

BİR ŞERİT TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMINA TOPRAĞIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

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, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ÖZET

Topraklayıcıların davranışı, mevsimsel ve yerel toprak iletkenliğinin değişmesinden etkilenir. Bu çalışmada, bu durumları incelemek amacıyla, farklı bir yaklaşım ve yöntem kullanarak yapılan, seri ve paralel tabakalı toprağa gömülü bir şerit topraklayıcı çevresinde sonlu elemanlar yöntemi ile potansiyel dağılımı hesapları sunulmuştur. Her bir durum, toprak öz direncine karşı gelen dielektrik sabitleri göz önüne alınarak modellenmiş ve toprağın kuruması veya nemlenmesi ile ilintili olarak potansiyel dağılımları bulunmuştur. Sonuçlar, toprağın neminin, iletkenliğinin artmasının ve buna bağlı olarak dielektrik sabitinin büyümesinin topraklayıcı çevresindeki potansiyelin yüksek olmasına yol açtığını ancak potansiyel farklarının küçük ve değişimlerinin yavaş olduğunu göstermiştir.

1. GİRİŞ

Elektrikli aygıtlarda veya elektrik tesislerinde meydana gelen bir yalıtım hatası, aygıtların ve tesislerin tehlikeli gerilim altında kalmasına neden olur. Dokunma gerilimi veya adım gerilimi adı verilen bu gibi tehlikeli gerilimler, gerek işletme çalışanları için gerekse söz konusu elektrik tesislerine herhangi bir şekilde dokunan veya yakınında bulunan kişiler için yaşamsal tehlikelere yol açarlar. İşletme çalışanlarını ve elektrik tesisleri dışındaki kişileri, dokunma ve adım gerilimine karşı korumak için topraklama yapılır.

Bir topraklama sistemi, basit olarak topraklama iletkeni, topraklayıcı ve toprak olmak üzere üç temel unsurdan oluşur. Toprak, elektriksel potansiyelin her noktada sıfır olduğu yüzünün madde veya yer olarak ifadesi olup, topraklayıcı ise topraklanması istenen makinenin, aygıtın veya tesisin toprak ile iletken bir bağlantı sağlamasına yarayan tesis elemanıdır.

Bir elektrikli işletmede meydana gelebilecek atlama, kısa devre, yıldırım gibi olumsuz koşullar sonucunda oluşan akımlar, topraklama iletkeninden önce

topraklayıcıya ve oradan da toprağa akarlar. Bu sırada akımın genliğine ve karşılaştığı dirence bağlı olarak topraklayıcı çevresinde bir potansiyel dağılımı meydana gelir. Akıma karşı topraklama tesisinin toplam direnci, toprak geçiş direnci, topraklama iletkeninin direnci, topraklayıcı yayılma direnci ve toprak zemininin dirençlerinin toplamından oluşur. Topraklayıcının yayılma direnci yanında diğer direnç değerleri ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan topraklama direnci olarak sadece topraklayıcının yayılma direnci alınabilir. Topraklayıcı yayılma direnci ise topraklayıcının cinsine, şekline, boyutlarına, toprağın öz direncine bağlıdır [1-3]. Bu nedenle çeşitli topraklayıcıların (çubuk, şerit, küre) farklı öz dirence sahip toprak yapısı (bataklık, killi, nemli, taşlı, kuru kum vs.) içinde bulunması durumunda, çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımın bulunması, söz konusu tehlikeli gerilimlerin büyüklüklerinin ve değişimlerinin bilinmesi bakımından önem taşımaktadır.

Literatürde, gerek topraklama direncinin gerekse potansiyel dağılımının belirlenmesine yönelik deneysel, analitik ve sayısal bir çok çalışma bulunmaktadır [4-8]. Bu çalışmaların bazısında, çalışılan toprak öz direnci ile birlikte buna karşı gelen dielektrik sabitleri de verilmektedir. Literatürden bu bilgiler toplanarak Çizelge 1'de bir araya getirilmiştir.

Çizelge 1: Toprak öz dirençleri ve karşı gelen bağlı dielektrik sabitleri.

