

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK GERİLİM ENERJİ İLETİM HATLARININ MEYDANA GETİRDİĞİ  
ELEKTRİK VE MANYETİK ALANLAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Orhan Cengiz USTA**

**ŞUBAT 2010  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK GERİLİM ENERJİ İLETİM HATLARININ MEYDANA GETİRDİĞİ  
ELEKTRİK VE MANYETİK ALANLAR**

**Elektrik-Elektronik Müh. Orhan Cengiz USTA**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Elektronik Yüksek Mühendisi"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.12.2009  
Tezin Savunma Tarihi : 02.02.2010**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Adnan CORA  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Sefa AKPINAR  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2010**

## ÖNSÖZ

50 Hz frekanslı güç sistemlerinin gelişmesine bağlı olarak, enerji sistem elemanlarının, yakın çevresinde yaymış olduğu elektromanyetik alanlar ile ilgili çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu tezde, güç sistemlerinin en önemli basamağını oluşturan enerji iletim hatları ve trafo merkezlerinin meydana getirmiş oldukları elektrik ve manyetik alanların hesaplamaları, matematiksel olarak ve görsel programlar vasıtasıyla yapılmış ve standartlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar grafikler yardımıyla açıklanmıştır.

Bu yüksek lisans tezinin ortaya çıkmasında yardım, katkı ve yönlendirmelerinden dolayı, başta değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Adnan CORA' ya, bilgileriyle yardımcı olan Sayın Mustafa YUVACI, M. Emin TENKEKİ, Ahmet GÜNER' e ve Narda EFC-400 LF programının geçici kullanımına vesile olduğu için PROTEL Elektronik Ürünler Pazarlama Tic. Ltd. Şti. Genel Müdürü Murat ÖNOL' a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışma boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Orhan Cengiz USTA  
Trabzon 2010

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Elektrik ve Manyetik Alanlar .....	2
1.2.1. Elektromanyetik Alan Kuramı.....	2
1.2.2. Elektrik Alan .....	3
1.2.3. Manyetik Alan .....	5
1.2.4. Elektrik ve Manyetik Alanların Karşılaştırılması.....	7
1.3. Elektrik ve Manyetik Alan İndüklenmesi.....	9
1.3.1. Elektrik Alan İndüklenmesi.....	9
1.3.2. Manyetik Alan İndüklenmesi .....	10
1.4. Türkiye’ de Enerji İletim Tesislerinin Durumu.....	10
1.5. Enerji İletim Hatlarından Kaynaklanan Elektrik ve Manyetik Alanlar.....	12
1.6. Elektromanyetik Işınım .....	16
1.7. Standartlar ve Referans Seviyeler.....	19
1.7.1. Yurt Dışında Belirlenmiş Güvenlik Standartları .....	19
1.7.2. Türkiye’ deki Alçak Frekans EMA Güvenlik Standartları.....	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	26
2.1. Üç Fazlı Enerji İletim Hattının Oluşturduğu Elektrik Alan .....	26
2.1.1. Çift Devre Enerji İletim Hattının Oluşturduğu Elektrik Alan Hesabı.....	26
2.2. Hat Parametrelerindeki Değişikliklerin Elektrik Alan Üzerine Etkileri....	31
2.2.1. Hat Konfigürasyonu .....	32
2.2.2. Hat Yüksekliği.....	32

2.2.3.	Toprak Koruma Telinin Etkisi.....	35
2.2.4.	İletken Kesitleri .....	36
2.2.5.	Sistem Gerilim Değişimi .....	39
2.2.6.	Faz İletkenleri Aralığı.....	40
2.2.7.	Faz Sırası .....	41
2.3.	Manyetik Alan Hesabı .....	42
2.3.1.	İletim Hatları İçin Manyetik Alan .....	42
2.3.2.	Tek Devre Enerji İletim Hattı Manyetik Alan Hesabı.....	46
2.4.	Hat Parametrelerindeki Değişikliklerin Manyetik Alan Üzerine Etkileri .	48
2.4.1.	Hat Konfigürasyonu .....	48
2.4.2.	Hat Yüksekliği.....	49
2.4.3.	Faz İletkenleri Aralığı.....	50
2.4.4.	Faz Sırası .....	51
2.5.	Enerji İletim Hatlarında Meydana Gelen Elektrik ve Manyetik Alanlar...	53
2.5.1.	154 kV EİH' lerde Meydana Gelen Elektrik ve Manyetik Alanlar.....	53
2.5.1.1.	154 kV EİH' lerde Meydana Gelen Elektrik Alan .....	54
2.5.1.2.	154 kV EİH' lerde Meydana Gelen Manyetik Alan.....	55
2.5.2.	380 kV EİH' lerde Meydana Gelen Elektrik ve Manyetik Alanlar .....	57
2.5.2.1.	380 kV EİH' lerde Meydana Gelen Elektrik Alan .....	57
2.5.2.2.	380 kV EİH' lerde Meydana Gelen Manyetik Alan.....	59
2.6.	Transformatör Merkezlerinde Elektrik ve Manyetik Alan Hesaplamaları .....	60
2.6.1.	Trafo Merkezinde Hesaplanan Elektrik Alan.....	62
2.6.2.	Trafo Merkezinde Hesaplanan Manyetik Alan .....	63
2.6.3.	Hesaplanan Değerlerin Standartlarla Karşılaştırılması.....	65
3.	SONUÇLAR.....	66
4.	ÖNERİLER .....	68
5.	KAYNAKLAR.....	69
6.	EKLER .....	72

## ÖZGEÇMİŞ

## ÖZET

Elektriğin icadıyla birlikte santrallerde üretilen elektrik enerjisinin kullanıcılara iletimini sağlamak amacıyla enerji iletim, dağıtım hatları ve trafo merkezleri tesis edilmiştir. Dolayısıyla elektromanyetik alanlar (EMA) insanların yaşam çevresini kuşatmıştır. Bu çalışmada, enerji iletim hattı (EİH) ve trafo merkezlerindeki (TM) elektromanyetik alan hesaplamaları yapılmıştır.

EİH çevresindeki EMA hesaplamaları ayrı ayrı yapılarak hattın altında istenen noktalarda, alan hesaplamalarının yapılması sağlanmıştır.

Ayrıca, Narda EFC-400 LF simülasyon programı vasıtasıyla örnek bir trafo merkezinde modelleme yapılarak EMA hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçlar grafikler yardımıyla açıklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektromanyetik Alan, Elektrik Alan, Manyetik Alan, Enerji İletim Hatları, Trafo Merkezleri

## **SUMMARY**

### **Electromagnetic Fields Produced By High Voltage Electrical Overhead Lines**

With the invention of electricity produced in power plants, energy transmission, distribution lines and substations have been established to provide users with transmission of electric energy. Therefore, the electromagnetic fields (EMF) has surrounded the people's living environment. In this study, electromagnetic field calculations have been made in energy transmission line and transformer centers.

Calculations can be done separately around high voltage electrical overhead lines, the field calculations has been carried out at the desired point the bottom of line.

In addition, through Narda EFC-400 LF simulation program, EMF calculations were made in a sample substation. Results are explained with the help of the graphics.

**Key Words:** Electromagnetic Field, Electrical Field, Magnetic Field, Electrical Overhead Lines, Transformer Substations

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. Elektrik alan vektörlerinin ve çizgilerinin gösterimi.....	5
Şekil 1.2. Akım taşıyan telin oluşturduğu manyetik alan.....	6
Şekil 1.3. Bir elektrik cihazının çalışır-çalışmaz durumu için elektrik ve manyetik alan yayılım şekli.....	8
Şekil 1.4. Elektrik alanın neden olduğu insan vücudundaki elektrik akımları.....	9
Şekil 1.5. Manyetik alanın neden olduğu insan vücudundaki elektrik akımları.....	10
Şekil 1.6. Elektriğin üretim ve kullanımı arasındaki süreç.....	11
Şekil 1.7. EİH tarafından üretilen elektrik ve manyetik alan çizgileri.....	12
Şekil 1.8. Bazı uygulamalar için manyetik alanın mesafe ile değişimi.....	14
Şekil 1.9. Bazı uygulamalar için elektrik alanın mesafe ile değişimi.....	14
Şekil 1.10. Farklı gerilimlere göre EİH EMA' larının mesafe ile değişimi.....	15
Şekil 1.11. 500 kV EİH için ölçülen manyetik alan sonuçları.....	16
Şekil 1.12. Elektromanyetik spektrum.....	18
Şekil 1.13. ICNIRP Elektrik alan referans seviyeleri.....	22
Şekil 1.14. ICNIRP Manyetik alan referans seviyeleri.....	22
Şekil 2.1. Sonsuz çizgisel yük dağılımının "r" kadar uzaktaki elektrik alan vektörleri.....	27
Şekil 2.2. Görüntü alma metoduyla çift devre 3-fazlı enerji iletim hattının oluşturduğu elektrik alan.....	28
Şekil 2.3. Düz ve dikey geometriye sahip hatların elektrik alan değişimi.....	32
Şekil 2.4. Tek devre EİH' nin toprak seviyesindeki elektrik alan büyüklüğünün hattın yüksekliğine bağlı olarak değişmesi.....	33
Şekil 2.5. Çift devre EİH' nin toprak seviyesindeki elektrik alan büyüklüğünün hattın yüksekliğine bağlı olarak değişmesi.....	34
Şekil 2.6. 154 kV TA1+0 tipi EİH' nin toprak korumalı ve toprak korumasız elektrik alan grafiği.....	35
Şekil 2.7. Demet iletken gösterimi.....	36
Şekil 2.8. İletken kesitlerinin tek devre EİH' lerde elektrik alan etkisi.....	37
Şekil 2.9. İletken kesitlerinin çift devre EİH' lerde elektrik alan etkisi.....	37
Şekil 2.10. 3'lü ve 2'li demet iletkenlerin elektrik alan etkisi.....	38



Şekil 2.11.	154 kV ve 380 kV' lik hatların meydana getirdikleri elektrik alan.....	39
Şekil 2.12.	Faz iletkenleri aralığının toprak seviyesindeki elektrik alan etkisi .....	40
Şekil 2.13.	Toprak korumalı çift devre enerji iletim hattının düşey konfigürasyonu..	41
Şekil 2.14.	154 kV Çift devre enerji iletim hattında faz sırası konfigürasyonuna göre elektrik alan profili .....	42
Şekil 2.15.	Manyetik alan hesabı için koordinat sistemi .....	44
Şekil 2.16.	Sonsuz uzunlukta iletken toprak düzlemi üzerinde, 3 iletkenli bir hat ve "P" noktasında oluşturduğu manyetik alan .....	46
Şekil 2.17.	Düz ve dikey geometriye sahip hatların manyetik alan değişimi.....	49
Şekil 2.18.	Tek devre EİH'nin toprak seviyesindeki manyetik alan büyüklüğünün hattın yüksekliğine bağlı olarak değişmesi.....	49
Şekil 2.19.	Çift devre EİH'nin toprak seviyesindeki manyetik alan büyüklüğünün hattın yüksekliğine bağlı olarak değişmesi.....	50
Şekil 2.20.	Faz aralığının toprak seviyesindeki manyetik alan üzerinde etkisi .....	51
Şekil 2.21.	Toprak korumasız çift devre EİH'nin düşey konfigürasyonu .....	51
Şekil 2.22.	154 kV Çift devre enerji iletim hattında faz sırası konfigürasyonuna göre manyetik alan grafiği.....	52
Şekil 2.23.	154 kV Enerji iletim hattı ve hat altındaki insan modeli.....	53
Şekil 2.24.	154 kV EİH'nin xz düzleminde hesaplanan elektrik alan değerleri.....	54
Şekil 2.25.	154 kV EİH'nin xy düzleminde hesaplanan elektrik alan değerleri.....	55
Şekil 2.26.	154 kV EİH'nin xz düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri .....	56
Şekil 2.27.	154 kV EİH'nin xy düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri.....	56
Şekil 2.28.	380 kV Enerji iletim hattı ve hat altındaki insan modeli.....	57
Şekil 2.29.	380 kV EİH'nin xy düzlemindeki elektrik alan değerleri .....	58
Şekil 2.30.	380 kV EİH'nin xy düzleminde hesaplanan elektrik alan değerleri.....	58
Şekil 2.31.	380 kV EİH'nin xy düzlemindeki manyetik alan değerleri.....	59
Şekil 2.32.	380 kV EİH'nin xy düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri.....	60
Şekil 2.33.	154 kV Ondokuz Mayıs TM tek hat şeması.....	60
Şekil 2.34.	154 kV Ondokuz Mayıs trafo merkezi kesit resmi.....	61
Şekil 2.35.	Ondokuz Mayıs TM'nin 3 boyutlu modeli.....	61
Şekil 2.36.	TM'nin xy düzleminde elektrik alan değerleri .....	62
Şekil 2.37.	TM'nin xz düzleminde elektrik alan değerleri .....	63
Şekil 2.38.	TM'nin xy düzleminde manyetik alan değerleri .....	64
Şekil 2.39.	TM'nin xz düzleminde manyetik alan değerleri.....	64

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Türkiye’ de trafo merkezlerinin durumu .....	11
Tablo 1.2. Türkiye’ de enerji iletim hatlarının durumu .....	12
Tablo 1.3. Çeşitli gerilimlere göre iletim hattı alanlarının mesafe ile değişimi .....	13
Tablo 1.4. Yüksek gerilim elektrik iletim tesislerinden kaynaklı EMA .....	15
Tablo 1.5. ABD’ de enerji iletim hatları EMA eyalet standartları.....	20
Tablo 1.6. ICNIRP 50 Hz elektromanyetik alana maruz kalma referans değerleri ....	21
Tablo 1.7. Tam vücut için maksimum izin verilen elektrik alan seviyeleri.....	23
Tablo 1.8. Baş ve gövde için maksimum izin verilen manyetik alan seviyeleri.....	23
Tablo 1.9. 50 Hz Elektromanyetik alana maruz kalma referans seviyeleri (TSE) ....	24
Tablo 1.10. Güvenli yaklaşım için gerekli yatay mesafeler.....	25
Tablo 1.11. Güvenli yaklaşım için gerekli düşey mesafeler .....	25
Tablo 2.1. Çift devre enerji iletim hatlarında faz sırası konfigürasyonları.....	41
Tablo 2.2. Toprak korumasız çift devre enerji iletim hatlarında faz sırası konfigürasyonları.....	52

## SEMBOLLER DİZİNİ

- AB : Avrupa Birliği
- ABD : Amerika Birleşik Devletleri
- B : Manyetik akı yoğunluğu
- BEM : Bioelektromanyetik
- E : Elektrik alan
- E* : Işınım enerjisi
- EİH : Enerji iletim hatları
- ELF : Extremely low frequency (Çok düşük frekanslı alanlar)
- EM : Elektromanyetik
- EMA : Elektromanyetik alan
- EMF : Electromagnetic field (Elektromanyetik alan)
- F : Yükler arasındaki elektriksel kuvvet
- GIS : Gaz izoleli kompakt tip trafo merkezi
- H : Manyetik alan şiddeti
- I : Akım
- ICNIRP : International Commission on Non-Ionising Radiation Protection ( Uluslararası İyonlaşmayan Radyasyon Komitesi )
- IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
- INIRC : International Non-Ionizing Radiation Committe ( Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyon Komitesi)
- IRPA : International Radiation Protection Association ( Uluslararası Radyasyondan Koruma Kurulu )
- J : Yüzey akım yoğunluğu
- NIR : Non-Ionizing radiation ( İyonlaştırmayan radyasyon )
- RMS : Root mean square (Etkin değer)
- ROW : Right of way ( İletim hattının irtifak hakkı güzergahı )
- TEAŞ : Türkiye Elektrik Anonim Şirketi
- TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
- TM : Trafo merkezi
- TSE : Türk Standartları Enstitüsü

- UNEP : United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı )
- V : Elektriksel potansiyel
- WHO : World Health Organisation (Dünya Sağlık Örgütü )
- $\epsilon$  : Ortamın dielektrik katsayısı
- $\epsilon_0$  : Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
- f : Frekans
- h : Planck sabiti
- k : Boltzmann sabiti
- $\mu$  : Ortamın manyetik geçirgenliği
- $\sigma$  : Ortamın iletkenliği
- $\rho$  : Hacimsel yük yoğunluğu
- q : Elektrik yükü
- $\tau$  : Toprak yüzeyinde oluşan yükün şarj süresi
- v : Yüklü parçacığın hızı

## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Giriş**

19. yüzyılda elektriğin keşfi ile yeni bir yaşam boyutu açılmış ve bunu izleyen teknolojik yeniliklere, her geçen gün yenileri eklenerek çoğalmıştır. Fakat bu teknolojik gelişim, yaşamı kolaylaştırırken bir yandan da yaşam kalitesini bozan unsurlar içermektedir. Günlük hayatı kolaylaştıran birçok elektrikli cihaz, farklı frekanslarda elektromanyetik alan yaymaktadır. Dolayısıyla modern toplumlarda yaşayan hemen herkes, sürekli olarak doğal olaylardan kaynaklananların çok üstünde elektromanyetik alanların ve dalgaların içinde bulunmaktadır. Sonuçta insan vücudu, elektromanyetik alanlarla etkileşim içindedir ve bu etkileşim insan vücudunda olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Elektrik ve manyetik alanlar, elektriğin üretimi, iletimi, dağıtımını ve kullanımı ile meydana gelmektedir. Genellikle uzak bölgelerdeki santrallerde üretilen elektrik enerjisi, yüksek gerilim (54-750 kV arası) enerji iletim hatlarıyla kentlere taşınır. Kentlerin girişlerine kurulan büyük trafo merkezlerinde yüksek gerilim orta gerilime dönüştürülür. Orta gerilim (3-35 kV arası) hatlarından bir bölümü, çevre ilçe ve köylerdeki dağıtım trafolarını, bir bölümü de kent içindeki dağıtım trafolarını besler. Dağıtım trafolarına orta gerilim düzeyinde gelen elektrik, bu trafolarında alçak gerilim (190-1000 V arası) düzeyine düşürülerek evlere ve işyerlerine dağıtılır. Bütün ülkeyi bir ağ gibi saran iletim ve dağıtım hatları ve bu hatlar üzerindeki küçük büyük on binlerce trafo merkezleri, çevrelerinde son derece düşük frekanslı (50 Hz) (ELF: Extremely Low Frequency) elektromanyetik alanlar oluştururlar.

Yüksek gerilim hatlarının giderek artan kullanımına paralel olarak, akım ve gerilimin ürettiği alanların etkilerinin önemi artmış ve bu konuda yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada, yüksek gerilim enerji iletim hatlarının çevresinde ve trafo merkezinde meydana gelen elektrik ve manyetik alanların hesaplamaları ve hat parametrelerinde yapılan değişikliklerin elektrik ve manyetik alan üzerindeki etkisinin incelenmesi ele alınmıştır.

## 1.2. Elektrik ve Manyetik Alanlar

### 1.2.1. Elektromanyetik Alan Kuramı

Çok eskiden beri bilinmelerine ve birçok bilim insanının katkılarıyla belirli bir yere gelmesine karşın elektrik ve manyetizma konularının gerçekçi ve halen kullanılan modeli 1831 – 1879 yılları arasında yaşamış olan James Clerk Maxwell tarafından kurulmuştur. Maxwell denklemleri adı verilen dört denklem ile elektromanyetik alan teorisi yerli yerine oturmuş ve her türlü alan ve devre problemi çözümlerine gelmiştir.

Alan ya da dalga kuramı iki bağımsız değişken ile gösterilir. Bunlar elektrik alan ve manyetik alanlardır. Temel fizik bilgilerinden yola çıkarak şu tanımların verilmesi yerinde olur.

- Duran elektrik yükleri arasında elektrik alan oluşur.
- Hareketli yükler etrafında manyetik alan oluşur.
- Hareketli yükler zamanla değişiyorsa (Alternatif akım) hem elektrik hem de manyetik alan oluşur. Buna elektromanyetik dalga adı verilir.

Elektromanyetik olaylar Maxwell tarafından düzenlenen dört temel denklemle gösterilir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(r, t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(r, t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(r, t) = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}(r, t)}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.4)$$

Burada, E: Elektrik alan, B: Manyetik alan yoğunluğu,  $\rho$ : Hacimsel yük yoğunluğu,  $\epsilon_0$ : Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği, J: Yüzey akım yoğunluğu,  $\mu$ : Ortamın manyetik geçirgenliğidir.

Denklem (1.1) elektrik alanının konuma göre davranışının manyetik alanın zamana göre davranışını etkilediğini, denklem (1.2) ise manyetik alanın konuma göre değişiminin elektrik alanın zamana göre davranışından bağımsız olmadığını göstermektedir. Denklemlerde görülen  $\epsilon$ ,  $\mu$  ortam parametreleridir. Yani herhangi bir ortam (bir iletken tel, hava, insan vücudu, pencere, vb) elektriksel olarak bu üç parametre ile belirlidir. Boşluğun (hava belli oranda boşluk kabul edilebilmektedir) parametreleri ( $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ ) genelde referans olarak kullanılır. Denklemlerde görülen  $J$  ve  $\rho$  ise ortamdaki bağımsız elektromanyetik olaylara neden olan kaynakları gösterir.

Alan kuramındaki elektrik alan, manyetik alan, yüzey akım yoğunluğu vektörel büyüklüklerdir. Yani başlangıç noktası, yönü ve şiddeti vardır. Örneğin bir elektrik alandan söz etmek gerektiğinde hem şiddeti hem de yönü belirtilmelidir [1].

### 1.2.2. Elektrik Alan

Elektrik alan vektörü, elektrik alan etkisinin bir vektör alanıdır ve birbirlerine dik üç eksen boyunca tanımlanır. Sürekli durum sinüzoidal alan için her bir uzay bileşeni, bir etkin değer (V/m) ve bir faz ile ifade edilen bir fazördür:

$$\vec{E} = e_x(t)\vec{u}_x + e_y(t)\vec{u}_y + e_z(t)\vec{u}_z \quad (1.5)$$

Burada,  $u_x, u_y, u_z$  : x, y, z eksenleri boyunca birim vektörler ve  $e_x(t), e_y(t), e_z(t)$  fazörlerdir. Zamana bağımlılık, x uzay bileşeni için, eşitlik 1.6' da gösterilmiştir:

$$e_x(t) = E_x \cos(\omega t + \phi_x) = E_{x,r} \cos \omega t + E_{x,i} \sin \omega t \quad (1.6)$$

Burada,  $E_x$  genlik ve  $\phi_x$ ,  $e_x'$  in faz açısıdır.  $E_{x,r}$  ve  $E_{x,i}$ , gerçel ve sanal bileşenlerdir. Eşitlik 1.6, y ve z eksenleri için de yazılabilir [2].

Elektrik alan, elektrik yüklerinin var olduğu bir ortamda yüklerin birbirine uyguladığı kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Birimi, metre başına gerilimle tanımlanır (V/m). Yükler arasındaki alan çizgileri elektriksel kuvvet yönündedir. Elektrik alan şiddeti, bu kuvvetin genliği ve alan çizgilerinin yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Coulomb 1785' de yüklü, durgun iki parçacık arasındaki temel elektrik kuvvet yasasını ortaya koymuştur.

$$\vec{F} = k \frac{|q_1||q_2|}{d^2} \hat{r} \quad (1.7)$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1.8)$$

$\epsilon_0$  : Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği ( $\epsilon_0=8,854187.10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$ )

$k$  : Boltzmann sabiti ( $k=8,9875.10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ )

$q_1$  ve  $q_2$  : Elektrik yük değerleri (Coulomb)

$F$  : Yükler arasındaki elektriksel kuvvet (N)

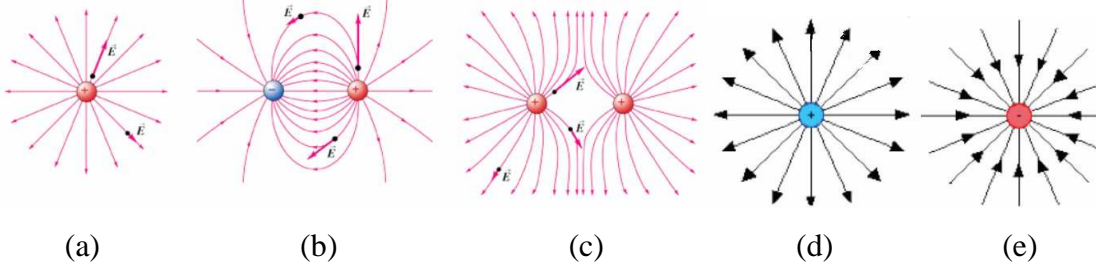
Uzayda bir  $\vec{E}$  elektrik alan vektörü, o noktaya konulan bir deneme yüküne etkiyen  $\vec{F}$  elektrik kuvvetinin,  $q_0$  deneme yüküne bölümü olarak da tanımlanmaktadır. Elektrik alan,  $q_0$  yüküne etkiyen elektrik alanıdır.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.9)$$

Elektrik alanlar yüke veya yüklü iletkene yaklaştıkça kuvvetlenir ve uzaklaştıkça hızla zayıflar. Uzaklığın sabit kalması koşulu ile gerilimin artmasıyla elektrik alan şiddeti de artacaktır.

Elektrik alanı  $\vec{E}$  vektörü ile gösterilir ve bir yönü vardır (bkz. şekil 1.1.(d,e)). Eksi yük için elektrik alan vektörü  $\vec{E}$ , radyal (yükten olan doğrusal uzaklık) olarak eksi yüke doğru yönelmiştir. Artı yük içinse durum, radyal olarak yükten dışarı doğrudur. Bu vektörün anlamı,  $\vec{r}$  kadar bir uzaklıkta bulunan artı birim yük üzerine etki eden kuvvetin büyüklüğü ve yönüyle aynı olmasıdır. Yani  $\vec{r}$  kadar uzaklığa konan bir artı birim yükün, ne kadar kuvvet ve ivme ile nereye doğru hareket edeceğini göstermektedir. Elektrik alan vektörünün şiddeti  $1/r^2$  ile orantılı olarak azalır.





Şekil 1.1. Elektrik alan vektörlerinin ve çizgilerinin gösterimi

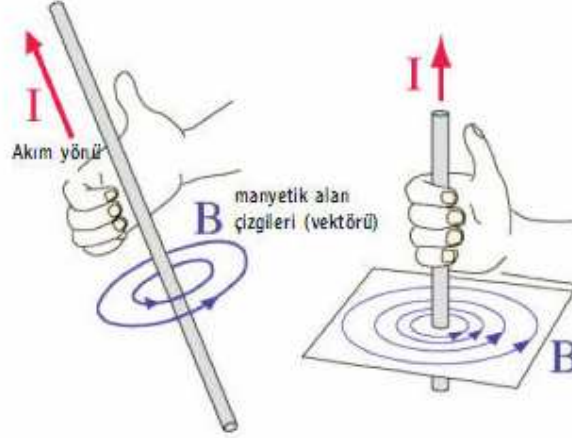
Elektrik alan vektörü, elektrik alan çizgilerini oluşturur ve çizgilerin nerden nereye doğru gittiğini gösterir (bkz. şekil 1.1 (a)). Elektrik alan çizgileri iki yük arasında nasıl şekil alır? İki zıt kutuplu yük için elektrik alan çizgileri, artıdan çıkıp eksiye son bulur. İki farklı çizgi hiçbir zaman bir diğer çizgiyi kesmez (bkz. şekil 1.1 (b)). Aynı kutuplu iki artı veya eksi yük içinse, yüklerden çıkan çizgiler birbirlerini kesmeyecek bir biçimde birbirlerini bükerek ve sonsuzda son bulur (bkz. şekil 1.1 (c)) (Not: Şekillerdeki düzgün ışınlar gibi gösterilen okların elektrik alan çizgilerinin o noktadaki elektrik alanın büyüklüğünü ve yönünü göstermek için kullanılan vektör işaretleri olduğu unutulmamalıdır.) [3].

### 1.2.3. Manyetik Alan

Elektrik alanı, bir gözlemciye göre duran yüklerin (parçacıkların) oluşturduğu bir alan çeşidi olarak karşımıza çıkarırken, manyetik alansa bir gözlemciye göre düzgün doğrusal (sabit hız) hareket eden yüklerin (parçacıkların) oluşturduğu bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır [3]. Manyetik alan da elektrik alanı gibi vektörel (büyüklüğü ve yönü olan) bir niceliktir. Manyetik alan vektörü,  $\vec{B}$  simgesiyle gösterilir.  $\vec{B}$  manyetik alan vektörünün yönü, yüklerin hareket yönüne diktir. Manyetik alan çizgileri, elektrik alan çizgilerinin aksine bir yükte başlayıp bir yükte son bulmazlar. Tersine, alan çizgileri kendi üzerine kapanan eğriler oluştururlar. Bunun yanında, elektrik alan çizgileri gibi birbirlerini kesmezler.

Elektrikte hareket eden yükler, artı yükler olarak kabul edilir ve eksi yüklerin (aslında hareket eden yükler eksi yüklü parçacıklar olan elektronlardır) tersi yönünde aktığı kabul edilir. Teoriler ve hesaplar artı yüklerin hareketine göre çözülür. Manyetik alan çizgilerinin sıklığı, akım geçen telden radyal uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak azalır (Elektrik

alan çizgilerinde olduğu gibi). Bilimsel otoritelerce kabullenilmiş olan sağ el kuralı geçerlidir. Sağ el kuralı, sağ el başparmağınızı akım yönünde tutup diğer parmaklarınızı tel etrafına doladığınızda manyetik alan vektörünün yönünü bulmanızı sağlar (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2. Akım taşıyan telin oluşturduğu manyetik alan

Manyetik alan, günlük yaşamımızda her yerde karşımıza çıkmaktadır. Akım geçiren her şey, manyetik alan oluşturur. Mıknatıslar manyetik alan oluşturur, hatta dünyanın akışkan olan iç kesimleri dahi dünyanın manyetik alanını oluşturur.

Manyetik alan çizgileri her zaman kapalıdır; ama bazı durumlarda manyetik alan çizgilerini sanki N kutuplu bir uçtan çıkan ve S kutuplu bir uca doğru hareket eden çizgiler olarak da düşünülebilir. Analoji kurmak adına, bu durum, aynı elektrik alan çizgilerinin artı kutuptan eksi kutba yönelmesine benzetilebilir [3].

Manyetik alan, bir noktada  $\vec{v}$  hızıyla hareket eden bir  $q$  yükünde  $\vec{F}$  kuvvetini oluşturan alan vektörüdür [1]. Akım taşıyan telin civarındaki hareketli yüklere kuvvet uygulaması olayı ile tanımlanmaktadır. Bu kuvvetin şiddeti akım şiddetine ve hareketli yükün hızına bağlıdır.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.10)$$

$\vec{v}$  : Yüklü parçacığın hızı

$\vec{B}$  : Manyetik akı yoğunluğu (Tesla)

Manyetik akı yoğunluğu, birim yüzeydeki alan çizgilerinin yoğunluğu olarak tanımlanır ve birimi Tesla (T) ya da Gauss (G)' dur. Tesla ve Gauss arasındaki ilişki  $1T=10^4 G$  ' dir. Manyetik alan ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki;

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.11)$$

$\mu$  : Ortamın manyetik geçirgenliği

(Serbest uzayın manyetik geçirgenliği  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ )

$\vec{H}$  : Manyetik alanın şiddeti (A/m)

Manyetik alan, hareket eden elektrik yükleri tarafından oluşturulurlar. Durgun elektrik yükleri manyetik alan oluşturamaz. Onlar sadece elektrik alanı oluşturabilirler. Doğrusal bir telden geçen akımın oluşturduğu manyetik alan, akımın şiddetiyle doğru orantılıdır.

