablodaki kılıf akımlarının (Ika, Ikb, Ikc) etkin olduğu görülmüştür. PSCAD/EMTDC benzetim programında, farklı hatlar için Ia, Ib, Ic, Is, Vs, THBIb, THBI, Ika, Ikb, Ikc, L ve Rg parametre değerlerine göre benzetim yapılmış ve bu hatlara ait kılıf gerilimleri (Vk) ölçülmüştür. DVR yöntemlerinin eğitim çalışmalarında Ia, Ib, Ic, Is, Vs, THBIb, THBI, Ika, Ikb, Ikc, L ve Rg parametreleri giriş verileri ve bu parametre değerlerine göre PSCAD/EMTDC benzetim programında ölçülen Vk değerleri de çıkış verileri olarak kullanılmıştır. DVR yöntemlerinin eğitiminde kullanılan giriş ve çıkış verilerinin bulunduğu matrisler Şekil 8'de özetlenmiştir.



**Şekil 8.** Eğitimde kullanılan giriş ve çıkış matrisleri  
*Figure 8. Input and output matrices for training of regression methods*

Bu yöntemlerin eğitim hata oranları 4 ayrı yöntemle incelenmiştir. Bu yöntemler, Kare Ortalamalarının Karekökü (KOK), R Kare Hatası (R-KH), Ortalama Kareler Hatası (OKH) ve Mutlak Ortalama Hata (MOH) şeklindedir. Belirtilen eğitim hatalarına göre oranı en düşük yöntem, PÇT optimizasyonunda kullanılan optimizasyon yöntemlerinin amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. PÇT yönteminin optimizasyonu Şekil 9'da gösterilen algoritmaya göre yapılmıştır.



**Şekil 9.** PÇT optimizasyon algoritması  
*Figure 9. The algorithm of PÇT optimization*

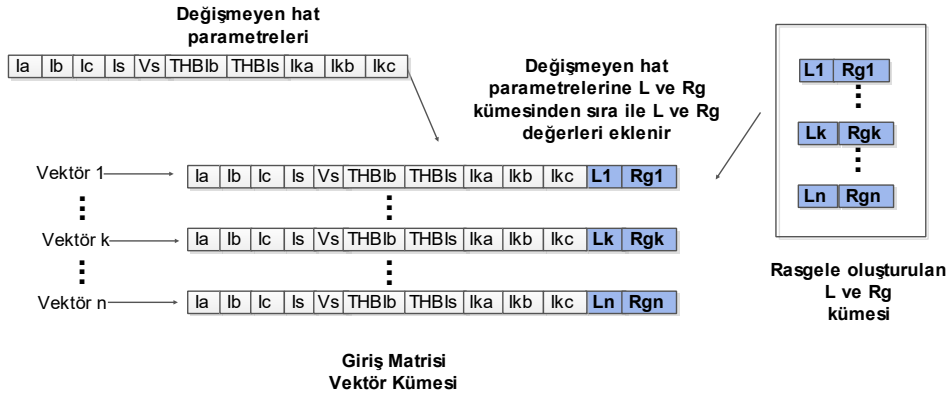
Şekil 9'da gösterilen PÇT parametreleri optimizasyon algoritmasında, kılıf geriliminin dokunma geriliminden düşük ve parça sayısının da minimum olması istenmektedir. Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği alternatif akımda dokunma geriliminin sınır değerini 50 V (etkin değer)

olarak belirlemiştir. Dolayısıyla bu çalışmada da dokunma gerilimi 50 V (etkin) olarak kabul edilmiştir. Kılıf geriliminin dokunma geriliminden düşük olması ile can kayıplarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

PÇT optimizasyonunda eğitimi tamamlanmış DVR yöntemi ile hatta oluşacak kılıf gerilimi tahmin edilir. Eğer tahmin edilen bu gerilim dokunma gerilimine de en yakın değerde ise parça uzunluğu en yüksek değerdedir. Bu da PÇT yöntemindeki parça sayısının minimum olacağı anlamına gelir. Bu sayede hem güvenlik hem de ekonomiklik sağlanmış olacaktır.