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

Sunulan bu çalışmada da Çizelge 1'den yararlanarak bir şerit topraklayıcının sonlu elemanlar yöntemi ile potansiyel dağılımları hesaplanmıştır. Hesaplarda topraklayıcı çevresindeki toprak yapısı için, mevsimsel hava değişimlerine, doğa ve konum

durumlarına bağlı olarak olabilecek değişik toprak durumları göz önüne alınmıştır. Örneğin yazın sıcağın toprağın üst tabakaları kurumaya başlarken alt bölümler daha nemli kalır veya yağışlı mevsimlerde toprağın üst bölümleri alt bölümlerden daha nemli olur veya topraklayıcı çevresinde iletkenlik bakımından değişik iletkenlikli topraklar bulunabilir veya konulabilir veya topraklayıcı böyle bir toprak içine yerleştirilmek durumunda kalınabilir. Bu tür durumlarda topraklayıcının davranışını bilebilmek için gerçeğe uygun olarak problemi modellemek ve incelemek gerekir. Bu çalışmada, bu durumlar modellenmeye çalışılmış ve incelemeler bu modeller üzerinden yapılmıştır.

Toprak ve su, dielektrik sabitleri farklı malzemelerdir. Toprak ile suyun bir arada bulunduğu yani nemli toprak veya çamur gibi farklı su içeren topraklar, karma malzeme gibi davranırlar. Karma malzemenin dielektrik sabiti, bir arada bulunan malzemelerin (toprağın ve suyun) dielektrik sabitlerine ve hacimsel oranlarına bağlıdır. Toprak su emdikçe iletkenliği artar, direnci azalır ve artan su oranı ile dielektrik sabiti büyür. Buna karşılık toprak kurudukça iletkenliği azalır, direnci artar ve azalan su oranı ile 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 malzeme (toprak) özelliği olarak öz direnç yerine dielektrik sabitini kullanmak gerekir. Bu aşamada Çizelge 1'deki verilerden yararlanılabilir. Aşağıda önce kullanılan yöntem tanımlanmış sonra da geliştirilen modeller ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

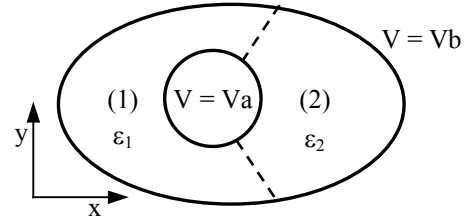
2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), elektrik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi (minimumlaştırılması) ilkesine dayanır [9-11]. Bölge içindeki alan Laplace veya Poisson tipinde bir elektrik alan olabilir. SEY'de de diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğü, sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunur.

Şekil 1'de iki boyutlu, sınırlardaki potansiyel değerleri (V_a ve V_b) verilmiş (Dirichlet tipi) 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.



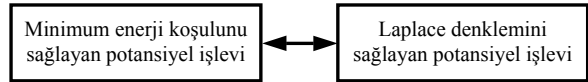
Şekil 1: İki boyutlu bölge.

Enerji bağıntısından yararlanarak enerjiyi minimum yapan potansiyel değerlerini bulabilmek için öncelikle katsayıları henüz bilinmeyen ve basit işlevlerin toplamından oluşmuş 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 tutulmalıdır.

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 çözümlü, Laplace denklemini sağlayan potansiyel çözümdür.



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:

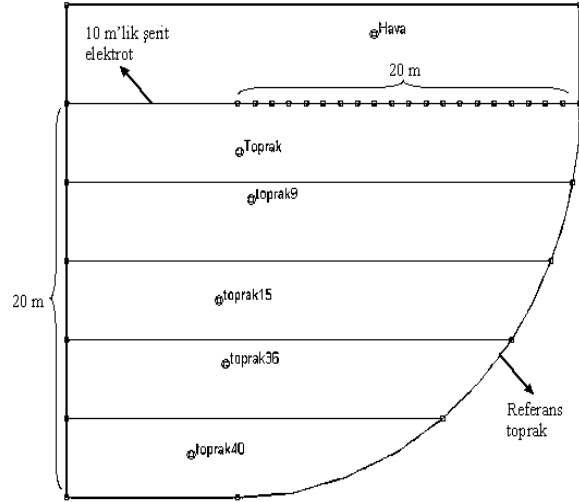
- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması
- Herbir eleman için temel denklemlerin yazılması
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi
- Elde edilen denklem sisteminin çözümü [4].

3. ŞERİT TOPRAKLAYICI VE SONLU ELEMANLAR MODELİ

Dielektrik sabiti değişken bir toprak içine gömülmüş bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla model olarak 10 m uzunluğunda bir şerit topraklayıcı göz önüne alınmıştır. Şerit topraklayıcının kesiti ihmal edilmiştir. Şerit topraklayıcıya uygulanan gerilimin hesaplamaya kolaylığı bakımından 100 Volt olduğu ve referans toprak kavramına uygun olarak şerit topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her noktada potansiyel değerinin 0 Volt olduğu varsayılmıştır.

