

BİR ÇUBUK TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDE POTANSİYEL DAĞILIMININ SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE HESABI

Özcan KALENDERLİ¹ Ersan ŞENTÜRK² Okan İhsan ÖZTÜRK³

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

^{2,3}Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş.

¹e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

²e-posta: ersan.senturk@turkcell.com.tr

³e-posta: okan.ozturk@turkcell.com.tr

Anahtar sözcükler: Elektriksel Topraklama, Potansiyel Dağılımı, Sonlu Farklar Yöntemi

ÖZET

Bu çalışmada, elektriksel topraklamada yaygın olarak kullanılan topraklayıcı türlerinden biri olan çubuk topraklayıcıların işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı sunulmuştur. Problemin sayısal hesabı, silindriksel koordinatlarda, iki boyutlu sonlu farklar yöntemi ile geliştirilen bir bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma, canlıların can güvenliği bakımından önemli olan adım ve dokunma gerilimlerinin boyutunu ve değişimini vermekte ve elektriksel topraklayıcılar çevresinde potansiyel dağılımı hesapları için farklı bir yaklaşım seçeneği sunmaktadır.

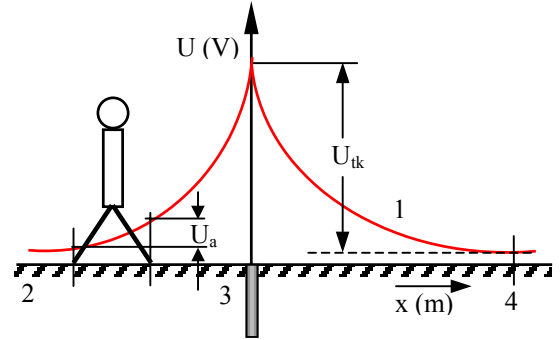
1. GİRİŞ

Elektriksel topraklama, başta insanlar olmak üzere, canlıları, elektrik devrelerini, elemanlarını ve kullandığımız nesnelere tehlikeli gerilimlerden korumada ve elektriksel sistemlerin işletilmesi için gereken toprak potansiyelini sağlamada kullanılan bir elektrik tesisidir. Basitçe bir topraklama tesisi, topraklanacak yerin toprakla bağlantısını sağlayan topraklama iletkenlerinden ve toprağa gömülen topraklayıcı adı verilen iletkenlerden oluşur. Koruma görevini arıza koşullarında oluşan akımları, çevresi için tehlikeli gerilimler oluşturmadan güvenli bir şekilde toprağa akıtarak yerine getirir.

Bir topraklama tesisi üzerinde ve çevresinde oluşacak gerilim değeri, topraklama tesisini oluşturan, malzemenin türüne, boyutlarına, topraklayıcının gömülme ortamına ve koşullarına yakından bağlıdır. Atlama, delinme, dokunma, bağlanma gibi olaylar sonucu devrede veya elemanlarda meydana gelen kısa devrelerde veya yıldırım gibi elektriksel boşalmanın etkisinde topraklama tesisinden yüksek değerlerde akımlar geçer. Bu akımlarla topraklama tesisi ve bağlı olduğu yapılarda ortaya çıkacak gerilim düzeyi, topraklama direncine veya genel anlamda topraklama empedansına bağlıdır. Topraklama direnci ise toprağın ve topraklayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu basit gibi görünen bağlılık zinciri pekçok araştırmaya konu olmuştur [1 - 4]. Topraklayıcının geometrisine (çubuk,

levha, şerit, boru,...), boyutlarına, gömülme derinliğine, toprağın öz direncine gibi birçok büyüklüğe bağlı olarak topraklama direncinin belirlenmesi, topraklama konusunda kuramsal ve deneysel çalışmaların ilgi odağı olmuştur [1 - 6].

Literatürde, yönetmelik ve standartlarda topraklama direncini hesaplamak için amprik, analitik ve sayısal birçok formül ve yöntem, verilmekte; topraklama direncini ölçerek belirlemek için birçok ölçme yöntemi açıklanmaktadır [7, 8]. Sonuçta belli bir direnç değerine sahip bir topraklayıcıdan bir akım geçtiğinde, topraklayıcıda referans toprağa göre bir gerilim oluşur ve topraklayıcı ile referans toprak arasında bir potansiyel dağılımı ortaya çıkar (Şekil 1). Burada sözü edilen referans toprak kavramı, topraklayıcı çevresinde oluşan bir potansiyel dağılımında potansiyelin teorik olarak sıfır kabul edildiği toprak bölümüdür. Uygulamada bir topraklayıcıdan yaklaşık 20 m uzaklıktaki toprak bölümü referans toprak olarak kabul edilir.