PÇT optimizasyon algoritmasında kılıf geriliminin tahmin edilebilmesi için giriş verilerine gerek vardır. Proje aşamasında kablodan akacak olan yük akımları yaklaşık olarak hesaplandığı için bu hatta oluşacak olan sıfır bileşen akımı ( $I_s$ ), sıfır bileşen gerilimi ( $V_s$ ), hat başı toplam akım harmoniği bozunumu (THB<sub>lb</sub>), hat sonu toplam akım harmoniği bozunumu (THB<sub>ls</sub>), her bir fazda bulunan kablodaki kılıf akımları ( $I_{ka}$ ,  $I_{kb}$ ,  $I_{kc}$ ) da yaklaşık olarak PSCAD/EMTDC programında belirlenmiştir.

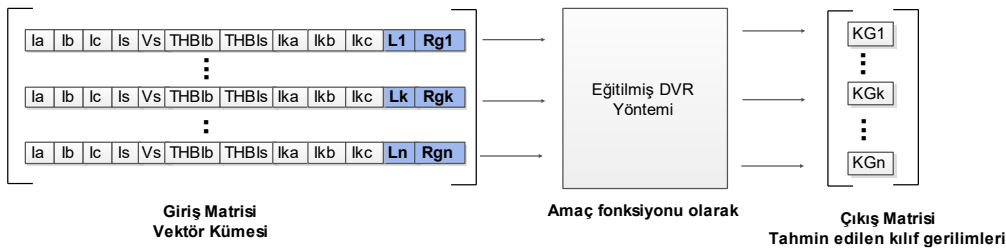
Kılıf geriliminin tahmininde kullanılacak giriş matrisinin her bir elemanı bir vektör olarak tanımlanmıştır. Bir vektör oluşturulurken  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ,  $I_s$ ,  $V_s$ , THB<sub>lb</sub>, THB<sub>ls</sub>,  $I_{ka}$ ,  $I_{kb}$  ve  $I_{kc}$  parametreleri de belli olduğu için bu veriler sabit tutulmuş, değişken L ve R<sub>g</sub> parametre değerleri ile giriş matrisinin vektörleri oluşturulmuştur. Şekil 10'da PÇT parametre optimizasyonunda kullanılacak giriş matrisinin nasıl oluşturulduğu özetlenmektedir. Başlangıçta değişken L ve R<sub>g</sub> parametre değerleri için bir L ve R<sub>g</sub> kümesi oluşturulmuştur. Giriş matrisi için farklı vektörler oluşturmak için gerekli L ve R<sub>g</sub> değerleri L ve R<sub>g</sub> kümesinden alınmıştır. Algoritmanın diğer iterasyonlarında bu L ve R<sub>g</sub> matrisi güncellenerek yeni vektörlerin oluşturulmasında kullanılmıştır.



Şekil 10. Giriş Matrisi Oluşturma

Figure 10. Generating of the Input Matrix

Optimizasyon algoritmasında giriş matrisi oluşturulduktan sonra kılıf gerilimi tahmin edilmektedir. Kılıf geriliminin tahminin eğitilmiş DVR yöntemi ile nasıl yapıldığı da Şekil 11'de özetlenmiştir.



