

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

50Hz İLETİM HATLARINDA HAT OPTİMİZASYONU

Ruslan ABDULLA

Danışman: Prof. Dr. Mustafa MERDAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2011**

TEZ ONAYI

Ruslan ABDULLA tarafından hazırlanan “**50Hz İletim Hatlarında Hat Optimizasyonu**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mustafa MERDAN
Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği A.B.D

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Adnan KAYA
Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği A.B.D

Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE
Süleyman Demirel Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği A.B.D

Prof. Dr. Mustafa KUŞCU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	6
3.1. Materyal.....	6
3.1.1. İletim hattı.....	6
3.1.1.1. Yapılar.....	7
3.1.1.2. Yalıtkanlar.....	8
3.1.1.3. İletkenler.....	9
3.1.1.4. Tarihçe.....	10
3.1.1.5. İletim hattı tasarımı.....	11
3.1.1.6. Elektrik direği türleri.....	13
3.1.1.7. Direk yapısı seçimi.....	14
3.1.1.8. İletken türleri.....	18
3.1.1.9. İletken boyutunun belirlenmesi.....	19
3.1.1.10. İletken seçiminde başka önem verilmesi gerekenler.....	20
3.1.1.11. Yalıtkan türleri.....	20
3.1.1.12. Topraklama kablosu.....	22
3.1.1.13. Elektrik direğinin topraklanması.....	23
3.1.2. Elektromanyetik alan kuramı.....	24
3.1.2.1. Elektrik alan.....	26
3.1.2.2. Manyetik alan.....	26
3.1.2.3. Elektromanyetik büyüklükler ve birimler.....	26
3.2. Yöntem.....	27

3.2.1. Ekranlama	27
3.2.1.1. Ekranlama etkinliği	29
3.2.1.2. Ekranlama teorisi ve ekranlama etkinliğinin hesaplanması	30
3.2.1.3. Tek ekran.....	33
3.2.1.4. Çoklu lamine ekran	34
3.2.1.5. Açıklık ve deliklerin ekran üzerinde etkisi	36
3.2.1.6. Elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinliği.....	40
3.2.1.7. Düşük empedanslı manyetik alanı	44
3.2.1.8. Yüksek empedanslı elektrik alanı ve düzlem dalga	44
3.2.2. Elektrik alan hesaplaması	45
3.2.3. Manyetik alan hesaplaması	46
3.2.4. Yakın alan	47
3.2.4.1. Yakın alanda elektrik alan ekranlaması	47
3.2.4.2. Yakın alanda manyetik alan ekranlaması.....	48
3.2.5. Ekranlama analizi.....	48
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	51
4.1. Elektrik Alan Ölçümü	51
4.2. Manyetik Alan Ölçümü	53
4.3. Elektrik Alanın Ekranlama Etkinliği	56
4.4. Manyetik Alanın Ekranlama Etkinliği.....	57
4.5. Elektrik Alanın Ekranlama Etkinliğinin Hesaplanması.....	58
4.6. Manyetik Alanın Ekranlama Etkinliğinin Hesaplanması	59
4.7. Elektrik Alanı Azaltılması	60
4.8. Manyetik Alanı Azaltılması.....	65
5. SONUÇ.....	70
6. KAYNAKLAR.....	72
EKLER	76
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

50Hz İLETİM HATLARINDA HAT OPTİMİZASYONU

Ruslan ABDULLA

Süleyman Demirel Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa MERDAN

Bu tez çalışmasında, 50Hz yüksek gerilim taşıyan iletim hatlarından dolayı meydana gelen elektromanyetik dalgaların oluşturduğu, insan sağlığına zararlı etkileri olabilecek, elektrik ve manyetik alanların insanlara ulaşmasının asgariye indirilmesi amaçlanmıştır.

İletim hatlarının yapısı incelenmiş ve oluşturdukları elektrik ve manyetik alan şiddetleri ölçülmüştür. Alanların engellenmesi için ekranlama metoduna başvurulmuştur. Seçilecek ekran malzemesi için günümüzde sık kullanılan demir, alüminyum ve bakırın metalik özellikleri ve hangi alanda nasıl daha iyi bir ekranlama görevi üstlenebilecekleri araştırılmıştır.

Ekran malzemelerinin maliyet, ağırlık, ekran performansı analizi, elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin ölçümleri ve diğer testler Matlab programında hesaplanmış ve simule edilmiştir.

Kullanılan yöntemler sonucu, istenen elektrik ve manyetik alan ekranlamasına her üç malzemeyle de ulaşılmasına rağmen, maliyet ve diğer nedenler göz önüne alındığında alüminyumun daha kabul edilebilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alçak frekans, elektromanyetik uyumluluk, elektromanyetik dalga, elektrik alan, manyetik alan, ekranlama, iletim hattı, yüksek gerilim.

2011, 83 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

LINE OPTIMIZATION ON 50Hz TRANSMISSION LINES

Ruslan ABDULLA

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electronic and Communication Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa MERDAN

In this thesis, it has been aimed to minimize the accessibility of potentially harmful electric and magnetic fields, generated by electromagnetic waves radiated from 50Hz high voltage transmission lines, to public.

The structure of transmission lines was studied and electric and magnetic field intensities were measured. Shielding method was preferred to prevent fields. To choose shielding material, largely used materials such as copper, aluminium and iron's metallic properties was examined. For which field how effectively these materials could shield was analyzed.

The analysis of cost, weight and shielding performance of shielding material, measurements of electric and magnetic field intensities and other tests were calculated and simulated on Matlab platform.

As a result of the methods used, despite the fact that it was possible to achieve electric and magnetic field shielding performance by three of these materials, within the considerations of cost and other aspects, it was concluded that aluminium was the most preferable material.

Key Words: Extremely low frequency, electromagnetic compatibility, electromagnetic wave, electric field, magnetic field, shielding, transmission line, high voltage.

2011, 83 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübeleri ile aşmamda yardımcı olan, desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mustafa MERDAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca çekinmeden sorularımı yöneltebildiğim ve fikirlerinden yararlandığım sevgilim Fidan Gamze KIZILÇAY, tüm bölüm personeli, Volkan KALENDER, Hüseyin ÇARK ve desteklerini her zaman hissettiğim dostlarım Ali Murat ÇEKİRGE ve Zeynel Serdar ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

En zor anlarda karşılıksız destekleri ile daima yanımda olan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ruslan ABDULLA
ISPARTA, 2011

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. İletim hattı yapıları.....	14
Şekil 3.2. Tipik elektrik direği.....	15
Şekil 3.3. Denizli – Afyon arasında 380kV gerilim taşıyan kablo örneği.....	18
Şekil 3.4. Denizli – Afyon arasında 380kV gerilim taşıyan kablonun yapısı	19
Şekil 3.5. Düzlem dalga için ekranlama mekanizmasının şeması.....	30
Şekil 3.6. Kaynaktan uzaklaştıkça dalga empedansının değişimi	32
Şekil 3.7. Çoklu lamine ekran örneği	34
Şekil 3.8. a) Ekran üzerinden indüklenmiş ekran akımlarının dağılımı b) üzerinde bir açıklık bulunan manyetik alan.	36
Şekil 3.9. a) Ekran üzerinde dikdörtgen yapıda bir açıklık olması durumunda akım dağılımı b) boyu d olan bir dalga kılavuzu.....	37
Şekil 3.10. Ekran üzerindeki delikler ve ekran akım dağılımı	38
Şekil 3.11. a) Havalandırma amaçlı çok sayıda açıklığa sahip ekran b) arı peteği şeklinde açıklık modeli	39
Şekil 3.12. Bakır ekran ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 1$) için yansıma kayıpları	41
Şekil 3.13. Demir ekran ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 1$) için yansıma kayıpları	41
Şekil 3.14. Bakır ekran ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 1$) için toplam ekran etkinliği	42
Şekil 3.15. Demir ekran ($\mu_r = 1000$, $\sigma_r = 0.17$) için toplam ekran etkinliği	42
Şekil 3.16. Bakır kullanarak uzaklığa göre elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinliği.....	43
Şekil 3.17. Ekran kalınlığının artması ile malzemenin fiyatlarının artması	49
Şekil 4.1. Elektrik alanı ölçümü için direk konfigürasyonu.....	51
Şekil 4.2. Hattın merkezinden yere uzaklık $h = 10.1m$ ve hattın ucundan yere uzaklık $h = 19.8m$	52
Şekil 4.3. Hat merkezinden direğe doğru olan yatay ekseninde elektrik alan şiddeti ...	53
Şekil 4.4. Manyetik alan ölçümü için direk konfigürasyonu	54
Şekil 4.5. $h = 5.5m$ hattın merkezinden yere uzaklık, yükseklik $h = 8.5m$ hattın ucundan yere uzaklık	55
Şekil 4.6. Hat merkezinden direğe doğru yükseklik arttıkça manyetik alan şiddetinin davranışı.....	56

Şekil 4.7. $r = 27.58\text{m}$ 'de malzemelerin kalınlıklarına göre elektrik alan ekranlama etkinliğinin değişimi	57
Şekil 4.8. $r = 20.79\text{m}$ 'de malzemelerin kalınlıklarına göre manyetik alan ekranlama etkinliğinin değişimi	58
Şekil 4.9. Orijinal ayarlamalarla test sürecine girecek durum.....	61
Şekil 4.10. Hat geriliminin %10 artması ile elektrik alan şiddeti.....	62
Şekil 4.11. Ölçüm noktası yüksekliğinin artması sonucu elektrik alan şiddeti.....	63
Şekil 4.12. Yükseklik arttıkça elektrik alan şiddetinin davranışı.....	64
Şekil 4.13. İletken yakınlştırılması sonucu ortaya çıkan elektrik alan şiddeti	65
Şekil 4.14. Test sonuçları için ilk durumdaki manyetik alan şiddeti.....	66
Şekil 4.15. İletkendeki akımın %10 artması ile ortaya çıkan manyetik alan şiddeti.....	67
Şekil 4.16. Klerans artması ile manyetik alan şiddetinin değişimi.....	68
Şekil 4.17. İletkenlerin yakınlştırılması sonucu ortaya çıkan manyetik alan şiddeti.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Elektrik ve manyetik alana maruz kalma limiti	3
Çizelge 3.1. İletim hattının güvenlik derecesine bağlı dayanıklılık süresi.....	12
Çizelge 3.2. Gerekli güç aktarımına göre hesaplanan yeterli gerilim seviyesi	13
Çizelge 3.3. Değişik gerilim hatları için minimum klerans değerleri	16
Çizelge 3.4. İletim hatları ile telekomünikasyon hatları kesiştiklerinde aralarındaki olması gereken açıklıklar.....	17
Çizelge 3.5. İletim hatlarının kesiştiklerinde aralarındaki olması gereken açıklıklar	17
Çizelge 3.6. Topraklama kablosu ile üst iletken arasındaki minimum açıklık.....	23
Çizelge 3.7. Bazı malzemelerin özellikleri.....	44
Çizelge 3.8. Elektromanyetik kaynaktan $r = 20.79\text{m}$ uzaklıktaki manyetik alanı ekranlama performansı	49
Çizelge 3.9. Elektromanyetik kaynaktan $r = 27.58\text{m}$ uzaklıktaki elektrik alanı ekranlama performansı	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

AAAC	Alaşımli Alüminyum İletkenler
AAC	Tam Alüminyum İletkenler
ACSR	Çelik Güçlendirmeli Alüminyum İletken
EHV	Çok Yüksek Gerilim
ELF	Çok Alçak Frekans Alanı
EM	Elektromanyetik
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
EMF	Elektromanyetik Alan
EMI	Elektromanyetik Girişim
CGS	Santimetre-Gram-Saniye Ölçü Sistemi
IARC	Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı
IRPA	Uluslararası Radyasyon Korunma Kurumu
NHMRC	Ulusal Sağlık ve Tıbbi Araştırma Kurulu
SAR	Özgül Soğurma Oranı
SE	Ekranlama Etkinliği
SI	Uluslararası Birimler Sistemi
UHV	Aşırı Yüksek Gerilim
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

1. GİRİŞ

Elektriğin günlük hayatta kullanımını önemli bir yer teşkil etmektedir. İletim hatından akım geçtiğinde hat yakınında ve çevresinde hem elektrik, hem de manyetik alanlar oluşmaktadır. 1970'lerden beri ELF elektrik ve manyetik alanlarının insan sağlığına etkisi sorusu sürekli gündemdedir. O zamandan buyana birçok araştırma yapılmış ve gelecek araştırmalar için önemli veriler elde edilmiştir.

1996'da Dünya Sağlık Örgütü (WHO) Uluslar arası Elektromanyetik Alan Projesi başlığı altında EMF yayan teknolojilerle ilgili potansiyel sağlık risklerini göz önünde bulunduran makale yayınlamıştır. WHO Çalışma Grubu son dönemlerde ELF ile ilgili bir karara varmıştır.

Genellikle elektrik gücü iletimi 50 – 60 Hz frekanslarında olmaktadır. Bu anlamda manyetik alan şiddeti birkaç yüz mikrotteslalık değişkenlik gösterir. İletim hattı altında manyetik alan $20\mu T$ elektrik alan şiddeti ise birkaç yüz V/m olmaktadır. Ancak, yerleşim yerlerinde ortalama manyetik alan şiddeti Avrupa'da $0.07\mu T$, Kuzey Amerika'da $0.11\mu T$ 'dir. Aynı durum elektrik alan için evlerde 100V/m'ye kadar değişmektedir (Anonymous, 2007).

Son zamanlarda $100\mu T$ ve daha büyük çok ciddi manyetik alan şiddetlerinde biyofiziksel mekanizmalar tarafından saptanmış biyolojik etkilerin olduğu veriler elde edilmiştir. Dış ELF manyetik alanları elektrik alan ve akımlarını vücutta indükler. Yüksek şiddetlerde olduğunda sinir ve kas uyarılmasına sebep olur ve merkezi sinir sisteminde sinir hücresi uyarılmasını değiştirmektedir (Anonymous, 2007).

ELF manyetik alanların çocukluk lösemisinin tetikleyicisi olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden aştırmacılar en çok bu hastalığın olma riski üzerinde odaklanmışlardır. 2002'de IARC, "insanlarda muhtemel kanserojen etkenler" adlı ELF manyetik alan monografi yayınladı. Monografinin amacı insanlarda kanserojenlik bulgusu limitli ve denek hayvanlardaki kanserojenlikle ilgili bulgulardan çok daha az olduğunu

göstermektedir. Monografide yerleşim yerlerinde manyetik alanın ortalama $0.3-0.4\mu T$ olduğunda çocukluk çağındakilerin lösemiye yakalanma oranının iki kat fazla olduğunu gösteren epidemiyolojik araştırma sonuçlarına yer verilmiştir.

Yalnız seçim önyargısı gibi metodolojik problemlerle epidemiyolojik bulgular zayıflatılmıştır. Ek olarak, kanser gelişiminde düşük seviye maruz kalmaların etkisi şimdiye kadarki biyofiziksel mekanizmalar ile tam olarak desteklenememiştir. Böylece, eğer bu düşük seviye alanlara maruz kalmaktan dolayı oluşan herhangi bir etki olsaydı, bu henüz bilinmeyen biyolojik mekanizma yüzünden olmalıydı. Ek olarak, hayvan deneyleri negatif sonuç vermektedir. Bu yüzden, tarafsız olacaksak çocukluk lösemisi iddiasın bilinenin aksine o kadar da sağlam verilere dayanmadığı bir gerçektir.

Çocukluk lösemisi diğer hastalıklara nazaran ender görülen bir hastalıktır. 2000 yılı verilerine göre dünya genelinde 49.000 vaka kaydedilmiştir. Ortalama $0.3\mu T$ 'in üzerinde manyetik alan şiddetine maruz kalan ev sayısı azınlıktadır. Tahminlere göre ancak %1 - %4 arası çocuklar bu koşullarda yaşıyor. 2000 yılı sonuçlarını baz alırsak, EMF'den dolayı yıllık 100-2400 hastalığa yakalanma riski ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile ELF manyetik alanı gerçekten de dünya genelinde hastalık sayısında artışa sebep oluyorsa ELF EMF etkilerine maruz kalmalar sınırlandırılmalıdır. (Anonymous, 2007).

ELF manyetik alanı ile ilgili bağdaştırılabilecek başka kötü hastalıklar üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Bunlar diğer çocukluk kanserleri, yetişkinlerde kanser, depresyon, intihar, kan ve damar rahatsızlıkları, üreme bozukluğu, gelişim yetersizliği, immünolojik gelişimler, sinir davranış etkileri ve sinir bozukluğu hastalıkları olarak sayılabilir. WHO çalışma grubuna göre ELF manyetik alanlardan dolayı ortaya çıkan rahatsızlıklara göre bütün bu hastalıklar lösemiye oranla daha düşük sayıda meydana gelmektedir. Bazı durumlarda (kalp ve damar hastalıkları ve göğüs kanseri) ise bulgular bu alanların hastalığa etkisinin olmadığını göstermektedir (Anonymous, 2007).

Günümüzde henüz elektromanyetik alanlara maruz kalma limitleri kesin olarak tanımlanmamıştır (Anonymous, 2009). 1990'da IRPA tarafından hazırlanan kılavuza göre yüksek gerilim hatlarından kaynaklanan elektrik ve manyetik alan için maruz kalma limitleri Çizelge 1.1'deki gibidir (Hameyer et al., 1996). Kılavuzda bu alanlardan dolayı ani hastalıklara davetiye çıkarılmasının engellemesi amaçlanmıştır

Çizelge 1.1. Elektrik ve manyetik alana maruz kalma limiti

Maruz Kalan	Elektrik Alan Büyüküğü kV/m(rms)	Manyetik Akı Yoğunluğu mT(rms)
Profesyonel		
Gün boyunca	10	0.5
Kısa zaman için	30 ^(a)	5 ^(b)
Kol,bacak	-	25
Halk		
24 saate kadar ^(c)	5	0.1
Birkaç saat ^(d)	10	1
a) maruz kalma süresi $t(\text{saat}) \leq 80/E$, $E = [10,30]\text{kV/m}$		
b) günde maksimum 2 saat çalışma süresi		
c) dinlenme, toplantı alanlarında maruz kalma		
d) maruz kalma olmadığında birkaç dakikalığına limit değeri önemli değildir		

Bu konuda yapılan çalışmalar EM alanlarının birçok hastalıklara yol açtığını göstermektedir. Gelişigüzel kurulan iletim hattı sistemi yerleşim yerlerindeki insanların yüksek şiddetlerde EM alanlarına maruz kalmasına neden olmaktadır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmaları, insan sağlığını risk altında bırakan etmenlerin aradan kaldırılması konusunda yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu sebepten iletim hattı sistemleri için kapsamlı bir elektromanyetik alan hesaplaması yapılmalı, engellenebilirliği görülmeli buna göre iletim hattı tasarlanmalıdır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Son 30 yıldır elektromanyetik alanların insanlar üzerindeki olumsuz etkileri ile ilgili kayda değer bulgulara rastlanmamıştır (Chen et al., 2002). Buna rağmen literatür taraması yapıldığında seneler boyunca bu alan üzere çok sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir.

Deno (1977), yüksek gerilim iletim hattı elektrik alandan kaynaklanan insanlarda indüklenmiş akımı incelemiştir. Çalışmasında insan anatomisine yer verilmiş, insanın değişik pozisyonlarda duruşlarına bağlı olarak maruz kaldığı elektrik alanı hesaplanmıştır.

Massouidi vd., (1984), insan üzerinde EM alan şiddetlerini ve SAR değerlerini ölçmüştür. Çalışmasında insan figürünü küplerle ifade etmiş (blok modeli) ve küplerin üzerindeki değerleri hesaplamıştır. Küplerin birbirlerinden etkilendiği göz önünde bulundurulmuştur. Bu blok modeli çözümünü moment metodu ile çözmüştür (Sadiku, 2000).

Mamyshev vd., (1996), iletim hatlarından kaynaklanan manyetik alan hesaplaması için hattın yatay düz olduğu varsayımının benimsendiği bir anlayışın olduğunu iddia etmiştir. Bu ise manyetik alan ölçümlerde yanılgılara sebep oluyordu. Çalışmada hatların eğilmesi ile ortaya çıkan kleranstın (en alttaki iletken ile yer arasındaki uzaklık) bahsedilmiş, manyetik alan üzerindeki etkisi incelenmiştir. Manyetik alanlar için Biot Savart kanunu kullanılarak formül geliştirmiştir.

Marincu vd., (2005), üç fazlı bir sistemde faz farkını dikkate alarak her hat için anlık meydana getirdiği EM alanlarını ölçmüş ve Matlab simülasyonları ile sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmasında EM alanların insanlar üzerinde olası etkisine yer verilmiştir.

DMD & Associates Ltd. (2005), değişik türlerdeki iletim hattı tasarımları için yapıları, hat kleransları göz önünde bulundurularak iletim hatlarının otobanlardan ne

kadar uzakta bulunması gerektiği araştırılmıştır. Amaç yeterli uzaklığı sağlayarak, meydana gelen EM alanların araçtaki elektronik cihazlara olası girişimini engellemektir. Çalışmada rüzgar sonucu iletkenlerin salınımı düşünülmüş, iletkenin maksimum yer değiştirmesi için elektrik direğinin otobandan ne kadar uzak olması gerektiği hesaplanmıştır. Çok yüksek gerilimlerde yatay uzaklıkla beraber iletkenler arası dikey uzaklığın artırılması ve elektrik ve manyetik alan için sınır değerleri çıkarılmıştır.

Governder (2008), elektrik alanlarını daha verimli inceleme adına gerçek ortamı oluşturmak için laboratuvar kurmuştur. Çalışmasının amacı laboratuvar sonuçlarını gerçek sonuçlarla karşılaştırmak ve simülasyonlarla desteklenebilir olduğunu göstermektedir.

Zemlyaric (2010), iletim hatlarından doğan elektromanyetik alanların farklı direklerde hangi şiddetlerde hissedilebilirliğini incelemiştir. Direk üzerinde bazı noktalarda iletim hatlarına çok yakın olduğundan tamir çalışması yapan işçi için limit değerleri endişe verici şekilde aşılabılır. Zemlyaric çalışmasında farklı direklerde farklı zayıf EM şiddeti bulunan yerleri tespit ederek işçinin güvenle tırmanabileceği uygun yol önermiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. İletim hattı

Yüksek gerilimli iletim hattı elektrik santralinde kontrollü ve planlı olarak elde edilmiş elektrik enerjisinin, santrallerden dağıtım hatlarına iletilmesini sağlayan hatlardır (Anonim, 2010). Yalıtkanlığın büyük kısmının hava tarafından karşılanmasından, büyük miktarda elektrik enerjisinin taşınmasında oldukça ekonomik olmaktadır. Elektrik direkleri genellikle ahşap, beton, alüminyum, nadiren de güçlendirilmiş plastikten yapılmaktadır. İletkenler ise alüminyumdan veya demir, alaşım gibi maddelerle güçlendirilmiş, desteklenmiş alüminyumdan yapılmaktadır. Bazı orta ve alçak gerilim taşınan bölgelerde ise bakır tercih edilebilmektedir. İletim hattı tasarımında en önemli hedef, iletkenle toprak arasında yeterli uzaklığın bulunması ve tehlikeli olacak elektrik akımının yere boşalmasını engellemektir.

