

151329

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ FREKANSLI ELEKTRİK ALANLAR VE
BİYOLOJİK ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Zühal ÖZCAN
(504001107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih: 20 Mayıs 2004

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Kevork MARDİKYAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Aydoğan ÖZDEMİR (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Cevdet IŞIK (İ.T.Ü.)

K. Mardikyan
Afderi
Ceyhan

151329

MAYIS 2004

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmamı yöneten ve bu tezi hazırlarken bana yardımcı olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN'a, çalışmalarım sırasında değerli katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili anne ve babama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2004

Zühal ÖZCAN



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji iletimi	1
1.2. Enerji İletim Hatlarında Kullanılan İletkenler ve Özellikleri	2
1.3. Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler	5
2. ELEKTRİK ALAN TEMEL KAVRAMLARI VE ANALİZ YÖNTEMLERİ	8
2.1. Elektrik Alan Temel Kavramları	8
2.1.1. Elektrik Yükü	8
2.1.2. Coulomb Yasası	8
2.1.3. Deplasman (Elektriksel Akı Yoğunluğu)	8
2.1.4. Elektriksel Akı	9
2.1.5. Gauss Teoremi	9
2.1.6. Poisson Denklemi	10
2.1.7. Laplace Denklemi	10
2.2. Elektrik Alan Analiz Yöntemleri	10
2.2.1. Analitik Yöntemler	10
2.2.2. Deneysel Yöntemler	11
2.2.2.1. Yarı İletken Kağıt Yöntemi	11
2.2.2.2. Elektrolitik Banyo Yöntemi	11
2.2.3. Sayısal Yöntemler	12
2.2.3.1. Monte Carlo Yöntemi	12
2.2.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	12
2.2.3.3. Sonlu Farklar Yöntemi	12
2.2.3.4. Moment Yöntemi	13
2.2.3.5. Yük Benzetim Yöntemi	13
3. YÜK BENZETİM YÖNTEMİ İLE ALAN HESABI	14
3.1. Yük Benzetim Yönteminin Temel İlkesi	14
3.2. Benzetim Yükleri	17

3.2.1. Noktasal Yük	17
3.2.2. Sonsuz Çizgisel Yük	20
3.2.3 Sonlu Çizgisel Yük	22
3.2.4. Halkasal Yük	24
3.3. Üç Fazlı 154 kV'luk Bir Hat Çevresindeki Potansiyel Ve Elektrik Alanın Yük Benzetim Yöntemiyle Hesabı	26
3.4. Üç Fazlı 380 kV'luk Bir Hat Çevresindeki Potansiyel Ve Elektrik Alanın Yük Benzetim Yöntemiyle Hesabı	37
4. ELEKTRİK ALANLARIN BİYOLOJİK ETKİLERİ	52
4.1. ELF Elektrik Alanların Canlılar Üzerine Biyolojik Etkileri	53
4.2. Epidemiolojik Çalışmalar	56
5. GÜVENLİK STANDARTLARI	58
5.1.Çeşitli Ülkelerde Yayınlanan Güvenlik Standartları	58
5.1.1. Almanya	58
5.1.2. Japonya	59
5.1.3. Amerika Birleşik Devletleri	60
5.1.4. Rusya	61
5.1.5. Diğer Ülkeler	62
5.2.Türkiye'deki Durum	63
6. SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	69
EK A. BİLGİSAYAR PROGRAMI KODLARI	71
ÖZGEÇMİŞ	76

KISALTMALAR

ROW	: Hat güzergahının genişliği (Right-of-way)
ELF	: Çok Düşük Frekans (Extremely Low Frequency)
EHV	: Çok Yüksek Gerilim (Extra High Voltage)



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Çelik Alüminyum İletkenlerin Akım Taşıma Kapasiteleri.....	4
Tablo 4.1. Taşıma Hatlarının Oluşturduğu Elektrik Alan Değerlerinin %50'ye İndiği Uzaklıklar	54
Tablo 4.2. Taşıma Hattının Altında Bulunan İnsan Vücudunda İndüklenen Elektrik Alan Değerleri	54
Tablo 4.3. Yüksek Gerilim Hatları Etrafında Yapılan Araştırma Sonuçları	55
Tablo 5.1. ELF elektrik alan sınır değerleri için hesaplamalarda kullanılan parametre değerleri	58
Tablo 5.2. Şemsiyede indüklenen çeşitli gerilimler için yanakta hissetme	59
Tablo 5.3. 275 kV iletim hattı altında şemsiyeden hissedilen insanların sayısı	60
Tablo 5.4. ABD'de maksimum elektrik alan değerleri ve hat güzergahı genişlikleri	60
Tablo 5.5. ABD'de iletim hatları altında tavsiye edilen elektrik alan şiddetinin sınır değerleri	61
Tablo 5.6. SSCB'de 500 kV ve üzeri, donanımlarda çalışanlar için elektrik alan maruziyet sınır değerleri	62
Tablo 5.7. 50 Hz Elektrik Alanlara Maruz Kalma Referans Seviyeleri	63
Tablo 5.8. Türkiye için önerilen elektrik alanın maksimum müsaade edilebilir seviyeleri	64
Tablo 5.9. Güvenli Yaklaşım İçin Gerekli Düşey Mesafeler	65
Tablo 5.10. Güvenli Yaklaşım İçin Gerekli Yatay Mesafeler	65

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Enerji Taşıma Sistemi	2
Şekil 1.2 : Çelik Alüminyum Örgülü İletken Tipleri	3
Şekil 1.3 : 154 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler	6
Şekil 1.4 : 380 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler	7
Şekil 3.1 : Akış diyagramı	16
Şekil 3.2 : Kartezyen koordinatlarda noktasal yük	19
Şekil 3.3 : Sonsuz Uzun Çizgisel Yük	20
Şekil 3.4 : Sonsuz Çizgisel Yük ve A noktası.....	21
Şekil 3.5 : Sonlu çizgisel yük ve A noktası	22
Şekil 3.6 : Merkezi z ekseninde bulunan halkasal yük ve A noktası	24
Şekil 3.7 : 154 kV'luk iletim hattı	26
Şekil 3.8 : 154 kV'luk hattın elektrik alan – uzaklık eğrisi	36
Şekil 3.9 : 380kV'luk ikili demet iletkenli enerji iletim hattı boyutları	37
Şekil 3.10 : 380 kV'luk iletim hattı için elektrik alan – mesafe eğrisi	51
Şekil 4.1 : İnsan, domuz ve farenin yüzeyi üzerindeki en yüksek nokta için elektrik alan değerleri	56
Şekil 5.1 : 66, 154 ve 380 kV üç faz sistem için elektrik alan – mesafe eğrisi	64

SEMBOL LİSTESİ

D	: Deplasman (Elektriksel akı yoğunluğu)
E	: Elektrik alan şiddeti
F	: Kuvvet
f	: Frekans
$f_{x,y,z,r,z}$	: Alan katsayıları
I	: Akım
λ	: Çizgisel yük yoğunluğu
K	: İntegral sabiti
N	: Sınır değer parametresi
p_{ij}	: Potansiyel katsayıları
q, q'	: Yük değeri
q_j	: j. yükün değeri
Q	: Toplam yük değeri
r	: Yarıçap
R	: Yük kaynağına uzaklık
S	: Kesit
t	: Sıcaklık
u_x, u_y, u_z, u_r	: Birim vektörler
Δ	: Laplace operatörü
ϵ_0	: Boşluğun dielektik sabiti
ϵ_r	: Bağlı dielektik sabiti
ϵ	: Ortamın dielektik sabiti
ρ	: Hacimsel yük yoğunluğu
Φ	: Elektriksel akı
x_A, x_B, x_C	: A noktasının koordinatları
x_Q, x_Q, x_Q	: Q yükünün koordinatları
V	: Potansiyel
V_i	: i. noktanın potansiyel değeri
Y_p	: Alan hesaplanan yükseklik

GÜÇ FREKANSLI ELEKTRİK ALANLAR VE BİYOLOJİK ETKİLERİ

ÖZET

Enerji iletim hatlarının çevresinde, yüksek gerilimden dolayı elektrik alanları meydana gelmektedir. Güç frekanslı bu alanların çevredeki insanlar, hayvanlar ve bitki örtüsü üzerindeki biyolojik etkilerinin belirlenebilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlardan yararlanılarak, çeşitli ülkelerde elektrik alanlarına sınır değerler getirilmiştir. Enerji iletim hatlarının planlanmasında en uygun düzenin belirlenmesi için elektrik alan hesabının yapılması büyük önem taşımaktadır.

Bu tezin birinci bölümünde, elektrik enerjisi iletimi, iletim hatları, iletkenler ve direkler anlatılmıştır. 154 kV'luk ve 380 kV'luk enerji iletim hatlarına ait direk şekilleri örnek olarak verilmiştir.

İkinci bölümde, elektrik alan analiz yöntemleri incelenmiş ve elektrik alan temel kavramları verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yük benzetim yönteminin temel ilkesi anlatılmış ve en sık kullanılan benzetim yüklerinin potansiyel katsayıları ve alan ifadeleri verilmiştir. İki boyutlu kartezyen koordinat sisteminde yük benzetim yöntemi kullanılarak 154 kV ve 380 kV'luk iletim hatları çevresindeki potansiyel ve elektrik alan hesaplanmıştır.

Dördüncü bölümde, elektrik alanların biyolojik etkileri için yapılan araştırma sonuçları ve epidemiyolojik çalışmalar verilmiştir.

Beşinci bölümde, Almanya, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Rusya ve diğer ülkelerdeki standartlar verilmiştir. Ayrıca, Türkiye'deki durum değerlendirilmiş ve güvenlik seviyeleri belirtilmiştir.

Yüksek gerilim iletim hatlarının etrafında oluşan elektrik alanın hesaplanabilmesi için Yük Benzetim Yöntemi kullanılarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bilgisayar programı ile Türkiye'de kullanılan 154 kV'luk ve 380 kV'luk iletim hatlarının etrafında oluşan elektrik alan değerleri hesaplanmıştır.

POWER FREQUENCY ELECTRIC FIELDS AND BIOLOGICAL EFFECTS

SUMMARY

Electric fields occur around energy transmission lines because of high voltage. Researchers have been studying to determine the biological effects on human, animals and plants of these power frequency fields. By using the results obtained from the studies on this subjects, the limitation of the electric fields are determined in many countries. In the stage of the planning of power transmission lines, the calculation of electric fields is very important to determine the most convenient configuration.

In the first chapter of this thesis, electrical energy transmission, transmission lines, conductors and towers are described. 154 kV and 380 kV high voltage towers are figured.

In the second chapter, the electrical fields analysis methods are investigated and the basic electric fields equations are given.

In the third chapter, the basic structure of The Charge Simulation Method is described and the commonly used potential coefficients and electric fields of the simulation charges are presented. In 2-D cartesian coordinates system, The Charge Simulation Method is used to calculate the electric fields around 154 kV and 380 kV transmission lines.

In the fourth chapter, the research results on the biological effects of electric fields and epidemiological studies are investigated.

In the fifth chapter, the standards in Germany, Japan, United States of America, Russia and other countries are given. Furthermore, the situation in Turkey is summed up and security limits are presented.

To calculate electric fields around high voltage transmission lines, a computer programme is developed by using Charge Simulation Method. Using the computer programme, electric fields around 154 kV and 380 kV transmission lines are calculated in Turkey.

1. GİRİŞ

Sosyal ve ekonomik kalkınmaya paralel olarak gelişen hayat standardı ve teknolojik ilerlemeler çerçevesinde ve nüfus artışına paralel olarak artan elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanabilmesi için, elektrik alanı oluşturan cihazlar günlük yaşantımızda daha fazla yer almakta, elektrik enerjisi iletim ve dağıtım tesislerinin uzunlukları ile transformatör merkezleri sayıları gün geçtikçe artmaktadır. Artan elektrik enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine büyük miktarda enerjinin iletilmesi gerekmektedir.

Büyük güçlerin, daha yüksek verimle uzak noktalara taşınmasında yüksek gerilim kullanılmaktadır. Enerji iletim hattının gerilim değerine bağlı olarak çevresinde meydana getirdiği elektrik alan değeri de yüksek olmaktadır.

Enerji iletim hatlarının çevresinde alçak frekanslı elektrik alanların, çevre ve insan sağlığı açısından bir takım risklere yol açtığı, bilim adamları arasında tartışmalara ve sonucunda çeşitli araştırmalar yapılmasına neden olmuştur [1].

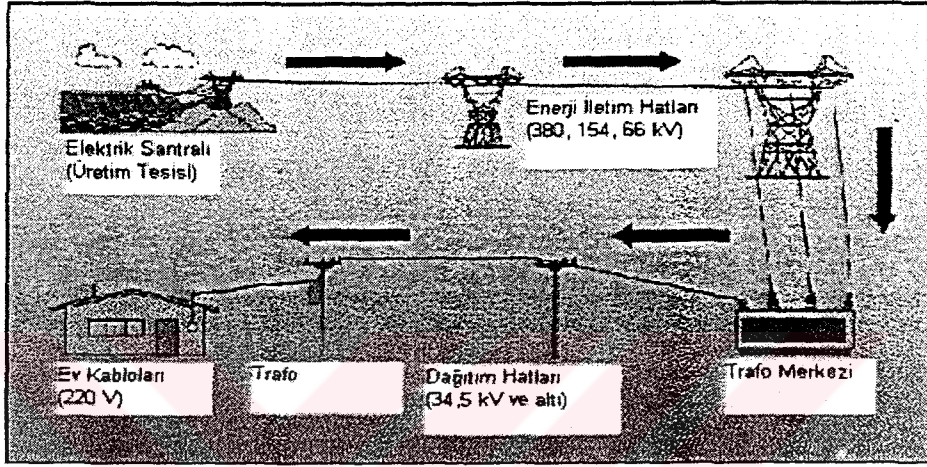
1.1. Enerji İletimi

Türkiye’de elektrik enerjisi genel olarak doğu ve güneydoğu bölgelerinde üretilmekte, tüketim ise sanayiinin ve yerleşimin daha yoğun olduğu batı bölgelerinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle enerjinin, genel olarak, doğudan batıya iletilmesi enerji iletim hatları ile gerçekleştirilmektedir.

Ülkemizde elektrik, genel olarak iki gerilim düzeyinde taşınmaktadır. Bunlardan ilki yüksek gerilim düzeyi olarak tanımlanan 66 kV, 154 kV ve 380 kV gerilimli iletim hatları grubudur. Bu hatlar, üretim merkezlerindeki elektrik enerjisini, tüketim merkezlerindeki ana transformatör merkezlerine taşırlar. Ancak 66 kV gerilimli hatlar artık ülkemizde uzun bir süreden beri tesis edilmemektedir. İkinci gerilim düzeyi ise orta gerilim hattı olarak tanımlanan 34,5 kV ve daha düşük gerilimli 6 kV,

10 kV ve 15 kV gerilimli dağıtım hatlarıdır. Bu hatlar, transformatör merkezlerindeki elektrik enerjisini daha düşük gerilimli transformatörlere ve/veya evlerimize ve iş yerlerimize ulaştırmaktadır. Şematik olarak Şekil 1.1.'de gösterilmiştir [2].

Ülkemizde mevcut yüksek gerilim hattı uzunluğu 38.295 km, orta gerilim hattı uzunluğu 285.094 km ve alçak gerilim hattı uzunluğu ise 407.000 km'dir. Ayrıca 485 adet yüksek gerilim transformatör merkezi ve 204.119 adet orta gerilim transformatör merkezi bulunmaktadır (Mayıs 2001) [2].



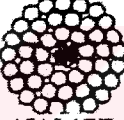
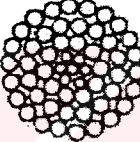
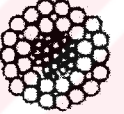
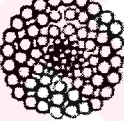
Şekil 1.1. Enerji Taşıma Sistemi

1.2. Enerji İletim Hatlarında Kullanılan İletkenler

Enerji iletim hatlarında kullanılan iletkenlerin enerji taşınması ve mekanik açıdan uygun seçilmesi gereklidir. İletkenler, gerekli esnekliği sağlamak ve askı noktalarında oluşan titreşimler nedeniyle yıpranmalarını, iletkenin yorulmasını ve kopmasını önlemek amacıyla spiral şeklinde sarılmış örgülü olarak yapılırlar.

Spiral şeklinde örgülü yapılmış iletkenlerde, her bir damarın yüzeyinde meydana gelen kir ve oksit tabakasından dolayı akım, damardan damara değil, spiral sarılmış örgünün içinde akar. Bu nedenle örgülü iletkenlerin elektriksel hat sabitlerinden direnç ve empedansları dolayısıyla endüktif reaktansları aynı kesit ve cinsteki iletkenlere göre daha büyüktür. Endüktans artışını azaltmak için çok katlı örgülü iletkenlerde damarlar, en dıştaki katın yönü daima saat yönünde olacak şekilde birbirini izleyen katlarda ters yönde sarılırlar [3].



 6Al/1Fe	 7Al/1Fe	 8Al/1Fe	 18Al/1Fe
 3Al/4Fe	 6Al/7Fe	 7Al/7Fe	 8Al/7Fe
 10Al/7Fe	 12Al/7Fe	 14Al/7Fe	 18Al/7Fe
 22Al/7Fe	 24Al/7Fe	 26Al/7Fe	 30Al/7Fe
 42Al/7Fe	 45Al/7Fe	 48Al/7Fe	 54Al/7Fe
 14Al/19Fe	 16Al/19Fe	 30Al/19Fe	 54Al/19Fe

Şekil 1.2. Çelik Alüminyum Örgülü İletken Tipleri

Alüminyumun iletkenliğinden çeliğin dayanıklılığından yararlanmak üzere çift metalli St-Al (çelik özlü alüminyum) iletkenler yapılmıştır. Örgülü yapılan bu iletkenlerde Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi ortada galvanizli çelik göbek, etrafında da alüminyum damarlar bulunur. Damarların tamamı aynı çap ve kesittedir [3].

Hava hatlarında kullanılan iletkenlerin cinsi ne olursa olsun kesit değerine göre ancak belirli akım değerlerini taşıyabilirler. Teorik olarak hava hattı iletkenlerinden çıplak oldukları için akkor hale gelinceye kadar akım geçirmek mümkünse de belirli akım değerlerinin aşılması durumunda RI^2 't joule'lük elektrik enerjisi $0.24 RI^2$ 't kalori ısıya dönüşmesi durumunda iletkenler ortam sıcaklığını aşacak şekilde ısınmaya başlarlar. St-Al iletkenlerin akım taşıma kapasiteleri Tablo 1.1.'de gösterilmiştir [3].

Tablo 1.1. Çelik Alüminyum İletkenlerin Akım Taşıma Kapasiteleri

NORM ADI	AWG ya da C Mil	KESİT[mm ²]		TOPLAM ÇAP [mm]	DİRENÇ [Ohm/km]			AMPER(*) KAPASİTESİ [A]
		ALÜMİNYUM	TOPLAM		DC 20°C	AC		
						25°C	75°C	
SWAN	4	21.16	24.71	6.35	1.327	1.355	1.715	145
SWANATE	4	21.16	26.52	6.63	1.313	1.338	1.738	145
ROBİN	1	42.39	49.38	9.02	0.662	0.676	0.889	220
RAVEN	1/0	53.48	62.39	10.11	0.524	0.538	0.715	255
PİGEON	3/0	85.03	99.23	12.75	0.330	0.338	0.469	340
PENGUİN	4/0	107.23	125.10	14.30	0.262	0.270	0.384	390
PARTRIDGE	266800	135.16	157.16	16.31	0.210	0.215	0.257	490
OSTRICH	300000	152.00	176.77	17.27	0.187	0.190	0.228	530
ORİOLE	336400	170.45	210.26	18.82	0.165	0.169	0.202	575
LARK	397500	201.42	248.39	20.47	0.140	0.143	0.172	640
HAWK	477000	241.68	281.03	21.79	0.117	0.120	0.144	720
EAGLE	556500	282.00	347.81	24.21	0.100	0.103	0.123	800
TEAL	605000	306.58	376.45	25.25	0.092	0.094	0.113	840
EGRET	636000	322.26	295.74	25.88	0.087	0.090	0.108	870
REDWİNG	715500	362.58	445.22	27.46	0.078	0.080	0.095	940
DRAKE	795000	402.84	468.45	28.14	0.070	0.073	0.087	990
CANARY	900000	456.06	515.16	29.51	0.062	0.065	0.077	1050
CARDİNAL	954000	483.42	546.22	30.39	0.058	0.061	0.073	1090
GRACKLE	1192500	604.26	688.77	33.86	0.047	0.050	0.059	1260
MARTİN	1351500	684.84	771.55	36.17	0.042	0.044	0.052	1370
PARROT	1510500	765.42	862.32	38.25	0.037	0.040	0.047	1470

* :Bu değerler güneş etkisi yokken emisyon faktörü E=0.5, rüzgar hızı 0.6 m/s, çevre sıcaklığı 25°C ve iletken sıcaklığı max. 75°C için verilmiştir.

Bu sıcaklık değerinin 75 - 80 °C'yi aşması durumunda malzeme ısınma dolayısıyla tavanır, soğuk haddelme ile kazandırılan mukavemetini gösteremez duruma gelir ve kopar. Bu nedenle iletkenlerin kesit değerlerine göre belirli değerlerdeki akımların üzerine yüklenmemesi gerekir.

Normal koşullarda hava hatları 25 °C'lik sıcaklıkta tesis edilirler. Bu ortam sıcaklığını 75 °C'ye çıkartan akım değerine iletkenin anma akımı denir.

Anma akımla yüklenen bir hatta meydana gelen 0.24 RI²t kalori ısı iletkenin etrafından dış havaya radyasyon ve konveksiyon yoluyla dağılarak meydana gelen ısı ile dağıtılan ısı arasında bir denge oluşturur ve iletken kopmadan gereken akımı taşımaya devam eder.

Hattın başlangıç sıcaklığı t₁ °C ve işletme sıcaklığı t₂ °C ise,

$$\Delta t = (t_2 - t_1) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.1)$$

iletkenin taşıyacağı akımı belirleyen sıcaklık değişimidir. Buna tekabül eden akım iletkenin anma akımı olup bu akım değerleri iletken imal eden firmalar tarafından veya VDE yönetmeliği tarafından belirlenmiştir.

