

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TV/RADYO VERİCİLERİNDEN KAYNAKLANAN ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİ

ÖLÇMELERİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisi Ekrem EYÜBOĞLU

OCAK 2010
TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TV/RADYO VERİCİLERİNDEN KAYNAKLANAN ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİ
ÖLÇMELERİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Elektrik-Elektronik Mühendisi Ekrem EYÜBOĞLU

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30.12.2009
Tezin Savunma Tarihi : 21.01.2010**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Haydar KAYA

Jüri Üyesi : Doç. Dr. İ. Hakkı ÇAVDAR

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Cemal KÖSE

M. Kaya
İ. Hakkı Çavdar
Cemal Köse

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nda hazırlanmıştır. Çalışmamda Trabzon – Boztepe Mevkii'nde bulunan TV/Radyo verici anten kuleleri etrafında elektrik alan şiddeti ölçümleri yapılmış ve sonuçlar limit değerlerle karşılaştırılarak, bu bölge için 2-ışınlı yayılım modelinin uygunluğu değerlendirilmiştir. Tez çalışmam süresince bilimsel desteği ve değerli düşünceleriyle bana her aşamada yardımcı olan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Haydar KAYA'ya teşekkür ederim.

Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim. Bu tezin, bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ekrem EYÜBOĞLU
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Elektromanyetik Dalgaların Genel Özellikleri	1
1.1.1. Elektrik Alanı.....	1
1.1.1.1. Elektriksel Geçirgenlik	2
1.1.1.2. İletkenlik	2
1.1.2. Manyetik Alan	3
1.2. Düzlem Dalganın Özellikleri	3
1.2.1. Elektrik ve Manyetik Alan İfadeleri	4
1.2.2. Dalga Empedansı	5
1.2.3. Poynting Vektörü	6
1.2.4. Faz Hızı.....	6
1.3. Temel Anten Parametreleri	7
1.3.1. Giriş	7
1.3.2. Işıma Paterni	7
1.3.3. Alan Bölgeleri.....	10
1.3.4. Işıma Şiddeti (U).....	11

1.3.5.	Yönelticilik (D).....	12
1.3.6.	Kazanç (G).....	13
1.3.7.	Bandgenişliği	13
1.3.8.	Kutuplanma.....	14
1.4.	Radyo Dalgalarının Yayılımı.....	15
1.4.1.	Yayılım, Güç Yoğunluğu ve Alan İfadeleri Arasındaki İlişki.....	16
1.4.2.	Friis İletim Denklemi.....	19
1.4.3.	Radyo Dalgaları İçin Frekans Bandlarının Sınıflandırılması	21
1.4.4.	Yeryüzü Yakınında Radyo Dalgası Yayılımı	22
1.4.5.	Yayılım Yöntemleri	25
1.4.5.1.	Sınırlı Bir Yüzeyden Yansıma.....	25
1.4.5.2.	Düzgün Yeryüzü Üzerinde Radyo Dalgası Yayılımı	27
1.4.5.3.	Açık-Alan Test Mesafe Modeli	36
1.4.5.4.	Belirli Uzaklıktaki Alan Şiddetinin Tahmini.....	37
1.5.	TV/Radyo Yayını ve İletişim İçin VHF ve UHF Antenler.....	41
1.5.1.	Tasarımda Sistem Kararlılığı	41
1.5.2.	Güvenlik.....	43
1.5.3.	Yayılım	43
1.5.4.	Kutuplanmanın Seçimi	43
1.5.5.	Linklerde ve TV/Radyo Yayınında Kullanılan Antenler.....	44
1.5.6.	TV/Radyo Yayını Antenlerinde Paternin Belirlenmesi	48
1.5.6.1.	Azimut Paterninin Belirlenmesi.....	49
1.5.6.2.	Elevasyon Paterninin Belirlenmesi	50
1.5.7.	TV/Radyo Yayın Sistemleri.....	50
1.5.8.	Noktadan-Bölgeye İletişim	52
1.6.	Literatür Araştırması.....	54
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	56

2.1.	Materyal	56
2.2.	Yöntem.....	57
2.2.1.	Elde Edilen Ölçüm Sonuçları	57
2.2.2.	Matlab Programı	74
2.3.	Ölçümlerin Değerlendirilmesi	76
3.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR	86
4.	ÖNERİLER.....	88
5.	KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Elektromanyetik dalgalar günümüz kablosuz haberleşmesinin temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle elektromanyetik dalgaların yapısı ve haberleşmeyi sağlayan yayılma özellikleri sıklıkla incelenmektedir. En temel yayılım şekli olan serbest uzay yayılımı, sistemlerin tasarımında genel bir bilgi vermesi açısından kullanılmaktadır. Ancak alıcı ve verici arasındaki linki, yalnızca verici antenden alıcı antene ulaşan direkt bir dalga ile düşünmek birçok uygulamada yetersiz kalacaktır. Kablosuz iletişim ve yaşam alanlarının iç içe olduğu sistemlerde elektromanyetik dalgaların bulundukları ortama etkileri de yine incelenmesi gereken bir konudur. Zira gündelik hayatta frekans spektrumunun çok büyük bir kullanım alanı bulan UHF ve VHF bandlarında hizmet veren tüm sistemler için ulusal ve uluslar arası sınırlamalar mevcuttur. Bu sınırlamaların esasını güvenlik mesafesi ve sınır değerler olarak belirlenen elektrik alan şiddeti veya güç yoğunluğu değerleri oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Trabzon – Boztepe Mevkii'nde bulunan TV/Radyo verici kulelerinin çevrelerinde oluşturdıkları elektrik alan şiddetinin belirlenmesi, sınır değerler açısından değerlendirilmesi ve temel yayılım yöntemlerinden olan 2-ışınlı yayılım modeli ile yapılan hesaplamaların ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması üzerine çalışıldı. 2-ışınlı model, serbest uzay yayılımından farklı olarak yerden yansıyan dalgayı da hesaba kattığından gerçek değerlere yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. 2-ışınlı modelde gereken hesaplamalar formüllerde varsayımlar ve kısaltmalar olmadan bir matlab programı ile ele alınmıştır. Çalışmada ayrıca TV/Radyo yayınının temel ilkeleri ve çalışılan bandlarda elektrik alan şiddeti tahmininde kullanılan bazı yöntemlerden bahsedilmiştir.

Farklı tarihlerde yapılan ölçümler ve verici antenler ile ilgili elde edilebilen bilgilere dayanarak yapılan hesaplamalar sonunda elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Ölçüm yapılan bölge için 2-ışınlı modelin TV yayınları açısından daha uygulanabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca ölçüm sonuçları ICNIRP ve IEEE referans alınarak oluşturulan bir sınırlama testine tabi tutulmuştur. Elde edilen değerlerin tamamı sınır değerlerin altındadır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik dalga, Yayılım, TV/Radyo yayını, 2-ışınlı model

SUMMARY

Measurements of TV/Radio Transmitters - Induced Electric Field Strength and Evaluation of Results

Electromagnetic waves underlie the present-day wireless communication. Thus, structure of electromagnetic waves and their propagation features that obtain communication are examined frequently. Free space propagation which is the essential type of propagation is used to get general information about design of systems. But for many applications, considering link from transmitter to receiver as only free space comes up short. In a system that wireless communication and living spaces are nested, the effects of electromagnetic waves to the environment which waves exist must also be examined. Because there are lots of national and international limitations for all services that operate in the UHF and VHF bands. The limitations are based on safety distance and electric field strength or power density which are determined as limit values.

In this thesis, it was studied on the determination of the electric field strength which is produced by the broadcast transmitter antenna masts at the Trabzon – Boztepe region, evaluation of these measured values according to limitations and comparison of the measured results with the calculated values of 2-ray propagation method. In 2-ray propagation method, not only direct way but also reflected wave from the ground is considered. So there will be more accurate results unlike the free space propagation. The calculations which are based on 2-ray propagation method are made by a matlab program without assumptions and shortenings. The basis of broadcasting and some electric field strength prediction methods for used bands are also mentioned.

The values that measured on different dates and the calculated values that based on the information about broadcast transmitter antennas were compared. It was determined that 2-ray propagation method was more suitable for TV broadcasting services at region where measurements were done. Also the measured values were tested with a limitation that uses ICNIRP and IEEE as references. All the results were below the limitations.

Key Words: Electromagnetic wave, Propagation, Broadcast, 2-ray propagation method

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Elektrik alanı, manyetik alan ve poynting vektörlerinin gösterimi	1
Şekil 1.2. Uzayda yayılan düzlem dalganın anlık görüntüsü	4
Şekil 1.3. Anten ışıma paterninin küresel ve kartezyen koordinatlarda gösterimi (a) Anten paterninde kulaklar ve demet açıklıkları (b) Güç paterninin doğrusal çizimi	9
Şekil 1.4. Yönsemez anten paterni	10
Şekil 1.5. Antenin alan bölgeleri	11
Şekil 1.6. Verici ve alıcı arasında uzay dalgası modunda yayılım	23
Şekil 1.7. Verici ve alıcı arasında gök dalgası modunda yayılım	23
Şekil 1.8. Verici ve alıcı arasında yüzey dalgası modunda yayılım	24
Şekil 1.9. Sonlu bir yüzeyden yansıma ve bir açıklıktan kırılmanın karşılaştırılması	26
Şekil 1.10. 2-ışınlı yayılım modeli	28
Şekil 1.11. 2 katmanlı yer yüzeyinde yayılım modeli	32
Şekil 1.12. İşaret şiddetinde yüzey dalgası dağılımının ihmal edilmesi sonucu oluşan hata	33
Şekil 1.13. $f=900\text{MHz}$ için d mesafesine bağlı serbest uzay kaybı (...), düz yeryüzü kayı (—) ve yaklaşık düz yeryüzü kaybı eğrileri (- - -)	35
Şekil 1.14. 75m yüksekliğe konumlandırılmış, 600Mhz’de yayın yapan ve 1000W etkin ışıma gücüne sahip bir verici antenin mesafeye bağlı oluşturacağı ortalama elektrik alan şiddeti tahmini	38
Şekil 1.15. 75m ve 300m yüksekliklere konumlandırılmış, 600Mhz’de yayın yapan ve 1000W etkin ışıma gücüne sahip verici antenlerin mesafeye bağlı oluşturacakları ortalama elektrik alan şiddeti tahmini	39
Şekil 1.16. 75m yüksekliğe yerleştirilmiş bir anten için 600MHz (koyu renkli eğri) ve 100MHz’de (açık renkli çizgi) ortalama alan şiddeti tahminleri	41
Şekil 2.1. Boztepe Mevkii TV/Radyo verici anten kuleleri	56
Şekil 2.2. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami yanı ölçüm çalışması	58
Şekil 2.3. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (174m) ölçüm çalışması	60
Şekil 2.4. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (172m) ölçüm çalışması	61
Şekil 2.5. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (160m) ölçüm çalışması	62

Şekil 2.6. Boztepe Mevkii – Askeri Kışla Girişi yanı ölçüm çalışması	63
Şekil 2.7. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı yanı ölçüm çalışması	64
Şekil 2.8. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı yanı kayalık üstü ölçüm çalışması	65
Şekil 2.9. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami yanı 2. ölçüm çalışması	67
Şekil 2.10. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (164m) ölçüm çalışması	68
Şekil 2.11. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (228m) ölçüm çalışması	69
Şekil 2.12. Boztepe Mevkii – Askeri Kışla Girişi yanı 2. ölçüm çalışması	70
Şekil 2.13. Boztepe Mevkii – Çay Bahçesi üstü ölçüm çalışması	71
Şekil 2.14. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı üstü ölçüm çalışması	72
Şekil 2.15. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı yanı 2. ölçüm çalışması	73
Şekil 2.16. Spektrum analizör modunda elde edilen örnek bir ölçüm çıktısı	74
Şekil 2.17. Elektrik alan şiddeti değerinin mesafeye bağlı olarak hesaplandığı matlab programı	75
Şekil 2.18. Ölçüm II-A, Ölçüm II-B ve Ölçüm II-C noktalarındaki ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	84
Şekil 2.19. Ölçüm I-F, Ölçüm I-G ve Ölçüm II-G noktalarındaki ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	85

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Frekans bandı sınıflandırması	21
Tablo 1.2. Mikrodalga frekans bandı sınıflandırması.....	22
Tablo 1.3. Yüzey, gök ve uzay dalgası kullanan hizmetlerin karşılaştırılması	25
Tablo 1.4. Çeşitli arazi yapıları için dielektrik sabiti ve iletkenliğin tipik değerleri.....	31
Tablo 1.5. Çeşitli sabit ve test anteni birleşimleri için n parametresi.....	37
Tablo 2.1. Ölçüm I-A bölgesinde VHF-UHF bandları için elde edilen ölçüm sonuçları...	59
Tablo 2.2. Ölçüm I-A bölgesinde FM bandı için elde edilen ölçüm sonuçları	59
Tablo 2.3. Ölçüm I-A bölgesinde UHF bandı için elde edilen ölçüm sonuçları	59
Tablo 2.4. Ölçüm I-B bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları	60
Tablo 2.5. Ölçüm I-C bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları	61
Tablo 2.6. Ölçüm I-D bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları.....	62
Tablo 2.7. Ölçüm I-E bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları	63
Tablo 2.8. Ölçüm I-F bölgesinde 1.85m alıcı anten yüksekliği için elde edilen ölçüm sonuçları.....	64
Tablo 2.9. Ölçüm I-F bölgesinde 90cm alıcı anten yüksekliği için elde edilen ölçüm sonuçları.....	65
Tablo 2.10. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten eş yönlü ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları.....	66
Tablo 2.11. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten x-ekseni ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları.....	66
Tablo 2.12. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten y-ekseni ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları.....	66
Tablo 2.13. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten z-ekseni ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları.....	67
Tablo 2.14. Ölçüm II-A bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları	68
Tablo 2.15. Ölçüm II-B bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları.....	69
Tablo 2.16. Ölçüm II-C bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları.....	70
Tablo 2.17. Ölçüm II-D bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları	71
Tablo 2.18. Ölçüm II-E bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları.....	72

Tablo 2.19. Ölçüm II-F bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları	73
Tablo 2.20. Ölçüm II-G bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları	74
Tablo 2.21. ICNIRP tarafından halka açık alanlar için ortamın toplam elektrik ve manyetik alan limit değerleri tablosu	78
Tablo 2.22. IEEE Std C95.1'e göre kontrolsüz çevrede maruz kalınabilecek maksimum limit değerler	79
Tablo 2.23. Boztepe Mevkii'nde 17.08.2009 tarihinde yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi	80
Tablo 2.24. Boztepe Mevkii'nde 07.12.2009 tarihinde yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi	81
Tablo 2.25. Bir TV istasyonu için yapılan ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.....	82
Tablo 2.26. 89.3MHz'de yayın yapan bir radyo istasyonu için ölçüm sonuçları ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.....	83
Tablo 2.27. 104MHz'de yayın yapan bir radyo istasyonu için ölçüm sonuçları ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	83

SEMBOLLER DİZİNİ

A	:	Yüzey dalgası katsayısı
B	:	Manyetik akı yoğunluğu
C	:	Rayleigh kriteri
CP	:	Dairesel kutuplanma (Circular Polarization)
D	:	Yönelticilik
E	:	Elektrik alan şiddeti
EIRP	:	Equivalent Isotropically Radiated Power
ERP	:	Effective Radiated Power
F	:	Yol kazanç katsayısı veya patern yayılım katsayısı
FNBW	:	Birinci sıfır demet açıklığı (First Null Beamwidth)
FSPL	:	Serbest uzay yol kaybı (Free Space Path Loss)
G	:	Anten kazancı
GPS	:	Global Positioning System
GSM	:	Global System for Mobile Communications
H	:	Manyetik alan şiddeti
HF	:	Yüksek frekans (High Frequency)
HPBW	:	Yarı güç demet açıklığı (Half-power Beamwidth)
ICNIRP	:	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ITU	:	International Telecommunication Union
LF	:	Düşük frekans (Low Frequency)
LPDA	:	Log-periyodik dipol dizi (Log-Periodic Dipole Array)
MF	:	Orta frekans (Medium Frequency)
P	:	Antenin toplam ışıma (çıkış) gücü
RF	:	Radyo frekansı (Radio Frequency)
RMS	:	Etkin değer (Root Mean Square)
S	:	İşıma yoğunluğu
SNR	:	İşaret-gürültü oranı (Signal to Noise Ratio)

TEM	:	Enine elektromanyetik (Transverse electromagnetics)
TV	:	Televizyon
U	:	Işıma şiddeti
UHF	:	Pek yüksek frekans (Ultra High Frequency)
UMTS	:	Universal Mobile Telecommunication System
UTM	:	Universal Transverse Mercator
VHF	:	Çok yüksek frekans (Very High Frequency)
VSWR	:	Gerilim duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio)
W	:	Watt
XPD	:	Çapraz kutuplanma ayrımı (Cross Polarization Discrimination)
A_r	:	Alıcı anten etkin yüzeyi
c	:	Işığın serbest uzaydaki hızı
d_d	:	Direkt dalganın katettiği yol
d_r	:	Yansıyan dalganın katettiği yol
dB	:	Desibel
dB _i	:	Eş yönlü antene göre desibel
dB _d	:	Yarım-dalga antene göre desibel
e_{cd}	:	Kayıpları içeren anten ışıma verimi
E_d	:	Direkt dalganın oluşturduğu elektrik alan
E_r	:	Alıcıda oluşan toplam elektrik alan
E_0	:	Elektrik alanın genliği
$\vec{E}$	:	Elektrik alanı vektörü
f	:	Frekans
F_d	:	Direkt ışın yönünde değerlendirilen anten paterni
F_r	:	Yansıyan ışın yönünde değerlendirilen anten paterni
G_r	:	Alıcı anten kazancı
G_t	:	Verici anten kazancı
h_r	:	Alıcı anten yüksekliği
h_t	:	Verici anten yüksekliği
H_0	:	Manyetik alanın genliği
$\vec{H}$	:	Manyetik alan vektörü

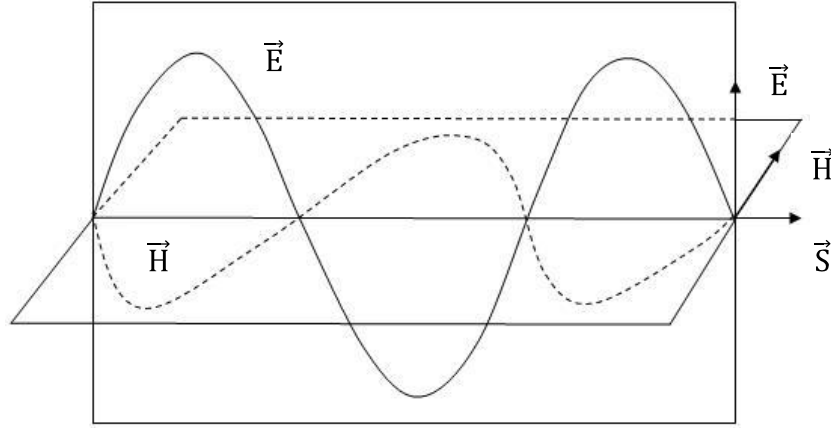
Hz	:	Hertz
k	:	Faz sabiti
L_p	:	Yol kaybı
L_{PEL}	:	Düz yeryüzü kaybı
m	:	Metre
p	:	Güç yoğunluğu
p_r	:	Alıcı antende oluşan güç yoğunluğu
P_d	:	Direkt dalga ile taşınan güç
P_i	:	Antenin giriş gücü
P_r	:	Alıcı antene ulaşan güç
P_R	:	Açık alan test mesafe modelinde güç zayıflaması
P_t	:	Verici anten tarafından iletilen güç
$P_{2-ışın}$	:	Alıcı antenin verici antene güç oranı
$\vec{S}$	:	Poynting vektörü
U_{f_G}	:	Görünür ufuk uzaklığı
U_{f_R}	:	Radio ufku uzaklığı
U_0	:	Eş yönlü antenin ışıma şiddeti
v	:	Fresnel parametresi
α	:	Zayıflama sabiti
ε	:	Malzemenin elektriksel geçirgenliği
ε_g	:	Yer yüzeyinin karmaşık dielektrik sabiti
ε_L	:	İki katmanlı yüzey için alt katman dielektrik sabiti
ε_0	:	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
ε_r	:	Bağıl geçirgenlik ve malzemenin dielektrik sabiti
η	:	Dalga empedansı
η_0	:	Serbest uzay dalga empedansı
θ	:	Gelme (teğet) açısı
θ_s	:	İki katmanlı yüzey için alt katman gelme açısı
λ	:	Elektromanyetik dalganın dalga boyu
μ	:	Manyetik geçirgenlik
μ_0	:	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
μ_r	:	Bağıl manyetik geçirgenlik

v	:	Faz hızı
ρ	:	Özdirenç
σ	:	İletkenlik
ψ	:	Yansıma katsayısı açısı
ω	:	Radyan cinsinden açısal frekans
Γ	:	Yansıma katsayısı
Δd	:	Direkt ve yansıyan ışın yol farkı
Φ	:	Faz farkı (gecikmesi)
ϕ	:	Antenden belirlenen uzaklıktaki bir referans noktanın xy-düzlemi ile yaptığı açı
Ω	:	Direnç birimi ohm

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Elektromanyetik Dalgaların Genel Özellikleri

Bir elektromanyetik düzlemsel dalga, iki dikgen ve zamanla değişen alandan oluşur. Bu alanlar “elektrik ($\vec{E}$)” ve “manyetik ($\vec{H}$)” alanlar olarak adlandırılırlar [1]. Serbest uzay yayılımı durumunda ve verici antenin uzak alan bölgesi için bu alanlar birbirlerine oldukları gibi elektromanyetik dalganın yayılım yönüne de dik olduklarından bu bileşenlerin oluşturdukları dalga, enine elektromanyetik (Transverse Electromagnetics - TEM) olarak ifade edilir. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi elektrik ve manyetik alan vektörlerinin vektörel çarpımı sonucu elde edilen ve elektromanyetik düzlemsel dalganın yayılım yönünü gösteren bileşen ise “poynting vektörü ($\vec{S}$)” dır [2].



Şekil 1.1. Elektrik alanı, manyetik alan ve poynting vektörlerinin gösterimi

1.1.1. Elektrik Alanı

Elektrik alan, bir elektrik yükü tarafından oluşturulan ve birim yüke etki eden vektörel kuvvet olarak ifade edilir. Elektrik alanın birimi olarak volt/metre [V/m] kullanılır. Elektrik alanın genel gösterimi “E” simgesi ile yapılır. Elektrik alan, akı yoğunluğuna (D) ve malzemenin elektriksel geçirgenliğine (ϵ) bağlıdır.

$$\vec{E} = \epsilon \vec{D} \quad (1)$$

Akı yoğunluğu vektörü, elektrik alan vektörü ile aynı yöne sahip olan ve şiddeti, elektrik alanı oluşturan yük ile orantılı olan bir vektördür [1].

1.1.1.1. Elektriksel Geçirgenlik

Elektrik alan yalnızca akı yoğunluğuna değil malzemenin veya elektromanyetik dalganın yayıldığı ortamın elektriksel geçirgenliğine de bağlı olduğundan bu büyüklük elektrik alanın hesabı için önemlidir. Elektriksel geçirgenlik dielektrik maddelere özgü bir özelliktir. Elektriksel geçirgenlik bir malzeme içinde sınırlanmış yüklerin sayısının bir ölçütüdür ve birimi Farad/metre [F/m]'dir. Elektriksel geçirgenlik, serbest uzayın elektriksel geçirgenliği “ ϵ_0 ” ve bağlı geçirgenlik veya malzemenin dielektrik sabiti olarak adlandırılan “ ϵ_r ” nin çarpımına eşittir [1].

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2)$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ [F/m]} \quad (3)$$

1.1.1.2. İletkenlik

Yapısında serbest halde elektron bulunduran maddelere iletken denir. İletkenler, ya iletkenlikleriyle (σ) ya da iletkenliğin tersi olan öz dirençleriyle (ρ) karakterize edilirler. İletkenliğin birimi Siemens/metre [S/m] iken öz direncin birimi ohm.metre [Ω m] olarak ifade edilir. İletkenliği çok küçük olan maddelere yalıtkan denir. Mükemmel bir yalıtkanın teoride sıfır iletkenliğe sahip olması beklenirken, uygulamada malzemeler hem bir dielektrik (yalıtkanlık) katsayısına hem de sıfırdan farklı bir iletkenlik değerine sahiptirler. Dielektrik malzemenin iletkenliği arttıkça malzeme daha kayıplı hale gelir. Elektromanyetik dalgalar açısından ideal olmayan bir malzeme ele alındığında elektriksel geçirgenlik, dielektrik sabiti, iletkenlik ve elektromanyetik dalganın frekans değerlerinden oluşan karmaşık bir sayı olarak ifade edilir [1].

1.1.2. Manyetik Alan

Manyetik alan hem bir şiddet değerine hem de yöne sahip vektörel bir büyüklüktür. Manyetik olmayan malzemeler için manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasında manyetik geçirgenlik olarak bilinen μ ile doğrusal bir ilişki mevcuttur [1].

$$B = \mu H \quad (4)$$

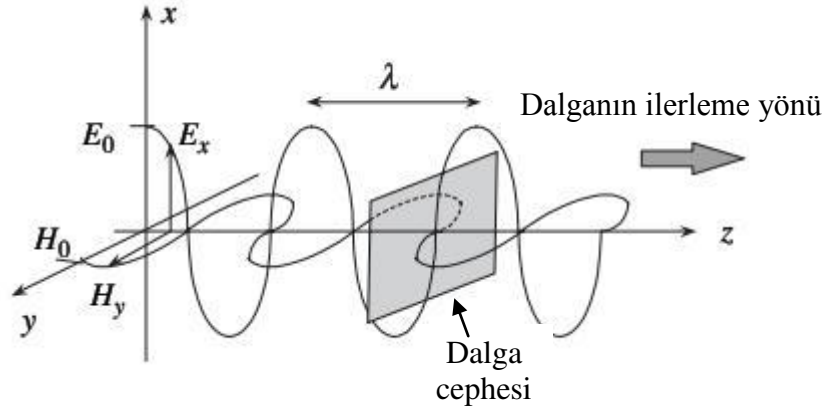
Malzemenin manyetik geçirgenliğinin birimi metre başına endüktansın birimi olan Henry/metre [H/m]'dir. Manyetik geçirgenlik, bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) ve serbest uzayın manyetik geçirgenliği (μ_0) cinsinden ifade edilir [1]. Serbest uzayın bağıl manyetik geçirgenliği 1'dir [3].

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (5)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]} \quad (6)$$

1.2. Düzlem Dalga'nın Özellikleri

Esnek olmayan bir yaklaşımla tüm dalgaların küresel olduğu söylenebilir. Ancak kaynaktan yeterli uzaklıktaki mesafelerde küresel dalga, doğrusal bileşenlerden oluşan düzlem bir dalgaya çok yakınsamaktadır ve düzlem dalga'nın analizi oldukça basittir [1]. Maxwell Denklemleri'nin birçok çözümü mevcut olup, bu çözümler uygulamada gerçekleştirilecek alanlar ortaya koyarlar. Ayrıca bu alanların tamamı, zamana bağlı çözümlerin en basit hali olan düzlem dalgaların toplamı olarak da ifade edilebilmektedir. Şekil 1.3'de $t=0$ zamanından itibaren z-eksenine paralel olarak yayılan bir düzlem dalga gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Uzayda yayılan düzlem dalğanın anlık görüntüsü [3].