Yüksek gerilimli iletim hatlarının kullanılmasına izin verilmesi asma tipi yalıtkanın keşfine dayanmaktadır. 19.cu yüzyılın sonlarına dek telgraf tipi pim yalıtkanlar taşınabilecek gerilimi 69000 Volta sınırlandırmışlardı. Günümüzde ise iletim hatları 765000 Voltun üzerinde, gerekli olduğunda çok daha yükseğini taşıyabilmektedirler.

Yüksek gerilimli iletim hatları elektrik sanayisi üreticilerince sınıflandırılarak standarda bağlanmıştır. Buna göre;

- Düşük gerilim: 1000 Volttan düşük, küçük yerleşim yerleri ve işletmelerinin olduğu yerlerde kullanılır.
- Orta gerilim (dağıtım): 1kV ila 33kV arasında, şehir içi – şehir dışı iletimlerde kullanılır.
- Yüksek gerilim (33 – 115kV destekleyen ve 115kV+ yapabilen): 33kV – 230kV arası gerilimleri alt iletim ve iletim hattı olarak büyük tüketicilere ulaştırır.

- Çok yüksek gerilim (EHV): 230kV üzeri – 800kV'a kadar uzak mesafelerde yüksek gerilim taşır.
- Aşırı yüksek gerilim (UHV): 800kV'daha yüksek gerilim taşır.

3.1.1.1. Yapılar

Hattın türüne göre iletim hattı sistemi değişik şekillerde olabilmektedir. Yapılar basitçe iletkeni desteklemek için bir veya birden fazla kol kirişli veya kol olmadan iletkenin yalıtkandan asılmış olduğu yere sabitlenmiş ahşap direk olabilir. Borumsu demir direklerle genellikle kentsel alanlarda kullanılır. Yüksek gerilim hatları sık-sık kafes-tipi kulelerde veya çelik direklerde taşınır. Uzak, ulaşımı güç bölgelerde alüminyum kuleler helikopter vasıtasıyla konulmaktadır. Beton direkler de bu şekilde kullanılabilir. Güçlendirilmiş plastikten yapılmış direkler de kullanıma uygun olup yüksek maliyetinden dolayı tercih edilememektedir.

Her bir yapı taşıyacağı iletkenin üzerindeki yüklenme göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır. Büyük bir iletim hattı projesi içinde birçok elektrik direği türünün ismi geçebilir. Bunlar, kullanılabilir alanı geniş olan teget direkleri, sonlandırıcı veya nehir ve otoban üzerinden geçebilen direkler olarak sıralanabilir. Herhangi bir hattın tasarım kriterlerine bağlı olarak, yarı-esnek tipi yapılar iletkenlerin ağırlığına bağlı olarak her direğin iki tarafında da dengeyi sağlayabilir. Bu sefer herhangi bir iletken kopma meydana gelirse denge bozulabilir. Bundan dolayı, bazı yerlerde yere daha sağlam basan sert direkler tercih edilmelidir.

Yüksek gerilimli iletim hatları kuvvetini ve ağırlığını dengelemek ve rüzgardan dolayı oluşabilecek salınımları engellemek için her yapı arasında gerdirilir. Bundan dolayı bu hatlara yüksek-gerginlikli hat da denmektedir.

Elektrik direklerini kurmak oldukça pahalıdır. Arazi de sulak veya bataklık gibi bir yer ise iş daha da zorlaşır. Bu gibi durumlarda direk üzerindeki iletkenin doğan kuvvetleri karşılamak için gerdirme halatları kullanılmaktadır.

İletim hatları ve destek unsurları görüntü kirliliğine yol açmaktadırlar. Bazı durumlarda iletim hatları yer altından geçirilmekte, ama bu da fiyatı çok etkilemektedir.

3.1.1.2. Yalıtkanlar

Yalıtkanların görevi iletkeni tutmaya ve aşırı yüklenme ve yıldırım çarpmasına karşı koyabilmektir. Yalıtkanlar 2 türdür. İlki pim tipi, üzerinde iletken taşır. Diğeri ise asma tipidir. Burada ise iletkenler yapının alt tarafından yalıtkana asılmıştır. 33kV'a kadar her 2 tür de kullanılmaktadır. Daha yüksek gerilimlerde ise ancak asma tipi yalıtkanlar tercih edilmektedir. Yalıtkanlar genellikle porselen ve katılaştırılmış camdan yapılmıştır. Camla güçlendirilmiş polimer yalıtkan kullanımı ise artmaktadır. Gerilim seviyesinin artması ve iklim şartlarının değişmesi ile silikon lastikle desteklenmiş polimer yalıtkanlar daha çok kullanılmaktadır. Çin 1100kV destekleyecek polimer yalıtkanları geliştirdi. Hindistan ise 1200kV'luk hat yapmak uğraşında, önce 400kV ile yüklenecek sistem daha sonra 1200kV ile test edilecektir.

Gerilimle doğru orantılı olarak, asma yalıtkanları birkaç disk üniteden oluşur. Disk sayısı hat gerilimine, yıldırıma karşı koyabilme, yüksekliğine ve sis, kirlilik veya tuz serpintisi gibi çevre koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu gibi durumlarda, uzak mesafelerde akım sızıntısını engellemek adına uzun yalıtkanlar kullanılmalıdır. Gerdirilmiş yalıtkanlar mekanik olarak iletkenin ağırlığını taşıyacak, buzlanmadan dolayı oluşacak ekstra yüke ve rüzgara dayanabilecek yapıda olmalıdırlar.

Porselen yalıtkanlar yarı-iletken kaplama ile bitebilir. Bu durumda birkaç milliamper yalıtkindan geçebilir. Bu ise yüzeyi az da olsa ısıtır ve sis ve toz gibi birikintilerini azaltır.

Polimer yalıtkanlar doğası gereği hidrofobik karakteristik gösterirler. Ayrıca, yapılan araştırmalar polimer yalıtkanlarda olması gereken belli bir akım kaybının porselen ve camdan çok daha az olduğunu gösteriyor. Buna ek olarak, polimer yalıtkanların kütlesi porselen ve cama kıyasla yaklaşık %30 - %50 daha hafiftir. Kirlilik ve neme

karşı üstün performansı bu yalıtkanın daha sık kullanılmasını destekleyen başlıca unsurdur.

200kV üzeri yüksek gerilimli hatlar için yalıtkanlar bitiş noktalarında aşamalı şekilde halkalarla desteklenmiş olabilir. Bu yalıtkan etrafında elektrik alan dağılımını düzenleştirir ve gerilim dalgalanması sırasında oluşacak elektrik arklarına daha dayanıklı olur.

3.1.1.3. İletkenler

ACSR olarak bilinen çelik ile desteklenmiş alüminyum iletkenler genellikle orta ve yüksek gerilimli hatlarda veya özel tüketicilere olan iletim hatlarında kullanılır. Alüminyumun tercih edilme sebebi ucuz olmasının yanı sıra bakırdan daha iyi direnç / ağırlık oranının olmasıdır. Bazı düşük gerilimli hatlarda ve topraklamada bakır kullanılmaktadır.

Büyük çaplı iletkenler düşük elektrik dirence sahip olduklarından daha az enerji kaybına sebep olurlar ama küçük çaplı iletkenlerden çok pahalıdırlar. Kelvin kanunu optimizasyonuna¹ göre, bir iletkenin optimum boyutu, iletkende boşa harcanan enerjinin hattın o bölgesindeki iletkenin boyutuna göre yıllık harcama tutarına eşit olduğunda belirlenebilir. Optimizasyon problemi yıllık yükleme, kurulum için değişen maliyetler ve ancak belirli bir boyutta kullanılacak iletken gibi birçok ek faktörle daha da zorlaşmaktadır.

İletkenin birim boyutta homojen ağırlığıyla esnek bir nesne oluşu, direkler arasında geometrik olarak katener² ortaya çıkarmasına sebep oluyor. İletkenin kleransı sıcaklığa göre değişir. Güvenlik için minimum açıklık kesin olarak belirlenmelidir.

¹ Matematiksel fizikçi ve mühendis Lord Kelvin elektrik endüstrisinin geliştiği 19. yüzyılda elektrik sistemleri için optimum tasarımlar geliştirmiştir (Morton, 2010).

² Katener, bir telin eşit yükseklikte iki nokta arasına gerildikten sonra serbest bırakılıp yerçekiminin etkisiyle biraz sarkmasıyla oluşan şekle verilen isimdir (Anonim, 2010)

Çünkü iletkenin sıcaklığı, üzerinden geçen akımın oluşturduğu sıcaklık ile artmaktadır.

Küme iletkenler korona kayıplarını ve duyulabilir sesi engellemek için 220kV üzeri gerilim taşıyan sistemlerde kullanılır. Küme iletkenler iletken olmayan bağlaçlarla birbirine tutturulmuş iletkenlerdir. 220kV hatlar için iki-küme iletken, 380kV için ise genellikle üç veya dört-küme iletkenler kullanılmaktadır. Aradaki bağlaçlar rüzgara ve kısa devre sırasında manyetik kuvvete dayanıklı olmak zorundadırlar.

İletim hatları çoğu zaman topraklama kablosu ile donatılır. Topraklama kablosu genellikle bir ucu toprakta diğer ucu ise en üstteki iletkenen daha yükseğe bağlanmış iletkenlerdir. Böylelikle, yıldırım çarpmasından doğan akım faz iletkenlerine değil topraklansa kablosuyla yere aktarılmaktadır. Çok yüksek gerilimli

iletim hatları iki topraklama kablosuna sahip olabilir. Bu durumda ikisi de tepede veya karşılıklı olarak direğin iki kolunda da olabilirler.

Orta gerilimli iletim hatlarında topraklanmış iletken fazlarının en altında da olabilir. Bu şekilde yüksek araç ve donanımlara karşı güvenlik sağlanmış olur.

İletim hatlarının kaplanmamış olmasına karşın çok az yerde, 1km'den daha kısa mesafelerde izole edilmiş iletkenler kullanılmaktadır. İzole edilmiş kablolar yapılar hiçbir yalıtım desteği olmadan doğrudan kurulabilirler. Doğal olarak hava tarafından yalıtımının var olduğunu saydığımız iletim hatları bu tür izole edilmiş hatlardan daha ucuzdur. Öte yandan izole edilmiş kablolar kaplanmış iletkenlerdir. Bu daha güvenilir ve iletkenin ömrünün uzaması anlamına gelmektedir. Bu tür kablolar ormanlık alanlarda ve dağınık bir sistemde, kesişimin bol olduğu yerlerde kullanılır.

3.1.1.4. Tarihçe

Uzak mesafede ilk elektriksel darbenin iletimi 14 Temmuz 1729'da fizikçi Stephen Gray tarafından gözlemlenmiştir (Binnie, 2001). Bu metotla elektriğin iletilebildiği

gösterilmiştir. Bu gösteride ipek ipliklerle gerdirilmiş nemli kordon kullanılmıştır (o dönemler metalik iletkenlerin düşük dirençleri önemsenmemektedir).

Ancak iletim hatlarının günlük hayatta pratik olarak kullanımı ilk kez telgrafla başlamıştır. 1837'de test için ticari telgraf sistemi 20km mesafede çalıştırılmıştır. Elektrik iletimi 1882'de Münih ile Miesbah arasında yüksek gerilim taşınmasıyla hayata geçirilmiştir. 1891'de Lauffen ile Frankfurt arasında ilk 3 fazlı alternatif akımlı iletim hattı yapıldı (Blanco et al., 2010).

1912'de ilk 110kV iletim hattından sonra 1923'te ilk 220kV iletim hattı sistemi kuruldu. 1920'de RWE AG bu hatlarına kurulumuna başladı ve 1926ya gelindiğinde Ren nehri üzerinden Voerde direkleri denilen 128m yüksekliğinde bir sistemi tamamladı (Blanco et al., 2010).

1957'de ilk 380kV'luk hat yapıldı. Aynı yıl İtalyada Messinadaki dar boğazda Elbi geçişi 1 adlı direk kuruldu. Bu model adı Elbi geçişi 2 olup, 1970lerin ikinci yarısından itibaren dünyanın kurulacak olan en yüksek direği olma özelliğine sahip olacaktı. 1967'den itibaren Rusya, ABD ve Kanadada 765kV'luk sistemler kuruldu. Bunu Rusya 1982'de 1200kV'luk 3 fazlı sistemi tamamladı. 1999'da Japonyada 2 devreli 1000kV'luk Kita-Iwaki sistemi devreye girdi. 2003te günümüzün en yüksek iletim hattı adını taşıyan Çinin Yangtze nehri üzerinde kurulan yüksek gerilim iletim hattıdır (Blanco et al., 2010).

3.1.1.5. İletim hattı tasarımı

İletim hattını kurmak için iletken, topraklama kablosu, yalıtkan, elektrik direği, dalga engelleyicisi ve kenetleyici, ara halkası, titreşim perdelemesi, bağlantı kurucu, vs gibi diğer aygıtlar gerekmektedir.

Bir hattı kurmadan önce onu çevre şartlarına ve ihtiyaç doğrultusunda tasarlamak lazım. Bunun için bir düzine işlemi öngörmek, hesaplamak zaruridir. Bu doğrultuda, hat tasarımı için gerekli olacak veriler ve iklim şartları ile ilgili verilerin toplanması

gereklidir. Bu yüzden tasarlanan her hattın bir güvenlik derecesi olmaktadır. Bu sistemin kaç yıl dayanacağına öngörülmesi olarak adlandırılabilir. Güvenlik derecesi yüksek olması, iletim hattının o kadar dayanıklı, dolayısı ile aşırı pahalı hale gelmesi demektir. Çizelge 3.1’de değişik güvenlik derecelerine sahip iletim hatlarının maksimum hizmet ömrü verilmiştir.

Çizelge 3.1. İletim hattının güvenlik derecesine bağlı dayanıklılık süresi

Güvenlik Derecesi	1	2	3
İklim şartlarında dayanıklılık süresi (yıl)	50	150	300

Bu vesile ile iklim şartlarının hat elemanlarına etkisi incelenmelidir. Elemanların zamanla dayanma ve davranış şekli belirlenmelidir. Hattın konumu ile bağlı olarak, hattın inşa veya tamir edilirken güvenlik önlemlerinin alınabilmesi için gerekli ortamın oluşturabilmesi gereklidir. Yapım aşamasında önemli olabilecek düzeltme ve geliştirmeler için, eleman sayısına göre, sertlik faktörleri ve koordinasyonu, kalite kontrol ve eleman karakteristikleri ve davranışlarının ölçülmesi gerekmektedir. Bütün bu önlemler ve hesaplamalar göz önünde bulundurularak ihtiyaca göre daha kaliteli bir tasarımın gerçekleşmesi mümkündür.

İletim hatlarında standart olarak genellikle 66, 110, 132, 220 ve 400kV gerilim taşınmaktadır. 220kV’a kadarki gerilimlerde $\pm 10\%$ ’luk, 400kV’da ise $\pm 5\%$ ’lik tolerans sağlanmaktadır. Ekonomik gerilim seçimi için, hattın ne kadar güç iletileceğini ve uzunluğunu, gerilimin zamanla değişiminin, güç kaybının, işlemlerdeki maliyetin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ekonomik gerilim için uygulanan formül aşağıdaki gibidir.

$$E = 5.5 \sqrt{\frac{L}{1.6} + \frac{KVA}{150}} \quad (3.1)$$

Burada, E – iletim gerilimi (kV), L – iletim hattı uzunluğu (km), KVA ise iletilecek güçtür (kW). Gerekli olacak güç miktarına bağlı olarak bazı hesaplanmış, gerekli gerilim değerleri Çizelge 3.2’deki gibidir.

Çizelge 3.2. Gerekli güç aktarımına göre hesaplanan yeterli gerilim seviyesi

Gerekli güç aktarımı(MW)	Hat Uzunluğu	Ekonomik gerilim seviyesi
3500	500	765
500	400	400
120	150	220
80	50	132

3.1.1.6. Elektrik direği türleri

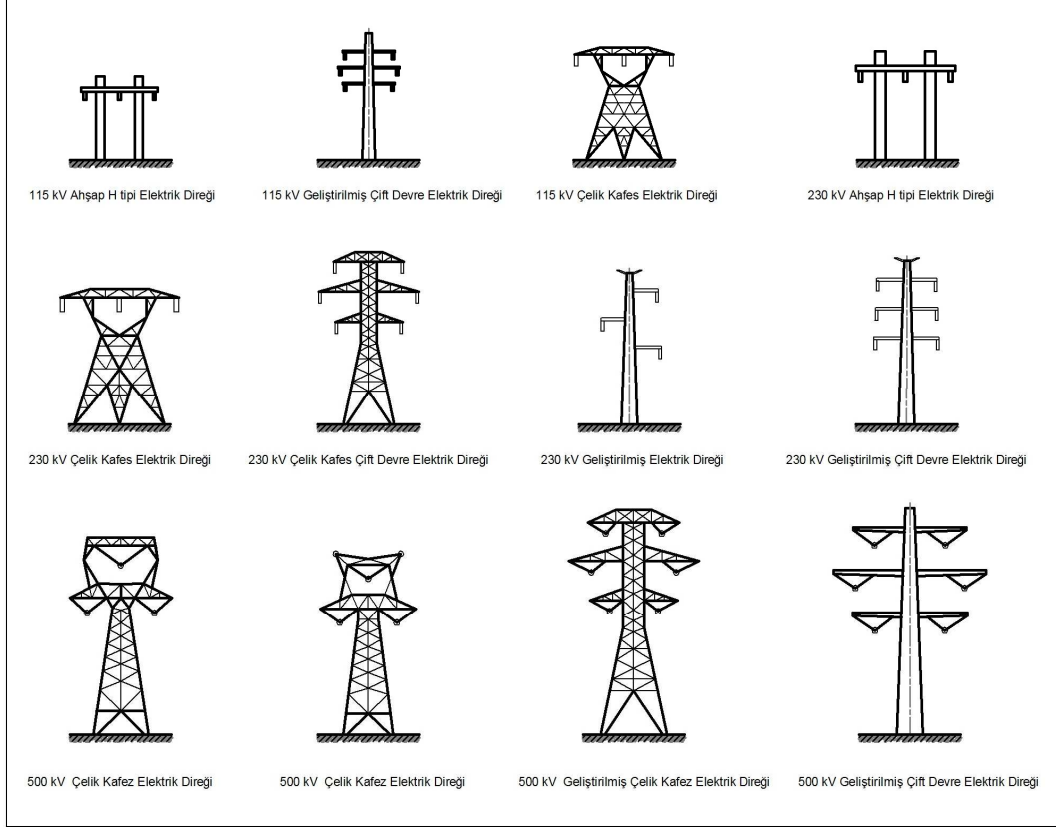
Elektrik direği seçimi arazi ve çevre koşullarına, maliyete, talebe ve başka nedenlerden dolayı değişiklik göstermektedir. Bazı elektrik direği türleri (Şekil 3.1) aşağıdaki gibidir (Singh, 2008).

- A tipi direk (Eğik asma direk)
(Düz ve 2 dereceye kadar eğimli iletimlerde kullanılır.)
- B tipi direk (Gerdirilmiş küçük açılı direk)
(2 dereceden 15 dereceye kadar eğimli iletimlerde kullanılır.)
- C tipi direk (Gerdirilmiş orta açılı direk)
(15 dereceden 30 dereceye kadar eğimli iletimlerde kullanılır.)
- D tipi direk (gerdirilmiş büyük açılı direk)
(30 dereceden 60 dereceye kadar eğimli iletimlerde kullanılır.)
- E tipi direk (gerdirilmiş kör uç direk)
(Hat başlangıcı ve bitimi terminallerinde kullanılır.)

Özel direkler.

- Askı direk (1000m'ye kadar kullanım alanı)
(Nehir, dağ gibi zor arazi koşullarını aşmak için kullanılır.)

- Yer değiştiren direk.
(Gerekli olduğu takdirde kolaylıkla yerinin değiştirilebilmesine olanak sağlayan direktir.)



Şekil 3.1. İletim hattı yapıları

3.1.1.7. Direk yapısı seçimi

Direk yapısı belirlenirken onun uygun direk olması için aşağıdaki maddeleri gözden geçirmekte fayda vardır.

- Tek devre / çift devre direk
- Yalıtım montajının, kurulumunun uzunluğu
- Toprak ile iletken ve iletken ile direk arasındaki olması gereken minimum açıklık
- Topraklama kablosunun en dıştaki iletkene bağlı konumu

- İletkenlerin dinamik davranışları ve hattın yıldırıma karşı korunması gerektiği düşünülerek hatlara arası minimum açıklık bilinmelidir.
- En alttaki iletken ile toprak arasındaki minimum açıklık da göz önünde bulundurulmalıdır.

Direk yapı tasarımında direğin yüksekliği, taban genişliği, çapraz kol uzunluğu gibi parametreler denge için önemlidir.

Direğin uzunluğu aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

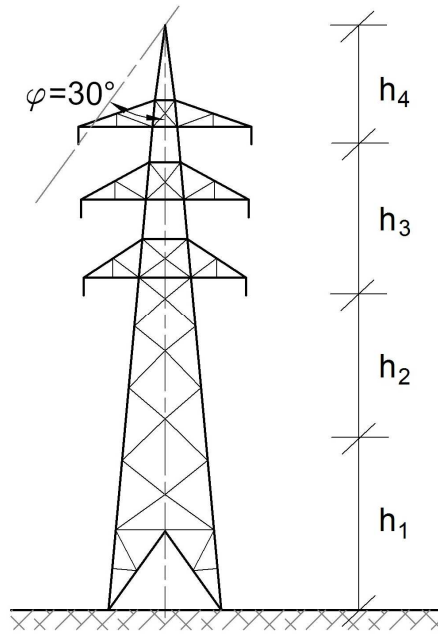
$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \text{ (Şekil 3.2)}$$

h_1 – izin verilen toprak ile en alttaki iletken arasındaki açıklık.

h_2 – maksimum klerans.

h_3 – iletkenlerin dikey olarak diziliminden doğan yükseklik.

h_4 – en üstteki iletken ile topraklama hattı arasındaki gereken açıklık.



Şekil 3.2. Tipik elektrik direği

Taban genişliğinin belirlenmesi:

Taban genişliği köşe bacağın ağırlık merkezi ile ona komşu olan diğer bacağın ağırlık merkezi arasındaki uzaklıktır.

Direğin minimum maliyete mal olması için her hangi bir taban genişliği aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$B = 0.42\sqrt{M} \quad \text{veya} \quad 0.013\sqrt{m} \quad (3.2)$$

Burada,

B – taban genişliği,

M – direğin toprağa göre devrilebilme momenti ($ton * m$)

m – direğin toprağa göre devrilebilme momenti ($kg * m$)

Taban genişliği ile direğin toplam yüksekliği arasındaki oran bire beş ila bire on arasında değişmektedir.