İletkenlerin cinsine göre anma akım taşıma cetvelleri varsa iletken kesitlerinin belirlenmesinde bunlardan yararlanılır. Bu tür cetvellerin bulunmaması durumunda pratik olarak kesit tayin etmeye yarayan veya bilinen bir kesittir. Taşınacak akım yönünden uygun olup olmadığını belirlemeye yarayan değişik esaslara dayalı ampirik ifadeler geliştirilmiştir. Bunlardan en çok uygulanan ifadeye göre kesiti S (mm^2) olan iletkenin Δt °C'lik sıcaklık farkı için taşıyacağı akımın yaklaşık değerini hesaplamaya yarayan ifade

$$I = \sqrt{\Delta t(3.95S + 1.72\sqrt{S^3})} \quad (1.2)$$

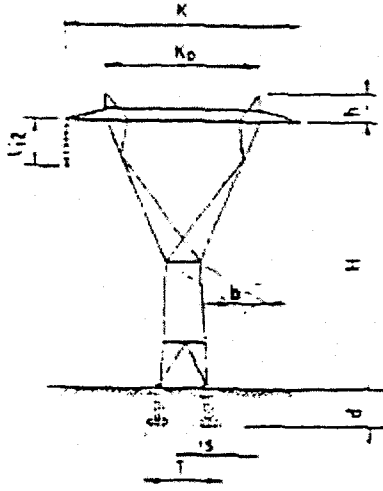
dır. İletken St-Al ise toplam kesit, Cu veya Al ise anma kesit dikkate alınacaktır.

1.3. Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler

Enerji iletim hatlarında kullanılan direklerin tasarımı, devre sayısına, koruma teli olup olmamasına , faz iletkenlerinin tertip tarzına, kullanılacakları maksimum menzile, dikilecekleri yerlerin zemin cinsine ve hattın gerilimine bağlı olarak en ekonomik ve en emniyetli şekilde tesis edilebilmesi için şekil ve boyutları projelendirilerek yapılır.

Türkiye’de kullanılan 154 kV’luk tek devre Hawk ve Partridge iletkenli ve 380 kV’luk tek devre ikili demet Cardinal iletkenli direklerin dizayn ve boyutları Şekil 1.3 ve Şekil 1.4.’te gösterilmiştir [3].

154 kV'LUK TEK DEVRE 477 MCM İLETKENLİ DİREKLERİN DİZAYN VE BOYUTLARI



DİREK	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
BOYUT (metre)	Taslayıcı	Ağır Taslayıcı	Durdurucu	Nihayet
h	1,70	2,50	2,35	4,60
H(x)	20,60	19,60	17,15	17,15
K	13,60	13,60	11,80	14,30
K ₀	8,90	8,30	7,90	8,90
1/2	2,20	2,20	-	-
d	2,10	2,40	2,70	2,95
s	1,15	1,25	1,70	1,90
T	4,83	5,83	7,00	8,10
C	1,82	2,10	2,40	2,90
Eğim 210 B	0,126977	0,180258	0,220096	0,256155

(x) H Yüksekliği direklerin D boylarına göre verilmiş olup,

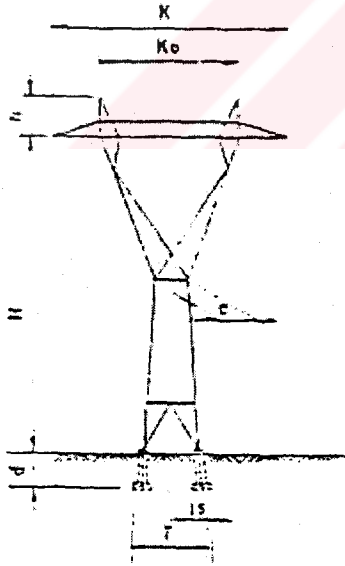
- A₂ C₂ D₂ Tipi direklerde,

- 6 ile +8 boyları arasında 3'er m.

B₂ Tipi direklerde,

- 6 ile +9 boyları arasında 3'er m. artar veya azalır

154 kV'LUK TEK DEVRE 256800 CM İLETKENLİ DİREKLERİN DİZAYN VE BOYUTLARI



DİREK	S ₁	L ₁	D ₁	K ₁
BOYUT (metre)	Taslayıcı	Ağır Taslayıcı	Durdurucu	Nihayet
h	2,35	2,35	4,05	4,25
H(x)	18,80	18,80	15,75	15,75
K	13,70	13,70	12,20	13,70
K ₀	8,20	6,20	7,30	8,60
d	1,90	2,10	2,50	2,80
s	1,00	1,05	1,25	1,25
T	4,64	4,67	5,29	6,21
C	1,81	1,81	2,057	2,577
Eğim 210 B	0,079767	0,079787	0,097968	0,115746

(x) H Yüksekliği direklerin D boylarına göre verilmiş olup,

- S₁, L₁ Tipi direklerde,

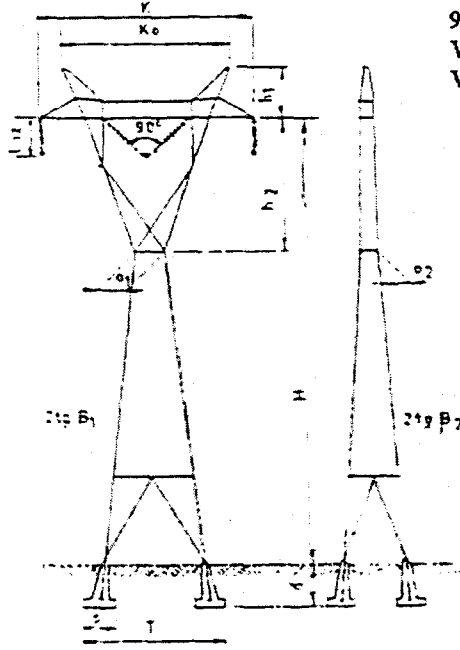
- 3 ile +6 boyları arasında 3'er m.

- D₁, K₁ Tipi direklerde,

- 3 ile +6 boyları arasında 3'er m. artar veya azalır

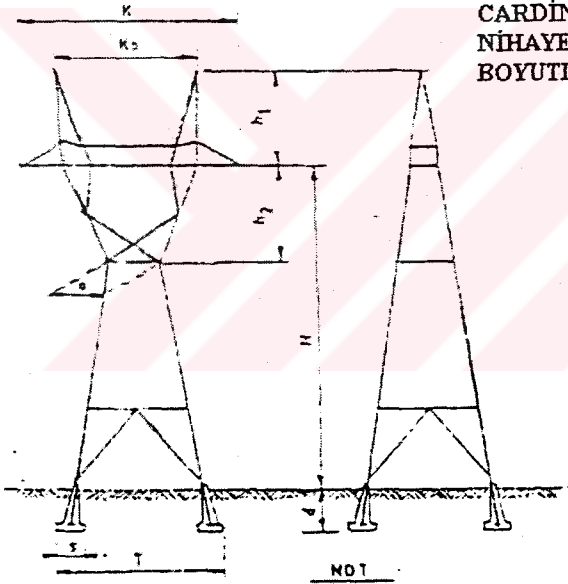
Şekil 1.3. 154 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler

380 kV'LUK TEK DEVRE (İKİLİ DEMET)
954 MCM CARDİNAL İLETKENLİ TAŞIYICI
VE AĞIR TAŞIYICI DİREKLERİN DİZAYN
VE BOYUTLARI



DİREK	A	B	C
BOYUT (metre)			
h ₁	3.92	4.235	6.375
h ₂	10.50	10.50	10.50
h ₃	4.00	4.00	4.00
H (x)	35.75	35.75	35.75
K	18.00	18.80	21.00
K ₀	12.85	14.57	15.374
d (xx)	2.75	2.80	3.05
s (xx)	1.90	2.00	2.20
T (xx)	13.47	14.80	15.09
α ₁	3.50	2.58	3.50
α ₂	1.60	1.60	1.60
Eğim 2lg B	0.209714	0.241942	0.241942
Eğim 2lg B	0.174171	0.125828	0.174171

380kV'LUK TEK DEVRE 954 MCM
CARDİNAL İLETKENLİ DURDURUCU VE
NİHAyet DİREKLERİN DİZAYN VE
BOYUTLARI



DİREK	D	E	F
BOYUT (metre)			
h ₁	10.00	10.00	10.00
h ₂	11.00	11.00	11.00
H (x)	31.75	31.75	31.75
K	20.00	22.60	24.00
K ₀	14.574	16.574	18.574
d (xx)	2.60	3.15	3.20
s (xx)	1.90	2.50	2.90
T (xx)	19.58	21.19	21.61
α	5.50	6.00	6.08
Eğim 2lg B	0.354615	0.363682	0.363682

- (=) H Yüksekliği direklerin + 6 gövdelerine ve + 9 ayaklarına göre verilmiş olup, 0 ve +12 gövdelerine göre 5m arttırıya azalır. Ayrıca direklerin ayak boyutları +1 ile +9 arasında değişmekte olup, H yüksekliği ayak boyutlarına göre 1'er m azalır.
(xx) d, s, T boyutları ıyı zemundeki temel projelerine göre verilmiştir.

Şekil 1.4. 380 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler

2. ELEKTRİK ALAN TEMEL KAVRAMLARI VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

2.1. Elektrik Alan Temel Kavramları

2.1.1. Elektrik Yükü

Elektrik yükü, bir cismin ya da maddesel bir sistemin temel elektriksel yüklerinin cebirsel toplamıdır. Elektrik yükü birimi coulomb'dur[C]. Temel elektrik yükü, bir protonun taşıdığı $e = +1,6 \cdot 10^{-19}$ C'lik elektrik yük miktarıdır. Bir elektronun elektrik yükü -e'dir. [4 - 6]

2.1.2. Coulomb Yasası

Homojen bir dielektrik içinde yer alan q ve q' gibi noktasal iki elektrik yükünün birbirine uyguladıkları kuvvetlerin eşit ve zıt yönlü olduklarını, doğrultularının yükleri birleştiren doğruyu izlediğini, değerinin iki yükle doğru ve aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğunu belirten yasa Coulomb Yasası olarak isimlendirilmiştir. F kuvveti,

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qq'}{r^2} \quad (2.1)$$

ile ifade edilir. Burada ϵ ortamın dielektrik sabitidir ve $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ 'dir. Ortamı karakterize eden ϵ_r 'ye bağlı dielektrik sabiti denir. Birimsizdir ve boşluk için $\epsilon_r = 1$ 'dir. Diğer ortamlar için $\epsilon_r > 1$ 'dir. ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitidir ve $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ F/m'dir [4 - 6].

2.1.3. Deplasman (Elektriksel Akı Yoğunluğu)

Elektrik alanını belirlemek için kullanılan diğer bir vektör

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.2)$$

şeklinde bulunan deplasmandır. Deplasmanın birimi C/m^2 'dir. Noktasal bir yük için

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \vec{u}_r \quad (2.3)$$

2.1.4. Elektriksel Akı

Düzgün alan içinde $\vec{D}$ = sabittir. Böyle bir alan içinde D-çizgilerine dik olan bir S yüzeyi için hesaplanan

$$\Phi = \vec{D} \cdot \vec{S} \quad (2.4)$$

elektriksel akıdır. $D = \Phi/S$ olduğundan D'ye elektriksel akı yoğunluğu da denir [4-6].

2.1.5. Gauss Teoremi

Q elektrik yüklerini taşıyan kapalı bir S yüzeyinden çıkacak Φ elektrik akısını tanımlayan elektrostatik teoremdir. ds yüzey elemanı vektörünü göstermek üzere

$$\Phi = \int_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q \quad (2.5)$$

şeklinde yazılır. İntegral formda

$$\int_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_v \rho \cdot dv \quad (2.6)$$

ve diferansiyel formda

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir [4-6].

2.1.6. Poisson Denklemi

Bir noktadaki elektrik alan vektörü E , hacimsel yük yoğunluğu ρ ve dielektrik sabiti ϵ ise Poisson denklemi

$$\text{div } \vec{E} = \rho / \epsilon \quad (2.8)$$

şeklinde yazılır. Statik durumda E , $E = -\text{grad}V$ eşitliğini sağlayacak biçimde bir V potansiyelinden türer ve bu durumda Poisson denklemi

$$\Delta V + \rho / \epsilon = 0 \quad (2.9)$$

biçimini alır [4-6].

2.1.7. Laplace Denklemi

Poisson denkleminde elde edilen ve yüklerin dışında ($\rho = 0$), elektrik potansiyeline ilişkin Laplace işlemcisinin sıfır olduğunu belirten denklemdir. [4-6]

$$\Delta V = 0 \quad (2.10)$$

2.2. Elektrik Alan Analiz Yöntemleri

2.2.1. Analitik Yöntemler

Analitik çözümün bulunabildiği problemler için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Ancak genellikle oldukça basit yapılarıdaki iki boyutlu alan problemlerinde bu çözümler vardır. Bu durumda ya Laplace denkleminin doğrudan çözümü yapılmalı ya da bir konform dönüşümle elektrot şekli çözülebilir bir şekle dönüştürülmelidir. Karmaşık ve çok dielektrikli sistemlerde analitik çözüm bulmak zordur. [1, 7]

2.2.2. Deneysel Yöntemler

Deneysel yöntemlerde, gerçek ortamın laboratuvar ortamında simülasyonu yapılarak sistem üzerindeki alan dağılımları hakkında bilgi sahibi olunur. Yarı iletken kağıt ve elektrolitik banyo yöntemi olmak üzere yaygın olarak kullanılan iki deneysel yöntem vardır. [1,7].

2.2.2.1. Yarı İletken Kağıt Yöntemi

Problemin alan ve akış büyüklüğü, bir iletkenin akan akımla temsil edilebilir. Temsil edilecek olan büyüklük elektrik alanında akan elektrik akısı ise, o zaman elektrostatik sistemdeki potansiyeller akım sistemindeki benzer potansiyellerle temsil edilir. Burada akım sistemindeki potansiyellerin çok düşük olmasından dolayı bir ölçek katsayısı kullanılır.

İki boyutlu bir elektrik alanın akım benzerini kurmanın basit bir yolu yarı iletken kağıt kullanmaktır. Sistemin elektrot düzeninin ölçekli bir modelini oluşturmak için elektrotlar kağıt üzerine gümüş boya ile boyanır ve elektrotlar arasına ölçekli potansiyel uygulanır. Eşpotansiyel noktalarının yerlerini bulmak için yüksek empedanslı voltmetreye bağlı bir sonda kullanılır. Bu yöntemde, kağıt direncinin homojen olmayışı hatalara neden olmaktadır [1, 7].

2.2.2.2. Elektrolitik Banyo Yöntemi

Üç boyutlu alanların modeli, elektrik akısı yerine suyun içinden akan akımın ölçülmesiyle oluşturulabilir. Elektrotlardan ve bir dielektrikten oluşan sistemin alanı, elektrot şeklinin ölçekli bir modeli yapılarak bu modelin, sınırlarının varlığından dolayı oluşabilecek hatayı en aza indirmek için boyutları mümkün olduğunca büyük alınan bir kabın ortasına konulması ve elektrotlar arasına bilinen bir gerilim uygulanarak eşpotansiyel noktaların bir sonda yardımıyla bulunmasıyla incelenebilir.

Elektrolitik banyo yönteminde güç kaynağının gerilimi 10 V civarında ve çıkış gücü en az 10 W olmalıdır. Eğer bir doğru gerilim kaynağı kullanılırsa elektrotlarda kutuplanma olur. Bu durum elektrik alanını bozar. Tercihen en az 1-1,5 kHz frekanslı bir alternatif akım kaynağı bu kutuplanma problemini önler [1, 7].

2.2.3. Sayısal Yöntemler

2.2.3.1. Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo yöntemi alanı incelenecek bölge içerisindeki rastgele bir ilerleme hareketini belirleyecek rastgele sayıların üretilmesini esas alır. Hareket, potansiyeli belirlenecek noktayı potansiyeli bilinen bir sınıra bağlar. Alanı incelenecek bölge ızgara şeklinde bölünebilir. Gerçekleştirilen hareket sayısı arttıkça değerin doğruluğu artar ve yeterli doğruluk için çok sayıda hareket gerekebilir [1,7].

2.2.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu yöntemde, alanı incelenecek bölge ızgara şeklinde bölünür ve her bir ızgara elemanı içerisindeki elektrik alan şiddetinin sabit olduğu kabul edilir. İki boyutlu problemlerde elemanlar, eğrisel veya doğrusal sınırlara sahip olabilirler. Uygulamada genellikle tüm bölge çok sayıda üçgen elemanlara bölünür ve her biri üç düğüm noktası ile tanımlanır. Her bir eleman içerisindeki skaler potansiyel fonksiyonu, düğüm noktalarının potansiyelleri cinsinden kesin olarak belirlenebilir [1, 7].

2.2.3.3. Sonlu Farklar Yöntemi

Bu yöntem, yüksek gerilim tasarımcılığında geniş olarak kullanılmaktadır. sonlu elemanlar yönteminde olduğu gibi, alanı incelenecek bölge üzerine bir ızgara yerleştirilir, bu ızgara sonlu elemanlar yönteminden farklı olarak çok daha düzenli olmalıdır. Her bir düğüm noktasının potansiyeli ile komşu düğüm noktalarının potansiyellerini birbirine bağlayan lineer denklemler yazılır. Elde edilen lineer denklem sistemi düğüm noktalarının potansiyelleri için çözülmelidir.

Çözüm yapabilmek için sınırlardaki potansiyellerin bilindiği kabul edilmelidir. Sınırlar elektrot sistemlerinden oluşuyorsa elektrotlara uygulanan gerilim sınır potansiyelleri olarak alınır. Düğüm noktalarına keyfi başlangıç potansiyelleri verilir ve daha doğru değerler bulmak için iterasyon yapılır. Problemin herhangi bir noktasında potansiyel hızlı değişiyorsa ızgaranın çok küçük gözlerden oluşması gerekir. Bu durumda çok büyük matrisler ortaya çıkacağından çözüm uzun ve zordur [1,7].

2.2.3.4. Moment Yöntemi

Moment yöntemi, elektrot yüzeylerindeki ve farklı yalıtkanlar arasındaki sınır yüzeydeki yükleri elektrostatik alanın kaynağı olarak kullanır. Yük dağılımları noktasal, çizgisel, halkasal veya yüzeysel yük olabilir. Yük sayısı arttıkça doğruluk artar.

Yüklerin değerleri sınırlardaki etkileri hesaplanarak belirlenir. Elektrot yüzeyindeki bütün noktaların potansiyellerinin elektrot potansiyellerine eşit olması, yalıtkan sınırında her iki yalıtkindaki elektriksel akının normal bileşeninin aynı olması ve her iki yalıtkindaki elektriksel alanın yalıtkan sınırına paralel olması gerekmektedir. Bu koşullarla oluşturulan lineer denklem sistemi yük değerlerini belirlemek için iterasyon yöntemiyle çözülür [1, 7].

2.2.3.5. Yük Benzetim Yöntemi

Yük benzetim yönteminde, elektrotlar üzerindeki veya yalıtkan yüzeyindeki yük yerine elektrot veya yalıtkan içerisine yerleştirilen benzetim yükleri alınır.

Yöntemin temel ilkesi, yük tipleri ve sayısal uygulamaları bu tez çalışmasının dördüncü bölümünde geniş olarak açıklanacaktır [1, 7].

3. YÜK BENZETİM YÖNTEMİ İLE ALAN HESABI

3.1. Yük Benzetim Yönteminin Temel İlkesi

Yük Benzetim Yöntemi ile elektrik alan hesabının temel ilkesi, elektrot etkisinin yüklerle benzetilmesine dayanır. Elektrotun yüzeyine dağılmış yüzeysel yükler yerine “ayrık yükler” (noktasal, sonsuz çizgisel, sonlu çizgisel, halkasal vb.) yerleştirilir. Ayrık yüklerin değerleri, sınır üzerinde seçilen belirli sayıda sınır noktasında sınır koşullarının sağlanmasıyla belirlenir. Bu yüklerin oluşturduğu potansiyeller incelenen bölge içinde Laplace ve Poisson denklemlerini sağlamaktadır. Benzetim yüklerinin yerleri ve değerleri bilinirse, herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektrik alan şiddeti hesaplanabilir. Yöntemin doğruluğu, benzetim yüklerinin sayısına, yerine, tipine ve sınır noktalarının yerine bağlıdır.

Benzetim yüklerinin herhangi bir noktada meydana getirdikleri potansiyel süperpozisyon prensibi ile yüklerin oluşturduğu potansiyellerin toplamından bulunabilir.

Sistemde bulunan N tane ayrık q_j yükünün herhangi bir noktada oluşturdukları V_i potansiyeli

$$V_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} q_j \quad (3.1)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada p_{ij} , Laplace ve Poisson denklemlerinin özel çözümlerinin yapıldığı potansiyel katsayılarıdır. Bu bağıntıdan N tane q_j yükünün bulunabilmesi için potansiyeli bilinen N tane V_i potansiyelli nokta tanımlanır. Bu noktalara “sınır noktası” denir. Sınır noktalarının sayısı, benzetim yüklerinin sayısına eşit olmalıdır.

Seçilen sınır noktalarından herhangi birinde, bütün benzetim yüklerinin potansiyellerinden oluşan potansiyelin elektrot potansiyeline eşit olması gerekir. Yük benzetim yönteminin temel bağıntısı,

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

denklem sistemi şeklindedir. Bu denklemden yüklerin değerleri belirlendikten sonra herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektrik alan süperpozisyon prensibinden hesaplanabilir.

Ayrıca benzetimin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla potansiyeli bilinen ve elektrot sınırına yerleştirilmiş birkaç kontrol noktasında potansiyeller hesaplanır. Hesaplanan kontrol noktası ile verilen sınır noktası potansiyelleri arasındaki fark, benzetimin doğruluğunun ve uygulanabilir olmasının bir ölçüsüdür.

