

BİR ÇUBUK TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMINA TOPRAK ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİ

Okan İhsan ÖZTÜRK¹

Özcan KALENDERLİ²

¹Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş.-Kartal, İstanbul

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü – 34469, Maslak, İstanbul

¹e-posta: okan.ozturk@turkcell.com.tr ²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Topraklama, Potansiyel Dağılımı, Adım Gerilimi, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ÖZET

Topraklayıcıların çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının bilinmesi canlılar açısından tehlikeli olabilecek adım ve dokunma gerilimlerinin genliklerinin bilinmesi bakımından önemlidir. Bu nedenle potansiyel dağılımına, topraklayıcının içinde bulunduğu toprağın özdirencinin veya iletkenliğinin değişiminin etkisinin de bilinmesi gereklidir. Bu çalışmada, bu durumları incelemek amacıyla, farklı bir yaklaşım ve yöntem kullanılarak yapılan, farklı bağıl dielektrik sabitli ve seri tabakalı toprağa gömülü çubuk topraklayıcı çevresinde sonlu elemanlar yöntemi ile potansiyel dağılımı hesapları sunulmuştur. Hesaplar, topraklayıcı çevresindeki toprak yapısı için toprak özdirenç değerleri yerine karşılığı olan dielektrik sabitleri göz önüne alınarak yapılmış ve toprağın kuru veya nemli olması durumundaki potansiyel dağılımları bulunmuştur. Hesap sonuçları, toprağın özdirencinin azalması, iletkenliğinin yani toprağının neminin artması ve buna bağlı olarak dielektrik sabitinin büyümesi durumunda, topraklayıcı çevresindeki potansiyelin yükselmesine ancak potansiyel farklarının ise azalmasına neden olduğunu göstermiştir.

1. GİRİŞ

Topraklamanın amacı, bir elektrik aygıtında veya tesisinde meydana gelen bir arıza sonucu akan arıza akımlarını güvenli bir şekilde toprağa akıtmak ve çevresindeki varlıkları tehlikeli adım ve dokunma gerilimlerinden korumaktır.

Genel olarak bir topraklama tesisatı, topraklanacak yapıyı toprağa bağlayan bir topraklama iletkeni ile, toprak içine yerleştirilmiş bir topraklayıcıdan oluşur. Bir topraklayıcıdan herhangi nedenle bir akım geçmesi durumunda, topraklayıcı ile potansiyelin sıfır olarak kabul edildiği referans toprak arasında bir potansiyel dağılımı oluşur. Potansiyel dağılımı, topraklayıcı çevresindeki adım ve dokunma gerilimlerinin büyüklüğünü ve değişimini göstermesi bakımından önemlidir.

Bu potansiyel dağılımına dolayısıyla adım ve dokunma gerilimlerine topraklayıcının malzemesi, şekli, boyutları, gömülme derinliği ve gömüldüğü toprağın özellikleri etki eder. Topraklayıcının gömüldüğü toprağın iletkenliği veya özdirenci, toprağın türüne, mevsim ve doğa koşullarına bağlı olarak değişir. Toprağın iletkenliğinin değişmesi durumunda topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı da değişir [1-3].

Bir topraklama tesisinin akıma karşı toplam direnci, topraklama iletkeninin direnci ile topraklayıcının yayılma direncinin toplamından oluşur. Literatürde, gerek alçak gerilim gerekse yüksek gerilim tesislerinde topraklama direncinin ve potansiyel dağılımının belirlenmesine yönelik pekçok çalışma bulunmaktadır [6-8]. Bunların bazısında, toprak özdirenci ile bu özdirenç değerlerine karşılık gelen dielektrik sabitleri de verilmektedir. Bu tür bir bilgi Çizelge 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada, Çizelge 1 göz önünde bulundurularak bir çubuk topraklayıcı çevresindeki toprağın özelliklerinin (özdirencinin, iletkenliğinin veya dielektrik sabitinin) değişmesi durumunda adım gerilimindeki değişimi göstermek amacıyla sonlu elemanlar yöntemiyle potansiyel dağılımının bulunması ve sonuçları açıklanmıştır.

