

YÜKSEK GERİLİM HATTI ELEKTRİK ALANLARINDA İNSAN VÜCUDUNDA ENDÜKLENEN AKIMLARIN HESABI

Hayri Yıldırım, Özcan Kalenderli

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
80626 Maslak, İstanbul

Özet - Bu çalışmada, bir insanın bir yüksek gerilim hattı altında durması durumunda elektrik alanı etkisiyle vücudunda endüklenenecek akım değerlerinin hesabı için bir yöntem ve bir örnek sunulmuştur. Sunulan yöntem statik elektrik alanı hesabında yaygın olarak kullanılan Yük Benzetim Yöntemidir. Yöntemin söz konusu probleme uygulaması gösterildikten sonra insan vücudunda endüklenen akımların hesabı açıklanmıştır. Bir örnek olarak 380 kV'luk bir yüksek gerilim hattının altında duran bir insan için hesaplar yapılmıştır. Ele alınan örnekteki insan vücudunda endüklenen akımların insan için tehlikeli akım sınırları içinde olmadığı görülmüştür.

Abstract - This paper aimed at determining the distribution of electric fields and induced currents on a human body standing underneath high voltage overhead transmission lines. Distribution of electric field around a 380 kV transmission line is determined by charge simulation method, and induced currents are obtained using computed electric field values on a human body. Calculated induced currents are evaluated with respect to safe limits. It has been seen that these currents are below the dangerous current limits.

1. GİRİŞ

Enerji iletim hatlarının işletme gerilimleri yükseldikçe, bu hatlar çevresindeki elektrik alan değerlerinin de daha büyük seviyelere çıkması, olabilecek sağlık ve çevre etkileri konusunda ciddi sorunlar ortaya çıkarmıştır [1-5]. Elektrik ve manyetik alanlar insan vücudu üzerinde yüzeysel yükler oluştururlar ve bundan dolayı da vücut içerisinden bir akım akar. Son yıllarda elektrik ve manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkisi araştırılırken, eğer bir zararlı etki varsa, bu etkinin vücutta endüklenen akımlar yoluyla olabileceği üzerinde durulmaktadır. Manyetik alanların endüklediği akımların vücuttaki doğal akımlara ve elektrik alanının endüklediği akımlara göre küçük olmasından dolayı elektrik alanının endüklediği akımların daha önemli olduğu anlaşılmaktadır [6-9].

Bu alanlar içerisinde ayakta duran bir insan vücudu üzerindeki yüzeysel yükler, yerel olarak baş çevresine yakın yerlerde alan şiddeti değerinin büyümesine sebep olurlar. Bu alan şiddeti, düzgün alan şiddetinin 8-10 katına veya daha yüksek değerlere çıkabilir. Alan içinde ayakta duran bir insanda elektrik alanı tarafından endüklenen akım yoğunluğu vücut boyunca farklı değerler

alır. Örnek olarak elektrik alanının endüklediği bir vücut akımının bacaklardaki değeri $15 \mu\text{A/kV/m}$ 'dir. Buna göre örneğin 8 kV/m alan içerisinde ayakta duran bir insanın bacaklarında endüklenen akım 120 μA olacaktır [10].

Bu çalışmada, elektrik alanlarının biyolojik etkilerinin anlaşılması amacıyla yüksek gerilim hatları altında oluşan elektrik alanlarının bu hatlar altında ayakta duran normal boyutlardaki bir insanda endüklediği vücut akımları bilgisayar yardımıyla hesaplanmıştır. Elektrik alanı hesabı Yük Benzetim Yöntemi ile yapılmıştır.