Şekil 11. Kılıf gerilim tahmini

Figure 11. Forecasting of The the sheath voltage

Şekil 9'da gösterilen algoritmadan da anlaşılacağı üzere giriş matrisini oluşturmak için rasgele bir L ve R<sub>g</sub> kümesi oluşturulur. Öncelikle farklı vektörler ile giriş matrisi oluşturulur. Daha sonra giriş matrisinde bulunan her bir vektör için daha önce eğitilmiş olan DVR yöntemi ile kılıf gerilimi tahmin edilir. Vektörler içinden kılıf gerilimi dokunma geriliminden yüksek olanlar elenir. Kalan vektörlerin kılıf



gerilimleri sıralanır ve bunlar içinden kılıf gerilimi dokunma gerilimine en yakın olan vektör o iterasyon için iyi vektör olarak seçilerek iyi vektörler kümesine alınır. Böylece bir iterasyon tamamlanmış olur. Yani her iterasyon sonunda 1 tane vektör iyi vektör olarak seçilerek iyi vektörler kümesine gönderilir.

Eğer belirlenen iterasyon sayısına ulaşılmadı ise L ve Rg vektör kümesi belirlenen optimizasyon yöntemi ile yeniden güncellenir ve yeni iterasyon için giriş matrisi yeniden oluşturularak algoritmadaki adımlar izlenir. Yeni iterasyon için L ve Rg kümesini optimizasyon yöntemi ile güncelleme işleminde L ve Rg değerleri kendileri için belirlenen sınır değerler içinde yeni değerler alırlar ve bu da ait oldukları vektörün kılıf gerilimi değerlerine göre yapılır. Kılıf gerilimi değeri iyi olan vektörlerde çok değişiklik yapılmazken, kılıf gerilimi değerleri iyi olmayan vektörler de köklü değişiklikler yapılır. L ve Rg kümesinin güncellenmesi için kullanılan optimizasyon yöntemleri olarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), İntertia Ağırlıklı Parçacık Sürü Optimizasyonu (iPSO), Çekimsel Arama Algoritması (CAA) ve Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Her optimizasyon yönteminin algoritması farklı olduğu için optimum L ve Rg değerlerinin belirlenmesi de optimizasyon algoritmasına göre farklılık göstermektedir. Bu değerler Sonuç ve Tartışmalar bölümünde daha açık görülmektedir.

Her iterasyon sonunda bir tane iyi vektör seçilerek iyi vektör kümesi maksimum iterasyon sonunda tamamlanır. Örneğin iterasyon sayısı 100 ise iyi vektör kümesinde 100 tane seçilmiş iyi vektör bulunmaktadır. Belirlenen iterasyon sayısı tamamlandıktan sonra iyi vektörler kümesindeki vektörler kılıf gerilimlerine göre sıralanırlar. İyi vektörler kümesi içinde kılıf gerilimi dokunma gerilimine en yakın olan vektör en iyi vektör olarak seçilir. Seçilen en iyi vektördeki L ve Rg değerleri PCT yöntemi için en uygun değerlerdir.

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu bölümde öncelikle PCT yönteminin optimizasyonunda amaç fonksiyonu olarak kullanılacak olan DVR yönteminin seçimi yapılmıştır. DVR yönteminin seçiminde eğitim hatalarından yararlanılmıştır. Daha sonra optimizasyon algoritması kullanılarak 4 optimizasyon yöntemiyle en uygun L ve Rg değerleri belirlenmiştir. Bu belirlenen L ve Rg değerleri PSCAD /EMTDC programında oluşturulan hat parametrelerinde yerine koyularak benzetim çalışmaları yapılmıştır. En son olarak optimizasyonu yapılmış PCT yöntemleri ile çift taraflı topraklama yöntemlerinin 1 km uzunluğundaki hat için yapılan benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Öncelikle PSCAD/METDC benzetim programında 61 ayrı yüksek gerilim yeraltı kablolu hat çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar ile Materyal ve Yöntem bölümünde belirtilen DVR yöntemleri eğitilmiştir. Eğitim için 61x13 eğitim matrisi kullanılmıştır. Bu matrisin bir bölümü Çizelge 1'de gösterilmektedir. Eğitim işlemi sonunda belirtilen yöntemlerin eğitim hataları da Çizelge 2'de gösterilmektedir. Çizelge 2'den de görüleceği üzere CDVR yönteminin eğitim hataları diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Dolayısıyla optimizasyon algoritmasında eğitilmiş DVR yöntemi olarak CDVR yöntemi kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Eğitim parametrelerinin bazıları

