



Araştırma Makalesi / Research Article
DESIGN OF GROUNDING GRID WITH AND WITHOUT GROUNDING ROD
IN TWO-LAYER SOIL MODEL VIA GENETIC ALGORITHMS

Barış GÜRSU*¹, Melih Cevdet İNCE²

¹TEİAŞ 13.İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürlüğü, ELAZIĞ

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ

Geliş/Received: 10.01.2008 Kabul/Accepted: 21.11.2008

ABSTRACT

Limiting Grounding Potential Rise(GPR) that may have a vital hazard for alives forms the basic of a safe grounding grid. In this paper, Genetic Algorithms(GA) method is proposed for the design of grounding grid on the structures of two-layer soil model and grid designs with and without grounding rods that are made by this method are compared. We have aimed both minimum cost and GPR is less than maximum allowable touch voltage on grounding grid designs. It is shown that grounding grid which are fast, cheap, easy, near to real, consistent and provides the safety conditions can be designed both with rods without rods by the way of purposed approach and the method. The role of grounding rods that carry out working safety conditions at grid designs is determined by cost analysis. Besides, the ground resistance that is measured on actual power system and the ground resistances that are calculated by uniform and two-layer soil models are compared.

Keywords: Two-Layer soil model, grounding grid design, genetic algorithms, grounding potential rise, maximum allowable touch voltage, ground resistance.

İKİ KATMANLI TOPRAK MODELİNDE GENETİK ALGORİTMALAR İLE TOPRAKLAMA ÇUBUKLU VE ÇUBUKSUZ AĞ TASARIMI

ÖZET

Canlılar için hayati tehlike oluşturabilecek toprak potansiyel yükselmesi(GPR)' nin sınırlandırılması güvenli bir topraklama şebekesinin temelini oluşturur. Bu çalışmada, iki katmanlı toprak modeli yapılarında güvenli bir topraklama ağı tasarımı için Genetik Algoritmalar(GA) metodu önerilmiş ve bu metod ile yapılan topraklama çubuklu ve çubuksuz ağı tasarımları karşılaştırılmıştır. Topraklama ağı tasarımlarında hem GPR' nin müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimi($E_{dokunma}$)' nden küçük olması esası hem de minimum maliyet hedeflenmiştir. Önerilen yaklaşım ve metod ile kolay, hızlı, tutarlı, düşük maliyetli, gerçeğe yakın ve emniyetli koşulları sağlayacak şekilde hem çubuklu hem de çubuksuz ağı tasarlanabileceği gösterilmiştir. Ağı tasarımlarında topraklama çubuklarının güvenli çalışma koşullarını yerine getirmesindeki rolü, maliyet analizi yapılarak belirlenmiştir. Ayrıca gerçek bir güç sistemi üzerinde ölçülen topraklama direnci ile, uniform ve iki katmanlı toprak modelleri ile hesaplanan topraklama direnci değerlerinin karşılaştırması da yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: İki katmanlı toprak modeli, topraklama ağı tasarımı, genetik algoritmalar, toprak potansiyel yükselmesi, müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimi, topraklama direnci.

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: e-mail / e-ileti: gursubaris@hotmail.com, tel: (424) 247 26 04

1. GİRİŞ

Büyük yatırım gerektiren iletim sisteminin en can alıcı bölümü yüksek gerilim şalt merkezleridir. Yıldırım, açma-kapama manevraları, kısa devreler ve toprak arızaları yüksek gerilimli trafo merkezlerinde (şalt merkezi), yüksek akımlar ve dolayısıyla yüksek potansiyel artışları oluşturur. Ortaya çıkan bu gerilimler canlılar için yaşamsal tehlikelere neden olduğu gibi, trafo merkezindeki teçhizatlarda da büyük hasarlar meydana getirmektedir. Bu durumlardan kaçınmak için tek yol gerek şebekenin gerekse işletme teçhizatlarının topraklanmasıdır [1]. Yüksek gerilimli trafo merkezlerinde topraklama sistemi olarak topraklama ağı ile birlikte anılan topraklama iletkenlerinden ve topraklama çubuklarından faydalanılır [2].

Yüksek gerilim istasyonu kurulmadan önce yapılması gereken en ilk ve en önemli adımlardan biri, topraklama ağının doğru olarak tasarlanmasıdır. Topraklama ağıyla ilgili literatürdeki çalışmalar, genellikle tek katmanlı düzenli toprak modeli baz alınarak yapılmıştır [2 - 7]. Bu çalışmalarda toprak homojen kabul edilmiştir. Halbuki gerçekte homojen yapıya sahip bir toprak bulmak oldukça zordur. Belirli bir bölgedeki toprak hem yatayına hem de derinliğine çok az homojendir. Trafo merkezi kurulacak arazinin büyük bir ekseriyetle homojen toprak yapısına sahip olmaması nedeniyle, tek katmanlı düzenli toprak modeliyle yapılan ağ tasarımlarının tam olarak gerçeğe yakın olmadığı düşünülmüş ve bu nedenle iki katmanlı toprak modeli yaklaşımı geliştirilmiştir.

İki katmanlı toprak modeli yaklaşımında, toprak derinlemesine farklı öz dirence sahip iki katmandan oluşmaktadır. Böylece tek katmanlı toprak modeline nazaran, toprak yapısının gerçeğe daha yakın belirlenmesi ve dolayısıyla daha tutarlı bir topraklama sistemi tasarlanması amaçlanmıştır. İki katmanlı bir modelin kullanımıyla, gerçek toprak şartlarının daha doğru bir temsili elde edilebilir [8]. İki katmanlı toprak modeli ile ilgili literatürdeki çalışmalarda, genellikle topraklama direnci hesaplama formülleri verilmiştir [9 - 12]. Bu çalışmada, iki katmanlı tüm toprak modeli yapılarında, GA yardımıyla GPR sınırlandırılarak hem topraklama çubuklu hem de topraklama çubuksuz optimum topraklama ağı tasarlanmıştır. Topraklama ağı tasarımlarında, $GPR < E_{\text{dokunma}}$ şartının sağlanmasının yanında maliyetin de en az olmasına yönelik strateji izlenmiştir. Bu şekilde topraklama çubuklarının güvenli çalışma koşullarını sağlamadaki yeri, maliyet faktörüyle analiz edilmiştir. GA metodunun uygulanmasıyla da kolaylık, hızlık, tutarlık, güvenilirlik ve düşük maliyet sağlanmıştır. Tasarım ilkesi Matlab' ta hazırlanan program ile oluşturulmuştur.

2. EMNİYETLİ TOPRAKLAMA

Topraklamada varılması istenen temel amaçlar, sistemde enerji kesilmelerini azaltmak (sistem devamlılığı), insan emniyetini sağlamak ve meydana gelecek arızalarda rölelerin arızaları algılayabilmelerine yardımcı olmaktır. Kuşkusuz ki bu temel amaçlardan en önemlisi, insan emniyetini sağlamaktır. Güvenlik koşulu her zaman vazgeçilemeyecek şarttır. IEEE Std.80-2000' de $GPR < E_{\text{dokunma}}$ şartının sağlanmasının güvenli topraklama ağı tasarımı için yeter derecede olduğu belirtilmiştir. Bu şartın sağlanmasındaki kriterler aşağıda incelenmiştir.

2.1. GPR Kriteri

Yüksek gerilim topraklama tesislerinin düzenlenmesine esas ulusal ve uluslar arası standartların ilgilendiği en önemli konu, topraklama direnci R_t ile topraklama sisteminden akan maksimum akım I_G ' nin oluşturduğu istenmedik gerilim yükselmelerini ifade eden GPR' nin sınırlandırılmasıdır [13]. Bu sınırlandırmadan kasıt, $GPR < E_{\text{dokunma}}$ ' nin sağlanmasıdır. Yani trafo merkezinin içerisinde ya da çevresindeki bir insanın emniyeti için GPR, müsaade edilebilir maksimum dokunma geriliminden küçük olmalıdır. Topraklama sistemlerinde güvenlik analizleri bu şartın sağlanmasını referans alır. Böylece emniyetli bir topraklama sağlanmış olunur.

Normal şartlar altında topraklanan elektriksel cihazlar 0 V toprak potansiyelinde çalışır. Yani, topraklanan nötr iletkenin potansiyeli, referans toprak olarak adlandırılan ve potansiyel değerinin yaklaşık 0 V olarak kabul edildiği, topraklayıcıdan yaklaşık 20 metre uzaklıktaki toprak potansiyeline neredeyse eşittir. Bir toprak arızası süresince, trafo merkezi topraklama ağıyla toprağa iletilen hata akımının bir bölümü, referans toprak potansiyeline bağlı olarak, ağ potansiyelinin yükselmesine neden olur. Bu yükselen ağ potansiyelinin olabilecek maksimum değeri GPR' yi ifade eder. Bir trafo merkezi topraklama ağının maksimum elektrik potansiyeli, referans toprağın potansiyelinde varsayılan uzak bir topraklama noktasına bağlı olarak ulaşabilir. Bu gerilim, IEEE Std.80-2000' de aşağıdaki (1a) denklemi ile verilen ağın topraklama direnci R_t ile maksimum ağ akımı I_G ' nin çarpımına eşittir.

$$GPR = I_G \cdot R_{t_{\text{bir veya iki}}} \quad (1a)$$

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot I_f \quad (1b)$$

(1b) denkleminde D_f , t_f arıza süresinde azaltma faktörüdür ve uygulamalarımızda 1 alınmıştır. S_f arıza akım dağılım faktörünü ifade eder ve uygulamalarımızda 0.1 olarak alınmıştır. I_f simetrik toprak arıza akımının rms değeri olup, her uygulama için trafo merkezi verilerine göre farklı olur. Çalışmamızda iki katmanlı toprak modeli ile ağ tasarımı yapıldığından $R_{t_{\text{iki}}}$ hesaplanacaktır. (1a) denkleminde görüldüğü gibi, sistemde meydana gelebilecek herhangi bir toprak arızası anında oluşacak toprak potansiyel artışı topraklama direncinin büyüklüğü ile direkt ilgilidir.