Herhangi bir noktadaki elektrik alan şiddeti, potansiyel denkleminde

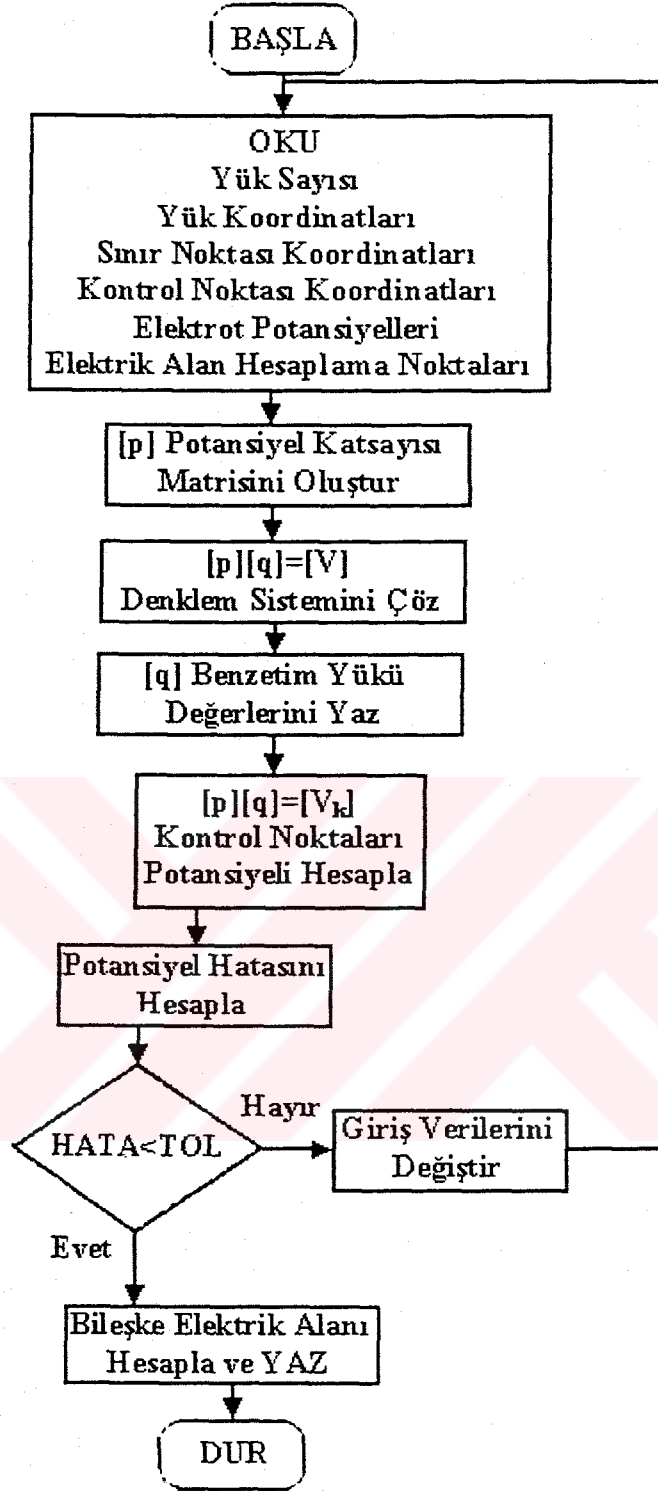
$$\vec{E} = -\vec{\nabla}.V \quad (3.3)$$

bağıntısıyla kartezyen koordinat sisteminde E_i alan ifadesi,

$$\begin{aligned} \vec{E}_i &= \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial p_{ij}}{\partial x} q_j \right] \vec{u}_x + \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial p_{ij}}{\partial y} q_j \right] \vec{u}_y + \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial p_{ij}}{\partial z} q_j \right] \vec{u}_z \\ &= \left[\sum_{j=1}^n (f_{ij})_x q_j \right] \vec{u}_x + \left[\sum_{j=1}^n (f_{ij})_y q_j \right] \vec{u}_y + \left[\sum_{j=1}^n (f_{ij})_z q_j \right] \vec{u}_z \end{aligned} \quad (3.4)$$

bağıntısı ile verilir. Burada $(f_{ij})_x$, $(f_{ij})_y$ ve $(f_{ij})_z$ 'ye "alan katsayıları" denir. u_x , u_y ve u_z ise sırasıyla x, y ve z doğrultularındaki birim vektörlerdir [1, 7 - 9].

(3.1), (3.3) ve (3.4) bağıntılarından yararlanılarak elde edilen bilgisayar algoritması ile sayısal hesaplamalar yapılır. Akış diyagramı Şekil 3.1.'de verilmiştir [8].



Şekil 3.1. Akış diyagramı

3.2. Benzetim Yükleri

3.2.1. Noktasal Yük

Noktasal yükün alanı Coulomb Yasası'ndan gidilerek bulunur. Boyutları aralarındaki uzaklık yanında çok küçük iki iletken arasındaki itme veya çekme kuvveti, yüklerle doğru, aralarındaki uzaklık ile ters orantılıdır ve yüklerin içinde bulunduğu dielektriğe bağlıdır. Bu şartı sağlayan yüke noktasal yük adı verilir. Aralarında r uzaklığı bulunan q ve q' gibi iki noktasal yük arasında radyal yönde meydana gelen kuvvet Coulomb Yasası'na göre vektörel olarak

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qq'}{r^2} \vec{u}_r \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada u_r , yükleri birleştiren doğrultu üzerinde, bir yükten diğerine yönelik radyal yöndeki birim vektördür.

Bir elektrik alan içine sokulan, boyut ve değerce alanı bozmayacak kadar küçük olduğu varsayılan noktasal q' yüküne etki eden kuvvet, bu yükün bulunduğu noktanın koordinatına ve yükün değerine bağlıdır. Bu kuvvet vektörel olarak,

$$\vec{F} = q' \vec{E} \quad (3.6)$$

elektrik alan şiddeti de,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} \quad (3.7)$$

bağıntısı ile ifade edilir. (3.5) eşitliği (3.7)'da yerine yazıldığında alan ifadesi

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_r \quad (3.8)$$

şeklinde elde edilir. Bu bağıntılar, kartezyen koordinat sisteminde bulunan q noktasal yükünden r uzaklığında bulunan bir A noktasındaki elektrik alan şiddetini verir. Bir elektrik alan aynı zamanda

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \frac{q}{4\pi r^2} \vec{r} = D_r \vec{r} \quad (3.9)$$

deplasman vektörü ile de gösterilebilir. Burada D_r , D vektörünün radyal yöndeki bileşenidir. Bu bağıntılar aynı zamanda Gauss Teoremi yardımıyla da bulunabilir. Noktasal q yükünü kuşatan r yarıçaplı küre yüzeyine Gauss Teoremi uygulandığında,

$$\int_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_s D_r ds = D_r 4\pi r^2 = q \quad (3.10)$$

$$D_r = \frac{q}{4\pi r^2} = D \quad (3.11)$$

bağıntısı ve buradan da $D = \epsilon E$ yardımıyla alan şiddeti için,

$$E_r = E = \frac{q}{4\pi \epsilon r^2} \quad (3.12)$$

bağıntısı elde edilir.

Noktasal bir yükün alanında, bu yükten uzaklığı r olan herhangi bir noktanın sonsuza göre mutlak potansiyeli,

$$V = \int_r^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{q}{4\pi \epsilon} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi \epsilon r} \quad (3.13)$$

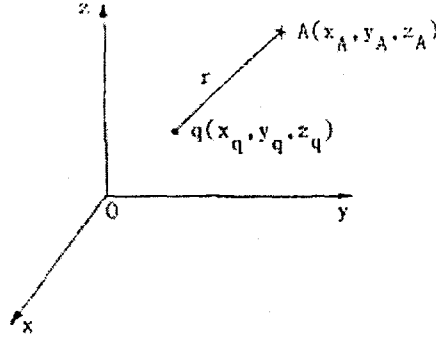
bağıntısıyla bulunur. $r \rightarrow \infty$ için $V=0$ olacağından sonsuzdaki bir nokta, noktasal yükün potansiyel alanı için referans bir nokta olarak alınabilir. Gerilim ifadesi,

$$V = \frac{q}{4\pi \epsilon r} = pq \quad (3.14)$$

şeklinde düzenlenebilir. Burada

$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon r} \quad (3.15)$$

terimine noktasal yükün “potansiyel katsayısı” denir.



Şekil 3.2. Kartezyen koordinatlarda noktasal yük

Potansiyel katsayısını kartezyen koordinatlarda hesaplamak için Şekil 3.2.’den r,

$$r = \sqrt{(x_A - x_Q)^2 + (y_A - y_Q)^2 + (z_A - z_Q)^2} \quad (3.16)$$

ifadesi ile verilir. (3.16) bağıntısı (3.15)’de yerine yazıldığında

$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon \sqrt{(x_A - x_Q)^2 + (y_A - y_Q)^2 + (z_A - z_Q)^2}} \quad (3.17)$$

yazılabilir. Noktasal yükün “alan katsayısı” ise, (3.17) eşitliğine (3.3) denkleminin uygulanmasıyla bulunur. Buna göre (3.17) ifadesinin x, y ve z’ye göre kısmi türevleri alınarak alan şiddetinin x, y ve z bileşenlerinin alan katsayıları,

$$f_x = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{(x_A - x_Q)}{4\pi\epsilon r^3} \quad (3.18)$$

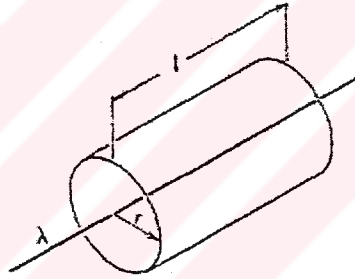
$$f_y = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{(y_A - y_Q)}{4\pi\epsilon r^3} \quad (3.19)$$

$$f_z = \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{(z_A - z_Q)}{4\pi\epsilon r^3} \quad (3.20)$$

olarak bulunur.

3.2.2. Sonsuz Çizgisel Yük

Yarıçapı sonsuz küçük olan düzgün yüklü, çok uzun, doğrusal bir iletken, çizgisel bir yük kaynağı olarak ele alınabilir. Çizgisel yük kaynağının l uzunluğundaki bir parçası incelendiğinde, bu parçanın toplam yükü q ve çizgisel yük yoğunluğu da $\lambda=q/l$ olur. Şekil 3.3.'deki yük kaynağını kuşatan eş eksenli r yarıçaplı bir silindir yüzeyine Gauss Teoremi uygulanırsa,



Şekil 3.3. Sonsuz Uzun Çizgisel Yük

$$\int_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_s D_r ds = D_r 2\pi r l = q = \lambda l \quad (3.21)$$

$$D_r = \frac{q}{2\pi r l} = \frac{\lambda}{2\pi r} = \epsilon E_r \quad (3.22)$$

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} \quad (3.23)$$

bağıntıları elde edilir. Çizgisel yükün potansiyeli,

$$V = -\int \vec{E} \cdot \vec{dr} = -\int E_r dr = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \int \frac{dr}{r} = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r + K \quad (3.24)$$

bağıntısıyla bulunur. burada K integral sabitinin değeri, potansiyel sıfır olan referans noktasına göre sınır koşullarından bulunur. Referans noktasının çizgisel yük kaynağına uzaklığı R ise,

$$V = 0 = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln R + K \quad (3.25)$$

$$K = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln R \quad (3.26)$$

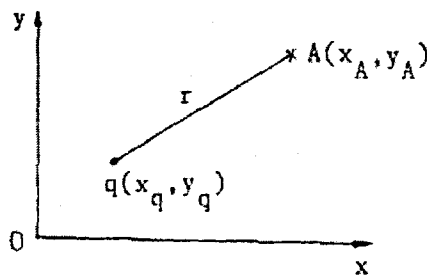
bağıntısı bulunur. (3.26) bağıntısı (3.24)'te yerine yazıldığında potansiyel ifadesi için de,

$$V = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{R} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{r} = pq \quad (3.27)$$

bağıntısı bulunur. Burada sonsuz çizgisel yük için potansiyel katsayısı

$$p = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{r} \quad (3.28)$$

dir. Şekil 3.4.'ten r değeri,



Şekil 3.4. Sonsuz çizgisel yük ve A noktası

$$r = \sqrt{(x_A - x_q)^2 + (y_A - y_q)^2} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilir. (3.29) ifadesi (3.29)'da yerine yazılırsa

$$p = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{\sqrt{(x_A - x_q)^2 + (y_A - y_q)^2}} \quad (3.30)$$

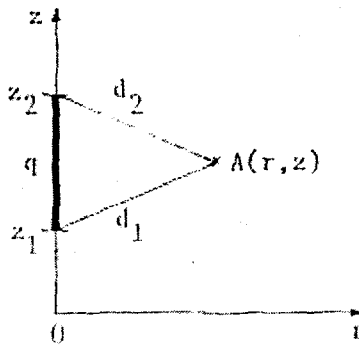
olur. (3.28) ifadesi (3.4) ifadesine uygulandığında yani potansiyel katsayısının x ve y'ye göre kısmi türevleri alındığında

$$f_x = \frac{(x_A - x_q)}{2\pi\epsilon r^2} \quad (3.31)$$

$$f_y = \frac{(y_A - y_q)}{2\pi\epsilon r^2} \quad (3.32)$$

şeklinde sonsuz çizgisel yükün elektrik alan şiddetinin, x ve y bileşenlerinin alan katsayıları elde edilir.

3.2.3. Sonlu Çizgisel Yük



Şekil 3.5. Sonlu çizgisel yük ve A noktası

Şekil 3.5.'de görülen sonlu çizgisel yükün \$A(r,z)\$ noktasında meydana getirdiği potansiyel,

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \ln \frac{(z_2 - z + d_2)(z_2 + z + \delta_1)}{(z_1 - z + d_1)(z_1 + z + \delta_2)} \quad (3.33)$$

ifadesiyle verilebilir. $V=pq$ ifadesinden sonlu çizgisel yük için potansiyel katsayısı,

$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \ln \frac{(z_2 - z + d_2)(z_2 + z + \delta_1)}{(z_1 - z + d_1)(z_1 + z + \delta_2)} \quad (3.34)$$

şeklinde ifade edilir. Burada

$$d_1 = \sqrt{r^2 + (z_1 - z)^2} \quad (3.35)$$

$$d_2 = \sqrt{r^2 + (z_2 - z)^2} \quad (3.36)$$

$$\delta_1 = \sqrt{r^2 + (z_1 + z)^2} \quad (3.37)$$

$$\delta_2 = \sqrt{r^2 + (z_2 + z)^2} \quad (3.38)$$

dir. Sonlu çizgisel yükün A noktasındaki elektrik alan şiddetinin r ve z bileşenleri potansiyelin r ve z 'ye göre türevleri alınarak

$$E_r = \frac{q}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \left[\frac{(z_2 - z)}{r d_2} - \frac{(z_1 - z)}{r d_1} + \frac{(z_1 + z)}{r \delta_1} - \frac{(z_2 + z)}{r \delta_2} \right] \quad (3.39)$$

$$E_z = \frac{q}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \left[\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} + \frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\delta_2} \right] \quad (3.40)$$

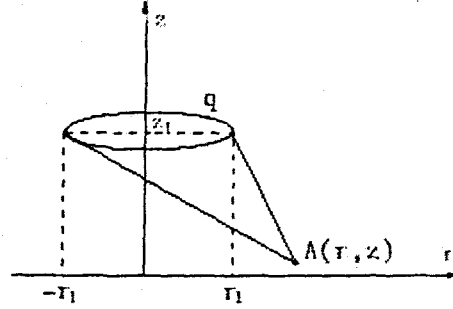
elde edilir. Buradan alan katsayıları

$$f_r = \frac{1}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \left[\frac{(z_2 - z)}{r d_2} - \frac{(z_1 - z)}{r d_1} + \frac{(z_1 + z)}{r \delta_1} - \frac{(z_2 + z)}{r \delta_2} \right] \quad (3.41)$$

$$f_z = \frac{1}{4\pi\epsilon(z_2 - z_1)} \left[\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} + \frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\delta_2} \right] \quad (3.42)$$

şeklinde elde edilir.

3.2.4. Halkasal Yük



Şekil 3.6. Merkezi z ekseninde bulunan halkasal yük ve A noktası

Şekil 3.6.'te verilen halkasal yük için potansiyel ifadesi

$$V = \frac{q}{4\pi^2\epsilon} \left[\frac{K(k_1)}{\alpha_1} - \frac{K(k_2)}{\alpha_2} \right] \quad (3.43)$$

şeklindedir. Burada

$$\alpha_1 = \sqrt{(r+r_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (3.44)$$

$$\alpha_2 = \sqrt{(r+r_1)^2 + (z+z_1)^2} \quad (3.45)$$

ve $K(k)$, birinci tür komple eliptik integraldir. Halkasal yükün potansiyel katsayısı

$$p = \frac{1}{4\pi^2\epsilon} \left[\frac{K(k_1)}{\alpha_1} - \frac{K(k_2)}{\alpha_2} \right] \quad (3.46)$$

şeklinde yazılabilir. Alan bileşenleri ise,

$$E_r = \frac{-q}{4\pi\epsilon} \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{[r_1^2 - r^2 + (z-z_1)^2]E(k_1) - \beta_1^2 K(k_1)}{\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[r_1^2 - r^2 + (z+z_1)^2]E(k_2) - \beta_2^2 K(k_2)}{\alpha_2 \beta_2^2} \right\} \quad (3.47)$$

$$E_z = \frac{-q}{4\pi\epsilon} \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{(z-z_1)^2 E(k_1)}{\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{(z+z_1)^2 E(k_2)}{\alpha_2 \beta_2^2} \right\} \quad (3.48)$$

olarak bulunur. Burada

$$\beta_1 = \sqrt{(r-r_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (3.49)$$

$$\beta_2 = \sqrt{(r-r_1)^2 + (z+z_1)^2} \quad (3.50)$$

$$k_1 = \frac{2\sqrt{r_1 r}}{\alpha_1} \quad (3.51)$$

$$k_2 = \frac{2\sqrt{r_1 r}}{\alpha_2} \quad (3.52)$$

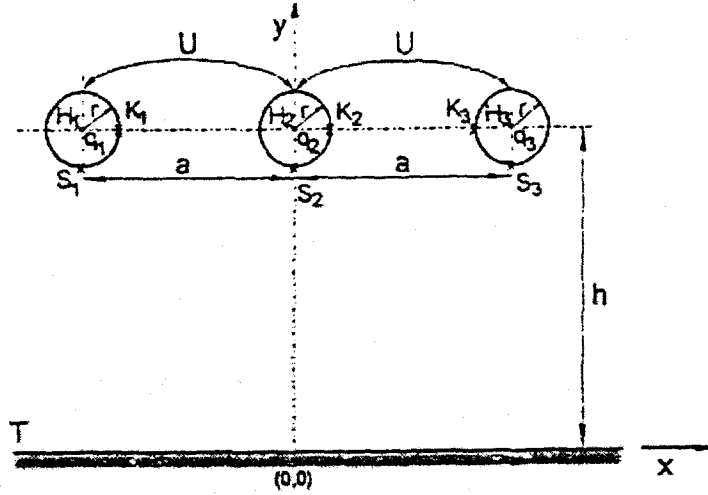
ve $E(k)$, ikinci tür komple eliptik integraldir. Her bir alan bileşeninin alan katsayıları ise ,

$$f_r = \frac{-1}{4\pi^2 \epsilon r} \left\{ \frac{[r_1^2 - r^2 + (z-z_1)^2]E(k_1) - \beta_1^2 K(k_1)}{\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[r_1^2 - r^2 + (z+z_1)^2]E(k_2) - \beta_2^2 K(k_2)}{\alpha_2 \beta_2^2} \right\} \quad (3.53)$$

$$f_z = \frac{-2}{4\pi^2 \epsilon} \left\{ \frac{(z-z_1)^2 E(k_1)}{\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{(z+z_1)^2 E(k_2)}{\alpha_2 \beta_2^2} \right\} \quad (3.54)$$

şeklinde yazılabilir [1, 7].

3.3. Üç Fazlı 154kV'luk Bir Hat Çevresindeki Potansiyel Ve Elektrik Alanın Yük Benzetim Yöntemiyle Hesabı



Şekil 3.7. 154 kV'luk iletim hattı

Şekil 3.7.'da gösterilen iletim hattı için veriler,

$U = 154\text{kV}$ (fazlar arası gerilim)

$r = 0.011\text{m}$ (iletken yarıçapı)

$a = 6.8\text{m}$ (iletkenler arası açıklık)

$h = 18.4\text{m}$ (iletkenlerin yerden yükseklikleri)

$H_{1T} = H_{2T} = H_{3T} = 18.4\text{m}$

dir. Hesaplamalarda ortamın dielektrik sabiti $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ alınmıştır.

Yüklerin koordinatları:

$H_1(x_{q1}; y_{q1}) = H_1(-6.8; 18.4)$

$H_2(x_{q2}; y_{q2}) = H_2(0; 18.4)$

$H_3(x_{q3}; y_{q3}) = H_3(6.8; 18.4)$

Sınır noktalarının koordinatları:

$$S_1(-6.8;18.389)$$

$$S_2(0;18.389)$$

$$S_2(6.8;18.389)$$

Kontrol noktalarının koordinatları:

$$K_1(-6.789;18.4)$$

$$K_2(0,011;18.4)$$

$$K_2(6.789;18.4)$$

S_1 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_1 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1 S_1} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2 S_1} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3 S_1})$$

Yükler ile S_1 sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1 S_1} = \sqrt{(x_{H_1} - x_{S_1})^2 + (y_{H_1} - y_{S_1})^2} = \sqrt{(-6.8 + 6.8)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 0.011 \text{ m}$$

$$\overline{H_2 S_1} = \sqrt{(x_{H_2} - x_{S_1})^2 + (y_{H_2} - y_{S_1})^2} = \sqrt{(0 + 6.8)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 6.8 \text{ m}$$

$$\overline{H_3 S_1} = \sqrt{(x_{H_3} - x_{S_1})^2 + (y_{H_3} - y_{S_1})^2} = \sqrt{(6.8 + 6.8)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 13.6 \text{ m}$$

S_2 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_2 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1 S_2} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2 S_2} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3 S_2})$$

Yükler ile S_2 sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1 S_2} = \sqrt{(x_{H_1} - x_{S_2})^2 + (y_{H_1} - y_{S_2})^2} = \sqrt{(-6.8 - 0)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 6.8 \text{ m}$$

$$\overline{H_2 S_2} = \sqrt{(x_{H_2} - x_{S_2})^2 + (y_{H_2} - y_{S_2})^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 0.011 \text{ m}$$

$$\overline{H_3S_2} = \sqrt{(x_{H_3} - x_{S_2})^2 + (y_{H_3} - y_{S_2})^2} = \sqrt{(6.8 - 0)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 6.8m$$

S_3 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_3 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_{1S_3}} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_{2S_3}} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_{3S_3}})$$

Yükler ile S_3 sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1S_3} = \sqrt{(x_{H_1} - x_{S_3})^2 + (y_{H_1} - y_{S_3})^2} = \sqrt{(-6.8 - 6.8)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 13.6m$$

$$\overline{H_2S_3} = \sqrt{(x_{H_2} - x_{S_3})^2 + (y_{H_2} - y_{S_3})^2} = \sqrt{(0 - 6.8)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 6.8m$$

$$\overline{H_3S_3} = \sqrt{(x_{H_3} - x_{S_3})^2 + (y_{H_3} - y_{S_3})^2} = \sqrt{(6.8 - 6.8)^2 + (18.4 - 18.389)^2} = 0.011m$$

Sınır noktasındaki potansiyeller:

$$V_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{18.4}{0.011} + q_2 \ln \frac{18.4}{6.8} + q_3 \ln \frac{18.4}{13.6}) = 89 \cdot 10^3 e^{j0^\circ} V$$

$$V_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{18.4}{6.8} + q_2 \ln \frac{18.4}{0.011} + q_3 \ln \frac{18.4}{6.8}) = 89 \cdot 10^3 e^{j120^\circ} V$$

$$V_3 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{18.4}{13.6} + q_2 \ln \frac{18.4}{6.8} + q_3 \ln \frac{18.4}{0.011}) = 89 \cdot 10^3 e^{j240^\circ} V$$

Potansiyel denklemleri matris biçiminde yazılırsa

$$\begin{bmatrix} 13.36 & 1.8 & 0.54 \\ 1.8 & 13.36 & 1.8 \\ 0.54 & 1.8 & 13.36 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.89 \\ -0.45 + j0.77 \\ -0.45 - j0.77 \end{bmatrix}$$

elde edilir. Bu denklem sistemi çözülürse benzetim yükleri

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.318 - j0.64 \\ -3.932 + j6.745 \\ -3.314 - j6.646 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7} C$$

kompleks olarak bulunur.