*Table 1. Some training parameters*

Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	Is (A)	Vs (V)	THBIb (%)	THBIc (%)	Ika (A)	Ikb (A)	Ikc (A)	L (m)	Rg (ohm)	Vk (V)
522	612	567	1.67	8.35	3.92	3.95	204	258	213	250	5	70
510	702	499	1.24	6.18	3.92	3.95	201	264	221	250	5	68
524	618	567	1.8	8.99	4.72	4.76	206	259	213	250	5	70
512	702	502	1.29	6.44	4.72	4.76	203	264	225	250	5	68
527	620	567	1.92	9.62	5.52	5.57	208	260	213	250	5	70
513	702	506	1.31	6.56	5.52	5.57	204	264	228	250	5	69
533	622	567	2.18	10.91	7	7.06	212	261	213	250	5	70
514	702	508	1.34	6.69	7	7.06	204	264	234	250	5	69

**Çizelge 2.** Tahmin Yöntemlerinin Eğitim Hataları*Table 2. Training Errors of The forecasting Methods*

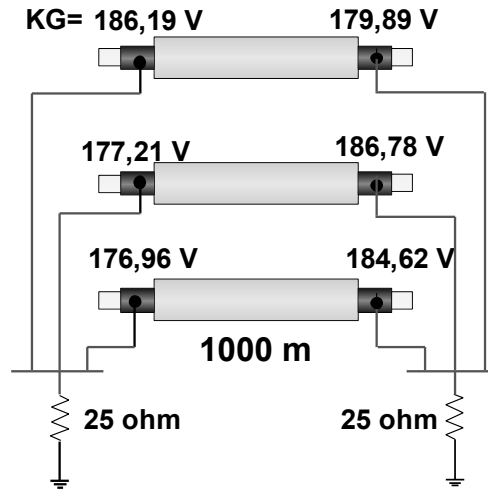
DVR Yöntemi	Eğitim Hataları			
	KOK	R-KH	OKH	MOH
LDVR	1,0942	0,97	1,1973	0,7702
QDVR	1,1470	0,97	1,3155	0,8390
CDVR	0,9831	0,98	0,9664	0,8190
FGDVR	4,6387	0,48	21,518	4,3242
MGDVR	1,7043	0,93	2,9048	1,2657
CoDVR	3,6518	0,68	13,336	2,9522

CDVR yönteminin eğitim işlemleri tamamlandıktan sonra PÇT yöntemi için en uygun devre parametreleri tespit edilerek bir yüksek gerilim kablolu hattın topraklaması için benzetimler yapılmıştır. Benzetimi yapılan hat Şekil 7'de gösterilen radyal bir şebekede bulunup hat gerilimi 31,5 kV'dur. Radyal şebeke için yapılan topraklama çalışmalarında 1. YG kablo hattı dikkate alınmıştır. Çünkü en yüksek akım hattın bu parçasından akmaktadır. Dolayısıyla kılıf gerilimi de en yüksek bu parçada olacaktır. 1. YG kablo hattının uzunluğu 1 km olmakla birlikte, hattın topraklanması için çift taraflı topraklama yöntemi ve optimize edilmiş PÇT yöntemleri ayrı ayrı denenerek iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Hatta her faz için 1x 240mm<sup>2</sup> kesitli XLPE yalıtımlı yüksek gerilim kablosu kullanılmış ve hattın toprak altında bir yeraltı kablosu kanalında gittiği düşünülmüştür. Hattan akan faz akımları 415,64 A, 378,35 A ve 442,511 A şeklindedir. Bu akımlar kablonun akım taşıma kapasitesini geçmemekte ve sistemde en büyük sorunlardan olan dengesiz yüklenme durumuna da uymaktadır. Benzetim çalışmalarına geçmeden önce kılıf geriliminin dokunma gerilimini aşmayacak ve parça sayısı da en az olacak şekilde en uygun L ve Rg değerleri optimizasyon yöntemleri ile belirlenmiştir. Çizelge 3'de optimizasyon yöntemlerine göre belirlenen PÇT için optimum L, Rg değerleri gösterilmektedir. Rg'nin en düşük değeri 1 ohm, en yüksek değeri ise 25 ohm'dur. Optimizasyon yöntemlerinde popülasyon sayısı 61 ve iterasyon sayısı 100 olarak belirlenmiştir.