Bir topraklayıcı (topraklama ağı, çubuk, şerit, levha) özelliklerine göre, üzerinden akım aktığında kendisi ile referans toprak arasında oluşan potansiyel dağılımını ve dolayısıyla GPR' nin büyüklüğünü belirler [14]. Sınırlandırılmak istenilen GPR büyüklüğünü sağlamak için uygun niteliklerde (boy, çap, gömülme derinliği, uzunluk, kesit) topraklayıcı seçmek zoruridir.

2.2. E_{dokunma} Kriteri

IEEE Std.80-2000, topraklama ağında kullanılacak iletkenlerin toplam uzunluğunun, kesitinin, çubukların sayısının, çapının, boyunun, ağdaki göz sayısının, göz boyutunun ve ağ kurulacak alanın boyutunun müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimini etkilemediğini göstermiştir. 50 ve 70 kg ağırlığındaki insanlar için denklem (2a) ve (2b)' de hesabı verilen müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimi, direkt olarak ağ kurulacak alanın toprağının özdirenci ve şok akım süresi ile orantılıdır. Eğer yüzey tabakası kullanılırsa, bu tabakanın özelliklerine de bağlıdır.

$$E_{\text{dokunma}-50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (2a)$$

$$E_{\text{dokunma}-70} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \cdot 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (2b)$$

Denklem (2a) ve (2b), hem tek katmanlı hem de iki katmanlı toprak modelinde geçerlidir. t_s kısa devre akım süresi ve C_s yüzey tabakası düzeltme katsayısıdır. C_s iki katmanlı toprak modeli için denklem (3)' deki gibi hesaplanır.

$$C_s = 1 - 0.09 \cdot \left[\frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}}{2h_s + 0.09} \right] \quad (3)$$

h_s yüzey tabakası kalınlığı olmak üzere, trafo merkezinin yüzeyine özdirenci yüksek bir çakıl tabakasının serilmesi müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimi değerini artıracaktır.

$$\rho_a = \frac{\rho_1}{\left[1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-K \cdot (h_r + 2h_b)} \right) \right]} \quad \rho_2 < \rho_1 \quad (4a)$$

$$\rho_a = \frac{\rho_2}{\left[1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-K \cdot (h_r + 2h_b)} \right) \right]} \quad \rho_2 > \rho_1 \quad (4b)$$

İki katmanlı toprak modelinde, tek katmanlı toprak öz direnci ρ yerine, tek katmanlı toprak öz direncine yansıyan ve denklem (4a) ve (4b)' de gösterilen basitleştirilmiş şekli ρ_a kullanılır.

h_b ağ gömülme derinliği, h_r yansımaya sınır derinliği, ρ_1 üst katman toprak öz direnci, ρ_2 alt katman toprak öz direnci ve K iki katmanlı toprak modelinde aşağıdaki denklem ile ifade edilen yansımaya faktörüdür.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (5)$$

Yüzey tabakası kullanılmazsa, tek katmanlı toprak modelinde $\rho_s = \rho$, iki katmanlı toprak modelinde $\rho_s = \rho_a$ ve her iki modelde de $C_s = 1$ ' dir. Yüzey tabakası kullanılmadığında müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimi doğrudan şok akım süresine ve toprağın öz direncine bağlıdır. Topraklama çubuklu ve çubuksuz yapılan ağ tasarımlarında, en kötü şartları sağlamak için $GPR < E_{\text{dokunma}} - 50$ 'nın sağlanması gerçekleştirilecektir.

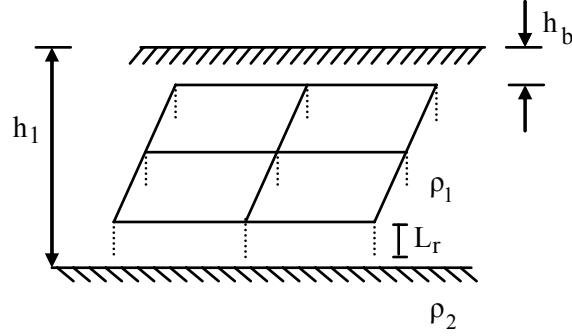
3. İKİ KATMANLI TOPRAK MODELİ YAPILARI

Topraklama ağı tasarımında toprak öz direncinin iyi tespit edilmesi önemli rol oynar. Çünkü hesaplamalar yapılırken, bu katsayı ağın direncinin bulunmasında, buna bağlı olarak ağdaki akım ve potansiyel dağılımlarının hesaplanmasında direkt etkindir. Toprak öz direncinin ölçümü, Wenner' in dört elektrod metoduna göre yapılır. Bu yöntemde elektrodlar arasındaki açıklıklar ölçü derinliğini verir. Tek katmanlı toprak modelinde ölçümlerin ortalama değeri alınır. Böylece hem yatayına hem de derinliğine homojen tek bir toprak yapısı olduğu kabul edilir. Halbuki gerçekte özellikle daha derinlerde toprak öz direncinin değiştiği bilinmektedir. İki katmanlı toprak modelinde, toprağın derinlemesine iki katmandan oluştuğu yaklaşımı yapılmıştır. Wenner' in dört elektrod metoduna göre, elektrodlar arasındaki açıklıklar ayarlanarak, öz dirençteki ani değişiklikler farklı katmanları ifade etmiştir. Üst katman toprağının derinliği sonlu bir değer olmasına karşın, alt katman toprağının derinliği sonsuz kabul edilmiştir. Her toprak katmanının sınırlarında toprak öz direncindeki ani değişiklik (5) denkleminde gösterildiği gibi yansımaya faktörü ile tanımlanır. İki katmanlı toprak modelinde, topraklama direncinin gerçeğe daha yakın belirlenmesi ile daha tutarlı bir emniyet analizi yapmak mümkündür. Aşağıda, iki katmanlı toprak modelinde topraklama ağının katmanlara yerleşim şekline göre farklı yapılarının topraklama direncinin hesaplanması gösterilmiştir.

3.1. Farklı Yerleşim Düzenlerine Göre Topraklama Ağı Direnç Hesaplamaları

İki katmanlı toprak modelinde topraklama ağı; h_b ağ gömülme derinliği, h_1 üst katman derinliği ve L_r her bir topraklama çubuğunun boyunu göstermek üzere, üç farklı düzende tasarlanabilir:

1.Yerleşim Düzeni: Topraklama iletkenleri ve varsa topraklama çubuklarının iki katmanlı toprağın üst katmanında olacak şekilde yerleştirilmesi durumu Şekil 1’ de gösterildiği gibidir.



Şekil 1. Topraklama Ağının Üst Katmanda Olması Durumu

Topraklama çubuklu durumda $h_b + L_r \leq h_1$ ve topraklama çubuksuz durumda $h_b \leq h_1$ dir. Üst katman derinliği, ağ gömülme derinliğinden büyüktür. Denklem (6a)’ da topraklama ağı iletken direnci, denklem (6b)’ de topraklama ağı çubuk direnci hesaplamaları verilmiştir. Her iki denklemden ve şekilden de anlaşıldığı gibi, hesaplamalarda üst katman toprak öz direnci kullanılmaktadır.

$$R_g = \rho_1 \cdot \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L_C} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.061 \Delta l}{d} \right) \right] \cdot \left(1 - \frac{2.256 \cdot h_b}{\sqrt{A}} \right) - \rho_1 \cdot \frac{\ln(1-K)}{2\pi \cdot (h_1 + h_0)} \quad (6a)$$

$$R_{ab} = \frac{\rho_1 \cdot g_0 \cdot F_0}{L_r \cdot n_r} + \frac{\rho_1}{h_1} \cdot \phi \quad (6b)$$

Denklemlerde geçen h_0 , g_0 , Δl , F_0 , ϕ aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h_0 = C_f \cdot \sqrt{\frac{A}{2\pi}} \cdot \ln(1-K) \cdot \frac{K-1}{2K} \quad (7a)$$