Toprak üzerinde iletkene kadar olan açıklık gerilim değerine bağlı olarak ayarlanmalıdır.

$$CL = 5.182 + 0.305 * K \quad (3.3)$$

Burada, $K = \left(\frac{V - 33}{33} \right)$, V iletkenin taşıdığı gerilimdir. Bu durumda kabul edilen minimum açıklıklar Çizelge 3.3’te verilmiştir (Singh, 2008).

Çizelge 3.3. Değişik gerilim hatları için minimum klerans değerleri

Seviye	Gerilim seviyesi	Klerans(m)
1	≤ 33 kV	5.20
2	66 kV	5.49
3	132 kV	6.10
4	220 kV	7.01
5	400 kV	8.84

Yüksek gerilim hatları birbirlerinden etkilenebildikleri gibi telekomünikasyon hatlarından etkilenebilirler. Bu yüzden bu hatlar arasında da belirlenmesi gereken minimum açıklıklar olmalıdır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. İletim hatları ile telekomünikasyon hatları kesiştiklerinde aralarındaki olması gereken açıklıklar

Seviye	Gerilim seviyesi	Minimum Açıklık(mm)
1	≤33 kV	2440
2	66 kV	2440
3	132 kV	2740
4	220 kV	3050
5	400 kV	4880

Çizelge 3.5. İletim hatlarının kesiştiklerinde aralarındaki olması gereken açıklıklar

Gerilim seviyesi	Minimum Açıklık(m)
≤66 kV	2.4
132 kV	2.75
220 kV	4.55
400 kV	6.00

İletkenler arasındaki açıklıkların (Çizelge 3.5) hesaplanması için birçok denklem kullanılmaktadır. Örnek olarak Mecomb denklemi aşağıdaki gibidir.

$$Klerans(cm) = 0.3048 * V + 4.010 \frac{D}{W} \sqrt{S} \quad (3.4)$$

Burada, V – sistemin gerilimi(kV)

D – iletkenin çapı(cm)

S – klerans (cm)

W – iletkenin ağırlığı(kg/m)

Bunun gibi açıklıkları bulmada VDE, Still, NESC, Swedish ve french denklemleri de kullanılabilir (Kumar and Kumar, 2006).

3.1.1.8. İletken türleri

Hafif ve iletkenlik veriminin kabul edilebilir olmasından dolayı yüksek gerilim hatlarında genellikle alüminyum tercih edilmektedir. Bazen kendi ağırlığını taşıyamadığından alüminyumu destekleyen başka malzeme veya karışımlar kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bazı iletken türleri aşağıdaki gibidir.

- ACSR iletkeni (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
- AAC (All Aluminium Conductor)
- AAAC (All Alloy Aluminium Conductor)

ACSR'ye örnek olarak Şekil 3.3'deki kablo gösterilebilir. Bu Denizli Afyon arasında 180km mesafe için yaklaşık 380kV gerilim taşıyan, günümüzün en yüksek gerilim taşıyabilen kablolarından biridir (Çark'dan, 2010). Şekil 3.4'den görüldüğü gibi alüminyum kaplama gibi görünen kablonun içine demir kablo yerleştirilmiştir. Burada demir kablonun görevi, iki direk arasında uzun genişlik bulunduğu kablonun kendi ağırlığından dolayı kırılma ihtimalinin ortadan kaldırılmasıdır. Burada alüminyumun daha fazla kullanılmış olması, gerçekte bir iletken olarak alüminyumun tercih edilme nedeninden ileri gelmektedir. Neden alüminyumun seçildiği ileriki bölümlerde malzemelerin özelliklerini tanıtırken daha detaylı anlatılacaktır.



Şekil 3.3. Denizli – Afyon arasında 380kV gerilim taşıyan kablo örneği



Şekil 3.4. Denizli – Afyon arasında 380kV gerilim taşıyan kablonun yapısı

3.1.1.9. İletken boyutunun belirlenmesi

İletken boyutları belirlenirken 2 neden göz önünde bulundurulmaktadır. Bunlar, Mekanik ve Elektrik ihtiyaçları sebebiyle belirlenmektedir.

Bir mekanik gereksinimlerde

- Gerilme dayanıklılığı (hattın gergin oluşuna karşın)
- Eğilme dayanıklılığı (salınımlara karşın)

önemlidir. Salınımı kontrol altına almak için salınım engelleyici tampon kullanılması gerekmektedir.

Bir elektriksel gereksinimlerde

- Devamlı akım oranı
- Kısa süreli akım taşıma oranı
- Gerilim düşmesi
- Güç kaybı

- Coronayı engellemek için minimum çap
- Hattın uzunluğu
- Doldurma akımı³

3.1.1.10. İletken seçiminde başka önem verilmesi gerekenler

- Alüminyum/Çelik oranı (uzun yayılım⁴ ve ekonomik nedenler için az klerans)
- Nehir atlama (yayılım $\geq 1000m$ ise bu durumda AAAC iletkeni kullanılmalıdır. Titreşime ve kıvrılmaya elverişlidir.)
- Ağırlık/Çap (ağırlık/çap oranı küçük olunca iletkenin salınımı fazla olur, bu nedenle burulma yükünü artıran uzun kol gerektiriyor)

3.1.1.11. Yalıtkan türleri

Yalıtkanlar iletkeni desteklemek ve yapı ve toprak arasındaki kleransları sağlamak için kullanılır. Yalıtkan malzemesi olarak genellikle aşağıdakiler kullanılmaktadır.

- Yüksek kalite elektrik porseleni
- Sağlamlştırılmış cam
- Fiber cam

Yalıtkan malzemenin seçimi onun kolay elde edilebilirliğine, fiyatına ve tamir edilebilir olmasına bağlıdır. Sistemdeki gerilme ve mekanik gerilmelere göre çeşitli türlerde yalıtkanlar kullanılmaktadır. En çok kullanılan türler ve kullanım alanları aşağıdaki gibidir (Junid, 2008).

³ Doldurma akımı - Topraklanmamış bir fazın hatayla topraklanması halinde akımın toprak bağlantısına akmasıdır.

⁴ Yayılım - Hattın iki direk arasında uzanması, asılması anlamına gelmektedir.

- Disk tipi yalıtkanlar.

Yalıtma derecesine göre dizi şeklinde kenetlenmiş yalıtkan disklerdir. Her disk 30-40pF'lık kapasitansı ile 10-12kV için tasarlanmıştır. Diskler birbirine başlıklar ve pimler ile bağlanmıştır. Kenetleme mekanizması bilye yuvası ve clevis-dili tipindedir. Başlık pimden porselen veya cam ile yalıtılmıştır. Porselen yapıştırıcı özellikte solüsyon ile başlık ve pim yapıştırılmıştır.

- Uzun Çubuk tipi yalıtkanlar.

Disk yalıtkanlardaki gibi bilye yuvası ve clevis-dili tipinde kenetlenebilir ve yüksek yalıtımlar için kullanılır. Uzun olması şiddetli rüzgar olduğunda hat gallopunu⁵ azaltmaya yönelik fazlar arası yalıtım görevi yapmasına olanak sağlar. Gerek disk tipi, gerekse de uzun çubuk tipi yalıtkanlar genellikle gerdirme veya asma yalıtım uygulamalarında kullanılmaktadır.

- Pim tipi yalıtkanlar.

Pim tipi yalıtkanlar direğin kollarına cıvatalar ile perçinlenir. Pim tipi yalıtkanlar gergi tipi yalıtkan değil, bağlama hattı yalıtkanı gibi fonksiyona sahiptirler.

- Kelepçe tipi yalıtkanlar.

Bu tarz yalıtkanlar genellikle hattın yön değiştirmesi gibi durumlarda hat gerilmesini desteklemek için kullanılır.

- Post tipi yalıtkanlar.

Bunlar pim tipi yalıtkanlardan daha kalın yalıtkan ve daha fazla disklerden oluşur ve kısaç veya pim metoduyla kurulabilir. Post tipi yalıtkanlar pim tipi veya germe tipi, nadiren de asma tipi yalıtkan olarak kullanılmaktadır. Post tipi yalıtkanlar hat ağırlığını kaldırabilecek destek gibi davranabildiğinden, bu yalıtkanlar Maksimum Destek Yüğü Tasarımı derecesine sahiptir.

⁵ İletken gallopu – rüzgar sayesinde yüksek gerilim, düşük frekans iletim hatlarının osilasyonudur (Moore,1997).

- Hewlett tipi yalıtkanlar.

Disk tipine benzer, farkı formatta bir yalıtandır. Ancak daha fazla mekanik gerilmeye zorlanabilir. Çünkü yapısındaki birleşmeler yapışkan solüsyon ile değil, yalıtılmış çelik çubuk kullanılmıştır. Öte yandan, Hewlett tipi yalıtkanlar iç çelikçubuğa sahip olduğundan yüksek elektrik stresine bulundurur.

- Pot tipi yalıtkanlar.

Genellikle pim tipi kurulmuş ve telefon hatları için kullanılır. Telefon hatları için farklı çeşit tasarımları bulunsa da birçoğu temelde pim tipi yalıtıkana benzemektedir.

3.1.1.12. Topraklama kablosu

Topraklama kablosu faz iletkeninin üzerinde hat boyunca uzanmakta ve her direkte topraklanmıştır. Bu, iletken hattının doğrudan şoklara karşı ekranlamasını sağlar. Yıldırım etkisi görüldüğünde yalıtkanlar arasındaki gerilim yüklemesini düşürür.

Topraklama kablosunun ekranlama açısı⁶:

- 220 kV'a kadar 25°-30°
- 400kV ve yukarısı için 20°

dir. Topraklama kablosu çok kısa süreli 100kA kadar yüksek bir akıma sahip yıldırıma aşırı ısınmaya yol açmayacak şekilde dayanıklı olması gerekmektedir. Bu kısa süre 200µ-san, güvenli ısı limiti ise 300°C'dir.

Topraklama kablosu ile tepe iletkeni arasında olması gereken en küçük açıklık, IS 5613 standartlarına bağlı kalarak Çizelge 3.6'daki gibidir (Singh, 2008).

⁶ Ekranlama açısı – topraklama kablosunun dikey izdüşümünün topraklama kablosunu faz kablosuna bağlayan sanal hat ile yaptığı açıdır (Rako and Uman,2007).

Çizelge 3.6. Topraklama kablosu ile üst iletken arasındaki minimum açıklık

Gerilim seviyesi	Minimum Açıklık(m)
$\leq 66\text{kV}$	2.3
110kV	4.5
132kV	6.1
220kV	8.5
400kV	9.0

3.1.1.13. Elektrik direğinin topraklanması

Topraklama kablosunun gerilimini ve yıldırım düşmesi sırasında yalıtkanlardaki yüklenmenin azaltılması ve güvenlik için kullanılmaktadır.

Direk bacağına direnci 10Ω olmalı ve hiçbir şekilde 20Ω 'un üstüne çıkmamalıdır. Toprak direnci zeminin direncine bağlı kalmakta, genellikle $100\Omega\text{-m}$ civarındadır.

Direk topraklama yöntemleri:

- Gömülü iletken

Bir veya birden fazla iletken bir taraftan direğin ayaklarına, öte yandan direğin temelini altında bağlanır. Zemin direncinin az olduğu yerlerde kullanılır.

- Dengeleyen kablo

50 m uzunluğundaki kablonun yerin 0.5 m altında yatay olarak uzatılmasıyla olur. Direğin ayağına bağlıdır. Toprak direncinin çok yüksek ve zemin iletkenliğinin üst katmanlara sarkması durumlarında tercih edilir.

- Çubuk boru

3-4 m uzunluğunda bir borunun direğin yakınından toprağa verilmesidir. Direğin ayağına uygun kablo ile bağlanır. Toprak iletkenliğinin derinlikle beraber arttığı zaman tercih edilen bir yöntemdir.

- Toprak çukuru kullanılarak

3-4 m uzunluğunda bir borunun çukura geçirilmesidir. Direğin ayağına uygun kablo ile bağlanır. Direğin yanında yüksek dirençler olduğu zamanlar kullanılır.

3.1.2. Elektromanyetik alan kuramı

Elektromanyetik (EM) dalgaların yaşantımızdaki rolü artık tartışılmayacak boyutlardadır. Haberleşme sistemlerinden, uzaktan algılamaya, tıbbi tanı ve tedavi cihazlarından çevre, eğitim, pazarlama, savunma sistemlerine, hemen her yerde EM dalgalardan yararlanılmakta. EM dalgalar bir yerden bir başka yere ses, görüntü gibi haber işaretlerini taşımada kullanıldıkları gibi, karşımıza istenmeyen girişim / karışım işaretlerini taşıyan EMC problemleri olarak da çıkabilmekte. İster faydalı haber işareti olsun isterse istenmeyen işaret karşılaşılan problemleri alt etmenin temel kuralı EM dalga yayılımının iyi anlaşılmasıdır.

Birkaç bin yıldır bilinmelerine ve birçok bilim insanının katkılarıyla belirli bir yere gelmesine karşın elektrik ve manyetizma konularının gerçekçi ve halen kullanılan modeli 1831 – 1879 yılları arasında yaşamış olan James Clerk Maxwell tarafından kurulmuştur. Maxwell denklemleri adı verilen dört denklem ile EM alan teorisi yerli yerine oturmuş ve her türlü alan ve devre problemi çözümlerine gelmiştir. (Balanis, 1989).

$$\nabla \times E = -\mu_i - \frac{\partial B}{\partial t} = -\mu_i - \mu_d = -\mu_t \quad (3.5)$$

$$\nabla \times H = j_i + j_c + \frac{\partial D}{\partial t} = j_{ic} + \frac{\partial D}{\partial t} = j_{ic} + j_d = j_t \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot D = q_{ev} \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot B = q_{mv} \quad (3.8)$$

burada,

$$j_{ic} = j_i + j_c \quad (3.9)$$

$$j_d = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\mu_d = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.11)$$

dir. Tanımlamalar ve birimler ise aşağıdaki gibidir (Balanis, 1989).

E = elektrik alan şiddeti (volt / m).

H = manyetik alan şiddeti (amper / m)

D = elektrik akı yoğunluğu (coulomb / m²)

B = manyetik akı yoğunluğu (weber / m²)

j_i = tesirli (kaynak) elektrik akım yoğunluğu (amper / m²)

j_c = elektrik akım yoğunluğu iletkenliği (amper / m²)

j_d = elektrik akım yoğunluğu yer değiştirmesi (amper / m²)

μ_i = tesirli (kaynak) manyetik akım yoğunluğu (volt / m²)

μ_d = manyetik akım yoğunluğu yer değiştirmesi (volt / m²)

q_{ev} = elektrik yük yoğunluğu (coulomb / m³)

q_{mv} = manyetik yük yoğunluğu (weber / m³)

Birçok kitapta veya yayında yer verilmemesine rağmen bu kaynaktaki formüllerde tesirli (kaynak) manyetik akım yoğunluğu μ_i ve manyetik yük yoğunluğu q_{mv} genelleştirilmiş akım kavramı çerçevesinde gösterilmiştir. Bu yaklaşımın nedeni manyetik akım yoğunluğunun ve manyetik yük yoğunluğunun fiziksel olarak gözlemlenememesidir (Balanis, 1989).

Alan kuramındaki elektrik alan, manyetik alan, yüzey akım yoğunluğu vektör boyutundadır. Yani hem şiddetleri hem de yönleri vardır. Örneğin bir elektrik alandan söz etmek gerektiğinde hem şiddeti hem de yönü belirtilmelidir (Karacaörenli, 2007).

İlk iki, (3.5) ve (3.6) denklemlerine bakıldığında zamanla değişen manyetik alanın zamanda ve uzayda değişen elektrik alanı oluşmasına ve sıfır olmayan $\partial E/\partial t$

bağıntısının uzayda zamanla değişen manyetik alanının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum elektromanyetik dalga yayılımının ana habercisidir (Hoole and Hoole).

3.1.2.1. Elektrik alan

Yüklü bir parçacığın etrafında oluşturduğu alan vektörüdür. Elektrik alan şiddeti birim yüke etki eden kuvvet olarak tanımlanır. Bu kuvvetin yönü artı yükten eksi yüke doğrudur. Elektrik alanlar yönlü oklarla gösterilir. Başka bir deyişle elektrik alan çizgileri yüksek potansiyelden düşük potansiyele doğrudur.

3.1.2.2. Manyetik alan

Bir noktada v hızıyla hareket eden bir q yükünde (F) kuvvetini oluşturan alan vektörüdür $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$. Manyetik alan çizgileri kendileri üzerinde kapanan ve akımı çevreleyen çizgilerdir.

3.1.2.3. Elektromanyetik büyüklükler ve birimler

Elektrik alanların şiddeti metre başına düşen gerilim SI birim sistemiyle (Volt/metre) ile ölçülürken, manyetik alanın ölçü birimi SI birim sistemiyle Tesla'dır. 1 Tesla = 1 Weber/m². Yaygın olarak kullanılan bir başka birim ise CGS sistemiyle Gauss'tur. Elektrik ve manyetik alanların özellikleri farklıdır. Dolayısı ile bu alanların canlıların biyolojik yapıları üzerindeki etkileri değişik olur. Bu alanların insanları nasıl etkilediği henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Fakat yapılan çalışmalar; manyetik alanların, elektrik alanlara göre daha etkili olduğunu düşündürmektedir. Öte yandan manyetik alanlar, özel olarak üretilmiş kimi maddeler dışında, hiçbir engel tanımaz. Elektrik alanlar insan bedenini yüzeyinde zayıf akım oluşturur. Manyetik alanlar ise bedenin içine girerek bu tür zayıf akımların iç organlarda bile oluşmasına yol açarlar. Gerçekte değişken manyetik alanlar, çevrelerinde bulunan tüm iletkenlerde (insan bedeni de bir iletken olarak düşünülebilir) akım oluştururlar.

Bazı elektromanyetik değişkenler araştırma aşamasında elektrik alan ve manyetik alan şiddetleri ölçümlerinde kullanılacaktır. Bu değişkenlerin anlamları ve birimleri aşağıdaki gibidir (Karacaörenli, 2007).

- İletkenlik, σ iletken akım yoğunluğunun elektrik alan şiddetine oranıdır ve metre başına *Siemens* birimi ile ölçülür ($\sigma = J / E[S / m]$).
- Dielektrik katsayısı, ϵ elektrik akı yoğunluğunun elektrik alana bölünmesiyle tanımlıdır ($\epsilon = D / E[F / m]$).
- Manyetik geçirgenlik, μ manyetik akı yoğunluğunun manyetik alana oranı olarak tanımlanır ($\mu = B / H[Henry / m]$).

3.2. Yöntem

3.2.1. Ekranlama

Ekranlama; kart, devre ya da cihaz düzeyinde iki ortamı birbirinden elektromanyetik anlamda izole etmek diye tanımlanır. Ekranlamanın etkili olması ekranlanacak kaynağın cinsine bağlıdır. EMC problemlerinde iki tip girişim kaynağı söz konusudur: elektrik dipolü gibi davranan kaynaklar, manyetik dipolü gibi davranan kaynaklar. Elektrik dipol yakınında güçlü elektrik alan, manyetik dipol ise yakınında güçlü manyetik alan oluşur. Uzak alanda iki kaynağın etkileri açısından bir fark yoktur.

- Elektrik dipolü gibi davranan girişim kaynağı yakınında elektriksel ekranlama
- Manyetik dipolü gibi davranan girişim kaynağı yakınında manyetik ekranlama gereklidir.

Elektriksel ekranlama için mükemmel iletken duvarlar kullanılırken, manyetik ekranlama ferro-manyetik malzemelerden oluşan filtrelerle sağlanır. Alüminyum

folyodan oluşan ince metal perdeler bile bazen yeterli elektriksel ekranlama sağlayabilir. Pabrikte şu noktalar önemlidir:

- Ekranlama elektrik alanın düşük frekanslarda yansıtılması yüksek frekanslarda soğrulması ile gerçekleşir.
- Ekranlama manyetik alanın düşük frekanslarda soğrulması ile gerçekleşir.
- Yüksek iletkenlik, yansıma ve soğrulmayı pozitif yönde etkiler.
- Yüksek manyetik geçirgenlik yüksek soğrulamaya neden olurken, düşük yansıma oluşturur.
- Çok düşük frekanslı manyetik kaynakların ekranlanacağı hallerde yüksek manyetik geçirgenlikli malzemeler kullanılır.
- Ekran kalınlığı arttıkça soğrulma artar.
- Manyetik alan için kalın ekranlara ihtiyaç duyulurken elektrik alan için ince yapılar (folyo kalınlığında) kullanılabilir.
- Kaynak ile ekran arasındaki uzaklık yansıma özelliklerini değiştirir.
- Elektrik kaynaklar ekrana yakın, manyetik kaynaklar ekrana uzak yerleştirilmelidir.

Uygulamaya yönelik özel notlar:

- Ekranlama yapısını tasarlamadan önce, elektrik, manyetik ya da her ikisine de ihtiyaç duyulduğunun belirlenmesi gereklidir (çoğu durumda elektriksel ekranlama gereksinimleri karşılamak için yeterli olmaktadır).
- Manyetik ekranlama frekansın artması ile yükselir.
- Elektriksel ekranlama ise belli bir frekansta minimum gösterir.

Sonuç olarak bir ekranlamanın EMC performansı, kullanılan malzemenin özelliklerine, çalışma frekansına ve dikkate alınan kaynaklara bağlıdır. Ancak, pratikte

- Girişim kaynağına göre ekran konumu
- Farklı ekran parçalarının arasındaki bağlantılar

- Ekran üzerindeki delikler ve boşluklar

ve benzeri başka etkenler de baskın rol oynar.

3.2.1.1. Ekranlama etkinliği

Ekranlamanın tipik bir ölçüsü olarak ekranlama etkinliği (SE) kullanılmaktadır. SE kaynak ile kurban arasında ekran yok iken ölçülen (ya da hesaplanan) elektrik alan şiddetinin ekran varken oluşan alan şiddetine desibel (dB) olarak oranı şeklinde tanımlanmaktadır (Sevgi, 2004). Yüksek SE iyi ekranlama etkinliği demek. Negatif SE ise çınlama (rezonans) yani ekranlama bir yana işaretin kuvvetlenmesi anlamına gelmektedir.

Ekranlama problemlerini tamamen ortadan kaldırmak çok güçtür. Buna neden olarak, ekranlama duvarındaki süreksizlikler, bağlantı noktaları, havalandırma boşlukları, gözlemlenebilir açıklıklar ve anahtarlar olarak sıralanabilir. Bu bölümde bu tür problemler aşılmaya çalışılacaktır.