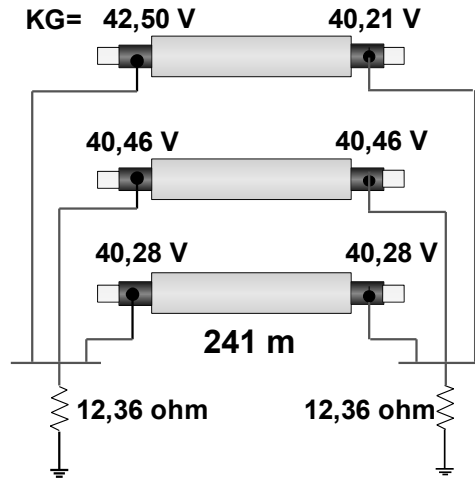
**Çizelge 3.** Her bir hat parçası için optimum L ve Rg değerleri*Table 3. Optimum L and Rg values for each minor part*

Optimizasyon Yöntemi	L (m)	Rg (ohm)
PSO	241	12,36
iPSO	247	3,56
GA	244	11,37
GSA	250	12,81

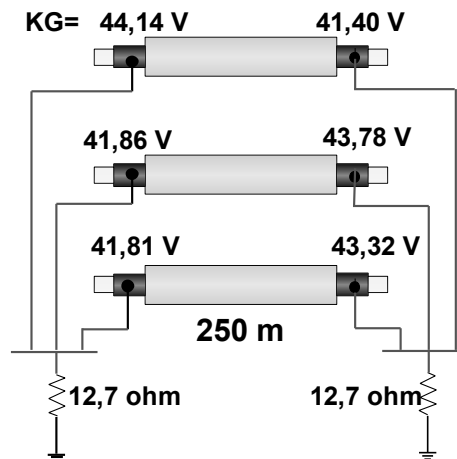
Belirlenen değerlere göre yüksek gerilim kablolu hattın topraklaması PÇT yöntemine göre PSCAD/EMTDC benzetim programında kurulmuş ve hattın benzetimleri yapılmıştır. Öncelikle 1. YG kablo hattı için çift taraflı topraklama yöntemi uygulanmış ve sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir.



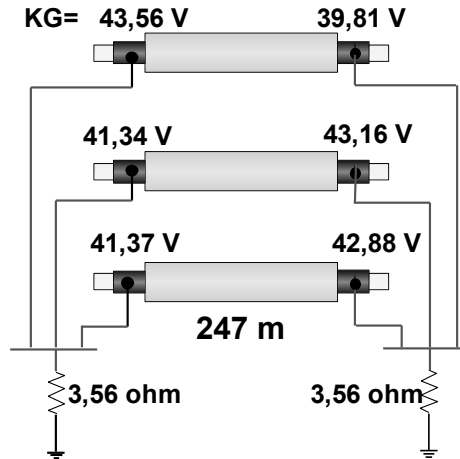
Şekil 12. Çift taraflı topraklama sonucu  
Figure 12. The solid bonding



