

TOPRAK İYONLAŞMASININ TOPRAKLAMA DİRENCİNE ETKİSİ

Özcan KALENDERLİ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü – 34469, Maslak, İstanbul
e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

ÖZET

Topraklama konusunda yapılan çalışmalar, bir topraklayıcıdan toprağa akan akımın genliği yükseldikçe topraklama direncinin azaldığını göstermiştir. Bu durum, topraklayıcı çevresindeki toprağın iyonlaşması ile açıklanmaktadır. Topraklayıcı üzerindeki elektrik alan şiddeti, toprağın delinme dayanımını aştığında, toprakta iyonlaşma yani elektriksel boşalma olur. Bu durum, topraklayıcı boyutlarının iyonlaşma bölgesi sonuna kadar büyümüş olması gibi göz önüne alınır. Bunun sonucu olarak topraklayıcı direnci, topraklayıcı çevresindeki elektrik alan ve potansiyel dağılımı ve bunlara bağlı olarak adım ve dokunma gerilimleri değişir. Bu çalışmada, bir çubuk topraklayıcının çevresindeki toprağın iyonlaşması modellenerek iyonlaşmanın topraklama direncine etkisi incelenmiştir. Bunun için toprak iyonlaşmasının olması ve olmaması durumlarında, bir çubuk topraklayıcının topraklama direnci ve elektrik alan dağılımı hesabı yapılmıştır. İncelemeler, topraklayıcıdan geçen akım değeri yükseldikçe iyonlaşmanın arttığını, topraklama direncinin küçüldüğünü, potansiyel değerlerinin yükseldiğini ancak iyonlaşmasız duruma göre beklenenden küçük değerlere sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Topraklama, Çubuk topraklayıcı, Toprak iyonlaşması, Sonlu Elemanlar Yöntemi

1. GİRİŞ

Topraklama konusunda yapılan farklı deneysel ve teorik çalışmalar, bir topraklayıcıdan toprağa akan akımın genliği yükseldikçe topraklama elektrodu empedansının azaldığını göstermiştir [1-4]. Bu durum topraklayıcı çevresindeki toprağın iyonlaşması ile açıklanmaktadır [5-9]. Topraklayıcı üzerindeki elektrik alan şiddeti toprağın delinme elektrik alan şiddetini aşarsa, alan şiddetinin toprağın delinme elektrik alan şiddetinden küçük olduğu bölgeye kadar toprak iyonlaşması yani toprakta elektriksel kısmi boşalma olur. Toprak iyonlaşmasının olduğu boşalma bölgesinde toprak öz direncinin hızla azalmış ve genellikle topraklayıcı iletkeni öz direncine yaklaşık eşit olduğu kabul edilir. Bu durum, topraklayıcı boyutlarının, örneğin yarıçapının, iyonlaşma bölgesi sonuna kadar büyümüş olması gibi göz önüne alınır. Bunun sonucu olarak topraklayıcı direnci, topraklayıcı çevresindeki potansiyel ve elektrik alan dağılımı ve bunlara bağlı olarak canlılar için tehlikesi nedeniyle önemli olan adım ve dokunma gerilimleri değişir.

Bu tür toprak iyonlaşmasına, özellikle yıldırım gibi yüksek akımlı olaylara karşı korumada yararlanılan topraklama elektrotları çevresinde sıkça karşılaşılır. Bu nedenle bu konu teorik ve deneysel pek çok araştırmanın konusu olmuş, üzerinde çokça çalışma yapılmış ve yapılmakta olan bir konudur [10-13].