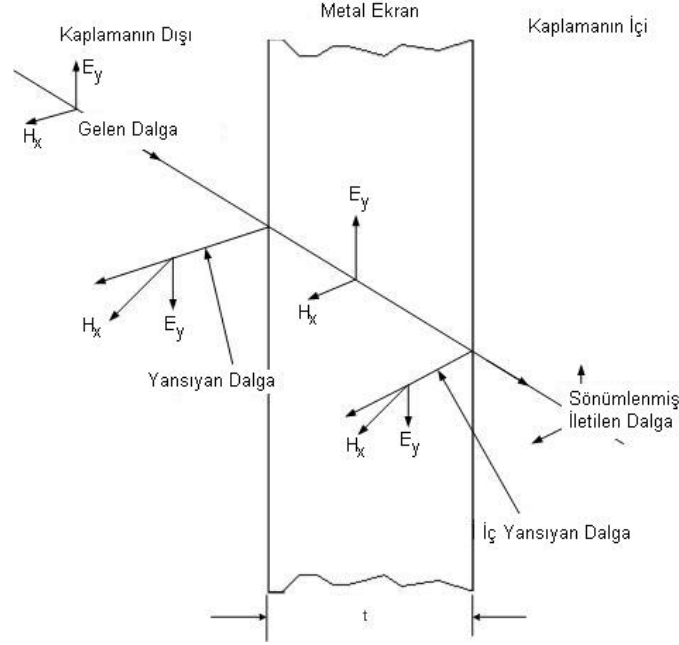
Görünüşe göre, ekranlama, emitör ve alıcı arasına konulan metalik bariyerdir. Elektromanyetik dalgalar metalik bariyerlerden geçtiklerinde metalin öz empedansı

$$Z_m = \left(\frac{\omega \mu_0}{2\sigma} \right)^{1/2} (1 - j) \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilir. Bu empedansın değeri optik bölge altındaki frekanslarda, iyi iletkenler için oldukça düşüktür.

İki ana mekanizma, yansıma ve emilme kaybı ekranlamanın en önemli kısmıdır. Bu nedenle, ekranlama teorisi metallerin içinden iletme ve yüzeyinden yansımaya dayanır (Şekil 3.5). Emitörden gelen elektromanyetik dalgalar kısmi olarak düşük empedanslı ekranlama yüzeyinden yansır. Bunun sebebi ekran ile yüzey arasındaki empedans uyuşmamasıdır. Bir kısım dalganın ekran tarafından soğurulmasından

geriye kalan ise iletilmektedir. Bununla birlikte, soğurulma düşük olduğunda, ekranlama materyalleri yüzeylerinde birçok yansıma gözlemlenmektedir.



Şekil 3.5. Düzlem dalga için ekranlama mekanizmasının şeması

Genel olarak katı iletkene bariyerin ekranlama etkinliği $SE(dB)$, yansıma kaybı $\alpha_R(dB)$, soğurulma kaybı $\alpha_A(dB)$, ve iç yansıma kaybının $\alpha_{IR}(dB)$ toplamı olarak ifade edilebilir (Kodali, 2001).

$$SE(dB) = \alpha_R(dB) + \alpha_A(dB) + \alpha_{IR}(dB) \quad (3.13)$$

3.2.1.2. Ekranlama teorisi ve ekranlama etkinliğinin hesaplanması

Ekranlama etkinliğini ölçerken teorik ve pratik arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Pratik ekranlama frekans, kaynağın ekranlamaya olan uzaklığı, alanların polarizasyonu, ekrandaki süreksizlikler vs gibi faktörlere dayanmaktadır. Radyasyon yayan kaynağa yakın bölgeler yüksek şiddetli alanların enine ve boyuna bileşenlerine maruz kalmaktadır. Bu alanlar enerjilerinin büyük kısmının \vec{E} ve \vec{H} bileşenlerinde olmasından elektrik ve manyetik alanlardır. Elektrik ve manyetik alan

bileşenlerinin birim uzaklıklarının teğetsel bileşeni oranıyla tanımlanmış dalga empedansı ile ilişkilidir.

$$Z = \frac{|\vec{E}_t|}{|\vec{H}_t|} \quad (3.14)$$

Bu sebepten, elektrik alanın yoğunluğu daha baskın ise dalga empedansı yüksek, manyetik alanın baskın olduğu durumlarda ise dalga empedansı düşük değerlere sahiptir.

Kaynaktan yeteri kadar uzak bölgede $r > D^2 / 2\lambda$ ($D \geq \lambda_0 / 2$) veya $r > \lambda_0 / 2\pi$ ($D \ll \lambda_0$) elektromanyetik dalga düzlem dalgaya dönüşmekte ve dalga empedansı aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$Z_w = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.15)$$

Burada D kaynağın büyüklüğüdür. Optik frekans sınırı altında serbest uzayda aşağıdaki gibidir ($\sigma \ll \omega\epsilon_0$):

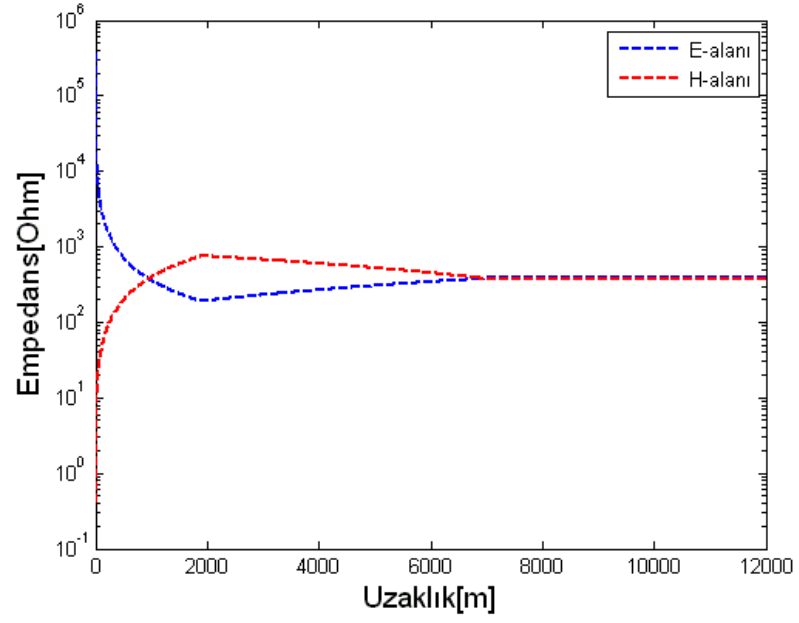
$$Z_w = \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega \quad (3.16)$$

Kaynağı sırasıyla küçük elektrik dipolü veya küçük manyetik döngü olarak kabul ederek elektrik ve manyetik alan empedansların değerini hesaplamak mümkün (Kodalı, 2001). Yakın alan bölgesinde ($r \ll \lambda_0 / 2\pi$) elektrik ve manyetik alan empedansları sırası ile aşağıdaki formüllerle hesaplanabilmektedir.

$$Z_E = \frac{\eta_0 \lambda_0}{2\pi r} \gg \eta_0 \quad (3.17)$$

$$Z_H = \frac{\eta_0 2\pi r}{\lambda_0} \ll \eta_0 \quad (3.18)$$

Şekil 3.6. kaynaktan uzaklaştıkça empedans değerlerinin değişimini simule etmektedir.



Şekil 3.6. Kaynaktan uzaklaştıkça dalga empedansının değişimi

Bu alanların ekranlama etkinliği SE , alıcıdaki duvar yokken etkiyen şiddetin duvar varken olan şiddetlerin oranına eşittir.

$$\text{Düzlem dalga } SE(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (3.19)$$

$$\text{E - alanı } SE(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (3.20)$$

$$\text{H - alanı } SE(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (3.21)$$

Burada P_1 , E_1 , H_1 emitör ve kurban arasında ekran duvarı yok iken, P_2 , E_2 , H_2 ise ekran duvarının olduğu zamanlardaki değerlerdir. Elektrik ve manyetik alanları empedansı için duvardan önce ve sonra aynı değere sahip olduğu varsayımı yapılmaktadır.

3.2.1.3. Tek ekran

Optik frekans sınırının altında kalan iletkenler için, $\sigma \gg \omega\epsilon_0$ olduğunda iletken akımı yer değiştirme akımından çok daha büyüktür. Herhangi bir θ_i açısında gelen elektromanyetik dalga için metalin elektrik parametreleri aşağıdaki gibidir.

Metal içinde normal yönünde ilerleme sabiti

$$K = \left(\frac{\omega\mu_0\sigma}{2} \right)^{1/2} (1 + j) \quad (3.22)$$

Metal içinde normal yönünde sönümleme sabiti

$$\alpha = \left(\frac{\omega\mu_0\sigma}{2} \right)^{1/2} \quad (3.23)$$

Yüzeyde, alanın e^{-1} 'e ulaştığı sırada deri derinliği

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega\mu_0\sigma} \right)^{1/2} \quad (3.24)$$

Ekran içindeki faz hızı ve dalga boyu

$$v = c \sqrt{\frac{\omega\epsilon_0}{\sigma}} < c \quad (3.25)$$
$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{\omega\epsilon_0}{\sigma}}$$

Tanım gereği, yansımaya kaybı (Kodali, 2001)

$$\alpha_R (\text{dB}) = -20 \log_{10} |T| = 20 \log_{10} \frac{|1 - v|^2}{4|v|} \quad (3.26)$$

gibidir. Burada T duvardan geçen net iletim katsayısıdır, v gelen dalga empedanslarının oranının ekran malzemesinin empedansına oranı (η_0 / Z_m), ve η_0 ise serbest uzayın yalın empedansıdır ($120\pi\Omega$).

t kalınlığındaki ekrandan geçen dalganın soğurulma kaybı

$$\alpha_A = 8.686\alpha t \text{ (dB)} \quad (3.27)$$

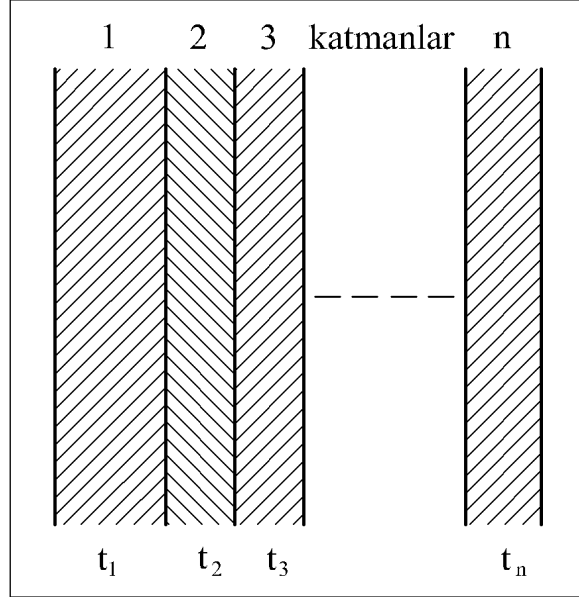
İç yansımaya kaybı ise

$$\alpha_{IR} = 20 \log_{10} \left| 1 - \frac{(v-1)^2}{(v+1)^2} e^{-2t(1+j)\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \right| \quad (3.28)$$

dir. Soğurulma kaybı α_A 'nın 15 dB'den büyük olduğu durumlarda iç yansımaya kaybı ihmal edilebilir. Düzlem dalganın tek ekranın toplam ekranlama etkinliği (3.26) – (3.28) denklemleri ile hesaplanabilir.

3.2.1.4. Çoklu lamine ekran

Şekil 3.7. empedans değerleri $Z_{m_1}, Z_{m_2}, \dots, Z_{m_n}$ olan n tane metalin ve hava boşluklarının bulunduğu çok katmanlı ekranlamayı göstermektedir.



Şekil 3.7. Çoklu lamine ekran örneği

Toplam yansımaya kaybı her yüzeydeki yansımaya kayıplarının toplamı olarak ifade etmek mümkündür. Matematiksel olarak (Kodali, 2001),

$$\begin{aligned}
\alpha_R &= 20 \log_{10} \left[\frac{1}{2^n} \left(1 + \frac{Zm_1}{\eta_0} \right) \left(1 + \frac{Zm_2}{Zm_1} \right) \dots \left(1 + \frac{\eta_0}{Zm_{n-1}} \right) \right] \\
&= 20 \log_{10} \frac{\left| 1 + \frac{Zm_1}{\eta_0} \right|}{2} + 20 \log_{10} \frac{\left| 1 + \frac{Zm_2}{Zm_1} \right|}{2} + \dots + 20 \log_{10} \frac{\left| 1 + \frac{\eta_0}{Zm_{n-1}} \right|}{2}
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Toplam sönümleme kaybı n adet ekranın sönümleme kayıplarının toplamıdır.

$$\alpha_A = 8.686(\alpha_1 t + \alpha_2 t + \dots + \alpha_n t_n) \text{ (dB)} \tag{3.30}$$

Burada α_n ve t_n değerleri her bir n'inci ekranın sönümleme ve kalınlığına denk gelmektedir. Not edilmesi gereken bir diğer konu ise Zm_1 , Zm_2 ve diğerlerinin değerleri frekansın kareköküyle değişim göstermektedirler. Bu sebepten, metal-metal arayüzündeki yansıma kaybı frekans bağımlı değildir. Bu daha çok metal hava arayüzlerinde geçerlidir (Kodali, 2001). Görüldüğü gibi, malzemenin empedansını ve kalınlığını kontrol ederek çoklu ekranlamanın etkinliğini artırmak mümkündür.

İç yansımaları göz önünde bulundurduğumuzda ortaya çıkan düzeltme deyimini aşağıdaki gibi olacaktır (Kodali, 2001).

$$\begin{aligned}
\alpha_{IR} &= 20 \log_{10} \left| \left(1 - v_1 e^{-2K_1 t_1} \right) \left(1 - v_2 e^{-2K_2 t_2} \right) \dots \left(1 - v_n e^{-2K_n t_n} \right) \right| \\
&= 20 \log_{10} \left| 1 - v_1 e^{-2K_1 t_1} \right| + 20 \log_{10} \left| 1 - v_2 e^{-2K_2 t_2} \right| + \dots \\
&\dots + 20 \log_{10} \left| 1 - v_n e^{-2K_n t_n} \right|
\end{aligned} \tag{3.31}$$

Burada,

$$v_n = \frac{(Zm_n - Zm_{n-1})(Zm_n - Zm_m)}{(Zm_n + Zm_{n-1})(Zm_n - Zm_m)} \tag{3.32}$$

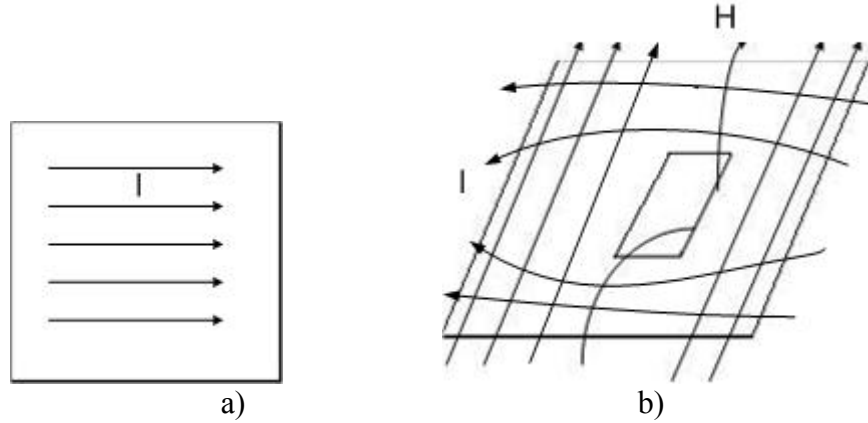
$$K_n = (1 + j) \sqrt{\pi f \mu_n \sigma_n} \tag{3.33}$$

Olmaktadır. Burada, Zm_m her bir katmanın sağında tespit edilen empedansı ifade eder (Kodali, 2001).

3.2.1.5. Açıklık ve deliklerin ekran üzerinde etkisi

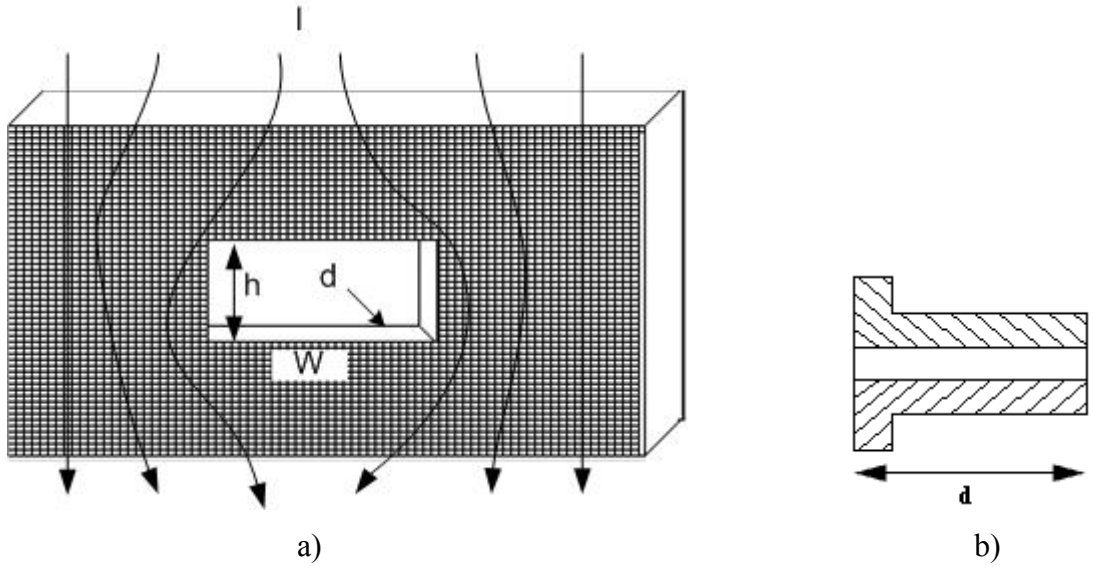
Pratik uygulamalarda ekranlar üzerinde bağlantı noktaları, anahtarlar, ölçü aletleri, havalandırma, kablo bağlantıları vb. nedenlere bağlı olarak açıklıklar ve delikler bulunabilmektedir. Bu açıklık ve delikler ekranda süreksizliğe neden olmakta ve ekranlama etkinliğini azaltmaktadır. Özellikle manyetik alanın ekranlamasında bu açıklıklar nedeniyle kaçaklar meydana gelir. Bir ekran üzerinde bu şekilde mevcut süreksizlik noktaları nedeniyle oluşan kaçak miktarı temel olarak üç ana faktöre bağlıdır. Bunlar, açıklık boyutu, dalga empedansı ve kaynak frekansıdır.

Bir ekrana gelen alanlar, ekran üzerinde bir akım indüklerler. Şayet bir ekran üzerinden açıklık veya delik şeklinde süreksizlik noktaları varsa, indüklenen ekran akımları bu süreksizlik noktalarından etkilenirler. Bu durum ekran verimini azaltan bir etki oluşturur. Şekil 3.8a'da ekran üzerinde indüklenmiş ekran akımları ve Şekil 3.8b'de ise ekran üzerindeki bir açıklıktan manyetik alan kaçağının nasıl oluştuğu gösterilmiştir (Arı ve Özen, 2008).



Şekil 3.8. a) Ekran üzerinden indüklenmiş ekran akımlarının dağılımı b) üzerinde bir açıklık bulunan manyetik alan.

Şekil 3.9a'da dikdörtgen şeklinde bir açıklığın olması durumunda, açıklık nedeniyle ekran akımlarının dağılımı gösterilmiştir. Burada W açıklığın büyük kenarı, h yükseklik ve d ise kalınlıktır. Bu model dikdörtgen yapıda bir dalga kılavuzu modelidir (Arı ve Özen, 2008). Ekranlardaki açıklık ve deliklerin ekran etkinliği üzerine etkisi dalga kılavuzlarından yararlanılarak analiz edilir.



Şekil 3.9. a) Ekran üzerinde dikdörtgen yapıda bir açıklık olması durumunda akım dağılımı b) boyu d olan bir dalga kılavuzu

Bir dalga kılavuzunda zayıflama kavramı, kılavuzun kesim frekansı (f_c) veya dalga boyu (λ_c) ile ilişkilidir. Bu durumda dalga kılavuzunun boyutları önemli hale gelir. Şekil 3.9b’de gösterilen dikdörtgen şeklindeki bir dalga kılavuzunun kesim frekansı aşağıdaki gibi bulunur.

$$f_c = \frac{c}{2W} \quad (3.34)$$

Burada $c = 3 \times 10^8$ m/s ışık hızı ve W ise açıklığın en büyük boyutudur. Kesim frekansının üzerindeki frekanslarda EM dalga açıklıktan zayıflamadan geçer. Kesim frekansının altındaki frekanslar için ekran zayıflaması oluşur. Çalışma frekansının kesim frekansından küçük olması durumunda, dikdörtgen açıklık için ekranlama etkinliği, $f \ll f_c, (\lambda \gg \lambda_c)$ için aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

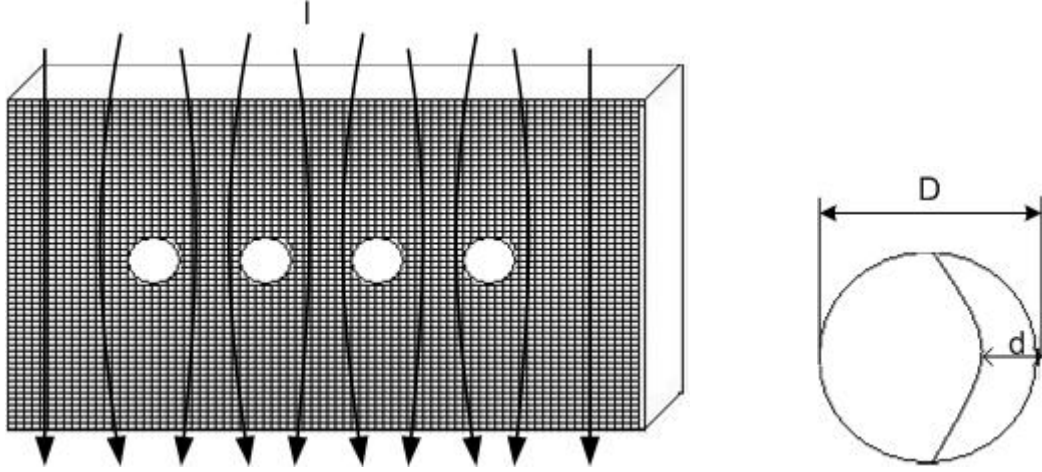
$$SE(\text{dB}) = 20 \log \frac{c}{2Wf} \quad (3.35)$$

Birden çok açıklık ekranlama etkinliğini doğal olarak azaltmaktadır. Bu durumda ekranlama etkinliği

$$SE(\text{dB}) = 20 \log \frac{c}{2Wf} - 10 \log n \quad (3.36)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada n toplam açıklık sayısıdır.

Şekil 3.10'da ekran üzerinde dairesel delikler ve dağılımı gösterilmiştir (Arı ve Özen, 2008). Burada D daire çapı ve d ise ekran kalınlığına karşılık gelmektedir.