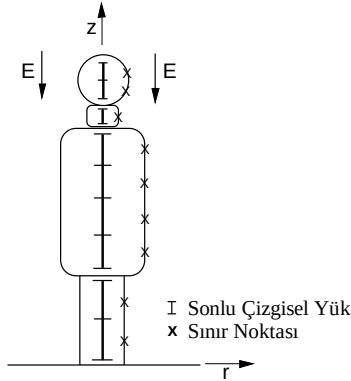
2. İNSAN VÜCUDUNUN MODELLENMESİ

Yüksek gerilim hatları altındaki elektrik alanlarının hesabı sayısal yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Hattın altında ve yer düzeyindeki elektrik alanı yaklaşık düzgün alandır ve yer düzlemine diktir. İletkenleri yatay düzende yerleştirilmiş üç fazlı 154 kV'luk bir enerji iletim hattının altında yer seviyesindeki elektrik alan şiddeti 2,5 kV/m mertebesinde dir. Bu değer 380 kV'luk bir enerji iletim hattı altında 7-8 kV/m'ye çıkmaktadır. Bu hatlar altında duran bir insan, bulunduğu yerde alan dağılımının bozulmasına ve bu bölgedeki alan şiddetinin yükselmesine yol açar. Bu yüksek elektrik alanı etkisiyle insan üzerinde endüklenen 50 Hz frekanslı akımlar güvenli sınır değerleri aşabilir. Enerji iletim hatlarının bakımında çalışan elektrik işçileri bu alanlar altında çalışmaktadır.

Yüksek gerilim hattı altında bulunan bir insanın hatta yakın kısımlarında alternatif gerilimin kutbiyetine zıt işaretli elektrik yükü birikmesi olur. Sinüsoidal alternatif gerilimin pozitif ve negatif kutuplar arasında işaret değiştirmesiyle zıt işaretli yükler vücut içerisinde yer değiştirirler. Bunun sonucunda vücut içerisinde "yer değiştirme akımı" adı verilen bir alternatif akım akar. Bu durumda yer değiştirme akımları vücudun bir tarafından girer ve vücut içerisinden akarlar. Elektrik alan çizgileri ise diğer taraftan çıkarak toprağa girerler. Topraktan yalıtılmış olarak böyle bir alan altında duran bir insan, alan içerisindeki konumu ve alan şiddetinin değerine bağlı olarak toprak potansiyelinden farklı bir potansiyele sahip olur ve bunun sonucu olarak topraklanmış bir iletken cisme dokunursa üzerinden bir kısadevre akımı akar ve küçük bir elektrik çarpması ile karşılaşır. Aynı durumda fakat topraklanmış olarak duran bir insanın üzerindeki potansiyel sıfır olacaktır, ancak bu insan elektrik alanı

altındaki topraktan yalıtılmış bir iletkene dokunduğunda, bu iletken, elektrik alanının endüklediği bir serbest potansiyele ve yüke sahip olduğundan iletkendeki yük insanın üzerinden toprağa akar ve böylece benzer bir etki altında kalır.

Hesaplama elektrik alanı altında elleri yana sarkmış olarak ayakta duran ve toprak potansiyelinde bir insan gözönüne alınmıştır. Bununla beraber inceleme topraktan yalıtılmış insan modeli için de yapılabilir. İnsan vücudunun özgül iletkenliğinin yaklaşık 0,1 S/m ve eşdeğer bağıl dielektrik sabitinin yaklaşık 100 000 civarında olması, alan içinde bir iletken gibi davranış görmesine ve yüksek gerilim hattı altındaki elektrik alan çizgilerinin insan vücuduna dik olarak gelmesine sebep olmaktadır. Bu varsayımla çalışmada yüksek gerilim hattı altında insan olduğu durumda elektrik alan hesabı Yük Benzetim Yöntemiyle yapılmıştır. Geliştirilen modelde yüksek gerilim hatları sonsuz çizgisel yüklerle benzetilirken insan vücudu, eş eksenli, çapları ve boyları farklı üst üste silindirlere modellenmiş ve bu silindirlerin eksenine sonlu çizgisel yükler yerleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Elektrik alanı altında ayakta duran bir insanın yük benzetim modeli.

