

YÜKSEK GERİLİM HATLARI ÇEVRESİNDEKİ ELEKTROMAGNETİK ALANLARIN HESABI VE ÖLÇÜMÜ

Özcan Kalenderli, Hayri Yıldırım, Hasbi İsmailoğlu

*İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul*

Özetçe - Bu çalışmada, yüksek gerilim hatları çevresindeki elektromagnetik alanların yük benzetim yöntemi ile hesabı açıklanmış, 380 kV'luk bir hat için yapılan hesaplar verilmiştir. Çalışmanın deneysel bölümünde laboratuvarında hat modeli çevresinde ve İstanbul Kağıthane'de açık havada gerçek 380 kV'luk bir hat çevresinde yapılan elektrik ve magnetik alan ölçmelerinin sonuçları verilmiştir. Hesaplanan ve ölçülen elektromagnetik alan değerlerinin hattan uzaklıkla azaldığı görülmüş, alan düzeyleri hakkında bilgi verilerek elektromagnetik etkileşimin değerlendirilmesi için katkıda bulunulmuştur.

I. GİRİŞ

Enerjili bir hattın çevresinde elektromagnetik alanın varlığı kaçınılmazdır. Hattın gerilimi veya potansiyeli elektrik alanının, hattan akan akım da magnetik alanın kaynağıdır.

Elektriğin vazgeçilmez bir enerji kaynağı olması ve artan enerji gereksinimi, bu gereksinimi sağlama sorununu yaratmaktadır. Enerji kolay üretilebileceği yerde üretilip, gereksinimi olan yerlere iletilir ve dağıtılır. Bu durum enerjinin üretildiği yerler ile tüketildiği yerler arasında büyük uzaklıkların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Hem daha büyük güçleri iletmek hem de gerilim düşümü sorunundan etkilenmemek için yüksek gerilimli enerji iletim hatları kullanılmaktadır. Bu hatların tasarımında elektrik, mekanik, ekonomik gibi pekçok yan göz önüne alınmaktadır. Bu hatlar elektriksel yalıtımı yeterli, öncelikle elektriksel atlama olmayacak açıklıklara sahip olacak şekilde kurulurlar. Hatların elektromagnetik etkileşimi genelde geri planda kalır. Günümüzde çevre bilincinin giderek artması ve özen gösterilmesi bu etkileşimin özellikle insanlar açısından önemini öne çıkarmaktadır.

Bu çalışmada da ülkemizde bu konudaki çalışmalara katkıda bulunmak ve yüksek gerilim hatları çevresindeki yüksek frekanslı elektromagnetik alan düzeyleri hakkında bilgi vermek amacıyla yapılan kuramsal ve deneysel çalışma ve sonuçları açıklanmış, değerlendirmeye sunulmuştur.

2. YÜK BENZETİM YÖNTEMİ

Yük benzetim yöntemi, ilkesi iletken yüzeyindeki gerçek elektriksel yüklerin yarattığı alan yerine, iletken içine yerleştirilen ve benzetim yükü denilen noktasal, çizgisel veya başka tip yüklerin oluşturduğu alanın hesabına dayanan bir sayısal yöntemdir. Yöntemde benzetim yüklerinin tipi, sayısı ve yeri benzetimin doğruluğunu ve uygulamasını belirlemektedir. Genelde problemin geometrisine uygun elektriksel yüklerle çalışmak çözümlemeye kolaylık sağlar. Yüklerin değerleri, iletken yüzeyinde alınan belirli sayıda sınır noktasındaki potansiyelin iletkenin bilinen potansiyeline eşit olması koşulundan gidilerek bulunur. Buna göre yükler