Şekil 13. PSO ile PÇT sonucu  
Figure 13. SSB with PSO result

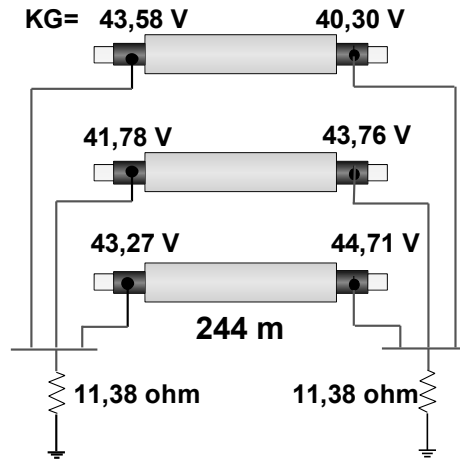


Şekil 14. ÇAA ile PÇT sonucu  
Figure 14. SSB with GSA result



Şekil 15. iPSO ile PÇT (SSB wit iPSO)

Figure 15. SSB wit iPSO result



Şekil 16. GA ile PÇT (SSB with GA)

Figure 16. SSB with GA result

Şekil 12’de gösterilen çift taraflı topraklama yöntemi ile Şekil 13, 14, 15 ve 16’da gösterilen optimize edilmiş PÇT yöntemleri 1. YG hattına uygulanmıştır. PÇT yöntemlerinde 1 km uzunluğundaki hat 4 parçaya ayrılmış ve sadece 1 parçasının benzetim sonuçları gösterilmiştir. Çünkü diğer 3 parçanın da sonuçları benzerdir.

Benzetim sonuçlarına bakıldığında CDVR ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak tasarlanan PÇT yöntemi ile yapılan topraklamalarda kılıf gerilimleri dokunma geriliminin altında kalırken, literatürde önerilen yöntemlerden olan çift taraflı topraklama yöntemi ile yapılan topraklamada kılıf gerilimleri dokunma geriliminin çok üzerindedir. Yani günümüz şebeke koşullarında regresyon tabanlı optimize edilmiş PÇT yöntemleri ile radyal şebekelerdeki yüksek gerilim yeraltı kablolarının topraklaması hem kablo başlığı arızalarını hem de elektrik çarplıma riskini önlemede etkili yöntemlerdir. Dolayısıyla bu çalışma sonuçları literatüre de bu yönden katkı sağlamaktadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akbal, B., 2018, “Applications of artificial intelligence and hybrid neural network methods with new bonding method to prevent electroshock risk and insulation faults in high-voltage underground cable lines”, *Neural Comput & Applic*, Cilt: 24, Sayı: 2, ss. 32-36
- Alex J. S., Bernhard, S., 2004, “A tutorial on support vector regression” *Statistics and Computing*, Cilt: 14, ss. 199-222