Şekil 1.2’de görüldüğü gibi zamanın veya uzayın herhangi bir noktasında elektrik ve manyetik alanlar aynı fazdadırlar. Sözü geçen alanların xy düzleminde genlikleri sabittir. Sabit fazların oluşturduğu dalga cephesi xy düzlemine paralel bir düzlem meydana getirir. Bu da düzlem dalga teriminin esasını oluşturmaktadır. Maxwell denklemleri gereğince; salınım yapan bir elektrik alan daha sonra tekrar aynı elektrik alanı oluşturacak bir manyetik alan üretir. Elektrik ve manyetik alanlar arasındaki bu etkileşim sonucu enerji muhafaza edilir ve güç, poynting vektörü boyunca taşınabilir. Sonuç olarak dalğanın özelliklerinden genlik, frekans ve faz çeşitli biçimlerde ayarlanarak kablosuz iletişimin temelini oluşturan sistem, yani bilginin kaynaktan hedefe ulaşması sağlanmış olur [3].

1.2.1. Elektrik ve Manyetik Alan İfadeleri

Düzlemsel bir dalgada elektrik alanı ifadesi Şekil 1.2 esas alınarak şu şekildedir:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) \hat{x} \quad (7)$$

E_0 , [V/m] cinsinden elektrik alanının genliğini; f [Hz], frekans olmak üzere $\omega = 2\pi f$, radyan cinsinden açısal frekansı; t , saniye cinsinden geçen zamanı; z , [m] cinsinden z -ekseni üzerindeki mesafeyi; k , [rad/m] cinsinden faz sabitini ve $\hat{x}$ de x -ekseninin pozitif yönündeki birim vektörü ifade etmektedir.

Faz sabiti, alanın belirli bir mesafeyi kat ettikten sonra fazında meydana gelen değişimin bir oranıdır. Örneğin; r metrelik bir mesafe için dalğanın fazında, kr radyanlık bir değişim gözlenecektir. Dalğanın fazının 2π değiştiği mesafeye dalga boyu (λ) denir.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

Manyetik alan vektörü $\vec{H}$ da benzer şekilde ifade edilebilir:

$$H = H_0 \cos(\omega t - kz) \hat{y} \quad (9)$$

H_0 , manyetik alanın genliğini ve $\hat{y}$ de y-ekseninin pozitif yönündeki birim vektörü ifade eder.

Eşitlik 7 ve 9'da dalganın kayıpsız bir ortamda yayıldığı varsayılmıştır. Bu sebeple ifadelerden de anlaşılacağı gibi dalganın genliği mesafe ile değişmemektedir. Alan ifadeleri, yalnızca zamana ve mesafeye bağlı sinüzoidal bir değişim göstermektedir.

Elektrik ve manyetik alan büyüklüklerinin kayıplı ortamlar için karmaşık ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$E = E_0 \exp[j(\omega t - kz) - \alpha z] \hat{x} \quad (10)$$

$$H = H_0 \exp[j(\omega t - kz) - \alpha z] \hat{y} \quad (11)$$

α , kayıplı ortamın zayıflama sabitidir ve birimi Neper/metre [Np/m] veya desibel/metre [dB/m]'dir. Dalganın yayıldığı ortam kayda değer miktarda iletken ise dalganın taşıdığı enerjinin bir kısmı dalgadan ayrılarak ısıya dönüşür ve sonuç olarak böyle bir ortamda yayılma esnasında dalganın genliğinde azalma gözlenir [3]. Radyo dalgaları göz önüne alındığında manyetik alandan neredeyse söz edilmez [4].

1.2.2. Dalga Empedansı

Maxwell denklemlerini sağlayan denklemler 7 ve 9, verilen bir ortam için alan genliklerinin oranının sabit olduğunu ortaya koymaktadır.

$$\frac{|E|}{|H|} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{E_0}{H_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \eta \quad (12)$$

Yukarıdaki eşitlikten elde edilen η , “dalga empedansı” veya “serbest uzay empedansı” olarak adlandırılır ve birimi ohm $[\Omega]$ ’dur. Serbest uzayın bağıl dielektrik katsayısı ve bağıl manyetik geçirgenliği 1 olduğundan;

$$\eta = \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377\Omega \quad (13)$$

olur. Serbest uzayda veya aynı yapıya sahip bir ortamda düzlem bir dalga için tüm alan ifadeleri yerine yalnızca bir alan ifadesi ve dalga empedansının belirtilmesi yeterli olacaktır [3].

1.2.3. Poynting Vektörü

Birimi $[W/m^2]$ olan Poynting vektörü “ $\vec{S}$ ”, xy düzlemine paralel olan düzlem alanının metre kare başına, taşıdığı güç akışının genliğini ve yönünü tanımlar. Diğer bir deyişle bu vektör dalganın güç yoğunluğunun bir ifadesidir. Güç yoğunluğunun anlık değeri şu şekildedir:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}^* \quad (14)$$

Güç yoğunluğunun genellikle bir periyotluk ortalama değeri aşağıdaki denklemdeki gibi kullanılır:

$$S_{av} = \frac{1}{2} E_0 H_0 \hat{z} \quad (15)$$

Denklem 15’de kullanılan alan ifadeleri tepe değerleri işaret etmektedir [5]. Poynting vektörünün yönü sağ el kuralı ile bulunabilir [3].

1.2.4. Faz Hızı

Faz hızı, $\vec{S}$ vektörü yönünde ilerleyen dalga cephesi üzerindeki sabit fazlı bir noktanın hızı olarak tanımlanabilir [3]. Düzlem dalganın belirli bir noktası ele alındığında

" $kx - \omega t$ " faz ifadesi, sabit olduğu sürece $\cos(kx - \omega t)$ ifadesi aynı değeri verecektir. Yani aynı noktanın ilerlemesi takip edilmiş olur. Bu noktanın hızı hesaplandığında,

$$kx - \omega t = s \quad (16a)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (16b)$$

denklemleri ile faz hızı [m/s] elde edilir [6]. Böylelikle dalga boyu (λ) aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (17)$$

Ortamın serbest uzay olarak kabul edilmesi durumunda, bir elektromanyetik dalga olan ışığın serbest uzaydaki hızı, yani $c = 3 \times 10^8$ m/s elde edilmiş olur.

1.3. Temel Anten Parametreleri

1.3.1. Giriş

Bir antenin başarımını tanımlayabilmek için çeşitli parametrelerin tanımları gereklidir. Bu parametrelerin bazıları birbiriyle ilişkilidir ve bu nedenle bir antenin toplam başarımının ifade edilebilmesi için parametrelerin tamamının belirtilmesi ihtiyacı yoktur. Anten parametrelerinin tanımlanmasında IEEE Std. 145-1973 (IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas) standardının değişiklik yapılmış hali olan IEEE Std. 145-1983 standardı dikkate alınacaktır.

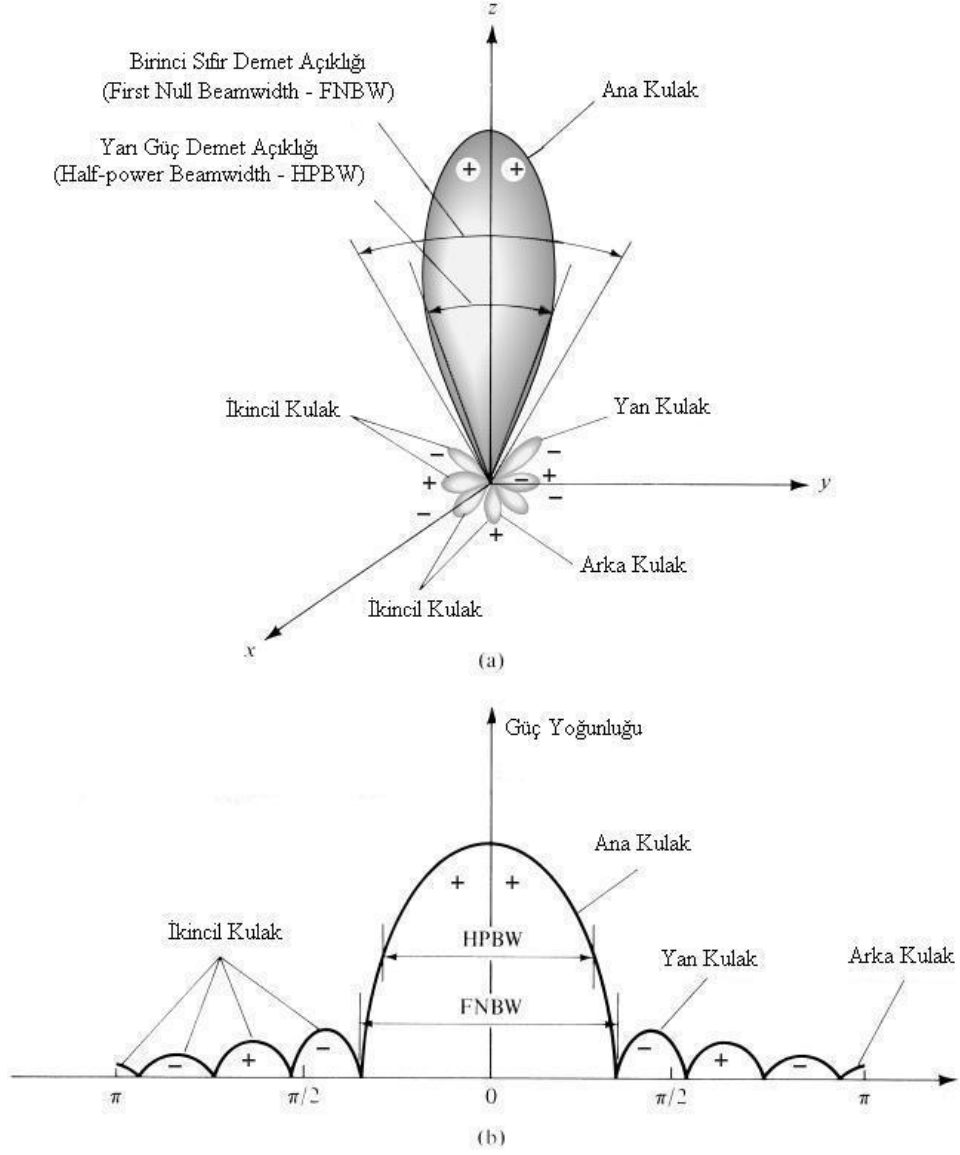
1.3.2. Işıma Paterni

Anten paterni olarak da kullanılan bu parametre, anten tarafından üretilen elektromanyetik alanı nitelendiren bir büyüklüğün uzamsal dağılımını ifade etmektedir. Bu dağılım matematiksel bir fonksiyon veya grafiksel olarak belirtilebilmektedir. Antende meydana gelen ışımının nitelendirilmesinde sıklıkla kullanılan büyüklükler, güç akısı

yoğunluğu, ışıma şiddeti, yönelticilik, faz, kutuplanma ve alan şiddeti ile ya orantılı ya da eşittir. Herhangi bir yüzey veya yol üzerindeki uzamsal dağılım da anten paterni olarak nitelendirilebilir. Elektrik alan vektörünün belirlenmiş bir bileşeninin bağıl veya gerçek genliği kullanılarak ışıma paterni çizimi yapıldığında, genlik paterni, alan paterni veya gerilim paterni olarak adlandırılır. Bağıl veya gerçek genliğin karesi kullanılarak yapılan çizimlere ise güç paterni denilmektedir [7].

Birçok durumda ışıma paterni uzak alan bölgesi için belirlenir. Alan ve güç paternleri sıklıkla maksimum değerlerine göre normalize edilerek, normalize alan ve güç paterni olarak kullanılır. Ayrıca düşük seviyeli kulaklar için daha fazla detayın ortaya koyulabilmesi açısından güç paterni logaritmik ölçeklendirme ile desibel (dB) değeriyle çizilir.

Şekil 1.3 (a) anten paterninin küresel koordinatlarda gösterimi, Şekil 1.3 (b) ise kutupsal koordinatlar için gösterimidir. Şekil 1.3’de görülen yarı güç demet açıklığı; alan paterni için maksimum ışıma değerinin 0.707 katına indiği değer aralığının, doğrusal güç paterni (normalize patern) için maksimum değer 0.5 katına indiği değer aralığının ve logaritmik güç paterni için maksimum değer 3dB aşağısındaki değer aralığının açı cinsinden ifadesidir.



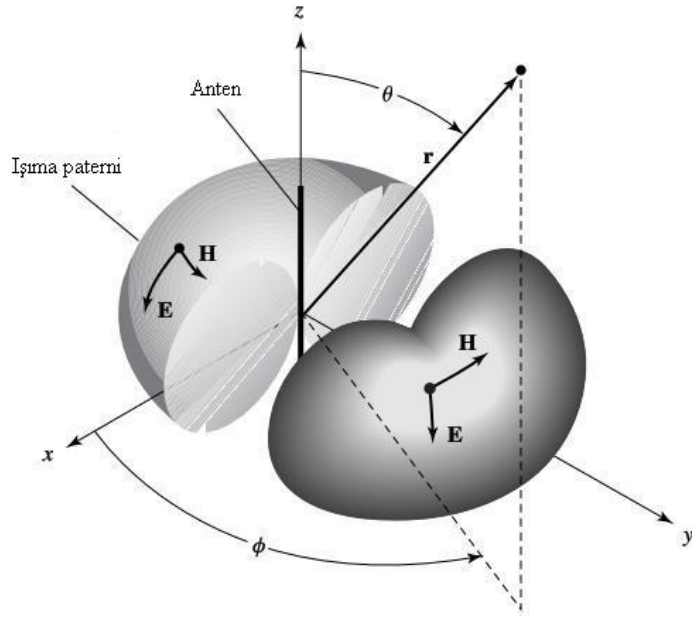
Şekil 1.3. Anten ışıma paterninin küresel ve kartezyen koordinatlarda gösterimi (a) Anten paterninde kulaklar ve demet açıklıkları (b) Güç paterninin doğrusal çizimi [5].

Birinci sıfır demet açıklığı, patern değerinin sıfıra ilk düştüğü değer aralığının açı cinsinden ifadesidir. Ana kulak maksimum ışıma doğrultusundaki kulağı temsil ederken, yan kulak terimi istenen kulaklar haricindekileri, ikincil kulak ise ana kulak harici kulakları ifade etmektedir. Ana kulağın 180° ters yönündeki ikincil kulak ise arka kulaktır.

Uygulamada aksi belirtilmedikçe demet açıklığından kastedilen yarı güç demet açıklığıdır.

Şekil 1.4’de gösterilen ışıma paterni yönsemez bir antene aittir. Şekilde, antenden r kadar uzaklıkta belirlenen bir nokta için anten merkezinden referans noktaya doğru

oluşturulan doğrultunun z-ekseni ile yaptığı açı θ , xy-düzlemi ile yaptığı açı ϕ olarak ifade edilmektedir. Paternin yönsemez olması, azimut düzleminde (xy düzlemi) yönsemez iken bu düzleme dik olan elevasyon düzleminde (zy düzlemi) yönlü bir özellik göstermesi demektir. Bir başka deyişle yönsemez anten, yönlü antenin özel bir halidir. Yönlü anten ise, diğer yönlerle göre belirlenmiş bir yönde daha etkin elektromanyetik dalga ışıması ve alımı yapan antendir.



Şekil 1.4. Yönsemez anten paterni [5].

Üçüncü bir çeşit ve referans olarak kullanılan patern ise eş-yönlü anten paternidir. Eş-yönlü anten teorik olarak tüm yönlerle kayıpsız eşit şekilde ışıma yapabilir [5].

1.3.3. Alan Bölgeleri

Bir anteni çevreleyen boşluk Şekil 1.5’de gösterildiği gibi genellikle 3 bölgeye ayrılır:

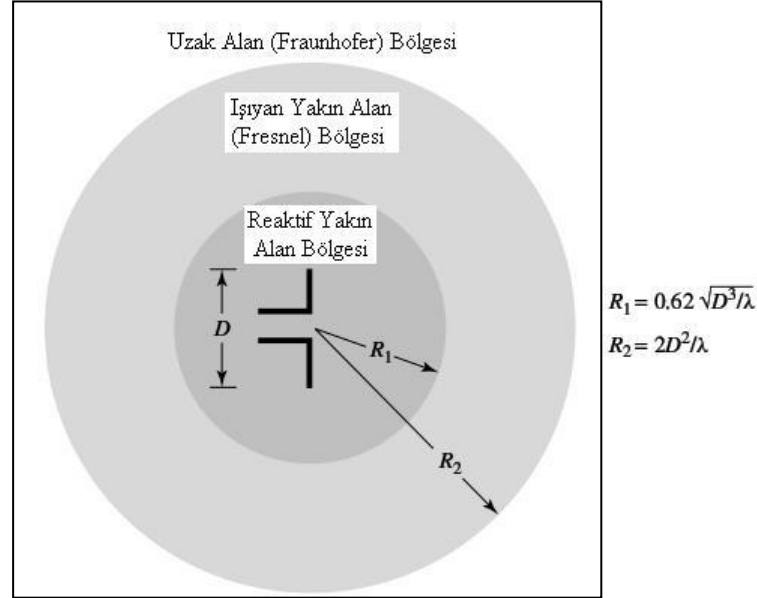
- Reaktif yakın alan
- Işıyan yakın alan (Fresnel)
- Uzak alan (Fraunhofer)

Reaktif yakın alan: Antenin bu bölgesi antenden hemen sonra başlar. Bu bölgede, anteni çevreleyen reaktif alanı oluşturan elektrik ve manyetik alan, elektromanyetik ışıma yapmaktan çok bu enerjiyi depo eder.

Işıyan yakın alan: Işıma yapan alanların baskın ve açısal alan dağılımının anten ile belirlenen bir nokta arasındaki mesafeye bağlı olduğu bölgedir [5].

Uzak alan: Açısal alan dağılımının, temelde anten ile belirlenen bir nokta arasındaki mesafeden bağımsız olduğu bölgedir [7].

Şekil 1.5’de bölgelerin sınırları dalga boyu λ ve maksimum anten boyutu D ile orantılanarak R_1 ve R_2 olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.5. Antenin alan bölgeleri [5].

Şu unutulmamalıdır ki belirten sınırlar Şekil 1.5’de gösterildiği gibi kesin hatlarla birbirlerinden ayrılmamaktadır.

1.3.4. Işıma Şiddeti (U)

Işıma şiddeti, belirlenen bir yönde birim katı açı başına ışınlanan gücü ifade eder [7]. Işıma şiddeti bir uzak alan parametresidir ve basitçe ışıma yoğunluğunun, mesafenin karesi ile çarpımıyla elde edilir.

$$U = r^2 S \text{ [W/birim katı açı]} \quad (18)$$

Birim katı açı Ω $[1/4\pi]$, bir kürenin yüzeyinde belirlenen alanı oluşturan yayların bitiş noktalarından geçen ışınların, küre merkezinde oluşturdıkları açıdır. Bir başka deyişle 3-boyutlu uzayda 2-boyutlu bir açıyı ifade eder.

Toplam ışıma gücü, ışıma şiddetinin 4π 'lik tüm katı açı üzerinden integralinin alınmasıyla elde edilebilir. Şekil 1.4 referans alınarak;

$$P = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \text{ [W]} \quad (19)$$

elde edilir. Katı açı elemanı $d\Omega$, $\sin \theta d\theta d\phi$ ifadesine karşılık gelir.

Eş-yönlü bir anten için ışıma şiddeti U_0 , θ ve ϕ açılarından bağımsız olacaktır. Bu durumda denklem 19 şu şekilde düzenlenebilir:

$$P = \oint_{\Omega} U_0 d\Omega = U_0 \oint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_0 \quad (20)$$

Bir başka deyişle eş-yönlü bir antenin ışıma şiddeti;

$$U_0 = \frac{P}{4\pi} \quad (21)$$

olacaktır [5].

1.3.5. Yöneltilik (D)

Yöneltilik, antenden belirlenen bir yöndeki ışıma şiddetinin, tüm yönlerdeki ortalama ışıma şiddetine oranıdır. Ortalama ışıma şiddeti, toplam ışıma gücünün (P) 4π 'ye bölümüyle elde edilir [7]. Başka bir ifadeyle; eş-yönsüz bir kaynağın yönlülüğü, belirtilen yöndeki ışıma şiddetinin (U) eş-yönlü kaynağına (U_0) bölümüyle hesaplanır.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P} \quad (22)$$

Eğer özel bir yön belirtilmiyorsa yönelticilik ifadesi, maksimum ışıma şiddeti (maksimum yönelticilik)'nin yönüne işaret etmektedir [5].

1.3.6. Kazanç (G)

Kazanç, belirtilen bir yöndeki ışıma şiddetinin, antenin girişten aldığı gücü (P_i) eş-yönlü olarak ışıma yaptığındaki ışıma şiddetine oranıdır. Kazanç parametresi, empedans ve kutuplanma uyumsuzluklarından kaynaklanan kayıpları içermez. Eğer antende belirlenen bir yön için yitirgen kayıp (ısı kaybı) mevcut değil ise böyle bir antenin kazancı yönelticiliğine eşittir [7]. Denklem olarak kazanç ifadesi şu şekildedir:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_i} \quad (23)$$

Denklem 23'deki kazanç ifadesi bağıl kazanç olarak da adlandırılmaktadır. Bağıl kazanç değeri, giriş güçleri (P_i) aynı olmak kaydı ile bir antenin belirlenen bir yöndeki güç kazancının, referans antenin güç kazancının referans olarak alınan yöndeki güç kazancına oranıdır.

Bir diğer kullanılan kazanç türü ise mutlak kazançtır. Mutlak kazanç, bağıl kazancın aksine empedans ve kutuplanma uyumsuzluklarını hesaba katmaktadır. Bu kazanç ifadesi denklem 24'de görüldüğü gibi yansıma, iletim ve dielektrik kayıplarını içeren anten ışıma verimi e_{cd} terimini içermektedir. Ayrıca anten giriş ve ışıma (çıkış) güçleri de yine bu verim ifadesiyle birbirlerine orantılıdır [5].

$$P = e_{cd}P_i \quad (24)$$

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P} \right] \quad (25)$$

1.3.7. Bandgenişliği

Bandgenişliği, bazı karakteristiklere (giriş empedansı, patern, demet açıklığı, kutuplanma, yan kulak seviyesi, kazanç, demet yönü, ışıma verimi gibi) göre anten

başarımının standart kaldığı frekans aralığı olarak tanımlanır. Bu frekans aralığı merkez frekansın her iki tarafını da kapsamaktadır. Genişband antenler için bandgenişliği genellikle en yüksek frekansın en düşük frekansa oranı olarak verilmektedir. Örneğin; 10:1 bandgenişliğine sahip bir anten için en yüksek frekans en düşüğün 10 katı büyüklüktedir denebilir [5]. Darband antenler için bandgenişliği yüzde olarak ifade edilir. Yüzde ifadesi, bandgenişliğinin (üst frekans – alt frekans farkı) merkez frekansa oranını vermektedir.

1.3.8. Kutuplanma

Belirlenen bir yön için antenin kutuplanması, antenden iletilen veya ışınlanan dalganın kutuplanmasını tanımlamaktadır. Eğer yön belirtilmiyorsa kutuplanma, maksimum kazanç yönündeki kutuplanma olarak kabul edilir [7]. Uygulamada ışınlanan enerjinin kutuplanması, anten merkezinden referans alınan yöne göre değişir. Yani paternin farklı parçaları farklı kutuplanmalara sahip olabilir.

Alıcı anten için kutuplanma, belirlenen bir yönde gelen ve bilinen bir güç akısı yoğunluğuna sahip düzlem dalganın, alıcı anten uçlarında oluşturabileceği mümkün maksimum gücü ifade eder.

Kutuplanma, doğrusal, dairesel ve eliptik olmak üzere 3 grupta sınıflandırılabilir:

Doğrusal kutuplanma: Uzayda belirlenen bir nokta için elektrik alan (veya manyetik alan) vektörü, zamanın her anında aynı düz çizgi merkezli ise zaman-harmonik bu dalga doğrusal kutupludur. Alan (elektrik veya manyetik) vektörlerinin şu özelliklerden birine sahip olması gerekir:

- a) Yalnızca bir bileşen olmalıdır.
- b) Aynı fazda veya 180° faz farklı 2 dikgen doğrusal bileşen mevcut olmalıdır [5].

Uygulamada doğrusal kutuplanma, elektrik alanın konumuna göre yatay, dikey veya bu ikisi arasında herhangi bir açıda bulunabilir.

Dairesel kutuplanma: Uzayda belirlenen bir nokta için elektrik alan (veya manyetik alan) vektörü, zamanın fonksiyonu olarak bir daireyi takip ediyorsa zaman-harmonik bu dalga dairesel kutupludur. Alan (elektrik veya manyetik) vektörlerinin şu özelliklerin hepsine sahip olması gerekir:

- a) Alan dikgen ve doğrusal 2 bileşene sahip olmalıdır.
- b) 2 bileşen de aynı genliğe sahip olmalıdır.
- c) İki bileşenin, 90° 'nin tek katları kadar aralarında faz farkı bulunmalıdır.

Eğer alan vektörünün dönüşü saat yönünde ise dalga, sağ-el (veya saat yönünde) dairesel kutuplu, vektör dönüşü saat yönünün aksine ise dalga sol-el (veya saatin aksi yönünde) dairesle kutuplu olarak adlandırılır [5].

Eliptik Kutuplanma: Uzayda elektrik alan (veya manyetik alan) vektörünün ucu eliptik bir yörüngeyi takip ediyorsa, zaman-harmonik bu dalga eliptik kutupludur. Zamanın çeşitli anlarında alan vektörü eliptik bir yörünge oluşturacak şekilde zamanla sürekli olarak değişir. Dairesel kutuplanmada olduğu gibi alan vektörünün dönüş yönüne göre sağ-el veya sol-el eliptik kutuplu olarak adlandırma yapılır [8]. Alan (elektrik veya manyetik) vektörlerinin şu özelliklerin hepsine sahip olması gerekir:

- a) Alan dikgen ve doğrusal 2 bileşene sahip olmalıdır.
- b) 2 bileşen aynı veya farklı genliğe sahip olabilir.
- c) (1) Eğer iki alan bileşeni de aynı genliğe sahip ise aralarındaki faz farkı 0° veya 180° 'nin katları kadar olmamalıdır. Çünkü bu durumda dalga doğrusal kutuplu olur. (2) Eğer iki alan bileşeni aynı genliğe sahip ise aralarındaki faz farkı 90° 'nin tek katları şeklinde olmamalıdır [5].

Ayrıca dalganın kutuplanması incelenirken, ortak-kutuplanma ve çapraz-kutuplanma ifadelerine de dikkat edilmelidir. Ortak-kutuplanma, antenin elektromanyetik dalgayı iletmesi veya alması durumlarında amaçlanan kutuplanmayı ifade eder. Çapraz-kutuplanma ise belirlenen bir kutuplanmaya (genellikle ortak-kutuplanma) dik olan kutuplanmadır.

1.4. Radyo Dalgalarının Yayılımı

Radyo dalgaları 2 nokta arasında ya serbest uzayda ya da koaksiyel kablo, dalga kılavuzu veya fiber optik ortamlar gibi kılavuzlanarak yayılımla iletilirler. Serbest uzayda kullanılabilir spektrum tüm kullanıcılara paylaştırılmalıdır. Uygun paylaşımdan emin olmak için serbest uzay radyo spektrumunun kullanımı uluslar arası kabul edilmiş sözleşmelerdeki düzenlemelere bağlıdır ve birbirine yakın coğrafi bölgelerde aynı frekansta çalışan servislerin girişimini en aza indirmek için yönlü anten kullanımına sıklıkla rastlanır.

Kural olarak eğer ışınım kılavuzlu bir ortam içerisinde taşınyorsa diğer kullanıcılarla muhtemelen herhangi bir girişim olmayacaktır. Ayrıca ortam tarafından desteklenen tüm frekans aralığı kullanıcı tarafından kullanılabilir. Ancak kılavuzlu ortamlarda kullanılan

frekans spektrumu, çoğu kez sözleşmelerden çok hizmet sağlayıcısının özelliklerine göre düzenlenir [2].