Teorik çalışmalarda, iletim hattı modelleri ağırlıklı olmak üzere topraklayıcı davranışına uyan devre modelleri [5-6] ve elektromanyetik alan yaklaşımına dayanan analitik [4, 13] ve sayısal modeller [7, 11] yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modellerde değişik geometriye, boyutlara ve düzenlemeye sahip topraklayıcıların, tek ve çok tabakalı, farklı öz dirençli ve dielektrik sabitli topraklarda, farklı akım, gerilim genliklerinin ve şekillerinin, farklı noktalardan uygulanmalarına göre farklı koordinat sistemlerinde, bir, iki veya üç boyutlu statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Genelde her biri az da olsa varsayımlar içeren bu çalışmalar, laboratuvar ve saha deneyleri ve ölçmelerinden edinilen bilgiler arttıkça düzeltilip geliştirilmekte, gelişen yeni yöntemlerin de uygulama alanı olmaktadır.

Bu çalışmada, bir çubuk topraklayıcının çevresindeki toprağın iyonlaşması modellenerek iyonlaşmanın topraklama direncine etkisi incelenmiştir. Bunun için toprak iyonlaşmasının olması ve olmaması durumlarında, bir çubuk topraklayıcının topraklama direnci, potansiyel ve elektrik alan dağılımı hesabı yapılmıştır.

2. TOPRAK İYONLAŞMASIZ DURUMDA TOPRAKLAMA DİRENCİ HESABI

Toprakta bir iyonlaşmaya ve elektriksel boşalmaya yol açmayacak genlikteki akımlarda, bir topraklayıcıdan öz iletkenliği σ , dielektrik sabiti ϵ olan toprağa akan akımın J akım yoğunluğu ile topraklayıcının topraklama direncinden akan akım nedeniyle yaratılan gerilimin topraklayıcı çevresinde oluşturduğu E elektrik alanı arasında

$$J = \sigma E + \frac{\partial(\epsilon E)}{\partial t} \quad (1)$$

bağıntısı vardır. ϵ sabit durumunda bağıntı

$$J = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

şeklinde olur. Doğru akımda veya zamanla çok yavaş

değişen (alçak frekanslı) akımlarda bağıntıdaki ikinci terim ihmal edilebileceğinden bağıntı

$$J = \sigma E \quad (3)$$

şeklinde basitleşir. σ iletkenliği ile ρ öz direnci arasında

$$\sigma = 1/\rho \quad (4)$$

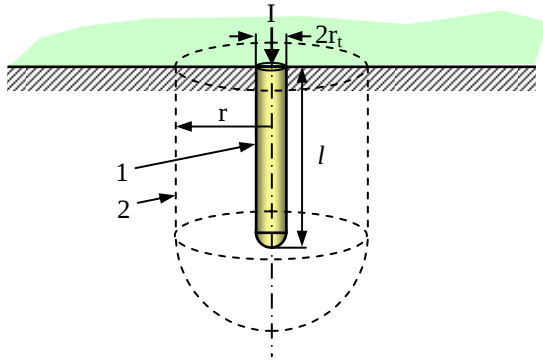
ilişkisini göz önüne alarak elektrik alanı ile akım yoğunluğu arasındaki bağıntı

$$E = \rho J \quad (5)$$

şeklinde de yazılabilir. Bu bağıntıdan yararlanarak bir topraklayıcının topraklama direnci basit olarak hesaplanabilir. Aşağıda bu yolla bir çubuk topraklayıcının topraklama direncinin hesabı açıklanmıştır.

2.1. Bir Çubuk Topraklayıcının Topraklama Direncinin Hesabı

İçinden I akımı geçen, r_t yarıçaplı, l uzunluğunda, tepesi toprak yüzeyinde olan bir düşey çubuk topraklayıcının topraklama direncini hesaplamak için topraklayıcıyı kuşatan r yarıçaplı herhangi bir yüzey alınrsa, Şekil 1'de gösterildiği gibi topraklayıcı boyunca silindrsel ve ucunda da yarı küresel parçalarla gösterilen bir bölge tanımlanır.