Şekil 3.10. Ekran üzerindeki delikler ve ekran akım dağılımı

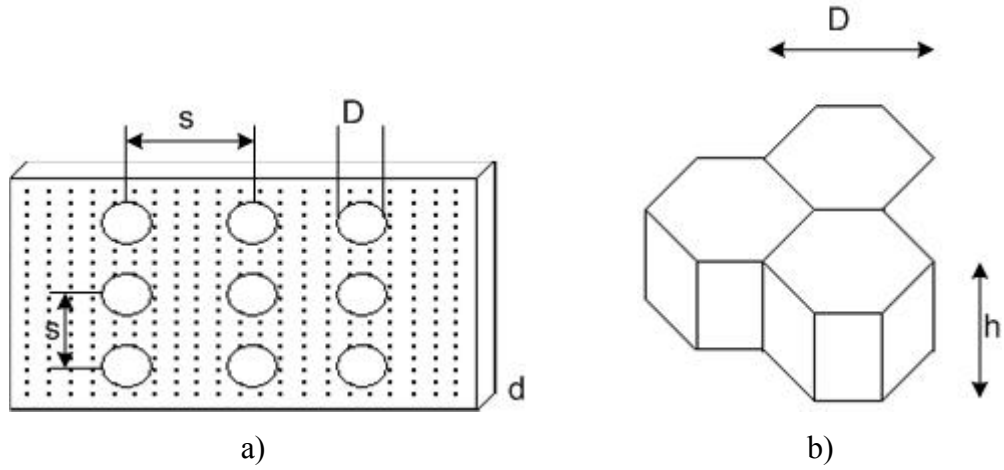
Şekil 3.10'de gösterilen dairesel kesitli açıklık için, dalga kılavuzunun kesim frekansı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f_c = 1.841 \frac{c}{\pi D} \quad (3.37)$$

Kesim frekansından küçük çalışma frekansları için dairesel yapıdaki deliklerin olması durumunda zayıflama ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$S_A = 54.6 \frac{df}{c} = 32 \frac{d}{D} [\text{dB}] \quad (3.38)$$

Şekil 3.11a'da ekran üzerinde belli bir düzende dağılmış havalandırma amaçlı delik modeli, Şekil 3.11b'de ise arı peteği şeklindeki açıklık modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.11. a) Havalandırma amaçlı çok sayıda açıklığa sahip ekran b) arı peteği şeklinde açıklık modeli

Bu düzenlemeye bağlı olarak ekran verimi azalır. Bu azalma miktarı EMI kaynağının dalga boyu, açıklık boyu ve açıklık sayısına bağlıdır. Kesim frekansından küçük frekanslarda, $s < \lambda/2$ için ekranlama etkinliği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S_E = 20 \log \frac{c}{2Df} - 10 \log N [dB] \quad (3.39)$$

Burada N açıklık sayısı, D açıklık boyudur. Havalandırma amacıyla ekranda petek şeklinde açıklıkların kullanılması (Şekil 3.11b) durumunda ekran etkinliği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S_E = 20 \log \frac{c}{2Df} - 10 \log N + 27.3 \frac{h}{D} [dB] \quad (3.40)$$

Burada N ekrandaki petek sayısı, D petek boyu ve h ise petek derinliğidir. Genel olarak en büyük genişliği W olan herhangi bir açıklık için ekran zayıflatması şu ifade ile verilir. ($f < f_c$)

$$S_A \approx 30 \frac{d}{D} [dB] \quad (3.41)$$

3.2.1.6. Elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinliği

Sırasıyla (3.17), (3.18) denklemlerindeki E ve H alanlarından doğan Z_E ve Z_H empedanslarını ve (3.12)'deki metalin yalın empedansını kullanarak yansıma kaybı aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}\alpha_E \text{ (dB)} &= 20 \log_{10} \left(\frac{Z_E}{4Z_m} \right); \text{ burada } \frac{Z_E}{Z_m} \gg 1 \\ &= 332 - 10 \log_{10} \left(\frac{\mu_r r^2 f^3}{\sigma_r} \right)\end{aligned}\quad (3.42)$$

ve

$$\alpha_H \text{ (dB)} = 15 - 10 \log_{10} \left(\frac{\mu_r}{r^2 \sigma_r f} \right); \text{ burada } \frac{Z_H}{Z_m} \ll 1 \quad (3.43)$$

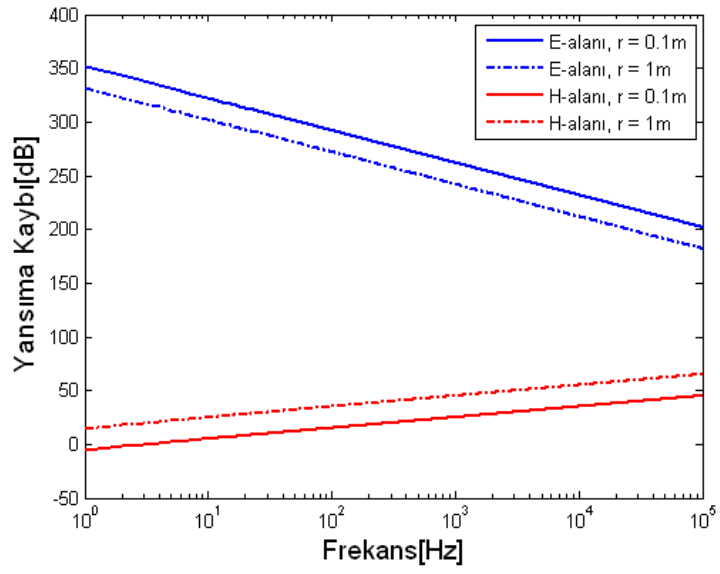
Burada μ_r havaya bağlı geçirgenlik sabiti, σ_r bakıra bağlı iletkenlik sabiti, f Hz cinsinden frekans ve r ise kaynak ile ekran duvarı arasında metre cinsinden uzaklıktır. Düzlem dalga için yansıma kaybı (3.26) denkleminde

$$\alpha_{RP} = 168.2 - 10 \log_{10} \left(\frac{\mu_r f}{\sigma_r} \right) \quad (3.44)$$

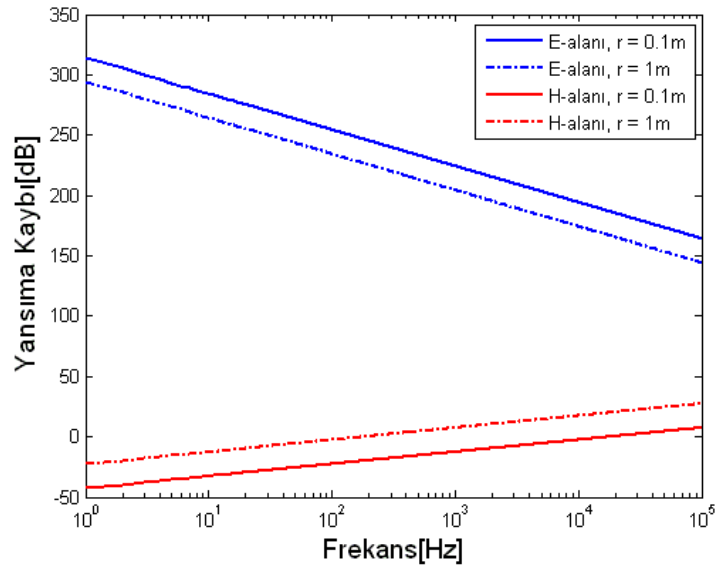
olarak bulunur. Bu üç alan tipi için soğurulma kaybı aynı denklem ile çözülmektedir.

$$\alpha_A \text{ (dB)} = 3.34 (\mu_r \sigma_r f)^{1/2} t \text{ (cm)} \quad (3.45)$$

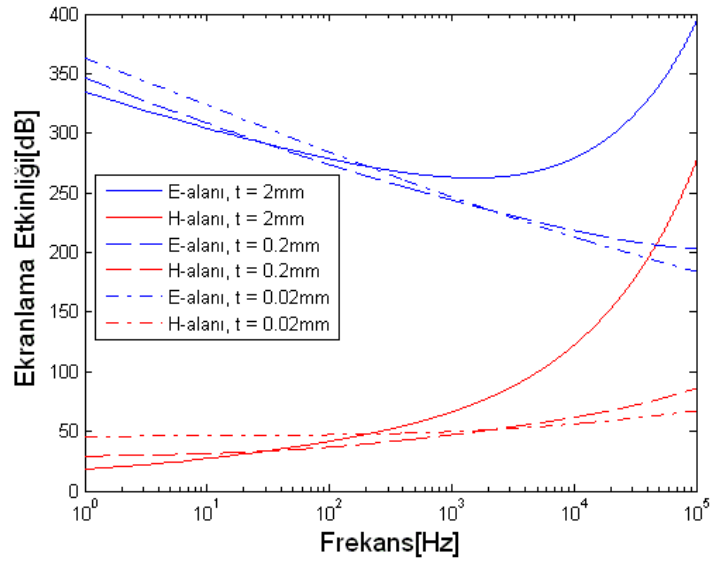
şekil 3.12 – şekil 3.15'de 2 farklı metal için değişen frekans altında yansıma kayıpları ve toplam ekranlama etkinlikleri verilmiştir. Sabit r ve t değerleri için elektrik alanı ekranlaması frekansla zayıflarken, manyetik alan için artmaktadır. Düşük frekanslarda bakır için toplam ekranlama etkinliği demirinkinden yüksektir. Yüksek frekanslarda ise durum tersini göstermektedir. Bunun sebebi yüksek frekanslarda demirin soğurulma kaybının daha yüksek olmasıdır.



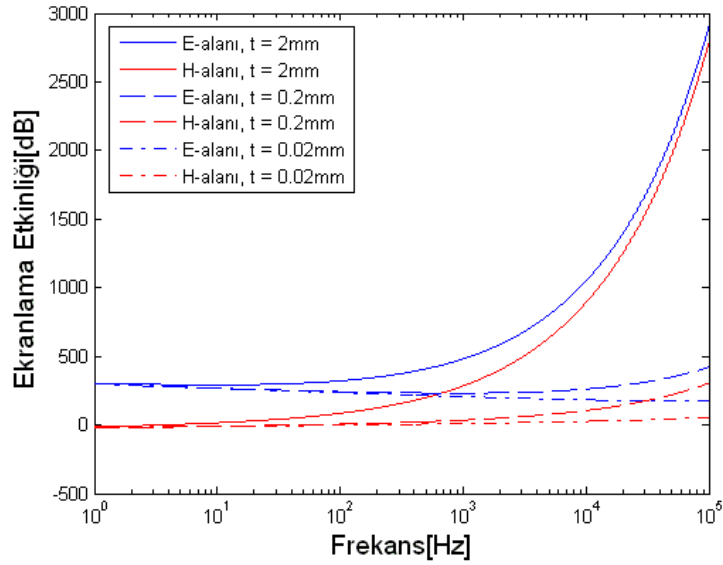
Şekil 3.12. Bakır ekran ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 1$) için yansımaya kayıpları



Şekil 3.13. Demir ekran ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 1$) için yansımaya kayıpları

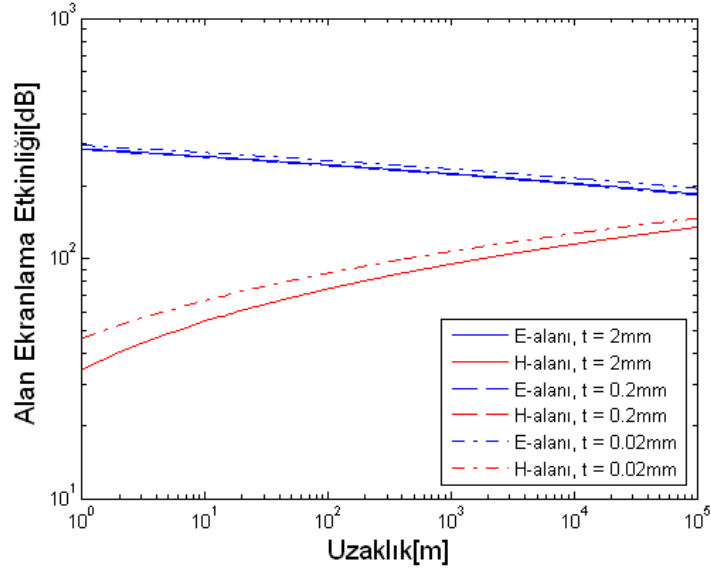


Şekil 3.14. Bakır ekran ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 1$) için toplam ekran etkinliği



Şekil 3.15. Demir ekran ($\mu_r = 1000$, $\sigma_r = 0.17$) için toplam ekran etkinliği

50 Hz'lik sabit frekans altında, bakırdan yapılan ekranın kaynaktan uzaklaştıkça belirli ekran kalınlıklarında elektrik ve manyetik alanlarının ekranlama etkinliğinin büyüklükleri Şekil 3.16'de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Bakır kullanarak uzaklığa göre elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinliği

Çıkan sonuçlardan genelleme yapılırsa, ekranlamada dikkate alınması gereken durumlar için aşağıdakiler söylenebilir;

- Soğurulma:
Elektromanyetik dalganın frekansının, ekran kalınlığının ve ekranın manyetik geçirgenliği ve iletkenlik sabitinin artması soğurulma kaybının artmasına neden olmaktadır.
- Yansıma:
Genel olarak, iletkenliğin artması ve geçirgenliğin azalması ilse yansıma kaybı artmaktadır.
- Elektrik alanı için yansıma:
Frekansta ve kaynak ile ekran arasındaki mesafenin azalması ile E-alanının yansıma kaybı artmaktadır.
- Manyetik alanı için yansıma:
Frekansta ve kaynak ile ekran arasındaki mesafenin artması ile H-alanının yansıma kaybı artmaktadır.
- Düzlem dalga için yansıma:
Frekanstaki azalma ile düzlem dalganın yansıma kaybı artmaktadır.

3.2.1.7. Düşük empedanslı manyetik alanı

Tüm frekanslarda düşük empedanslı elektrik iletkenen gelen düşük empedanslı manyetik alanın yansımaları düşük boyutlardadır. Bu nedenle, manyetik alan iletkenin içine girerek, iletken içinde eksponansiyel sönümlenmeye çalışmaktadır. Bu yüzden, manyetik alan soğurulma kaybına bağlıdır. Bu sebeple ferromanyetik malzemeler (yüksek μ) tercih sebebi olmalıdır.

3.2.1.8. Yüksek empedanslı elektrik alanı ve düzlem dalga

Düşük empedanslı metal ekrandan gelen yansıma soğurulma ile beraber artarak E- alanı ve düzlem dalga için daha iyi koruma sağlamaktadır. Bu sebepten, E-alanı ve düzlem dalga için daha etkin ekranlama için yüksek iletkenlikli malzemeler tercih edilmektedir. Çizelge 3.7 ekranlama malzemelerini onların geçirgenlik ve iletkenlik sabitlerini göstermektedir (Kodali, 2001; Arı ve Özen, 2008; Anonim, 2010; Anonim, 2010). Bununla beraber son sütunlarda verilen yoğunluk ve fiyat bağıntıları daha sonraki optimizasyon aşamalarında kullanılacaktır.

Çizelge 3.7. Bazı malzemelerin özellikleri

Malzeme	σ_r	μ_r	Fiyat	Yoğunluğu	Isı İletkenliği
Gümüş	1.05	1	19.17\$/ons	10.5 g/cm ³	4.29 Wcm/K
Bakır	1	1	2.881\$/lb	8.96 g/cm ³	4.01 Wcm/K
Altın	0.7	1	1257\$/ons	19.3 g/cm ³	3.17 Wcm/K
Alüminyum	0.61	1	1.145\$/lb	2.70 g/cm ³	2.37 Wcm/K
Kurşun	0.08	1	0.774\$/lb	11.3 g/cm ³	0.353 Wcm/K
Demir	0.17	1000	350\$/GT	7.87 g/cm ³	0.802 Wcm/K
Nikel	0.2	1	8.756\$/lb	8.90 g/cm ³	0.907 Wcm/K

Bazı büyüklüklerin karşılığı aşağıdaki gibidir.

- 1 ons = 31.1 gram
- 1 lb = 454 gram
- 1 gross ton = 1 016.04691 kg

3.2.2. Elektrik alan hesaplaması

Elektrik alanı hesaplamak için birçok metot kullanılmaktadır. Bu araştırmada elektrik alanı şiddetini bulmak için iki boyutlu yük dağılımı metodundan yararlanılacaktır (Belhadj and El-Ferik, 2009).

Elektrik alanı şiddeti iletken üzerindeki gerilime bağlı olarak değişebilmekte ve etrafındaki diğer iletkenlerden de etkilenmektedir. Buna bağlı olarak her iletkenin üzerindeki yükün belirlenmesi gerekmektedir. Yük dağılımı metodunun (Amiri et al., 2006) ayrıntılı incelenmesinden çıkan sonuca göre yük ile gerilim arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$[P][Q] = [V] \quad (3.46)$$

Buradan Q'yu çekersek

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (3.47)$$

Burada, Q her iletkenin üzerindeki yükün bilgisini tutan sütun vektörü, V – her iletkenin taşıdığı gerilim bilgisini tutan sütun vektörü, P ise her iletken için Maxwell gerilim katsayılarının bilgisini tutan kare matrisidir. Katsayılarının belirlenmesi hattın tasarımına, konumuna ve yarıçapına bağlıdır (Belhadj and El-Ferik, 2009).

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{2y_i}{d_i}\right) \quad (3.48)$$

ve

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}\right) \quad (3.49)$$

Burada $\epsilon = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m (havanın dielektrik sabiti), d_i – i iletkeninin yarıçapı, y_i ve y_j – i ve j iletkenlerinin yerden yüksekliği, x_i ve x_j ise i ve j iletkenlerinin yatay konumlarıdır. Bununla beraber katsayısı matrisinin tersi bulunduktan sonra iletkenlerin üzerinde birim başına düşen yük bulunarak elektrik alanın formüle edilmesine devam edilmektedir.

N sayıda iletkenin meydana getirdiği elektrik alanın bulunabilmesi için aşağıdaki formül kullanılmaktadır (Keikko et al., 1999).

$$\bar{E} = \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{(x_0 - x_k)}{R_1^2} - \frac{(x_0 - x_k)}{R_2^2} \right) \bar{a}_x + \left(\frac{(y_0 - y_k)}{R_1^2} - \frac{(y_0 - y_k)}{R_2^2} \right) \bar{a}_y \right] \quad (3.50)$$

Burada Q_k iletkenin yükü, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m (havanın dielektrik sabiti), x_k, y_k, x_0 ve y_0 iletkenin ve gözlem noktasının konumlarıdır, \bar{a}_x ve \bar{a}_y birim vektörlerdir ve

$$R_1^2 = (x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 \quad (3.51)$$

$$R_2^2 = (x_k - x_0)^2 + (y_k + y_0)^2 \quad (3.52)$$

R_1 – iletken ile gözlem noktası arasındaki uzaklık, R_2 ise gözlem noktası ile iletkenin yerin altındaki yansıması arasındaki uzaklıktır.

3.2.3. Manyetik alan hesaplaması

Bir iletkenin meydana getirdiği manyetik alan o iletken üzerinden geçen akıma bağlıdır. Akım bilindiğinde manyetik alan Biot Savart kanunu ile hesaplanabilir. Toprakta indüklenmiş eddy akımını da göz önünde bulundurarak, manyetik alan şiddeti aşağıdaki formül ile hesaplanır (Olsen, 1993).

$$\bar{B} = -2I_n \left\{ \left[\frac{(y - d_n)}{r_{cn}^2} - \frac{(y + d_n + \alpha)}{r_{in}^2} \right] \bar{a}_x - \left[\frac{(x - h_n)}{r_{cn}^2} - \frac{(x - h_n)}{r_{in}^2} \right] \bar{a}_y \right\} \text{mG(RMS)} \quad (3.53)$$

ve

$$r_{cn} = \left((x - h_n)^2 + (y - d_n)^2 \right)^{1/2}, \quad r_{in} = \left((x - h_n)^2 + (y + d_n + \alpha)^2 \right)^{1/2} \quad (3.54)$$

$$\alpha = \sqrt{2} \delta e^{-j\pi/4}, \quad \delta = 503 (\rho_g / f)^{0.5} \quad (3.55)$$

Burada görüntü teorisi kullanılmıştır (Li and Gao, 1998). Kompleks görüntünün derinliği $d_n + \alpha$ 'dır. ρ_g - yer direnci (Ω m), f – Hertz türünden frekans, I_n – n.ci

iletkenin akımı(amper-RMS). İletkenin konumu (h_n, d_n), ölçüm yapılan noktanın konumu ise (x, y) dir.

3.2.4. Yakın alan

50 Hz iletim hatları λ dalga boyunda, $c = 3 \times 10^8$ m/sn'lik ışık hızında gerilim taşırlar. Buradaki dalga boyu

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.56)$$

formülü ile bulunmaktadır. Bu sebepten değerleri yerine koyduğumuzda 50 Hz frekansta çalışan iletim hatlarının ortaya çıkardığı dalga boyu 6000m olmaktadır. Dolayısı ile iletim hattına birkaç metre kadar yakında bulunan bir insanın konumu dalga boyundan oldukça kısadır. Bu durumda bu bölge için elektrik ve manyetik alanların birbirinden bağımsız hesaplanabildiği yakın alan denmektedir (McKetta, 1997). Detay olarak düşünecek olursak; (Kodali, 2001)

$$r \ll \lambda_0 / 2\pi \quad (3.57)$$

Yakın alan tanımı yukarıdaki gibi olmaktadır. Burada r kaynağa bulunan uzaklıktır. Bu çalışmada yapılacak işlemler 1000m'ye kadar sınırlı olacağından yakın alanda mevcut elektrik ve manyetik alanların hesaplanması amaç olacaktır.

3.2.4.1. Yakın alanda elektrik alan ekranlaması

Yakın alanda, dalga empedansı sadece havanın yalın empedansına bağlı değildir. Aksine, dalga empedansı genellikle kaynağın türüne ve bulunduğu uzaklığa bağlıdır. Elektrik alanlarını göz önünde bulundurduğumuzda, yakın alan büyük elektrik bileşeni ve çok küçük manyetik bileşeni barındırmaktadır. Bu sebepten dalga empedansı (elektrik alanın manyetik alana oranı) çok büyüktür. İletken içindeki dalga empedansının şiddeti aksine çok düşük olduğundan, iletkenler yakın alan için elektrik alanlarını ekranlamaya çok iyi örnek sayılabilirler. Elektrik alan kaynakları

yüksek gerilim ve düşük akımlara sahiptirler. Başka bir deyişle kaynaklar kendilerine özgü yüksek empedansa sahiptirler. Dipol ve monopol antenler, elektriksel boşalma ve yüksek empedans devreler çoğunlukla elektrik alan yakın alan üretmektedirler. Düşük frekans limitinde elektrik alan ekranlaması mükemmel olmaktadır (Schmitt, 2002).

3.2.4.2. Yakın alanda manyetik alan ekranlaması

Manyetik alanlar iletkenler tarafından çok iyi yansıtılmamaktadır. Tanımdan, manyetik alan elektrik bileşeninden daha çok manyetik alan bileşenleri taşımaktadır. Bu yüzden, onun alan empedansı çok düşüktür. Ayrıca, düşük frekanslarda iletkenlerin yalın empedansı da çok düşüktür. Çünkü empedanslar aynıdır, pek fazla yansıma meydana gelmemektedir. Manyetik alan için emilme ekranlaması kullanılması daha uygundur. Bundan dolayı, manyetik alanı etkili bir şekilde ekranlanabilmesi için ekranın birkaç deri kalınlığında olması gerekir (Schmitt, 2002).