Şekil 1. Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı.

U (V): Gerilim eksenini	1. Potansiyel dağılımı
x (m): Uzaklık eksenini	2. Toprak
U _{tk} : Topraklayıcı gerilimi	3. Topraklayıcı
U _a : Adım gerilimi	4. Referans toprak

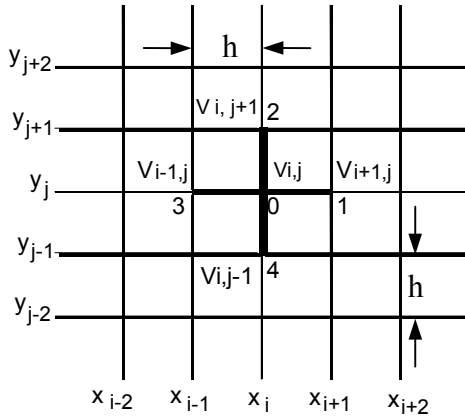
Bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı, dokunma ve adım gerilimlerinin büyüklüğünü belirler. Dokunulan yer ile ondan 1 m uzaklıktaki nokta arasındaki potansiyel farkı, dokunma gerilimi olarak; 1 m uzunluğundaki bir adımda iki ayak arasındaki potansiyel farkı da adım gerilimi olarak adlandırılır.

Her iki gerilimin de tehlikeli olmayacak sınırlarda olması gerekir. Bu gerilimler hakkında birşey söyleyebilmek için potansiyel dağılımını bilmek gerekir. Uygulamada bu bilgiyi elde etmek için değişik formüller kullanılmaktadır [7 - 8].

Bu çalışmada, uygulamada yaygın olarak kullanılan topraklayıcı türlerinden biri olan bir çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı, sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmıştır.

2. SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Sonlu farklar yöntemi (SFY), potansiyel dağılımı hesaplarında da kullanılan bir sayısal yöntemdir [9]. İlkesi, potansiyel dağılımı Laplace veya Poisson denklemiyle verilmiş kapalı bir bölgede sayısal çözümlemedeki sayısal türev konusundan bilinen türevler için sonlu fark denklemlerini kullanarak potansiyel dağılımını hesaplamaya dayanır. Bunun için örneğin iki boyutlu problemlerde, inceleme bölgesi kare, dikdörtgen veya üçgen gözleri olan bir ağı bölünür (Şekil 2).



Şekil 3. Kartezyen koordinatlarda, iki boyutlu, kare gözlü sonlu farklar yöntemi ağı örneği.

Ağın düğüm noktalarında Laplace veya Poisson denklemleri yerine sonlu fark denklemleri yazılır. Böylelikle bilinen ve bilinmeyen düğüm potansiyellerini içeren bir lineer denklem takımı elde edilir. Bu denklemlerde, sınır koşulları veya bilinen düğüm potansiyelleri kullanılarak lineer denklem takımı çözülür ve bilinmeyen düğüm potansiyelleri bulunur.

Bu çalışmada kare gözlere sahip bir ağ yapısı kullanılmıştır. İncelenen problemin geometrisine uygun olarak sonlu fark denklemleri silindrisel koordinatlarda yazılmıştır. Silindrisel koordinatlarda iki boyutlu Laplace denklemi;

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

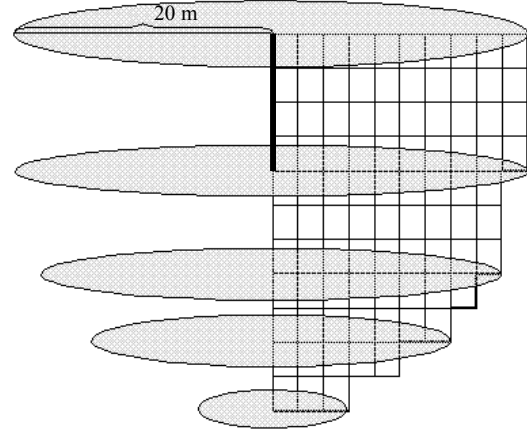
dir. Burada, r ve z silindrisel koordinatlar, $V = V(r, z)$ potansiyeldir. (1) denkleminin sonlu farklar ifadesi,

$$V_{i,j+1} + V_{i,j-1} + \left(1 + \frac{h}{2r}\right)V_{i+1,j} + \left(1 - \frac{h}{2r}\right)V_{i-1,j} - 4V_{i,j} = 0 \quad (2)$$

olacaktır [9]. Ağın potansiyeli bilinmeyen her düğümü için yazılan bu denklemlerde, h ağın göz genişliği veya adım büyüklüğü, r ise denklemin yazıldığı düğümün koordinatıdır.