Şekil 1. Toprak iyonlaşmasız durumda topraklayıcı modeli. 1: Çubuk topraklayıcı, 2: Topraklayıcıyı kuşatan r yarıçaplı yüzey

Topraklayıcıdan akan I akımının çevresindeki toprağa düzgün dağılması durumunda J akım yoğunluğu

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi r(l - r_t) + \frac{4\pi r^2}{2}} = \frac{I}{2\pi r(l - r_t + r)} \quad (6)$$

olur. Bu denklem, (1) denklemine yerine koyularak elektrik alan şiddeti

$$E = \frac{\rho I}{2\pi r(l - r_t + r)} \quad (7)$$

olarak yazılır. Çubuk topraklayıcı ile topraklayıcıdan r_0 yarıçapı uzaklığında kabul edilen, sıfır potansiyelli referans toprak arasındaki U gerilimi veya buna göre

topraklayıcı üzerindeki potansiyel (toprak potansiyeli yükselmesi)

$$U = \int_{r_t}^{r_0} E dr = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{l - r_t} \ln\left(\frac{l - r_t + r}{r}\right) \Bigg|_{r_t}^{r_0}$$

$$U = \frac{\rho I}{2\pi(l - r_t)} \ln\left[\frac{l}{r_t} \frac{1}{\left(\frac{l - r_t}{r_0} + 1\right)}\right] \quad (8)$$

olacaktır. Bu gerilim, referans toprağın sonsuzda ($r_0 = \infty$) kabul edilmesi durumu için,

$$U = \frac{\rho I}{2\pi(l - r_t)} \ln\left(\frac{l}{r_t}\right) \quad (9)$$

olur. Uygulamada yaygın bir kabul gören, "topraklayıcıdan $r_0 = 20$ m uzaklıktaki noktalar referans toprak olarak alınabilir" varsayımına göre

$$U = \frac{\rho I}{2\pi(l - r_t)} \ln\left[\frac{l}{r_t} \frac{1}{\left(\frac{l - r_t}{20} + 1\right)}\right] \quad (10)$$

olur. Buna göre, içinde I akımının aktığı (veya dağıldığı) ve uçlarında U geriliminin oluştuğu toprağın direnci veya çubuk topraklayıcının R_t topraklama direnci Ohm yasasına göre

$$R_t = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi(l - r_t)} \ln\left[\frac{l}{r_t} \frac{1}{\left(\frac{l - r_t}{r_0} + 1\right)}\right] \quad (11)$$

olur. (11) bağıntısında $r_0 = \infty$ alınrsa

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi(l - r_t)} \ln\left(\frac{l}{r_t}\right) \quad (12)$$

veya $r_0 = 20$ m alınrsa

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi(l - r_t)} \ln\left[\frac{l}{r_t} \frac{1}{\left(\frac{l - r_t}{20} + 1\right)}\right] \quad (13)$$

olur. Buradaki yaklaşımla bulunan toprak iyonlaşmasız durumdaki topraklama direnci, literatürde, standart ve yönetmeliklerde verilen topraklama direnci olan

$$R_t \cong \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{8l}{r_t}\right) \quad (14)$$

bağıntısından farklıdır [14]. (12), (13) ve (14) bağıntıları ile bulunan direnç değerlerinin uygulamada ölçülen sonuçlara yakınlığını göstermek için örneğin $d = 0,025$ m, $l = 1$ m, $\rho = 42,3$ ohm.m için topraklama direncinin $R_t = 23,2 \Omega$ ölçülmüş [13] olmasını göz önüne alarak bir sayısal uygulama yapılırsa (12) bağıntısıyla $R_t = 24,83 \Omega$, (13) bağıntısıyla $R_t = 24,50 \Omega$ ve (14) bağıntısıyla $R_t = 38,83 \Omega$ bulunur. (13) bağıntısıyla bulunan sonucun (14) ile bulunan sonuca göre ölçme sonucuna yakınlık bakımından daha uygun

sonuç verdiği görülmektedir. Bu hesabın topraklayıcıdaki deri etkisi, topraktaki iyonizasyon, homojensizlik veya öz direncin doğrusal değişmemesi gibi birçok etken göz önüne alınmadan yapıldığına bakılırsa sonucun doğruluğu yeterli bulunabilir.

3. TOPRAK İYONLAŞMALI DURUMDA TOPRAKLAMA DİRENCİ HESABI

Toprağın iyonlaşmasını belirleyen delinme elektrik alan şiddeti üzerine yapılan deneysel çalışmalardan, başta toprak öz direnci olmak üzere pek çok koşula bağlı olmasına rağmen toprağın delinme dayanımının 3 kV/cm ile 10 kV/cm arasında değerlere sahip olduğu görülmüştür. 3 kV/cm yaygın kullanılan $E_{dtoprak}$ değeri olmakla birlikte IEEE Standardı 3,5 kV/cm, CIGRE 4 kV/cm değerini önermektedir [1, 5, 6].

Topraklayıcı üzerindeki ve çevresindeki elektrik alan incelemesi bakımından çubuk topraklayıcı, akımın geçtiği, gerilimin uygulandığı iç elektrot; onu kuşatan, sıfır potansiyele sahip noktaların oluşturduğu eşpotansiyel yüzey dış elektrot ve aradaki bölgenin de toprak olduğu bir elektrot sistemi gibi göz önüne alınabilir. Bu durumda topraklayıcı, kendisi ile eş eksenli, yarım küre tabanlı, silindirselsel, sıfır potansiyele sahip bir elektrotla çevrilmiş gibi olur. Bu durum, Şekil 1'de r yarıçaplı yüzey yerine r_0 yarıçaplı bir yüzey düşünmek demektir. Buna göre bu elektrot sistemi üzerinde yaklaşık maksimum elektrik alan şiddeti hesabı yaparken kabaca üst bölümü eş eksenli silindirselsel, alt bölümü eş merkezli küresel elektrot sistemi gibi incelenebilir. Eş eksenli silindirselsel bölümde elektrik alan şiddeti

$$E \cong \frac{U}{r \ln \frac{r_0}{r_t}} \quad (15)$$

$r = r_t$ ve $r_0 = 20$ m olarak maksimum elektrik alan şiddeti

$$E_{maks} \cong \frac{U}{r_t \ln \frac{r_0}{r_t}} = \frac{U}{r_t \ln \frac{20}{r_t}} \quad (16)$$

ve eş merkezli küresel bölümde elektrik alan şiddeti

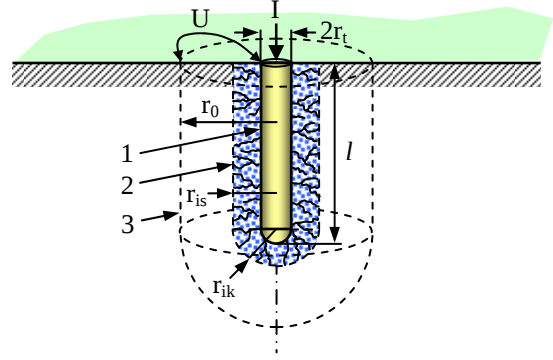
$$E \cong \frac{r_t r_0}{r_0 - r_t} \cdot \frac{U}{r^2} \quad (17)$$

$r = r_t$ ve $r_0 = 20$ m olarak maksimum elektrik alan şiddeti

$$E_{maks} \cong \frac{U}{\frac{r_t}{r_0} (r_0 - r_t)} = \frac{U}{\frac{r_t}{20} (20 - r_t)} \quad (18)$$

olur. Bu bağıntılarda, U gerilimi yerine (10) bağıntısından hesaplanan değer yazılırsa topraklayıcı üzerindeki yaklaşık maksimum elektrik alan şiddeti, topraklayıcı boyutlarına, akıma ve toprağın öz direncine bağlı olarak bulunmuş olur. Topraklayıcı üzerindeki maksimum elektrik alan şiddeti toprağın

delinme elektrik alan şiddetini aşıyorsa ($E_{maks} > E_{dtoprak}$ ise) topraklayıcı ile elektrik alanının toprağın delinme elektrik alan şiddetine eşit olduğu yere kadar olan toprakta iyonlaşma veya diğer bir deyişle elektriksel kısmi boşalma olur. Elektriksel boşalmanın olduğu bölgede toprağın öz direnci, elektriksel kısa devre olmuş gibi sıfıra düşer. Bu da topraklayıcı çapının boşalma bölgesinin sınırına kadar büyümesi olarak göz önüne alınabilir (Şekil 2).