2.1. Yük benzetim yöntemi (YBY) ile elektrik alan hesabı [10-17]

Yük benzetim yönteminde, iletkenlerin yüzeysel yüklerinin yarattığı gerçek elektrik alanı yerine bu iletkenlerin içine yerleştirilen n_q sayıda ve uygun tipte elektriksel yükün yarattığı alan gözönüne alınmakta ve benzetim yükü denilen bu yüklerin sayısı ve yerleri, verilen sınır koşullarından belirlenmektedir. Sınır noktalarının potansiyelleri için toplama ilkesiyle

$$[p] \cdot [q] = [V] \quad (1)$$

lineer denklem sistemi yazılabilir. Burada $[p]$ potansiyel katsayıları matrisi, $[q]$ benzetim yükleri matrisi, $[V]$ ise sınır noktaları potansiyelleri matrisidir. Benzetim yüklerinin değerleri, (1) eşitliğinden belirlenir. Yük değerleri belirlendikten sonra herhangi bir noktadaki potansiyel, bütün yüklerin söz konusu noktada oluşturdukları potansiyellerin toplanması ile hesaplanır. Elektrik alanı ise çeşitli doğrultulardaki bileşenlerinin

toplanmasıyla vektörel olarak hesaplanır. Örneğin silindrisel koordinat sisteminde, eksenel simetrisinin göz önüne alındığı alan problemlerinde herhangi bir noktadaki iki boyutlu elektriksel alan

$$\vec{E}_i = E_r \cdot \vec{i}_r + E_z \cdot \vec{i}_z \quad (2)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada $n=n_q=n_s$ yük sayısı i_r , i_z ise r ve z doğrultularındaki birim vektörlerdir.

Birçok problemde bir iletken sistemi ile sıfır potansiyelli sonsuz düzlem arasındaki elektriksel alanın incelenmesi gerekir. Böyle problemlerde her bir yükün görüntüsü alınarak YBY, görüntü yöntemi ile birlikte kullanılır. Böylece sıfır potansiyelli düzlem için ayrıca yük kullanılmaz ve toplam yük sayısında bir azalma olur.

Yüksek gerilim hatlarının elektrik alanını yük benzetim yöntemiyle hesaplamak için hat iletkenleri içerisine sonsuz çizgisel yükler yerleştirilmiştir. Hattın altında ayakta duran insanın benzetimi ise simetri eksenine üzerine yerleştirilen sonlu uzunlukta çizgisel yüklerle yapılmıştır.

Yüklerin değerleri yük sayısına eşit sayıda alınan sınır noktalarında sınır koşullarının sağlanmasıyla (1) eşitliğinden belirlenmiştir. Sınır koşulu olarak hat iletkenlerinin yüzeyindeki potansiyelin hat potansiyeline eşit olması ve insanın vücudu üzerindeki sınır noktalarındaki potansiyelin toprak potansiyeline (sıfır) eşit olması alınmıştır. İnsanın topraktan yalıtılmış olması durumunda insan üzerinde endüklenen serbest potansiyel bilinmediğinden ek bir denklem olarak insan üzerindeki yüklerin toplamının sıfır olduğu denklem alınmıştır. Toprak potansiyelindeki yer düzleminin benzetimi için yüklerin görüntüleri de hesaba katılmıştır.

Herhangi bir "i" sınır noktasının potansiyeli, bütün benzetim yüklerinin bu sınır noktasında oluşturduğu potansiyellerin toplamına eşittir:

$$V_i = \sum_{j=1}^{n_q} p_{ij} \cdot q_j \quad (3)$$

Burada p_{ij} , q_j yükünün i . sınır noktasında hesaplanan potansiyel katsayısıdır. Elektrik alanının r ve z bileşenleri E_{ri} ve E_{zi} ise

$$E_{ri} = \sum_{j=1}^{n_q} f_{ri,j} \cdot q_j \quad (4)$$

$$E_{zi} = \sum_{j=1}^{n_q} f_{zi,j} \cdot q_j \quad (5)$$

bağıntılarından hesaplanır. Burada $f_{ri,j}$ ve $f_{zi,j}$, i .sınır noktasında q_j yükü ile hesaplanan elektrik alanının sırasıyla r ve z bileşenlerinin alan katsayılarıdır. Toplam elektrik alan şiddeti ise

$$E_i = \sqrt{E_{ri}^2 + E_{zi}^2} \quad (6)$$

bağıntısından hesaplanır.

2.1.1. Sonsuz çizgisel yük

Yarıçapı sonsuz küçük ve düzgün yük dağılımlı çok uzun doğrusal bir iletken, sonsuz çizgisel yük olarak alınabilir. Toplam yükü Q olan l uzunluğundaki bir çizgisel yükün yük yoğunluğu $q=Q/l$ dir. Çizgisel yükü çevreleyen r yarıçaplı eş eksenli bir silindire Gauss teoremi uygulanırsa elektriksel akı yoğunluğu,

$$D = \frac{q}{2\pi r} \quad (7)$$

şeklinde elde edilir. Buradan elektriksel alan ve potansiyel bağıntıları,

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \quad (8)$$

$$V = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r + K \quad (9)$$

bulunur. Referans noktasının sonsuz çizgisel yüke uzaklığı r_0 ile gösterilirse, $r = r_0$ için $V_0=0$ olur ve K sabiti

$$K = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r_0 \quad (10)$$

bulunur. Sonsuz çizgisel yükün potansiyel bağıntısı,

$$V = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{r_0} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_0}{r} \quad (11)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklem $V=p \cdot q$ şeklinde yazılırsa potansiyel katsayısı

$$p = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_0}{r} \quad (12)$$

olarak tanımlanır. Bir $A(x_A, y_A)$ noktasının sonsuz çizgisel yüke dik uzaklığı r ,

$$r = \left[(x_A - x_q)^2 + (y_A - y_q)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

dir. Elektrik alan katsayıları

$$f_x = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{x_A - x_q}{2\pi\epsilon r^2} \quad (14a)$$

$$f_y = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{y_A - y_q}{2\pi\epsilon r^2} \quad (14b)$$

şeklinde elde edilir. Elektrik alanının x ve y bileşenleriyle toplam alan sırasıyla denklem (4), (5) ve (6)'da r yerine x ve z yerine y olarak hesaplanır.

2.1.2. Sonlu çizgisel yük

Silindrisel koordinat sisteminde, Şekil 2'de gösterilen sonlu uzunluktaki bir çizgisel yük ve görüntüsünün $A(r, z)$ noktasında oluşturduğu potansiyel

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \ln \frac{(z_2 - z + d_2)(z_1 + z + \delta_1)}{(z_1 - z + d_1)(z_2 + z + \delta_2)} \quad (15)$$

bağıntısıyla verilebilir. Burada

$$\delta_1 = \left[r^2 + (z_1 + z)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$d_i = \left[r^2 + (z_i - z)^2 \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2 \quad (17)$$

dir. Buradan potansiyel katsayısı,

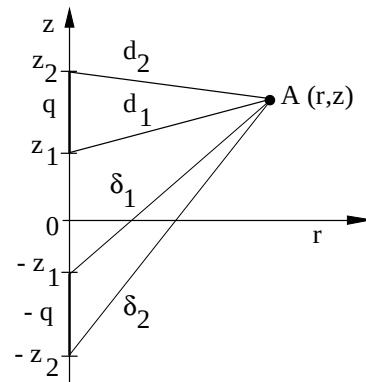
$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \ln \frac{(z_2 - z + d_2)(z_1 + z + \delta_1)}{(z_1 - z + d_1)(z_2 + z + \delta_2)} \quad (18)$$

ve elektrik alan katsayıları

$$f_r = \frac{1}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \left[\frac{z_2 - z}{r \cdot d_2} - \frac{z_1 - z}{r \cdot d_1} + \frac{z_1 + z}{r \cdot \delta_1} - \frac{z_2 + z}{r \cdot \delta_2} \right] \quad (19)$$

$$f_z = \frac{1}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \left[\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} - \frac{1}{\delta_2} + \frac{1}{\delta_1} \right] \quad (20)$$

şeklinde bulunur. Elektrik alanın r ve z bileşenleriyle toplam alan sırasıyla denklem (4), (5) ve (6) denklemlerinden hesaplanır.



Şekil 2. Silindrisel koordinatlarda sonlu çizgisel yük.

2.2. Endüklenen akımların hesabı

Elektrik alan şiddeti hesaplandıktan sonra insanın vücudunda endüklenen akımı hesaplamak için vücut sınır yüzeyindeki ve z yüksekliğindeki bir noktada endüklenen yük yoğunluğu

$$\sigma = \epsilon_0 E_n \quad (21)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada ϵ_0 havanın dielektrik sabiti, E_n ise vücut üzerindeki sınır noktasında hesaplanan elektrik alanının normal (vücuda dik) bileşenidir. İnsanın vücudu iletken olarak kabul edildiği için vücut üzerindeki sınır noktalarında hesaplanan toplam elektrik alanı vücuda dik olacağından elektrik alanının normal bileşeni toplam alana eşit alınmıştır.