A(0;1.2) koordinatlı noktadaki potansiyel

$$V_A = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_{1A}} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_{2A}} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_{3A}})$$

$$H_{1A} = \sqrt{(x_{H1} - x_A)^2 + (y_{H1} - y_A)^2} = \sqrt{(-6.8 - 0)^2 + (18.4 - 1.2)^2} = 18.5\text{m}$$

$$H_{2A} = \sqrt{(x_{H2} - x_A)^2 + (y_{H2} - y_A)^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (18.4 - 1.2)^2} = 17.2\text{m}$$

$$H_{3A} = \sqrt{(x_{H3} - x_A)^2 + (y_{H3} - y_A)^2} = \sqrt{(6.8 - 0)^2 + (18.4 - 1.2)^2} = 18.5\text{m}$$

$$V_A = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} [(7.318 - j0.64)10^{-7} \ln \frac{18.4}{18.5} + (-3.932 + j6.745)10^{-7} \ln \frac{18.4}{17.2} + (-3.134 - j6.646)10^{-7} \ln \frac{18.4}{18.5}]$$

$$V_A = -518 + j890$$

$$V_A = 1029.7 e^{j120^\circ} \text{ V}$$

B(0;1.6) koordinatlı noktadaki potansiyel

$$V_B = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_{1B}} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_{2B}} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_{3B}})$$

$$H_{1B} = \sqrt{(x_{H1} - x_B)^2 + (y_{H1} - y_B)^2} = \sqrt{(-6.8 - 0)^2 + (18.4 - 1.6)^2} = 18.124\text{m}$$

$$H_{2B} = \sqrt{(x_{H2} - x_B)^2 + (y_{H2} - y_B)^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (18.4 - 1.6)^2} = 16.8\text{m}$$

$$H_{3B} = \sqrt{(x_{H3} - x_B)^2 + (y_{H3} - y_B)^2} = \sqrt{(6.8 - 0)^2 + (18.4 - 1.6)^2} = 18.124\text{m}$$

$$V_B = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} [(7.318 - j0.64)10^{-7} \ln \frac{18.4}{18.124} + (-3.932 + j6.745)10^{-7} \ln \frac{18.4}{16.8} + (-3.134 - j6.646)10^{-7} \ln \frac{18.4}{18.124}]$$

$$V_B = -530 + j906.3$$

$$V_B = 1049.9 e^{j120^\circ} \text{ V}$$

C(0;1.8) koordinatlı noktadaki potansiyel

$$V_C = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_{1C}} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_{2C}} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_{3C}})$$

$$H_{1C} = \sqrt{(x_{H1} - x_C)^2 + (y_{H1} - y_C)^2} = \sqrt{(-6.8 - 0)^2 + (18.4 - 1.8)^2} = 17.94\text{m}$$

$$H_{2C} = \sqrt{(x_{H2} - x_C)^2 + (y_{H2} - y_C)^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (18.4 - 1.8)^2} = 16.6\text{m}$$

$$H_{3C} = \sqrt{(x_{H3} - x_C)^2 + (y_{H3} - y_C)^2} = \sqrt{(6.8 - 0)^2 + (18.4 - 1.8)^2} = 17.94\text{m}$$

$$V_C = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} [(7.318 - j0.64)10^{-7} \ln \frac{18.4}{17.94} + (-3.932 + j6.745)10^{-7} \ln \frac{18.4}{16.6} + (-3.134 - j6.646)10^{-7} \ln \frac{18.4}{17.94}]$$

$$V_C = -538 + j918$$

$$V_C = 1064 e^{j120^\circ} \text{ V}$$

A(0;1.2) noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_A = E_{Ax} \cdot i + E_{Ay} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Ax} = \frac{1}{2\pi\epsilon} [(\frac{x_{H1} - x_A}{H_{1A}^2}) q_1 + (\frac{x_{H2} - x_A}{H_{2A}^2}) q_2 + (\frac{x_{H3} - x_A}{H_{3A}^2}) q_3]$$

$$E_{Ax} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} [(\frac{-6.8 - 0}{18.5^2})(7.318 - j0.64)10^{-7} + (\frac{0 - 0}{17.2^2})(-3.932 + j6.745)10^{-7} + (\frac{6.8 - 0}{18.5^2})(-3.134 - j6.646)10^{-7}]$$

$$E_{Ax} = -373.8 - j214.8$$

$$E_{Ax} = 431.15 e^{-j150} \text{ V/m}$$

$$E_{Ay} = \frac{1}{2\pi\epsilon} [(\frac{y_{H1} - y_A}{H_{1A}^2}) q_1 + (\frac{y_{H2} - y_A}{H_{2A}^2}) q_2 + (\frac{y_{H3} - y_A}{H_{3A}^2}) q_3]$$

$$E_{Ay} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{18.4-1.2}{17.94^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{18.4-1.2}{16.6^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} + \left(\frac{18.4-1.2}{17.94^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Ay} = -32.97 + j46.73$$

$$E_{Ay} = 57.19 e^{j125} \text{ V/m}$$

A(0;1.2) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_A = \sqrt{E_{Ax}^2 + E_{Ay}^2}$$

$$E_A = 434.92 \text{ V/m}$$

B(0;1.6) noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_B = E_{Bx} \cdot i + E_{By} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Bx} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_B}{H_{1B}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_B}{H_{2B}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_B}{H_{3B}^2} \right) q_3 \right]$$

$$E_{Bx} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-6.8-0}{18.124^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{0-0}{16.8^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} + \left(\frac{6.8-0}{18.124^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Bx} = -389.44 - j223.56$$

$$E_{Bx} = 449 e^{-j150} \text{ V/m}$$

$$E_{By} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_B}{H_{1B}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_B}{H_{2B}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_B}{H_{3B}^2} \right) q_3 \right]$$

$$E_{By} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{18.4-1.6}{18.124^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{18.4-1.6}{16.8^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} + \left(\frac{18.4-1.6}{18.124^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{By} = -35.9 + j51.63$$

$$E_{By} = 62.9 e^{j125} \text{ V/m}$$

B(0;1.6) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_B = \sqrt{E_{Bx}^2 + E_{By}^2}$$

$$E_B = 453.38 \text{ V/m}$$

C(0;1.8) noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_C = E_{Cx} \cdot i + E_{Cy} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Cx} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_C}{H_{1C}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_C}{H_{2C}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_C}{H_{3C}^2} \right) q_3 \right]$$

$$E_{Cx} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-6.8 - 0}{17.94^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{0 - 0}{16.6^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} \right. \\ \left. + \left(\frac{6.8 - 0}{17.94^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Cx} = -397.5 - j228.2$$

$$E_{Cx} = 458.375 e^{-j150} \text{ V/m}$$

$$E_{Cy} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_C}{H_{1C}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_C}{H_{2C}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_C}{H_{3C}^2} \right) q_3 \right]$$

$$E_{Cy} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{18.4 - 1.8}{17.94^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{18.4 - 1.8}{16.6^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} \right. \\ \left. + \left(\frac{18.4 - 1.8}{17.94^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Cy} = -37.9 + j54.9$$

$$E_{Cy} = 66.7 e^{j125} \text{ V/m}$$

C(0;1.8) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_C = \sqrt{E_{Cx}^2 + E_{Cy}^2}$$

$$E_C = 463.2 \text{ V/m}$$

D(11.8;1) Noktasındaki Elektrik Alan Şiddeti

$$E_D = E_{Dx} \cdot \mathbf{i} + E_{Dy} \cdot \mathbf{j}$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Dx} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_D}{H_{1D}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_D}{H_{2D}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_C}{H_{3D}^2} \right) q_3 \right]$$

$$H_{1D} = \sqrt{(x_{H1} - x_D)^2 + (y_{H1} - y_D)^2} = \sqrt{(-6.8 - 11.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 25.47 \text{ m}$$

$$H_{2D} = \sqrt{(x_{H2} - x_D)^2 + (y_{H2} - y_D)^2} = \sqrt{(0 - 11.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 21 \text{ m}$$

$$H_{3D} = \sqrt{(x_{H3} - x_D)^2 + (y_{H3} - y_D)^2} = \sqrt{(6.8 - 11.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 18.1 \text{ m}$$

$$E_{Dx} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-6.8 - 11.8}{25.47^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{0 - 11.8}{21^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} \right. \\ \left. + \left(\frac{6.8 - 11.8}{18.1^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Dx} = -102.17 - j109.3$$

$$E_{Dx} = 149.6 e^{j47} \text{ V/m}$$

$$E_{Dy} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_D}{H_{1D}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_D}{H_{2D}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_C}{H_{3D}^2} \right) q_3 \right]$$

$$E_{Dy} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{18.4 - 1}{25.47^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{18.4 - 1}{21^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} \right. \\ \left. + \left(\frac{18.4 - 1}{18.1^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Dy} = -225.78 - j187$$

$$E_{Dy} = 293.2 e^{-j140} \text{ V/m}$$

D(11.8;1) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_D = \sqrt{E_{Dx}^2 + E_{Dy}^2}$$

$$E_D = 329.16 \text{ V/m}$$

E(16.8;1) Noktasındaki Elektrik Alan Şiddeti

$$E_E = E_{Ex} \cdot i + E_{Ey} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Ex} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_E}{H_{1E}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_E}{H_{2E}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_E}{H_{3E}^2} \right) q_3 \right]$$

$$H_{1E} = \sqrt{(x_{H1} - x_E)^2 + (y_{H1} - y_E)^2} = \sqrt{(-6.8 - 16.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 29.3 \text{ m}$$

$$H_{2E} = \sqrt{(x_{H2} - x_E)^2 + (y_{H2} - y_E)^2} = \sqrt{(0 - 16.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 24.19 \text{ m}$$

$$H_{3E} = \sqrt{(x_{H3} - x_E)^2 + (y_{H3} - y_E)^2} = \sqrt{(6.8 - 16.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 20 \text{ m}$$

$$E_{Ex} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-6.8 - 16.8}{29.3^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{0 - 16.8}{24.19^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} + \left(\frac{6.8 - 16.8}{20^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Ex} = -17.95 - j17.7$$

$$E_{Ex} = 25.2 e^{j45} \text{ V/m}$$

$$E_{Ey} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_E}{H_{1E}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_E}{H_{2E}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_E}{H_{3E}^2} \right) q_3 \right]$$

$$E_{Ey} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{18.4 - 1}{29.3^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{18.4 - 1}{24.19^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} + \left(\frac{18.4 - 1}{20^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Ey} = -188.6 - j183$$

$$E_{Ey} = 262.88 e^{-j135} \text{ V/m}$$

E(16.8;1) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_E = \sqrt{E_{Ex}^2 + E_{Ey}^2}$$

$$E_E = 264 \text{ V/m}$$

F(21.8;1) Noktasındaki Elektrik Alan Şiddeti

$$E_F = E_{Fx} \cdot \mathbf{i} + E_{Fy} \cdot \mathbf{j}$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Fx} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_F}{H_{1F}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_F}{H_{2F}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_F}{H_F^2} \right) q_3 \right]$$

$$H_{1F} = \sqrt{(x_{H1} - x_F)^2 + (y_{H1} - y_F)^2} = \sqrt{(-6.8 - 21.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 33.48 \text{ m}$$

$$H_{2F} = \sqrt{(x_{H2} - x_F)^2 + (y_{H2} - y_F)^2} = \sqrt{(0 - 21.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 27.9 \text{ m}$$

$$H_{3F} = \sqrt{(x_{H3} - x_F)^2 + (y_{H3} - y_F)^2} = \sqrt{(6.8 - 21.8)^2 + (18.4 - 1)^2} = 23 \text{ m}$$

$$E_{Fx} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-6.8 - 21.8}{33.48^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{0 - 21.8}{27.9^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} + \left(\frac{6.8 - 21.8}{23^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Fx} = -22.2 - j28.63$$

$$E_{Fx} = 36.25 e^{-j128} \text{ V/m}$$

$$E_{Fy} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_F}{H_{1F}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_F}{H_{2F}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_F}{H_F^2} \right) q_3 \right]$$

$$E_{Fy} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{18.4 - 1}{33.48^2} \right) (7.318 - j0.64) 10^{-7} + \left(\frac{18.4 - 1}{27.9^2} \right) (-3.932 + j6.745) 10^{-7} + \left(\frac{18.4 - 1}{23^2} \right) (-3.134 - j6.646) 10^{-7} \right]$$

$$E_{Fy} = -139.6 - j140$$

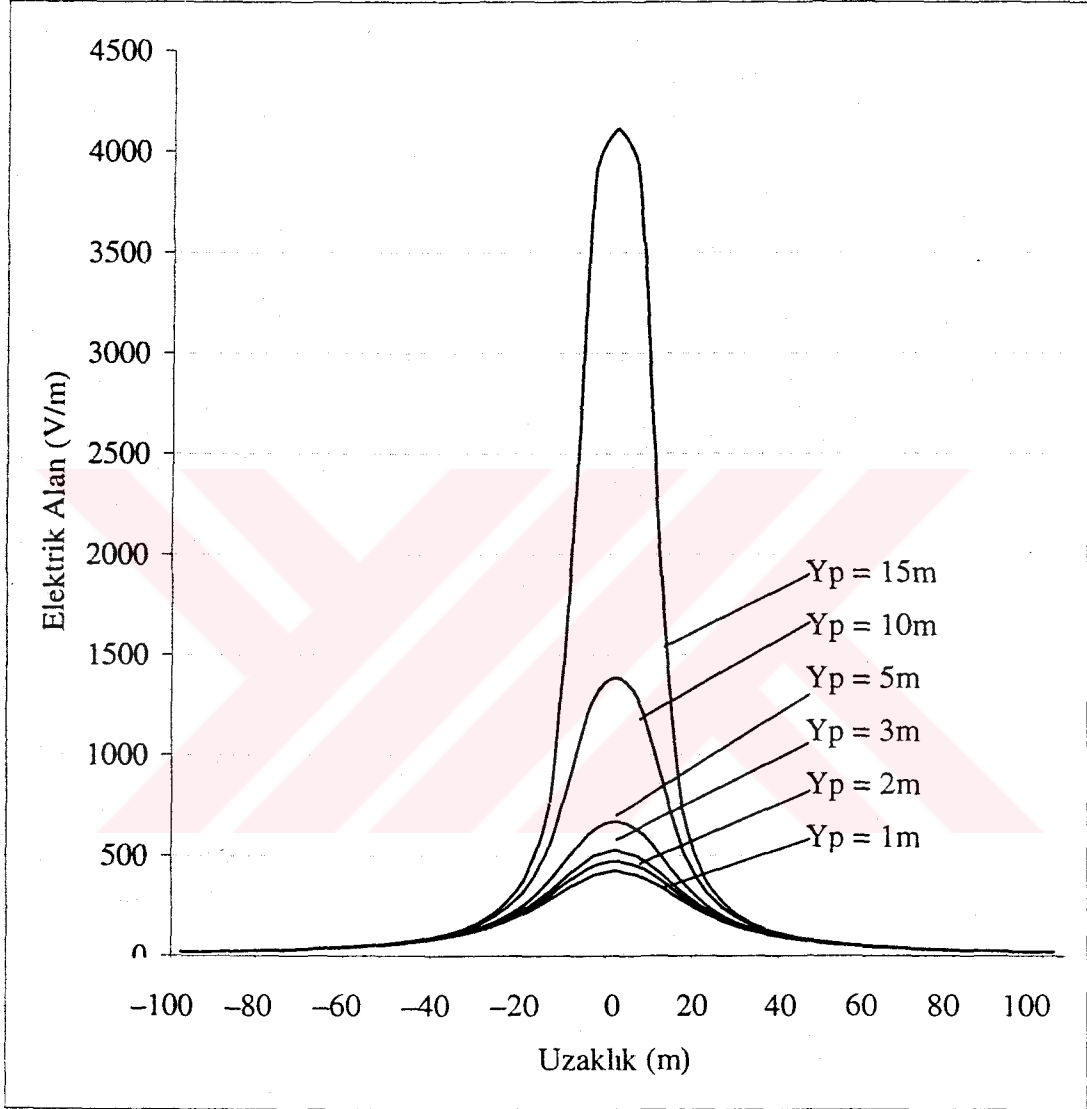
$$E_{Fy} = 197.77 e^{-j135} \text{ V/m}$$

F(21.8;1) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_F = \sqrt{E_{Fx}^2 + E_{Fy}^2}$$

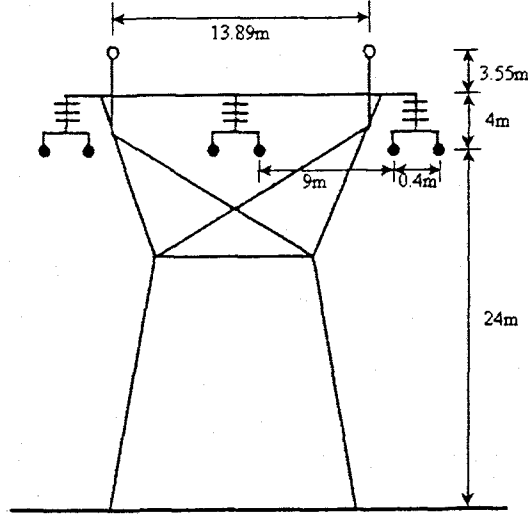
$$E_F = 201 \text{ V/m}$$

154 kV'luk iletim hattı için bilgisayar programıyla, orta fazın tam altından her iki yönde 100'er metre yatay mesafelerde ve toprak seviyesinden 1, 2, 3, 5, 10 ve 15 m düşey mesafelerde hesaplanan değerlerden yola çıkılarak çizilen elektrik alan – uzaklık eğrisi Şekil 3.8.'da verilmiştir.



Şekil 3.8. 154 kV'luk hattın elektrik alan – uzaklık eğrisi

3.4 Üç Fazlı 380kV'luk Bir Hat Çevresindeki Potansiyel Ve Elektrik Alanın Yük Benzetim Yöntemiyle Hesabı



Şekil 3. 9. 380kV'luk ikili demet iletkenli enerji iletim hattı boyutları

Şekil 3.9'de boyutları verilen 380kV'luk ikili demet iletkenli enerji iletim hattı için yapılan hesaplamalarda $r = 0.015\text{m}$ alınmıştır.