Şekil 2. Toprak iyonlaşmalı durumda topraklayıcı modeli. 1: Çubuk topraklayıcı, 2: İyonizasyon bölgesi, 3: Referans toprak

Toprağın $E_{dtoprak}$ delinme elektrik alan şiddeti değerine göre iyonizasyon bölgesinin r_i yarıçapı, eş eksenli silindirselsel bölüm için r_{is} olarak

$$E_{dtoprak} \cong \frac{U}{r_{is} \ln \frac{r_0}{r_t}} \quad (19)$$

bağıntısından

$$r_{is} \cong \frac{U}{E_{dtoprak} \ln \frac{r_0}{r_t}} \quad (20)$$

olarak ve eş merkezli küresel bölüm için r_{ik} olarak

$$E_{dtoprak} \cong \frac{r_t r_0}{r_0 - r_t} \cdot \frac{U}{r_{ik}^2} \quad (21)$$

bağıntısından

$$r_{ik} \cong \sqrt{\frac{r_t r_0}{r_0 - r_t} \cdot \frac{U}{E_{dtoprak}}} \quad (22)$$

olarak bulunur. İyonlaşmadan dolayı topraklayıcı, boyutları iyonlaşma tabakası kalınlığı kadar büyümüş elektrot gibi davranır. Bu durumda topraklayıcının yarıçapı $r_i \cong r_t + (r_{is} - r_t) = r_{is}$ ve uzunluğu da $l_i \cong l + (r_{ik} - r_t)$ olarak kabul edilebilir. Buna göre toprak iyonlaşmalı durumda çubuk topraklayıcının topraklama direnci yaklaşık

$$R_{ti} \cong \frac{\rho}{2\pi(l - r_t)} \ln \left[\frac{l_i}{r_i} \frac{1}{\left(\frac{l - r_t}{20} + 1 \right)} \right] \quad (23)$$

olur.

3.1. Sayısal Uygulama

Buraya kadar önerilen model ve bağıntılarla, sayısal örnek olmak üzere, önce içinden $I = 20$ A değerinde, toprakta iyonlaşmaya yetmeyecek kadar küçük bir akım geçen, sonra da içinden $I = 1000$ A değerinde toprakta iyonlaşma yaratacak kadar büyük bir akım geçen bir çubuk topraklayıcı için topraklama direnci hesapları yapılmıştır. Hesaplarda topraklayıcı yarıçapı $r_t = 0,01$ m, referans toprak yarıçapı $r_0 = 20$ m, toprak öz direnci $\rho = 100 \Omega \cdot m$ alınmış, topraklayıcı uzunluğu l , 0,5 m ile 3 m arasında 0,5 m basamaklarla değiştirilmiştir. Bu verilerle topraklayıcı üzerinde oluşan U potansiyeli (gerilimi), silindrsel çubuk kısmındaki E_{msil} maksimum elektrik alan şiddeti, yarım küre şekilli uç kısmındaki $E_{mküre}$ maksimum elektrik alan şiddeti ve R_t topraklama direnci değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 1 ve 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. İçinden 20 A geçen bir çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarında üzerindeki gerilim, alan ve topraklama direnci değerleri ($E_{maks} < E_{dtoprak} = 3$ kV/cm durumu)

l (m)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
U (kV)	2,525	1,450	1,047	0,828	0,688	0,590
E_{msil} (kV/cm)	0,332	0,191	0,138	0,109	0,091	0,077
$E_{mküre}$ (kV/cm)	2,527	1,451	1,048	0,828	0,688	0,590
R_t (Ω)	126,28	72,52	52,40	41,40	34,40	29,52