3.1 Seri Tabakalı Toprak İçinde Şerit Topraklayıcı

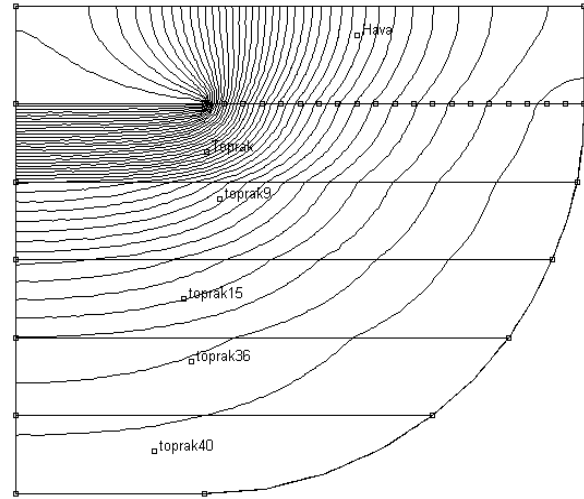
10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının birbirine seri farklı dielektrik sabitine sahip toprak yapısı içinde olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla oluşturulan model Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Seri tabakalı toprak içindeki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla oluşturulan model.

Bu modelde topraklayıcının, herbiri farklı dielektrik sabitli, 4 m kalınlığında, yer yüzeyine paralel, seri, 5 tabakalı toprak yapısı içinde olması durumu göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla önce, bağıl dielektrik sabiti değerleri, en üsteki toprak tabakasından başlayarak, üstü kuru aşağıya doğru daha nemli toprak durumunu göz önüne almak için, küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olacak biçimde alınmıştır. Sonrasında ise bağıl dielektrik sabitleri, üstü yaş alta doğru kuru toprak durumunu göz önüne almak için, büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9, ve 3 olarak alınmıştır. Hesaplar, ilkesi sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM 4.0 programı yardımıyla yapılmıştır. Toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla potansiyeli bilinmeyen aralarında belirli uzaklık bulunan düğüm noktalarının potansiyelleri, potansiyelleri bilinen düğüm noktaları, yani topraklayıcıya uygulanan 100 Volt ve referans toprak olarak kabul edilen potansiyel değeri 0 Volt olan noktalar yardımıyla bulunmuştur.

Şekil 2'de verilen modelde şerit topraklayıcı ile referans topraktan oluşan çözüm bölgesi üçgen sonlu elemanlara ayrılır ve herbir eleman için temel denklemler yazıldıktan sonra, çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi ve elde edilen denklem sisteminin çözülmesiyle şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılım değerleri elde edilmiş olur. Buna göre şerit topraklayıcı çevresinde SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri Şekil 3'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3: Seri tabakalı toprak içinde bulunan bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı.

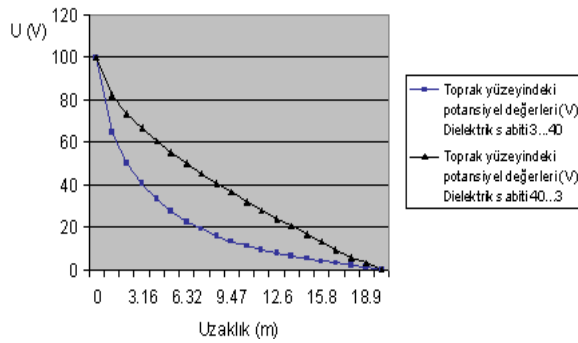
Şekil 3'ten görüldüğü gibi eşpotansiyel çizgileri, topraklayıcı yakınında birbirlerine yaklaşmakta, topraklayıcıdan uzaklaştıkça ise birbirinden uzaklaşmaktadır. Bu durum topraklayıcıya yakın yerlerde potansiyel değerlerinin yüksek, uzaklaştıkça azalmakta olduğunun bir göstergesidir. Toprağın dielektrik sabitinin değişmesi eşpotansiyel çizgilerinin de seyrini değişmesine bir çeşit dalgalanmasına neden olmaktadır.

Toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımının bilinmesi özellikle canlıları ilgilendiren adım geriliminin saptanması açısından önemlidir. Buna göre 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı ile referans toprak arasında toprak yüzeyindeki bazı noktalarda hesaplanan potansiyel değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2: Seri toprak içindeki şerit elektrot için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.