Çizelge 1: Toprak özdirenç değerleri ve karşılığı bağıl dielektrik sabitleri [5].

Toprak Özdirenci ρ ($\Omega.m$)	1800	1000	700	100	38
Bağıl Dielektrik Sabitleri, ϵ_r	3	9	15	36	40

Çubuk topraklayıcılar, genellikle 20-25 mm çapında metal borudan veya buna eşdeğer profil malzemeden veya dolu iletken yapılmış ve zemine dik olarak çakılan topraklayıcılardır. Çubuk topraklayıcının uzunluğu genellikle 2-5 m arasında değişir ve üst ucu genellikle 50 cm kadar toprak altında kalır. Sunulan

çalışmadaki hesaplamalarda farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcıların çevresindeki toprak yapısı için doğa ve mevsimsel hava değişimlerine bağlı olarak olabilecek değişik toprak durumları göz önünde bulundurulmuştur. Çubuk topraklayıcı, farklı türden özelliklere sahip tabakalardan oluşmuş toprak içinde bulunabilir ya da mevsime göre özellikle yazın üst bölümü kurumuş alt kısmı nemli kalmış ya da yağışlı mevsimlerde üst bölümü alt bölümlerine göre daha nemli olan toprak içinde bulunabilir. Bu gibi durumlar için topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımından söz edilirken gerçeğe uygun olarak problemin modellenmesi ve incelenmesi gerekir. Bu çalışmada, bu durumlar modellenmiş ve incelemeler bu modeller üzerinden yapılmıştır.

Toprak su emdikçe iletkenliği artar, direnci azalır ve artan su oranı ile birlikte dielektrik sabiti büyür. Buna karşılık toprak kurudukça iletkenliği azalır, direnci artar ve dielektrik sabiti küçülür. Bütün bu bilgilerin yanında sayısal olarak topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını sonlu elemanlar yöntemi ile statik elektrik alan ve potansiyel hesabından yararlanarak bulurken toprak özelliği olarak öz direnç yerine dielektrik sabitini kullanmak gerekir. Bu aşamada Çizelge 1'den yararlanılabilir. Aşağıda önce kullanılan yöntem tanımlanmış sonra da geliştirilen modeller ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. SEY elektrik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi ilkesine dayanır. Bölge içindeki alan Laplace veya Poisson tipinde bir elektrik alan olabilir. SEY ile çözümlemede bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir.

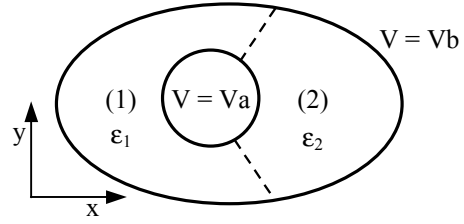
Şekil 1'de iki boyutlu, sınırlardaki potansiyel değerleri (V_a ve V_b) verilmiş bir A bölgesi gösterilmiştir. Bölge kesikli çizgi ile (1) ve (2) alt bölgelerine ayrılmıştır. Alt bölgelerin ara kesitinde serbest yüklerin bulunmadığı ve koşulların bilindiği varsayılır. Bölge içindeki toplam enerji

$$W = z \iint \left\{ \frac{1}{2} \left[\epsilon_x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \epsilon_y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada z sabittir. Buradan yazılacak $\omega = W/z$ bağıntısı z uzunluğu başına enerji yoğunluğunu gösterir. ϵ_x ve ϵ_y elektrik alanın yönüne bağlı olarak değer alan dielektrik katsayılarıdır.

Enerji bağıntısından yararlanarak enerjiyi minimum yapan potansiyel değerlerini bulabilmek için öncelikle bir $V(x,y)$ potansiyel yaklaşım işlevinin tanımlanmış

olması gerekir. Tanımlanacak bu potansiyel işlevinin bölge içinde sürekli olduğu ve sonlu sayıda türevi bulunacağı göz önünde tutulur.