Manyetik alanın genliği akım şiddeti ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Mesafenin artmasıyla genliği hızla azalır.

Yerkürenin iç kısımlarında yüklü iyonlar ya da elektronların hareketi ile doğal manyetik alan oluşur. Yeryüzündeki statik doğal manyetik alanın büyüklüğü  $20 \mu\text{T} - 50 \mu\text{T}$  ( $0,2 \text{ G} - 0,5 \text{ G}$ ) değerleri arasındadır [4].

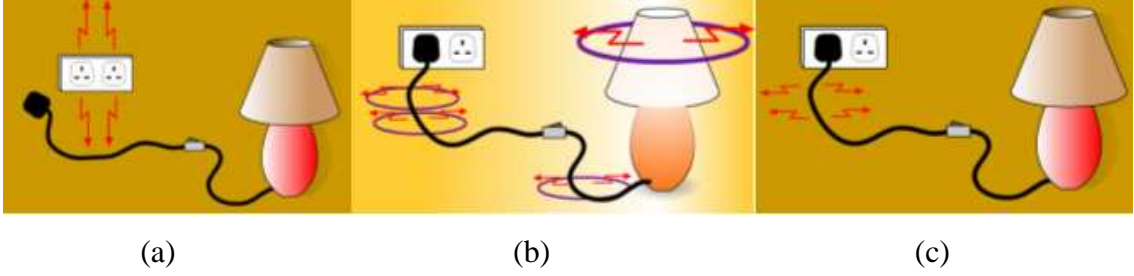
#### **1.2.4. Elektrik ve Manyetik Alanların Karşılaştırılması**

##### **Elektrik Alan**

1. Elektrik alan gerilimle artar.
2. Metre başına gerilimle (V/m) tanımlanır.
3. Cihaz kapalı olsa bile elektrik alan mevcuttur.
4. Mesafe arttıkça alan şiddeti azalır.
5. Birçok binalar ve iletken malzemeler elektrik alana kalkan olmaktadır.

## Manyetik Alan

1. Manyetik alan akımla artar.
2. Metre başına akım olarak tanımlanır (A/m). Ancak birim olarak genellikle akı yoğunluğu (Tesla) kullanılmaktadır.
3. Manyetik alan akım aktığı sürece vardır. Dolayısıyla, cihaz kapalıyken manyetik alan meydana gelmez.
4. Mesafe arttıkça alan şiddeti azalır.
5. Manyetik alanları zayıflatmak oldukça güçtür [5].



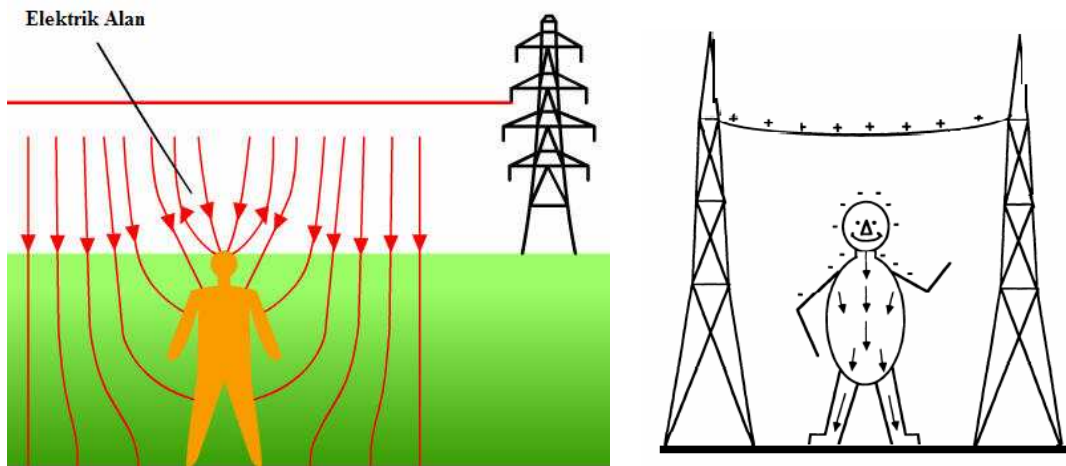
Şekil 1.3. Bir elektrik cihazının çalışır-çalışmaz durumu için elektrik ve manyetik alan yayılım şekli  
 a) Cihaz prize takılı değil  
 b) Cihaz prize takılı ve lamba yanıyor  
 c) Cihaz prize takılı lamba yanmıyor

Şekil 1.3. (a)' da elektrik cihazı prize takılı olmadığından cihazın kablosunun etrafında meydana gelecek elektrik alanı önlemiş oluruz, fakat hala duvarın içindeki elektrik kablolarında gerilim olduğu için elektrik alan yayılımı devam etmektedir. Şekil 3. (b)' de cihaz çalışır duruma getirildiğinde akım akacağı için hem elektrik alan hem de manyetik alan meydana gelecektir. Şekil 1.3. (c)' de cihazın kablosunu prize taktığımızda cihaz çalışmasa bile kablo çevresinde bir elektrik alan olacaktır.

### 1.3. Elektrik ve Manyetik Alan İndüklenmesi

#### 1.3.1. Elektrik Alan İndüklenmesi

Elektrik indüksiyonunda herhangi bir enerji hattı ya da elektrikli alet üzerindeki yükler, insan vücudu içerisindeki serbest yükleri çeker ya da iterler. Vücut içerisindeki sıvılar iyi iletken olduğu için vücutta bulunan elektrik yükleri de bu elektrik kuvvetinin etkisi ile vücut yüzeyine doğru hareket eder. Enerji hatlarındaki elektrik yükü zamanla değişmekte olduğundan insan vücudunda oluşan yükler de aynı değişime uğramaktadır. Başlangıçta alternatif gerilimin pozitif kısmını ele alırsak, bu durumda vücudun üst kısımları negatif yüklenmiş olacaktır. İşaretin negatif kısmında ise vücudun üst kısmı pozitif yüklenmiş olacaktır. Enerji hatlarında işaretin polaritesi sürekli değiştiğinden (saniyede 50 kez) yüklerin vücut içerisinde hareketi söz konusudur. Bu nedenle son derece düşük frekanslı elektrik alanları, vücut yüzeyinde oluşturduğu elektrik yükleri gibi vücut içerisinde de akımlar akmasına neden olur. Şekil 1.4.' te iletim hattı altındaki bir insan için yüklerin hareketinin neden olduğu indüksiyon akımı gösterilmiştir [6].

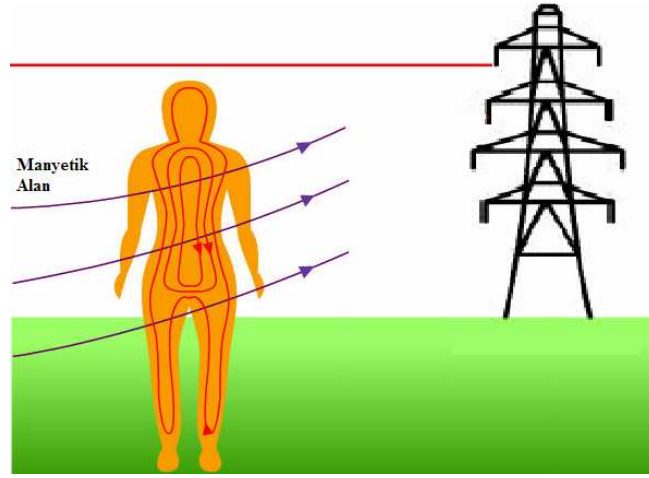


Şekil 1.4. Elektrik alanın neden olduğu insan vücudundaki elektrik akımları [6, 7].

Elektrik alanlar, vücut yüzeyinde elektriksel yük yoğunluğu oluşturur. Bu ise içsel elektrik akımların dolaşmasına neden olur.

### 1.3.2. Manyetik Alan İndüklenmesi

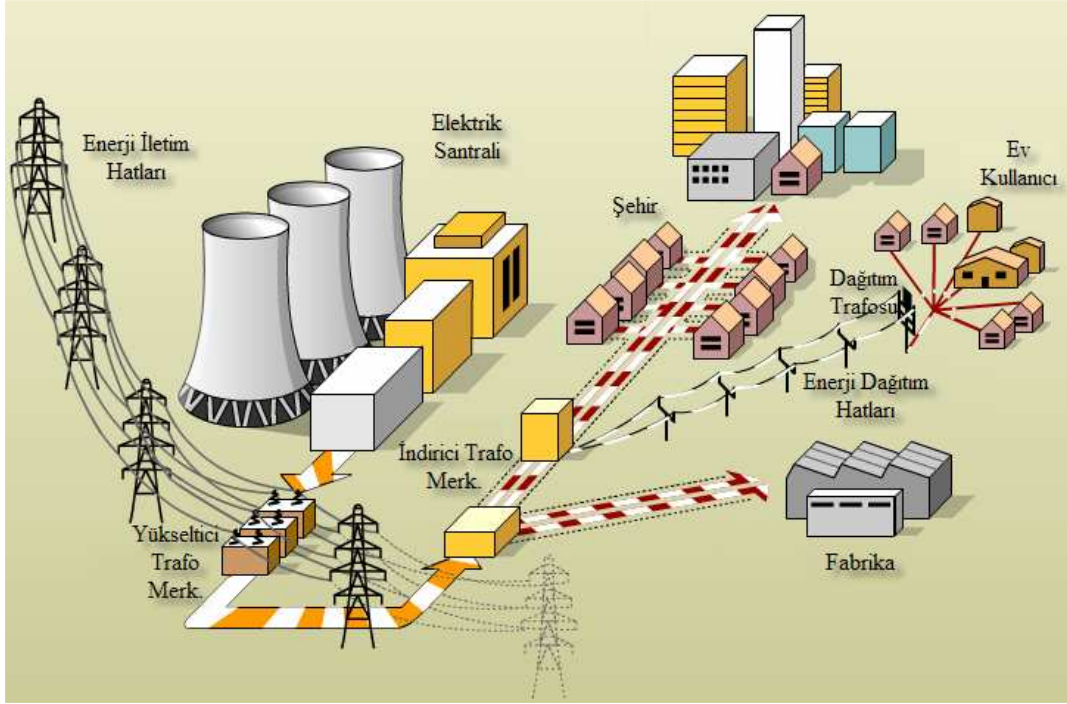
Manyetik alan etkisi sonucu oluşan akımlar halkalar halinde akmakta olduğu için bazen girdap (Eddy) akımlar olarak da isimlendirilir. Manyetik indüksiyonun yapısı gereği manyetik alanların vücut içerisinde oluşturduğu akımlar vücut çevresi yakınında en fazla, vücut merkezinde ise en az düzeydedir. Şekil 1.5.' te iletim hattı altında duran bir insan için manyetik indüksiyon sonucu oluşan akımların yönü gösterilmiştir [6].



Şekil 1.5. Manyetik alanın neden olduğu insan vücudundaki elektrik akımları [7].

### 1.4. Türkiye' de Enerji İletim Tesislerinin Durumu

Ülkemizde elektrik enerjisi, genel olarak doğu ve güney doğu bölgelerinde üretilmekte tüketim ise, daha fazla, sanayinin ve yerleşimin yoğun olduğu batı bölgelerinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle enerjinin, genel olarak, doğudan batıya iletilmesi enerji iletim hatları ile gerçekleştirilmektedir. Elektrik enerjisi, güç üretim santrallerinden kullanıcılara gelinceye kadar şekil 1.6.' da gösterildiği üzere çeşitli aşamalardan geçer.



Şekil 1.6. Elektriğin üretimi ve kullanımı arasındaki süreç

Ülkemizde elektrik enerjisi iletim ve dağıtım hatlarıyla taşınır. Bunlardan birincisi yüksek gerilim hattı diye tanımlanan 66 kV, 154 kV, 220 kV ve 380 kV gerilimli iletim hatları grubudur. Bu hatlar, üretim merkezlerindeki elektrik enerjisini, tüketim merkezlerindeki ana trafo merkezlerine taşırlar. Ancak 66 ve 220 kV gerilimli hatlar hâlihazırda ülkemizde uzun bir süreden beri tesis edilmemektedir. İkinci hat türü ise dağıtım hattı olarak tanımlanan 34,5 kV ve daha düşük gerilimli hatlardır. Bu hatlar, trafo merkezlerindeki elektrik enerjisini daha düşük gerilimli trafolarla ve/veya evlerimize ve iş yerlerimize ulaştırmaktadır. Tablo 1.1. ve tablo 1.2.’ de ülkemizde enerji iletim tesisleri hakkında, gerilim sınıflarına göre istatistiki bilgiler verilmektedir.

Tablo 1.1. Türkiye’ de trafo merkezlerinin durumu [8].

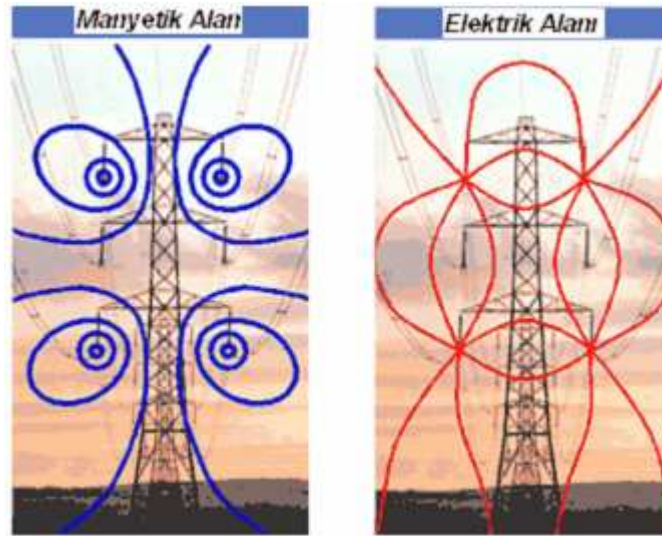
Gerilim (kV)	Merkez Adedi	Trafo Adedi	Güç (MVA)
400	61	153	28.715
154	459	963	52.669
66	15	57	672
TOPLAM	535	1173	82.056

Tablo 1.2. Türkiye’ de enerji iletim hatlarının durumu [8].

Enerji İletim Hatlarının Adedi					Enerji İletim Hatlarının Toplam Uzunlukları				Genel Toplam (km)
400 kV	220 kV	154 kV	66 kV	TOPLAM	400 kV (km)	220 kV (km)	154 kV (km)	66 kV (km)	
123	2	1012	25	1162	14.338,4	84,5	31.383,0	477,4	46.283,3

### 1.5. Enerji İletim Hatlarından Kaynaklanan Elektrik ve Manyetik Alanlar

Tipik bir havai iletim hattı tarafından üretilen elektrik ve manyetik alan çizgileri Şekil 1.7.’ de verilmiştir [9].



Şekil 1.7. EİH tarafından üretilen elektrik ve manyetik alan çizgileri [9].

Enerji iletim hatları, akıma göre çok daha az değişen gerilime ve gün boyunca yük değişiminden dolayı sürekli değişen akımlara sahiptir. Bu sebepten dolayı iletim hatlarından oluşacak elektrik ve manyetik alan sürekli yüke bağlı olarak değişmektedir. Tablo 1.3.’ te farklı gerilim seviyelerindeki iletim hatlarındaki elektrik ve manyetik alan değerleri görülmektedir.

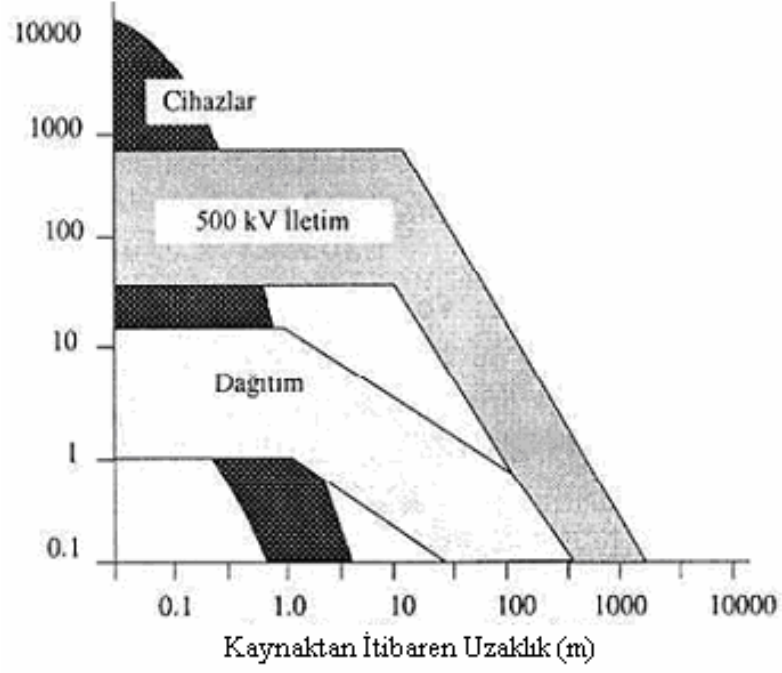


Tablo 1.3. Çeşitli gerilimlere göre iletim hattı alanlarının mesafe ile değişimi [10].

<b>ELEKTRİK ALANLAR (V/m)</b>	<b>MANYETİK ALANLAR (<math>\mu</math>T)</b>
<b>400 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 5000 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 2000 Eksenden 100 metre uzaklıkta: 200	<b>400 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 30 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 12 Eksenden 100 metre uzaklıkta : 1,2
<b>225 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 3000 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 400 Eksenden 100 metre uzaklıkta: 40	<b>225 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 20 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 3 Eksenden 100 metre uzaklıkta : 0,3
<b>90 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 1000 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 100 Eksenden 100 metre uzaklıkta: 10	<b>90 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 10 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 1 Eksenden 100 metre uzaklıkta : 0,1
<b>20 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 250 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 10 Eksenden 100 metre uzaklıkta: Önemsiz/göz ardı edilebilir.	<b>20 000 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 6 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 0,2 Eksenden 100 metre uzaklıkta: Önemsiz/göz ardı edilebilir.
<b>230 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 9 Eksenden 30 metre uzaklıkta : 0,3 Eksenden 100 metre uzaklıkta : Önemsiz/göz ardı edilebilir.	<b>230 Volt hatlar</b> Hattın altında ..... : 0,4 Eksenden 30 metre uzaklıkta : Önemsiz/göz ardı edilebilir. Eksenden 100 metre uzaklıkta: Önemsiz/göz ardı edilebilir.

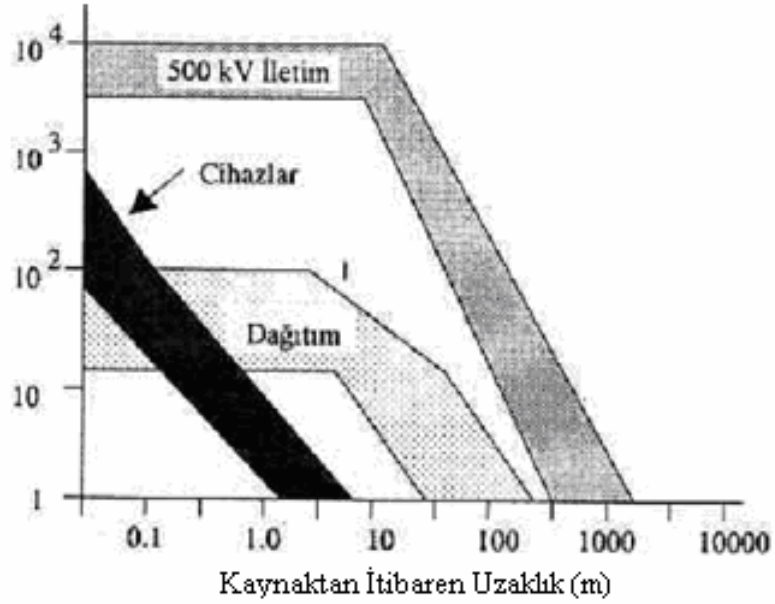
Ülkemizdekilerden daha yüksek gerilime sahip Kuzey Amerika iletim hatlarındaki maksimum manyetik alan seviyesi 2-7  $\mu$ T (20-70 mG) olabilmektedir. Hat güzergâhının kenarında (irtifak hakkı sınırı) ise bu değerler 0,5 – 2,5  $\mu$ T (5-25 mG) seviyesindedir [11]. Aşağıdaki şekillerde yüksek gerilim hatlarıyla birlikte elektriksel cihazların yaydığı EMA' lar gösterilmiştir.

Manyetik Akı Yoğunluğu (mG)



Şekil 1.8. Bazı uygulamalar için manyetik alanın mesafe ile değişimi [12].

Elektrik Alan Şiddeti (V/m)



Şekil 1.9. Bazı uygulamalar için elektrik alanın mesafe ile değişimi [12].

Ülkemizde, yüksek gerilimli elektrik iletim tesislerinden kaynaklı elektrik alan ve manyetik alan düzeylerinin saptanmasına yönelik kapsamlı çalışma, 2001 yılında Türkiye Elektrik Anonim Şirketi (TEAŞ) ile TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, bu tesislerden kaynaklı alan şiddetleri aralığı tablo 1.4.' te verilmektedir [11].

Tablo 1.4. Yüksek gerilim elektrik iletim tesislerinden kaynaklı EMA [11].

Tesis Tipi	Elektrik Alanı (kV/m)	Manyetik Alan (mG)
154 kV EİH	0,3 – 1	9 – 14
154 kV Yer altı EİH	3 – 4	25 – 27
380 kV EİH	1 – 3	35 – 60
154 kV GIS TM	3 – 5	35 – 39
154 kV TM	0,1 – 2	30 – 140
380 kV TM	1 – 6	25 – 69

EİH: Enerji iletim hattı

TM: Trafo merkezi

GIS: Gaz izoleli kompakt tip trafo merkezi

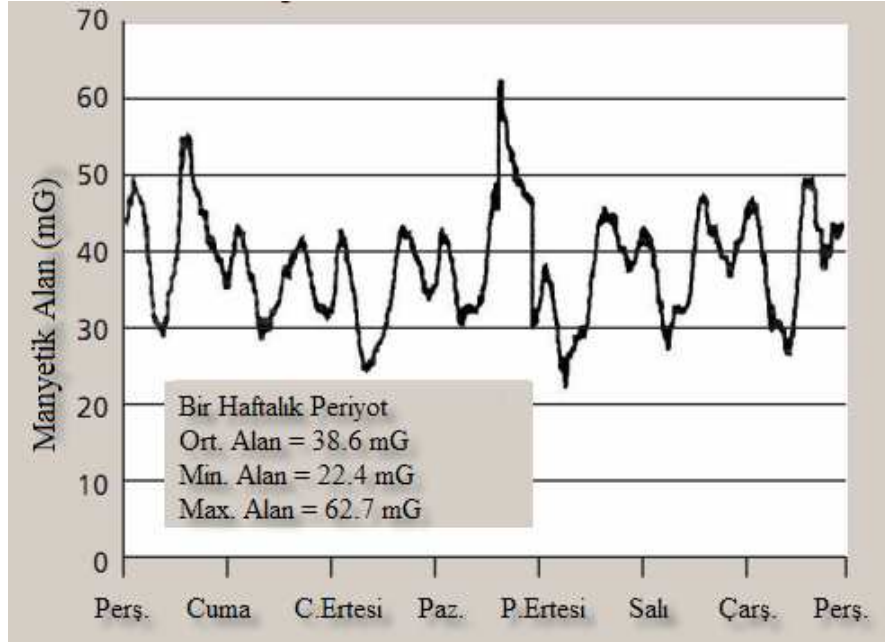
EMA: Elektromanyetik alanlar



Şekil 1.10. Farklı gerilimlere göre EİH EMA' larının mesafe ile değişimi [13].

Yine diğ er yapılan bir ç alışmada, farklı yüksek gerilim seviyelerinde tipik enerji iletim hattının ç evresinde elektrik ve manyetik alan ölçüm sonuçları ř ekil 1.10.' da verilmektedir. Yapılan ölçümler yerden bir metre yükseklikte yapılmıştır.

Enerji iletim hatlarından meydana gelen elektrik alan, hattın gerilim seviyesi ç ok değ işmediğ inden nispeten sabittir. Manyetik alanlar ise akımla değ iştiğ inden dolayı sürekli olarak yük değ işmelerinden kaynaklanan akım dalgalanmaları manyetik alan seviyelerini devamlı değ iştirecektir. ř ekil 1.11.' de 500 kV' lik EİH için 1 hafta boyunca 5 dakika aralıklarla ölçülen manyetik alan sonuçları verilmektedir. Ölçülen manyetik alan değerleri yüke bağ lı olarak 62,7 mG ile 22,4 mG arasında değ işmektedir.



ř ekil 1.11. 500 kV EİH için ölçülen manyetik alan sonuçları [13].

## 1.6. Elektromanyetik Iř ınım

Iř ınım, enerjinin bir ortamda dalga veya tanecik halinde yayılması olarak tanımlanır. Elektromanyetik iş ınım ise dalga ve tanecik özellikleri ile iki farklı görüşle açıklanır. Dalga özelliğ i, frekansa göre değ işen dalga hareketidir. Yüksek frekanslarda ise dalgalar madde ile karşılaştırıldıklarında dalgadan daha ç ok tanecik özelliğ ine sahiptirler. Bu dalgalara foton adı verilir. Her bir foton tarafından taşınan enerji, frekansa bağ lıdır.

Elektromanyetik (EM) ışınım ise elektromanyetik dalganın herhangi bir ortamda yayılmasıdır.

Enerji akışı, dalga yayılması veya parçacık akışı şeklinde karşımıza çıkar. Bu da elektromanyetik dalganın “dalga-parçacık” ikili davranışı olarak bilinir. Einstein teorisine göre, bir fotonun enerjisi elektromanyetik dalgaların frekansıyla orantılıdır. Işınım enerjisini Joule cinsinden [14];

$$E = h \times \nu \quad (1.12)$$

Burada;

$E$  : Fotonun sahip olduğu enerji (Joule)

$h$  : Planck sabiti ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J. s)

$\nu$  : Frekans (Hertz)

bağıntısı ile verilebilir. Burada;

Elektron-Volt (eV) cinsinden ışınım enerjisi;

$$E = 4,14125 \cdot 10^{-15} \times \nu \quad (\text{eV}) \quad (1.13)$$

şeklinde verilebilir. ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ )

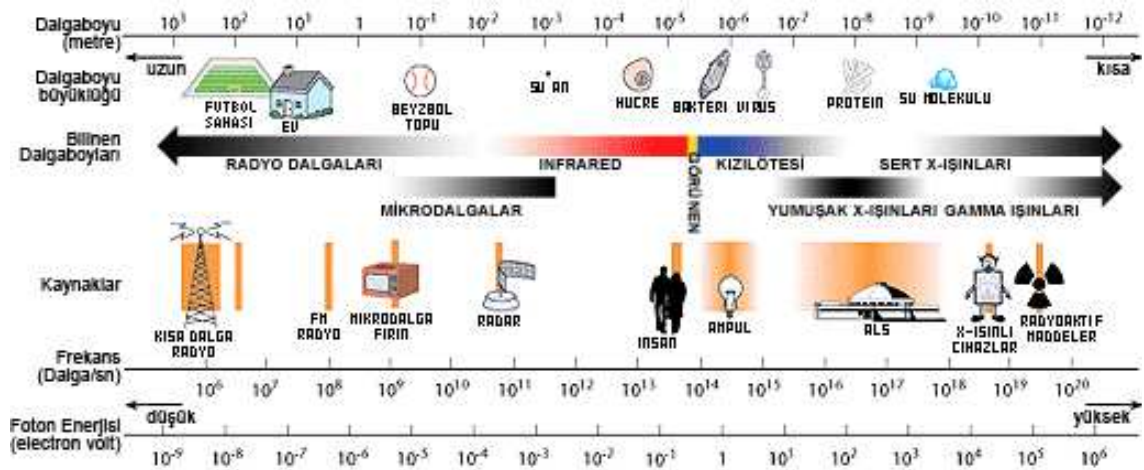
İyonlaşma, elektronun çekirdekten koparılarak serbest hale gelmesidir. En basit atom olan hidrojen atomunda iyonlaşma enerjisi 13,6 eV' dir. İyonlaşma, moleküler yapıda değişime neden olur. Bu değişme, biyolojik dokuda, DNA'nın yapısında ve genetik yapıda bozulmalara neden olur. 12 eV' lik bir enerjiden daha büyük bir enerjiye sahip parçacık, biyolojik molekülü iyonlaştırıp biyolojik bozulmalara neden olabilir [15].

Elektromanyetik dalgalar foton denilen küçük enerji paketlerinden oluşmaktadır. Fotondaki enerji, frekans ile doğru orantılıdır. Frekans arttıkça fotondaki enerji miktarı da artmaktadır. Elektromanyetik dalganın biyolojik sistemlere olan etkisinin bir kısmını alanın gücü ve bir kısmını da fotonun enerjisi belirler. Düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar "Elektromanyetik Alanlar" ve yüksek frekanslı dalgalar ise "Elektromanyetik Radyasyon" olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca elektromanyetik dalgalar frekans ve enerjilerine göre "İyonlaştıran Radyasyon" veya "İyonlaştırmayan Radyasyon" diye ayrılır.

İyonlaştıran radyasyon yüksek frekanslı enerjisi oldukça yüksek olan ve iyonizasyon (yani pozitif veya negatif elektrik yüklü atom veya molekül parçacıklarının oluşturulması)

meydana getiren nükleer radyasyondur (röntgen - gama ışması). Bunlar atom bağlarını kopararak hücrelerdeki moleküllerin parçalanmasına neden olur. İyonlaştırıcı radyasyon atom ve moleküllerden elektron koparabilen radyasyonlardır. Bu kopmanın olabilmesi için bir minimum kuantum enerjisi vardır. Değişik frekanslar bunun için 12 eV ile 35 eV arası değişen değerler vermektedir.

EM alan ışmasına aynı zamanda “iyonize olmayan” ışınım da denir. Maddeleri iyonize edecek kadar enerjisi olmayan bütün elektromanyetik alan ve ışınım iyonize olmayan ışınım denir. İyonize olmayan ışınım, her foton 12 eV’ den daha az enerjiye, 100 nm’ den daha uzun dalga boyuna ve 300 THz’ den daha düşük frekansa sahiptir[16].



Şekil 1.12. Elektromanyetik spektrum

Şekil 1.12.’ de elektromanyetik spektrum ve ilgili kullanım alanları gösterilmektedir. Elektromanyetik spektrumda, 0 - 300 GHz arası, iyonlaştırmayan ışınım bölgesi sayılır.

Elektromanyetik spektrumda bölgeler;

- 3 Hz - 3 kHz arası, çok çok düşük frekans bölgesi
- 3 kHz - 30 kHz arası, çok düşük frekans bölgesi
- 10<sup>12</sup> Hz’ lere kadar olan bölge radyo dalgaları
- 10<sup>12</sup> Hz’ ler kızıl ötesi ışınım bölgesidir. Bütün nesnelere, bu frekanslarda ışınım yaparlar.
- Görünür ışık frekansları 10<sup>14</sup> Hz’ dir. Bu frekansların üstü; iyonlaştırıcı radyasyon bölgesi olup, x ve gama ışınları bu bölgededir.

## 1.7. Standartlar ve Referans Seviyeler

Bir standart, talimat ve yönetmelikler içerip, birey veya insan gruplarının güvenliğini artıran kural veya şartlar takımı olarak belirlenen genel bir terimdir. Bir talimat, bir kanuni kural altında belirlenir ve zorunlu bir standart olarak gösterilir. Bir yönetmeliğin genellikle kanuni bir zorunluluğu yoktur ve sadece rehberlik için yayınlanır (ihtiyari, isteğe bağlı standart). Standartlar maksimum maruziyet limitlerini ve kişisel maruz kalma için diğer güvenlik kurallarını kesin olarak belirtebilir veya bir aracın görevi, tasarımı, yapısı ve çalışması hakkında detaylı bilgi sağlayabilir [17].