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2L_r}{a} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2) \cdot h_b}{L_r}} \right] \quad (7b)$$

$$\Delta l = \sqrt{\Delta l_x \cdot \Delta l_y} \quad (7c)$$

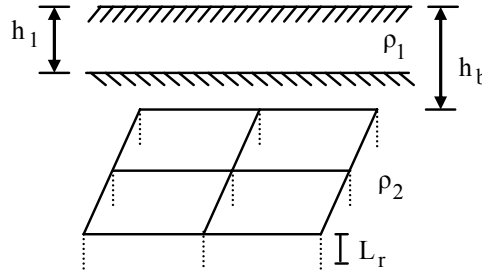
$$F_0 = F \Big|_{L_r \rightarrow \frac{L_r}{1-0.9K}}, \quad F = 1 + \left(n_r - \frac{1}{\sqrt{n_r}} \right) \cdot \frac{R_s}{R_r} \quad (7d)$$

$$\frac{R_s}{R_r} = \frac{\sqrt{\left[\frac{L_r}{r_1} \left[\frac{1}{8} + \left(\frac{L_r}{L_r + \frac{r_1}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \right]}{\ln\left(\frac{4L_r}{a}\right) - 1}, \quad r_1 = \frac{A}{2\pi L_r} \quad (7e)$$

$$\phi = \frac{\frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{1-K}\right)}{\sqrt{\left(\frac{n_r}{F_0} - 1\right)^2 \cdot \left(\frac{L_r + h_b}{h_1}\right)^2 + 1}} \quad (7f)$$

Eşitliklerde kullanılan; Δl_x : x doğrultusundaki tek bir göz uzunluğu(m), Δl_y : y doğrultusundaki tek bir göz uzunluğu(m), A : Ağ alanı(m²), d : Ağ iletkeni çapı(m), L_C : Ağ iletkeni toplam uzunluğu(m), C_f : Alan şekil faktörü(~0.9), n_r : Topraklama çubuğu sayısı, a : Topraklama çubuk yarıçapı(m)' ni ifade etmektedir.

2.Yerleşim Düzeni: Topraklama iletkenleri ve varsa topraklama çubuklarının iki katmanlı toprağın alt katmanında olacak şekilde yerleştirilmesi durumu Şekil 2' de gösterildiği gibidir.



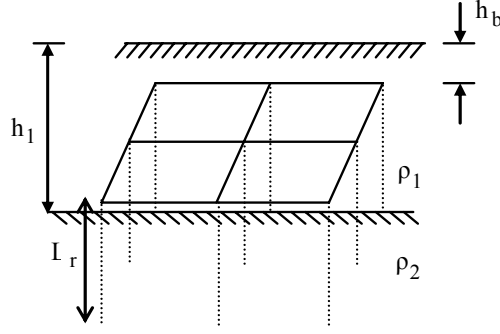
Şekil 2. Topraklama Ağının Alt Katmanda Olması Durumu

Bu yerleşim düzeninde, ağ gömülme derinliği üst katman derinliğinden büyüktür($h_b > h_1$). Bu yerleşim düzeni için, denklem (8a)' da topraklama ağı iletken direnci, denklem (8b)' de topraklama ağı çubuk direnci hesaplamaları verilmiştir. Her iki denklemden ve şekilden de anlaşıldığı gibi hesaplamalarda alt katman toprak öz direnci kullanılmaktadır[15].

$$R_g = \rho_2 \cdot \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L_C} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.061 \Delta l}{d} \right) \right] \cdot \left(1 - \frac{2.256 \cdot h_b}{\sqrt{A}} \right) - \rho_2 \cdot \frac{\ln(1-K)}{2\pi \cdot (h_1 + h_b)} \quad (8a)$$

$$R_{ab} = \frac{\rho_2 \cdot g_0 \cdot F_0}{(L_r + h_b - h_1) \cdot n_r} \quad (8b)$$

3.Yerleşim Düzeni: Topraklama iletkenlerinin üst katmanda ve varsa topraklama çubuklarının her iki katmana da gelecek şekilde yerleştirildiği durum Şekil 3' de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Topraklama İletkenlerinin Üst, Topraklama Çubuklarının Hem Üst Hem Alt Katmanda Olması Durumu

Topraklama iletkenleri üst katmanda olduğundan, iletken direnci denklem (7a) ile aynıdır. Topraklama çubukları kullanıldığı zaman, $h_1 \leq L_r + h_b$ dir. (9a) denkleminde, topraklama çubuğunun alt katmanda olan kısmı için direnci R_a , (9b) denkleminde üst katmanda olan kısmı için R_b ve (9c) denkleminde çubukların kombinasyon sonuç direnci R_{ab} ' nin hesaplanması gösterilmiştir.

$$R_a = \frac{\rho_2 \cdot g_0 \cdot F_0}{(L_r + h_b - h_1) \cdot n_r} \quad (9a)$$

$$R_b = \frac{\rho_1 \cdot g_0 \cdot F_0}{(h_1 - h_b) \cdot n_r} + \frac{\rho_1}{h_1} \cdot \phi_0 \quad (9b)$$

$$R_{ab} = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (9c)$$

(9b) denkleminde kullanılan ϕ_0 aşağıdaki gibi bulunur.

$$\phi_0 = \frac{\frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{1-K}\right)}{\sqrt{\left(\frac{n_r}{F_0} - 1\right)^2 + 1}}$$

İletken ve çubukların kombinasyon direnci: Her üç yerleşim düzeni topraklama ağı sonuç direnci denklem (10)' daki gibi hesaplanır. Topraklama çubukları kullanılmazsa $R_{t-iki}=R_g$ olduğu denklem (10)' dan da görülmektedir.

$$R_{t-iki} = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_g}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_{ab}}\right)^3}} \quad (10)$$

4. GA' NIN İKİ KATMANLI TOPRAK MODELİNDE TOPRAKLAMA AĞI DİZAYNINA UYGULANMASI

Elektrik sistem tasarımcıları, en az maliyetle en güvenli elektrik enerjisini sağlamak durumundadır. Trafo merkezlerinin tasarımındaki en önemli iki etken, işletmedeki en üst güvenlik ve ilk yatırımın düşüklüğüdür. Sistemlerdeki tüm merkezlerde en üst güvenliği sağlamak için, teçhizatların çiftler çiftler konması ya da topraklama konusunda on binlerce metrelik iletkenlerin toprağa serilmesi ekonomik yönden nasıl kabul edilemezse, ilk yatırımın en düşük olması için güvenlik koşullarının göz ardı edilmesi de düşünülemez.

1-İster topraklama çubuklu ister topraklama çubuksuz olsun, emniyetli bir topraklama ağı tasarlamak için $GPR < E_{dokunma}$ şartının sağlanması,

2-Minimum maliyet.

Optimum topraklama ağı tasarımında yukarıdaki yaklaşımlar esas alınmıştır. Bu iki durumun aynı anda gerçekleşmesi hedefi için, GPR' yi mümkün olduğunca $E_{dokunma}$ değerine yaklaştıracak, ancak ondan küçük yapacak toplam iletken uzunluğu ve toplam çubuk sayısı hesaplanacaktır.

4.1. Toplam İletken Uzunluğunun Hesabında Önerilen Yaklaşım

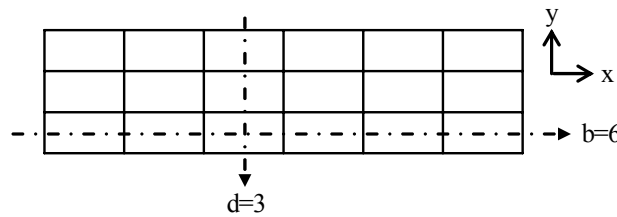
İki katmanlı toprak modeli yapıları topraklama ağı iletken direnci (R_g) hesabında, Δl terimi kullanılmaktadır. $\Delta l = \sqrt{\Delta l_x \cdot \Delta l_y}$ olduğundan R_g ' yi hesaplamak için, ağı içerisindeki bir gözün x ve y doğrultularındaki uzunluklarını yani göz boyutlarını bilmemiz gerekmektedir. Göz boyutları göz sayısı ile, göz sayısı da toplam iletken uzunluğunun hesabıyla ilişkilidir. Dolayısıyla toplam iletken uzunluğunu hesaplayabilme problemi, göz sayısının hesaplanmasıyla çözülecektir. Bu nedenle tasarlanacak topraklama ağının gözlerden oluşan satır ve sütunlardan ibaret olduğu varsayılmıştır. Denklem (11a)' da, ağın bir gözünün x doğrultusu uzunluğu, denklem (11b)' de ağın bir gözünün y doğrultusu uzunluğunu hesaplamak için formüller verilmiştir. Denklem (12)' de de toplam iletken uzunluğunun hesabı ifade edilmiştir. İki katmanlı toprak modelinde topraklama ağı tasarımı için, GA metodunda; [kullanılacaksa toplam çubuk sayısı, 1 satırdaki göz sayısı, 1 sütundaki göz sayısı] optimize edilecektir.

$$\Delta l_x = \frac{a}{b} \quad (11a)$$

$$\Delta l_y = \frac{c}{d} \quad (11b)$$

$$\text{Toplam iletken uzunluğu} = (b+1) \cdot c + (d+1) \cdot a \quad (12)$$

a, Topraklanacak alanın x doğrultusundaki kenar uzunluğu; b, x doğrultusundaki 1 satırdaki göz sayısı; c, Topraklanacak alanın y doğrultusundaki kenar uzunluğu; d, y doğrultusundaki 1 sütundaki göz sayısını gösterir.