$$[p]_{n \times n} \cdot [q]_{n \times 1} = [V]_{n \times 1} \quad (1)$$

lineer denklem sisteminden hesaplanır. Bu denklemde $[p]$ potansiyel katsayıları matrisi, $[q]$ bilinmeyen yüklerden oluşan vektör, $[V]$ sınır potansiyellerini içeren vektör, n yük sayısıdır. Bu denklemden yüklerin değerleri belirlendikten sonra herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektriksel alan bu yüklerin o noktada meydana getirdikleri potansiyel ve alanların süperpozisyonundan kolayca hesaplanabilir. Örneğin bir sonsuz çizgisel yükün, herhangi bir $A(x_A, y_A)$ noktasında meydana getirdiği potansiyel,

$$V_A = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_0}{r_A} \quad (2)$$

dir. Burada ϵ ortamın dielektrik sabiti, r_0 yükün, potansiyeli sıfır olan en yakın noktaya uzaklığı; r_A yükün, potansiyeli hesaplanacak noktaya uzaklığıdır.

Benzetim yükünün bulunduğu yerin koordinatları x_q , y_q ile gösterilirse, A noktasındaki elektrik alan şiddetinin x ve y bileşenleri ve mutlak değeri ise

$$E_{xA} = q(x_A - x_q) / r_A^2 \quad (3)$$

$$E_{yA} = q(y_A - y_q) / r_A^2 \quad (4)$$

$$E_A = \sqrt{E_{xA}^2 + E_{yA}^2} \quad (5)$$

denklemleriyle bulunur. Görüldüğü gibi yöntemin ilkesi basittir ve analitiktir. Yöntemin sayısal yöntem olması, ortaya çıkan denklem sisteminin genelde sayısal çözümlemeyi gerektirecek boyutlarda olmasından kaynaklanmaktadır.

Burada kısaca ilkesini verdiğimiz bu yöntem, açık sınırlı bir elektromagnetik alan problemi oluşturan hatlar çevresindeki alanın hesabına diğer pek çok analitik ve sayısal yöntemden daha kolaylıkla uygulanabilir.

3. 380 kV'LUK ÜÇ FAZLI BİR HAT ÇEVRESİNDEKİ ELEKTRİK ALANININ YÜK BENZETİM YÖNTEMİ İLE HESABI

Bu bölümde, yük benzetim yöntemi ile kompleks-sonsuz çizgisel yükler kullanarak yapılan, 380 kV'luk üç fazlı bir hat çevresindeki elektrik alan ve potansiyel dağılımı hesabı açıklanmıştır.

Şekil 1'de gösterilen hatta ilişkin aşağıdaki veriler kullanılmıştır:

Fazlar arası gerilim: $U=380$ kV
İletken yarıçapı: $r=16$ mm= $0,0152$ m
İletkenlerin yerden yüksekliği: $h=20,5$ m
İletkenler arası açıklık: $a=7,24$ m

Yüklerin koordinatları:

$H_1(-7,24;20,5)$
 $H_2(0;21)$
 $H_3(7,24;20,5)$

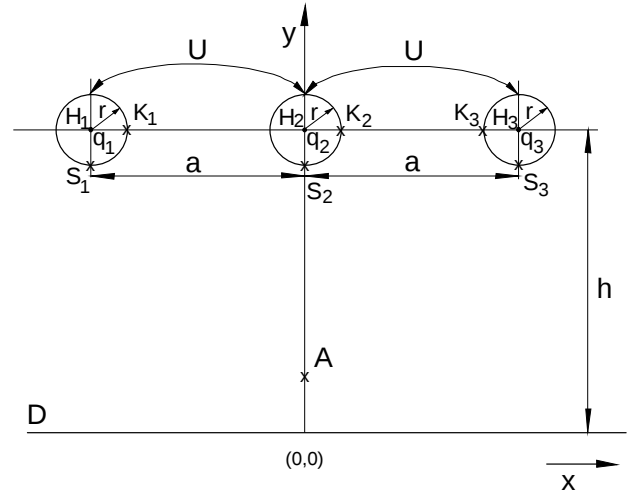
Sınır noktalarının koordinatları:

$S_1(-7,24;20,4848)$
 $S_2(0;20,4848)$
 $S_3(7,24;20,4848)$

Kontrol noktalarının koordinatları:

$K_1(-7,2248;20,5)$
 $K_2(0,0152;20,5)$
 $K_3(7,2248;20,5)$

Problemin çözümü sonsuz çizgisel benzetim yükleri ile yapılmıştır. Bunun için her bir faz iletkeninin eksenine bir sonsuz çizgisel yük yerleştirilmiştir. Bu yüklerin faz iletkeninin yüzeyinde alınan, potansiyeli iletkenin potansiyeline eşit olan ve sınır noktası adı verilen noktalarda yarattığı potansiyelden yararlanarak bu yüklerin değerleri belirlenmiştir.