Genel olarak toplumun veya mesleği gereği statik ve elektromanyetik alanlara maruz kalan kişileri korumak için maruziyet limitleri belirlenir. Bunlar herhangi bir araçtan yayılan radyasyona, vücudun maruz kalmasına izin verilen maksimum seviyeyi gösterir. Birçok ülkede olumsuz biyolojik etkilere dair daha belirgin bilgiler elde edilinceye kadar, sağlık riski oluşturabilecek kısa süreli yönetmeliklerle güvenlik limitleri oluşturulmuştur [17].

### 1.7.1. Yurt Dışında Belirlenmiş Güvenlik Standartları

60 Hertzlik manyetik ve elektrik alanlar için, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) ulusal standartlar yoktur. Yine de, Ulusal Elektrik Güvenlik Kodu gereğince, akımlar için güç hatları alan şiddetlerine, bazı üst sınırlar getirilmiştir.

Birçok eyalet, genellikle önerilen iletim hatları için düzenleyici tutanaklar tutarken biyolojik etkiler konusuna değinmiştir. Altı eyalet, iletim hatlarından kaynaklanan elektrik alanları için standart veya rehber belirlemiştir. Bu altı eyaletlerden ikisi ise manyetik alanlar için de standartlar tanımlamışlardır. Anılan bu iki eyaletin (New York ve Florida) manyetik alanları, temelde, maksimum yük koşullarında, mevcut hatların yakınındaki manyetik alan değerleridir. Başka bir deyişle, bu eyaletlerin amacı, gelecekteki hatların hâlihazırdaki EMA düzeylerini aşmamasını sağlamaktır [13].

Tablo 1.5. ABD’ de enerji iletim hatları EMA eyalet standartları [13].

Eyalet	Elektrik Alanı (kV/m)		Manyetik Alan (mG)	
	ROW İçinde	ROW Sınırında	ROW İçinde	ROW Sınırında
Florida	8 <sup>a</sup>	2	-	150 <sup>a</sup> (maks. yükte)
	10 <sup>b</sup>	-	-	200 <sup>b</sup> (maks. yükte)
	-	-	-	250 <sup>c</sup> (maks. yükte)
Minnesota	8	-	-	-
Montana	7 <sup>d</sup>	1	-	-
New Jersey	-	3	-	-
New York	11,8	1,6	-	200 (maks. yükte)
	11 <sup>e</sup>	-	-	-
	7 <sup>d</sup>	-	-	-
Oregon	9	-	-	-

ROW: İletim Hattının” İrtifak Hakkı Güzergahı”

<sup>a</sup>: 69-230 kV gerilimli hatlar; <sup>b</sup>: 500 kV gerilimli hatlar;

<sup>c</sup>: Mevcut bazı güzergahlar içindeki 500 kV gerilimli hatlar

<sup>d</sup>: Otoyol geçişleri için maksimum; <sup>e</sup>: Özel ulaşım yolu geçişleri için maksimum

Elektrik ve manyetik alanların limit değerlerinin belirlenebilmesi için birçok kurum ve kuruluşlar araştırma yapmaktadır. Bu çalışmaların neticesinde birçok ülkede standartlar belirlenmiştir. Ancak dünyada birçok ülke belirlenen standartlardan ICNIRP (International Committee on Non-Ionising Radiation Protection) Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyon Komitesi limit değerlerini referans almaktadır.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), bağımsız, kar amacı gütmeyen ve uzman kuruluşları temel almaktadır. WHO, iyonlaştırmayan radyasyon etkileri konusunda ICNIRP Kurumu’nu kabul etmektedir.

1974 yılında IRPA (International Radiation Protection Association) Uluslararası Radyasyondan Koruma Kurulu, NIR (Non-Ionizing Radiation) İyonlaştırmayan Radyasyon çalışma grubunu oluşturdu ve 0-300 GHz arasında BEM konusunu incelemekle görevlendirdi. 1997 yılında Paris’te yapılan IRPA kongresinde bu çalışma grubu INIRC (International Non-Ionizing Radiation Committee) Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyondan Koruma Komitesi’ne dönüştürüldü [18].

IRPA/INIRC Kurumu WHO (World Health Organisation) Dünya Sağlık Örgütü’ nün çevre sağlığı birimi ile birlikte; UNEP (United Nations Environment Programme) Birleşmiş Milletler Çevre Programı’na desteklenen bir dizi çalışma sonucu çevre sağlık kriterlerini oluşturdu. Bu dokümanlarda iyonlaştırmayan radyasyon konusunda problemin



fiziği, kaynaklar, ölçü teknikleri ve cihazları, vb. bilgiler derlendi. Bu bilgiler sürekli gözden geçirildi, yenilendi ve zamanla konuşulan temel ve türetilmiş limitlerin kaynağını oluşturdu. IRPA' nın 1992 yılında Kanada'da yapılan 8. uluslararası kongresinde bağımsız ICNIRP kuruldu ve bu kurul IRPA/INIRC kurumunun yerini aldı.

ICNIRP; İyonlaştırmayan radyasyon konusunda bağımsız, bilimsel çalışmalar yapmak, ulusal ve uluslararası sağlık kuruluşları ve örgütleri ile ortak çalışmalar yapmak ve ilgili çalışmaları izlemek bunların sonunda elde edilen verilere dayanarak iyonlaştırmayan radyasyon konusunda insan ve toplum sağlığı kılavuzları hazırlamakla yükümlüdür [18].

ICNIRP kılavuzlarında iki sınıfta limitlerden söz edilir:

- Temel sınırlamalar: Doğrudan sağlık etkileri oluşturan ve zamanla değişen elektrik ve manyetik alanlar.
- Referans seviyeler: Bu seviyeler temel sınırlamaların sağlanıp sağlanmadığını belirlenmesine yarayan ölçülebilir büyüklüklerdir [18].

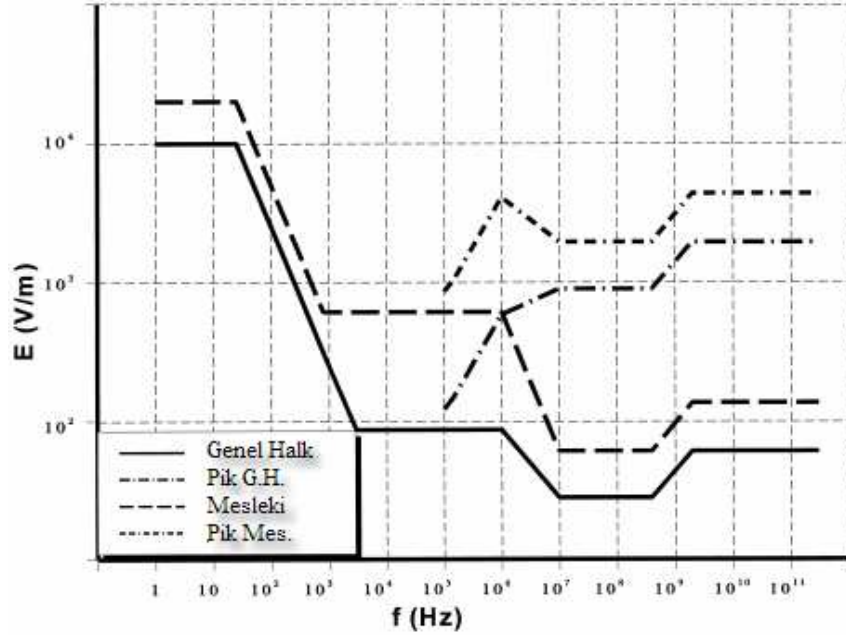
Tablo 1.6. ICNIRP 50 Hz elektromanyetik alana maruz kalma referans değerleri [18].

Maruz Kalma Koşulları	Elektrik Alan (kV/m)	Manyetik Alan (G)
<b>Çalışanlar</b>		
Tam mesai günü	10	5
Kısa süre*	30	50
Uzuvlar (kol ve bacak gibi vücuda eklemle bağlı)	--	250
<b>Genel Halk</b>		
24 saat/gün	5	1
Günde birkaç saat	10	10

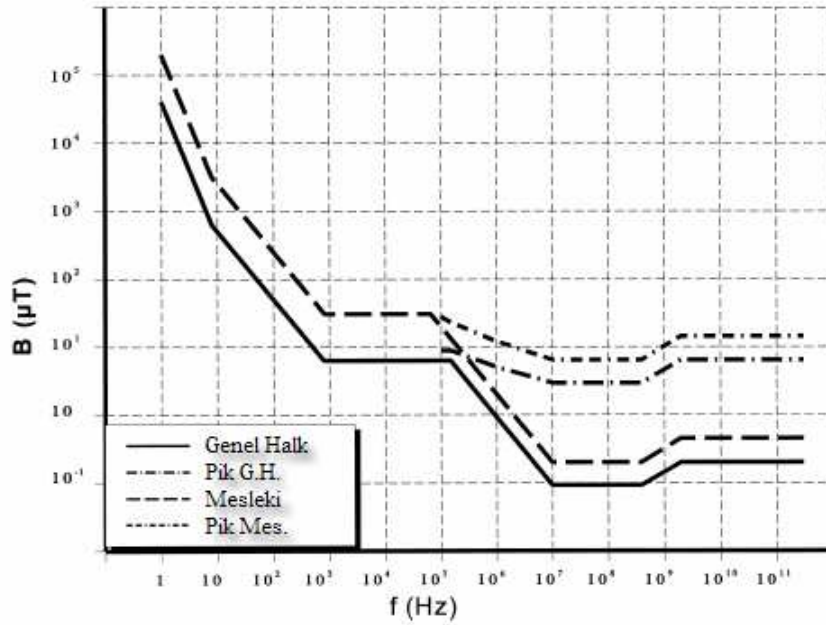
\* :10-30 kV/m düzeyindeki elektrik alanları için, alan şiddeti (kV/m) × maruz kalma süresi (saat), tüm mesai günü için 80 kV/m değerini aşmamalıdır. Vücudun tamamının günde iki saat maruz kaldığı manyetik alan şiddeti 50G' u geçmemelidir.

Standartlarda belirtilen limit değerler, EMA' ya maruz kalarak çalışan kişiler (kontrollü çevre) için ve genel halk (kontROLSÜZ çevre) için olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Genel halk yaşam alanlarında insanların kendi bilgi ve kontrolleri dışında etkilenmeleri söz konusu olduğundan kontrollü çevreye göre 5 kat koruma faktörü eklenmiştir. Birbirinden

farklı birçok araştırma sonucunda ICNIRP kontrollü ve kontrolsüz çevre EMA maruziyeti limit değerlerini yayınlamıştır.



Şekil 1.13. ICNIRP Elektrik alan referans seviyeleri [18].



Şekil 1.14. ICNIRP Manyetik alan referans seviyeleri [18].

Geçmiş yıllarda ANSI (American National Standards Institute) Amerikan Standartlar Enstitüsü C95 alt komitesi altında elektromanyetik alanların insan sağlığına etkileri konusunda sorumluydu. Yaptığı çalışmalar IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tarafından da desteklenmiştir. IEEE 0-3 kHz frekans bandı için elektromanyetik alan standardı tablo 1.7. ve tablo 1.8.’ de gösterilmektedir. Bu standarda uyulması ve kullanılması tamamıyla gönüllük esasına dayanmaktadır.

Tablo 1.7. Tam vücut için maksimum izin verilen elektrik alan seviyeleri [19].

Frekans (Hz)	Genel Halk	Kontrollü Çevre
	E (kV/m)	E (kV/m)
50	5 <sup>a,d</sup>	20 <sup>b,e</sup>

- <sup>a</sup> : ROW içerisinde normal yük koşullarında genel halk için maksimum izin verilen elektrik alan 10 kV/m’ dir.
- <sup>b</sup> : 20 kV/m’ de kolayca zararlı deşarjlarla karşılaşılabilir ve 5-10 kV/m’ de koruyucu önlemler olmadan karşılaşılabilir.
- <sup>c</sup> : 5 kV/m’ de indüklenen deşarjlar yetişkinlerin yaklaşık % 7’ sinde zararlı olacaktır (İnsanların toprakla temas ettiği yerler iyi bir şekilde yalıtılmalıdır).
- <sup>d</sup> : Bir işçi topraklanmış iletken nesneye ulaşamayacağı yerde, 20 kV/m kontrollü çevrede aşılabilir.

Tablo 1.8. Baş ve gövde için maksimum izin verilen manyetik alan seviyeleri [19].

Frekans (Hz)	Genel Halk		Kontrollü Çevre	
	B (mT)	H (A/m)	B (mT)	H (A/m)
50	0,904	719	2,71	2,16x10 <sup>3</sup>

### 1.7.2. Türkiye’ deki Alçak Frekans EMA Güvenlik Standartları

Ülkemizde enerji iletim hatlarından kaynaklı elektrik ve manyetik alanlara ilişkin özel bir standart bulunmamakta olup, elektrik frekansını da içine alan düşük frekanslar için “İnsanların Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalması- Düşük Frekanslar (0 Hz – 10 kHz)” adlı bir Türk Standartları Enstitüsü (TSE) standardı vardır [20]. Avrupa Birliği’ nde (AB) elektrik ve manyetik alanlar için kullanılan referans değerler (CEI ENV 50166-1 Normu),

TSE standardı ile aynıdır. Ülkemizde alternatif akımda işletilmekte olan enerji iletim hatlarının frekans değeri 50 Hz' dir. 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 1.9.' da verilmektedir.

Tablo 1.9. 50 Hz Elektromanyetik alana maruz kalma referans seviyeleri (TSE) [20].

Maruz Kalma Koşulları	Elektrik Alan		Manyetik Alan
	Referans (kV/m)	Zaman (t, saat)	Referans (mT)
<b>Çalışanlar</b>	30	$t \leq 80/E$	1,6 <sup>(1)</sup> (16 G)
<b>Halk</b>	10		0,64 <sup>(2)</sup> (6,4 G)

E: Ortamda ölçülen elektrik alan değeri

<sup>(1)</sup>: Kol ve bacaklar için 25 mT' ya izin verilebilir.

<sup>(2)</sup>: Kol ve bacaklar için 10 mT' ya izin verilebilir

Manyetik alanlar için baş ve gövdenin maruz kaldığı alanın ortalaması veya baş ve gövdenin merkezindeki alanın değeri esas alınmıştır. Kol ve bacaklar için daha yüksek değerlere müsaade edilmemektedir [20].

Çevre ve Orman Bakanlığı EİH ile ilgili olarak; ülkemizde, Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesi kılavuzunda verilen sınır değerlerin uygulanması görüşünü taşımaktadır.

Bunlara ek olarak, EMA referansları dışında, yüksek gerilim hatlarına güvenli yaklaşımın sağlanabilmesi için, 30.11.2000 tarih ve 24246 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 temel alınmak kaydı ile hattın tesisine izin verilmektedir. Tablo 1.10. ve tablo 1.11.' de, anılan yönetmelikteki iletim hatlarına güvenli yaklaşım mesafeleri verilmiştir.

Tablo 1.10. Güvenli yaklaşım için gerekli yatay mesafeler [21]

Tesis	Tesisin Kenarına Olan Yatay Uzaklık (m)
Demiryolu ve Karayolu	Direğin toprak üstü tüm boyu + 2 ya da karayolu ve demiryolu istimplâk sınırı dışı (bu değerlerden en büyük olanı)
Ağaçlar 154 kV	3
380 kV	4
Binalar 154 kV	4
380 kV	5

Tablo 1.11. Güvenli yaklaşım için gerekli düşey mesafeler [21].

İletkenlerin Üzerinden Geçtiği Yer	170 kV Düşey Uzaklıklar (m)	420 kV Düşey Uzaklıklar (m)
Üzerinde trafik olmayan sular (Suların en kabarık yüzeyine göre)	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
Şehirlerarası karayolları	9	12
Ağaçlar	3	5
Üzerine herkes tarafından çıkılabilen düz damlı yapılar	5	8,7
Üzerine herkes tarafından çıkılmayan eğik damlı yapılar	5	8,7
Elektrik hatları	2,5	4,5
Petrol ve doğalgaz boru hatları	9	9
Üzerinde trafik olan sular ve kanallar	6	9
İletişim hatları	3,5	4,5
Elektriksiz demiryolları	8	10,5
Otoyollar	14	14

Her iki tabloda yer alan değerler sadece can ve mal güvenliği açısından tanımlanmış düşey ve yatay mesafelerdir. İletim hatlarından kaynaklanan elektrik ve manyetik alanlar için güvenli yaklaşım mesafeleri olarak yorumlanmamalıdır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Üç Fazlı Enerji İletim Hattının Oluşturduğu Elektrik Alan

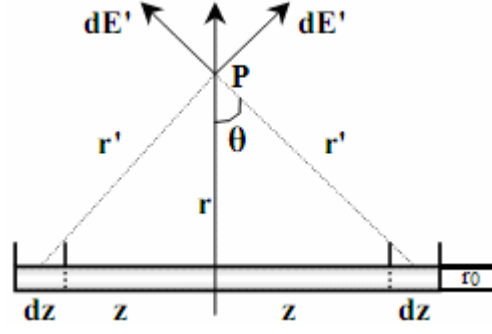
#### 2.1.1. Çift Devre Enerji İletim Hattının Oluşturduğu Elektrik Alan Hesabı

Herhangi bir ortamda elektromanyetik alanların en genel tanımı Maxwell denklemleri ile açıklanır [22]. Ancak bu denklemlerin uygulanmasında büyük zorluklar bulunmaktadır. Enerji iletim hattı civarında elektrik alan hesabını güçleştiren, toprak yüzeyinin biçimsizliği, iletkenlerdeki yük dağılımının dengesizliği, hatta yakın iletken nesnelere, gerilim düşümleri, toprak yüzeyinin gerilimi, harmonik etkiler, iletkenlerin paralel olup olmayışı gibi bazı etkenler vardır.

Alternatif akım iletim hatlarının çevresindeki elektrik alan, havada serbest bir yük olmadığı farz edilerek hesaplanır. Toprak mükemmel bir iletken olarak kabul edilir. Çünkü toprak yüzeyinde oluşan yükün şarj süresi, güç frekansı ile karşılaştırıldığında aşırı derecede küçük olduğu görülür ( $\tau = \rho \cdot \epsilon$ , 0,1-100 ns). Havanın geçirgenliği pratikte hava şartlarından bağımsızdır ve boşluğun geçirgenliğine eşittir ( $\epsilon = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m) [2]. 3- Fazlı enerji iletim hattının etrafında elektrik alan hesabı yapılırken faz iletkenleri sonsuz uzunlukta ve birbirine paralel yükler gibi düşünülür [23-25].

Burada yapılan elektrik alan hesaplamalarında, vektörel hesaplarla görüntü alma yöntemi kullanılmıştır [23, 26, 27]. Enerji iletim hatlarında elektrik alanının hesabında iletkenler için sonsuz çizgisel yük tipi seçilir. Bir iletken üzerindeki yükün, sonsuz uzunluktaki çizgisel yüklerle benzetilmesi, silindrsel iletkenlerin elektrostatik alanlarının hesabı için bilinen bir yoldur [26]. İlk olarak, sonsuz uzunluktaki enerji iletim hattının neden olduğu elektrik alan ve elektriksel potansiyel hesaplanmıştır.

Sonsuz uzunluktaki çizgisel yük dağılımından r kadar uzaktaki P noktasında elektrik alan vektörleri şekil 2.1.' de gösterilmiştir. İletim hattına dik elektrik alan dE olarak isimlendirilmiştir. Hattın birim boyları boyunca eşit yük dağılımı olduğu düşünülmektedir. Alan vektörlerine bakıldığında, simetri nedeniyle elektrik alanın yatay bileşeni sıfırdır. Bundan dolayı, elektrik alan iletim hattına dik olacaktır.



Şekil 2.1. Sonsuz çizgisel yük dağılımının “r” kadar uzaktaki elektrik alan vektörleri

Elektrik alanın düşey bileşeni;

$$dE = dE' \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

$$dE' = \frac{q \cdot dz}{4\pi\epsilon r'^2} \quad (2.2)$$

$$\tan \theta = \frac{z}{r}, \quad z = r \tan \theta, \quad dz = \frac{r \cdot d\theta}{\cos^2 \theta} \quad (2.3)$$

$$\cos \theta = \frac{r}{r'}, \quad r' = \frac{r}{\cos \theta} \quad (2.4)$$

$$dE = \frac{q}{4\pi\epsilon r} \cos \theta d\theta \quad (2.5)$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon r} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta d\theta \quad (2.6)$$

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \quad (2.7)$$

$$V = -\int E \cdot dr = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \int \frac{dr}{r} + c = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r + c \quad (2.8)$$

$r = r_0$  için potansiyel sıfır seçilirse;

$$0 = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r_0 + c \Rightarrow c = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r_0 \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9' daki c sabiti eşitlik 2.8' de yerine konursa, elektriksel potansiyel;

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \left( \frac{r_0}{r} \right) \quad (2.10)$$

olur [28]. Burada;

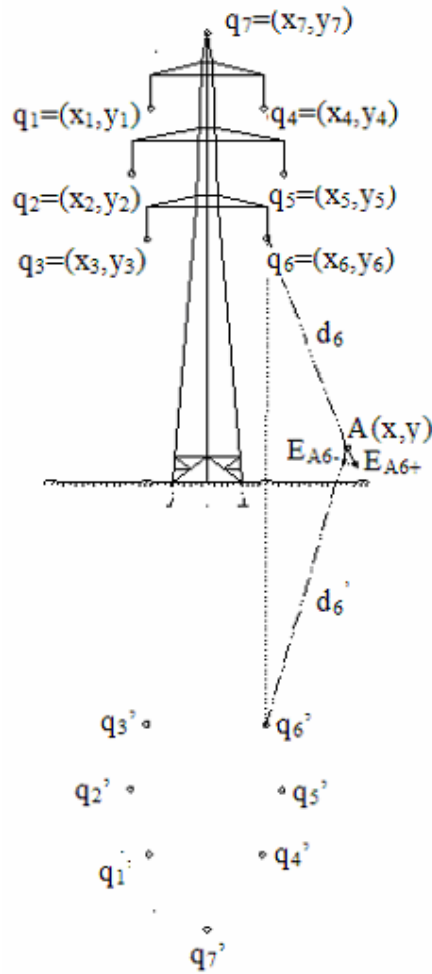
$q$ : İletken yükü,

$r_0$ : İletken yarıçapı,

$r$ : İletkenin P noktasına uzaklığı,

$\epsilon$ : Dielektrik sabitidir.

Enerji iletim hatlarının elektrik alan hesabı için, yukarıdaki elektrik alan ve elektriksel potansiyel eşitliklerine göre yük dağılımı değerinin bilinmesi gerekmektedir. İletim hattının potansiyeli bilindiğine göre, (2.10) eşitliği yardımıyla yük değeri bulunabilir ve böylece elektrik alan kolaylıkla hesaplanabilir. İletim hattı boyunca yük dağılımı sabit kabul edildiğine göre her bir hat için yük değeri de değişmeyecektir.



Şekil 2.2. Görüntü alma metoduyla çift devre 3-fazlı enerji iletim hattının oluşturduğu elektrik alan



Şekil 2.2.'deki çift devre EİH' nin elektrik alanını hesaplamak için ilk önce q yüküne sahip iletkenin  $-q$  yüküne sahip görüntüsüyle birlikte bir noktada oluşturduğu potansiyel değeri;

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d'}{d} \quad (2.11)$$

ile hesaplanır [27,29].

Her bir iletkenin A noktasında oluşturduğu toplam potansiyel (2.12) no' lu eşitlikten elde edilir.

$$V_{A_i} = \sum_{i=1}^7 \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \left( \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2}}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y_i-y)^2}} \right) \quad (2.12)$$

Tam olarak düz bir toprak yüzeyi üzerindeki paralel iletkenlerin iletim hattı düzenlemeleri için maxwell potansiyel katsayı matrisi [P]' nin elemanları (2.13) ve (2.14) no' lu eşitlikler kullanılarak elde edilir.

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left( \frac{2y_a}{r} \right) \quad (2.13)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left( \frac{\sqrt{(x_a-x_b)^2 + (y_a+y_b)^2}}{\sqrt{(x_a-x_b)^2 + (y_a-y_b)^2}} \right) \quad (2.14)$$

Burada;

$y_a, y_b$  : a ve b iletken yüksekliği,

$r$  : a iletkenin yarıçapı,

$x_a, x_b$  : a,b iletkenlerinin yatay koordinatlarıdır [2].

Her bir iletim hattının ve koruma telinin üzerindeki potansiyel yazılır,

$$V_1 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_1 \ln\left(\frac{2y_1}{r}\right) + \sum_{i=2}^7 q_i \ln\left(\frac{\sqrt{(x_1-x_i)^2+(y_1+y_i)^2}}{\sqrt{(x_1-x_i)^2+(y_1-y_i)^2}}\right) \right] \quad (2.15)$$

$$V_2 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_2 \ln\left(\frac{2y_2}{r}\right) + q_1 \ln\left(\frac{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2+y_1)^2}}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}}\right) + \sum_{i=3}^7 q_i \ln\left(\frac{\sqrt{(x_2-x_i)^2+(y_2+y_i)^2}}{\sqrt{(x_2-x_i)^2+(y_2-y_i)^2}}\right) \right] \quad (2.16)$$

$$V_3 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_3 \ln\left(\frac{2y_3}{r}\right) + \sum_{i=1}^2 q_i \ln\left(\frac{\sqrt{(x_3-x_i)^2+(y_3+y_i)^2}}{\sqrt{(x_3-x_i)^2+(y_3-y_i)^2}}\right) + \sum_{j=4}^7 q_j \ln\left(\frac{\sqrt{(x_3-x_j)^2+(y_3+y_j)^2}}{\sqrt{(x_3-x_j)^2+(y_3-y_j)^2}}\right) \right] \quad (2.17)$$

$$V_4 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_4 \ln\left(\frac{2y_4}{r}\right) + \sum_{i=1}^3 q_i \ln\left(\frac{\sqrt{(x_4-x_i)^2+(y_4+y_i)^2}}{\sqrt{(x_4-x_i)^2+(y_4-y_i)^2}}\right) + \sum_{j=5}^7 q_j \ln\left(\frac{\sqrt{(x_4-x_j)^2+(y_4+y_j)^2}}{\sqrt{(x_4-x_j)^2+(y_4-y_j)^2}}\right) \right] \quad (2.18)$$

$$V_5 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_5 \ln\left(\frac{2y_5}{r}\right) + \sum_{i=1}^4 q_i \ln\left(\frac{\sqrt{(x_5-x_i)^2+(y_5+y_i)^2}}{\sqrt{(x_5-x_i)^2+(y_5-y_i)^2}}\right) + \sum_{j=6}^7 q_j \ln\left(\frac{\sqrt{(x_5-x_j)^2+(y_5+y_j)^2}}{\sqrt{(x_5-x_j)^2+(y_5-y_j)^2}}\right) \right] \quad (2.19)$$

$$V_6 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_6 \ln\left(\frac{2y_6}{r}\right) + \sum_{i=1}^5 q_i \ln\left(\frac{\sqrt{(x_6-x_i)^2+(y_6+y_i)^2}}{\sqrt{(x_6-x_i)^2+(y_6-y_i)^2}}\right) + q_7 \ln\left(\frac{\sqrt{(x_6-x_7)^2+(y_6+y_7)^2}}{\sqrt{(x_6-x_7)^2+(y_6-y_7)^2}}\right) \right] \quad (2.20)$$

$$V_7 = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_7 \ln\left(\frac{2y_7}{r}\right) + \sum_{i=1}^6 q_i \ln\left(\frac{\sqrt{(x_7-x_i)^2+(y_7+y_i)^2}}{\sqrt{(x_7-x_i)^2+(y_7-y_i)^2}}\right) \right] \quad (2.21)$$

Bu potansiyel denklemleri matrisel olarak çözümlenirse her bir iletim hattının 'q' değerleri Matlab programı yardımıyla bulunur.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} & P_{17} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} & P_{67} \\ P_{71} & P_{72} & P_{73} & P_{74} & P_{75} & P_{76} & P_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \end{bmatrix} \implies [q] = [P]^{-1} [V] \quad (2.22)$$

Bulunan 'q' değerleri aşağıdaki elektrik alan formüllerinde yerlerine konarak A noktası için elektrik alan hesabı hesaplanmış olur.

$$|E_{A_x}| = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ \sum_{i=1}^7 \left[ q_i (x - x_i) \left( \frac{1}{d_i^2} - \frac{1}{(d_i')^2} \right) \right] \right] \quad (2.23)$$

$$|E_{A_y}| = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ \sum_{i=1}^7 \left[ q_i \left( \frac{y - y_i}{d_i^2} - \frac{y_i + y}{(d_i')^2} \right) \right] \right] \quad (2.24)$$

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2.25)$$

$$d_i' = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \quad (2.26)$$

$$|E_A| = \sqrt{|E_{A_x}|^2 + |E_{A_y}|^2} \quad (2.27)$$

Böylece A noktasındaki elektrik alan değerinin genliği elde edilmiş olur. Matlab programında bu formüller kullanılarak elektrik alan değerini kolayca hesaplamak ve grafikler çizdirmek mümkündür. Programlarda, faz-faz gerilimi “V” olan 3-fazlı iletim

hattında faz-nötr gerilimleri  $V_1 = \frac{V}{\sqrt{3}}|0^\circ$ ,  $V_2 = \frac{V}{\sqrt{3}}|120^\circ$ ,  $V_3 = \frac{V}{\sqrt{3}}|240^\circ$  olarak alınmıştır.

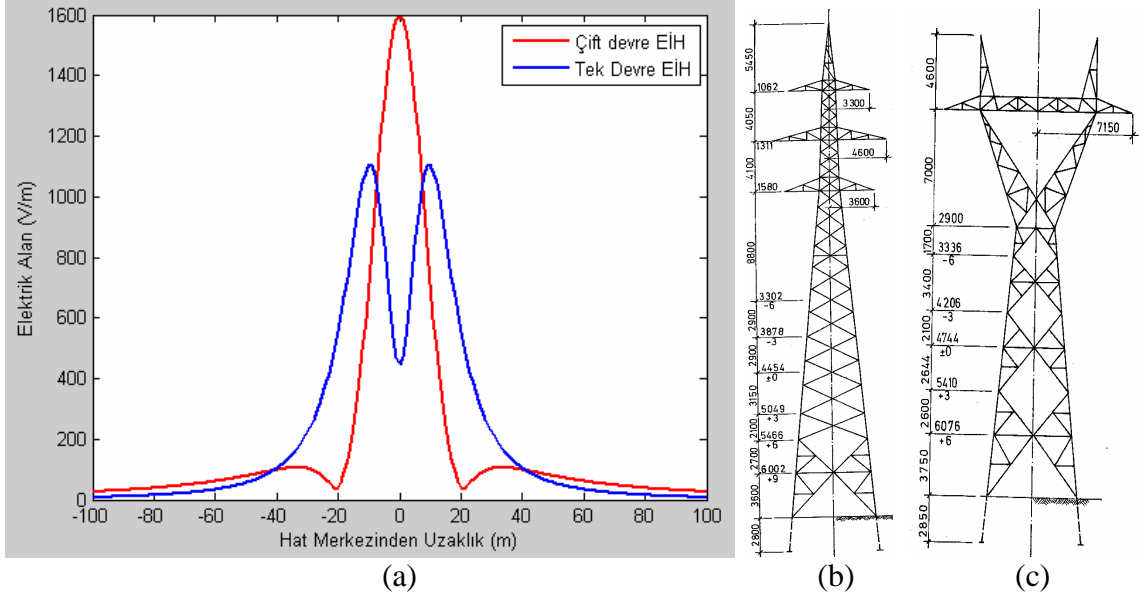
Bu nedenle hesaplanan elektrik alan değerleri etkin değerlerdir. Matlab ile yazılan program kullanılarak, 154 kV ve 380 kV’ lik iletim hatları için Türkiye Elektrik İletim A. Ş. (TEİAŞ)’ nin kullandığı direk tiplerinden uygun direk şekilleri ( dikey ve düz geometrili) [30] seçilerek, elektrik alan değerleri, yerden 1 metre yükseklikte hatta dik olarak [31] hesaplanmıştır.

