

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ FREKANSLI MAGNETİK ALANLAR VE
BİYOLOJİK ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Hülya Sevgi TORAMAN**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2005

**GÜÇ FREKANSLI MAGNETİK ALANLAR VE
BİYOLOJİK ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Hülya Sevgi TORAMAN
(504001104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Haziran 2005

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

HAZİRAN 2005

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmamı yöneten ve bu tezi hazırlamamda bana yardımcı olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kevork MARDİKİYAN'a, çalışmalarım sırasında yardımını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, manevi desteklerini esirgemeyip her zaman yanımda olan sevgili anneme, babama, Murat'a ve kardeşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2005

Hülya Sevgi TORAMAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Elektrikle Enerji Taşıma	1
1.2. Elektrikle Enerji Taşımada Frekans	2
1.3. İletim Hatlarında Kullanılan İletkenler ve Özellikleri	3
1.4. İletim Hatlarında Kullanılan Direkler	6
2. MAGNETİK ALAN TEMEL KAVRAMLARI	10
2.1. Elektrik Yükleri ve Magnetik Alan	10
2.2. Amper Formülü	10
2.3. Stokes Teoremi	11
2.4. Magnetik Akı Yoğunluğu	11
2.5. Maddelerin Magnetik Özellikleri	12
3. MAGNETİK ALAN HESABI	15
3.1. Biot-Savart Yasası	15
3.2. Üç Fazlı 380 kV'luk (Üçlü Demet) Bir Hat Çevresindeki Magnetik Alan ve Magnetik Endüksiyon Hesabı	17
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (SEY) İLE MAGNETİK ALAN HESABI	23
4.1. Genel Bilgi	23
4.2. Denklemlerin Çıkarımı	23
4.3. 380 kV'luk Üçlü Demet İletkenli, Yatay Düzenli Tek Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının SEY İle Bulunması	32
4.4. 380 kV'luk Üçlü Demet İletkenli, Düşey Düzenli Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının SEY İle Bulunması	41

4.5. 380 kV'luk İkili Demet İletkenli, Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının SEY İle Bulunması	44
5. ELEKTRİKLİ ALETLERİN MAGNETİK ALAN DEĞERLERİ	49
5.1. Elektrikli Aletlerin Magnetik Alan Değerlerinin Bulunması İçin Yapılan Çalışmalar	49
6. MAGNETİK ALANLARIN BİYOLOJİK ETKİLERİ	55
6.1. Magnetik Alanların Canlılar Üzerindeki Etkileri Ve Araştırma Sonuçları	58
7. GÜVENLİK STANDARTLARI VE KORUNMA YÖNTEMLERİ	61
7.1. Güvenlik Standartları	61
7.1.1. Çeşitli Ülkelerde Yayınlanan Güvenlik Standartları	62
7.1.1.1. ABD Eyaletleri	62
7.1.1.2. Almanya	63
7.1.1.3. İsveç	64
7.1.1.4. Avusturalya	64
7.1.1.5. İngiltere	65
7.1.2. Uluslararası Radyasyondan Korunma Derneği (IRPA) Tarafından Belirlenen Sınırlar	65
7.1.3. Türkiye'de Yayınlanan Güvenlik Standartları	66
7.1.3.1. Referans Seviyeleri	66
7.1.3.2. Temel Sınırlamalar	68
7.2. Magnetik Alanlardan Korunma Yöntemleri	68
8. SONUÇLAR	70
KAYNAKLAR	73
EK A. Üç Fazlı 380 kV'luk (Üçlü Demet) Bir Hat Çevresindeki Magnetik Alan ve Magnetik Endüksiyonun Hesaplanması	75
EK B. 380 kV'luk Üçlü Demet İletkenli, Düşey Düzenli Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının 400 A, 800 A ve 1000 A İçin Çizilmiş Grafikleri	123
EK C. 380 kV'luk İkili Demet İletkenli, Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının 400 A, 800 A ve 1000 A İçin Çizilmiş Grafikleri	128
ÖZGEÇMİŞ	133

KISALTMALAR

ELF	: Çok Düşük Frekans (Extremely Low Frequency)
EM	: Elektromagnetik
EMA	: Elektromagnetik Alan
EPA	: Amerika Çevre Kurumu (U.S. Environmental Protection Agency)
EPRI	: Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute)
FEMM	: Finite Element Method Magnetics
IRPA	: Uluslararası Radyasyondan Korunma Derneği (International Radiation Protection Association)
ITRI	: Illinois Teknoloji Araştırma Enstitüsü
LCD	: Sıvı Kristal Ekran
RF	: Radyo Frekansı
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Çelik Alüminyum İletkenlerin Akım Taşıma Kapasiteleri.....	5
Tablo 3.1. 380 kV'luk Bir Hat Çevresinde Biot-Savart Yasası İle Hesaplanan Magnetik AlanDeğerleri.....	18
Tablo 3.2. 380 kV'luk Bir Hat Çevresinde Biot-Savart Yasası İle Hesaplanan Magnetik Endüksiyon Değerleri.....	19
Tablo 5.1. Evde kullanılan çeşitli aletlerin arka yüzünde ölçülen mG cinsinden magnetik alan değerleri.....	50
Tablo 5.2. Büroda kullanılan çeşitli aletlerin arka yüzünde ölçülen mG cinsinden magnetik alan değerleri.....	51
Tablo 5.3. En Çok Kullanılan Elektrikli Aletlerin Magnetik Alan Değerleri...	52
Tablo 5.4. Çeşitli Elektrikli Aletlerin Magnetik Alan Değerleri.....	53
Tablo 7.1. ABD'de Eyaletlerdeki elektromagnetik alan standartları.....	63
Tablo 7.2. ELF magnetik alan sınır değerleri için hesaplamalarda kullanılan parametre değerleri.....	64
Tablo 7.3. Avusturalya'daki standartlar.....	65
Tablo 7.4. IRPA Tarafından Belirlenmiş Sınırlar.....	66
Tablo 7.5. İşçiler İçin Magnetik Alan Referans Seviyeleri.....	67
Tablo 7.6. Genel Halk İçin Magnetik Alan Referans Seviyeleri.....	67

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Enerji Taşıma Sistemi	2
Şekil 1.2 : Çelik Alüminyum Örgülü İletken Tipleri	4
Şekil 1.3 : 154 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler	7
Şekil 1.4 : 380 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler	8
Şekil 1.5 : 380 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Tek ve Çift Devre Direkler.....	9
Şekil 3.1 : Üç iletkenli bir sistemde magnetik alan hesaplanması için gerekli vektörel büyüklükler.....	16
Şekil 3.2 : 380 kV'luk üçlü demet iletkenli enerji iletim hattı boyutları.....	17
Şekil 3.3 : A, B, C, D, E, F Noktalarındaki Magnetik Alan Değerlerinin Akıma Göre Değişimi.....	19
Şekil 3.4 : A, B, C Noktalarındaki Magnetik Alan Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi.....	20
Şekil 3.5 : D, E, F Noktalarındaki Magnetik Alan Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi.....	20
Şekil 3.6 : A, B, C, D, E, F Noktalarındaki Magnetik Endüksiyon Değerlerinin Akıma Göre Değişimi.....	21
Şekil 3.7 : A, B, C Noktalarındaki Magnetik Endüksiyon Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi.....	21
Şekil 3.8 : D, E, F Noktalarındaki Magnetik Endüksiyon Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi.....	22
Şekil 4.1 : Silindrsel koordinatlarda bir üçgen eleman.....	24
Şekil 4.2 : 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı..	32
Şekil 4.3 : 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı için oluşturulan SEY ağı.....	33
Şekil 4.4 : 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 200 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	34
Şekil 4.5 : 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	34
Şekil 4.6 : 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	35
Şekil 4.7 : 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 400 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	36
Şekil 4.8 : 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	36
Şekil 4.9 : 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	37

Şekil 4.10	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 800 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	37
Şekil 4.11	: 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	38
Şekil 4.12	: 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	38
Şekil 4.13	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 1000 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	39
Şekil 4.14	: 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	39
Şekil 4.15	: 1000A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	40
Şekil 4.16	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı	42
Şekil 4.17	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı için oluşturulan SEY ağı	42
Şekil 4.18	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 200 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	43
Şekil 4.19	: 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	43
Şekil 4.20	: 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	44
Şekil 4.21	: 380 kV'luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı.....	45
Şekil 4.22	: 380 kV'luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı için oluşturulan SEY ağı.....	45
Şekil 4.23	: 380 kV'luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 200 A için elde edilen magnetik alan dağılımı	46
Şekil 4.24	: 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	47
Şekil 4.25	: 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	47
Şekil B.1	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 400 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	123
Şekil B.2	: 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	124
Şekil B.3	: 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	124
Şekil B.4	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 800 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	125
Şekil B.5	: 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	125

Şekil B.6	: 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	126
Şekil B.7	: 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 1000 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	126
Şekil B.8	: 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	127
Şekil B.9	: 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	127
Şekil C.1	: 380 kV'luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 400 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	128
Şekil C.2	: 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	129
Şekil C.3	: 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	129
Şekil C.4	: 380 kV'luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 800 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	130
Şekil C.5	: 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	130
Şekil C.6	: 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	131
Şekil C.7	: 380 kV'luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 1000 A için elde edilen magnetik alan dağılımı.....	131
Şekil C.8	: 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.....	132
Şekil C.9	: 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi.....	132

SEMBOL LİSTESİ

A	: Vektörel magnetik potansiyel
A_c	: Ağırlık merkezindeki vektörel potansiyel
A_1, A_2, A_3	: Düğüm vektörel potansiyeli
B	: Magnetik akı yoğunluğu
B_r	: Magnetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni
B_z	: Magnetik akı yoğunluğunun eksenel bileşeni
f	: Frekans
H	: Magnetik alan şiddeti
H_{xi}	: Magnetik alanın yatay bileşeni
H_{yi}	: Magnetik alanın düşey bileşeni
I	: Akım
J	: Akım yoğunluğu
L	: Endükleme
Q	: Yük
R	: Direnç
r_i	: Seçilen noktanın iletken olan uzaklığı
r, θ, z	: Silindirik koordinat sistemi
S	: Kesit
S	: Üçgen elemanın alanı
t	: Sıcaklık
W	: Magnetik enerji
X_i, Y_i	: İletken koordinatları
X_L	: Hattın endüktansı
X_p, Y_p	: Seçilen bir P noktasının koordinatları
Δt	: Sıcaklık değişimi
∇	: Nabla (gradyan) operatörü
μ_0	: Boşluğun magnetik geçirgenliği
μ_r	: Maddenin bağıl magnetik geçirgenliği
μ	: Magnetik iletkenlik (permeabilite)
Ψ_m	: Magnetik akı

GÜÇ FREKANSLI MAGNETİK ALANLAR VE BİYOLOJİK ETKİLERİ

ÖZET

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

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

İkinci bölümde, magnetik alan temel kavramları verilmiştir.

Üçüncü bölümde, magnetik alan hesaplamasında kullanılan bir yöntem olan Biot-Savart Yasasından bahsedilmiştir. Bu yöntem ile 380 kV'luk üç fazlı bir yüksek gerilim hattı çevresindeki magnetik dağılımların hattan akan akım değerleri ile, hattan uzaklıkta ve yerden yükseklikte değişimi hesaplanarak incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)(Finite Element Method Magnetism) ile magnetik alan problemlerinin çözümü hakkında bilgi verilmiştir. FEMM 4.0 (Finite Element Magnetism) adlı bir paket sonlu elemanlar yöntemi çözüm programı ile 380 kV'luk yüksek gerilimli enerji iletim hatları çevresindeki magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyon dağılımının çözümü gerçekleştirilmiştir.

İletim hatlarının yanı sıra evlerde ve bürolarda kullanılan elektrikli aletlerin oluşturduğu magnetik alanlarda canlıları etkileyebilmektedir. Elektrikli aletlerin oluşturduğu magnetik alan değerlerine beşinci bölümde yer verilmiştir.

Altıncı bölümde, magnetik alanların canlılar üzerindeki biyolojik etkilerinden bahsedilmiştir.

Yedinci bölümde, çeşitli ülkelerdeki standartlar verilmiştir. Türkiye'deki durum değerlendirilmiş ve güvenlik seviyeleri belirtilmiştir. Ayrıca magnetik alanlardan korunma yöntemleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

Son bölümde ise konu ile ilgili genel değerlendirmeler yapılmıştır.

POWER FREQUENCY MAGNETIC FIELDS AND BIOLOGICAL EFFECTS

SUMMARY

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

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

In the second chapter, the basic magnetic fields equations are given.

Biot-Savart Law is used a method of calculating of magnetic field which has been mentioned in the third chapter. Magnetic distributions of 380kV High Voltage Line have been examined by this methods detailed as below.

Current rates of magnetic distributions,

Alternation of within line and alternation of ground altitude.

In the fourth chapter has been given an information about Finite Element Method Magnetics (FEMM) and solution of magnetic filed problems. Severity of magnetic field and distribution of magnetic induction, which are surroundings of 380kV high voltage transmission lines, has been performed by FEMM 4.0 (Finite Element Magnetics) solution program.

Electrical devices, which are using at houses and in the offices, can occurs magnetic fields. It also effects as like transmission lines. It has been given magnetic field rates, which are occurring by electrical devices, in the fifth chapter.

In the six chapter was mentioned biological effects of magnetic fields on human-being.

In the seventh chapter the standards in many countries are given. The situation in Turkey is summed up and security limits are presented. It also was presented an information about protection methods from magnetic fields in the same part.

The last chapter covers general evaluations about the power frequency magnetic fields.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi çağımızın en önemli enerji kaynaklarından biridir. Teknolojik gelişmeler ve ekonomik kalkınmışlık düzeyine bağlı olarak, elektrikli araç ve gereçlerden yararlanma da hergün biraz daha artmaktadır. Magnetik alanı oluşturan cihazlar günlük yaşantımızda daha fazla yer almakta, elektrik enerjisi iletim ve dağıtım tesislerinin uzunlukları ile transformatör merkezleri sayıları gün geçtikçe artmaktadır. Artan elektrik enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine büyük miktarda enerjinin iletilmesi gerekmektedir.

Büyük miktarda enerjinin uzak mesafelere iletilmesi, gerilim değerinin yükseltilmesi ile mümkün olmaktadır. Yüksek gerilim ve akımdan dolayı enerji iletim hatlarının çevresinde elektromagnetik alanlar meydana gelmektedir.

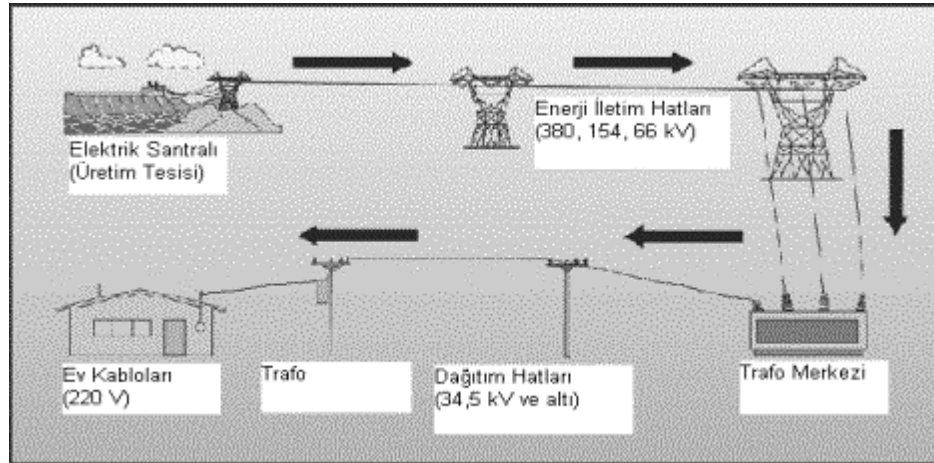
Çevre bilincinin giderek önem kazanması ile enerji iletim hatlarının çevresinde alçak frekanslı magnetik alanların, çevredeki bitki örtüsü, hayvanlar ve insanlar üzerindeki biyolojik etkisinin belirlenmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [1, 2].

1.1. Elektrikle Enerji Taşıma

Enerji üretim merkezlerinin doğal kaynakların bulunduğu yerlerde tesis edilmesi zorunlu olduğundan, Türkiye’de elektrik enerjisi genel olarak doğu ve güneydoğu bölgelerinde üretilmekte, tüketim ise sanayiinin ve yerleşimin daha yoğun olduğu batı bölgelerinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle enerjinin, genel olarak, doğudan batıya taşınması enerji iletim hatları ile gerçekleştirilmektedir. Bir ülkenin tamamının ya da belirli bölgelerinin elektrik enerji gereksinmesini karşılayabilecek bir biçimde üretim ile tüketim merkezleri arasındaki enerji alış verişini sağlayan enerji taşıma sistemine “Enterkonnekte Sistemi” denilir [2, 6].

Ülkemizde elektrik, genel olarak iki gerilim düzeyinde taşınmaktadır. Bunlardan ilki yüksek gerilim düzeyi olarak tanımlanan 66 kV, 154 kV ve 380 kV gerilimli iletim hatları grubudur. Bu hatlar, üretim merkezlerindeki elektrik enerjisini, tüketim merkezlerindeki ana transformatör merkezlerine taşırlar. Ancak 66 kV gerilimli hatlar artık ülkemizde uzun bir süreden beri tesis edilmemektedir. İkinci gerilim düzeyi ise orta gerilim hattı olarak tanımlanan 34,5 kV ve daha düşük gerilimli 6 kV, 10 kV ve 15 kV gerilimli dağıtım hatlarıdır. Bu hatlar, transformatör merkezlerindeki elektrik enerjisini daha düşük gerilimli transformatörlere ve/veya evlerimize ve iş yerlerimize ulaştırmaktadır. Şematik olarak Şekil 1.1.'de gösterilmiştir [3].

Ülkemizde mevcut yüksek gerilim hattı uzunluğu 38.295 km, orta gerilim hattı uzunluğu 285.094 km ve alçak gerilim hattı uzunluğu ise 407.000 km'dir. Ayrıca 485 adet yüksek gerilim transformatör merkezi ve 204.119 adet orta gerilim transformatör merkezi bulunmaktadır (Mayıs 2001) [3].



Şekil 1.1. Enerji Taşıma Sistemi [3]

1.2. Elektrikle Enerji Taşımada Frekans

Bugün kullanılan standart frekanslar, Amerika'da 60 Hz ve Avrupa ülkeleri ile Türkiye'de 50 Hz'dir.

Frekansın 50 ya da 60 Hz seçilişinin birbirlerine göre üstünlükleri ve yararları vardır. Örneğin 60 Hz frekanslı akım ile çalışan motorlarda döner alanın hızı daha büyük olduğundan, motor devir sayıları daha yüksek olmaktadır. Ayrıca 60 Hz'lik

transformatörlerin boyutları 50 Hz'lik trafolarinkinden daha küçük olmakta ve %10-15 arası malzeme arttırımı yapılabilmektedir. Çünkü bir trafoya uygulanan gerilimin frekansı toplam magnetik akı yoğunluğu ile ve magnetik akı yoğunluğu da trafonun çekirdek kesiti ile doğru orantılıdır.

60 Hz frekansın en büyük sakıncası, uzak mesafe enerji hatlarında kendini gösterir. Çünkü gerilim frekansının büyük olması hattın endüktansını ($X_L = 2\pi fL$) arttırmakta ve dolayısıyla enerji kayıpları yükselmektedir [6].

1.3. İletim Hatlarında Kullanılan İletkenler ve Özellikleri

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

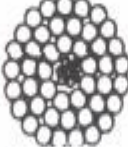
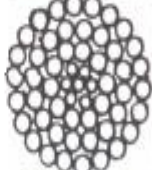
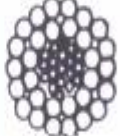
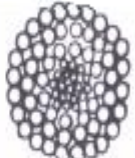
Spiral şeklinde örgülü yapılmış iletkenlerde, her bir damarın yüzeyinde meydana gelen kir ve oksit tabakasından dolayı akım, damardan damara değil, spiral sarılmış örgünün içinde akar. Bu nedenle örgülü iletkenlerin elektriksel hat sabitlerinden direnç ve empedansları dolayısıyla endüktif reaktansları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

Alüminyum iletkenliğinden çeliğin dayanıklılığından yararlanmak üzere çift metalli St-Al (çelik özlü alüminyum) iletkenler yapılmıştır. Örgülü yapılan bu iletkenlerde Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi ortada galvanizli çelik göbek, etrafında da alüminyum damarlar bulunur. Damarların tamamı aynı çap ve kesittedir [4, 5].

Hava hatlarında kullanılan iletkenlerin cinsi ne olursa olsun kesit değerine göre ancak belirli akım değerlerini taşıyabilirler. Teorik olarak hava hattı iletkenlerinden çıplak oldukları için akkor hale gelinceye kadar akım geçirmek mümkünse de belirli akım değerlerinin aşılması durumunda $R I^2 t$ joule'lük elektrik enerjisi $0.24 R I^2 t$ kalori ısıya dönüşmesi durumunda iletkenler ortam sıcaklığını aşacak şekilde ısınmaya başlarlar. St-Al iletkenlerin akım taşıma kapasiteleri Tablo 1.1.'de gösterilmiştir [4].

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



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

Şekil 1.2. Çelik Alüminyum Örgülü İletken Tipleri [5]

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

Tablo 1.1. Çelik Alüminyum İletkenlerin Akım Taşıma Kapasiteleri [4]

NORM ADI	AWG ya da C Mil	KESİT[mm ²]		TOPLAM ÇAP [mm]	DİRENÇ [Ohm/km]			AMPER(*) KAPASİTESİ [A]
		ALÜMİNYUM	TOPLAM		DC 20°C	AC		
						25°C	75°C	
SWAN	4	21.16	24.71	6.35	1.327	1.355	1.715	145
SWANATE	4	21.16	26.52	6.63	1.313	1.338	1.738	145
ROBİN	1	42.39	49.38	9.02	0.662	0.676	0.889	220
RAVEN	1/0	53.48	62.39	10.11	0.524	0.538	0.715	255
PİGEON	3/0	85.03	99.23	12.75	0.330	0.338	0.469	340
PENGÜİN	4/0	107.23	125.10	14.30	0.262	0.270	0.384	390
PARTRIDGE	266800	135.16	157.16	16.31	0.210	0.215	0.257	490
OSTRİCH	300000	152.00	176.77	17.27	0.187	0.190	0.228	530
ORİOLE	336400	170.45	210.26	18.82	0.165	0.169	0.202	575
LARK	397500	201.42	248.39	20.47	0.140	0.143	0.172	640
HAWK	477000	241.68	281.03	21.79	0.117	0.120	0.144	720
EAGLE	556500	282.00	347.81	24.21	0.100	0.103	0.123	800
TEAL	605000	306.58	376.45	25.25	0.092	0.094	0.113	840
EGRET	636000	322.26	295.74	25.88	0.087	0.090	0.108	870
REDWİNG	715500	362.58	445.22	27.46	0.078	0.080	0.095	940
DRAKE	795000	402.84	468.45	28.14	0.070	0.073	0.087	990
CANARY	900000	456.06	515.16	29.51	0.062	0.065	0.077	1050
CARDİNAL	954000	483.42	546.22	30.39	0.058	0.061	0.073	1090
GRACKLE	1192500	604.26	688.77	33.86	0.047	0.050	0.059	1260
MARTİN	1351500	684.84	771.55	36.17	0.042	0.044	0.052	1370
PARROT	1510500	765.42	862.32	38.25	0.037	0.040	0.047	1470
*: Bu değerler güneş etkisi yokken emisyon faktörü E=0.5, rüzgar hızı 0.6 m/s, çevre sıcaklığı 25°C ve iletken sıcaklığı max. 75°C için verilmiştir.								

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

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

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

iletkenin taşıyacağı akımı belirleyen sıcaklık değişimidir [5]. Buna tekabül eden akım iletkenin anma akımı olup bu akım değerleri iletken imal eden firmalar tarafından veya VDE yönetmeliği tarafından belirlenmiştir.

İletkenlerin cinsine göre anma akım taşıma cetvelleri varsa iletken kesitlerinin belirlenmesinde bunlardan yararlanılır. Bu tür cetvellerin bulunmaması durumunda pratik olarak kesit tayin etmeye yarayan veya bilinen bir kesittir. Taşınacak akım yönünden uygun olup olmadığını belirlemeye yarayan değişik esaslara dayalı ampirik ifadeler geliştirilmiştir. Bunlardan en çok uygulanan ifadeye göre kesiti S (mm²) olan iletkenin Δt °C'lık sıcaklık farkı için taşıyacağı akımın yaklaşık değerini hesaplamaya yarayan ifade

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

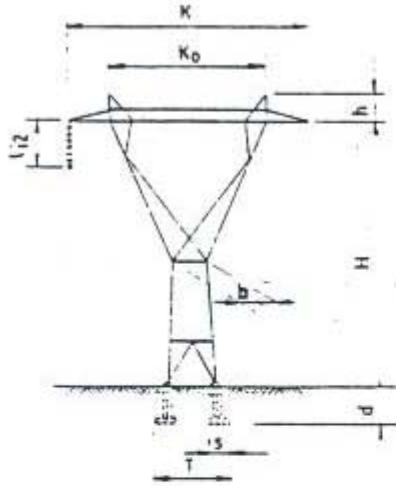
dır [5]. İletken St-Al ise toplam kesit, Cu veya Al ise anma kesit dikkate alınacaktır.

1.4. İletim Hatlarında Kullanılan Direkler

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

Türkiye’de kullanılan 154 kV’luk tek devre Hawk ve Partridge iletkenli ve 380 kV’luk tek devre ikili demet Cardinal iletkenli direklerin dizayn ve boyutları Şekil 1.3 ve Şekil 1.4.’te, 380kV’luk tek ve çift devre direklerde Şekil 1.5.’te gösterilmiştir [4].

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



DİREK	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
BOYUT (metre)	Tasiyıcı	Ağır Tasiyıcı	Durdurucu	Nihayet
h	1,70	2,50	2,35	4,60
H(x)	20,60	19,60	17,15	17,15
K	13,60	13,60	11,80	14,30
K ₀	8,90	8,30	7,30	8,90
l ₁₂	2,20	2,20	-	-
d	2,10	2,40	2,70	2,95
s	1,15	1,25	1,70	1,90
T	4,83	5,83	7,00	8,10
α	1,82	2,10	2,40	2,90
Eğim 210 B	0,126977	0,180258	0,220096	0,256155

(x) H Yüksekliği direklerin 0 boylarına göre verilmiş olup,

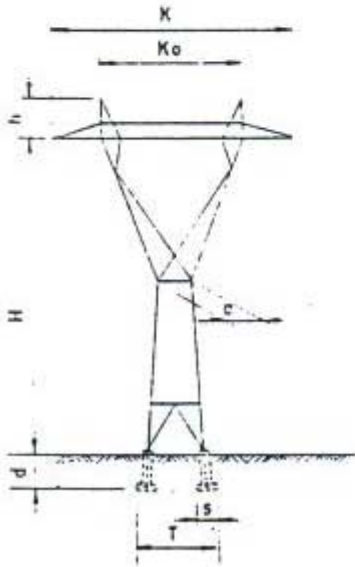
- A₂ C₂ D₂ Tipi direklerde:

- 6 ile +8 boyları arasında 3'er m.

B₂ Tipi direklerde:

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

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



DİREK	S ₁	L ₁	O ₁	K ₁
BOYUT (metre)	Tasiyıcı	Ağır Tasiyıcı	Durdurucu	Nihayet
h	2,35	2,35	4,05	4,25
H(x)	18,80	18,80	15,75	15,75
K	13,70	13,70	12,20	13,70
K ₀	8,20	8,20	7,30	8,60
d	1,90	2,10	2,50	2,80
s	1,00	1,05	1,25	1,25
T	4,64	4,62	5,29	6,21
α	1,81	1,81	2,057	2,577
Eğim 210 B	0,079767	0,079787	0,097968	0,115746

(x) H Yüksekliği direklerin 0 boylarına göre verilmiş olup,

- S₁, L₁ Tipi direklerde:

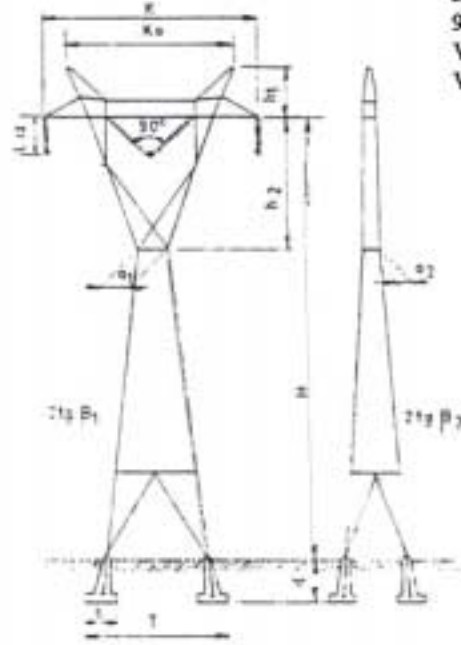
- 3 ile +9 boyları arasında 3'er m.

- O₁, K₁ Tipi direklerde:

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

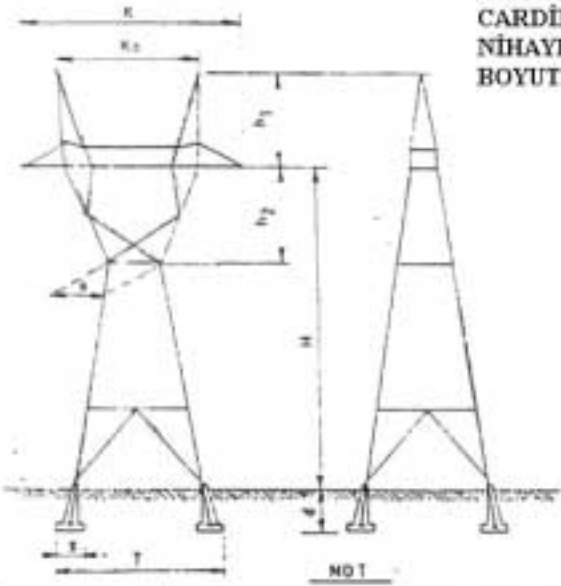
Şekil 1.3. 154 kV'luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler [4]

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



DİREK Boyut (metre)	A	B	C
h_1	3,92	4,225	4,375
h_2	10,50	10,50	10,50
l_{12}	4,00	4,00	4,00
H (*)	35,75	35,75	35,75
K	18,00	18,80	21,00
K_0	13,88	14,52	15,374
d (xx)	2,75	2,80	3,05
s (xx)	1,90	2,01	2,20
T (xx)	13,47	14,83	15,09
α_1	3,50	2,50	2,50
α_2	1,60	1,60	1,60
Eğim 2tg B	0,209714	0,241942	0,241942
Eğim 2tg B	0,134171	0,125829	0,174171

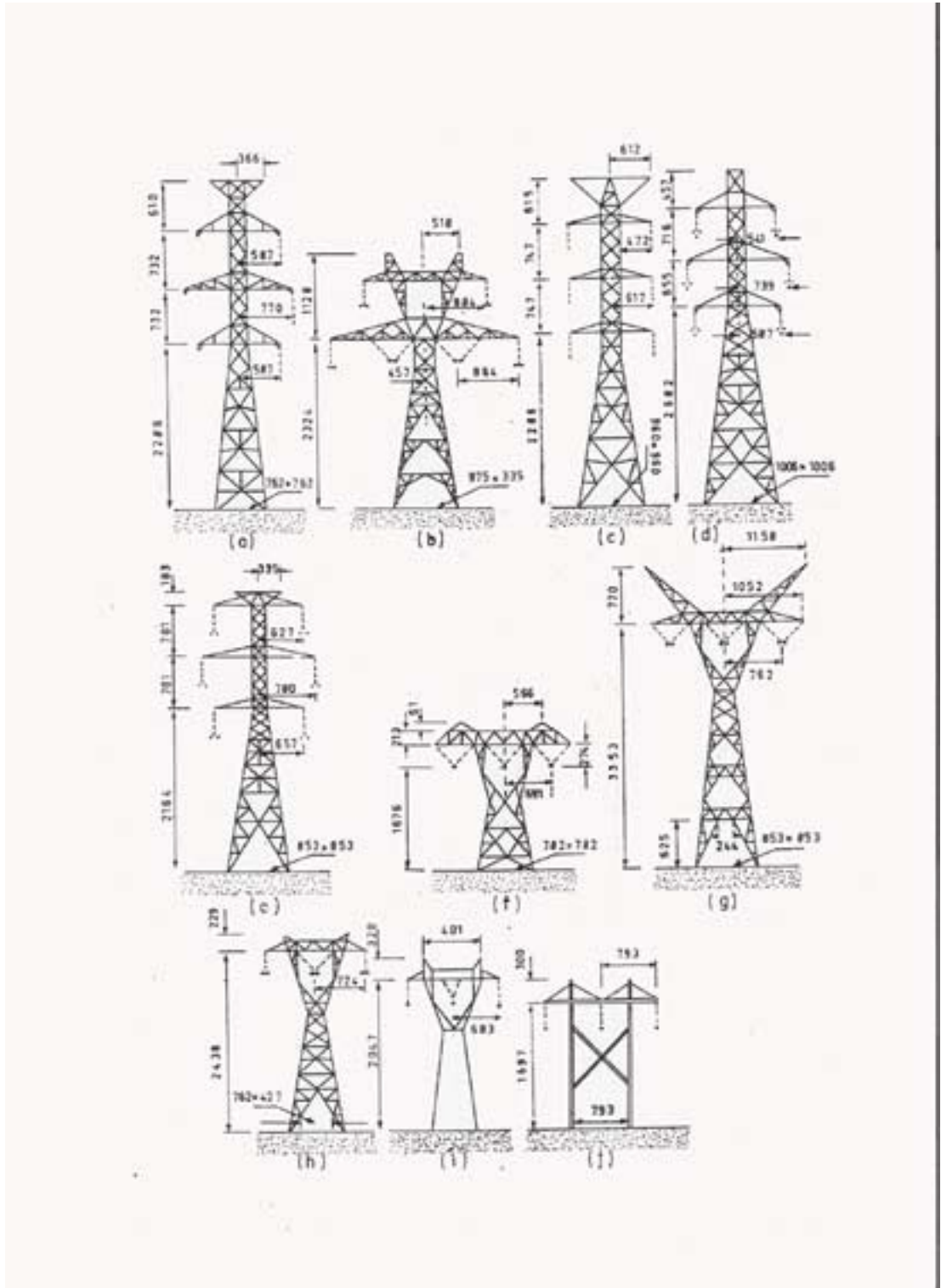
**380kV'LUK TEK DEVRE 954 MCM
CARDİNAL İLETKENLİ DURDURUCU VE
NİHAyet DİREKLERİN DİZAYN VE
BOYUTLARI**



DİREK Boyut (metre)	D	E	F
h_1	10,00	10,00	10,00
h_2	11,00	11,00	11,00
H (*)	31,75	31,75	31,75
K	20,00	22,60	24,00
K_0	14,574	16,574	18,574
d (xx)	2,60	3,15	3,20
s (xx)	1,90	2,50	2,90
T (xx)	10,58	21,19	21,61
α	5,50	6,00	6,00
Eğim 2tg B	0,354615	0,363692	0,363692

- (*) H Yüksekliği direklerin + 5 gövdelerine ve + 3 ayaklarına göre verilmiş olup, 0 ve +12 gövdelerine göre 5m artar veya azalır. Ayrıca direklerin ayak boyuları +1 ile +9 arasında değişmekte olup, H yüksekliği ayak boylarına göre 1'er m azalır.
- (xx) d, s, T boyutları aynı zemindeki temel projelerine göre verilmiştir.

Şekil 1.4. 380 kV'lık Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direkler [4]



Şekil 1.5. 380 kV’luk Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Tek ve Çift Devre Direkler [4]

2. MAGNETİK ALAN TEMEL KAVRAMLARI

2.1. Elektrik Yükleri ve Magnetik Alan

Her bir madde pozitif ve negatif elektrik yüklerinden oluşur. En küçük yük birimleri ise atomu oluşturan elektron ve protonlardır. Elektrik yükü, bir cismin ya da maddesel bir sistemin temel elektriksel yüklerinin cebirsel toplamıdır. Elektrik yükü birimi coulomb'dur [C]. Temel elektrik yükü, bir protonun taşıdığı $e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ 'lik elektrik yük miktarıdır. Bir elektronun elektrik yükü $-e$ 'dir.

Durgun ve hareket eden yükler durmakta ya da hareket eden diğer yükler üzerinde kuvvet uygular. Bu kuvvet alanlarına elektrik alan ve magnetik alan denir. Yükler hareketsiz olduğunda ortaya çıkan alan statik elektrik alan, yükler sabit hızla hareket ederken oluşturdıkları alan statik magnetik alan olarak isimlendirilir. İvmelenmiş yükler elektrik ve magnetik alanların zamanla değiştiği elektromagnetik alanları oluşturur. Elektromagnetik alana örnek olarak, içindeki ivmeli yükler nedeni ile radyo istasyonlarından yayınlanan radyo işaretlerini verebiliriz. Elektrik devreleri, transistörler, kapasitörler, elektrik makinaları, jeneratörler v.s. elemanların içerisinde ve dışarısında da magnetik alanlar mevcuttur [10].

2.2. Amper Formülü

Magnetik alan vektörel bir büyüklüktür. Sabit bir eksen boyunca salınımlar (tek fazlı kaynak) veya bir düzlemde elips şeklinde dönmeler (çok fazlı veya pekçok senkronize kaynaklar) yapar. Magnetik alan şiddeti, H , metre başına amper olarak ifade edilir (A/m) [16].

Magnetik alanlarda akım dağılımlarının simetrik olması durumunda problem çözümlerini kolaylaştıran bir bağıntı mevcut olup Amper Çevre Kanunu olarak

adlandırılır. Bu kurala göre H magnetik alanının kapalı bir çevre boyunca integrali bu kapalı çevrenin içinde kalan akıya eşittir.

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I \quad (2.1)$$

ile ifade edilir [10, 13].

2.3. Stokes Teoremi

Stokes teoremi sayesinde $\mathbf{H} \cdot d\mathbf{L}$ çevre integrali, rot H'nın yüzey integraline bağlanır.

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \int_S (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} \quad (2.2)$$

olarak ifade edilir. Burada “S” yüzeyi çizgisel integraldeki C çevresinin içinde kalan bölgedir [10].

2.4. Magnetik Akı Yoğunluğu

Statik magnetik alanları işlerken şimdiye kadar H (A/m) magnetik alan şiddeti ile ilgilenmiştik. B ile göstereceğimiz ve boşlukta

$$B = \mu_0 \cdot H \text{ [(Wb/m}^2\text{) veya (T)]} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilen magnetik akı yoğunluğu Tesla veya metre kare başına weber birimi ile ifade edilir [10]. Magnetik endüksiyon olarak da bilinen magnetik akı yoğunluğu, özellikle biyolojik etkileri açısından magnetik alanları karakterize etmek için kullanılır. Magnetik malzemeler için, B ve H alanları arasında çok önemli farklılıklar mevcuttur. Fakat boşlukta ve pratiklik yönünden biyolojik dokularda B/H oranı sabittir. Bu oran μ_0 boşluğun magnetik geçirgenliğidir. Birimi H/m, Henry/metre'dir [10, 16].

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ (H /m)} \quad (2.4)$$

Magnetik malzemeler için ise, μ magnetik iletkenlik(permeabilite) ve μ_r maddenin bağıl magnetik geçirgenliği olmak üzere;

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.5)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (2.6)$$

Magnetik akı ise;

$$\Psi_m = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{Wb}) \quad (2.7)$$

ile gösterilir [10].

Magnetik malzemelerde, magnetik kutuplar izole edilemediği için magnetik alan çizgilerinin başlayıp son bulduğu magnetik yükler yoktur. Bu nedenle magnetik akılar için;

$$\Psi_m = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{Wb}) = Q \quad (2.8)$$

yazılır [10, 11].

2.5. Maddelerin Magnetik Özellikleri

Birçok pratik uygulamalarda, maksada uygun olacak biçimde magnetik alan üreten özel bobinlere ihtiyaç duyulur. Özellikle mümkün olduğunca kuvvetli magnetik alanı, bobinden geçebilecek en küçük akımla sağlanması istenir. Akım ile magnetik alan orantılı olduğundan bu düşüncelerin gerçekleştirilmesi için yüksek magnetik geçirgenlikli malzemeler aranır. Bu tür geçirgenliği yüksek olan malzemeler “ferromagnetik malzeme” olarak adlandırılır.

Bir malzemenin atomlarındaki hareketli yüklerin dış magnetik alanla etkileşmesine bağlı olarak, B magnetik akısı, magnetik geçirgenliği boşluğa göre büyükse artar, küçükse azalır. Maddelerin içinde oluşan magnetik alanlar genellikle elektronların yörüngelerde dolaşmalarından ve kendi eksenleri etrafında dönmelerinden (spin) kaynaklanır [10].

Bazı malzemelerde elektronların yörünge ve spin hareketlerinden kaynaklanan magnetik alanlar birbirini nötrleştirir. Bunlara diyamagnetik malzemeler denir. Diyamagnetik maddelerde; bağıl magnetik geçirgenlik birden küçüktür ($\mu_r < 1$, $\mu < \mu_0$) ve maddenin bulunduğu yerde hüküm süren magnetik alan şiddetine (H) bağlı değildir. Bakır, gümüş, çinko, su ve hidrojen bu sınıfa girerler. Diyamagnetik maddelerde μ_r birden çok az küçük olduğundan pratikte $\mu_r = 1$ ve dolayısı ile $\mu = \mu_0$ alınır. Örneğin, bakırda $\mu_r = 1-12 \cdot 10^{-6}$ kadardır. Diyamagnetik maddelerin bağıl geçirgenliği sıcaklığa da bağlı değildir [7, 10].

Bazı malzemelerde dışarıdan uygulanan magnetik alanla, elektronlar ve kuvantum mekaniksel kuvvetlerin etkileşmesi sonucu denge hafifçe bozulur, yörünge ve spin hareketlerinin oluşturduğu iç magnetik alanlar nötrleşmez. Paramagnetik malzemelerde elektronun yörünge ve spin hareketlerinden oluşan magnetik alanlar birbirlerini nötrleştirmezler. Paramagnetik maddelerin bağıl geçirgenliği birden büyüktür ($\mu_r > 1$, $\mu > \mu_0$) ve diyamagnetik maddelerde olduğu gibi alan şiddetine bağlı değildir. Hava, tahta, alüminyum, platin ve oksijen bu sınıfa girerler. Bu maddelerde de μ_r birden çok az büyük olduğundan pratikte $\mu = \mu_0$ alınır. Örneğin, havada $\mu_r = 1+0.35 \cdot 10^{-6}$ kadardır. Paramagnetik maddelerin bağıl geçirgenliği genel olarak sıcaklığa bağlıdır [7, 10].

Ferromagnetik maddeler, diyamagnetik ve paramagnetik maddelerden tamamen farklıdır. Bu sınıfa giren maddelerin başında bu sınıfa ismini de veren demir gelir. Nikel ve kobalt madenleri ile bazı alaşımlar da bu sınıfa girer.

Ferromagnetik maddelerde, μ_r birden çok büyük olan değerler alabilir. Pratikte ferromagnetik malzemelerin bağıl geçirgenliği 10000'e ve daha yüksek değerlere çıkabilir. Bu maddelerde μ_r sabit olmayıp maddenin bulunduğu yerde hüküm süren magnetik alanın şiddetine bağlı olarak değişir. Özellikleri sıcaklığa bağlı olup 770°C civarında paramagnetik hale geçerler.

Magnetik geçirgenliği büyük olan ferromagnetik maddelere “magnetik malzeme” de denir. Diyamagnetik ve paramagnetik maddelere de magnetik olmayan malzeme denir.

Magnetik özellikleri itibari ile; diyamagnetik, paramagnetik ve ferromagnetik malzemelerden başka üç tip malzeme daha vardır. Bunlar; antiferromagnetik, ferrimagnetik ve süperparamagnetik malzemelerdir. Bunlardan antiferromagnetik malzemeler, dış alanlardan çok az etkilenirler ve düşük sıcaklıklarda mevcuttur.

Ferrimagnetik malzemeler ise ferromagnetikler kadar olmazsa bile dış alana büyük tepkide bulunurlar. Süperparamagnetik malzemeler ise non-ferromagnetik bir ortamda ferromagnetik parçacıkların toplanması ile oluşur. Bu maddeler görüntü veya ses kayıtlarında kullanılan magnetik teyplerde kullanılır [6, 7, 10].

3. MAGNETİK ALAN HESABI

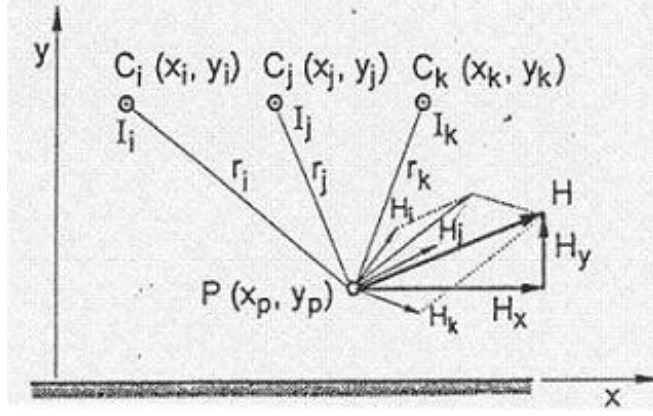
3.1. Biot-Savart Yasası

İçinden akım akan bir iletkenin çevresinde magnetik alan oluşur. Magnetik alan içerisinde bulunan iletken ya da dielektrik cisimlerde magnetik alandan dolayı iç akımlar indüklenir. İndüklenen akımların çevresel ve özellikle de canlılar üzerindeki biyolojik etkileri yapılan araştırmalar sonucunda ortaya çıkartılmıştır. Bu konuda geliştirilen standartlarda magnetik alanların sınır değerleri tespit edilmiştir. Magnetik alan kaynaklarının en önemlilerinden biri de enerji iletim hatlarıdır. Yeni kurulacak iletim hatlarının dizayn aşamasında magnetik alan şiddetinin standartlarda öngörülen değerlerin üzerinde olup olmadığının tespit edilmesi için magnetik alan hesabı büyük önem kazanmaktadır.

Magnetik alanı hesaplamak için Biot-Savart yasasından yararlanılabilir. Bu yasaya göre içinden I akımı akan bir iletkenin r uzaklığındaki bir noktada magnetik alan şiddeti;

$$H = \frac{I}{2 \pi r} \text{ (A/m)} \quad (3.1)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Bu hesap ortamda içinden akım akan çok sayıda iletken bulunduğunda her bir iletkenin geçen akımın magnetik alana katkısı göz önüne alınarak yapılır. Şekil 3.1’de üç fazlı yüksek gerilim hatlarında olduğu gibi üç iletkenli bir sistemin magnetik alan hesabında kullanılan büyüklükler gösterilmiştir. Magnetik alan vektörel bir büyüklüktür. Şekil 3.1’den görüldüğü gibi her bir iletkenindeki akımın bir P noktasında yarattığı magnetik alanların bileşkesi, yatay ve düşey bileşenleri ile P noktasındaki magnetik alanı verir [10-12].



Şekil 3.1. Üç iletkenli bir sistemde magnetik alan hesaplanması için gerekli vektörel büyüklükler

Koordinatları x_p, y_p olan bir P noktasının, koordinatları x_i, y_i olan bir noktaya (iletkene) olan uzaklığı;

$$r_i = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \quad (3.2)$$

olur. Koordinatları (x_i, y_i) olan iletkenlerden akan I_i akımının, bir $P(x_p, y_p)$ noktasında oluşturduğu magnetik alanın H_{xi} yatay ve H_{yi} düşey bileşenleri;

$$H_{xi} = \frac{I_i}{2\pi} \frac{y_p - y_i}{r_i^2} \quad (3.3)$$

$$H_{yi} = \frac{I_i}{2\pi} \frac{x_p - x_i}{r_i^2} \quad (3.4)$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Magnetik alanın x bileşeni yere paralel, iletkene diktir, y bileşeni ise düşey bileşendir. Buna göre n iletkenli bir sistemin (hattın) herhangi bir noktada oluşturduğu H bileşke magnetik alan şiddeti;

$$H = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n H_{xi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n H_{yi}\right)^2} \quad (3.5)$$

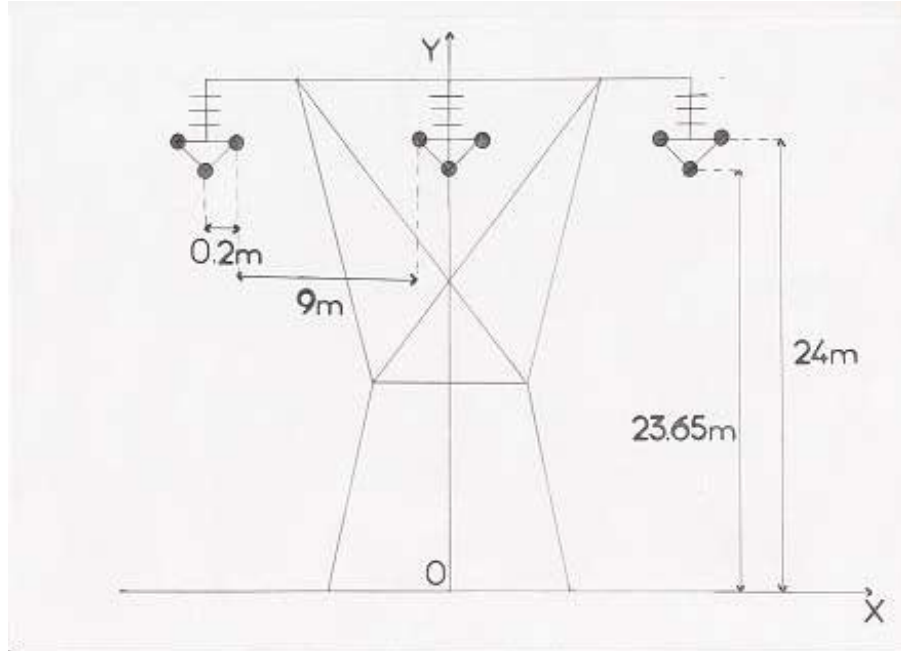
ve B magnetik akı yoğunluğu (veya magnetik endüksiyon)

$$B = \mu_0 \cdot H \text{ (Wb/m}^2 \text{) veya (T)} \quad (3.6)$$

olur. Bu eşitlikte $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ (H / m)}$ boşluğun (havanın) magnetik geçirgenliğidir [1, 10-12].

3.2. Üç Fazlı 380 kV'luk (Üçlü Demet) Bir Hat Çevresindeki Magnetik Alan ve Magnetik Endüksiyon Hesabı

Bu bölümde 380 kV'luk, üç fazlı, üçlü demet bir yüksek gerilim hattı için çevresindeki magnetik dağılımlarının hattan akan akım değerleri ile, hattın uzaklıkta ve yerden yükseklikte değişimi hesaplanarak incelenmiştir.



Şekil 3.2. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli enerji iletim hattı boyutları

Aşağıda koordinatları verilen kısmi iletkenlerin:

$H_1(-9.6;24)$; $H_2(-9.4;23.65)$; $H_3(-9.2 ; 24)$

$H_4(-0.2;24)$; $H_5(0 ; 23.65)$; $H_6(0.2 ; 24)$

$H_7(9.2 ;24)$; $H_8(9.4;23.65)$; $H_9(9.6 ; 24)$

Her birinden 200, 400, 800, 1000'er amper akım akması durumunda

$A(0 ; 1.2)$; $B(0 ; 1.6)$; $C(0 ; 1.8)$

$D(14.6 ; 1)$; $E(19.6 ; 1)$; $F(24.6 ; 1)$

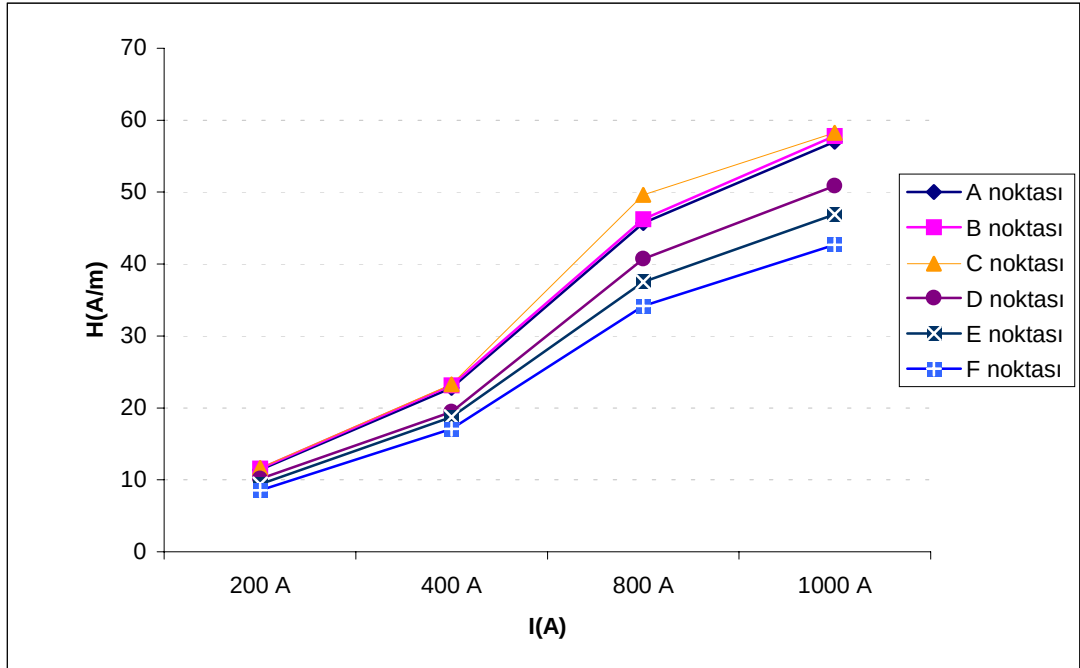
noktalarındaki magnetik alan ve endüksiyon hesabı (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) ve (3.6) denklemleri ile yapılırsa, tablo 3.1 ve tablo 3.2'de ki sonuçlar elde edilir. Yapılan hesapların ayrıntıları Ek A'da verilmiştir.

Tablo 3.1. 380 kV'luk Bir Hat Çevresinde Biot-Savart Yasası İle Hesaplanan Magnetik Alan Değerleri

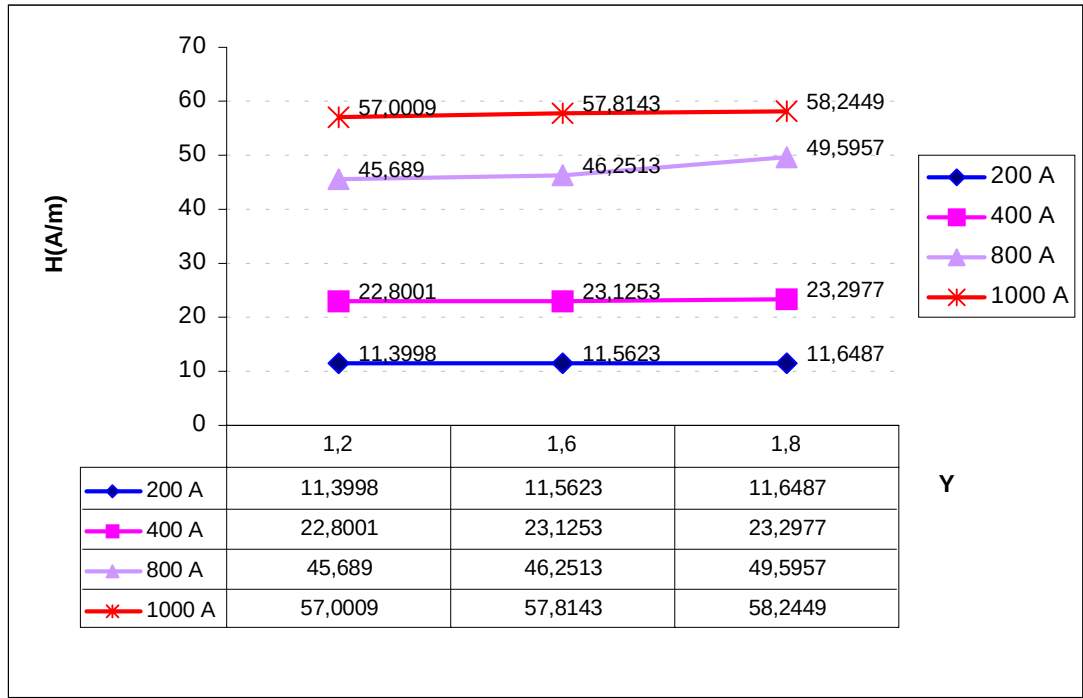
	200 A	400 A	800 A	1000 A
A(0;1.2) için H_A (A/m)	11,3998	22,8001	45,6890	57,0009
B(0;1.6) için H_B (A/m)	11,5623	23,1253	46,2513	57,8143
C(0;1.8) için H_C (A/m)	11,6487	23,2977	49,5957	58,2449
D(14.6;1) için H_D (A/m)	10,1714	19,4719	40,7140	50,8598
E(19.6;1) için H_E (A/m)	9,3800	18,7610	37,5227	46,9039
F(24.6;1) için H_F (A/m)	8,5405	17,0776	34,1557	42,6948

Tablo 3.2. 380 kV’luk Bir Hat Çevresinde Biot-Savart Yasası İle Hesaplanan
Magnetik Endüksiyon Değerleri

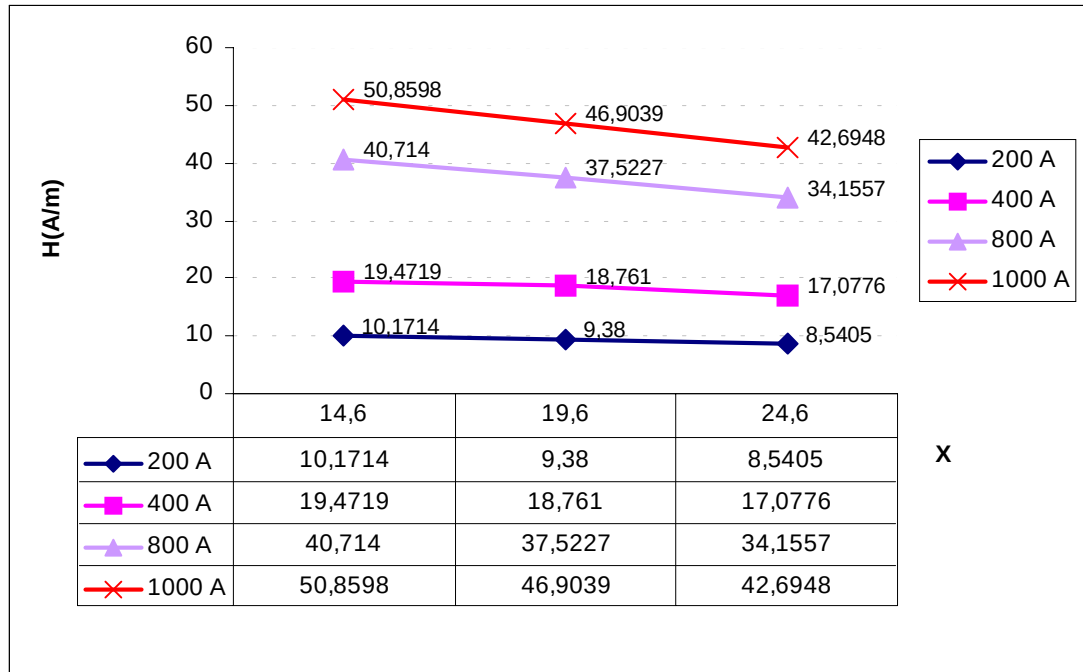
	200 A	400 A	800 A	1000 A
A(0;1.2) için B_A (μT)	14,32	28,65	57,41	71,629
B(0;1.6) için B_B (μT)	14,5296	29,0601	58,1210	72,65
C(0;1.8) için B_C (μT)	14,638	29,276	62,323	73,192
D(14.6;1) için B_D (μT)	12,781	24,469	51,162	63,912
E(19.6;1) için B_E (μT)	11,787	23,575	47,152	58,941
F(24.6;1) için B_F (μT)	10,732	21,460	42,921	53,651



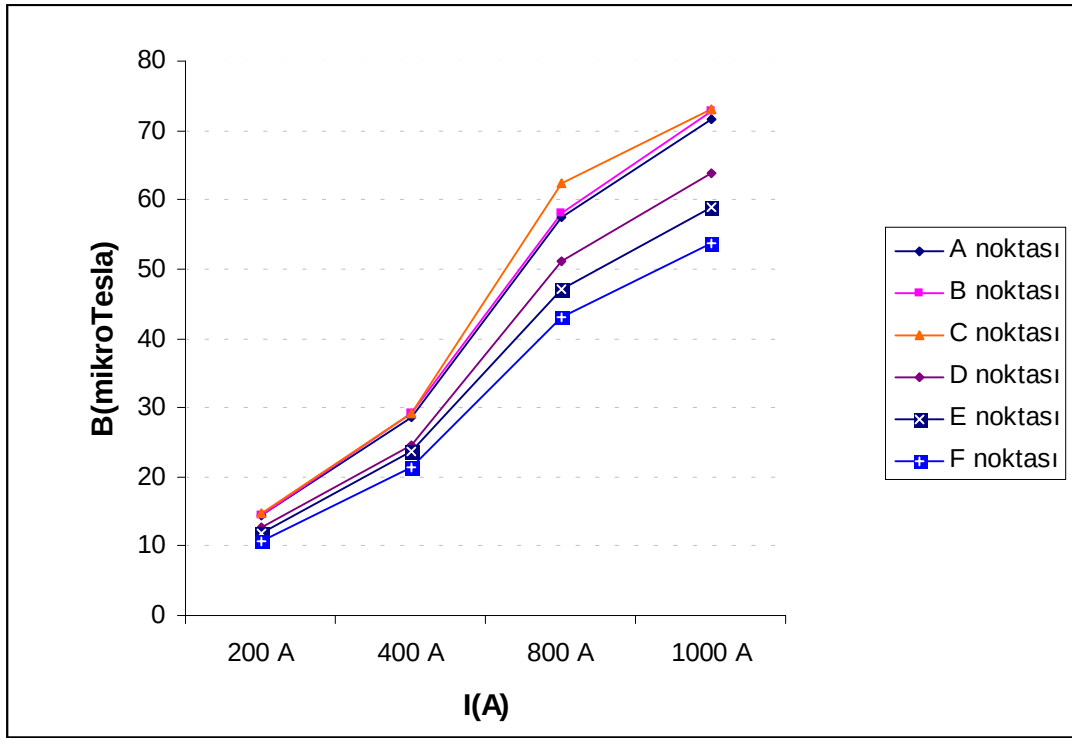
Şekil 3.3. A, B, C, D, E, F Noktalarındaki Magnetik Alan Değerlerinin Akıma Göre
Değişimi



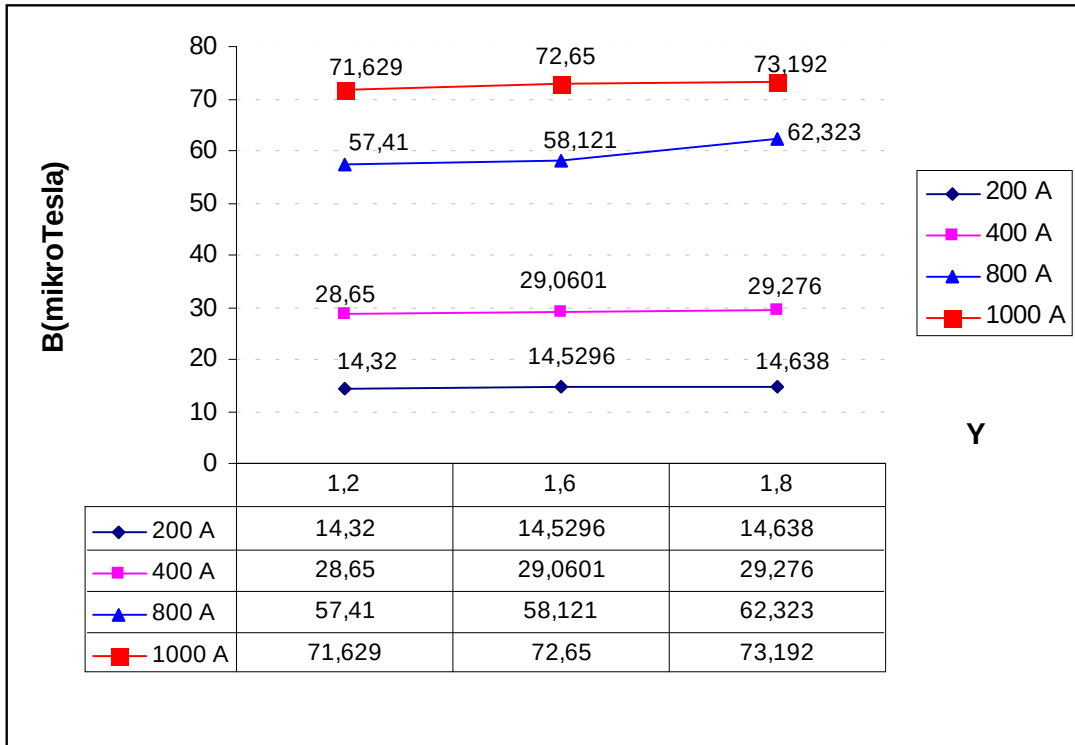
Şekil 3.4. A, B, C Noktalarındaki Magnetik Alan Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi



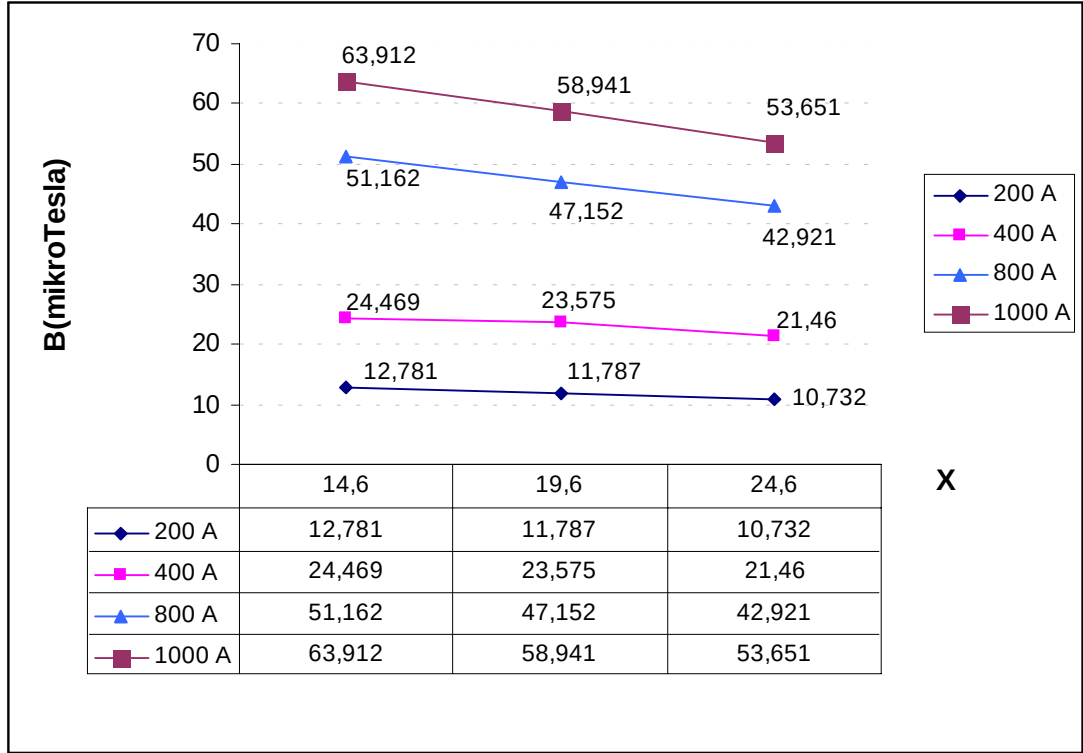
Şekil 3.5. D, E, F Noktalarındaki Magnetik Alan Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi



Şekil 3.6. A, B, C, D, E, F Noktalarındaki Magnetik Endüksiyon Değerlerinin Akıma Göre Değişimi



Şekil 3.7. A, B, C Noktalarındaki Magnetik Endüksiyon Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi



Şekil 3.8. D, E, F Noktalarındaki Magnetik Endüksiyon Değerlerinin Uzaklığa Göre Değişimi

Tablo 3.1, Tablo 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.6 incelendiğinde aynı nokta için akım yükseldiği zaman magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun yükseldiği görülüyor.

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilere göre çizilen grafikler incelendiğinde magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun uzaklıkla ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. A, B, C noktaları direk üzerinde seçilen noktalardır. D, E, F noktaları ise 1 m yükseklikte ve yatayda direkten uzaklaşarak elde edilen noktalardır. Direk üzerinde seçilen noktalarda (A, B, C noktalarında) iletkenlere yani hatta yaklaştıkça magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyon değerlerinin de arttığı Şekil 3.4 ve 3.7’de görülmektedir. D, E, F noktalarında ise yatayda hattan uzaklaştıkça alan ve endüksiyon değerinin azaldığı Şekil 3.5 ve 3.8’de görülmektedir.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (SEY) İLE MAGNETİK ALAN HESABI

4.1. Genel Bilgi

Elektrik mühendisliğinde transformatör, motor, generatör gibi elektrik makinalarında magnetik alan dağılımının ve magnetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi için analog veya sayısal yöntemler kullanılabilir. Analog yöntemlerin zorlukları ve yetersizlikleri sayısal yöntemlerle aşılabılır. Magnetik alan problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerden birisi sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile magnetik akı yoğunluğunun (magnetik endüksiyonun) sayısal çözümünü elde etmek için verilen alan bölgesi sonlu küçük elemanlardan oluşan bir ağ ile bölünerek bu ağın düğümlerdeki vektörel magnetik potansiyeller hesaplanır.

Sonlu elemanlar yöntemi, (tersi de geçerli olmak üzere) toplam magnetik enerjiyi minimuma indirgeyen çözümün, aynı zamanda, Poisson denklemini sağlayan çözüm olması ilkesine dayanır. İlkesinden de anlaşıldığı gibi, sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekte Poisson denklemi gibi ikinci derece bir diferansiyel denklemin sayısal çözümü yapılmaktadır. SEY ile bir, iki veya üç boyutlu magnetik alan problemleri çözülebilir. Bu kısımda, uygulamada çok karşılaşılan eksenel simetrlili üç boyutlu Poisson tipi magnetik alan problemlerinin, eksenel simetrlilerinden yararlanarak iki boyutta incelenmelerine ilişkin bilgiler verilecektir [20].

4.2. Denklemlerin Çıkarımı

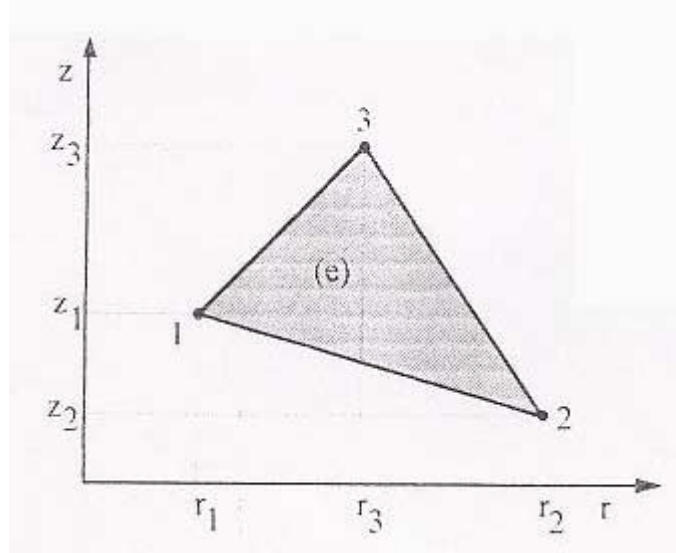
Eksenel simetrlili problemleri, değişkenleri r , ϕ ve z ile gösterilen silindrsel koordinat sisteminde incelemek uygundur. Şekil 4.1’de, silindrsel koordinat sisteminde bir üçgen sonlu eleman gösterilmiştir. Şekilde z eksenini aynı zamanda problemin simetri eksenidir. r radyal doğrultuyu göstermektedir. z eksenine göre r - z düzleminin pozitif ϕ dönüş yönü olarak kağıt düzlemine dik yön alınmıştır. Buna

göre pozitif ν yönlü bir akımın yarattığı A vektörel magnetik potansiyeli de, pozitif ν yönünde olacaktır [20].

B magnetik akı yoğunluğunun (magnetik endüksiyonun) radyal ve eksenel bileşenleri B_r ve B_z aşağıdaki şekilde yazılabilir [20].

$$B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} \quad (4.1)$$

$$B_z = \frac{A}{r} + \frac{\partial A}{\partial r} \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Silindrisel koordinatlarda bir üçgen eleman [20]

Sonlu elemanlar yönteminin birinci adımı problemin çözüm bölgesini üçgen sonlu elemanlara bölmektir. Bu amaçla, eksenel simetrik olarak göz önüne alınan bölge, ν yönünde ve bir radyan derinliğinde üçgen elemanlara bölünür. Yöntemin ikinci adımında her bir üçgen eleman içinde geçerli olacak, magnetik vektör potansiyeline ilişkin yaklaşım işlevinin belirlenmesi gerekir. Burada problem iki boyutlu olarak göz önüne alındığına göre iki boyutlu ve örneğin genellikle alındığı gibi birinci derece bir polinom, yaklaşım işlevi olarak seçilebilir. Bu varsayıma göre bir üçgen eleman içinde A vektörel potansiyeli yaklaşım işlevi

$$A = a + br + cz \quad (4.3)$$

olur. Bu eşitlik, vektörel potansiyelin bir eleman içinde doğrusal olarak değiştiğini gösterir. (4.3)'ten akı yoğunluğunun B_r radyal bileşeni

$$B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} = -c \quad (4.4)$$

bulunur. Bu, eleman içinde B_r radyal bileşeninin sabit olması anlamına gelir. Akı yoğunluğunun eksenel bileşeni B_z ise

$$B_z = \frac{A}{r} + \frac{\partial A}{\partial r} = \frac{A}{r} + b \quad (4.5)$$

olacaktır. Sayısal çözümde, üçgenler yeterince küçük seçilerek üçgenin ağırlık merkezindeki B_z eksenel bileşeni üçgenin tamamını temsilen alınabilir. Üçgenin ağırlık merkezindeki eksenel alan bileşeni

$$B_z = \frac{A_c}{r_c} + b \quad (4.6)$$

şeklinde belirtilir. Vektörel potansiyelin eleman içindeki değişiminin doğrusal olmasından dolayı ağırlık merkezindeki A_c vektörel potansiyeli; 1, 2, 3 düğümlerindeki vektörel potansiyellerin ortalamasına eşit olur;

$$A_c = \frac{1}{3}(A_1 + A_2 + A_3) \quad (4.7)$$

Toplam akı yoğunluğu

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_z^2} \quad (4.8)$$

den bulunur. (4.4) ve (4.6)'dan yararlanarak bu bağıntı

$$B = \sqrt{(-c)^2 + \left(\frac{A}{r_c} + b\right)^2} = \sqrt{c^2 + b^2 + \frac{2A_c b}{r_c} + \left(\frac{A_c}{r_c}\right)^2} \quad (4.9)$$

olur. Köşe(düğüm) vektörel potansiyelleri A_1, A_2, A_3 ve köşe koordinatları $(r_1, z_1), (r_2, z_2), (r_3, z_3)$ olan bir üçgen eleman için (4.3)'te verilen eşitlik ayrı ayrı yazılırsa

$$\begin{aligned} A_1 &= a + br_1 + cz_1 \\ A_2 &= a + br_2 + cz_2 \\ A_3 &= a + br_3 + cz_3 \end{aligned} \quad (4.10)$$

elde edilir. Bu denklemler matrisel olarak yazılırsa

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

olur. Bu denklem sisteminden a, b, c katsayılarını bulabiliriz. Örneğin Cramer Yöntemi ile katsayılar bulunabilir.

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{2S} \begin{vmatrix} A_1 & r_1 & z_1 \\ A_2 & r_2 & z_2 \\ A_3 & r_3 & z_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2S} [(r_2 z_3 - r_3 z_2) A_1 - (A_2 z_3 - A_3 z_2) r_1 + (A_2 r_3 - A_3 r_2) z_1] \\ a &= \frac{1}{2S} [(r_2 z_3 - r_3 z_2) A_1 - (r_3 z_1 - r_1 z_3) A_2 + (r_1 z_2 - r_2 z_1) A_3] \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{2S} \begin{vmatrix} 1 & A_1 & z_1 \\ 1 & A_2 & z_2 \\ 1 & A_3 & z_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2S} [(A_2 z_3 - A_3 z_2) - (z_3 - z_2) A_1 + (A_3 - A_2) z_1] \\ b &= \frac{1}{2S} [(z_2 - z_3) A_1 - (z_3 - z_1) A_2 + (z_1 - z_2) A_3] \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$c = \frac{1}{2S} \begin{vmatrix} 1 & r_1 & A_1 \\ 1 & r_2 & A_2 \\ 1 & r_3 & A_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2S} [(r_2 A_3 - r_3 A_2) - (A_3 - A_2) r_1 + (r_3 - r_2) A_1] \quad (4.14)$$

$$c = \frac{1}{2S} [(r_3 - r_2) A_1 - (r_1 - r_3) A_2 + (r_2 - r_1) A_3]$$

$$2S = (z_2 - z_1) r_1 + (z_1 - z_3) r_3 + (r_2 - r_1) (z_3 - z_1)$$

$$= r_1 z_2 - r_1 z_1 + r_3 z_1 - r_3 z_3 + r_2 z_3 - r_2 z_1 - r_1 z_3 + r_1 z_1$$

$$= (r_2 z_3 - r_3 z_3) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1) \quad (4.15)$$

Bu bağıntılarda, S bir üçgen elemanın alanını göstermektedir. (4.15) eşitliği ile alanın iki katı olan 2S bulunurken, hangi düğümünden başladığı önemli olmaksızın, düğüm numaraları 1, 2, 3'ün saat yönüne ters sıralanması durumunda pozitif değerli bir sonuç verdiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Bir radyana eşit derinlikteki bir Ω bölgesindeki toplam magnetik enerji

$$W = \iint_{\Omega} \left(\int_0^B \frac{1}{\mu} B dB \right) \cdot r dr dz - \iint_{\Omega} J A r dr dz \quad (4.16)$$

dir. Burada, μ magnetik geçirgenlik, B magnetik akı yoğunluğu, J akım yoğunluğu, A vektörel magnetik potansiyeldir. Varyasyonel hesap yönteminden bilindiği gibi toplam magnetik enerji denklemini minimum yapan değerler magnetik Poisson denklemini de sağlar. Bu durum, bütün düğümlerdeki vektör potansiyellerine göre kısmi türevlerin

$$\frac{\partial W}{\partial A} = 0 \quad (4.17)$$

yapılması demektir. Bir tek üçgen eleman içindeki enerji

$$W^{(e)} = W_1^{(e)} + W_2^{(e)} \quad (4.18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$W_1^{(e)} = \iint \left(\int_0^B \frac{1}{\mu} B dB \right) \cdot r dr dz \quad (4.19)$$

$$W_2^{(e)} = \iint -J A r dr dz \quad (4.20)$$

dir. 1 düğümündeki vektörel potansiyele göre $W_1^{(e)}$ in kısmi türevi

$$\frac{\partial W_1^{(e)}}{\partial A_1} = \iint \left(\frac{d}{dB} \int_0^B \frac{1}{\mu} B dB \frac{\partial B}{\partial A_1} \right) \cdot r dr dz = \iint \left(\frac{1}{\mu} B \frac{\partial B}{\partial A_1} \right) \cdot r dr dz \quad (4.21)$$

şeklinde bulunur.

$$A_c = \frac{1}{3}(A_1 + A_2 + A_3)$$

$$B^2 = c^2 + b^2 + \frac{2b}{r_c} A_c + \left(\frac{A_c}{r_c} \right)^2$$

bağıntılarından

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial A_1} &= \frac{1}{2B} \cdot \frac{\partial(B^2)}{\partial A_1} \\ \frac{\partial B}{\partial A_1} &= \frac{1}{2B} \left(2c \frac{\partial c}{\partial A_1} + 2b \frac{\partial b}{\partial A_1} + \frac{2b}{r_c} \frac{\partial A_c}{\partial A_1} + \frac{2A_c}{r_c} \frac{\partial b}{\partial A_1} + \frac{2A_c}{r_c^2} \frac{\partial A_c}{\partial A_1} \right) \\ \frac{\partial B}{\partial A_1} &= \frac{1}{2B} \left(2c \frac{\partial c}{\partial A_1} + 2b \frac{\partial b}{\partial A_1} + \frac{2b}{3r_c} + \frac{2A_c}{r_c} \frac{\partial b}{\partial A_1} + \frac{2A_c}{3r_c^2} \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

elde edilir.

$$\frac{1}{\mu} B \frac{\partial B}{\partial A_1} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{c}{2S} (r_3 - r_2) + \frac{b}{2S} (z_2 - z_3) + \frac{1}{3r_c} \left(b + \frac{3A_c}{2S} (z_2 - z_3) + \frac{A_c}{r_c} \right) \right] \quad (4.23)$$

şeklinde elde edilen (4.23) bağıntısını, $2S$ 'nin üçgen alanının iki katı olduğu hatırlanarak (4.21)'de yerine koyduğumuzda

$$[\iint dr \cdot dz = S]$$

$$\frac{\partial W_1^{(e)}}{\partial A_1} = \frac{r_c}{2\mu} \left[(z_2 - z_3) b + (r_3 - r_2) c + \frac{1}{3r_c} \left(2Sb + 3A_c(z_2 - z_3) + 2S \frac{A_c}{r_c} \right) \right] \quad (4.24)$$

eşitliği elde edilir. (4.20) bağıntısından,

$$W_2^{(e)} = -JA_c r_c \frac{2S}{2} (= -JA_c r_c S) \quad (4.25)$$

bulunurken,

$$A_c = \frac{1}{3} (A_1 + A_2 + A_3)$$

$$W_2^{(e)} = -J \left[\frac{1}{3} (A_1 + A_2 + A_3) \right] r_c \frac{2S}{2}$$

bağıntılarından

$$\frac{\partial W_2^{(e)}}{\partial A_1} = \left(-\frac{1}{3} J r_c S \right) = -\frac{1}{6} J r_c 2S \quad (4.26)$$

eşitliği elde edilir. $\partial W^{(e)}/\partial A_1$ yani toplam magnetik enerjinin 1 düğümünün vektör potansiyeline göre kısmi türevi hesaplanırken yalnızca 1 düğümüne bağlı üçgenlerin enerjilerinin toplamının gözönüne alınması gerekir. Denklem (4.18) den

$$\sum_{e=1}^{ne} \frac{\partial W^{(e)}}{\partial A_1} = \sum_{e=1}^{ne} \frac{\partial}{\partial A_1} (W_1^{(e)} + W_2^{(e)}) = 0 \quad (4.27)$$

yazılabileceği görülür. Buradan $\partial W_1/\partial A_1$ şu şekilde yazılabilir,

$$\Sigma \frac{\partial W_1^{(e)}}{\partial A_1} = \Sigma \frac{r_c}{2\mu} \left[(z_2 - z_3) b + (r_3 - r_2) c + \frac{1}{3r_c} \left(2Sb + 3A_c(z_2 - z_3) + 2S \frac{A_c}{r_c} \right) \right] \quad (4.28)$$

b ve c bağıntıları yani (4.13) ve (4.14), (4.28)'de yerine konulursa,

$$\begin{aligned} \Sigma \frac{\partial W_1^{(e)}}{\partial A_1} &= A_1 \Sigma \frac{1}{\mu} \left[\frac{r_c}{4S} \{ (z_2 - z_3)^2 + (r_3 - r_2)^2 \} + \frac{1}{3} (z_2 - z_3) + \frac{2S}{18r_c} \right] + \\ &+ \Sigma A_2 \frac{1}{\mu} \left[\frac{r_c}{4S} \{ (z_2 - z_3)(z_3 - z_1) + (r_3 - r_2)(r_1 - r_3) \} + \frac{1}{6} (z_2 - z_1) + \frac{2S}{18r_c} \right] + \\ &+ \Sigma A_3 \frac{1}{\mu} \left[\frac{r_c}{4S} \{ (z_2 - z_3)(z_1 - z_2) + (r_3 - r_2)(r_2 - r_1) \} + \frac{1}{6} (z_1 - z_3) + \frac{2S}{18r_c} \right] \end{aligned} \quad (4.29)$$

bulunur. Her bir üçgen için ayrı ayrı

$$m_1 = \frac{r_c}{4S} \{ (z_2 - z_3)^2 + (r_3 - r_2)^2 \} + \frac{1}{3} (z_2 - z_3) + \frac{2S}{18r_c} \quad (4.30)$$

$$m_2 = \frac{r_c}{4S} \{ (z_2 - z_3)(z_3 - z_1) + (r_3 - r_2)(r_1 - r_3) \} + \frac{1}{6} (z_2 - z_1) + \frac{2S}{18r_c} \quad (4.31)$$

$$m_3 = \frac{r_c}{4S} \{ (z_2 - z_3)(z_1 - z_2) + (r_3 - r_2)(r_2 - r_1) \} + \frac{1}{6} (z_1 - z_3) + \frac{2S}{18r_c} \quad (4.32)$$

hesaplanarak

$$\Sigma \frac{\partial W_1^{(e)}}{\partial A_1} = A_1 \Sigma \frac{1}{\mu} m_1^{(e)} + \Sigma (A_2 \frac{1}{\mu} m_2^{(e)} + A_3 \frac{1}{\mu} m_3^{(e)}) \quad (4.33)$$

yazılabilir.

$$\frac{\partial W_2^{(e)}}{\partial A_1} = -\frac{1}{6} J r_c 2S$$

bağıntısında m tanımı

$$\frac{\partial W_2^{(e)}}{\partial A_1} = -\frac{1}{6} \sum J \cdot r_c 2S = m \quad (4.34)$$

şeklinde alınırsa, bu durumda sonuç olarak,

$$\sum \frac{\partial W^{(e)}}{\partial A_1} = \sum \frac{\partial}{\partial A_1} (W_1^{(e)} + W_2^{(e)}) = 0 \quad (4.35)$$

bağıntısında, (4.33) ve (4.34) bağıntılarının kullanılmasıyla

$$\sum \frac{\partial W_1^{(e)}}{\partial A_1} = A_1 \sum \frac{1}{\mu} m_1^{(e)} + \sum (A_2 \frac{1}{\mu} m_2^{(e)} + A_3 \frac{1}{\mu} m_3^{(e)}) + m^{(e)} = 0 \quad (4.36)$$

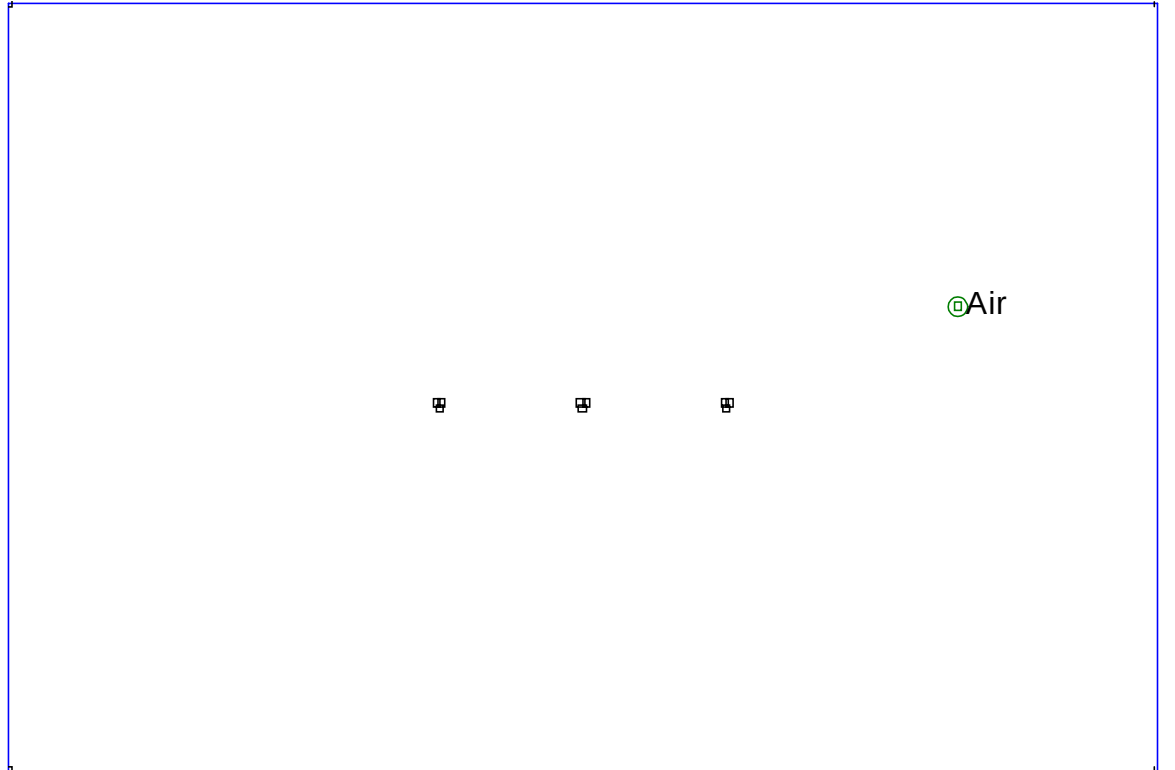
$$A_1 = -\frac{1}{\sum \frac{1}{\mu} m_1^{(e)}} \left[\sum (A_2 \frac{1}{\mu} m_2^{(e)} + A_3 \frac{1}{\mu} m_3^{(e)}) + m^{(e)} \right] \quad (4.37)$$

denklemini elde edilir.

Bu denklem, iki boyutlu alan için tamamen uygundur. Bir düğümdeki vektör potansiyeli, ona komşu düğümlerdeki vektör potansiyellerinin bir işlevidir. Bütün bölgeler için çözüm aynı yolla bulunur [20].

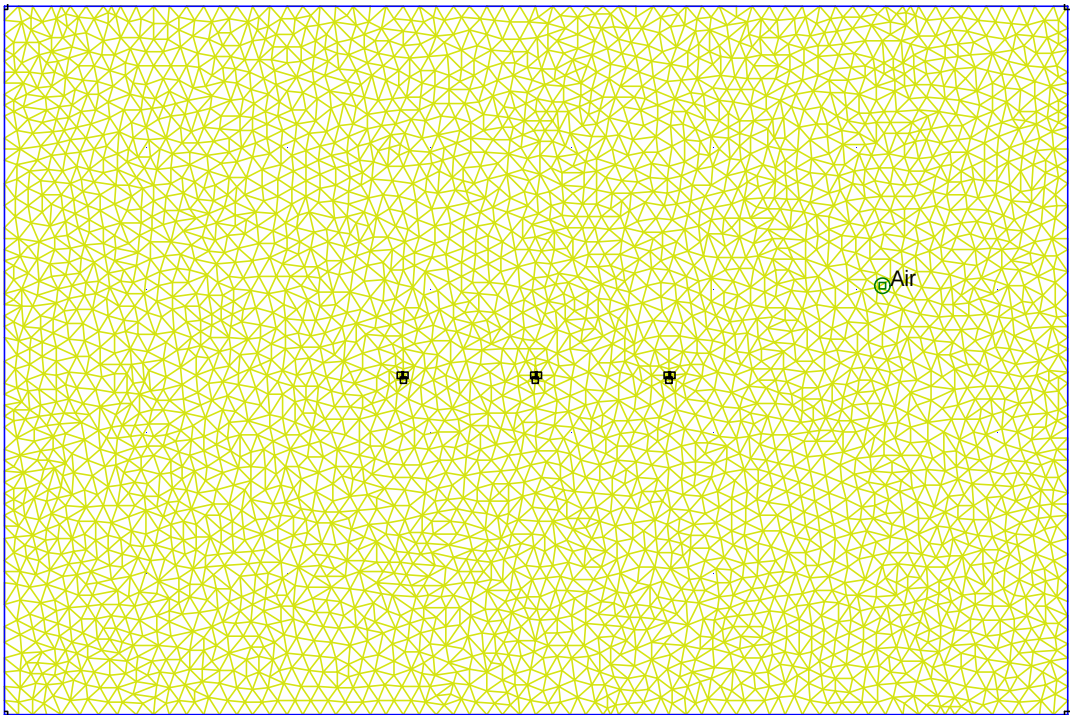
4.3. 380 kV'luk Üçlü Demet İletkenli, Yatay Düzenli Tek Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) İle Bulunması

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yapılan çözümde her bir iletkenin aynı değerde akım aktığı ve aynı fazda oldukları varsayılmıştır. Çözümleme akımının 200 A, 400 A, 800 A ve 1000 A değerleri için yapılmıştır. İncelemede SEY çözümlemesi için problem gerçek boyutları ile tanımlanmış, bölge problem çözümüne etki etmeyecek boyutta yapay sınırla kapatılmıştır. Tüm dış sınırlarda magnetik vektör potansiyelleri $A = 0$ alınmıştır. Çözümleme kartezyen koordinatlarda yapılmış, iletken uzunluğu 400 m alınmıştır. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu iletim hattının açık şekli Şekil 3.2'de verilmişti.



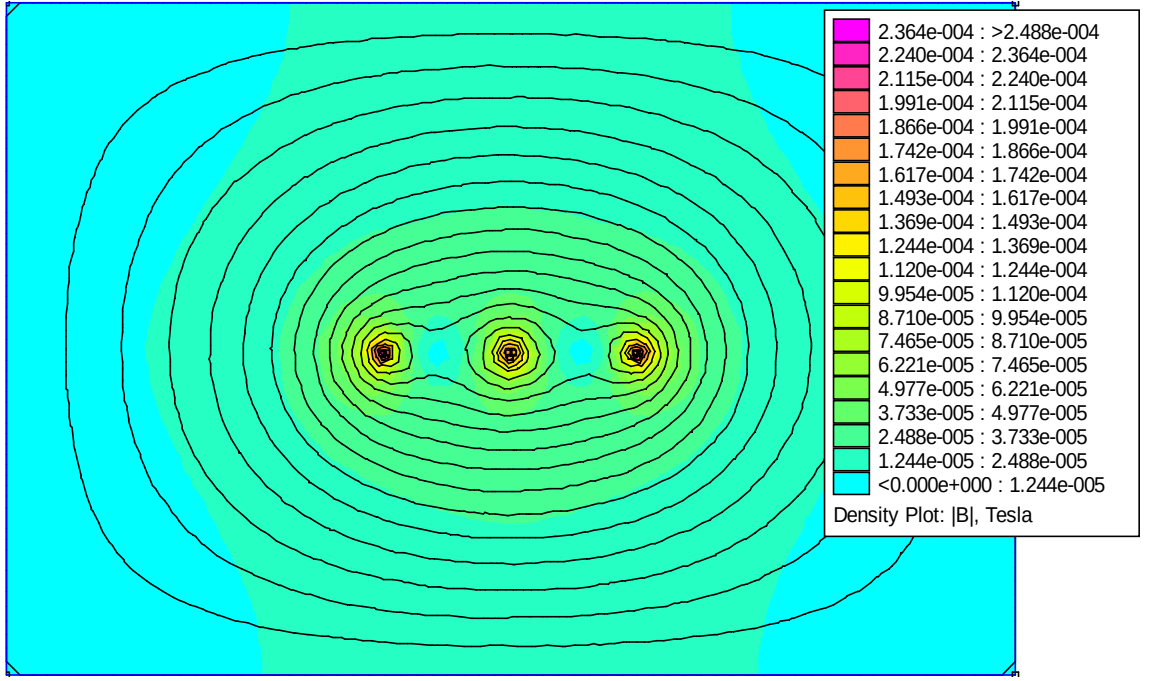
Şekil 4.2. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı.

Her çözüm aşamasında yaklaşık 7000-8000 elemanlı sonlu elemanlar ağı elde edilmiş ve eşlenik eğim yöntemi ile 10^{-8} doğrulukla sonuçlar elde edilmiştir. Problem çözümleri magnetik akı dağılımları elde edilerek aşağıda verilmiştir. Elde edilen akı dağılımlarından yerden yükseklikle ve hattan uzaklıkla magnetik alan ve endüksiyon değişimleri bulunarak grafikleri çizilmiştir. Tüm SEY çözümleri FEMM 4.0 (Finite Element Magnetics) adlı bir paket sonlu elemanlar yöntemi çözüm programında yapılmıştır. İletkenler için tüm tanımlamalar yapılarak, program çalıştırıldığında 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı için elde edilen sonlu elemanlar ağı Şekil 4.3'de gösterilmiştir [21].

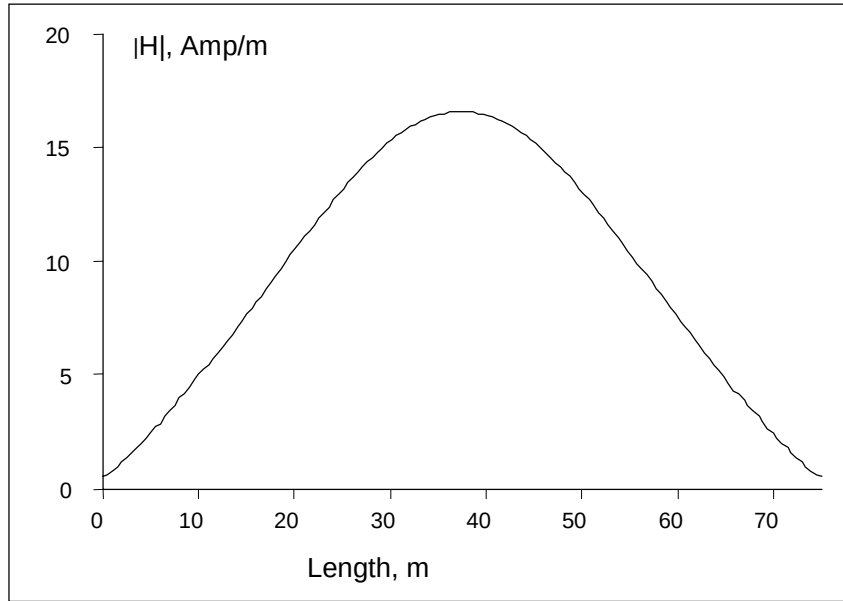


Şekil 4.3. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı için oluşturulan SEY ağı

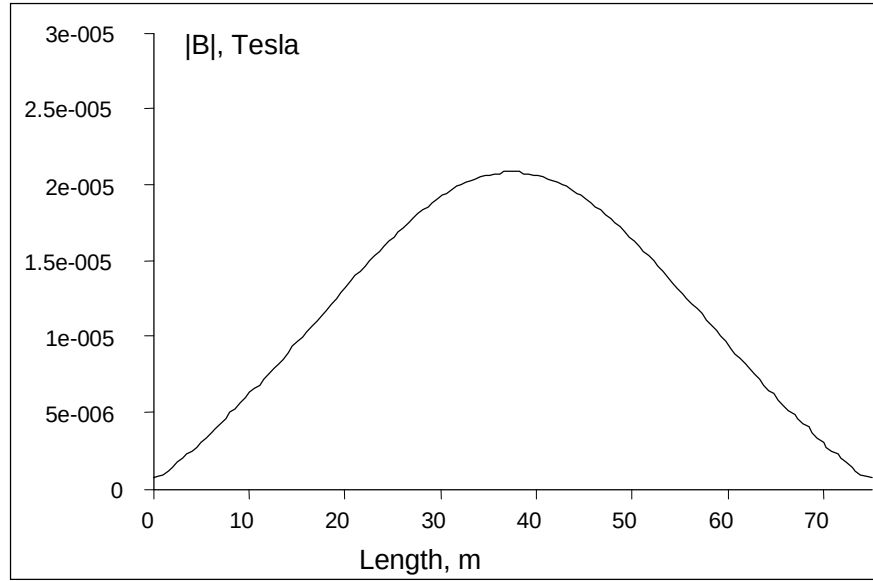
Sonlu elemanlar ağı elde edildikten sonra, ilk olarak her bir iletken üzerinden 200A akım geçtiği kabul edilerek 200A değeri tüm iletkenler için sisteme girilmiştir. Program çalıştırılarak 200A için magnetik akı dağılımı elde edilmiştir. Şekil 4.4'de bu dağılım görülmektedir.



Şekil 4.4. 380 kV’luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 200 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



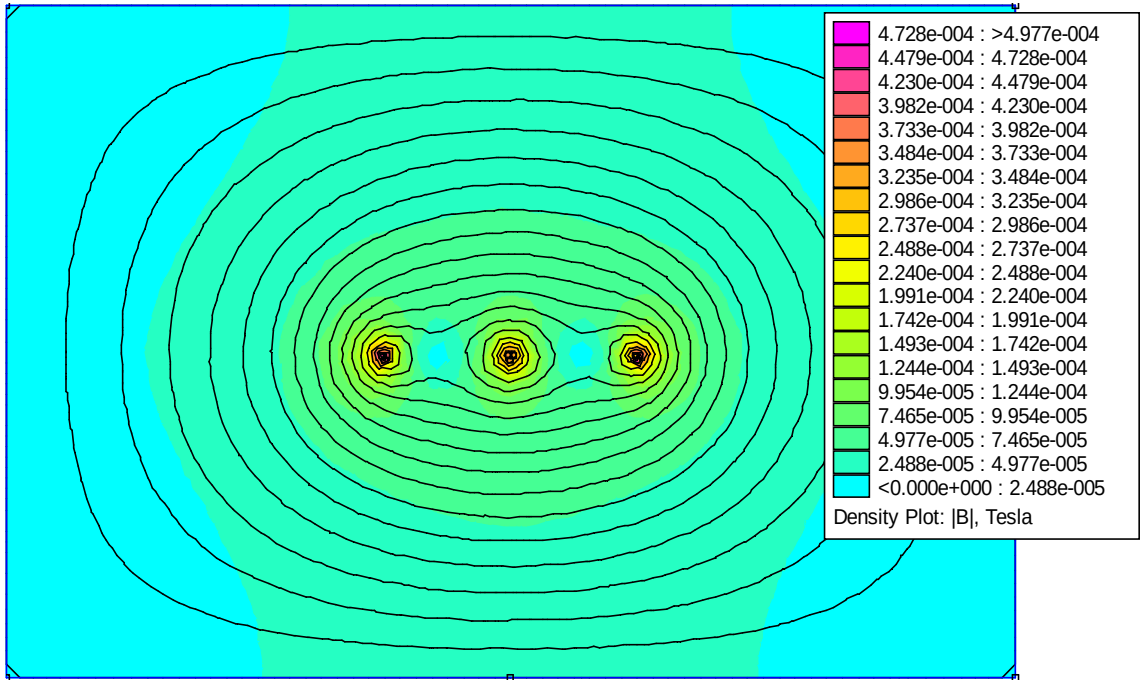
Şekil 4.5. 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



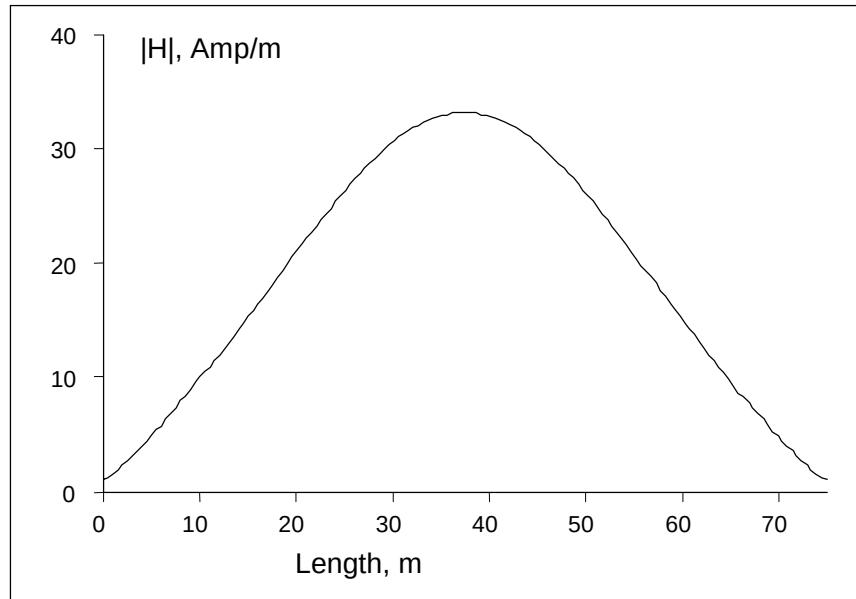
Şekil 4.6. 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

200 A için elde edilen akı dağılımından yerden 1 m yükseklikte ve hattın uzaklıkla magnetik alan ve endüksiyon değişimleri bulunarak grafikleri çizilmiştir. Hat ekseninden 37.5 m sağa ve 37.5 m sola gidildiği kabul edilmiştir. Şekil 4.5'te magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi, Şekil 4.6'da ise magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi grafik olarak gösterilmiştir.

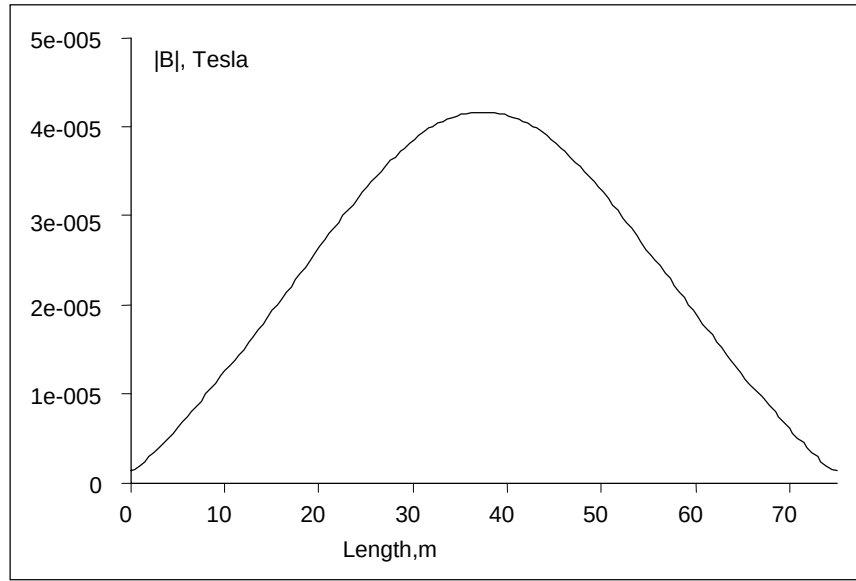
Yine elde edilen ağ kullanılarak, her bir iletken üzerinden 400A akım geçtiği kabul edilmiş ve bu kez 400A değeri tüm iletkenler için sisteme girilmiştir. Program çalıştırılarak 400A için Şekil 4.7'de görülen magnetik akı dağılımı elde edilmiştir. Bu dağılımdan, yerden 1m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağ ve 37,5 m solda magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi Şekil 4.8'de, magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi ise Şekil 4.9'da grafiksel olarak verilmiştir.



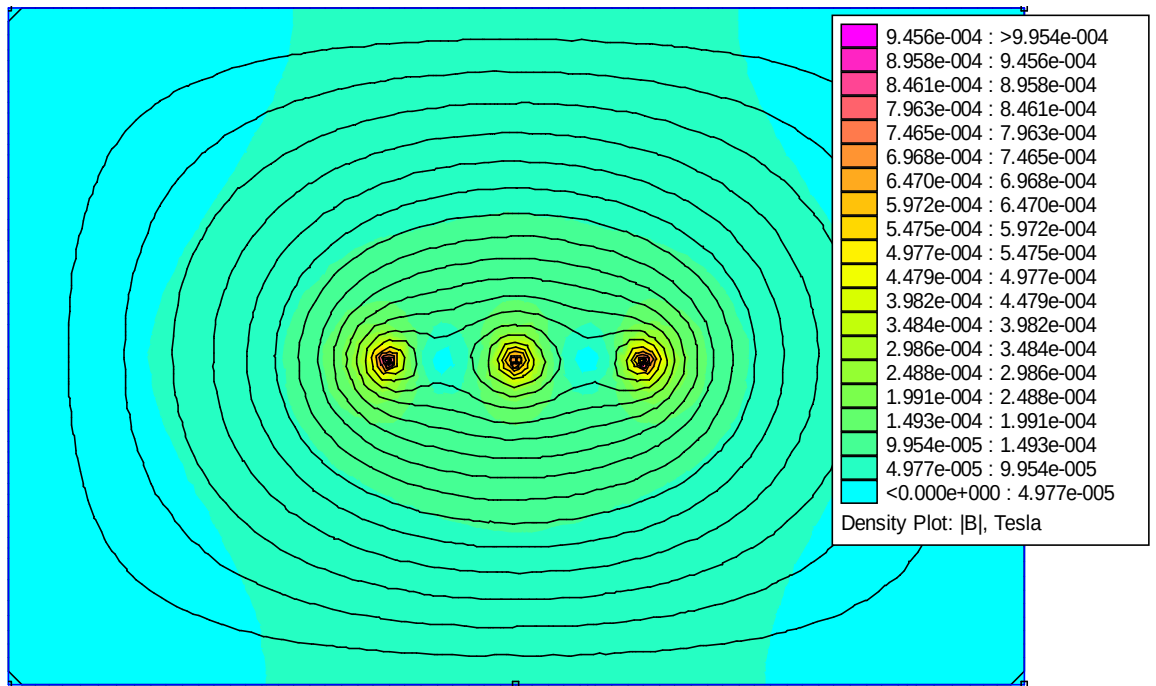
Şekil 4.7. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 400 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



Şekil 4.8. 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi

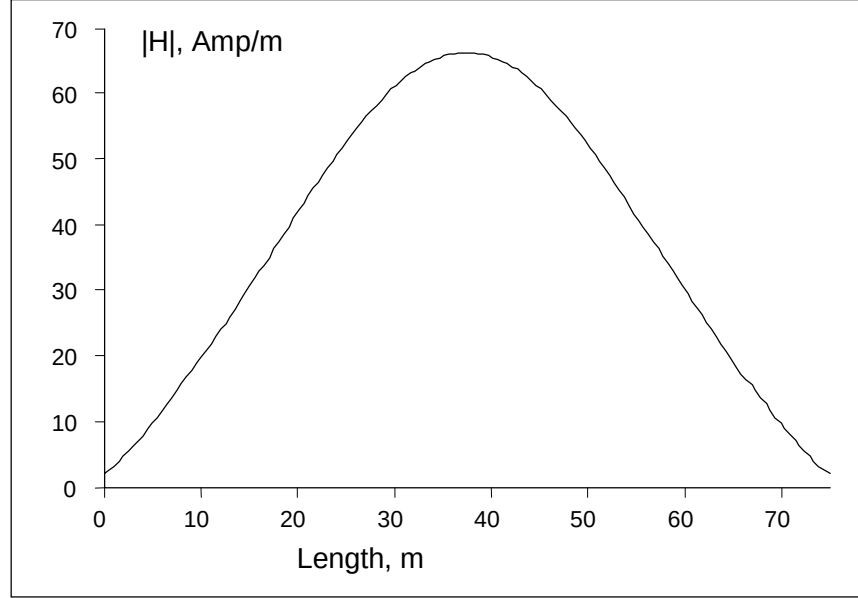


Şekil 4.9. 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

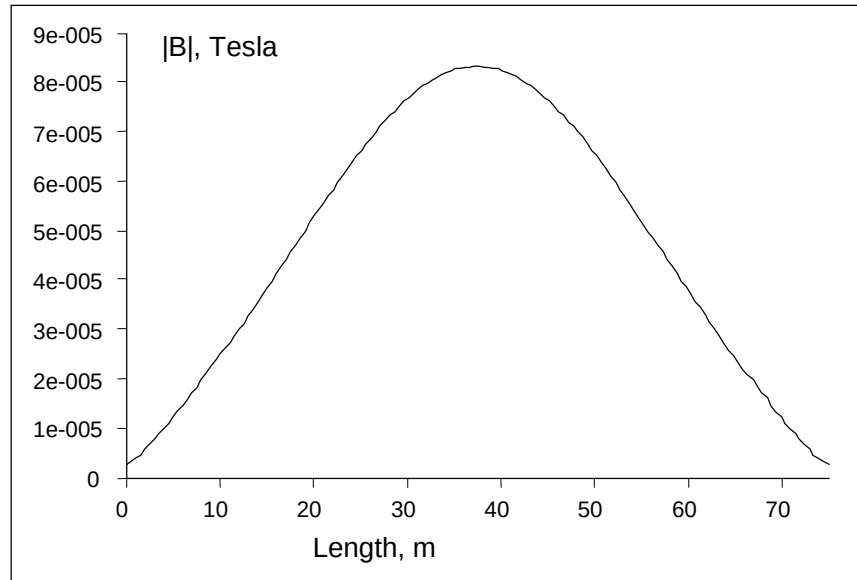


Şekil 4.10. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 800 A için elde edilen magnetik alan dağılımı

Şekil 4.10’da iletkenler üzerinden 800 A akım aktığında elde edilen magnetik akı dağılımı görülmektedir. Şekil 4.11 ve 4.12’de de 800 A akım değeri için magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişim grafikleri verilmiştir.

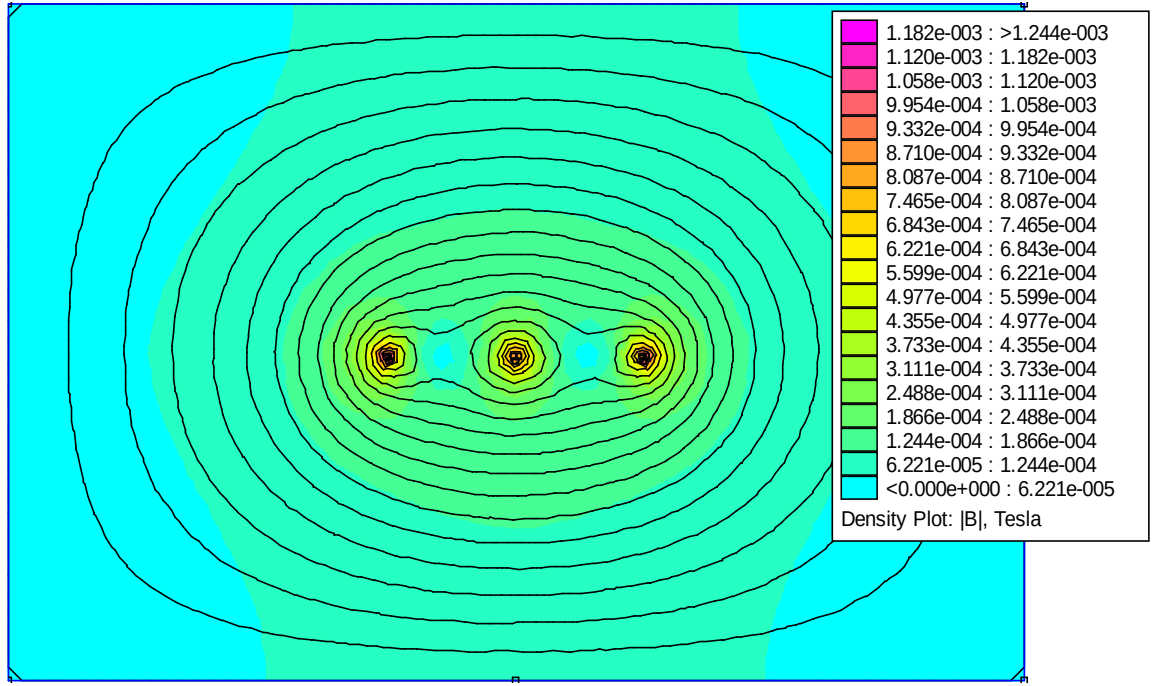


Şekil 4.11. 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi

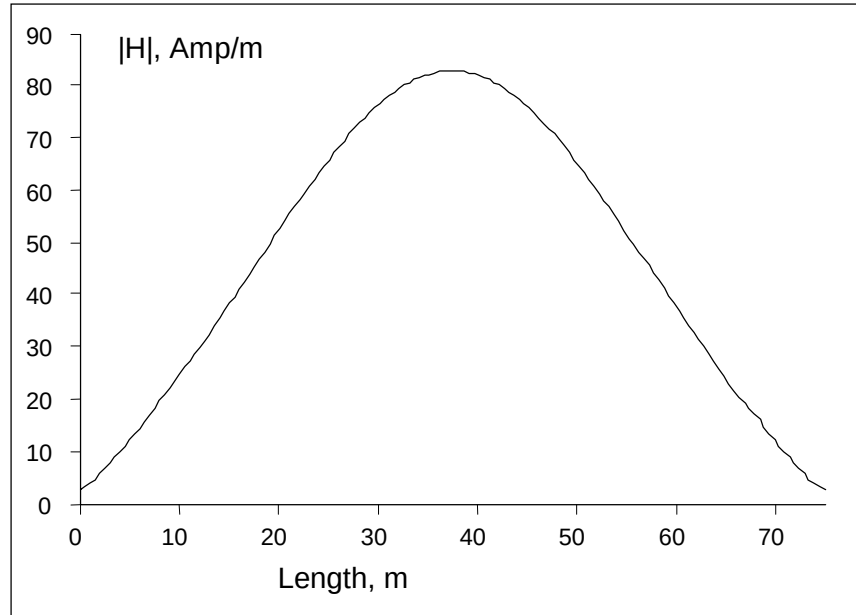


Şekil 4.12. 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

Bu örnek için son olarak iletkenler üzerinden 1000 A akım aktığı kabul edilerek çözümleme yapılır ve Şekil 4.13’de ki dağılım elde edilir.

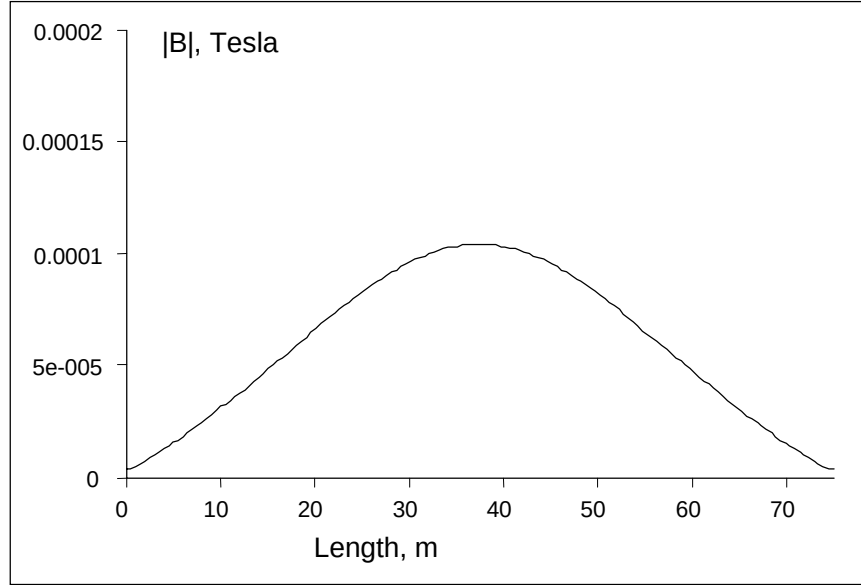


Şekil 4.13. 380 kV’luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 1000 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



Şekil 4.14. 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi

1000A akım değeri için magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişiminin grafikleri de Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. 1000A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

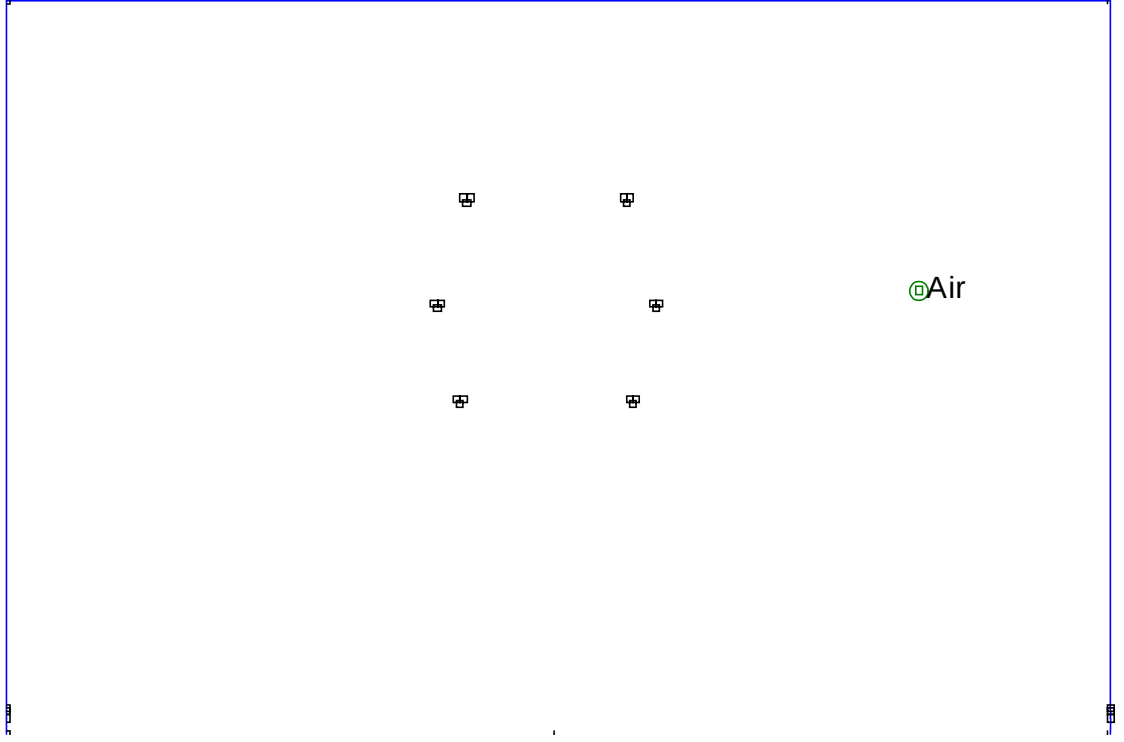
380 kV'luk üçlü demet iletkenli, yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı çevresindeki magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyon dağılımının bulunabilmesi için yaptığımız çözümlemelerde elde etmiş olduğumuz dağılımlar ve grafikler incelendiğinde, hat eksenine yaklaştıkça magnetik endüksiyonun arttığı, iletkenlerin üzerinde en yüksek değerine ulaştığı, iletkenlerden ve hattın uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde magnetik alan şiddetide hattın uzaklaştıkça azalmaktadır.

200 A, 400 A, 800 A ve 1000 A için ayrı ayrı çizilmiş olan dağılımlar ve grafikler karşılaştırıldığında, magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun akım arttıkça arttığı görülmektedir.

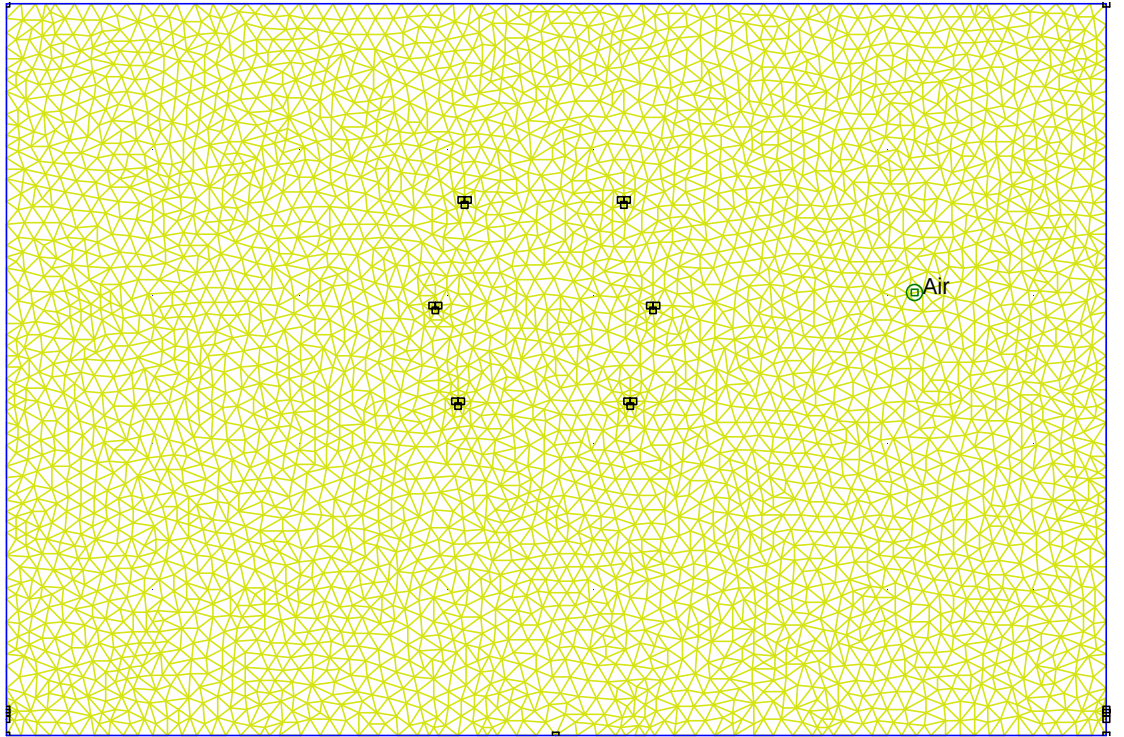
4.4. 380 kV'luk Üçlü Demet İletkenli, Düşey Düzenli Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) İle Bulunması

Bölüm 4.3'de yatay düzenli tek devre bir hat çevresinde yapmış olduğumuz hesaplamaları bu kez düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı çevresinde yapacağız. Bu çözümde de, her bir iletkenin aynı değerde akım aktığı ve aynı fazda oldukları varsayılmıştır. Çözümleme akımın 200 A, 400 A, 800 A ve 1000 A değerleri için yapılmıştır. İncelemede SEY çözümlemesi için problem gerçek boyutları ile tanımlanmış, bölge problem çözümüne etki etmeyecek boyutta yapay sınırla kapatılmıştır. Tüm dış sınırlarda magnetik vektör potansiyelleri $A = 0$ alınmıştır. Çözümleme kartezyen koordinatlarda yapılmış, iletken uzunluğu 400 m alınmıştır. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu iletim hattının açık şekli Şekil 1.5.(d)'de verilmiştir.

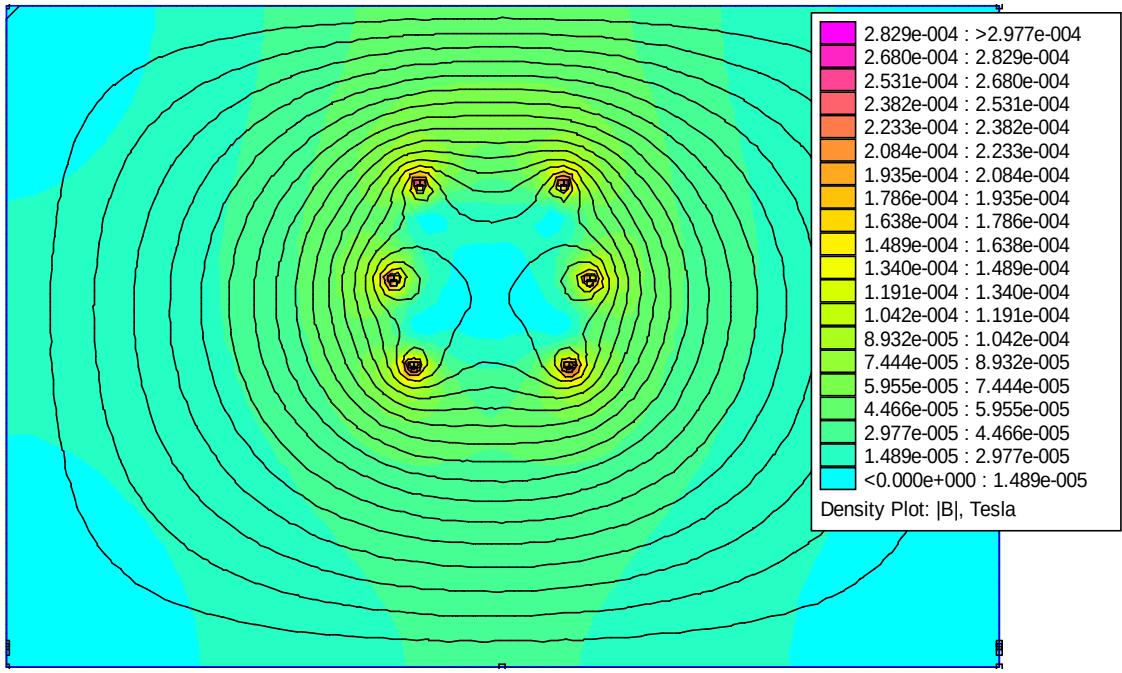
Yapılan çözümlemenin her aşamasında yaklaşık 7000-8000 elemanlı sonlu elemanlar ağı elde edilmiş ve eşlenik eğim yöntemi ile 10^{-8} doğrulukla sonuçlar elde edilmiştir. Problem çözümleri magnetik akı dağılımları elde edilerek 200 A için aşağıda ve diğer akım değerleri için Ek B'de verilmiştir. Elde edilen akı dağılımlarından yerden yükseklikle ve hattan uzaklıkla magnetik alan ve endüksiyon değişimleri bulunarak grafikleri çizilmiştir. Grafikler 200 A için bu bölümde diğer akım değerleri için de Ek.B'de sunulmuştur. İletkenler için tüm tanımlamalar yapılarak, program çalıştırıldığında bu örnekteki hat için elde edilen sonlu elemanlar ağı Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



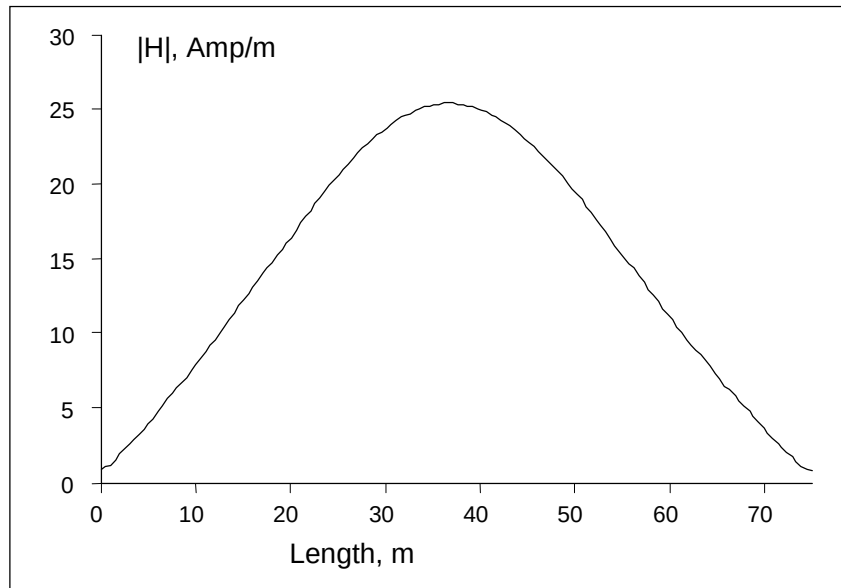
Şekil 4.16. 380 kV’luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı



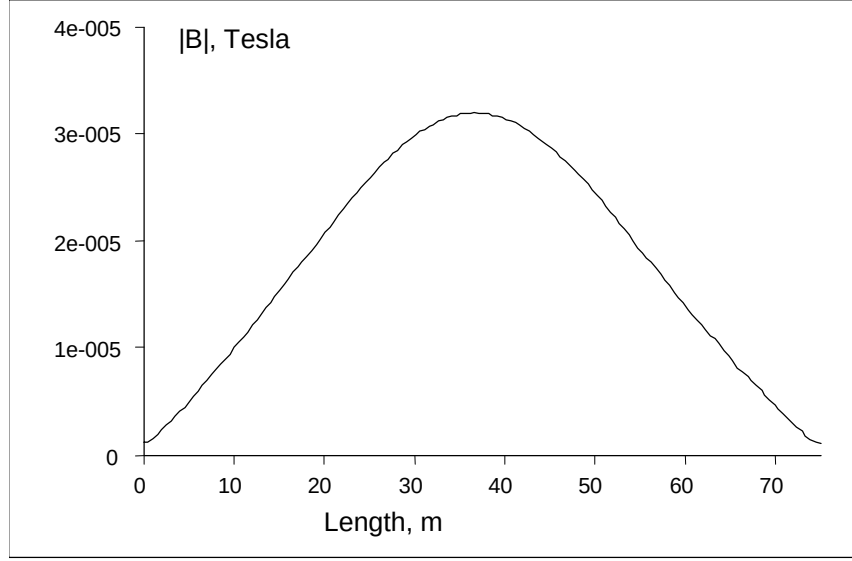
Şekil 4.17. 380 kV’luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı için oluşturulan SEY ağı



Şekil 4.18. 380 kV’luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 200 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



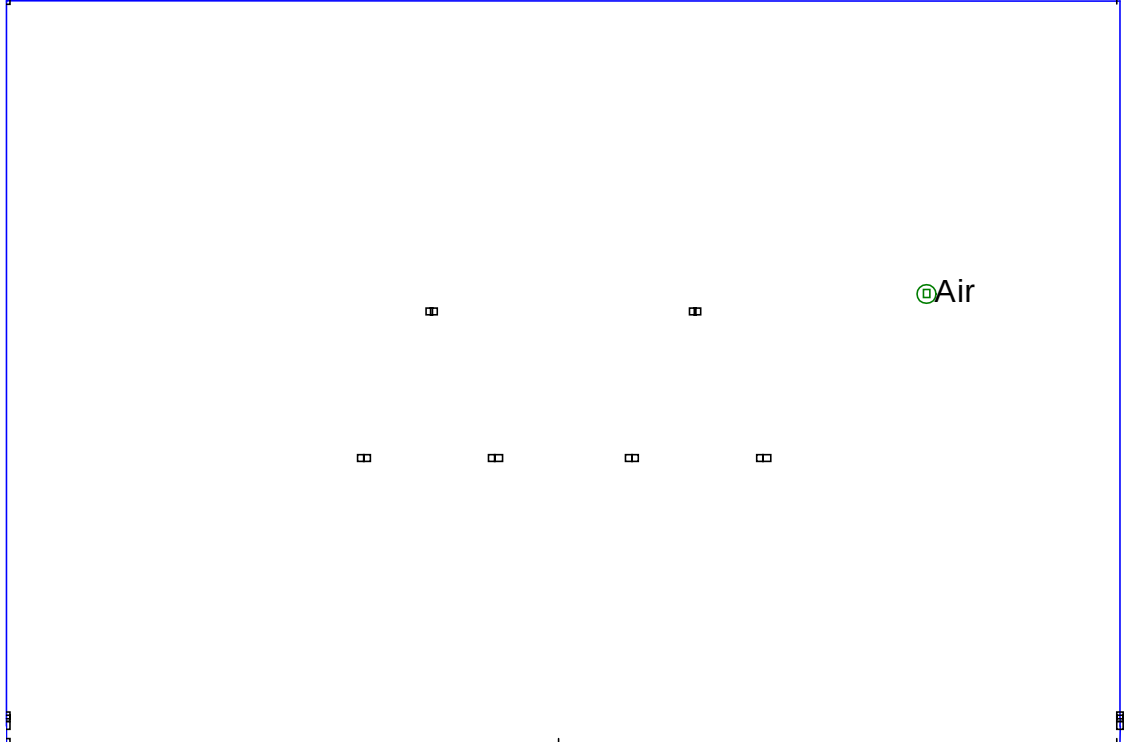
Şekil 4.19. 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



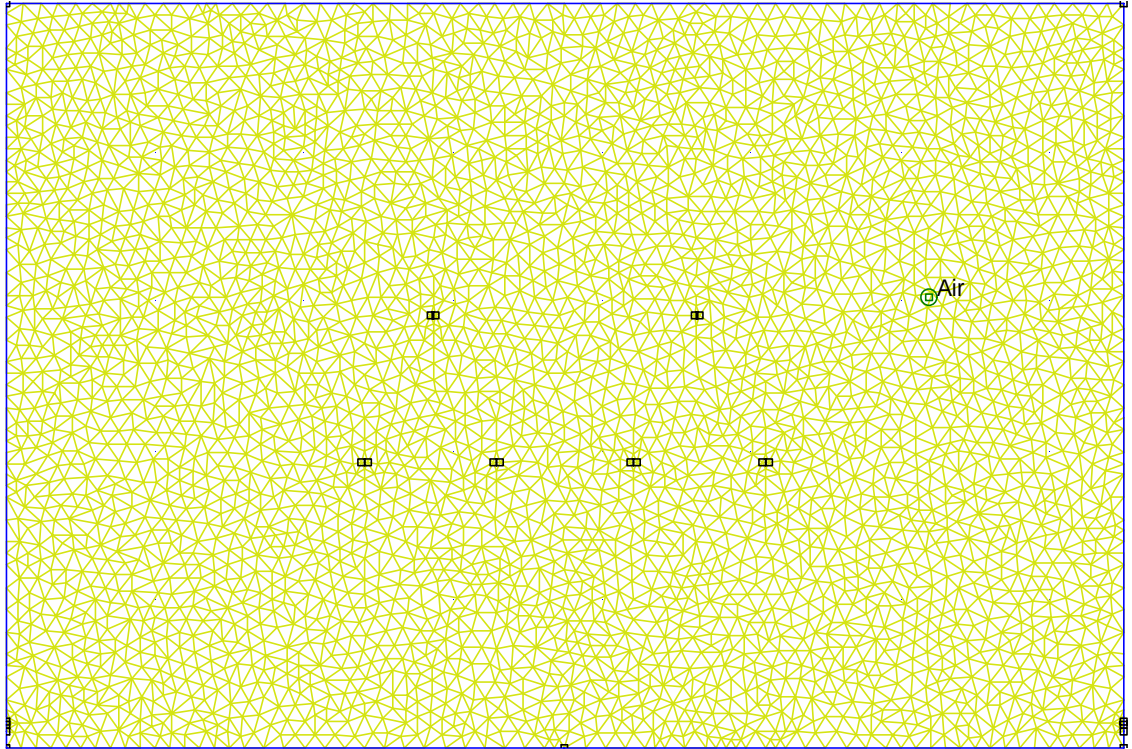
Şekil 4.20. 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

4.5. 380 kV'luk İkili Demet İletkenli, Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) İle Bulunması

Sonlu elemanlar yöntemi ile magnetik akı dağılımlarını ve magnetik endüksiyonları bulmak için yaptığımız bu üçüncü çalışmada iletken olarak ikili demet iletken seçilmiştir. İkili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı çevresindeki dağılımları bulmak için yapacağımız çözümlemelerde her bir iletkenin aynı değerde akım aktığı ve aynı fazda oldukları varsayılmıştır. 200 A, 400 A, 800 A ve 1000 A akım değerleri için problem çözümlenmiştir. Problem gerçek boyutları ile tanımlanmış, bölge problem çözümüne etki etmeyecek boyutta yapay sınırla kapatılmıştır. Tüm dış sınırlarda magnetik vektör potansiyelleri $A = 0$ alınmıştır. Çözümleme kartezyen koordinatlarda yapılmış, iletken uzunluğu 400 m alınmıştır. Bu iletim hattının SEY programında tanımı Şekil 4.21'de verilmiştir. Bu iletim hattının açık şekli Şekil 1.5.(b)'de verilmişti.

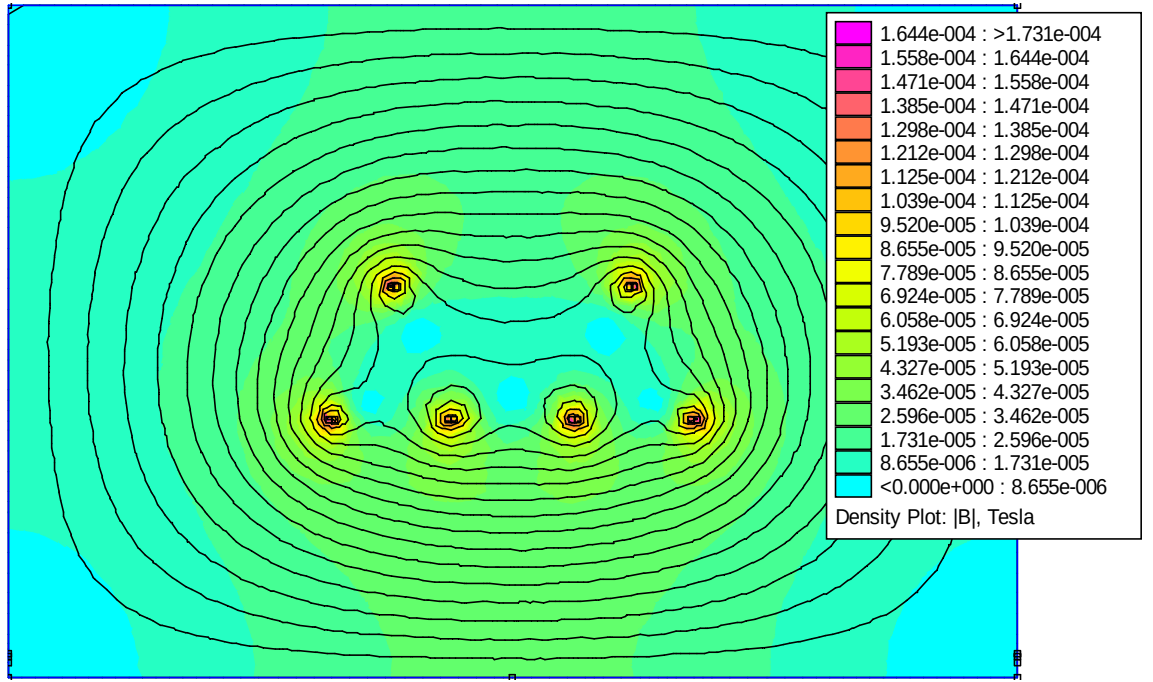


Şekil 4.21. 380 kV’luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattının SEY programında tanımı

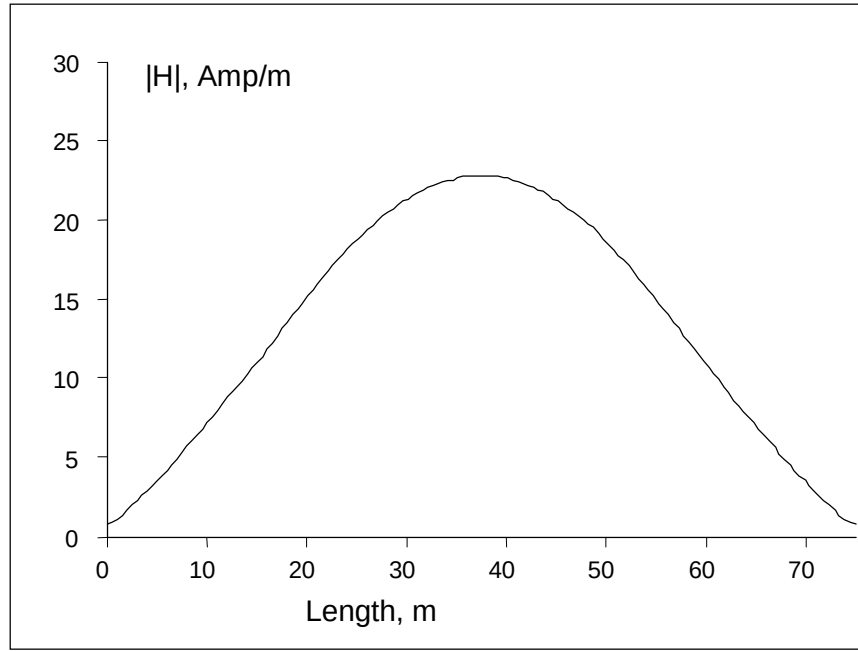


Şekil 4.22. 380 kV’luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı için oluşturulan SEY ağı

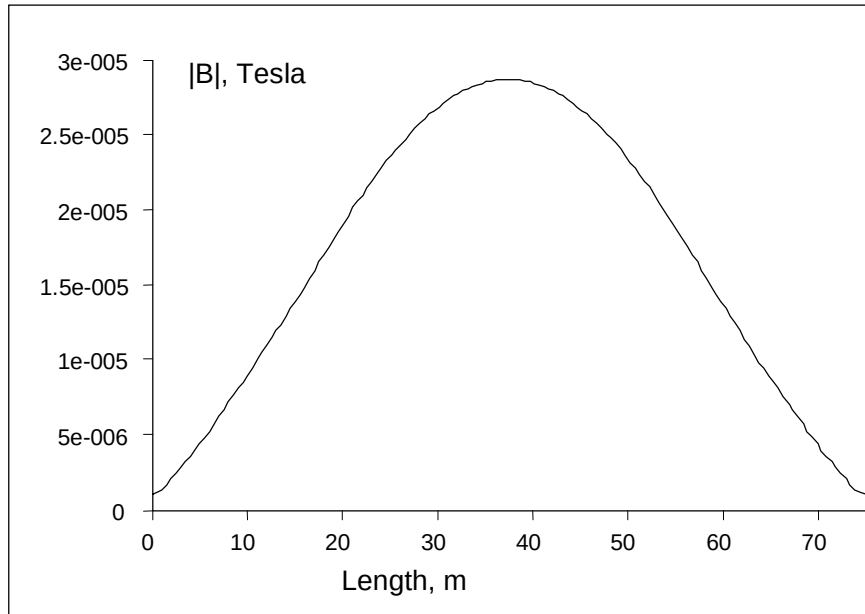
Program çalıştırılarak sonlu elemanlar ağı elde edilmiş ve eşlenik eğim yöntemi ile sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra magnetik akı dağılımları elde edilmiş 200 A için aşağıda ve diğer akım değerleri için Ek C’de verilmiştir. Bu akı dağılımlarından yararlanılarak çizilen yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağda ve 37.5 m solda magnetik alan ve magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimini gösteren grafikler 200A için bu bölümde diğer akım değerleri için de Ek C’de sunulmuştur. İletkenler için tüm tanımlamalar yapılarak, program çalıştırıldığında bu örnekteki hat için elde edilen sonlu elemanlar ağı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. 380 kV’luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 200 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



Şekil 4.24. 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



Şekil 4.25. 200 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

Sonuç olarak; 380 kV'luk yüksek gerilimli enerji iletim hatları çevresindeki magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyon dağılımının bulunabilmesi için yaptığımız örnek çözümlemelerde elde etmiş olduğumuz dağılımlar ve grafiklerden hat eksenine yaklaştıkça magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun arttığı, iletkenlerden ve hattan uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Dört farklı akım değeri için çizilmiş olan dağılımlar ve grafikler karşılaştırıldığında da, magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun akım arttıkça arttığı görülmektedir.

5. ELEKTRİKLİ ALETLERİN MAGNETİK ALAN DEĞERLERİ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte evlerde ve işyerlerinde kullanılan elektrikli aletlerin sayısı artmaktadır. İnsanların gün boyu yaşadıkları ortamda bulunan, farklı zamanlarda veya aynı anda kullanılabilen bu aletlerin, insan sağlığı açısından zararlı etkileri olup olmadığı araştırılmaktadır.

Elektrikli aletler ve aydınlatma için kullanılan lambalar da tıpkı enerji iletim hatları gibi çevrelerinde magnetik alanlar oluştururlar.

Elektrikle çalışan tüm aletler elektrik kaynağına bağlandığı zaman çevrelerinde magnetik alan oluşur. Bu alanların değerleri, aletlerin yapısına, büyüklüğüne ve üretim şekline göre değişmektedir. Örneğin iki ayrı marka veya model makinenin oluşturacağı magnetik alan değerleri birbirinden farklı olabilir [9].

Evlerde veya işyerlerinde bir oda içerisinde oluşabilecek magnetik alanların değeri ise, odadaki kaynakların türüne, sayısına, ve aynı anda kaç tanesinin çalıştığına bağlıdır. Odayı çevreleyen duvarlar magnetik alanı engelleyemez. Magnetik alan değeri aletlerin bulunduğu oda ile duvarın diğer tarafındaki odada yaklaşık olarak aynıdır [9].

5.1. Elektrikli Aletlerin Magnetik Alan Değerlerinin Bulunması İçin Yapılan Çalışmalar

Evlerde ve işyerlerinde kullanılan, elektrikli aletlerin çevrelerinde oluşturdukları magnetik alan değerleri ile ilgili yayınlanmış bilgiler vardır. Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (EPRI), Illinois Teknoloji Araştırma Enstitüsü (ITRI) ve Amerika Çevre Kurumu (EPA)'nın yayınladığı veriler Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmiştir [9].

Tablo5.1. Evde kullanılan çeşitli aletlerin arka yüzünde ölçülen mG cinsinden
magnetik alan değerleri [9]

Uzaklık(cm)		15	30	60	120
Saç Kurutma Makinesi (mG)	En Düşük	30	5	-	-
	Orta	70	10	2	-
	En Yüksek	100	20	3	-
Tıraş Makinesi (mG)	En Düşük	4	-	-	-
	Orta	100	20	-	-
	En Yüksek	600	100	10	1
Çamaşır Makinesi (mG)	En Düşük	4	1	-	-
	Orta	20	7	1	-
	En Yüksek	100	30	6	-
Ütü (mG)	En Düşük	6	1	-	-
	Orta	8	1	-	-
	En Yüksek	20	3	-	-
Elektrik Süpürgesi (mG)	En Düşük	100	20	4	-
	Orta	300	60	10	1
	En Yüksek	700	200	50	10
Blender (mG)	En Düşük	30	5	-	-
	Orta	70	10	2	-
	En Yüksek	100	20	3	-

Tablo5.2. Büroda kullanılan çeşitli aletlerin arka yüzünde ölçülen mG cinsinden
magnetik alan değerleri [9]

Uzaklık(cm)		15	30	60	120
Fotokopi Makinesi (mG)	En Düşük	4	2	1	-
	Orta	90	20	7	1
	En Yüksek	200	40	13	4
Fax Makinesi (mG)	En Düşük	4	-	-	-
	Orta	6	-	-	-
	En Yüksek	9	2	-	-
Floresan Lamba (mG)	En Düşük	20	-	-	-
	Orta	40	6	2	-
	En Yüksek	100	30	8	4
Havalandırma (mG)	En Düşük	110	20	3	-
	Orta	180	35	5	1
	En Yüksek	250	50	8	2
Elektrikli Kalem Açacağı (mG)	En Düşük	20	8	5	-
	Orta	200	70	20	2
	En Yüksek	300	90	30	30
Taşınabilir Isıtıcı (mG)	En Düşük	5	1	-	-
	Orta	100	20	4	-
	En Yüksek	150	40	8	1

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de magnetik alanın büyüklüğü, kendisini oluşturan aletten 6 inç (1 inç = 2.54 cm), 1,2 ve 4 feet (1 feet = 30.48 cm) olarak dört farklı uzaklıkta ölçülmüştür. Uzaklıkların her alet için aynı seçilme sebebi; aletler arasında karşılaştırma yapabilmeyi sağlamaktır. Aletler kullanıldığında vücudun bölümlerine olan uzaklıklara göre etkilenme oranları da değişebilir. Burada magnetik alan değerleri gün boyu kullanıldıkları yerlerde ölçülmüştür. Her alet için, her uzaklıkta en düşük, orta ve yüksek değer olmak üzere üç ayrı ölçüm değeri verilmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen magnetik alan değerleri miliGauss cinsinden verilmiştir [9].

Yapılan farklı bir araştırma sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’de verilmiştir. Tablo 5.3’de en çok kullanılan elektrikli aletlerin 3 farklı uzaklık değeri için magnetik alan değerleri, Tablo 5.4’de ise daha farklı uzaklıklarda ölçülmüş alan değerleri verilmiştir [8].

Tablo5.3. En Çok Kullanılan Elektrikli Aletlerin Magnetik Alan Değerleri [8]

Mag Alan Seviyesi (mG) Uzaklık(cm)	3.048 cm	30.48 cm	99.06 cm
Elektrikli Battaniye	2-80	-	-
Çamaşır Makinesi	8-400	2-30	0.1-2
Televizyon	25-500	0.4-20	0.1-2
Elektrik Sobası	60-2000	4-40	0.1-2
Mikrodalga Fırın	750-2000	40-80	3-8
Tıraş Makinesi	150-15000	1-90	0.4-3
Floresan Lamba	400-4000	5-20	0.1-3
Saç Kurutma Makinası	60-20000	1-70	0.1-3

Tablo5.4. Çeşitli Elektrikli Aletlerin Magnetik Alan Değerleri [8]

Mag Alan Seviyesi (mG) Uzaklık(cm)	10.16 cm	30.48 cm	91.44 cm
Kurutma Makinesi	4.8-110	1.5-29	0.1-1
Çamaşır Makinesi	2.3-3	0.8-3.0	0.2-0.48
Kahve Makinesi	6-29	0.9-1.2	<0.1
Tost Makinası	10-60	0.6-7.0	<0.1-0.11
Ütü	12-45	1.2-3.1	0.1-0.2
Konserve Açacağı	1300-40.000	31-280	0.5-7.0
Mikser	58-1.400	5-100	0.15-2.0
Blender	50-220	5.2-17	0.3-1.1
Elektrikli Süpürge	230-1300	20-180	1.2-18
Taşınabilir Isıtıcı	11-280	1.5-40	0.1-2.5
Saç Kurutma Mak.	3.1400	< 0.1-70	< 0.1-2.8
Tıraş Makinesi	14-1600	0.8-90	< 0.1-1.5
Televizyon	4.8-100	0.4-20	< 0.1-1.5
Floresan Lamba	40-123	2-32	< 0.1-2.8
Masa Üstü Floresan Lamba	100-200	6-20	0.2-2.1
Testere	200-2100	9-220	0.2-10
Matkap	350-500	22-31	0.8-2.0

Tablo 5.3 ve 5.4 karşılaştırıldığı zaman aynı alet ve aynı uzaklık için değerler arasında fark olduğu görülmektedir. Bu farkın nedeni, daha öncede sözünü ettiğimiz gibi ölçülen aletlerin model, marka ve üretim şekillerinin birbirinden farklı olmasıdır.

Tablolardan da görüldüğü gibi magnetik alan değerleri aletlerden uzaklaştıkça düşmektedir [8].

6. MAGNETİK ALANLARIN BİYOLOJİK ETKİLERİ

Modern toplumlarda yaşayan hemen herkes sürekli olarak doğal olaylardan kaynaklananların çok üzerinde elektromagnetik alan ve dalgalara maruz kalmaktadır. Bunların yüksek şiddet veya güç düzeyinde insan sağlığına zararlı olduklarına kuşku yoktur. Ancak insanların günlük hayatta karşılaştıkları daha düşük düzeydeki alan ve dalgaların dahi uzun vadede insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilerinin olup olmadığı tartışma konusu olmaya devam etmektedir [19].

Çevrenin kirletilmesinin yoğun eleştirilere sebep olduğu günümüzde, elektromagnetik çevre kirlenmesi artan radyo ve TV kanalları ve cep telefonları nedeniyle gündeme gelmiştir. Elektromagnetik alanlar (EMA) insan organizmasında büyük ölçüde karışıklığa sebep olabilirler. İnsan sinir sistemi 500.000 km uzunluğu, 25 milyar sinir hücresi ile dev bir elektriksel donanıma sahip elektronik sistemdir. Bedeni fonksiyonların hepsi 1-250 mikrovolt arası çok küçük gerilimli elektrik uyarıları ile devam eder. EMA'nın dışarıdan bu hassas sisteme tesir etmesi durumunda, doğal sirkulasyon zarar görebilir. Dolaşım sistemi ve sinir sisteminde buna bağlı bozukluklar ortaya çıkabilir. Vücudun bağışıklık sisteminin sürekli zayıflamasının “ kanseri artıran bir etki” yapacağı da artık tıp tarafından kabul edilmiş bir konudur [17].

Magnetik alanlara maruziyetin araştırılması başta mesleki çalışanları olmak üzere, genel halk sağlığı açısından büyük önem taşır. Magnetik alanlar çevremizi kuşatmakta olup, kaynakların gittikçe artan bir biçimde kullanılması, maruziyet miktarının potansiyel seviyesinde bir artışa neden olmaktadır. EMA'ların biyolojik sistemler üzerinde nörolojik, nöroendoknirolojik, hematolojik, kardiovasküler etkiler oluşturduğu ve bağışıklık sistemi ve hücre çoğalmasını etkilediği bilinmektedir.

Araştırmalar iki yoldan sonuç almaya çalışmaktadır;

A. Epidemiyolojik alışmalar: Belirli bir hastalık ile muhtemel sebebi arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak araştırır.

B. Deneysel alışmalar: Laboratuvarda hayvanlar üzerinde doku hücrelerinin alanlara karşı gösterdikleri etkileri test edilir.

Magnetik alanların etkilerinde, anlamlı epidemiyolojik çalışma yapmak hayli zordur; çünkü dünyanın her yerinde elektrikten faydalanma söz konusu olduğu için magnetik alanlara maruz kalmamış bireylerin bulunması mümkün değildir.

Elli yıl öncesine kadar magnetik alanların atmosferde oluşan doğal seviyesi hayli düşük değerde idi. Endüstrileşme ile birlikte Elektromagnetik (EM) enerjinin kullanımının yaygınlaşması, E.M. alanlarının her frekansında insan, hayvan ve bitkileri etkileyen çevresel bir artış meydana gelmiştir. E.M. alanlarının kullanımının gelecekte daha da artış göstereceği dikkate alınırsa konunun önemi daha da artmaktadır. Elektromagnetik enerji üreten cihazlara, mikrodalga el telsiz ve telefonları, alarm cihazları, otomatik kapılar, TV ve Radyo vericileri ve g iletim hatları örnek olarak verilebilir. Ayrıca endüstriyel işlemlerde ısıtma amacıyla kullanılan daha düşük frekanslı RF ısıtıcılar da sayılabilir. Bu uygulamalarla ilgili mesleklerde çalışanlar ve bakım personeli, ısıtma yapan cihaza sürekli olarak yakın olmak durumunda kaldıkları için birinci derecede risk altındadırlar.

Magnetik Alanların iki tür biyolojik etkisi vardır.

- Birinci kısım kısa zamanda hissedilen etkiler diyebileceğimiz baş ağrıları, göz yanmaları, yorgunluk, halsizlik ve baş dönmeleri gibi şikayetlerdir. Ayrıca gece uykusuzlukları, gündüz uykulu dolaşım, küskünlük ve sürekli rahatsızlık nedeniyle topluma katılmamak gibi neticeler de literatürde rapor edilmiştir.
- Diğer bir etki ise moleküller ve kimyasal bağlara, hücre yapısına vucut koruma sistemine yaptığı ve uzun sürede ortaya çıkabilen etkilerdir.

Magnetik alanların kansere yol açıcı bir faktör olduğu henüz kesin olarak (% 100) ispat edilmemiştir. Fakat yapmıyorda diyemeyiz. Zira bunun kesinleşmesi için insanlar üzerinde, uzun süreli, epidemiyolojik ve deneysel çalışmalar yapılması gereklidir. Bugün ise sadece hayvanlar üzerinde yapılan çalışmalardan yorumlar yapılmaktadır. Hayvanlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda magnetik alanların kanser riskini artırıcı etkileri görülmüştür.

Bu etkilerin oluşması magnetik alanın frekansına, şiddetine, vücut ölçülerine, vücudun elektriksel özelliklerine, alanın mesafesine ve en önemlisi etki süresine bağlıdır. Sağlık etkilerinin tam olarak hangi doz parametresi ile orantılı olduğu ve bunların eşik değerlerinin ne olması gerektiği tartışma konusudur. Ancak genel olarak, ne kadar uzun süre maruz kalınırsa zararın da o kadar büyük olabileceği düşünülebilir [17, 19].

En çok yüksek gerilim hatlarında veya yüksek gerilim tesislerinde, radyo ve TV vericilerinde çalışanlar tehlikeye maruz kalmaktadırlar.

TV, Radyo ve cep telefon hizmetlerine yaydıkları güç açısından sınırlamalar getirilmiştir. Elektrik enerjisiyle çalışan bütün cihazlar yaydıkları alanlardan ötürü diğer elektronik cihazlarda etkileşime (interferans) sebep olurlar. Bu etkileşim aşırı olduğu zaman cihazlar bazı fonksiyonlarını yapamazlar. İnsanlarda ise biyolojik etkilere neden olurlar. İnterferansın önlenmesi için cihazların ekranlanması gerekmektedir.

Yüksek gerilim hatlarının civarında, hattın olan uzaklığa ve hattın gerilimine bağlı olarak değişik seviyelerde magnetik alanlar oluşur. Taşıma hatları civarında magnetik alan değerleri 10 - 40 mikro Tesla (T) ($1\text{ T} = 10^4\text{ Gauss}$) arasında değişir. Hattan 100 metre uzaklıkta magnetik alan 1 mikro T gibi çok küçük değere düşer. Endüstriyel çevrelerde oluşan magnetik alanlar taşıma hatlarına göre 10-100 kat daha büyüktür. Son yıllarda yerleşim bölgelerinde magnetik alan artışı ile ilgili olarak kanser olaylarındaki artışın paralellik gösterdiği ve bilhassa çocuklarda lösemi hastalığı ile ilişkili olduğu ileri sürülmüştür [17].

6.1. Magnetik Alanların Canlılar Üzerindeki Etkileri Ve Araştırma Sonuçları

Elektromagnetik enerjinin günümüzde yaygın kullanımı beraberinde “EM kirlenme” olarak tanımlanabilecek yeni bir çevre sorunu ortaya çıkarmaktadır. Bu kirlenmenin canlılar üzerinde duyu organları ile doğrudan hissedilmemesi yüzünden durum daha tehlikeli bir hal almaktadır. Uzun süreli EM radyasyona maruziyetin kümülatif etkiler oluşturması kuvvetle muhtemeldir. 100 yıl önce gezegenimizde hava, su, gürültü kirliliklerinin bu seviyede olmadığı bilinmekte olup, zaman içerisindeki yığılmaları dünyamızda önemli çevre sorunlarını doğurmuştur. Bu nedenle EM kirlenme olayının daha önce yapılan ihmal ve hatalar tekrarlanmadan, bilimsel olarak ele alınıp incelenmesi önemli bir ihtiyaçtır. EM radyasyonunun vücut tarafından yutulması neticesinde, vücut sıcaklığı, güce ve diğer bazı parametrelere bağlı olarak 0.25-2 dereceye kadar artabilir. Hastalık olmadan artan bu ısı, pek çok zararlara neden olmaktadır. Vücudun bağışıklık sisteminin sürekli zayıflaması kanser artıran bir etki olduğu artık tıp tarafından kabul edilmiştir. Bu açıdan güvenlik standartlarının uygulanması ve yenilenmesi gibi çalışmalar desteklenmelidir.

Bu konuda yapılacak çalışmalar gereksiz yere E.M. radyasyonuna maruziyeti önleyeceği gibi toplumun E.M. enerjiden optimum yararlanmasında sağlayacaktır. E.M. alanlarının biyolojik etkilerini de tespit etmek için dünyanın bir çok ülkesinde araştırmalar yapılmaktadır [17, 18].

Yapılan araştırmalar sonucunda magnetik alanların etkilerine dair bazı bulguları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

1. Son yıllarda yapılan yoğun araştırmalar E.M. alanların hücreleri etkilediğini göstermekle birlikte kansere yol açıcı bir faktör olduğu henüz kesin olarak (%100) gösterilememiştir. Bununla beraber çocuklarda ve yaşlılarda 0.4 mikro T’den yüksek değerlerdeki magnetik alanların kanser ile ilgisi hakkında önemli ilişkiler ortaya çıkmıştır. Fakat bu ilişkinin kesinleşmesi için insanlar üzerinde epidemiyolojik ve deneysel çalışmalar yapılmalıdır.

2. Moleküler ve kimyasal bağları bozacak kadar kuvvetli olmadığı anlaşılan E.M. alanların hücrelerin büyüme ve normal olarak çoğalmalarına etki edip edemediği

araştırılmaktadır. E.M. alanların alzheimer hastalığına neden olduğu ihtimali hayli yüksektir.

3. Bazı araştırmalara göre E.M. alanlar hücre zarındaki kalsiyum akışına etki ederek adele kasılmasına, yumurta kısırlaşmasına ve hücre bölünmesine etki ederek kansere neden olmaktadır. E.M.alanlar ayrıca sinyalleriyle hücreleri etkileyerek normal büyüme yeteneklerini bozmaktadır.

4. Çok düşük frekanslı (ELF) alanların dört önemli yönden etkilerinden şüphe edilmektedir.

- a) Hücreler arası aktiviteyi etkilemek
- b) Hormon salgısını etkilemek
- c) Vücudun koruma sistemini etkilemek
- d) Embriyonlarda anormal gelişmelere neden olmak

5. RF Dalgalarının bilinen potansiyel biyolojik etkileri şu başlıklarla toplanabilir

- a) Tek bir hücre veya hücre sistemlerini etkiler
- b) Genetik düzen ve gelişmeyi etkiler
- c) Gelişmiş organ,doku veya hücre sistemlerini etkiler
- d) Metabolizma ve düzenleme sistemlerini etkiler
- e) Moleküler sistemleri etkiler (Bu etki ısınmadan dolayı görülen değişiklikler olup, genellikle elektromagnetik enerji soğurulmasının yüksek olduğu durumda ortaya çıkar).

6. EMA'nın kadınlarda östrojen salgısını artırdığını, östrojenin meme kanseri yapabileceğini ve erkeklerde testosteron düzeyini azalttığını, bunun ise prostat veya erbezi kanserine neden olabileceği literatürde ifade edilmiştir.

7. Filtre ve ekran kullanmak gibi yöntemler, katot ışın tüpü, monitör ve televizyonların yaydığı düşük frekanslı magnetik alanları önlemede başarısızdır.

Magnetik alanların yayılmasına insan vücudu, örtü, duvar gibi şeyler engel olamaz. Sıvı kristal ekran (LCD) bilgisayarlarda elektrik ve magnetik alan yayılımı yoktur. Darbeli elektrik ve magnetik alanların darbesizden daha zararlı olduğuna dair bilimsel deliller mevcuttur. Video ve bilgisayar monitörlerinden yayılan RF enerjisinin hamile kadınlarda düşük yapma oranı ve gözler üzerinde zararlı etki oluşturma ihtimali maruziyet süresine bağılı olarak artmaktadır.

7. GÜVENLİK STANDARTLARI VE KORUNMA YÖNTEMLERİ

7.1. Güvenlik Standartları

Teknolojideki gelişmeler ve elektriksel enerjinin dağıtımında giderek artan talepler, ELF magnetik alanlarına güvenilir sınırlarda maruz kalma sorununuda beraberinde getirmiştir. Biyolojik etki verilerine dayanılarak hazırlanan eşik seviyeler, olumsuz sağlık etkileri açıkça belli olmadığı durumlarda magnetik alanları kullanan teknolojiden elde edilen faydalar da dikkate alınarak, bir sağlık riski hesaba katılarak hazırlanır.

Magnetik alanlara maruz kalmadan dolayı açığa çıkan biyolojik etki verilerini değerlendiren kurumların karşılaştıkları ana problem; bu konuda kendilerine çelişkili ve tartışmalı bilgilerin gelmesidir. Magnetik alana maruziyet seviyesi ile hastalık yapıcı (patho-physiological) veriler arasında açıkça belirlenmiş bir ilişki yoktur. Bu da, standartların tasarlanması problemini çok daha karmaşık hale getirmektedir. Çoğu durumlarda gerekli bilgiyi elde etmek için, doz-etki ilişkisini değerlendirip sağlam sonuçlara varmak oldukça zor ve imkansızdır. İdeal olanı, standartları; sabitleşmiş insan verilerine dayandırmak olacaktır. Bununla beraber, insanlara ait verilerin yetersizliğinden dolayı iyi dizayn edilmiş, gerektiği şekilde analiz edilmiş hayvan deneylerinden elde edilecek bazı verilerin insanlar üzerine uyarlanmasına ihtiyaç vardır.

Bir standart; talimat ve yönetmelikleri içerip, birey ve insan gruplarının güvenliğini arttıran 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 (isteğe bağlı standart). Standartlar maksimum maruziyet limitlerini ve kişisel maruz kalma için diğer güvenlik kurallarını kesin olarak belirtebilir veya bir

aracın görevi, dizaynı, yapısı ve çalışması hakkında detaylı bilgi sağlayabilir.

Genel olarak toplumun veya mesleği gereği magnetik alanlara maruz kalan kişileri korumak için maruziyet standartları 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 edinceye kadar, sağlık riski oluşturabilecek kısa süreli yönetmeliklerle güvenlik limitleri oluşturulmuştur [15].

7.1.1 Çeşitli Ülkelerde Yayınlanan Güvenlik Standartları

7.1.1.1. ABD Eyaletleri

Amerika’da ülke genelinde, 60 Hz frekansında elektromagnetik alanlar için belirlenmiş ulusal standartlar bulunmamaktadır. Ülkede enerji dağıtım sistemi, kamu yada özel yatırımcılara ait pek çok farklı şirket tarafından işletilmektedir. Bu kuruluşlar hem eyalet, hem de ulusal düzeyde kontrol edilmektedir. Ülke genelinde, halk sağlığı üzerinde etkisi olan elektromagnetik alanların düzenlenmesi ile ilgili bir kurum olmadığı için eyaletler bu konu ile ilgilenmişlerdir [8].

Eyaletlerin bazıları enerji iletim hatlarının çevresinde oluşan elektrik alanlar için standartlar belirlemişlerdir. Magnetik alanlar için ise 2 eyalet (NewYork ve Florida) standart belirlemiştir. Bu magnetik alan standartları, eyaletlerde bulunan hatların en yüksek yük değerinde oluşturdukları alan değerleridir. Bu standartların hedefi, ileride kurulacak olan hatların şu andaki elektromagnetik alan seviyelerinin üzerine çıkmamasını sağlamaktır. Eyaletlerde belirlenmiş sınırlar Tablo 7.1’de verilmiştir [14].

Eyaletlerdeki düzenlemeler elektromagnetik alanları sadece bir yönden düzenlemektedir. Magnetik alanların büyüklüğünü sınırlandıran düzenlemeler ise daha geniş kapsamlıdır. Magnetik alanlarda yüksek değerler dağıtım sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Doğru bir düzenleme, alt istasyonlarda, dağıtım transformatörlerinde ve servis düzeyinde yapılmalıdır [8].

Tablo 7.1. ABD’de Eyaletlerdeki elektromagnetik alan standartları [14]

Eyalet	Elektrik Alan		Magnetik Alan	
	Hat Boyunca	Hat Çevresinde	Hat Boyunca	Hat Çevresinde
Florida	8kV/m ^a 10kV/m ^b	2 kV/m	-	150mG ^a 200mG ^b 250mG ^c
Minnesota	8 kV/m	-	-	-
Montana	7 kV/m ^d	1 kV/m	-	-
NewJersey	-	3 kV/m	-	-
NewYork	11.8 kV/m 11 kV/m* 7 kV/m ^d	1.6 kV/m	-	200mG
Oregon	9 kV/m	-	-	-

a : 69 – 230 kV’luk hatlar için

b : 500 kV’luk hatlar için

c : 500 kV’luk hatlardaki kesin değerler

d : Tepe geçişinde maksimum değer

* : Yol geçişinde maksimum değer

7.1.1.2. Almanya

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

Standart, alçak frekans magnetik alanlar için ayrıca sınır değerleri düzenler. Magnetik alan için, maksimum müsaade edilebilir seviye, 0 Hz - 30 kHz frekans aralığında aşağıdaki ifade ile bulunur [1].

$$H = c / f^d \quad (5.1)$$

Bu ifade de H, A/m olarak sınır değer, f Hertz cinsinden frekans, c ve d sabitleri ise Tablo 7.2.'de verilmiştir.

Tablo 7.2. ELF magnetik alan sınır değerleri için hesaplamalarda kullanılan parametre değerleri [1]

Frekans (Hz)	c	d
0-2	önemsiz	0
2 - 30000	21593	0.4325

Sınır değerler, tüm vücudun sınırsız maruz kalmaları için tasarlanmıştır. Kısa süre için (her saat başına 5 dakika), sınır değerın 1.5 katı fazlası magnetik alan şiddetine maruziyete izin verilir [1].

7.1.1.3. İsveç

Sağlık ve güvenlik konusunda duyarlı olan İsveç hükümeti yoğun araştırmalardan sonra, alçak frekanslı magnetik alan sınırını bilgisayar monitörleri için 2.5 mG olarak belirlemiştir. İsveç standartları dünya çapında kabul edilmektedir. İnsanların bu sınır değerın üzerinde bir magnetik alana maruz kalması durumunda, çeşitli sağlık problemleri olabileceği belirtilmektedir [8].

7.1.1.4. Avusturalya

Avusturalya'da 1989 yılında yayınlanan, 50/60 Hz frekansındaki magnetik alan sınırları Tablo 7.3'de görülmektedir [8].

Tablo 7.3. Avusturalya'daki standartlar [8]

	Magnetik Alan (G)
Halk (24 saat)	1
Halk (Günde 2 saat)	10
Mesleki (24 saat)	5
Mesleki (Günde 2 saat)	50

7.1.1.5. İngiltere

İngiltere'de 1988 yılında 50/60 Hz frekansındaki magnetik alanlar için yayınlanmış standartlarda, hem genel halk, hem de ilgili meslek grupları için 20 gauss limit değeri belirlenmiştir. Bu değeri Amerika ve İsveç'deki standartlardan oldukça yüksektir [8].

7.1.2. Uluslararası Radyasyondan Korunma Derneği (IRPA) Tarafından Belirlenen Sınırlar

1989'da Uluslararası Radyasyondan Korunma Derneği (IRPA), geçici elektromagnetik alan maruziyeti için bir kılavuz hazırlamıştır. Bu kılavuzda, işyerlerinde işçiler için ve genel halk için verilmiş sınırlar Tablo 7.4'de görülmektedir.

IRPA bu kılavuzu hazırlarken, elektromagnetik alanların insan vücudunda indüklediği akımın, vücuttaki doğal (fizyolojik) olarak oluşan akımlara eşit yada büyük olduğu varsayımından yola çıkmıştır. Bu nedenle IRPA'nın önerdiği limitler sağlık üzerinde etkisi olabilecek alan seviyelerinden daha büyüktür ve IRPA'nın belirlediği sınırlar yetersiz bulunmuştur [8, 14].

Tablo 7.4. IRPA Tarafından Belirlenmiş Sınırlar [14]

Maruziyet	Magnetik Alan (G)
İş Yerleri	
Bütün gün	5
Kısa süre	50
Uzuvlarda oluşan	250
Genel Halk	
Günde 24 saate kadar	1
Günde birkaç saat	10

7.1.3. Türkiye’de Yayınlanan Güvenlik Standartları

Ülkemizde Türk Standartları Enstitüsünün, TS ENV 50166-1/Nisan 1996 Baskı ICS 29020 sayılı “İnsanların Elektromagnetik Alanlara Maruz Kalması - Düşük Frekanslar (0 Hz – 10 kHz)” adlı standardında, magnetik alanlar için frekansla ilgili referans değerler ve temel sınırlamalar yer almaktadır.

Standartta işçiler ve genel halk için ayrı ayrı referans seviyeleri belirlenmiştir. Durgun magnetik alanın bütün vücut için maruz kalma temel sınırlaması 2 T olarak belirlenmiştir [16].

7.1.3.1. Referans Seviyeleri

Magnetik alanlar için belirlenen referans seviyeleri Tablo 7.5 ve Tablo 7.6’da verilmiştir. Tablo 7.5’de işçiler için Tablo 7.6’da da genel halk için değerler görülmektedir.

Tablo 7.5. İşçiler İçin Magnetik Alan Referans Seviyeleri [16]

Frekans (f, Hz)	Magnetik Alan
0-0.1	2 T
0.1-0.23	1.4 T
0.23-1	$320 / f$ mT
1-4	$320 / f^2$ mT
4-1500	$80 / f$ mT (50 Hz’de 1.6 mT)
1500-10000	0.053 mT

Tablo 7.6. Genel Halk İçin Magnetik Alan Referans Seviyeleri [16]

Frekans (f, Hz)	Magnetik Alan
0-0,1	0,04 T
0,1-1,15	0,028 T
1,15-1500	$32/f$ (mT) (0.64 mT 50 Hz’de)
1500-10000	0,021 mT

Magnetik 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 edilmektedir. Genel halk için 0-0.1 Hz frekansta 100 mT, 0.1-7.1 Hz’de 71 mT, 7.1 - 1500 Hz’de $500/f$ mT, 1500-10000 Hz’de 0.33 mT değerlerine ulaşır [16].

7.1.3.2. Temel Sınırlamalar

İşçiler için statik magnetik alanlara bütün vücudun maruziyeti durumunda temel sınırlama 2 T olarak belirlenmiştir. Bu değerin üstünde denge kaybı, bulantı ve olumsuz sağlık etkileri ihtimali vardır. Bu etkiler beyin fonksiyonlarının zarar görmesi ile kalp ritm bozukluklarından kaynaklanır. Kol ve bacaklarda kritik organlar veya büyük kan damarları olmadığından 5T'lik bir değere müsaade edilmektedir. Kabul görmüş etkilerin mekanizmasının incelenmesi sonucu iş günü boyunca bütün vücudun maruz kalmasının zaman ağırlıklı ortalama değeri 0.2 T ile sınırlandırılmıştır. Genel halk için devamlı maruz kalmada bu sınır 0.04 T'ya indirilmiştir [16].

7.2. Magnetik Alanlardan Korunma Yöntemleri

Magnetik alanların zararlı etkilerinden korunmak için aşağıdaki tavsiyeler dikkate alınmalıdır [17].

Herşeyden önce konuyla ilgili ülkemizde yapılan veya getirilen elektrik enerjisini kullanan cihazların denetlenmesi gerekir. CE damgası olmayan ürün kullanılmamalıdır. Ayrıca Radyo ve TV kanalları ve mobil iletişim için bir güç sınırlandırılması getirilmelidir.

Aşağıdaki öneriler elektromagnetik radyasyona belirli zamanlar değil, sürekli olarak maruz kalanlar için geçerlidir.

·Yüksek gerilim hatları yerleşim birimlerinin uzağına taşınmalı. 380 kV için en az 60m, 154 kV için 40 m emniyet bölgesi bırakılmalıdır.

·Magnetik alanlarda çalışanların korunması için gereken önlemler –özel giysiler, yalıtım sistemleri vb- alındıktan sonra çalışma süreleri radyasyon alımının miktarına ve sürekliliğine göre belirlenmelidir.

·Elektrikli radyolu saatler, tele-sekreterler ve benzeri aletleri yatak odasında bulundurulmamalı, şayet çok gerekliyse yataktan en az 1,5 m veya daha uzağına yerleştirilmelidir.

·Yatak – özellikle de çocukların yatağının- başucunun dayandığı duvarda evin elektrik hatlarının geçmemesine özen gösterilmelidir.

·Bilgisayar ekranlarından en az bir kol mesafesi uzaklıkta oturulmalı, kullanılmadığı zamanlarda bilgisayarlar kapalı olmalıdır.

·Bilgisayarlarını arkası en tehlikeli bölgedir. Büro ya da evdeki bir bilgisayarın arkasına 1,5 metreden fazla yaklaşılmamalı ve arkası kullanılmayan bir alana yönlendirilmelidir.

·Televizyon en yakın ekrana 2 metre uzaklıktan izlenmeli ve arkası sokağa doğru olmalıdır.

·Saç kurutma makinası mümkün olduğu kadar az kullanılmalıdır. Uzmanlar, uzun süreli ve sürekli kullanımın kellikten göz bozukluğuna uzanan bir zararlar listesi oluşturulabileceğini iddia etmektedirler.

·Fişi takılı aletlerden uzak durulmalıdır.

·Mikrodalga fırınından, çamaşır ve bulaşık makinalarından buzdolaplarından ısımadan korunmak için cihazın önünde mümkün olduğunca kısa süre kalınmalı ve özellikle de küçük çocukların mikrodalga fırına yaklaşmalarını engellenmelidir.

·Cep telefonları yalnızca zorunlu hallerde kullanılmalıdır.

8. SONUÇLAR

Teknolojinin gelişimine bağlı olarak elektrik enerjisinin kullanımı ve ihtiyacı giderek artmakta bunun sonucunda insanlar, hayvanlar, bitkiler yani canlılar ve tüm çevre magnetik alanların etkisi altında kalmaktadır. Elektromagnetik kirliliğe gözle görülmemesi ve etkilerinin hemen ortaya çıkmamasından dolayı yeterli önem verilmemekte ve göz ardı edilmektedir.

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

Türk Standartları Enstitüsü tarafından magnetik alanlar için birtakım sınırlamalar getirilmiştir. Fakat insanlara bu sınırlamaların gerekliliği konusunda yeterince bilgi verilememektedir.

Elektrikle çalışan tüm aletler elektrik kaynağına bağlandığı zaman çevrelerinde magnetik alan oluşur. Bu alanların değerleri, aletlerin yapısına, büyüklüğüne ve üretim şekline göre değişmektedir. Evlerde veya işyerlerinde bir oda içerisinde oluşabilecek magnetik alanların değeri, odadaki kaynakların türüne, sayısına, ve aynı anda kaç tanesinin çalıştığına bağlıdır. Odayı çevreleyen duvarlar magnetik alanı engelleyemez. Magnetik alan değeri aletlerin bulunduğu oda ile duvarın diğer tarafındaki odada yaklaşık olarak aynıdır.

Enerji iletim hatları ise elektrikli aletlere oranla çok daha fazla elektromagnetik kirlenme meydana getirebilirler. Özellikle büyük kentlerde plansız yapılaşmanın sonucu olarak yüksek gerilimli enerji iletim hatları ve transformatör merkezleri konutlara çok yakın yerlerde bulunmaktadır. Bu konutlarda yaşayan insanlar yüksek seviyeli magnetik alanlara uzun süre maruz kalırlar.

Magnetik alan hesabında değişik yöntemler kullanılabilir. Tezde Biot-Savart Yasası'ndan yararlanılarak elle yapılan çözümde, 380 kV'luk üçlü demet iletkenli,

yatay düzenli tek devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattı örnek olarak seçilmiştir. Yapılan hesaplamalarda, orijin olarak kabul edilen orta fazın tam altında, toprak seviyesinden 1.2 m, 1.6 m ve 1.8 m düşey yüksekliklerde alınan sırasıyla A, B ve C noktaları için yapılan çözümlerde, akımı sabit tutup, iletim hattına yaklaştığımızda magnetik alan şiddeti ($H_A < H_B < H_C$) ve magnetik endüksiyon ($B_A < B_B < B_C$) değerlerinin arttığı, dış fazdan 14.6, 19.6 ve 24.6 m uzaklıklarda ve yerden 1m yüksekliklerde alınan sırasıyla D, E ve F noktaları için yapılan hesaplamalarda da hattan uzaklaştıkça magnetik alan şiddeti ($H_D > H_E > H_F$) ve magnetik endüksiyonun ($B_D > B_E > B_F$) azaldığı görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlardan, aynı nokta için akım yükseldiği zaman magnetik alan şiddeti ve endüksiyonunda yükseldiği görülmektedir.

Bu çalışmada, FEMM 4.0 (Finite Element Magnetics) adlı paket sonlu elemanlar yöntemi çözüm programı kullanarak bilgisayarda ortamında da magnetik alan hesaplamaları yapılmıştır. 380 kV'luk üç ayrı yüksek gerilimli enerji iletim hattı tipi için, iletkenlerden 200 A, 400 A, 800 A ve 1000 A akım akması durumunda ayrı ayrı yapmış olduğumuz çözümlemelerde, problemler gerçek boyutları ile tanımlanmış, çözümler kartezyen koordinatlarda yapılmıştır. Her çözüm aşamasında yaklaşık 7000-8000 elemanlı sonlu elemanlar ağı elde edilmiş ve eşlenik eğim yöntemi ile 10^{-8} doğrulukla sonuçlar elde edilmiştir. Problem çözümleri magnetik akı dağılımları elde edilerek Bölüm 4, Ek B ve Ek C'de şekilleri verilmiştir. Elde edilen akı dağılımlarından yerden yükseklikle (örneklerde 1m) ve hattan uzaklıkla (örneklerde 37.5 m sağa, 37.5 m sola) magnetik alan ve endüksiyon değişimleri bulunarak grafikleri çizilmiş ve dağılımlarla birlikte bunlarda sunulmuştur. Sonuç olarak; 380 kV'luk yüksek gerilimli enerji iletim hatları çevresindeki magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyon dağılımının bulunabilmesi için yaptığımız örnek çözümlemelerde elde etmiş olduğumuz dağılımlar ve grafiklerden hat eksenine yaklaştıkça magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyonun arttığı, iletkenlerden ve hattan uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Dört farklı akım değeri için çizilmiş olan dağılımlar ve grafikler karşılaştırıldığında da, magnetik alan şiddeti ve magnetik

endüksiyonun akım arttıkça arttığı görülmektedir. Elde edilen verilerden, magnetik alanların etkilerinin uzaklıkla hızla azalacağını söyleyebiliriz. Bu yüzden inşa edilecek olan yeni binaların iletim hatlarından mümkün olduğunca uzak yerlere yapılması gerekmektedir.

Hatların çevresinde oluşan magnetik alanların değeri, akım gibi elektriksel büyüklüklerin yanı sıra hattın geometrik özelliklerine, iletkenlerin yerden yüksekliklerine, aralarındaki açıklığa, tek devre, çift devre olmasına da bağlıdır. Yaptığımız hesaplamalardan görüldüğü üzere çift devre bir yüksek gerilim hattında magnetik alan şiddeti ve magnetik endüksiyon değerleri daha yüksek çıkmıştır.

Magnetik alanlara maruz kalmanın çeşitli biyolojik etkileri vardır. Bunlar kısa zamanda hissedilen etkiler ve uzun sürede ortaya çıkan etkiler olmak üzere iki türdür. Baş ağrıları, göz yanmaları, yorgunluk, halsizlik ve baş dönmesi gibi şikayetler, gece uykusuzlukları, gündüz uykulu dolaşım, küskünlük ve sürekli rahatsızlık nedeniyle topluma katılmamak gibi kısa süreli etkiler ve moleküller ve kimyasal bağlara, hücre yapısına vucut koruma sistemine yaptığı ve uzun sürede ortaya çıkabilen etkilerdir. Etkilerinin oluşması magnetik alanın frekansına, şiddetine, vücut ölçülerine, vücudun elektriksel özelliklerine, magnetik alanın mesafesine ve en önemlisi etki süresine bağlıdır. Buna göre en çok tehlikeye yüksek gerilim hatlarında veya yüksek gerilim tesislerinde çalışanlar maruz kalmaktadır.

Elektromagnetik alanların etkileri uzaklık ile hızla azalacağından, elektrikli aletlerin mümkün olduğunca uzakta çalıştırılması, kullanılmayan aletlerin ya kapalı tutulması ya da fişten çıkarılması, saç kurutma makinasının mümkün olduğunca az kullanılması, elektrikli battaniye kullanılmaması ya da yatmadan önce battaniyeyi ısıtıp, sonra fişten çekilerek kullanılması, elektrikli tıraş makinesini şarjlı kullanmanın tercih edilmesi, TV ekranlarından (ön ve arkasından) en az 2 m uzakta bulunulması, bilgisayarın arkasına 1,5 metreden fazla yaklaşılmaması ve arkasının kullanılmayan bir alana yönlendirilmesi, çamaşır, bulaşık, buzdolabı vs. makineleri çalışırken yakınında bulunulmaması, özellikle çocukların bulunduğu ortamlarda ve yatak odalarında magnetik alan üreten cihazların bulundurulmaması gibi önlemlerle elektromagnetik alan etkisinden korunmak mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Umurkan, N.**, 1995. Enerji İletim Hatlarında Elektrik Ve Magnetik Alan Hesabı Ve Biyolojik Etkilerinin Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Umurkan, N., Çakır, H. ve Arslan, F.**, 1998. Enerji İletim Hatlarının Çevresindeki Elektromagnetik Alanlar, 3e Endüstri & Teknik Fuarı, 27 – 31 Mayıs, Gaziantep, s. 52-55
- [3] www.teas.gov.tr/EMA_etki.htm
- [4] **Dengiz, H.**, 1991. Enerji Hatları Mühendisliği, Kardeş Kitabevi, Ankara.
- [5] **Akpınar, S.**, 1997. Yüksek Gerilim Tekniğinin Temelleri, İstanbul.
- [6] **Erna, H.**, 1979. Pratik Elektrik ve Uygulamalarıyla Modern Elektroteknik, İnkılap ve Aka Kitabevleri, İstanbul.
- [7] **Dalfes, M.**, 1984. Elektroteknik, Kipaş Dağıtımçılık, Çağaloğlu-İstanbul.
- [8] **Horton, W. F. and Goldberg, S.**, 1995. Power Frequency Magnetic Fields and Public Health, CRC Press, USA
- [9] **Yazarsız**, December 1992. Emf İn Your Environment, U.S. Environmental Protection Agency Office of Radiation And Indoor Air, İnternet Adresi: <http://consumerlawpage.com/brochure/emf.shtml>
- [10] **Şeker, Ş. S. ve Çerezci, O.**, 1992. Elektromagnetik Alanlar Ve Mühendislik Uygulamaları, İTÜ Yayınları, Sakarya.
- [11] **Akhunlar, A.**, 1980. Elektrik Alanlarına Giriş II, Magnetik Alan, İTÜ, İstanbul.
- [12] **Kalenderli Ö., Yıldırım, H. ve Mardikyan, K.**, 1997. Yüksek Gerilim Hatları Çevresindeki Magnetik Alanların Hesabı, Biyomut 97, 13 – 14 Ekim, İstanbul, s. 162-165
- [13] **Kraus, J. D.**, 1984. Electromagnetics, Mc Graw-Hill Book Co, Singapore
- [14] **National İnstitute Of Environmental Health Sciences And U.S Department Of Energy**, January 1995. Questions and Answers About EMF, Electric and Magnetic Field Associated With The Use of Electric Power

- [15] **Şeker, Ş. S. ve Çerezci, O.**, 1991. Elektromagnetik Alanların Biyolojik Etkileri, Güvenlik Standartları Ve Korunma Yöntemleri, BÜ Yayınları, İstanbul.
- [16] **TS ENV 50166**, 1996. İnsanların Elektromagnetik Alanlara Maruz Kalması – Düşük Frekanslar (0 Hz – 10 kHz) , *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [17] **Şeker, Ş. S. ve Çerezci, O.**, 1997. Çevremizdeki Radyasyon Ve Korunma Yöntemleri, BÜ Yayınları, İstanbul.
- [18] **Gandhi, O. P.**, 1990. Biological Effects and Medical Application of Electromagnetic Energy, Prentice Hall Pub.New.
- [19] **Özaktaş, H. M.**, 1999. Günlük Hayatta Karşılaşılan Elektromagnetik Alanlar ve İnsan Sağlığı, Bilişim Toplumuna Giderken Elektromagnetik Kirlilik Etkileri Sempozyumu, 11 Kasım, Ankara, s. 7 – 12.
- [20] **Kalenderli, Ö.**, 1996. Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notları
- [21] **Finite Element Magnetics 4.0 (FEMM 4.0)**, 2004. Sonlu elemanlar yöntemi çözüm programı.

EK A. Üç Fazlı 380 kV'lık (Üçlü Demet) Bir Hat Çevresindeki Magnetik Alan ve Magnetik Endüksiyonun Hesaplanması

A(0 ; 1.2) Noktası İçin Magnetik Alan ve Endüksiyon

200 A için hesaplama:

$$r_{A1} = \sqrt{(x_A - x_{H1})^2 + (y_A - y_{H1})^2} = \sqrt{(0 - (-9.6))^2 + (1.2 - 24)^2} = 24.73 \text{ m}$$

$$r_{A2} = \sqrt{(x_A - x_{H2})^2 + (y_A - y_{H2})^2} = \sqrt{(0 - (-9.4))^2 + (1.2 - 23.65)^2} = 24.33 \text{ m}$$

$$r_{A3} = \sqrt{(x_A - x_{H3})^2 + (y_A - y_{H3})^2} = \sqrt{(0 - (-9.2))^2 + (1.2 - 24)^2} = 24.58 \text{ m}$$

$$r_{A4} = \sqrt{(x_A - x_{H4})^2 + (y_A - y_{H4})^2} = \sqrt{(0 - (-0.2))^2 + (1.2 - 24)^2} = 22.80 \text{ m}$$

$$r_{A5} = \sqrt{(x_A - x_{H5})^2 + (y_A - y_{H5})^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (1.2 - 23.65)^2} = 22.45 \text{ m}$$

$$r_{A6} = \sqrt{(x_A - x_{H6})^2 + (y_A - y_{H6})^2} = \sqrt{(0 - 0.2)^2 + (1.2 - 24)^2} = 22.80 \text{ m}$$

$$r_{A7} = \sqrt{(x_A - x_{H7})^2 + (y_A - y_{H7})^2} = \sqrt{(0 - 9.2)^2 + (1.2 - 24)^2} = 24.58 \text{ m}$$

$$r_{A8} = \sqrt{(x_A - x_{H8})^2 + (y_A - y_{H8})^2} = \sqrt{(0 - 9.4)^2 + (1.2 - 23.65)^2} = 24.33 \text{ m}$$

$$r_{A9} = \sqrt{(x_A - x_{H9})^2 + (y_A - y_{H9})^2} = \sqrt{(0 - 9.6)^2 + (1.2 - 24)^2} = 24.73 \text{ m}$$

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_A - y_{H1})}{2\pi r_{A1}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 24)}{2\pi(24.73)^2} = -1.1866 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_A - x_{H1})}{2\pi r_{A1}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.6))}{2\pi(24.73)^2} = 0.4996 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_A - y_{H2})}{2\pi r_{A2}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 23.65)}{2\pi(24.33)^2} = -1.2072 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_A - x_{H2})}{2\pi r_{A2}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.4))}{2\pi(24.33)^2} = 0.5054 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_A - y_{H3})}{2\pi r_{A3}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 24)}{2\pi(24.58)^2} = -1.20122 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_A - x_{H3})}{2\pi r_{A3}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.2))}{2\pi(24.58)^2} = 0.4847 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_A - y_{H4})}{2\pi r_{A4}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 24)}{2\pi(22.8)^2} = -1.3960 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_A - x_{H4})}{2\pi r_{A4}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-0.2))}{2\pi(22.8)^2} = 0.0122 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_A - y_{H5})}{2\pi r_{A5}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 23.65)}{2\pi(22.45)^2} = -1.4178 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_A - x_{H5})}{2\pi r_{A5}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 0)}{2\pi(22.45)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_A - y_{H6})}{2\pi r_{A6}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 24)}{2\pi(22.8)^2} = -1.3960 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_A - x_{H6})}{2\pi r_{A6}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 0.2)}{2\pi(22.8)^2} = -0.0122 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_A - y_{H7})}{2\pi r_{A7}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 24)}{2\pi(24.58)^2} = -1.2012 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_A - x_{H7})}{2 \pi r_{A7}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.58)^2} = -0.4847 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_A - y_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (24.33)^2} = -1.2072 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_A - x_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (24.33)^2} = -0.5054 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_A - y_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{200 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.73)^2} = -1.1866 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_A - x_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.73)^2} = -0.4996 \text{ A/m}$$

$$H_{XA} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -1.1866 - 1.2072 - 1.2012 - 1.3960 - 1.4178 - 1.3960 - 1.2012 - 1.2072 - 1.1866 = -11.3998 \text{ A/m}$$

$$H_{YA} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 0.4996 + 0.5054 + 0.4847 + 0.0122 + 0 - 0.0122 - 0.4847 - 0.5054 - 0.4996 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_A = \sqrt{H_{XA}^2 + H_{YA}^2} = 11.3998 \text{ A/m}$$

$$B_A = \mu_0 \cdot H_A = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 11.3998 = 14.32 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

400 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_A - y_{H1})}{2 \pi r_{A1}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.73)^2} = -2.3733 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_A - x_{H1})}{2 \pi r_{A1}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.73)^2} = 0.9993 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_A - y_{H2})}{2 \pi r_{A2}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (24.33)^2} = -2.4144 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_A - x_{H2})}{2 \pi r_{A2}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (24.33)^2} = 1.0109 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_A - y_{H3})}{2 \pi r_{A3}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.58)^2} = -2.4024 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_A - x_{H3})}{2 \pi r_{A3}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.58)^2} = 0.9694 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_A - y_{H4})}{2 \pi r_{A4}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (22.8)^2} = -2.7921 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_A - x_{H4})}{2 \pi r_{A4}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.8)^2} = 0.0244 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_A - y_{H5})}{2 \pi r_{A5}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (22.45)^2} = -2.8357 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_A - x_{H5})}{2 \pi r_{A5}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (22.45)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_A - y_{H6})}{2 \pi r_{A6}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (22.8)^2} = -2.7921 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_A - x_{H6})}{2 \pi r_{A6}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.8)^2} = -0.0244 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_A - y_{H7})}{2 \pi r_{A7}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.58)^2} = -2.4024 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_A - x_{H7})}{2 \pi r_{A7}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.58)^2} = -0.9694 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_A - y_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (24.33)^2} = -2.4144 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_A - x_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (24.33)^2} = -1.0109 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_A - y_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{400 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.73)^2} = -2.3733 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_A - x_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.73)^2} = -0.9993 \text{ A/m}$$

$$H_{XA} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -2.3733 - 2.4144 - 2.4024 - 2.7921 - 2.8357 - 2.7921 - 2.4024 - 2.4144 - 2.3733 = -12.8 \text{ A/m}$$

$$H_{YA} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 0.9993 + 1.0109 + 0.9694 + 0.0244 + 0 - 0.0244 - 0.9694 - 1.0109 - 0.9993 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_A = \sqrt{H_{XA}^2 + H_{YA}^2} = 22.8 \text{ A/m}$$

$$B_A = \mu_0 \cdot H_A = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 22.8 = 28.65 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

800 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_A - y_{H1})}{2 \pi r_{A1}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.73)^2} = -4.7467 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_A - x_{H1})}{2 \pi r_{A1}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.73)^2} = 1.9986 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_A - y_{H2})}{2 \pi r_{A2}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (24.33)^2} = -4.8288 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_A - x_{H2})}{2 \pi r_{A2}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (24.33)^2} = 2.0218 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_A - y_{H3})}{2 \pi r_{A3}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.58)^2} = -4.8048 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_A - x_{H3})}{2 \pi r_{A3}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.58)^2} = 1.9388 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_A - y_{H4})}{2 \pi r_{A4}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (22.8)^2} = -5.5843 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_A - x_{H4})}{2 \pi r_{A4}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.8)^2} = 0.0489 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_A - y_{H5})}{2 \pi r_{A5}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (22.45)^2} = -5.7598 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_A - x_{H5})}{2 \pi r_{A5}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (22.45)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_A - y_{H6})}{2 \pi r_{A6}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (22.8)^2} = -5.5843 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_A - x_{H6})}{2 \pi r_{A6}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.8)^2} = -0.0489 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_A - y_{H7})}{2 \pi r_{A7}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.58)^2} = -4.8048 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_A - x_{H7})}{2 \pi r_{A7}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.58)^2} = -1.9388 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_A - y_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (24.33)^2} = -4.8288 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_A - x_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (24.33)^2} = -2.0218 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_A - y_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{800 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.73)^2} = -4.7467 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_A - x_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.73)^2} = -1.9986 \text{ A/m}$$

$$H_{XA} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -4.7467 - 4.8288 - 4.8048 - 5.5843 - 5.7598 - 5.5843 - 4.8048 - 4.8288 - 4.7467 = -45.689 \text{ A/m}$$

$$H_{YA} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 1.9986 + 2.0218 + 1.9388 + 0.0489 + 0 - 0.0489 - 1.9388 - 2.0218 - 1.9986 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_A = \sqrt{H_{XA}^2 + H_{YA}^2} = 45.689 \text{ A/m}$$

$$B_A = \mu_0 \cdot H_A = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 45.689 = 57.41 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

1000 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_A - y_{H1})}{2 \pi r_{A1}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.73)^2} = -5.9334 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_A - x_{H1})}{2 \pi r_{A1}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.73)^2} = 2.4982 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_A - y_{H2})}{2 \pi r_{A2}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (24.33)^2} = -6.0360 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_A - x_{H2})}{2 \pi r_{A2}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (24.33)^2} = 2.5273 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_A - y_{H3})}{2 \pi r_{A3}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.58)^2} = -6.0060 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_A - x_{H3})}{2 \pi r_{A3}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.58)^2} = 2.4235 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_A - y_{H4})}{2 \pi r_{A4}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (22.8)^2} = -6.9804 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_A - x_{H4})}{2 \pi r_{A4}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.8)^2} = 0.0612 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_A - y_{H5})}{2 \pi r_{A5}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (22.45)^2} = -7.0893 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_A - x_{H5})}{2 \pi r_{A5}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (22.45)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_A - y_{H6})}{2 \pi r_{A6}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (22.8)^2} = -6.9804 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_A - x_{H6})}{2 \pi r_{A6}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.8)^2} = -0.0612 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_A - y_{H7})}{2 \pi r_{A7}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.58)^2} = -6.0060 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_A - x_{H7})}{2 \pi r_{A7}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.58)^2} = -2.4235 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_A - y_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 23.65)}{2 \pi (24.33)^2} = -6.036 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_A - x_{H8})}{2 \pi r_{A8}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (24.33)^2} = -2.5273 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_A - y_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{1000 \cdot (1.2 - 24)}{2 \pi (24.73)^2} = -5.9334 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_A - x_{H9})}{2 \pi r_{A9}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.73)^2} = -2.4982 \text{ A/m}$$

$$H_{XA} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -5.9334 - 6.0360 - 6.0060 - 6.9804 - 7.0893 - 6.9804 - 6.0060 - 6.0360 - 5.9334 = -57.0009 \text{ A/m}$$

$$H_{YA} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 2.4982 + 2.5273 + 2.4235 + 0.0612 + 0 - 0.0612 - 2.4235 - 2.5273 - 2.4982 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_A = \sqrt{H_{xA}^2 + H_{yA}^2} = 57.0009 \text{ A/m}$$

$$B_A = \mu_0 \cdot H_A = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 57.0009 = 71.629 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

B(0 ; 1.6) Noktası İçin Magnetik Alan ve Endüksiyon

200 A için hesaplama:

$$r_{B1} = \sqrt{(x_B - x_{H1})^2 + (y_B - y_{H1})^2} = \sqrt{(0 - (-9.6))^2 + (1.6 - 24)^2} = 24.37 \text{ m}$$

$$r_{B2} = \sqrt{(x_B - x_{H2})^2 + (y_B - y_{H2})^2} = \sqrt{(0 - (-9.4))^2 + (1.6 - 23.65)^2} = 23.97 \text{ m}$$

$$r_{B3} = \sqrt{(x_B - x_{H3})^2 + (y_B - y_{H3})^2} = \sqrt{(0 - (-9.2))^2 + (1.6 - 24)^2} = 24.21 \text{ m}$$

$$r_{B4} = \sqrt{(x_B - x_{H4})^2 + (y_B - y_{H4})^2} = \sqrt{(0 - (-0.2))^2 + (1.6 - 24)^2} = 22.4 \text{ m}$$

$$r_{B5} = \sqrt{(x_B - x_{H5})^2 + (y_B - y_{H5})^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (1.6 - 23.65)^2} = 22.05 \text{ m}$$

$$r_{B6} = \sqrt{(x_B - x_{H6})^2 + (y_B - y_{H6})^2} = \sqrt{(0 - 0.2)^2 + (1.6 - 24)^2} = 22.4 \text{ m}$$

$$r_{B7} = \sqrt{(x_B - x_{H7})^2 + (y_B - y_{H7})^2} = \sqrt{(0 - 9.2)^2 + (1.6 - 24)^2} = 24.21 \text{ m}$$

$$r_{B8} = \sqrt{(x_B - x_{H8})^2 + (y_B - y_{H8})^2} = \sqrt{(0 - 9.4)^2 + (1.6 - 23.65)^2} = 23.97 \text{ m}$$

$$r_{B9} = \sqrt{(x_B - x_{H9})^2 + (y_B - y_{H9})^2} = \sqrt{(0 - 9.6)^2 + (1.6 - 24)^2} = 24.37 \text{ m}$$

$$H_{x1} = \frac{I_1 \cdot (y_B - y_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.37)^2} = -1.2005 \text{ A/m}$$

$$H_{y1} = \frac{I_1 \cdot (x_B - x_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.37)^2} = 0.5145 \text{ A/m}$$

$$H_{x2} = \frac{I_2 \cdot (y_B - y_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (23.97)^2} = -1.2215 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_B - x_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.97)^2} = 0.5207 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_B - y_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.21)^2} = -1.2164 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_B - x_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.21)^2} = 0.4996 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_B - y_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (22.4)^2} = -1.421 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_B - x_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.4)^2} = 0.0126 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_B - y_{H5})}{2 \pi r_{B5}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (22.05)^2} = -1.4435 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_B - x_{H5})}{2 \pi r_{B5}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (22.05)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_B - y_{H6})}{2 \pi r_{B6}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (22.4)^2} = -1.4210 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_B - x_{H6})}{2 \pi r_{B6}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.4)^2} = -0.0126 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_B - y_{H7})}{2 \pi r_{B7}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.21)^2} = -1.2164 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_B - x_{H7})}{2 \pi r_{B7}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.21)^2} = -0.4996 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_B - y_{H8})}{2 \pi r_{B8}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (23.97)^2} = -1.2215 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_B - x_{H8})}{2 \pi r_{B8}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (23.97)^2} = -0.5207 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_B - y_{H9})}{2 \pi r_{B9}^2} = \frac{200 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.37)^2} = -1.2005 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_B - x_{H9})}{2 \pi r_{B9}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.37)^2} = -0.5145 \text{ A/m}$$

$$H_{XB} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -1.2005 - 1.2215 - 1.2164 - 1.4210 - 1.4435 - 1.4210 - 1.2164 - 1.2215 - 1.2005 = -11.5623 \text{ A/m}$$

$$H_{YB} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 0.5145 + 0.5207 + 0.4996 + 0.0126 + 0 - 0.0126 - 0.4996 - 0.5207 - 0.5145 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_B = \sqrt{H_{XB}^2 + H_{YB}^2} = 11.5623 \text{ A/m}$$

$$B_B = \mu_0 \cdot H_B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 11.5623 = 14.5296 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

400 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_B - y_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.37)^2} = -2.4011 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_B - x_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.37)^2} = 1.0290 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_B - y_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (23.97)^2} = -2.4431 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_B - x_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.97)^2} = 1.0415 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_B - y_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.21)^2} = -2.4329 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_B - x_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.21)^2} = 0.9992 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_B - y_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (22.4)^2} = -2.8420 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_B - x_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.4)^2} = 0.0253 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_B - y_{H5})}{2 \pi r_{B5}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (22.05)^2} = -2.8871 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_B - x_{H5})}{2 \pi r_{B5}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (22.05)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_B - y_{H6})}{2 \pi r_{B6}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (22.4)^2} = -2.8420 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_B - x_{H6})}{2 \pi r_{B6}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.4)^2} = -0.0253 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_B - y_{H7})}{2 \pi r_{B7}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.21)^2} = -2.4329 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_B - x_{H7})}{2 \pi r_{B7}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.21)^2} = -0.9992 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_B - y_{H8})}{2 \pi r_{B8}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (23.97)^2} = -2.4431 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_B - x_{H8})}{2 \pi r_{B8}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (23.97)^2} = -1.0415 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_B - y_{H9})}{2 \pi r_{B9}^2} = \frac{400 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.37)^2} = -2.4011 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_B - x_{H9})}{2 \pi r_{B9}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.37)^2} = -1.0290 \text{ A/m}$$

$$H_{XB} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -2.4011 - 2.4431 - 2.4329 - 2.8420 - 2.8871 - 2.8420 - 2.4329 - 2.4431 - 2.4011 = -23.1253 \text{ A/m}$$

$$H_{YB} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 1.0290 + 1.0415 + 0.9992 + 0.0253 + 0 - 0.0253 - 0.9992 - 1.0415 - 1.0290 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_B = \sqrt{H_{XB}^2 + H_{YB}^2} = 23.1253 \text{ A/m}$$

$$B_B = \mu_0 \cdot H_B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 23.1253 = 29.0601 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

800 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_B - y_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.37)^2} = -4.8022 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_B - x_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.37)^2} = 2.0581 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_B - y_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (23.97)^2} = -4.88631 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_B - x_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.97)^2} = 2.0830 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_B - y_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.21)^2} = -4.8659 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_B - x_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.21)^2} = 1.9985 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_B - y_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (22.4)^2} = -5.6841 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_B - x_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.4)^2} = 0.0507 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_B - y_{H5})}{2\pi r_{B5}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 23.65)}{2\pi(22.05)^2} = -5.7743 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_B - x_{H5})}{2\pi r_{B5}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 0)}{2\pi(22.05)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_B - y_{H6})}{2\pi r_{B6}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 24)}{2\pi(22.4)^2} = -5.6841 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_B - x_{H6})}{2\pi r_{B6}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 0.2)}{2\pi(22.4)^2} = -0.0507 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_B - y_{H7})}{2\pi r_{B7}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 24)}{2\pi(24.21)^2} = -4.8659 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_B - x_{H7})}{2\pi r_{B7}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.2)}{2\pi(24.21)^2} = -1.9985 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_B - y_{H8})}{2\pi r_{B8}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 23.65)}{2\pi(23.97)^2} = -4.8863 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_B - x_{H8})}{2\pi r_{B8}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.4)}{2\pi(23.97)^2} = -2.0830 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_B - y_{H9})}{2\pi r_{B9}^2} = \frac{800 \cdot (1.6 - 24)}{2\pi(24.37)^2} = -4.8022 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_B - x_{H9})}{2\pi r_{B9}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.6)}{2\pi(24.37)^2} = -2.0581 \text{ A/m}$$

$$H_{XB} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -4.8022 - 4.8863 - 4.8659 - 5.6841 - 5.7743 - 5.6841 - 4.8659 - 4.8863 - 4.8022 = -46.2513 \text{ A/m}$$

$$H_{YB} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 2.0581 + 2.0830 + 1.9985 + 0.0507 + 0 - 0.0507 - 1.9985 - 2.0830 - 2.0581 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_B = \sqrt{H_{XB}^2 + H_{YB}^2} = 46.2513 \text{ A/m}$$

$$B_B = \mu_0 \cdot H_B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 46.2513 = 58.1210 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

1000 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_B - y_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.37)^2} = -6.0028 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_B - x_{H1})}{2 \pi r_{B1}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.37)^2} = 2.5726 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_B - y_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (23.97)^2} = -6.1079 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_B - x_{H2})}{2 \pi r_{B2}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.97)^2} = 2.6038 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_B - y_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.21)^2} = -6.0824 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_B - x_{H3})}{2 \pi r_{B3}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.21)^2} = 2.4981 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_B - y_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (22.4)^2} = -7.1051 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_B - x_{H4})}{2 \pi r_{B4}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.4)^2} = 0.0634 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_B - y_{H5})}{2 \pi r_{B5}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (22.05)^2} = -7.2179 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_B - x_{H5})}{2 \pi r_{B5}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (22.05)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_B - y_{H6})}{2 \pi r_{B6}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (22.4)^2} = -7.1051 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_B - x_{H6})}{2 \pi r_{B6}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.4)^2} = -0.0634 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_B - y_{H7})}{2 \pi r_{B7}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.21)^2} = -6.0824 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_B - x_{H7})}{2 \pi r_{B7}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.21)^2} = -2.4981 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_B - y_{H8})}{2 \pi r_{B8}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 23.65)}{2 \pi (23.97)^2} = -6.1079 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_B - x_{H8})}{2 \pi r_{B8}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (23.97)^2} = -2.6038 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_B - y_{H9})}{2 \pi r_{B9}^2} = \frac{1000 \cdot (1.6 - 24)}{2 \pi (24.37)^2} = -6.0028 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_B - x_{H9})}{2 \pi r_{B9}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.37)^2} = -2.5726 \text{ A/m}$$

$$H_{XB} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -6.0028 - 6.1079 - 6.0824 - 7.1051 - 7.2179 - 7.1051 - 6.0824 - 6.1079 - 6.0028 = -57.8143 \text{ A/m}$$

$$H_{YB} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 2.5726 + 2.6038 + 2.4981 + 0.0634 + 0 - 0.0634 - 2.4981 - 2.6038 - 2.5726 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_B = \sqrt{H_{XB}^2 + H_{YB}^2} = 57.8143 \text{ A/m}$$

$$B_B = \mu_0 \cdot H_B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 57.8143 = 72.65 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

C(0 ; 1.8) Noktası İçin Magnetik Alan ve Endüksiyon

200 A için hesaplama:

$$r_{C1} = \sqrt{(x_C - x_{H1})^2 + (y_C - y_{H1})^2} = \sqrt{(0 - (-9.6))^2 + (1.8 - 24)^2} = 24.18 \text{ m}$$

$$r_{C2} = \sqrt{(x_C - x_{H2})^2 + (y_C - y_{H2})^2} = \sqrt{(0 - (-9.4))^2 + (1.8 - 23.65)^2} = 23.78 \text{ m}$$

$$r_{C3} = \sqrt{(x_C - x_{H3})^2 + (y_C - y_{H3})^2} = \sqrt{(0 - (-9.2))^2 + (1.8 - 24)^2} = 24.03 \text{ m}$$

$$r_{C4} = \sqrt{(x_C - x_{H4})^2 + (y_C - y_{H4})^2} = \sqrt{(0 - (-0.2))^2 + (1.8 - 24)^2} = 22.20 \text{ m}$$

$$r_{C5} = \sqrt{(x_C - x_{H5})^2 + (y_C - y_{H5})^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 + (1.8 - 23.65)^2} = 21.85 \text{ m}$$

$$r_{C6} = \sqrt{(x_C - x_{H6})^2 + (y_C - y_{H6})^2} = \sqrt{(0 - 0.2)^2 + (1.8 - 24)^2} = 22.20 \text{ m}$$

$$r_{C7} = \sqrt{(x_C - x_{H7})^2 + (y_C - y_{H7})^2} = \sqrt{(0 - 9.2)^2 + (1.8 - 24)^2} = 24.03 \text{ m}$$

$$r_{C8} = \sqrt{(x_C - x_{H8})^2 + (y_C - y_{H8})^2} = \sqrt{(0 - 9.4)^2 + (1.8 - 23.65)^2} = 23.78 \text{ m}$$

$$r_{C9} = \sqrt{(x_C - x_{H9})^2 + (y_C - y_{H9})^2} = \sqrt{(0 - 9.6)^2 + (1.8 - 24)^2} = 24.18 \text{ m}$$

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_C - y_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -1.2086 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_C - x_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.18)^2} = 0.5226 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_C - y_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -1.2299 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_C - x_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.78)^2} = 0.5291 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_C - y_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -1.2237 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_C - x_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.03)^2} = 0.5071 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_C - y_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -1.4338 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_C - x_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{200 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.2)^2} = 0.0129 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_C - y_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (21.85)^2} = -1.4567 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_C - x_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (21.85)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_C - y_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -1.4338 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_C - x_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.2)^2} = -0.0129 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_C - y_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -1.2237 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_C - x_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.03)^2} = -0.5071 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_C - y_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -1.2299 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_C - x_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (23.78)^2} = -0.5291 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_C - y_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{200 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -1.2086 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_C - x_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{200 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.18)^2} = -0.5226 \text{ A/m}$$

$$H_{XC} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -1.2086 - 1.2299 - 1.2237 - 1.4338 - 1.4567 - 1.4338 - 1.2237 - 1.2299 - 1.2086 = -11.6487 \text{ A/m}$$

$$H_{YC} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 0.5226 + 0.5291 + 0.5071 + 0.0129 + 0 - 0.0129 - 0.5071 - 0.5291 - 0.5226 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_C = \sqrt{H_{XC}^2 + H_{YC}^2} = 11.6487 \text{ A/m}$$

$$B_C = \mu_0 \cdot H_C = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 11.6487 = 14.638 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

400 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_C - y_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -2.4172 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_C - x_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.18)^2} = 1.0452 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_C - y_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -2.4598 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_C - x_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.78)^2} = 1.0582 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_C - y_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -2.4475 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_C - x_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.03)^2} = 1.0142 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_C - y_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -2.8676 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_C - x_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{400 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.2)^2} = 0.0258 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_C - y_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (21.85)^2} = -2.9135 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_C - x_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (21.85)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_C - y_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -2.8676 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_C - x_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.2)^2} = -0.0258 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_C - y_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -2.4475 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_C - x_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.03)^2} = -1.0142 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_C - y_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -2.4598 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_C - x_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (23.78)^2} = -1.0582 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_C - y_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{400 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -2.4172 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_C - x_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{400 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.18)^2} = -1.0452 \text{ A/m}$$

$$H_{XC} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -2.4172 - 2.4598 - 2.4475 - 2.8676 - 2.9135 - 2.8676 - 2.4475 - 2.4598 - 2.4172 = -23.2977 \text{ A/m}$$

$$H_{YC} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 1.0452 + 1.0582 + 1.0142 + 0.0258 + 0 - 0.0258 - 1.0142 - 1.0582 - 1.0452 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_C = \sqrt{H_{XC}^2 + H_{YC}^2} = 23.2977 \text{ A/m}$$

$$B_C = \mu_0 \cdot H_C = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 23.2977 = 29.276 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

800 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1 \cdot (y_C - y_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -4.8344 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1 \cdot (x_C - x_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.18)^2} = 2.0905 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2 \cdot (y_C - y_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -4.9196 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2 \cdot (x_C - x_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.78)^2} = 2.1164 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3 \cdot (y_C - y_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -4.8950 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3 \cdot (x_C - x_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.03)^2} = 2.0285 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4 \cdot (y_C - y_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -5.7353 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4 \cdot (x_C - x_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{800 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.2)^2} = 0.0516 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5 \cdot (y_C - y_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (21.85)^2} = -5.8271 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5 \cdot (x_C - x_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (21.85)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6 \cdot (y_C - y_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -5.7353 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6 \cdot (x_C - x_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.2)^2} = -0.0516 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7 \cdot (y_C - y_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -4.8950 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7 \cdot (x_C - x_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.03)^2} = -2.0285 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8 \cdot (y_C - y_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -4.9196 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8 \cdot (x_C - x_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (23.78)^2} = -2.1164 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9 \cdot (y_C - y_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{800 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -4.8344 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9 \cdot (x_C - x_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{800 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.18)^2} = -2.0905 \text{ A/m}$$

$$H_{XC} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -4.8344 - 4.9196 - 4.8950 - 5.7353 - 5.8271 - 5.7353 - 4.8950 \\ - 4.9196 - 4.8344 = -49.5957 \text{ A/m}$$

$$H_{YC} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 2.0905 + 2.1164 + 2.0285 + 0.0516 + 0 - 0.0516 - 2.0285 \\ - 2.1164 - 2.0905 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_C = \sqrt{H_{XC}^2 + H_{YC}^2} = 49.5957 \text{ A/m}$$

$$B_C = \mu_0 \cdot H_C = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 49.5957 = 62.323 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

1000 A için hesaplama:

$$H_{x1} = \frac{I_1 \cdot (y_C - y_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -6.0431 \text{ A/m}$$

$$H_{y1} = \frac{I_1 \cdot (x_C - x_{H1})}{2 \pi r_{C1}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.6))}{2 \pi (24.18)^2} = 2.6132 \text{ A/m}$$

$$H_{x2} = \frac{I_2 \cdot (y_C - y_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -6.1496 \text{ A/m}$$

$$H_{y2} = \frac{I_2 \cdot (x_C - x_{H2})}{2 \pi r_{C2}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.4))}{2 \pi (23.78)^2} = 2.6456 \text{ A/m}$$

$$H_{x3} = \frac{I_3 \cdot (y_C - y_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -6.1187 \text{ A/m}$$

$$H_{y3} = \frac{I_3 \cdot (x_C - x_{H3})}{2 \pi r_{C3}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-9.2))}{2 \pi (24.03)^2} = 2.5357 \text{ A/m}$$

$$H_{x4} = \frac{I_4 \cdot (y_C - y_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -7.1691 \text{ A/m}$$

$$H_{y4} = \frac{I_4 \cdot (x_C - x_{H4})}{2 \pi r_{C4}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - (-0.2))}{2 \pi (22.2)^2} = 0.0645 \text{ A/m}$$

$$H_{x5} = \frac{I_5 \cdot (y_C - y_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (21.85)^2} = -7.2839 \text{ A/m}$$

$$H_{y5} = \frac{I_5 \cdot (x_C - x_{H5})}{2 \pi r_{C5}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 0)}{2 \pi (21.85)^2} = 0 \text{ A/m}$$

$$H_{x6} = \frac{I_6 \cdot (y_C - y_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (22.2)^2} = -7.1691 \text{ A/m}$$

$$H_{y6} = \frac{I_6 \cdot (x_C - x_{H6})}{2 \pi r_{C6}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 0.2)}{2 \pi (22.2)^2} = -0.0645 \text{ A/m}$$

$$H_{x7} = \frac{I_7 \cdot (y_C - y_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.03)^2} = -6.1187 \text{ A/m}$$

$$H_{y7} = \frac{I_7 \cdot (x_C - x_{H7})}{2 \pi r_{C7}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.2)}{2 \pi (24.03)^2} = -2.5357 \text{ A/m}$$

$$H_{x8} = \frac{I_8 \cdot (y_C - y_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 23.65)}{2 \pi (23.78)^2} = -6.1496 \text{ A/m}$$

$$H_{y8} = \frac{I_8 \cdot (x_C - x_{H8})}{2 \pi r_{C8}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.4)}{2 \pi (23.78)^2} = -2.6456 \text{ A/m}$$

$$H_{x9} = \frac{I_9 \cdot (y_C - y_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{1000 \cdot (1.8 - 24)}{2 \pi (24.18)^2} = -6.0431 \text{ A/m}$$

$$H_{y9} = \frac{I_9 \cdot (x_C - x_{H9})}{2 \pi r_{C9}^2} = \frac{1000 \cdot (0 - 9.6)}{2 \pi (24.18)^2} = -2.6132 \text{ A/m}$$

$$H_{xc} = \sum_{i=1}^9 H_{xi} = -6.0431 - 6.1496 - 6.1187 - 7.1691 - 7.2839 - 7.1691 - 6.1187 - 6.1496 - 6.0431 = -58.2449 \text{ A/m}$$

$$H_{yc} = \sum_{i=1}^9 H_{yi} = 2.6132 + 2.6456 + 2.5357 + 0.0645 + 0 - 0.0645 - 2.5357 - 2.6456 - 2.6132 = 0 \text{ A/m}$$

$$H_C = \sqrt{H_{xc}^2 + H_{yc}^2} = 58.2449 \text{ A/m}$$

$$B_C = \mu_0 \cdot H_C = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 58.2449 = 73.192 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

D(14.6 ; 1) Noktası İçin Magnetik Alan ve Endüksiyon

200 A için hesaplama:

$$r_{D1} = \sqrt{(x_D - x_{H1})^2 + (y_D - y_{H1})^2} = \sqrt{(14.6 - (-9.6))^2 + (1 - 24)^2} = 33.38 \text{ m}$$

$$r_{D2} = \sqrt{(x_D - x_{H2})^2 + (y_D - y_{H2})^2} = \sqrt{(14.6 - (-9.4))^2 + (1 - 23.65)^2} = 33 \text{ m}$$

$$r_{D3} = \sqrt{(x_D - x_{H3})^2 + (y_D - y_{H3})^2} = \sqrt{(14.6 - (-9.2))^2 + (1 - 24)^2} = 33.09 \text{ m}$$

$$r_{D4} = \sqrt{(x_D - x_{H4})^2 + (y_D - y_{H4})^2} = \sqrt{(14.6 - (-0.2))^2 + (1 - 24)^2} = 27.35 \text{ m}$$

$$r_{D5} = \sqrt{(x_D - x_{H5})^2 + (y_D - y_{H5})^2} = \sqrt{(14.6 - 0)^2 + (1 - 23.65)^2} = 26.94 \text{ m}$$

$$r_{D6} = \sqrt{(x_D - x_{H6})^2 + (y_D - y_{H6})^2} = \sqrt{(14.6 - 0.2)^2 + (1 - 24)^2} = 27.13 \text{ m}$$

$$r_{D7} = \sqrt{(x_D - x_{H7})^2 + (y_D - y_{H7})^2} = \sqrt{(14.6 - 9.2)^2 + (1 - 24)^2} = 23.62 \text{ m}$$

$$r_{D8} = \sqrt{(x_D - x_{H8})^2 + (y_D - y_{H8})^2} = \sqrt{(14.6 - 9.4)^2 + (1 - 23.65)^2} = 23.23 \text{ m}$$

$$r_{D9} = \sqrt{(x_D - x_{H9})^2 + (y_D - y_{H9})^2} = \sqrt{(14.6 - 9.6)^2 + (1 - 24)^2} = 23.53 \text{ m}$$

$$H_{x1} = \frac{I_1 \cdot (y_D - y_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.38)^2} = -0.6570 \text{ A/m}$$

$$H_{y1} = \frac{I_1 \cdot (x_D - x_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{200 \cdot (14.6 - (-9.6))}{2\pi(33.38)^2} = 0.6913 \text{ A/m}$$

$$H_{x2} = \frac{I_2 \cdot (y_D - y_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(33)^2} = -0.6620 \text{ A/m}$$

$$H_{y2} = \frac{I_2 \cdot (x_D - x_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{200 \cdot (14.6 - (-9.4))}{2\pi(33)^2} = 0.7015 \text{ A/m}$$

$$H_{x3} = \frac{I_3 \cdot (y_D - y_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(33.09)^2} = -0.6686 \text{ A/m}$$

$$H_{y3} = \frac{I_3 \cdot (x_D - x_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{200(14.6 - (-9.2))}{2\pi(33.09)^2} = 0.6918 \text{ A/m}$$

$$H_{x4} = \frac{I_4 \cdot (y_D - y_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(27.35)^2} = -0.9787 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_D - x_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{200(14.6 - (-0.2))}{2\pi(27.35)^2} = 0.6297 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_D - y_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{200(1 - 23.65)}{2\pi(26.94)^2} = -0.9933 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_D - x_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{200(14.6 - 0)}{2\pi(26.94)^2} = 0.6403 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_D - y_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(27.13)^2} = -0.9946 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_D - x_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{200(14.6 - 0.2)}{2\pi(27.13)^2} = 0.6227 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_D - y_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(23.62)^2} = -1.3122 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_D - x_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{200(14.6 - 9.2)}{2\pi(23.62)^2} = 0.3080 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_D - y_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{200(1 - 23.65)}{2\pi(23.23)^2} = -1.336 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_D - x_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{200(14.6 - 9.4)}{2\pi(23.23)^2} = 0.3067 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_D - y_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(23.53)^2} = -1.3223 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_D - x_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{200(14.6 - 9.6)}{2\pi(23.53)^2} = 0.2874 \text{ A/m}$$

$$H_{XD} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -0.6570 - 0.6620 - 0.6686 - 0.9787 - 0.9933 - 0.9946 - 1.3122 - 1.3360 - 1.3223 = -8.9247 \text{ A/m}$$

$$H_{YD} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 0.6913 + 0.7015 + 0.6918 + 0.6297 + 0.6403 + 0.6227 + 0.3080 \\ + 0.3067 + 0.2874 = 4.8794 \text{ A/m}$$

$$H_D = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2} = \sqrt{(-8.9247)^2 + (4.8794)^2} = 10.1714 \text{ A/m}$$

$$B_D = \mu_0 \cdot H_D = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 10.1714 = 12.781 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

400 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_D - y_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{400(1 - 24)}{2\pi(33.38)^2} = -1.3141 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_D - x_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{400(14.6 - (-9.6))}{2\pi(33.38)^2} = 1.3826 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_D - y_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{400(1 - 23.65)}{2\pi(33)^2} = -1.324 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_D - x_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{400(14.6 - (-9.4))}{2\pi(33)^2} = 1.4030 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_D - y_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{400(1 - 24)}{2\pi(33.09)^2} = -1.3372 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_D - x_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{400(14.6 - (-9.2))}{2\pi(33.09)^2} = 1.3837 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_D - y_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{400(1 - 24)}{2\pi(27.35)^2} = -1.9574 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_D - x_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{400(14.6 - (-0.2))}{2\pi(27.35)^2} = 1.2595 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_D - y_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{400(1 - 23.65)}{2\pi(26.94)^2} = -1.9867 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_D - x_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{400(14.6 - 0)}{2\pi(26.94)^2} = 1.2806 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_D - y_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{400(1 - 24)}{2\pi(27.13)^2} = -1.9893 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_D - x_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{400(14.6 - 0.2)}{2\pi(27.13)^2} = 1.2454 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_D - y_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{400(1 - 24)}{2\pi(23.62)^2} = -2.6245 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_D - x_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{400(14.6 - 9.2)}{2\pi(23.62)^2} = 0.6161 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_D - y_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{400(1 - 23.65)}{2\pi(23.23)^2} = -2.6720 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_D - x_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{400(14.6 - 9.4)}{2\pi(23.23)^2} = 0.6134 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_D - y_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{400(1 - 24)}{2\pi(23.53)^2} = -2.6446 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_D - x_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{400(14.6 - 9.6)}{2\pi(23.53)^2} = 0.5749 \text{ A/m}$$

$$H_{XD} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -1.3141 - 1.324 - 1.3372 - 1.9574 - 1.9867 - 1.9893 - 2.6245 - 2.6720 - 2.6446 = -16.8498 \text{ A/m}$$

$$H_{YD} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 1.3826 + 1.4030 + 1.3837 + 1.2595 + 1.2806 + 1.2454 + 0.6161 + 0.6134 + 0.5749 = 9.7592 \text{ A/m}$$

$$H_D = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2} = \sqrt{(-16.8498)^2 + (9.7592)^2} = 19.4719 \text{ A/m}$$

$$B_D = \mu_0 \cdot H_D = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 19.4719 = 24.469 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

800 A için hesaplama:

$$H_{x1} = \frac{I_1(y_D - y_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{800(1-24)}{2\pi(33.38)^2} = -2.6282 \text{ A/m}$$

$$H_{y1} = \frac{I_1(x_D - x_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{800(14.6 - (-9.6))}{2\pi(33.38)^2} = 2.7653 \text{ A/m}$$

$$H_{x2} = \frac{I_2(y_D - y_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{800(1-23.65)}{2\pi(33)^2} = -2.6481 \text{ A/m}$$

$$H_{y2} = \frac{I_2(x_D - x_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{800(14.6 - (-9.4))}{2\pi(33)^2} = 2.8060 \text{ A/m}$$

$$H_{x3} = \frac{I_3(y_D - y_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{800(1-24)}{2\pi(33.09)^2} = -2.6745 \text{ A/m}$$

$$H_{y3} = \frac{I_3(x_D - x_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{800(14.6 - (-9.2))}{2\pi(33.09)^2} = 2.7675 \text{ A/m}$$

$$H_{x4} = \frac{I_4(y_D - y_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{800(1-24)}{2\pi(27.35)^2} = -3.9149 \text{ A/m}$$

$$H_{y4} = \frac{I_4(x_D - x_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{800(14.6 - (-0.2))}{2\pi(27.35)^2} = 2.5191 \text{ A/m}$$

$$H_{x5} = \frac{I_5(y_D - y_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{800(1-23.65)}{2\pi(26.94)^2} = -3.9735 \text{ A/m}$$

$$H_{y5} = \frac{I_5(x_D - x_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{800(14.6 - 0)}{2\pi(26.94)^2} = 2.5613 \text{ A/m}$$

$$H_{x6} = \frac{I_6(y_D - y_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{800(1-24)}{2\pi(27.13)^2} = -3.9786 \text{ A/m}$$

$$H_{y6} = \frac{I_6(x_D - x_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{800(14.6 - 0.2)}{2\pi(27.13)^2} = 2.4909 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_D - y_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{800(1-24)}{2\pi(23.62)^2} = -5.2790 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_D - x_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{800(14.6-9.2)}{2\pi(23.62)^2} = 1.2323 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_D - y_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{800(1-23.65)}{2\pi(23.23)^2} = -5.3441 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_D - x_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{800(14.6-9.4)}{2\pi(23.23)^2} = 1.2269 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_D - y_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{800(1-24)}{2\pi(23.53)^2} = -5.2892 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_D - x_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{800(14.6-9.6)}{2\pi(23.53)^2} = 1.1498 \text{ A/m}$$

$$H_{XD} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -2.6282 - 2.6481 - 2.6745 - 3.9149 - 3.9735 - 3.9786 - 5.2790 \\ - 5.3441 - 5.2892 = -35.7301 \text{ A/m}$$

$$H_{YD} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 2.7653 + 2.8060 + 2.7675 + 2.5191 + 2.5613 + 2.4909 + 1.2323 \\ + 1.2269 + 1.1498 = 19.5191 \text{ A/m}$$

$$H_D = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2} = \sqrt{(-35.7301)^2 + (19.5191)^2} = 40.7140 \text{ A/m}$$

$$B_D = \mu_0 \cdot H_D = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 40.7140 = 51.162 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

1000 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_D - y_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{1000(1-24)}{2\pi(33.38)^2} = -3.2853 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_D - x_{H1})}{2\pi r_{D1}^2} = \frac{1000(14.6 - (-9.6))}{2\pi(33.38)^2} = 3.4567 \text{ A/m}$$

$$H_{x2} = \frac{I_2(y_D - y_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{1000(1 - 23.65)}{2\pi(33)^2} = -3.3102 \text{ A/m}$$

$$H_{y2} = \frac{I_2(x_D - x_{H2})}{2\pi r_{D2}^2} = \frac{1000(14.6 - (-9.4))}{2\pi(33)^2} = 3.5075 \text{ A/m}$$

$$H_{x3} = \frac{I_3(y_D - y_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(33.09)^2} = -3.3431 \text{ A/m}$$

$$H_{y3} = \frac{I_3(x_D - x_{H3})}{2\pi r_{D3}^2} = \frac{1000(14.6 - (-9.2))}{2\pi(33.09)^2} = 3.4594 \text{ A/m}$$

$$H_{x4} = \frac{I_4(y_D - y_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(27.35)^2} = -4.8936 \text{ A/m}$$

$$H_{y4} = \frac{I_4(x_D - x_{H4})}{2\pi r_{D4}^2} = \frac{1000(14.6 - (-0.2))}{2\pi(27.35)^2} = 3.1489 \text{ A/m}$$

$$H_{x5} = \frac{I_5(y_D - y_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{1000(1 - 23.65)}{2\pi(26.94)^2} = -4.9669 \text{ A/m}$$

$$H_{y5} = \frac{I_5(x_D - x_{H5})}{2\pi r_{D5}^2} = \frac{1000(14.6 - 0)}{2\pi(26.94)^2} = 3.2016 \text{ A/m}$$

$$H_{x6} = \frac{I_6(y_D - y_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(27.13)^2} = -4.9733 \text{ A/m}$$

$$H_{y6} = \frac{I_6(x_D - x_{H6})}{2\pi r_{D6}^2} = \frac{1000(14.6 - 0.2)}{2\pi(27.13)^2} = 3.1137 \text{ A/m}$$

$$H_{x7} = \frac{I_7(y_D - y_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(23.62)^2} = -6.5612 \text{ A/m}$$

$$H_{y7} = \frac{I_7(x_D - x_{H7})}{2\pi r_{D7}^2} = \frac{1000(14.6 - 9.2)}{2\pi(23.62)^2} = 1.5404 \text{ A/m}$$

$$H_{x8} = \frac{I_8(y_D - y_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{1000(1 - 23.65)}{2\pi(23.23)^2} = -6.6802 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_D - x_{H8})}{2\pi r_{D8}^2} = \frac{1000(14.6 - 9.4)}{2\pi(23.23)^2} = 1.5336 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_D - y_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(23.53)^2} = -6.6115 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_D - x_{H9})}{2\pi r_{D9}^2} = \frac{1000(14.6 - 9.6)}{2\pi(23.53)^2} = 1.4372 \text{ A/m}$$

$$H_{XD} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -3.2853 - 3.3102 - 3.3431 - 4.8936 - 4.9669 - 4.9733 - 6.5612 - 6.6802 - 6.6115 = -44.6253 \text{ A/m}$$

$$H_{YD} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 3.4567 + 3.5075 + 3.4594 + 3.1489 + 3.2016 + 3.1137 + 1.5404 + 1.5336 + 1.4372 = 24.399 \text{ A/m}$$

$$H_D = \sqrt{H_{XD}^2 + H_{YD}^2} = \sqrt{(-44.6253)^2 + (24.399)^2} = 50.8598 \text{ A/m}$$

$$B_D = \mu_0 \cdot H_D = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50.8598 = 63.912 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

E(19.6 ; 1) Noktası İçin Magnetik Alan ve Endüksiyon

200 A için hesaplama:

$$r_{E1} = \sqrt{(x_E - x_{H1})^2 + (y_E - y_{H1})^2} = \sqrt{(19.6 - (-9.6))^2 + (1 - 24)^2} = 37.17 \text{ m}$$

$$r_{E2} = \sqrt{(x_E - x_{H2})^2 + (y_E - y_{H2})^2} = \sqrt{(19.6 - (-9.4))^2 + (1 - 23.65)^2} = 36.79 \text{ m}$$

$$r_{E3} = \sqrt{(x_E - x_{H3})^2 + (y_E - y_{H3})^2} = \sqrt{(19.6 - (-9.2))^2 + (1 - 24)^2} = 36.85 \text{ m}$$

$$r_{E4} = \sqrt{(x_E - x_{H4})^2 + (y_E - y_{H4})^2} = \sqrt{(19.6 - (-0.2))^2 + (1 - 24)^2} = 30.34 \text{ m}$$

$$r_{E5} = \sqrt{(x_E - x_{H5})^2 + (y_E - y_{H5})^2} = \sqrt{(19.6 - 0)^2 + (1 - 23.65)^2} = 29.95 \text{ m}$$

$$r_{E6} = \sqrt{(x_E - x_{H6})^2 + (y_E - y_{H6})^2} = \sqrt{(19.6 - 0.2)^2 + (1 - 24)^2} = 30.08 \text{ m}$$

$$r_{E7} = \sqrt{(x_E - x_{H7})^2 + (y_E - y_{H7})^2} = \sqrt{(19.6 - 9.2)^2 + (1 - 24)^2} = 25.24 \text{ m}$$

$$r_{E8} = \sqrt{(x_E - x_{H8})^2 + (y_E - y_{H8})^2} = \sqrt{(19.6 - 9.4)^2 + (1 - 23.65)^2} = 24.84 \text{ m}$$

$$r_{E9} = \sqrt{(x_E - x_{H9})^2 + (y_E - y_{H9})^2} = \sqrt{(19.6 - 9.6)^2 + (1 - 24)^2} = 25.07 \text{ m}$$

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_E - y_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(37.17)^2} = -0.5298 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_E - x_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{200(19.6 - (-9.6))}{2\pi(37.17)^2} = 0.6727 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_E - y_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{200(1 - 23.65)}{2\pi(36.79)^2} = -0.5326 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_E - x_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{200(19.6 - (-9.4))}{2\pi(36.79)^2} = 0.6820 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_E - y_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(36.85)^2} = -0.5391 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_E - x_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{200(19.6 - (-9.2))}{2\pi(36.85)^2} = 0.6750 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_E - y_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(30.34)^2} = -0.7953 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_E - x_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{200(19.6 - (-0.2))}{2\pi(30.34)^2} = 0.6846 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_E - y_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{200(1 - 23.65)}{2\pi(29.95)^2} = -0.8037 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_E - x_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{200(19.6 - 0)}{2\pi(29.95)^2} = 0.6955 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_E - y_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(30.08)^2} = -0.8091 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_E - x_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{200(19.6 - 0.2)}{2\pi(30.08)^2} = 0.6824 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_E - y_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(25.24)^2} = -1.1492 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_E - x_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{200(19.6 - 9.2)}{2\pi(25.24)^2} = 0.5196 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_E - y_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{200(1 - 23.65)}{2\pi(24.84)^2} = -1.1684 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_E - x_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{200(19.6 - 9.4)}{2\pi(24.84)^2} = 0.5261 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_E - y_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{200(1 - 24)}{2\pi(25.07)^2} = -1.1649 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_E - x_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{200(19.6 - 9.6)}{2\pi(25.07)^2} = 0.5060 \text{ A/m}$$

$$H_{XE} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -0.5298 - 0.5326 - 0.5391 - 0.7953 - 0.8037 - 0.8091 - 1.1492 \\ - 1.1684 - 1.1649 = -7.4921 \text{ A/m}$$

$$H_{YE} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 0.6727 + 0.6820 + 0.6750 + 0.6846 + 0.6955 + 0.6824 + 0.5196 \\ + 0.5261 + 0.5060 = 5.6439 \text{ A/m}$$

$$H_E = \sqrt{H_{XE}^2 + H_{YE}^2} = \sqrt{(-7.4921)^2 + (5.6439)^2} = 9.38 \text{ A/m}$$

$$B_E = \mu_0 \cdot H_E = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9.38 = 11.787 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

400 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_E - y_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(37.17)^2} = -1.0597 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_E - x_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - (-9.6))}{2\pi(37.17)^2} = 1.3454 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_E - y_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(36.79)^2} = -1.0653 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_E - x_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - (-9.4))}{2\pi(36.79)^2} = 1.3640 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_E - y_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(36.85)^2} = -1.0782 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_E - x_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - (-9.2))}{2\pi(36.85)^2} = 1.3501 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_E - y_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(30.34)^2} = -1.5906 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_E - x_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - (-0.2))}{2\pi(30.34)^2} = 1.3693 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_E - y_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(29.95)^2} = -1.6075 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_E - x_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - 0)}{2\pi(29.95)^2} = 1.3910 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_E - y_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(30.08)^2} = -1.6128 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_E - x_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - 0.2)}{2\pi(30.08)^2} = 1.3649 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_E - y_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(25.24)^2} = -2.2984 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_E - x_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - 9.2)}{2\pi(25.24)^2} = 1.0392 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_E - y_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(24.84)^2} = -2.3369 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_E - x_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - 9.4)}{2\pi(24.84)^2} = 1.0523 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_E - y_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(25.07)^2} = -2.3296 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_E - x_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{400 \cdot (19.6 - 9.6)}{2\pi(25.07)^2} = 1.0129 \text{ A/m}$$

$$H_{XE} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -1.0597 - 1.0653 - 1.0782 - 1.5906 - 1.6075 - 1.6182 - 2.2984 \\ - 2.3369 - 2.3296 = -14.9844 \text{ A/m}$$

$$H_{YE} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 1.3454 + 1.3640 + 1.3501 + 1.3693 + 1.3910 + 1.3649 + 1.0392 \\ 1.0523 + 1.0129 = 11.2891 \text{ A/m}$$

$$H_E = \sqrt{H_{XE}^2 + H_{YE}^2} = \sqrt{(-14.9844)^2 + (11.2891)^2} = 18.7610 \text{ A/m}$$

$$B_E = \mu_0 \cdot H_E = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 18.7610 = 23.575 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

800 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_E - y_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(37.17)^2} = -2.1195 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_E - x_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - (-9.6))}{2\pi(37.17)^2} = 2.6909 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_E - y_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(36.79)^2} = -2.1306 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_E - x_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - (-9.4))}{2\pi(36.79)^2} = 2.7280 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_E - y_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(36.85)^2} = -2.1565 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_E - x_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - (-9.2))}{2\pi(36.85)^2} = 2.7003 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_E - y_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(30.34)^2} = -3.1813 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_E - x_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - (-0.2))}{2\pi(30.34)^2} = 2.7386 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_E - y_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(29.95)^2} = -3.2150 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_E - x_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - 0)}{2\pi(29.95)^2} = 2.7820 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_E - y_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(30.08)^2} = -3.2365 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_E - x_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - 0.2)}{2\pi(30.08)^2} = 2.7299 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_E - y_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(25.24)^2} = -4.5968 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_E - x_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - 9.2)}{2\pi(25.24)^2} = 2.0785 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_E - y_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(24.84)^2} = -4.6738 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_E - x_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - 9.4)}{2\pi(24.84)^2} = 2.1047 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_E - y_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(25.07)^2} = -4.6593 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_E - x_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{800 \cdot (19.6 - 9.6)}{2\pi(25.07)^2} = 2.0258 \text{ A/m}$$

$$H_{XE} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -2.1195 - 2.1306 - 2.1565 - 3.1813 - 3.2150 - 3.2365 - 4.5968 \\ - 4.6738 - 4.6593 = -29.9693 \text{ A/m}$$

$$H_{YE} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 2.6909 + 2.7280 + 2.7003 + 2.7386 + 2.7820 + 2.7299 + 2.0785 \\ 2.1047 + 2.0258 = 22.5787 \text{ A/m}$$

$$H_E = \sqrt{H_{XE}^2 + H_{YE}^2} = \sqrt{(-29.9693)^2 + (22.5787)^2} = 37.5227 \text{ A/m}$$

$$B_E = \mu_0 \cdot H_E = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 37.5227 = 47.152 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

1000 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_E - y_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(37.17)^2} = -2.6494 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_E - x_{H1})}{2\pi r_{E1}^2} = \frac{1000(19.6 - (-9.6))}{2\pi(37.17)^2} = 3.3637 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_E - y_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{1000(1 - 23.65)}{2\pi(36.79)^2} = -2.6635 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_E - x_{H2})}{2\pi r_{E2}^2} = \frac{1000(19.6 - (-9.4))}{2\pi(36.79)^2} = 3.4100 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_E - y_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(36.85)^2} = -2.6957 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_E - x_{H3})}{2\pi r_{E3}^2} = \frac{1000(19.6 - (-9.2))}{2\pi(36.85)^2} = 3.3754 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_E - y_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(30.34)^2} = -3.9766 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_E - x_{H4})}{2\pi r_{E4}^2} = \frac{1000(19.6 - (-0.2))}{2\pi(30.34)^2} = 3.4233 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_E - y_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{1000(1 - 23.65)}{2\pi(29.95)^2} = -4.0187 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_E - x_{H5})}{2\pi r_{E5}^2} = \frac{1000(19.6 - 0)}{2\pi(29.95)^2} = 3.4776 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_E - y_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(30.08)^2} = -4.0456 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_E - x_{H6})}{2\pi r_{E6}^2} = \frac{1000(19.6 - 0.2)}{2\pi(30.08)^2} = 3.4124 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_E - y_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(25.24)^2} = -5.7460 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_E - x_{H7})}{2\pi r_{E7}^2} = \frac{1000(19.6 - 9.2)}{2\pi(25.24)^2} = 2.5982 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_E - y_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{1000(1 - 23.65)}{2\pi(24.84)^2} = -5.8423 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_E - x_{H8})}{2\pi r_{E8}^2} = \frac{1000(19.6 - 9.4)}{2\pi(24.84)^2} = 2.6309 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_E - y_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{1000(1 - 24)}{2\pi(25.07)^2} = -5.8242 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_E - x_{H9})}{2\pi r_{E9}^2} = \frac{1000(19.6 - 9.6)}{2\pi(25.07)^2} = 2.5322 \text{ A/m}$$

$$H_{XE} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -2.6494 - 2.6635 - 2.6957 - 3.9766 - 4.0187 - 4.0456 - 5.7460 - 5.8423 - 5.8242 = -37.4620 \text{ A/m}$$

$$H_{YE} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 3.3637 + 3.4100 + 3.3754 + 3.4233 + 3.4776 + 3.4124 + 2.5982 + 2.6309 + 2.5322 = 28.2237 \text{ A/m}$$

$$H_E = \sqrt{H_{XE}^2 + H_{YE}^2} = \sqrt{(-37.4620)^2 + (28.2237)^2} = 46.9039 \text{ A/m}$$

$$B_E = \mu_0 \cdot H_E = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 46.9039 = 58.941 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

F(24.6 ; 1) Noktası İçin Magnetik Alan ve Endüksiyon

200 A için hesaplama:

$$r_{F1} = \sqrt{(x_F - x_{H1})^2 + (y_F - y_{H1})^2} = \sqrt{(24.6 - (-9.6))^2 + (1 - 24)^2} = 41.21 \text{ m}$$

$$r_{F2} = \sqrt{(x_F - x_{H2})^2 + (y_F - y_{H2})^2} = \sqrt{(24.6 - (-9.4))^2 + (1 - 23.65)^2} = 40.85 \text{ m}$$

$$r_{F3} = \sqrt{(x_F - x_{H3})^2 + (y_F - y_{H3})^2} = \sqrt{(24.6 - (-9.2))^2 + (1 - 24)^2} = 40.88 \text{ m}$$

$$r_{F4} = \sqrt{(x_F - x_{H4})^2 + (y_F - y_{H4})^2} = \sqrt{(24.6 - (-0.2))^2 + (1 - 24)^2} = 33.82 \text{ m}$$

$$r_{F5} = \sqrt{(x_F - x_{H5})^2 + (y_F - y_{H5})^2} = \sqrt{(24.6 - 0)^2 + (1 - 23.65)^2} = 33.43 \text{ m}$$

$$r_{F6} = \sqrt{(x_F - x_{H6})^2 + (y_F - y_{H6})^2} = \sqrt{(24.6 - 0.2)^2 + (1 - 24)^2} = 33.53 \text{ m}$$

$$r_{F7} = \sqrt{(x_F - x_{H7})^2 + (y_F - y_{H7})^2} = \sqrt{(24.6 - 9.2)^2 + (1 - 24)^2} = 27.67 \text{ m}$$

$$r_{F8} = \sqrt{(x_F - x_{H8})^2 + (y_F - y_{H8})^2} = \sqrt{(24.6 - 9.4)^2 + (1 - 23.65)^2} = 27.27 \text{ m}$$

$$r_{F9} = \sqrt{(x_F - x_{H9})^2 + (y_F - y_{H9})^2} = \sqrt{(24.6 - 9.6)^2 + (1 - 24)^2} = 27.45 \text{ m}$$

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_F - y_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 24)}{2\pi(41.21)^2} = -0.4310 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_F - x_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - (-9.6))}{2\pi(41.21)^2} = 0.6410 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_F - y_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(40.85)^2} = -0.4320 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_F - x_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - (-9.4))}{2\pi(40.85)^2} = 0.6485 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_F - y_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 24)}{2\pi(40.88)^2} = -0.4380 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_F - x_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - (-9.2))}{2\pi(40.88)^2} = 0.6437 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_F - y_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.82)^2} = -0.6400 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_F - x_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - (-0.2))}{2\pi(33.82)^2} = 0.6901 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_F - y_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(33.43)^2} = -0.6451 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_F - x_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - 0)}{2\pi(33.43)^2} = 0.7006 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_F - y_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.53)^2} = -0.6511 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_F - x_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - 0.2)}{2\pi(33.53)^2} = 0.6908 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_F - y_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.67)^2} = -0.9562 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_F - x_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - 9.2)}{2\pi(27.67)^2} = 0.6402 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_F - y_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(27.27)^2} = -0.9695 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_F - x_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - 9.4)}{2\pi(27.27)^2} = 0.6506 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_F - y_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{200 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.45)^2} = -0.9716 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_F - x_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{200 \cdot (24.6 - 9.6)}{2\pi(27.45)^2} = 0.6336 \text{ A/m}$$

$$H_{XF} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -0.4310 - 0.4320 - 0.4380 - 0.6400 - 0.6451 - 0.6511 - 0.9562 \\ - 0.9695 - 0.9716 = -6.1375 \text{ A/m}$$

$$H_{YF} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 0.6410 + 0.6485 + 0.6437 + 0.6901 + 0.7006 + 0.6908 + 0.6402 \\ 0.6506 + 0.6336 = 5.9391 \text{ A/m}$$

$$H_F = \sqrt{H_{XF}^2 + H_{YF}^2} = \sqrt{(-6.1375)^2 + (5.9391)^2} = 8.5405 \text{ A/m}$$

$$B_F = \mu_0 \cdot H_F = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 8.5405 = 10.732 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

400 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_F - y_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(41.21)^2} = -0.8621 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_F - x_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - (-9.6))}{2\pi(41.21)^2} = 1.2820 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_F - y_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(40.85)^2} = -0.8641 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_F - x_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - (-9.4))}{2\pi(40.85)^2} = 1.2971 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_F - y_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(40.88)^2} = -0.8761 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_F - x_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - (-9.2))}{2\pi(40.88)^2} = 1.2875 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_F - y_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.82)^2} = -1.2801 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_F - x_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - (-0.2))}{2\pi(33.82)^2} = 1.3803 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_F - y_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(33.43)^2} = -1.2902 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_F - x_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - 0)}{2\pi(33.43)^2} = 1.4013 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_F - y_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.53)^2} = -1.3023 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_F - x_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - 0.2)}{2\pi(33.53)^2} = 1.3816 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_F - y_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.67)^2} = -1.9124 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_F - x_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - 9.2)}{2\pi(27.67)^2} = 1.2805 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_F - y_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(27.27)^2} = -1.9390 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_F - x_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - 9.4)}{2\pi(27.27)^2} = 1.3012 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_F - y_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{400 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.45)^2} = -1.9432 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_F - x_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{400 \cdot (24.6 - 9.6)}{2\pi(27.45)^2} = 1.2673 \text{ A/m}$$

$$H_{XF} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -0.8621 - 0.8641 - 0.8761 - 1.2801 - 1.2902 - 1.3023 - 1.9124 \\ - 1.9390 - 1.9432 = -12.2695 \text{ A/m}$$

$$H_{YF} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 1.2820 + 1.2971 + 1.2875 + 1.3803 + 1.4013 + 1.3816 + 1.2805 \\ 1.3012 + 1.2673 = 11.8788 \text{ A/m}$$

$$H_F = \sqrt{H_{XF}^2 + H_{YF}^2} = \sqrt{(-12.2695)^2 + (11.8788)^2} = 17.0776 \text{ A/m}$$

$$B_F = \mu_0 \cdot H_F = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 17.0776 = 21.460 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

800 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_F - y_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(41.21)^2} = -1.7243 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_F - x_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - (-9.6))}{2\pi(41.21)^2} = 2.5640 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_F - y_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(40.85)^2} = -1.7282 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_F - x_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - (-9.4))}{2\pi(40.85)^2} = 2.5942 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_F - y_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(40.88)^2} = -1.7523 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_F - x_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - (-9.2))}{2\pi(40.88)^2} = 2.5751 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_F - y_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.82)^2} = -2.5602 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_F - x_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - (-0.2))}{2\pi(33.82)^2} = 2.7606 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_F - y_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(33.43)^2} = -2.5805 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_F - x_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - 0)}{2\pi(33.43)^2} = 2.8026 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_F - y_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.53)^2} = -2.6047 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_F - x_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - 0.2)}{2\pi(33.53)^2} = 2.7633 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_F - y_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.67)^2} = -3.8248 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_F - x_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - 9.2)}{2\pi(27.67)^2} = 2.5610 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_F - y_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(27.27)^2} = -3.8780 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_F - x_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - 9.4)}{2\pi(27.27)^2} = 2.6024 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_F - y_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{800 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.45)^2} = -3.8864 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_F - x_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{800 \cdot (24.6 - 9.6)}{2\pi(27.45)^2} = 2.5346 \text{ A/m}$$

$$H_{XF} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -1.7243 - 1.7282 - 1.7523 - 2.5602 - 2.5805 - 2.6047 - 3.8248 \\ - 3.8780 - 3.8864 = -24.5394 \text{ A/m}$$

$$H_{YF} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 2.5640 + 2.5942 + 2.5751 + 2.7606 + 2.8026 + 2.7633 + 2.5610 \\ + 2.6024 + 2.5346 = 23.7578 \text{ A/m}$$

$$H_F = \sqrt{H_{XF}^2 + H_{YF}^2} = \sqrt{(-24.5394)^2 + (23.7578)^2} = 34.1557 \text{ A/m}$$

$$B_F = \mu_0 \cdot H_F = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 34.1557 = 42.921 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

1000 A için hesaplama:

$$H_{X1} = \frac{I_1(y_F - y_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 24)}{2\pi(41.21)^2} = -2.1554 \text{ A/m}$$

$$H_{Y1} = \frac{I_1(x_F - x_{H1})}{2\pi r_{F1}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - (-9.6))}{2\pi(41.21)^2} = 3.2050 \text{ A/m}$$

$$H_{X2} = \frac{I_2(y_F - y_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(40.85)^2} = -2.1602 \text{ A/m}$$

$$H_{Y2} = \frac{I_2(x_F - x_{H2})}{2\pi r_{F2}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - (-9.4))}{2\pi(40.85)^2} = 3.2427 \text{ A/m}$$

$$H_{X3} = \frac{I_3(y_F - y_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 24)}{2\pi(40.88)^2} = -2.1904 \text{ A/m}$$

$$H_{Y3} = \frac{I_3(x_F - x_{H3})}{2\pi r_{F3}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - (-9.2))}{2\pi(40.88)^2} = 3.2189 \text{ A/m}$$

$$H_{X4} = \frac{I_4(y_F - y_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.82)^2} = -3.2003 \text{ A/m}$$

$$H_{Y4} = \frac{I_4(x_F - x_{H4})}{2\pi r_{F4}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - (-0.2))}{2\pi(33.82)^2} = 3.4508 \text{ A/m}$$

$$H_{X5} = \frac{I_5(y_F - y_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(33.43)^2} = -3.2256 \text{ A/m}$$

$$H_{Y5} = \frac{I_5(x_F - x_{H5})}{2\pi r_{F5}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - 0)}{2\pi(33.43)^2} = 3.5033 \text{ A/m}$$

$$H_{X6} = \frac{I_6(y_F - y_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 24)}{2\pi(33.53)^2} = -3.2559 \text{ A/m}$$

$$H_{Y6} = \frac{I_6(x_F - x_{H6})}{2\pi r_{F6}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - 0.2)}{2\pi(33.53)^2} = 3.4541 \text{ A/m}$$

$$H_{X7} = \frac{I_7(y_F - y_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.67)^2} = -4.7811 \text{ A/m}$$

$$H_{Y7} = \frac{I_7(x_F - x_{H7})}{2\pi r_{F7}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - 9.2)}{2\pi(27.67)^2} = 3.2012 \text{ A/m}$$

$$H_{X8} = \frac{I_8(y_F - y_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 23.65)}{2\pi(27.27)^2} = -4.8475 \text{ A/m}$$

$$H_{Y8} = \frac{I_8(x_F - x_{H8})}{2\pi r_{F8}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - 9.4)}{2\pi(27.27)^2} = 3.2530 \text{ A/m}$$

$$H_{X9} = \frac{I_9(y_F - y_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{1000 \cdot (1 - 24)}{2\pi(27.45)^2} = -4.8580 \text{ A/m}$$

$$H_{Y9} = \frac{I_9(x_F - x_{H9})}{2\pi r_{F9}^2} = \frac{1000 \cdot (24.6 - 9.6)}{2\pi(27.45)^2} = 3.1683 \text{ A/m}$$

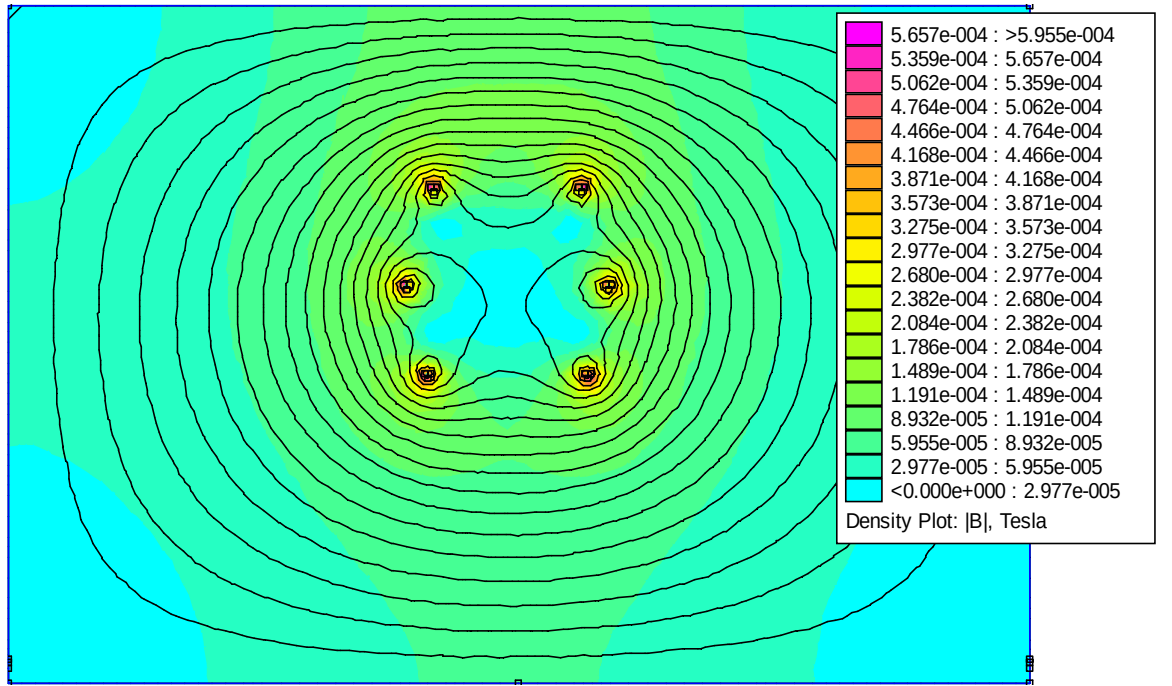
$$H_{XF} = \sum_{i=1}^9 H_{Xi} = -2.1554 - 2.1602 - 2.1904 - 3.2003 - 3.2256 - 3.2559 - 4.7811 \\ - 4.8475 - 4.8580 = -30.6744 \text{ A/m}$$

$$H_{YF} = \sum_{i=1}^9 H_{Yi} = 3.2050 + 3.2427 + 3.2189 + 3.4508 + 3.5033 + 3.4541 + 3.2012 \\ + 3.2530 + 3.1683 = 29.6973 \text{ A/m}$$

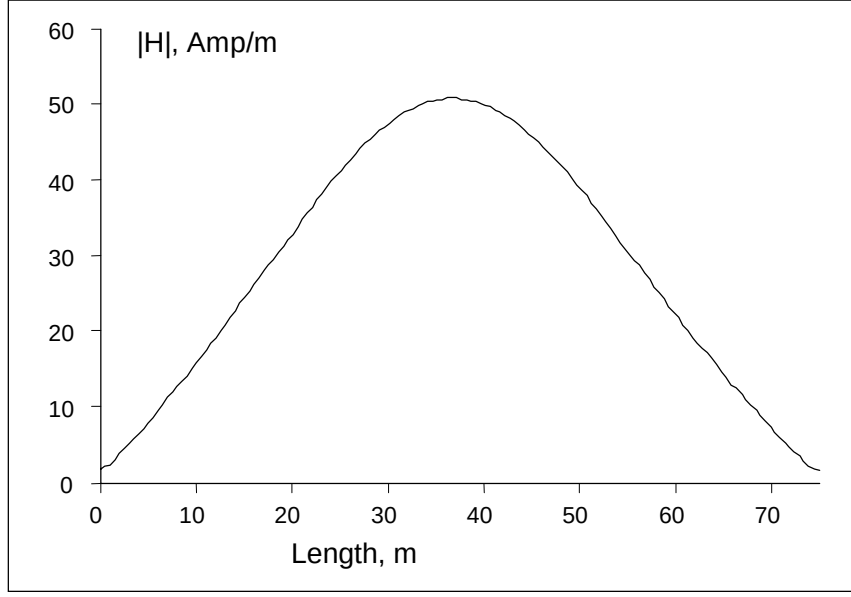
$$H_F = \sqrt{H_{XF}^2 + H_{YF}^2} = \sqrt{(-30.6744)^2 + (29.6973)^2} = 42.6948 \text{ A/m}$$

$$B_F = \mu_0 \cdot H_F = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 42.6948 = 53.651 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

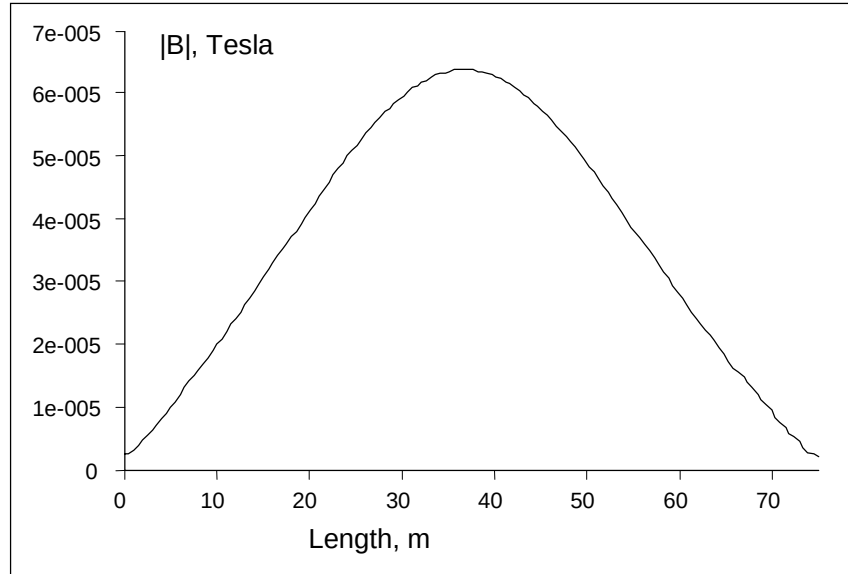
EK B. 380 kV’luk Üçlü Demet İletkenli, Düşey Düzenli Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının 400 A, 800 A ve 1000 A İçin Çizilmiş Grafikleri



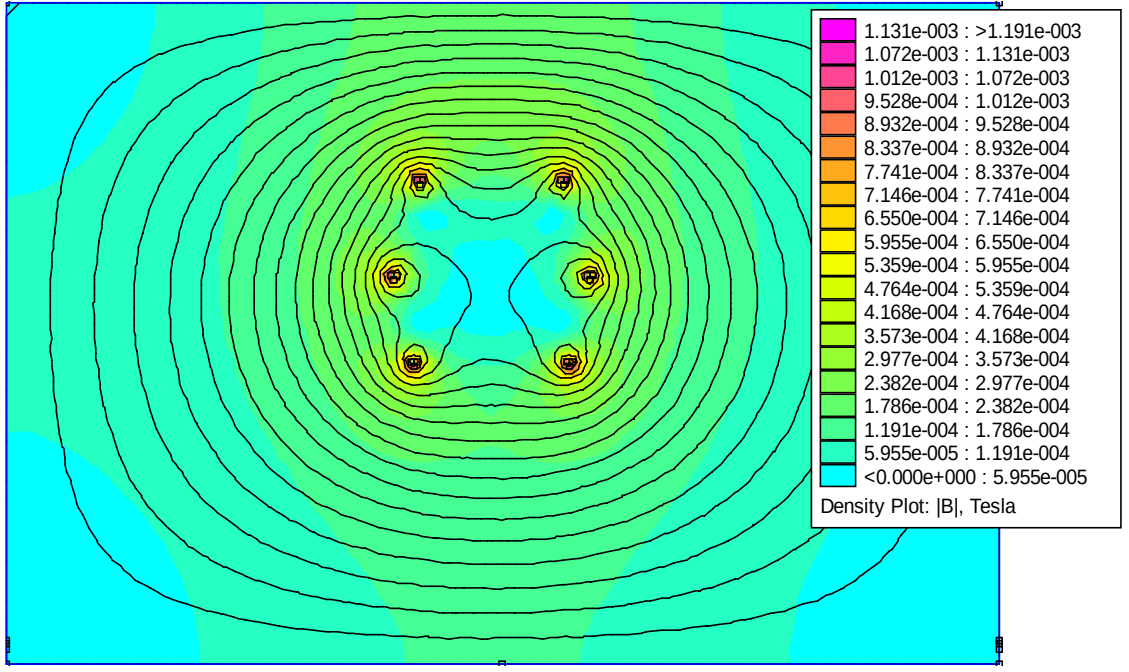
Şekil B.1. 380 kV’luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 400 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



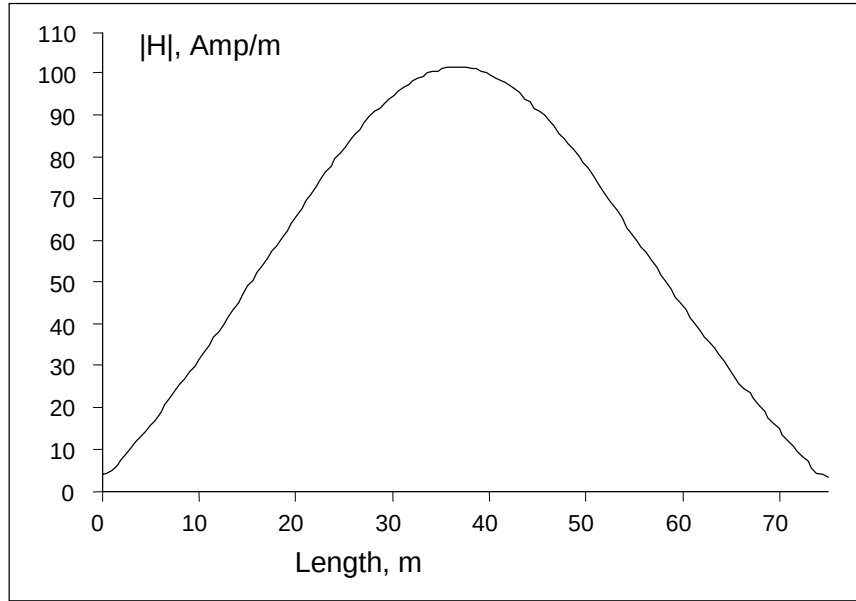
Şekil B.2. 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



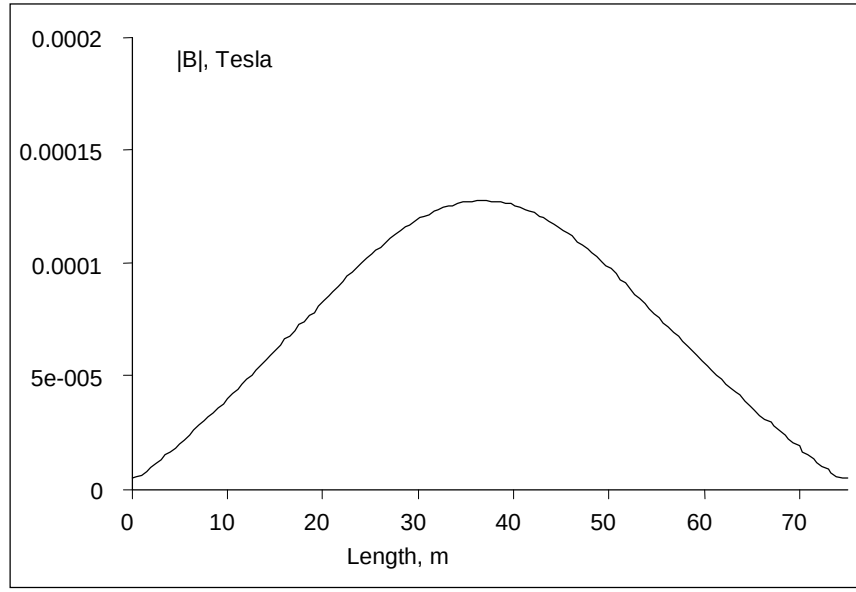
Şekil B.3. 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi



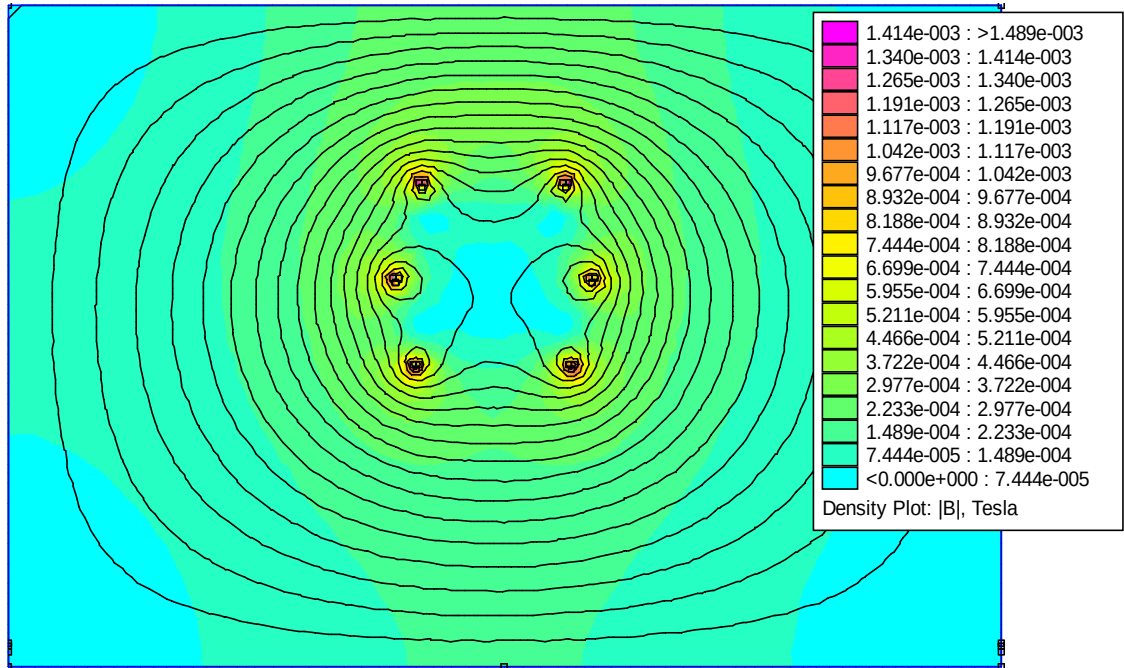
Şekil B.4. 380 kV’luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 800 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



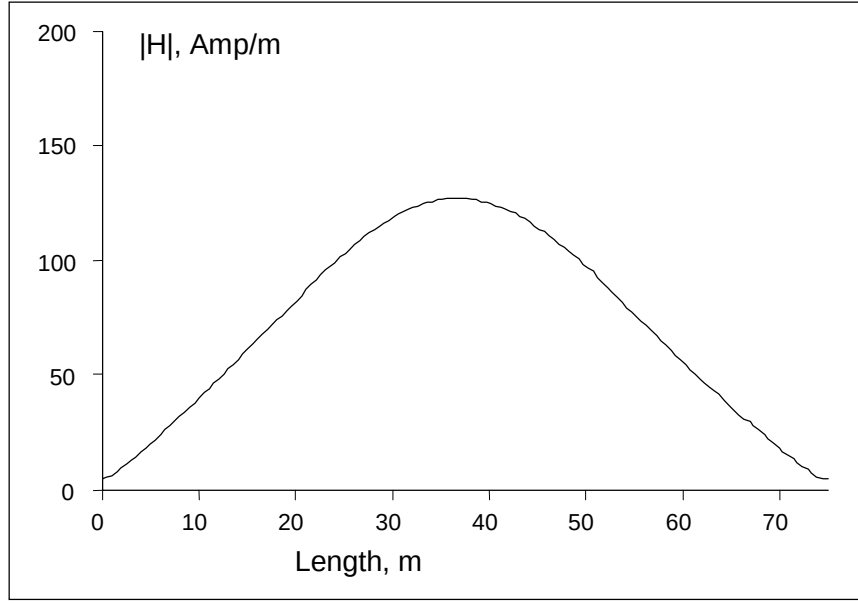
Şekil B.5. 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



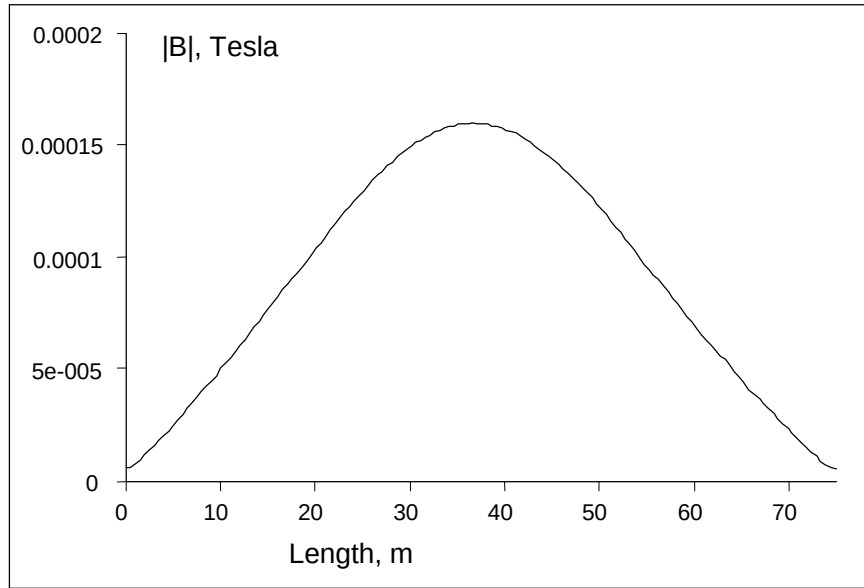
Şekil B.6. 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi



Şekil B.7. 380 kV'luk üçlü demet iletkenli, düşey düzenli çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 1000 A için elde edilen magnetik alan dağılımı

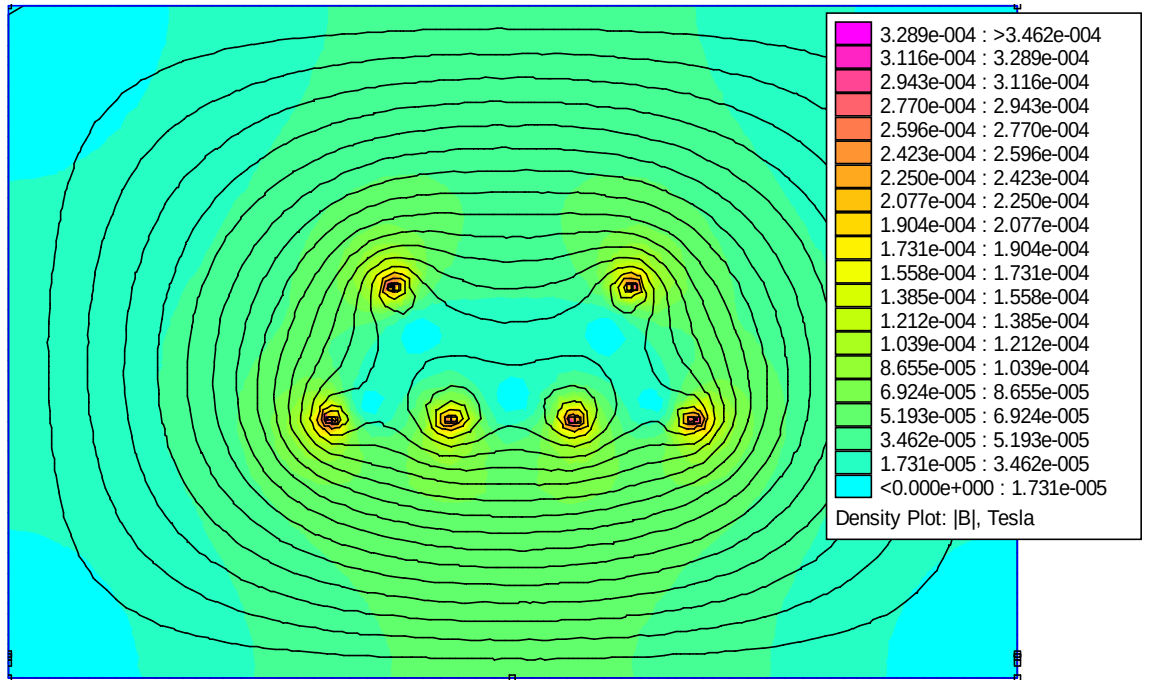


Şekil B.8. 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi

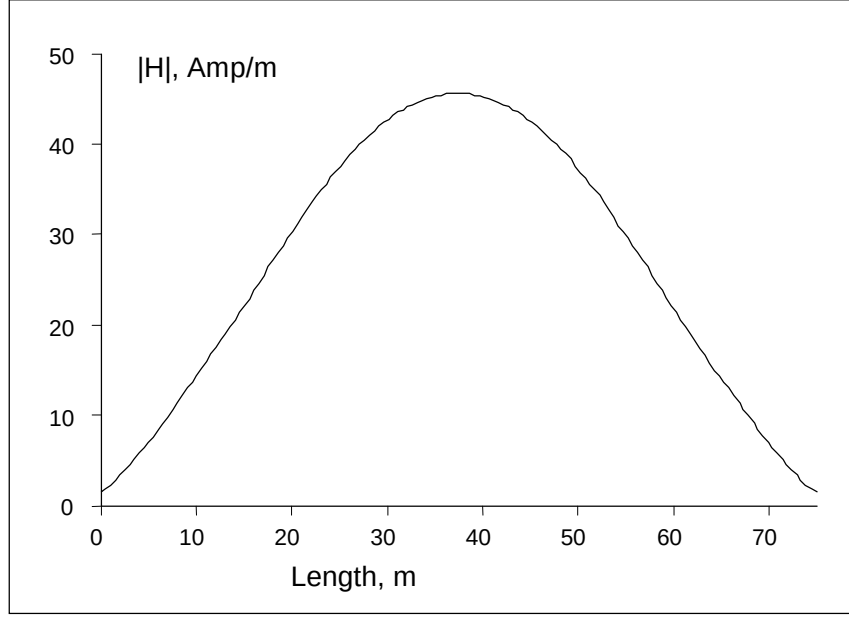


Şekil B.9. 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

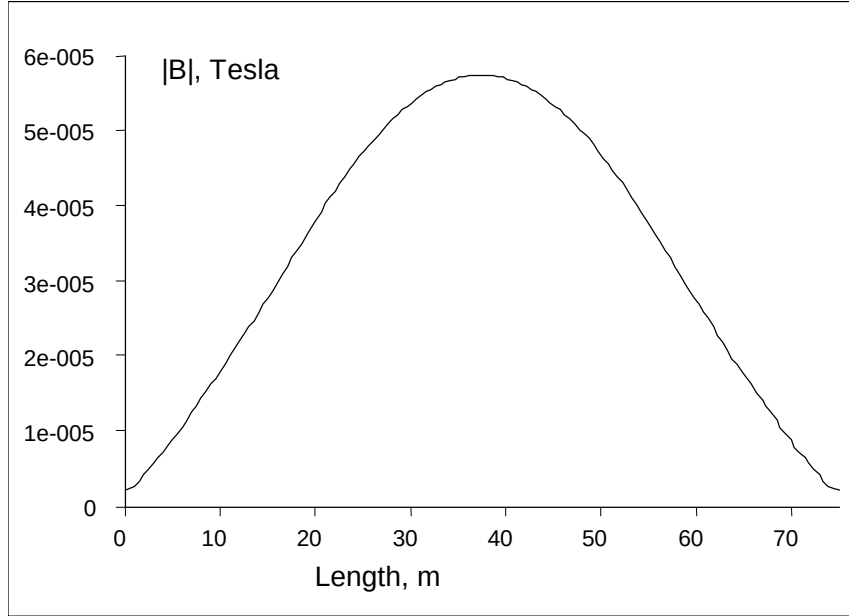
EK C. 380 kV’luk İkili Demet İletkenli, Çift Devre Bir Yüksek Gerilimli Enerji İletim Hattı Çevresindeki Magnetik Alan Şiddeti Ve Magnetik Endüksiyon Dağılımının 400 A, 800 A ve 1000 A İçin Çizilmiş Grafikleri



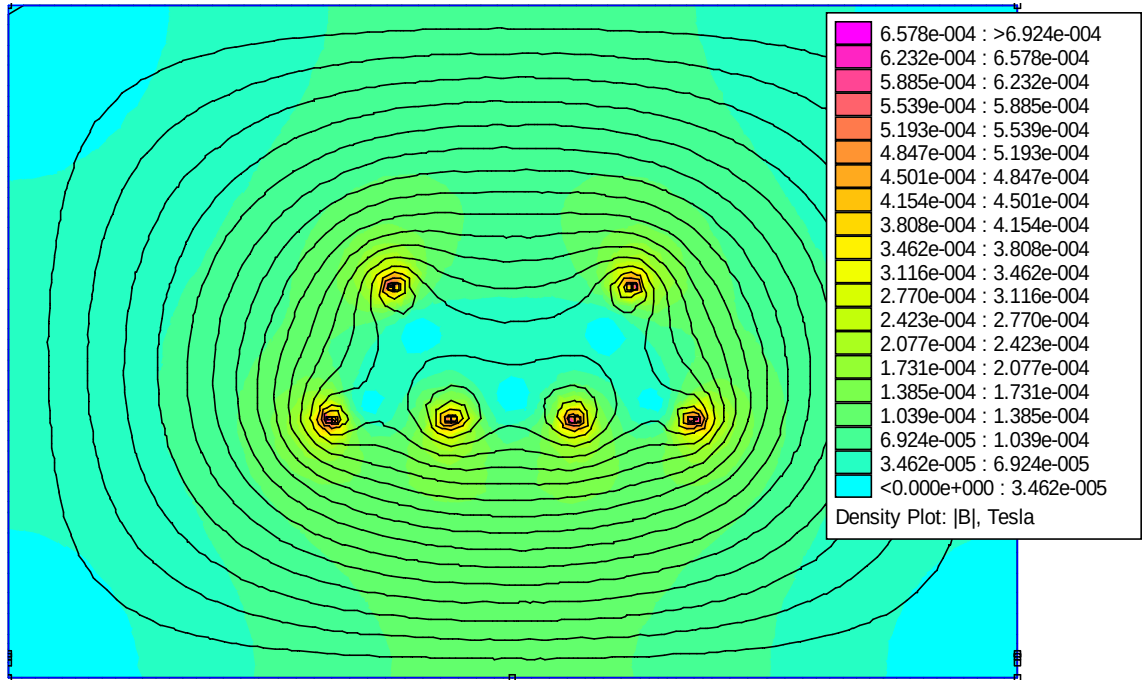
Şekil C.1. 380 kV’luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 400 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



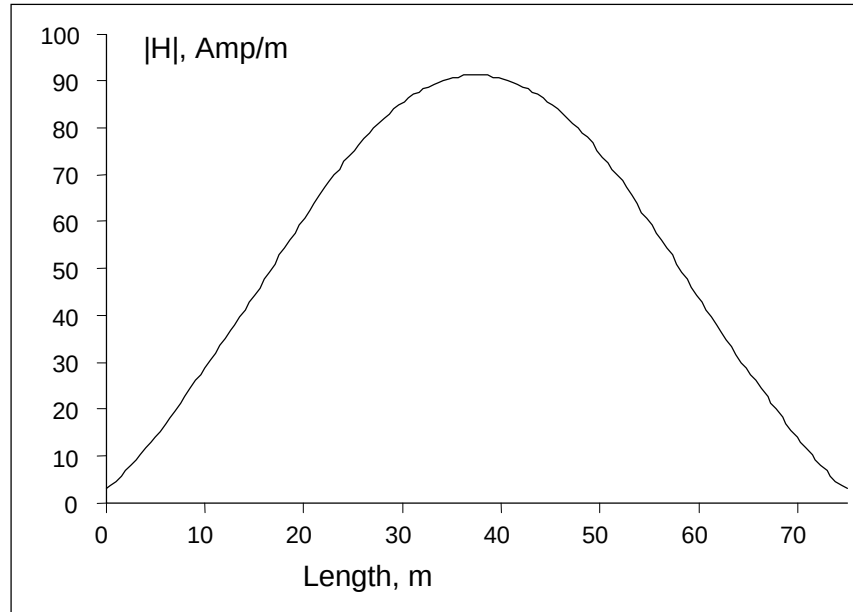
Şekil C.2. 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



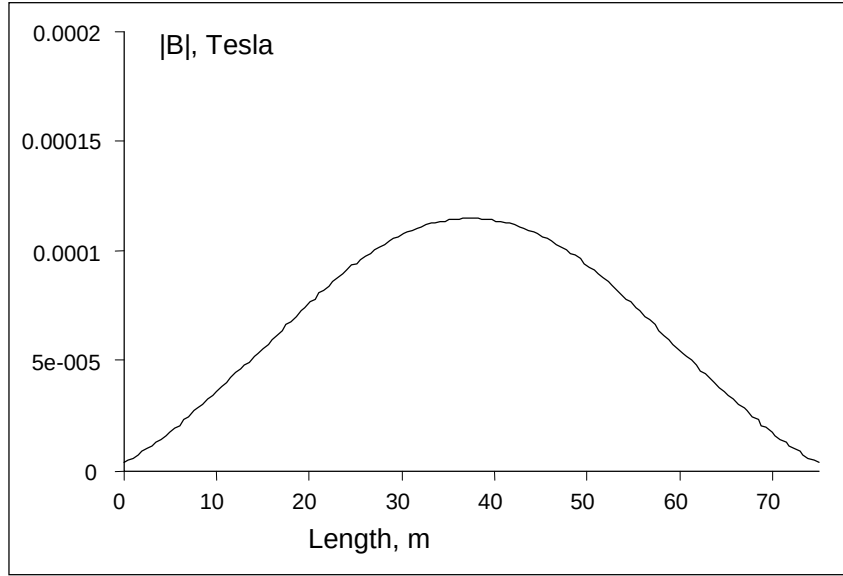
Şekil C.3. 400 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi



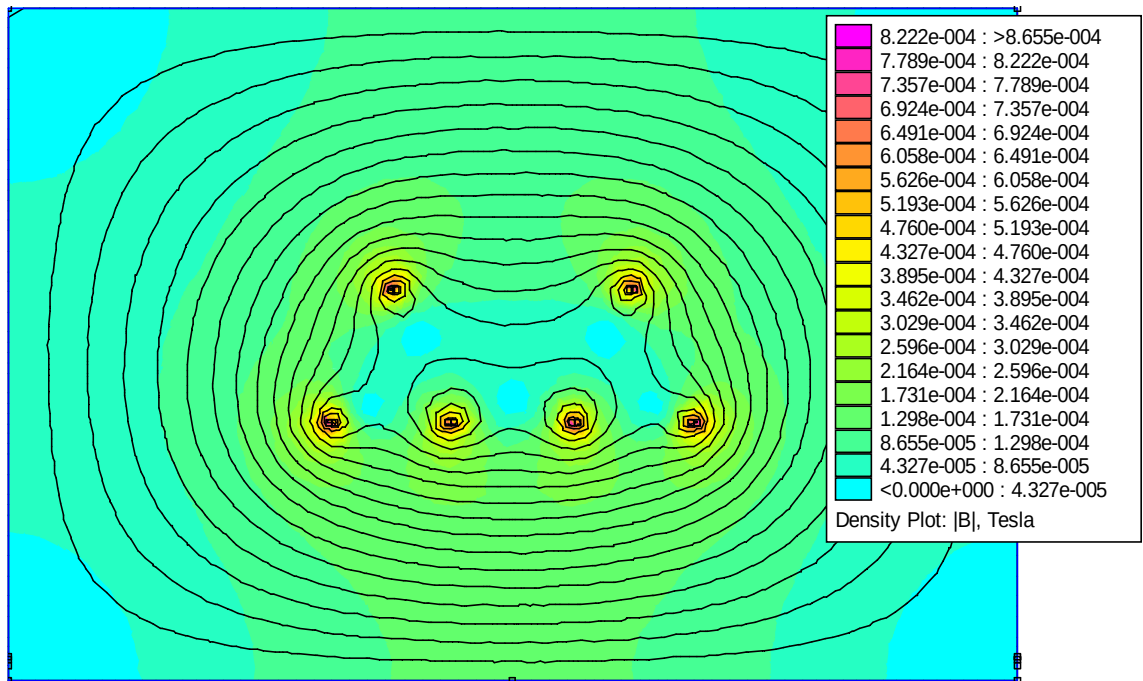
Şekil C.4. 380 kV’luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 800 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



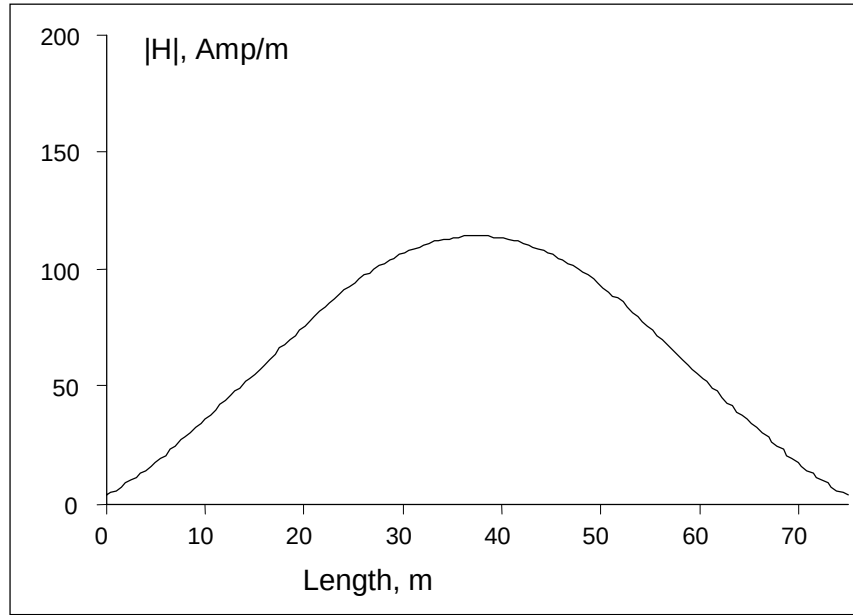
Şekil C.5. 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



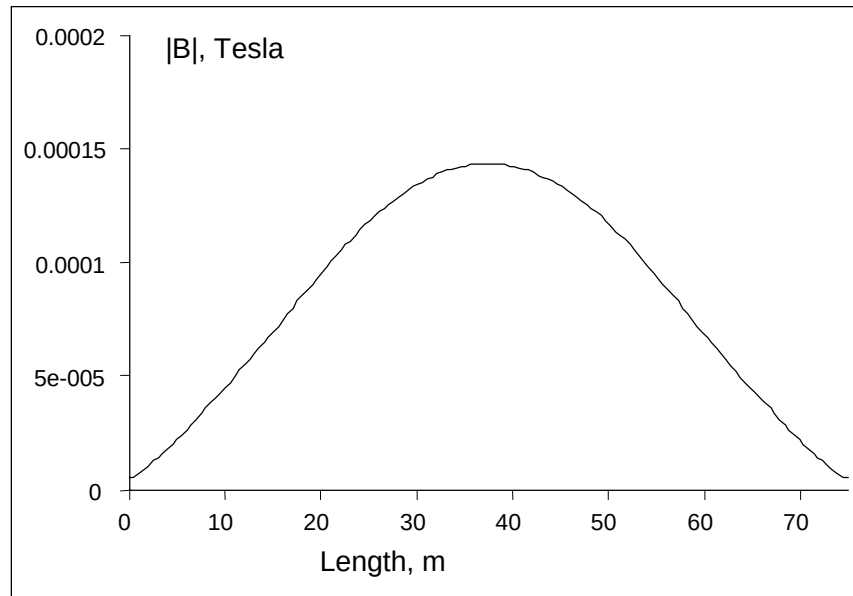
Şekil C.6. 800 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi



Şekil C.7. 380 kV’luk ikili demet iletkenli, çift devre bir yüksek gerilimli enerji iletim hattında 1000 A için elde edilen magnetik alan dağılımı



Şekil C.8. 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi



Şekil C.9. 1000 A için yerden 1 m yukarıda hat ekseninden 37,5 m sağa ve sola magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Hülya Sevgi TORAMAN, 31.10.1978 tarihinde İstanbul’da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 1996 yılında Lisans öğrenimine başladığı YTÜ Elektrik – Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden 2000 yılında mezun oldu. Aynı yıl başlamış olduğu İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmasına devam etmektedir.