Yüklerin koordinatları:

$$H_1(x_{q1};y_{q1}) = H_1(-9.6;24)$$

$$H_4(x_{q4};y_{q4}) = H_4(0.2;24)$$

$$H_2(x_{q2};y_{q2}) = H_2(-9.2;24)$$

$$H_5(x_{q5};y_{q5}) = H_5(9.2;24)$$

$$H_3(x_{q3};y_{q3}) = H_3(-0.2;24)$$

$$H_6(x_{q6};y_{q6}) = H_6(9.6;24)$$

Sınır noktalarının koordinatları:

$$S_1(-9.6;23.895)$$

$$S_4(0.2;23.895)$$

$$S_2(-9.2;23.895)$$

$$S_5(9.2;23.895)$$

$$S_3(-0.2;23.895)$$

$$S_6(9.6;23.895)$$

Kontrol noktalarının koordinatları:

$$K_1(-9.6;24.015)$$

$$K_4(0.2;24.015)$$

$$K_2(-9.2;24.015)$$

$$K_5(9.2;24.015)$$

$$K_3(-0.2;24.015)$$

$$K_6(9.6;24.015)$$

S_1 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_1 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1 S_1} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2 S_1} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3 S_1} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_4 S_1} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_5 S_1} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_6 S_1})$$

Yükler ile S_1 sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1 S_1} = \sqrt{(x_{H1} - x_{S1})^2 + (y_{H1} - y_{S1})^2} = 0.015m$$

$$\overline{H_2 S_1} = \sqrt{(x_{H2} - x_{S1})^2 + (y_{H2} - y_{S1})^2} = 0.4m$$

$$\overline{H_3 S_1} = \sqrt{(x_{H3} - x_{S1})^2 + (y_{H3} - y_{S1})^2} = 9.4m$$

$$\overline{H_4 S_1} = \sqrt{(x_{H4} - x_{S1})^2 + (y_{H4} - y_{S1})^2} = 9.8m$$

$$\overline{H_5 S_1} = \sqrt{(x_{H5} - x_{S1})^2 + (y_{H5} - y_{S1})^2} = 18.8m$$

$$\overline{H_6 S_1} = \sqrt{(x_{H6} - x_{S1})^2 + (y_{H6} - y_{S1})^2} = 19.2m$$

$$V_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{24}{0.015} + q_2 \ln \frac{24}{0.4} + q_3 \ln \frac{24}{9.4} + q_4 \ln \frac{24}{9.8} + q_5 \ln \frac{24}{18.8} + q_6 \ln \frac{24}{19.2})$$
$$= 220.10^3 e^{j0^\circ} V$$

S_2 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_2 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1 S_2} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2 S_2} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3 S_2} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_4 S_2} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_5 S_2} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_6 S_2})$$

Yükler ile S_2 sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1 S_2} = \sqrt{(x_{H1} - x_{S2})^2 + (y_{H1} - y_{S2})^2} = 0.4m$$

$$\overline{H_2 S_2} = \sqrt{(x_{H2} - x_{S2})^2 + (y_{H2} - y_{S2})^2} = 0.015m$$

$$\overline{H_3 S_2} = \sqrt{(x_{H3} - x_{S2})^2 + (y_{H3} - y_{S2})^2} = 9m$$

$$\overline{H_4 S_2} = \sqrt{(x_{H4} - x_{S2})^2 + (y_{H4} - y_{S2})^2} = 9.4m$$

$$\overline{H_5 S_2} = \sqrt{(x_{H_5} - x_{S_2})^2 + (y_{H_5} - y_{S_2})^2} = 18.4 \text{ m}$$

$$\overline{H_6 S_2} = \sqrt{(x_{H_6} - x_{S_2})^2 + (y_{H_6} - y_{S_2})^2} = 18.8 \text{ m}$$

$$V_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{24}{0.4} + q_2 \ln \frac{24}{0.015} + q_3 \ln \frac{24}{9} + q_4 \ln \frac{24}{9.4} + q_5 \ln \frac{24}{18.4} + q_6 \ln \frac{24}{18.8})$$

$$= 220 \cdot 10^3 e^{j0^\circ} \text{ V}$$

S_3 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_3 = \frac{1}{2\pi \epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1 S_3} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2 S_3} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3 S_3} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_4 S_3} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_5 S_3} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_6 S_3})$$

Yükler ile S_3 sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1 S_3} = \sqrt{(x_{H_1} - x_{S_3})^2 + (y_{H_1} - y_{S_3})^2} = 9.4 \text{ m}$$

$$\overline{H_2 S_3} = \sqrt{(x_{H_2} - x_{S_3})^2 + (y_{H_2} - y_{S_3})^2} = 9 \text{ m}$$

$$\overline{H_3 S_3} = \sqrt{(x_{H_3} - x_{S_3})^2 + (y_{H_3} - y_{S_3})^2} = 0.015 \text{ m}$$

$$\overline{H_4 S_3} = \sqrt{(x_{H_4} - x_{S_3})^2 + (y_{H_4} - y_{S_3})^2} = 0.4 \text{ m}$$

$$\overline{H_5 S_3} = \sqrt{(x_{H_5} - x_{S_3})^2 + (y_{H_5} - y_{S_3})^2} = 9.4 \text{ m}$$

$$\overline{H_6 S_3} = \sqrt{(x_{H_6} - x_{S_3})^2 + (y_{H_6} - y_{S_3})^2} = 9.8 \text{ m}$$

$$V_3 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{24}{9.4} + q_2 \ln \frac{24}{9} + q_3 \ln \frac{24}{0.015} + q_4 \ln \frac{24}{0.4} + q_5 \ln \frac{24}{9.4} + q_6 \ln \frac{24}{9.8})$$

$$= 220 \cdot 10^3 e^{j120^\circ} \text{ V}$$

S_4 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_4 = \frac{1}{2\pi \epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1 S_4} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2 S_4} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3 S_4} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_4 S_4} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_5 S_4} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_6 S_4})$$

Yükler ile S₄ sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1S_4} = \sqrt{(x_{H_1} - x_{S_4})^2 + (y_{H_1} - y_{S_4})^2} = 9.8\text{m}$$

$$\overline{H_2S_4} = \sqrt{(x_{H_2} - x_{S_4})^2 + (y_{H_2} - y_{S_4})^2} = 9.4\text{m}$$

$$\overline{H_3S_4} = \sqrt{(x_{H_3} - x_{S_4})^2 + (y_{H_3} - y_{S_4})^2} = 0.4\text{m}$$

$$\overline{H_4S_4} = \sqrt{(x_{H_4} - x_{S_4})^2 + (y_{H_4} - y_{S_4})^2} = 0.015\text{m}$$

$$\overline{H_5S_4} = \sqrt{(x_{H_5} - x_{S_4})^2 + (y_{H_5} - y_{S_4})^2} = 9\text{m}$$

$$\overline{H_6S_4} = \sqrt{(x_{H_6} - x_{S_4})^2 + (y_{H_6} - y_{S_4})^2} = 9.4\text{m}$$

$$V_4 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{24}{9.8} + q_2 \ln \frac{24}{9.4} + q_3 \ln \frac{24}{0.4} + q_4 \ln \frac{24}{0.015} + q_5 \ln \frac{24}{9} + q_6 \ln \frac{24}{9.4})$$

$$= 220 \cdot 10^3 e^{j120^\circ} \text{ V}$$

S₅ sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_5 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1S_5} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2S_5} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3S_5} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_4S_5} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_5S_5} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_6S_5})$$

Yükler ile S₅ sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1S_5} = \sqrt{(x_{H_1} - x_{S_5})^2 + (y_{H_1} - y_{S_5})^2} = 18.8\text{m}$$

$$\overline{H_2S_5} = \sqrt{(x_{H_2} - x_{S_5})^2 + (y_{H_2} - y_{S_5})^2} = 18.4\text{m}$$

$$\overline{H_3S_5} = \sqrt{(x_{H_3} - x_{S_5})^2 + (y_{H_3} - y_{S_5})^2} = 9.4\text{m}$$

$$\overline{H_4S_5} = \sqrt{(x_{H_4} - x_{S_5})^2 + (y_{H_4} - y_{S_5})^2} = 9\text{m}$$

$$\overline{H_5S_5} = \sqrt{(x_{H_5} - x_{S_5})^2 + (y_{H_5} - y_{S_5})^2} = 0.015\text{m}$$

$$\overline{H_6S_5} = \sqrt{(x_{H_6} - x_{S_5})^2 + (y_{H_6} - y_{S_5})^2} = 0.4\text{m}$$

$$V_5 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{24}{18.8} + q_2 \ln \frac{24}{18.4} + q_3 \ln \frac{24}{9.4} + q_4 \ln \frac{24}{9} + q_5 \ln \frac{24}{0.015} + q_6 \ln \frac{24}{0.4})$$

$$= 220 \cdot 10^3 e^{j240^\circ} \text{ V}$$

S_6 sınır noktasındaki potansiyel:

$$V_6 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_1 S_6} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_2 S_6} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_3 S_6} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_4 S_6} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_5 S_6} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_6 S_6})$$

Yükler ile S_6 sınır noktası arasındaki uzaklık:

$$\overline{H_1 S_6} = \sqrt{(x_{H_1} - x_{S_6})^2 + (y_{H_1} - y_{S_6})^2} = 19.2 \text{ m}$$

$$\overline{H_2 S_6} = \sqrt{(x_{H_2} - x_{S_6})^2 + (y_{H_2} - y_{S_6})^2} = 18.8 \text{ m}$$

$$\overline{H_3 S_6} = \sqrt{(x_{H_3} - x_{S_6})^2 + (y_{H_3} - y_{S_6})^2} = 9.8 \text{ m}$$

$$\overline{H_4 S_6} = \sqrt{(x_{H_4} - x_{S_6})^2 + (y_{H_4} - y_{S_6})^2} = 9.4 \text{ m}$$

$$\overline{H_5 S_6} = \sqrt{(x_{H_5} - x_{S_6})^2 + (y_{H_5} - y_{S_6})^2} = 0.4 \text{ m}$$

$$\overline{H_6 S_6} = \sqrt{(x_{H_6} - x_{S_6})^2 + (y_{H_6} - y_{S_6})^2} = 0.015 \text{ m}$$

$$V_6 = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} (q_1 \ln \frac{24}{19.2} + q_2 \ln \frac{24}{18.8} + q_3 \ln \frac{24}{9.8} + q_4 \ln \frac{24}{9.4} + q_5 \ln \frac{24}{0.4} + q_6 \ln \frac{24}{0.015})$$

$$= 220 \cdot 10^3 e^{j240^\circ} \text{ V}$$

Potansiyel denklemleri matris biçiminde yazılırsa

$$\begin{bmatrix} 13.28 & 7.37 & 1.68 & 1.6 & 0.44 & 0.4 \\ 7.37 & 13.28 & 1.76 & 1.68 & 0.48 & 0.44 \\ 1.68 & 1.76 & 13.28 & 7.37 & 1.68 & 1.6 \\ 1.6 & 1.68 & 7.37 & 13.28 & 1.76 & 1.68 \\ 0.44 & 0.48 & 1.68 & 1.76 & 13.28 & 7.37 \\ 0.4 & 0.44 & 1.6 & 1.68 & 7.37 & 13.28 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.2 \\ 2.2 \\ -1.1 + j1.9 \\ -1.1 + j1.9 \\ -1.1 - j1.9 \\ -1.1 - j1.9 \end{bmatrix}$$

elde edilir. Bu denklem sistemi çözülmüşse benzetim yükleri

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.79 - j1.28 \\ 12.03 - j1.43 \\ -6.71 + j11.08 \\ -6.26 + j11.34 \\ -4.77 - j11.11 \\ -4.79 - j10.82 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7} \text{ C}$$

kompleks olarak bulunur.

A(0;1.2) koordinatlı noktadaki potansiyel

$$V_A = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_{1A}} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_{2A}} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_{3A}} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_{4A}} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_{5A}} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_{6A}})$$

$$H_{1A} = H_{6A} = \sqrt{(x_{H1} - x_A)^2 + (y_{H1} - y_A)^2} = \sqrt{(-9.6 - 0)^2 + (24 - 1.2)^2} = 24.74 \text{ m}$$

$$H_{2A} = H_{5A} = \sqrt{(x_{H2} - x_A)^2 + (y_{H2} - y_A)^2} = \sqrt{(-9.2 - 0)^2 + (24 - 1.2)^2} = 24.58 \text{ m}$$

$$H_{3A} = H_{4A} = \sqrt{(x_{H3} - x_A)^2 + (y_{H3} - y_A)^2} = \sqrt{(-0.2 - 0)^2 + (24 - 1.2)^2} = 22.8 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} ((11.79 - j1.28) \ln \frac{24}{24.74} + (12.03 - j1.43) \ln \frac{24}{24.58} + (-6.71 + j11.08) \ln \frac{24}{22.8} \\ &+ (-6.26 + j11.34) \ln \frac{24}{22.8} + (-4.77 - j11.11) \ln \frac{24}{24.58} + (-4.79 - j10.82) \ln \frac{24}{24.74}) \\ &= -1892.18 + j3270.4 \\ &= 3778.34 e^{j120^\circ} \text{ V} \end{aligned}$$

B(0;1.6) koordinatlı noktadaki potansiyel

$$V_B = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_{1B}} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_{2B}} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_{3B}} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_{4B}} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_{5B}} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_{6B}})$$

$$H_{1B} = H_{6B} = \sqrt{(x_{H1} - x_B)^2 + (y_{H1} - y_B)^2} = \sqrt{(-9.6 - 0)^2 + (24 - 1.6)^2} = 24.37 \text{ m}$$

$$H_{2B} = H_{5B} = \sqrt{(x_{H2} - x_B)^2 + (y_{H2} - y_B)^2} = \sqrt{(-9.2 - 0)^2 + (24 - 1.6)^2} = 24.21 \text{ m}$$

$$H_{3B} = H_{4B} = \sqrt{(x_{H3} - x_B)^2 + (y_{H3} - y_B)^2} = \sqrt{(-0.2 - 0)^2 + (24 - 1.6)^2} = 22.4 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
V_B &= \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left((11.79 - j1.28) \ln \frac{24}{24.37} + (12.03 - j1.43) \ln \frac{24}{24.21} + (-6.71 + j11.08) \ln \frac{24}{22.4} \right. \\
&\quad \left. + (-6.26 + j11.34) \ln \frac{24}{22.4} + (-4.77 - j11.11) \ln \frac{24}{24.21} + (-4.79 - j10.82) \ln \frac{24}{24.37} \right) \\
&= -1917.3 + j3314.13 \\
&= 3828.78 e^{j120^\circ} \text{ V}
\end{aligned}$$

C(0;1.8) koordinatlı noktadaki potansiyel

$$V_C = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_1 \ln \frac{H_{1T}}{H_{1C}} + q_2 \ln \frac{H_{2T}}{H_{2C}} + q_3 \ln \frac{H_{3T}}{H_{3C}} + q_4 \ln \frac{H_{4T}}{H_{4C}} + q_5 \ln \frac{H_{5T}}{H_{5C}} + q_6 \ln \frac{H_{6T}}{H_{6C}})$$

$$H_{1C} = H_{6C} = \sqrt{(x_{H1} - x_C)^2 + (y_{H1} - y_C)^2} = \sqrt{(-9.6 - 0)^2 + (24 - 1.8)^2} = 24.18 \text{ m}$$

$$H_{2C} = H_{5C} = \sqrt{(x_{H2} - x_C)^2 + (y_{H2} - y_C)^2} = \sqrt{(-9.2 - 0)^2 + (24 - 1.8)^2} = 24.03 \text{ m}$$

$$H_{3C} = H_{4C} = \sqrt{(x_{H3} - x_C)^2 + (y_{H3} - y_C)^2} = \sqrt{(-0.2 - 0)^2 + (24 - 1.8)^2} = 22.2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
V_C &= \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left((11.79 - j1.28) \ln \frac{24}{24.18} + (12.03 - j1.43) \ln \frac{24}{24.03} + (-6.71 + j11.08) \ln \frac{24}{22.2} \right. \\
&\quad \left. + (-6.26 + j11.34) \ln \frac{24}{22.2} + (-4.77 - j11.11) \ln \frac{24}{24.03} + (-4.79 - j10.82) \ln \frac{24}{24.18} \right) \\
&= -1930.56 + j3337.15 \\
&= 3855.34 e^{j120^\circ} \text{ V}
\end{aligned}$$

A(0;1.2) noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_A = E_{Ax} \cdot \mathbf{i} + E_{Ay} \cdot \mathbf{j}$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$\begin{aligned}
E_{Ax} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_A}{H_{1A}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_A}{H_{2A}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_A}{H_{3A}^2} \right) q_3 + \left(\frac{x_{H4} - x_A}{H_{4A}^2} \right) q_4 \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{x_{H5} - x_A}{H_{5A}^2} \right) q_5 + \left(\frac{x_{H6} - x_A}{H_{6A}^2} \right) q_6 \right]
\end{aligned}$$

$$E_{Ax} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-9.6-0}{24.73^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{-9.2-0}{24.58^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\ \left. + \left(\frac{-0.2-0}{22.8^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{0.2-0}{22.8^2} \right) (-6.26 + j11.34) \right. \\ \left. + \left(\frac{9.2-0}{24.58^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{9.6-0}{24.73^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right]$$

$$= 928.63 + j534.69$$

$$= 1071.57 e^{j30^\circ} \text{ V/m}$$

$$E_{Ay} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_A}{H_{1A}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_A}{H_{2A}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_A}{H_{3A}^2} \right) q_3 + \left(\frac{y_{H4} - y_A}{H_{4A}^2} \right) q_4 \right. \\ \left. + \left(\frac{y_{H5} - y_A}{H_{5A}^2} \right) q_5 + \left(\frac{y_{H6} - y_A}{H_{6A}^2} \right) q_6 \right]$$

$$E_{Ay} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{24-1.2}{24.73^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{24-1.2}{24.58^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\ \left. + \left(\frac{24-1.2}{22.8^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{24-1.2}{22.8^2} \right) (-6.26 + j11.34) \right. \\ \left. + \left(\frac{24-1.2}{24.58^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{24-1.2}{24.73^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right]$$

$$= -61.06 + j106.2$$

$$= 122.5 e^{j120^\circ} \text{ V/m}$$

A(0;1.2) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_A = \sqrt{E_{Ax}^2 + E_{Ay}^2}$$

$$E_A = 1078.55 \text{ V/m}$$

B(0;1.6) noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_B = E_{Bx} \cdot i + E_{By} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Bx} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_B}{H_{1B}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_B}{H_{2B}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_B}{H_{3B}^2} \right) q_3 + \left(\frac{x_{H4} - x_B}{H_{4B}^2} \right) q_4 \right. \\ \left. + \left(\frac{x_{H5} - x_B}{H_{5B}^2} \right) q_5 + \left(\frac{x_{H6} - x_B}{H_{6B}^2} \right) q_6 \right]$$

$$\begin{aligned}
E_{B_x} &= \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-9.6-0}{24.37^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{-9.2-0}{24.21^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\
&+ \left(\frac{-0.2-0}{22.4^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{0.2-0}{22.4^2} \right) (-6.26 + j11.34) \\
&+ \left(\frac{9.2-0}{24.21^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{9.6-0}{24.37^2} \right) (-4.79 - j10.82) \left. \right] \\
&= 956.75 + j550.88 \\
&= 1104 e^{j30^\circ} \text{ V/m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{B_y} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H_1} - y_B}{H_{1B}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H_2} - y_B}{H_{2B}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H_3} - y_B}{H_{3B}^2} \right) q_3 + \left(\frac{y_{H_4} - y_B}{H_{4B}^2} \right) q_4 \right. \\
&+ \left. \left(\frac{y_{H_5} - y_B}{H_{5B}^2} \right) q_5 + \left(\frac{y_{H_6} - y_B}{H_{6B}^2} \right) q_6 \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{B_y} &= \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{24-1.6}{24.37^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{24-1.6}{24.21^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\
&+ \left(\frac{24-1.6}{22.4^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{24-1.6}{22.4^2} \right) (-6.26 + j11.34) \\
&+ \left(\frac{24-1.6}{24.21^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{24-1.6}{24.37^2} \right) (-4.79 - j10.82) \left. \right] \\
&= -67.57 + j117.5 \\
&= 135.54 e^{j120^\circ} \text{ V/m}
\end{aligned}$$

B(0;1.6) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_B = \sqrt{E_{B_x}^2 + E_{B_y}^2}$$

$$E_B = 1112.3 \text{ V/m}$$

C(0;1.8) noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_C = E_{C_x} \cdot i + E_{C_y} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$\begin{aligned}
E_{C_x} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H_1} - x_C}{H_{1C}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H_2} - x_C}{H_{2C}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H_3} - x_C}{H_{3C}^2} \right) q_3 + \left(\frac{x_{H_4} - x_C}{H_{4C}^2} \right) q_4 \right. \\
&+ \left. \left(\frac{x_{H_5} - x_C}{H_{5C}^2} \right) q_5 + \left(\frac{x_{H_6} - x_C}{H_{6C}^2} \right) q_6 \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{Cx} &= \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-9.6-0}{24.18^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{-9.2-0}{24.03^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\
&+ \left(\frac{-0.2-0}{22.2^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{0.2-0}{22.2^2} \right) (-6.26 + j11.34) \\
&+ \left(\frac{9.2-0}{24.03^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{9.6-0}{24.18^2} \right) (-4.79 - j10.82) \Big] \\
&= 971.49 + j559.37 \\
&= 1121.02 e^{j30^\circ} \text{ V/m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{Cy} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_C}{H_{1C}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_C}{H_{2C}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_C}{H_{3C}^2} \right) q_3 + \left(\frac{y_{H4} - y_C}{H_{4C}^2} \right) q_4 \right. \\
&+ \left. \left(\frac{y_{H5} - y_C}{H_{5C}^2} \right) q_5 + \left(\frac{y_{H6} - y_C}{H_{6C}^2} \right) q_6 \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{Cy} &= \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{24-1.8}{24.18^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{24-1.8}{24.03^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\
&+ \left(\frac{24-1.8}{22.2^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{24-1.8}{22.2^2} \right) (-6.26 + j11.34) \\
&+ \left(\frac{24-1.8}{24.03^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{24-1.8}{24.18^2} \right) (-4.79 - j10.82) \Big] \\
&= -70.79 + j123.06 \\
&= 141.97 e^{j120^\circ} \text{ V/m}
\end{aligned}$$