Şekil 4. 3 satırlı 6 sütunlu topraklama ağı yaklaşımı

4.2. Maliyet Fonksiyonunun Belirlenmesi

Bir trafo merkezinin kapladığı alan, ortalama 10000 m²' den az değildir. Bu kadar alana topraklama iletkenlerinin gömülmesi işi de extra bir maliyeti ortaya çıkartır. Bu maliyet, denklem (13a)' da hesabı verilen, hafriyat maliyetidir.

$$\text{Hafriyat Maliyeti} = [(Topraklama ağının kurulacağı alanın x doğrultusu mesafesi \cdot Ağ derinliği \cdot x \text{ doğrultusunda serilecek iletken sayısı} \cdot 0.75) + (Topraklama ağının kurulacağı alanın y doğrultusu mesafesi \cdot Ağ derinliği \cdot y \text{ doğrultusunda serilecek iletken sayısı} \cdot 0.75)] \cdot 5 \quad (13a)$$

Çalışmamızda hafriyat maliyeti de maliyet fonksiyonuna dahil edilmiştir. Hafriyat maliyeti hesabı, bu işi yapanlar tarafından genellikle m³ bazında fiyatlandırılmaktadır. Yerel olarak alınan bilgilerde 1 m³ toprağın hafriyat işinin ortalama 5 YTL olduğu tespit edilmiştir. Eğer arazi kayalık ise bu fiyat daha da artmaktadır. Hafriyat maliyeti hesabında trafo merkezi kurulacak alanın tamamının hafriyatı değil, sadece iletkenlerin toprağa gömülecek yerlerinin hafriyatı hesaba dahil edilmiştir. Her bir iletkenin geçtiği yerin 0.75 metre(m) genişliğinde kazılması yeterlidir. Buna göre maliyet fonksiyonunun hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\text{Maliyet Fonksiyonu} = (1 \text{ metre iletkenin fiyatı} \cdot \text{Kullanılacak toplam iletken uzunluğu}) + (1 \text{ adet topraklama çubuğunun fiyatı} \cdot \text{Kullanılacak çubuk sayısı}) + \text{Hafriyat Maliyeti} \quad (13b)$$

4.3. Uygunluk Fonksiyonunun Tespiti

GA, uygunluk fonksiyonuyla tanımlanan değere göre hareket eder. Uygunluk değerini sürekli iyileştirmeyi hedefleyerek optimum çözümü yakalamaya çalışır. Bu nedenle GA' nın temel taşı olan uygunluk fonksiyonunun doğru olarak belirlenmesi şarttır. Amaç, $GPR < E_{dokunma}$ ' nın sağlanması ve minimum maliyet olduğundan;

$$\text{Uygunluk fonksiyonu} = \text{Maliyet fonksiyonu} + GPR - E_{dokunma} \quad (14a)$$

denklemini kurulabilir. Burada uygunluk fonksiyonunun minimizasyonu amaçlanacaktır. Ancak $GPR - E_{dokunma}$ değeri, maliyet fonksiyonunun yanında oldukça küçük olduğundan, GA optimizasyonunda uygunluk fonksiyonu iterasyonlarda maliyet ağırlıklı ilerleyecektir. Uygunluk değeri çok küçük olsa bile $GPR > E_{dokunma}$ olabilir. Bu nedenle optimizasyon işlemi hatalı olabilir. Bu hatalı durumlarla karşılaşmamak için çalışmamızda, (14b) denklemiyle verilen penaltı fonksiyonu tanımlanmıştır. Penaltı fonksiyonunun tanımlanmasıyla, hem güvenilirlik hem de hız kazanılmıştır.

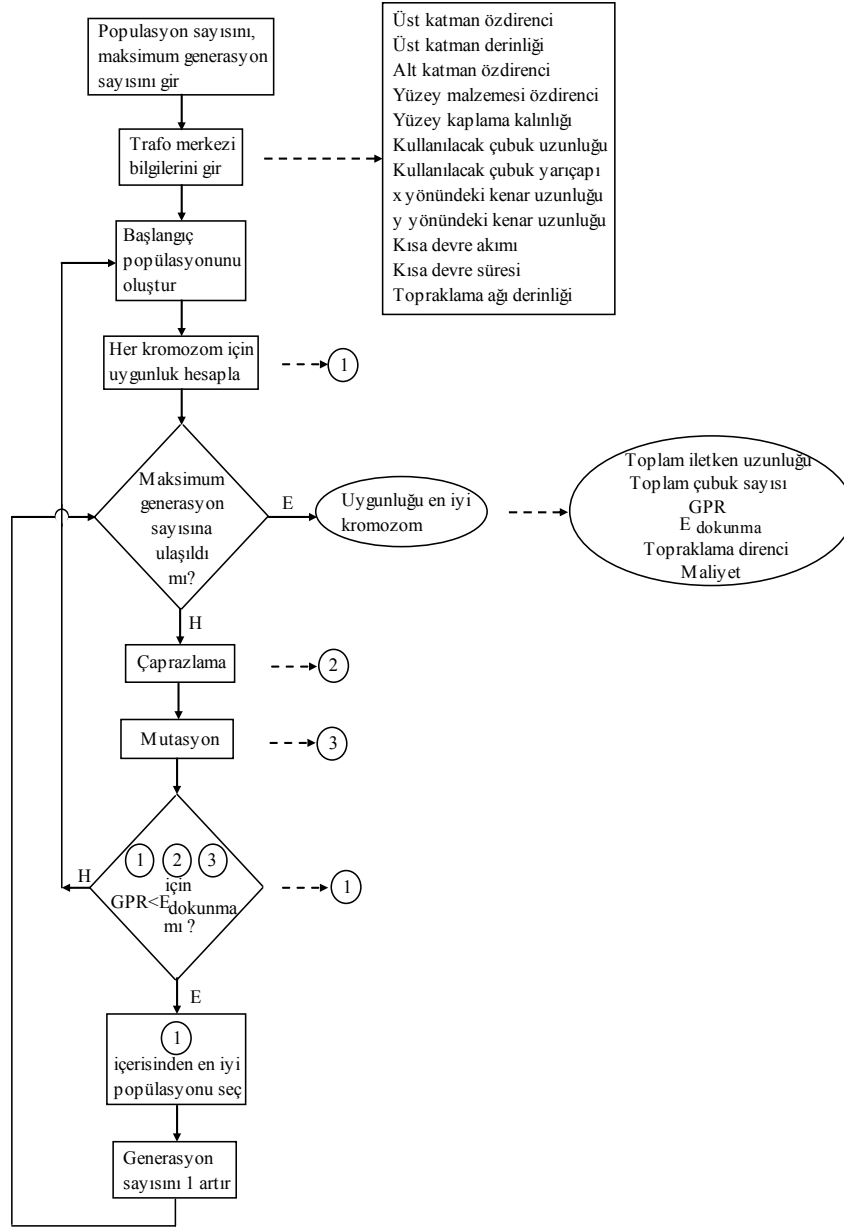
$$\begin{cases} \text{Penaltı fonksiyonu} = \text{Maliyet fonksiyonu} \rightarrow & GPR \geq E_{dokunma} \\ \text{Penaltı fonksiyonu} = 1 \rightarrow & GPR < E_{dokunma} \end{cases} \quad (14b)$$

Penaltı fonksiyonunun uygunluk fonksiyonuna eklenmesiyle denklem (14a) şu hali alır:

$$\text{Uygunluk Fonksiyonu} = \text{Maliyet Fonksiyonu} + [\text{Penaltı değeri} \cdot (GPR - E_{dokunma})] \quad (14c)$$

$GPR \geq E_{dokunma}$ ise penaltı değerinin eklenmesiyle uygunluk fonksiyonunun değeri yükselecek, dolayısıyla amaçlanan minimizasyondan uzaklaşılacaktır. $GPR < E_{dokunma}$ ise uygunluk fonksiyonu maliyet ağırlıklı işleyecek ve minimizasyon sağlanmış olacaktır.