Şekil 1. Üç fazlı hatta ilişkin hesap parametreleri.

3.1. Benzetim yüklerinin hesabı

Benzetim yüklerinin S_1 sınır noktasında oluşturdukları potansiyel

$$V_1 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{\overline{H_1 D}}{\overline{H_1 S_1}} + q_2 \ln \frac{\overline{H_2 D}}{\overline{H_2 S_1}} + q_3 \ln \frac{\overline{H_3 D}}{\overline{H_3 S_1}} \right) \quad (6)$$

dir. Eşitlikteki uzaklıklar

$$\overline{H_1 D} = \overline{H_2 D} = \overline{H_3 D} = h = 20,5 \text{ m}$$

olup diğer uzaklıklar koordinatları belli iki nokta arasındaki uzaklığı veren

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7)$$

bağıntısından yararlanarak

$$\overline{H_1 S_1} = \sqrt{(x_{H1} - x_{S1})^2 + (y_{H1} - y_{S1})^2} = 0,0152 \text{ m}$$

$$\overline{H_2 S_1} \cong 7,24 \text{ m}, \quad \overline{H_3 S_1} \cong 14,48 \text{ m}$$

dir. $\epsilon_o = 8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m, $\epsilon_r = 1$ (hava),

$$\epsilon = \epsilon_o \cdot \epsilon_r = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

alınarak

$$V_1 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{20,5}{0,0152} + q_2 \ln \frac{20,5}{7,24} + q_3 \ln \frac{20,5}{14,48} \right) = \frac{380}{\sqrt{3}} \cong 220 \text{ kV} \quad (8)$$

yazılır.

Benzetim yüklerinin S_2 sınır noktasında oluşturdıkları potansiyel

$$V_2 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{\overline{H_1 D}}{\overline{H_1 S_2}} + q_2 \ln \frac{\overline{H_2 D}}{\overline{H_2 S_2}} + q_3 \ln \frac{\overline{H_3 D}}{\overline{H_3 S_2}} \right) \quad (9)$$

$$\overline{H_1 S_2} \cong 7,24 \text{ m}, \overline{H_2 S_2} = 0,0152 \text{ m}, \overline{H_3 S_2} \cong 7,24 \text{ m}$$

$$V_2 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{20,5}{7,24} + q_2 \ln \frac{20,5}{0,0152} + q_3 \ln \frac{20,5}{7,24} \right) = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{j2\pi/3} = -110 + j190,5 \text{ kV} \quad (10)$$

Benzer şekilde benzetim yüklerinin S_3 sınır noktasında oluşturdıkları potansiyel

$$V_3 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{\overline{H_1 D}}{\overline{H_1 S_3}} + q_2 \ln \frac{\overline{H_2 D}}{\overline{H_2 S_3}} + q_3 \ln \frac{\overline{H_3 D}}{\overline{H_3 S_3}} \right) \quad (11)$$

$$\overline{H_1 S_3} \cong 14,48 \text{ m}, \overline{H_2 S_3} \cong 7,24, \overline{H_3 S_3} \cong 0,0152 \text{ m}$$

$$V_3 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{20,5}{14,48} + q_2 \ln \frac{20,5}{7,24} + q_3 \ln \frac{20,5}{0,0152} \right) = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{j4\pi/3} = -110 - j190,5 \quad (12)$$

(8), (10), (12) denklemleri $[p][q]=[V]$ biçimde yazılır ve çözülürse benzetim yükleri

$$\begin{aligned} q_1 &= 1,88312 \cdot 10^{-6} - j1,690877 \cdot 10^{-7} \text{ C} \\ q_2 &= -1,00681 \cdot 10^{-6} + j1,74379 \cdot 10^{-6} \text{ C} \\ q_3 &= -7,951238 \cdot 10^{-7} - j1,71533 \cdot 10^{-6} \text{ C} \end{aligned} \quad (13)$$

kompleks olarak bulunur.