Vücut sınır noktasında, endüklenen akım yoğunluğu J , vücut yüzeyinde ve yüzeyin hemen içinde vücuda diktir ve

$$J = \omega \sigma = \omega \epsilon_0 E_n \quad (22)$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir. Burada ω , yüksek gerilim hattına uygulanan gerilimin açısal frekansıdır.

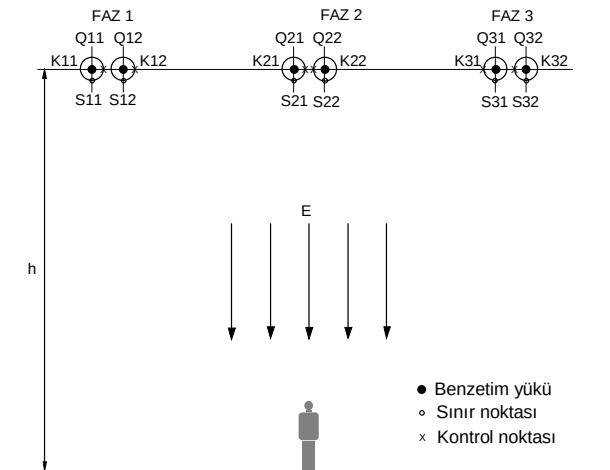
Vücudun herhangi bir kısmında vücut yüzeyinin hemen içinde, örneğin k . kısmında endüklenen akım I_k , akım yoğunluğu J 'nin vücudun bu kısmının yüzeyi (S_k) boyunca integre edilmesiyle

$$I_k = \oint_{S_k} J \cdot dS = \oint_{S_k} \omega \sigma dS = \omega \epsilon_0 \oint_{S_k} E_n dS \quad (23)$$

bulunur. Bununla beraber akım yoğunluğunun vücut içerisinde dağılımı vücut içindeki organların dielektrik sabitlerine ve iletkenliklerine bağlıdır.

3. MODELLEME SONUÇLARI

Yukarıda verilen bağıntılarla, fazlar arası gerilimi 380 kV olan 3 fazlı, ikili demet iletkenli, iletkenleri yatay düzende yerleşik bir yüksek gerilim hattı altında bir insan modeli bulunması durumunda elektrik alan hesabı yapılarak insan vücudunda endüklenen akımlar hesaplanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Yüksek gerilim hattı altındaki elektrik alanı.

Hesaplama fazların yerden yüksekliği $h = 15$ m, fazlar arası açıklık 9 m, ikili demet iletkenin kısmi iletkenleri arası açıklık 40 cm, kısmi iletkenlerin çapı 27,7 mm alınmıştır. Faz iletkenlerinin potansiyelleri, fazların

gerilimleri arasında 120° lik faz farkı olduğu göz önüne alınarak, kompleks büyüklük olarak tanımlanmıştır. Hattın yarattığı gerçek elektrik alanı, yük benzetim yöntemine göre hattaki 6 iletkenin eksenine yerleştirilen sonsuz uzun çizgisel benzetim yükünün yarattığı alan ile benzetilmiştir.

Hattın altında bulunduğu varsayılan 174 cm boyunda bir insanı modellemek için farklı çap (D) ve yüksekliklerde (H), üst üste yerleştirilmiş 4 silindir kullanılmıştır (Şekil 1) (Çizelge 1). İnsanın toprak potansiyelinde olduğu kabul edilmiştir. Yük benzetim yöntemine göre elektrik alanı bakımından insanın modellenmesinde modelin eksenine yerleştirilmiş baş için 2, boyun için 2, gövde için 3 ve bacak için 3 yani toplam 10 adet sonlu çizgisel yük kullanılmıştır.

Çizelge 1. İnsan modelini oluşturan silindirlerin çap ve yükseklikleri.

Bölge	D (cm)	H (cm)
Baş	18	18
Boyun	12	6
Gövde	40	60
Bacak	20	90

16 benzetim yükü ile yapılan çözümlemede benzetim yüklerinin değerleri, sınır yüzeyler üzerinde alınan ve potansiyeli bilinen noktalar için hesap yapılarak bulunmuştur. Sınır potansiyellerinin kompleks alınması nedeniyle benzetim yükü değerleri

$$q(i) = \text{reel } [q(i)] + j \text{ sanal } [q(i)], \quad i = 1, \dots, 16$$

şeklinde kompleks büyüklük olarak elde edilmiştir.

Çözümlemenin doğruluğuna bakmak amacıyla kontrol noktaları için yapılan potansiyel ve bağıl hata hesaplamaları sonunda en büyük bağıl hatanın % 0,384 mertebesinde olduğu görülmüştür. Bu hata büyüklüğü benzetimin doğruluğu için yeterli sayılarak çözümlemeye devam edilmiştir.

Çözümlemenin sonraki aşamasında insan vücudu üzerinde endüklenen akımları hesaplayabilmek için vücut üzerindeki bazı noktalarda elektrik alan şiddetleri hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Elektrik alan hesabı sonuçları.

R_s (cm)	Z_s (cm)	E_r (kV/m)	E_z (kV/m)	E_b (kV/m)
15	15	0.5506	0.0013	0.55082
15	45	1.7679	0.1594	1.7751
15	75	2.3081	0.6684	2.4029
20	100	4.2605	0.0277	4.2605
20	120	4.8536	0.7067	4.9048
20	140	8.5794	2.4467	8.9214
6	151.5	19.323	12.8962	23.2316
6	154.5	1.5552	6.8025	6.9780
7.8	160.5	8.3668	0.86627	8.4115
7.8	169.5	19.666	6.4934	20.7103

Çizelge 2'de alan değerleri hakkında bir fikir vermesi amacıyla hesap yapılan bazı noktaların koordinatları (R_s , Z_s), elektrik alanının yatay (E_r), düşey (E_z) ve bileşke (E_b) değerleri sunulmuştur.

Son olarak (22) ve (23) bağıntıları ile insan vücudu üzerinde endüklenen akımlar hesaplanmıştır. Hesaplarda $f = 50$ Hz'lik elektrik alanının açısal frekansı $\omega = 2\pi f = 314$ rad/s, $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m alınmıştır. E_b bileşke elektrik alan değerleri ve insan vücudunu modelleyen silindirin yüzey alanları kullanılarak insan vücudu üzerinde endüklenen akımlar hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 380 kV'luk hat altında insan vücudunda endüklenen akımlar.

Bölge	Akım yoğunluğu ($\mu A/m^2$)	Endüklenen akım (μA)
Baş	81.00453	10.62681
Boyun	84.03022	3.362397
Gövde	50.30984	66.09042
Bacak	13.15383	17.94501

Hesaplama sonucunda bulunan ve Çizelge 3'te verilen insan vücudunda endüklenen akım değerlerine bakıldığında bu akımların etkileri süre, vücut direnci, ortam koşulları gibi pek çok parametreye bağlı olmakla birlikte TS 3182/Nisan 1988'de verilen tehlikeli akım sınırları içinde olmadığı görülmektedir [18].

SONUÇ

Bu çalışmada, bir insanın bir yüksek gerilim hattı altında durması durumunda elektrik alanı etkisiyle vücudunda endüklenecek akım değerlerinin hesabı için bir yöntem ve bir örnek sunulmuştur. Sunulan yöntemin açık sınırlı problemlere uygulanmasındaki ve programlanmasındaki kolaylık ve yeterli doğruluk, bu tür problemlerin çözümü için çekici bir seçenek olduğunu göstermiştir. 380 kV'luk bir yüksek gerilim hattının altında duran bir insan için yapılan vücutta endüklenen akım hesabı, hem akımların mertebesini görmek hem de tehlike sınırları içinde olup olmadığını incelemek bakımından yararlı olmuştur. Sonuçta yapılan uygulamada hesaplanan akım değerlerinin tehlike sınırlarının altında kaldığı görülmüştür.

Benzetimde insanın modellenmesi geliştirilerek, hattın magnetik alanı ve çevre koşulları göz önüne alınarak bu inceleme genişletilebilir. Ayrıca hesapların ölçme sonuçları ile desteklenmesi ve karşılaştırılması bu konudaki bilgileri arttıracak ve insanları içinde bulunabileceği tehlikelere karşı bilgilendirecektir.

KAYNAKLAR

[1] E. J. Bridges, M. Preache, "Biological Influences of Power Frequency Electric Fields- A Tutorial Review From a

Physical and Experimental Viewpoint", Proc. IEEE, Vol.69, No.9, Sayfa 1092-1120, Sept. 1981.

[2] C. Polk, "Biological Effects of Low-Level Low, Frequency Electric and Magnetic Fields", IEEE Trans. on Education, Vol.34, No.3, Sayfa.243-249, Aug. 1991.

[3] J. G. Davis, W. R. Bennett ve diğerleri, "Health effects of low-frequency electric and magnetic fields", Environmental Science and Technology, Vol. 27, No.1, Sayfa 42-51, 1993.

[4] W. F. Horton, S. Goldberg, "Power Frequency Magnetic Fields and Public Health", CRC Press, Inc., Boca Raton, 1995.

[5] H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, "Elektrik ve manyetik alanların biyolojik etkileri ve kanser araştırmaları", Endüstri-Otomasyon Dergisi, Sayı: 4, Sayfa 88-92, Temmuz 1997.

[6] D. W. Deno, "Calculating Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines", IEEE Trans. on PAS, Vol.93, No.5, Sayfa 1458-1471, Sept./Oct. 1974.

[7] T. D. Bracken, "Field Measurements and Calculations of Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines", IEEE Trans. on PAS, Vol.95, No.2, Sayfa 1517-1527, March/April 1976.

[8] D. W. Deno, "Electrostatic Effect Induction Formulae", IEEE Trans. on PAS, Vol.94, No.5, Sayfa , Sept./Oct. 1975.

[9] D. W. Deno, "Currents Induced in The Human Body By High Voltage Transmission Line Electric Field - Measurement and Calculation of Distribution and Dose", IEEE Trans. on PAS, Vol.96, No.5, Sayfa 1517-1527 Sept./Oct. 1977.

[10] J. D. Tranen, G. L. Wilson, "Electrostatically Induced Voltages and Currents on Conducting Objects Under EHV Transmission Lines", IEEE Trans. on PAS, Vol.90, No.2, Sayfa 768-776, March/April 1971.

[11] H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss, "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", IEEE Trans. on PAS, Vol.93, Sayfa 1660-1667, 1974.

[12] N.H. Malik, "A Review of the Charge Simulation Method and its Applications", IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-Vol.24, Sayfa 3-20, Şubat 1989.

[13] H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, M. Özkaya, "Yüksek Gerilim Alan İncelemelerinde Yük Benzetim Yönteminin Kullanımı", Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İzmir, Sayfa 373-376, 16-22 Eylül 1991.

[14] N. Umurkan, H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, "Yüksek Gerilim Hatları Çevresinde Elektrik Alan Hesabı", Elektrik Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, Trabzon, Sayfa.1249-1253, 13-18 Eylül 1993.

[15] N. Umurkan, H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, "Ulusal Orta ve Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hatları Çevresinde Elektrik Alan Hesabı İçin Yeni Bir Yaklaşım", 3. Elektromekanik (Elmeksem'93) Sempozyumu, Bursa, Sayfa 154-160, 1-5 Aralık 1993.

[16] Ö. Kalenderli, H. Yıldırım, H. İsmailoğlu, "Yüksek Gerilim Hatları Çevresindeki Elektromagnetik Alanların Hesabı ve Ölçümü", 1995 Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı - BİYOMUT'95, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Sayfa.142-147, 4-5 Aralık 1995.

[17] M. Abdel-Salam, M. H. Abdallah, "Transmission-Line Electric Field Induction in Humans Using Charge Simulation Method", IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol.42, No.11, Sayfa 1105-1109, Nov. 1995.

[18] TS 3182, "İnsan vücudundan geçen elektrik akımlarının etkileri", Türk Standardları Enstitüsü, Nisan 1988.