3. ÇUBUK TOPRAKLAYICI ve SONLU FARKLAR MODELİ

Bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak amacıyla model olarak 16 mm çapında 2 m boyunda bir çubuk topraklayıcı göz önüne alınmıştır. Referans toprak kavramına uygun olarak bu topraklayıcıdan 20 m uzakta bulunan her noktada potansiyel değerinin sıfır volt olduğu kabul edilmiştir. Bu şekilde düşünülerek oluşturulmuş olan model Şekil 3'te gösterilmiştir. Her bir kare gözün kenarı $h = 2$ metre alınmıştır. Bu şekilde problemin incelendiği çözüm bölgesi, 90 kare göz ve 112 düğümünden meydana gelmiştir.



Şekil 3. Çubuk topraklayıcı SFY modeli.

Şekil 3'te gösterilen ve Şekil 4'te düğüm numaraları verilen modelin kare gözlere bölünmüş olan kesiminde yer alan düğümlerden 1, 12, 23, 34, 35, 45, 55, 56, 65, 74, 83, 84, 91, 92, 93, 94, 98, 99, 100, 101 ve 112 numaralı düğümlerdeki potansiyel değerleri; bu düğümlerin herbirinin 11 ve 102 düğümleri arasına yerleştirilmiş, 2 metre boyundaki bakır çubuk elektrot topraklayıcıdan 20 metre uzakta olmasından dolayı, sıfır voltur. Potansiyel değerleri belli olan 1, 11, 12, 23, 34, 35, 45, 55, 56, 65, 74, 83, 84, 91, 92, 93, 94, 98, 99, 100, 101, 102 ve 112 numaralı düğümlerin dışındaki düğümlerin potansiyel değerleri bilinmemektedir.

Bu çalışmada potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyel değerlerinin Sonlu Farklar

Yöntemi (SFY) ile hesaplanması amaçlanmıştır. Her düğüme ilişkin sonlu farklar denklemi (2) numaralı ifadeye olduğu gibi ayrı ayrı yazılmış ve elde edilen lineer denklem takımı MATLAB 6.0 programı kullanılarak çözülerek bilinmeyen düğümlerin potansiyel değerleri bulunmuştur.

Hesaplamalarda kullanılan denklemlerin oluşturulması ve oluşturulan bu denklemlerin düzenlenmesi göz önünde bulundurularak MS EXCEL programında Visual Basic tabanlı bir program hazırlanmış ve denklemlerin düzenlenmesi sonrasında elde edilen matrisin hatasız ve kullanıma uygun olarak elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen bu denklem takımının çözümü için MATLAB 6.0 programı kullanılmıştır. Oluşturulan denklem takımında bilinmeyen düğümlerin potansiyel ifadelerinin başında bulunan katsayıların oluşturduğu katsayılar matrisi [A], potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu matris [x] ve potansiyel değerleri bilinen düğümlerin potansiyel değerlerinin oluşturduğu matris [B] olarak gösterildiğinde; bu matrisler arasında $[A] \cdot [x] = [B]$ şeklinde bir bağıntı elde edilir. Bilinmeyen düğüm sayısı 88 adet olduğu için oluşturulması gereken katsayılar matrisinin boyutu 88 x 88 olacaktır.

	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
11	22	33	44	54	64	73	82	90	97		
10	21	32	43	53	63	72	81	89	96		
9	20	31	42	52	62	71	80	88	95		
8	19	30	41	51	61	70	79	87	94		
7	18	29	40	50	60	69	78	86	93		
6	17	28	39	49	59	68	77	85	92		
5	16	27	38	48	58	67	76	84	91		
4	15	26	37	47	57	66	75	83			
3	14	25	36	46	56	65	74				
2	13	24	35	45	55						
1	12	23	34								

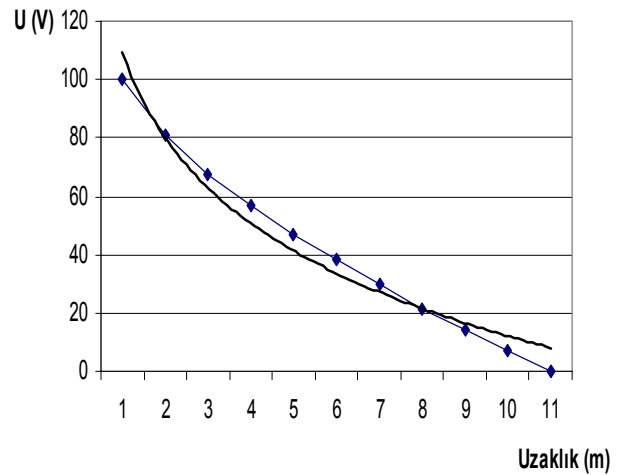
Şekil 4. Topraklama sistemi SFY çözüm ağı.