## 2.2. Hat Parametrelerindeki Değişikliklerin Elektrik Alan Üzerine Etkileri

İletim hattının yakınında meydana gelen elektrik alan, hattın geometrik parametrelerinin bir fonksiyondur. Bundan dolayı alan etkisi, iletim hattı tasarımındaki yeni yaklaşımlarla azaltılabilir. Hat tasarımındaki bazı değişiklikler, iletim koridoru dışındaki alandan farklı olarak, hattın altındaki veya yanındaki alan üzerinde etkili olurlar. Alan etkisinin incelenmesinde göz önünde tutulan parametreler şunlardır: Hat konfigürasyonu, yükseklik, iletken kesitleri, faz iletkenleri arası mesafe, toprak koruma teli [2], sistem gerilimi ve faz sırası.

### 2.2.1. Hat Konfigürasyonu

Ülkemizde yaygın olarak kullanılan tek devre (düz geometrili, D2-3 tipi direk) ve çift devre (dikey geometrili, F1-3 tipi direk) enerji iletim hatlarına ait, hat konfigürasyonlarına göre elektrik alan değişimi şekil 2.3.' te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. a) Düz ve dikey geometriye sahip hatların elektrik alan değişimi  
b) F1 tipi enerji iletim hattı direği  
c) D2 tipi enerji iletim hattı direği

Gerilim (154 kV), iletken tipleri (477 MCM) ve alt konsolun yerden yükseklikleri (14,15 m.) iki konfigürasyon için de aynıdır. Topraktaki maksimum elektrik alan, dikey geometrisine sahip hat için yüksek, düz geometrili hatlar için ise daha düşüktür. İletim koridoru dışındaki elektrik alan dikey geometrili hatlar için son derece düşük, düz geometrili hatlar için ise oldukça yüksektir.

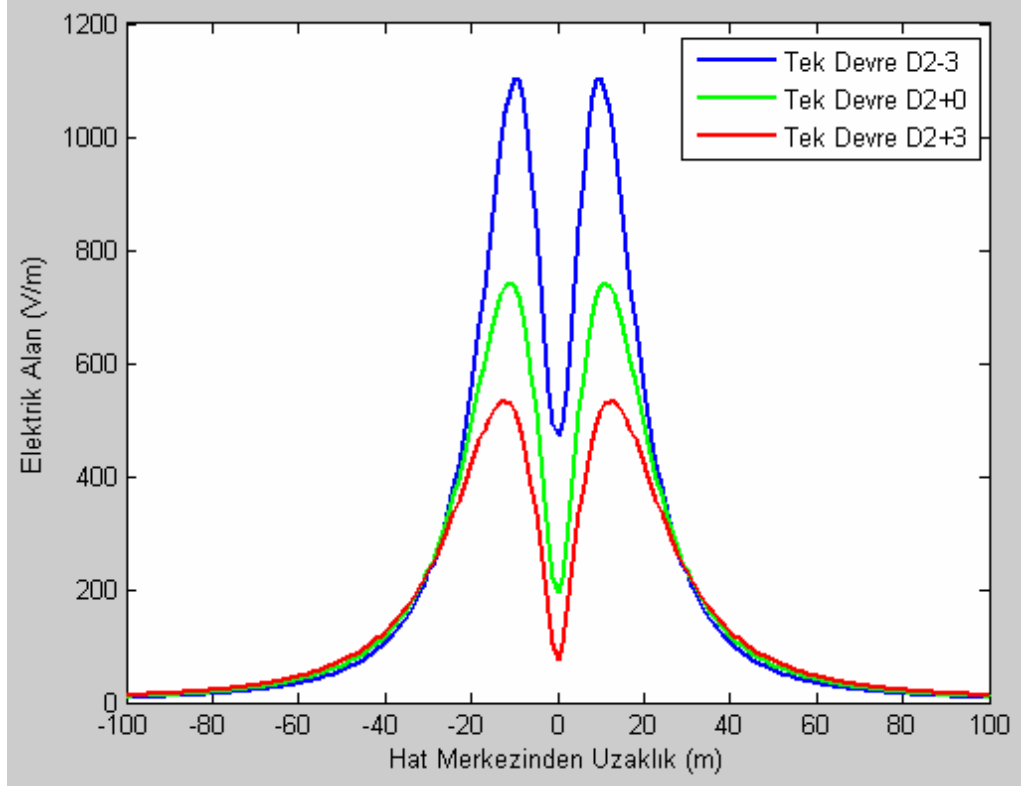
### 2.2.2. Hat Yüksekliği

Hat yüksekliğinin artırılması, topraktaki elektrik alanı azaltmak için uygulanacak etkili yöntemdir. Bununla birlikte, hat yüksekliğini artırmak, direk boylarını artırmakla ya da direk ara mesafelerini dar tutarak sehimin azaltılmasını sağlamak ile olabilir.

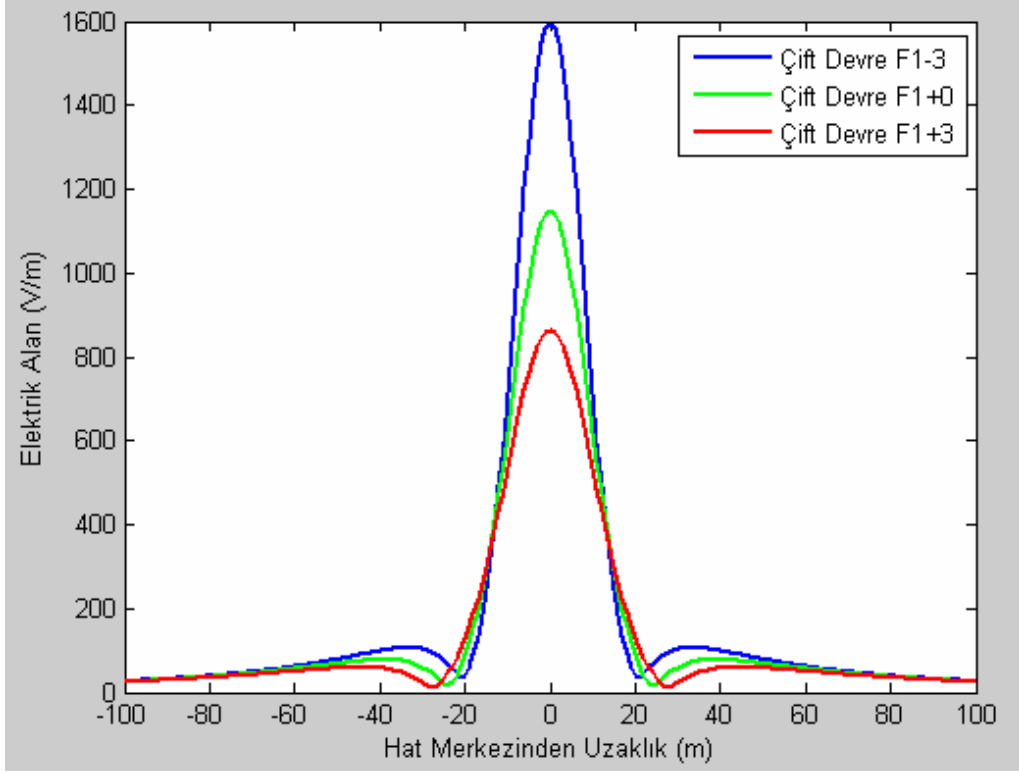
Dikey eksen değişiklikleri, hat yüksekliği ( $h$ ) ile elektrik alanın ( $E$ ) ters orantılı olduğunu ifade etmektedir. Hat yüksekliği, yatay eksen değişikliğinin ve  $S/h$  ( $S$ : Faz-faz arası mesafe,  $h$ : Hattın yerden yüksekliği) parametresinin içerisinde yer alır. Hat yüksekliği ve elektrik alan arasındaki ilişki, eşitlik (2.28) ile ifade edilebilir.

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^m \quad (2.28)$$

Burada; minimum hat yükseklikleri  $h_1$  ve  $h_2$  için,  $E_1$  ve  $E_2$  maksimum elektrik alanlarıdır.  $m$  değeri hat geometrisine bağlıdır. Düz geometrili üç fazlı iletim hatları için,  $S/h=1$  ve  $S/D=33$  ( $D$ :Yığın geometrisi yarıçapı) ise  $m \approx -1,4$  [2].



Şekil 2.4. Tek devre EİH' nin toprak seviyesindeki elektrik alan büyüklüğünün hattın yüksekliğine bağlı olarak değişmesi



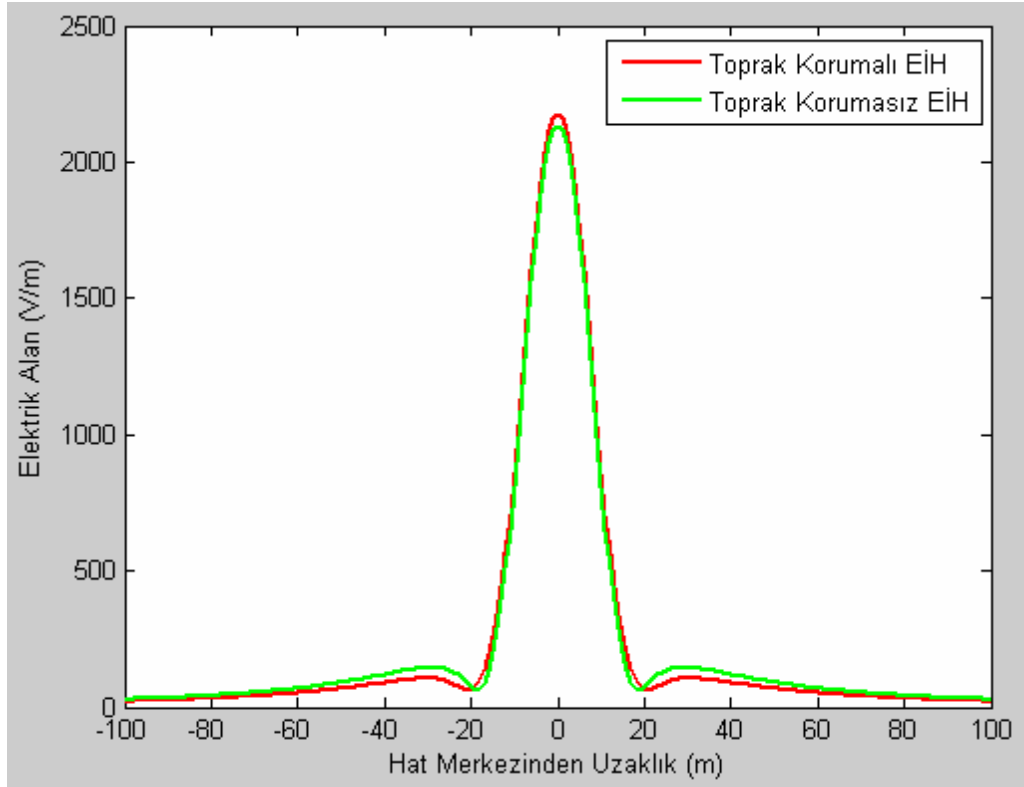
Şekil 2.5. Çift devre EİH'nin toprak seviyesindeki elektrik alan büyüklüğünün hattın yüksekliğine bağlı olarak değişmesi

Burada, şekil 2.4.'teki tek devre D2 tipi direğinin ve şekil 2.5.'teki çift devre F1-3 tipi enerji iletim direğinin boyları değiştirilerek hat yüksekliğinin elektrik alana etkisi incelenmiştir. Hesaplamalarda gerilim seviyesi 154 kV, 477 MCM (Hawk) tipi iletken alınmıştır ve toprak koruma teli etkisi ihmal edilmiştir.

Hat yüksekliğindeki bir artış, hattın merkezinden belli bir kritik mesafeye kadar, elektrik alanda bir azalmaya neden olur. Kritik mesafeden büyük mesafelerde ise tek devre hatlarda elektrik alanda bir artış, çift devre hatlarda az da olsa elektrik alanda bir azalma görülür. Böylece, hat yüksekliğinin artırılması, iletim hattı koridoru dışındaki elektrik alan söz konusu olduğunda, elektrik alanda pek büyük bir azalmaya neden olmaz. Hattın yüksekliğinin değiştirilmesine rağmen, belli bir kritik mesafede, tek devre hatlarda hat merkezinden sağlı sollu olarak yaklaşık 30 metre, çift devre hatlarda da yaklaşık 10 metre boyunca elektrik alan büyüklüğünde bir değişiklik görülmemiştir. Hesaplamalarda toprak koruma teli etkisi ihmal edilmiştir.

### 2.2.3. Toprak Koruma Telinin Etkisi

Toprak koruma teli, zeminin yüksek özgül direncinden dolayı tehlikeli gerilimlerin teşekkül etmesine mani olmak için topraklama arızasının olduğu direğin civarında meydana gelen akımların diğer direkler vasıtasıyla toprağa geçmesini sağlamak için kullanılır [32]. Bunun için koruma teli, toprak seviyesindeki elektrik alanı pek etkilemez. Şekil 2.6.' da 154 kV, 795 MCM iletkenli, çift devre TA1+0 tipi enerji iletim hattı direğinin 70 mm<sup>2</sup> toprak koruma telinin etkisi gösterilmiştir. Toprak koruma telinin mevcudiyeti, hattın iletim koridorunda elektrik alanda % 1-2 kadar bir artışa neden olmaktadır, ancak iletim koridorunun dışında yani hattan uzaklaştıkça toprak teli olmayan hattın elektrik alanı %1-2 kadar daha fazla olmaktadır. Bu azalmanın küçük olmasının sebebi, koruma telinin faz iletkenlerinin üzerinde ve toprağa daha uzak olmasından dolayıdır.



Şekil 2.6. 154 kV TA1+0 tipi EİH' nin toprak korumalı ve toprak korumasız elektrik alan grafiği

### 2.2.4. İletken Kesitleri

İletken kesitlerinin etkisi iki farklı aşamada değerlendirilebilir. İlk olarak tek bir iletkenin kesitinin artırılması ikinci olarak da aynı faza birden fazla iletken ekleyerek kesitin artırılması sağlanabilir. Türkiye’de 380 kV’ lik enerji iletim hatlarında 2’ li ve 3’ lü demet iletkenler kullanılarak kesit artırılmaktadır. Faz başına bir iletken kullanılması halindeki iletken kesiti ile demet iletkenlerin kesitlerinin toplamı eşit olacak şekilde seçilmesi halinde aynı işletme geriliminde, iletkenlerin etrafında meydana gelen elektrik alanı demet iletken durumunda daha küçük olur [32].

Demetteki her bir iletkeni ayrı ayrı hesaba katmak yerine, iletkenden uzak bölgelerde aynı etkiyi yapacak bir eşdeğer iletken yarıçapı bağıntısı ile belirlenebilir [33]. Demet iletkenlerin eşdeğer yarıçapı;

$$R_{Eşd} = A^n \sqrt{\frac{nr}{A}} \quad , \quad A = \frac{D}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}} \quad (2.29)$$

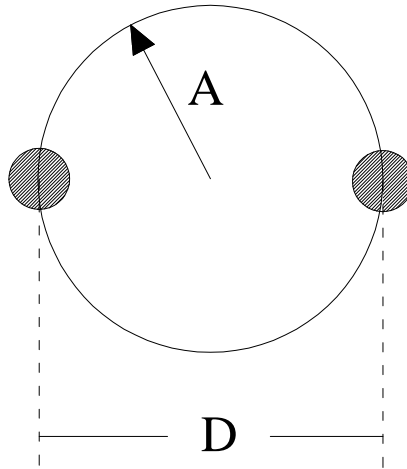
Burada;

A: Demet dairesinin yarıçapı,

D : Demetteki iletken merkezleri arası uzaklık,

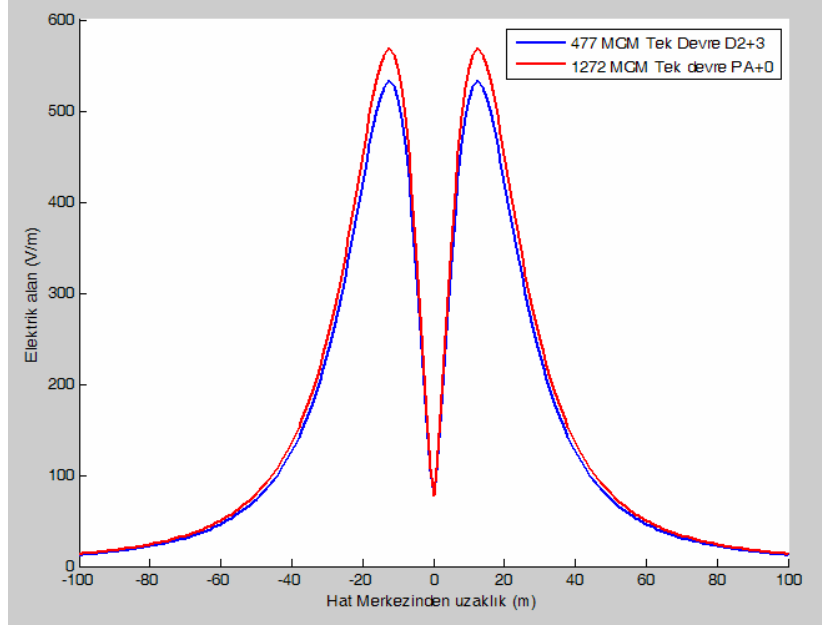
n : Demetteki iletken sayısı,

r : İletken yarıçapıdır.

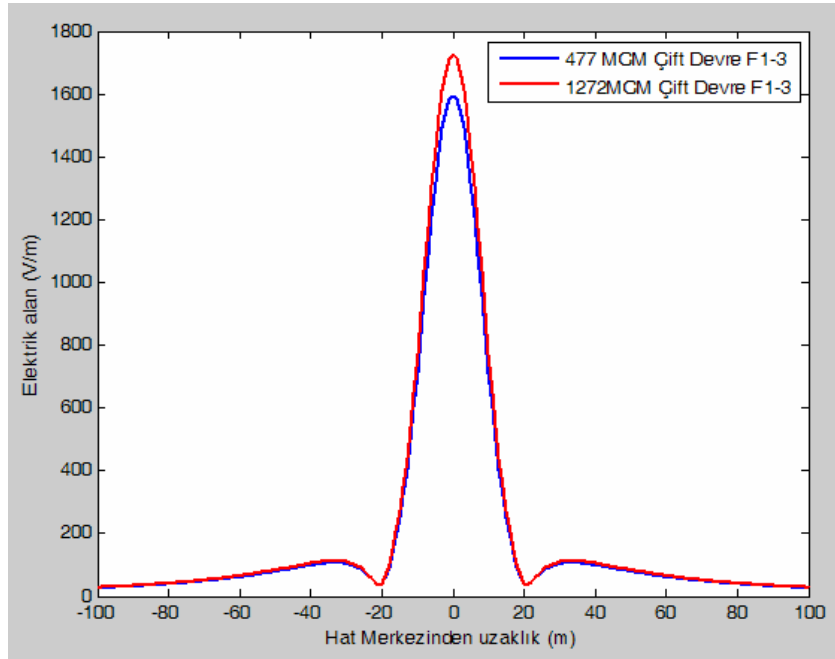


Şekil 2.7. Demet iletken gösterimi





Şekil 2.8. İletken kesitlerinin tek devre EİH'lerde elektrik alan etkisi

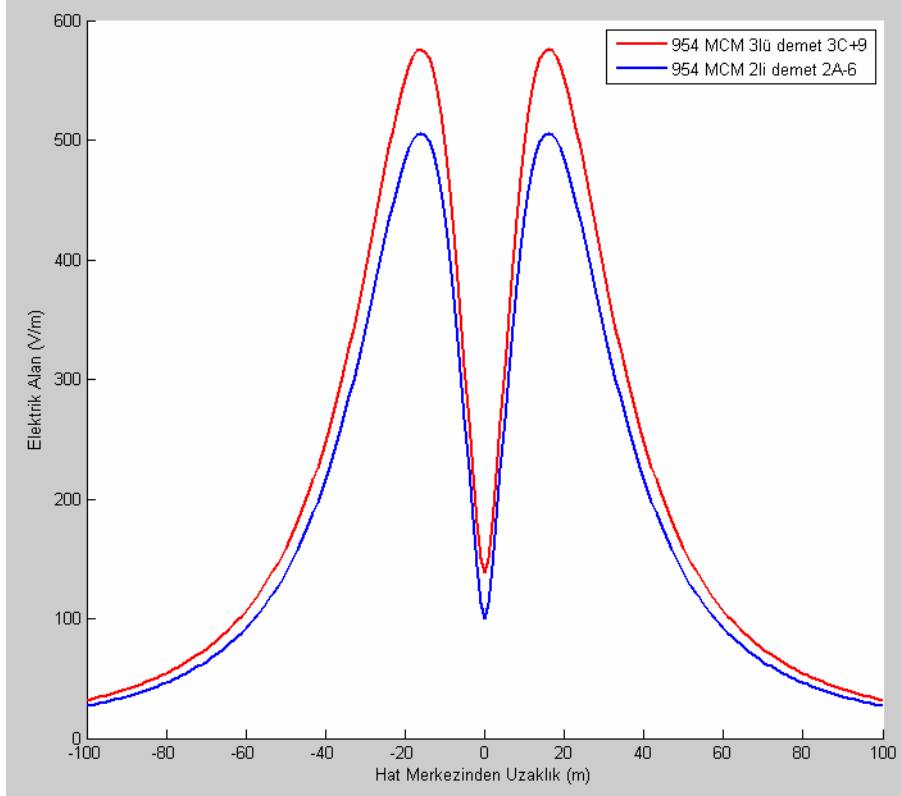


Şekil 2.9. İletken kesitlerinin çift devre EİH'lerde elektrik alan etkisi

İletken kesitinin artırılmasının elektrik alana etkisini eşit şartlarda görebilmek için tek devre EİH' nin PA+0 direk boyutlarının D2+3 tip direkle aynı olması için konsol genişliği 3 m artırılarak hesap yapılmıştır. Çift devre EİH direklerinde ise her iki iletkeninde de aynı direk tipi (F1-3) seçilmiştir. Toprak koruma teli etkisi ihmal edilmiştir. Şekil 2.8. ve 2.9.'

da görüldüğü üzere iletken kesitinin artırılması tek devre ve çift devre enerji iletim hatlarında elektrik alanı artırmaktadır.

380 kV tek devre hatlarda son zamanlarda genellikle 1272 MCM pheasant iletken tercih edilmektedir. 2' li demet iletkenle 3' lü demet iletken arasındaki elektrik alan farkı şekil 2.10.' da görülebilir. Burada, 3C+9 (3' lü demet) ve 2A-6 (2' li demet) tipi direğin alt konsol yerden yüksekliği 28 m, izolatör boyu 4 m, fazlar arası mesafe 8,5 m olarak alınmıştır. 954 MCM pheasant 3' lü demet iletkenin ve 954 MCM cardinal 2' li demet iletkenin eşdeğer yarıçapları eşitlik (2.29)' da hesaplanarak 15,60 cm ve 8,72 cm bulunmuştur. Demet iletkenleri arası mesafe 50 cm olarak alınmıştır.

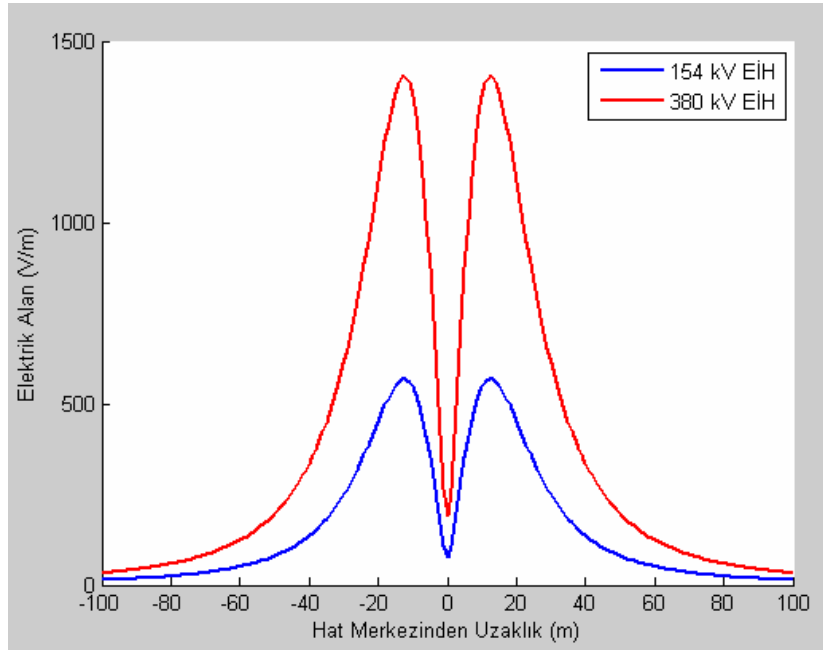


Şekil 2.10. 3' lü ve 2' li demet iletkenlerin elektrik alan etkisi

EİH' lerin çevresinde elektrik alan hesabı yapılırken kıyaslamalarda mümkün mertebe Türkiye'de kullanılan hatlar seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Sonuçların doğru okunabilmesi için gerilim seviyeleri, iletkenler arası mesafe, iletkenlerin toprağa olan uzaklıkları eşit olacak şekilde direk tipleri seçilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.10.' da ikili demet iletkenlerin 3' lü demet iletkenlere göre elektrik alan seviyesi, iletim koridoru içinde ve dışında daha düşük olmaktadır.

### 2.2.5. Sistem Gerilim Değişimi

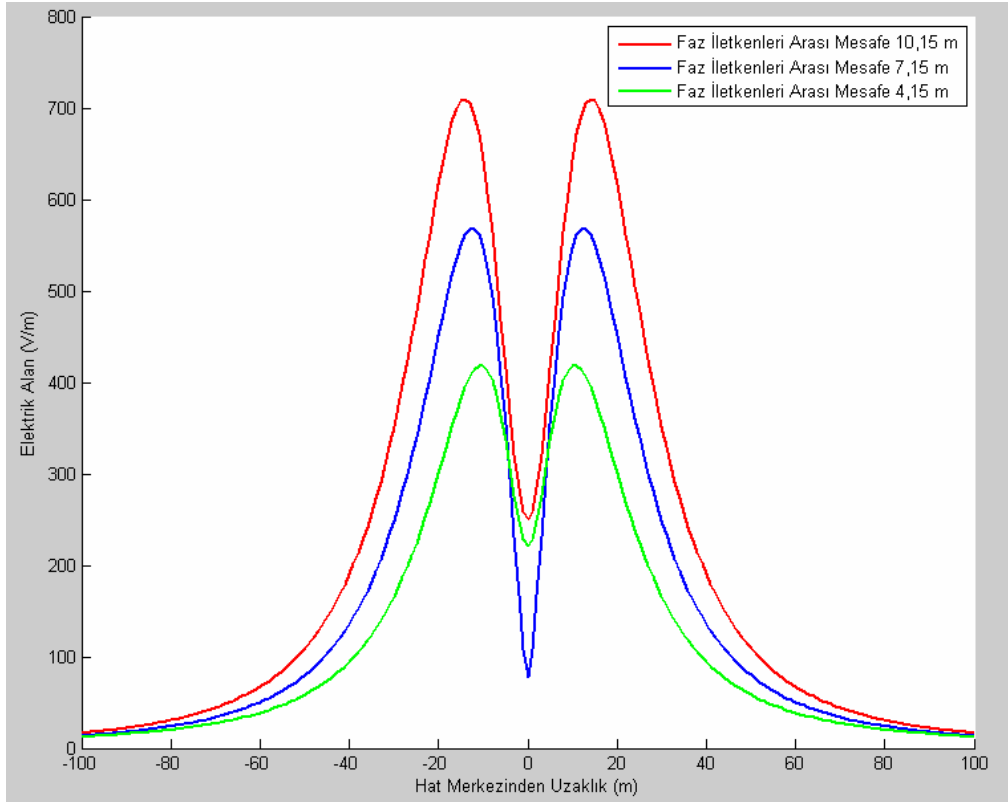
Türkiye’de yüksek gerilim standardı olarak 154 kV ve 380 kV gerilim seviyeleri belirlenmiştir. Enerji ihtiyacına göre sonraki yıllarda, bu gerilim seviyelerinin artması düşünülmektedir. Dünyanın diğer devletlerinde daha yüksek gerilim seviyelerinde enerji iletimi sağlanmaktadır. Elektrik alan, gerilimin bir fonksiyonu olduğu için doğrudan doğruya gerilim değişimlerine bağlıdır. Şekil 2.10.’ da 154 kV ve 380 kV’ lik hatların meydana getirdikleri elektrik alan grafikleri görülmektedir. Türkiye’ deki 380 kV yüksek gerilim hatlarında tek iletken kullanılmamaktadır. Enerji iletimi için 954 MCM veya 1272 MCM kesitinde ikili veya üçlü demet iletkenler kullanılmaktadır. Gerilim seviyelerindeki değişikliklerin elektrik alana etkisini doğru belirleyebilmek için hattın kesitlerinin, yerden yüksekliklerinin v.b. aynı olması gerekmektedir. Bunun için PA+0 tipi direk tipi direktteki 1272 MCM iletkenli hatlara 154 kV ve 380 kV gerilim seviyeleri tatbik edilerek yerden 1 m yükseklikte hatta dik doğrultuda elektrik alan hesabı yapılmıştır. İletken yerden yüksekliği 18,10 m, fazlar arası mesafe 7,15 m alınarak hesaplama yapılmıştır. Toprak koruma teli etkisi ihmal edilmiştir. Şekil 2.11.’ de görüldüğü üzere 380 kV’ lik hatlarda 154 kV’ lik hatlara göre iletim hattının her bölgesinde elektrik alan seviyeleri daha yüksektir.



Şekil 2.11. 154 kV ve 380 kV’ lik hatların meydana getirdikleri elektrik alan

### 2.2.6. Faz İletkenleri Aralığı

Şekil 2.12' de 154 kV, 1272 MCM iletkenli tek devre enerji iletim hattının, faz iletkenleri arasındaki mesafe değişikliklerindeki elektrik alan etkisi görülmektedir. Toprak koruma teli etkisi ihmal edilmiştir. Tek devre PA+0 direğinin faz iletkenleri arası mesafesi  $\pm 7,15$  metredir. Faz iletkenleri arası mesafe arttıkça açık bir şekilde elektrik alan artmaktadır.