Toprak yüzeyinde topraklayıcıdan olan uzaklık (m)	Toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri (V)	
	Bağıl dielektrik sabiti: 3 ... 40	Bağıl dielektrik sabiti: 40 ... 3
0.00	100	100
1.05	65.0	82.3
2.11	50.3	73.5
3.16	40.5	66.7
4.21	33.1	60.7
5.26	27.5	55.3
6.32	22.9	50.3
7.37	19.2	45.5
8.42	16.1	40.9
9.47	13.5	36.5
10.5	11.3	32.3
11.3	9.41	28.2
12.6	7.80	24.2
13.7	6.40	20.4
14.7	5.10	16.7
15.8	4.10	13.1
16.8	3.10	9.60
17.9	2.20	6.31
18.9	1.27	3.11
20.0	0.00	0.00

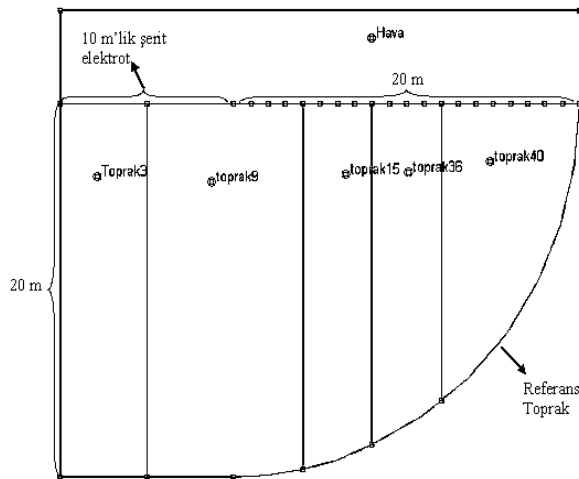
Şekil 4'ten görülebileceği gibi toprak tabakalarının dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olması durumunda elde edilen potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızlı bir şekilde parabolik olarak azalmakta, toprak tabakalarının dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9, 3 olması durumunda ise potansiyel değerleri yine topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmakta ancak bu azalmanın doğrusal bir azalmaya daha yakın olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak iki ayak arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlanan adım gerilimi değerlerinin de topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmakta olduğu görülür.



Şekil 4: Seri toprak içindeki şerit elektrot için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları.

3.2 Paralel Tabakalı Toprak İçindeki Şerit Topraklayıcı

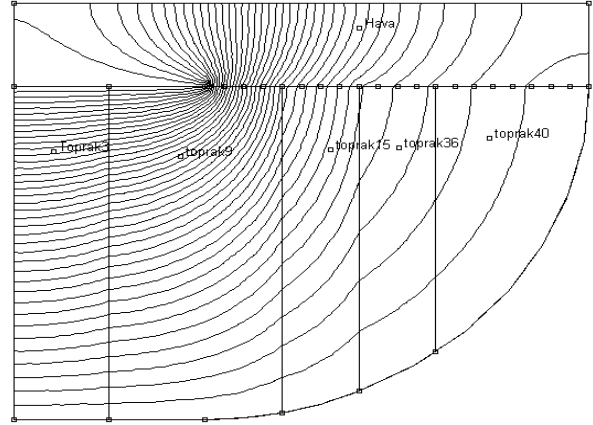
10 m uzunluğundaki şerit elektrotun farklı dielektrik sabitli, yer yüzeyine dik, paralel, tabakalı toprak yapısı içinde gömülü olması durumundaki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla Şekil 5'te verilen model oluşturulmuştur.



Şekil 5: Paralel tabakalı toprak içindeki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla oluşturulan model.

Şerit topraklayıcının uzunluğunun yarısından itibaren toprak yapısının yani dielektrik sabitinin değiştiği düşünülmüştür. Bu amaçla öncelikli olarak dielektrik

sabiti değeri en soldaki toprak tabakasından başlayarak küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olacak biçimde beş tabakalı toprak içinde, sonrasında ise büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9, ve 3 olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. Paralel tabakalı toprak içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri, SEY ile Şekil 6'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



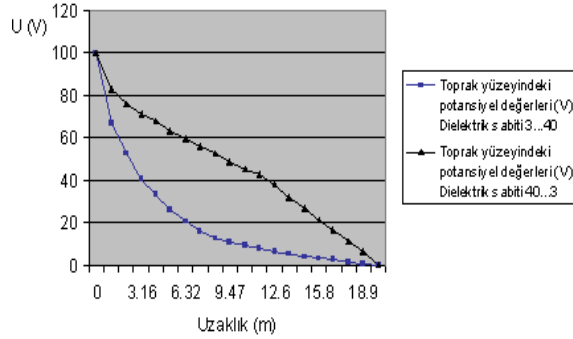
Şekil 6: Paralel tabakalı toprak içinde bulunan bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı.

Şekil 6'dan görüldüğü gibi şerit topraklayıcı yakınında eşpotansiyel çizgileri birbirlerine daha yakın ancak topraklayıcıdan uzaklaştıkça birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Aynı zamanda paralel tabakalı toprak yapısında eşpotansiyel çizgileri seri tabakalı toprak yapısına göre topraklayıcı yakınında birbirlerinden daha uzaktırlar.

Çizelge 3: Paralel toprak içindeki şerit elektrot için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.

Toprak yüzeyinde topraklayıcıdan olan uzaklık (m)	Toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri (V)	
	Bağıl dielektrik sabiti: 3 ... 40	Bağıl dielektrik sabiti: 40 ... 3
0.00	100	100
1.05	67.0	82.98
2.11	52.5	75.97
3.16	40.8	71.57
4.21	33.35	68.1
5.26	25.72	63.1
6.32	20.67	59.13
7.37	15.9	55.8
8.42	12.4	52.4
9.47	10.7	48.7
10.5	9.17	45.4
11.3	7.70	42.6
12.6	6.40	37.8
13.7	5.30	32.04
14.7	4.30	26.57
15.8	3.30	21.37
16.8	2.40	16.35
17.9	1.50	11.4
18.9	0.77	6.4
20.0	0.00	0.00

Çizelge 3'ten de görülebileceği gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır, buna bağlı olarak adım gerilimi değerleri de azalmaktadır. Bu durum dielektrik sabitlerinin değişimine göre Şekil 7'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 7: Paralel toprak içindeki şerit elektrot için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı dielektrik sabitli ve yapıdaki toprak içine gömülü olan bir şerit topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımının hesabı, farklı bir yaklaşım olarak SEY ile yapılmıştır. Çözümlerde SEY'e göre hesaplamalar yapan FEMM bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Topraklayıcının farklı dielektrik sabitli seri ve paralel tabakalı toprak içinde olması durumunda SEY modelleri kurulmuş ve topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının değişimi incelenmiştir. Yapılan hesaplamaların sonuçları incelendiğinde topraklayıcıdan uzaklaştıkça, potansiyel dağılımı azalmakta ve bu potansiyel dağılımı üzerinde, seri ve paralel toprak tabakaları içinde topraklayıcı yakınındaki toprağın dielektrik sabitinin büyükten küçüğe doğru azalması durumunda yaklaşık olarak doğrusal bir azalmaya, dielektrik sabitinin küçükten büyüğe doğru artması durumunda ise parabolik bir azalmaya neden olmaktadır.

Çeşitli topraklayıcılar (çubuk, küre vs.) içinde benzer şekilde modeller kurularak çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımı hesapları SEY kullanılarak kolaylıkla yapılabilir ve canlılar için önemli olan adım ve dokunma gerilimlerinin büyüklüğü ve değişimi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bayram, M., Elektrik Tesislerinde Topraklama, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [2] Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, Bursa, 2001.
- [3] Kaşıkçı, İ., Elektrik Tesislerinde Topraklama Yönetmeliği Uygulama Kitabı, İstanbul, 2002.
- [4] Gonos, I. F., Kontargyri, V. T., Topalis, F. V., Stathopoulos, I. A., "Transient behaviour of a horizontal electrode under impulse current", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, 2003.
- [5] Chen, G., Pilling, N., Osman, M., "Effect of high resistive barrier on earthing system", XIIIth Int. Symp. on High Voltage Engineering, Rotterdam, Netherlands, 2003.
- [6] Meliopoulos, A. P. S., Xia, F., Joy, E. B., Cokkinides, G. J., "An advanced computer model for grounding system analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, 8, 13-23, 1993.
- [7] Dawalabi, F., Mukhedkar, D., "Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 94, pp. 252-270, 1975.
- [8] Cardoso, J. S., "FEM Modelling of grounding systems with unbounded approach", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 5, pp. 2893-2896, 1994.
- [9] Kalenderli, Ö., Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları, İ.T.Ü., 1997.
- [10] Meeker, D., FEMM 4.0 Finite Element Method Magnetics Software, 17 June 2004.
- [10] Zhou, P. B., Numerical Analysis of Electro-magnetic Fields, Springer-Verlag, Berlin, 1993.