1.4.1. Yayılım, Güç Yoğunluğu ve Alan İfadeleri Arasındaki İlişki

Radyo dalgalarının yayılım yöntemlerini detaylı şekilde anlamamanın yolu genelde Maxwell Denklemleri'nin işleyişi ve bu denklemlerin dalga denklemleriyle birleşimiyle başlar. Bu nedenle iyi bir pratik değerlendirme, bir radyo vericisinde olduğu gibi bir enerji kaynağından gücün nasıl yayıldığı basitçe anlaşılmasıyla elde edilebilir.

Bu amaçla bir noktasal enerji kaynağı incelenebilir. Bu kaynak; ısı, ışık, ses veya elektrik enerjisi kaynağı olabilir. Kaynak, genellikle watt (W) olarak ölçülen yaydığı güç ile karakterize edilir. Eğer kaynak tüm yönlerde düzgün ışıyorsa, bu kaynağa “eş-yönlü kaynak” denir. Noktasal bir kaynak eş-yönlü olmalıdır. Çünkü enerji akışını herhangi bir yönde yönlendirecek bir bileşen içermemektedir.

Bir eş yönlü kaynaktan dışarıya doğru enerji küresel biçimde yayılır. Eğer gözlemci kaynaktan d [m] kadar bir mesafede konumlanırsa ve d yarıçaplı bir küre ile kaynağın çevrelendiği varsayılırsa, kaynak tarafından yayılan tüm güç ile kesişilmiş olunur. Güç, noktasal bir ışınlıyıcı kaynaktan çıkıyor olsa da, şimdi bir kürenin tüm yüzey alanı üzerine yayılmış veya bir başka deyişle dağılmış bir haldedir. Kürenin yüzeyinde oluşan güç yoğunluğunu (p); iletilen gücün (P_t), kürenin yüzey alanına bölümüyle aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlamak uygun olur:

$$p = \frac{P_t}{4\pi d^2} \left[\text{W/m}^2 \right] \quad (26)$$

Çıkan güç yoğunluğu, kürenin tüm yüzey alanı boyunca toplanmaktansa, küçük bir kesit alanla kesişen miktarı şu şekilde hesaplanır:

$$P_r = pA_r \text{ [W]} \quad (27)$$

A_r kesit alanı genelde bir açıklık olarak, P_r ise alıcı antene ulaşan güç olarak belirtilir. Gerçekte, noktasal eş-yönlü ışınlıyıcı kaynak yoktur. Bunun yerine iletilen gücü belirli yönlerde odaklayan antenler tasarlanır [2]. Bu odaklamanın antenler için ölçütü

kazanç terimidir. Tüm bu ifadeler sonucunda kaynak antenden d kadar mesafedeki bir alıcı antende oluşacak güç yoğunluğu (p_r) ve alınan güç aşağıdaki denklemlerdeki gibi olacaktır:

$$p_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \left[\text{W/m}^2 \right] \quad (28)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r}{4\pi d^2} \left[\text{W} \right] \quad (29)$$

Daha önce 1.2.3. konusunda poynting vektörü ve 1.3.3. konusunda ışıma güç yoğunluğu olarak bahsedilen güç yoğunluğu ifadesi ile yukarıdaki denklemde ifade edilen güç yoğunluğu ifadesi birbirlerine eşitlenebilir.

$$p_r = |S| = |E| \cdot |H| \left[\text{W/m}^2 \right] \quad (30a)$$

$$|E| = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d} \left[\text{V/m} \right] \quad (30b)$$

Denklem 30a'daki eşitlikten elde edilen elektrik alan ifadesi (E) ile verici antenden d uzaklıkta oluşan elektrik alan şiddeti hesaplanabilir. Denklem 30b'deki elektrik alan şiddeti ifadesinin ters mesafe kuralına (inverse distance law) ve denklem 28'deki güç yoğunluğu ifadesinin de ters kare yasasına (inverse square law) uygun olduğu görülür.

Alınan elektrik alan şiddeti çok küçük olduğundan dolayı, [$\mu\text{V/m}$] standart birim haline gelmiştir. Benzer şekilde mesafe de metre yerine kilometre cinsinden ifade edilebilir [4]. Bu şekilde düzenlenmiş elektrik alan ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$E[\mu\text{V/m}] = 1000000 \sqrt{\frac{30 P_t G_t}{1000d}} = 5480 \sqrt{\frac{P_t G_t}{d}} \quad (31)$$

Daha ileri bir basitleştirme veya standartlaşma yapıldığında, yarım dalga dipol anten için $P_t G_t$ çarpımında verici gücünün 1000W, anten kazancının 2.14dBi (1.64) olarak hesaba katılması ile $P_t G_t = 1640$ standart bir değer olarak bulunur [4]. Bu şekilde;

$$E[\mu V/m] = 5480 \sqrt{\frac{1640}{d}} = \frac{222000}{d} \quad (32)$$

elde edilir. Bu ifade de logaritmik olarak yazıldığında denklem 33 oluşacaktır:

$$E_{dB\mu V/m} = 20 \log \left(\frac{222000}{d} \right) = 106.9 - 20 \log d \quad (33)$$

Dikkat edilirse elektrik alanının denklem 33'deki ifadesinde frekans terimi bulunmamaktadır. Bu ifade serbest uzay yayılımı olarak da adlandırılır.

Eğer alıcıdaki elektrik alan şiddeti biliniyorsa, güç yoğunluğu da ifade edilebilir. Buradan da alıcı antenin etkin açıklığı ile güç yoğunluğu çarpılarak denklem 34'deki alınan güç ifadesi bulunabilir. Eğer alıcı anten özellikleri bilinmiyorsa sıklıkla alıcı anten bir eş yönlü antenmiş gibi kabul edilerek işlemler yapılır:

$$P_r(\text{eş yönlü}) = \frac{E^2}{120\pi} \frac{7160}{f^2} \quad (34)$$

Denklem 34'de elektrik alan şiddeti [V/m], f [MHz] cinsinden yazıldığında P_r [Watt] birimiyle ifade edilir.

Eğer elektrik alan şiddeti [$\mu V/m$] birimiyle hesaba katılırsa P_r 'nin birimi [mW] olur. Bu şekilde denklemin son hali;

$$P_r(\text{miliwatt}) = \frac{E[\mu V / m]^2}{1 \times 10^9 \times 120\pi} \frac{7160}{f^2} = 1.9 \times 10^{-8} \frac{E[\mu V/m]^2}{f^2[\text{MHz}]} \quad (35)$$

şeklindedir. İfadenin logaritmik şekli aşağıdaki gibi olacaktır:

$$P_r[\text{dBm}] = -77.2 + 20 \log E[\mu V/m] - 20 \log f[\text{MHz}] \quad (36)$$

Son olarak;

$$20 \log E[\mu V/m] = E[\text{dB}\mu V/m] \quad (37)$$

ifadesinden faydalanılarak;

$$P_r[\text{dBm}] = E[\text{dB}\mu\text{V/m}] - 20\log f[\text{MHz}] - 77.2 \quad (38)$$

elde edilir. Elde edilen bu son güç ifadesi (denklem 38) eş yönlü bir anten için alınan güç ifadesidir. Eğer yönsemeli bir anten kullanılıyorsa, antenin kazancı dBi cinsinden bu güç ifadesine eklenmelidir.

1.4.2. Friis İletim Denklemi

Yeryüzü etkilerinin yok sayıldığı bir iletim ortamında, aralarında d kadar mesafe bulunan verici ve alıcı antenler için;

- G_t , verici anten kazancı
- A_r , alıcı anten açıklığı
- P_t , verici antenden yayılan güç olmak üzere,

alıcı antende oluşacak güç ve güç yoğunluğu ifadeleri denklem 28 ve 29'daki gibi olacaktır. Bu denklemlerde yer alan açıklık ifadesi (A_r), antenlerin karşılık (resiprok) özelliğinden elde edilir. Antenin, verici olarak kullanıldığı zaman kazancı ve alıcı olarak kullanıldığı zaman açıklığı arasında şöyle bir ilişki mevcuttur:

$$A_r = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} [\text{m}^2] \quad (39)$$

Denklem 39'daki açıklık ifadesinde G_r alıcı anten kazancıdır ve bu ifade denklem 29'da kullanıldığında,

$$P_r = \frac{G_r G_t P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2} = G_r G_t P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 [\text{W}] \quad (40)$$

“Friis İletim Denklemi” olarak bilinen ifade elde edilir. Bu ifadenin logaritmik kullanımı daha yaygın ve kullanışlıdır. Bu nedenle denklem 40'a logaritma işlemi uygulanırsa;

$$10\log_{10} P_r = 10\log_{10} G_r + 10\log_{10} G_t + 10\log_{10} P_t + 20\log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (41)$$

elde edilir. Başka bir düzenleme ile

$$10\log_{10}P_r = 10\log_{10}G_r + 10\log_{10}G_t + 10\log_{10}P_t - 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (42)$$

denklemleri elde edilir. Denklem 41 ve 42’de belirtilen $10\log_{10}\frac{G_t}{1}$ ifadesi, eş-yönlü bir anten referans alınarak, kazanç ifadesini ortaya koyar ve işlem sonucunda $G_t[\text{dBi}]$ elde edilir. Aynı durum denklemdeki diğer tüm büyüklükler için de geçerlidir. Yani logaritmik işlem sonucu, referans alınan değerin birimine göre yazılır. Güç değerleri için sırasıyla miliwatt ve watt büyüklükleri referans alınarak denklem 42, logaritmik olarak şu şekillerde ifade edilebilir:

$$P_r [\text{dBW}] = P_t[\text{dBW}] + G_r[\text{dBi}] + G_t[\text{dBi}] - 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (43)$$

$$P_r [\text{dBm}] = P_t[\text{dBm}] + G_r[\text{dBi}] + G_t[\text{dBi}] - 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (44)$$

Denklem 43 ve 44’deki son ifade $\left(20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)\right)$ desibel cinsinden serbest uzay yol kaybına (free space path loss - FSPL) karşılık gelir. Bu kayıp; iletilen ışın demetinde, ters kare yasasına göre meydana gelen yayılma sonucu alıcıya ulaşan işaretteki kaybı vermektedir.

İletişim sistemleri için ifadeler, desibel cinsinden kullanıldığında, aşağıdaki genel sözlü eşitlik elde edilir:

$$\text{Alınan güç} = \text{İletilen güç} + \text{Anten kazançları} - \text{Kayıplar} \quad (45)$$

Eşitlik 45’deki kayıplar, serbest uzay yol kaybı yanında bir iletişim sistemi için diğer tüm kayıpları kapsamaktadır [2].

Kayıplar şu şekilde sıralanabilir;

- Serbest uzay yol kaybı
- Kırılma kaybı (difraksiyon kaybı)
- Kırılma kaybı (refraksiyon kaybı) (fading)

- Yağış kaybı
- Atmosferik emilim kaybı

1.4.3. Radyo Dalgaları İçin Frekans Bandlarının Sınıflandırılması

Kablosuz iletişime olan talep arttıkça, yeni sistemler için belirlenen frekanslar da yıllar içinde artmaktadır. Bu artışın sebebi, yüksek frekanslarda çok büyük bandgenişliklerinin elde edilebilmesidir [3]. Tablo 1.1’de radyo dalgaları için farklı frekans bandlarının ITU (International Telecommunication Union)’ya göre sınıflandırılması gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Frekans bandı sınıflandırması [9].

<u>ITU Band Numarası</u>	<u>Adlandırma</u>	<u>Frekans Aralığı</u>	<u>Dalga Boyu</u>
1	ELF	3 - 30 Hz	100,000 km - 10,000 km
2	SLF	30 - 300 Hz	10,000 km - 1000 km
3	ULF	300 - 3000 Hz	1000 km - 100 km
4	VLF	3 - 30 kHz	100 km - 10 km
5	LF	30 - 300 kHz	10 km - 1 km
6	MF	300 - 3000 kHz	1 km - 100 m
7	HF	3 - 30 MHz	100 m - 10 m
8	VHF	30 - 300 MHz	10 m - 1 m
9	UHF	300 - 3000 MHz	1 m - 10 cm
10	SHF	3 - 30 GHz	10 cm - 1 cm
11	EHF	30 - 300 GHz	1 cm - 1 mm

Tablo 1.1’den görüldüğü gibi frekans band isimleri belirlenirken, orta frekans bandı (medium frequency band) olarak adlandırılan MF bandı referans alınmıştır. MF bandı, radyonun ilk zamanlarında en çok kullanılan frekans ve dalga boyunu içermektedir.

Mikrodalga frekansları için, özellikle radar sistemleri ve dalga kılavuzlarında yayılım söz konusu olduğunda, çoğunlukla alternatif bir sınıflandırma kullanılmaktadır [2]. Tablo 1.2’de IEEE tarafından standartlaştırılmış mikrodalga band sınıflandırması gösterilmektedir.

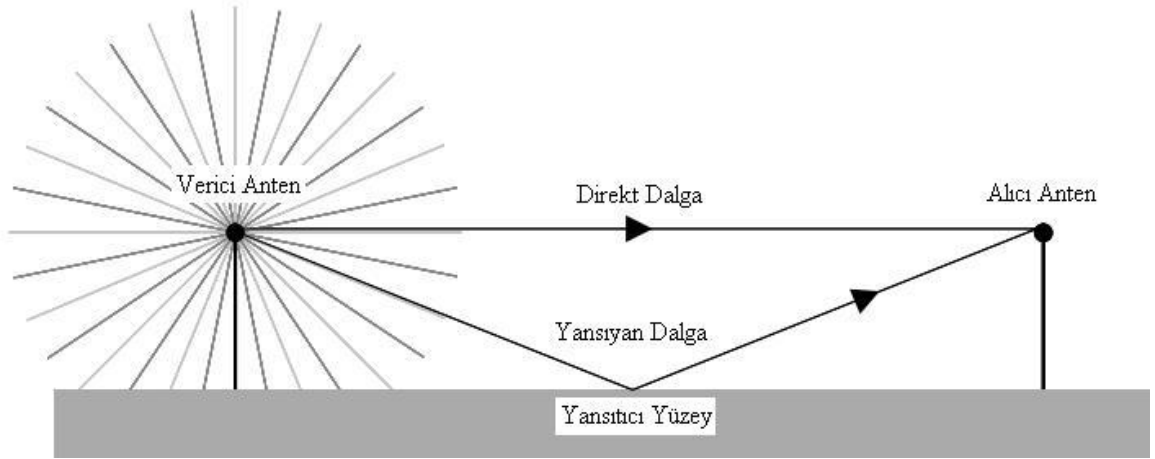
Tablo 1.2. Mikrodalga frekans bandı sınıflandırması [10].

<u>Band Adı</u>	<u>Frekans Aralığı</u>
HF	3-30 MHz
VHF	30-300 MHz
UHF	300-1000 MHz
L	1-2 GHz
S	2-4 GHz
C	4-8 GHz
X	8-12 GHz
Ku	12-18 GHz
K	18-27 GHz
Ka	27-40 GHz
V	40-75 GHz
W	75-110 GHz
mm	110-300 GHz

Ülkemizde TV yayınları için VHF-III (174-230MHz), UHF-IV (470-582MHz) ve UHF-V (582-800MHz) olarak adlandırılan frekans bandları, FM radyo yayınları için ise 87.5-108MHz aralığındaki FM bandı kullanılmaktadır.

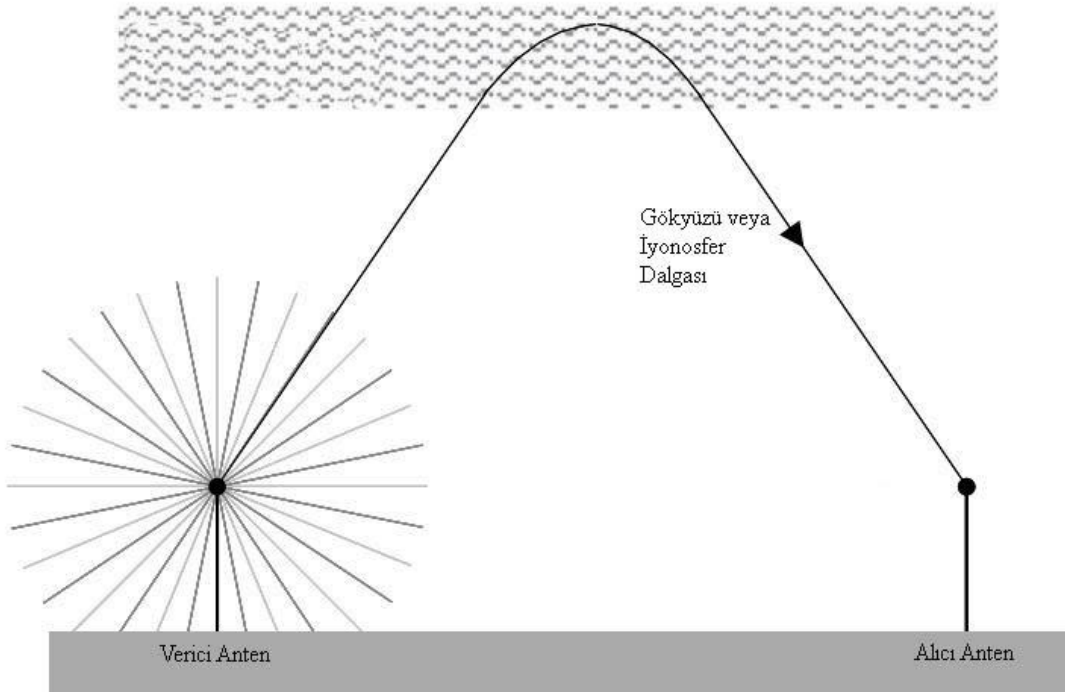
1.4.4. Yeryüzü Yakınında Radyo Dalgası Yayılımı

Eş-yönlü bir anten, bir direğin tepesine yerleştirilerek verici anten olarak kullanıldığında, antenin eş-yönlü karakteristiğinden dolayı ışıma dışı doğru tüm yönlerde olacaktır. Buradaki sorun; belirli bir mesafedeki direğe yerleştirilmiş olan bir alıcı antene işaretin nasıl ulaşacağıdır. İletim yolunda yayılan radyo dalgaları, alıcı ve verici arasında işareti taşıyan düz bir hattan oluşan ışın gibi düşünülebilir. İkinci bir yol, yer yüzeyinden yansıyan ışın sonucu oluşur (bina ve motorlu taşıt gibi diğer nesnelerden de yansıma olabilir). Bu radyo dalgalarının işareti taşıyabilmesi için alıcı ve verici antenlerin birbirlerini görmesi gerekir. Şekil 1.6’da gösterilen iki dalga, sırasıyla direkt ve (yerden) yansıyan dalgalar olarak ifade edilirler ve her ikisine birden “uzay dalgası” denilir.



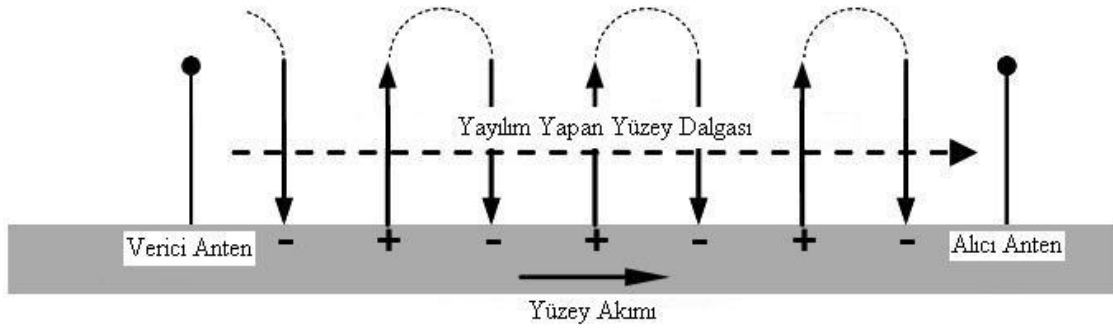
Şekil 1.6. Verici ve alıcı arasında uzay dalgası modunda yayılım [2].

Yer yüzeyinin üzerinde iyonosfer adı verilen yüklü katman sıraları bulunmaktadır. Eğer şartlar uygun olursa, radyo dalgalarının gökyüzüne doğru iletilenlerinden bazıları iyonosferden yansırarak Şekil 1.7’de olduğu gibi yer yüzeyine ve dolayısıyla alıcı antene ulaşacaklardır. Bu dalgaya “gök dalgası veya iyonosfer dalgası” denir.



Şekil 1.7. Verici ve alıcı arasında gök dalgası modunda yayılım [2].

Uzay ve gök dalgasında olduğu gibi durumun ışınlarla ifade edilemediği, Şekil 1.8’de gösterilen 3. bir yayılım yöntemi mevcuttur. Bu yöntem “yüzey dalgası” olarak bilinir. Bu yöntem; bilgi işaretini, yer yüzeyinde hareket eden yüklerde sonlanan bir alan gibi taşır.



Şekil 1.8. Verici ve alıcı arasında yüzey dalgası modunda yayılım [2].

Teoride tüm üç yayılım yöntemi (uzay, gök ve yüzey dalgası) aynı anda ortaya çıkabilir. Tablo 1.3’den anlaşılabileceği gibi uzay dalgası diğer yöntemlerden daha fazla hizmet taşımaktadır. Çünkü spektrumun büyük bir parçası VHF ve üzeri frekanslarda hizmet vermektedir. Ayrıca bu frekanslarda çok büyük bandgenişlikleri mevcuttur. Direkt görmeye dayalı yayılım, uzay dalgası servisleri için çok önemli bir sınırlama olduğundan bu sınırlama karasal tekrarlayıcılar ve iletişim uyduları kullanılarak aşılmaya çalışılmaktadır [2].

30MHz üzerinde çok sayıda hizmetin verilmesi mümkün olduğundan, uzay dalgası tartışmasız göz önüne alınması gereken en önemli dalga yayılımıdır. Birçok açıdan kısmen basit olsa da, alıcı ve vericinin birbirini direkt olarak görmesi gerekliliğinin oluşturduğu sınırlama ve çoklu yol sorunları uzay dalgasının aşılması gereken zorluklarıdır.

Teoride dünya yüzeyinden iyi ayrılmış uzay dalgasının alan şiddeti denklem 30b’deki ters mesafe kanunu ile açıklanır. Birçok iletişim hizmetinin yeryüzüne yakın olarak çalışıyor olmasından dolayı verici antenden alıcı antenlere direkt dalgadan başka, özellikle yer yüzeyinden yansıyan dalgaları da içeren yayılım yolları da mevcuttur. Direkt ve yansıyan dalgalar arasındaki yol farkı umulacağı gibi alıcıda alınan işarete bir faz farkı oluşmasına sebep olacaktır. Bu da 2 dalga arasında girişime neden olur. Ek olarak girişime

eklenen bir başka faz değişimi de, yerden yansıyan elektromanyetik dalganın yansımasının olduğu noktada ortaya çıkar [2].

Tablo 1.3. Yüzey, gök ve uzay dalgası kullanan hizmetlerin karşılaştırılması [2].

<u>Frekans Aralığı</u>	<u>Baskın Yöntem</u>	<u>Bazı Yaygın Hizmetler</u>
< 500 kHz	Yüzey dalgası	Denizaltı haberleşmesi, küresel seyir yardımı
500kHz - 1.5MHz	Kısa mesafeler için yüzey dalgası Uzak mesafeler için gök dalgası	AM radyo yayını, hava seyir yardımı
1.5MHz - 30MHz	Gök dalgası	Uzak mesafelerde kısa dalga (amatör) iletişim
> 30MHz	Uzay dalgası	TV, FM radyo, hava seyir yardımı, GPS, WLAN, internet, WiFi, GSM

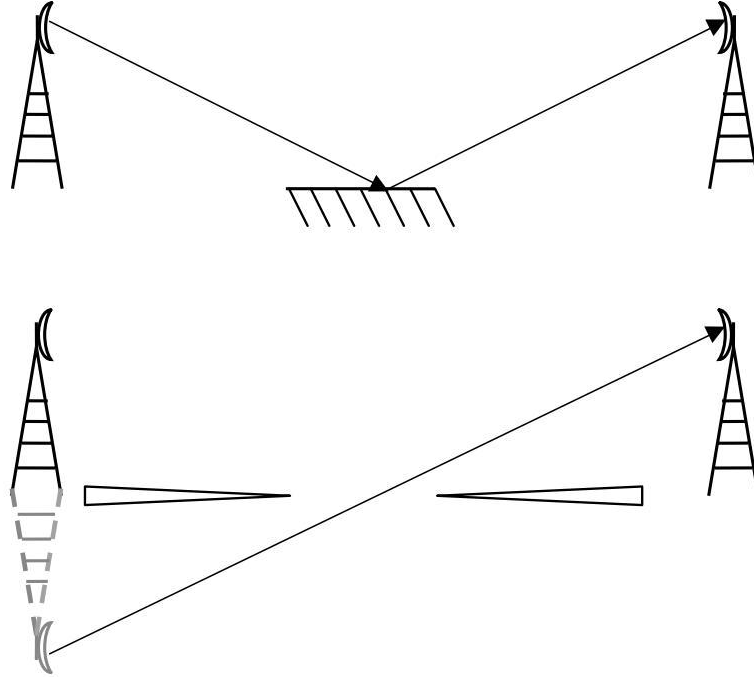
1.4.5. Yayılım Yöntemleri

1.4.5.1. Sınırlı Bir Yüzeyden Yansıma

Yansıyan alanı tahmin etmekte kullanılan yöntem vericinin sanal bir görüntüsünü düşünmektir. Eğer yansıtıcı yüzey sonsuz değilse (veya alıcı ve verici arasındaki alanın tamamını kapsamıyorsa) yansıyan alan, yüzeyin yansıma katsayısının genliği hesaba katılarak basitçe tahmin edilemez. Şekil 1.9’da olduğu gibi yansıtıcı yüzeyde vericinin yansıması, alıcı tarafından bakıldığında vericinin sanal görüntüsünün açıklığı doğrultusundadır.

İncelenmesi gereken bir sorun; yansıtıcı bir yüzeyin sonsuz bir alanın etkisine benzer bir etkiye sahip olabilmesi için ne kadar büyük olmasının gerektiğidir. “Cornu Spirali” bu konuda yardımcı olacaktır. Yansıma noktasının her iki yanında $\pm 60^\circ$ ’lik faz kaymalarını içerecek kadar büyük bir yüzey mevcutsa, alınan işaret yaklaşık sonsuz boyuttaki yüzeyden yansımadakine benzer olacağı görülmektedir. Bu, bir dalga boyunun 1/6’sı kadar yol uzunluğunda artışa karşılık gelir. Örneğin aralarında 20km mesafe bulunan, yansıtıcı yüzeyden yükseklikleri 30m olan antenler için 10GHz frekansta dalga boyu 3cm olacaktır.

Böylece direkt ve yansıyan dalgaların yol uzunlukları farkının yalnızca 5mm olması beklenir.



Şekil 1.9. Sonlu bir yüzeyden yansıma ve bir açıklıktan kırılmanın karşılaştırılması [4].

Bu çok küçük bir miktar olarak görülebilir. Ancak durumun geometrisi (yayılım doğrultusu ve yansıtıcı yüzey düzlemi arasında çok küçük açılarla) yansıtıcı yüzeyin boyutunun şaşırtıcı şekilde büyük olabileceğini göstermektedir. Yansıtıcı yüzeyin genişliğinin $2X$ olduğu varsayıldığında direkt yolun uzunluğu;

$$\sqrt{20000^2 + 60^2} = 20000.09\text{m} \quad (46)$$

olur.

