

# Genetik Algoritmalar ile Adım ve Dokunma Gerilimi Kontrolünde Bakır, Alüminyum ve Çelik Özlü Alüminyum İletkenli Topraklama Ağı Karşılaştırması

Barış GÜRSU<sup>1</sup>, Melih Cevdet İNCE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TEİAŞ 13.İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürlüğü  
gursubaris@hotmail.com

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
mcince@firat.edu.tr

## Özet

Son yıllarda bakır fiyatları tüm dünyada hızlı ve sürekli yükselişler göstermiştir. Bu duruma bağlı olarak, yüksek gerilim iletim merkezlerinin topraklama ağlarında kullanılan bakır iletkenlerin yükselen fiyatlarından kaynaklanan maliyet artışları dikkate değerdir. Bu çalışmada, Ülkemizde kullanılan bakır iletkenli topraklama ağları, yükselen bakır fiyatları karşısında alternatif olarak düşünülebileceği tartışmaya açılan alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenli topraklama ağları Genetik Algoritmalar yardımıyla optimum olarak tasarlanmıştır. Tasarımlarda, IEEE Std.80-2000' e göre adım ve dokunma gerilimlerinin kontrolünün yanında ekonomik yaklaşım da ortaya konulmuştur. Bakır, alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenli topraklama ağlarının avantaj ve dezavantajları, hem Genetik Algoritmalara dayalı tasarımlar ile hem de iletkenlik, korozyon, mukavemet gibi farklı yönlerden gösterilmiştir. Topraklama ağı tasarımlarında iletken uzunluğu, çubuk sayısı ve ağ gömülme derinliği GA yardımıyla optimize edilmiştir.

## Abstract

In recent years, copper prices have increased fast and continuously. It is notable that the increasing cost related to the increasing prices of copper conductors which are used for ground grid at substations. In this study, we design optimum ground grids with copper conductors that are used in our country, ground grids with aluminium and steel reinforced aluminium conductors that are proposed considering as alternatives to the increasing copper costs by the help of Genetic Algorithms. In these designs beside the control of step and touch voltages, economic approach is also exhibit. The advantages and disadvantages of ground grids with copper, aluminium and steel reinforced aluminium conductors are showed by both the designs based on GA and different aspects like conductivity, corrosion and strength. The length of conductor, rod quantity and grid burial depth are optimized in ground grid designs via GA.

## Semboller Listesi

$\rho_s$	Yüzey malzemesi özdirenci( $\Omega \cdot m$ )
t	Kısa devre akım süresi(sn)
$C_s$	Yüzey tabakası düzeltme katsayısı
$h_s$	Yüzey malzeme kalınlığı(m)

$\rho$	Toprak özdirenci( $\Omega \cdot m$ )
$E_m$	Göz gerilimi(V)
$K_m$	Göz gerilimi için mesafe faktörü
$K_i$	Ağ geometrisi için düzeltme faktörü
$I_G$	Maksimum ağ akımı(A)
D	Paralel iletkenler arası mesafe(m)
d	Ağ iletkeninin çapı(m)
h	Ağ gömülme derinliği(m)
$L_r$	Her bir topraklama çubuğunun uzunluğu(m)
$L_C$	Topraklama iletkenlerinin toplam uzunluğu(m)
$L_R$	Topraklama çubuklarının toplam uzunluğu(m)
A	Topraklama ağının kapladığı toplam alan( $m^2$ )
$L_P$	Topraklanacak yerin çevresi(m)
$L_x$	(x) doğrultusunda ağın maksimum uzunluğu(m)
$L_y$	(y) doğrultusunda ağın maksimum uzunluğu(m)
$D_m$	Ağın iki nokta arasındaki maksimum mesafe(m)
I	Kısa devre akımı(A)
$\alpha_r$	Referans sıcaklıkta özdirencin ısıl katsayısı
$\rho_r$	Referans sıcaklıkta topraklama iletkeninin özdirenci ( $\mu\Omega cm$ )
$T_{CAP}$	Isıl kapasite faktörü( $J/cm^3/^\circ C$ )
$T_m$	Müsaade edilebilir maksimum sıcaklık( $^\circ C$ )
$T_a$	Ortam sıcaklığı( $^\circ C$ )
$T_r$	Malzeme sabitleri için referans sıcaklık( $^\circ C$ ).