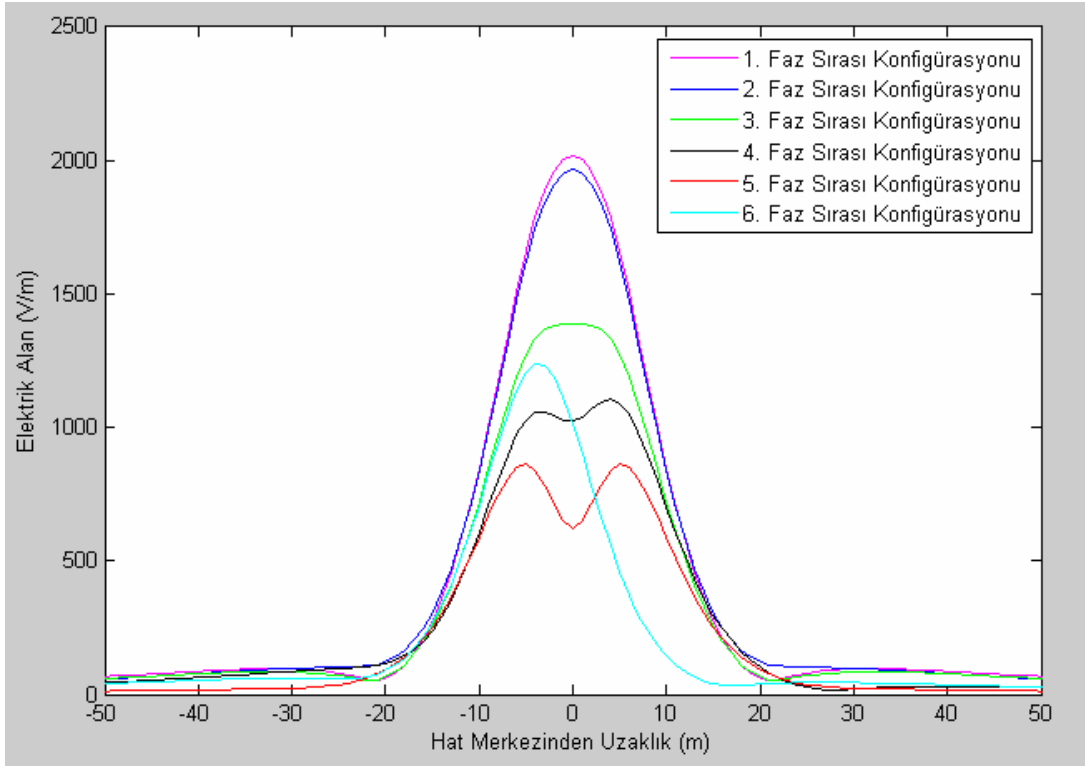


Şekil 2.12. Faz iletkenleri aralığının toprak seviyesindeki elektrik alan etkisi

Faz iletkenleri arası mesafeleri sıklaştırmak elektrik alanı daha da azaltır. Bundan dolayı çok yüksek gerilimli enerji iletim hatlarının sıkıştırılması, elektrik alanının azaltılması için çok önemlidir. Çok yüksek gerilim hatlarının sıkıştırılması, faz iletkenleri arasında metalik parçalar olmayan direkler gerektirir ve bu hattın korona performansının kötüleşmesine neden olur. Bu nedenle, topraktaki alanın azaltılmasına neden olan faz aralığındaki daralmayla birlikte, ses ve radyo gürültüsünden kaçınmak için, daha fazla sayıda veya daha geniş iletkenlere ihtiyaç duyulur [2].



Şekil 2.14.' te yapılan çalışmada görüldüğü üzere çift devre EİH' lerde faz sırasının değişikliği ciddi anlamda elektrik alan değerlerini değiştirmektedir. 1. Faz sırası konfigürasyonunda maksimum 2 kV/m olan elektrik alan, 5. faz sırası konfigürasyonda maksimum  $\approx 0,8$  kV/m olmaktadır. Elektrik alanı azaltmak için maliyet gerektirmeyen yöntemlerdendir. Çünkü sadece dikey geometrili hatlarda elektrik alan azalması iletkenlerdeki gerilim seviyelerinin faz sıraları değiştirilerek elde edilir. Düz geometrili hatlarda faz sırasının değiştirilmesi elektrik alanda herhangi bir değişiklik meydana getirmemektedir.



Şekil 2.14. 154 kV Çift devre enerji iletim hattında faz sırası konfigürasyonuna göre elektrik alan profili

### 2.3. Manyetik Alan Hesabı

#### 2.3.1. İletim Hatları İçin Manyetik Alan

İletim hatlarının manyetik alanı, hattın toprak yüzeyine paralel olduğu varsayılarak, iki boyutlu analiz kullanılarak hesaplanır. Kullanılan koordinat sistemi şekil 2.15.' te

tanımlanmıştır. Bu koordinat sisteminde z eksenine paraleldir. Manyetik alan şiddeti,  $H_{j,i}$  ve  $I_i$  akımına sahip bir iletkenin,  $r_{i,j}$  mesafesindeki bir  $(x_i, y_i)$  noktasında hesaplanır ve genliği şu şekilde bulunur:

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \quad (2.30)$$

Bu ifadenin vektörel gösterimi:

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{\vec{I}_i \times \vec{r}_{i,j}}{2\pi r_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j} \quad (2.31)$$

şeklindedir. Eşitlik (2.31)' de;  $\vec{\phi}_{i,j}$ , vektörel akımın ürettiği alan yönündeki birim vektördür.

Birim vektör şu eşitlikle bulunur:

$$\vec{\phi}_{i,j} = -\frac{y_i - y_j}{r_{i,j}} \vec{u}_x + \frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} \vec{u}_y \quad (2.32)$$

Burada  $\vec{u}_x$  ve  $\vec{u}_y$  sırasıyla yatay ve dikey doğrultudaki birim vektörlerdir. Birden fazla sayıdaki iletkenlerin herhangi bir noktada meydana getirdikleri toplam manyetik alan şiddeti:

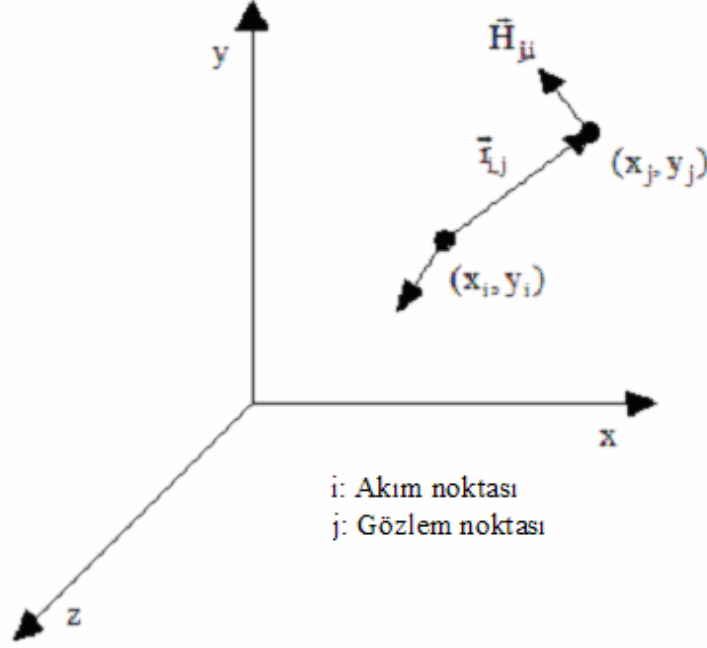
$$\vec{H}_j = \sum_i \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j} \quad (2.33)$$

bağıntısıyla elde edilir.

Manyetik akı yoğunluğu:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.34)$$

şeklindedir. Burada, hem hava ve hem de toprak için  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m' dir.



Şekil 2.15. Manyetik alan hesabı için koordinat sistemi

Pratikte, üç fazlı dengeli yüklenmiş bir iletim hattının yakınındaki alan, toprak koruma teli ve toprak akımları ihmal edilip, iletkenden geçen akım göz önüne alınarak hesaplanabilir. Özellikle hatta büyük mesafelerde toprağa dönen akımların bulunması manyetik alanı etkiler. Dönen bu akımlar, üç fazlı sistemi dengelemek için toprakta dağıtılır ve böylece bu akımların toplamı sıfır yapılıır. Her bir iletken ve topraktaki görüntüsü tarafından oluşturulan manyetik alan, aşağıdaki gibi ifade edilir[2]:

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j} - \frac{I_i}{2\pi r'_{i,j}} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{2}{\gamma'_{i,j}} \right)^4 \right] \vec{\phi}'_{i,j} \quad (2.35)$$

Eşitlik (2.35)' teki birinci terim, eşitlik (2.31)' in aynısıdır ve bu ifade hattın 100 m uzağına kadar olan noktalardaki manyetik alan hesabı için yeterlidir. (2.35) eşitliğinin ikinci terimi, toprak dönüş akımının hesaplanmasında kullanılan düzeltme faktörünü ifade eder.



$$\gamma = [j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)]^{1/2} \quad (2.36)$$

Burada;  $\sigma$  toprağın iletkenliği ( $\sigma \approx 0,001$  ile  $0,02$  S/m arasındadır),  $\epsilon$  ise, toprağın elektriksel geçirgenliğidir ( $\epsilon \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m aynı elektriksel geçirgenlik hava için de kullanılabilir). Eşitlik (2.37),  $r'_{i,j}$  değerini verir.

$$r'_{i,j} = \left[ (x_i - x_j)^2 + \left( y_i + y_j + \frac{2}{\gamma} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.37)$$

$\vec{\Phi}'_{i,j}$  ifadesi şu şekilde hesaplanır:

$$\vec{\Phi}'_{i,j} = - \left[ \frac{y_i + y_j + (2/\gamma)}{r'_{i,j}} \right] \vec{u}_x + \frac{x_i - x_j}{r'_{i,j}} \vec{u}_y \quad (2.38)$$

(2.35) eşitliğinin sonucu bir karmaşık değerdir ve H manyetik alanı (toprak direnci hesaba katılırsa), iletkenin geçen akımla aynı fazda değildir. Eşitlik (2.35) kullanılarak, (x,y) noktasındaki toplam manyetik alan, tüm iletkenlerin (i=1..n) akımlarının manyetik alan katkılarının toplanması ile elde edilir. (2.35) eşitliği sonucunda manyetik alan, x ve y eksenleri boyunca karmaşık vektörler olarak şu şekilde ifade edilebilirler:

$$H_x = H_{x,r} + jH_{x,i} \quad (2.39)$$

$$H_y = H_{y,r} + jH_{y,i} \quad (2.40)$$

Reel veya imajiner vektörler kullanılarak da ifade edilebilir. Şöyle ki:

$$\vec{H}_r = \vec{H}_{x,r} \vec{u}_x + \vec{H}_{y,r} \vec{u}_y \quad (2.41)$$

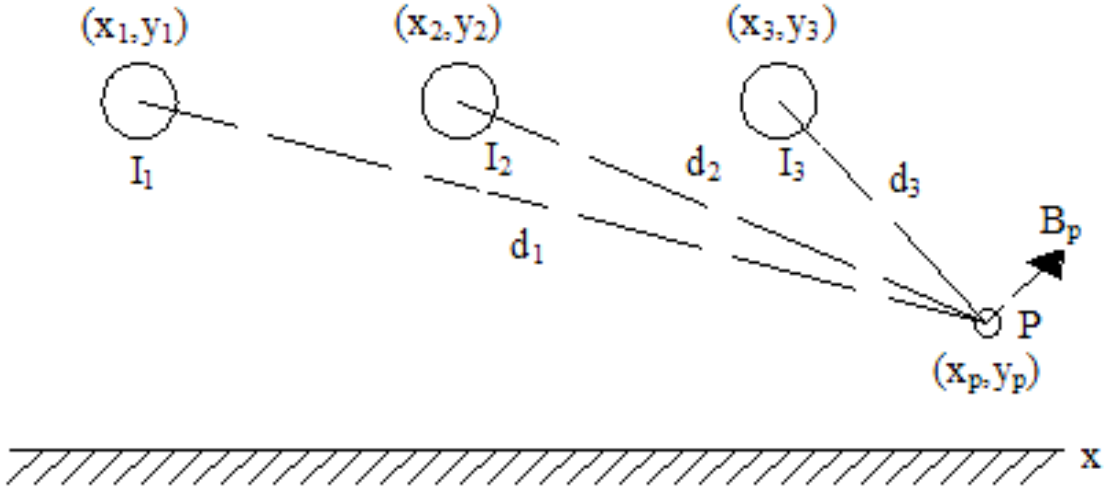
$$\vec{H}_i = \vec{H}_{x,i} \vec{u}_x + \vec{H}_{y,i} \vec{u}_y \quad (2.42)$$

Manyetik alan eksenlerinin doğrultusu ve genliği elektrik alan hesabına benzer şekilde tanımlanır [2].

### 2.3.2. Tek Devre Enerji İletim Hattı Manyetik Alan Hesabı

Enerji iletim hatlarının manyetik alan hesabı bazı güçlükler içerir. Çevrenin düzgün olmayan ve tanımlanamayan geometrisi, hat sarkma ve kıvrılmaları bu nedenlerin başlıcalarıdır. Ayrıca gün içerisinde yüke bağlı olarak çekilen akımın sürekli olarak değişmesi de doğrudan manyetik alanı etkilemektedir. Toprak altında ve üstündeki enerji iletim hattına yakın akım taşıyan iletkenler ve toprak dönüş akımları da hesaba katılarak manyetik alan hesabı yapmak daha da güçleşmektedir. Hattın 100 m uzağına kadar olan noktadaki manyetik alan hesabı için bu güçlükler yok sayılabilir [34]. Şekil 2.16.' da sonsuz uzunlukta iletken toprak düzlemi üzerinde, I akımını taşıyan sonsuz uzunlukta ve düzgün bir hat ile onun herhangi bir "P" noktasında oluşturduğu manyetik alan gösterilmektedir. Genellikle enerji iletim hatlarında manyetik alanı tanımlarken manyetik alan şiddeti (H) yerine manyetik alan yoğunluğu (B) kullanılmaktadır.

Örnek olarak tek devre bir enerji iletim hattının herhangi bir "P" noktasında oluşturduğu manyetik alan yoğunluğunu hesaplayalım.



Şekil 2.16. Sonsuz uzunlukta iletken toprak düzlemi üzerinde, 3 iletkenli bir hat ve "P" noktasında oluşturduğu manyetik alan

"P" noktasındaki manyetik alan yoğunluğu hesabı Bio-Sawart yasasıyla bulunur [35,36] ve süperpozisyon yöntemi kullanılır. Yani, her bir iletkenin "P" noktasında oluşturacakları manyetik alanların vektörel toplamı, o noktadaki manyetik alanı verir. Bir iletken için manyetik alan hesabı:

$$|B| = \mu_0 |H| = \mu_0 \frac{I}{2\pi d_1} = \frac{2I \cdot 10^{-7}}{d_1} (\text{Tesla}) = \frac{2I \cdot 10^{-3}}{d_1} (\text{Gauss}) \quad (2.43)$$

Bu eşitlikte;

$$d_1 = \sqrt{(x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2} \quad (2.44)$$

x, y doğrultusundaki manyetik alan bileşenleri:

$$B_x = |B| \frac{y_1 - y_p}{d_1}, \quad B_y = |B| \frac{x_p - x_1}{d_1} \quad (2.45)$$

3 tane iletkenin “P” noktasında oluşturacakları manyetik alan bileşenleri:

$$B_{p_x} = \sum_{i=1}^3 \frac{\bar{I}_i (y_i - y_p)}{d_i^2} 2 \cdot 10^{-3} \quad (2.46)$$

$$B_{p_y} = \sum_{i=1}^3 \frac{\bar{I}_i (x_p - x_i)}{d_i^2} 2 \cdot 10^{-3} \quad (2.47)$$

olacaktır. (2.46) ve (2.47) no' lu eşitliklerde,

$$d_i = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \quad (2.48)$$

Enerji iletim hattının faz akımları fazöredir,

$$\bar{I}_i = I_q + jI_s \quad (2.49)$$

Yukarıdaki hesaplama yöntemi bazı kabul ve yaklaşımlarla basitleştirilmiştir. Bu yaklaşım ve varsayımlar şunlardır:

1. Enerji iletim hattının altında ve yakınındaki tüm yapılar yok sayılmıştır.

2. Geçit içerisinde, iletim hattına paralel olmayan çit telleri, su boruları ve diğer iletkenler yok sayılmıştır.
3. Hat iletkenleri toprak birbirine ve toprak yüzeyine paralel kabul edilmiştir.
4. Geçit içerisinde arazi düz kabul edilmiştir.
5. Toprak etkisi ihmal edilmiştir.
6. Çaprazlamalar ve hat boyunca akım değişimleri yok sayılmıştır.
7. Uç etkileri yok sayılmıştır.
8. 3. Boyutta alan değişimi olmadığı varsayılmıştır.
9. Ekranlama etkisi yok sayılmıştır.
10. Harmonik etkiler yok sayılmıştır.

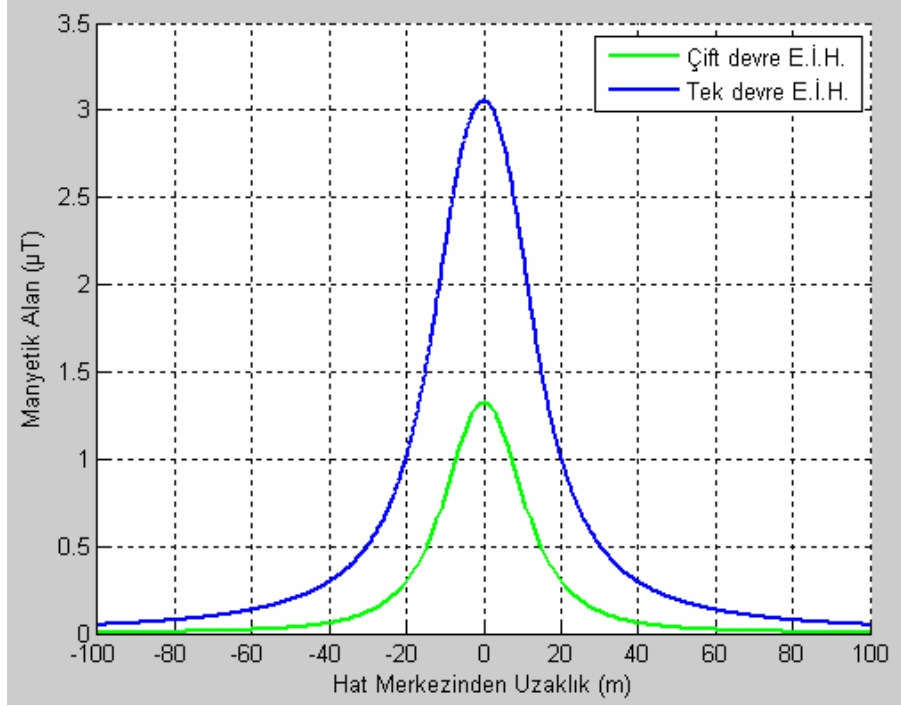
#### **2.4. Hat Parametrelerindeki Değişikliklerin Manyetik Alan Üzerine Etkileri**

İletim hattının yakınında meydana gelen manyetik alan, hattın geometrik parametrelerinin bir fonksiyondur. Bundan dolayı alan etkisi, iletim hattı tasarımındaki yeni yaklaşımlarla azaltılabilir. Hat tasarımındaki bazı değişiklikler, iletim hattı koridoru dışındaki alandan farklı olarak, hattın altında veya yanındaki alan üzerinde etkili olurlar. Alan etkisinin incelenmesinde göz önünde tutulan parametreler şunlardır: Hat konfigürasyonu, yükseklik, faz iletkenleri arası mesafe [2], faz sırası.

##### **2.4.1. Hat Konfigürasyonu**

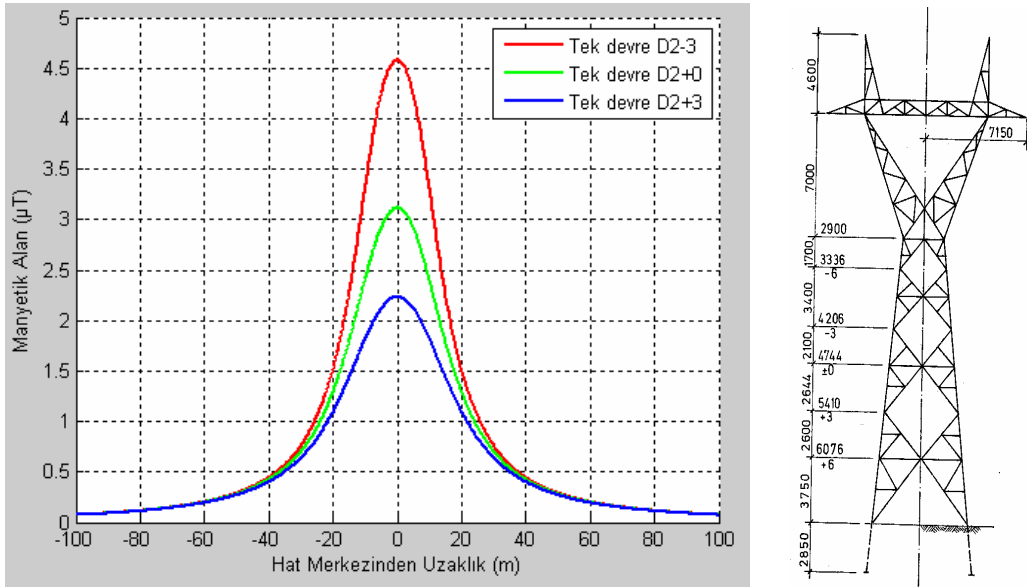
Ülkemizde yaygın olarak kullanılan tek devre (D2-3 tipi direk) ve çift devre (F1-3 tipi direk) enerji iletim hatlarına ait, hat konfigürasyonlarına göre manyetik alan değişimi şekil 2.17.' de gösterilmiştir.

Akım (200 A), iletken tipleri (477 MCM) ve alt konsolun yerden yükseklikleri (14,15 m) iki konfigürasyon için de aynıdır. Topraktaki maksimum manyetik alan, dikey geometrisine sahip hat için düşük, düz geometrili hatlar için ise daha yüksektir. İletim koridoru dışındaki manyetik alan dikey ve düz geometrili hatlar için son derece düşüktür.



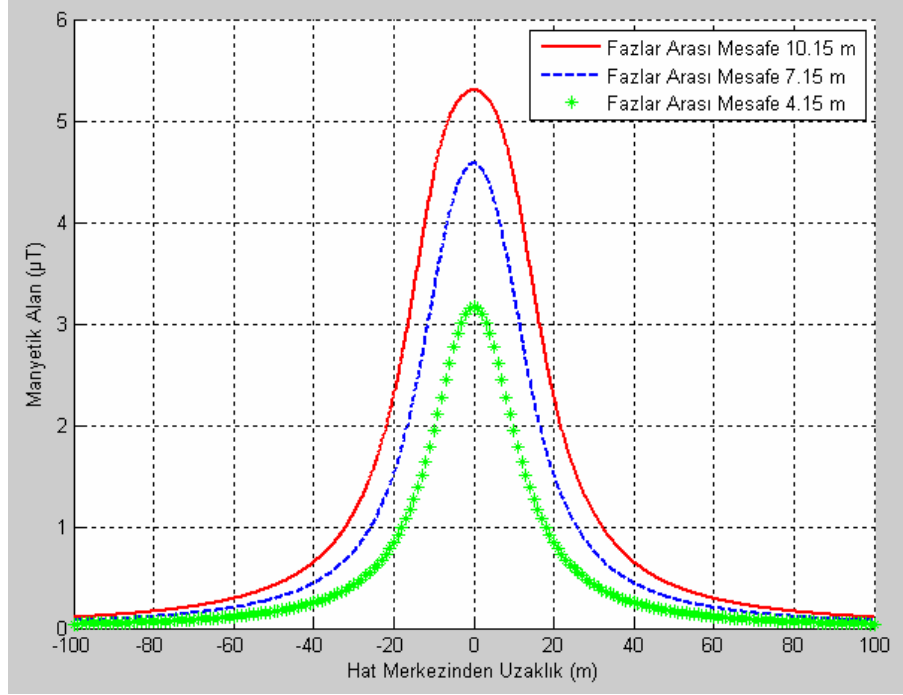
Şekil 2.17. Düz ve dikey geometriye sahip hatların manyetik alan değişimi

#### 2.4.2. Hat Yüksekliği



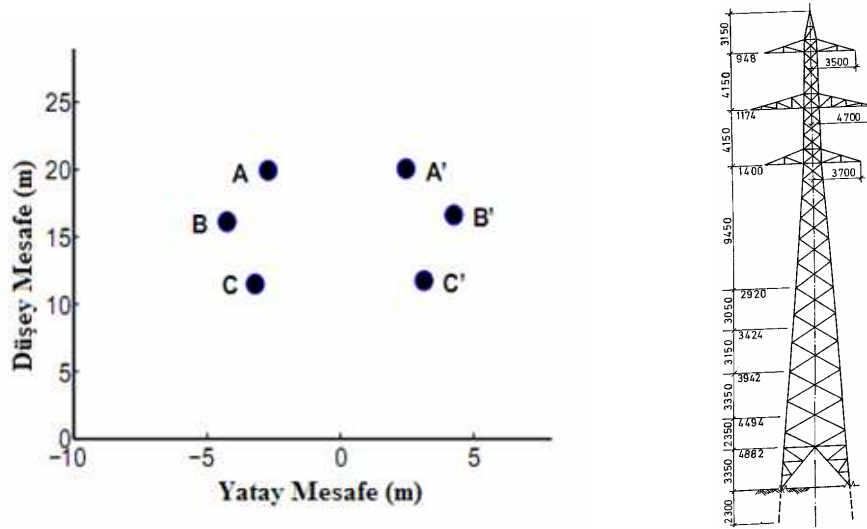
Şekil 2.18. Tek devre EİH' nin toprak seviyesindeki manyetik alan büyüklüğünün hattın yüksekliğine bağlı olarak değişmesi





Şekil 2.20. Faz iletkenleri aralığının manyetik alan üzerinde etkisi

#### 2.4.4. Faz Sırası



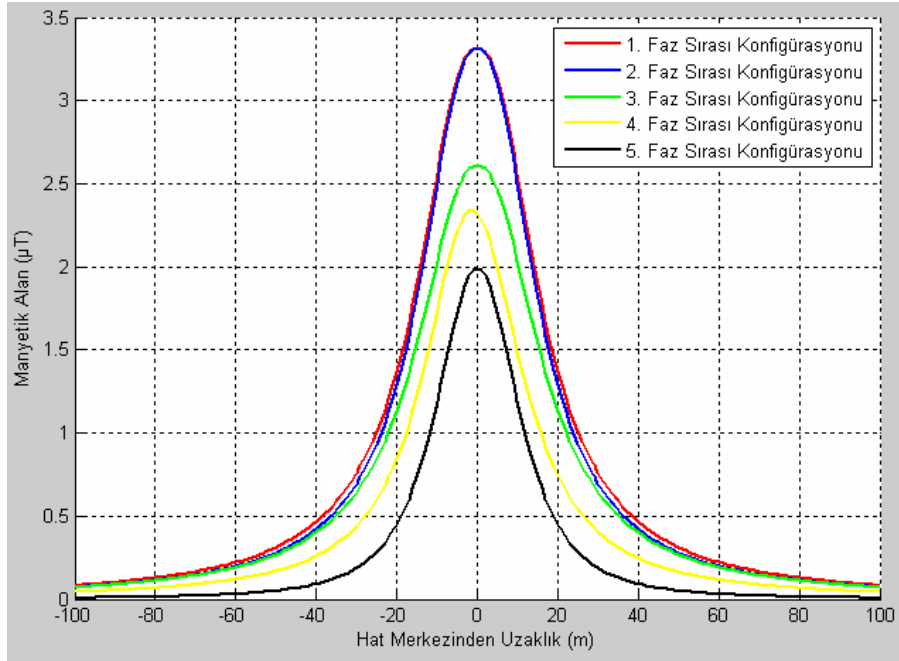
Şekil 2.21. Toprak korumasız çift devre EİH' nin düşey konfigürasyonu

Şekil 2.21.' deki TA1-6 tipindeki çift devre enerji iletim hattının faz sıraları, tablo 2.2.' deki şekilde değiştirilerek, faz sırasının manyetik alana etkisi incelenmiştir. Şekil 2.22.' de görüldüğü üzere hat merkezinden başlayarak üstel olarak bir azalma söz konusudur. Hattın merkezinde 1. faz sırası konfigürasyonunda hesaplanan manyetik alan

değeri, 5. faz sırası konfigürasyonda hesaplanan manyetik alan değerinin, yaklaşık 1,65 katı olmaktadır. Hatlarda faz sıralarını belirlerken manyetik alanın en aza indirilmesi için 5. faz sırası konfigürasyona göre faz sırası seçilmelidir.

Tablo 2.2. Toprak korumasız çift devre enerji iletim hatlarında faz sırası konfigürasyonları

Sıra No	1	2	3	4	5
Faz Sırası Konfigürasyonu	A A' B B' C C'	A B' B A' C C'	A A' B C' C B'	A B' B C' C A'	A C' B B' C A'



Şekil 2.22. 154 kV Çift devre enerji iletim hattında faz sırası konfigürasyonuna göre manyetik alan grafiği

Şekil 2.22.' de görüldüğü üzere çift devre EİH' lerde faz sırasının değişikliği ciddi anlamda manyetik alan değerlerini değiştirmektedir. 1. Faz sırası konfigürasyonunda maksimum 3,3 µT manyetik alan 5. faz sırası konfigürasyonda maksimum  $\approx 2$  µT olmaktadır.



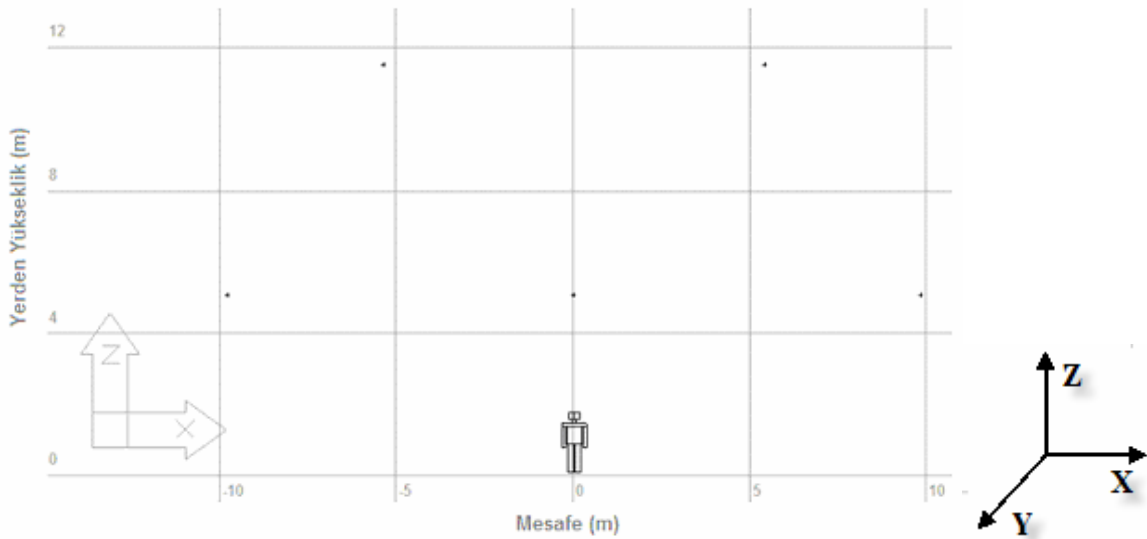
## 2.5. Enerji İletim Hatlarında Meydana Gelen Elektrik ve Manyetik Alanlar

Uluslararası standartlarda ifade edilen elektrik alan referans seviyeleri, olması gereken maksimum elektrik ve manyetik alan değerlerini vermektedirler. Onun için Türkiye’de bulunan yüksek gerilim EİH’ lerde maksimum gerilim ve iletkenlerden akacak olan maksimum akım değerleri alınarak elektrik ve manyetik alan değerleri, NARDA EFC-400 LF programı vasıtasıyla hesaplanmıştır. NARDA EFC 400-LF, enerji iletim hatları ve trafo merkezleri tarafından meydana getirilen elektrik ve manyetik alanları hesaplamak için geliştirilen ve Microsoft Windows işletim sistemi altında çalışan bir simülasyon programıdır.

154 kV ve 380 kV Enerji iletim hattının altında yapılan hesaplamalardan görüldüğü üzere maksimum gerilim, iletkenlerin minimum yere uzaklığı, maksimum iletken kesiti, alınarak yapılan hesaplamalarda bulunan değerler, ICNIRP’ ın çalışanlar için belirlediği referans seviyelerinin altında kalmaktadır. Uygulamada, iletken yüksekliklerinin yerden yükseklikleri, yönetmelikte olan değer her zaman çok daha üzerinde olduğu için, genel halk için olan referans seviyeler gerçek değerlerin altında kalmaktadır.

### 2.5.1. 154 kV EİH’ lerde Meydana Gelen Elektrik ve Manyetik Alanlar

154 kV Enerji iletim hatlarında meydana gelen elektrik ve manyetik alanı hesaplamak için yapılan hesaplama modeli Şekil 2.23.’ de gösterilmektedir.

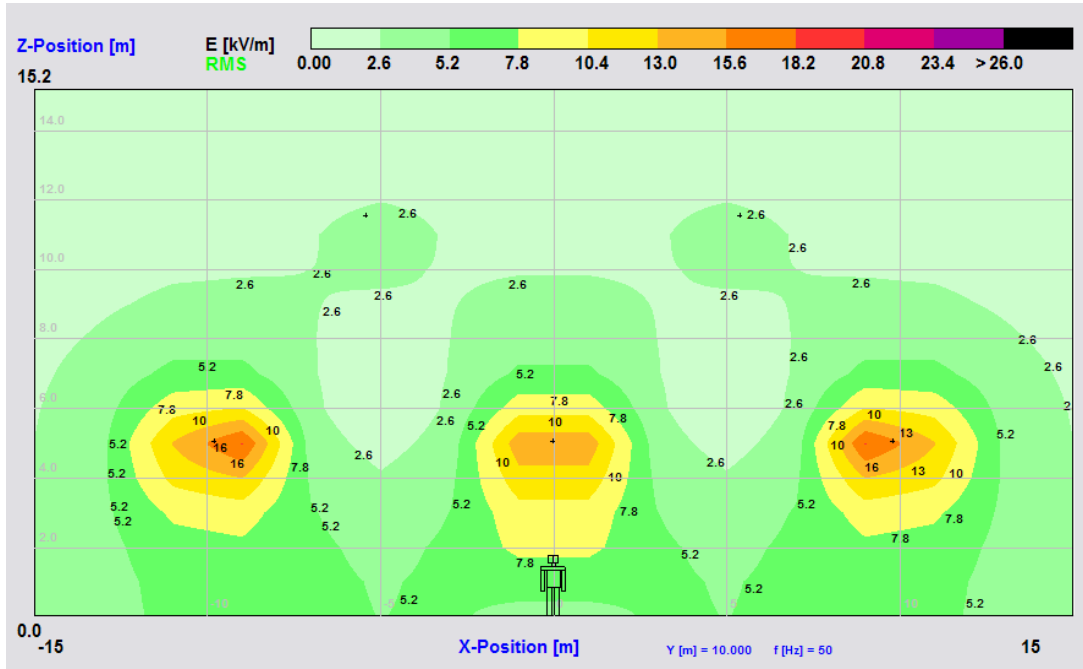


Şekil 2.23. 154 kV Enerji iletim hattı ve hat altındaki insan modeli

### 2.5.1.1. 154 kV EİH' lerde Meydana Gelen Elektrik Alan

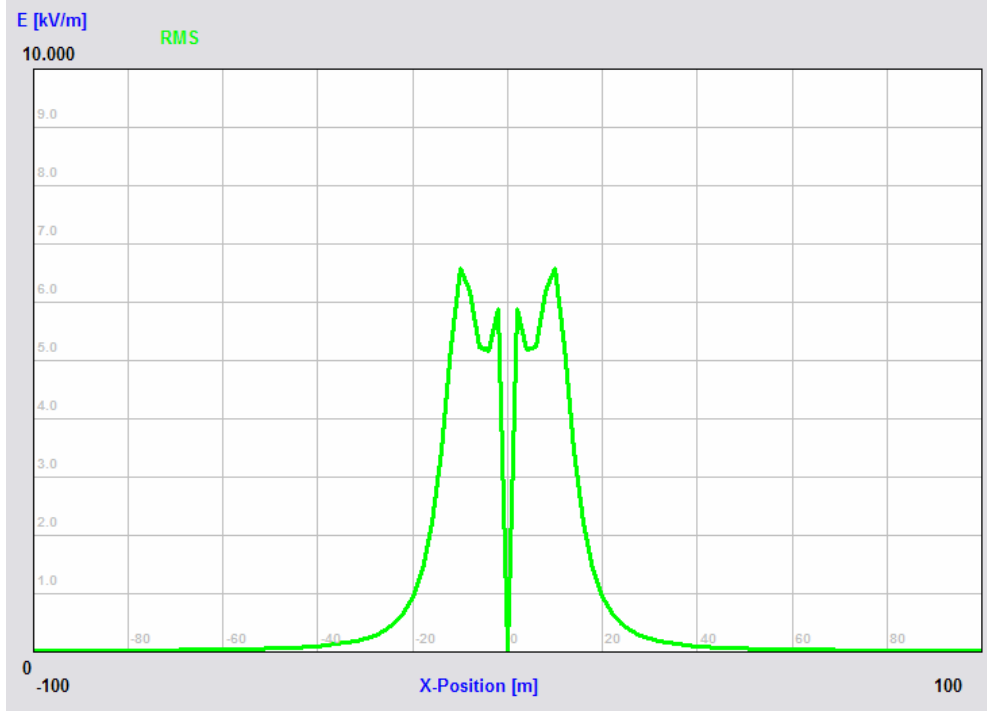
154 kV Enerji iletim hattının altındaki elektrik ve manyetik alanın hesabı yapılırken maksimum gerilim olarak 170 kV seçilmiştir. Türkiye'deki 154 kV' lik EİH' lerde maksimum iletken kesiti olarak 1272 MCM pheasant iletken kullanılmaktadır. İletkenlerin yerden yüksekliği kuvvetli akım tesisleri yönetmeliğindeki, üzerine herkes tarafından çıkılabilen düz damlı yapıların hatta en küçük düşey uzaklığı 5 metre, olarak veriler alınmıştır [21]. 154 kV Tek devre EİH' lerde faz arası maksimum iletken mesafesi hesaplamalar için 9,8 m alınmıştır.

Şekil 2.24.' te xz düzleminde hesaplanan elektrik alan değerleri görülmektedir. İnsanın baş çevresinde 7,2 kV/m diğer taraflarında 5,2 kV/m değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.24. 154 kV EİH' nin xz düzleminde hesaplanan elektrik alan değerleri

Yerden 1 m yükseklikte yapılan hesaplamalarda elektrik alan, insanın olduğu yerde sıfıra düşüp, hatta dik mesafede alan değeri maksimum 6,5 kV/m' ye yükselip daha sonra şekil 2.25.' te görüldüğü üzere hızlı bir şekilde düşüşe geçmektedir.

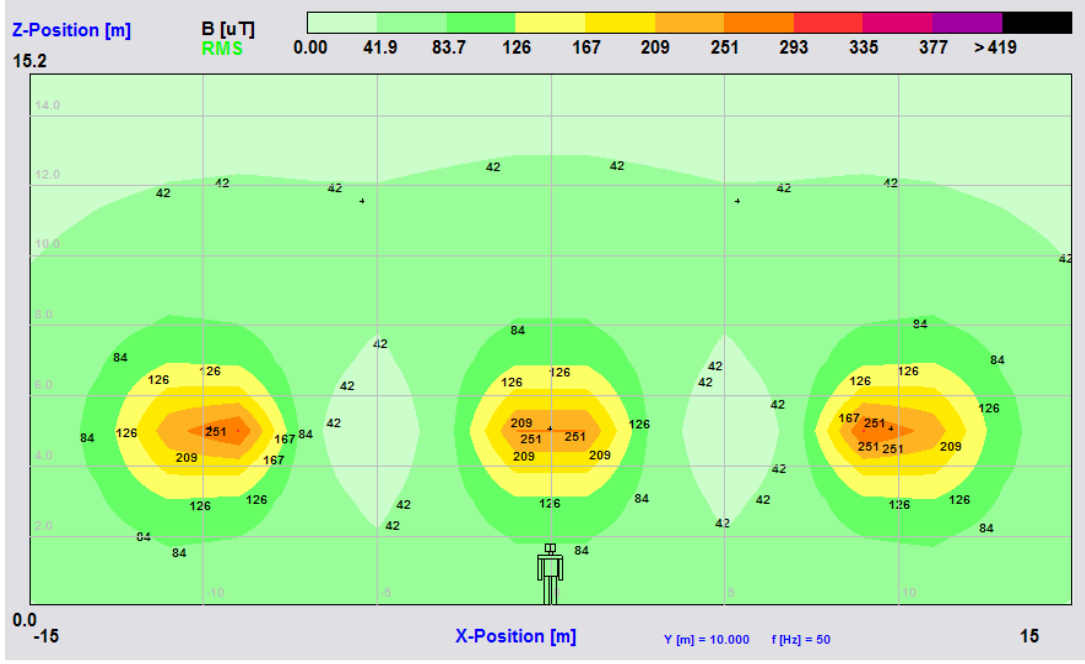


Şekil 2.25. 154 kV EİH' nin xy düzleminde hesaplanan elektrik alan değerleri

### 2.5.1.2. 154 kV EİH' lerde Meydana Gelen Manyetik Alan

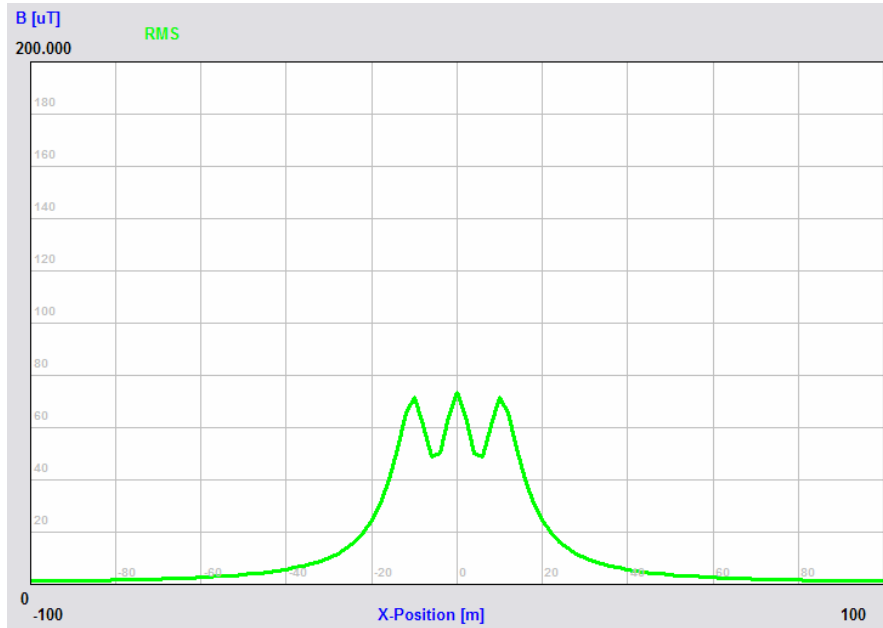
154 kV Enerji iletim hattının altındaki manyetik alanın hesabı yapılırken maksimum 1272 MCM pheasant iletkenin maksimum akım taşıma kapasitesi 1300 A seçilmiştir. Türkiye' deki 154 kV' lik EİH' lerde maksimum iletken kesiti olan 1272 MCM pheasant iletken ve iletkenin yerden yüksekliği kuvvetli akım tesisleri yönetmeliğindeki, üzerine herkes tarafından çıkılabilen düz damlı yapıların hatta en küçük düşey uzaklığı 5 metre, olarak veriler alınmıştır [21].

Şekil 2.26.' da xz düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri görülmektedir. İnsanın baş çevresinde 126  $\mu$ T diğer taraflarında 84  $\mu$ T değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.26. 154 kV EİH' nin xz düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri

Yerden 1 m yükseklikte yapılan manyetik alan hesaplamalarında, hattın altında insanın olduğu yerde manyetik alanın engellenmesi söz konusu değildir. xy düzleminde hatta dik mesafede manyetik alan değeri şekil 2.27.' de görüldüğü üzere hattın ortasında maksimum  $73 \mu T$ ' ye yükselmiştir.

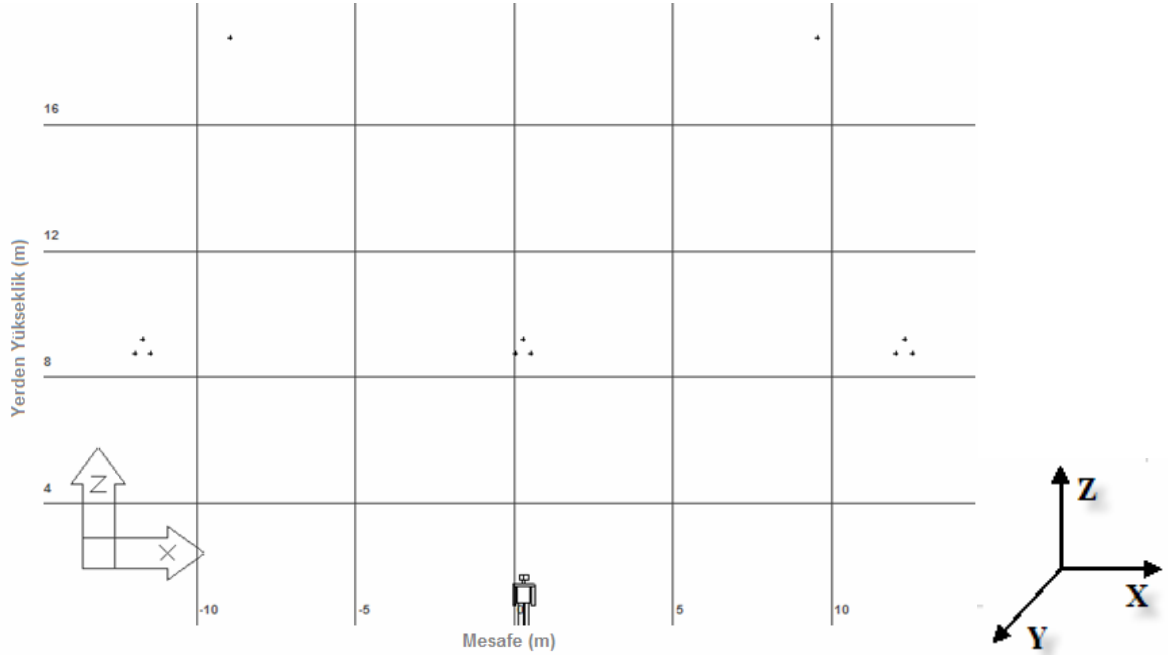


Şekil 2.27. 154 kV EİH' nin xy düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri

### 2.5.2. 380 kV EİH' lerde Meydana Gelen Elektrik ve Manyetik Alanlar

380 kV Enerji iletim hatlarında meydana gelen elektrik ve manyetik alanı hesaplamak için yapılan hesaplama modeli şekil 2.28.' de gösterilmektedir.

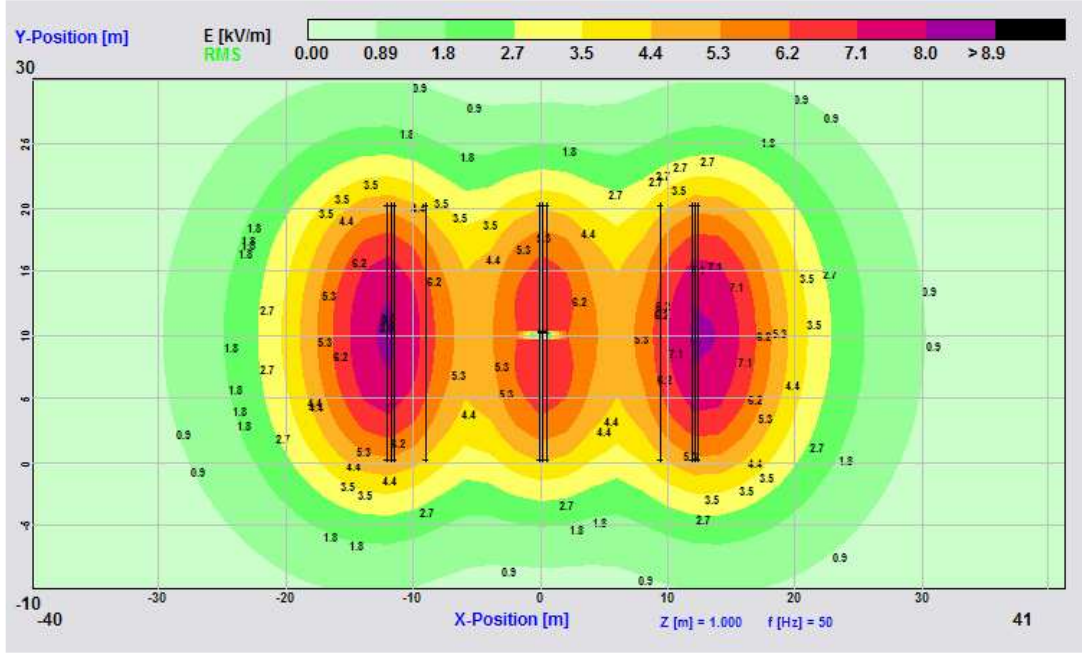
Türkiye'deki 380 kV'lık EİH' lerde maksimum iletken birkaç istisna bölge (Boğaz atlaması, Keban Bölgesi) dışında kesiti olan 1272 MCM pheasant iletken kullanılmaktadır. Elektrik ve manyetik alan hesabı yapılırken iletkenlerin yerden yüksekliği kuvvetli akım tesisleri yönetmeliğine göre, üzerine herkes tarafından çıkılabilen düz damlı yapıların hatta en küçük düşey uzaklığı 8,7 metre olarak alınmıştır [21]. 380 kV Tek devre EİH' lerde faz arası maksimum iletken mesafesi hesaplamalar için 12 m alınmıştır. 3'lü demet iletkene göre hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 2.28. 380 kV Enerji iletim hattı ve hat altındaki insan modeli

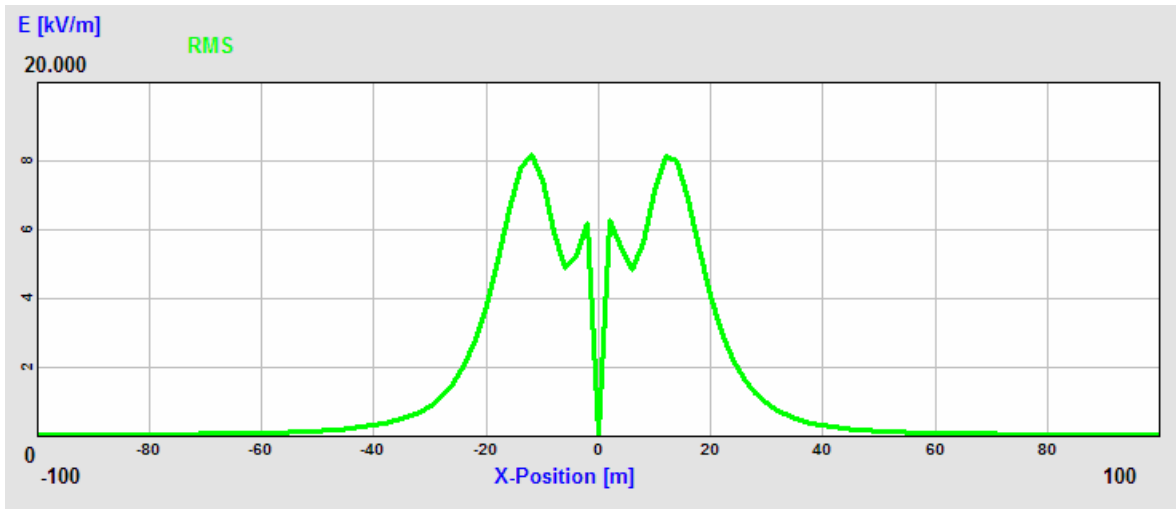
#### 2.5.2.1. 380 kV EİH' lerde Meydana Gelen Elektrik Alan

380 kV Enerji iletim hattının altındaki elektrik ve manyetik alanın hesabı yapılırken gerilim olarak 380 kV seçilmiştir.



Şekil 2.28. 380 kV EİH' nin xy düzlemindeki elektrik alan değerleri

xy düzleminde yerden 1 m yükseklikte hesaplanan elektrik alan değerleri şekil 2.29.' da görülmektedir. Şekil 2.29.' da görüldüğü üzere maksimum elektrik alanı, maksimum 8,9 kV/m olmuştur. Hattın altındaki insan modelinin bulunduğu yerde, xy düzleminde yapılan hesaplamada, elektrik alanı insanın olduğu yerde sıfıra düşüp, hatta dik mesafede elektrik alan değeri maksimum 8,1 kV/m' ye yükselip daha sonra şekil 2.30.' da görüldüğü üzere hızlı bir şekilde düşüşe geçmektedir.

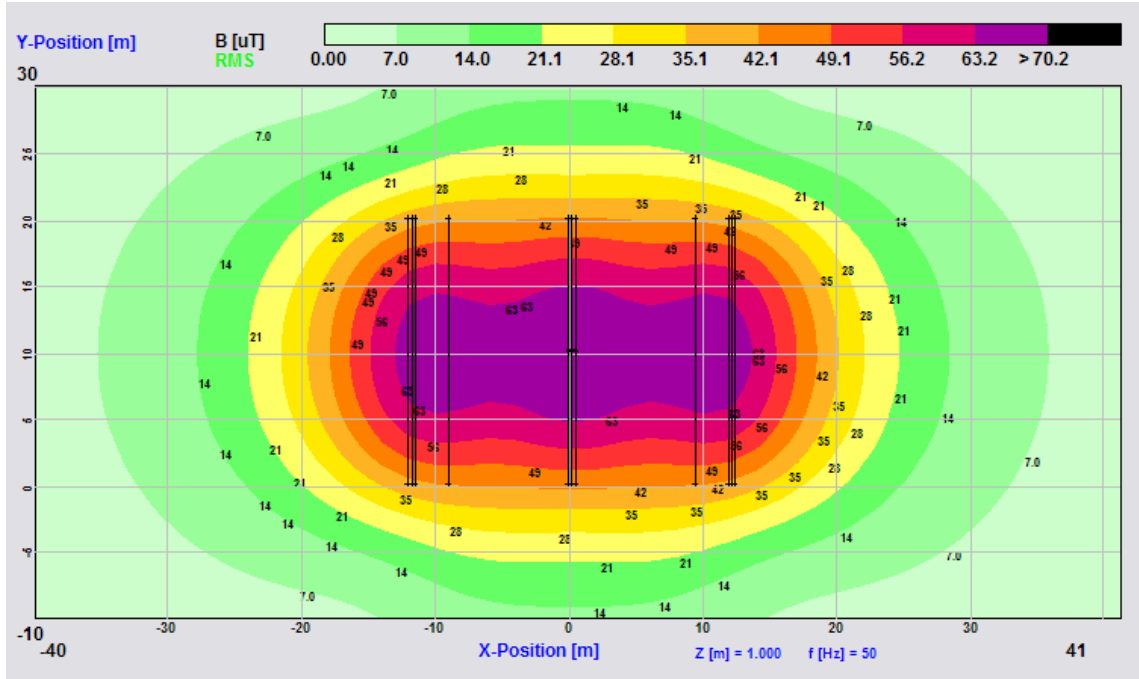


Şekil 2.30. 380 kV EİH' nin xy düzleminde hesaplanan elektrik alan değerleri

### 2.5.2.2. 380 kV EİH' lerde Meydana Gelen Manyetik Alan

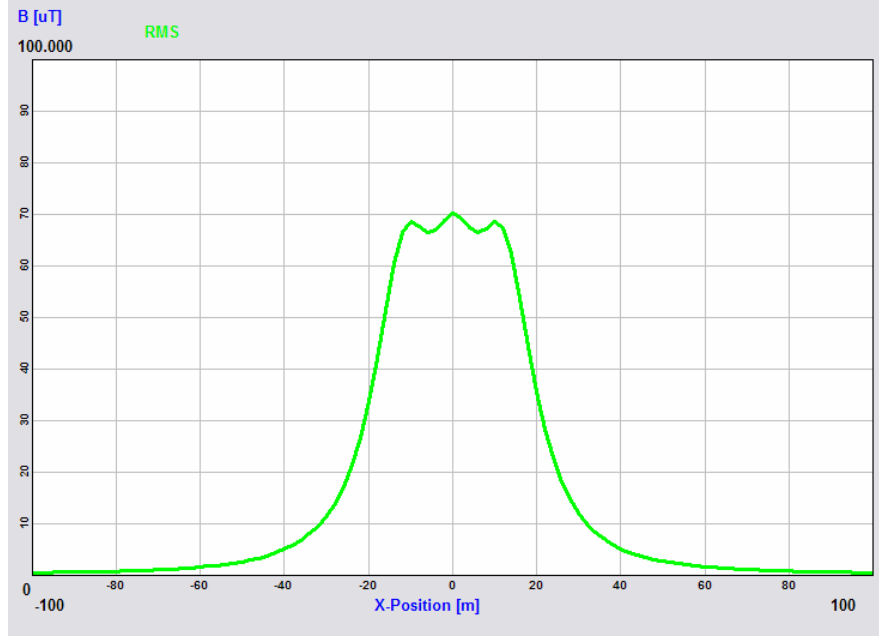
380 kV Enerji iletim hattının altındaki manyetik alanın hesabı yapılırken Türkiye'deki hatlardan geçen maksimum akım olarak 1300 A seçilmiştir.

Şekil 2.31.' de xy düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri görülmektedir. Şekil 2.31.' de görüldüğü üzere manyetik alan hattın iletim hattı koridorunda, maksimum  $70,2 \mu\text{T}$  olmuştur.



Şekil 2.31. 380 kV EİH' nin xy düzlemindeki manyetik alan değerleri

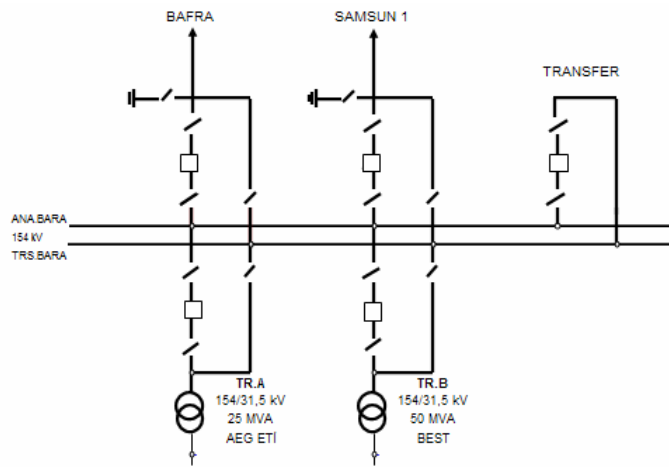
Yerden 1 m yükseklikte yapılan manyetik alan hesaplamalarında, hattın altında insanın olduğu yerde manyetik alanın engellenmesi söz konusu değildir. xy düzleminde hatta dik mesafede manyetik alan değeri, şekil 2.32.' de görüldüğü üzere maksimum  $70 \mu\text{T}$ ' ye hattın ortasında yükselmiştir. Hat eksenine dik mesafede, 10. metreden sonra manyetik alan hızla düşmeye başlamıştır.



Şekil 2.32. 380 kV EİH' nin xy düzleminde hesaplanan manyetik alan değerleri

## 2.6. Transformatör Merkezlerinde Elektrik ve Manyetik Alan Hesaplamaları

Bu çalışmada, Narda EFC 400-LF programı vasıtasıyla bir indirici transformatör merkezinde elektrik alan ve manyetik alan hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalara model olarak Samsun ili Ondokuz Mayıs İlçesinde bulunan 154 kV / 31,5 kV Ondokuz Mayıs TM seçilmiştir. Ondokuz Mayıs TM 154 kV şaltı, 2 hat, 1 transfer, 2 trafo fiderinden meydana gelmektedir. Tek hat şeması şekil 2.33.' te gösterilmektedir.

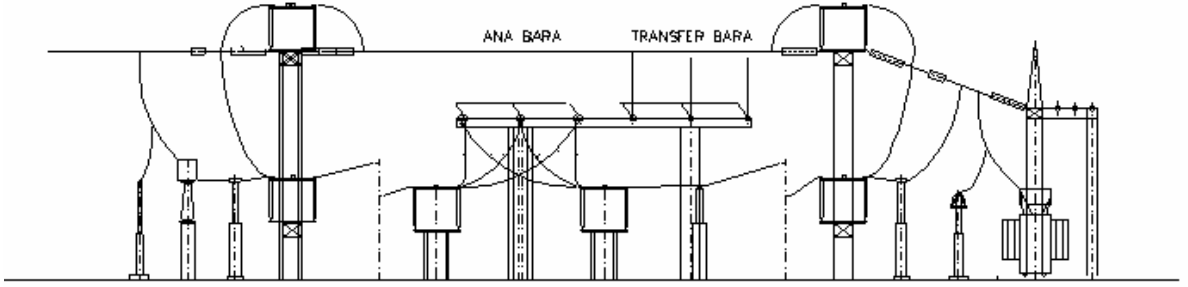


Şekil 2.33. 154 kV Ondokuz Mayıs TM tek hat şeması

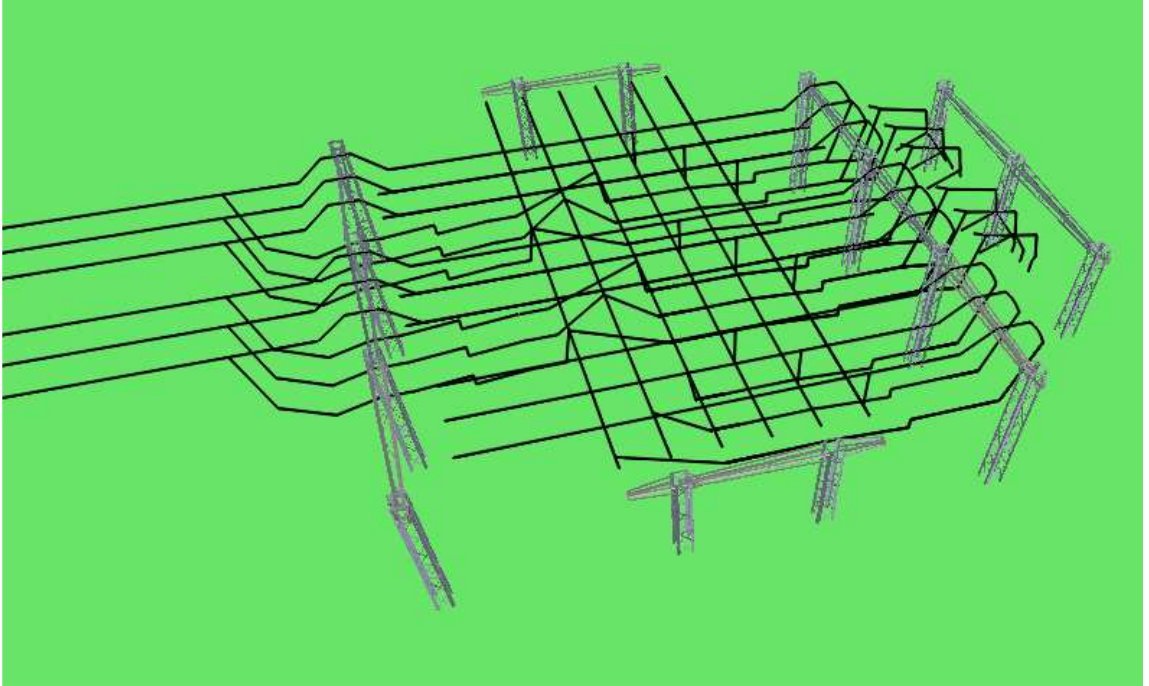


Hesaplamalar yapılırken bütün iletkenlerin enerjili olduğu varsayılmış toprak etkisi ihmal edilmiştir. Gerilim seviyesi 154 kV, akım 400 A, iletken kesiti 795 MCM (14,165 mm<sup>2</sup>), frekans 50 Hz olarak seçilmiş ve iletkenler şekil 2.34.' teki kesit resminde gösterilen şekliyle koordinat düzlemine yerleştirilmiştir.

Elektrik ve manyetik alan hesabı yapılırken xy düzleminde yerden 1 m yükseklik referans alınarak yapılmıştır [29,37].



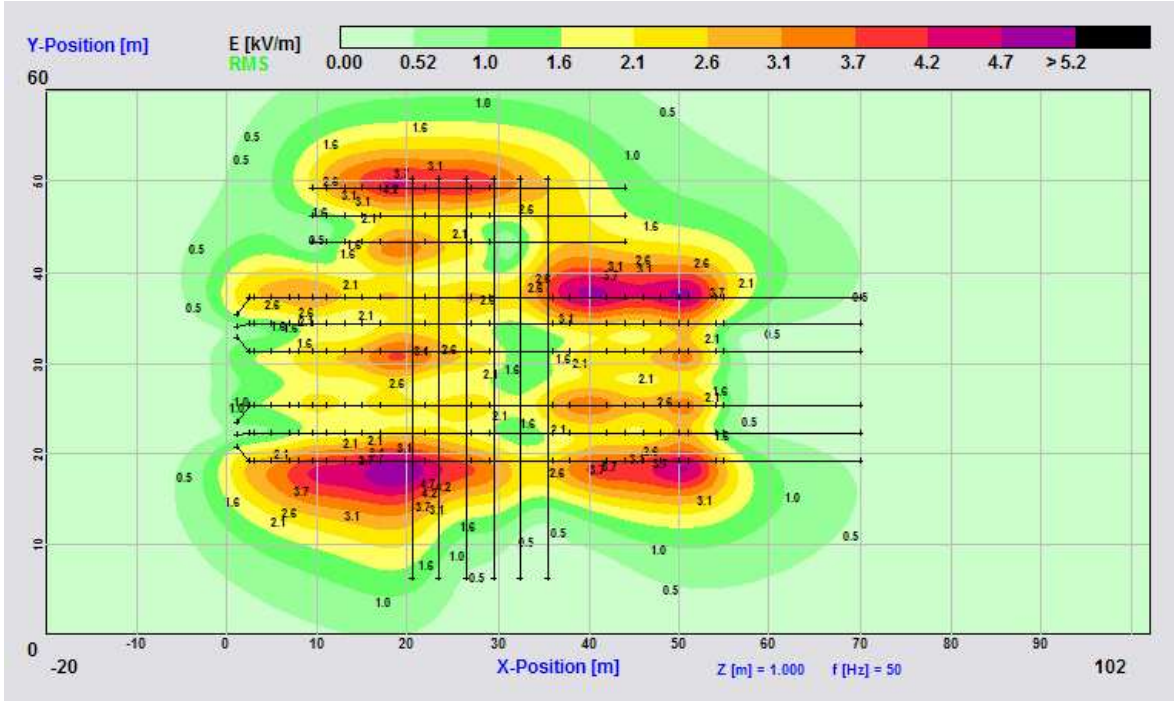
Şekil 2.34. 154 kV Ondokuz Mayıs trafo merkezi kesit resmi



Şekil 2.35. Ondokuz Mayıs TM'nin 3 boyutlu modeli

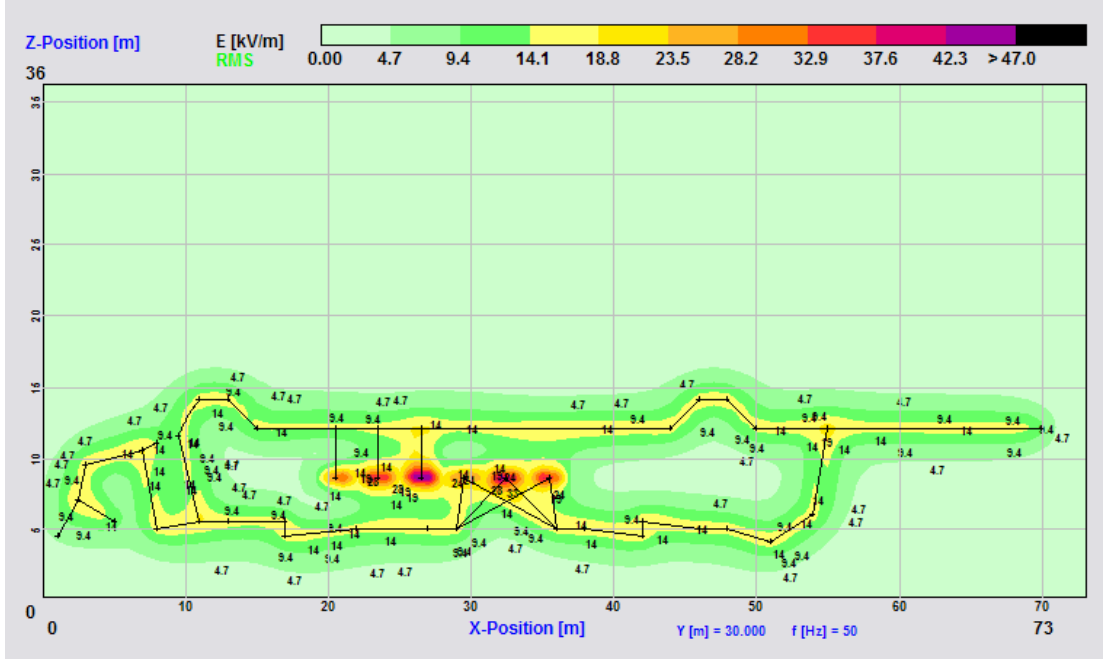
### 2.6.1. Trafo Merkezinde Hesaplanan Elektrik Alan

154 kV Ondokuz Mayıs Trafo Merkezi' ndeki elektrik alan değerlerinin xy düzlemindeki hesaplaması yapılırken  $-20 \text{ m} < x < 102 \text{ m}$ ,  $0 \text{ m} < y < 60 \text{ m}$  ve  $z = 1 \text{ m}$  olacak şekilde koordinat aralıkları seçilmiştir. Şekil 2.36.' da görüldüğü üzere trafo merkezinde elektrik alan değerleri maksimum 5,2 kV/m olmuştur.



Şekil 2.36. TM' nin xy düzleminde elektrik alan değerleri

154 kV Trafo merkezinin xz düzlemindeki elektrik alan hesaplaması yapılırken  $0 \text{ m} < x < 73 \text{ m}$ ,  $0 \text{ m} < z < 36 \text{ m}$  ve  $y = 30 \text{ m}$ , olacak şekilde koordinat aralıkları seçilmiştir. Şekil 2.37.' de görüldüğü gibi yerden 8,5 metre yükseklikte elektrik alan değeri maksimum 47 kV/m olmuştur.

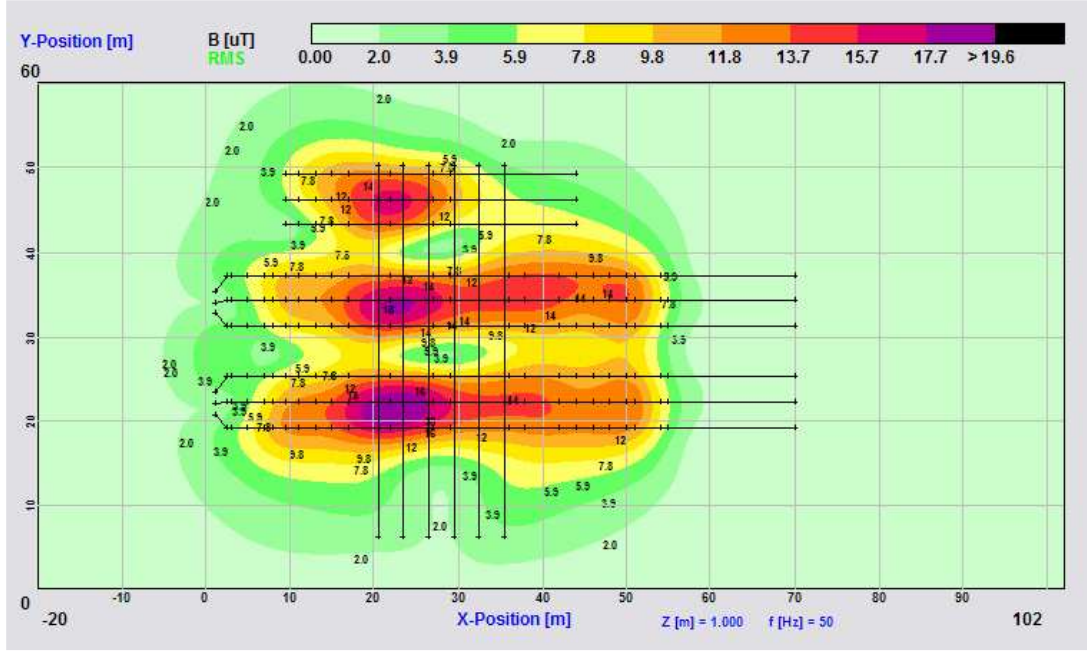


Şekil 2.37. TM' nin xz düzleminde elektrik alan değerleri

### 2.6.2. Trafo Merkezinde Hesaplanan Manyetik Alan

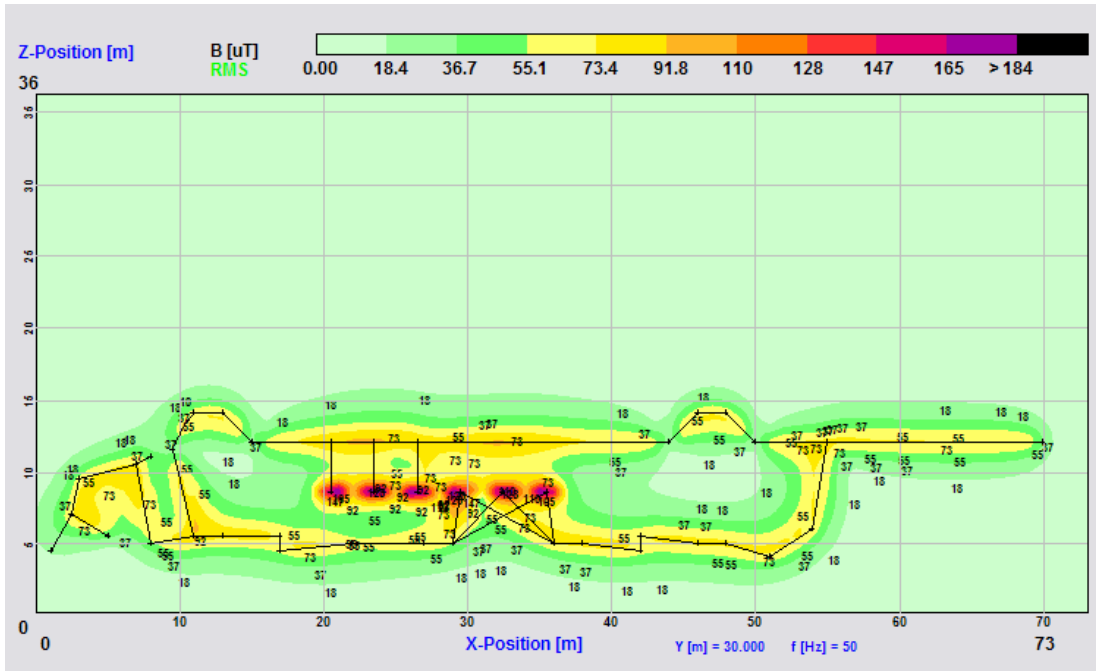
154 kV Ondokuz Mayıs Trafo Merkezi' ndeki manyetik alan değerlerinin xy düzlemindeki hesaplaması yapılırken  $-20 \text{ m} < x < 102 \text{ m}$ ,  $0 \text{ m} < y < 60 \text{ m}$  ve  $z = 1 \text{ m}$  olacak şekilde koordinat aralıkları seçilmiştir. Şekil 2.38.' de görüldüğü üzere trafo merkezinde manyetik alan değerleri maksimum  $19,6 \mu\text{T}$  olmuştur.

154 kV şalt sahasında yapılan diğer çalışmalardaki ölçümler, hesaplanan değerleri desteklemektedir. 154 kV şalt sahasında operatörlerce yoğun kullanılan bölgelerde yerden 1 m yükseklikte ölçülen 350 A için, manyetik alan seviyeleri  $9\text{-}15 \mu\text{T}$  aralığında ölçülmüştür [38].



Şekil 2.38. TM' nin xy düzleminde manyetik alan değerleri

154 kV Trafo merkezindeki manyetik alan değerlerinin xy düzlemindeki hesaplaması yapılırken  $0 \text{ m} < x < 73 \text{ m}$ ,  $0 \text{ m} < z < 36 \text{ m}$  ve  $y = 30 \text{ m}$  olacak şekilde koordinat aralıkları seçilmiştir. Şekil 2.39.' da görüldüğü üzere trafo merkezinde manyetik alan değerleri maksimum  $184 \mu\text{T}$  olmuştur.



Şekil 2.39. TM' nin xz düzleminde manyetik alan değerleri

### 2.6.3. Hesaplanan Değerlerin Standartlarla Karşılaştırılması

Örnek olarak ele alınmış ve üzerinde çalışılarak içinde ve yakın civarındaki elektrik ve manyetik alan değerleri ölçülmüş transformatör merkezi için, ölçülen bu alan değerlerinin insan sağlığı ile ilişkili olarak, ilgili standartlarla nasıl bir uyum içinde olduğunu belirlemek amacıyla, bu standartların belirlediği sınır değerlerine bakmak gerekmektedir. Burada kastedilen sınır değerler Bioelektromanyetik (BEM) konusuna ilişkin olanlardır. Bu konuda standart üreten en yetkili ve tanınmış kuruluş ICNIRP' dır.

ICNIRP, temel limitlerin zor ölçülebilir ya da elde edilebilir olması nedeniyle, işyeri ve genel halk şeklinde ikiye ayrılan türetilmiş limitleri ortaya koymuştur [18]. İşyeri tanımı ile günün belirli saatlerinde (ortalama 8 saat) sadece yetişkinlerin bulunduğu ve bulunanların da elektromanyetik etkilerin riskleri konusunda bilgi sahibi olduğu ve önlem alındığının varsayıldığı yerler düşünülmüştür. Genel halk deyimi ile kastedilen ise, günün tüm saatlerinde elektromanyetik etkilere açık, risk ve önlemlerden habersiz olarak maruz kalınabilen, ev, hastane, park vb. yerlerdir. Buna bağlı olarak bu limitlerin işyerine oranla daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. ICNIRP, işyerleri için 25-820 Hz aralığında elektrik alan sınır değerini  $500/f$  (kV/m), manyetik alan sınır değerini ise  $20/f$  (A/m) şeklinde vermektedir. Genel halk için bu sınır değerler yine aynı frekans aralığında elektrik alan için  $250/f$  (kV/m), manyetik alan için  $4/f$  (A/m) şeklinde tanımlanmıştır.

Türk Standartları Enstitüsü'nün 1 Nisan 1996 yılında yayınladığı "İnsanların Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalması-Düşük Frekanslar (0-10 kHz)" isimli standartta 50 Hz' lik şebeke frekansı için (Bu çalışmada ölçülen değerler 50 Hz' lik işletme içindir), elektrik alan sınır referans değeri işçiler için 30 kV/m, genel halk için 10 kV/m olarak belirlenmiştir. Aynı standartta referans manyetik alan değerleri ise; işçiler için 1,6 mT, genel halk için 0,64 mT olarak belirlenmiştir [20]. Bu bilgiler ışığında hesabı yapılan transformatör merkezindeki elektrik ve manyetik alan değerlerinin ICNIRP ve TSE standartlarında belirtilen sınırları aşmadığı görülmektedir.

### 3. SONUÇLAR

Sosyal, ekonomik ve teknolojik gelişmelerle birlikte artan elektrik enerjisi ihtiyacı, beraberinde enerji üretim, iletim ve dağıtım konusunda yeni gelişmeleri zorunlu kılmıştır. Ancak bu gelişmeler, özellikle enerjinin yüksek gerilim hatlarıyla iletimi noktasında, çevresel ve elektromanyetik kirlenmeyi beraberinde getirmektedir. Bu kirlenmenin kabul edilebilir boyutlara indirilebilmesi için planlama kuruluşları tarafından çalışmalar yapılmaktadır. İletim hatlarının projelendirilmesi aşamasında çevresel etki değerlendirmesi raporu hazırlanmakta, fakat elektromanyetik kirliliği azaltmaya yönelik çözümler üretilmemektedir.

Yapılan bu çalışma sonucunda; iletim hattının yakınında meydana gelen elektrik ve manyetik alanların, hattın geometrik parametrelerine (hat konfigürasyonu, hat yüksekliği, iletken kesitleri, faz aralığı), faz sırasına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Ayrıca elektrik alanın gerilime bağlı, manyetik alanın akıma bağlı olduğu görülmüştür.

Yüksek gerilim EİH' lerinin farklı konfigürasyonlarda meydana getirdikleri elektrik ve manyetik alan değerleri hesaplanarak gösterilmiştir. Bununla birlikte, yüksek gerilim hatları tarafından meydana getirilen alanların belirlenmiş olan güvenlik seviyelerini ne kadar sağlayıp sağlamadığı gösterilmiştir. Elektrik alan ile ilgili elde edilen sonuçlar;

1. Çift devre EİH' lerinin altındaki elektrik alan değerleri, tek devre EİH' lerine göre daha yüksektir. Bu saptama iletim koridoru içindeki alan için söz konusudur. İletim koridoru dışındaki alan şiddetinin ise, düz geometrili hatlar için yüksek, dikey geometrili hatlar için ise son derece düşük olduğu görülmüştür.
2. EİH' lerinde hat yüksekliği arttıkça elektrik alan değerleri azalmaktadır.
3. Yüksek gerilim hatlarında toprak koruma telinin etkisi ihmal edilebilir.
4. İletim hatlarında iletken kesitleri ve demetteki iletken sayıları arttıkça elektrik alan artmaktadır.
5. İletim hatlarında gerilim seviyesi arttıkça ona bağlı olarak elektrik alan artmaktadır.
6. Tek devre EİH' lerinde fazlar arası mesafe arttıkça elektrik alan değerleri artmaktadır.

7. Çift devre EİH' lerinde her iki devrede de fazlar yerden aynı yükseklikte yerleştirilirse elektrik alan değerleri diğer faz sırası konfigürasyonlara göre maksimum olmaktadır.

EİH' lerde manyetik alan ile ilgili sonuçlar, hemen hemen elektrik alanıyla ilgili sonuçlarla örtüşmektedir. Akımın, fazlar arası mesafenin, iletken boyutlarının ve toprağa olan mesafelerin aynı olduğu farz edildiğinde topraktaki maksimum manyetik alanın, çift devre hatlar için en düşük, tek devre hatlar için ise en yüksek olduğu, hat yüksekliği arttıkça düz ve dikey geometrili hatlarda manyetik alanın azaldığı, fazlar arası mesafe arttıkça manyetik alanın arttığı, dikey geometrili hatlarda her iki devrede de fazlar yerden aynı yükseklikte yerleştirilirse manyetik alan değerlerinin diğer faz sırası konfigürasyonlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

NARDA EFC -400 LF programıyla yapılan hesaplamalarda, 154 kV ve 380 kV EİH için yaklaşma mesafeleri, gerilim ve akım değerleri maksimum alınarak hesaplamalar yapılmıştır. 154 kV' lik hatların altındaki hesaplamalarda, elektrik alan değerleri insanın baş çevresinde 7,2 kV/m diğer taraflarında 5,2 kV/m hesaplanmıştır. 380 kV' lik hatların altında elektrik alan maksimum 8,1 kV/m olmaktadır. ICNIRP ve IEEE standartlarında genel halk için elektrik alan 10 kV/m olması gerekmektedir. Ancak genel halk, yüksek gerilim hatlara yaklaşım mesafelerinin üzerinde bir uzaklıkta bulunmaktadır. Hattın altında yerden 1 m yükseklikte yapılan diğer hesaplamalarda 154 kV' lik hatların altında elektrik alan maksimum  $\approx 1,6$  kV/m bulunmuştur. Bu değer de yukarıda verilen standart değerlerin altındadır.

154 kV' lik hatların altında yapılan hesaplamalarda manyetik alan insanın baş çevresinde 126  $\mu$ T diğer taraflarında 84  $\mu$ T değerleri bulunmuştur. 380 kV' lik iletim hattı koridorunda manyetik alan maksimum 70,2  $\mu$ T olmuştur. Genel halk için ICNIRP' ın standardı 100  $\mu$ T' dir. Ancak IEEE standardı 904  $\mu$ T' dir. Bu açıdan bulunan değerler ICNIRP' ın standart değerlerine yakındır.

Ayrıca örnek bir trafo merkezi olarak Samsun 19 Mayıs TM alınmış trafo merkezindeki baralar, cihazlara iniş iletkenleri modelleme yapılmış ve bir trafo merkezindeki elektrik ve manyetik alan dağılımları hesaplanmıştır. Hesabı yapılan transformatör merkezindeki maksimum elektrik alan değeri 5,2 kV/m ve maksimum manyetik alan değerleri 19,6  $\mu$ T olmuştur. ICNIRP, IEEE ve TSE standartlarında çalışanlar için belirtilen sınırları aşmadığı görülmüştür.

#### 4. ÖNERİLER

Yüksek gerilim enerji iletim hatlarının oluşturduğu elektrik ve manyetik alan hesabı yapılırken ihmal edilen enerji iletim hattının altında ve yakınındaki tüm yapılar, geçit içerisinde iletim hattına paralel olmayan çit telleri, su boruları ve diğer iletkenler, yeryüzü şekilleri, toprak etkisi, çaprazlamalar ve hat boyunca akım değişimleri, uç etkileri, 3. boyutta alan değişimi, ekranlama etkisi, harmonik etkiler gibi şeyler tek tek hesaba katılarak daha ayrıntılı bir alan hesabı yapılabilir.

Enerji iletim hatlarının alan hesapları için bilgisayar ortamında gerçeğe yakın bir modelleme çalışması yapılabilir.

Trafo merkezlerinde bulunan cihazları (güç trafosu, kesici, akım ve gerilim trafosu) da içine alacak bir alan analizi yapılabilir. Ayrıca farklı gerilimlerdeki TM' lerde aynı hesaplar yapılabilir. Bulunacak analitik sonuçlar, ölçüm aletleriyle yapılacak olan sonuçlarla karşılaştırılabilir.

İnsan vücudunun elektriksel olarak modellenmesi yapılarak hatların altında ve trafo merkezinde maruz kaldığı EM alanların insan vücudunda meydana getireceği akım yoğunlukları hesaplanabilir.



## 5. KAYNAKLAR

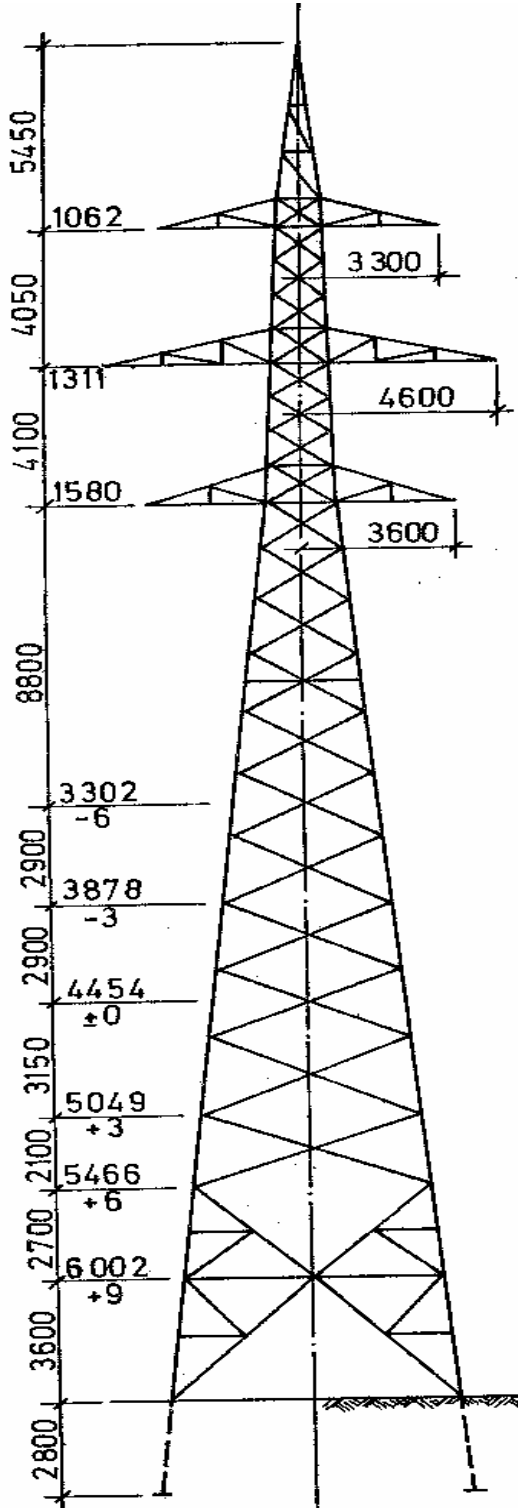
1. Sevgi, L., Elektromanyetik Kirlilik Elektromanyetik Uyumluluk, EMO Yayınları, 2000.
2. Deno, D. W. ve Zaffanella, L. E., Field Effects of Overhead Transmission Lines and Stations, Transmission Line Reference Book-345 kV and Above, Second Edition, Electric Power Res. Inst., Palo Alto, 1982.
3. Çınar, K., Elektromanyetik Alan, Bilim ve Teknik, 465 (2006) 80-81.
4. Zipse, D.W., Health Effects of Extremely Low Frequency (50 and 60 Hz) Electric and Magnetic Fields, IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1992, Portland, Bildiriler Kitabı, 89-102.
5. <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/>, 20 Haziran 2009.
6. Nair, I., Morgan, M.G. ve Florig, H.K., Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields-Background Paper, OTA-BPO-E-53. U.S. Government Printing Office, Washington, 1989.
7. <http://nup4mm.googlepages.com/emfv1HPA.swf>, 15 Eylül 2009.
8. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Faaliyet Raporu, 2007.
9. <http://www.emfs.info/Sources+of+EMFs/Overhead+power+lines/Field+lines.htm>, 06 Temmuz 2009.
10. Çok Alçak Frekanslı Elektromanyetik Alanlar, RTE & EDF Broşürü, 2008.
11. TEAŞ Genel Müdürlüğü Çevre Daire Başkanlığı, Elektrik Alanları ve Manyetik Alanlar, Cilt 2, Elektrik İletimine Bağlı Elektrik Alanları ve Manyetik Alanlar, Ankara, 2001.
12. Barnes, F. S. ve Greenebaum, B., Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, CRC Press, Florida, 2006.
13. NIEHS (National Institute of Environmental Health Sciences) EMF RAPID (EMF Research and Public Information Dissemination) Questions and Answers about Electric and Magnetic Field Associated with the Use of Electric Power, 1995.
14. Serway, R.A., Fizik 2 Elektrik-Manyetizma ve Optik, Palme Yayıncılık, Ankara, 1996.
15. Şeker, S. ve Çerezci, O., Çevremizdeki Radyasyon ve Koruma Yöntemleri, Boğaziçi Üniversitesi Yayını , İstanbul, 1997.

16. Dinçer, H., Elektromanyetik Işınımların İnsan Sağlığına Etkisi, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi, 406 (2000) 22-30.
17. Şeker, S. ve Çerezci, O., Elektromagnetik Alanların Biyolojik Etkileri, Güvenlik Standartları ve Korunma Yöntemleri, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1991.
18. ICNIRP, Guidelines for Limiting Exposure Time Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields, Health Physics Society, 74, 4 (1998) 494-522.
19. IEEE PC95.6-2002, Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3 kHz. Prepared by Subcommittee III of Standards Coordinating Committee 28, IEEE Standards Department. Piscataway, New Jersey, 2002.
20. TS ENV 50166, İnsanların Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalması-Düşük Frekanslar (0-10 kHz), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1996.
21. T.C. Resmi Gazete, Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği (24246), 30.11.2000.
22. Lorrain, P. ve Corson, D. R., Electromagnetic Fields and Waves, W.H. Freeman and Company, Third Edition, 1988.
23. Tzinevrakis, A.E., Tsanakas, D.K. ve Mimos, E.I., Analytical Calculation of the Electric Field Produced by Single-Circuit Power Lines, Power Delivery, IEEE Transactions on Power Delivery, 23, 3 (2008) 1495 - 1505.
24. Shangzun, Y., Pengfei, L. ve Ling, N., Study on Electromagnetic Radiation of Ultra-High Voltage Power Transmission Line, International Conference on Computer Science and Information Technology, IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2008.
25. Olsen, R.G., Wong, P. S., Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines, IEEE Transactions on Power Delivery, 7, 4 (1992) 1310 - 1319.
26. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Enerji Kalitesi ve Harmonikler, Ankara, Ocak 2006.
27. Arı, N. ve Özen, Ş., Elektromanyetik Alanlar, Palme Yayınları, Ankara, 2008.
28. Faria, J. A., Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
29. Kasten, D.C., Zhang, W. ve Addis, G.I., Calculation of Magnetic Flux Density in High Voltage AC Substations, Proceeding of the Seventh International Symposium on HV Eng., Dresden-Germany, 1991.
30. TEK, İletim ve Dağıtım Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan Demir Direkler, 1977.