Yansıtıcı yüzeyin kenarından yansıyan ışının boyu;

$$\sqrt{(10000 + X)^2 + 30^2} + \sqrt{(10000 - X)^2 + 30^2} \quad (47)$$

olacaktır. $X=2300\text{m}$ için 2 yol arasındaki fark 0.005m olur. Bunun anlamı yansıtıcı yüzeyin genişliğinin, alıcı ve verici arasındaki mesafenin tamamının yansıtıcı özellikte

olduğundaki alıcı işareti elde etmek için 4600m olması gerekir. Birincisi bu sonuç oldukça şaşırtıcıdır. 4.6km’lik bir yüzey, merkezin yüzeyinin ucundan yalnızca 5mm’lik bir yol uzunluğu farkına sebep olur. Yansıtıcı yüzeyin yalnızca 1km olduğunu varsayalım. Bu durumda X boyutu 500m olacaktır ve yüzey kenarında ilerleyen ışın ile yansıma noktasında ilerleyen arasındaki yol uzunluğu farkı 0.22mm olur. Bu 0.0075’lik dalga boyuna karşılık gelir. Fresnel parametresi;

$$v = \sqrt{4 \times 0.0075} = 0.17 \quad (48)$$

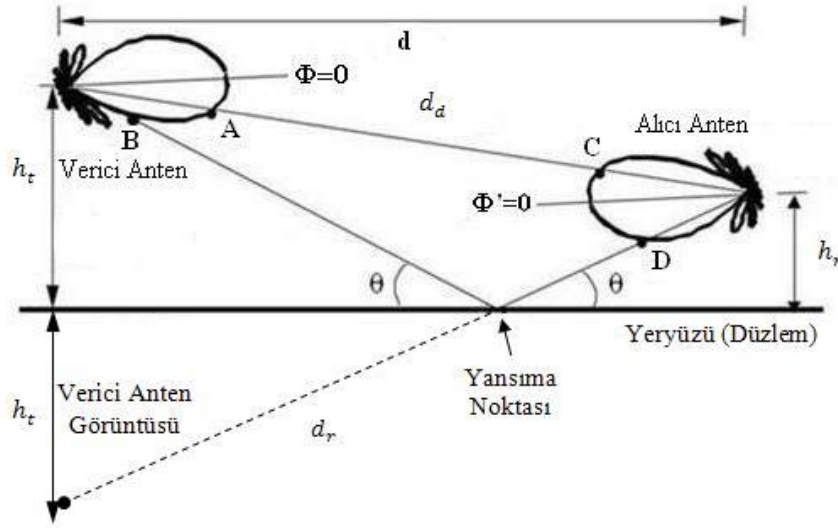
olarak hesaplanır. Böylece yansıyan alanın şiddeti, $v = \pm 0.17$ için Cornu Spirali’nde eşleşen fazör uzunluğu ile spiralin bir ucuyla diğeri arasındaki mesafenin ($\sqrt{2}$) karşılaştırılmasıyla tespit edilebilir. v ’nin küçük değeri için merkezden uzaklık hemen hemen bu değere eşittir. Böylece fazör bağlantısının boyu yaklaşık 0.34 olacaktır. Yüzey mükemmel yansıtıcı olsa bile alıcıdaki yansıyan işaret,

$$20 \log \left(\frac{\sqrt{2}}{0.34} \right) = 12.2 \text{dB} \quad (49)$$

direkt işaretten az olacaktır. Eğer yansıma katsayısı 1’den daha az bir genliğe sahip ise, direkt ve yansıyan işaretlerin genlikleri arasındaki fark daha büyük olacaktır [4].

1.4.5.2. Düzgün Yeryüzü Üzerinde Radyo Dalgası Yayılımı

Günümüz kişisel iletişim cihazları giderek artan şekilde sistem özelliklerinin limitlerinde tasarlanmaktadır. Kişisel iletişim için kullanılan alıcıların, alan şiddeti hassasiyetlerini ölçmek için radyo dalgası yayılımı, 2-ışınlı model esas alınarak anlatılabilir [11]. Konunun incelenmesi amacıyla Şekil 1.10, yer yüzeyi düzgün olarak kabul edilip bu yüzeyden tek bir yansıma olduğu varsayılarak incelenmiştir.



Şekil 1.10. 2-ışınlı yayılım modeli [12].

Yüzeye yakın 2 nokta arasındaki harmonik dalgalar için radyo dalgası yayılımı, kaynak antenden hedef antene doğru genişleyen bir küresel dalgayı içermektedir. Hava-yer sınırından dolayı indüklenen yüzey akımları, sonrasında sınır yüzeyinden ışınlanırlar ve kaynak küresel dalga ile karmaşık vektörler olarak birleşirler. Bu genel durum büyük bir basitleştirme ile düzlem dalga teorisi kullanılarak ele alınır. Bu durumda kaynak ve hedef antenler arasında düzlemsel bir dalganın ilerlediği kabul edilmektedir. Hedef antene ikinci bir dalga mükemmel düzgün olarak kabul edilen yer yüzeyinden meydana gelen bir yansıma ile ulaşır. Basitleştirilmiş 2-ışınlı yaklaşım Friis İletim Denklemi'nde kabul edildiği gibi genişleyen bir küresel dalgayı, düzgün yeryüzünden düzlem dalganın yansıması şeklinde kabul ederek kullanır [11].

Zaman-harmonik dalgalar için (sinüs dalgaları) küresel dalgaların düzlemsel dalga olarak kabul edilerek 2-ışınlı hale dönüştürülmesi, matematiksel açıdan birim kazançlı antenler arasında alıcının vericiye olan “ $P_{2-ışın}$ ” güç oranı olarak aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilir:

$$P_{2-ışın} = \left| \frac{e^{-jkd_d}}{2kd_d} [F_d + F_r(\Gamma + (1 + \Gamma)A)e^{-j\phi} + \dots] \right|^2 \quad (50)$$

Denklem 50’de fazör olan birinci terim, kaynak ile hedef arasında d_d uzunluğundaki bir mesafede ilerleyen ve temel serbest uzayda genişleyen küresel dalgayı ifade eder. F_d

terimi, direkt ışın yönünde değerlendirilen (A ve C noktaları için) anten paterni tarafından değiştirilmiş (kazanç terimi) direkt dalgayı gösterir. F_r terimi, yansıyan ışın yönünde (B ve D noktaları) değerlendirilen anten paternini içerir ve direkt ışınla karşılaştırıldığında yansıyan ışın tarafından kat edilen ek yol için bir genlik katsayısı içerir.

$$\Gamma = |\Gamma|e^{j\psi} \quad (51)$$

Eşitlik 51, yansıyan düzlem dalga yüzey yansıma katsayısıdır. Eşitlikten de anlaşılacağı üzere yansıma katsayısı karmaşık bir büyüklüktür [2]. Düşük teğet (gelme) açılarındaki ($\theta \approx 0$) $\Gamma \approx -1$ yaklaşıklığı hem yatay hem de dikey polarizasyon için geçerlidir [12]. A faktörünü içeren terim ise baskın yüzey dalga katsayısıdır. Fazör, yansıyan ışın yolu için ek faz gecikmesi ϕ 'yi içermektedir:

$$\phi = k(d_r - d_d) \quad (52)$$

Anten yüksekliklerinin toplam yoldan küçük oldukları varsayıldığında “ $d \gg h_t, h_r$ ” binom teoremine ($[1 + x^2] = 1 + nx$) göre aşağıdaki yaklaşıklıklar yapılabilir [3]:

$$d_d = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \approx d \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t - h_r}{d} \right)^2 \right\} \quad (53)$$

$$d_r = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} \approx d \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t + h_r}{d} \right)^2 \right\} \quad (54)$$

Denklem 52 ve 53 sırasıyla direkt ve yansıyan dalga yol uzunlukları bulunmuş olur. Bu iki denklemden dalgalar arasındaki yol farkına (Δd) bağlı olan faz farkı (ϕ) hesaplanabilir.

$$\Delta d = d_r - d_d = \frac{2h_t h_r}{d} \quad (55)$$

Denklem 8'deki faz sabiti ifadesi kullanılarak faz farkı;

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \quad (56)$$

şeklinde elde edilmiş olur.

Yüzey dalgası katsayısı A genellikle ihmal edilir. Eğer alıcı ve verici anten yere yakın olacak şekilde yaklaşık aynı yükseklikte ve birbirlerine doğru yönelmiş iseler $d \gg h_t, h_r$ için F_d ve F_r kazanç terimleri bir olarak hesaba katılır [12].

Parantez içine alınan tüm terimler karmaşık küresel dalganın, düzlem dalgaya yaklaşımlarıdır. 3. ve takip eden terimler bunun dışında bir sınır tabakasından küresel dalgaların yansıması göz önüne alınarak ifade edilebilir. Yanal dalgaların yanı sıra, dikey kutuplanmış antenler için genel problem hava-yer sınırı boyunca oluşan yayılım ile birleşen “Zenneck” yüzey dalgasının oluşmasıdır [11].

Yansıyan ve yüzey dalgası terimleri temel serbest uzay yayılımı konusunun tamamlayıcılarıdır. Yüzeye gelme açısı “ θ ”, Şekil 1.10 incelenerek şu şekilde hesaplanır:

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_t + h_r}{d}\right) \quad (57)$$

Dikey ve yatay polarizasyonlar için yeryüzü yansıma katsayıları, düzlem dalga yansıma katsayılarıyla ifade edilebilirler:

$$\Gamma(\theta) = \frac{\sin(\theta) - X}{\sin(\theta) + X} \quad (58)$$

Dikey kutuplama için X , X_v olarak ifade edilir:

$$X_v = \frac{\sqrt{\epsilon_g - \cos^2(\theta)}}{\epsilon_g} \quad (59)$$

Yatay kutuplama için X , X_h olarak ifade edilir:

$$X_h = \sqrt{\epsilon_g - \cos^2(\theta)} \quad (60)$$

Yer yüzeyinin karmaşık dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_g = \varepsilon_1 - j \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0 2\pi f} \quad (61)$$

şeklindedir. Denklem 61’de f , Hz cinsinden frekansı; ε_1 , yerin dielektrik sabiti; σ_1 , yerin iletkenliği olarak ifade edilir. Yerin dielektrik sabiti $\varepsilon_1 = 7$ civarındadır. Ancak gevşek çakıl için 3’ten, nemli toprak için 25’e kadar değişebilir. İletkenlik tipik olarak $\sigma_1 = 0.005 \text{ S/m}$ ’dir ve 0.0001’den nemli toprak için 0.03 S/m ’ye kadar değişebilir [11].

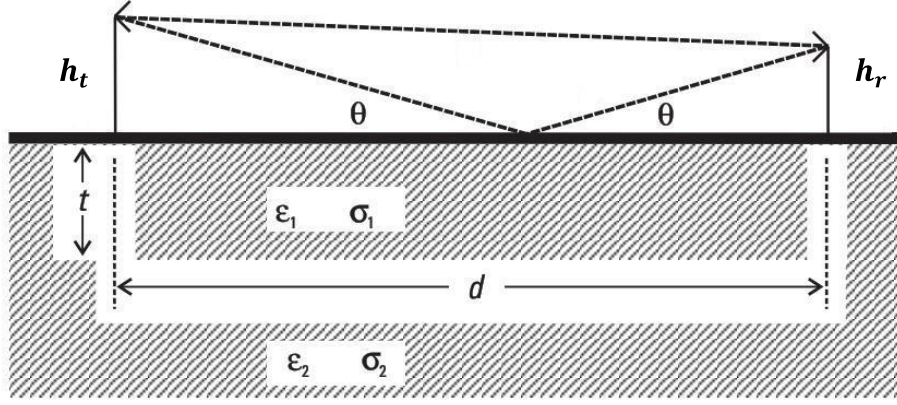
Tablo 1.5’de çeşitli arazi yapıları için hesaplamalarda kullanılabilecek dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri verilmiştir.

Tablo 1.4. Çeşitli arazi yapıları için dielektrik sabiti ve iletkenliğin tipik değerleri [13].

<u>Arazi</u>	<u>Dielektrik Sabiti, ε_r</u>	<u>İletkenlik, σ</u>	<u>Oran, (ε_r/σ)</u>
Deniz Suyu	80	4	2×10
Tatlı Su	80	0.001	8×10^4
Kırsal Arazi (Ohio)	14	0.01	1.4×10^3
Kentsel Arazi	3	0.0001	3×10^4
Kısa, Kuru Çim	3	0.05	6×10
Kısa, Islak Çim	6	0.1	6×10
Kuru, Çıplak, Kumlu Toprak	2	0.03	6.7×10
Islak, Çıplak, Kumlu Toprak	24	0.6	4×10

Dünya’nın homojen bir yarı-düzlem modeli genellikle yeterli olsa da, yer yüzeyine gelme açısının küçük olduğu durumlarda Şekil 1.11’de gösterilen 2 katmanlı model, ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir. 2 katmanlı yer yüzeyi öncelikle yüzey katmanı gelme açısı θ ve yüzey katmanı parametreleri ile belirlenen gömülü katmanın gelme açısı θ_s tanımlanarak modellenir.

$$\theta_s = \arccos\left(\frac{\cos(\theta)}{\sqrt{\varepsilon_g}}\right) \quad (62)$$



Şekil 1.11. 2 katmanlı yer yüzeyinde yayılım modeli [11].

Hava-yer ara yüzündeki yansımaya katsayısı G ;

$$G = \frac{\Gamma_1(\theta) + \Gamma_2(\theta_s)e^{-2jk\sqrt{\epsilon_g}\sin(\theta_s)t}}{1 + \Gamma_1(\theta) + \Gamma_2(\theta_s)e^{-2jk\sqrt{\epsilon_g}\sin(\theta_s)t}} \quad (63)$$

şeklindedir. Üst katman kalınlığı t 'dir. Γ_1 , tek katmanlı yansımadaki gibi ϵ_1 ve σ_1 kullanılarak bulunur. Alt katman yansımaya katsayısı Γ_2 ise yer parametresi ϵ_L ile hesaplanır:

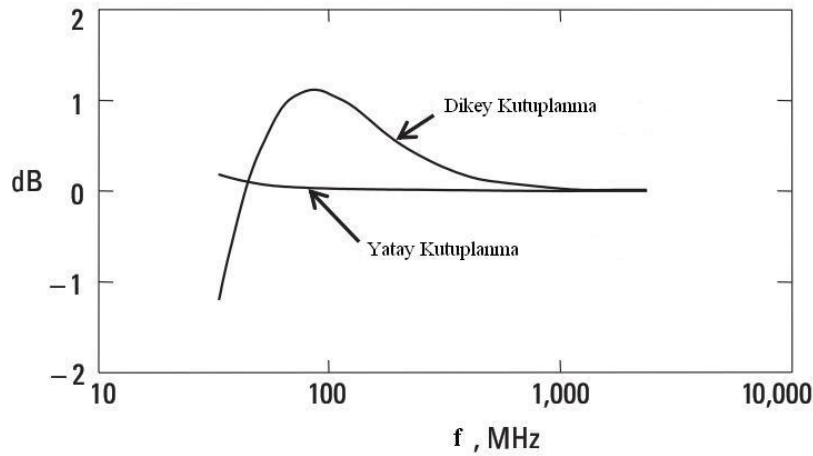
$$\epsilon_L = \frac{\epsilon_2 - j\frac{\sigma_2}{\epsilon_0 2\pi f}}{\epsilon_g} \quad (64)$$

Bu formüldeki ϵ_g , ϵ_2 ve σ_2 kullanılarak bulunur. İletkenlik ve dielektrik sabiti terimlerindeki 1 ve 2 indisleri katman numarasıdır. 2 katmanlı durumda $P_{2-ışın}$ ifadesinde mevcut olan Γ yerine G kullanılır. G ifadesi, sonsuz yansımaya grupları, hava-yer sınırı ve ara katman sınırı arasındaki yansımalar kullanılarak türetilmiştir. Bu formül kısa d mesafeleri için fiziksel olarak mümkün değildir ve üst katmanın d mesafesi ile karşılaştırıldığında ince olması zorunluluğu mevcuttur [11].

Yüzey dalgası katsayısı A ; frekans, yer parametreleri, kutuplanma ve gelme açısının bir fonksiyonudur. A , her zaman 1'den küçüktür. Ayrıca frekans ve mesafe değerleriyle ters orantılıdır.

$$A = \frac{-1}{1 + jkd(X + \sin(\theta))^2} \quad (65)$$

A'nın bu yaklaşık ifadesi $|A| < 0.1$ olduğu sürece doğrudur. Şekil 1.12 incelendiğinde VHF ve daha yüksek frekanslarda yatay kutuplanma için yüzey dalga katsayısı ihmal edilebilir olduğu görülür. Ancak dikey kutuplanmada 1dB'lik doğruluğun önemli olduğu durumlarda bu etki göz önüne alınmalıdır [11].



Şekil 1.12. İşaret şiddetinde yüzey dalgası dağılımının ihmal edilmesi sonucu oluşan hata [11].

Yansıyan ışın yeryüzüne teğet olduğunda daha önce belirtildiği gibi yansıma katsayısı -1 olarak hesaba katılabilir ve yüzey dalgasından daha yüksek dereceli terimler ihmal edilebilir. Bu durumda denklem 50'deki P ifadesinde, faz farkını ifade eden ϕ 'li üstel terimler Euler benzerliğine göre ($e^{-j\phi} = \cos \phi - j\sin \phi$) yazılırsalar, d [m] mesafe ile ayrılmış olan eş yönlü antenler arasındaki serbest uzay ve yüzey dalgası terimlerini içeren iletim gücü oranı şu şekilde olur:

$$P_{2-ışın} = \left| \frac{1}{2kd} [1 - \cos(\phi) + j\sin(\phi) + 2A] \right|^2 \quad (66)$$

$\Gamma = -1$, $\theta \approx 0^\circ$ ve d mesafesinin büyük olduğu durumlarda yüzey dalgası katsayısı için şu yaklaşıklık yapılabilir:

$$A = \frac{j}{(kdX^2)} \quad (67)$$

Aynı yaklaşıklıklar için;

$$P_{2-ışın} = \left| \frac{\sin \left[k \frac{2h_t h_r}{d} \right]}{2kd} + \frac{1}{(kdX)^2} \right|^2 \quad (68)$$

elde edilir. Bu formüldeki sinüs fonksiyonundan açıkça anlaşılıyor ki dikey düzlemde alan yoğunluğu duran bir dalgadır. İlk maksimum, sinüs fonksiyonunun içinin $\pi/2$ değeri veya $h_t h_r = d\lambda/8$ için oluşur. Denklem 68, sinüsün içinin kendisiyle yer değiştirebileceği kadar büyük mesafelerde denklem 69'daki yaklaşık biçimiyle kullanılır:

$$P_{2-ışın} = \left| \frac{h_t h_r}{d^2} + \frac{1}{(kX)^2} \right|^2 \quad (69)$$

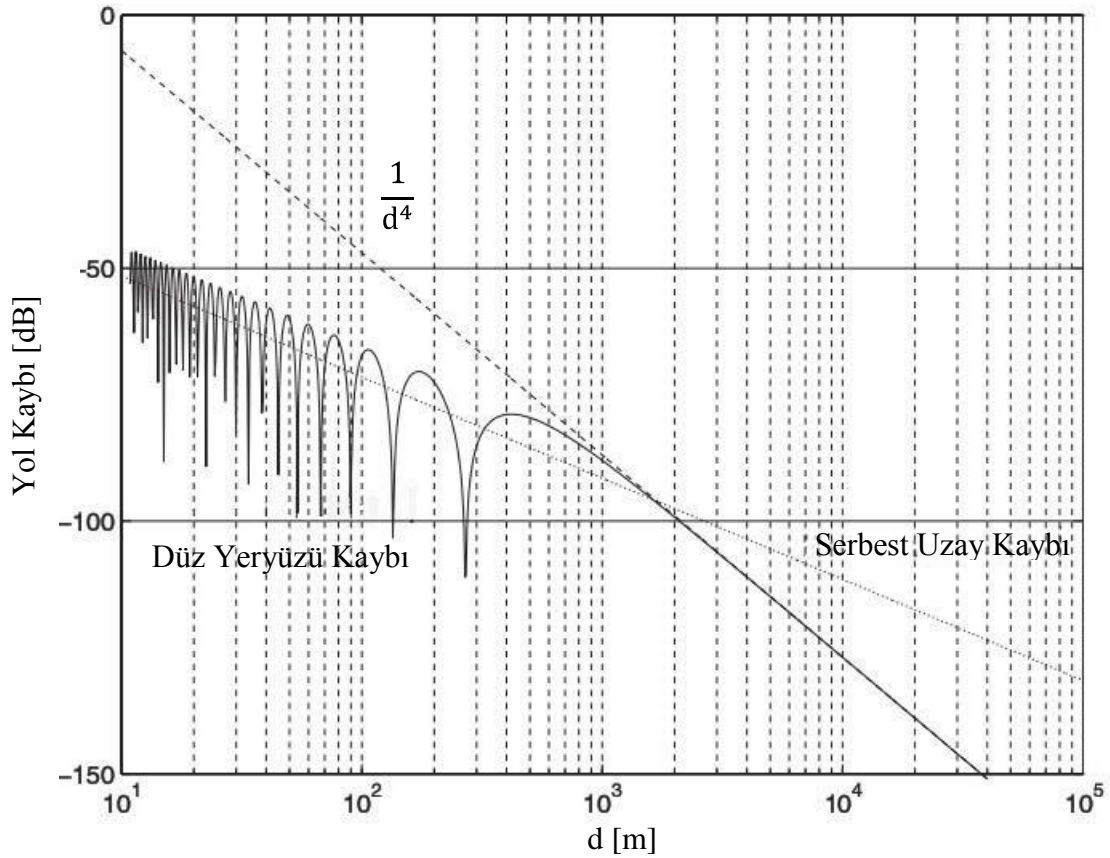
Yüzey dalgasının katkısı birkaç dalga boyundan daha büyük yükseklikler için önemli değildir [11]. Ters dördüncü kuvvet yasası olarak bilinen denklem 69 genellikle yüzey dalgası bileşenlerini bulundurmaz. Sonuçta ortaya çıkan güç oranı ifadesi şu şekilde olur:

$$P_{2-ışın} = \frac{P_r}{P_T} = \frac{(h_t h_r)^2}{d^4} \quad (70)$$

Bu güç oranı düz yeryüzü kaybı (plane earth loss – PEL) olarak da bilinir. Bu ifadenin logaritmik şekli aşağıdaki gibidir:

$$L_{PEL} = 40 \log d - 20 \log h_r - 20 \log h_t \quad (71)$$

Bu ifade düz yeryüzü kaybının son halidir. Şekil 1.13'den görülebileceği gibi düz yeryüzü kaybı, serbest uzay kaybından daha hızlı artmaktadır ve taşıyıcı frekanstan bağımsızdır [3].



Şekil 1.13. $f=900\text{MHz}$ için d mesafesine bağlı serbest uzay kaybı (...), düz yeryüzü kaybı (—) ve yaklaşık düz yeryüzü kaybı eğrileri (- - -) [3].

Şekil 1.13'deki yaklaşık düz yeryüzü kaybı denklem 70'e göre, düz yeryüzü kaybı ise denklem 66'daki ifadede yüzey dalgası bileşeni ihmal edilerek çizilmiştir.

P_r alınan gücü ve P_d direk dalga ile taşınan gücü, E_d direkt dalga ile oluşan elektrik alan şiddetini ve E_r de alıcıda oluşan elektrik alan şiddetini ifade etmek üzere güç, genliğin karesiyle orantılı olduğundan dolayı,

$$\frac{P_r}{P_d} = \left(\frac{E_r}{E_d} \right)^2 \quad (72)$$

ifadesi yazılabilir. E_r/E_d büyüklüğü yol kazanç katsayısı (PGF – path gain factor) veya patern yayılım katsayısı (PPF – pattern propagation factor) olarak bilinir ve “F” simgesi ile gösterilir. Yol kazanç katsayısı, alıcıdaki toplam alan ile serbest uzayı ilişkilendirmektedir ve $0 \leq F \leq 2$ değerlerini alır [12]. F'in alacağı değerler için şu durumlar söz konusudur:

- $F=0$ ise direkt ve yansıyan ışınlar çıkarılır (yıkıcı girişim).

- $F=2$ ise direkt ve yansıyan ışınlar toplanır (yapıcı girişim).

Yol kazanç katsayısı için de güç oranı hesaplamalarında kullanılan varsayımlar yapıldığında aşağıdaki son durum elde edilir:

$$|F| = \frac{E_r}{E_d} = 2|\sin(kh_t h_r / d)| \quad (73)$$

Bu son denklem ile alakalı olarak birçok yorum yapılabilir. İlk olarak; elektrik alan şiddeti, alıcı – verici anten yükseklikleri ve antenler arası mesafeye bağlı olan ve bu büyüklükler ile değişen maksimum ve minimum değerlere sahiptir. Ayrıca bir diğer etkin büyüklük dalga boyu ifadesidir. Örneğin; televizyon alıcı anteninin konumundaki küçük bir değişim, sinyal seviyesini artırarak görüntü kalitesinde fark edilir bir iyileşme sağlar. Aynı durum mobil iletişim için de geçerlidir. 900MHz’de çalışan bir hizmet için dalga boyuna karşılık gelen 33cm’lik bir konum değişimi alınan işaret gücünde çok büyük artışlar sağlayabilir.

İkinci bir nokta ise alınan elektrik alan şiddetinin maksimum değerinin, yalnızca direkt dalga olduğu durumun 2 katı olmasıdır. Bu maksimum değer tabi ki yansıyan dalganın direkt dalgaya pozitif girişimi sonucu oluşabilir. Yapılabilecek üçüncü bir değerlendirmede, alıcı anten boyunun sıfır olacağı yer yüzeyinde denklemden de anlaşılabileceği gibi elektrik alan şiddetinin değerinin sıfır olacağıdır [2].

1.4.5.3. Açık-Alan Test Mesafe Modeli

2-ışınlı yol yayılım modeli açık-alan test mesafelerinin ve alıcı alan şiddeti hassaslığı test mesafelerinin modellenmesi ve analiz edilmesi için uygulanabilir. Açık-alan anten test mesafesinde güç zayıflaması şu şekilde ifade edilir:

$$P_R = \left| \frac{1}{2kd} \left[\left[\frac{d}{d_d} \right]^{n+1} + \left[\frac{d}{d_r} \right]^{n+1} (\Gamma e^{-j\phi} + [1 - \Gamma] A e^{-j\phi}) \right] \right|^2 \quad (74)$$

Denklem 74'deki birinci terim, yeryüzü boyunca aralarında d mesafe bulunan 2 nokta arasındaki serbest uzay yol kaybı olarak kabul edilmektedir. Köşeli parantez içindeki birinci terim, d/d_d oranında doğru bir mesafeyi ortaya koymak için değiştirilmiş direkt ışını ifade eder. Köşeli parantez içindeki ikinci terim, benzer şekilde d_r mesafesi için bir genlik düzeltmesini ve son terim de yüzey dalgası bileşeni için bir yaklaşım içermektedir. n katsayısı, direkt ışının yatayla yaptığı açının kosinüsünün n . dereceden kuvvetiyle anten paternine benzerlik gösterir. Γ terimi yüzey yansıma katsayısı ve ϕ terimi de faz farkını belirtmektedir [11]. Tablo 1.5'de anten testleri esnasında kullanışlı olabilecek bazı n değerleri verilmiştir.

Tablo 1.5. Çeşitli sabit ve test anteni birleşimleri için n parametresi [11].

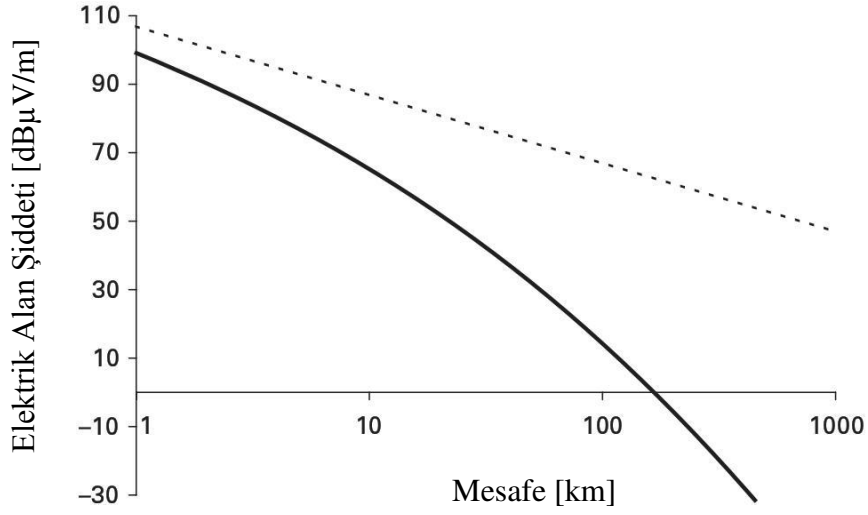
Sabit Anten (3dB açıklığı)	Test Anteni (3dB açıklığı)	n
Yönsemez	Yönsemez	0
Dikey Dipol, (78°)	Dikey Dipol, (78°)	2.8
Köşeli Yansıtıcı, (62°)	Dikey Dipol, (78°)	3.6
Log Periyodik, (53°)	Dikey Dipol, (78°)	4.5
Köşeli Yansıtıcı, (62°)	17 dBi Açıklık Anten, (29°)	13.2

Bir sonraki adım olarak denklem 74'de belirtilen (P_R) zayıflama değeri [dBm], verici gücü P_{eirr} [dBm] ve f [MHz] frekansı için denklem 38 kullanılarak $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ cinsinden elektrik alan şiddeti hesaplanabilir. $P_{eirr} + 10 \log(P_R)$, birim kazançlı bir antende dBm cinsinden alınan gücü ifade eder [11].