C(0;1.8) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_C = \sqrt{E_{Cx}^2 + E_{Cy}^2}$$

$$E_C = 1130 \text{ V/m}$$

D(14.6;1) Noktasındaki Elektrik Alan Şiddeti

$$E_D = E_{Dx} \cdot i + E_{Dy} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$\begin{aligned}
E_{Dx} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_D}{H_{1D}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_D}{H_{2D}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_D}{H_{3D}^2} \right) q_3 + \left(\frac{x_{H4} - x_D}{H_{4D}^2} \right) q_4 \right. \\
&+ \left. \left(\frac{x_{H5} - x_D}{H_{5D}^2} \right) q_5 + \left(\frac{x_{H6} - x_D}{H_{6D}^2} \right) q_6 \right]
\end{aligned}$$

$$H_{1D} = \sqrt{(x_{H1} - x_D)^2 + (y_{H1} - y_D)^2} = \sqrt{(-9.6 - 14.6)^2 + (24 - 1)^2} = 33.38\text{m}$$

$$H_{2D} = \sqrt{(x_{H2} - x_D)^2 + (y_{H2} - y_D)^2} = \sqrt{(-9.2 - 14.6)^2 + (24 - 1)^2} = 33.09\text{m}$$

$$H_{3D} = \sqrt{(x_{H3} - x_D)^2 + (y_{H3} - y_D)^2} = \sqrt{(-0.2 - 14.6)^2 + (24 - 1)^2} = 27.35\text{m}$$

$$H_{4D} = \sqrt{(x_{H4} - x_D)^2 + (y_{H4} - y_D)^2} = \sqrt{(0.2 - 14.6)^2 + (24 - 1)^2} = 27.13\text{m}$$

$$H_{5D} = \sqrt{(x_{H5} - x_D)^2 + (y_{H5} - y_D)^2} = \sqrt{(9.2 - 14.6)^2 + (24 - 1)^2} = 23.62\text{m}$$

$$H_{6D} = \sqrt{(x_{H6} - x_D)^2 + (y_{H6} - y_D)^2} = \sqrt{(9.6 - 14.6)^2 + (24 - 1)^2} = 23.53\text{m}$$

$$\begin{aligned} E_{Dx} = & \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-9.6 - 14.6}{33.38^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{-9.2 - 14.6}{33.09^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\ & + \left(\frac{-0.2 - 14.6}{27.35^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{0.2 - 14.6}{27.13^2} \right) (-6.26 + j11.34) \\ & \left. + \left(\frac{9.2 - 14.6}{23.62^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{9.6 - 14.6}{23.53^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right] \end{aligned}$$

$$= -211.07 - j466.33$$

$$= 511.88 e^{j65^\circ} \text{V/m}$$

$$\begin{aligned} E_{Dy} = & \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_D}{H_{1D}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_D}{H_{2D}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_D}{H_{3D}^2} \right) q_3 + \left(\frac{y_{H4} - y_D}{H_{4D}^2} \right) q_4 \right. \\ & \left. + \left(\frac{y_{H5} - y_D}{H_{5D}^2} \right) q_5 + \left(\frac{y_{H6} - y_D}{H_{6D}^2} \right) q_6 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{Dy} = & \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{24 - 1}{33.38^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{24 - 1}{33.09^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\ & + \left(\frac{24 - 1}{27.35^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{24 - 1}{27.13^2} \right) (-6.26 + j11.34) \\ & \left. + \left(\frac{24 - 1}{23.62^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{24 - 1}{23.53^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right] \end{aligned}$$

$$= -542.77 - j484$$

$$= 727.3 e^{-j138^\circ} \text{V/m}$$

D(14.6;1) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_D = \sqrt{E_{Dx}^2 + E_{Dy}^2}$$

$$E_D = 889.37 \text{ V/m}$$

E(19.6;1) Noktasındaki Elektrik Alan Şiddeti

$$E_E = E_{Ex} \cdot \mathbf{i} + E_{Ey} \cdot \mathbf{j}$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Ex} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_E}{H_{1E}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_E}{H_{2E}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_E}{H_{3E}^2} \right) q_3 + \left(\frac{x_{H4} - x_E}{H_{4E}^2} \right) q_4 + \left(\frac{x_{H5} - x_E}{H_{5E}^2} \right) q_5 + \left(\frac{x_{H6} - x_E}{H_{6E}^2} \right) q_6 \right]$$

$$H_{1E} = \sqrt{(x_{H1} - x_E)^2 + (y_{H1} - y_E)^2} = \sqrt{(-9.6 - 19.6)^2 + (24 - 1)^2} = 37.17 \text{ m}$$

$$H_{2E} = \sqrt{(x_{H2} - x_E)^2 + (y_{H2} - y_E)^2} = \sqrt{(-9.2 - 19.6)^2 + (24 - 1)^2} = 36.85 \text{ m}$$

$$H_{3E} = \sqrt{(x_{H3} - x_E)^2 + (y_{H3} - y_E)^2} = \sqrt{(-0.2 - 19.6)^2 + (24 - 1)^2} = 30.34 \text{ m}$$

$$H_{4E} = \sqrt{(x_{H4} - x_E)^2 + (y_{H4} - y_E)^2} = \sqrt{(0.2 - 19.6)^2 + (24 - 1)^2} = 30.09 \text{ m}$$

$$H_{5E} = \sqrt{(x_{H5} - x_E)^2 + (y_{H5} - y_E)^2} = \sqrt{(9.2 - 19.6)^2 + (24 - 1)^2} = 25.24 \text{ m}$$

$$H_{6E} = \sqrt{(x_{H6} - x_E)^2 + (y_{H6} - y_E)^2} = \sqrt{(9.6 - 19.6)^2 + (24 - 1)^2} = 25.08 \text{ m}$$

$$E_{Ex} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-9.6 - 19.6}{37.17^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{-9.2 - 19.6}{36.85^2} \right) (12.03 - j1.43) + \left(\frac{-0.2 - 19.6}{30.34^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{0.2 - 19.6}{30.09^2} \right) (-6.26 + j11.34) + \left(\frac{9.2 - 19.6}{25.24^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{9.6 - 19.6}{25.08^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right]$$

$$= -129.6 - j126.7$$

$$= 181.28 e^{j44^\circ} \text{ V/m}$$

$$E_{Ey} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_E}{H_{1E}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_E}{H_{2E}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_E}{H_{3E}^2} \right) q_3 + \left(\frac{y_{H4} - y_E}{H_{4E}^2} \right) q_4 + \left(\frac{y_{H5} - y_E}{H_{5E}^2} \right) q_5 + \left(\frac{y_{H6} - y_E}{H_{6E}^2} \right) q_6 \right]$$

$$E_{Ey} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{24-1}{37.17^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{24-1}{36.85^2} \right) (12.03 - j1.43) + \left(\frac{24-1}{30.34^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{24-1}{30.09^2} \right) (-6.26 + j11.34) + \left(\frac{24-1}{25.24^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{24-1}{25.08^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right]$$

$$= -493.17 - j498.8$$

$$= 701.5 e^{-j135^\circ} \text{ V/m}$$

$E(19.6;1)$ noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_E = \sqrt{E_{Ex}^2 + E_{Ey}^2}$$

$$E_E = 724.54 \text{ V/m}$$

F(21.8;1) Noktasındaki Elektrik Alan Şiddeti

$$E_F = E_{Fx} \cdot i + E_{Fy} \cdot j$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$E_{Fx} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\left(\frac{x_{H1} - x_F}{H_{1F}^2} \right) q_1 + \left(\frac{x_{H2} - x_F}{H_{2F}^2} \right) q_2 + \left(\frac{x_{H3} - x_F}{H_{3F}^2} \right) q_3 + \left(\frac{x_{H4} - x_F}{H_{4F}^2} \right) q_4 + \left(\frac{x_{H5} - x_F}{H_{5F}^2} \right) q_5 + \left(\frac{x_{H6} - x_F}{H_{6F}^2} \right) q_6 \right]$$

$$H_{1F} = \sqrt{(x_{H1} - x_F)^2 + (y_{H1} - y_F)^2} = \sqrt{(-9.6 - 24.6)^2 + (24 - 1)^2} = 41.21 \text{ m}$$

$$H_{2F} = \sqrt{(x_{H2} - x_F)^2 + (y_{H2} - y_F)^2} = \sqrt{(-9.2 - 24.6)^2 + (24 - 1)^2} = 40.88 \text{ m}$$

$$H_{3F} = \sqrt{(x_{H3} - x_F)^2 + (y_{H3} - y_F)^2} = \sqrt{(-0.2 - 24.6)^2 + (24 - 1)^2} = 33.82 \text{ m}$$

$$H_{4F} = \sqrt{(x_{H4} - x_F)^2 + (y_{H4} - y_F)^2} = \sqrt{(0.2 - 24.6)^2 + (24 - 1)^2} = 33.53 \text{ m}$$

$$H_{5F} = \sqrt{(x_{H5} - x_F)^2 + (y_{H5} - y_F)^2} = \sqrt{(9.2 - 24.6)^2 + (24 - 1)^2} = 27.68 \text{ m}$$

$$H_{6F} = \sqrt{(x_{H6} - x_F)^2 + (y_{H6} - y_F)^2} = \sqrt{(9.6 - 24.6)^2 + (24 - 1)^2} = 27.46 \text{ m}$$

$$E_{Fx} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{-9.6 - 24.6}{41.21^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{-9.2 - 24.6}{40.88^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\ \left. + \left(\frac{-0.2 - 24.6}{33.82^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{0.2 - 24.6}{33.53^2} \right) (-6.26 + j11.34) \right. \\ \left. + \left(\frac{9.2 - 24.6}{27.68^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{9.6 - 24.6}{27.46^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right]$$

$$= -15 + j10$$

$$= 18.56 e^{j34^\circ} \text{ V/m}$$

$$E_{Fy} = \frac{1}{2\pi \epsilon} \left[\left(\frac{y_{H1} - y_F}{H_{1F}^2} \right) q_1 + \left(\frac{y_{H2} - y_F}{H_{2F}^2} \right) q_2 + \left(\frac{y_{H3} - y_F}{H_{3F}^2} \right) q_3 + \left(\frac{y_{H4} - y_F}{H_{4F}^2} \right) q_4 \right. \\ \left. + \left(\frac{y_{H5} - y_F}{H_{5F}^2} \right) q_5 + \left(\frac{y_{H6} - y_F}{H_{6F}^2} \right) q_6 \right]$$

$$E_{Fy} = \frac{1}{2\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} \left[\left(\frac{24 - 1}{41.21^2} \right) (11.79 - j1.28) + \left(\frac{24 - 1}{40.88^2} \right) (12.03 - j1.43) \right. \\ \left. + \left(\frac{24 - 1}{33.82^2} \right) (-6.71 + j11.08) + \left(\frac{24 - 1}{33.53^2} \right) (-6.26 + j11.34) \right. \\ \left. + \left(\frac{24 - 1}{27.68^2} \right) (-4.77 - j11.11) + \left(\frac{24 - 1}{27.46^2} \right) (-4.79 - j10.82) \right]$$

$$= -408.56 - j442$$

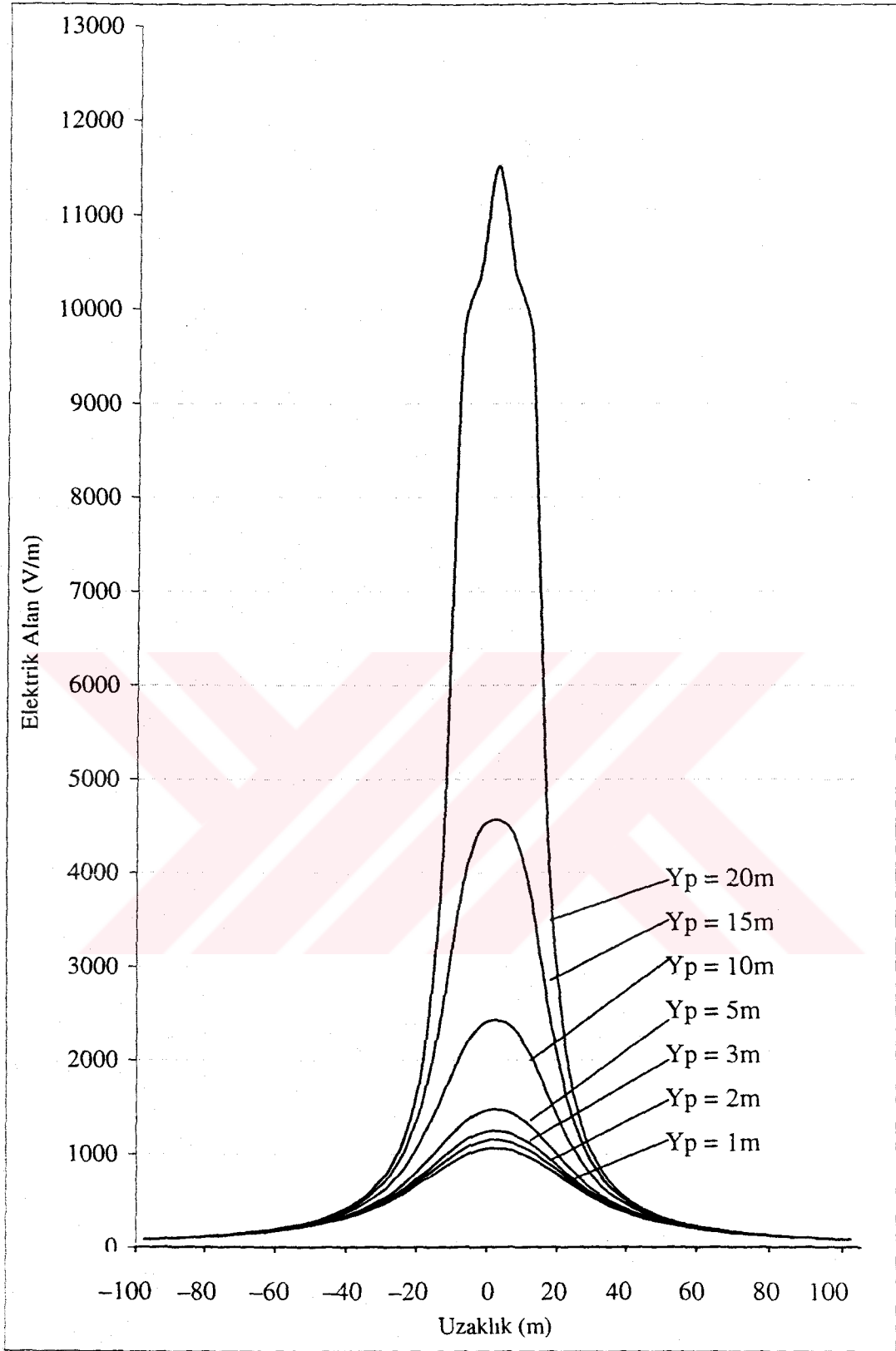
$$= 601.95 e^{-j133^\circ} \text{ V/m}$$

F(21.6;1) noktasındaki bileşke elektrik alan şiddeti

$$E_F = \sqrt{E_{Fx}^2 + E_{Fy}^2}$$

$$E_F = 602.24 \text{ V/m}$$

Geliştirilen bilgisayar programıyla, orta fazın tam altından her iki yönde 100'er metre yatay mesafelerde ve toprak seviyesinden 1, 2, 3, 5, 10, 15 ve 20 m düşey mesafelerde hesaplanan değerlerden yola çıkılarak çizilen elektrik alan – uzaklık eğrisi Şekil 3.10.'da verilmiştir.



Şekil 3.10. 380 kV'luk iletim hattı için elektrik alan – uzaklık eğrisi

4. ELEKTRİK ALANLARIN BİYOLOJİK ETKİLERİ

Çevrenin kimyasal atıklarla kirletilmesi tartışılmaya devam etmekle beraber artık elektromagnetik kirlenme de gündemimize girmiştir. Modern toplumlarda yaşayan hemen herkes sürekli olarak doğal olaylardan kaynaklananların çok üzerinde elektromagnetik alan ve dalgalara maruz kalmaktadır. Bunların yüksek şiddet veya güç düzeyinde insan sağlığına zararlı olduklarına kuşku yoktur. Ancak insanların günlük hayatta karşılaştıkları daha düşük düzeydeki alan ve dalgaların dahi uzun vadede insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilerinin olup olmadığı tartışma konusu olmaya devam etmektedir.

Elektromagnetik dalgalar insan organizmasında önemli ölçüde karışıklığa neden olabilirler. Vücudun molekül ve atomları kendi aralarında kurdukları dengeyi kaybedebilir, biyokimyasal faaliyetler etkilenebilir ve en önemlisi hücrelerin ve dolayısıyla dokuların işleyişindeki elektriksel yapı bozulabilir. Kalp - dolaşım sistemi, bağışıklık sistemi ve sinir sisteminde buna bağlı bozukluklar ortaya çıkabilir. Vücudun bağışıklık sisteminin sürekli zayıflamasının kanseri artıran veya kanseri başlatan, tetikleyen bir etki yapacağı sorusu da gündeme gelmiştir. Çocuklarda kan kanseri riskinin artmasını, kan tablosunun değişmesini, baş ağrısının ve baş dönmesinin artmasını elektromagnetik alanlara bağlayan çalışmalar vardır. İnsan sağlığı açısından artık bir risk faktörü oluşturan elektrik alanların biyolojik etkilerini araştıran çalışmaların sayısı hızla artmaya başlamıştır [10].

ABD ve Avrupa ülkelerinde yirmi yılı aşkın bir süreden beri araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar, elektromagnetik alanların kanserle bir ilişkisi olup olmadığını belirlemeye yönelik istatistiksel (epidemiyolojik) araştırmalar, biyolojik etkilenmenin oluşumunu inceleyen araştırmalar ve canlı hayvanlar veya dokular üzerinde yapılan laboratuvar çalışmaları ve elektrik alan değerlerinin ölçülmesi ve hesaplanması için yapılan mühendislik araştırmalarıdır [11].

Gelişmiş her ülkede olduğu gibi elektromagnetik enerjinin kullanımının ülkemizde de giderek yaygınlaşması nedeniyle çoğumuz sürekli olarak değişik şiddetlerde elektrik alanlara maruz kalmaktayız. Normal bir evde güç frekanslı alanlar 1 – 20 kV/m aralığında değişir. Elektrikli

ev aletlerinin oluşturduğu elektrik alanların şiddeti 1 – 250 V/m arasında değişim göstermektedir. Örneğin elektrikli battaniye 250 V/m, renkli televizyon 30 V/m, buzdolabı 60 kV/m, saç kurutma makinası 40 V/m ve el mikseri de 50 V/m civarında elektrik alan yaratmaktadır. Elektrikli aletlerin yarattığı elektrik alanların dışında normal havada atmosferde 120 – 150 V/m şiddetinde doğal elektrik alanı mevcutken yıldırımlı havalarda bu değer 10 kV/m'ye ulaşmaktadır [11].

Ancak canlılar için en önemli etki çevreleri için elektrik alan kaynağı oluşturmaları nedeni ile yüksek gerilim hatlarından ve transformatörlerinden kaynaklanmaktadır. Yüksek gerilim hattı en fazla 750 kV'luk gerilime sahip olduğunda yarattığı elektrik alan şiddeti hattın yerden yüksekliğine göre 1 – 12 kV/m şiddetlerinde olabilmektedir.

Yüksek gerilim hatlarının yapımına ilişkin şartnameler hatların yerleşim merkezlerinin dışında ya da açığında kurulmasını gerektiriyorsa da, bugün yerleşim merkezlerinin içinden geçen yüksek gerilim hatları insan sağlığı açısından gerçek birer tehlike oluşturmaktadır. Halk sağlığı açısından yüksek gerilim hatlarının oluşturduğu elektrik alanların limit değerleri ve bu alanlarda kalış süreleri her gelişmiş ülke tarafından güvenlik standartları ile sınırlandırılmıştır. Çeşitli ülkelere ait güvenlik standartları ve Türkiye'deki durum Bölüm 5'da geniş olarak ifade edilmiştir.

4.1. ELF Elektrik Alanların Canlılar Üzerine Biyolojik Etkileri

Çoğumuz sürekli olarak çok düşük frekanslı (ELF) elektrik alanlara maruz kalmaktayız. ELF alanlara maruz kalmanın, bitkiler ve hayvanlar üzerindeki etkilerinin pek çoğunun değerlendirilmesi zordur. Bunun başlıca nedeni biyolojik sistemlerin çok karışık yapılı olmasıdır.

Yüksek gerilim hatlarının civarında hattan uzaklığa ve hattın gerilimine bağlı olarak elektrik alanı oluşur. Tablo 4.1.'de çeşitli taşıma hatlarının civarında oluşan elektrik alanların uzaklığa bağlı olarak sayısal değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.2.'de taşıma hattının altında bulunan bir insan vücudunun kafa, alın, omuz ve bacaklar gibi çeşitli bölümlerinde indüklenen elektrik alan değerleri verilmiştir [12].

Tablo 4.1. Taşıma Hatlarının Oluşturduğu Elektrik Alan Değerlerinin %50'ye İndiği Uzaklıklar

Gerilim (kV)	Yükseklik (m)	Maksimum Alan Şiddeti (kV/m)	Maks. Alan Şiddetinin Yarıya İndiği Uzaklıklar (m)
120	6.4	2	20
130	11.5	1.1	40
300	10.5	4	40
315	7.3	6	25
420	11.5	6	43
735	11	10.5	45
765	12	12	50
1150	14.5	20	75

Tablo 4.2. Taşıma Hattının Altında Bulunan İnsan Vücudunda Hesaplanan Elektrik Alan Şiddeti Değerleri

Hat Gerilimi (kV)	Baş	Şakak	Boyun	Omuz	Bacak ve ayaklar
225	32.8	21.5	5.6	12.2	5.8
400	76	51.9	12.4	39.6	13.4
750	135	94.1	22.5	72	24.4
1000	173	118	28.2	90	30.4

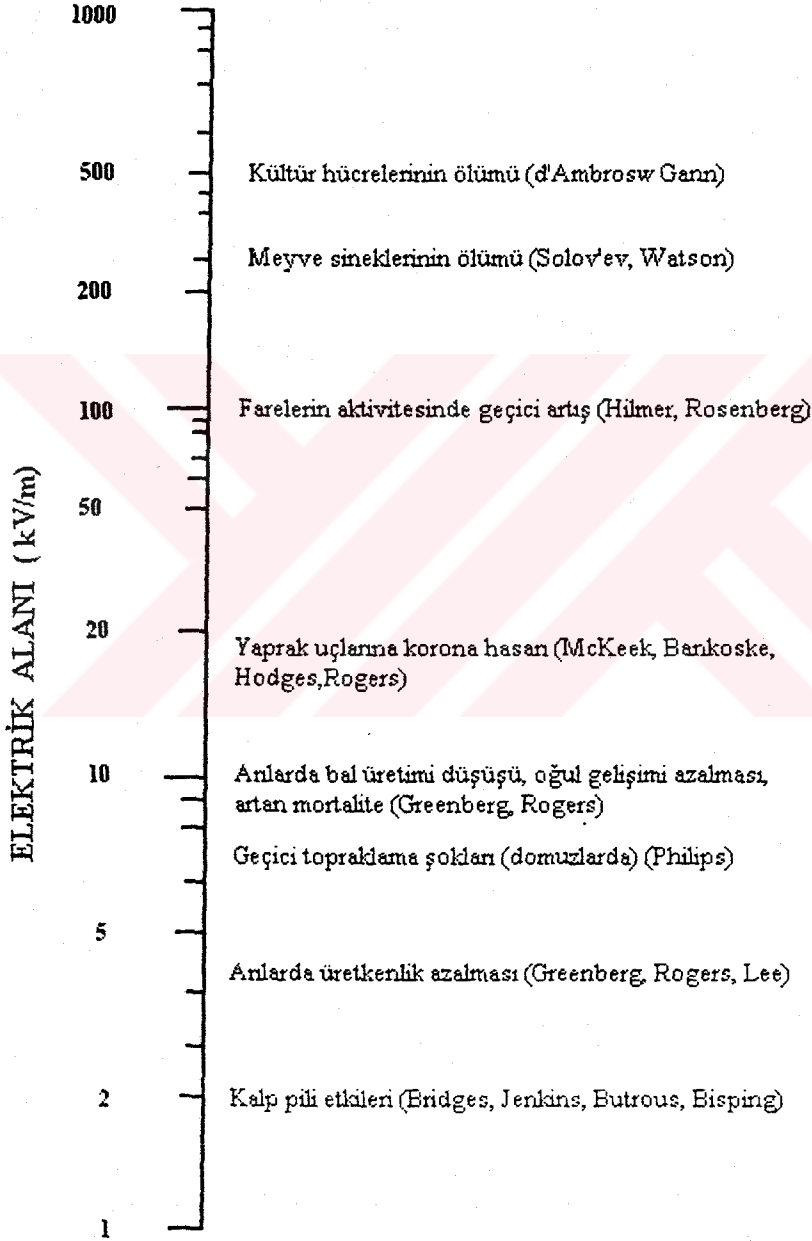
60 Hz'de 30 gün süresinde 100 kV/m'lik alanlara maruz kalan farelerden alınan sinirlerin incelenmesi sonucu halsizlik oranında azalma ve sinirsel uyarımlarda artışları gösteren gerilim – süre eğrisinde kaymalar görülmüştür.