4.4. GA Akış Şeması



Şekil 5. Önerilen GA Optimizasyon Şeması

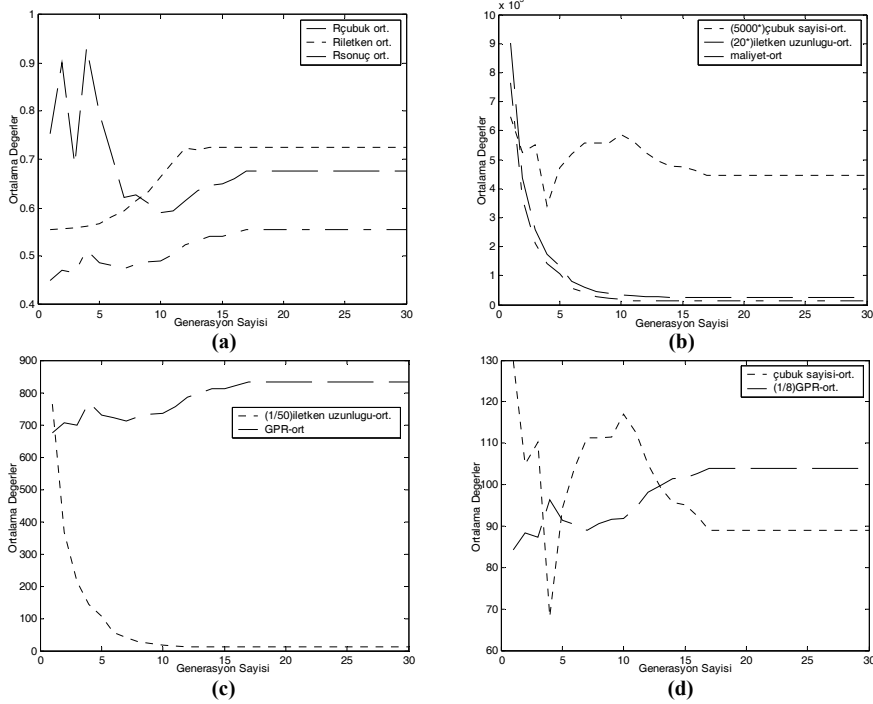
4.5. Uygulamalar

Bu bölümde, GA yardımıyla topraklama çubuklu ve çubuksuz ağ tasarımında, topraklama ağının farklı yerleşim düzenlerine göre yapılmış uygulama sonuçları gösterilecektir. Arama aralığı değiştirilebilir esneklikte olmak kaydıyla, çubuk sayısı [10,255], satır sayısı ve sütun sayısı [1,255] aralığında alınmıştır. Yüksek gerilimli trafo merkezlerinde topraklama iletkeni kesiti, arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliği ile en az 120 mm² olacak şekilde sınırlandırıldığından, burada da kesit en az 120 mm² alınmıştır. 120 mm² bakır iletkenin 1 m' sinin fiyatı 19.4 YTL, 2.5 m-3 m-4 m' lik 1' er adet çubuğun fiyatları sırasıyla, 121.9 YTL, 137.7 YTL, 162.2 YTL alınmıştır.

4.5.1. Topraklama Ağının Üst Katmanda Olması Durumu

Çizelge 1. Üst Katmanda Çubuklu ve Çubuksuz Ağ Tasarımı

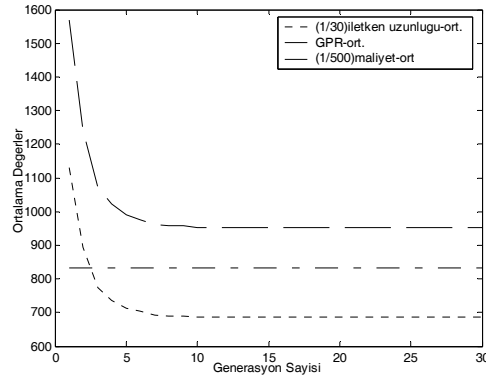
	Giriş Değerleri			GA Sonuçları	
	Çubuklu	Çubuksuz		Çubuklu	Çubuksuz
Popülasyon Büyüklüğü	100	100	Satır Sayısı	1	107
Maks. Gen. Sayısı	30	30	Sütun Sayısı	1	48
Üst Katman Özdirenci	100	100	Topraklama Direnci	0.5545	0.5557
Alt Katman Özdirenci	200	200	GPR	831.7	833.4
Yüz.Kap.Özdir.ve Kal.	3500-0.15	3500-0.15	Dokunma Gerilimi	833.5	833.5
Çubuk Uz.ve Yarıçapı	2.5-0.011	-	Top. İletken Uzunluğu	600	20600
x ve y Kenar Uzunluğu	100-200	100-200	Top.Çubuk Sayısı	89	-
Kısa Dev. Akı. ve Sür.	15000-0.5	15000-0.5	Hafriyat Maliyeti	2250	77250
Ağ İletken Derinliği	1	1	Toplam Maliyet	24739	476890
Üst Katman Derinliği	5	5	İletken Kesiti	120	120



Şekil 6. Generasyon Sayısına Bağlı Çubuklu Ağ Parametrelerinin Ortalama Değerleri

Çizelge 1' de görüldüğü gibi GA, gerek topraklama çubuklu gerekse topraklama çubuksuz ağ tasarımında, GPR' yi müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimi değerine mümkün olduğu kadar yaklaştıracak ve ondan küçük olacak toplam iletken uzunluğu ve çubuk sayısını, maliyeti de minimum yapacak şekilde hesaplamıştır. Ancak çubuk kullanılmadığında, $GPR < E_{dokunma}$ şartının sağlanması için iletken uzunluğu mecburen fazla olmuştur. İletken uzunluğu arttığından, maliyet te yaklaşık 20 kat artmıştır.

Şekil 6(a)' da; maliyeti düşürmek gayesiyle topraklama iletkeninden topraklama çubuğunun kullanılması daha avantajlı olduğundan, uzunluğu az olan topraklama iletkeni direncinin, topraklama çubuğu direncinden büyük olduğu ve iletken ve çubukların kombinasyon sonuç direnci şeklinin daha çok topraklama çubuk direnci şekline benzediği görülmektedir. Şekil 6(b)' de; iletken uzunluğunun ve dolayısıyla maliyetin generasyon sayısı arttıkça azaldığı ve çubuk sayısının, maliyeti iletken uzunluğu kadar etkilemediği görülmektedir. Şekil 6(c) ve (d)' de; iletken uzunluğunun GPR' yi çubuk sayısı kadar etkilemediği anlaşılmaktadır. İletken uzunluğu ile GPR' nin orantılı şekilde değişmediği, ancak çubuk sayısının GPR' yi orantılı bir şekilde etkilediği görülmektedir. Çubuk sayısı azaldığında GPR' nin arttığı, çubuk sayısı arttığında GPR' nin azaldığı her iterasyonda açıkça bellidir. Şekil 6(a),(b) ve (c)' de iletken uzunluğunun çok fazla olmasının topraklama iletkeni direncine ve GPR' ye önemli bir katkı sağlamadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 7. Topraklama Çubuksuz Durumda Generasyon Sayısına Bağlı Ağ Parametreleri

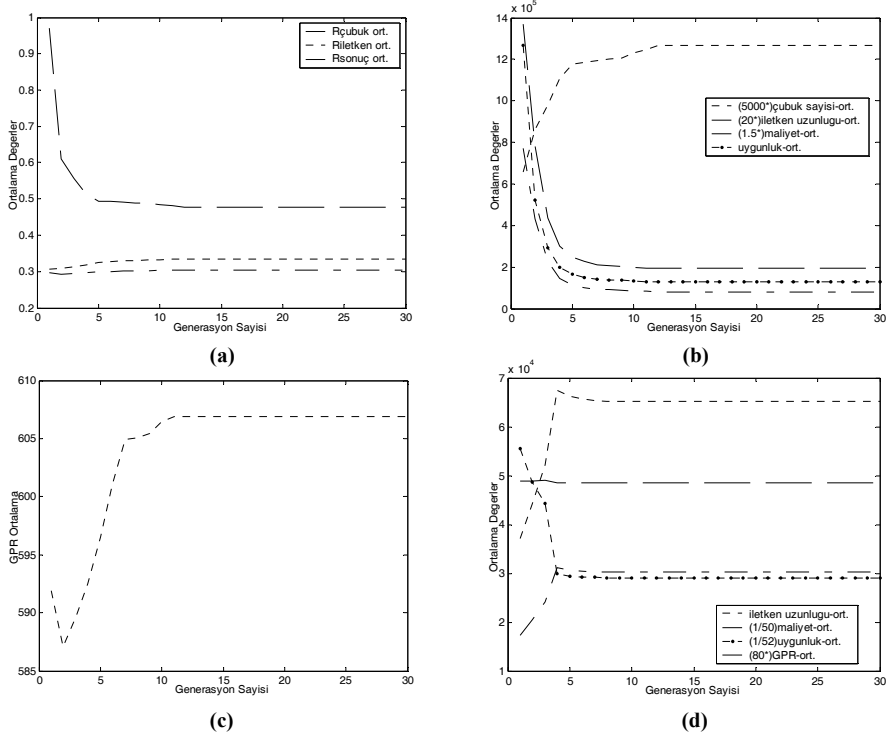
Şekil 7' de iletken uzunluğunun azalmasıyla maliyetin azaldığı ve iletken uzunluğunun çok fazla olmasının da GPR' ye hemen hemen hiçbir etki yapmadığı görülmektedir. Dolayısıyla belli bir iletken uzunluğundan sonra, iletken uzunluğunun artmasının maliyeti artırmaktan öte bir anlam ifade etmediği anlaşılmaktadır.

4.5.2. Topraklama Ağının Alt Katmanda Olması Durumu

Çizelge 2' de görüldüğü gibi, ağ tasarımlarında topraklama çubuksuz durumdaki maliyet(1.510.538 YTL), topraklama çubuklu durumdaki maliyetten(128.596 YTL) yaklaşık 12 kat daha fazladır. Topraklama çubuksuz durumda kullanılan 65250 m iletken, bakır iletkenin çok pahalı olması nedeniyle maliyeti bu denli artırmıştır.