3.2. Bir noktadaki potansiyelin ve alanın hesabı

Benzetim yüklerinin değeri bu şekilde hesaplandıktan sonra herhangi bir noktadaki potansiyelin ve alanın hesabı kolaydır. Örneğin orta fazın altında yerden 1,5 m yükseklikteki $A(0;1,5)$ noktasındaki potansiyel

$$V_A = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{\overline{H_1 D}}{\overline{H_1 A}} + q_2 \ln \frac{\overline{H_2 D}}{\overline{H_2 A}} + q_3 \ln \frac{\overline{H_3 D}}{\overline{H_3 A}} \right)$$

$$\overline{H_1 A} = \overline{H_3 A} = \sqrt{(x_{H1} - x_A)^2 + (y_{H1} - y_A)^2} = 21,27 \text{ m}$$

$$\overline{H_2 A} = y_{H2} - y_A = 20 \text{ m}$$

$$V_A = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{20,5}{21,27} + q_2 \ln \frac{20,5}{20} + q_3 \ln \frac{20,5}{21,27} \right)$$

$$V_A = 2,428 e^{-j120^\circ} \text{ kV}$$

$A(0;1,5)$ noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_A = E_{xA} \dot{i}_x + E_{yA} \dot{i}_y \quad (15)$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{xA} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{x_{H1} - x_A}{\overline{H_1 A}^2} q_1 + \frac{x_{H2} - x_A}{\overline{H_2 A}^2} q_2 + \frac{x_{H3} - x_A}{\overline{H_3 A}^2} q_3 \right)$$

$$E_{xA} = 0,9728 \text{ kV/cm}$$

$$E_{yA} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{y_{H1} - y_A}{\overline{H_1 A}^2} q_1 + \frac{y_{H2} - y_A}{\overline{H_2 A}^2} q_2 + \frac{y_{H3} - y_A}{\overline{H_3 A}^2} q_3 \right)$$

$$E_{yA} = 0,1073$$

A noktasındaki elektrik alan şiddetinin mutlak değeri

$$E_A = \sqrt{E_{xA}^2 + E_{yA}^2}$$

$$E_A = 0,9787 \text{ kV/cm}$$

bulunur.

4. DENEYLER

Bu bölümde, yüksek gerilim hatları çevresindeki elektromagnetik alanların ölçüm yoluyla belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Bu amaçla laboratuvar içinde hat modeli çevresinde ve açık havada gerçek hat çevresinde iki grup ölçme yapılmıştır. Aşağıda yapılan deneyler ve sonuçları verilmiştir.

4.1. Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneyleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Deneyleri gerçekleştirebilmek için laboratuvar içinde 66 kV'luk bir hava hattı modeli kurulmuştur. Bunun için bir demir direk modeline 6 adet zincir izolatöründen oluşan izolatör zinciri ve bunun ucuna da yere paralel olarak yerleştirilmiş hava hattını temsilen 4 m uzunluğunda, 8 mm çapında dolu bakır iletken bağlanmıştır. Hattın yerden yüksekliği 2,20 m'dir. Bu hatta, laboratuvarında bulunan 300 kV'luk 50 kVA gücünde bir fazlı bir deney transformatöründen yüksek gerilim uygulanmıştır. Uygulanan deney gerilimi, bir kumanda masasından ayarlanmış ve deney transformatörünün birincil tarafına bağlı bir voltmetre ile ölçülmüştür.