Şekil 1. İki boyutlu bölge

Bir çözüm bölgesi içinde sınır koşullarını sağlayan birden fazla potansiyel işlevi elde etmek olasıdır, ancak bunlardan bir tanesi

$$\nabla^2 V = \Delta V = 0 \quad (2)$$

Laplace denklemini sağlar ve bu işlev tektir. Laplace denklemini sağlayan bu çözüm aynı zamanda bölge içindeki potansiyel enerjiyi minimum yapan çözümdür. Bunun tersi de söylenebilir, yani, bölge içinde enerjiyi minimum yapan potansiyel çözümdür, Laplace denklemini sağlayan potansiyel çözümdür.

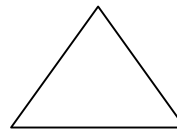
Minimum enerji koşulunu sağlayan potansiyel işlevi

Laplace denklemini sağlayan potansiyel işlevi

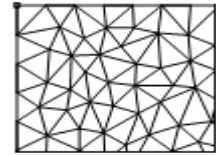
Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde Laplace denklemini çözmek yerine, enerji denklemini minimum yapan bir potansiyel çözümünü bulmak yoluna gidilir.

Herhangi bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü temel olarak dört adımda gerçekleştirilir:

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması (Şekil 2),
- Herbir eleman için temel denklemlerin yazılması,
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi,
- Elde edilen denklemler sisteminin çözümü [4].



Üçgen sonlu eleman



Sonlu elemanlar

Şekil 2. Sonlu elemanların gösterilmesi

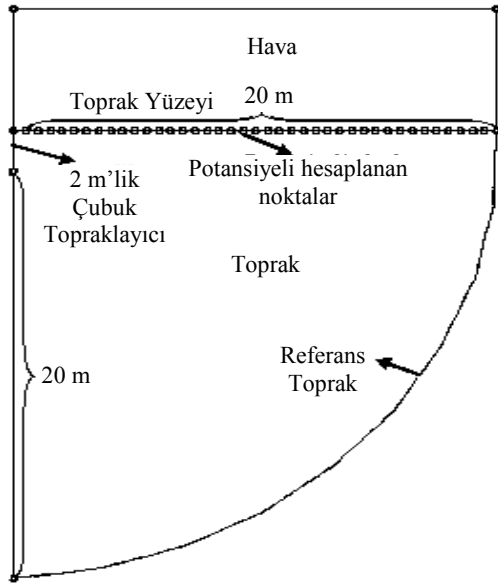
3. ÇUBUK TOPRAKLAYICI VE SONLU ELEMANLAR MODELİ

Özdirençleri (dielektrik sabitleri) farklı olan toprak içine gömülmüş bir çubuk topraklayıcı çevresindeki

potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla model olarak 2 m ve 5 m uzunluklarındaki çubuk topraklayıcılar göz önüne alınmıştır. Her bir modelde sınır potansiyel değerleri, çubuk topraklayıcı üzerinde 100 volt ve referans toprak kavramına uygun olarak topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her noktada da 0 volt olarak alınmıştır.

3.1 Farklı Özellikli Topraklar İçinde Çubuk Topraklayıcı

2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla oluşturulan model Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması için kurulan model

Bu modelde 2 m uzunluğundaki topraklayıcının toprağın bağıl dielektrik sabitinin sırasıyla 3, 9, 15, 36, 40 olması durumunda yani toprağın iletkenliğinin artması buna bağlı olarak direncinin düşmesi durumunda çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplamalar ilkesi sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM 4.0 programı yardımıyla yapılmıştır. Toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla, toprak yüzeyinde topraklayıcıdan başlayarak birer metre aralıklarla potansiyel değerleri hesaplanmıştır.

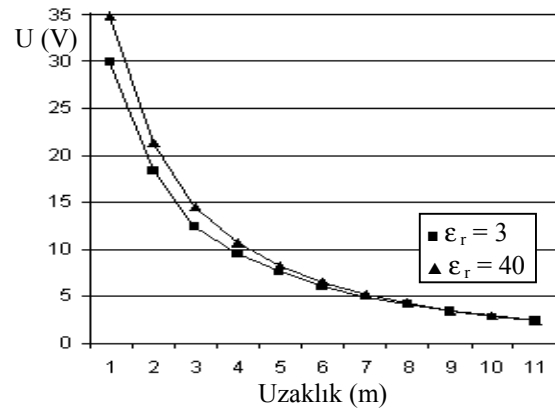
Şekil 3'teki çubuk topraklayıcı ile referans toprak arasındaki bölge üçgen sonlu elemanlara bölünür ve her bir eleman için temel denklemler yazıldıktan sonra, çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi ve elde edilen denklem sisteminin çözülmesiyle çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı elde edilmiş olur. Buna göre 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 3, 9, 15, 36 ve 40 olan toprak içinde olması durumunda Şekil 3'e benzeyen ayrı ayrı modeller kurulmuş olup, toprak