Çizelge 2. Alt Katmanda Çubuklu ve Çubuksuz Ağ Tasarımı

	Giriş Değerleri		GA Sonuçları	
	Çubuklu	Çubuksuz	Çubuklu	Çubuksuz
Popülasyon Büyüklüğü	100	100	Satır Sayısı	9
Maks. Gen. Sayısı	30	30	Sütun Sayısı	16
Üst Katman Özdirenci	400	400	Topraklama Direnci	0.3034
Alt Katman Özdirenci	200	200	GPR	606.8
Yüz.Kap.Özdir.ve Kal.	2500-0.1	2500-0.1	Dokunma Gerilimi	607.03
Çubuk Uz.ve Yarıçapı	3-0.015	-	Top. İletken Uzunluğu	4050
x ve y Kenar Uzunluğu	150-150	150-150	Top.Çubuk Sayısı	253
Kısa Dev. Akı. ve Sür.	20000-0.5	20000-0.5	Hafriyat Maliyeti	15188
Ağ İletken Derinliği	1	1	Toplam Maliyet	128596
Üst Katman Derinliği	0.8	0.8	İletken Kesiti	120



Şekil 8. Topraklama Çubuklu(a,b,c) ve Çubuksuz(d) Generasyon Sayısına Bağlı Ağ Parametreleri

Çizelge 2' de görüldüğü gibi, ağ tasarımlarında topraklama çubuksuz durumdaki maliyet(1.510.538 YTL), topraklama çubuklu durumdaki maliyetten(128.596 YTL) yaklaşık 12 kat daha fazladır. Topraklama çubuksuz durumda kullanılan 65250 m iletken, bakır iletkenin çok pahalı olması nedeniyle maliyeti bu denli artırmıştır.

Şekil 8. (a),(b) ve (c) topraklama çubuklu duruma ait şekilleri, (d) de topraklama çubuksuz duruma ait şekli gösteriyor. Şekil 8.(a) ve (b)' de başlangıçta çubuk sayısı ortalaması(131) düşük olduğu için çubuk direncinin(0.97) yüksek olduğu görülmektedir. En uygun çubuk sayısının belirlendiği 12.jenerasyon sonunda çubuk sayısı 253 olmasına orantılı

olarak çubuk direnci 0.478' e düşmüştür. Başlangıçta iletken uzunluğunun 38654 m olmasına rağmen, iletken direncinin 0.30' dan, en uygun iletken uzunluğunun belirlendiği 12. generasyon sonunda ancak 0.33' e yükseldiği ve dolayısıyla iletken uzunluğunun çok fazla olmasının iletken direncini düşürmeye fazla bir katkısı olmadığı anlaşılmaktadır. Şekillerden maliyetin çubuk sayısı ile değil, iletken uzunluğu ile daha fazla değiştiği görülmektedir. Ayrıca $GPR-E_{dokunma}$ değeri küçük ve penaltı değeri de hep 1 bulunduğu için, uygunluğun maliyetle hemen hemen aynı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 8.(a) ve (c)' de sonuç direncinin 0.29' dan 0.30' a çok az yükseldiği ve bununla orantılı olarak ta GPR ' nin 591.9' dan 606.8' e yükseldiği görülmekte olup, ayrıca arama aralığındaki en uygun maksimum çubuk sayısına ulaşıldığından sonuç direncinin iletken direncine daha çok benzediği anlaşılmaktadır.

Topraklama çubuksuz ağ tasarımı iletken uzunluğu başlangıçta 38850 m, sonuç direnci 0.3057 ve GPR de 611.3 iken, generasyonlar ilerledikçe iletken uzunluğu 65250 m, sonuç direnci 0.3035 ve GPR 607.02 olmuştur. $GPR < E_{dokunma}$ yapabilmek için yani 611.3' ü 607.02 yapabilmek için 27000 m daha fazla iletken kullanılmıştır. Şekil 8.(d)' den de görüldüğü gibi, iletken uzunluğu artarken maliyet de artmıştır. Ayrıca başlangıçtaki generasyonlarda, $GPR < E_{dokunma}$ sağlanamadığı için penaltı değeri de maliyet olarak alındığından, uygunluk değeri yüksek olmuştur. Generasyonlar ilerledikçe, uygunluk düşmekte, penaltı değeri de 1' e eşit olmaktadır.

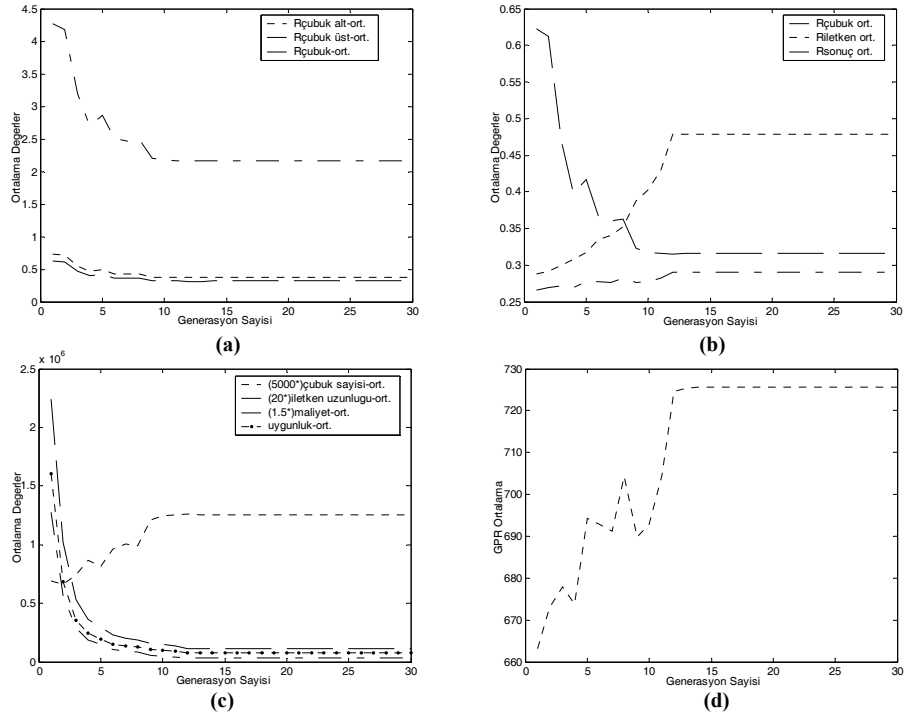
4.5.3. Topraklama İletkenlerinin Üst, Topraklama Çubuklarının Hem Üst Hem Alt Katmanda Olması Durumu

Çizelge 3. İletkenlerin Üst Katmanda, Çubukların Hem Alt Hem Üst Katmanda Olması Durumunda Tasarım

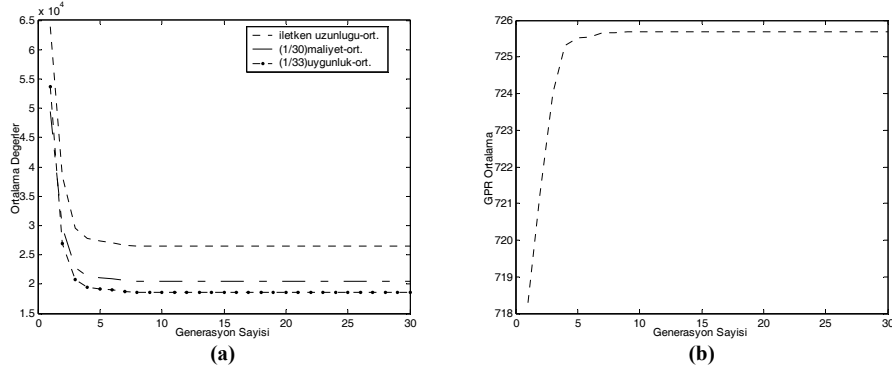
	Giriş Değerleri			GA Sonuçları	
	Çubuklu	Çubuksuz		Çubuklu	Çubuksuz
Popülasyon Büyüklüğü	100	100	Satır Sayısı	1	67
Maks. Gen. Sayısı	30	30	Sütun Sayısı	3	42
Üst Katman Özdirenci	300	300	Topraklama Direnci	0.2903	0.2903
Alt Katman Özdirenci	150	150	GPR	725.66	725.67
Yüz.Kap.Özdir.ve Kal.	4500-0.15	4500-0.15	Dokunma Gerilimi	725.68	725.68
Çubuk Uz.ve Yarıçapı	4-0.01	-	Top. İletken Uzunluğu	1600	26500
x ve y Kenar Uzunluğu	200-300	200-300	Top.Çubuk Sayısı	251	-
Kısa Dev. Akt. ve Sür.	25000-1	25000-1	Hafriyat Maliyeti	6000	99375
Ağ İletken Derinliği	1	1	Toplam Maliyet	77752	613475
Üst Katman Derinliği	2	2	İletken Kesiti	120	120

Çizelge 3' te görüldüğü gibi, 251 topraklama çubuğu ve 1600 m iletken ile ulaşılan GPR değerine, topraklama çubuğu kullanılmadan 26500 m iletken ile ulaşılmıştır. Her ne kadar $GPR < E_{dokunma}$ sağlanmışsa da maliyet yaklaşık 8 kat artmıştır.