Çizelge 2. İçinden 1000 A geçen bir çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarında üzerindeki gerilim, alan ve topraklama direnci değerleri ($E_{maks} > E_{dtoprak} = 3$ kV/cm durumu)

l (m)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
U (kV)	126,28	72,52	52,40	41,40	34,40	29,52
E_{msil} (kV/cm)	16,61	9,54	6,89	5,44	4,52	3,88
$E_{mküre}$ (kV/cm)	126,34	72,55	52,42	41,43	34,42	29,53
r_{is} (cm)	5,53	3,18	2,30	1,82	1,51	1,30
r_{ik} (cm)	6,49	4,92	4,18	3,72	3,39	3,14
R_{ti} (Ω)	74,07	55,28	44,09	36,95	31,97	28,28

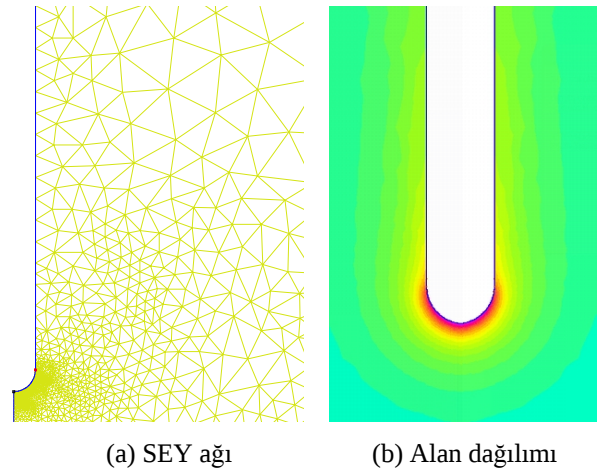
Çizelge 1’deki sonuçlar toprakta iyonlaşmanın olmadığı duruma ilişkin olup (10), (16), (18) ve (13) bağıntılarından, Çizelge 2’deki sonuçlar da iyonlaşmanın olduğu duruma ilişkin olup (10), (16), (18), (20), (22) ve (23) bağıntılarından hesaplanmıştır. Toprakta iyonlaşma ile ilgili değerlendirmeler toprağın delinme elektrik alan şiddeti $E_{dtoprak} = 3$ kV/cm kabul edilerek yapılmıştır.

Çizelge 3’te sırasıyla (14), (13) ve (23) denklemlerinden, aynı çubuk topraklayıcı için hesaplanan R_{is} standart, R_t iyonlaşmasız ve R_{ti} iyonlaşmalı durum topraklama direnci değerleri karşılaştırma amacıyla bir arada verilmiştir. Çizelge 3’ten topraktaki iyonlaşma sonucu boyutları büyümüş gibi davranan topraklayıcının diğerlerine göre daha küçük topraklama direnci gösterdiği, bu durumu göz önüne almamanın daha büyük direnç değeri hesaplamaya yol açtığı görülmektedir.

Çizelge 3. Bir çubuk topraklayıcının farklı bağıntılardan hesaplanan topraklama dirençleri

l (m)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
R_{is} (Ω)	190,71	106,39	75,23	58,71	48,39	41,29
R_t (Ω)	126,28	72,52	52,40	41,40	34,40	29,52
R_{ti} (Ω)	74,07	55,28	44,09	36,95	31,97	28,28

Bu çalışmada anlatılan yaklaşımla yaklaşık olarak bulunan elektrik alan şiddeti değerleri yerine bir sayısal yöntemle elektrik alan dağılımı ve değerleri daha doğru olarak hesaplanabilir. Bunun için sonlu elemanlar yönteminden (SEY) yararlanılırsa Şekil 3’te bir örnek olarak gösterilen çubuk topraklayıcı ucundaki sonlu elemanlar ağı parçası ve alan dağılımı elde edilir. SEY çözümlemesinde, çubuk topraklayıcıya, göz önüne alınan koşullara uygun olarak (10) bağıntısından hesaplanan kadar gerilim uygulanmış, $r_0 = 20$ m olan noktalarda potansiyelin sıfır olduğu (referans toprak) kabul edilmiştir.