Denklem sistemi çözüldükten sonra sonlu farklar ağının düğüm noktalarında elde edilen potansiyel değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi 11 ve 102 numaralı düğümlerin potansiyelleri, çözümü yüzde (%) cinsinden değerlendirmek ve bağıl olarak diğer gerilim değerlerine geçişi normalize ederek kolaylaştırmak amacıyla 100 Volt olarak kabul edilmiştir.

100	81,0671	67,7645	56,7853	47,0328	38,0457	29,6045	21,6069	14,0187	6,8363	0
100	82,771	68,9501	57,5002	47,48	38,3541	29,8448	21,8161	14,2058	6,9696	0
79,2723	72,7284	63,734	54,5486	45,6359	37,0624	28,8178	20,8966	13,339	6,2889	0
68,0944	65,0695	58,9175	51,4519	43,513	35,4673	27,4736	19,6018	11,9199	4,7487	0
60,6368	58,7962	54,226	48,0115	40,9054	33,3571	25,6061	17,72	9,5115	0	0
54,9952	53,6233	49,8955	44,4699	37,9494	30,7839	23,2767	15,5893	7,8219	0	0
50,3966	49,2151	45,8764	40,8313	34,5894	27,5954	20,2344	12,7042	5,5226	0	0
46,4521	45,2994	41,9806	36,8693	30,4896	23,2715	15,8827	7,9407	0	0	0
42,9517	41,6615	37,8777	31,9569	24,7747	16,2924	9,3672	0	0	0	0
39,828	38,1322	32,8824	24,0289	15,2977	0	0	0	0	0	0
37,2401	34,6522	25,1043	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 5. Düğümlerin SFY ile bulunan volt cinsinden potansiyel değerleri

Elde edilen bu potansiyel değerleri ile çizilecek toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı, adım ve dokunma gerilimlerinin hesaplanması açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 6'da yapılan SFY çözümlemesi ile elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 6. Bir çubuk topraklayıcı çevresinde toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı

4. SONUÇLAR

Elektriksel topraklamada yaygın kullanılan bir topraklayıcı türü olan çubuk topraklayıcı için açıklanan ve yapılan bu hesaplardan görüldüğü gibi bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı sonlu

farklar yöntemi ile sayısal olarak kolaylıkla bulunabilir. Bilgisayarda yapılan bu hesaplarla potansiyel dağılımını hem dokunma hem de adım gerilimi bakımından, hem doğru hem hızlı bir şekilde etmek olanaklıdır.

Elde edilen hesap sonuçları incelendiğinde topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyelin ve birim uzunluk başına düşen potansiyel farkının azaldığı görülmektedir. Hesaplar farklı topraklayıcı uzunlukları için yapılarak topraklayıcı boyunun, farklı gömülme derinlikleri için yapılarak da gömülme derinliğinin etkisi görülebilir. Bunun yayılma direncini ve adım gerilimini azaltıcı etkileri olduğu bilinir. Bu yöntemle yapılan çalışmanın ayrıcalığı ise potansiyel dağılımının ve potansiyel farklarının sözü edilen büyüklüklerle değişimini elde etmek ve görmek olacaktır.

Sonuç olarak, bu şekilde farklı geometrilere, boyutlarda ve derinliklerdeki topraklayıcılar için potansiyel dağılımı hesabı ile davranışları değerlendirilebilir, güvenli ve doğru topraklama tasarımı yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bogensperger J. H., Frei J., Pack S., "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behaviour", Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, August 28-September 1, 1995.
- [2] Takahashi T., Kawase T., "Calculation of Earth Resistance for a Deep-Driven Rod in a Multi-Layer Structure", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April 1991.
- [3] Meliopoulos A. P. S., Xia F., Joy E. B., Cokkinides G. J., "An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No. 1, April 1993.
- [4] Dawalibi F., Mukhedkar D., "Influence of Ground Rods on Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.6, Nov./Dec. 1979, pp. 2089-2098.
- [5] Yıldırım, H., Kalenderli, Ö., Türkay, B., Çelikyay, M., "Topraklama ağlarının bilgisayar destekli analizi", Elektrik - Elektronik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa, s. 130-133, 11-17 Eylül 1995.
- [6] Hasse, P., Overvoltage Protection of Low Voltage Systems, IEE Power and Energy Series 33, United Kingdom, 2000,
- [7] ANSI/IEEE Std 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986.
- [8] Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, TMMOB, Elektrik Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, Bursa, 2001 (21 Ağustos 2001 tarih ve 24500 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanmıştır).
- [9] Kalenderli, Ö., Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları, İ.T.Ü., 2003.