1.4.5.4. Belirli Uzaklıktaki Alan Şiddetinin Tahmini

ITU-R Tavsiye P.1546 “genel yol (path-general)” modeli olarak bilinir. Bu model genel olarak 30-3000MHz aralığında TV/Radyo yayınları için yol – alan şiddeti eğrileri vermektedir [14]. Verilen eğriler ölçüm sonuçlarına dayanmaktadır [15]. P.1546-0, P.1546-1 ve P.1546-2 olmak üzere 3 versiyonu bulunmaktadır. Bu model ayrıca kara ve deniz hareketli veya sabit hizmetler için de uygundur. Eğriler; frekans (100,600 ve 2000 MHz), etkin verici anten yüksekliği (1-1200m), alıcı-verici anten arası mesafe (1-1000km), aşılacak zaman yüzdesi (%1, %10 ve %50) ve farklı yol çeşitleri (karasal, sıcak ve soğuk deniz)

içindir. Alıcı antenin yer yüzeyinde olduğu kabul edilmektedir. Çok dikkatli uygulanacak interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleriyle herhangi bir değere karşılık gelen elektrik alan ifadesi, eğriler yardımıyla bulunabilir [16]. Alıcı anten yüksekliği, alıcı antenin bulunduğu bölgenin yüzey türü, bu bölgenin değişkenliği, binaya giriş kaybı ve yüzey erişim açısı (terrain clearance angle – TCA) için düzeltmeler hesaplanabilir [17]. Bir örnek olarak Şekil 1.14’de gösterilen eğri incelenebilir. Bu eğride zamanın %50’si için (median seviyesi - ortalama seviye) 600MHz’de, verici anten yüksekliği 75m ve ERP=1000W olmak üzere elektrik alan şiddeti değerleri belirtilmektedir [4].



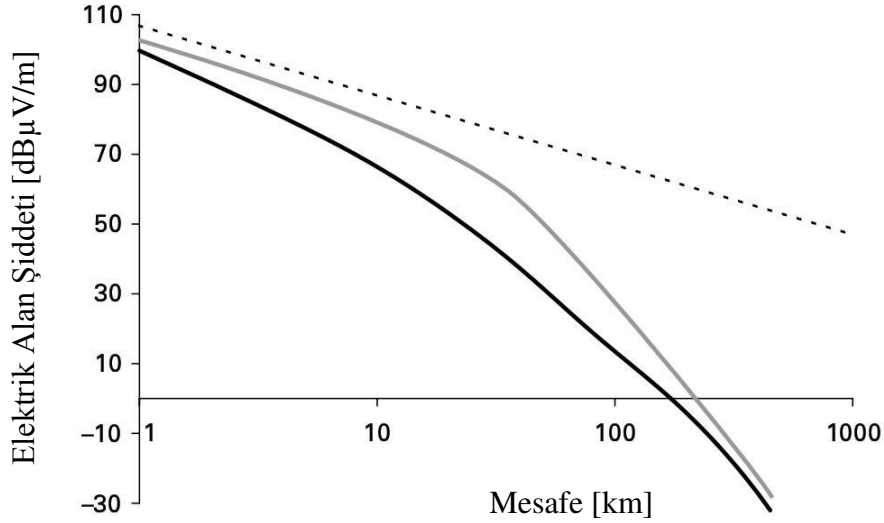
Şekil 1.14. 75m yüksekliğe konumlandırılmış, 600Mhz’de yayın yapan ve 1000W etkin ışıma gücüne sahip bir verici antenin mesafeye bağlı oluşturacağı ortalama elektrik alan şiddeti tahmini [4].

Şekil 1.14’de koyu renkli eğri, ITU-R P.1546 tavsiyesine göre, kesik çizgili eğri de serbest uzay yayılımına göre oluşturulmuştur. P.1546 tavsiyesi için 100km mesafede yaklaşık 13dBμV/m’lik bir elektrik alan şiddeti tahmini yapılmaktadır. Bu değer 600MHz’de eş yönlü bir anten tarafından alınan güce dönüştürülebilir:

$$\begin{aligned}
 P_r[\text{dBm}] &= E[\text{dB}\mu\text{V/m}] - 20\log f[\text{MHz}] - 77.2 \\
 &= 13 - 20\log 600 - 77.2 \\
 &= -119.7
 \end{aligned} \tag{75}$$

Yerel bir televizyon alıcı anteni yaklaşık 14dBi kazanca sahiptir ve besleme kablosuna yaklaşık (119.7+14) -105dBm’lik işaret iletir. Anten ve televizyon arasındaki

diğer kayıplar da hesaba katıldığında bu -110dBm'e kadar düşebilir. Televizyonda net bir görüntünün oluşabilmesi için -80dBm'lik işaret gerektiği bilindiğine göre verici gücü 30dB artırılmalıdır. Bir başka seçenek olarak verici anten yüksekliği artırılabilir. Şekil 1.15, Şekil 1.14'deki grafiği 300m yükseklikteki verici antenin oluşturduğu elektrik alan şiddeti tahminlerini gösteren ek bir eğri ile göstermektedir [4].



Şekil 1.15. 75m ve 300m yüksekliklere konumlandırılmış, 600Mhz'de yayın yapan ve 1000W etkin ışıma gücüne sahip verici antenlerin mesafeye bağlı oluşturacakları ortalama elektrik alan şiddeti tahmini [4].

Şekil 1.15'de koyu renkli eğri 75m yüksekliğe, açık renkli eğri 300m yüksekliğe yerleştirilmiş anten için ve kesik çizgili eğri de serbest uzay yayılımı için tahmin edilen değerleri göstermektedir. Tavsiye P.1546 tarafından verilen iki eğri incelendiğinde 300m anten yüksekliğine sahip vericinin 100km'lik mesafede yaklaşık 9dB'lik bir artışla (75m anten yüksekliğine sahip verici 100km'de 13dBµV/m'lik elektrik alan şiddeti oluşturabilirken) 22dBµV/m değere sahip bir elektrik alan şiddeti oluşturduğu gözlenmektedir. 2 eğri arasındaki fark sabit değildir. Çok kısa mesafeler için her iki anten yüksekliği için yapılan alan şiddeti tahminleri, serbest uzay için yapılan hesaplamalar sonucu oluşan eğrinin verdiği değerlere yaklaşmaktadır. Ayrıca çok uzak mesafeler için (1000km'ye yaklaşırken) tahmin edilen işaret şiddetleri arasındaki fark çok küçüktür. 2 anten yüksekliği için 25km'de yaklaşık 15dB'lik bir seviye farkı oluşmaktadır. Bu fark, dünya yüzeyinin eğriliğinden kaynaklanmaktadır [4].

Ufka doğru bakıldığında, ufkun uzaklığı gözlemcinin yüksekliğine bağlıdır. Deniz seviyesinde bulunulduğu düşünülürse, ufkun uzaklığı deniz seviyesinden yüksekliğe bağlıdır. Görünür ufkun (Uf_G) uzaklığı yaklaşık;

$$Uf_G = 3.6\sqrt{h} \text{ [km]} \quad (76)$$

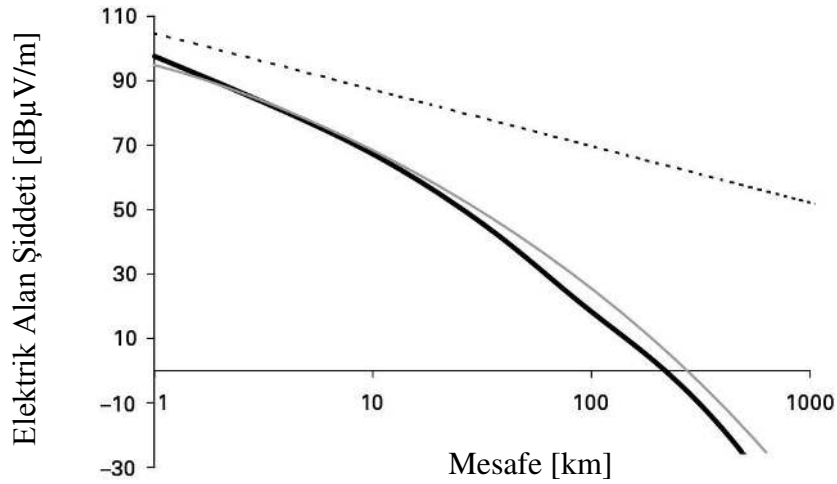
dir. Bu ifadedeki “h” deniz seviyesinden m cinsinden yüksekliği ifade eder. Radyo ufku (Uf_R) troposferik etkilerden dolayı yaklaşık;

$$Uf_R = 4.1\sqrt{h} \text{ [km]} \quad (77)$$

dir. Bu sebeple 75m yüksekliğe sahip bir anten için ufuk uzaklığı 35km, 300m yüksek için 70km olacaktır. 75m’lik anten yüksekliği için iki tahmin arasındaki fark, radyo ufkunun biraz yakını ve uzağının oluşturduğu aralıktadır en büyüktür. 70km aşıldığında ise her iki yükseklik için radyo ufku aşılmış olur ve işaretler arasındaki fark azalır. 1000km’de verici anten yüksekliğinin alınan işaret gücü seviyesine etkisi yok denecek kadar azdır [4].

Denklem 33, yani frekans terimi içermeyen elektrik alan şiddeti ifadesi için mesafenin logaritmik olarak arttığı bir elektrik alan şiddeti - mesafe grafiği çizildiğinde düz bir çizgi elde edilir. Bunun sebebi alıcının vericiyi direkt olarak gördüğü yakın mesafelerde elektrik alan şiddeti bütün frekanslar için serbest uzay durumundaki değere yakınsayacaktır. Ancak link uzayıp, dünyanın tümsekliği etki etmeye başladığında alan şiddeti frekansa bağlı olacaktır. Şekil 1.16’da 100MHz ve 600MHz için alan şiddetinin mesafe ile nasıl azaldığı gösterilmektedir [4]. Şekilde kesik çizgili eğri yine serbest uzay yayılımını temsil etmektedir.

Umulduğu gibi yakın mesafelerde (30km’ye kadar) her iki frekans için çizilen eğrilerde çok az bir fark gözlenebilmektedir. Uzak mesafeler için düşük frekanslarda elektrik alan şiddeti değeri daha yüksek olacaktır. Bunun sebebi düşük frekanslı elektromanyetik dalgaların yüksek frekanslılara göre engellerden daha iyi kırılma başarımına sahip olmalarıdır. Bu incelemede engel uzak mesafeler için dünyanın oluşturduğu tümsekliktir.



Şekil 1.16. 75m yüksekliğe yerleştirilmiş bir anten için 600MHz (koyu renkli eğri) ve 100MHz'de (açık renkli çizgi) ortalama alan şiddeti tahminleri [4].

P.1546 yönteminin 30-3000MHz frekans aralığı ve 1-1000km arası mesafelerde kullanılması önerilmektedir. P.1546 yöntemi tarafından sağlanan eğriler, yer yüzeyinden 10m'lik bir yükseklikte elektrik alan şiddeti tahminleri sağlamaktadırlar. Bu yükseklik yaklaşık 2 katlı bir binanın çatısına denk gelmektedir [4].

1.5. TV/Radyo Yayını ve İletişim İçin VHF ve UHF Antenler

VHF ve UHF bantları noktadan noktaya ve TV/Radyo Yayını hizmetlerinden oluşan çok geniş bir hizmet çeşitliliğine, büyük ekonomik ve sosyal içeriğe sahip amaçlar için kullanılırlar. Bunu başarmak için de birçok anten tipine ihtiyaç vardır.

1.5.1. Tasarımda Sistem Kararlılığı

Herhangi bir yayın veya iletişim sistemi yeterli seviyede ve dış etkenlerden etkilenmeyecek şekilde, sistem kararlılığı ve kullanılabilirlik sağlamalıdır. Bir link, eğer işaret-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) tasarlanan seviyenin altına düşerse kullanışsız hale gelebilir. Bir sistem için tasarlanan hizmetin, bu kullanışsız kalma süresini zamana bağlı olarak belirtmesi önemlidir. Can kurtarma acil servislerine gerekli linkin, %0.01 veya daha aşağısında bir aksama süresine sahip olmasına izin verilebilir. Bir başka

durumda ise amatör balıkçıların kullandığı iletişim cihazlarında %1'lik bir aksama süresi kabul edilebilir olacaktır.

Yayılmı yolundaki istatistiksel dalgalanmalardan dolayı oluşan bayılmadan (fading), güç hesaplamalarında genellikle bir bayılma sınırı (fade margin) ifadesi referans alınarak korunmaya çalışılır. Mobil sistemlerde, sistem kararlılığında bayılmanın etkisini azaltmak için çoğullama sistemleri kullanılır. Bu durum, fiziksel olarak ayrılmış 2 yoldaki bayılma olayları arasında düşük ilinti oluşması avantajını getirir.

Anten sorunları, sistem kullanılrlılığında önemli bir etkiye sahiptir. Kritik sistemlerde kararlılık, sıklıkla 2 farklı anten bir hibrid birleştirici ile beslenerek arttırılır. Böylece bir anten sistemi çöktüğünde diğeriyle daha düşük işaret seviyesiyle sistemin devamlılığı sağlanmış olur. Antenler tasarlanırken kullanıcının sistem kararlılığı ve güvenilirliği ihtiyacının anlaşılması çok önemlidir ve tasarlanan her bir sistemin performansından emin olunmalıdır. Bu amaçların gerçekleştirilebilmesi için sistemde hata ve kararsızlığa neden olan mekanizmalar anlaşılmalı ve karşı önlemler alınmalıdır. Herhangi, çok yaygın ve herkes tarafından kabul görmüş yöntemle bir antenin kararlılığını tahmin etmek çok zordur. Kullanıcılar, deneyimleri ışığında geçmişteki problemlere neden olan zayıflıklara özellikle bakarak amaçlanan tasarımı gözden geçirirler. Çalışmakta olan antenlerinin servis dışı kalması telekomünikasyon veya yayın işletmecisinin asla istemeyeceği bir durumdur. Zor iklim şartlarında yıllarca kararlı bir şekilde çalışabilen antenler iyi tasarımlarla mümkündür. Karmaşık tasarımlar (over-design) pahalı ve gereksizdir. Ayrıca basit tasarım (under-design) için fazla harcama yapılır ve hayati hizmetleri tehlikeye atar. Anten arızalarındaki başlıca sebepler şunlardır [18]:

- Rüzgâr sebepli mekanik arızalar
- Korozyon
- Ultraviyole bozulma
- Su sızması
- Buz ve kar
- Kum ve toz
- Güç altında oluşan aşırı ısıya bağlı bozulma
- Yıldırımın zararları

1.5.2. Güvenlik

Kişinin maruz kalabileceği maksimum izin verilen RF alanı ve güç akısı seviyeleri belirli ulusal ve uluslar arası düzenlemelerle ve karşılık gelen ulusal standartlarla belirtilmiştir. Bunlar elektromanyetik alanların etkilerinin, insan vücuduna bilinen bir sağlık etkisi olmayan seviyede kontrol edilmesini sağlarlar. LF, MF ve HF antenlerin çevresinde çalışanların sınırlayıcı parametrelerin, elektrik alan şiddeti (E) veya güç yoğunluğundan çok manyetik alan şiddeti (H) olduğunu unutmamaları gerekir [18].

1.5.3. Yayılım

Bütün sistem tasarımcıları, terminalden terminale kararlı bir link oluşturabilmek için troposferik etkileri, arazi engellerini ve inşa edilen çevrenin etkilerini göz önünde bulundurmalıdır. Bir noktadan-noktaya linkin izlediği yolun tahmini oldukça açık olmasına rağmen, çok sayıda kullanıcıya hizmet veren TV/Radyo yayını ve hücresel sistemler için kapsama alanı belirlenmesi çeşitli yol ve konum durumlarına göre istatistiksel bir yaklaşım gerektirir. Çoklu yol yayılımından dolayı sinyalde bozulma olma olasılığı birçok sistemi etkiler. Uzun bir link için anten tasarlanırken, tipik sinyal seviyelerinin artması sonucu aynı frekanstaki yakın kullanıcılardan kaynaklı ortak kanal girişimi ve tipik sinyal seviyelerinin azalması sonucu kurulu linklerde kayıp oluşmasına sebep olan bayılma ve oluklanma (ducting) göz önüne alınmalıdır.

Elektromanyetik spektrumun sonlu kaynaklarının kullanımı yalnızca işaret biçimleri ve uygun modülasyon sistemlerinin kullanılması ile değil, ayrıca anten karakteristiklerinin seçimiyle de en uygun hale getirilir. Yerel TV sistemlerinde ortak ve bitişik kanal girişiminden kaçınmak için TV/Radyo verici ve alıcı antenlerinde patern ayarlaması yapılır [18].

1.5.4. Kutuplanmanın Seçimi

Radyo hizmetleri için sıklıkla dairesel kutuplanma kullanılır. Böylece alıcı anten kutuplanmasının etkisi azalmış olur ve amatör bir kullanıcı için yeterli yüksek kalitede işaret bulmak kolay hale gelir.

Dağlık arazide yatay kutuplanma kullanımının avantajı, yayılım yolu üzerinde engeller bulunan noktadan-noktaya linkler kurabilmektir. Ancak kutuplanma seçimini, sıklıkla ortak kanal girişim kontrolü ihtiyacı belirler. Birbirine yakın yerleştirilmiş antenlerin aralarındaki yalıtımı arttırmak için dikgen (ortagonal) kutuplanma çokça kullanılır.

Dairesel kutuplanmanın (CP) kullanımı, yansıyan çoklu yol işaretlerinin oluşturduğu bozucu girişimin etkilerini azaltabilir. Bu tür bir problemin oluşacağını düşünüldüğü herhangi bir yayılım yolu için dairesel polarizasyon göz önüne alınmalıdır. Dairesel kutuplanma, ayrıca deniz yüzeyi yansımalarının sorun oluşturacağı düşünülen problemli deniz yüzeyi yayılımı için de dikkate alınır. Bir dairesel kutuplanma linkinin her iki ucunda da aynı polarizasyona sahip antenler kullanılır. Bazı ülkelerde TV yayınında dairesel kutuplanma kullanılır. Ama bu tür uygulamada, alıcı anten genellikle yatay kutupludur [18].

1.5.5. Linklerde ve TV/Radyo Yayınında Kullanılan Antenler

Birçok düşük ve orta kazançlı anten, ışınma dizi eksenine paralel olacak şekilde uçtan ışımalı (end-fire) olarak tasarlanırlar. Yüksek kazanç istenildiğinde genellikle uçtan ışımalı anten dizisi kullanılır.

Bazı ülkelerde bowtie dipol ve köşeli yansıtıcı anten tasarımları, TV alıcılar için sıkça kullanılırlar. Fiyat/başarım açısından bakıldığında bu antenler pek avantajlı değildirler. Basit log-periyodik antenler UHF bandını kapsarlar. Çeşitli hibrid yagi-uda, log-periyodik ve diğer çözümler VHF ve UHF bandlarında çoklu band işlemleri sağlamak için kullanılırlar. Bu tasarımların çoğu, orta seviyede kazançla sahiptirler. Ancak bina dışı yüksek işaret seviyeleri bu anten çeşitlerinin birçok şehirde yeterli alım yapabilmelerini sağlar. Ortak kanal girişimi ve çoklu yol (multipath veya ghosting) durumlarında, daha dar azimut ışın demeti genişliğine ve daha düşük yan kulak seviyelerine sahip olduğu bilinen anten türleri kullanmak fazlaca tercih edilen bir durumdur [18].

Yagi-Uda Antenler: Yagi-Uda anteni 2.5GHz'e kadar, tasarlanmış en başarılı genel amaçlı yönsiz antendir. Ucuz, yapısı basit ve 17dBi'ye kadar kazanç sağlamaktadır. Çoklu dizi kullanıldığında kazanç daha da yükselmektedir. Uygulamaya uygun olacak şekilde bandgenişliği seçilebilir. Yaklaşık bir oktav bandgenişliği elde edilebilir. Bir oktav bandgenişliği, en yüksek frekansın en düşük frekansın 2 katı olduğunu ifade etmektedir

[19]. Daha düşük bir kazançla daha dar bir band sağlanabilir. Düşük frekanslarda gerçekleştirilebilir kazanç, antenin fiziksel boyutuyla sınırlanmıştır. UHF bandının üst kısımlarında daha yüksek kazanç gerekliyse yansıtıcı bir anten daha basit, daha ucuz ve daha kararlı olabilir.

Yagi-Uda antenler makul derecede düşük yan ve arka kulak seviyeleriyle tek yönlü demet sağlarlar. Temel anten karakteristiği, yansıtıcı çubuklar veya anten dizileri oluşturularak değiştirilebilir. Belirli bir ışıma paterni elde edebilmek için besleme kablosundan istenmeyen ışımayı engellemek amacıyla ışıma yapan elemanı uygun bir balun ile beslemek önemlidir. Tipik yagi-uda antenleri, ana demet yönünde en az 20dB'lik çapraz kutuplanma ayrımı (cross-polarization discrimination, XPD) sağlarlar. İyi simetri ve iyi dengelenmiş besleme/balun sistemiyle daha yüksek çapraz polarizasyon ayrımı elde edilebilir. Ayrıca iyi tasarlanmış bir ekranlama (screen) ile 40dB'lik arka-ön kulak kazanç oranı sağlanabilecektir. Yagi-Uda antenlerde dairesel kutuplanma, antenler çapraz yerleştirilerek oluşturulacak dizilerle elde edilebilir. Bunun için bir çift anten elemanı dik açıda olacak şekilde ortak bir direğe yerleştirilir.

Yagi-Uda antenleri yüksek giriş güçlerini desteklemek için üretilebilirler ve sıkça yönlü TV/Radyo iletimi için kullanılırlar. Evlerde kullanılan TV alıcı antenlerinin fiziksel şekilleri bir anlamda tasarımcının hayal gücüne bağlıdır ve dünyanın dört bir tarafındaki şehirlerde üretilmiş çok farklı ilginç anten tasarımlarına rastlanabilir [18].

Log-periyodik Antenler: Büyük bir bandgenişliğine ihtiyaç olan uygulamalarda log-periyodik antenin geniş bir kullanımı vardır. Tipik bir VHF ve UHF antenin kazancı yaklaşık 10dB'dir. Ancak iki veya daha fazla antenden dizi oluşturularak daha büyük kazançlar elde edilebilir. Tüm log-periyodik tasarımların dezavantajı, orta seviyede bir kazançla rağmen büyük fiziksel boyutlarıdır. Bunun sebebi, tüm yapının yalnızca küçük bir parçasının verilen frekansta aktif olmasıdır.

VHF-UHF bandlarında en çok kullanılan tasarım şekli log-periyodik dipol dizilerdir (log-periodic dipole array, LPDA). İyi tasarlanmış bir oktav bandgenişlikli LPDA, 1.3:1'den düşük VSWR (voltage standing wave ratio / gerilim duran dalga oranı) ve 10dB'lik kazançla sahiptir. Log-periyodik antenler hem TV alıcı antenlerinde hem de VHF ve UHF TV/Radyo bandları için düşük güçlü naklen yayın istasyonlarında verici antenler olarak kullanılırlar [18].

Sarmal Antenler: Uzun sarmal bir anten, kolay belirlenebilir bir başarıma sahiptir. Ayrıca yapımı ve sisteme uyumu basittir. 1.2:1'den az bir VSWR %20 bandgenişliğinde

oldukça kolay elde edilebilir. Daha geniş bandgenişlikleri sarmal, uca doğru inceltilerek veya çapına müdahale edilerek elde edilebilir. İletken ara halkalar (spacers) sarmal elemanı merkezdeki destek çubuğundan desteklemek için kullanılabilirler ve anten çok sağlam yapılabilir. Daha yüksek frekanslarda sarmal elemanı desteklemek için iletken bir bandın, yalıtkan bir çubuk veya boru üzerine sarılması daha uygun olabilir. Tek bir sarmaldan elde edilebilecek maksimum kazanç, uyun olarak desteklenebilecek fiziksel boy ile sınırlandırılmıştır. Tipik olarak 150MHz’de 12dBi ve 2GHz’de 20dBi kazanç mevcuttur.

Kazancı arttırmak için sarmallardan dizi oluşturulabilir. Sistemin doğru faza sahip olması için dizi elemanlarının girişleri aynı fazla sürülmelidir. Her bir sarmalın dizideki başlama konumu aynı olmalıdır. Düşük kazançlı, özellikle kısa 4-katlı sarmal antenler (quadriplier helices) yansıtıcıları besleme birimleri ve küçük uydu terminalleri için anten olarak uygulamada yer alırlar. Ayrıca seramik-yüklü 4-katlı sarmal anten (ceramic-loaded quadriplier helices) GPS sistemleri için alıcı anten olarak kullanılır [18].

Bowtie Dipoller ve Yansıtıcılar: Bir sütun boyunca dizilmiş bowtie dipollerden oluşan diziler bir yansıtıcı yüzeyin önüne yerleştirilerek yatay kutuplu TV alıcı anteni olarak sıkça kullanılır. Bowtie dipolü oluşturan üçgenler delikli ve ızgaraya benzeyen bir yapıda oluşturulabilir. Bu ızgaranın aralıkları $1/10$ dalga boyundan küçük olmalı veya üçgenler besleme noktasından iletken çubuklardan oluşmuş bir yelpaze şeklinde yerleştirilerek elde edilmelidir. Daha fazla kazanç sağlamak ve ön-arka kulak kazanç oranını arttırmak için dipoller genelde dikey olarak kümelenirler. Ticari olarak mevcut antenler 2’den daha az VSWR’a, 15dB’den daha büyük ön-arka kulak kazanç oranına ve UHF bandının %90’ında, maksimum kazancın 13dB aşağısından daha düşük yan kulak seviyelerine sahiptir [18].

Köşeli Yansıtıcılar: İyi tasarlanmış köşeli yansıtıcı antenler yükek kazanç ve düşük yan kulak seviyelerini sağlayabilecek özelliktedir. Ama 100MHz’in altında mekanik olarak elverişsizdirler. Bir köşeli yansıtıcı kullanmadan önce aynı miktarda malzeme kullanılarak bir ya da iki Yagi-Uda antenin yapımının daha etkin olmadığından emin olmak gerekir.

UHF bandında köşeli yansıtıcıların yapımı delikli veya deliksiz levha kullanılarak çok basit şekilde gerçekleştirilebilir. Yansıtıcının genişliği, tepeden dipolün uzaklığı ve tepe açısı seçilerek çeşitli demet genişlikleri ve arka-ön kulak kazanç oranları ile elde edilir [18].

Panel Antenler: Üzerine bir hat boyunca veya düzlem üzerinde konumlanmış şekilde basit ışıyan elemanlar yerleştirilmiş, düzlem bir yansıtıcıya sahip antenlerdir. Bir veya daha çok panelin birbirine eklenmesiyle bir dizi oluşturulabilir.