Şekil 9.(a)' da topraklama çubuklarının alt katmana gelen kısımlarının direncinin, alt katman özdirencinin düşük olmasından dolayı küçük olduğu görülmektedir. Üst katman çubuk direnci 4.27' den generasyonlar ilerledikçe 2.16' ya, alt katman çubuk direnci 0.73' den generasyonlar ilerledikçe 0.37' ye gelmiştir. Bu düşüş, şekil 9.(a) ve (c)' de görüldüğü gibi, çubuk sayısının başlangıçta 138 iken, generasyonlar ilerledikçe 251' e yükselmesinden kaynaklanmıştır. Bu durumda çubukların alt ve üst katmana gelen kombinasyon direnci de 0.62' den 0.31' e düşmüştür. Şekil 9.(b) ve (c)' de iletken uzunluğu başlangıçta 63612 m' den generasyonlar ilerledikçe 1600 m' ye düştüğünden iletken direncinin de 0.28' den 0.48' e yükseldiği görülmektedir. Maliyete iletken uzunluğu daha fazla etki ettiğinden, iletken uzunluğu düştükçe maliyet düşmekte ve uygunluk ta amaçlanan minimizasyonu sağlayarak generasyonlar ilerledikçe düşmektedir. Şekil 9.(d)' de GPR ' nin generasyonlar ilerledikçe minimum maliyet için dokunma değerine yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 9. Generasyon Sayısına Bağlı Çubuklu Ağ Parametrelerinin Değişimi



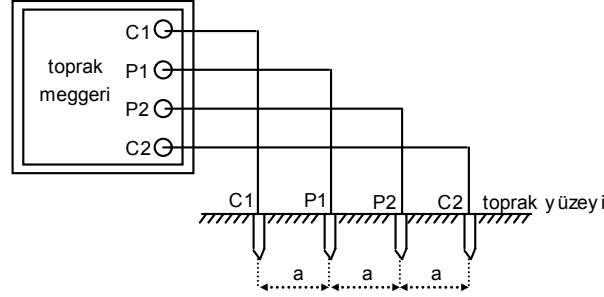
Şekil 10. Generasyon Sayısına Bağlı Çubuksuz Ağ Parametrelerinin Değişimi

Çubuk kullanılmadığında, 4.5.1 bölümünde uygulama örneği verilen topraklama iletkenlerinin üst katmanda olması durumu söz konusudur. Bu durumda üst katman iletken direnci GPR' nin hesaplanmasında kullanılan sonuç direncidir. Başlangıçta iletken uzunluğu 63970 m iken GPR 718.3, generasyonlar ilerledikçe iletken uzunluğu 26500 m' ye düşerken GPR ancak 725.6' ya yükselebilmektedir. 2. generasyonda iletken uzunluğu 38453 m iken GPR 721.3' tür. Buradan iletken uzunluğunun çok fazla olmasının GPR' nin düşürülmesine yönelik

fazla bir katkı sağlamadığı, aksine maliyetin çok fazla yükselmesine neden olduğu anlaşılmaktadır.

4.5.4. İki Katmanlı Toprak Modeli İle Gerçek Sistem Uygulaması Karşılaştırması

Burada, Türkiye Elektrik İletim Sisteminde yakın zamanda devreye giren 154 kV Tunceli Trafo Merkezinin(yeni merkez) ölçülen topraklama direncinin, uniform ve iki katmanlı toprak modeli hesaplama denklemleriyle karşılaştırması yapılacaktır. Böylece, gerçek bir güç sisteminin ölçüm değerleriyle, uniform ve iki katmanlı toprak modelinin analitik olarak hesaplanan değerleri arasındaki doğruluk sınanmış olunacaktır. İletim merkezinin Şekil 11’ de şematik gösterimi verilen dört noktalı Wenner metoduyla yapılan 5 ayrı nokta ve ölçüm yönündeki, toprak öz direnci ölçüm sonuçları Çizelge 4’ deki gibidir.



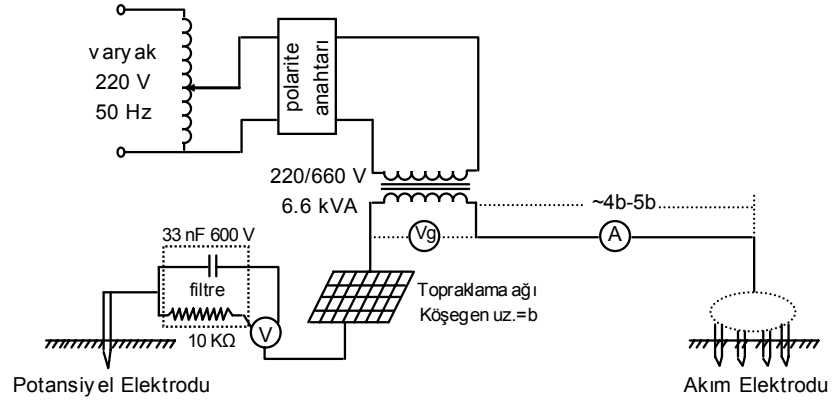
Şekil 11. Wenner' in Dört Elektrod Metodu Toprak Özgül Direnci Ölçüm Şeması

Çizelge 4. 154 kV Tunceli TM Farklı Ölçme Yönlerine Göre Toprak Öz direnci Ölçüm Sonuçları

a	1.ölçme yönü		2.ölçme yönü		3.ölçme yönü		4.ölçme yönü		5.ölçme yönü	
	R	$\rho = 2\pi aR$	R	$\rho = 2\pi aR$	R	$\rho = 2\pi aR$	R	$\rho = 2\pi aR$	R	$\rho = 2\pi aR$
1	6	37.7	7.8	49	7	43.98	8.5	53.4	9.5	59.69
1.5	5	47.12	5.6	52.77	5.6	52.77	6.5	61.26	7	65.97
2	4.15	52.15	4.6	57.8	4.4	55.29	5	62.83	5.5	69.11
2.5	3.65	57.33	3.9	61.26	3.9	61.26	4.2	65.97	4.7	73.82
3	3.225	60.79	3.6	67.85	3.4	64.09	3.5	65.97	3.75	70.68
4	2.7	67.85	3.1	77.91	3	75.4	2.82	70.87	3.16	79.42
5	2.3	72.25	2.7	84.82	2.6	81.68	2.5	78.54	2.18	68.48
6	2.1	79.17	2.35	88.59	2.4	90.48	2.37	89.34	2.5	94.24
8	1.85	93	2.05	103.04	2.13	107.06	2.05	103.04	2	100.53
10	1.65	103.67	1.83	114.98	1.8	113.09	1.75	109.95	1.75	109.95
12	1.5	113.1	1.57	118.37	1.75	131.94	1.5	113.09	1.6	120.63
14	1.285	113.03	1.55	136.34	1.51	132.82	1.33	117	1.4	123.15
16	1.275	128.18	1.325	133.2	1.15	115.61	1.25	125.66	1.28	128.68
18	1.125	127.24	1.125	127.23	1.1	124.4	1.15	130.06	1.15	130.06
20	1	125.66	1	125.66	1.125	141.37	0.95	119.38	1.05	131.94

Bu iletim merkezinin uniform toprak öz direnci 91.48 $\Omega \cdot m$ iken iki katmanlı toprak modeli uygulanırsa $\rho_1 = 38 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 140 \Omega \cdot m$ ve $h_1 = 1.9 m$ dir.

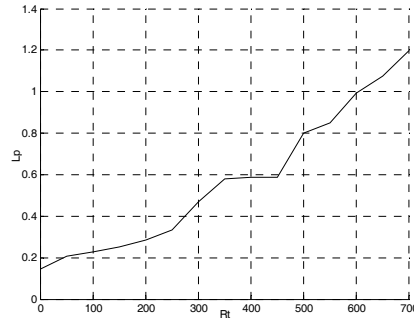
Aynı iletim merkezinin Şekil 12’ de şematik diyagramı verilen potansiyel düşümü metoduna göre topraklama direnci de ölçülmüştür. Bu metoda göre, potansiyel elektrodu ilk yeri fens teli sıfır kabul edilip 50’ şer metre aralıklarla yer değiştirmek suretiyle ölçmeler yapılmıştır.