yüzeyinde topraklayıcıdan 10 m uzaklığa kadar hesaplanan potansiyel değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2: Farklı özellikteki topraklar içinde çubuk topraklayıcı için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Topraklama elektrodundan uzaklık (m)	Toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri (V)				
	Bağıl dielektrik sabiti				
	3	9	15	36	40
0	100	100	100	100	100
1	29,927	33,280	34,067	34,793	34,846
2	18,287	20,286	20,754	21,187	21,196
3	12,353	13,959	14,244	14,506	14,525
4	9,500	10,302	10,484	10,650	10,662
5	7,608	7,949	8,056	8,1718	8,179
6	5,968	6,313	6,387	6,452	6,457
7	4,893	5,112	5,157	5,195	5,198
8	4,062	4,192	4,215	4,235	4,236
9	3,399	3,464	3,473	3,480	3,486
10	2,855	2,872	2,876	2,878	2,879
11	2,401	2,401	2,402	2,403	2,406

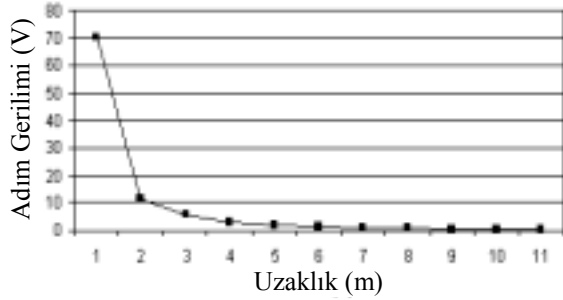
Çizelge 2'den görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri azalmakta aynı zamanda aralarında 1 m uzaklık bulunan iki nokta arasındaki potansiyel farkları bir başka deyişle adım gerilimi değerleri de azalmaktadır. Toprağın dielektrik sabitin büyümesi, iletkenliğinin artması durumunda yüzeydeki potansiyel değerleri artmakta buna karşılık potansiyel farkları azalmaktadır. Adım gerilimi olarak adlandırılan gerilim aralarında 1 m açıklık bulunan iki nokta arasındaki potansiyel farkı olduğuna göre toprak dielektrik sabitinin artması özellikle topraklayıcıdan 10-11 m kadar uzaklıkta potansiyel farklarının azalmasına neden olmaktadır. 11 m'den sonra potansiyel değerleri ve buna bağlı olarak da potansiyel farklarındaki değişim çok küçük olduğu için Çizelge 2'de bu değerler verilmemiştir. Şekil 4'te toprağın bağıl dielektrik sabiti 3 ve 40 olması durumunda toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları verilmiştir.



Şekil 4. Farklı dielektrik sabitli toprak içindeki çubuk topraklayıcı için bulunan potansiyel dağılımları

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel azalmakta, toprağın dielektrik sabitinin artması durumunda toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri artmaktadır.

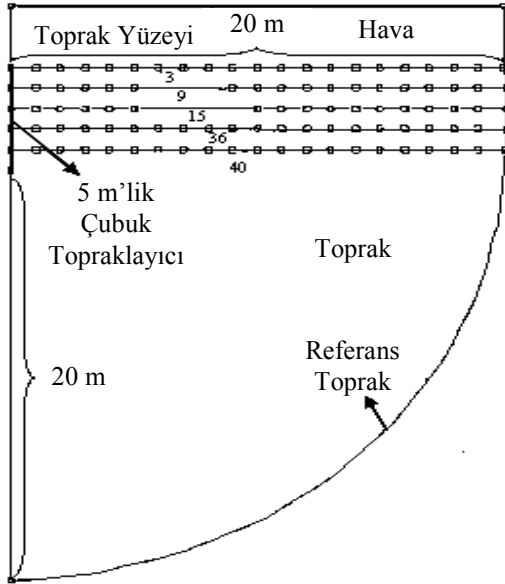
Şekil 5'de 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 3 olan toprak içinde olması durumunda çevresindeki adım gerilimi değişimi verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi topraklayıcı yakınında adım gerilimi değeri oldukça büyük fakat topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değer hızlı bir şekilde azalmaktadır.