Tipik paneller; tam dalga dipoller, yarım dalga dipoller veya yarıkları ışıyan elemanlar olarak kullanırlar. Bazı uygulamalar için Yagi-Uda antenlerden daha avantajlıdırlar:

- Bir oktav kadar geniş bir bandgenişliğinde daha sabit kazanç, ışıma paterni ve VSWR,
- Daha kompakt fiziksel yapı (Faz merkezi destek yapının eksenine daha yakındır. Böylece azimut ışıma paterni kontrolü daha iyi sağlanır),
- Üzerine yerleştirildiği yapı ile çok düşük kuplaj,
- Düşük yan ve arka kulak seviyeleri.

UHF bandındaki frekanslar için panel antenler baskı devre tasarım yöntemlerine elverişlidirler. Işıyan elemanlar, besleme hatları ve uyumlama sistemleri şerit hatlarla üretilebilirler. Daha düşük frekanslarda ışıyan elemanlar iletken destekler kullanılarak minimum gerilimli noktalara yerleştirilir. Böylece güçlü, sert bir yapı üretilebilir. Paneller, sıklıkla TV/Radyo yayını için karmaşık diziler halinde bloklar oluşturularak kullanılır.

Paraboloid Antenler: Yüksek kazançlı antenlerin tasarımı, belirlenmiş ışıma paterni ve kazanç oluşturmak için gerekli açıklığın aydınlatılması problemini azaltabilmektedir. Açıklığın boyutları yalnızca gerekli kazanç ile belirlenir. Açıklığı dolduran elemanın çeşidi önemli değildir. Besleme sistemi ve ışıyan elemanların her birinin kazançlarını 3dB arttırmak için maliyet 2 katına çıkmaktadır. İlgi çeken bir tasarım gereken anten açıklığının tamamını kapsayan bir yansıtıcının ışıyan bir eleman tarafından aydınlatılmasıdır.

Tasarımın amacı yansıtıcının şeklinin ve boyutunun seçilmesi, ayrıca aydınlatan antenin ışıma paterninin belirlenmesidir. Eğer anten açıklığı tam olarak doldurulmazsa veya aydınlatması düzgün değilse, elde edilebilecek kazanç azalır. Elde edilen kazancın, aynı açıklığın kayıpsız elemanlarla düzgün bir biçimde aydınlatılması ile elde edilen kazanca oranına açıklık verimi denir. Alıcı durumunda bu büyüklük, açıklığa gelen gücün antenin uçlarındaki uyumlu bir yüke oranını verir.

VHF ve UHF bandlarında bir yansıtıcı bütün plaka, delikli plaka, tel ağ veya paralel eğritilmiş çubuklar serisiyle yapılabilir. Dalga boyu büyük olduğunda yansıtıcı yüzeyi

hesaplamalarında, birçok gerçek yüzeye yaklaşıklık yöntemi mevcuttur ve mekanik toleransla ilgilenilmez.

Rüzgâr ve karın etkilerini azaltmak için beslemeler veya antenin tamamı bir kaporta (radome) ile kaplanır. Bu kaplama malzemesi fiberglastan veya antenin ön kısmı boyunca gerilmiş diyaframdan yapılabilir. Birçok soğuk iklimde koruma kaportası içine tel setler gömülerek anten ısıtılır. Ancak bu yöntem yalnızca düzlem polarizeli antene uygulanabilir [18].

1.5.6. TV/Radyo Yayını Antenlerinde Paternin Belirlenmesi

TV/Radyo yayını antenlerinin ortak bir karakteristiği genelde standart ışılan elemanların farklı biçimlerde doğrusal dikey dizileri olmalarıdır. Bu yapılandırma ihtiyacı, elevasyon düzleminde iyi odaklanmış bir demetin içine enerjiyi toplayarak, etraftaki arazinin belirlenmiş alanlarına işareti göndermek amacıyla oluşmuştur. Gökyüzüne doğru olan ışımaya boşa gider. Bu yüzden amaç, mümkün olabildiğince enerjiyi hizmet verilen alanın dış kenarları doğrultusunda ve bazen ufka doğru yoğunlaştırmaktır. Dikey (elevasyon) ve yatay (azimut) düzlemlerde elde edilen ışımaya paternlerinden oluşan doğrusal dizilerin karakteristiği matematiksel olarak ayrılabilir. Bir başka deyişle elevasyon paterni, ışılan elemanların fiziksel olarak düzenlendiği ve elektriksel olarak beslendiği dikey düzlemde belirlenir. Her bir elemanın yapısı yalnızca kapsama alanı için önemlidir. Çünkü patern her bir elemanın elevasyon paterni ile seçilen karmaşık besleme akımları ve boşluk miktarından oluşan dizi faktörünün çarpımına eşittir. Azimut paterni üst üste dikey katların bulunduğu yoldan bağımsız, tek bir kattaki elemanların dizilişine bağlıdır. Şunu değerlendirmek önemlidir ki bu ayrılabilirlik antenin ana demeti yatay doğrultudan aşağıya doğru saparsa veya antenin üst üste katları eş azimut paternlerine sahip değilse başarısız olur. Baz istasyonu ve TV/FM yayını antenleri arasındaki temel fark, TV/FM yayınında antenlerin daha geniş ve karmaşık azimut paternlerine sahip olmalarıdır.

Yönsemez azimut kapsama sağlayacak şekilde dikey düzlemde aralıklı olarak yerleştirilen elemanlar dizisini göz önüne alındığında, eğer açıklık büyükse (örneğin dalga boyundan 8 kat büyük), toplam yönlendiricilik yalnızca dizi boyunun bir fonksiyonu olur. Bu açıklığı, düşük yönlendiriciliğe (eş yönlü ışınlayıcılar) veya yüksek yönlendiriciliğe (örneğin bir dalga boyunda dikey dipoller) sahip elemanlarla doldurabiliriz. Ancak açıklığı elemanlarla

doldurduğumuz sürece yöneltilik aynı kalacaktır. Genel bir kural olarak yönsemez bir dizinin maksimum yöneltiliği, dikey açıklığın dalga boyu başına yaklaşık 1.15 kat olacaktır. Eğer açıklık az doldurulursa, elemanlar birbirlerinden çok uzakta kalacaktır ve bu düşük yöneltilik ile sonuçlanacaktır. Açıklığın aşırı derecede doldurulmasının yöneltiliğe bir yararı olmaz. Aksine bitişik elemanlar arasında kuplajı (karşılıklı empedans) artırır ve dizinin uyartımının kontrolünü zorlaştırır.

Azimet düzleminde durum farklıdır. Eğer 180° 'lik bir daire alanını diğer yarım dairede hiçbir işaret olmayacak şekilde düzgün aydınlatma özelliğine sahip ışıyan bir eleman seçilirse, böyle bir elemanın 2'lik (3dB) bir yöneltiliğe sahip olacağı açıktır. Çünkü yöneltilik aslen 3 boyutlu bir özellik olarak tanımlanmıştır. Bu oran çoğunlukla azimet maksimum-ortalama değer oranı olarak bilinir. Maksimum-ortalama değer oranı, sayısal olarak doğrusal alan koordinatlarında çizildiğine kutupsal ışına paternini daire içine alan dairenin alanına, yani çizilen ışına paterninin kendisine eşittir. Çünkü güç ve alan, elektrik alan şiddetinin karesi ile orantılıdır.

Dikey bir dizinin toplam maksimum yöneltiliği, elevasyon düzleminde yöneltiliğin maksimum-ortalama değer oranı ile çarpımıdır [18].

1.5.6.1. Azimet Paterninin Belirlenmesi

Bir dizinin her bir katı tek bir ışıyan elemandan oluşabilir. Bu basit TV/Radyo yayını antenlerinde yaygındır. İstenen patern, sıklıkla elemanları bir direğin üzerine dizerek veya ters yönde fazla sınırlamaya ihtiyaç duyulduğunda bir yansıtıcı düzleme dizerek elde edilir. Yansıtıcı veya yansıtıcısız tek bir ışıyan eleman kullanılarak istenen azimet paterni elde edilemediğinde, her bir kat birçok elemandan oluşturulur. Her biri sıklıkla entegre edilmiş bir ışıyan yapı ve yansıtıcıdan oluşan panel şeklinde üretilirler. Paneller genelde geniş frekans bandgenişliğini kapsamak için ve çalıştığı bandgenişliği içinde çok tutarlı ışına paterni, kutuplanma ve empedans sağlamak için tasarlanırlar. Tipik paneller TV/Radyo yayını bandlarının tümünü kapsarlar. Anten tasarımcısı geniş bir çeşitlilikte azimet patern şekilleri oluşturabilir. Yakın antenler arasındaki ortak empedansı (coupling) azaltmak için sıkça her bir eleman tel çitlerle veya boşluklu yapılarla çevrelenir [18].

1.5.6.2. Elevasyon Paterninin Belirlenmesi

Düz arazide ışınlanan gücün yarısı yer yüzeyine yerleştirilmiş herhangi bir alıcının üst kısmında kaybolur. Dünyanın eğriliğinin sonucu ana demet alıcının üzerinde ne kadar fazla geçiyorsa, alıcı antende o kadar fazla enerji toplanabilir. Ana demet bu nedenle genellikle aşağıya eğilir. Üst -3dB noktası yatay düzlemde bulunduğundan tam eğim, anten ve kullanıcının birbirlerine göre elevasyonuna bağlıdır. Demeti aşağı eğmenin ek bir sonucu, etkin hizmet verilen alanın ötesinde yerleşmiş kullanıcıların istenmeyen aydınlanma seviyeleri düşer. Hizmet verilen alan her zaman kullanmak için çok zayıf ama ihmal etmek için çok güçlü sinyaller tarafından kapsanan bir alanla çevrilidir. Bu bölgenin alanı demet eğimi (beam tilt) kullanıldığında azalır. Yerden havaya hizmetler için küçük bir yukarı demet eğimi ara sıra kullanılır.

Her biri özdeş akımlara sahip ışışyan elemanlardan oluşan bir sütun eleman basit bir $\frac{\sin(x)}{x}$ fonksiyonu şeklinde elevasyon ışışma paterni oluşturur. Bu patern genelde bazı ilave şekillendirmeler yapmak için dizinin katlarını farklı fazlarda veya genliklerde akımlarla besleyerek değiştirilir.

Keyfi şekillendirme ile bir ışışma paterni oluşturmanın tek bir çözümü yoktur. Genelde genlik ve fazın her ikisinin birden değil yalnızca genlik için bir uyumlamaya gereksinim vardır. Bu nedenle çeşitli prosedürler uygun eleman akımları dizisi türetmek için benimsenebilir. Pratik yaklaşımlarda yakın elemanların çok farklı akımlara ihtiyaç duymayacağı fonksiyonların seçildiğinden emin olunmalıdır. Farklı akımlar ortak empedans etkilerinin büyümesine yol açacaktır. Işıışma paterni dizi akımlarındaki küçük değişikliklere karşı hassas olmalıdır. Çünkü bu geniş bir frekans bandgenişliğinde gerekli paternin elde edilmesini zorlaştırır [18].

1.5.7. TV/Radyo Yayın Sistemleri

TV/Radyo yayın sistemlerinin tasarımında, uzak mesafelerde olabildiğince girişim kısıtlanarak maksimum kapsama elde edilmeye çalışılır. Bu nedenle gelişmiş bir ülkede yüzlerce mikrodalga link bulunmasından dolayı elektromanyetik girişim yönetimi gerekir [4]. Bu amaçla frekans spektrumunun hizmetler arasında dağılımı dikkatlice yapılmalıdır.

Çalışılan frekanstaki radyo dalgaları; engeller, atmosfer ve yağmur tarafından etkilenir. İlk bakışta düşük frekansların daha iyi olduğu görülür. Uzun dalga boylarında

engeller düşük seviyelerde kırımın kaybına sebep olurlar. Yağmur etkisi ve atmosferik emilim 5GHz'in altında göz ardı edilebilir. Ayrıca düşük frekanslarda dalgaın beton gibi maddelere nüfuz etme (penetration) özelliğı daha iyidir. 2 önemli nokta unutulmamalıdır. İlk olarak; düşük frekanslarda anten boyları artacaktır ve yüksek veri hızları için büyük bandgenişliklerine ihtiyaç duyulacaktır.

Noktadan noktaya sağlanan servisler için yüksek frekanslarda link kayıpları azalacağından (frekans her ikiye katlandığında 6dB) yüksek frekanslardaki hizmetlerin daha verimli olduğu akla gelebilir. Ancak yüksek frekans yükselteçleri ve alıcılarının geliştirilme zorluğu, yağmur ve bulut etkileri bu durumu değiştirmektedir. Örneğın; 10GHz'de çoklu yol bayılması (multipath fading), 23GHz'de yağmur bayılması (rain fading) baskındır. Bu durumda engel bulunmayan radyo linkler için yüksek frekanslar iyidir demek daha uygun olacaktır. Aksine engel bulunan radyo linkler için alçak frekanslar daha uygundur. Dahası; her linkin her iki ucu anten boyutlarıyla değil de anten ışıma paterni gereksinimleriyle kısıtlanıyorsa, düşük frekanslarda link kaybı daha az olacaktır. Yüksek kapasiteli ve bundan dolayı büyük bandgenişliğine ihtiyaç duyan sistemler için frekans seçimi bütün durumlar ele alınarak dengeli olmalıdır. Çünkü frekans arttıkça bandgenişliği kullanılabilirliği artar. Eğer frekans çok yüksek olursa, yönsemez antenli terminallerin link kaybı ve engellerin etkileri, bir bölgede sürekli kapsamanın sağlanmasını zorlaştırır.

Uzak mesafeli TV/Radyo yayını ve uluslar arası karasal iletişimde 30kHz'den 30MHz'e kadar olan frekanslar kullanılabilir. Bu durumda tahsis edilen bandgenişliği küçük olacağından yalnızca orta seviyede kaliteli ses ve düşük veri hızlarında hizmet verilebilecektir. 30MHz üstünde yapılan Radyo/TV yayını daha kısa bir menzili kapsamaktadır ve tahsis edilebilecek daha geniş bandgenişlikleri ile yüksek kaliteli ses yayını yapılabilir. Televizyon yayını için büyük bandgenişlikleri gerektiğinden dolayı (10 MHz'den biraz daha az) genellikle 400-900MHz frekans aralığında bulunan daha yüksek bir frekans tahsis edilir. Bu durum televizyon yayını, frekans tahsisi açısından mobil sistemlere rakip hale getirmektedir.

Özellikle mobil servislerin kullandığı frekans spektrumu fazlaca kullanıldığından, sıklıkla 300MHz ve 3000MHz arasında oluşan özel spektrum bölgesi çok yüksek değere sahiptir. Televizyon yayını, mobil telefon, veri hizmetleri ve uzak mesafeli mikrodalga linklerine bu önemli frekans aralığı tahsis edilmiştir. Bütün bu sistemlerin karasal sistemler olduğuna dikkat edilmelidir.

Radyo veya televizyon yayını yapan bir anten için ideal yer, ufku açık olarak görebilen yüksek bir konumdur. TV/Radyo yayını, tek yönlü bir iletişimdir. Kullanılacak alıcının türü ve bulunduğu konum ile ilişkili varsayımlar yapmak gereklidir. Genellikle şu umulur ki; küçük, taşınabilir alıcılarla hareket halinde ve bina içinde radyo üzerinden ses iletimi yapılır. Bu nedenle işaret, bina içine girme ve bina içinde yayılmaya uygun, kayıpları izin verebilecek kadar güçlü olmalıdır. Bu, tek bir vericinin kapsayabileceği alanı etkiler. Televizyon alıcılarının, binaların çatılarının üstü gibi yüksek konumlara yerleştirilmiş yönsemeli alıcı antenlere sahip olması beklenir. Bu durum televizyon yayını işaretinin iletiminde avantaj sağlar. Alıcı antenin bu özellikleri, televizyon iletim bandgenişliğinin bir ses sinyalinin birkaç 100 katı olmasından dolayı gereklidir.

Ulusal TV/Radyo yayın ağları farklı bölgelerde frekansları yeniden kullanmaya ihtiyaç duyarlar. İki ortak frekans kullanan bölge arasında girişim oluşmuyor olması önemlidir. Sebep olunacak olan girişim seviyesi belirlenirken “ducting” oluştuğunda, zamanın küçük bir yüzdesi için işaret gücünün girişim tahminleri kullanılarak belirleme yapılması önemlidir.

Ağ tasarımcısı kapsama ve link tahminlerini göz önüne alarak bir kapsama ve frekans planı ortaya koyar. Bu plan, verici istasyonunun yeriyle beraber anten yüksekliği, kazanç, verici gücü ve ek olarak her bir verici tarafından kullanılacak frekansı içerir. İyi tasarlanmış bir ağ için tam kapsama ve girişim bulunmayan bir işaret alımı çok önemlidir. Dijital TV/Radyo yayınının icadıyla ağların planlanmasındaki yöntem değişmiştir. Dijital işaretlerle yüksek girişimli bir ortamda çalışmak, analog sistemlere göre çok daha tercih edilmektedir. Böylece aynı sayıda iletim kanalı için çok daha az spektruma ihtiyaç duyulur.

Ayrıca anten boyu arttıkça, belirli bir kapsama alanı için verici gücü azalacağından uzak mesafelerde daha düşük girişim oluşur. Böylece frekansların yeniden kullanılabilirliği artar [4].

1.5.8. Noktadan-Bölgeye İletişim

Noktadan alana iletişim, TV/Radyo yayını ve mobil iletişim için kullanılan verici istasyonların belirli bir bölgeyi kapsamasında izlenen yola verilen genel bir addır.

Kullanılan antenlerin en basit şekli yönsemesiz bir antendir. Dikey düzlemde sıklıkla 20°’den az olacak şekilde çok dar bir demet açıklığına sahiptirler. Bu çeşit antenler yaklaşık 10dBi’lik bir kazanca sahiptirler. Aynı doğrultu üzerindeki (collinear) 2 tel

elemanın birleşim noktasından bir işaret biçimi ile beslenmesiyle oluşturulan antene ise dipol anten olarak bilinmektedir. Yönsesiz antenlerin en temeli boyu yarım dalga boyu uzunluğunda olan bir dipoldür. Dolayısıyla yarım dalga dipolde her bir tel elemanın boyu çeyrek dalga boyu kadardır. Yarım dalga dipol geniş bir demet açıklığına ve 2.1dBi'lik kazanca sahiptir. Eş yönlü antenlere benzer şekilde referans anten olarak kullanılmaktadır. TV/Radyo yayınında kullanılan antenlerin kazançları yarım dalga bir dipole göre dB cinsinden, dBd sembolü ile ifade edilmektedir. Bu durumda 10dBi'lik kazanca sahip bir anten için 7.9dBd'lik kazanca sahiptir de denilebilmektedir [4].

Yarım dalga dipolün referans anten olarak eş yönlü antenden daha yaygın kullanılmasından dolayı EIRP terimi ERP (effective radiated power - etkin ışınlanan güç) terimi ile yer değiştirmiştir. ERP terimi, P_t ve G_t 'nin logaritmik birime sahip değerlerinin toplamına eşittir ve anten kazancı dBd cinsinden ifade edilmektedir. Bu sebeple 50dBm ERP'ye sahip bir anten 52.1dBd'lik bir EIRP değerine sahip olur [4].

TV yayını ve benzeri amaçlar için yüksek güçlü vericiler yüksek konuma yerleştirilmiş antenleri beslemektedirler. Alıcı, genellikle iletim linkine ek bir kazanç sağlamak amacıyla çatı seviyesine yerleştirilmiş, yönlü bir antendir. Tipik yerel TV antenleri yaklaşık 14dBi'lik kazanca sahiptir. Bunun anlamı büyük bandgenişliği gerektiren TV işaretinin iletimi düşünüldüğün de bile tek bir verici 100km ve üzerinde bir kapsama alanı sağlayabilir [4].

Bir TV/Radyo yayını vericisinin kapsama alanı öngörülürken kapsayacağı arazinin özelliğinin iletimin yönüne göre değişeceği unutulmamalıdır. Eğer TV/Radyo yayın anteni etrafındaki engellerden (binalar gibi) yeterince yüksek bir konuma yerleştirilirse “path-general” tahmin modelinin kullanımı mümkün olabilir. Bu model, verici ve alıcı arasındaki yolun tüm ayrıntılarını göz önüne almaz.

Noktadan alana iletim, bir merkez antenden kapsama alanı adı verilen bölgedeki vericilere veya alıcılara iletim veya alım işleminin gerçekleştirilmesinden söz etmektedir. Noktadan alana iletimin 2 ana çeşidi TV/Radyo yayını ve dijital mobil iletişim (GSM ve UMTS)'dir. Televizyon yayını düzenlemelerinde, alıcı antenin çatının üzerine yerleştirildiği ve verici antene yönlendirilmiş yönsemeli bir anten olduğu varsayılmaktadır. Televizyon yayınında büyük bandgenişliği (analog TV için 8MHz civarında) kullanıldığı için yüksek işaret seviyesine ihtiyaç duyulur. Yerel bir TV alıcısının net bir resim elde edebilmek için yaklaşık -80dBm'lik bir işarete ihtiyacı vardır.

1.6. Literatür Araştırması

Frekans spektrumunun iletişim için çok yoğun olarak kullanılan bandlarından, VHF ve UHF bandlarında özellikle TV/Radyo vericilerinin çevrelerinde oluşturdukları elektrik alan şiddeti ve güç yoğunluğu değerlerini belirlemek amacıyla bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Bell Sistem tarafından işletilen radyo iletim tesisleri için 1MHz – 11GHz aralığında birçok elektrik alan şiddeti ve güç yoğunluğu ölçümü gerçekleştirilmiştir. Farklı hizmetler için tekrarlayıcı istasyonlarda, büyük merkez istasyonlarda, büyük kentlerdeki ve yarı kentsel bölgelerdeki ofis binalarının çatılarında, bu binalarda bulunan radyo odalarında ve özel konutların bulunduğu bölgelerde uzak alan için elde edilen ölçüm değerleri, serbest uzay iletim denklemi ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Mikrodalga linkleri için yapılan ölçümlerin çoğu $1\text{mW}/\text{cm}^2$ değerinden küçük iken kentsel binaların üst katlarında yapılan ölçümlerde VHF ve UHF bandlarında yayın yapan vericiler (mobil iletişim ve ticari TV/Radyo yayını) sebebiyle güç yoğunluğu değerleri onun birkaç katı mertebelerinde ölçülmüştür [20].

Ning H. Lu tarafından yapılan bir çalışmada dünya yüzeyini düz varsayan 2-ışınlı yayılım modeli esas alınarak doğrusallaştırılmış ve birleştirilmiş 2-ışınlı yayılım modeli ortaya konarak çeşitli arazi yapıları, verici ve alıcı anten yükseklikleri ile farklı mesafeler için hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmada da genel formül basitleştirmeleri uygulanmış olup $L_p = E_r/E_t$ olarak belirtilen yol kaybı terimine, bitki örtüsü ve dünya yüzeyinin eğriliğinden kaynaklanan kayıpları da eklenmiştir. Çalışmanın sonucunda uygulanan bu yöntemin, iletişim uygulamalarının çoğunda ortak bir referans olarak kullanılabileceği vurgulanmaktadır. Elde edilen frekans – yol kaybı grafiklerinden sonuçların, 1000Mhz'den sonra yol kayıplarının frekanstan bağımsız hale geldiği, 100MHz'in altında kare yasasına uygun olarak değiştiği ve 100-1000MHz aralığında kare yasası ve frekanstan bağımsız durum arasında geçiş özelliği gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca anten yükseklikleri arttıkça yol kaybı eğrilerinin serbest uzay hesaplamalarındakilere yakınsadığı tespit edilmiştir [13].

Yeni Zelanda'da Auckland Üniversitesinde yapılan çalışmalarda 76MHz, 465MHz ve 851MHz'de baz istasyonları için kırsal, yarı kentsel, az kentsel ve kentsel alanlarda yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlarla oluşturulan eğriler, 20km'ye kadar düz yeryüzü kaybı denklemi ile oluşturulan eğrileri belirli bir yığın (clutter) katsayısı ile takip

etmektedir. Ayrıca ölçümler dördüncü kuvvet yasası ile oluşturulan eğrilerle örtüşmektedir [21, 22, 23].

Amerika Birleşik Devletlerinde nüfusun iyonlaşmayan radyasyona hangi değerlerde maruz kaldığını tespit etmek amacıyla VHF ve UHF bandlarında 15 büyük şehirde, 486 noktada toplam 14000 ölçüm yapılmıştır. Ölçümler sonuçlarında dikkat çeken nokta genel nüfusun sürekli elektromanyetik ışıma maruz kalmasından en çok FM radyo yayınının sorumlu olmasıdır [24].

400MHz üzeri frekanslarda mobil radyo yayılımı ile ilgili bir çalışmada çoklu yol girişimi incelenmiştir. Bu amaçla 2-ışınlı yayılım modeli ele alınmıştır. Serbest uzay iletim denklemi, aralarında d kadar mesafe bulunan alıcı ve verici anten için etrafta herhangi bir emici veya yansıtıcı yüzey olmadığını varsayarak alıcı antendeki güç ifadesini ortaya koymaktadır. Güç, mesafenin karesi ile ters orantılı olarak değişmektedir. Bir başka önemli nokta da, serbest uzay iletim denklemine göre yüksek frekanslarda iletim kaybı artacaktır. Bunun sebebi ise iletim kaybı frekansın karesi ile doğru orantılıdır. Mikrodalga frekanslarına kadar kullanılabilen, K.A. Norton tarafından türetilen ve K. Bullington tarafından sadeleştirilen düz yeryüzü iletimi ters dördüncü kuvvet yasası (frekans terimi içermez) olarak bilinir. Mikrodalga frekanslarında dünya yüzeyi düzgün olarak kabul edilemez. Bunun bir ölçütü aşağıdaki denklemde verilen “Rayleigh Kriteri (C)” dir:

$$C = \frac{4\pi\sigma\theta}{\lambda} \quad (78)$$

σ , yüzey düzensizliğinin yüzeyin ortalama yüksekliğine göre standart sapması; θ , radyan cinsinden yatayda gelme açısıdır. Deneysel sonuçlar göstermektedir ki $C < 0.1$ için yansıma aynada olduğu gibi yani yüzey düzgün kabul edilebilir [25].

L. W. Barclay tarafından geçtiğimiz 100 yıl içerisinde radyo dalgası yayılımının nasıl geliştiğini özetleyen bir çalışma yapılmıştır. Süreç 1860 yıllarında Maxwell, Fraday ve Hertz’in çalışmalarıyla başlamaktadır. Yayılım araştırmalarının ortamın daha kesin karakteri ve modellenmesine bağlı olarak, istatistiksel belirsizliklerin çok az etkili olduğu daha iyi tahmin modellerinin yapılabileceği vurgulanmaktadır [26].

Yapılan çalışmalarda serbest uzay yayılımı ve 2-ışınlı yayılım modelinin halen daha birçok sistem için temel oluşturduğu görülebilmektedir. Ancak tam bir sistem analizi için her bir yayılım ortamına özel yayılım modelleri oluşturulması gerekmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Materyal

Trabzon ili, Boztepe Mahallesinde kurulu olan TV/Radyo verici kuleleri etrafında farklı alıcı anten yükseklikleri, mesafeler ve konumlar için NARDA SRM-3000 spektrum analizör ile çeşitli modlarda ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, mevcut standartlarla karşılaştırılarak bir analiz yöntemi vasıtasıyla değerlendirilmiştir.