Şekil 3. SEY çözümlemesinde çubuk topraklayıcı için elde edilen ağ ve alan dağılımından bir parça örnek

Örnek olarak verilen şekilde $l = 1$ m, $r_t = 0,01$ m, $r_0 = 20$ m, $\rho = 100 \Omega \cdot m$ ve $I = 1000$ A alınmıştır. Bu verilerle (13) ile $R_t = 72,52$ ohm olarak hesaplanır. (10) ile veya $U = R_t \cdot I$ bağıntısından topraklayıcı-referans toprak arasındaki gerilim $U = 72,52$ kV olarak hesaplanır. Bu gerilim çubuk topraklayıcıya uygulanmışken SEY ile alan dağılımı 43794 düğümlü 85204 üçgen elemanlı ağ üzerinden, 10^{-8} doğrulukla bulunmuştur. Benzer yolla 2 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için gerilim 41,40 kV olarak hesaplanmıştır. Bu gerilim çubuk topraklayıcıya uygulanmışken SEY ile alan dağılımı 30686 düğümlü 58984 üçgen elemanlı ağ üzerinden bulunmuştur. Bu verilerle SEY ile bulunan sonuçlar Çizelge 4’te verilmiştir. SEY çözümlemeleri problemin eksenel simetrisi nedeniyle silindrsel koordinatlarda yapılmıştır [15]. Hesaplarda toprağın üzerindeki hava tabakası da göz önüne alınmıştır. SEY modelinde toprağın bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 36$, havanınki ise $\epsilon_r = 1$ kabul edilmiştir. SEY hesapları, FEMM 4.2 adlı, açık kodlu bir bilgisayar programı ile yapılmıştır [16].

Çizelge 4. İçinden 1000 A geçen ve çevresinde toprak iyonlaşması olan bir çubuk topraklayıcı için SEY ile hesaplanan alan ve topraklama direnci değerleri ($E_{dtoprak} = 3 \text{ kV/cm}$ alınmıştır)

$l \text{ (m)}$	1,0	2,0
$U \text{ (kV)}$	72,52	41,40
$E_{msil} \text{ (kV/cm)}$	9,81	6,72
$E_{mküre} \text{ (kV/cm)}$	45,07	24,12
$r_{is} \text{ (cm)}$	3,93	2,38
$r_{ik} \text{ (cm)}$	4,80	3,22
$R_{ti} \text{ (}\Omega\text{)}$	51,85	34,77

Çizelge 4'teki sonuçların, basitleştirilmiş yaklaşımla bulunan önceki sonuçlardan daha gerçeğe yakın sonuçlar olduğu açıktır. Yine de basitleştirilmiş model sonuçlarının bu sonuçlarla yakınlığı kabul edilebilir ölçülerdedir. Bu da bu çalışmada önerilen modelin uygunluğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Topraklayıcılardan örneğin kısa devreler veya yıldırım gibi durumlarda yüksek akımların geçmesi, topraklayıcıda topraklama direnci ile orantılı gerilim oluşturması bakımından önemlidir. Çünkü referans toprağa göre bu gerilimin topraklayıcı üzerinde ve çevresinde yaratacağı elektrik alanı toprağın iyonlaşmasına yol açacak yüksekliğe ulaşması kaçınılmazdır. Buna da topraklayıcının kabaca iyonlaşan bölgeye kadar boyutlarının büyümesi olarak bakılabilir. Bunun sonucu olarak iyonlaşmasız durumdan daha küçük topraklama direnci ortaya çıkar.