## 1. Giriş

Mühendisliğin temel ilkelerinden biri de teknik problemleri en ekonomik şekilde çözmektir. Son yıllarda tüm dünyada bakır fiyatları hızlı ve sürekli olarak yükselmektedir. Yükselen bakır fiyatları karşısında, [1-2]' de elektrik enerjisi iletim, dağıtım ve kullanımında bakır kabloların yerine alüminyum iletkenli kablo kullanılmasının avantajlarından bahsedilmiştir. Yüksek gerilimli iletim merkezlerinin topraklama ağlarında, topraklama iletkenleri ve topraklama çubukları kullanılmaktadır[3-4]. İletim merkezlerinin topraklama ağlarında topraklama iletkeni olarak, Ülkemizde örgülü bakır iletkenler kullanılırken, Çin gibi bazı Asya Ülkelerinde çelik iletkenler de kullanılmaktadır. [5]' de çelik ve bakır iletkenlerden yapılan topraklama ağlarının performansı incelenmiştir. IEEE Std.80-2000[6] topraklama ağı dizaynında aranılan şartlar içerisinde, topraklama ağının hesaplanan göz geriliminin, dokunma gerilimi limit değerinden ve hesaplanan adım geriliminin adım gerilimi limit değerinden küçük olmasının gerektiğini ifade etmiştir.

Topraklama ağı dizaynı ile ilgili olarak literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur[7-10]. Son yıllarda hemen her bilimin çözülmesi zor problemlerinde, başarılı neticeler alabilen yapay zeka uygulamalarından Genetik Algoritmalar(GA), uygunluk fonksiyonu referanslı kaliteli olanların neslini devam ettirmesi esasına göre çalışmaktadır. Özellikle, iyi olmayan toprak şartları altında, geniş alanlı iletim merkezi topraklama ağı dizaynında yüksek maliyetler ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada, GA yardımıyla topraklama ağının hesaplanan göz ve adım gerilimlerinin, dokunma ve adım gerilimi limit değerlerinden küçük olmasını sağlayan en düşük maliyetli topraklama ağları tasarlanmıştır. Bakır, alüminyum ve çelik özlü alüminyum için ayrı ayrı GA yardımıyla yapılan topraklama ağı tasarımları karşılaştırılmıştır.

## 2. GA İle Topraklama Ağı Tasarımı

Topraklama sisteminin analizinde IEEE Std. 80-2000' de Şekil 1' deki GA ile uyarlı blok diyagramı verilen dizayn prosedürü kullanılmıştır. 50 kg ağırlığındaki bir vücut için adım ve dokunma gerilimi limitleri IEEE Std.80-2000' e denklem (1) ve (2)' de verilmiştir.

$$E_{\text{dokunma-50}} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t} \quad (1)$$

$$E_{\text{adım-50}} = (1000 + 6C_s \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t} \quad (2)$$

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

Bir topraklama ağının bir gözü içerisindeki maksimum dokunma gerilimi, göz gerilimi olarak ifade edilmekte ve denklem (4)' deki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (4)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left( \frac{8}{\pi \cdot (2n-1)} \right) \right] \quad (5)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (6)$$

$$\text{Ağın çevresi boyunca veya köşelerinde çubuk varsa,} \quad (7)$$

$$K_{ii} = 1$$

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (8)$$

Ağda hiç topraklama çubuğu yok veya birkaç topraklama çubuğu var ve bunlar da çevresinde yerleştirilmemiş ise;