Şekil 12. Potansiyel Düşümü Metodu Test Devresinin Şematik Diyagramı

Çizelge 5. Tunceli TM Potansiyel Düşümü Metodu Ölçüm Sonuçları

$L_p(m)$	$V_{kayıp}(mV)$	$V_1(mV)$	$V_2(mV)$	$V(mV)$	$R_t(\Omega)$
0	670	1150	1160	940.8	0.144
50	500	1400	1450	1334.6	0.205
100	500	1550	1600	1493.7	0.229
150	400	1650	1700	1626.7	0.25
200	350	1850	1900	1842.2	0.283
250	500	2200	2250	2168.2	0.333
300	600	3000	3200	3043	0.468
350	600	3800	3850	3777.7	0.581
400	600	3850	3870	3813	0.586
450	700	3880	3880	3816.4	0.587
500	800	4900	5600	5200.5	0.8
550	600	5200	5900	5528.5	0.85
600	400	6100	6800	6447	0.991
650	500	7000	7000	6982.1	1.074
700	500	7800	7800	7784	1.197



Şekil 13. Gerilim Elektrodu-Topraklama Ağı Mesafesine Göre Topraklama Direnci Değişimi

Tüm ölçümlerde 480 V uygulanmış, devreden 6.5 A akım akıtılmıştır. L_p , 50'şer metre aralıklarla kaydırılan potansiyel elektrodu mesafesidir. Hataları minimuma indirebilmek için, besleme trafosunun girişine polarite değiştirici anahtar konulmak suretiyle, ölçmeler her iki polaritede yapılarak akımın yönü değiştirilmekte ve ortalaması alınmaktadır. V_2 , polarite anahtarının akımın aktığı yönde ölçülen gerilim, V_1 , polarite anahtarının diğer konumunda terslenen akımın akmasıyla okunan gerilimdir. $V_{kayıp}$ da devreden akım akıyorken voltmetrede okunan gerilimdir. Her ölçümde, V aşağıdaki (15) denklemden hesaplandıktan sonra, devreden akıtılan I akımına oranlanmasıyla topraklama direnci değerleri bulunur.

$$V = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2}{2} - V_{kayıp}^2} \text{ ve } R_t = \frac{V}{I} \quad (15)$$

Gerilim elektrodunun kaydırılmasıyla elde edilen topraklama direnci değerleri Şekil 13' de görülmektedir. Topraklama direncinin belirlenebilmesi için, topraklama direnci eğrisinde düz bölgenin olması gerekmektedir. Bu düz bölge, ard arda 2-3 ölçümün birbirine eşit ya da $\pm \%10$ 'a kadar fark olduğu bölgedir. Bu düz bölge test altındaki elektrodun topraklama direnci değerini vermektedir. Düz bölgenin oluşabilmesi için test altındaki elektrod(ağ) ile yardımcı akım elektrodu arasındaki açıklığın yeterli uzaklıkta olması gereklidir (~4b-5b). Eğer test altındaki elektrod ile yardımcı akım elektrodu arasında yeterli açıklık yoksa, düz bölge oluşmayacak ve test altındaki elektrodun topraklama direnci tespit edilemeyecektir [16]. Şekil 13' de görüldüğü gibi, ölçümlerimizde topraklama direnci eğrisinde düz bölge oluşmuştur ve bu iletim merkezinin topraklama direnci 0.58 Ω olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6. Tunceli TM için Topraklama Direnci Karşılaştırması

Giriş Değerleri								Topraklama Direnci		
ρ	ρ_1	ρ_2	ρ_s	h_1	h_b	h_s	L_C	Uniform	İki Katmanlı	Gerçek Ölçüm
91.5	38	140	2500	1.9	0.5	0.15	6550	0.49	0.6	0.58
n_r	l_r	a	L_x	L_y	I_r	t_r		% Hata		
14	2.5	0.011	98	74	25000	0.5		18.3	3.5	0

Uniform toprak modeli için bu çalışmada IEEE Std.80-2000' de verilen Sverak' ın aşağıdaki (16) denklemini kullanılmıştır. Bu denklemden Alan; topraklama ağının alanı(m^2), L_C ; toplam iletken uzunluğu(m), n_r ; toplam çubuk sayısı, l_r ; 1 çubuğun boyu(m), h_b ; ağ gömülme derinliği(m)'dir.

$$R_g = \rho \cdot \left[\frac{1}{(L_C + n_r \cdot l_r)} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot \text{Alan}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h_b \cdot \sqrt{20} / \text{Alan}} \right) \right] \quad (16)$$

5. SONUÇLAR

Bu çalışmanın iki özgün noktası vardır. Birincisi, iki katmanlı toprak modelinin tüm yapılarında GA kullanılarak GPR' nin sınırlandırılmasına dayalı önerilen yaklaşım metodu ile topraklama ağının tasarlanmasıdır. İkincisi, iki katmanlı toprak modeli topraklama ağı tasarımında topraklama çubuklarının önemini belirlemesidir.

$GPR < E_{dokunma}$ ve minimum maliyetin birlikte arandığı ağ tasarımlarında, topraklama iletkenlerindense topraklama çubuklarının kullanılmasının daha avantajlı olduğu, tüm iki katmanlı toprak modeli yapılarında yapılan hem çubuklu hem de çubuksuz uygulamalarda görülmüştür. Ayrıca iki katmanlı toprak modelinin her üç yapısında da topraklama çubuklu ağ tasarımı yapılabildiği halde, iletken uzunluğunu verecek satır ve sütun göz sayıları arama aralığının

yetersiz gelmesi nedeniyle, topraklama çubuğu kullanılmadan ağ tasarımının yapılamadığı uygulamalara da rastlanılmıştır.

İletken uzunluğunun belli bir değerden sonra artmasının topraklama direncini ve dolayısıyla GPR'yi düşürmediği, ancak çubuk sayısının artırılmasının bu kriterleri direkt ve orantılı şekilde etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca maliyeti, topraklama çubuklarındansa topraklama iletkenlerinin çok daha fazla etkilediği vurgulanmıştır.

GA kullanılarak önerilen ağ tasarımı yaklaşımında, en fazla 20 generasyonda en iyi çözümün elde edildiği ve problem çözme süresinin de çok kısa olduğu yapılan tüm deneylerde görülmüştür.

İki katmanlı toprak modelinde, hem en düşük maliyet hem de GPR'nin müsaade edilebilir maksimum dokunma geriliminden düşük olmasını sağlamak için, yüksek gerilimli trafo merkezlerindeki topraklama ağında topraklama çubuklarının kullanılması gereklidir. Ayrıca topraklama çubuklarının kullanılmasıyla, yazın üst katmanın kuruması ya da kışın alt katmanın donması gibi tehlikelerin etkileri de bertaraf edilebilecek ve istenilen topraklama direnci değeri elde edilebilecektir.

Gerçek bir iletim merkezi üzerinde yapılan topraklama direnci ölçümleriyle, uniform ve iki katmanlı toprak modelleri topraklama direnci hesaplamaları karşılaştırılarak, iki katmanlı toprak modelinin güvenilirliği sınanmıştır. İki katmanlı toprak modeli kullanıldığında, iletim merkezi üzerinde yapılan topraklama direnci ölçüm sonuçlarına oldukça yakın, kabul edilebilir neticeler alındığı görülmüştür. Bu da iki katmanlı toprak modeli ile güvenli bir şekilde topraklama ağı tasarlanabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Mürtezoğlu K., "Yüksek Gerilim İstasyonlarında Topraklama Sistemi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
- [2] Gürsu B., İnce M.C., "Genetik Algoritmalar İle Yüksek Gerilim İstasyonlarında Optimum Topraklama Ağı Tasarımı", Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Fırat Üniversitesi, Cilt:19, Sayı:4, 2007.
- [3] Otero A.F., Cidras J., Garrido C., "Genetic Algorithm Based Method for Grounding Grid Design", IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, 120-123, 1998.
- [4] Thasananutariya T., Spuntupong K., Chatratana S., "Design of Grounding System for GIS Indoor Substation", TENCON 2004, IEEE Region 10 Conference, Vol.3, 413-416, 2004.
- [5] Costa M.C., Filho M.L.P., Marechal Y., Coulomb J.C., Cardoso J.R., "Optimization of Grounding Grids by Response Surfaces and Genetic Algorithms", IEEE Transaction on Magnetism, Vol.39, No.3, 1301-1304, 2003.
- [6] Neri F., "A New Evolutionary Method for Designing Grounding Grids by Touch Voltage Control", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol.2, 1501-1505, 2004.
- [7] Covitti A., Delvecchio G., Fusco A., Lerario F., Neri F., "Two Cascade Genetic Algorithms to Optimize Unequally Spaced Grounding Grids With Rods", IEEE Eurocon, 1533-1536, 2005.
- [8] IEEE Std.80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [9] Salama M.M.A., Elsherbiny M.M., Chow Y.L., "A Formula for Resistance of Substation Grounding Grid in Two-Layer Soil", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.3, 1255-1262, 1995.
- [10] Chow Y.L., Elsherbiny M.M., Salama M.M.A., "Resistance Formulas of Grounding Systems in Two-Layer Earth", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.3, 1330-1336, 1996.

- [11] Nahman J.M., Djordjevic V.B., “Resistance to Ground of Combined Grid-Multiple Rods Electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.3, 1337-1342, 1996.
- [12] Elsherbiny M., “Simple Formulas for Calculating the Grounding Resistance of Rodbed Buried in Non-Uniform Soil”, IEEE Proceedings of the 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 2, 1281-1284, 1995.
- [13] Hocaoğlu M.H., Hocaoğlu A.T., “Yüksek Gerilim Tesisleri Topraklama Standartlarının Karşılaştırılması”, Kaynak Elektrik Uluslararası Enerji Elektrik Elektronik ve Otomasyon Dergisi, sayı: 134, 131-142, 2000.
- [14] Öztürk O.İ., Kalenderli Ö., “Topraklayıcılarda Potansiyel Dağılımının İki ve Üç Boyutlu Sayısal Analizi”, İTÜ Dergisi/d Mühendislik, Cilt:5, Sayı:2, Kısım:1, 37-48, 2006.
- [15] Chang C., Lee C.H., “Computation of Ground Resistances and Assesment of Ground Grid Safety at 161/23.9 kV Indoor-Type Substation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.21, No.3, 1250-1260, 2006.
- [16] Katipoğulları O., “Karmaşık Topraklama Sistemlerinde Topraklama Empedansının Ölçülmesi”, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2003.