Elektromagnetik alan ölçmeleri, 0,135-30 MHz aralığında parazit gerilimlerini ve elektrik ve magnetik parazit alanlarını ölçebilen bir radyoparazit ölçü aleti ile yapılmıştır. Bu ölçü aleti, dar bantlı kısmi boşalma ölçü aleti veya RIV-metre gibi adlarla da tanınmaktadır. Kullanılan ölçü aletinin band genişliği $9 \text{ kHz} \pm 10\%$, giriş empedansı $Z_i = 60 \Omega$ ve temel gerilim düzeyi $U_t = 0,4 \mu\text{V}$ 'tur. Alet hem şebekeden beslemeli hem de pille çalışabilmektedir. Ayrıca alet, yayımlanan ve iletilen parazitlere karşı çift ekran korumalı ve besleme filtrelidir.

Ölçü aleti büyüklükleri desibel (dB) cinsinden ölçmektedir. Aletten desibel (dB) olarak okunan değerler, istenirse aşağıdaki bağıntılar yardımıyla ölçülmek istenen alan büyüklük birimine çevrilebilir:

Magnetik alan

$$H[\text{dB}] = 20 \log(H_m/H_t) \quad (16)$$

Elektrik alanı

$$E[\text{dB}] = 20 \log(E_m/E_t) \quad (17)$$

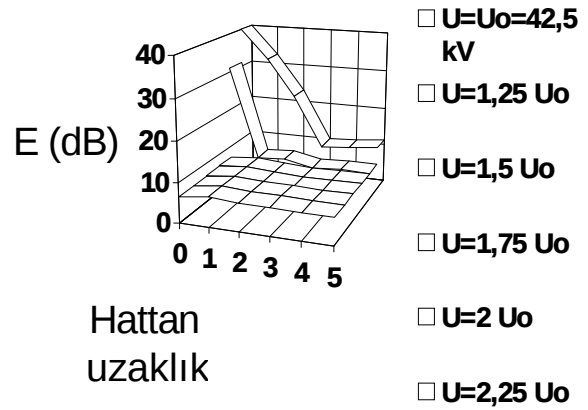
Gerilim

$$U[\text{dB}] = 20 \log(U_m/U_t) \quad (18)$$

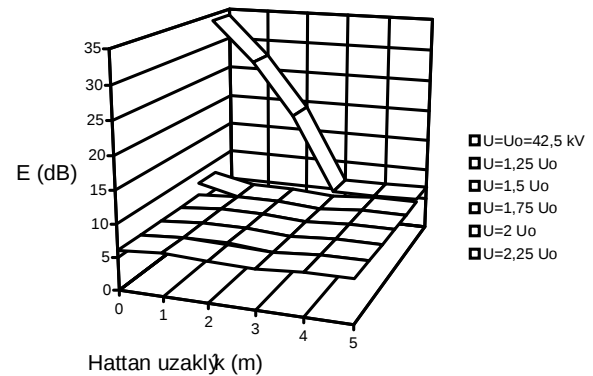
Elektrik alanı ölçmelerinde boyu 2,5 metre uzayabilen 0,4 m uzunluğunda bir çubuk anten;

magnetik alan ölçmeleri ise çapı $r=0,6 \text{ m}$ olan bir halka anten kullanılmıştır. Ölçmeler önce model hattın tam altında, daha sonra hattan değişik uzaklıklarda, 0,5 MHz ile 1 MHz ölçme frekanslarında gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 2'de 0,5 MHz ölçme frekansında, Şekil 3'te de 1 MHz ölçme frekansında hatta uygulanan gerilim parametre alınarak, yerden 1 m yükseklikte desibel olarak ölçülen elektrik alanının hattan olan uzaklıkla değişimleri gösterilmiştir.