Şekil 5. Çubuk topraklayıcı çevresinde uzaklıkla adım gerilimindeki değişim

3.2 Seri Tabakalı Toprak İçindeki Çubuk Topraklayıcı

Topraklayıcıların gömülmüş oldukları toprak yapısı, farklı iletkenliğe sahip, toprak yüzeyine paralel seri tabakalı yapıda olabilir. Bu durumda topraklayıcının davranışının bilinmesi gerekir. Bu amaçla 5 m'lik bir



Şekil 6. Birer metre kalınlığında seri tabakalardan oluşan toprak içindeki bir çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması için oluşturulan model

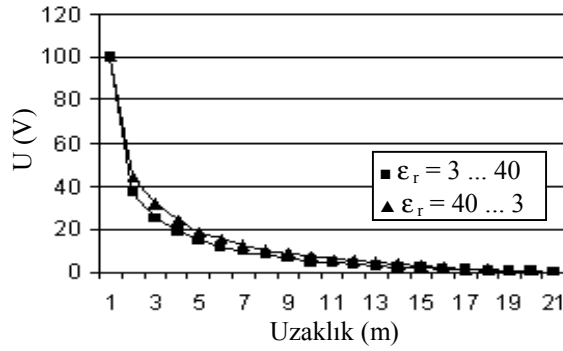
çubuk topraklayıcının her 1 metresinin farklı iletkenliğe sahip olan, toprak yüzeyine paralel seri tabakalı bir toprak yapısı içinde olması durumunda ve bu durumdaki yüzey potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla Şekil 6'daki model kurulmuştur. Bu modelde toprak yüzeyinden toprak içine doğru bağıl dielektrik sabitinin küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olması durumu yani toprağın üst taraftan aşağıya doğru neminin artması, iletkenliğinin artması ve öz direncinin azalması durumu göz önüne alınmış, yine bağıl dielektrik sabitinin üst taraftan aşağıya doğru büyükten küçüğe doğru azalması durumunda da toprak yüzeydeki potansiyel değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 3'te 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı ile referans toprak arasındaki toprak yüzeyindeki 1 m aralıklı noktalarda SEY ile hesaplanan potansiyel değerleri verilmiştir.

Çizelge 3: Tabakalı toprak içindeki çubuk topraklayıcı için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

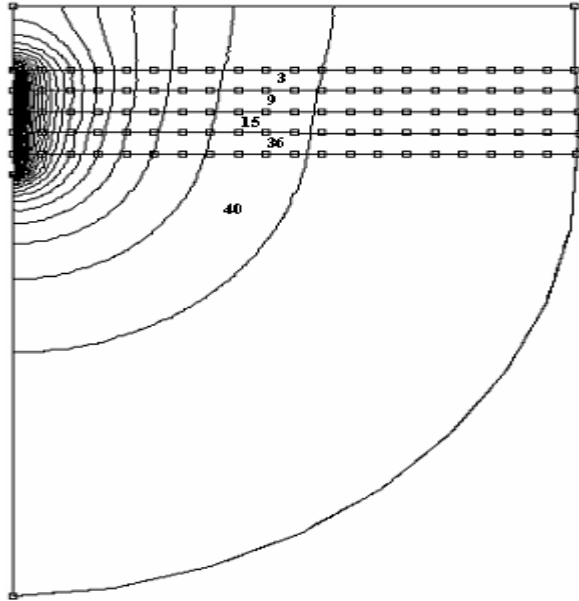
Topraklayıcıdan uzaklık (m)	Toprak yüzeyindeki potansiyel değeri (V)	
	Bağıl dielektrik sabiti: 3...40	Bağıl dielektrik sabiti: 40...3
0	100	100
1	36,6063	44,4258
2	25,3284	31,5226
3	18,94	24,0556
4	14,7274	18,6618
5	11,723	15,4342
6	9,46987	12,69
7	7,74095	10,556
8	6,37665	8,84025
9	4,47951	7,43087
10	4,38279	6,24999
11	3,64053	5,2458
12	3,0151	4,37392
13	2,43846	3,61345
14	2,03121	2,94024
15	1,60043	2,33891
16	1,28725	1,79541
17	0,972717	1,29987
18	0,6796	0,844372
19	0,386869	0,417781
20	0	0