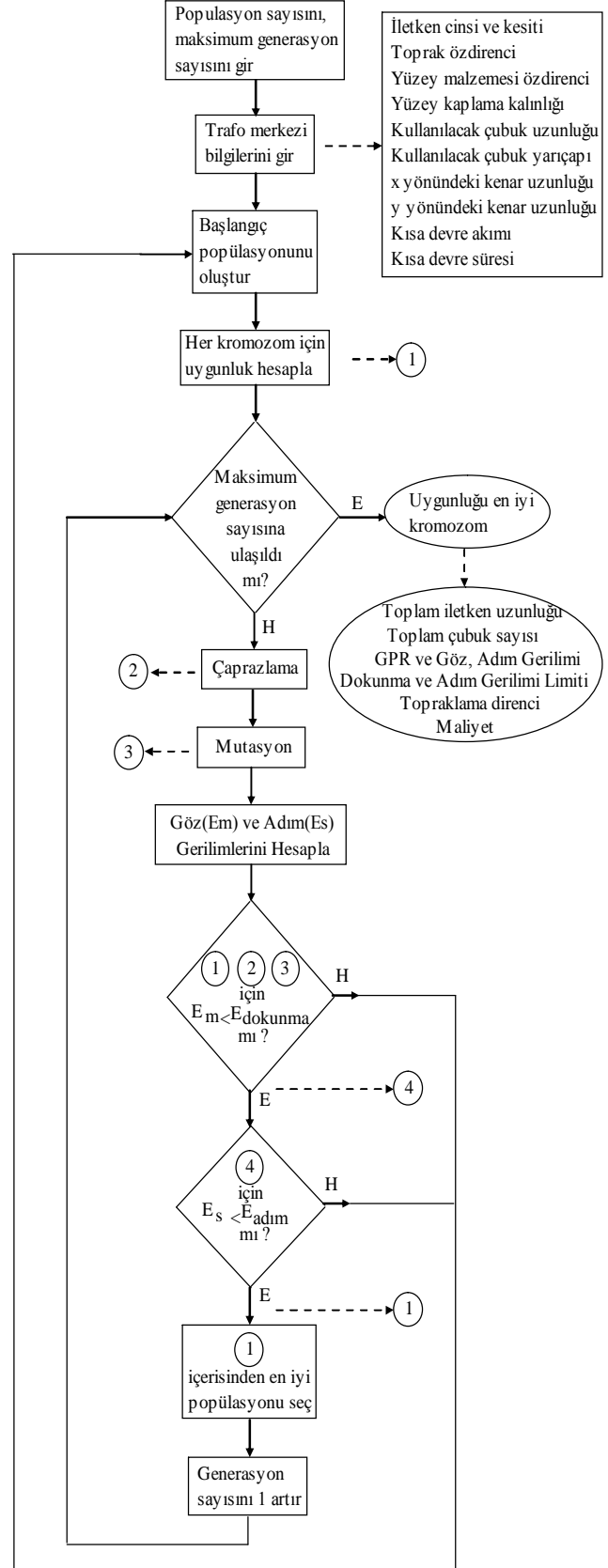
$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (9)$$

$$L_M = L_C + L_R \quad (10)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}, h_0 = 1m \quad (11)$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (12)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P} \quad (13)$$



Şekil 1. GA İle IEEE Std.80-2000' e Dayalı Topraklama Ağı Tasarımı

$$n_b = \begin{cases} 1, & \text{kare} \\ \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}, & \text{diğer} \end{cases} \quad (14)$$

$$n_c = \begin{cases} 1, & \text{kare - dikdörtgen} \\ \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0.7A}, & \text{diğer} \end{cases} \quad (15)$$

$$n_d = \begin{cases} 1, & \text{kare - dikdörtgen - L} \\ \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}, & \text{diğer} \end{cases} \quad (16)$$

Adım gerilimi hesabı denklem (17)' de gösterilmiştir.

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (17)$$

$$L_S = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (18)$$

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (19)$$

### 2.1. İletken Kesiti Hesabı

Dokunma gerilimi hesabında, ağ iletkeninin çapı, dolayısıyla kesiti çok önemlidir. Topraklama ağı tasarımında, farklı tip iletkenin farklı kesitleri kullanılacak, böylece maliyet analizi yapılacaktır. Topraklama iletkeninin kısa devre esnasında zarar görmemesi için en az denklem(20)'de hesaplanacak kesitte olması gerekir.

$$A_k = I \cdot \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \cdot 10000}{T_{CAP} \ln \left[ 1 + \left( \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}} \quad K_0 = \left( \frac{1}{\alpha_r} \right) - T_r \quad (20)$$

Tablo 1. Kesit Hesabı İçin Malzeme Sabitleri

	Bakır	Alüminyum	Çelik özlü alüminyum
Malzeme İletkenliği(%)	100	61	20.3
$\alpha_r$	0.00393	0.00403	0.00360
$K_0$	234	228	258
$T_m$	1083	657	657
$\rho_r$	1.72	2.86	8.48
$T_{CAP}$	3.42	2.56	3.58

### 2.2. Tasarımda Optimumu Aranılan Ağ Parametreleri ve Toplam İletken Uzunluğunun Hesaplama Yaklaşımı

Topraklama ağı tasarımında optimum maliyetin yanında, optimum maliyeti verecek ve emniyet şartlarını sağlayacak;

-Toplam çubuk sayısı( $n_r$ ),-Ağın 1 gözünün karesel boyutu(s) ve -Ağ gömülme derinliği(h) optimize edilecektir. Ağın 1 gözünün karesel boyutunun optimizasyonu ile hem toplam iletken uzunluğu bulunmuş olunacak hem de paralel iletkenler arası mesafenin(D) eşit olarak tespit edilmesiyle göz ve adım gerilimi hesabında gerekli olan mesafe faktörü doğru olarak belirlenmiş olunacaktır.

$$D=s \quad (21)$$

$$Goz_x = \frac{L_x}{s} \quad (22)$$

$$Goz_y = \frac{L_y}{s} \quad (23)$$

$$L_c = L_x \cdot (Goz_y + 1) + L_y \cdot (Goz_x + 1) \quad (24)$$

$$L_R = n_r \cdot L_r \quad (25)$$

Denklemlerde geçen, s:Ağın bir gözünün karesel boyutu( bir kenarının uzunluğu)dur. Ağın satır ve sütunlardan oluştuğu varsayılarak,  $Goz_x$ :x doğrultusundaki 1 satırdaki göz sayısı,  $Goz_y$ : y doğrultusundaki 1 satırdaki göz sayısıdır. Tasarım programında ayrıca, her generasyonda dokunma ve adım gerilimi, maliyet, iletken uzunluğu, çubuk sayısı, topraklama direnci, GPR, ağ gömülme derinliği, uygunluk hesaplanmakta ve kullanıcının isteğine göre tüm generasyonlar için değişimleri görülerek, ortalamaları çizdirilebilmektedir. Program esnek bir yapıya sahiptir.

### 2.3. GA' da Maliyet ve Uygunluk Fonksiyonu

Maliyet fonksiyonuna hafriyat maliyeti de dahil edilmiştir.

$$C = (C_{iletken} \cdot L_c) + (C_{çubuk} \cdot n_r) + C_{hafriyat} \quad (26)$$

$C_{iletken}$ :1 metre iletkenin fiyatı,  $C_{çubuk}$ :1 adet çubuğun fiyatı,  $C_{hafriyat}$ :Hafriyat maliyetidir. Hafriyat maliyetinde 1 m<sup>3</sup> toprağın hafriyatı 5 YTL alınmış olup, her bir iletkenin de 0.75 m genişliğinde kazılması yeterli görülmüştür.

$$C_{hafriyat} = [(L_x \cdot h \cdot (Goz_y + 1) \cdot 0.75) + (L_y \cdot h \cdot (Goz_x + 1) \cdot 0.75)] \cdot 5 \quad (27)$$

Uygunluk fonksiyonunun tanımlanmasında ağın hesaplanan göz gerilimi esas alınmıştır. Zira adım gerilimi için izin verilen değerler, dokunma gerilimleri için izin verilen değerlerden daha büyüktür. Dolayısıyla topraklama sistemi dokunma gerilimi koşullarını yerine getirdiğinde, genellikle tehlikeli adım gerilimlerinin oluşmayacağı varsayılır[11].

$$F = C + [P \cdot (E_m - E_{dokunma})] \quad (28)$$

$$\begin{cases} P = C \rightarrow E_m \geq E_{dokunma} \\ P = 1 \rightarrow E_m < E_{dokunma} \end{cases}$$

F Uygunluk fonksiyonu, C maliyet fonksiyonu, P penaltı değeridir. Amaç, uygunluk fonksiyonunu minimize etmektir. Tasarımlarımızda, 3 m boyunda 1 adet bakır kaplı çelik topraklama çubuğunun fiyatı 144 YTL, 5 m boyunda 1 adet alüminyum alaşımli topraklama çubuğunun fiyatı 86 YTL, 120 mm<sup>2</sup> lik örgülü bakır iletkenin 1 m' si 20 YTL, alınmıştır. 120 mm<sup>2</sup> bakır eşdeğerli alüminyum iletkenin 1 m' si 3.9 YTL, 120 mm<sup>2</sup> bakır eşdeğerli çelik özlü alüminyum iletkenin 1 m' si 5.4 YTL alınmıştır. [12]' ye göre en küçük iletken kesiti en az 120 mm<sup>2</sup> bakır alınması gerektiği ifade edildiğinden aynı eşdeğerli alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenler kullanılmıştır. Toplam çubuk sayısı [10, 255], ağ gömülme derinliği [0.5, 5] ve karesel göz boyutu [2, 255] arasında aranmıştır. GA' da kullanılan her bir birey; toplam çubuk sayısı, ağ gömülme derinliği ve karesel göz boyutunu oluşturan 3' er genenden oluşmaktadır.

### 3. Bakır, Alüminyum ve Çelik Özlü Alüminyum İletkenlerin Karşılaştırılması

Bakır eşdeğerli, alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenlerin fiyatları bakır iletkenlere nazaran çok daha düşüktür. Topraklamada iletkenlerin mekanik mukavemetleri de önemlidir. Bakır iletkenlerin kopma yükleri, eşdeğer bakır kesitli alüminyum iletkenlerden çok az yüksektir. Çelik özlü

alüminyum iletkenlerde ise içindeki çeliğin kesitine bağlı olarak bakıra göre yaklaşık %50 oranındaki bir fazlalıkla çelik özlü alüminyumun lehinedir. Alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenler dünyanın her yerinde havai hatlarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ömür bakımından iyi bir imtihan vermişlerdir. Alüminyumun erime derecesinin düşük oluşu menfi bir özellik gibi görünse de topraklama sistemleri için bu, söz konusu değildir. Bir arıza anında, alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenin kopmasına ya da yanmasına müsaade edilmeden akım toprağa enjekte edilecektir. Ayrıca iletken kesiti seçiminde de erime sıcaklığı önemli bir parametredir ve buna göre alüminyum ve çelik özlü alüminyum için daha yüksek kesitli iletken seçilir. Hem erime derecesi hem de aynı elektrik iletimi için bakıra göre daha büyük kesitte alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletken gerekliliği daha fazla yüzey ve daha kolay ısı emisyonu anlamına gelir ki bu da alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenler için ayrı bir avantaja dönüşür. Alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenlerin belki de söylenebilecek tek ve önemli dezavantajı korozyondur. Nerst skalası metallerin oksitlenme eğilimini gösterir. Bu skalaya göre alüminyumun standart oksitlenme ve redüklenme potansiyeli bakıra göre daha küçüktür. Bu da daha kolay korozyona uğrayacağını göstermektedir. Uygun alaşım alüminyum seçilerek ya da katodik koruma gibi uygun korozyon koruma metodları seçilerek bu korozyon tehlikesi önlenebilir. Elektrik tesislerinde topraklamalar yönetmeliğine göre yüksek gerilim tesislerinde topraklama için; Mekanik dayanım ve korozyona karşı dayanıklılığın sağlanması gerekir. Bunun için en küçük iletken kesitleri bakır için 25 mm<sup>2</sup>, alüminyum için 35 mm<sup>2</sup> ve çelik için 50 mm<sup>2</sup> dir. Görüldüğü gibi topraklama tesisleri için bakır iletken kullanılabilirliği gibi, alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletken kullanılabilmesi için de kesit koşulunun sağlanmasından başka sakınca olmadığı ortaya konulmuştur.

Tablo 2. Örgülü Bakır İletkenler

Kesit mm <sup>2</sup>	Kopma Yüğü (kgf)	Birim Ağırlık (kg/km)	Fiyat (YTL) (1 metre)	Korozyon (Oksitlenme Potansiyeli)
50	1740	443.5	9	+0.337
70	2320	605.2	12	
95	3055	841.7	17	
120	3750	1056	20	
150	4780	1320	25	

Tablo 3. Örgülü Alüminyum İletkenler

Kesit mm <sup>2</sup>	Bakır Eşdeğeri (mm <sup>2</sup> )	Kopma Yüğü (kgf)	Birim Ağırlık (kg/km)	Fiyat (YTL) (1 m)	Korozyon (Oksitlenme Potansiyeli)
84.91	53.40	1435	232.5	2	-1.66
107.3	67.53	1814	294	2.4	
151.8	95.47	2671	417.7	3.2	
170.6	107.2	2742	469	3.4	
201.3	126.7	3268	554	4	

Tablo 4. Örgülü Çelik Özlü Alüminyum İletkenler

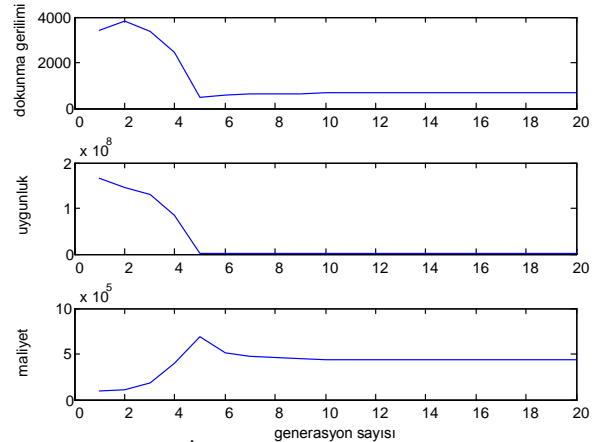
Kesit mm <sup>2</sup>	Bakır Eşdeğeri (mm <sup>2</sup> )	Kopma Yüğü (kgf)	Birim Ağırlık (kg/km)	Fiyat (YTL) (1 m)
99.30(85-14)	53.5	3035	343.9	2.4
142.48(135-7)	84.9	3220	430.1	3.5
160.54(152-8)	95.6	3628	484.6	4
176.90(152-25)	95.7	5736	612.9	4.4
280.84(242-39)	152	8798	972.8	6.8

#### 4. Topraklama Ağı Tasarım Uygulaması

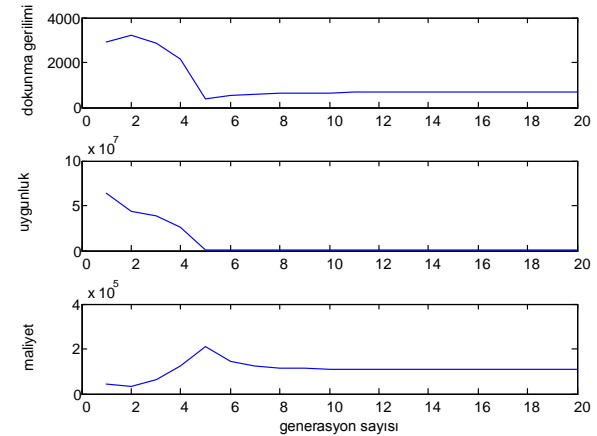
Matlab'ta hazırlanan topraklama ağı tasarım programında kullanıcının istediği şekilde seçebileceği giriş değerleri olarak; popülasyon sayısı: 200, maksimum generasyon sayısı:20,  $\rho_{200} \Omega m$ ,  $\rho_s:2500 \Omega m$ ,  $h_s:0.2 m$ , bakır için  $L_r:3 m$ , alüminyum ve çelik özlü alüminyum için  $L_r:5 m$ ,  $L_x:200 m$ ,  $L_y:250 m$ ,  $I_G:20000 A$ ,  $t_s:0.5 sn$  alınmıştır.

Tablo 5. Topraklama Ağı Tasarımı Simülasyon Sonuçları

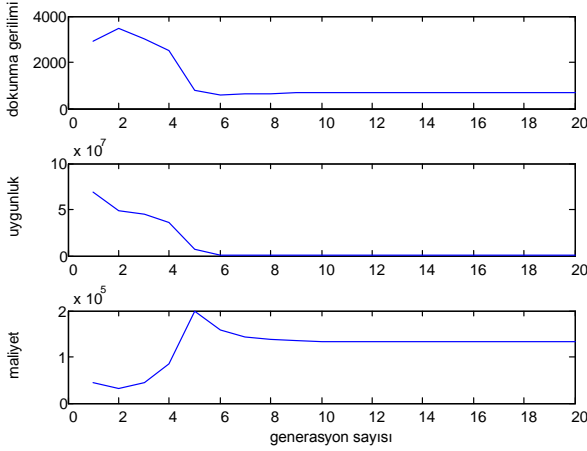
Simülasyon Sonuçları	Bakır	Alüminyum	Çelik özlü alüminyum
Hesaplanan $A_k(mm^2)$	49	84.13	119.65
Kullanılacak $A_k(mm^2)$	120	191	221
$Göz_x$	38	36	34
$Göz_y$	48	45	43
$s(m)$	5.26	5.55	5.88
$R_i(\Omega)$	0.4	0.4	0.41
GPR(V)	816	817.66	818.63
$h(m)$	0.6	0.5	0.5
$E_m(V)$	675.15	666.27	675.23
$E_{do:kuma-50}(V)$	675.27	675.27	675.27
$E_s(V)$	734.36	830.53	812.96
$E_{adm-50}(V)$	2209	2209	2209
$L_C(m)$	19450	18450	17450
$n_r$	11	10	50
C(YTL)	434350	107410	131250



Şekil 2. Bakır İletkenli Topraklama Ağı Tasarımında Generasyon Sayısına Bağlı Ortalama Değerler



Şekil 3. Alüminyum İletkenli Topraklama Ağı Tasarımında Generasyon Sayısına Bağlı Ortalama Değerler



**Şekil 4. Çelik Özlü Alüminyum İletkenli Topraklama Ağı Tasarımında Generasyon Sayısına Bağlı Ortalama Değerler** Tablo 5’ te görüldüğü gibi; 120 mm<sup>2</sup>(bakır), 191 mm<sup>2</sup>(alüminyum) ve 221 mm<sup>2</sup>(çelik özlü alüminyum) kesitinde kullanılan iletkenler için yapılan GA’ ya dayalı tasarımda, adım ve dokunma gerilimlerinin müsaade edilebilir değerlerinden küçük olmasını sağlayan en düşük maliyetli olanı alüminyumdur. Bakır iletkenli topraklama ağı tasarımında, 1.generasyonda uygunluk ortalaması  $1.6554 \cdot 10^8$  iken sürekli düşerek 11.generasyondan itibaren  $0.0044 \cdot 10^8$ ’e gelmiştir. Amaçlanan uygunluk minimizasyonu sağlanmıştır. 1.generasyonda  $3.4358 \cdot 10^3$  olan dokunma gerilimi(göz gerilimi) ortalamasını müsaade edilebilir maksimum dokunma gerilimi değeri olan 675.27’ den daha aşağıda tutmak için maliyet te  $0.9441 \cdot 10^5$  ‘den 11. generasyondan itibaren  $4.4051 \cdot 10^5$ ’ e gelmiştir. Dokunma gerilimi değerini düşürmek için toplam iletken uzunluğu(iletken ya da çubuk) artırılacağından maliyet te artar. Dokunma gerilimi değeri limit değerinden aşağıda tutulmaya çalışılırken, aynı zamanda maliyetin de minimum olması stratejisi izlendiğinden dokunma gerilimi değerinin çok düşürülmesine izin verilmemiştir. Alüminyum iletkenli topraklama ağı tasarımında, 1.generasyonda uygunluk ortalaması  $6.4061 \cdot 10^7$  ‘den yine sürekli düşerek 12. generasyondan itibaren  $0.0109 \cdot 10^7$  ‘ de sabitlenmiştir. Dokunma gerilimi ortalaması 1. generasyonda  $2.9254 \cdot 10^3$  iken 12.generasyonda  $0.6631 \cdot 10^3$ ’ e gelmiştir. Maliyet te dokunma gerilimi ile ters orantılı şekilde değişerek  $0.4444 \cdot 10^5$  ‘den  $1.0940 \cdot 10^5$ ’ e yükselmiştir. Çelik özlü alüminyum iletkenli topraklama ağı tasarımında, uygunluk ortalaması,(amaçlandığı gibi)  $6.8901 \cdot 10^7$  ‘den  $0.0132 \cdot 10^7$  ‘ye azalmıştır. Başlangıçta yetersiz gelen iletken uzunluğu artırılarak dokunma gerilimi ortalaması  $2.9012 \cdot 10^3$  ‘den 17.generasyonda  $0.6735 \cdot 10^3$  e, maliyet ortalaması da  $0.4319 \cdot 10^5$  ‘den 17.generasyonda  $1.3210 \cdot 10^5$  ‘e ulaşmıştır.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, GA yardımıyla IEEE Std.80-2000’ e dayalı optimum topraklama ağı tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, göz ve adım gerilimi hesabında kullanılan paralel iletkenler arası mesafenin bulunuşu, ağıın 1 gözünün karesel göz boyutu optimizasyonu ile sağlanmış, böylece toplam iletken uzunluğu da hesaplanmıştır. Ayrıca toplam çubuk sayısı ve ağ gömülme derinliği de optimize edilmiştir. Bakır, alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenli topraklama ağı tasarımlarında, dokunma ve adım gerilimi limit değerlerinin hesaplanacak göz ve adım gerilimlerinden büyük olması ve

minimum maliyet birlikte sağlanmıştır. İletken cinsine göre kesit hesabı yapılmış, bakır eşdeğerli alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletken kesitleri kullanılmıştır. Tasarım sonuçları, alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenlerin kesitleri artsa bile topraklama ağı tasarımında bakır iletkenli topraklama ağlarına göre 1/4 – 1/3 kadar maliyetli olacağını göstermiştir. Çelik özlü alüminyum iletkenli ağların maliyet yönünden alüminyum iletkenli topraklama ağlarının 1.22 katı olması dezavantaj olsa da, çeliğin sağlamış olduğu mukavemet avantajı vardır. Katodik korozyon koruması yapılması halinde bile alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenli topraklama ağları, bakır iletkenli topraklama ağlarına nazaran çok daha ekonomik olacaktır. Kaldı ki gerçek sistem uygulamaları üzerinde edinilen tecrübeler, bakır iletkenlerin de zaman içinde toprak altında korozyona uğradığını göstermiştir. Özellikle büyük boyutlu ve toprak şartlarının kötü olduğu topraklama ağı tasarımlarında alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletken kullanılması ekonomik olarak ülkeye kazanç sağlayacaktır.

## 6. Kaynaklar

- [1] Duran, A.M., “Yükselen Bakır Fiyatları Karşısında Alüminyum İletkenli Kablo Kullanımı”, Kaynak Elektrik Dergisi, syf.86-92, 2006.
- [2] Alperöz, N., “Alüminyum İletkenli Havai ve Yer altı Kablolarının Teknik ve Ekonomik Bakımından İncelenmesi”, Elektrik Mühendisliği-334/335,151-153.
- [3] Gürsu, B. ve İnce, M.C., "Genetik Algoritmalar İle Yüksek Gerilim İstasyonlarında Optimum Topraklama Ağı Tasarımı", Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt No.19(4), syf. 511-524, 2007.
- [4] Gürsu, B. ve İnce, M.C., “Heterojen Toprakta Genetik Algoritmalarla Dayalı Ağ tasarımı İçin Yeni Bir C<sub>s</sub> Formülü”, Galatasaray Üniversitesi YA/EM 2008.
- [5] Li, Y., Ma, J. And Dawalibi, F.P., “Power Grounding Safety:Copper Grounding Systems vs. Steel Grounding Systems”, International Conference on Power System Technology, Page(s).1-6, 2006.
- [6] IEEE Std.80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [7] Zhongdong, D., Zhenyu, Y., Xishan, W., Hua, X., “The Optimum Design of Grounding Grid of Large Substation”, Proceedings of the XIV.International Symposium on High Voltage Engineering,page1-5, 2005.
- [8] Ghoneim, S., Hirsch, H., Elmorshedy, A., Amer, R., ”Improved Design of Square Grounding Grids”, IEEE International Conference on Power System Technology, Page(s).1-4, 2006.
- [9] Gonos, F.I., Stathopoulos, I.A., “Estimation of Multilayer Soil Parameters Using Genetic Algorithms” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.1, Page(s).100-106, 2005.
- [10] Sullivan J.A., “Evaluation of Mesh and Touch Voltage at Substations”, IEE Proc.-Gener Transm.Distrib., Vol.149, No.2, Page(s).201-209, 2002.
- [11] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği”, 24500 sayılı Resmi Gazete, 2001.
- [12] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu,“Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”, 25639 sayılı Resmi Gazete, 2004.