Köpekler üzerine yapılan deneyler, 50 Hz'de 25 kV/m şiddetli elektrik alanlarına 6 hafta boyunca 8 saat süreyle maruz kalma sonucunda kan kimyasında önemli değişimler göstermiştir. Bu değişimler reticulocyteste artış, hemoglobin konsantrasyonunda azalma, serum proteinde artış, neutrophils'de azalma ve lymphocytes'de artıştır. Fareler üzerine yapılan aynı deneylerde büyüme oranı 25 ve 100 kV/m'lik alanlarda yavaşça artış göstermiştir. Bu farelerde ayrıca neutrophils'de artış, lymphocytes'de azalma olmuştur.

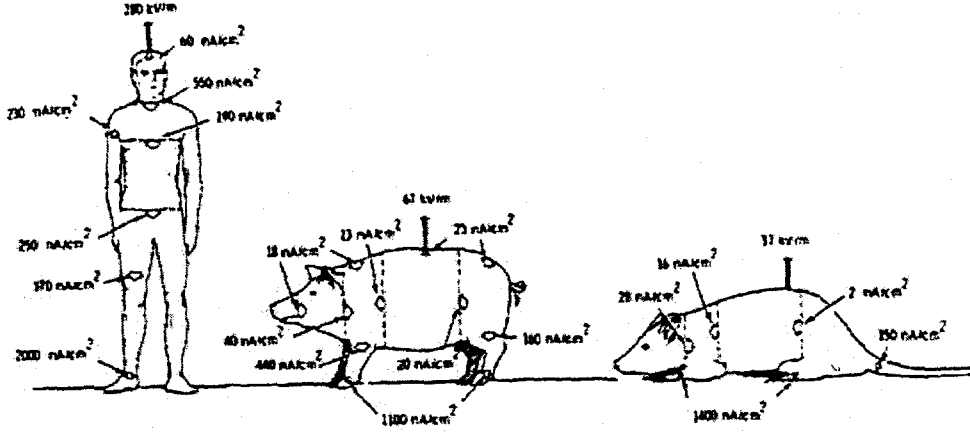
765 kV'luk iletim hatlarının altına yerleştirilen bal arıları üzerine yapılan deneylerde, 0.6-4.5 kV/m'lik alanlar sağlığa önemli miktarda zarar verebilecek etkiler gözlenmiştir. Bunlar aynı bölgede ekranlanmış yuvalarda yaşayanlara göre kış süresince ölüm oranlarında %64 artış olarak özetlenebilir. Aynı çalışmada 1.1-8.3 kV/m'lik alana maruz kalan yuvalardaki arılar

yaz süresince hiç bal üretmediği ve ağırlıklarında azalma olduğu, kışı sağ olarak geçirmede başarısız kaldığı anlaşılmıştır. Son zamanlarda kovanlara elektrik şoku verilerek yapılan deneyler de benzer sonuçlar vermiştir. Tablo 4.3'de birbirinden bağımsız araştırma gruplarının buldukları ortak sonuçlar özetlenmektedir. Deneyler büyük kV/m'li ELF alanlarının biyolojik sistemleri bozabilmesinin etki süresine bağlı olduğunu göstermiştir.

Tablo 4.3. Yüksek Gerilim Hatları Etrafında Yapılan Araştırma Sonuçları



10 kV/m 60 Hz'lik elektrik alanlara maruz bırakılan üç modelin yüzey elektrik alanları ve akım yoğunlukları Şekil 4.1.'de verilmiştir. Verilerin değerlendirilmesiyle üç model tarafından maruz kalınan elektrik alanların dozajının tamamen farklı olduğu görülmektedir. Doz yüzeysel elektrik alan tepe değeri ile gösterilirse, insanda hayvan modellerinden daha büyüktür.



Şekil 4.1. İnsan, domuz ve farenin yüzeyi üzerindeki en yüksek nokta için elektrik alan değerleri

İnsan sağlığı üzerinde ELF elektrik alanların muhtemel sağlığa zararlı etkileri hakkında ilk incelemeler Sovyetler Birliği'nde 1970'lerde başlamıştır. Bu çalışmalar ile 26 kV/m'ye kadar elektrik alana maruz kalan manevra anahtarlama işçilerinde baş ağrısı, sindirim bozukluğu, kardiyovasküler değişimler, libido azalması, uykusuzluk, sinirlilik artması gibi maruziyetle ilgili semptomlar ortaya atıldı. Bu bulgulardan sonra Sovyetler Birliği'nde ve çeşitli ülkelerde araştırmaların artmasına neden olmuştur. 50 Hz'de 1, 15 ve 20 kV/m'lik alanlara kısa periyotlar için maruz kalan 100 gönüllü için kapsamlı klinik değerlendirme sonucunda, alanla ilgili sadece beyaz kan hücrelerinde hafif artma ve reaksiyon süresinde hafif azalma gözlenmiştir [13,14].

4.2. Elektrik Alanların Epidemiyolojik Çalışmaları

Epidemiyolojik çalışmalar belirli bir hastalık ile olası sebebi arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak araştırır ve insan topluluklarının sağlığı hakkında doğrudan delil verir. Epidemiyolojik araştırmalar özel olarak elektrik alana maruz kalmayan bireylerle, maruz kalanlar üzerine yapılan çalışmaları içerir. Elektrik alanların etkilerinde, anlamlı epidemiyolojik çalışma yapmak oldukça zordur, çünkü dünyanın her yerinde elektrikten faydalanma söz konusu

olduğu için elektrik alanlara maruz kalmamış bireylerin bulunması mümkün değildir. Epidemiyoloji küçük riskleri ya da tanımlanmamış küçük alt gruplardaki riski belirlemek için uygun değildir. Düşük maruz kalma düzeyleri için sonuçlar çoğu zaman tutarsız ve elektrik alanlar ile hastalık arasında rapor edilen ilişki zayıf, gözlenmiş bir bağlantının maruz kalmadan mı yoksa bozucu başka bir etkenden mi kaynaklandığı açık değildir.

Yirmi yıldan fazla bir süredir, artan epidemiyolojik çalışmalar, elektrik iletim hatları ve ekipmanlarına yakın yerde çalışan veya yaşayan insanların daha fazla kanser riski taşıdıklarını öne sürmektedirler [12].

Düşük seviyelerde elektrik alan etkisinde kalan kişilerin, doğal çevrede bulunan alanlardan daha yüksek şiddette bir alan etkisine maruz kalması söz konusudur, bu durumda canlıların bu alanların olası etkilerine karşı evrimsel olarak edinilmiş özel bir korunma mekanizmalarının olması beklenemez. Böyle bir durumda, çeşitli biyolojik etkilerden birinin değilse bile bir diğerinin insanlara zararlı olma olasılığı yok sayılamaz. Birçok epidemiyolojik ve bilimsel çalışmalar da bunu desteklemektedir.

Ancak bugüne kadar elektrik alanlarla sebep oldukları iddia edilen çok sayıdaki kronik hastalık veya kanser, düşük veya sakat doğum, bağışıklık sistemi zayıflaması gibi sağlık sorunları arasında bütün araştırmacıların üzerinde anlaştığı çok açık neden – sonuç ilişkileri gösterilememiştir.

5. GÜVENLİK STANDARTLARI

5.1. Çeşitli Ülkelerde Yayınlanan Güvenlik Standartları

5.1.1. Almanya

Almanya'da 0 Hz'den 3000 GHz'e kadar frekansta elektromagnetik alanın tehlikelerine karşı insanları korumak için bir ulusal standart tasarısı Ağustos 1986'da yayınlanmış ve böylece itiraz ve fikir vermesi bakımından kamuoyuna sunulmuştur. Standardın 0 Hz ve 30 MHz arasındaki frekans ile ilgili bölümü onaylanmıştır.

Bütün düşük frekans oranlarını içeren, 0 Hz ve 30 MHz frekans aralığında, elektrik alan şiddetinin rms değeri için değer aşağıdaki ifade ile verilir.

$$E = a / f^b \quad (5.1)$$

Burada E, V/m olarak sınır değer, f Hertz cinsinden frekans, a ve b sabitleri ise Tablo 5.1.'de verilmiştir. Sınır değerler altında elektrik alanlara maruz kalmaya sınırsız zaman için izin verilir. Kısa zaman için (her çalışma günü için 2 saat), sınır değerinin 1.5 katına kadar üzerinde alan şiddetine maruz kalmalara izin verilir.

Tablo 5.1. ELF elektrik alan sınır değerleri için hesaplamalarda kullanılan parametre değerleri

Frekans(Hz)	a	b
0-10	40000	0
10-30000	102850	0.4101

Bazı insanların, 2 ila 10 kV/m yoğunluklu elektrik alanlarında rahatsızlık hissetmeleri mümkündür, ya da elektrik alan içinde diğer insanlara veya yüklü nesnelere dokunduğu zaman hoş gitmeyen elektriksel deşarjlara maruz kalabilir, bu

etkilerin varlığı kabul edilir, fakat günümüzde sağlık etkilerine bu duyarlılıkların ifadesini sağlayacak bilimsel veriler mevcut değildir.

5.1.2. Japonya

Japonya'da, bütün elektriksel ekipmanlar 1973'de yayınlanan, Uluslararası Ticaret ve Sanayi Bakanlığının düzenlediği Elektriksel Tesisatların Teknik Standartlarına mecbur tutulur. Kalabalık nüfuslu, % 25 ya da daha fazla yapıların kapladığı bölgelerde yüksek gerilim havai hatların yapımı yasaklanır. Standart ayrıca hat altında elektrik alan şiddeti için, toprak seviyesinden 1 m yükseklikte 3 kV/m'yi aşmayan sınır değer tayin eder. Bu sınır değer güç hatları altında metal şemsiyeden deşarjdan dolayı insan üzerinde hoş gitmeyen hissin önlenmesi niyetiyle açıklanır. Böylece bu rahatsız etki sadece hat altından geçtiği esnada şemsiyenin metal parçasına dokunan insanda meydana gelir, tarlalar, ormanlar vs. gibi içinde insanların geliş gidişlerinin nadiren olduğu yerlerde şart uygulanmaz.

Metal şemsiye ile yanak ya da parmağın temas ettiği zaman indüklenen akımın hissedilmesi yüzünden 3 kV/m olarak ortalama eşik değerin belirlenmesinde kullanılan bilimsel veriler 1976'da Japon IERE Konseyi tarafından rapor edildi. Tablo 5.2. ve 5.3.'da gösterildiği gibi, hissedebilme, psikolojik faktörler, şemsiyenin karakteristiklerine vs. bağlı olarak çeşitli seviyelerde alanın algılanması meydana gelir. Zaten 3 kV/m'nin altındaki alanlar sadece bazı insanlar tarafından hissedilebilir, halbuki 4-5 kV/m'lik alanlar rahatsız edici his verebilir. Yapılan araştırmada 48 de 7 kişi sadece 4 kV/m üzerindeki alanı algılamıştır.

Tablo 5.2. Şemsiyede indüklenen çeşitli gerilimler için yanakta hissetme

Elektrik Alan Şiddeti (kV/m)	Yanak şemsiye ile temas ettiği zaman hissedilen
0.5-1	Nadiren hissedilir
1.5 - 2	Hissedilir
2.5 - 3	Dokunulduğu anda hafifçe uyarma hissedilir
>4	Tamamen hissedilir

Tablo 5.3. 275 kV iletim hattı altında şemsiyeden hissedilen insanların sayısı

Elektrik Alan Şiddeti (kV/m)	insanların sayısı
<2	0
2,1 - 3	12
3,1 - 4	22
4,1 - 5	7
5,1 - 6	7

5.1.3. Amerika Birleşik Devletleri

Birleşik Devletler’de, düzenlemeler bir eyaletten diğerine genel olarak farklıdır. Yeni hatların dizayn kriterleri için, havai besleme ve iletişim hatlarının bakımı ve onların ilgili ekipmanları, yapıdan meydana gelen tehlikelerden kişilerin pratik olarak korunma tedbirleri için, bütün eyaletler Ulusal Elektrik Güvenlik Kodu (NESC)’nu ya da onun bazı düzenlemelerini kabul eder. Eğer toprağa kısa devre edilmiş hattın altında büyük ekipman ya da araç, kamyon 5 mA’lik deşarj akımı sınır değeri olarak, hatların dizaynının yapılmasında göz önünde bulundurulur

Hat güzergahı genişliği (ROW) kavramı bütün eyaletlerde elektrik şirketleri tarafından kabul edilir. Hat güzergahında ev kurmaya ve tam gün aktivitelerine izin verilmez. Hat güzergahının genişliği şirket politikasına ve hattın gerilimine bağlıdır. Elektrik alanların tipik değerleri Tablo 5.4.’te verilmiştir. Sadece maksimum müsaade edilebilir elektrik alan için tavsiye edilen birkaç yönetmelik vardır. Tablo 5.5.’te görüldüğü gibi, standartlar birbirine uymaz, böylece her bir eyaletin hat güzergahı sınırında ya da içinde farklı sınır değerleri vardır.

Tablo 5.4. ABD’de maksimum elektrik alan değerleri ve hat güzergahı genişlikleri

Gerilim (kV)	Maksimum alan şiddeti (kV/m)	Hat güzergahı genişliği (m)
345	5	45
500	8	53
765	10	76

Tablo 5.5. ABD’de iletim hatları altında tavsiye edilen elektrik alan şiddetinin sınır değerleri

Eyalet	Maksimum alan şiddeti(kV/m)	Açıklama
Minnesota	8	ROW içinde
Montana	7.1	Yol geçişinde
	1	ROW sınırında
New Jersey	3	ROW sınırında
New York	11.8	ROW içinde
	11	Özel yollarda
	7	Ulusal yollarda
	1.6	ROW sınırında
Kuzey Dakota	8	ROW içinde
Oregon	9	ROW içinde

Mevcut sınır değerler nüfusun korunmasını amaçlar. Trafo merkezlerinde çalışanlar için sabit olmayan kurallar mevcuttur. Benzer durum gerçekte, merkez otomasyonu ve koruyucu dizayndan dolayı yeterlidir, yüksek alanlarda çalışanların kaldığı süre azdır.

5.1.4. Rusya

Sovyetler Birliği’nde, Asanova – Rakov – ve Sazonova’nın bulgularını ifade etmelerinin neticesi olarak, iletim hatları tarafından üretilen elektrik alanlar için resmi maruziyet standartlarını yayınlayan ilk ülkedir. 400, 500 ve 700 kV AC trafo merkezleri ve iletim hatlarının tatbik edilerek çalışanlar hakkında ilk yönetmelik dokümanı, 29 Ekim 1970’de Sovyetler Birliği Sağlık Bakanlığı tarafından onaylandı, 1971’de uygulamaya geçildi. Beş yıl sonra, standart yeni yönetmelik ile değiştirildi, yeni yönetmelik 400 kV ve üzeri iletim hatlarında ve yeni 1150 kV EHV sistemlerde çalışanları da kapsar. Standarda göre, elektrik alanlara maruziyet süresi, alan şiddetine bağlı olarak Tablo 5.6.’da verildiği gibi sınırlandırılmıştır. Elektrik alanın direkt etkisi hakkında, organizmanın reaksiyonu kesin değildir, nispeten uzun süreden (2–5 ay) sonra gelişebilir, uzun müddet maruziyetin belirgin birikerek çoğalan etkileri vardır ve yaygın olarak bireyin karakteristiklerine bağlıdır.

Tablo 5.6. SSCB'de 500 kV ve üzeri, donanımlarda çalışanlar için elektrik alan maruziyet sınır değerleri

Elektrik alan şiddeti (kV/m)	İzin verilen günlük maruziyet süresi (dk)
5	Sınırsız
10	180
15	90
20	10
25	5

Not : Eğer çalışanlar standart tarafından izin verilen tam süre 10 kV/m ya da daha fazla elektrik alanlara maruz kalırsa, günün kalan kısmında 5 kV/m ya da daha az alanlarda kalmak zorundadır.

Yüksek alanlara maruziyetin sürdürülmesi kalp-damar sistemine, seksüel özelliklerin azalmasına, kan bileşimlerinde değişikliklere sebep olarak fonksiyonel rahatsızlık verebilir.

Elektrik deşarjları, bir insan elektrik alan içindeki nesneye dokunduğu zaman maruz kalınabilir, beynin dış tabakasında reflekslerin tutulması ve harekete geçirme rahatsızlığına yol açabilir. Büyük deşarjlar durumunda, kalp çarpıntısına (fibrilasyonuna) engel olunamayabilir.

5.1.5. Diğer Ülkeler

Avustralya:

Yüksek gerilim olarak 330 kV ve 500 kV iletim hatları mevcuttur. Hat güzergahı içinde 2 kV/m, hat güzergahı sınırında ise 5 kV/m'ye kadar müsaade edilmektedir. Hat güzergahı içinde tüm gün sürecek aktivitelere izin verilmemektedir.

Çek Cumhuriyeti:

Elektrik alan şiddetinin hat güzergahı içinde 15 kV/m ve anayol geçişinde 10 kV/m'yi aşmaması istenir. Hat güzergahında tarıma sınırlı olarak izin verilmektedir. Arabaların ve tarım makinelerinin hatların altında durmasına izin verilmez.

Polonya:

Elektrik alan sınır değeri 10 kV/m'dir. Bu değerin aşıldığı alanlarda, hat boyunca, güvenlik kuşağı oluşturulmaktadır. Bu alanda günlük aktivitelere izin verilmemektedir. İkinci bir koruma kuşağı yerleşim merkezleri için kabul edilen maksimum 1 kV/m'lik sınır değer ile 10 kV/m'lik alan arasındaki bölge olarak tespit edilir. Bu bölgede ancak geçici aktivitelere izin verilir. Çalışanlar için 15 kV/m'lik alan değerine maruz kalmaya izin verilir.

İngiltere:

Elektrik alanlarına mesleki maruz kalmalara 30 kV/m, girilebilir bölgelerde 12kV/m, ikamet bölgelerinde 2.6 kV/m sınır değerine izin verilmektedir.[1,15,16]

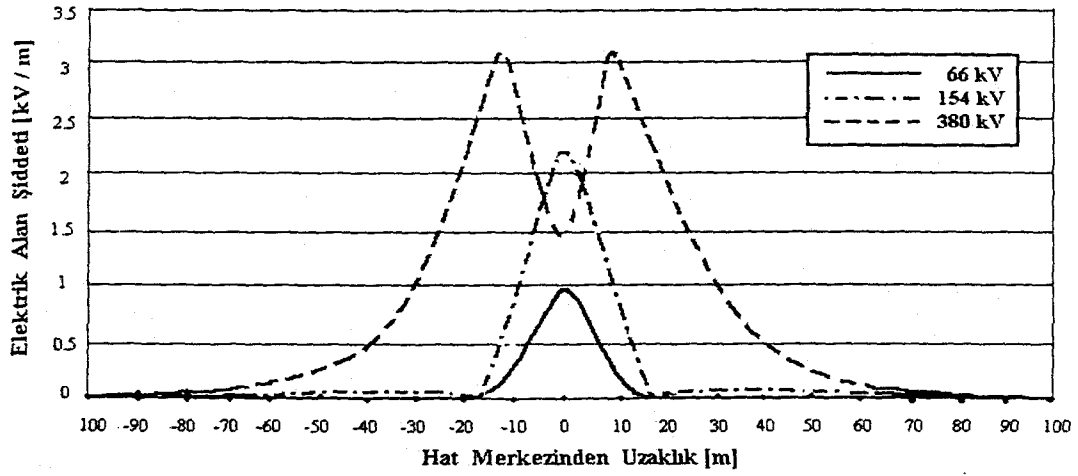
5.2. Türkiye'deki Durum

Ülkemizde enerji iletim hatlarından kaynaklı elektrik alanlara ilişkin özel bir standart bulunmamakta olup,. Türk Standartları Enstitüsünün, TS ENV 50166-1/Nisan 1996 Baskı ICS 29020 sayılı ve "İnsanların Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalması- Düşük Frekanslar (0 Hz – 10 kHz)" adlı standardında, iletim hatları için geçerli olan frekansla ilgili referans değerler de yer almaktadır. Bu değerler, Tablo 5.7'de verilmiştir [15, 17].

Tablo 5.7. 50 Hz Elektrik Alanlara Maruz Kalma Referans Seviyeleri

Maruz Kalma Koşulları	Elektrik Alanı	
	Referans (kV/m)	Zaman (t,saat)
Çalışanlar	30	$t \leq 80/E$
Halk	10	

Çeşitli ülkelerdeki hatlar için kullanılan standartlar Bölüm 5.1.'de verilmiştir. Bu sınır değerlerden yaygın olarak kullanılanlar Türkiye'deki hatlara uygulanması için önerilmektedir. 66 kV, 154 kV ve 380 kV hatlar için Şekil 5.1.'de verilen elektrik alan şiddeti – mesafe eğrisinden Tablo 5.8.'da önerilen sınır değerlere göre elde edilen hatlara güvenli yaklaşım mesafeleri tespit edilir [18].



Şekil 5.1. 66, 154 ve 380 kV üç faz sistem için elektrik alan – mesafe eğrisi

Tablo 5.8. Türkiye için önerilen elektrik alanın maksimum müsaade edilebilir seviyeleri

Bölge	(kV / m)
İkamete ait yerleşim bölgesi sınırı	1
ROW içi	8
ROW sınırı	2
Anayollar ile hatların keşistiği bölge	7
Mesleki maruziyet	10

Bunlara ek olarak, elektromagnetik alan referansları dışında, yüksek gerilim hatlarına güvenli yaklaşımın sağlanabilmesi için, 22 Kasım 1978 tarih ve 16466 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren "Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği"nde emniyetli yaklaşım mesafe değerleri tanımlanmıştır. Bu yönetmeliğin 46. Maddesinde yer alan yatay ve düşey mesafeler baz alınmak kaydı ile hattın tesisine izin verilmektedir. Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da yönetmelikteki iletim hatlarına güvenli yaklaşım mesafeleri verilmiştir.