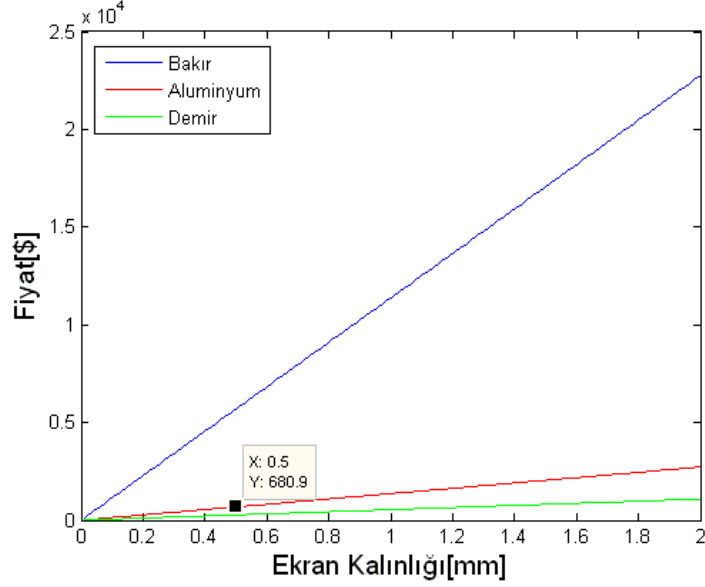
3.2.5. Ekranlama analizi

Ekran kalınlığının artması demek taşıyıcı yüzeyinde oluşturduğu ağırlığa ve fiyata doğrudan yansıması demektir. Bu üç malzemenin yoğunlukları ve ağırlıkları yukarıda verilmiştir (Bkz. Çizelge 3.7.). Kendi aralarında fiyat dengesi kurmak için her bir malzemenin 1 cm³'ü için fiyatının ne olacağını belirlemede yarar vardır. Bu durumda, 1cm³ malzemenin fiyatı o malzemenin 1 gramının fiyatının yoğunluğuna çarpılması ile bulunabilir.

$$\begin{aligned} g &= f / m \\ k &= d * g \end{aligned} \tag{3.58}$$

Burada, f ve m sırasıyla malzemeye verilen fiyatın ve malzemenin gram cinsinden kütlesidir (Metalprices, 2010), g ise bir gramının fiyatıdır, d malzemenin yoğunluğu, k 1cm³ malzemenin fiyatıdır.

Malzemelerin fiyatının hesaplanması için, örnek olarak 20m yüksekliğinde, 10m genişliğinde, t kalınlığında bir ekran ile kaplanmış bir yapının bir duvarı düşünölmüştür. Bu durum Şekil 3.17’te gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Ekran kalınlığının artması ile malzemenin fiyatlarının artması

Bu üç malzemenin ayrı-ayrı kalınlığa göre manyetik alan ekranlama etkinliği Çizelge 3.8’de, elektrik alan ekranlama etkinliği ise Çizelge 3.9’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Elektromanyetik kaynaktan $r = 20.79\text{m}$ uzaklıktaki manyetik alanı ekranlama performansı

Malzeme	Manyetik Alan.Ekranlama Etkinliği [dB] ($r = 20.79\text{m}$)						
	0.01mm	0.1mm	0.3mm	0.5mm	1mm	1.5mm	2mm
Bakır	69.66	58.93	59.05	59.52	60.70	61.89	63.07
Alüminyum	66.39	57.04	56.75	57.12	58.04	58.97	59.88
Demir	23.44	23.73	29.88	36.04	51.44	66.84	82.23

Çizelge 3.9. Elektromanyetik kaynaktan $r = 27.58\text{m}$ uzaklıktaki elektrik alanı ekranlama performansı

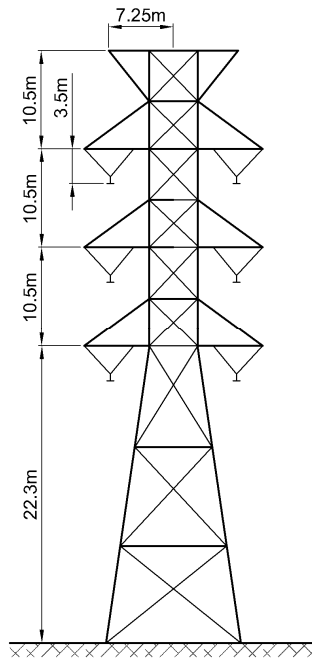
Malzeme	Elektrik Alan.Ekranlama Etkinliği [dB] ($r = 27.58\text{m}$)						
	0.01mm	0.1mm	0.3mm	0.5mm	1mm	1.5mm	2mm
Bakır	263.53	252.81	252.92	253.39	254.58	255.80	256.94
Alüminyum	260.27	250.91	250.62	250.99	251.91	252.84	253.76
Demir	217.31	217.60	223.76	229.92	245.31	260.72	276.11

Çizelge 3.8 – Çizelge 3.9’te r – kaynak ile gözlemci arasındaki uzaklık anlamına gelmektedir. Elektrik ve manyetik alan şiddetleri ölçülürken hesaplanan uzaklıklar bu değerlere tekabül etmektedirler.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

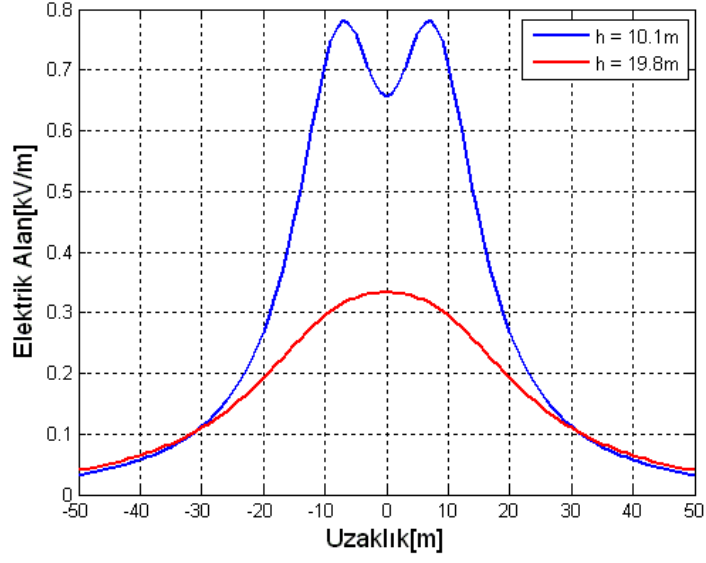
4.1. Elektrik Alan Ölçümü

Elektrik alan ölçümü için seçilen konfigurasyon Şekil 4.1'deki gibidir. Burada iletkenler arası yatay uzaklık 14.5m, dikey uzaklık 10.5m olup, en alttaki iletkenin direğe bağlandığı yerden yere olan uzaklığı 19.8m, ortasından yere olan uzaklık ise 10.1m'dir.



Şekil 4.1. Elektrik alanı ölçümü için direk konfigurasyonu

İletkenlerin taşıdığı gerilim hepsi için aynı olup 132KV'dur. Bu gerilim altında her iletken kabul edilmiş, çapı 2.773cm'dir. Ölçümler yerden yüksekliğin 1m olduğu bölgelerde yapılmıştır. Bu durumda ortaya çıkan elektrik alan Şekil 4.2'deki gibidir.

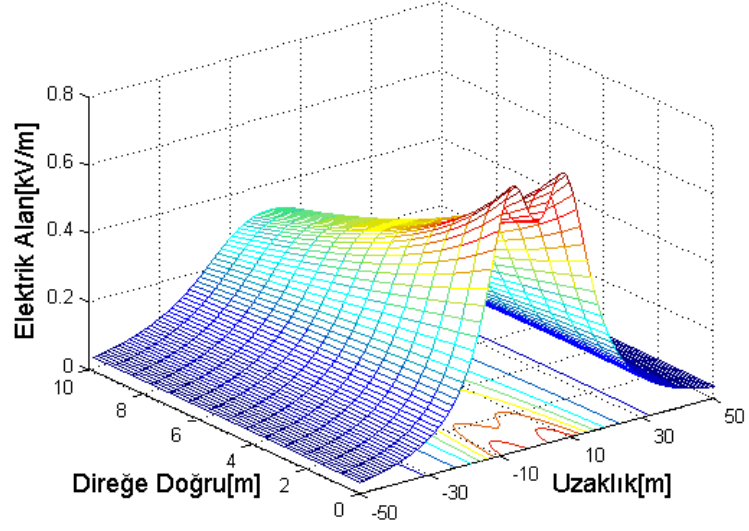


Şekil 4.2. Hattın merkezinden yere uzaklık $h = 10.1\text{m}$ ve hattın ucundan yere uzaklık $h = 19.8\text{m}$

Burada mavi renk ile gösterilen çizgi iki direk arasındaki hattın $h = 10.1\text{m}$ 'lik yükseklikteki ortasından yatay uzaklıktaki gözlem noktasında olan elektrik alan şiddetini yansıtmaktadır. Ölçülen en büyük değerin 0.7814KV/m olduğu görülmektedir.

Kırmızı renk ile gösterilen çizgi iletkenin direğe yakın olduğu noktayı ifade etmektedir. Bu örnekte yükseklik 19.8m olarak kabul edilmiştir. Bu noktada en yüksek elektrik alan şiddeti 0.3332KV/m olarak hesaplanmıştır.

Her iki renkteki çizgi merkezden 30m kadar uzaklıkta 0.1KV/m nin altına inebilmektedir. Şekil 4.3'de yüksekliğin azalması elektrik alanının da azalmasına sebep olduğu kolaylıkla gözlemlenebilir.

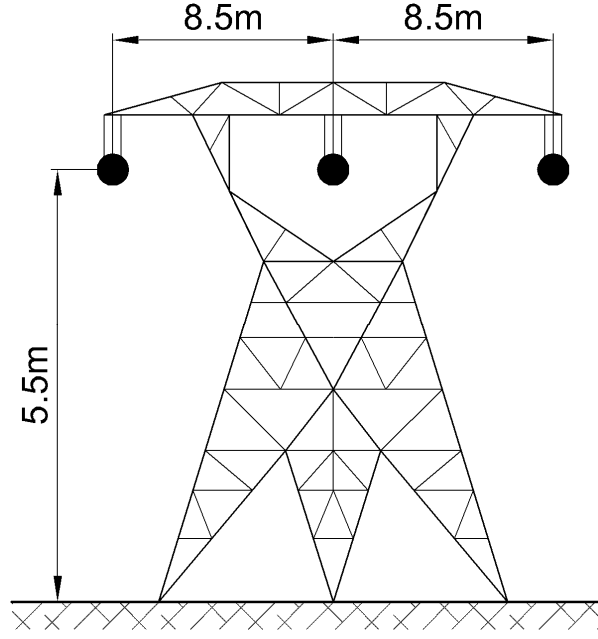


Şekil 4.3. Hat merkezinden direğe doğru olan yatay eksen de elektrik alan şiddeti

Şekil 4.3'ten görüldüğü gibi yükseklik yatay 30m uzaklıktan sonra elektrik alanı küçülmekte ve mavi çizgiler sıklaşmaktadır. Elektrik alan şiddeti direğe doğru gidilirken aynı grafik çıkarmamakta, giderek azalmaktadır.

4.2. Manyetik Alan Ölçümü

Şekil 4.4'te örnek elektrik direği konfigurasyonu verilmiştir. Manyetik alan şiddeti yukarıdaki formüller yardımıyla bulunabilir. Burada yatay olarak aynı hizada bulunan 3 iletken gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Manyetik alan ölçümü için direk konfigürasyonu

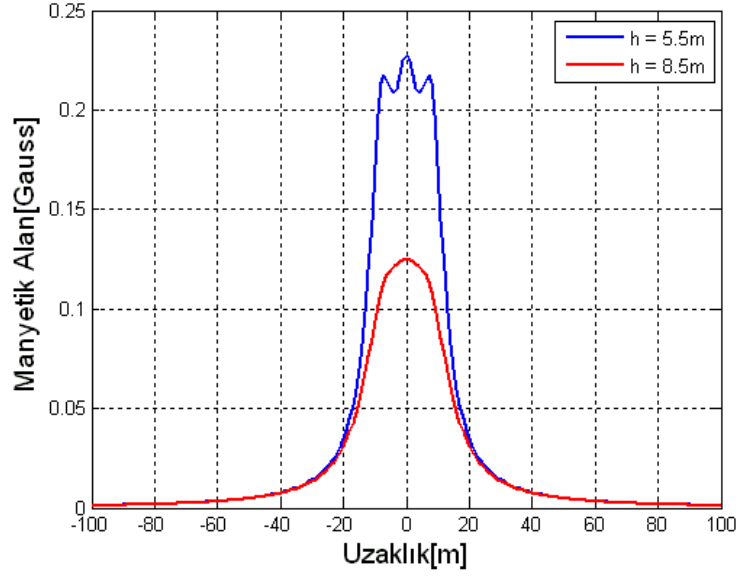
3 fazın her iletkeninden aynı akım geçmekte ve iletkenler arasındaki faz açısı 120° 'dir. Bu sebepten, iletkenlerdeki akım oranı

$$I_1 = I_0 \quad (4.1)$$

$$I_2 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_0 \quad (4.2)$$

$$I_3 = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_0 \quad (4.3)$$

gibi olmaktadır. Yerin öz direnci $\sigma = 0.025$ S/m. 220kV gerilim taşıyan bu iletkenlerin üzerinden geçen akım 400Amper, yatay iletkenler arasındaki uzaklık 8.5 m olarak kabul edilecektir. Bu sistemde 2 direk arasındaki hattın ortasından yere uzaklık minimum 7m olması gerekirken (Bkz. denklem (3.3)), bu örnekte manyetik alanın şiddetini hesaplarken nasıl bir davranışa büründüğünü görmek için 5.5m olarak kabul edip daha yüksek noktaların da değerlendirmesi sunulacaktır. Yerden 1.8m yükseklikteki bir noktada manyetik alan şiddeti Şekil 4.5'deki gibidir.



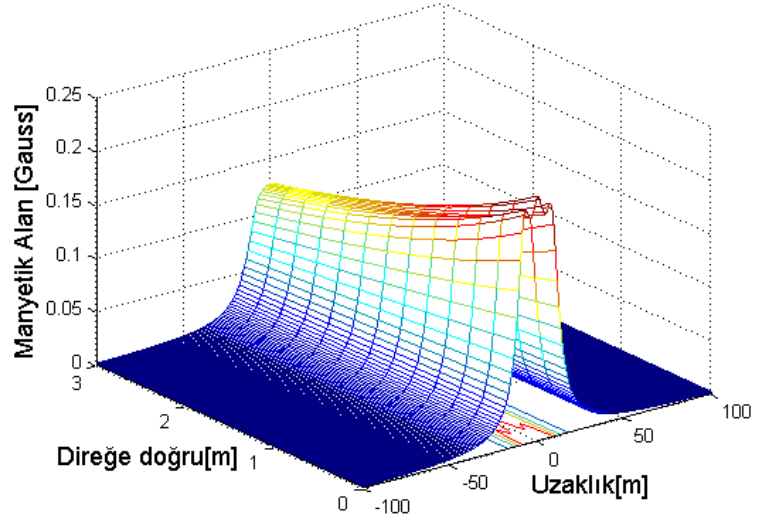
Şekil 4.5. $h = 5.5\text{m}$ hattın merkezinden yere uzaklık, yükseklik $h = 8.5\text{m}$ hattın ucundan yere uzaklık

Burada mavi renkte olan çizgi hat merkezinden yere olan uzaklığın 5.5m olduğu bölgeden yatay uzaklıktaki diğer noktalarda manyetik alan şiddetini yansıtmaktadır. Tepe noktadaki en yüksek değer 0.2276Gauss 'dur.

Kırmızı renkte olan çizgi ise hattın direğe yakın olan kısmı, 8.5m yükseklik olarak düşünülmüştür. Bu durumda en yüksek şiddet ise 0.1246Gauss 'dur.

Mavi renkte olan manyetik alan şiddeti 0 noktasından itibaren azalması beklenirken tekrar yükselme eğilimi göstermiştir. Kırmızıda ise bu durum bulunmamaktadır. Bu da iletim hattının üzerinden geçen akıma bağlı olarak yerden yüksekliğinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Yatay olarak 20m uzaklıktan sonra her iki yükseklik için manyetik alan şiddetleri neredeyse eşitlenmektedir.

Hattın merkezinin ve bittiği yerin meydana getirdiği manyetik alan şiddeti Şekil 4.6'ta net olarak görülmektedir.

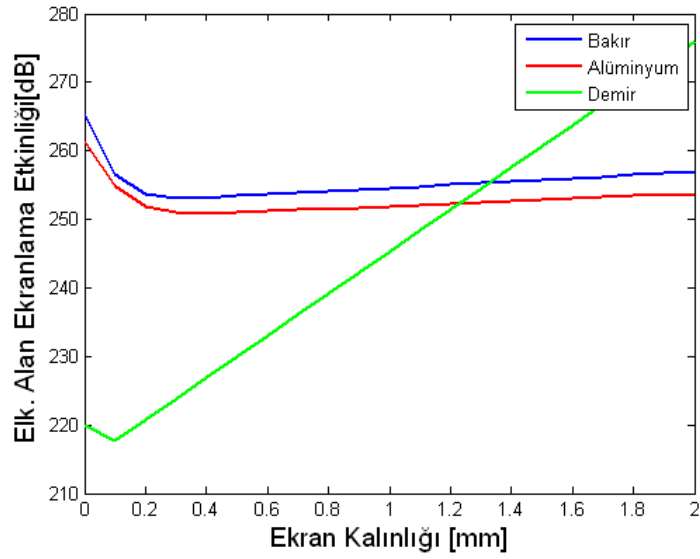


Şekil 4.6. Hat merkezinden direğe doğru yükseklik arttıkça manyetik alan şiddetinin davranışı

Burada direğe doğru eksenin 0 ve 3 noktası (Şekil 4.6) sırasıyla mavi ve kırmızı çizgiye (Şekil 4.5) denk gelmektedir. Bu sistem için yatay uzaklığın 50m olduğu bölgelerde manyetik alan şiddetlerinin çok düşük ve birbirine yakın değerler içerdiğinden o bölgelere maviye boyanmış gibi görünmektedir.

4.3. Elektrik Alanın Ekranlama Etkinliği

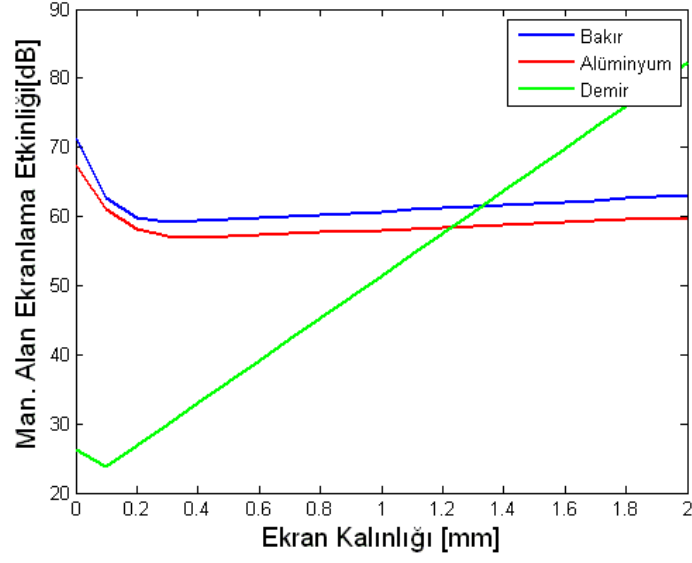
50 Hz frekansla çalışan bir iletim hattının meydana getirdiği elektrik alan ekranlama etkinliği Şekil 4.7’te gösterilmiştir. Elektrik alanı ele alındığında yansıma kaybının önemi büyüktür. Şekilden de görüldüğü üzere ekran kalınlığı arttıkça emilme kaybının artmasıyla ekranlama etkinliğinde artış görülmektedir.



Şekil 4.7. $r = 27.58\text{m}$ 'de malzemelerin kalınlıklarına göre elektrik alan ekranlama etkinliğinin değişimi

4.4. Manyetik Alanın Ekranlama Etkinliği

50 Hz frekansla çalışan bir iletim hattının meydana getirdiği manyetik alan dalgasının engellenmesi için öngörülen ekranlamanın kalınlığı ekran malzemesinin manyetik geçirgenliğinin yüksek olması ile önem kazanmaktadır. Bu durum Şekil 4.8'de görülmektedir. Yeşil renk ile belirtilmiş demirin manyetik geçirgenliği 1000 olup, manyetik alan ekranlamasının büyüklüğü ekran kalınlığı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bunun sebebi dalga emiliminin oranının hızlı bir şekilde artmasıdır (Bkz. denklem (3.45)). Elektrik alan ekranlamasında olduğu gibi burada da malzemenin manyetik geçirgenliğinin büyük olması soğurulma oranı artırmaktadır.



Şekil 4.8. $r = 20.79m$ 'de malzemelerin kalınlıklarına göre manyetik alan ekranlama etkinliğinin değişimi

4.5. Elektrik Alanın Ekranlama Etkinliğinin Hesaplanması

Şekil 4.2'de iletim hattının meydana getirdiği elektrik alanının hat merkezinden uzaklaştıkça oluşan dağılımı gösterilmiştir. Burada elektrik alanı şiddeti sistem merkezinden 20m kadar uzak bölgede $0.2683kV/m$ olarak ölçülmüştür. Elektrik alan şiddeti için maruz kalma limiti değişik koşullarda $5kV/m$ (Hameyer et al., 1996) olabilmektedir. Bu ölçülen değerden 19 kat daha büyük olmasına rağmen elektrik alanı azaltmak adına yapılabilecekleri görmek durumundayız.

Maliyetin kabul edilebilir olması, ekran ağırlığının fazla olmayacağı ve ekranlama etkinliğinin ön planda olacağı bir durum için, ekran malzemesin alüminyum ve kalınlığını $0.5mm$ olarak seçilirse $251.05dB$ 'lik bir elektrik alan ekranlamasına ulaşmak mümkündür (Bkz. Çizelge 3.8). Değerler yerine konulduğunda (Bkz. denklem (3.20)),

$$251.05 = 20 \log \left(\frac{0.2683 \text{ kV} / \text{m}}{E_2} \right) \quad (4.4)$$

$$E_2 = \frac{0.2683 \text{ kV} / \text{m}}{10^{251.05/20}} = 7.5183 \text{ e-}014 \text{ kV} / \text{m}$$

olmaktadır. Görüldüğü gibi 0.5mm kalınlığındaki alüminyum ekranlama sonucunda elektrik alan şiddeti $3.5686 \cdot 10^{12}$ kat azalarak 0'a yaklaşmıştır.

