

TOPRAKLAMA AĞLARININ ÜÇ BOYUTLU TASARIMI

Fikri Barış UZUNLAR

baris.uzunlar@tr.schneider-electric.com

Özcan KALENDERLİ

ozcan@elk.itu.edu.tr

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET

Bu çalışma, IEEE Std 80-2000, IEEE Std 81-1983 ve IEEE Std 837-2002 standartlarına uyumlu topraklama sistemlerinin tasarımı ve analizi için bir bilgisayar modeli ve gelişmiş metodoloji sunmaktadır. Metodoloji ve bilgisayar programı gerçek sistem ölçümleri ile doğrulanmıştır. Bilgisayar algoritmasının doğruluğu topraklama modelinin ve fiziksel düzenin gerçek saha koşullarına ne kadar iyi yansıtıldığına bağlıdır. İzin verilen gerilim sınırları ve en yüksek tahmini gerilim değerleri standartta verilen deneysel formül kullanılarak hesaplanmıştır. Adım, dokunma, ağ gerilimleri ve yüksek gerilimli akım taşıyan bölgeler standartta verilen tavsiyelere göre hesaplanmış ve aralarındaki farklılıklar incelenip açıklanmıştır. Mühendislik uygulamaları için yararlı bazı pratik tasarım ölçütlerinin tanıtılması olanağının gerçekleştirilmesi amacıyla benzetimler yapılmıştır. Kolay kullanım üstünlüğü ve yerleşik tehlikeli nokta değerlendirme olanağıyla her şekildeki mevcut ağların güçlendirilmesi ve yeni ağların tasarımının en uygun hale getirilmesinde mühendislere yardım etmek için tesis topraklama ağ tasarımı ve analiz modülü özellikle tasarlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Topraklama ağı, Dokunma Gerilimi, Adım Gerilimi, Ağ Gerilimi.

1. GİRİŞ

Topraklama ağları, toprak içine gömülmüş, toprak yüzeyine paralel olarak yerleştirilmiş, ağ oluşturacak şekilde birbirine birleştirilmiş iletkenlerden oluşan, geniş bir alanı kaplayan bir topraklayıcı türüdür. Enerji sistemlerinde, transformatör merkezlerinde ve potansiyel farklarının küçük olması istenen geniş yapılarda ve yerlerde, topraklama direncini, adım ve temas gerilimini küçük tutmak ve düzgün potansiyel dağılımı sağlamak amacı ile kullanılırlar. Topraklama ağlarının bu amaçlara uygun ve ekonomik tasarımı ve analizi, bir mühendislik problemi oluşturmaktadır.

Topraklama ağlarının tasarım hesapları, genellikle deneyime, görgüye dayalı (ampirik) formüller kullanılarak yapılmaktadır. Bu hesaplar, üç boyutlu incelemede, toprak ve topraklayıcı koşullarını tanımlamada ve gerçeğe uygun çözümler elde etmede yetersiz kalmakta, zor ve zaman alıcı olmaktadır.

Bir topraklama ağının tasarımında ağ boyutları ve biçimi, göz sayısı, gömülme derinliği, toprağın özellikleri gibi birçok parametrenin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunu gerçek bir topraklama ağı üzerinde deney yaparak gerçekleştirmek hem zor hem de zaman alıcı ve pahalı bir yoldur. Bunun kolay, kısa ve ekonomik yolu, örneğin, ölçekli küçük modeller üzerinde deney yapmak veya sayısal yöntemlerle bilgisayarda gerçeğe uygun modeller üzerinde hesap yapmaktır. Bu nedenle son yıllarda topraklama ağlarının tasarım ve analizinin bilgisayarla yapılması gözdedir. Bunun için de topraklama sistemlerinin tasarımında gerçeğe uygun, daha doğru sonuçlar veren bilgisayar algoritmalarına gerek duyulmaktadır. Bu amaçla yöntem ve yazılım geliştirme çalışmaları yapılmakta, paket programlar üretilmektedir.