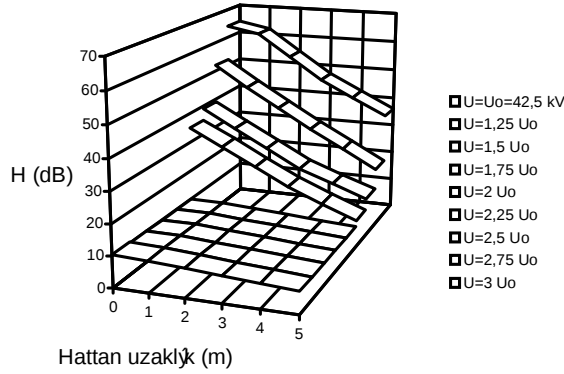


Şekil 2. Yerden 1 m yükseklikte ve 0,5 MHz ölçme frekansı için farklı hat gerilimlerinde hattan olan uzaklıkla elektrik alan şiddetinin değişimi.



Şekil 3. Yerden 1 m yükseklikte ve 1 MHz ölçme frekansı için farklı hat gerilimlerinde hattan olan uzaklıkla elektrik alan şiddetinin değişimi.

Şekil 4'te 1 MHz ölçme frekansında hatta uygulanan gerilim parametre alınarak, yerden 1 m yükseklikte desibel olarak ölçülen magnetik alanının hattan olan uzaklıkla değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Yerden 1 m yükseklikte ve 1 MHz ölçme frekansı için farklı hat gerilimlerinde hattan olan uzaklıkla magnetik alan şiddetinin değişimi.

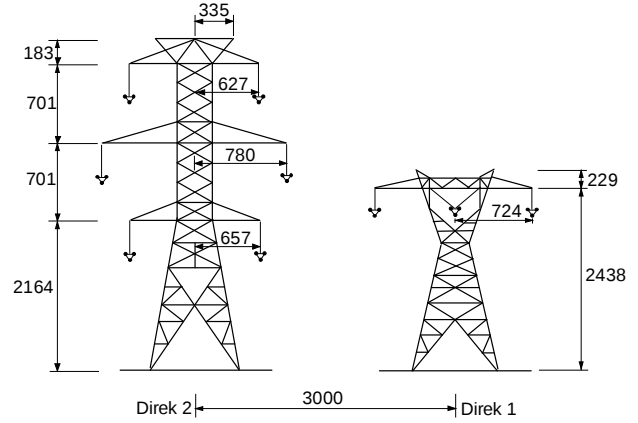
4.2. Açık Hava Deneyleri

Bu bölümde de açık havada gerçek hat çevresinde yapılmış olan deneyler ve sonuçları açıklanacaktır.

Açık havada gerçek hatlar çevresinde yapılan ölçmeler, İstanbul-TEM otoyolu üzerinde, Kağıthane-Arıcılar mahallesi üzerinden geçen 380 kV'luk indirici merkez girişindeki hatlar altında yapılmıştır. Ölçmelerde laboratuvar ölçmelerinde kullanılan ölçme donanımı kullanılmıştır.

Ölçmelere, 28.10.1994 Cuma günü saat 15:30'da başlanmış ve saat 17:25'de bitirilmiştir. Ölçme yerindeki hava basıncı 764 mmHg ve hava sıcaklığı $t = 20^{\circ}\text{C}$ olarak kaydedilmiştir. Ölçmelerin yapıldığı hatlara ilişkin taşıyıcı direkler Şekil 5'te görülmektedir. Faz hatları üçlü demet iletkenli olup hatların üzerinde koruma iletkenleri de vardır.

Ölçmelere Şekil 5'te görülen 1 numaralı direkdeki hattın orta fazının altından başlanmış ve bu başlangıç noktasından itibaren sağa doğru, her 5 metrede bir olmak üzere, 10 noktada daha ölçme yapılmıştır.



Şekil 5. Ölçmelerin yapıldığı hatların ve direklerin durumu.

Bu 10 noktadaki ölçmeden sonra, eksen 1 numaralı direğin ekseninden yaklaşık 30 m sol tarafında kalan 2 numaralı direğin orta noktasına gelinmiş ve bu noktadan itibaren sola doğru yine 5 m aralıklarla 12 noktada ölçme yapılmış ve değerler kaydedilmiştir. Son olarak, iki direk arasında 5'er m aralıklarla 5 noktada ölçme yapılmıştır. Ölçmelerin bu şekilde direklerin eksenleri etrafında eşit sayıda yapılamayışının sebebi, arazinin düzgün bir yapı göstermeyip çevrenin engebeli olmasıdır.