Tablo 5.9. Güvenli Yaklaşım İçin Gerekli Düşey Mesafeler

İletkenlerin Üzerinden Geçtiği Yer	154 kV Düşey Uzaklıklar (m)	380 kV Düşey Uzaklıklar (m)
Yalnızca yayaların geçebileceği yerler, üzerinde trafik olmayan sular	6	8.5
Araçların geçmesine elverişli çayır, tarla, otlak ve benzeri yerler	7	9.5
Araçların geçmesine elverişli köy ve şehir içi yollar	8	12
Şehirler arası karayolları	9	12
Üzerinde trafik olan sular ve kanallar	6	9
Elektriksiz demiryolları	8	10.5
İletişim hatları	3.5	4.5
Elektrik hatları	2.5	4.5
Yapılar	5	8.7
Ağaçlar	3	5

Tablo 5.10. Güvenli Yaklaşım İçin Gerekli Yatay Mesafeler

TESİS	TESİSİN KENARINA OLAN YATAY UZAKLIK (m)
Demiryolu ve Karayolu	Direğin toprak üstü tüm boyu + 2 ya da karayolu ve demiryolu istimlak sınırı dışı (bu değerlerden en büyük olanı)
Ağaçlar 154 kV	3
Ağaçlar 380 kV	4
Binalar 154 kV	4
Binalar 380 kV	5

6. SONUÇLAR

Yük benzetim yöntemi 154 kV'luk tek devre ve 380 kV'luk tek devre ikili demet iletkenli enerji iletim hatlarına uygulanmış ve benzetim yükü olarak da sonsuz çizgisel yük kullanılmıştır. Yüklerin alan hesaplanacak noktalarda meydana getirdikleri potansiyeller iki boyutlu kartezyen koordinatlarda hesaplanmıştır. Ayrıca yüklerin belirli noktalarda meydana getirdikleri elektrik alan şiddetleri iki boyutlu kartezyen koordinatlarda hesaplanmıştır.

Yük benzetim yöntemi ile hem 154 kV'luk hem de 380 kV'luk iletim hatları için yapılan hesaplamalarda, orijin olarak kabul edilen orta fazın tam altında, toprak seviyesinden 1.2 m, 1.6 m ve 1.8 m düşey yüksekliklerde alınan sırasıyla A,B ve C noktaları için elle yapılan çözümlerde, iletim hattına yaklaştıkça potansiyel ($V_A < V_B < V_C$) ve elektrik alan ($E_A < E_B < E_C$) değerlerinin arttığı, dış fazdan 5, 10 ve 15 m uzaklıklarda ve yerden 1m yüksekliklerde alınan sırasıyla D, E ve F noktaları için yapılan hesaplamalarda da hattan uzaklaştıkça elektrik alan ($E_D > E_E > E_F$) değerinin azaldığı görülmüştür.

154 kV'luk tek devre enerji iletim hatları ve 380 kV'luk tek devre ikili demet iletkenli enerji iletim hattı için geliştirilen bilgisayar programı EK 1'de verilmiştir.

EK 1'de verilen bilgisayar programı kullanılarak 154 kV'luk ve 380 kV'luk iletim hatları için, orta fazın tam altından her iki yönde 100'er metre yatay mesafelerde ve toprak seviyesinden 1, 2, 3, 5, 10, 15 ve 20 m düşey mesafelerde hesaplanan değerlerden yola çıkılarak çizilen elektrik alan – mesafe eğrisi Şekil 4.8.'de ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu eğrilerden, elektrik alan değerlerinin, toprak seviyesinden dikey yönde hatta yaklaşıldığında arttığı, orta fazın tam altından her iki yatay yönde hattan uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir.

Elektrik alan hesaplarının Türkiye'deki hatlara uygulanması için yapılan çalışmalardan, 66 kV'luk hat için alan değerlerinin yerleşim merkezleri için uluslararası standart değerlerinin altında olduğu, 154 kV'luk hat için hat merkezinden 8 metre mesafeden sonra alan şiddetinin yerleşim merkezleri için

standart değerinin altında olduğu ve 380 kV'luk hat için hat merkezinden 30 metre mesafeden sonra alan Şiddetinin yerleşim merkezleri için belirlenen standart değerinin altında olduğu sonucu elde edilmiştir.

Elektrik alanların biyolojik etkileri ve epidemiyolojik çalışmaları ile ilgili araştırma sonuçları incelenmiŐtir. Çeşitli ülkelerde kullanılan standartlar değerlendirilerek, bu ülkelerdeki yerleşim merkezleri, hat güzergahı genişliği (ROW), ROW sınırı, yol geçiŐi ve mesleki maruziyet için kullanılan standart değerlerden yaygın olarak kullanılan; yerleşim merkezleri için 1 kV/m, hat güzergahı sınırı için 2 kV/m ve hat güzergahı içinde maksimum 8 kV/m değerleri Türkiye'deki iletim hatlarının elektrik alan hesaplamalarında baz olarak kullanılmıştır.

Türkiye'de kullanılan bütün gerilim seviyelerinden dolayı hat güzergahı içinde meydana gelen elektrik alan Şiddeti değerlerinin, hat güzergahı için önerilen maksimum 8 kV/m'lik sınır değerin altında olduğu görülmektedir.

Kullanılmakta olan ve yeni inŐa edilecek olan hatlar için, standartlarda öngörüldüğü Şekilde yerleşim merkezlerini hatlara güvenli mesafelerde kurmak ve çeşitli aktiviteler için güvenli mesafelerin tespit edilmesinde elektrik alan ölçümü ve hesabı son derece önem kazanmaktadır.

Türkiye'de bugün itibariyle enerji iletim hatları ile ilgili elektrik alanlar konusunda herhangi bir standart bulunmamaktadır. Dünyanın bir çok ülkesinde kullanılan standartlardan uygun olan değerler alınarak enerji iletim hatları için standart oluşturulabilir ve bu Şekilde hatlara güvenli yaklaşım mesafeleri için sınır değerler tespit edilebilir.

EndüstrileŐme ve teknolojinin geliŐimine bağlı olarak elektrik enerjisinin kullanımı ve ihtiyaı giderek artmakta bunun sonucunda insanlar, hayvanlar, bitkiler kısacası tüm evre elektromanyetik alanın etkisi altında kalmaktadır. Elektromanyetik kirliliğe diğer evre kirliliklerinin aksine gözle görülmemesi ve etkilerinin hemen ortaya çıkmasından dolayı yeterli önem verilmemekte ve göz ardı edilmektedir.

Bütün elektrikli cihazlar gleri oranında elektro manyetik alan meydana getirirler.. Enerji iletim hatları ise diğerlerine oranla çok daha fazla kirlenme meydana getirebilirler. Özellikle büyük kentlerde çarpık kentleŐme ve plansız yapılaŐmanın sonucu olarak yüksek gerilimli enerji hatları ve indirici transformatör merkezleri

konutlarla iç içe bulunmaktadır. Bu konutlarda yaşayan insanlar yüksek seviyeli elektromanyetik alanlara uzun süre maruz kalırlar.

Elektromagnetik alanlara maruz kalmanın çeşitli etkileri vardır. Kısa zamanda hissedilen etkiler diyebileceğimiz baş ağrıları, göz yanmaları, yorgunluk, halsizlik ve baş dönmesi gibi şikayetlerdir. Gece uykusuzlukları, gündüz uykulu dolaşım, küskünlük ve sürekli rahatsızlık nedeniyle topluma katılmamak gibi neticelerde literatürde belirtilmiştir.

Diğer bir etkisi ise; sistemine, moleküler ve kimyasal bağlara, hücre yapısına vücut koruma yaptığı ve uzun sürede ortaya çıkabilen etkileridir. Etkilerinin oluşması elektromagnetik alanın frekansına, şiddetine, vücut ölçülerine, vücudun elektriksel özelliklerine, elektromagnetik alanın mesafesine ve en önemlisi etki süresine bağlıdır. Buna göre en çok tehlikeye yüksek gerilim hatlarında veya yüksek gerilim tesislerinde çalışanlar maruz kalmaktadır

Elektromagnetik alanların etkileri uzaklık ile hızla azalacağından, elektrikli aletlerin mümkün olduğunca uzakta çalıştırılması, stand by konumunda kaldığı sürece elektromanyetik kirlilik yaratacağından kullanılmayan aletlerin ya kapalı tutulması ya da fişten çıkarılması, elektrikli battaniye kullanılmaması ya da yatmadan önce battaniyeyi ısıtıp, sonra fişten çekilerek kullanılması, elektrikli tıraş makinesini şarjlı kullanmanın tercih edilmesi, TV ekranlarından (ön ve arkasından) en az 2 m uzakta bulunulması, çamaşır, bulaşık vs. makineleri çalışırken yakınında bulunulmaması gibi önlemlerle elektromagnetik alan etkisinden korunma mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Umurkan, N.**, 1995. Enerji İletim Hatlarında Elektrik Ve Magnetik Alan Hesabı Ve Biyolojik Etkilerinin Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] www.teas.gov.tr/EMA_etki.htm
- [3] **Dengiz, H.**, 1991. Enerji Hatları Mühendisliği, Kardeş Kitabevi, Ankara.
- [4] **Akhunlar, A.**, 1971. Elektrik Alanlarına Giriş I, Statik Elektrik Alan, İTÜ, İstanbul.
- [5] **Iskander, M. F.**, 1992. Electromagnetic Fields and Waves, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [6] **Bayrakçı, E.**, 1989. Elektromagnetik Alan Teorisi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [7] **Yıldırım, H.**, 1992. Elektrostatik Alanların Yük Benzetim Yöntemiyle İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Kalenderli, Ö. ve Umurkan, N., Yıldırım, H.**, 1993. Enerji İletim Hatlarında Yük Benzetim Yöntemi İle Alan Hesabı, Elektrik Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, 13 – 18 Eylül, Trabzon, s. 1349-1353.
- [9] **Umurkan, N, Çakır, H. ve Şeker, Ş.S.**, 1993. Enerjinin Altı Fazlı İletilmesi Durumunda Çevre Üzerindeki Elektrik Alan Şiddetinin Üç Fazlı Sistemlerle Karşılaştırılması, Elmeksem'93, 01 – 05 Aralık, Bursa, 148 – 153.
- [10] **Özaktaş, H. M.**, 1999. Günlük Hayatta Karşılaşılan Elektromagnetik Alanlar ve İnsan Sağlığı, Bilişim Toplumuna Giderken Elektromagnetik Kirlilik Etkileri Sempozyumu, 11 Kasım, Ankara, s. 7 – 12.
- [11] **Güler, G. Ve Atalay, N.S.**, 1999. Elektrik Alanın Biyolojik Etkileri, Bilişim Toplumuna Giderken Elektromagnetik Kirlilik Etkileri Sempozyumu, 11 Kasım, Ankara, s.
- [12] **Kalenderli, Ö. ve Yıldırım, H.**, 1997. Elektrik ve Manyetik Alanların Biyolojik Etkileri, Kanseri Araştırmaları, *İnsan ve Otomasyon*, 88-92.
- [13] **Şeker, Ş.S. ve Çerezci, O.**, 1991. Elektromagnetik Alanların Biyolojik Etkileri, Güvenlik Standartları Ve Korunma Yöntemleri, BÜ Yayınları, İstanbul.

- [14] Şeker, Ş. S. ve Çerezci, O., 1992. Elektromagnetik Alanlar Ve Mühendislik Uygulamaları, İTÜ Yayınları, Sakarya.
- [15] www.teas.gov.tr/ema_rapor.htm
- [16] Umurkan, N, Şeker,Ş. S. ve Çakır, H., 1995. Ulusal Orta ve Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hatlarına Yaklaşım Mesafelerinin Elektrik ve Magnetik Alanlara Göre Tespit Edilmesi, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, 11– 17 Eylül, Bursa, s. 142-145.
- [17] TS ENV 50166, 1996. İnsanların Elektromagnetik Alanlara Maruz Kalması – Düşük Frekanslar (0 Hz – 10 kHz) , *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [18] Umurkan, N., Çakır, H. ve Arslan, F, 1998. Enerji İletim Hatlarının Çevresindeki Elektromagnetik Alanlar, 3e Endüstri & Teknik Fuarı, 27 – 31 Mayıs, Gaziantep, s. 52-55



EK A. BİLGİSAYAR PROGRAMI KODLARI

```
*****
'*      YÜKSEK GERİLİM HATLARI ÇEVRESİNDE      *
'*      Kompleks Yük Benzetim Yöntemi ile      *
'* POTANSİYEL VE ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİ HESABI *
'*      Zühal ÖZCAN                             *
'*      Mayıs 2004                             *
*****
```

DECLARE SUB BEKLEME () 'Herhangi bir tuşa basana kadar
'ekrandaki görüntünün bekletilmesi

CLS 'Ekranın bilgilerin silinmesi (temizlenmesi)

READ N 'Benzetim yükü (hat) sayısı

DIM XQ(N), YQ(N), XS(N), YS(N), XK(N), YK(N), R(N, N), RO(N)

DIM L(2 * N, 2 * N), P(2 * N, 2 * N), VO(N), VK(N)

DIM VKR(N), VKL(N), LK(N, N), RK(N, N), PK(N, N)

DIM LP(N), RP(N), PP(N), ACIVKRAD(N), ACIVK(N), RE(N)

DIM EXR(100), EXL(100), EYR(100), EYL(100)

'Benzetim yükü, sınır ve kontrol noktalarının

'DATA bölümünden koordinatlarının okunması:

FOR I = 1 TO N

READ XQ(I), YQ(I), XS(I), YS(I), XK(I), YK(I)

NEXT I

PRINT

PRINT

M = N + 1 'Genişletilmiş matrisin sütun sayısı

'YBY model verileri:

'154 kV luk tekil iletkenli

'yatay düzende tek devre hat için

'DATA 3

'DATA -6.8, 18.4, -6.8, 18.389, -6.789, 18.4

'DATA 0, 18.4, 0, 18.389, 0.011, 18.4

'DATA 6.8, 18.4, 6.8, 18.389, 6.789, 18.4

'380 kV luk ikili demet iletkenli

'yatay düzende tek devre hat için

DATA 6

DATA -9.6, 24, -9.6, 23.985, -9.6, 24.015

DATA -9.2, 24, -9.2, 23.985, -9.2, 24.015

DATA -0.2, 24, -0.2, 23.985, -0.2, 24.015

DATA 0.2, 24, 0.2, 23.985, 0.2, 24.015

DATA 9.2, 24, 9.2, 23.985, 9.2, 24.015

DATA 9.6, 24, 9.6, 23.985, 9.6, 24.015

$KSA = 1 / (2 * 3.14159265\# * 8.854E-12)$ '1/(2*Pi*Epsilon) sabiti

FOR I = 1 TO N

FOR J = 1 TO N

RO(J) = ABS(YQ(J)) 'R0 hesabı

'Benzetim yüklerinin sınır noktalarına uzaklıklarının hesabı:

$R(I, J) = \text{SQR}((XS(I) - XQ(J))^2 + (YS(I) - YQ(J))^2)$

$L(I, J) = \text{LOG}(RO(J) / R(I, J))$

'Sonsuz çizgisel yükler için potansiyel katsayılarının hesabı:

$P(I, J) = KSA * L(I, J)$

NEXT J

NEXT I

=====

Faz açılarını gözönüne alarak

Uygulanan Faz-Toprak Gerilimleri

(Kompleks faz potansiyelleri)

=====

'V = P + jL Kompleks potansiyel

'P: Gerçel (reel) kısım

'L: Sanal (imaşiner) kısım

'Potansiyeller Volt cinsinden alınmıştır.

'154 kV luk tekil iletkenli

'yatay düzende tek devre hat için

'P(1, M) = 88900: L(1, M) = 0

'P(2, M) = -44450: L(2, M) = 76987.4

'P(3, M) = -44450: L(3, M) = -76987.4

'380 kV luk ikili demet iletkenli

'yatay düzende tek devre hat için

P(1, M) = 220000: L(1, M) = 0

P(2, M) = 220000: L(2, M) = 0

P(3, M) = -110000: L(3, M) = 190525

P(4, M) = -110000: L(4, M) = 190525

P(5, M) = -110000: L(5, M) = -190525

P(6, M) = -110000: L(6, M) = -190525

FOR I = 1 TO N

FOR J = 1 TO N

L(I, J) = 0

NEXT J

NEXT I

```

FOR I = 1 TO N
    Z1 = P(I, I): Z2 = L(I, I)
    X1 = Z1 ^ 2 + Z2 ^ 2
    FOR J = 1 TO M
        Y8 = (P(I, J) * Z1 + L(I, J) * Z2) / X1
        L(I, J) = (L(I, J) * Z1 - P(I, J) * Z2) / X1
        P(I, J) = Y8
    NEXT J
    FOR K = 1 TO N
        IF K = I THEN 510
        Y1 = P(K, I): Y2 = L(K, I)
        FOR J = 1 TO M
            P(K, J) = P(K, J) - Y1 * P(I, J) + Y2 * L(I, J)
            L(K, J) = L(K, J) - Y2 * P(I, J) - Y1 * L(I, J)
        NEXT J
510 NEXT K
NEXT I
PRINT TAB(15); "      SONUÇLAR"
PRINT TAB(15); "=====

```

```

PRINT TAB(15); DATE$, TIME$

```

```

PRINT : PRINT TAB(15); "YÜK SAYISI ="; N
PRINT : PRINT TAB(15); "YÜK DEĞERLERİ:"; PRINT

```

```

FOR I = 1 TO N
    Q$ = "+j"
    IF L(I, M) < 0 THEN Q$ = "-j"
    PRINT TAB(15); "q"; I; "="; P(I, M); TAB(35); Q$; ABS(L(I, M)); " C"
NEXT I
FOR I = 1 TO N
    B(I, M) = P(I, M)
    C(I, M) = L(I, M)
NEXT I

```

```

LOCATE 23, 2: PRINT "Herhangi bir tuşa basınız!"
CALL BEKLEME
CLS

```

```

PRINT
PRINT TAB(15); "      KONTROL NOKTALARININ POTANSİYELLERİ"
PRINT TAB(15);
"=====
PRINT TAB(15); DATE$, TIME$

```

```

PRINT
FOR I = 1 TO N
    FOR J = 1 TO N

```

```

RO(J) = ABS(YQ(J))
RK(I, J) = SQR((XK(I) - XQ(J)) ^ 2 + (YK(I) - YQ(J)) ^ 2)
LK(I, J) = LOG(RO(J) / RK(I, J))
PK(I, J) = KSA * LK(I, J)
NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO N
    VKR(I) = 0
    VKL(I) = 0
    FOR J = 1 TO N
        VKR(I) = VKR(I) + PK(I, J) * B(J, M)
        VKL(I) = VKL(I) + PK(I, J) * C(J, M)
    NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO N
    VK(I) = SQR(VKR(I) ^ 2 + VKL(I) ^ 2)
    ACIVKRAD(I) = ATN(ABS(VKL(I)) / ABS(VKR(I))) 'Radyan
    ACIVK(I) = ACIVKRAD(I) * (180 / 3.14159265#) 'Derece
    IF VKR(I) >= 0 AND VKL(I) >= 0 THEN ACIVK(I) = ACIVK(I): GOTO 130
    IF VKR(I) >= 0 AND VKL(I) < 0 THEN ACIVK(I) = 360 - ACIVK(I): GOTO
130
    IF VKR(I) < 0 AND VKL(I) >= 0 THEN ACIVK(I) = 180 - ACIVK(I): GOTO
130
    IF VKR(I) < 0 AND VKL(I) < 0 THEN ACIVK(I) = 180 + ACIVK(I)
130 PRINT TAB(15); "VK("; I; ")="; VK(I); "V, "; " AÇI("; I; ")=";
CINT(ACIVK(I)); "Derece"
NEXT I

LOCATE 23, 2: PRINT "Herhangi bir tuşa basınız!"
CALL BEKLEME
CLS
PRINT
PRINT TAB(8); "HERHANGİ BİR NOKTADAKİ POTANSİYEL VE ELEKTRİK
ALAN HESABI" _
PRINT
"=====
PRINT TAB(8); DATE$, TIME$
PRINT
PRINT "YP ="; YP; "m"
PRINT "XP(m) VP(V) Açı(Derece) EX(V/m) EY(V/m) E(V/m)"
PRINT "-----

XP = -14 'METRE (Hattan yan doğru uzaklık başlangıcı)
120 EXR = 0
    EXL = 0
    EYR = 0
    EYL = 0

    VPR = 0
    VPL = 0

```

```

FOR J = 1 TO N
    RO(J) = ABS(YQ(J))
    RP(J) = SQR((XP - XQ(J)) ^ 2 + (YP - YQ(J)) ^ 2)
    LP(J) = LOG(RO(J) / RP(J))
    PP(J) = KSA * LP(J)
    VPR = VPR + PP(J) * B(J, M)
    VPL = VPL + PP(J) * C(J, M)
NEXT J

```

'P noktasındaki potansiyel ve faz açısı

```

VP = SQR(VPR ^ 2 + VPL ^ 2)
ACIVPRAD = ATN(ABS(VPL) / ABS(VPR))    'Radyan
ACIVP = ACIVPRAD * (180 / 3.14159265#)  'Derece

```

```

IF VPR >= 0 AND VPL >= 0 THEN ACIVP = ACIVP: GOTO 230
IF VPR >= 0 AND VPL < 0 THEN ACIVP = 360 - ACIVP: GOTO 230
IF VPR < 0 AND VPL >= 0 THEN ACIVP = 180 - ACIVP: GOTO 230
IF VPR < 0 AND VPL < 0 THEN ACIVP = 180 + ACIVP: GOTO 230
230 FOR J = 1 TO N

```

```

    RE(J) = (XP - XQ(J)) ^ 2 + (YP - YQ(J)) ^ 2
    FXP = XP - XQ(J)
    EXR(J) = KSA * (FXP / RE(J)) * B(J, M)
    EXL(J) = KSA * (FXP / RE(J)) * C(J, M)
    EXR = EXR + EXR(J)
    EXL = EXL + EXL(J)
    EX = SQR(EXR ^ 2 + EXL ^ 2)    'Alanın yatay bileşeni

```

```

    FYP = YP - YQ(J)
    EYR(J) = KSA * (FYP / RE(J)) * B(J, M)
    EYL(J) = KSA * (FYP / RE(J)) * C(J, M)
    EYR = EYR + EYR(J)
    EYL = EYL + EYL(J)
    EY = SQR(EYR ^ 2 + EYL ^ 2)    'Alanın düşey bileşeni

```

```

NEXT J

```

'Bileşke elektrik alan şiddeti ve açısı:

```

EB = SQR(EX ^ 2 + EY ^ 2)
ACIEB = ATN(EY / EX)    'Radyan

```

```

PRINT TAB(0); XP; TAB(7); VP; TAB(19); ACIVP; TAB(35); EX; TAB(50); EY;
TAB(66); EB

```

```

XP = XP + 2    'METRE (Hattan yana doğru uzaklık artımı)

```

```

IF XP <= 14 THEN GOTO 120    'METRE (Hattan yan doğru uzaklık sonu)

```

```

END

```

ÖZGEÇMİŞ

Zühal Özcan, 14.08.1979 tarihinde Kastamonu’da doğmuştur. İlköğretim ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamlamıştır. 1996 yılında Lisans öğrenimine başladığı YTÜ Elektrik – Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden 2000 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl başlamış olduğu İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmasına devam etmektedir.