Ölçüm yapılan verici anten kulelerinin bulunduğu alanın genel görünümü Şekil 2.1'deki gibidir. Bu bölgede kurulu olan bazı TV ve Radyo vericilerinin telekomünikasyon kurumundan aldıkları güvenlik sertifikalarında bulunan değerler yardımıyla, Matlab programı ile 2-ışınlı yayılım modelini esas alınarak yazılan bilgisayar programı sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.1. Boztepe Mevkii TV/Radyo verici anten kuleleri

SRM-3000, 100kHz-3GHz aralığında elektromanyetik alanları ölçmek için tasarlanmış bir cihazdır. Asıl ölçüm görevi alan şiddetinin belirlenmesidir. SRM-3000’de kullanılan standart eş yönlü (3-eksenli) anten, 75MHz-3GHz frekans aralığında çalışabilmektedir. Ölçüm cihazı üzerinde 50Ω ’luk N-tipi RF giriş soket bağlantısı ve anten parametrelerini (tip, seri numarası, kalibrasyon tarihi...) cihaza ileten çoklu-pin bağlantı soketi de bulunmaktadır. Bu bağlantı ile yapılan ölçümlerde de kullanıldığı gibi 3 eksenli antenin istenen ekseninde ölçüm yapılmasına olanak sağlayacak şekilde antenin kontrolü sağlanabilir. Cihaz ile “Spectrum Analysis” ve “Safety Evaluation” modlarında anlık (RMS değeri için) ve ortalama değer sonuç tipleri için ölçümler yapılmıştır.

Ölçüm yapılan noktalar ile verici kuleleri arasındaki mesafe GARMIN marka GPS cihazı ile belirlenmiştir. Kullanılan bu GPS cihazı, bulunulan noktanın konumunu x-y kartezyen koordinat sisteminde (UTM – universal transverse mercator) belirttiği için mesafe hesabı, verici kuleleri ve ölçüm yapılan noktaların koordinatları ayrı ayrı belirlenerek basit kartezyen koordinat matematiği ile hesaplanabilmektedir [27].

2.2. Yöntem

2.2.1. Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

Boztepe Mevkii’nde kurulu olan TV/Radyo verici kuleleri etrafında kulelere farklı mesafelerde, konumlarda ve çeşitli anten yükseklikleri için SRM-3000 spektrum analizör ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir. Ayrıca ölçüm yapılan noktaların arazi yapısı ve konumu hakkında bilgi verilmesi amacıyla fotoğraflar sunulmaktadır.

Elde edilen veriler, “Spectrum Analysis” modu için belirlenen bir frekans çözünürlüğü ile ölçüm yapılan frekans aralığında her bir frekansta cihazın V/m cinsinden tespit ettiği elektrik alan şiddeti değerlerinin kaydedilerek oluşturulan tabloları içermektedir. Bu modda yapılan ölçüm verilerinden elde edilen frekans – elektrik alan şiddeti grafikleri ile belirlenen bir frekans için hesaplanan ve ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. “Safety Evaluation” modda yapılan band ölçümlerinde belirlenen bandlarda ortamdaki tüm frekanslar için toplam ortalama elektrik alan şiddeti değerlerini içeren tablolar kullanılmıştır.

SRM-3000 ile yapılan bazı ölçümlerde farklı anten yüksekliklerini daha rahat elde edebilmek ve anteni sabitleyebilmek için 1.5m’lik RF uzatma kablosu kullanılmıştır.

Kullanılan 3 eksenli anten ile eş yönlü ölçümler yapılabildiği gibi istenen düzlemde (X,Y veya Z) de ölçümler yapılabilmektedir. Anten yönelticiliğinin etkinliğinin tespiti amacıyla her bir düzlemde değer içeren ölçümler de yapılmıştır. Ölçüm için belirlenen konumların olabildiğince verici kuleleri direkt olarak görebilen noktalar olmasına dikkat edilmiştir. Konumlar, 17.08.2009 (I) ve 07.12.2009 (II) tarihlerinde A,B,C,D,E,F ve G simgeleri kullanılarak adlandırılmıştır. Tablolar halinde verilen ölçüm sonuçları, belirlenen her bir nokta için zamana bağlı olarak 20-50 örnek arası değer kayıtlı edildikten sonra ortalamaları hesaplanarak oluşturulmuştur.

Ölçüm I-A: Verici kulelerden 125m uzaklıkta, 1.70m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.2’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.1, Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami yanı ölçüm çalışması

Tablo 2.1. Ölçüm I-A bölgesinde VHF-UHF bandları için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	13,31
VHF-III	174	230	0,16
UHF-IV	470	582	1,76
UHF-V	582	800	2,72
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 13.761 V/m			

Tablo 2.2. Ölçüm I-A bölgesinde FM bandı için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM Band	87.5	108	13,34
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 13.34 V/m			

Tablo 2.3. Ölçüm I-A bölgesinde UHF bandı için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
UHF Band IV	470	582	1,75
UHF Band V	582	800	2,95
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 13.44 V/m			

Ölçüm I-B: Verici kulelerden 174m uzaklıkta, 1.70m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.3’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (174m) ölçüm çalışması

Tablo 2.4. Ölçüm I-B bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	4,68
VHF-III	174	230	0,05
UHF-IV	470	582	0,54
UHF-V	582	800	2,39
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 5.29 V/m			

Ölçüm I-C: Verici kulelerden 172m uzaklıkta, 1.70m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.4’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.5’de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (172m) ölçüm çalışması

Tablo 2.5. Ölçüm I-C bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	3,11
VHF-III	174	230	0,04
UHF-IV	470	582	0,51
UHF-V	582	800	1,11
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 3.25 V/m			

Ölçüm I-D: Verici kulelerden 160m uzaklıkta, 1.70m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.5’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.6’da gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (160m) ölçüm çalışması

Tablo 2.6. Ölçüm I-D bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	5,77
VHF-III	174	230	0,09
UHF-IV	470	582	1,82
UHF-V	582	800	1,78
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 6.34 V/m			

Ölçüm I-E: Verici kulelerden 114m uzaklıkta, 1.70m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.6’da gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Boztepe Mevkii – Askeri Kışla Girişi yanı ölçüm çalışması

Tablo 2.7. Ölçüm I-E bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	7,47
VHF-III	174	230	0,15
UHF-IV	470	582	1,43
UHF-V	582	800	2,86
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 8.13 V/m			

Ölçüm I-F: Verici kulelerden 224m uzaklıkta, farklı alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.7’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.8 ve Tablo 2.9’da gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı yanı ölçüm çalışması

Tablo 2.8. Ölçüm I-F bölgesinde 1.85m alıcı anten yüksekliği için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	2,51
VHF-III	174	230	0,44
UHF-IV	470	582	0,61
UHF-V	582	800	1,31
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 2.91 V/m			

Tablo 2.9. Ölçüm I-F bölgesinde 90cm alıcı anten yüksekliği için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	1,79
VHF-III	174	230	0,18
UHF-IV	470	582	1,15
UHF-V	582	800	2,03
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 2.94 V/m			

Ölçüm I-G: Verici kulelerden 246m uzaklıkta, 2m alıcı anten yüksekliği için Şekil 2.8’de gösterilen konumda farklı eksenlerde ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.10, Tablo 2.11, Tablo 2.12 ve Tablo 2.13’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı yani kayalık üstü ölçüm çalışması

Tablo 2.10. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten eş yönlü ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	1,26
VHF-III	174	230	0,18
UHF-IV	470	582	0,70
UHF-V	582	800	0,84
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 1.69 V/m			

Tablo 2.11. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten x-ekseni ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	1,03
VHF-III	174	230	0,03
UHF-IV	470	582	0,18
UHF-V	582	800	0,23
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 1.07 V/m			

Tablo 2.12. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten y-ekseni ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	0,26
VHF-III	174	230	0,13
UHF-IV	470	582	0,42
UHF-V	582	800	0,50
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 0.73 V/m			

Tablo 2.13. Ölçüm I-G bölgesinde alıcı anten z-ekseni ölçüm modunda iken elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	0,72
VHF-III	174	230	0,13
UHF-IV	470	582	0,51
UHF-V	582	800	0,64
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 1.12 V/m			

Ölçüm II-A: Verici kulelerden 119m uzaklıkta, 1.70m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.9’da gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.14’de gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami yanı 2. ölçüm çalışması

Tablo 2.14. Ölçüm II-A bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	10,41
VHF-III	174	230	0,23
UHF-IV	470	582	1,21
UHF-V	582	800	2,46
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 10.76 V/m			

Ölçüm II-B: Verici kulelerden 164m uzaklıkta, 1.70m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.10’da gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.15’de gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (164m) ölçüm çalışması

Tablo 2.15. Ölçüm II-B bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	6,98
VHF-III	174	230	0,10
UHF-IV	470	582	1,38
UHF-V	582	800	2,37
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 7.51 V/m			

Ölçüm II-C: Verici kulelerden 228m uzaklıkta, 1.80m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.11’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.16’da gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Boztepe Mevkii – Ahi Evren Dede Cami çevresi (228m) ölçüm çalışması

Tablo 2.16. Ölçüm II-C bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	2,08
VHF-III	174	230	0,05
UHF-IV	470	582	0,48
UHF-V	582	800	1,55
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 2.65 V/m			

Ölçüm II-D: Verici kulelerden 112m uzaklıkta, 1.80m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.12’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.17’de gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Boztepe Mevkii – Askeri Kışla Girişi yanı 2. ölçüm çalışması

Tablo 2.17. Ölçüm II-D bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	4,91
VHF-III	174	230	0,32
UHF-IV	470	582	1,33
UHF-V	582	800	2,58
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 5.72 V/m			

Ölçüm II-E: Verici kulelerden 111m uzaklıkta, 1.75m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.13’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.18’de gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Boztepe Mevkii – Çay Bahçesi üstü ölçüm çalışması

Tablo 2.18. Ölçüm II-E bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	4,36
VHF-III	174	230	0,43
UHF-IV	470	582	1,08
UHF-V	582	800	1,77
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 4.85 V/m			

Ölçüm II-F: Verici kulelerden 191m uzaklıkta, 1.80m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.14’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.19’da gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı üstü ölçüm çalışması

Tablo 2.19. Ölçüm II-F bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	2,89
VHF-III	174	230	0,31
UHF-IV	470	582	1,12
UHF-V	582	800	1,22
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 3.34 V/m			

Ölçüm II-G: Verici kulelerden 219m uzaklıkta, 1.75m alıcı anten yüksekliği için eş yönlü olarak Şekil 2.15’de gösterilen konumda ölçümler yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 2.20’de gösterilmektedir.

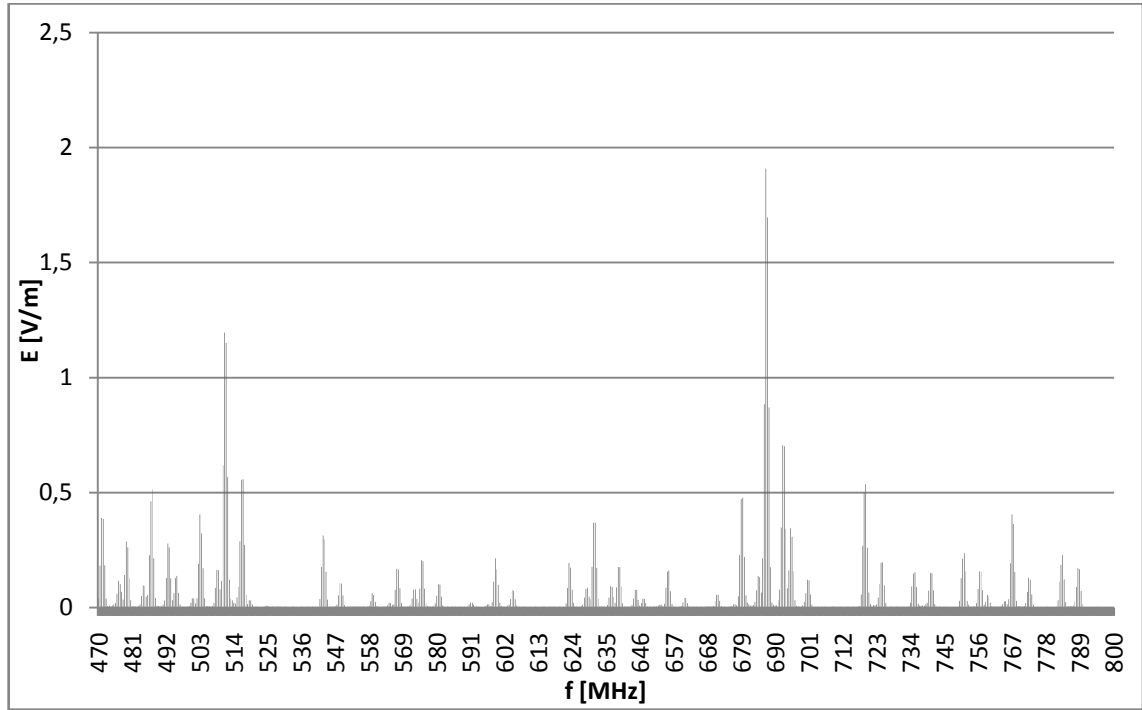


Şekil 2.15. Boztepe Mevkii – Trabzon yazısı yanı 2. ölçüm çalışması

Tablo 2.20. Ölçüm II-G bölgesi için elde edilen ölçüm sonuçları

Hizmet Adı	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]
FM	87.5	108	2,43
VHF-III	174	230	0,41
UHF-IV	470	582	1,15
UHF-V	582	800	1,94
Ortamdaki toplam elektrik alan şiddeti: 3.35 V/m			

Şekil 2.16’da hesaplamalarda karşılaştırma amaçlı kullanılan spektrum analizör modunda yapılan ölçümler sonucu elde edilen bir grafik gösterilmektedir.



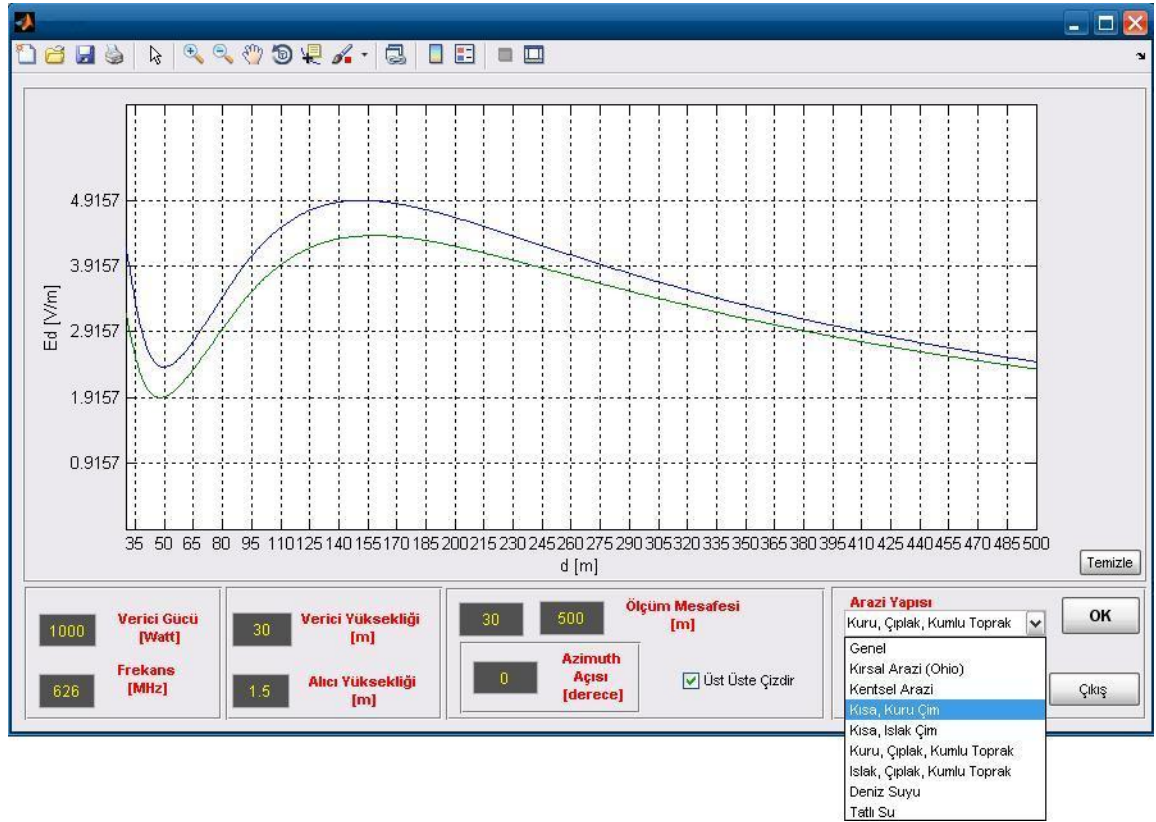
Şekil 2.16. Spektrum analizör modunda elde edilen örnek bir ölçüm çıktısı

2.2.2. Matlab Programı

Genel bilgiler bölümünde bahsedilen yayılım yöntemlerinde dikkat edilecek nokta işlem karmaşıklığının azaltılabilmesi ve daha hızlı tahminlerin yapılabilmesi amacıyla birçok yaklaşıklık ve kabulün kullanıldığıdır.

Çalışmanın bu kısmında genel bilgiler bölümünde ayrıntılı olarak anlatılan 2-ışınlı yayılım modeli veya düzgün yeryüzü üzerinde radyo dalgası yayılımı konularının ele aldığı hesaplamalar, yazılan bir matlab programı ile bilgisayar ortamında yapılmıştır. Bu program yaklaşıklık ve kabuller olmadan verici antenden belirlenen mesafe kadar uzaklıktaki bir alıcı antende oluşacak elektrik alan şiddetini hesaplamaktadır.

Özellikle; yer yüzeyinin mükemmel bir iletken olmayışı nedeniyle farklı arazi çeşitleri için farklı yansıma katsayıları hesabı yapılmaktadır. Şekil 2.17’den de görülebileceği gibi programın görsel ara yüzünden istenilen arazi çeşidi seçilerek bu yüzeye uygun dielektrik katsayısı ve iletkenlik değerlerinin kullanılması sağlanmaktadır. Ayrıca görsel ara yüzden; verici gücü, yayın yapılan frekans, alıcı ve verici anten yükseklikleri, elektrik alan şiddeti değerlerinin hesaplanması istenilen mesafe aralığı, verici antenin maksimum ışıma doğrultusu referans alınarak alıcı antenin bulunduğu konumun azimut açısı ve farklı parametreler için elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesini sağlayan üst üste çizdirme seçeneği ayarlanabilmektedir.



Şekil 2.17. Elektrik alan şiddeti değerinin mesafeye bağlı olarak hesaplandığı matlab programı

Direkt ışın ve yansıyan ışının alıcı antene ulaşınca kadar kat ettikleri yollar ayrı ayrı hesaplanıp yol farkından kaynaklanana faz farkı hesaplamalara katılmaktadır. Verici antenin ışıma paterni ve buna bağlı olarak kazanç değerleri programın kod kısmından ayarlanabilmektedir. Alıcı anten, eş yönlü olarak kabul edilmektedir. Verici antenin kazanç değerleri, antenin aşağı veya yukarı eğimli olması durumu da değerlendirilip, ölçüm yapılan mesafeye bağlı olarak elde edilen açı değerleri kullanılarak direkt ve yansıyan ışın için elde edilmektedir.

Referans patern olarak TV verici antenleri için RYMSA marka UHF bandı IV/V için yatay kutuplanmış panel antenlerin azimut ve elevasyon paternleri kullanılmıştır. Bu antenlerle ilgili elde edilen veri tablolarındaki değerler kullanılarak, en küçük kareler yöntemiyle eğri uydurma metoduyla uygun anten paterni eğrileri açığa bağlı olacak şekilde elde edilmiştir. Benzer şekilde radyo verici antenleri için de yarım dalga dipol antenin ışıma paterni olan $\sin^3\theta$ formülasyonu kullanılmıştır. Burada dikkat edilmesi gerek nokta TV verici antenlerin yatay, radyo vericilerinin de dikey kutuplanmış olduğudur. Çünkü yansıma katsayısı hesabı dikey ve yatay kutuplanmış dalgalar için farklı şekilde hesaplanmaktadır.

2.3. Ölçümlerin Değerlendirilmesi

Günümüz dünyasında insanlar ve yaşam alanları sürekli olarak doğal veya doğal olmayan elektromanyetik dalgaların etkisi altındadırlar. Doğal elektromanyetik kaynaklar; güneş, bazı uzak yıldızlar ve yıldırımlar olarak örneklenebilirken, doğal olmayan elektromanyetik kaynaklar için enerji nakil hatları, TV ve bilgisayarlar, elektrikli ev aletleri, TV/Radyo vericileri, telsiz haberleşme sistemleri ve hücresel telefon sistemleri örnek olarak ele alınabilir [28].

Mevcut elektromanyetik kaynaklar, çevrelerini ısıtım yaparak elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla etkilerler. Bu ısıtımın da 2 çeşidi bulunmaktadır. Birinci ısıtım yöntemi olarak iyonlaştırıcı radyasyon incelenebilir. Bu ısıtım, atom ve moleküllerden elektron koparabilen yüksek enerjili ışınları içermektedir. Bunlar; Gamma ışını, X-ışınları, nötron, proton, alfa, beta tanecikleri yayan radyoaktif maddeler ile bazı morötesi ışınlardır. DNA'nın yapısını bozabilir ve kansere yol açabilirler.

İkinci çeşit ışıma iyonlaştırmayan radyasyondur ve günlük hayatta insanlar sürekli olarak bu çeşit radyasyonun etkisi altındadırlar. Bu çeşit radyasyonun kaynağı da doğal

olmayan elektromanyetik kaynaklardır. Bunlar; hücre düzeyinde, kimyasal bağları etkileyecek güç ve enerjiye sahip değildirler. Ayrıca X- ışınlarına göre çok daha büyük dalga boyunda ve düşük frekanslardadır [28]. Yapılan çalışmaların konusu olan TV/Radyo vericileri de bu ikinci çeşit radyasyon kaynaklarındandır. Bu tür sistemlerde ısınım radyo dalgalarıyla gerçekleşmektedir. Radyo dalgaları, frekans spektrumunda 0-300GHz bölgesini kapsamaktadır.

Bu tür sistemlerin üretim veya kurulum aşamasından itibaren insan sağlığı üzerindeki etkileri göz önüne alınmalıdır. Çünkü insan vücudu bünyesindeki serbest yükler, çevresindeki elektrik alandan etkilenir. Ayrıca manyetik alan, bir iletken olarak düşünülebilecek insan bedeninde zayıf akımlar oluşturur. Elektromanyetik dalga insan vücuduna çarptığında bir kısmı yansır, bir kısmı ise vücut içine girerek soğurulur. Elektromanyetik dalganın canlı vücuduna soğurulması, doku ısınmasına ve dolayısıyla dokularda bozulmalara sebep olabilir [28].

Günümüz yaşam koşulları ele alındığında olmazsa olmaz olarak değerlendirilebilecek radyo dalgası esasına dayanan hizmetlerin bu tür etkilerinden korunmanın en temel yolu, belirlenen güvenlik mesafesi ve sınır değerlere uyulmasıdır. Çünkü elektromanyetik alanların şiddeti yüksek frekanslı alanlar için $1/r^3$, düşük frekanslı alanlarda $1/r^2$ olacak şekilde kaynaktan uzaklaştıkça hızla düşer [28]. Bu amaçla aşağıda sıralanan ulusal ve uluslar arası kurum ve kuruluşlar tarafında birçok standart belirlenmiştir:

- Bilgi ve İletişim Teknolojileri Kurumu (Eski Adı Telekomünikasyon Kurumu)
- Dünya Sağlık Örgütü (WHO – World Health Organization)
- Uluslar Arası İyonlaştırmayan Radyasyondan Koruma Komisyonu (ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
- Avrupa Birliği Elektromanyetik Alan Tavsiyesi (EU EMF Recommendation)
- CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)
- IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)
- FCC (Federal Communications Commission)

Uluslararası düzeyde yapılan çalışmalar ışığında, etkili olan elektromanyetik alanlar ve etki düzeyleri ile ilgili limit değerler yayınlanmaktadır. Muhtemel olumsuz etkilere karşı alınan önlemler çerçevesinde, Telekomünikasyon Kurumu tarafından 12.07.2001 tarihinde “10kHz-60GHz Frekans Bandında Çalışan Sabit Telekomünikasyon Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddeti Limit Değerlerinin

Belirlenmesi, Ölçüm Yöntemleri ve Denetlenmesi Hakkındaki Yönetmelik” yayımlanmıştır. Hazırlanması safhasında ilgili Kamu Kuruluşları ve üniversitelerin yanında, kamuoyunun da görüşleri alınarak koordine edilmiş ve elektromanyetik kirliliğin insan yaşamındaki etkilerinin en aza indirilmesi için gerekli teknik ve idari düzenlemeler yapılmıştır. Sabit telekomünikasyon cihazlarının (TV/Radyo ve Baz İstasyonları) söz konusu yönetmelikte belirtilen bütün teknik kıstaslar ve limit değerlere uygun olarak “Güvenlik Sertifikası” alınması suretiyle kurulması prosedürü geliştirilmiş ve uygulanmaya konulmuştur [28].

Şu anda yürürlükte olan yönetmeliğe göre P [W], cihaz çıkış gücü; G [dB], anten kazancı; E [V/m], elektrik alan limit değeri olmak üzere d [m], güvenlik mesafesi denklem 79’daki gibi hesaplanmaktadır [29]:

$$d = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot 10^{G/10}}}{E} \quad (79)$$

Elektrik alan limit değeri, yine bu yönetmelikte belirtilen tek bir cihaz için limit değerleri tablosundaki değerler ile kullanılacaktır.

Tablo 2.21. ICNIRP tarafından halka açık alanlar için ortamın toplam elektrik ve manyetik alan limit değerleri tablosu [30].

Frekans Aralığı [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]	Manyetik Alan Şiddeti [A/m]	Manyetik Akı Yoğunluğu [μ T]	Eşdeğer Düzlem Dalga Güç Yoğunluğu [W/m^2]
1 Hz’e kadar	-	3.2×10^4	4×10^4	
1-8 Hz	10000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8-25 Hz	10000	$4000 / f$	$5000 / f$	
0.025-0.8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	
0.8-3 kHz	$250 / f$	5	6.25	
3-150 kHz	87	5	6.25	
0.15-1 MHz	87	$0.73 / f$	$0.92 / f$	
1-10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	
10-400 MHz	28	0.073	0.092	2
400-2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	$f / 200$
2-300 GHz	61	0.16	0.20	10

Tablo 2.21, ICNIRP tarafından belirlenen değerlere göre oluşturulmuştur. Telekomünikasyon Kurumu yönetmeliğinde ortamın toplamı için olan sınır değerler ile tek bir cihaz için olan sınır değerler birbirinden ayrılmıştır ve ortamın toplamı için olan sınır değer %25'i alınarak tek bir cihaz için olan sınır değer belirlenmiştir [31]. Örneğin tek bir cihaz için 10-400 MHz frekans aralığında elektrik alan şiddeti limit değeri 7 V/m olarak ele alınacaktır.

Benzer bir limit değerler tablosu, IEEE tarafından kontrolsüz çevre için yayınlanmıştır. Tablo 2.22'de maksimum izin verilen maruz kalma limit değerleri belirtilmektedir:

Tablo 2.22. IEEE Std C95.1'e göre kontrolsüz çevrede maruz kalınabilecek maksimum limit değerler [32].