Bu çalışmada da, ilkesi sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir topraklama ağı tasarım programı yardımıyla yapılan üç boyutlu ağ tasarımı, açıklamalı ve uygulamalı olarak sunulmuştur.

2. AMAÇ VE HEDEFLER

Bu çalışmadaki temel amaçlar:

- Topraklama sistemi tasarımcılarının en verimli tasarıma odaklanabilmeleri için gerekli ilkeleri içeren uygun bir referans sağlamak,
- Dokunma ve adım gerilimlerini izin verilen güvenlik sınırları içerisinde tutmak ve topraklama direncini küçültmek,
- IEEE Std 80-2000 [1], IEEE Std 81-1983 [2] ve IEEE Std 837-2002 [3] standartlarına uygun bir topraklama tesisi tasarlamak,
- Arıza durumlarında elektrik şokuna maruz kalma olasılığı bulunan personelin güvenliğini sağlamak,
- Topraklama sisteminde kullanılması gereken ağ iletkenlerinin özelliklerini belirlemek,
- Tesis alanı, topraklama kazıklarının sayısı, ağ iletkeninin kesiti ve iletkenin gömülme derinliği gibi etkenlerin tesisin topraklama direncinin hesaplanmasında etkisini gözlemlemek,
- Toprak gerilim yükselmesini (GPR) hesaplamak,
- İzin verilen en yüksek dokunma ve adım gerilimlerini hesaplamak,
- Herhangi bir yön boyunca yüzey gerilim dağılımını toprak gerilimi yükselmesinin bir oranı olarak görüntülemek,
- Tüm tasarım ayrıntılarını içeren bir rapor sunmaktır.

3. TOPRAKLAMA AĞI TASARIM YAZILIMI

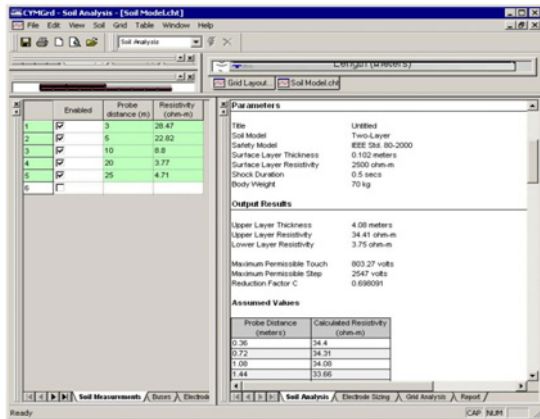
Topraklama sistemlerinin modellenmesinde kullanılan bilgisayar algoritmalarında aşağıdaki özellikler aranır:

- Topraklama iletkeni ve topraklama kazıklarının ayrı birer eleman olarak modellenebilmesi,
- Her ayrı elemanın bir denklem kümesi olarak tanımlanabilmesi,
- Toprağa akan toprak arıza akımının hesaplanması,
- İstenen herhangi bir noktada, yüzey potansiyelinin hesaplanması istenir.

Topraklama tasarımının gerçekleştirilmesinde ilk olarak proje ve çalışma tanımlanmalıdır. İkinci olarak, kullanılacak toprak modeli kararlaştırılmalıdır. Bu aşamada IEEE Std 80-2000'de tanımlanmış, belirli bir yüzey ve durum için izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimini içeren güvenlik değerlendirmesi hesabı yapılır. Üçüncü aşamada ise, bir elektrik tesisinde meydana gelebilecek en kötü arıza parametreleri hesaba katılarak iletkenlerin ve kazık gibi elektrotların boyutları kararlaştırılmaktadır. Bir sonraki aşamada, elektrik tesisinin koordinatları, iletkenin gömülme derinliği ve fiziksel boyutları gibi sahanın geometrik boyut ve biçim bilgileri girilmektedir. Son olarak, tesis tasarımının istenilen güvenlik ölçütlerini karşılayıp karşılamadığı doğrulanmaktadır. Potansiyel dağılımı çizimi, dokunma ve adım gerilimlerinin aşılmadığını doğrulamak üzere oluşturulmalıdır. Güvenlik ölçütleri sağlanmadığında, ağ tasarımının yeniden gözden geçirilmesi gerekir. Kabul edilebilir sonuçlar elde edilene kadar yöntem üçüncü aşamadan tekrarlanır. Bu çalışmada kullanılan yazılım aşağıdaki üç ana modülden oluşmaktadır:

A. Toprak Analiz Modülü

Bu modülde benzetimi yapılacak sahanın topraklama tasarımı için gerekli, aşağıdaki parametreler yer almaktadır (Şekil 1):



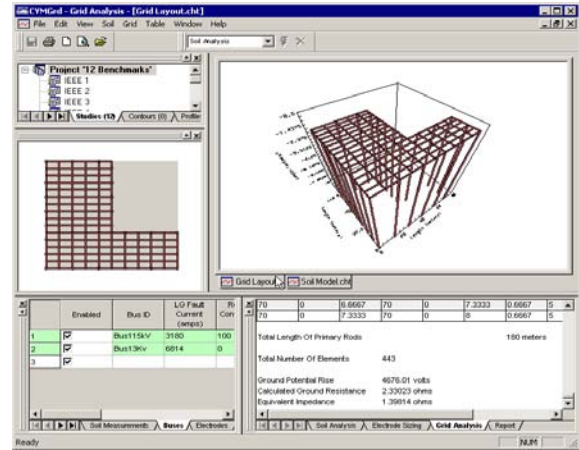
Şekil 1. Toprak analiz modülü

- 1) Toprak modeli (bir tabakalı veya çok tabakalı),
- 2) Üst tabaka kalınlığı (m),
- 3) Üst tabaka öz direnci (ohm.m),
- 4) Alt tabaka kalınlığı (m),
- 5) Alt tabaka öz direnci (ohm.m),
- 6) Arıza süresi (s),
- 7) Vücut ağırlığı (kg).

B. Topraklama Ağı Analiz Modülü

Sahanın elektriksel karakteristiklerinin ve kullanılacak ağ iletkenlerinin özelliklerinin bulunduğu modüldür (Şekil 2). Bu modülden aşağıdaki bilgiler girilir:

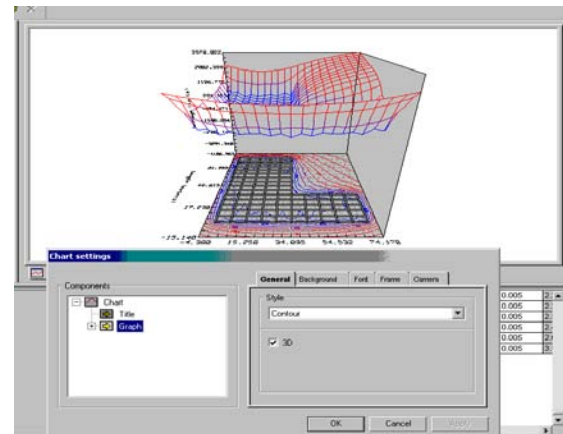
- 1) Tesis işletme gerilimi (V),
- 2) Toprak arıza akımı (A),
- 3) Topraklama kazık ve iletkenin adet ve uzunlukları,
- 4) Toprak gerilim yükselmesi (GPR) (V),
- 5) Hesaplanan toprak direnci (ohm),
- 6) Eşdeğer empedans (ohm).



Şekil 2. Topraklama ağı analiz modülü

C. Üç Boyutlu Potansiyel Dağılımı Modülü

Bu modülde de, sonlu elemanlar yöntemiyle benzetim sonucu bulunan potansiyel dağılımı üç boyutlu olarak gözlenebilmektedir (Şekil 3).

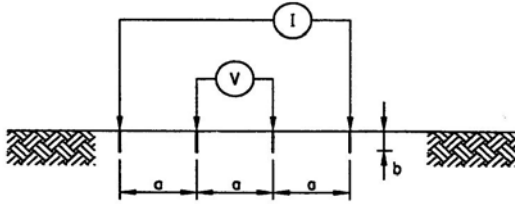


Şekil 3. Üç boyutlu potansiyel dağılımı modülü

4. TOPRAKLAMA AĞI TASARIM YÖNTEMİ

Pratikteki toprak modellerine ulaşabilmek için yıllardır birçok grafiksel ve analitik yaklaşımlar önerilmiştir [4-8, 10]. Değişik toprak öz dirençli katmanlardan oluşan çok tabakalı toprakların daha yaygın olmasından dolayı, topraklama direnci ölçüm teknikleri çok katmanlı toprak modeline göre kullanılmaktadır.

Tesis topraklamasının pratik yaklaşımında yıllardır, sonsuz derinlik ve farklı dirençte alt katman ile sonlu derinlikte üst katmandan oluşan iki tabakalı model kullanılmıştır. Yazılım [9] her kazık çiftinin arasındaki mesafenin (a) eşit olduğu Wenner dört kazıklı toprak öz direnci ölçüm tekniğini desteklemektedir (Şekil 4). Bu yöntemle göre, dıştaki elektrotlardan, değeri ampermetre ile ölçülen I akımı uygulanırken, içteki elektrotlar arasında, uygulanan akımın toprağın direncinde yarattığı V gerilimi voltmetreyle ölçülür ve direnci bulmak için ohm yasası uygulanır ($R = V / I$).



Şekil 4. Wenner dört kazık yöntemi

Ölçülen V ve I değerlerine, topraklama kazığının boyuna (b) ve kazıklar arası uzaklığa (a) göre toprak öz direnci (ρ) aşağıdaki bağıntıyla bulunur:

$$\rho = \frac{4\pi a(V/I)}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right]} \quad (1)$$

Eğer $a \gg b$ ise (1) bağıntısından

$$\rho = 2\pi a(V/I) \quad (2)$$

yazılır. İzin verilen en yüksek dokunma ve adım gerilimleri IEEE Std 80-2000 standardına uygun olarak hesaplanır. Hesaplamanın amacı, yüksek dirençli yüzey katmanını kullanılıp böylece izin verilen dokunma gerilimini de yüksek tutmaktır. Hesaplarda kullanılan yüzey tabakasının azaltma katsayısı (C_s) aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot (1 - \rho/\rho_s)}{2h_s + 0,09} \quad (3)$$

Vücut ağırlığının 50 kg olması durumunda, sırasıyla, dokunma ve adım gerilimleri:

$$E_{dokunma50} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (4)$$

$$E_{adım50} = (1000 + 6,0 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (5)$$

Vücut ağırlığının 70 kg olması durumundaki dokunma ve adım gerilimleri:

$$E_{dokunma70} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (6)$$

$$E_{adım70} = (1000 + 6,0 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (7)$$

Yukarıdaki bağıntılarda kullanılan parametrelerden:

- t_s saniye olarak şok süresini,
- ρ_s ohm-metre olarak toprağın yüzey kısmındaki malzemenin öz direncini,
- C_s yüksek dirençli yüzey malzemesi kullanımına ve yansıma faktörü (K) ile üst katmanın kalınlığına (h) bağlı azaltma katsayısını,
- h_s yüksek dirençli yüzey malzemesinin kalınlığını,
- ρ yüksek dirençli yüzey malzemesinin altındaki toprağın öz direncini

ifade etmektedir.

5. BENZETİMLER

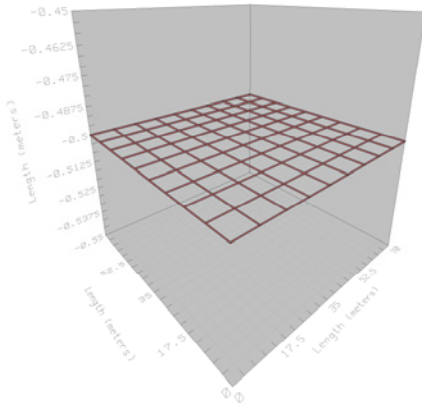
Bu çalışmada elde edilen sonuçların doğrulanması adına IEEE Std 80-2000 standardının Ek B kısmında verilmiş olan örnekler referans alınmış ve karşılaştırmalı tablolar ile ilgili grafikler kullanılmıştır. Tasarım bilgileri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Ağ tasarımında kullanılan tasarım bilgileri

Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Çakıl taşının öz direnci	2500 $\Omega \cdot m$
Çakıl taşı tabakasının kalınlığı	0,102 m
Arıza açma süresi	0,50 s
Toprak öz direnci	400 $\Omega \cdot m$
En yüksek arıza akımı I_G , X/R oranı	6814 A, 16,2
Arıza akımı I_G	3180 A
Ayrılma katsayısı S_f	0,6
İletkenin malzemesi	Sert çekilmiş bakır
Ortam sıcaklığı	40°C
Ağ iletkeninin çapı	0,01 m
Ağın gömülme derinliği	0,5 m

D. Topraklama kazıkları olmayan kare ağ

Şekil 5'te topraklama kazıkları olmayan, 70 m x 70 m boyutlarında, 9 x 9 gözden oluşan kare bir ağın üç boyutlu çizimi görülmektedir. Tablo 2'de hem IEEE Std 80-2000 ile hem de bu çalışmada kullanılan yazılım ile elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla bir arada verilmiştir.

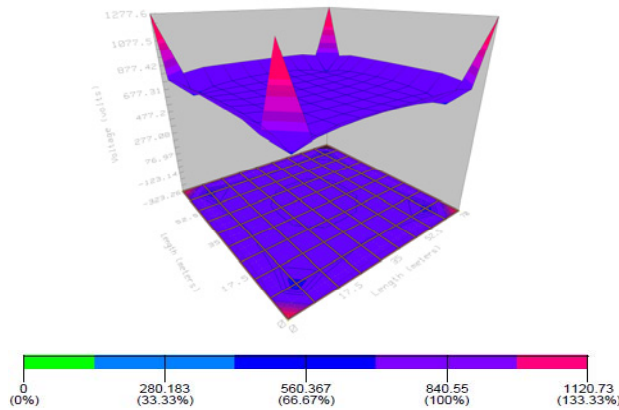


Şekil 5. Topraklama kazıkları olmayan kare ağ

Tablo 2: Topraklama kazıkları olmayan kare ağ için karşılaştırmalı sonuçlar tablosu

Özellik	IEEE Std 80-2000	Yazılım
İzin verilen en yüksek dokunma gerilimi (V)	838,20	840,55
İzin verilen en yüksek adım gerilimi (V)	2686	2696,10
Azaltma katsayısı C_S	0,740	0,740
R_G (Ω)	2,780	2,675
GPR (V)	5304,00	5105,61

Kazıksız, kare ağ için elde edilen Şekil 6'daki potansiyel dağılımından, topraklama sisteminin köşelerinde dokunma geriliminin maksimum değerinin aşıldığını gözlemlemek mümkündür.

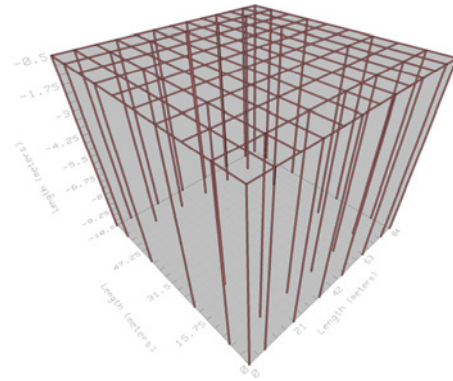


Şekil 6. Topraklama kazıkları olmayan kare ağ için en yüksek ve gerçek dokunma gerilimleri

E. Topraklama kazıklı dikdörtgen ağ

Şekil 7'de topraklama kazıklı, 63 m x 84 m boyutlarında, 9 x 12 gözden oluşan dikdörtgen bir ağın üç boyutlu çizimi görülmektedir.

Şekil 7'deki ağ için her iki yöntemle de elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

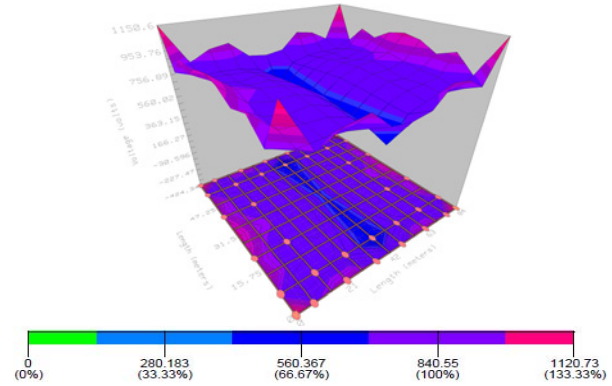


Şekil 7. Topraklama kazıklı dikdörtgen ağ

Tablo 3: Topraklama kazıklı dikdörtgen ağ için karşılaştırmalı sonuçlar tablosu

Özellik	IEEE Std 80-2000	Yazılım
İzin verilen en yüksek dokunma gerilimi (V)	838,20	840,55
İzin verilen en yüksek adım gerilimi (V)	2686	2696,10
Azaltma katsayısı C_S	0,740	0,740
R_G (Ω)	2,620	2,278
GPR (V)	4998,96	4348,00

Şekil 7'deki ağ için, kullanılan yazılım ile elde edilen potansiyel dağılımı, Şekil 8'de gösterilmiştir. Yine köşelerde potansiyel artışı gözlemlenmektedir.



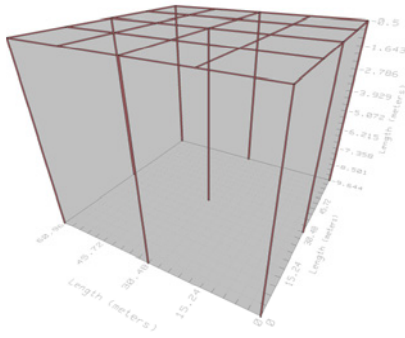
Şekil 8. Topraklama kazıklı dikdörtgen ağ için en yüksek ve gerçek dokunma gerilimleri

F. Eşit aralıklarla yerleştirilmiş topraklama kazıklı ve iki tabakalı ağ

Pratikte birçok uygulamada kullanılan iki tabakalı topraklama sistemlerinin benzetimlerini örneklemek amacıyla, IEEE Std 80 standardının B.5 örneğinde, Tablo 4'deki bilgilerle, Şekil 9'da gösterilen 60,96 m x 60,96 m boyutlarında, 4 x 4 göznlü benzetim yapılmaktadır. Şekil 9'daki ağ için her iki yöntemle de elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4: İki tabakalı ağ tasarımında kullanılan bilgiler

Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Çakıl taşının öz direnci	2500 Ω .m
Çakıl tabakasının kalınlığı	0,1 m
Üst tabakanın öz direnci	300 Ω .m
Üst tabakanın kalınlığı	4,572 m
Alt tabakanın öz direnci	100 Ω .m
Ağ iletkeninin çapı	0,01 m
Ağın gömülme derinliği	0,5 m
Kazıkların uzunluğu	9,144 m
Kazık çapı	0,0127 m
Arıza açma süresi	0,50 s
Toprak öz direnci	400 Ω .m
Arıza akımı I_G	1908 A



Şekil 9. Eşit aralıklarla yerleştirilmiş topraklama kazıklı ve iki tabakalı ağ

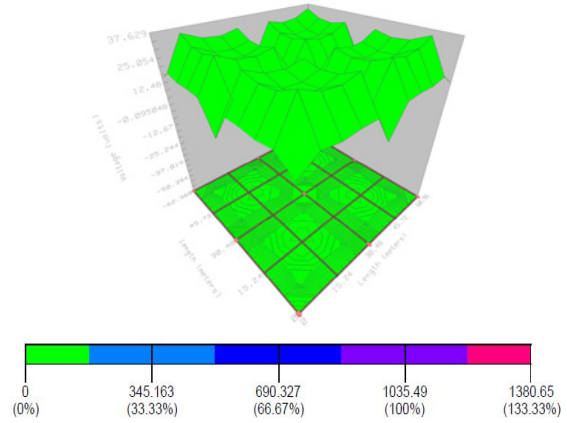
Tablo 5: Eşit aralıklarla yerleştirilmiş topraklama kazıklı ve iki tabakalı ağ için karşılaştırma tablosu

Özellik	IEEE Std 80-2000	Yazılım
İzin verilen en yüksek dokunma gerilimi (V)	838,20	840,55
İzin verilen en yüksek adım gerilimi (V)	2686	2696,10
Azaltma katsayısı C_s	0,740	0,740
R_G (Ω)	2,740	2,330
GPR (V)	4562,49	5227,92

Bu durumdan da gözlenebileceği üzere, topraklama direnci düşük olarak elde edildikçe sonuçlar arasındaki fark neredeyse önemsizdir. Şekil 9'daki ağ için, kullanılan yazılım ile elde edilen potansiyel dağılımı, Şekil 10'daki gibi gözlemlenmektedir.

6.SONUÇ

Bilgisayar benzetimine dayalı analiz teknikleri henüz pahalı olmakla birlikte bunların kullanımının ucuz ve güvenli topraklama şebekesi düzenlenmesine yol açacağı açıktır. Yapılan parametrik analizlerin çok tabakalı toprak koşullarını da içerecek biçimde yenilenmesi gerekmektedir. Topraklama şebekesini düzenleyen standartlar arasında uyumlulaştırmaya ihtiyaç vardır.



Şekil 10. Topraklama kazıklı dikdörtgen ağ için en yüksek ve gerçek dokunma gerilimleri

KAYNAKLAR

- [1] IEEE Std. 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Standard Board, New York, USA, 2000.
- [2] IEEE Std. 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Standard Board, New York, USA, 1983.
- [3] IEEE Std. 837, IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding, IEEE Standard Board, New York, USA, 2002.
- [4] C. H. Lee, A. P. S. Meliopoulos, "Comparison of touch and step voltages between IEEE Std. 80 and IEC 479-1", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 6, pp. 593–601, 1999.
- [5] H. Zhao, H. Griffiths, A. Haddad, A. Ainsley, "Safety-limit curves for earthing system designs: appraisal of standard recommendations", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 6, pp. 871–879, 2005.
- [6] M. H. Hocaoglu, A. T. Hocaoglu, "Yüksek gerilim tesisleri topraklama standartlarının karşılaştırılması", Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, Gaziantep, s. 395-398, 1999.
- [7] L. M. Coa, "Comparative study between IEEE Std. 80-2000 and finite elements method application for grounding systems analysis", Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America, pp. 1-5, 2006.
- [8] J. Ma, F. P. Dawalibi, R. D. Southey, "Effects of the changes in IEEE Std. 80 on the design and analysis of power system grounding", PowerCon International Conference, Vol. 2, 974-979, 2002.
- [9] CYMGRD, User Guide and Reference Manual, Canada, 2006.
- [10] S. Meliopoulos, Power System Grounding and Transients, Marcel Dekker, New York, 1998.