- Bak, C., L., Silva, F., F. 2016. "High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 1." *Electric Power Systems Research*, Cilt: 140, ss. 984-994
- Bak, C., L., Silva, F., F. 2016. "High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 2." *Electric Power Systems Research*, Cilt: 140, ss. 995-1004
- Benato, R., Balanuye, I., Köksal, F., Ozan, N., Özdemirci, E. 2017. "A 4 GW AC submarine Turkish power grid reinforcement under the Dardanelles Strait", *IEEE 2017 AEIT International Annual Conference*, Cagliari, Italy ss. 1-6.
- Bessissa, L., Boukezzi, L., Mahi, D. 2016. "Influence of Fuzzy Parameters on the Modeling Quality of XLPE Insulation Properties under Thermal Aging." *Fuzzy Information and Engineering*, Cilt: 8, Sayı:1, ss. 101-112
- Bessissa, L., Boukezzi, L., Mahi, D. 2016. "Influence of Fuzzy Parameters on the Modeling Quality of XLPE Insulation Properties under Thermal Aging." *Fuzzy Information and Engineering*, Cilt: 8, Sayı:1, ss. 101-112
- Czapp, S., Dobrzynski, K., Klucznik, J., 2014, "Calculation of induced sheath voltages in power cables – single circuit system versus double circuit system" *Journal of Information, Control and Management Systems*, Cilt: 12, ss. 113–123
- Gatta F. M., Lauria S., Luigi C. 2005. "Very long EHV cables and mixed overhead-cable lines. Steady-state operation." *IEEE Russia Power Tech*, ss. 1-7.
- Gouramanis, K., V., Kaloudas, C., G., Papadopoulos, T., A., 2011, "Sheath voltage calculations in long medium voltage power cables," *IEEE Trondheim Power Tech*, Norway, ss. 1–7
- Jiali D., Xin W., Yihui Z., Lixue L. 2019. "A Novel Fault Location Algorithm for Mixed Overhead-Cable Transmission System Using Unsynchronized Current Data." *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Cilt: 14, ss. 1295-1303.
- Jiangchao, Q., Maryam, S., 2015, "A Zero-Sequence Voltage Injection-Based Control Strategy for a Parallel Hybrid Modular Multilevel HVDC Converter System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt: 30, Sayı: 2, ss. 728 – 736
- Jittiphong K., Atthapol N. 2017. "Fault Classification on the Hybrid Transmission Line System between Overhead Line and Underground Cable." *17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS)*, ss. 1-6.
- Jung, C., K., Lee, J., B., Kang, J., W., 2007, "Sheath circulating current analysis of a cross-bonded power cable systems" *J Electr Eng & Technol*, Cilt: 2, ss. 320–328.
- Jung, C., K., Lee, J., B., Kang, J., W., 2005, "Sheath current characteristic and its reduction on underground power cable systems" *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, CA, USA, ss. 2562–2569
- Marina, A., S., Abderrahim K., Fernando G., et al.: 'Detection and localization of defects in cable sheath of cross-bonding configuration by sheath currents', *IEEE Transactions On Power Delivery*, DOI 10.1109/TPWRD.2019.2903329.
- Mehdi, N., Gerry, M., 2014, "Three-Phase Multi module VSIs Using SHE-PWM to Reduce Zero-Sequence Circulating Current", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt: 61, Sayı: 4, ss. 1659 – 1668
- Ruiz, J., R., Garcia, A., Morera, X., A. 2007. "Circulating sheath currents in flat formation underground power lines." *2007 International Conf. Renewable Energies and Power Quality*, Mart, ss. 1–5.
- Sachin K. G., Arun P., 2016, "Study on Semi Conductive Layer during EHV XLPE Cable Joint Procedure" *International Journal of Novel Research in Engineering and Science*, Cilt: 3, Sayı: 1, ss. 8-11
- Shuai Z., Houlei G., Yingtao S. 2016. "A New Fault-Location Algorithm for Extra-High-Voltage Mixed Lines Based on Phase Characteristics of the Hyperbolic Tangent Function." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt: 31, Sayı: 3, ss. 1203-1212.
- Tziouvaras A. D. 2006. "Protection of high-voltage AC cables", *59th Annual Conf. for Protective Relay Engineers*, TX, USA ss. 48–61.

- Xiang D., Yang Y., Chengke Z., Donald M. H., 2017, "Online Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults by Sheath System Currents", IEEE Transactions On Power Delivery, Cilt: 32, Sayı: 5, ss. 2281-2290.
- Yunus, B. 2016. "Trend adjusted lifetime monitoring of underground power cable". Electric Power Systems Research, Cilt: 143, ss. 189-196
- Zhangping, S., Xing, Z., Fusheng, W., 2015, "Modeling and Elimination of Zero-Sequence Circulating Currents in Parallel Three-Level T-Type Grid-Connected Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Cilt: 30, Sayı: 2, ss. 1050 – 1063
- Zhonglei, L., Du, B., X., Wang, L., 2012, "The calculation of circulating current for the single-core cables in smart grid", 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia, China, Mayıs, ss. 1–4.