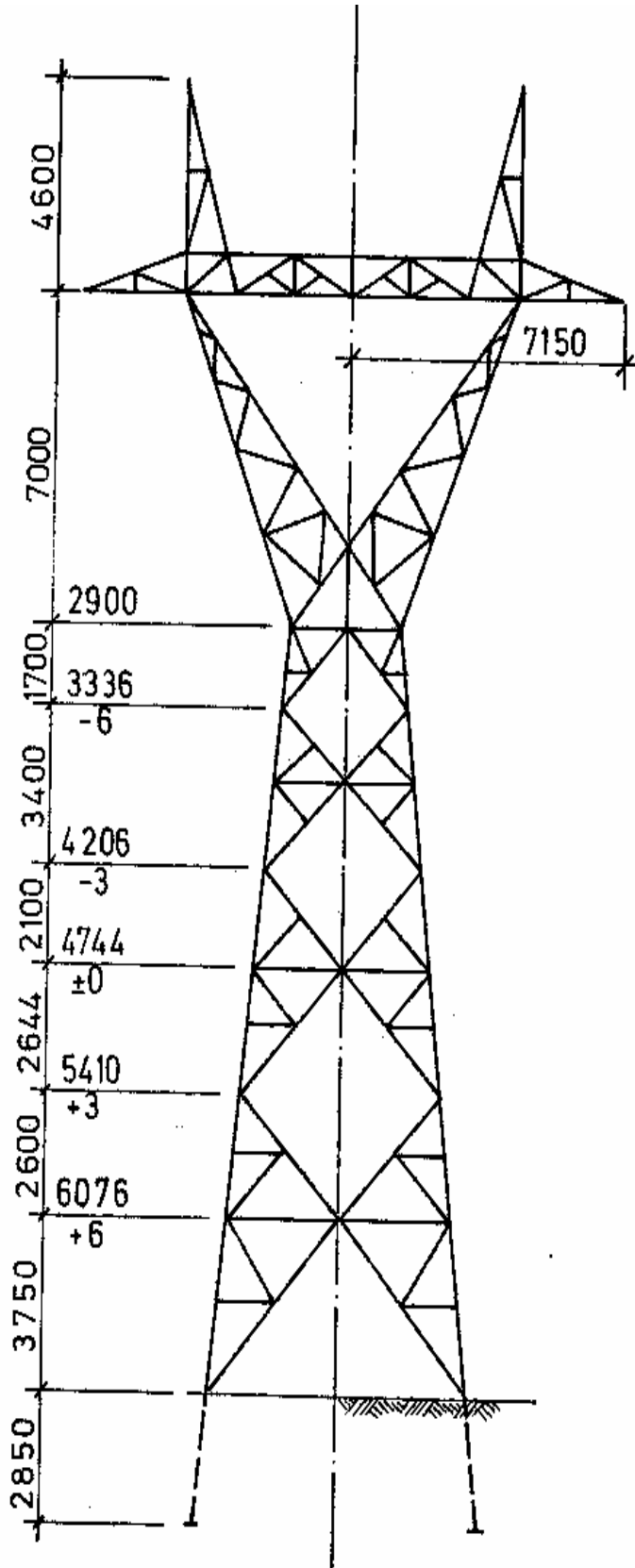
31. ANSI/IEEE Standard 644-1987, Procedures For Measurement Of Power Frequency Electric And Magnetic Fields From Ac Power Lines, IEEE, New York, Mart 1987.
32. Dengiz, H., Enerji Hatları Mühendisliği, 2. Baskı, Kardeş Kitabevi Yayınları, Ankara, 1991.
33. Carstensen, E. L., Biological Effects of Transmission Line Fields, Elsevier Science Publishing Co., New York, 1987.
34. Olsen, R.G., Deno, D., Baishiki, R.S., Abbot, J.R., Conti, R., Frazier, M., Jaffa, K., Niles, G.B., Stewart, J.R., Wong, R. ve Zavadil, R.M., Magnetic Fields From Electric Power Lines: Theory And Comparison to Measurements, IEEE Transactions on Power Delivery, 3, 4 (1988) 2127 – 2136.
35. Azzuhri, S.R. ve Mahadi, W.N.L, Power Transmission Line Magnetic Fields: A Surveyon 120kV Overhead Transmission Lines in Malaysia, TENCON, Kasım 2004, Chiang Mai, Bildiriler Kitabı C, 421- 424.
36. Mamishev, A.V., Nevels, R.D. ve Russell, B.D., Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic, IEEE Transactions on Power Delivery, 11, 3 (1996) 1571-1576.
37. Habiballah, I.O., Dawoud, M.M., Al-Balawi, K. ve Farag, A.S., Magnetic Field Measurement and Simulation of a 230 kV Substation, Proceeding of International Conference on Non-ionizing Radiation at UNITEN, 2003.
38. Özen, Ş., Yüksek Gerilim Trafo Merkezlerinde Manyetik Alan Seviyeleri ve Mesleki Maruz Kalmanın Değerlendirilmesi, 12. Ulusal Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Kasım 2007, Eskişehir, Bildiriler Kitabı,101-106.

## 6. EKLER

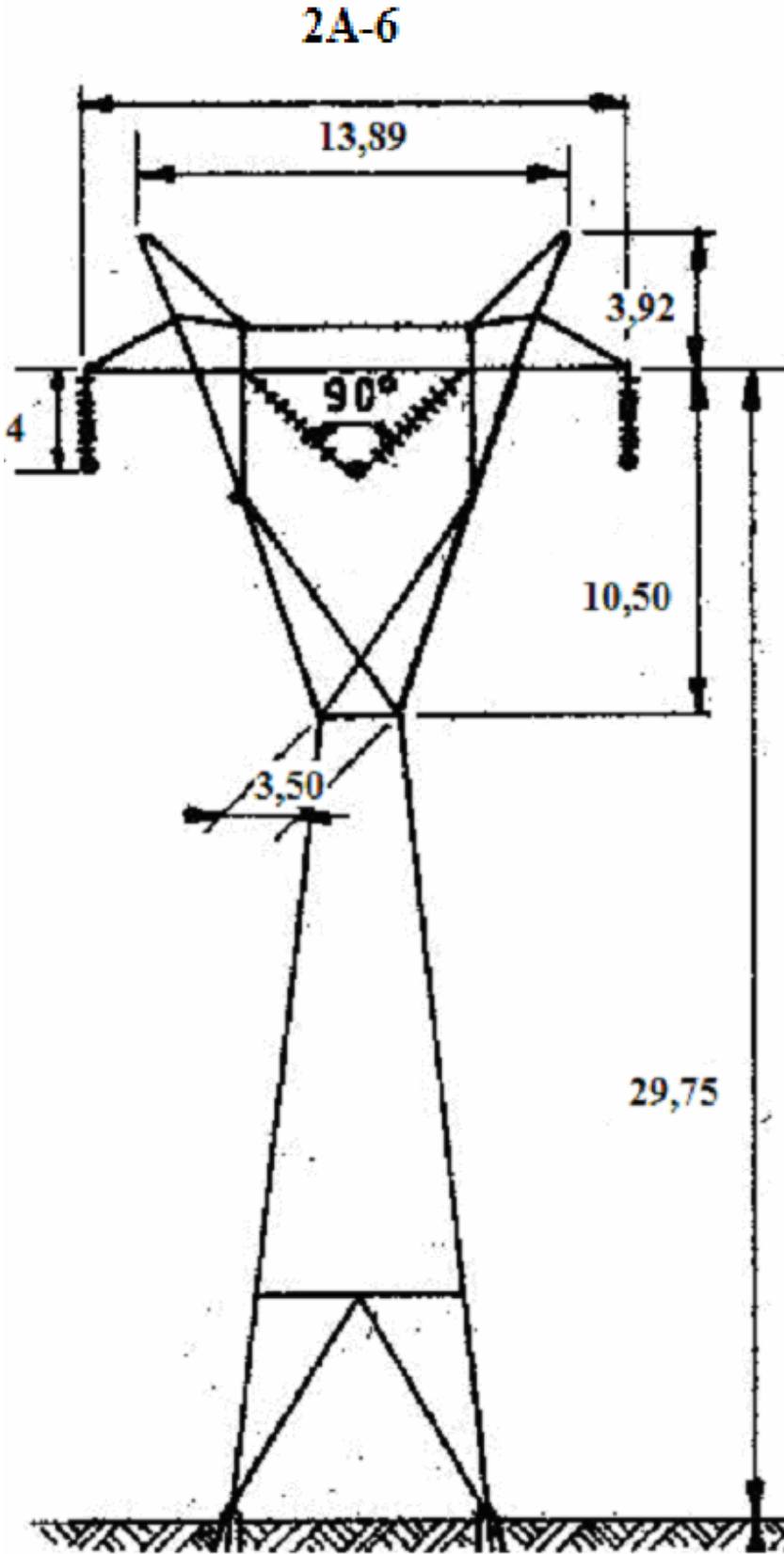
Ek 1. F1 Tipi Enerji İletim Hattı Direği



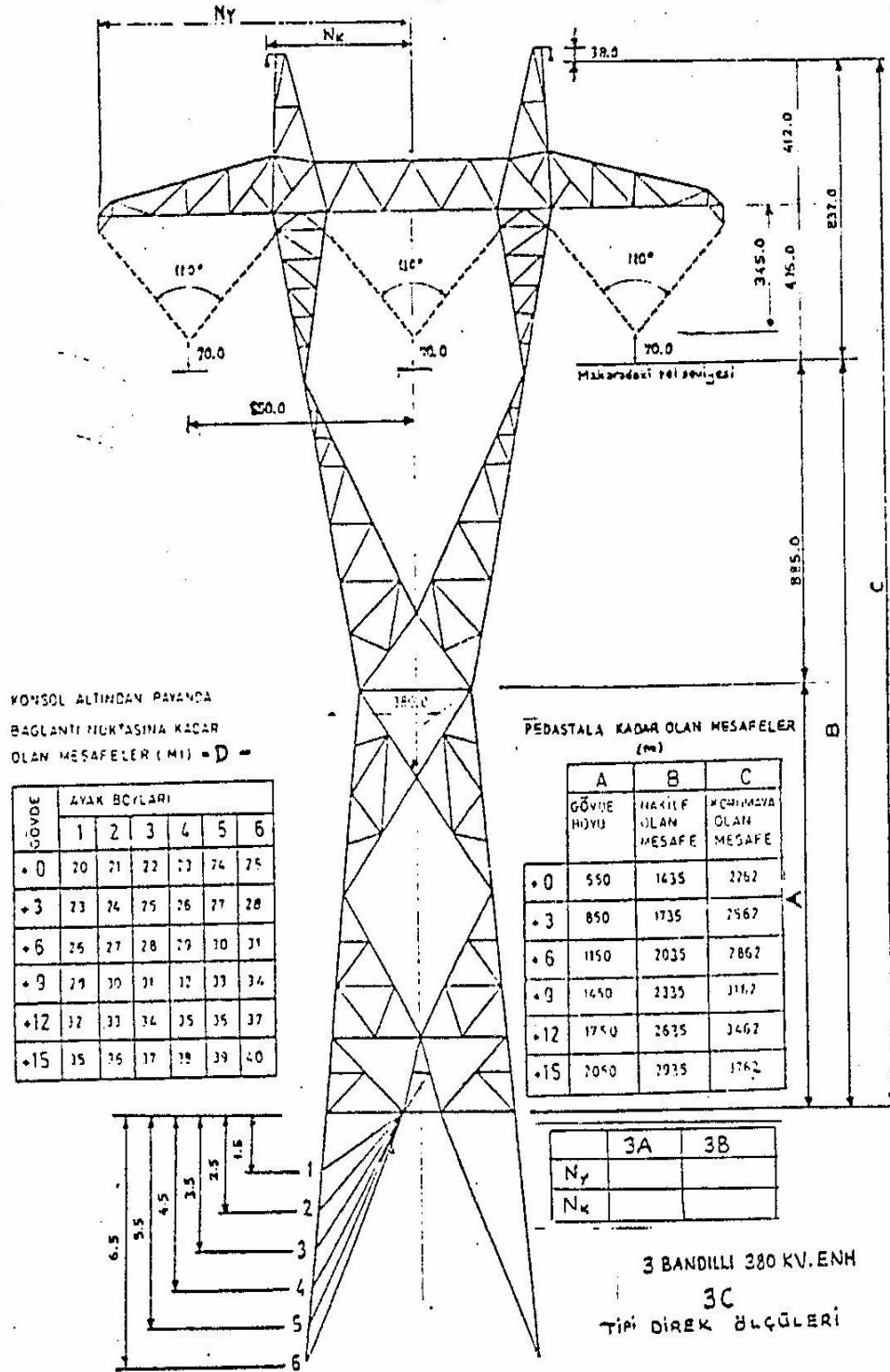
Ek 2. D2 Tipi Enerji İletim Hattı Direği



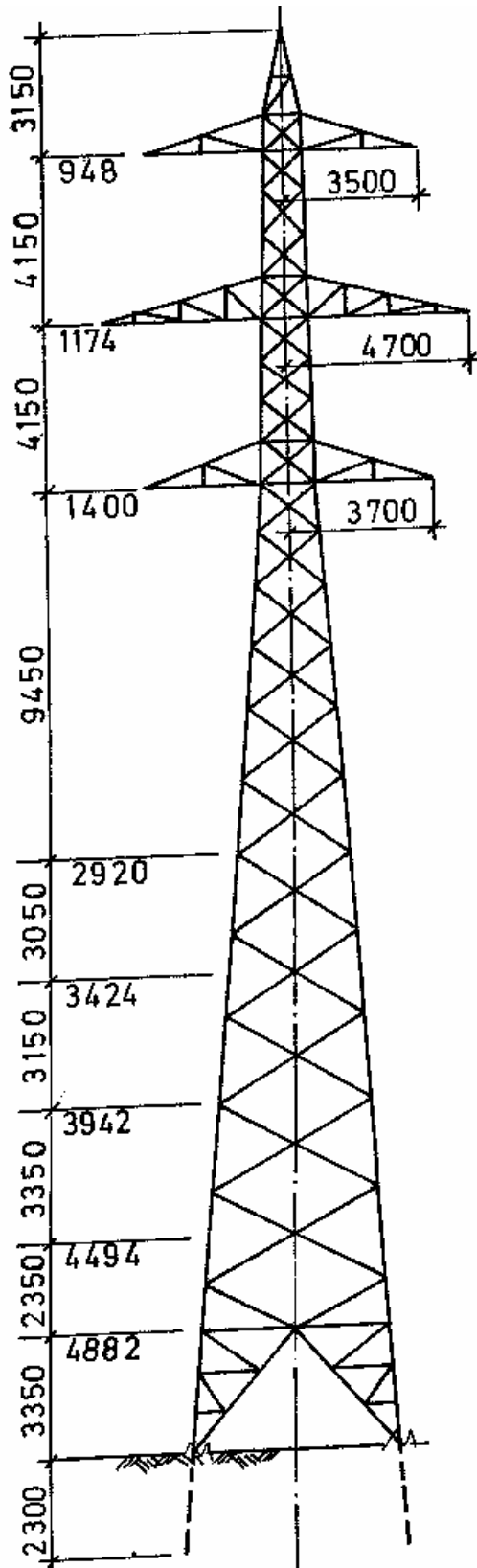
Ek 3. 2A-6 Tipi Enerji İletim Hattı Direği



Ek 4. 3C Tipi Enerji İletim Hattı Direği



Ek 5. TA1 Tipi Enerji İletim Hattı Direği







## Ek 7. Çelik Özlü Alüminyum İletkenlerin Mekanik ve Elektriksel Özellikleri

### ÇELİK ÖZLÜ ALÜMİNYUM İLETKENLER (Yapı, mekanik ve elektrik özellikleri)

Kanada Standartları Anma Adı	TS Anma Adı Alışt mm <sup>2</sup>	KESİT				Tel çapları ve sayıları				Anma Çapı		20°C'de DC direnci Ω /km	Anma birim ağırlığı kg/km	Akım Taşıma Kapasitesi A		
		AWG veya cir.mil	Al mm <sup>2</sup>	St mm <sup>2</sup>	Toplam İletken kesiti mm <sup>2</sup>	Alüminyum		Çelik		Çelik mm	İletken mm			(1)	(2)	(3)
						Adet	Çap mm	Adet	Çap mm							
SWALLOW	27/4	3	26,69	4,45	31,14	6	2,38	1	2,38	2,38	7,14	1038	107,8	120	160	180
SPARROW	34/6	2	33,59	5,60	39,19	6	2,67	1	2,67	2,67	8,01	1290	135,7	140	180	200
ROBIONE	45/7		44,70	7,45	52,15	6	3,08	1	3,08	3,08	9,24	1650	179,3	175	200	230
RAVEN	54/9	1/0	53,52	8,92	62,44	6	3,37	1	3,37	3,37	10,11	1969	216,2	195	230	280
PIGEON	65/14	3/0	85/13	14,18	99,30	6	4,25	1	4,25	4,25	12,75	2995	343,9	275	300	360
PARTRIDG	135/22		134,87	21,99	156,86	26	2,57	7	2,00	6,00	16,28	5113	543,8	345	460	510
E	152/25		300,000	152,19	452,19	26	2,73	7	2,12	95,6	17,28	5755	612,9	410	490	540
OSTRICH	242/39		477,000	241,65	718,65	26	3,44	7	2,67	152,0	8,01	8792	972,8	540	670	740
HAWK	403/65		795,000	402,56	1197,56	26	4,44	7	3,45	253,3	10,35	14222	1621,5	760	900	1020
DRAKE	402/52		795,000	402,33	1197,33	54	3,08	7	3,08	253,3	9,24	13003	1519,7	760	900	1020
CONDOR	483/34		954,000	483,4	1437,4	45	3,70	7	2,47	300,0	7,40	11864	1600,2	860	1010	1100
RAIL	485/63		954,000	484,53	1438,53	54	3,38	7	3,38	304,0	10,14	15241	1829,8	860	1010	1090
CARDINAL	645/82		1,272,000	645,08	1,917,08	54	3,90	19	2,34	405,7	11,70	19676	2423,5	1000(4)	1160(5)	1300(6)

### AKIM TAŞIMA KAPASİTESİ FAKTÖRLERİ

	1	2	3	4	5	6
Rüzgar Hızı (m/sn)	0	0,6096	0,6	0,6	0,6	0,6
Ortam Sıcaklığı (°C)	40	25	20	45	35	25
Max. İletken Sıcaklığı (°C)	80	75	80	80	80	80
Frekans (Hz)	50	60	50	50	50	50
İletken Yüzeyi	Pariaklıgını kaybetmiş					
Güneş Isısı (kW/m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	1,2	1,2

AWG(American Wire Gauge): Amerikan Tel Ölçüleri  
 CM (Circular Miles) : Çapı 0,001 inch olan daire yüzeyi

## Ek 8. Çift Devre ve Tek Devre Enerji İletim Hattının Civarında Elektrik Alan Hesaplayan Programın Matlab Kodları

```

Clear; % Çift devre EİH elektrik alan hesabı Matlab Kodları
s=8.854187817*10^(-12); %serbest uzayın elektrik geçirgenligi
v=input('Faz Faz gerilimi=')/sqrt(3); %Gerilim değeri
x1=input('x1=');
x2=input('x2=');
x3=input('x3=');
x4=input('x4=');
x5=input('x5=');
x6=input('x6=');
x7=input('x6=');
y1=input('y1=');
y2=input('y2=');
y3=input('y3=');
y4=input('y4=');
y5=input('y5=');
y6=input('y6=');
y7=input('y7=');
r=input('r(mm)=')*10^(-3); %iletken Kesiti
r1=input('r1(mm)=')*10^(-3); % Toprak iletken kesiti
x=-100:1:100;
y=1;
P11=log(2*y1/r);
P12=log(sqrt(((x1-x2)^2+(y1+y2)^2)/((x1-x2)^2+(y1-y2)^2)));
P13=log(sqrt(((x1-x3)^2+(y1+y3)^2)/((x1-x3)^2+(y1-y3)^2)));
P14=log(sqrt(((x1-x4)^2+(y1+y4)^2)/((x1-x4)^2+(y1-y4)^2)));
P15=log(sqrt(((x1-x5)^2+(y1+y5)^2)/((x1-x5)^2+(y1-y5)^2)));
P16=log(sqrt(((x1-x6)^2+(y1+y6)^2)/((x1-x6)^2+(y1-y6)^2)));
P21=log(sqrt(((x2-x1)^2+(y2+y1)^2)/((x2-x1)^2+(y2-y1)^2)));
P22=log(2*y2/r);
P23=log(sqrt(((x2-x3)^2+(y2+y3)^2)/((x2-x3)^2+(y2-y3)^2)));
P24=log(sqrt(((x2-x4)^2+(y2+y4)^2)/((x2-x4)^2+(y2-y4)^2)));
P25=log(sqrt(((x2-x5)^2+(y2+y5)^2)/((x2-x5)^2+(y2-y5)^2)));
P26=log(sqrt(((x2-x6)^2+(y2+y6)^2)/((x2-x6)^2+(y2-y6)^2)));
P31=log(sqrt(((x3-x1)^2+(y3+y1)^2)/((x3-x1)^2+(y3-y1)^2)));
P32=log(sqrt(((x3-x2)^2+(y3+y2)^2)/((x3-x2)^2+(y3-y2)^2)));
P33=log(2*y3/r);
P34=log(sqrt(((x3-x4)^2+(y3+y4)^2)/((x3-x4)^2+(y3-y4)^2)));
P35=log(sqrt(((x3-x5)^2+(y3+y5)^2)/((x3-x5)^2+(y3-y5)^2)));
P36=log(sqrt(((x3-x6)^2+(y3+y6)^2)/((x3-x6)^2+(y3-y6)^2)));
P41=log(sqrt(((x4-x1)^2+(y4+y1)^2)/((x4-x1)^2+(y4-y1)^2)));
P42=log(sqrt(((x4-x2)^2+(y4+y2)^2)/((x4-x2)^2+(y4-y2)^2)));
P43=log(sqrt(((x4-x3)^2+(y4+y3)^2)/((x4-x3)^2+(y4-y3)^2)));
P44=log(2*y4/r);
P45=log(sqrt(((x4-x5)^2+(y4+y5)^2)/((x4-x5)^2+(y4-y5)^2)));
P46=log(sqrt(((x4-x6)^2+(y4+y6)^2)/((x4-x6)^2+(y4-y6)^2)));
P51=log(sqrt(((x5-x1)^2+(y5+y1)^2)/((x5-x1)^2+(y5-y1)^2)));
P52=log(sqrt(((x5-x2)^2+(y5+y2)^2)/((x5-x2)^2+(y5-y2)^2)));
P53=log(sqrt(((x5-x3)^2+(y5+y3)^2)/((x5-x3)^2+(y5-y3)^2)));
P54=log(sqrt(((x5-x4)^2+(y5+y4)^2)/((x5-x4)^2+(y5-y4)^2)));
P55=log(2*y5/r);
P56=log(sqrt(((x5-x6)^2+(y5+y6)^2)/((x5-x6)^2+(y5-y6)^2)));
P61=log(sqrt(((x6-x1)^2+(y6+y1)^2)/((x6-x1)^2+(y6-y1)^2)));
P62=log(sqrt(((x6-x2)^2+(y6+y2)^2)/((x6-x2)^2+(y6-y2)^2)));
P63=log(sqrt(((x6-x3)^2+(y6+y3)^2)/((x6-x3)^2+(y6-y3)^2)));
P64=log(sqrt(((x6-x4)^2+(y6+y4)^2)/((x6-x4)^2+(y6-y4)^2)));
P65=log(sqrt(((x6-x5)^2+(y6+y5)^2)/((x6-x5)^2+(y6-y5)^2)));

```

```

P66=log(2*y6/r);
P=[P11 P12 P13 P14 P15 P16;P21 P22 P23 P24 P25 P26;P31 P32 P33 P34
P35 P36;P41 P42 P43 P44 P45 P46;P51 P52 P53 P54 P55 P56;P61 P62 P63
P64 P65 P66];
V3=v;
V2=v*exp((pi/180)*120i);
V1=v*exp((pi/180)*240i);
V6=v;
V5=v*exp((pi/180)*120i);
V4=v*exp((pi/180)*240i);
V=[V1;V2;V3;V4;V5;V6];
k=1/(2*pi*s);
Q=(inv(P)*V)/k;
Q1=Q(1,1);
Q2=Q(2,1);
Q3=Q(3,1);
Q4=Q(4,1);
Q5=Q(5,1);
Q6=Q(6,1);
d1=sqrt((x-x1).^2+(y1-y).^2);D1=sqrt((x-x1).^2+(y1+y).^2);
d2=sqrt((x-x2).^2+(y2-y).^2);D2=sqrt((x-x2).^2+(y2+y).^2);
d3=sqrt((x-x3).^2+(y3-y).^2);D3=sqrt((x-x3).^2+(y3+y).^2);
d4=sqrt((x-x4).^2+(y4-y).^2);D4=sqrt((x-x4).^2+(y4+y).^2);
d5=sqrt((x-x5).^2+(y5-y).^2);D5=sqrt((x-x5).^2+(y5+y).^2);
d6=sqrt((x-x6).^2+(y6-y).^2);D6=sqrt((x-x6).^2+(y6+y).^2);
Ex=k.*(Q1.*(x-x1).*(1./d1.^2-1./D1.^2)+Q2.*(x-x2).*(1./d2.^2-
1./D2.^2)+ Q3.*(x-x3).*(1./d3.^2-1./D3.^2)+Q4.*(x-x4).*(1./d4.^2-
1./D4.^2)+Q5.*(x-x5).*(1./d5.^2-1./D5.^2)+ Q6.*(x-x6).*(1./d6.^2-
1./D6.^2));
Ey=k.*(Q1.*((y-y1)./d1.^2-(y1+y)./D1.^2)+Q2.*((y-y2)./d2.^2-
(y2+y)./D2.^2)+ Q3.*((y-y3)./d3.^2-(y3+y)./D3.^2)+Q4.*((y-y4)./d4.^2-
(y4+y)./D4.^2)+Q5.*((y-y5)./d5.^2-(y5+y)./D5.^2)+ Q6.*((y-y6)./d6.^2-
(y6+y)./D6.^2));
E=sqrt(abs(Ex).^2+abs(Ey).^2)
plot(x,E,'LineWidth',2)
xlabel('Hat Merkezinden Uzaklık (m)')
ylabel('Elektrik Alan (V/m)')

% Tek devre EİH elektrik alan hesabı Matlab Kodları
s=8.854187817*10^(-12);
v= input('Faz Faz gerilimi=')/sqrt(3);
x1=input('x1=');
x2=input('x2=');
x3=input('x3=');
y1=input('y1=');
y2=input('y2=');
y3=input('y3=');
r= input('r(mm)=')*10^(-3); %iletken Kesiti
x=-100:1:100;
y=1;
P11=log(2*y1/r);
P12=log(sqrt(x1^2+4*y2^2)/abs(x1));
P13=log(sqrt((x1-x3)^2+4*y3^2)/((abs(x1)+x3)));
P21=log(sqrt(x1^2+4*y1^2)/abs(x1));
P22=log(2*y2/r);
P23=log(sqrt(x3^2+4*y3^2)/x3);
P31=log(sqrt((x1-x3)^2+4*y1^2)/((abs(x1)+x3)));
P32=log(sqrt(x3^2+4*y2^2)/x3);
P33=log(2*y3/r);
P=[P11 P12 P13;P21 P22 P23;P31 P32 P33];

```

```

V1=v;
V2=v*exp(-(pi/180)*120i);
V3=v*exp((pi/180)*120i);
V=[V1;V2;V3];
k=1/(2*pi*s);
Q=(inv(P)*V)/k;
Q1=Q(1,1);
Q2=Q(2,1);
Q3=Q(3,1);
d1=sqrt((x-x1).^2+((y1-y).^2));
D1=sqrt((x-x1).^2+(y1+y).^2);
d2=sqrt(x.^2+(y2-y).^2);
D2=sqrt(x.^2+(y2+y).^2);
d3=sqrt((x3-x).^2+(y3-y).^2);
D3=sqrt((x3-x).^2+(y3+y).^2);
Ex=k.*(Q1.*(x-x1).*(1./d1.^2-1./D1.^2)+Q2.*(x).*(1./d2.^2-1./D2.^2)+
Q3.*(x-x3).*(1./d3.^2-1./D3.^2));
Ey=k.*(Q1.*((y-y1)./d1.^2-(y1+y)./D1.^2)+Q2.*((y-y2)./d2.^2-
(y2+y)./D2.^2)+ Q3.*((y-y3)./d3.^2-(y3+y)./D3.^2));
E=sqrt(abs(Ex).^2+abs(Ey).^2)
plot(x,E,'r','LineWidth',2)
xlabel('Hat Merkezinden Uzaklık (m)')
ylabel('Elektrik Alan (V/m)')

```

### Ek 9. Çift Devre Enerji İletim Hattının Civarında Manyetik Alan Hesaplayan Programın Matlab Kodları

```

clear;
s=1.256637061*10^(-6);      %Havanın manyetik geçirgenliği
I=input('I=');;;
x1=input('x1=');
x2=input('x2=');
x3=input('x3=');
x4=input('x4=');
x5=input('x5=');
x6=input('x6=');
x7=input('x6=');
y1=input('y1=');
y2=input('y2=');
y3=input('y3=');
y4=input('y4=');
y5=input('y5=');
y6=input('y6=');
y7=input('y7=');
xp=-100:1:100;
yp=1;
i1=I*cos(0)+i*I*sin(0);
i3=I*cos(-120*pi/180)+i*I*sin(-120*pi/180);
i2=I*cos(120*pi/180)+i*I*sin(120*pi/180);
i6=I*cos(0)+i*I*sin(0);
i4=I*cos(-120*pi/180)+i*I*sin(-120*pi/180);
i5=I*cos(120*pi/180)+i*I*sin(120*pi/180);
i7=0;
h1y=i1*(xp-x1)/(2*pi*((xp-x1).^2+(yp-y1).^2));
h1x=-i1*(yp-y1)/(2*pi*((xp-x1).^2+(yp-y1).^2));
h2y=i2*(xp-x2)/(2*pi*((xp-x2).^2+(yp-y2).^2));
h2x=-i2*(yp-y2)/(2*pi*((xp-x2).^2+(yp-y2).^2));
h3y=i3*(xp-x3)/(2*pi*((xp-x3).^2+(yp-y3).^2));
h3x=-i3*(yp-y3)/(2*pi*((xp-x3).^2+(yp-y3).^2));
h4y=i4*(xp-x4)/(2*pi*((xp-x4).^2+(yp-y4).^2));
h4x=-i4*(yp-y4)/(2*pi*((xp-x4).^2+(yp-y4).^2));
h5y=i5*(xp-x5)/(2*pi*((xp-x5).^2+(yp-y5).^2));
h5x=-i5*(yp-y5)/(2*pi*((xp-x5).^2+(yp-y5).^2));
h6y=i6*(xp-x6)/(2*pi*((xp-x6).^2+(yp-y6).^2));
h6x=-i6*(yp-y6)/(2*pi*((xp-x6).^2+(yp-y6).^2));
h7y=i7*(xp-x7)/(2*pi*((xp-x7).^2+(yp-y7).^2));
h7x=-i7*(yp-y7)/(2*pi*((xp-x7).^2+(yp-y7).^2));
hx=(h1x+h2x+h3x+h4x+h5x+h6x+h7x) ;
hy=(h1y+h2y+h3y+h4y+h5y+h6y+h7y) ;
bx=s*hx;
by=s*hy;
b=sqrt(abs(bx).^2+abs(by).^2)
c=sqrt(abs(hx).^2+abs(hy).^2)
plot(xp,b)
xlabel('Hat Merkezinden Uzaklık (m)')
ylabel('Manyetik Alan (µT)')

```

} % Hat koordinatları

} % Akımlar

## ÖZGEÇMİŞ

Orhan Cengiz USTA, 1981 yılında Trabzon' da doğdu. İlköğrenimini Yenibosna İlköğretim Okulu' nda, orta öğrenimini Bakırköy Yahya Kemal Beyatlı Lisesi' nde tamamladı. 1998 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü' nde lisans programına başladı ve 2003 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı' nda yüksek lisans programına başladı. 2005-2007 yılları arasında Turhal Şeker Fabrikası' nda işletme ve bakım mühendisi olarak görev yaptı. 2007 yılında TEİAŞ 10. İletim Tesis İşletme Grup Müdürlüğü' nde kontrol mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir. Yabancı dil olarak iyi düzeyde İngilizce bilmekte olup, evli ve 2 çocuk babasıdır.