Şekil 7'den görülebileceği gibi toprak tabakalarının dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olması durumunda elde edilen potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızlı bir şekilde parabolik olarak azalmakta, toprak tabakalarının dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9, 3 olması durumunda ise potansiyel değerleri yine topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmakla birlikte, toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri toprak dielektrik sabitinin küçükten büyüğe doğru artması durumunda elde edilen değerlerden daha yüksektir.



Şekil 7. Farklı bağıl dielektrik sabitli seri tabakalı toprak içindeki çubuk topraklayıcı için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları

Çubuk topraklayıcının farklı bağıl dielektrik sabitli toprak içinde olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımı, Şekil 8'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Eşpotansiyel çizgilerin topraklayıcı yakınında birbirlerine çok daha yakın, topraklayıcıdan uzaklaştıkça ise birbirlerinden uzaklaşması topraklayıcı yakınında potansiyelin yüksek uzaklaştıkça azaldığının bir göstergesidir. Üst tabakadan alt tabakaya geçiş sırasında eşpotansiyel çizgilerinin seyrinde küçüğe olsa değişiklik meydana gelmektedir.



Şekil 8. Seri tabakalı toprak içinde bulunan bir çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı

4. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı dielektrik sabitli ve yapıdaki toprak içine gömülü olan farklı uzunluktaki çubuk topraklayıcılar çevresinde oluşan potansiyel dağılımının ve adım geriliminin hesabı farklı bir yaklaşım olarak SEY kullanılarak yapılmıştır.

Çözümlerde ilkesi SEY'e göre hesap yapan FEMM bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Çubuk topraklayıcının farklı dielektrik sabitli toprak içinde gömülmüş olması durumunda, toprağın iletkenliğinin artması, öz direncinin azalması durumunda, toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerinin artmasına rağmen potansiyel farkları bir başka deyişle canlılar için tehlikeli olan adım geriliminin düşmesine neden olmaktadır. Farklı dielektrik sabitli seri tabakalı toprak içinde, toprak dielektrik sabitinin üstteki tabakadan başlayarak aşağıya doğru azalması durumunda toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri, dielektrik sabitinin üst tabakadan alt tabakaya doğru artması durumunda elde edilen değerlerden daha büyük olmaktadır. Toprak yüzeyinden referans toprağa doğru gidildikçe potansiyel dağılımı parabolik olarak azalmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Kaşıkçı İ., Elektrik Tesislerinde Topraklama Yönetmeliği Uygulama Kitabı, İstanbul, 2002.
- [2] Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, TMMOB, Elektrik Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, Bursa, 2001.
- [3] Bayram, M., Elektrik Tesislerinde Topraklama, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [4] Kalenderli Ö., Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notları, İ.T.Ü., 1997.
- [5] Öztürk, O. İ., Kalenderli, Ö., "Bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımına toprağın dielektrik özelliklerinin etkisinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi", Eleco 2004 Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 2004.
- [6] Cardoso, J. S., "FEM modelling of grounding systems with unbounded approach", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 5, pp. 2893-2896, 1994.
- [7] Lorentzou, M. I., Hatzigrygiou, N. D., "Effective dimensioning of extended grounding systems for lightning protection", XXIVth International Conference on Lightning Protection, Greece, 2000.
- [8] Bogensperger, J. H., Frei, J., Pack, S., "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behaviour", IXth International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, 1995.
- [9] Meeker, D., FEMM 4.0 Finite Element Method Magnetics Software, 2004.