Frekans Aralığı [MHz]	Elektrik Alan Şiddeti [V/m]	Manyetik Alan Şiddeti [A/m]	Güç Yoğunluğu (E-alanı, H-alanı) [mW/cm ²]	Ortalama Zaman (E ² , S veya H ²) [dak.]	
0.003-0.1	614	163	100, 1000000	6	6
0.1-1.34	614	16.3/f	100, 10000/f ²	6	6
1.34-3.0	823.8/f	16.3/f	180/f ² , 10000/f ²	f ² /0.3	6
3.0-30	823.8/f	16.3/f	180/f ² , 10000/f ²	30	6
30-100	27.5	158.3/f ^{1.668}	0.2, 940000/f ^{3.336}	30	0.0636/f ^{1.337}
100-300	27.5	0.0729	0.2	30	30
300-3000	-	-	f/1500	30	
3000-15000	-	-	f/1500	90000/f	
15000-300000			10	616000/f ^{1.2}	

Belirlenen bir ölçüm noktası için farklı frekanslara karşılık gelen elektrik alan şiddeti değerleri biliniyorsa, bu nokta için elektrik alanı değerlerine süperpozisyon uygulanır. ICNIRP-1998 ve IEEE C95.1-1999 referans alınarak, farklı frekanstaki kaynaklardan oluşan bir çevrenin güvenli olma şartı şu şekilde belirtilmiştir:

$$\left(\frac{E_1}{E_{S_1}}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{E_{S_2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{E_N}{E_{S_N}}\right)^2 < 1 \quad (80)$$

$E_1, E_2, \dots, E_N$; sırasıyla $f_1, f_2, \dots, f_N$ frekansları için ölçülen veya hesaplanan elektrik alan şiddeti değerleridir. $E_{S_1}, E_{S_2}, \dots, E_{S_N}$ ise sırasıyla $f_1, f_2, \dots, f_N$ frekansları için belirlenen standart elektrik alana maruz kalma seviyeleridir [33]. Bu yöntemle göre Boztepe Mevkii'nde yapılan ölçümler değerlendirilip aşağıdaki tablolarda sunulmaktadır. Tablo 2.23'de, belirtilen bölgede yapılan ilk ölçüm (I) sonuçları değerlendirilmiştir:

Tablo 2.23. Boztepe Mevkii'nde 17.08.2009 tarihinde yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi

Ölçüm Noktası	Alt Frekans [MHz]	Üst Frekans [MHz]	Değerlendirme Sonucu	Alıcı Anten Yüksekliği [m]	Anten Eksen
Ölçüm I-A	470	800	0.0177	1.70	XYZ
Ölçüm I-A	87	108	0.4732	1.70	XYZ
Ölçüm I-E	87	108	0.1772	1.70	XYZ
Ölçüm I-E	470	800	0.0252	1.70	XYZ
Ölçüm I-F	470	800	0.0120	0.9	XYZ
Ölçüm I-F	87	108	0.0084	0.9	XYZ
Ölçüm I-F	470	800	0.0058	1.85	XYZ
Ölçüm I-F	75	108	0.0120	1.85	XYZ
Ölçüm I-F	87	108	0.0111	1.85	XYZ
Ölçüm I-G	87	108	0.0047	2	XYZ
Ölçüm I-G	87	108	0.0029	2	X
Ölçüm I-G	87	108	0.0001939	2	Y
Ölçüm I-G	87	108	0.0014	2	Z
Ölçüm I-G	470	800	0.0030	2	XYZ
Ölçüm I-G	470	800	0.00020067	2	X
Ölçüm I-G	470	800	0.00096021	2	Y
Ölçüm I-G	470	800	0.0018	2	Z

Tablo 2.24'de aynı bölgede benzer ve farklı noktalarda yapılan ikinci ölçüm sonuçları bir tablo halinde sunulmaktadır. X, Y ve Z olarak belirtilen anten eksenleri için çıkan sonuçlar limit değerlerin altındadır. Ölçüm I-G noktasında, FM bandı için anten eksenlerinde ayrı ayrı yapılan ölçümlerde X ekseninde en yüksek değerler görülmüştür.

Ayrıca aynı konum için yine farklı eksenlerde UHF bandında yapılan ölçümlerde Z ekseninde en yüksek değerler görülmüştür. Tablo 2.24’de değerlendirilen sonuçlar anten eksenini eş yönlü (XYZ) seçilerek elde edilmiştir.

Tablo 2.24. Boztepe Mevkii’nde 07.12.2009 tarihinde yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi

Ölçüm Noktası	Alt Frekans [Mhz]	Üst Frekans [MHz]	Değerlendirme Sonucu
Ölçüm II-A	87.5	108	0.3002
Ölçüm II-B	87.5	108	0.1297
Ölçüm II-C	87.5	108	0.0138
Ölçüm II-D	87.5	108	0.0676
Ölçüm II-E	87.5	108	0.0525
Ölçüm II-F	87.5	108	0.0247
Ölçüm II-G	87.5	108	0.0210
Ölçüm II-A	470	800	0.0129
Ölçüm II-B	470	800	0.0132
Ölçüm II-C	470	800	0.0040
Ölçüm II-D	470	800	0.0164
Ölçüm II-E	470	800	0.0091
Ölçüm II-F	470	800	0.0057
Ölçüm II-G	470	800	0.0062

Tablo 2.23 ve Tablo 2.24’de elde edilen sonuçlar belirtilen tarihlerde yapılan ölçümlerden, ortalama değere sahip olanlar kullanılarak elde edilmiştir.

Bir diğer değerlendirme olarak; ölçüm sonuçları, matlab programı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla 575.25MHz’de yayın yapan bir TV istasyonu, 89.3MHz ve 104MHz’de yayın yapan 2 radyo istasyonunu güvenlik sertifikalarındaki bilgiler kullanılmıştır. TV istasyonu için; verici gücü 1000W, anten kazancı 12.15dB ve anten yüksekliği 56m olarak kullanılmıştır. 89.3MHz’de yayın yapan radyo istasyonu için verici gücü 1000W, anten kazancı 4.15dB ve anten yüksekliği 50m; 104MHz’de yayın yapan radyo istasyonu için maksimum güç 250W, anten kazancı 3.35dB ve anten yüksekliği 40m olarak hesaplara katılmıştır. Anten yükseklikleri ölçüm yapılan konuma

göre değerlendirilerek ve eş yönlü ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Tablo 2.25’de TV istasyonu için ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerler gösterilmektedir.

Tablo 2.25. Bir TV istasyonu için yapılan ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Ölçüm Konumu	Arazi Yapısı	Azimet Açısı [derece]	Ölçüm Sonucu [V/m]	Hesaplanan Değer [V/m]
Ölçüm I-A	Kentsel	75	0.22	0.24
Ölçüm I-E	Kentsel	20	0.82	0.83
Ölçüm I-F (0.9m)	Kırsal (Ohio)	5	0.34	0.35
Ölçüm I-F (1.85m)	Kırsal (Ohio)	5	0.208	0.250
Ölçüm I-G	Kırsal (Ohio)	10	0.367	0.374
Ölçüm II-A	Kentsel	35	0.645	0.66
Ölçüm II-B	Kentsel	55	0.259	0.295
Ölçüm II-C	Kentsel	60	0.115	0.862
Ölçüm II-D	Kentsel	25	0.389	0.395
Ölçüm II-E	Kentsel	40	0.225	0.289
Ölçüm II-F	Kırsal (Ohio)	10	0.498	0.542
Ölçüm II-G	Kırsal (Ohio)	5	0.560	0.584

Tablo 2.26 ve Tablo 2.27’de sırasıyla 89.3MHz ve 104MHz için ölçüm sonuçları ve hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki iki tabloda radyo yayını için anten paterni eş yönlü olarak kabul edildiğinden azimet parametresi kullanılmamıştır.

Tablo 2.26. 89.3MHz’de yayın yapan bir radyo istasyonu için ölçüm sonuçları ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

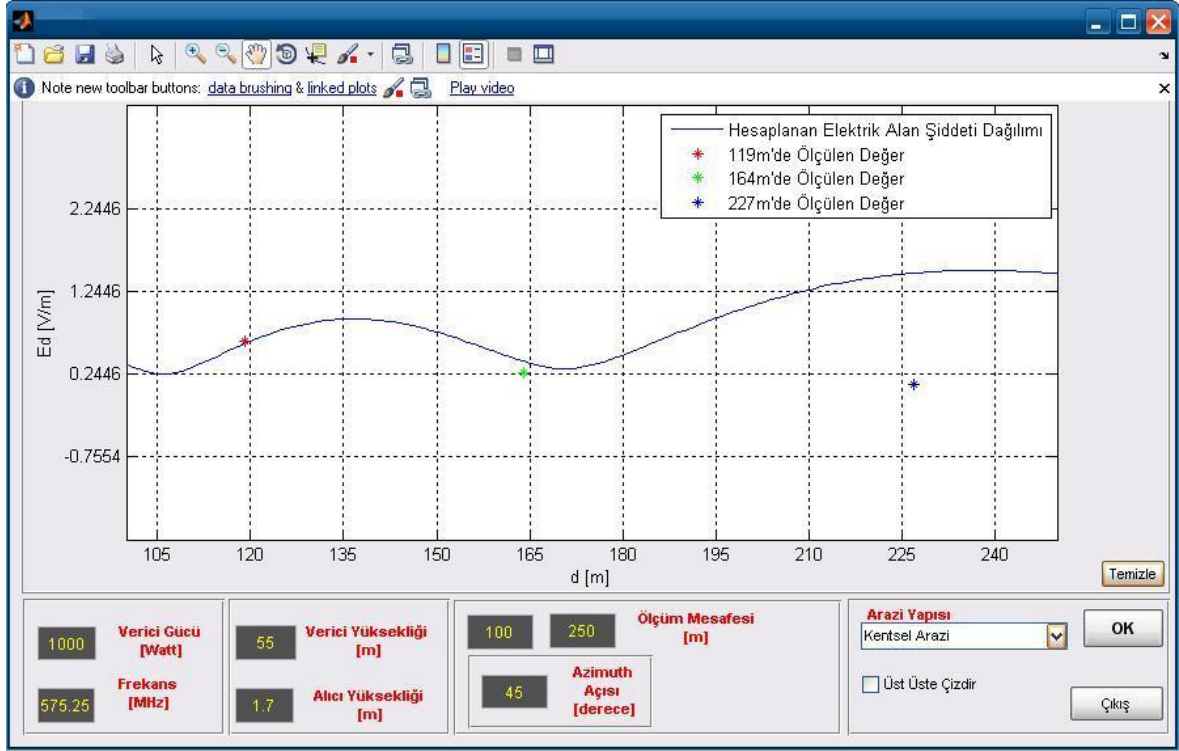
Ölçüm Konumu	Arazi Yapısı	Ölçüm Sonucu [V/m]	Hesaplanan Değer [V/m]
Ölçüm I-A	Kentsel	0.77	2.04
Ölçüm I-E	Kentsel	2.26	2.189
Ölçüm I-F (1.85m)	Kırsal (Ohio)	0.177	1.108
Ölçüm I-F (0.9m)	Kırsal (Ohio)	0.155	1.117
Ölçüm I-G	Kırsal (Ohio)	0.082	1.038

Tablo 2.27. 104MHz’de yayın yapan bir radyo istasyonu için ölçüm sonuçları ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Ölçüm Konumu	Arazi Yapısı	Ölçüm Sonucu [V/m]	Hesaplanan Değer [V/m]
Ölçüm I-A	Kentsel	0.973	1.04
Ölçüm I-E	Kentsel	2.64	1.133
Ölçüm I-F (1.85m)	Kırsal (Ohio)	0.155	0.532
Ölçüm I-F (0.9m)	Kırsal (Ohio)	0.131	0.496
Ölçüm I-G	Kırsal (Ohio)	0.124	0.492

Tablo 2.25, Tablo 2.26 ve Tablo 2.27’deki konumlar, elde edilen ölçüm sonuçları bölümünde verilen konumlarla aynıdır. Yine bu bölümde konumlar belirtilirken verilen anten yükseklikleri tablolar için de geçerlidir.

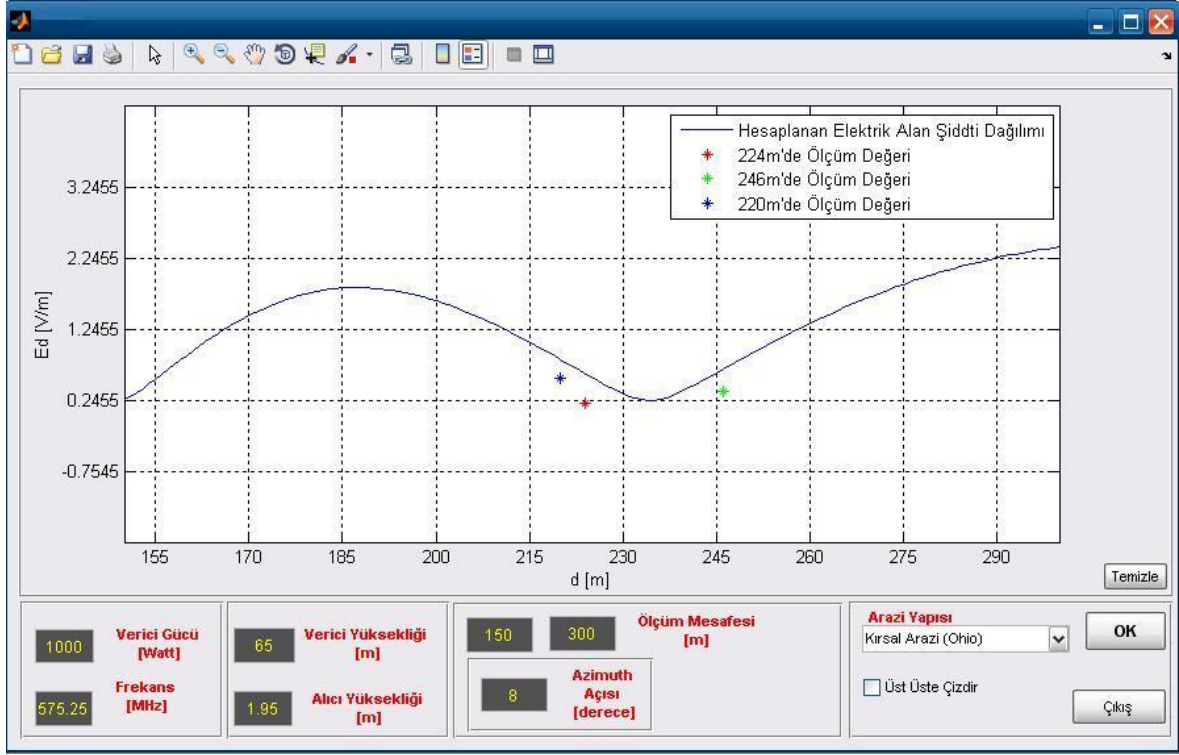
Tablo 2.25’deki değerler için Ölçüm II-A, Ölçüm II-B ve Ölçüm II-C konumları için matlab programı ile hesaplanan değerler Şekil 2.18’de grafiksel olarak karşılaştırılmıştır:



Şekil 2.18. Ölçüm II-A, Ölçüm II-B ve Ölçüm II-C noktalarındaki ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Şekil 2.18’de kırmızı ve yeşil renkli noktaların hesaplanan değerler eğrisi ile uyumlu olduğu ancak mavi renkli noktanın eğriyi takip etmediği görülmektedir. Bunun nedeninin ölçüm yapılan bu noktanın çevresel yansımalar ve gölgelemelerden (duvar, bina, ağaç...) çok daha fazla etkilenmesi olarak açıklanabilir. Şekil 2.19’da Ölçüm I-F, Ölçüm I-G ve Ölçüm II-G konumları için benzer bir karşılaştırma yapılmıştır. Ölçüm I-F 224m, Ölçüm II-G 220m ve Ölçüm I-G 246m’de yapılan ölçümlerdir.

Karşılaştırma noktaları belirlenirken verici antene göre azimut açıları benzer noktalar seçilmeye çalışılmıştır. Aynı şekilde her bir noktanın alıcı anten yüksekliği değerinde de azimut açısı gibi küçük farklılıklar olacağından hesaplamalarda bu iki büyüklüğün belirlenen noktalar için değerlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 2.19. Ölçüm I-F, Ölçüm I-G ve Ölçüm II-G noktalarındaki ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Şekil 2.19 incelendiğinde değerlendirilen 3 noktanın da hesaplanan eğriyi takip ettiği görülmektedir.

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Günümüz dünyasında haberleşme teknolojilerinin esasını kablosuz haberleşme ve dolayısıyla elektromanyetik dalgalar oluşturmaktadır. Kablosuz iletişim şu anki yaşam koşulları için kesin olarak çok büyük kolaylıklar getirmektedir. Gerekli kablosuz hizmetlerin verilebilmesi amacıyla hizmet sağlayıcıları birçok linkler ve hücreler tasarlamaktadırlar. Kurulan bu verici-alıcı ağları işletilmeye başlamadan önce teorik olarak denenmektedir. Bu amaçla birçok yayılım ve tahmin yöntemi kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında 2-ışınlı yayılım modeli TV/Radyo yayınları temel alınarak incelenmiş ve yine bu amaçla kullanılan bazı tahmin yöntemlerinden bahsedilmiştir. 2-ışınlı modelde alıcı – verici anten arası mesafenin düz ve engelsiz olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca bu yöntemin esasını oluşturan serbest uzay yayılımı, TV/Radyo vericilerinin kurulumunda gerekli olan güvenlik hesaplamalarında kullanılmaktadır.

Özellikle kentsel bölgelerde yaşayanlar sürekli ve artan bir biçimde farklı hizmetler amacıyla kullanılan elektromanyetik dalgalara maruz kalarak yaşamaktadırlar. Bu maruz kalma miktarının belirlenmesi amacıyla birçok ulusal ve uluslar arası standart belirlenmiştir. Trabzon – Boztepe Mevkii’nde kurulu bulunan TV/Radyo verici kuleleri etrafında yapılan ölçüm sonuçları, maruz kalınan elektrik alan şiddetinin değerlendirilmesinde kullanılan, IEEE ve ICNIRP’ın belirttiği sınır değerler ve hesaplamaları referans alan bir yöntem ile ele alınmıştır.

Yapılan band ölçümlerinin sonuçları ve ölçüm yapılan noktaların konumları hem mesafe olarak hem de her bir noktada çekilen fotoğraflarla belirtilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen verilerden FM, VHF-III, UHF-IV ve UHF-V bandları için “safety evaluation” modunda yapılanlar tablolar halinde sunulmuştur. Ölçüm sonuçları incelendiğinde FM yayın bandının (87.5MHz - 108MHz) ölçüm yapılan noktalarda oluşturduğu toplam elektrik alan şiddetinin en büyük olduğu görülmektedir. Tablo 2.23 ve Tablo 2.24 incelendiğinde ölçüm yapılan tüm noktalar için değerlerin kullanılan yöntem açısından uygun ve limit değerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 2.23’de ölçüm I-A olarak adlandırılan konumda FM bandı için limit değerler açısından yapılan hesaplama 0.4732 değeriyle en yüksek olanıdır. Ancak bu değer 1’den küçük olduğu için kabul edilebilirdir.

Yapılan ölçümler, teorik hesaplamalarda elde edilen sonuçlarla Tablo 2.25, Tablo 2.26 ve Tablo 2.27’de karşılaştırılmıştır. Tablo 2.25’de bir TV istasyonu için yapılan

ölçümler ve 2-ışınlı model esas alınarak yazılan program çıktıları değerlendirildiğinde tam bir uyuşmanın olmadığı ancak değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Modelin varsayımları ele alındığında bu beklenen bir durumdur. Hesaplamalarda özellikle verici anten özelliklerinin tam olarak bilinmemesi nedeniyle anten paterni ve azimut açılarında yaklaşıklıklar yapılmıştır. Ancak geri kalan işlemlerde formüller varsayım ve kısaltma yapılmadan kullanılmıştır.

Tablo 2.26 ve Tablo 2.27’de iki farklı radyo istasyonu için benzer bir karşılaştırma yapılmış ancak ölçüm ve hesaplamalar arasında büyük farklar olduğu görülmüştür. Tablo 2.27’de ölçüm I-A noktası için yapılan karşılaştırmada en uygun yaklaşıklık belirlenmiştir. Buna göre bu nokta için ölçülen değer 0.973 V/m iken hesaplanan değer 1.04 V/m’dir.

Ölçüm ve hesaplama sonuçlarında mutlak uyum elde edilememesi, 2-ışınlı modelin bölgenin incelenmesi açısından özellikle verici-alıcı arası mesafeyi düz ve engelsiz olarak kabul etmesi nedeniyle yetersiz kaldığını göstermektedir. Ancak yine sonuçlar incelendiğinde 2-ışınlı model ile TV/Radyo yayınları için genel yayılım incelemelerinin yapılabileceği görülmektedir.

4. ÖNERİLER

Bu çalışmada Trabzon – Boztepe Mevkii’nde belirlenen noktalar için TV/Radyo vericileri tarafından oluşturulan elektrik alan şiddeti değerlerinin tespiti, elde edilen sonuçların limit değerlerle karşılaştırılması ve 2-ışınlı yayılım modelinin bu bölgede uygulanabilirliği üzerine çalışılmıştır. Ölçüm yapılan bölgede çeşitli TV/Radyo istasyon verici antenlerinin bulunduğu 4 adet kule mevcuttur. Hesaplamaların doğruluğu açısından kulelere yerleştirilmiş antenlerin özelliklerinin belirlenmesi, çalışmadaki en büyük zorluğu oluşturmuştur. Bu nedenle 2-ışınlı model ile ölçüm sonuçları ancak elde edilebilen bilgilerin sınırlamalarıyla gerçekleştirilebilmiştir.

Ölçüm yapılan tüm noktalarda elde edilen ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde limit değerlerin altında kaldıkları görülmektedir. Bu amaçla çok daha fazla noktada ölçüm alınması ortaya çıkan bu sonucu daha fazla destekleyecektir. Ayrıca yaz ve kış mevsimlerinde yapılan ölçümlerin yanında çok daha farklı mevsim koşullarında elde edilecek ölçüm sonuçları değerlendirmenin doğruluğu açısından önemlidir. Limit değerler açısından kontrol edilen tüm ölçüm sonuçları, açık alanda yapılan ölçümlere dayanmaktadır. Ölçüm yapılan verici kuleleri etrafındaki binaların içinde de bu ölçümler tekrarlanarak sonuçlar ortaya koyulabilir.

Hesaplamalarda, mesafelerin varsayım yapılmadan hesaplanması ve ölçüm yapılan arazi çeşidinin hesaplara katılması yöntemi izlenmiştir. Ancak GPS ile konum ve mesafe tespiti yapıldığından tüm ölçümler cihazın belirttiği ortalama 5m’lik doğruluk ile yapılabilmiştir. Her ne kadar arazi yapısı ele alınmaya çalışılsa da kullanılan arazi yapıları ve bunlara ait dielektik katsayısı ve iletkenlik değerleri bu bölge için özel olarak belirlenmemiş değerlerdir. Ölçüm yapılması amacıyla belirlenen noktaların olabildiğince verici anten kulelerini direkt olarak görebilen konumlar olmasına dikkat edilmiştir.

Özellikle ilerde bu bölge açısından ortaya konmak istenecek bir yayılım modeli için hizmet veren istasyonların her birine ait antenler ile ilgili çok daha detaylı bilgiler edinilmelidir. Hesaplamalarda dikkate alınmayan engeller, bitki örtüsü ve bunlardan meydana gelebilecek saçılım ve kırınımalar ayrıca ele alınmalıdır.

5. KAYNAKLAR

1. Seybold, J.S., Introduction to RF Propagation, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.
2. Richards, J.A., Radio Wave Propagation, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
3. Saunders, S.R. ve Aragón-Zavala, A., Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., England, 2007.
4. Haslett, C., Essentials of Radiowave Propagation, William Webb ve Sudhir Dixit, Cambridge University Press, New York, 2008.
5. Balanis, C.A., Antenna Theory: Analysis and Design, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.
6. Karaoğlu, B., Kuantum Mekaniğine Giriş, Dördüncü Basım, Güven Yayın Dağıtım, İstanbul, 1998.
7. IEEE Std. 145-1983, IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1983.
8. Balanis, C.A., Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1989.
9. ITU-R, Nomenclature of The Frequency and Wavelength Bands Used in Telecommunications, Yayın No: V431-7(05/00), Geneva, 2000.
10. IEEE Std. 521-2002, IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2003.
11. Siwiak, K. ve Bahreini, Y., Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications, Third Edition, Artech House, Inc., Norwood, 2007.
12. Jenn, D.C., Lecture Notes for EO3602 (Electromagnetic Radiation, Scattering and Propagation), <http://faculty.nps.edu/jenn/EO3602/Vol5v1.3.pdf>, 30 Temmuz 2009.
13. Lu, N.H., Linearized, Unified Two-Ray Formulation for Propagation over a Plane Earth, Sensors for Industry Conference, February 2005, Texas, Bildiriler Kitabı:95-100.

14. ITU-R, Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz, Yayın No: P.1546-2, Geneva, 2004.
15. Östlin, E., Suzuki, H. ve Zepernick, H.J., Evaluation of the Propagation Model Recommendation ITU-R P.1546 for Mobile Services in Rural Australia, IEEE Vehicular Technology Society, 57,1 (2008) 38-51.
16. Östlin, E., Suzuki, H. ve Zepernick, H.J., Comparison and Evaluation of ITU-R Recommendation P.1546 Versions, Vehicular Technology Conference, May 2006, Australia, Bildiriler Kitabı:2896-2900.
17. Grosskopf, R., ITU Field-Strength Prediction Methods for Terrestrial Point-to-Area Services, Wave Propagation in Communication, Microwave Systems and Navigation, July 2007, Germany, Bildiriler Kitabı:63-67.
18. Volakis, J.L., Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition, Mc-Graw Hill Professional, US, 2007.
19. Basic Concepts of Microwave Engineering,
<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/basicconcepts.cfm#bandwidth>,
16 Ekim 2009.
20. Petersen, R.C., Electromagnetic Radiation from Selected Telecommunications Systems, IEEE, 68,1 (1980) 21-24.
21. Rowe, G.B., Williamson, A.G. ve Egan, B., Mobile Radio Propagation in Auckland at 76 MHz, Institution of Engineering and Technology, 19,25 (1983) 1064-1065.
22. Rowe, G.B., Williamson, A.G. ve Egan, B., Mobile Radio Propagation in Auckland at 465 MHz, Institution of Engineering and Technology, 19,6 (1983) 207-208.
23. Rowe, G.B. ve Williamson, A.G., Mobile Radio Propagation in Auckland at 851 MHz, Institution of Engineering and Technology, 22,22 (1986) 1154-1155.
24. Tell, R.A. ve Mantiply, E.D., Population Exposure to VHF and UHF Broadcast Radiation in the United States, IEEE, 68,1 (1980) 6-12.
25. Reudink, D.O., Properties of Mobile Radio Propagation Above 400 MHz, Vehicular Technology Conference, December 1973, Ohio, Bildiriler Kitabı:61-79.
26. Barclay, L.W., Radiowave Propagation – The Basis of Radiocommunication, International Conference on 100 years of Radio (IEE), September 1995, London, Bildiriler Kitabı:89-94.
27. Why Use UTM Coordinates,
<http://www.maptools.com/UsingUTM/whyUTM.html>, 6 Kasım 2009.

28. Telekomünikasyon Kurumu/Ulusal Etkinlikler,
http://www.tk.gov.tr/Etkinlikler/Ulusal_Etkinlikler/konferanslar/2008/sunumlar/doc_dr_malkan_sunum_baz.pps, 30 Temmuz 2009.
29. T.C Resmi Gazete, 10kHz-60GHz Frekans Bandında Çalışan Sabit Telekomünikasyon Cihazlarından Kaynaklı Elektromanyetik Alan Şiddeti Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Ölçüm Yöntemleri ve Denetlenmesi Hakkında Yönetmelik, 24460, 12.07.2001.
30. ICNIRP, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz), Yayın No:ICNIRP1998, Germany, 1997.
31. Akdeniz Üniversitesi / Elektromanyetik Dalgaların Biyolojik Yapılarla Etkileşim ve Etkileri ile Güvenlik Önlemleri Çalıştayı,
<http://www.akdeniz.edu.tr/muhfak/elekt/emkdokument/cerezci.pdf>, 2 Aralık 2009.
32. IEEE Std. C95.1-1999, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1998.
33. Netzer, M.Z., Shechter, A. ve Karni, Z., A Graphical Method for The Estimation of Radiation Hazards from a Crowded Multiple Antenna Site, The Environmentalist, 25 (2005) 195-199.

ÖZGEÇMİŞ

01.10.1982 tarihinde Trabzon’da doğdu. Liseyi Trabzon Yunus Emre Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2000 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2007 yılı bahar döneminde Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitime başladı. Aralık 2006’da Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.