Böylece elektrik alan şiddetini ekrandan sonra $7.5183 \cdot 10^{-14}$ kV'a düşürmek için 20m yüksekliğinde, 10m genişliğinde bir yapının tek yüzeyine 681 dolarlık 270 kg alüminyum gereklidir. Bu durum hesaplamalar sonucu noktanın konumunu da desteklemektedir (Bkz. Şekil 3.17.).

Aynı etkiyi ($E_2 = 7.5183 \cdot 10^{-14}$ kV) daha ucuz olan demirle sağlamak için 251.05 dB'lik bir ekranlamaya karşın 1.2mm kalınlığında ekran gerekmektedir. Bu durumda ortaya çıkan 1889 kg'lık malzeme için 651 dolar gerekmektedir.

Görüldüğü gibi demirin ucuz olmasına karşın aynı etkiyi sağlamak için ekran kalınlığının daha kalın olması gerekir. Maliyetin eşit seviyede olmasına rağmen demir kullanıldığında yapıya daha çok yük binecektir.

4.6. Manyetik Alanın Ekranlama Etkinliğinin Hesaplanması

Şekil 4.5'de manyetik alanın iletim hattından uzaklığa göre şiddeti verilmiştir. Burada verilere baktığımızda 7.5m yükseklikteki bir iletim hattının meydana getirdiği manyetik alan sistem merkezinden 20m yatay olarak uzak bir konumda 32.44 mG olarak hissedilmektedir. Maruz kalma limitinin 1 Gauss (Anonymous, 2009) olduğunu düşünürsek, bulunan sonucun limit değerinden 31 kat bir başka deyişle 967.56mG kadar az olduğu görülmektedir. Yüksek gerilimli hatlardan meydana gelen elektromanyetik alanların canlılarda biyolojik hasarlara yol açmasının kanıtlanamaması (Chen et al., 2002) bu durumu olduğu gibi bırakmak gerektiği anlamına gelmez. Bu yüzden önceki bölümlerde bahsedilen ekranlamaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Manyetik alanı şiddetini azaltmak için elektrik alan şiddetinin azaltılması ile ilgili yapılan işlemlerin benzeri uygulanacaktır. Yukarıdaki örnekte 251.05dB'lik bir elektrik alan ekranlaması uygulayabilmek için 0.5mm'lik alüminyuma denk geldiği görülmüş ve maliyeti hesaplanmıştır. Aynı özellikte malzeme manyetik alanı için kullanılırsa değerler yerine konulduğunda (Bkz. denklem (3.21)) ekran arkasındaki manyetik alan şiddeti

$$57.18 = 20 \log \left(\frac{32.44mG}{H_2} \right) \quad (4.5)$$
$$H_2 = \frac{32.44mG}{10^{57.18/20}} = 0.0449mG$$

olmaktadır. Bu sonuç ile bazı çevre şartları ve maruz kalma zamanları (Hameyer et al., 1996) göz önüne alınarak, manyetik alan şiddetini 1 Gauss olarak bilinen limit değerinden, 22280 kat daha düşük değere çekmek mümkündür.

Böylece manyetik alan şiddetini ekrandan sonra 0.0449mG'a düşürmek için 20m yüksekliğinde, 10m genişliğinde bir yapının tek yüzeyine 681 dolarlık 270kg alüminyum gereklidir.

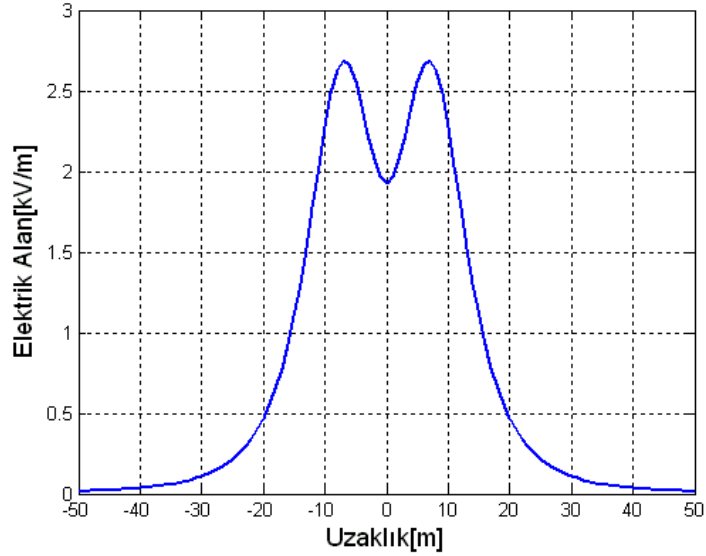
Aynı etkiyi ($H_2=0.0449mG$) daha ucuz olan demirle sağlamak için 57.18 dB'lik bir ekranlamaya karşın elektrik alanda olduğu gibi 1.2mm kalınlığında ekran gerekmektedir. Bu ise 1889kg'lık malzeme için 651 doların gerekliliğini göstermektedir.

Görüldüğü gibi her iki alan ekranlaması için seçilen 0.5mm kalınlığındaki alüminyumun sağladığı ekranlama etkinliği ile 1.2mm kalınlığındaki demir ile yakalanmakta ve yaklaşık aynı maliyete sahip olmaktadır. Alüminyumun avantajı ise daha hafif olmasıdır.

4.7. Elektrik Alanı Azaltılması

Elektrik alanı şiddetinin azaltılmasını net olarak görebilmek için basit bir sistem denemekte fayda vardır. Test olarak Afyon – Denizli arasında kullanılan 380kV 1272

MCM tipi iletkenlerin özelliğinin basit tasarım haliyle değerlendirilebilir. İki simetrik iletkenin bulunduğu sistem tercih edilmiştir. Böyle seçimin sebebi test aşamalarında oluşacak farkların kolaylıkla gözlemlenebilmesidir. Sistem özelliklerinde $V = 380\text{kV}$, iletkenin çapı 3.0403cm , klerans 9m , 2 iletken arası açıklık 14m olarak seçilmiştir. Bu durumda oluşacak elektrik alanı şiddeti Şekil 4.9'deki gibidir.

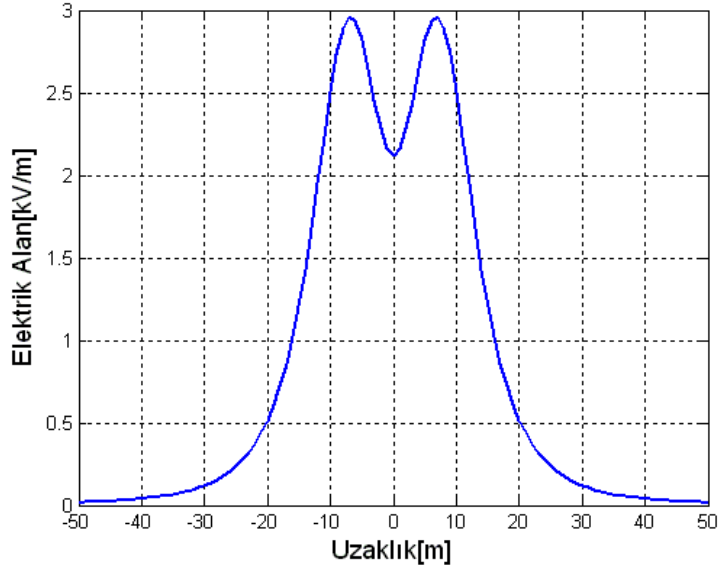


Şekil 4.9. Orijinal ayarlamalarla test sürecine girecek durum

Elektrik alanı şiddetini azaltmak için birçok yöntem kullanılabilir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir (Stewart and Opper, 1996).

- Hat Gerilimi

Tüm parametreler sabit tutulduğunda iletim hattından doğan elektrik alanı şiddeti hattaki gerilimle doğru orantılıdır. Örneğin gerilim %10 artarsa elektrik alanı da %10 büyüklüğünde artar. $V = 380000\text{V}$ ise şimdiki durumda 418000V olacaktır. Ortaya çıkan elektrik alanı şiddeti Şekil 4.10'deki gibidir.

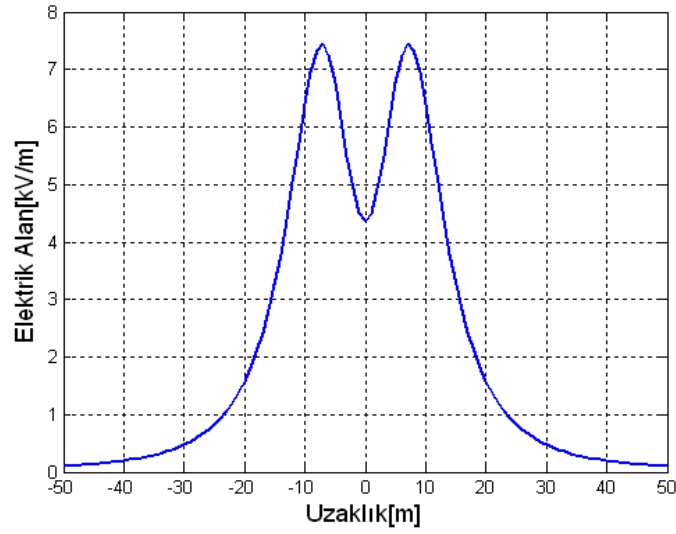


Şekil 4.10. Hat geriliminin %10 artması ile elektrik alan şiddeti

Şekilde görüldüğü gibi, gerilim değerinin %10 artması ile elektrik alan şiddeti de %10 artmaktadır. Hat gerilimi elektrik alanı şiddeti ile doğru orantılıdır.

- Ölçüm noktası yüksekliği

Elektrik alanın şiddeti ölçülürken ölçüm noktasının yüksekliği önemlidir. Ölçüm noktasının yüksek olması ile iletkeneye yakınlığın artması kaçınılmazdır. Yalnız, iletken yüksekliğine dokunmadan ölçüm noktası yüksekliğini artırmak, ölçüm noktasının yüksekliğini deşışmeden iletkenlerin yüksekliğini aynı seviyede aşağıya indirmekten, şiddeti daha büyük elektrik alanının okunmasına sebebiyet vermektedir. Test için yerden yüksekliğin 1m olan ölçüm noktasının yüksekliği 3m yapılırsa sonuç Şekil 4.11'deki gibi olur.



Şekil 4.11. Ölçüm noktası yüksekliğinin artması sonucu elektrik alan şiddeti

İletkenlerin yüksekliğinin 2m azaltılması aynı sonucu vermemektedir. Sonuçların aynı çıkmamasının sebebi elektrik alanı şiddetinin ölçümünde kullanılan görüntü modelidir. İletkenlerin yüksekliğinin değişmesi onların görüntülerinin de değişmesine sebep olmaktadır. Ölçüm noktası genellikle insan boyu kadar olarak düşünülürse, ölçümler daha yuksekten yapıldığında hesaplanan elektrik alanın insanlara etkisi araştırılırken daha dikkatli olunmalıdır.

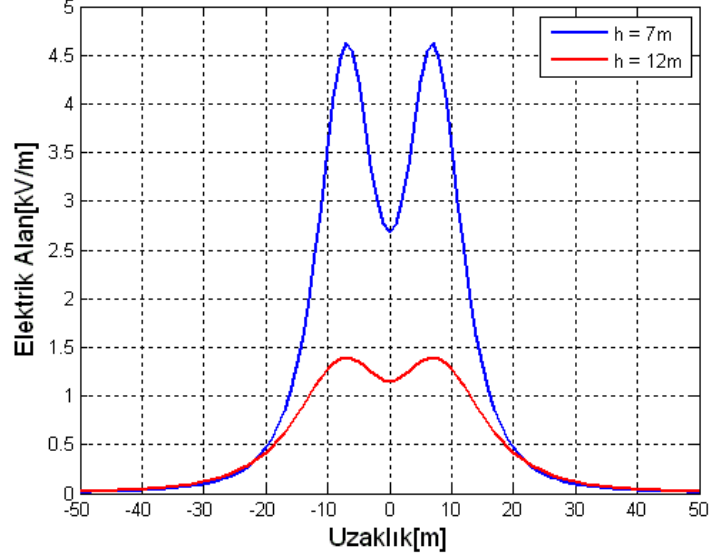
- Doğal ekranlama ve arazi

İletim hattı ağaçlık bölgelerden geçtiğinde ağaç ve diğer bitkiler doğal ekranlama sağlamaktadır. Binalar ve hatta insanlar bile elektrik alanı şiddetinin bazı yerlerde düşmesine neden olur.

- İletken – yer kleransı

Güç frekanslarında yer oldukça iletkendir ve zamanla elektrik alanı değişimi yeterince yavaş olduğundan yer mükemmel sıfır iletken düzlemi gibi davranmaktadır. Elektrik alanı hesaplamaları için yer ayna gibi kullanılır, iletkenlerin görüntüsü bulunur. Bu sebepten elektrik alanı şiddeti bu kleransa bağlıdır. İletkenin yüksekliğini artırmak iletken altında elektrik alanının azalmasına sebep olur. Ancak

kleransı artırmak bazı uzaklıkta elektrik alan şiddetinin artmasına sebep oluyor. İletkeni yükseğe taşımak yapının yüksekliğine ve ağırlığına yansır. Bu durum çok pahalı ve estetik çirkinliğe sebep olur.

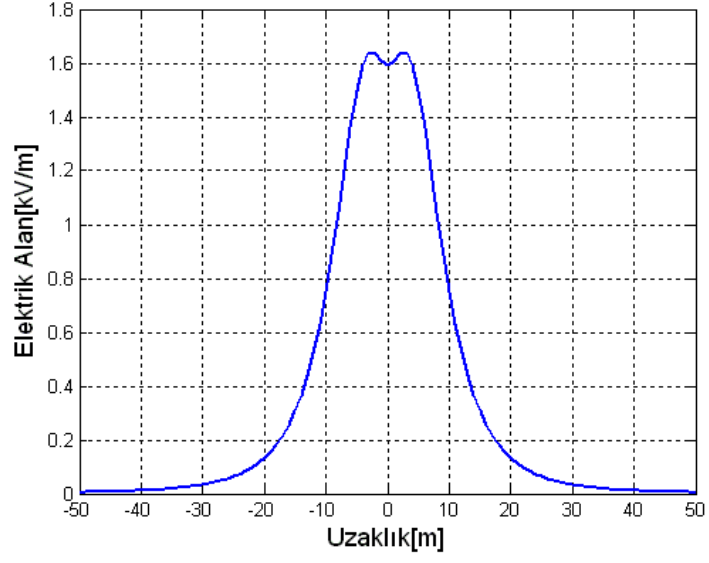


Şekil 4.12. Yükseklik arttıkça elektrik alan şiddetinin davranışı

Kleransı artırmak elektrik alanı şiddetinin azalmasına neden olmaktadır (Şekil 4.12). Hat merkezinden 30m yatay uzaklıkta ise daha yüksekte varsayılan iletkenin doğan elektrik alan şiddeti daha alçakta olandan büyüktür. Bu da kleransın artmasının genelde elektrik alanı şiddetinin düşmesine neden olsa da belli uzaklıklarda beklenenden daha fazla elektrik alanı şiddeti oluşturmaktadır.

- İletken konfigürasyonu

Üç fazlı AC yüksek gerilimde her iletkenin kendi taşıdığı gerilimi vardır ve ideal bir durumda, denge koşullarında toplamları sıfıra eşittir. Yer seviyesindeki elektrik alan gözlemcinin iletkene ve iletkenin görüntüne olan uzaklığa bağlı kalarak hat gerilimlerinden kaynaklanan elektrik alanların toplamlarına eşittir. Eğer tüm bu 3 iletken havada aynı yere konulabilseydi elektrik alanı oluşmazdı. İletkenleri birbirine yakın tutmak elektrik alanı yok etmesine ve şiddetinin düşmesine neden olur (Şekil 4.13).



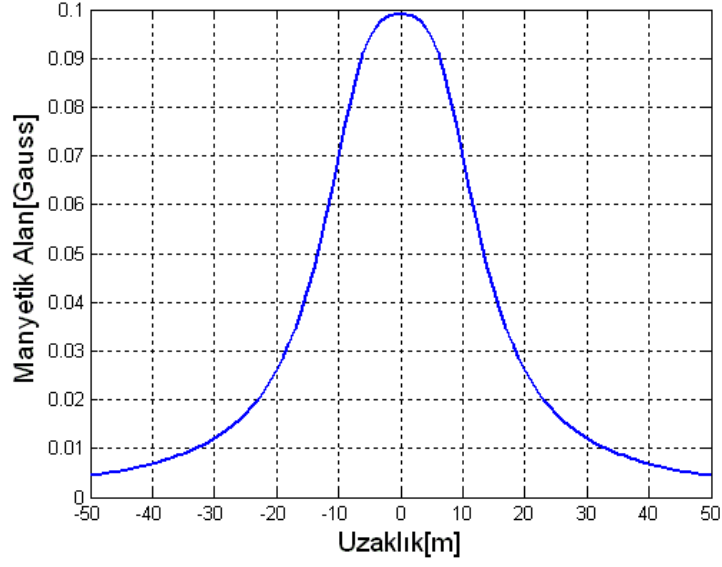
Şekil 4.13. İletken yakınlştırılması sonucu ortaya çıkan elektrik alan şiddeti

- Yatay uzaklık

Elektrik alanı yatay olarak kaynaktan uzaklaştıkça azalır. Hat merkezinden belli uzaklıktan sonra d – yatay uzaklık olmak üzere elektrik alanı $1/d^2$ oranında azalır (Bkz. denklem (3.50)-(3.52)).

4.8. Manyetik Alanı Azaltılması

Manyetik alan azaltılması için uygulanacak testlerde elektrik alanda uygulanan sistem aynen kullanılacak, akım şiddeti 400A olarak seçilecektir. Bu durumda ilk durumda manyetik alan şiddeti Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

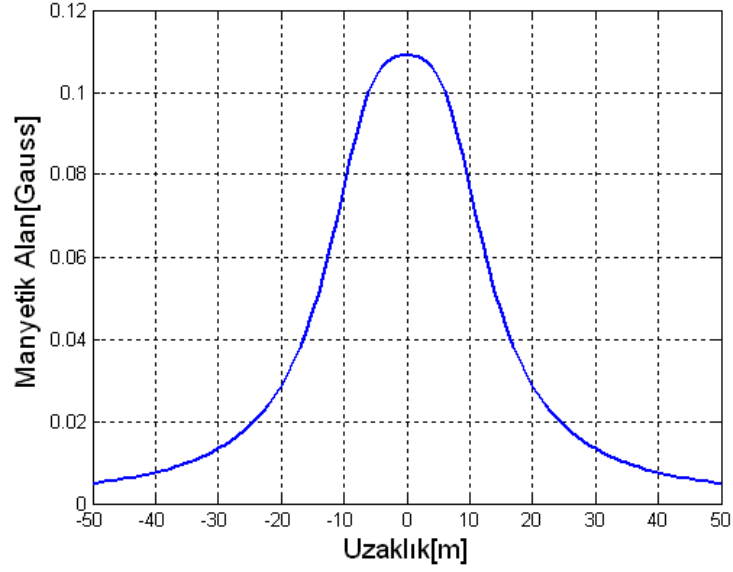


Şekil 4.14. Test sonuçları için ilk durumdaki manyetik alan şiddeti

Manyetik alanın azaltılması için yapılması gerekenler bazı yöntemler aşağıdaki gibidir (Stewart and Oppel, 1996).

- Faz akımı

Bütün ayarlamalar sabit tutulduğunda, güç frekanslarında manyetik alan faz akımı ile doğru orantılıdır. Bu yüzden, faz akımı %10 artırıldığında ortaya çıkan manyetik alan da %10 artar (Şekil 4.15). Aynı güç transferinde hat gerilimini artırmak faz akımını düşürür. Dolayısı ile manyetik alan azalır.



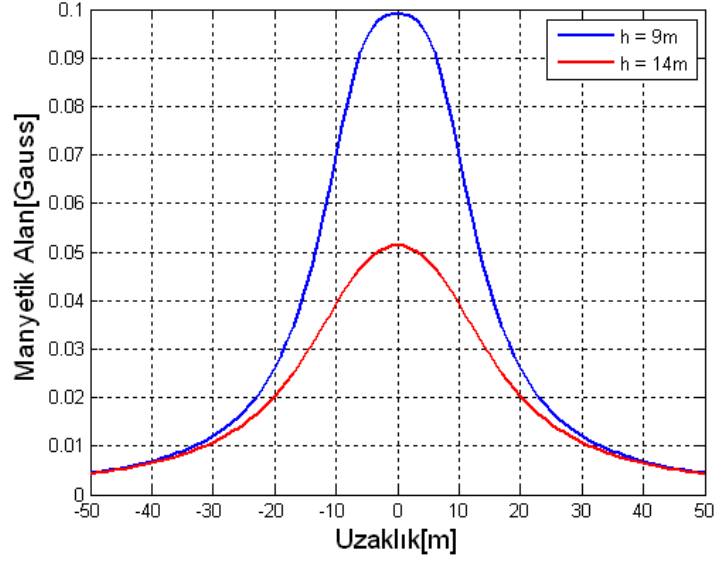
Şekil 4.15. İletkendeki akımın %10 artması ile ortaya çıkan manyetik alan şiddeti

İletim hatlarında gerilim genellikle sabit ve dengededir. Bu sebepten elektrik alanı da sabit ve tahmin edilebilir. Ancak, hat akımları hem büyüklük hem de faz açısı olarak değişebilmektedir. Günlük kullanıma bağlı olarak, haftalık, aylık, dönemlik ve yıllık değişimler gözlenmektedir.

Faz üzerinde akım dengesizliği manyetik alanı etkileyebilir. Bu hat yakınında manyetik alanda küçük tahmin saptamalarına neden olur. Ancak akım dengesizliği hattın uzaklaştıkça manyetik alan azalma oranını azaltmaktadır. Bu ise belirsizliğe neden olur. Diğer sorun ise ters akımdır. Bir kısmı topraklama kablosundan bir kısmı ise topraktan veya borulardan ve diğer paralel iletkenlerden akmaktadır. Dönüş akımların yeri tespit edilemediğinden manyetik alanı hat merkezinden uzakta tahmin etmek oldukça güç.

- İletken – yer kleransı

İletkenin yüksekliğini artırmak iletken altındaki manyetik alan şiddetini azaltır (Şekil 4.16). Bununla beraber manyetik alanı azaltarak hat tasarımı bazı bölgelerde elektrik alanının artmasına sebep olur.