Ölçmeler sonucunda elde edilen değerler Tablo 1, 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 1. 1 numaralı direğin orta fazının altından 5'er metre aralıklarla sağa doğru, iki farklı frekansta ölçülen elektrik ve magnetik alan şiddeti değerlerinin değişimi.

Ölçme Noktası	f=1 MHz		f=0,5 MHz	
	E (dB)	H (dB)	E (dB)	H (dB)
1	17,0	36,0	17,0	36,0
2	15,0	36,0	15,0	36,5
3	13,0	35,0	12,5	35,0
4	13,0	33,0	11,5	33,0
5	12,0	32,0	11,5	32,0
6	11,0	31,5	11,0	30,0
7	9,5	32,0	10,0	27,8
8	9,7	29,5	10,0	25,5
9	16,0	30,0	11,5	28,8
10	15,0	29,0	10,5	29,5

Tablo 2. 2 numaralı direğin ekseninden itibaren sola doğru 5'er metre aralıklarla iki farklı frekansta ölçülen elektrik ve magnetik alan şiddeti değerlerinin değişimi.

Ölçme Noktası	f=1 MHz		f=0,5 MHz	
	E (dB)	H (dB)	E (dB)	H (dB)
20	22,2	37,0	27,8	48,6
21	26,5	37,8	24,0	48,0
22	25,0	42,5	21,0	47,5
23	25,0	43,0	20,0	46,8
24	24,3	41,8	19,6	45,0
25	22,2	44,5	17,0	44,1
26	18,8	42,2	14,5	42,0
27	12,5	38,8	9,7	37,8
28	11,9	34,0	7,6	34,6
29	9,9	31,0	6,8	31,4
30	9,3	31,5	6,0	29,1
31	14,0	31,5	6,9	28,5

Tablo 3. 2 numaralı direğin ekseninden itibaren sağa doğru 5'er metre aralıklarla iki farklı frekansta ölçülen elektrik ve magnetik alan şiddeti değerlerinin değişimi.

Ölçme Noktası	f=1 MHz		f=0,5 MHz	
	E (dB)	H (dB)	E (dB)	H (dB)
40	22,0	45,6	31,0	52,5
41	20,3	48,0	30,5	49,2
42	21,0	48,5	30,0	45,9
43	21,5	48,5	29,5	43,6
44	21,0	48,2	27,5	43,5
45	21,5	48,8	27,0	44,8
46	22,2	48,8	26,5	45,0
47	22,1	48,5	24,8	43,9

5. SONUÇLAR

Yük benzetim yöntemiyle kuramsal olarak yapılan hesaplardan ve laboratuvarında ve açık havada yapılan deneylerden elektromagnetik alanın hattan uzaklaştıkça hızla azaldığı görülmüştür. Hesaplanan ve ölçülen alan değerleri 380 kV'luk bir yüksek gerilim hattı çevresindeki alan değerlerinin mertebesi hakkında bilgi vermektedir. Bu bilgilerin, elektriksel atlamaya karşı güvenlik açıklıkları tanımlı hatlar için ayrıca elektromagnetik etkileşim açıklıklarının tanımlanmasında yararlanılabileceğini düşünüyoruz.

KAYNAKLAR

- [1] N. Umurkan, H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, "Yüksek gerilim hatları çevresinde elektrik alan hesabı", Elektrik Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, Sayfa 1249- 1253, Trabzon, Eylül 1993.
- [2] N. Umurkan, H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, "Ulusal orta ve yüksek gerilimli enerji iletim hatları çevresinde elektrik alan hesabı için yeni bir yaklaşım", ELMEKSEM'93 III. Elektromekanik Sempozyumu, Sayfa 154-160, Bursa, Aralık 1993.
- [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] 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.
- [5] T.D. Bracken, "Field Measurements and Calculations of Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-Vol.95, Sayfa 494-504, Nisan 1976.