Bu çalışmada göz önüne alınan akımlara, kısa devrelerde ortaya çıkan, olayı yarı-statik incelemeye uygun kılan akımlar olarak bakılabilir. Bu açıdan burada önerilen model ve uygulamada statik inceleme uygun olmuştur. Fakat yıldırım gibi zamanla hızlı değişen ve kısa süreli akımlarda dinamik modelleme ve analiz yapmak uygun olacaktır. Çalışmadaki incelemeler, topraklayıcıdan geçen akım değeri yükseldikçe, topraklayıcı üzerindeki elektrik alan şiddetinin arttığını dolayısıyla iyonlaşmanın arttığını, topraklama direncinin küçüldüğünü, potansiyel değerlerinin yükseldiğini ancak iyonlaşmasız duruma göre beklenenden küçük değerlere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca beklendiği gibi topraklayıcı uzunluğunun artması ile topraklama direnci ve üzerindeki gerilim azalmaktadır.

Çalışmadaki sonuçlardan çubuk topraklayıcı için önerilen modelin kabul edilebilir bir model olduğu, aynı modelle sonlu elemanlar yöntemiyle veya başka bir sayısal yöntemle bulunacak alan dağılımından yararlanarak topraklayıcının iyonlaşmalı ve iyonlaşmasız durumlardaki özelliklerini belirlemenin uygun, kolay ve doğru olacağı görülmektedir. Çalışma, topraklayıcı çapı, toprak öz direnci gibi parametreler değiştirilerek, ayrıca ısı olaylar, homojen olmayan toprak davranışı göz önüne alınarak geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Haddad, A. Warne, D. F., Advances in High Voltage Engineering, IEE Power & Energy Series 40, London, 2004.
- [2] Bogensperger, J. H., Frei, J., Pack, S., "Resistance of grounding systems stationary and transient behaviour", 9th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Austria, 1995.
- [3] Nekhoul, B., Labie, P., Zgainski, F. X., Meunier, G., Morillon, F., and Bourg, S., "Calculating the impedance of a grounding system", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.32, No.3, pp. 1509-1512, 1996.
- [4] Gonos, I. F., Topalis, F. V., Stathopoulos, I. A., "Transient impedance of grounding rods", 11th Int. Symp. on High Voltage Engineering, England, 22-27 August 1999.
- [5] Liu, Y., Transient Response of grounding systems caused by lightning: Modelling and Experiments, Uppsala University, Ph. D. Dissertation, 2004.
- [6] Moussa, A. M., "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1669-1677, 1994.
- [7] Habjanic, A., and Trlep, M., "The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 42, No. 4, pp. 867-870, 2006.
- [8] Abdallah, M. A., "Effect of soil ionisation on the lightning current distribution in earthing system", 13th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Netherlands, 2003.
- [9] Nor, N. M., Srisakot, S., Griffiths, H., Haddad, A., "Characterisation of soil ionization under fast impulse", 25th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2000, Rhodes, Greece, 18-22 September 2000, pp. 417-422.
- [10] Lorentzou, M. I., Hatzargyriou, N. D., "Effective dimensioning of extended grounding systems for lightning protection", 24th Int. Conf. on Lightning Protection, Greece, 2000.
- [11] Wu, W., Jiangjun, R., Yunping, C., "Transient analysis of grounding system under lightning stroke using 3D FEM method", IEEE, pp. 2034-2037, 2002.
- [12] Trlep, M., Hamler, A., Hribernik B., "The analysis of complex grounding systems by FEM", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 2521-2524, 1998.
- [13] Xiaoqing, Z., "A simplified method for calculating the impulse resistance of vertical grounding rods", Proceedings of IEEE TENCON 2002, pp. 1881-1884.
- [14] Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, Bursa, 2001.
- [15] Kalenderli Ö., Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notları, İ.T.Ü., 1997.
- [16] Meeker, D., FEMM 4.2 Finite Element Method Magnetics Software, 2007.