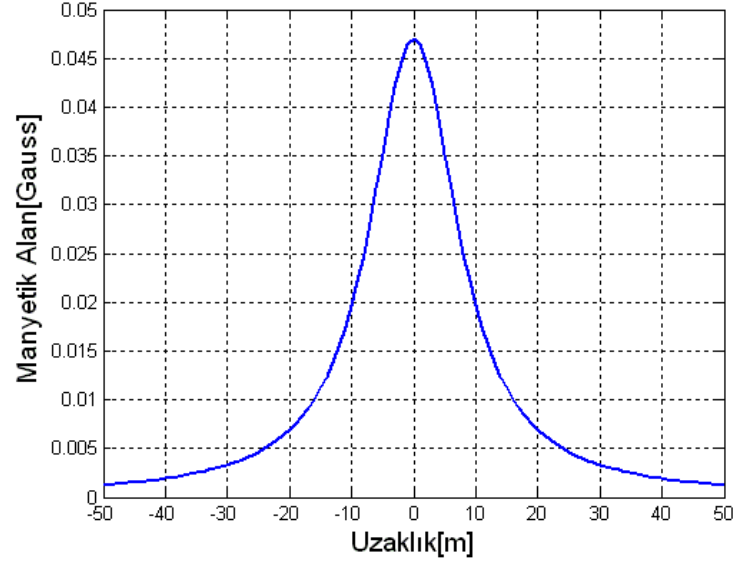


Şekil 4.16. Klerans artması ile manyetik alan şiddetinin değişimi

İletkenin yüksekliğinin artırılmasının dezavantajı doğal olarak elektrik değerinin yüksekliğine ve ağırlığına yansır, bu da maliyet ve estetik kirliliğini artması demektir.

- İletken ayarlaması

Dengeli bir sistemde her fazdaki akımların toplamı sıfıra eşittir. Yer yüzeyindeki manyetik alan şiddeti gözlemciye olan uzaklığa bağlı kalarak her fazdaki akımlardan doğan manyetik alanların toplamına eşittir. Bu sebepten tüm iletkenleri aynı noktaya koyulabilseydi hiç manyetik alan olmayacaktı. İletkenleri yakınlaştırmak manyetik alanın azalmasına yol açar (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. İletkenlerin yakınlaştırılması sonucu ortaya çıkan manyetik alan şiddeti

- İletken nesnelere yakınlık

Elektrik alanlarda olduğu gibi manyetik alanların şiddeti de binaların, ağaçların olması ile zayıflayabilmektedir. Yalnız manyetik alanlar ferromanyetik maddelerden yapılmış kalın levha ile azaltılabilir.

5. SONUÇ

NHMRC'e göre, 50/60 Hz alanlarına maruz kalan çocuk ve yetişkinlerde kansere yakalanma oranının yüksek olduğunu belirten epidemiyolojik araştırma sonuçlarına kısıtlama getirilse bile, bu veriler göz ardı edilemez (Anonymous, 2009). Risk değerlendirmesi yapmak için bu veriler üzerine ek olarak kapsamlı araştırılma yapılmalıdır. Çünkü elde edilen verilen kanser riskinin hangi maruz kalma seviyesinde ortaya çıktığını kanıtlamıyor. Bu sebepten, yukarıda verilen maruz kalma limitleri bile tam olarak 50Hz manyetik alanlarının zararsız olabileceği anlamına gelemeyebilir.

Yapılan denemeler sonucu farklı durumlarda elektrik ve manyetik alan şiddetleri ölçülmüş, sonuçlar maruz kalma limitleri ile kıyaslanmıştır. Her iki alan şiddetlerinin istenen seviyede ekranlanabilmesi için maliyet – performans açısından alüminyumun ve demirin daha iyi sonuç verdiği, demirin daha ağır olduğu görülmektedir. Buna karşın, demirin metalik özelliklerinden dolayı daha iyi ısı yalıtımı malzemesi olması (Kalender'den, 2010) onu da cazip kılmaktadır. Bir malzemenin elektromanyetik alanların ekranlama yöntemiyle engellenmesinde kullanılmasının önemli oluşu kadar ısı ve ses yalıtımı gibi özelliklerinin araştırılması da konuyu hep güncel tutar, araştırmacılara ilham verir.

Ekranlama dışında elektrik ve manyetik alanın şiddetini düşürmek için iletken kümelemesinden kaçınmak, iletken – yer kleransını artırmak, iletkenler arası yatay uzaklığı azaltmak ve en önemli husus kaynaktan mümkün olduğunca uzak olmak gerekmektedir. Ayrıca elektrik direk yapılarının kurulduğu bölgelerin arazi şartlarının ve çevredeki nesnelere etkisinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Literatürde 50Hz iletim hatlarından doğan elektromanyetik alanın şiddetini hesaplamak için farklı yöntemlerin kullanılmasına rağmen, sunulan denklemlerdeki değişken tanımlarının ve örneklerdeki veri eksikliğinden dolayı konuyu takip edenlerin anlaması ve yapılan testlerin doğruluğundan emin olması oldukça zordur.

Bu tez çalışması konuya uzak olanların dahi kolaylıkla anlayacağı şekilde denklem, örnek ve sonuçları bir arada toplamış, ekte verilen kodlarla da araştırmacılara konuyla ilgili ipucu vermiştir.

6. KAYNAKLAR

- Amiri, R., Hadi, H., Marich, M., 2006, The Influence of Sag in the Electric Field Calculation Around High Voltage Overhead Transmission Lines, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1-4244-0547-5/06/, 206-209.
- Arı, N., Özen Ş., 2008. Elektromanyetik Uyumluluk, Palme Yayıncılık, 232, İstanbul.
- Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency – 2009. İnternet Sitesi. http://www.arpana.gov.au/radiationprotection/factsheets/is_emf.cfm. Erişim Tarihi: 03.10.2010.
- Balanis, C.A., 1989, Advanced Engineering Electromagnetics, Wiley, 1008, U.S.A.,Canada.
- Belhadj, C.A., El-Ferik, S., 2009, Electric and Magnetic Fields Estimation For Live Transmission Line Right Of Way Workers Using Artificial Neural Network, Intelligent System Applications to Power Systems, International Conference.
- Binnie, A., 2001, Using the History of Electricity and Magnetism to Enhance Teaching, Kluwer Academic Publishers, Science and Education 10, 379-389.
- Blanco, I., Brault E., Cazzaniga M., Gmuer R., Jenne M., Königsberger P., Forns A. M., Poeplow E., Colautti M., Forder J., Kragelund N., Walters D., 2010, IMIA Conference, Berlin, IMIA WGP 69 (10).
- Chen, S., LI, L., HE, J., 2002, Power Frequency Electromagnetic Environment Evaluation of Zhongguancun Software Park near Transmission Lines, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 0-7803-7490-8/02/, 1915-1918.
- Çark, H., 2010, Sözlü Görüşme, TEİAŞ
- Deno, D.W., 1977, Currents Induced In The Human Body By High Voltage Transmission Line Electric Field – Measurement And Calculation Of Distribution And Dose, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. PAS-96, no.5, 1517-1529.
- DMD & Associates Ltd., 2005, Effects of High Voltage Transmission Line in Pximity of Highways, British Columbia Ministry of Transportation, 1369-05, 1-61.

- Govender, D., 2008, A Study of the Electrical Environment Below HVDC Transmission Lines, University of Kwazulu-Natal, Master Degree Thesis, 121, Durban, South Africa Republic.
- Hameyer, K., Mertens, R., Belmans, R., 1996, Computation and Measurement of Electromagnetic Fields of AC-High-Voltage Transmission Lines, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 'AC and DC Power Transmission', Conference Publication No. 423, 52-57.
- Hoole, S.R.H., Hoole, P.R.P., 1996, A Modern Short Course in Engineering Electromagnetics, Oxford University Pres, 576, New York.
- Junid A., 2008, What is an Overhead Line Insulator, İnternet Sitesi, <http://knol.google.com/k/overhead-line-insulators>, Erişim Tarihi: 16.11.2010.
- Kalender, V., 2010, Yazılı Görüşme, TÜBİTAK.
- Karacaörenli, A., 2007. 50Hz Şebeke Frekanslı Elektrik Alanın Sıçanlarda Yavru Gelişimi Üzerine Etkileri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 44, Isparta
- Keikko, T., Isokorpi, J., Korpinen, L., 1999, Practical Problems in Calculating Electric Fields of Transmission Lines, Institute of Electrical and Electronics Engineers, High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication No. 467, 2.103.P6 - 2.106.P6
- Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco, J.F., Kaintzyk, U., 2003, Overhead Power Lines: Plannig, Design, Construction, Springer, 759, Berlin.
- Kimyaevi – 2010. İnternet Sitesi. <http://www.kimyaevi.org/TR/Genel/BelgeGenis.aspx?F6E10F8892433CFF8007620E7D5602E83DB31F6A1D609AA7>. Erişim Tarihi: 24.06.2010.
- Kodali, P.V., 2001, Engineering Electromagnetic Compatibility, Wiley-IEEE Press, 476, New York.
- Kumar S.R.S., Kumar A.R.S, 2006, Design of Steel Structure, İnternet Sitesi, <http://www.scribd.com/doc/26564920/2-Material-Properties>, Erişim Tarihi: 15.11.2010.
- Mamishev, A.V., Nevels, R.D., Russel, B.D., 1996, Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Field, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, 1571-1576.
- Marincu, A., Greconici, M., Muşuroi, S., 2005, The Electromagnetic Field Around a High Voltage 400kV Electrical Overhead Lines and the Influence on the

- Biological Systems, Facta universitatis - series: Electronics and Energetics, vol. 18, no. 1, 105-111.
- Massoud, H., Durney, C.H., Iskander, M.F., 1984, Limitations of the Cubical Block Model of Man in Calculating SAR Distributions, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 0018-9480/84/0800-0746, 746-752.
- McKetta, J.J., 1997, Encyclopedia of Chemical Processing and Design, CRC Pres, 536, New York.
- Metalprices – 2010. İnternet Sitesi. <http://www.metalprices.com>. Erişim Tarihi: 22.06.2010.
- Moore, G. F. (1997), BICC Electric Cables Handbook, Blackwell, 1120, Great Britain.
- Morton, A.B., From Kelvin to HVDC: Optimising the Electrical Design of Transmission Links, <http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec06/htdocs/content/pdf/142.pdf>, Erişim Tarihi: 13.11.2010.
- Li, L., Gao, Y., 1998, Analysis of Magnetic Field Environment Near High Voltage Transmission Lines, International Conference on Communication Technology, S26-05, 1-5.
- Olsen,R.G., 1993, Electromagnetic Fields From Power Lines, Institute of Electrical and Electronics Engineers, CH3310-0/93/0000-0025, 138-143.
- Rako, V.A., Uman, M.A., 2007, Lightning: physics and effects, Cambridge University Press, 700, New York.
- Sadiku, M.N.O., 2000, Numerical Techniques in Electromagnetics, Second Edition, CRC Press, 760, U.S.A
- Schmitt R., 2002, Electromagnetic Explained, Newnes, 410, U.S.A
- Seslisözlük – 2010. İnternet Sitesi. <http://www.seslisozluk.com/search/Catenary>. Erişim Tarihi: 14.11.2010.
- Sevgi L., 2004. EMC ve Korunma yöntemleri: (I) Ekranlama, <http://www3.dogus.edu.tr/lsevgi/>. Erişim Tarihi: 14.06.2009.
- Singh, R.S., 2008. Transmission Line, <http://www.slideshare.net/singh1515/transmission-line>, Erişim Tarihi: 05.07.2010.
- Stewart, J.R., Oppel, L.J., 1996, Electric and Magnetic Fields From Overhead Transmission Lines, Power Technologies, Inc., 1-9.

Wikipedi – 2010. İnternet Sitesi. http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_iletim_hattı.
Erişim Tarihi: 13.11.2010.

World Health Organization – 2007. İnternet Sitesi.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs322/en/index.html>.
Erişim Tarihi: 06.11.2010.

Zemlyaric, B., 2010, Calculation of the Connected Magnetic and Electric Fields Around an Overhead-Line Tower for an Estimation of Their Influence Maintanance Personel, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Delivery, no. TPWRD-00910-2008, 1-8.

EKLER

EK-1

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%bakır ve demir için geniş frekans aralığında farklı ekran  
%kalınlıklar ile elektrik ve manyetik alanı ekranlama etkinliği  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all; % değişkenleri sıfırla  
close all; % açık pencereleri kapat  
  
eps0=8.854187816997944e-12;  
limitim = 1e5; % denenecek frekans üst limiti  
t = [ 0.2 0.02 0.002 ]; % ekran kalınlığı (cm)  
f = (1:1:limitim); %frekans vektörü (Hz)  
sigmar = [1 0.17]; % bakır ve demir için iletkenlik  
mur = [1 1000]; % bakır ve demir manyetik geçirgenlik  
r1 = 1;  
sonuce = zeros(3,limitim,2); % elektrik alanı sonuç vektörü  
sonuch = zeros(3,limitim,2); % manyetik alanı sonuç vektörü  
c = 3e8; % ışık hızı  
  
absorb = 3.34*t*sqrt(mur*sigmar*f); % soğurulma kaybı  
  
sae = 332 - 10*log10((mur*r1^2*f^3)/sigmar); % elektrik alan için  
yansımaya kaybı  
  
sbh = 15 - 10*log10(mur/(r1^2*f*sigmar)); % manyetik alan için  
yansımaya kaybı  
  
v = c*sqrt((2*pi*f*eps0) / sigmar);  
  
sir = abs(20*log10(1-(((v-1)/(v+1))*exp(-  
2*t*(1+j)*sqrt(pi*f*mur*sigmar))))); % iç yansımaya kaybı  
  
sonuce = sae + absorb + sir; % toplam elektrik alan ekranlama  
etkinliği  
  
sonuch = sbh + absorb + sir; % toplam manyetik alan ekranlama  
etkinliği  
  
figure; % yeni pencere oluştur  
plot(f, sonuce(1, :, 1), 'b', f, sonuch(1, :, 1), 'r', f, sonuce(2, :, 1), 'b--  
, f, sonuch(2, :, 1), 'r--', f, sonuce(3, :, 1), 'b-.', f, sonuch(3, :, 1), 'r-  
.');  
set(gca, 'XScale', 'log');  
xlabel('Frekans[Hz]', 'fontsize', 14);  
ylabel('Ekranlama Etkinliği[dB]', 'fontsize', 14);  
h_legend=legend('E-alanı, t = 2mm', 'H-alanı, t = 2mm', 'E-alanı, t =  
0.2mm', 'H-alanı, t = 0.2mm', 'E-alanı, t = 0.02mm', 'H-alanı, t =  
0.02mm');
```

EK - 2

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% elektrik alan şiddeti hesaplaması
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

close all; % değişkenleri sıfırla
clear all; % açık pencereleri kapat
eps0=8.854187816997944e-12; % F/m
% xx - iletkenin yatay pozisyonu
% h - iletkenin dikey pozisyonu (yerden yükseklik - klerans)
% klerans = en alttaki iletkenin ortasından yere uzaklık
% bu örnekte toplam 6 iletken simetrik olarak bulunmaktadır
xx = [ -7.25 -7.25 -7.25 7.25 7.25 7.25 ];
% ve yükseklikleri
h = [ 10.1 20.6 31.1 31.1 20.6 10.1 ];
d = 0.02773; % iletken çapı (cm)
V = 132000; % her iletkenindeki gerilim (V)
y = 1; % ölçüm yapılacak nokta - burada yerden 1m yükseklikte ölçüm
yapılmaktadır (m)

limit=50; % test edilen yatay max uzaklık; -limit : hat merkezi :
limit
% p katsayı matrisinin hesaplanması:

p = (1/(2*pi*eps0))*log(sqrt((xx(1)-xx(2))^2 + (h(1)+h(2))^2) /
sqrt((xx(1)-xx(2))^2 + (h(1)-h(2))^2));
Q = inv(p)*V % her iletken üzerindeki yük

% yatay olarak soldan ve sağdan R metre uzaklıkta elektrik alan
şiddetini ölç.

r = r+1; % elektrik alan matrisi için sayaç
r1 = ((x-xx)^2+(y-h)^2);
r2 = ((x-xx)^2+(y+h)^2);
% her iletkenin ex ve ey vektörleri toplanır
ex = ex + (Q/(2*pi*eps0))*(((xx-x))/r1 - ((xx-x))/r2);
ey = ey + (Q/(2*pi*eps0))*((y-h)/r1 - (y-h)/r2);
elektrik = sqrt(ex^2+ey^2); % elektrik alanı şiddeti yedeklenir

meshc(X,Y,elektrik/1000) % kV/m cinsinden olması için 1000'e böl
grid on;
xlabel('Uzaklık[m]', 'fontsize', 13);
ylabel('Direğe Doğru[m]', 'fontsize', 13);
set(gca, 'XTick', [-50:20:50]); % aralıkları göster
set(gca, 'YTick', [0:2:10]);

figure; % yeni pencere aç

% orta noktadan yatay uzaklıkta elektrik alan şiddeti
% mesh'in önden görünümü
plot((-limit:1:limit), (elektrik(1,:)/1000), 'linewidth', 2);
hold on; % pencereye görüntü eklemesi için beklet

% elektrik direğinden yatay uzaklıkta elektrik alan şiddeti
% mesh'in arkadan görünümü
```

```
plot((-limit:1:limit), (elektrik(end,:))/1000, 'r', 'linewidth', 2);  
hold off;  
grid on;  
legend('h = 10.1m', 'h = 19.8m'); % renklerin ait olduğu yüksekliği  
göster  
xlabel('Uzaklık[m]', 'fontsize', 13);  
ylabel('Elektrik Alan[kV/m]', 'fontsize', 13);
```

EK-3

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% manyetik alan şiddeti hesaplaması
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

close all
clear all
f = 50; % çalışılan frekans (Hz)
I = 400; % sistemdeki akım (Amper)
mu0 = 4*pi*1e-7; % manyetik geçirgenlik (N / A^2)
% xx - iletkenin yatay pozisyonu
% h - iletkenin dikey pozisyonu (yerden yükseklik - klerans)
% klerans = en alttaki iletkenin ortasından yere uzaklık
% bu örnekte toplam 3 iletken simetrik olarak aynı hizada
bulunmaktadır
xx = [0 -8.5 8.5 ]; % (m)
% ve yükseklikleri
h = [5.5 5.5 5.5]; % (m)

y = 1.8;% ölçüm yapılacak nokta - burada yerden 1.8m yükseklikte
ölçüm yapılmaktadır (m)
sinir = 100; % test edilen yatay max uzaklık; -limit : hat merkezi
: limit
iletkenlik = 0.025; % zeminin iletkenliği

% denklemdeki değişkenlerin ilk değerlerinin bulunması
sigma = 503*sqrt(1 /iletkenlik * f);
alfa = sqrt(2)*sigma*exp(-1i*(pi/4));

% yatay olarak soldan ve sağdan i metre uzaklıkta her noktadaki
manyetik alan bileşeni hesaplanır
r = r+1; % manyetik alan matrisi için sayaç

r1 = ((x-xx)^2+(y-h)^2);
r2 = ((x-xx)^2+(y+h+alfa)^2);

% her iletkenin mx ve my vektörleri toplanır
mx = mx + (- 2*I*( ( (y - h)) / r1 ) - ( (y + h + alfa ) / r2 ));
my = my + 2*I*( ( (x - xx) / r1 ) - ( (x - xx) / r2 ));

manyetik = sqrt(mx^2+my^2); % manyetik alanı şiddeti yedeklenir

meshc(X,Y,manyetik*1e-3) % sonucu mG olan manyetik alanın Gauss
olması için 1e-3 ile çarp

grid on;
zlabel('Manyetik Alan [Gauss]','fontsize',13);
xlabel('Uzaklık[m]','fontsize',13);
ylabel('Direğe doğru[m]','fontsize',13);

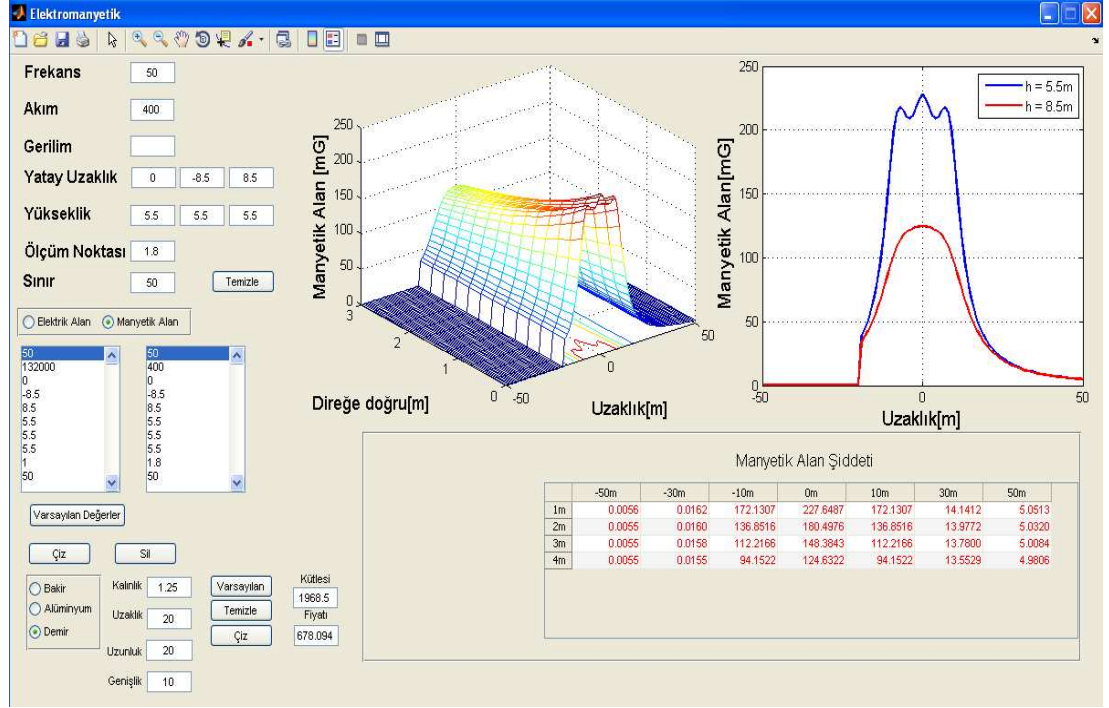
figure; % yeni pencere aç

% orta noktadan yatay uzaklıkta manyetik alan şiddeti
% mesh'in önden görünümü
plot([-sinir:1:sinir],(manyetik(1,:))*1e-3,'linewidth',2);
hold on; % pencereye görüntü eklemesi için beklet
```

```
% elektrik direğinden yatay uzaklıkta manyetik alan şiddeti
% mesh'in arkadan görünümü
plot([-sinir:1:sinir], (manyetik(end,:))*1e-3, 'r', 'linewidth', 2);
hold off;
grid on;
legend('h = 5.5m', 'h = 8.5m'); % renklerin ait olduğu yüksekliği
göster
xlabel('Uzaklık[m]', 'fontsize', 14);
ylabel('Manyetik Alan[Gauss]', 'fontsize', 14);
```

EK – 4

%%
% Elektrik ve manyetik alanı şiddeti ve onların ekranlanmasının tek
% Matlab arayüz programında gösterimi
%%



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Ruslan ABDULLA

Doğum Yeri ve Yılı: Oğuz / Azerbaycan - 1984

Medeni Hali: Bekâr

Yabancı Dili: İngilizce

Rusça



Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Denizli Lisesi (2002)

Lisans : Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Bilgisayar
Mühendisliği Bölümü (2008)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

06.2005 – 09.2005 Kaliptus / Antalya, Rusça tercümanlık

01.2009 – halen Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme
Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi