

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TRABZON KENT MERKEZİNDE ELEKTRİK ALAN ÖLÇMELERİ VE BAZI
MİKRO HÜCRELER İÇİN YAYILIM MODELLERİ İLE ÖLÇME
SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Beril SELVİ

**NİSAN 2011
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TRABZON KENT MERKEZİNDE ELEKTRİK ALAN ÖLÇMELERİ VE BAZI
MİKRO HÜCRELER İÇİN YAYILIM MODELLERİ İLE ÖLÇME
SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Beril SELVİ

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04.04.2011
Tezin Savunma Tarihi : 27.04.2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Haydar KAYA
Jüri Üyesi : Prof. Dr. İsmail H. ÇAVDAR
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Cemal KÖSE**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Trabzon 2011

ÖNSÖZ

Bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı Yüksek Lisans programında hazırlanmıştır. Çalışmada Trabzon il merkez genelinde yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde farklı frekans bantları için ortalama elektrik alan şiddeti ölçmeleri yapılmıştır. Merkezde bulunan dört mikro hücre için ölçme sonucunda elde edilen veriler kullanılarak hücrelere ait yol kaybı değerleri elde edilmiş ve bu değerler mikro hücreler için önerilen yol kaybı tahmin modelleriyle karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmam süresince bana her türlü desteği sağlayan başta değerli danışmanım Sayın Yrd. Doç. Haydar Kaya'ya ve değerli arkadaşım Ercan Yaman'a, ayrıca tüm olanaklarıyla beni bugünlere taşıyan ve her zaman yanımda olan çok sevgili aileme, teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin ileride yapılacak olan çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Beril SELVİ
Trabzon 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Hücresel Ağ Yapısı	2
1.3. Hücreleri Ayırma ve Mikro Hücre Uygulaması	5
1.4. Hücresel Sistemlerin Fiziksel Çalışma Ortamları.....	7
1.5. Hücre Tipleri ve Özellikleri	7
1.5.1. Mega Hücre.....	9
1.5.2. Büyük Makro Hücre	9
1.5.3. Küçük Makro Hücre.....	9
1.5.4. Mikro Hücre.....	9
1.5.5. Piko Hücre.....	10
1.6. Yayılım Olayı ve Yayılımı Etkileyen Faktörler.....	11
1.6.1. Yansıma	11
1.6.2. Kırınım ve Gölgeleme.....	12
1.6.3. Saçılma.....	12
1.6.4. Bina ve Araçların İçine Nüfuz Etme.....	12
1.6.5. Su Üzerinde Yayılım.....	13
1.6.6. Yeşil Alanlar Üzerindeki Yayınım	13
1.6.7. Sinyalin Sönümlenmesi	13
1.7. Antenler.....	15
1.7.1. Antenin Uzak, Yakın ve Reaktif Alan Bölgeleri	15

1.7.2.	Fresnel Bölgesi Elipsleri	16
1.7.3.	Polarizasyon	19
1.7.4.	Yarı Güç Hüzme Genişliği.....	19
1.7.5.	Yönsemez Antenler	19
1.7.6.	Yönelimli Antenler	21
1.7.7.	Anten Faktörü	21
1.8.	Çeşitleme.....	22
1.8.1.	Uzay Çeşitleme	24
1.8.2.	Polarizasyon Çeşitleme	24
1.9.	Yayılmayı Kaybı Tahmin Modelleri	25
1.9.1.	Yayılmayı Kaybı Hesaplama Yöntemleri.....	26
1.9.2.	Serbest Uzay Yayılmayı Modeli.....	27
1.9.3.	İki Işın Modeli.....	28
1.9.4.	Kırılma Noktası.....	30
1.10.	Yoğun Kentsel Bölgelerde Mikro Hücrelerin Yayılmayı Koşulları.....	33
1.11.	Mikro Hücreler İçin Yayılmayı Yol Kaybı Tahmin Modelleri	36
1.11.1.	ITU Tarafından Önerilen Modeller	36
1.11.1.1.	Kanyon Sokak İçin LOS Durumu.....	36
1.11.1.2.	Kanyon Sokak İçin NLOS Durumu	37
1.11.2.	Kanyon Sokak İçin Berg Modeli	39
1.11.3.	Kanyon Sokak İçin Kang ve Tzaras Modeli	42
1.11.4.	NLOS Durumu İçin Deneysel Bir Yayılmayı Yol Kaybı Modeli	44
1.11.5.	Masahuru Hata Modeli.....	45
1.11.6.	Çok Işın Modeli	46
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	49
2.1.	Materyal ve Yöntem.....	49
2.2.	Yapılan Ölçümler.....	53
2.2.1.	TRBCA2 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri	53
2.2.2.	TRMIG1 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri.....	55
2.2.3.	TRMIG2 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri.....	57
2.2.4.	TRMIG3 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri.....	59
2.3.	Yapılan Ölçümlerin Değerlendirilmesi.....	61
2.3.1.	Kırılma Noktası Mesafelerinin Belirlenmesi	61

2.3.2.	LOS Ölçüm Sonuçlarının Modellerle Karşılaştırılması.....	65
2.3.2.1.	TRBCA2 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleriyle Karşılaştırılması.....	65
2.3.2.2.	TRMIG1 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleriyle Karşılaştırılması.....	70
2.3.2.3.	TRMIG2 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleriyle Karşılaştırılması.....	74
2.3.2.4.	TRMIG3 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleriyle Karşılaştırılması.....	78
2.3.2.5.	TRBCA2, TRMIG1, TRMIG2 ve TRMIG3 Hücrelerine İki ve Dört Işın Modellerinin Uygulanması	81
2.3.3.	Elde Edilen Sonuçlara Göre Modellerin Değerlendirilmesi	85
3.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR	87
4.	ÖNERİLER.....	89
5.	KAYNAKLAR	90
6.	EKLER.....	93
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Son yıllarda hücresel radyo servislerine olan talebin hızlı bir şekilde artış göstermesiyle, yeni hücresel sistemlere duyulan ihtiyaç da aynı oranda artış göstermektedir. Artan hareketli abone trafiğini karşılamak amacıyla operatörler sistem kapasitesini artırma yoluna gitmektedirler. Bu nedenle artan kapasiteyi karşılamak ve kaliteyi korumak için mevcut hücresel sistemlerden daha küçük boyutlara sahip yeni mikro hücresel sistemler tasarlanmaktadır.

Bu çalışmada Trabzon il merkezinde yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz, UMTS 2 GHz, FM, VHF ve UHF frekans bantları için ortalama elektrik alan şiddeti ölçmeleri yapılmış ve veriler haritalara işlenmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla il merkezindeki dört mikro hücreye ait yol kaybı değerleri ve kırılma noktası mesafeleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler mikro hücreler için önerilen yol kaybı tahmin modelleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda ölçüm yapılan bölgeye en uygun model belirlenmeye çalışılmıştır. Mesafeye bağlı yol kaybı eğrilerinin grafiksel gösterimleri Matlab programı yardımıyla elde edilmiştir. Ortalama elektrik alan şiddeti değerleri Google Earth programı kullanılarak haritalar üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Alan, Mikro Hücre, Yayılım Yol Kaybı, Kırılma Noktası, Fresnel Bölgesi

SUMMARY

Electric Field Measurements in the City Center of Trabzon and Comparison of Propagation Models with Measurement Results for Some Microcells

The need for new cellular systems has been increasing dramatically in recent years with the increase in demand for cellular radio services. Operators are forced to increase the system capacity to meet the growing mobile subscriber traffic. Therefore, new micro cellular systems are designed with smaller dimensions to meet the increase in capacity and protect the quality.

In this study, for GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz, UMTS 2 GHz, FM, VHF and UHF frequency bands, average electric field strength measurements have been taken in the city center of Trabzon in areas of dense settlement. The distances of the break point and the path loss values of four micro cell in the city center of Trabzon have been calculated with the help of the data obtained from measurements. The calculated values have been compared with the path loss prediction models proposed for micro cells. As a result of the comparison, the most appropriate model for the measurement region have been tried to determine. Graphical representations of the path loss curves were obtained using Matlab software. The average electric field strength values were shown on the maps using the Google Eart program.

Key Words: Elektrik Field Strength, Micro Cell, Propagation Path Loss, Break Point, Fresnel Zone

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Farklı frekanslara sahip komşu hücreler.....	2
Şekil 1.2. Yapısal, ideal ve gerçek hücre yapısı	3
Şekil 1.3. Hücresel ağ yapısı.....	4
Şekil 1.4. Kavşak noktası ve cadde merkezinde yayılım.....	6
Şekil 1.5. Hiyerarşik hücre yapısı.....	10
Şekil 1.6. Yayılımı etkileyen faktörler.....	14
Şekil 1.7. Anten bölgeleri	16
Şekil 1.8. İlk üç Fresnel bölgesi elipsleri.....	17
Şekil 1.9. (a) ve (b) Hatalı yerleştirilmiş radyo bağlantıları	18
Şekil 1.10. Doğru yerleştirilmiş radyo bağlantısı	18
Şekil 1.11. $\lambda/2$ dipolün alan şiddetine bağlı ışınma diyagramları.....	20
Şekil 1.12. Düşey hüzme oluşturma yoluyla kazanç elde edilmesi	20
Şekil 1.13. $\lambda/2$ dipol ilavesiyle kazancı arttırılmış antenin ışınma diyagramları.....	21
Şekil 1.14. Yatay hüzme oluşturarak kazanç elde edilmesi.....	22
Şekil 1.15. Çeşitleme yöntemleri: (a) uzay (anten) çeşitleme, (b) polarizasyon çeşitleme, (c) anten patern çeşitleme, (d) frekans çeşitleme, (e) zaman çeşitleme.....	23
Şekil 1.16. Çeşitleme yöntemiyle sinyal seviyesinin arttırılması	24
Şekil 1.17. Farklı yayılım modellerinin karşılaştırılması: (a) deneysel modeller, (b) ışın izleme modelleri, (c) baskın yol modelleri	26
Şekil 1.18. İki ışın modeli	28
Şekil 1.19. İlk Fresnel bölgesi açıklığının gösterilimi	31
Şekil 1.20. Sinyal seviyesinin kırılma noktasına bağlı değişimi	32
Şekil 1.21. (a) İdeal kentsel sokak görünümü, (b) LOS durumu için tipik yol kaybı eğrisi, (c) NLOS durumu için tipik yol kaybı eğrisi.....	33
Şekil 1.22. Kent içi EM dalga yayılımı	34
Şekil 1.23. Kentsel alanda tipik yayılım koşulları	35
Şekil 1.24. Kanyon sokak için ITU tarafından öngörülen NLOS durumu	37
Şekil 1.25. Farklı açılara sahip sokak kavşağı örnekleri.....	39
Şekil 1.26. Berg modeli için alıcı verici arası sokak konumu	40

Şekil 1.27. Yol kaybı hesap örneği (düz çizgi $\theta_2=0$, noktalı çizgi $\theta_2=10$ ve kesikli çizgi $\theta_2=90$ derece için)	41
Şekil 1.28. Kavşak noktalarında yayılım yolu	44
Şekil 1.29. Kanyon sokak için LOS ve NLOS durumu	46
Şekil 1.30. On ışın modelinde sokağın üstten görünümü	47
Şekil 1.31. Çok ışın modeli için kanyon sokakta alıcı ve verici konumları	48
Şekil 2.1. SRM 3000 spektrum analizör	51
Şekil 2.2. TRBCA2 hücresi ölçüm güzergâhı.....	53
Şekil 2.3. TRMIG1 hücresi ölçüm güzergâhı	55
Şekil 2.4. TRMIG2 hücresi ölçüm güzergâhı	57
Şekil 2.5. TRMIG3 ölçüm güzergâhı.....	59
Şekil 2.6. TRBCA2 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği	62
Şekil 2.7. TRMIG1 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği.....	62
Şekil 2.8. TRMIG2 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği.....	63
Şekil 2.9. TRMIG3 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği.....	63
Şekil 2.10. TRBCA2 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması.....	69
Şekil 2.11. TRMIG1 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması.....	73
Şekil 2.12. TRMIG2 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması.....	77
Şekil 2.13. TRMIG3 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması.....	81
Şekil 2.14. TRBCA2 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri	82
Şekil 2.15. TRMIG1 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri	82
Şekil 2.16. TRMIG2 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri	83
Şekil 2.17. TRMIG3 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri	83
Şekil 2.18. Görünürlülük katsayısı değerleri değiştirilerek Berg modelinin ölçüm sonuçlarıyla grafiksel olarak karşılaştırılması	85
Ek Şekil 1. Tanjant ve Devlet Sahil Yolu arasında bulunan bölgede GSM 900 MHZ bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	93

Ek Şekil 2. Maraş Caddesi ve İnönü Caddesi boyunca GSM 900MHZ bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	93
Ek Şekil 3. Yavuz Selim Bulvarı ve İnönü Caddesi boyunca GSM 900 MHZ bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	94
Ek Şekil 4. Tanjant ve Devlet Sahil Yolu arasında bulunan bölge civarında FM, VHF ve UHF bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	94
Ek Şekil 5. Maraş Caddesi ve İnönü Caddesi boyunca FM, VHF ve UHF bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	95
Ek Şekil 6. Yavuz Selim Bulvarı boyunca FM, VHF ve UHF bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	95
Ek Şekil 7. Tanjant ve Devlet Sahil Yolu arasında bulunan bölge civarında 2GHz bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	96
Ek Şekil 8. Maraş Caddesi ve İnönü Caddesi boyunca 2GHz bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	96
Ek Şekil 9. Yavuz Selim Bulvarı ve İnönü Caddesi boyunca 2GHz bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi	97

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Hücresele sistemlerin fiziksel çalışma ortamları	8
Tablo 1.2.	İlk Fresnel bölgesi yarıçapının frekansa ve uzaklığa bağılı değişimi	18
Tablo 2.1.	SRM-3000 için üç eksenli antene ait frekansa bağılı kazanç ve anten faktörü değerleri	52
Tablo 2.2.	TRBCA2 sektörünün özellikleri.....	54
Tablo 2.3.	TRBCA2 hücresi için mesafeye bağılı ölçüm sonuçları	54
Tablo 2.4.	TRMIG1 sektörünün özellikleri	56
Tablo 2.5.	TRMIG1 hücresi için mesafeye bağılı ölçüm sonuçları.....	56
Tablo 2.6.	TRMIG2 sektörünün özellikleri	58
Tablo 2.7.	TRMIG2 hücresi için mesafeye bağılı ölçüm sonuçları.....	58
Tablo 2.8.	TRMIG3 sektörünün özellikleri	60
Tablo 2.9.	TRMIG3 hücresi için mesafeye bağılı ölçüm sonuçları.....	60
Tablo 2.10.	TRBCA2 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	66
Tablo 2.11.	TRBCA2 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	67
Tablo 2.12.	TRBCA2 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	68
Tablo 2.13.	TRMIG1 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	70
Tablo 2.14.	TRMIG1 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	71
Tablo 2.15.	TRMIG1 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	72
Tablo 2.16.	TRMIG2 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	74
Tablo 2.17.	TRMIG2 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	75
Tablo 2.18.	TRMIG2 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	76

Tablo 2.19.	TRMIG3 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	78
Tablo 2.20.	TRMIG3 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	79
Tablo 2.21.	TRMIG3 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar	80
Tablo 2.22.	Hücreler için hesaplanan fark ve standart sapma değerleri.....	86

SEMBOLLER DİZİNİ

AF	:	Anten faktörü
BS	:	Baz İstasyonu (Base Station)
BSC	:	Baz İstasyonu Kontrol Birimi (Base Station Controller)
BSS	:	Baz İstasyonu Sistemi (Base Station System)
BTS	:	Baz İstasyonu Alıcı Verici Sistemi (Base Transceiver System)
c	:	Işık hızı
c_n	:	Sabit katsayı
ÇD	:	Çift duvardan yansıyan dalga
d	:	Alıcı ile verici arası direk görüş hattı mesafesi
D	:	Maksimum anten boyu
dB	:	Desibel
dB _i	:	Desibel izotropik
d_j	:	Alıcı verici arası hayali mesafe
d_k	:	Kırılma noktası
d_r	:	Yansıyan dalganın boyu
DY	:	Duvardan yere yansıyan dalga
d_0	:	Direk dalganın boyu
d_1	:	Sokak kavşağı ile verici arası mesafe
d_2	:	Sokak kavşağı ile alıcı arası mesafe
E	:	Elektrik alan şiddeti
E_{ort}	:	Ortalama elektrik alan şiddeti
E_t	:	Alıcı antendeki toplam elektrik alan şiddeti
E_0	:	Direk dalgadan dolayı alıcı antende alınan elektrik alan şiddeti
f	:	Frekans
f_c	:	Taşıyıcı frekans
FM	:	Frekans Modülasyonu (Frequency Modulation)
GHz	:	Gigahertz
G_r	:	Alıcı anten kazancı
GSM	:	Global System for Mobile Communications
G_t	:	Verici anten kazancı

G_x	:	Verici ve alıcı anten kazançlarının çarpımı
h_r	:	Alıcı anten yüksekliği
h_t	:	Verici anten yüksekliği
j	:	Geçiş noktası
ITU	:	International Telecommunication Union
k	:	Anten faktörü
K	:	Yol kaybı sabiti
kHz	:	Kilohertz
km	:	Kilometre
l	:	Çok ışın modelinde direk ışının uzunluğu
L	:	Yol kaybı
L_{ab}	:	Direk görüş hattı durumunda kırılma noktası sonrası yol kaybı
L_{bb}	:	Direk görüş hattı durumunda kırılma noktası öncesi yol kaybı
L_{bp}	:	Kırılma noktasındaki yol kaybı
L_d	:	Kırınım yol kaybı
L_F	:	Serbest uzay yol kaybı
L_{ekstra}	:	Ekstra yol kaybı
L_{los}	:	Direk görüş hattı durumunda yol kaybı
$L_{los,h}$:	Yol kaybı üst sınır
$L_{los,l}$:	Yol kaybı alt sınır
L_{nlos}	:	Direk görüş hattı bulunmayan durumda yol kaybı
L_r	:	Yansıma yol kaybı
LOS	:	Direk görüş hattı (Line of site)
m	:	Metre
MHz	:	Megahertz
MS	:	Hareketli alıcı (Mobile subscriber)
MSC	:	Mobil Anahtarlama Merkezi (Mobile Services Switching Center)
n	:	Yayılm kaybı üssü
NLOS	:	Direk görüş hattının olmadığı durum (Non line of site)
P_{EIRP}	:	Etkin izotropik yayılım gücü
P_r	:	Alıcı anten gücü
P_t	:	Verici anten gücü
q_j	:	Açıya bağlı katsayı

R	:	Alıcı
R_a	:	Duvardan yansıyan dalga uzunluğu
R_b	:	Duvardan yansıyan dalga uzunluğu
r_j	:	Alıcı verici arası fiziksel mesafe
R_f	:	İlk Fresnel bölgesi yarı çapı
R_o	:	Anten giriş direncini
R_0	:	Alıcı verici arası direk dalga uzunluğu
R_1	:	Antenin ışınma yakın alan bölgesinin başladığı mesafe
R_2	:	Antenin ışınma uzak alan bölgesinin başladığı mesafe
s	:	Görünürlülük faktörü katsayısı
SK	:	Sokak kavşağı
t	:	Zaman
T	:	Verici
TD	:	Duvardan yansıyan dalga
UHF	:	Ultra High Frequency
UMTS	:	Universal Mobile Telecommunications System
U_o	:	Spektrum analizör girişinde oluşan potansiyel farkı
ÜD	:	Üç duvardan yansıyan dalga
V	:	Volt
VHF	:	Very High Frequency
w	:	Sokak genişliği
W	:	Watt
W_j	:	Ekstra yol kaybı katsayısı
w_1	:	Vericinin bulunduğu sokak genişliği
w_2	:	Alıcının bulunduğu sokak genişliği
x_i	:	Yansıyan i'nci ışının yol uzunluğunu
YD	:	Yerden duvara yansıyan dalga
YGHG	:	Yarı güç hüzmeye genişliği
YY	:	Yerden yansıyan dalga
z_R	:	Alıcının yolun tam ortasına olan uzaklığı
z_T	:	Vericinin yolun tam ortasına olan uzaklığı
λ	:	Dalga boyu

Ω	:	Ohm
α	:	Köşe açısı
θ	:	Ana yol ile yan yol arası açı
$\Delta\theta$:	Faz farkı
Δd	:	Yol farkı
Γ	:	Yansıma katsayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

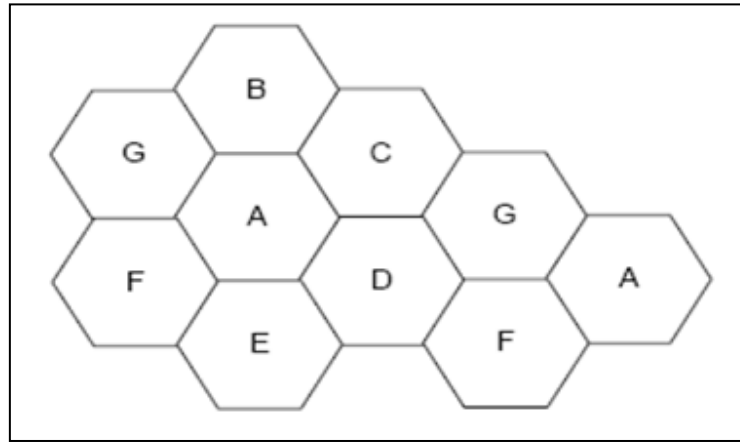
Son yıllarda hücresel radyo servislerine olan talebin hızlı bir şekilde artış göstermesiyle, yeni hücresel sistemlere duyulan ihtiyaç da aynı oranda artış göstermektedir. GSM (Global System for Mobile Communications) şebekelerinde mobil telefon servislerinin kullanımının artması ve bunun yanında geliştirilen yeni servislerin de kullanıma sunulmasıyla birlikte operatörler bu trafiği karşılamak amacıyla ağ kapasitesini arttırmak zorunda kalmışlardır. Mobil radyo iletişimde frekans kaynağının kısıtlı olması nedeniyle frekansın yeniden kullanımı, spektrum verimini arttırmakta ve artan talepleri karşılamakta oldukça önem arz etmektedir. Spektrumun kısıtlı olması ve donanımsal kısıtlamalardan dolayı mevcut makro hücrelerde kapasite artırımı konuşma kalitesinde kötüleşmeye neden olacaktır. Bu nedenle artan kapasiteyi karşılamak ve kaliteyi korumak için, frekansın daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla mevcut hücresel sistemlerden daha küçük boyutlara sahip yeni mikro ve küçük makro hücresel sistemlerin kurulması öngörülmektedir.

Makro hücrelerin mikro hücrelere bölünmesiyle aynı alana daha çok hücre ile servis verilebilmektedir. Mikro hücrelerde hücre boyutları küçüldüğünden baz istasyonlarının konumlandırılması da sokak lambası seviyelerine kadar inmektedir, dolayısıyla çıkış güçleri de mevcut istasyonların güç değerlerinden daha düşük seviyelerde olmaktadır.

1 km'den daha az mesafelerde gerçekleşen bu radyo yayılımı yer yükseltilerinin değişiminden ziyade, öncelikli olarak binalardan ve ağaçlardan etkilenmektedir. Çoğu mikro hücresel radyo bağlantıları kentsel alanlarda bulunduğu için, bu gibi hücrelerde yayılım olayında binaların etkisi daha baskındır. Bunun yanında baz istasyonları bina seviyesinin altında yaklaşık 7 ile 11 metre arasında bir yüksekliğe sahip olmaları nedeniyle kentsel alanda yoğun bölgelerde binaların dışında araçlar, yayalar, trafik işaretleri, levha ve tabelalar gibi yayılım yoluna engel teşkil eden birçok saçıcı da yayılım olayında ve yayılım kaybı hesabında oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu hücrelerde bulunan mobil alıcılar da çoğunlukla yolda yürüyen yayalar veya araç içinde bulunan kullanıcılardan oluşmaktadır.

1.2. Hücresel Ağ Yapısı

Kablosuz radyo haberleşmesinin ilk zamanlarında alıcı ve verici arasında iki yönlü bir iletişim hattı mevcut değildi. Bu hatlar tek-yönlü gönderme hatlarıydı ve hareketli alıcıları arayan insanlar hemen cevap alamazdı. Hatta aramalarının alıcı adreslere ulaşım ulaşmadığını dahi hemen anlayamazdılar. Bundan sonraki basamak çift-yönlü, hemen cevap alınabilen bir ileti hattı kurmak oldu. Bu da hareketli vericilerle sağlandı, fakat şebeke yapısı kolay kullanıma uygun değildi ve hizmet belli bir alan ile sınırlı idi. Bu alana, bir verici ile veya tek bir bölgede farklı kanallarda çalışan küçük bir grup verici ile ulaşmak mümkündü. Şebekenin tanıdığı bu alanlara “Hücre” denildi. Hücrenin veya şebekenin boyutu verici gücü ile ilgili idi. Hücredeki alıcı ve vericinin frekansını seçmek çok önemliydi. Çünkü diğer sistemlerle girişim oluşturma ihtimali yüksekti, büyük bir bölge için küçük bir frekans grubu kullanılıyordu. Bütün bu problemlere çözüm arandı. Sonraları, frekans bandının ayrılıp birçok hücre arasında bir hücreye tahsis edilmesi önerildi. Hücreler de birbirine bitişik ve bir arada olacaktı. Sonuç olarak Şekil 1.1’deki gibi bir hücre yapısı oluştu.

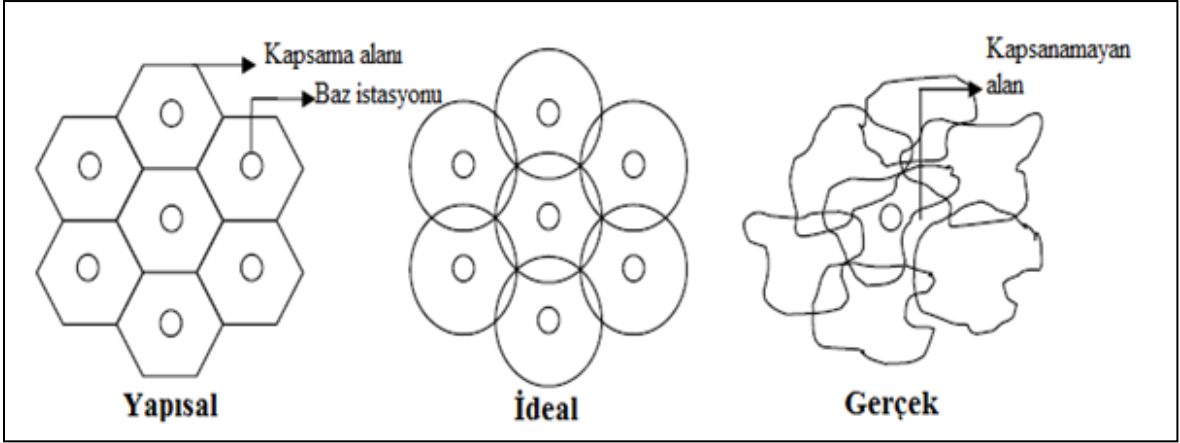


Şekil 1.1. Farklı frekanslara sahip komşu hücreler

Bu planlamanın düzgün çalışması için bazı kısıtlamalar getirildi. Aynı kanalı kullanan farklı iki istasyonlar arasındaki girişimi azaltmak için frekanslar belli hücrelere tahsis edildi. Farklı istasyonlar arası girişimi azaltmak için, hücre içinde güç seviyeleri uygun bir şekilde ayarlandı. Çünkü bitişik hücrelerin birbirlerine yönelik girişime sebep olmaması için, güç sınırlı olmalıydı. Bunun yanında alıcı filtreleri de geliştirildi [1].

Günümüzde, bir mobil abone, mobil cihazı ile hücre kapsama alanı içinde her yerden arama gönderebilir ve arama alabilir.

Hücre şekli teoride altıgen olarak gösterilir ve bu yapay bir gösterimdir. Baz istasyonu anteni tarafından yayılan sinyalin ideal kapsaması ise dairesel olarak gösterilir. Ancak gerçekte bazı alanlar çeşitli nedenlerle gerekli sinyal seviyesine sahip olamazlar. Bu sebeple Şekil 1.2’de görüldüğü gibi hücreler gerçekte geometrik olmayan şekillere sahiptir.

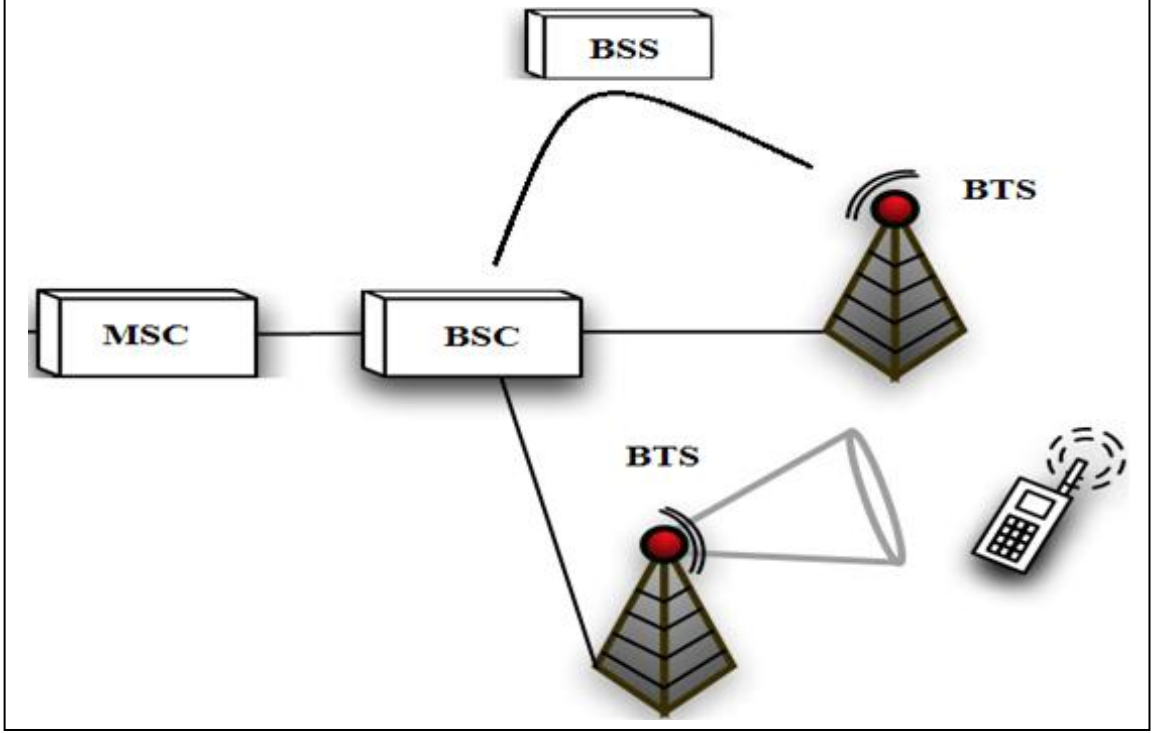


Şekil 1.2.Yapısal, ideal ve gerçek hücre yapısı [2].

GSM sistemi de hücresel yapıya sahip bir iletişim sistemidir. GSM sistemindeki tüm hücreler, hücresel ağı oluşturmaktadır. Genelde bir hücre, anten sisteminden oluşan bir sektörün kapsama alanı olarak tanımlanabilir. Bir baz istasyonu birkaç hücreye sahip olabilir.

Baz istasyonları Şekil 1.3’te gösterildiği gibi birbirlerine bir ağ yapısı şeklinde bağlıdır. Herhangi bir mobil telefondan gelen çağrı isteğinin ilgili kullanıcıya ulaştırılması bu ağ yapısı tarafından gerçekleştirilir. Her hücre bir grup radyo kanalını kullanan Baz İstasyonu Alıcı Verici Sistemine (BTS) sahiptir. Bu kanallar girişimi önlemek amacıyla komşu hücrelerde kullanılan kanallardan farklı tasarlanmıştır. BTS mobilin şebekeye ara yüzüdür ve genellikle hücrenin ortasına yerleştirilir. Bir grup BTS, bir Baz İstasyonu Kontrol Birimi (BSC) ile kontrol edilir ve baz istasyonlarının sayısı üreticiye bağlıdır. BSC’nin en önemli görevleri arasında güç kontrolü, frekans kontrolü ve BTS’lerin kontrolü sayılabilir. BSC donanımı, BTS gibi aynı bölgeye veya kendi başına bir bölgeye yerleştirilebileceği gibi Mobil Anahtarlama Merkezi (MSC) bölgesine de yerleştirilebilir. BSC ve BTS fonksiyonel olarak bir bütündür ve bu ikiliye Baz İstasyonu Sistemi (BSS)

adı verilmektedir. MSC ise şebekede mobilden gelen ve mobile giden her çeşit aramanın kurulması, yönlendirilmesi ve gözlenmesinden sorumlu olan kısımdır [3].



Şekil 1.3. Hücresel ağ yapısı [4].

Baz istasyonları, hücresel haberleşme sistemlerinde merkezi istasyon olarak görev yaparlar. Baz istasyonları olmadan mobil telefonlar iletişim sağlayamazlar. Mobil telefonlar, diğer mobil telefonlarla ve sabit ağ telefonlarıyla baz istasyonları üzerinden görüşme yapabilir. Bir baz istasyonunun aynı anda hizmet verebileceği görüşme sayısı sınırlıdır. Bu sayı, baz istasyonuna tahsis edilen taşıyıcı frekans sayısı ile doğru orantılıdır. Bir baz istasyonuna tahsis edilebilecek toplam taşıyıcı frekans sayısı ise sınırlıdır. Hücresel yapı ile birbirini etkilemeyecek uzaklıktaki hücrelerdeki baz istasyonlarında aynı taşıyıcı frekanslar tekrar kullanılarak daha çok sayıda kullanıcının şebekeden yararlanabilmesi sağlanır. Özellikle kullanıcı sayısının yüksek olduğu yerlerde daha küçük hücreler oluşturularak şebekenin kapasitesi artırılır. Bu amaçla kapsama alanı daha dar olan fakat daha sık aralıklarla baz istasyonları kurulur [5].

1.3. Hücreleri Ayırma ve Mikro Hücre Uygulaması

Abone sayısı arttıkça şebeke içindeki yoğunluk da artmaktadır. Var olan alanı daha küçük parçalara ayırmak, böylelikle var olan kanal sayısını arttırmak, kapasiteyi çok daha yukarılara çekmekte ve abone yoğunluğunu karşılamaktadır. Böylece hücrelerde kullanılan güç seviyeleri de daha düşük tutulmaktadır. Buradaki amaç ise mobil istasyonlar için gerekli olan pil büyüklüğünü azaltmaktır. Mobiller için gerekli olan güç miktarı azalınca, mobillerin boyutları ve ağırlıkları da azalmaktadır. Bu da şebekeleri kullanıcılar açısından daha çekici hale getirmektedir.

Şehir dışına tek bir kule kurarak hücresel yapı oluşturulamaz. GSM sistemlerinde mobil telefonlar ve baz istasyonu arasında karşılıklı iletişim olması gerekir. Bundan dolayı baz istasyonu ve mobil telefon arasındaki uzaklık arttıkça, iletişimin sağlanabilmesi için hem kulenin hem de mobil telefonların çıkış güçlerinin artırılması gerekir. İletişimin hücresel yapı kullanılmadan şehir dışına kurulan bir kule ile sağlanacağı bir yapıda, kuleye yakın mesafelerde ve kuleye uzak olan mobil telefonlarda çok yüksek elektromanyetik alan seviyeleri oluşur. Bunun yanı sıra hücresel yapı kullanılmadığında yığınla aboneyi konuşturabilmek için gerekli olan sınırlı sayıdaki bir çok taşıyıcı frekansta aynı baz istasyonuna tahsis edilecek olmasından dolayı sistemde girişim problemi oluşacak, kalite azalacak ve talep edilen hizmet neredeyse karşılanamaz hale gelecektir. Bu sebeple sınırlı sayıdaki frekans kanalının en verimli bir şekilde kullanılabilmesi için hücresel sistemlerin oluşturulması zorunlu olmakla birlikte mobil haberleşme sistemi için oldukça avantajlı ve vazgeçilmezdir [6].

Bir mikro hücresel katman, tüm hücrelerin kapsandığı şemsiye hücre katmanının altına kurulur. Böylece mikro hücreleri kapsayan makro hücreler kullanılarak devir teslim sıklığı azaltılmaya çalışılır ve olası konuşma kesilmelerinin önüne geçilir. Şemsiye hücreler, hiyerarşik hücre yapısının üst katmanında bulunan makro hücrelerdir. Makro hücrelerden en önemli farkı, farklı devir teslim algoritmalarının kullanılmasıdır. Makro hücreler genellikle büyük hücre alanlarını kaplar. Birçoğu çok yönlü veya üç sektörlüdür.

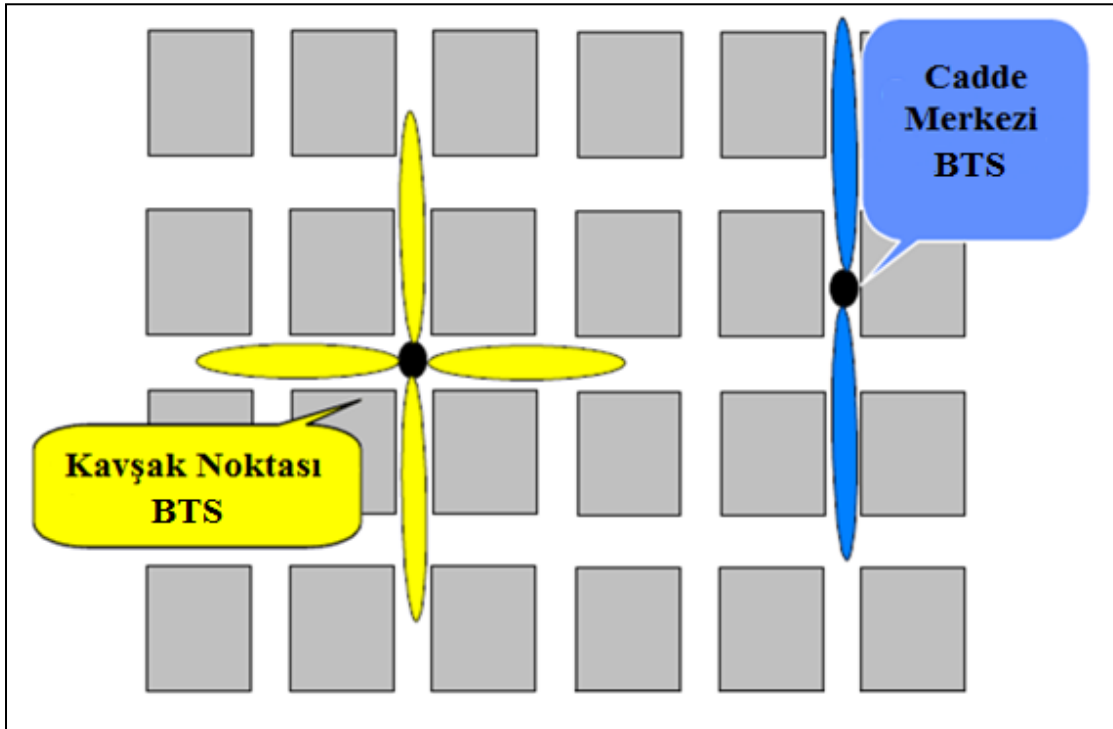
Mikro hücreler için potansiyel kapsama alanını belirlemek için trafik artışı dikkate alınır. Bundan dolayı şebekedeki kullanıcı artışını belirlemek gerekmektedir. Bu artış şöyle ifade edilebilir:

$$\text{Abone artışı} = \frac{\text{Beklenen abone sayısı}}{\text{Varolan kullanıcı sayısı}}$$

Bu varsayım her hücrede uygulanıp trafik tahmini yapılır. Her hücre için ayrı ayrı çalışma yapılırken;

- Eğer hücre yoğunluğu oldukça düşük ve kapsama boşlukları var ise hâlihazırdaki hücrelerin arasına makro hücre eklemek düşünülebilir.
- Eğer kapasite artırımını için talep oldukça düşük ise frekans yeniden kullanımı yeterli olabilir.
- Uzun zaman diliminde kapasite artışı tahmin ediliyor ise, yeni frekans spektrumu lisansı alınması düşünülebilir.
- Eğer kapasite ihtiyacı var olan kullanıcı tabanından fazla ise mikro hücreli hiyerarşik şebeke yapısı tek çözüm yöntemidir.
- Eğer belirli binaların iç bölgelerinde talep varsa mikro hücre en iyi çözümü sunar.

Mikro hücre kurulumu kararlaştırıldığında saha için iki farklı strateji izlenir. Baz istasyonları, caddelerin köşeleri ya da caddelerin ortalarına yerleştirilir.



Şekil 1.4. Kavşak noktası ve cadde merkezinde yayılım [6].

Kavşaklarda bulunan BTS'ler her siteye büyük kapsama alanı sunar ama bu durum km^2 'de düşük trafik kapasitesine neden olur. Caddelerin ortasında bulunan BTS'ler komşu mikro hücrelerden iyi izole olur ve çoğu kez frekansın yeniden kullanımını sağlar [6].

1.4. Hücresel Sistemlerin Fiziksel Çalışma Ortamları

Baz istasyonları, kapsamayı genişletmek veya kapsanan bölgedeki abone sayısının artması nedeniyle artan ihtiyacı karşılamak için kurulurlar. Bir bölgedeki hücre sayısının ve hücrenin kapasitesinin kararı, o bölge için beklenen gezgin abone, trafik yoğunluğu ve coğrafi yapı düşünülerek verilir. Geniş kapsama alanlı hücreler, gezgin abonelerin yoğunluğunun düşük olduğu ve radyo dalgalarının yayılmasını engelleyecek yapıların olmadığı bölgeler için tercih edilir. Küçük kapsama alanlı hücreler ise, abone ve istenen servisin yoğunluğunun çok fazla olduğu ve herhangi bir nedenle (bina, dağ gibi) radyo dalgalarının engellendiği ortamlar için tercih edilirler.

Radyo yayılımı binaların yapısı ve yüksekliği, mobil alıcı konumu (yaya ya da araçta), antenlerin pozisyonu gibi birçok çevresel faktörden etkilenmektedir. Tablo 1.1'de hücresel sistemlerin oldukça yaygın olduğu 4 farklı fiziksel çevre açıklanmaktadır. Dağlık ve tepelik bölgeler, büyük kentsel alanlarda az rastlanır olduğundan bahsedilmemiştir. Tablo 1.1'de bahsedilen çevrelerin, kendi içinde de oldukça farklı birçok çevreye ayrılabilceğini göz önüne alarak burada amaç mümkün olabilecek her bir durumu modellemek değil, sıkça karşılaşılan çevreleri temsil edebilecek yayılım modelleri verebilmektir [7].

1.5. Hücre Tipleri ve Özellikleri

GSM hücrelerinin planlanması yerleşim bölgelerinin özelliklerine göre yapılır. Hücre planlaması, hücrenin şehir içinde ya da şehir dışında olması ve kapsanacak bölgedeki GSM abone sayısı gibi faktörler göz önüne alınarak belirlenir. GSM hücresel sisteminde, kapsama alanına göre dört tip hücre vardır: Mega (Uydu), Makro, Mikro ve Piko hücre.

Tablo 1.1. Hücresel sistemlerin fiziksel çalışma ortamları [7].

Çevre Adı	Tanım
Kentsel çok katlı (Urban high-rise)	<ul style="list-style-type: none"> • Cadde ya da sokak boyunca yüksek binaların çevrelediği kentsel kanyonlardır. • Binaların yüksekliğinden dolayı çatı tepelerinden yayılım mevcutta mümkün değildir. • Yüksek bina dizileri uzun yol gecikmelerine sebep olur. • Alanda fazla sayıda hareket halinde bulunan araçlar, yansıyan dalgalara Doppler kayması ilave eden yansıtıcılar gibi davranır.
Kentsel az katlı (Urban low-rise)	<ul style="list-style-type: none"> • Geniş cadde ve sokaklara sahiptir. • Bina yükseklikleri genellikle 3 kattan azdır ve çatılardan kırınım olasıdır. • Bazen hareketli araçların neden olduğu yansıma ve gölgelemeler meydana gelir. • Başlıca etkiler uzun süreli gecikmeler ve küçük Doppler kaymalarıdır.
Oturmaya ayrılmış (Residential)	<ul style="list-style-type: none"> • Tek ya da çift katlı konutlar bulunur. • Caddeler genelde geniş ve çift yönlüdür, yol boyunca park etmiş arabalar vardır. • Bitki ve yapraklar yoğunluktan azdır. • Motor trafiği genellikle azdır.
Kırsal (Rural)	<ul style="list-style-type: none"> • Geniş bahçeleriyle küçük evler vardır. • Yer yükseltisinin (topografya) etkisi görülür. • Yoğundan hafife yeşil yaprak ve bitki örtüsü vardır. • Motor trafiği nadiren yoğundur.

1.5.1. Mega Hücre

Geniş alanları kapsamada ve özellikle trafik yoğunluğunun düşük olduğu uzak alanlarda kullanılır. Hücre boyutları itibariyle, mega hücreler uzak alanlar, şehir merkezleri ve erişim yapılamayan alanlar gibi çok çeşitli ortamlar için kullanılabilir. Gelişmekte olan ülkelerde, tek uygulanabilen hücre tipi olarak, şehir merkezlerinde de kullanmak mümkündür. Mega hücreler uydular tarafından sağlandığı için mega hücreler yerine uydu hücreleri ifadesi de kullanılmaktadır. Bununla birlikte makro hücre kapsamasının gelecekte uydular ile de sağlanabilecek olması sebebiyle mega hücre kavramını kullanmak daha uygun olmaktadır. Hücre boyutları uydu yüksekliğine, çıkış gücüne ve anten yüksekliğine bağlıdır ve çok büyüktür [8].

1.5.2. Büyük Makro Hücre

Hücre yarıçapları 35 km ye kadar ulaşabilen hücrelerdir. Ancak bina, ağaç ve tepe gibi engellerin çok olduğu yerleşim yerlerinde oluşturulan makro hücrelerin yarıçapları daha küçük olmak zorundadır. Büyük makro hücreler, trafik yoğunluğunun fazla olmayıp orta düzeyde olduğu ve mobil istasyon hızlarının çok olmadığı, dar bant hizmetlerinin sunulduğu ortamlarda tercih edilir. Genelde kırsal ve şehir dışı alanlarda kullanılır. Makro hücrelerde baz istasyonu antenlerinin çıkış güçleri 40-60 Watt arasında olabilmektedir.

1.5.3. Küçük Makro Hücre

Küçük makro hücreler genellikle trafik yoğunluğunun fazla olduğu kentsel bölgelerde tercih edilir. Hücre yarıçapları 1-3 km arasında değişir. Dışarıda, ortalama bina çatı seviyesinin üzerine monte edilirler. Bazı durumlarda çevre binalardan birkaçının yüksekliği baz istasyonu anten yüksekliğinden daha fazla olabilir.

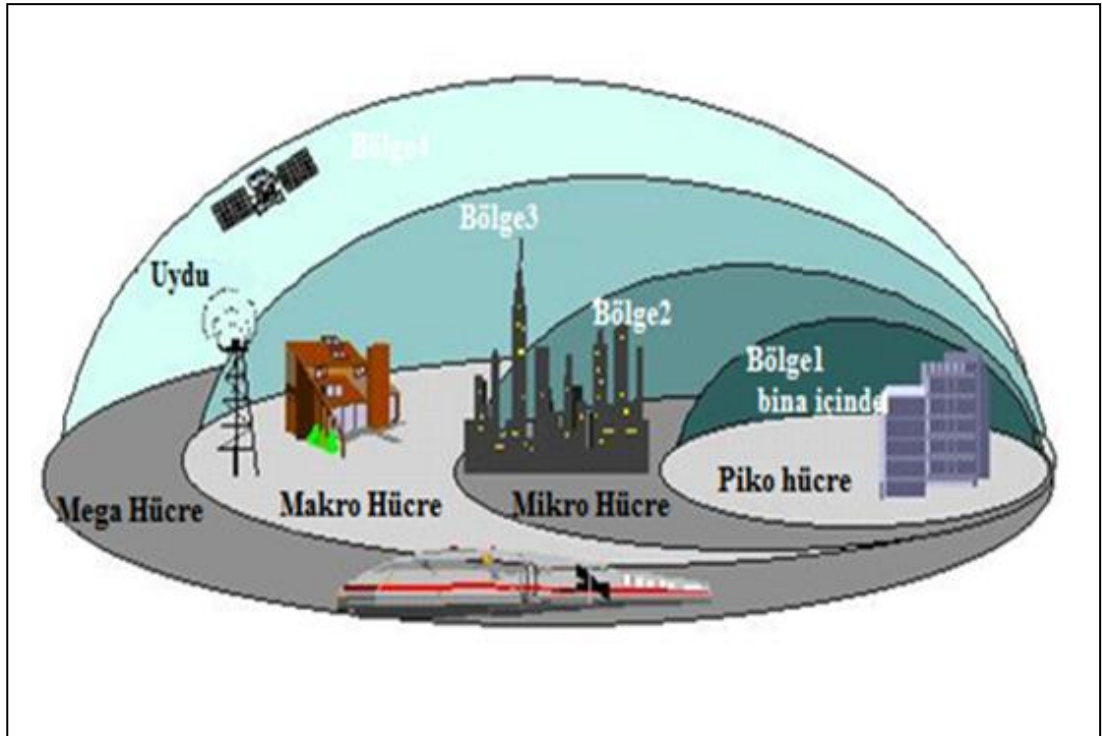
1.5.4. Mikro Hücre

Genellikle yerleşimin yoğun olduğu ve makro hücresel kapsamayı geliştirici ve tamamlayıcı olarak kurulan sistemlerdir. Mikro hücreler havaalanı, büyük alışveriş

merkezleri gibi yerlerde kurulabileceği gibi kentsel bölgelerde yoğun trafiğe sahip sokak ya da cadde gibi alanlarda ortalama bina seviyesinin altına kurulabilir. Mikro hücreler 1 kilometreye kadar yarıçapı olan alanları kapsar ve baz istasyonlarının çıkış gücü makro hücrelere göre daha düşüktür. Bu tip hücrelerde binalar engelleyici olabilir. Bu durumda hücre yarıçapını küçültmek dolayısıyla daha çok hücre kullanmak gerekir. Bu tip hücrelerdeki baz istasyonlarının çıkış gücü GSM 900 MHz için yaklaşık 5 ile 10 Watt arasında değişmektedir [8].

1.5.5. Piko Hücre

Daha çok bina içi haberleşmelerde kullanılır ve bu tip hücrelerde kullanılan baz istasyonlarının çıkış gücü birkaç Watt civarındadır. Bina dışında veya bina içinde tavana ya da çatıdan daha az bir yüksekliğe monte edilebilir.



Şekil 1.5. Hiyerarşik hücre yapısı [8].

1.6. Yayılım Olayı ve Yayılımı Etkileyen Faktörler

Günümüzde kullanılan kablosuz haberleşme sistemlerinde; radyo-bağlantıları genellikle 20 km civarında veya daha kısa olup, bağlantıyı oluşturan antenler binaların arasında hatta içerisinde yer almaktadır. Kullanılan elektromanyetik dalgaların dalga boyları ise binaların boyutları ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmaktadır. Sonuç olarak; haberleşme ortamının kanal karakteristikleri bitki örtüsünden ve arazi yapısından etkilendiği gibi ortamda bulunan binalardan da büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu tür ortamlarda; bina duvarlarında oluşan yansıma ve iletim olayları, zeminden kaynaklanan yansıma olayları, binaların köşe ve kenarları ile arazideki diğer engellerden kaynaklanan kırınım olayları neticesinde elektromanyetik dalgalar bir antenden diğerine çok sayıda farklı yol üzerinden ulaşmaktadır.

UHF ($300 \text{ MHz} < f < 3 \text{ GHz}$) bandındaki frekanslar için elektromanyetik dalgaların dalga boyu 1 m den daha azdır ve bu değer çevredeki bina boyutlarıyla karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Bu sebeple verici ile alıcı arasındaki elektromanyetik dalgaların yayılımının bireysel ışın yolları olarak tarif etmek anlamlı olmaktadır. Kentsel bölgelerde binalar, araçlar, insanlar vb. engellerden kaynaklanan yansıma, kırınım ve saçılma olayları sonucu alıcı ile verici arasında birçok farklı yol oluşmaktadır. Oluşan bu yollar sayesinde alıcı ile verici arasında doğrudan görüş hattı sağlanmasa bile haberleşmek mümkün olabilmektedir [9].

1.6.1. Yansıma

Herhangi bir ortamdaki elektromanyetik dalga farklı elektriksel özellikleri olan diğer bir ortama geçtiğinde; kısmen yansımaya uğrar, kısmen de diğer ortama geçer. Yansıma bir elektromanyetik dalganın dalga boyuna kıyasla çok büyük boyutları olan bir nesneye çarpması durumunda gerçekleşir. Yansıma katsayısı malzemelerin özelliklerinin fonksiyonudur ve genellikle dalga polarizasyonuna, geliş açısına ve yayılan dalganın frekansına bağlıdır [9].

1.6.2. Kırınım ve Gölgeleme

Kırınım, verici ile alıcı arasındaki yolun keskin kenarları olan bir cisim tarafından engellenmesi durumunda meydana gelir. Verici ile alıcı arasında doğrudan görüş hattı olmasa bile, engelleyen yüzeyde meydana gelen ikincil dalgalar tüm uzayda ve hatta engelin arkasında bile yer alır. Böylece, engelin arkasında da bir elektrik alan oluşur. Bu olgu “gölgeleme” olarak ta bilinir. Alıcı gölgelenmiş (engellenmiş) bölgeye doğru ilerlediğinde, kırınım bölgesi hala mevcuttur ve kaliteli bir işaret üretebilmek için yeterli alan şiddetine sahiptir. Yüksek frekanslarda, kırınım da yansıma gibi hem nesnenin geometrisine hem de genlik, faz ve gelen dalganın polarizasyonuna bağlıdır.

1.6.3. Saçılma

Saçılma, birim hacme düşen engel sayısının fazla olduğu ve dalga boyuna kıyasla nesnelerin küçük boyutlara sahip olduğu ortamlarda gerçekleşir. Saçılan dalgalar pürüzlü yüzeyler, küçük nesnelere veya kanaldaki diğer düz olmayan nesnelere tarafından meydana getirilir. Pratikte hareketli hücreli haberleşme sistemlerinde, ağaçlar, sokak lambaları ve trafik ışıkları gibi engeller saçılmaya neden olan etkenlerdir.

1.6.4. Bina ve Araçların İçine Nüfuz Etme

Sinyal binaların yüzeyine çarptığında, ya kırınıma uğrar ya da soğurulur. Eğer sinyalin birkaç uzantısı soğurulursa, sinyal gücü düşer. Soğurulmanın miktarı, binaların boyutuna ve çevresel faktörlere bağlıdır. Bina yanındaki yayılım karakteristiklerine bakılarak, dış yüzeyi cam kaplı yapılar ile metal yapıların miktarına göre, antenlerin yönelimleri ve binaların yönelimleri uyumlandırılmalıdır. Bu işlem, radyo şebekelerinin kapsama alanı planlamasında önemli bir husustur. Sinyalin araçların içerisine nüfuz ederek oluşturduğu kayıp ta benzer şekilde açıklanabilir.

1.6.5. Su Üzerinde Yayılım

Su üzerindeki yayılım, radyo planlama mühendisleri için büyük bir endişe kaynağıdır. Su yüzeyi, radyo dalgaları için çok iyi bir yansıtıcıdır ve bu durum, radyo sinyalinin diğer hücrelerin radyo sinyal frekansları ile girişim oluşturmaya neden olabilmektedir.

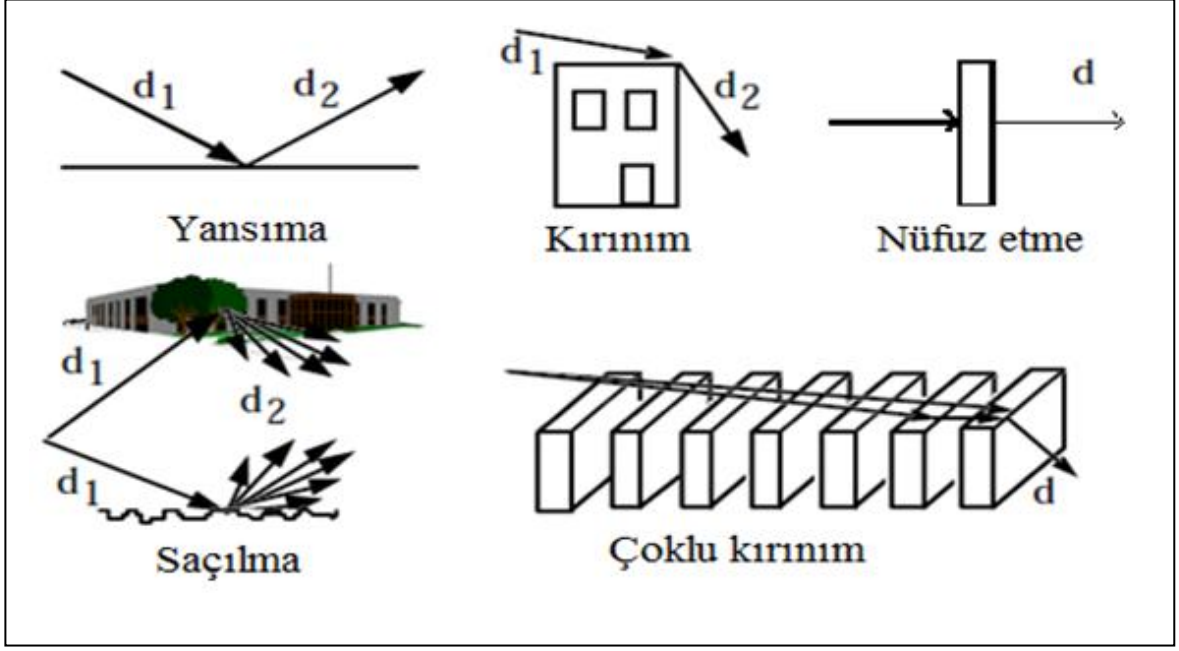
1.6.6. Yeşil Alanlar Üzerindeki Yayılım

Özellikle ormanlar gibi yeşil alanlarda radyo sinyallerinin yayılımı kayıplara neden olmaktadır. Sinyal gücündeki değişiklik, ağaçların türü, gövdeleri, yaprakları, dalları ve bunların yoğunluğuna ayrıca anten yüksekliklerine göre ağaç yükseklikleri gibi pek çok etkene bağlıdır. Ayrıca mevsim değişimlerine ve sinyal frekanslarına bağlı olarak bu kayıplar değişir.

1.6.7.Sinyalin Sönümlenmesi

Sinyal, verici antenden alıcı antene giderken, gücünde zayıflama olur. Bu durum, daha önce açıklandığı üzere, yoldaki kayıplardan olabileceği gibi, Rayleigh etkisinden dolayı da olabilir. Rayleigh sönümlenmesi, verici antenler ve alıcı antenler arasında görüş hattı yokken, yansımaların gecikme, faz ve genliğindeki hızlı değişimden dolayı meydana gelir. Rayleigh sönümlenmesi iki türe ayrılabilir. Bunlar, yansımali kanal sönümlenmesi ve frekans seçici sönümlenme şeklindedir.

Aynı sinyalin, farklı zamanlarda, farklı yollardan gelen birleşimleri, alıcıda sinyal sönümlenmesine neden olur. Bu olay yansımali kanal sönümlenmesidir ve yansımali kanal yayılımının doğrudan bir sonucudur. Yansımali kanal sönümlenmesi, sinyal seviyesinde sert dalgalanmalara neden olabilir. Bu tür sönümlenmeler, her iki yönde birbirlerinden farklı bantların kullanılmasından dolayı, aşağı bağlantı ve yukarı bağlantıda, birbirinden farklı olabilmektedir [2].



Şekil 1.6. Yayılmı etkileyen faktörler [10].

Frekans seçici sönmleme, bölgedeki atmosferik koşulların değişimi ile de meydana gelebilir. Atmosferik koşullar, sinyalin belirli frekanslarının sönmlemesine sebep olabilir. Gezgin istasyonun bir bölgeden başka bir bölgeye hareketi sırasında, gezgin antene ulaşan çeşitli bileşenler arasındaki faz ilişkisi değişir. Bundan dolayı sinyal seviyesinde değişiklik meydana gelir.

Birbirinden farklı gecikmeler ile alıcıya gelen yansıma bileşenlerinin aralarındaki gecikmenin büyüklüğüne ve bağıl genliklerine bağılı olarak, frekans düzleminde kimi frekanslar için güçlü, kimi frekanslar için ise zayıf sinyal alımı söz konusudur. Yansıma genlikleri birbirine yaklaştıkça, frekans düzleminde daha derin sönmlemeler görülürken; yansımaların gecikmeleri arasındaki fark azaldıkça, birbirine daha yakın frekanslarda sönmleme gerçekleşir. Frekanstaki doppler kayması, hareket eden gezgin istasyon ile alınan frekanslardan dolayı oluşur [2].

1.7. Antenler

1.7.1. Antenin Uzak, Yakın ve Reaktif Alan Bölgeleri

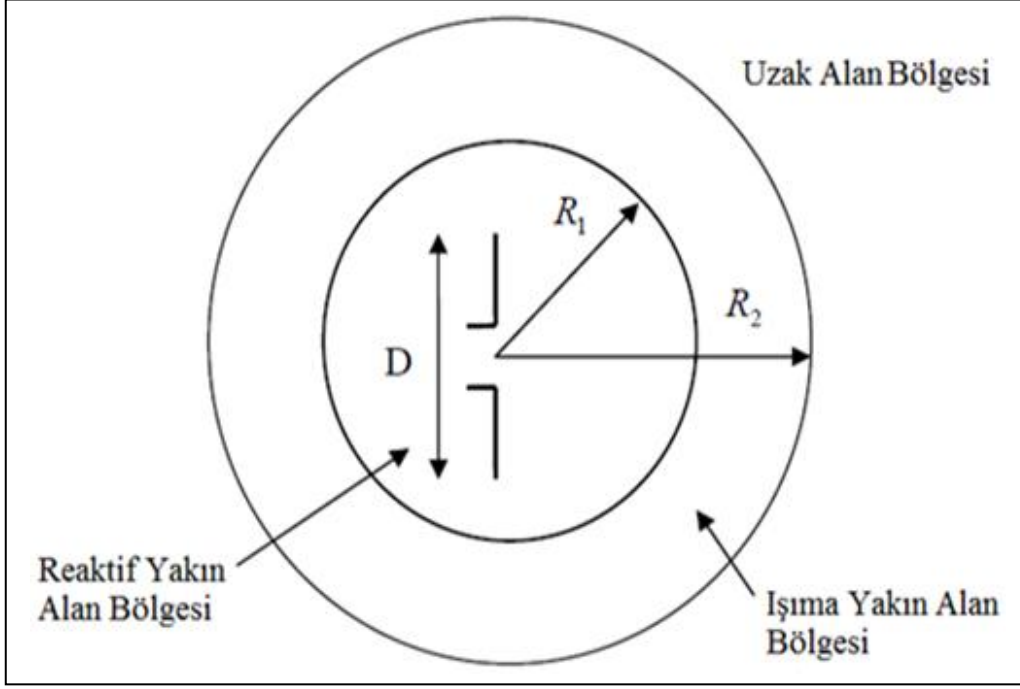
Anten çevresinde oluşan üç farklı alan vardır: Fraunhofer bölgesi olarak bilinen ışına uzak alan bölgesi, Fresnel bölgesi olarak bilinen ışına yakın alan bölgesi ve antene en yakın ışına olmayan reaktif yakın alan bölgesi.

Antenin uzak alan bölgesinde elektromanyetik dalgalar düzlem dalga özelliği göstermektedir. Alıcı ve verici arasında bu alan koşullarını sağlayacak uygun mesafe bulunduğu, kazanç ve ışına paterni gibi anten parametreleri performans ve girişim analizi hesaplamalarında kullanılabilir. Uzak alan bölgesinde antenin ışına paterni uzaklıktan bağımsızdır yani antenden yayılan açısal alan dağılımı uzaklığa bağlı değildir. Uzak alanda elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbiriyle orantılı olarak değişir ve bu oran serbest uzayda 377Ω değerindeyken yakın alanda değişim gösterir. Bu nedenle farklı boyuttaki anten açıklıkları için alan bölgelerinin nerede olduğunu bilmek gerekir.

Antenin ışına yakın alan bölgesi, ışına uzak alan ve reaktif yakın alan bölgeleri arasında radyal uzaklıkta oluşur. Bu alanda dalgalar düzlem dalga özelliği göstermez. Çalışma frekansında antenin maksimum boyutu dalga boyundan daha küçükse ışına yakın alan bölgesi oluşmayabilir. Maksimum boyu D ve $D \gg \lambda$ olan çoğu antenin ışına yakın alan bölgesi yaklaşık $R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ uzaklığında oluşur ve uzak alan bölgesinin bulunduğu alana kadar etkisini sürdürür. Reaktif yakın alan bölgesi antenin yüzeyinden başlar ve R_1 uzaklığına kadar açılır. $D \gg \lambda$ koşulu yarım dalga dipol ve çeyrek dalga monopollü antenler için tam olarak sağlanmamaktadır, bu nedenle bu yaklaşım reaktif yakın alan başlangıç ve ışına yakın alan bitiş mesafesinin hesaplanmasında kullanılamaz. Küçük dipol ve monopollü antenler için, reaktif yakın alanın bitimi ve ışına yakın alanın başlangıcı $R_1 = \lambda/2 \pi$ ya da 0.159λ olarak ifade edilir. Bu uzaklık ifadesi $R_1 = \lambda/2 \pi$ yakın ve reaktif alan bölgelerinde maksimum gücün eşit olduğu mesafedir [11].

Dalgaların düzlem dalga özelliği gösterdiği uzak alan bölgesinin başlangıcı dalga boyuna bağlı olarak anten açıklığının boyutlarına bağlıdır. Antenin uzak alan bölgesinde olmak için sağlanması gereken üç koşul aşağıdaki gibidir.

$$R_2 > \frac{2D^2}{\lambda}, \quad R_2 \gg D \quad \text{ve} \quad R_2 \gg \lambda \quad (1.1)$$



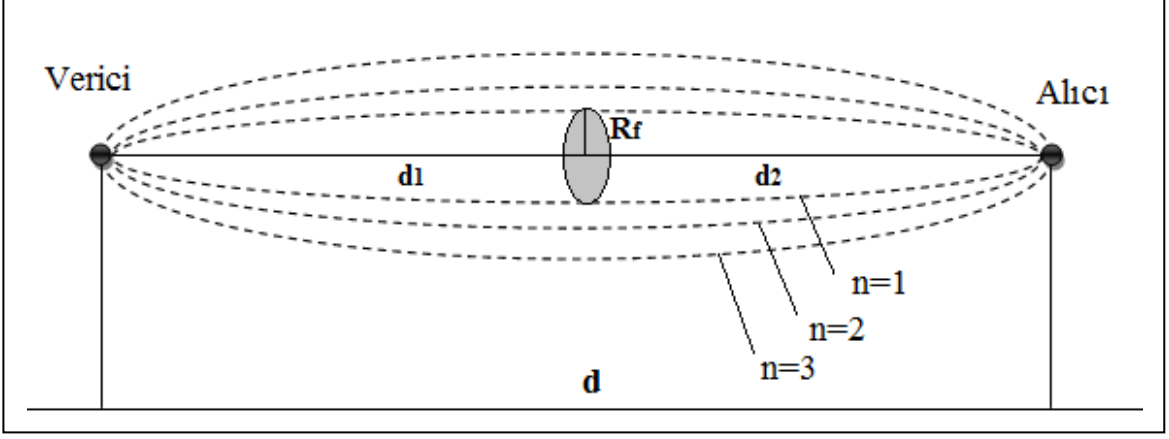
Şekil 1.7. Anten bölgeleri [12].

1.7.2. Fresnel Bölgesi Elipsleri

Şekil 1.8'de verici ile alıcı arasındaki direk yol ile ilk üç Fresnel bölgesi elipsleri gösterilmektedir. Alıcı ile verici arası direk yol uzunluğu d olarak alındığında oluşan her bir elips direk yoldan $n \cdot (\lambda/2)$ kadar daha uzundur (n bir tamsayı). En içteki daire $n = 1$ durumunu göstermektedir ve yol uzunluğu direk yoldan $\lambda/2$ kadar daha fazladır. $n = 2$ için λ ve $n = 3$ için $3\lambda/2$ 'dir. Yarım dalga boyunun bir tam sayı katı olan noktaların geometrik yeri Şekil 1.8'de gösterilen elipsleri oluşturmaktadır. $n = 1$ ile tanımlanan elipsin meydana getirdiği hacim birinci Fresnel bölgesi olarak adlandırılır. $n = 2$ ile belirlenen elipsin meydana getirdiği hacim ise ikinci Fresnel bölgesi olarak adlandırılır.

Art arda gelen Fresnel bölgelerinin alma noktasında alan şiddetine katkısı zıt fazlı olmaya yönelir ve birbirinin etkisini artırmak yerine yok etme yönünde girişim yaparlar. Eğer alıcı ile verici arasında bir noktaya engelleyici bir ekran yerleştirilirse ve ekranın tepesi direk görüş hattının (d) oldukça altında olursa çok az bir etki olur. Ekranın yüksekliği arttıkça alan şiddeti salınıma başlar ve böylece görüş hattının altında daha çok Fresnel bölgesini engeller. Engelleyici ekran alıcı ile verici arasındaki direk doğrultuya gelinceye kadar salınımın genliği artar, tam bu noktada alan şiddeti engel yokken ki

değerinin tam yarısı olur, yani kayıp 6 dB'dir. Yükseklik bu değer üstünde artmaya devam ettikçe salınım kesilir ve alan şiddeti düzgün bir şekilde azalır [12].



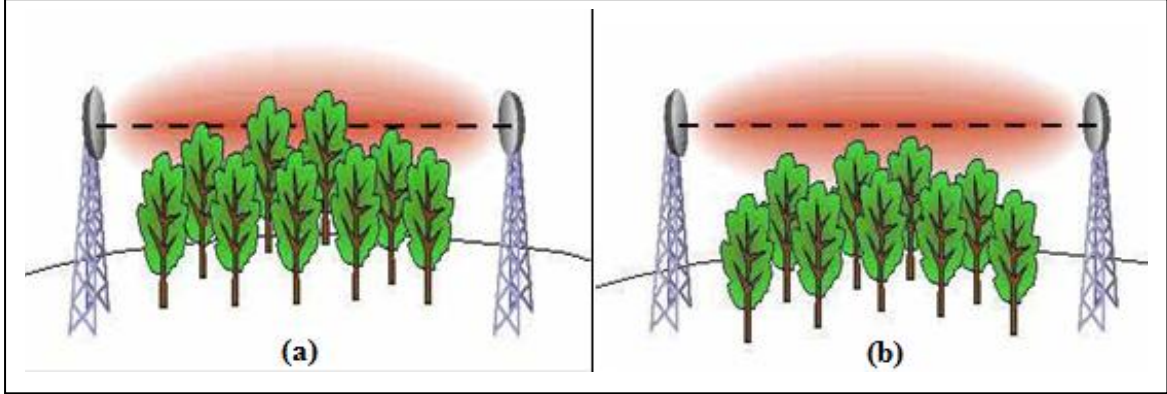
Şekil 1.8. İlk üç Fresnel bölgesi elipsleri [12].

Fresnel bölgesi elektromanyetik dalga yayılımında oldukça önemli bir konudur. Fresnel bölgesi uzunlamasına bir elips oluştururken kesiti daire şeklindedir. Bu daire kesitinin yarıçapı verici ve alıcı antenlerin bu kesite olan uzaklığının bir fonksiyondur. Daire kesiti alıcı ile verici arasındaki uzaklığın tam ortasında en büyük değerini alır. İlk Fresnel bölgesinin önemli olmasının nedeni sinyalin neredeyse tamamının bu alan üzerinden aktarılıyor olmasıdır. İlk Fresnel bölgesi yarıçapı denklem 1.2 yardımıyla hesaplanır. Denklemde d_1 ve d_2 sırasıyla alıcı ve vericinin dairesel kesite uzaklıklarıdır.

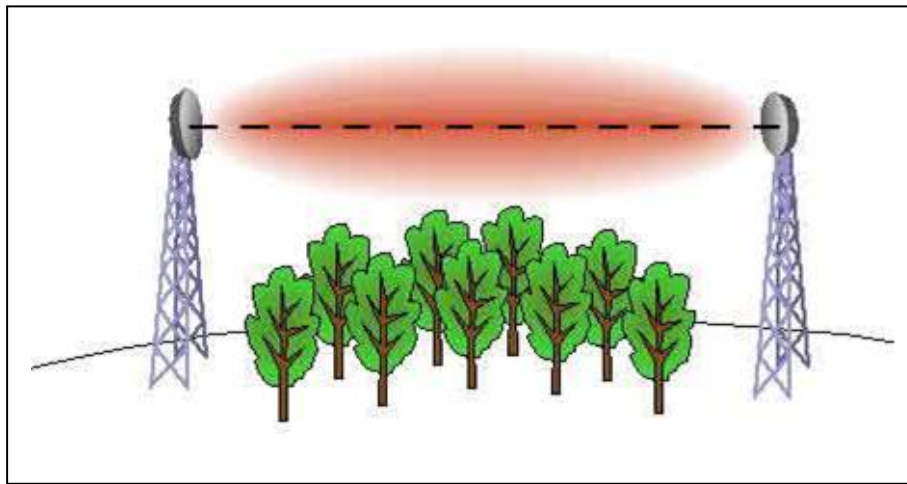
$$R_f(m) = 17,3 \sqrt{\frac{d_{1km}d_{2km}}{d_{km}f_{GHz}}} \quad (1.2)$$

Şekil 1.9'da hatalı yerleştirilmiş radyo bağlantıları gösterilmiştir. Şekil 1.9 (a)'da antenler arası görüş mevcut değildir ve radyo bağlantısı çalışmaz. Şekil 1.9 (b)'de ise ilk Fresnel bölgesinde bulunan engellerin varlığı radyo bağlantısının düzgün bir şekilde çalışmasını engeller. Radyo bağlantısının doğru kurulduğu ve sistemin düzgün çalıştığı durum Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Pratikte ilk Fresnel bölgesinin %60'ında hiçbir engel bulunmaması oldukça az bir güç kaybı meydana gelmesini garantiler [31]. Dört farklı frekans için ilk Fresnel bölgesi elipslerinin tam orta noktasında oluşan dairesel kesit yarıçaplarının %60'ı

hesaplanarak Tablo 1.2’de verilmiştir. Tablo 1.2’de görüldüğü gibi frekans değeri küçüldükçe yarıçap artmaktadır.



Şekil 1.9. (a) ve (b) Hatalı yerleştirilmiş radyo bağlantıları [31].



Şekil 1.10. Doğru yerleştirilmiş radyo bağlantısı [31].

Tablo 1.2. İlk Fresnel bölgesi yarıçapının frekansa ve uzaklığa bağlı değişimi

Radyo bağlantı Uzunluğu [km]	İlk Fresnel bölgesi yarıçapının %60'ı ($0,6 R_f$ [m])			
	900 MHz	1800 MHz	2.4 GHz	5 GHz
0,1	1,7	1,2	1,1	0,7
0,2	2,4	1,7	1,5	1,0
0,5	3,9	2,7	2,4	1,6

1.7.3. Polarizasyon

Polarizasyon kısaca elektromanyetik dalganın bir bileşeni olan elektrik alan vektörünün salınım yaptığı yön olarak tanımlanır. Antenin yaydığı elektromanyetik dalgalar için iletim boyunca elektrik alan eğer zemine dik ise düşey, paralel ise yatay polarizasyonlu dalga adını alır. Elektromanyetik dalganın polarizasyonunu etkilediğinden dolayı antenin uzaydaki konumu önemlidir. Verici anten yere yakın olduğunda, düşey polarizeli dalga yeryüzü boyunca daha güçlü bir işaret şiddeti sağlar. Anten yerden oldukça yükseğe yeryüzünde mümkün olan en büyük işaret şiddetini elde edebilmek için yatay polarizeli dalga kullanılmalıdır. Bu nedenle hareketli iletişim sistemi dikey polarizasyon tekniğini kullanırken, yayın sistemi yatay polarizasyon tekniğini kullanır [13].

1.7.4. Yarı Güç Hüzme Genişliği

Anten yarı güç hüzme genişliği (YGHG), yöneltiliği olan antenlerde yöneltiliğin bir ölçüsüdür. Yarı güç hüzme genişliği yatay ve düşey diyagramda ışınlanan sinyalin ana ışınma doğrultusundaki güç değerinin yarıya düştüğü ya da genlik değerinin $1/\sqrt{2}$ katına indiği noktalar olarak tanımlanır. Bu noktalar 3dB noktaları olarak ifade edilir.

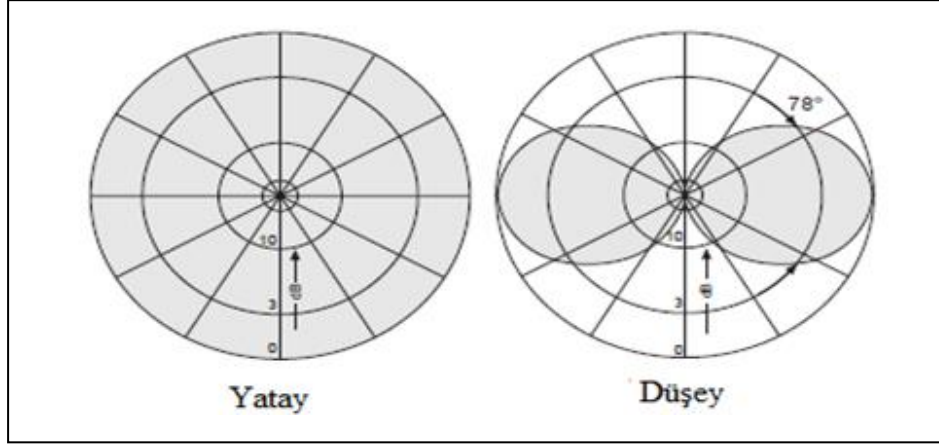
1.7.5. Yönsemesiz Antenler

Yönsemesiz antenler tüm çevresini düzgün olarak kapsayan ışınma paternine sahiptirler. Kazanç, yatay hüzme genişliğini azaltan fakat düşey paterni etkilemeyen kolineer düşey dizi oluşturularak elde edilir.

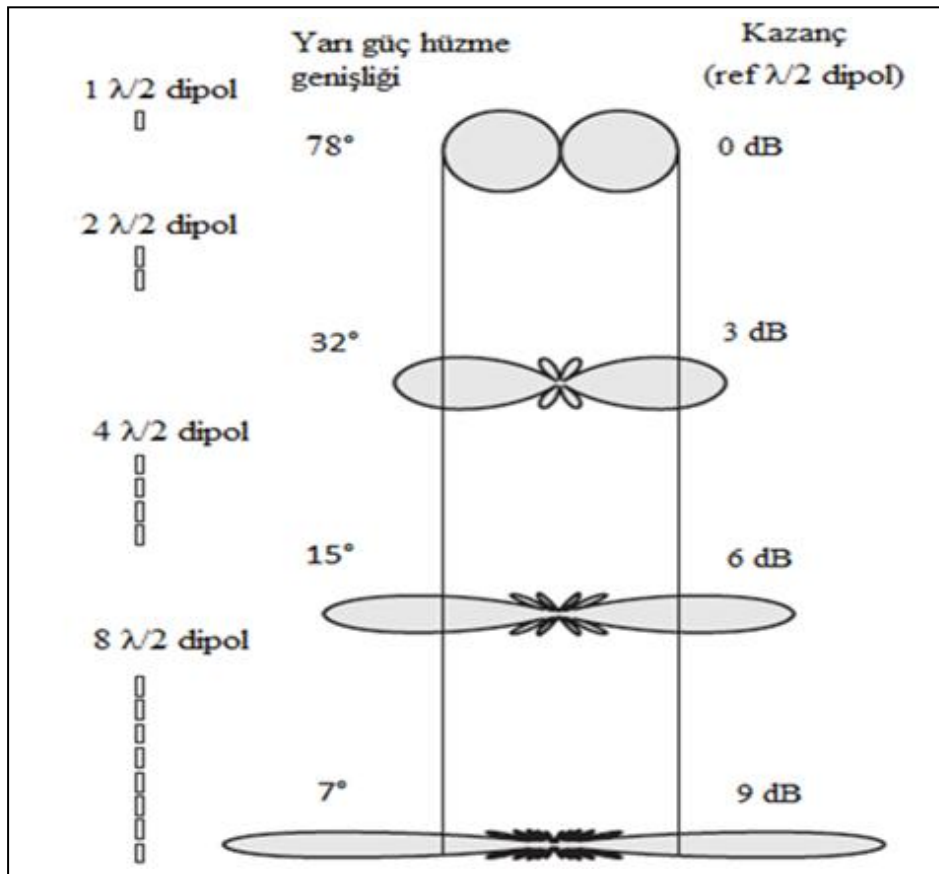
$\lambda/2$ dipol anten Şekil 1.11'deki gibi başından sonuna tüm azimut doğrultusunda yani yatayda aynı gücü yayar. Düşey yarı güç hüzme genişliği 78 derecedir. Görüldüğü gibi geniş oranda bir enerji aşağı ve yukarı yönde yayılmaktadır. Sonuç olarak büyük bir miktar güç yatay düzlemde kaybolmaktadır.

Şekil 1.12' da görüldüğü gibi dikey olarak istiflenmiş dipoller yerleştirilerek yarı güç hüzme genişliği azaltılabilir. Sonuç olarak yatay düzlemde ışınlanan güç artmış olur. Dipollerin sayısını iki katına çıkarmak kazancın 3 dB kadar artmasına neden olmaktadır.

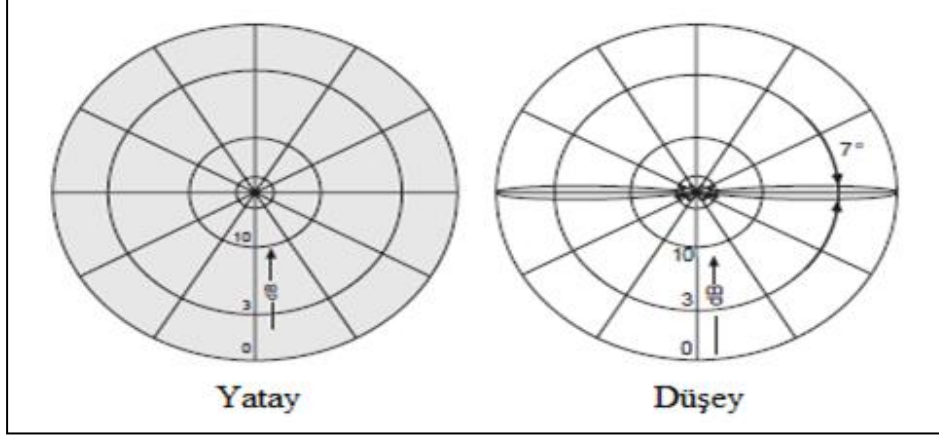
Şekil 1.13'te ortak fiber cam tüpün içine istiflenmiş birçok dipole sahip GSM-Kazanç anteninin örnek ışımaya diyagramı gösterilmektedir [14].



Şekil 1.11. $\lambda/2$ dipolün alan şiddetine bağlı ışımaya diyagramları [14].



Şekil 1.12. Düşey hüzme oluşturma yoluyla kazanç elde edilmesi [14].



Şekil 1.13. $\lambda/2$ dipol ilavesiyle kazancı arttırılmış antenin ışıma diyagramları [14].

1.7.6. Yöneltilimli Antenler

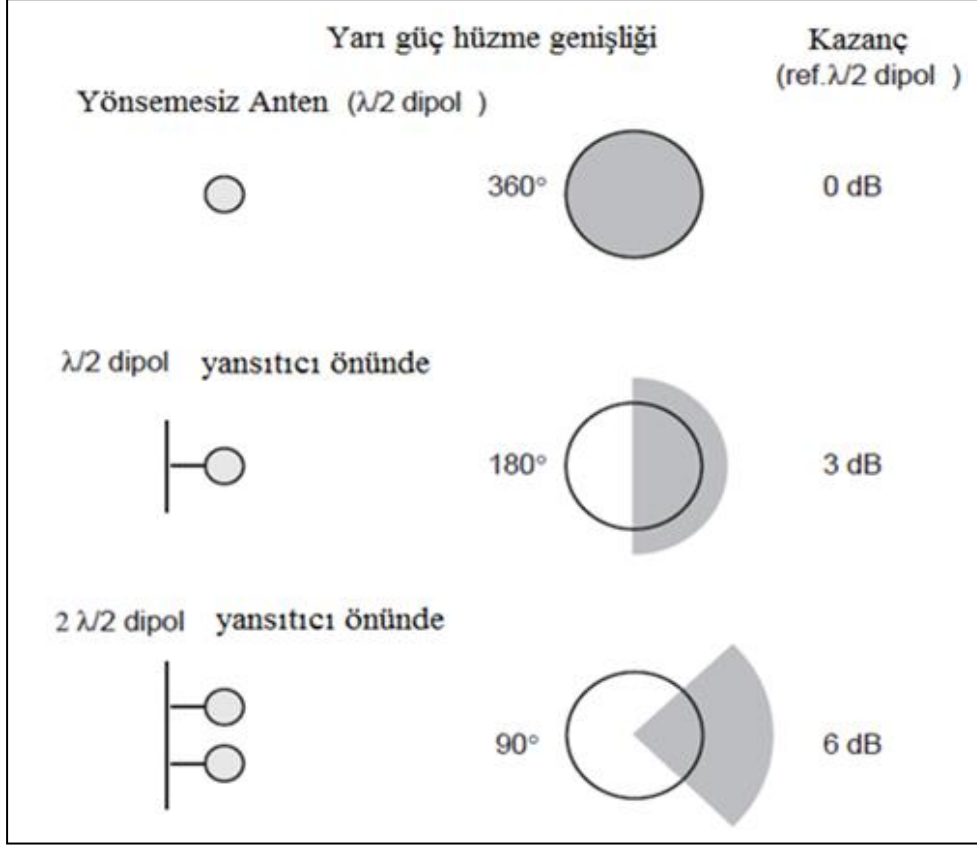
Yöneltilimli antenler, uygun yönsemez antenle elde edilebilecek kazançtan daha fazlasına (>7 dBi) ihtiyaç duyulan iletişim sistemlerinde kullanılır. Yöneltilimli antenler yüksek kazançta ihtiyaç duyulan uzak alanlar için uygundur. Bu tür antenler hücrelerde ve mikro hücre uygulamalarında coğrafik bölgeyi sektörlere bölmek için kullanılır. Sektörlere bölme işlemi sistemdeki girişimi azaltırken servis verilebilecek kullanıcı sayısının da artmasını sağlar [15].

Burada kazanç yatay düzlemde hüzme oluşturarak elde edilebilir. Mevcut enerjiyi yarım dairelik (180°) alanda ışıtarak 3dB kazanç elde edilebilir, çeyrek dairelik (90°) alanda ışıtarak 6dB kazanç elde edilebilir. Şekil 1.14'te bu durumu ifade eden patern şekilleri teoriktir çünkü gerçekte yöneltilimli antenler bu kadar keskin köşe noktaları üretemezler.

1.7.7. Anten Faktörü

Anten faktörü elektrik alan şiddetinin (E) antende oluşan gerilime (V) oranı olarak tanımlanır ($AF = E/V$). Anten faktörü tanımı genellikle alıcı antenlerde uygulama açısından anlamlı bir ifade sunmaktadır. Ele alınan bir elektrik alan şiddeti ölçü aleti ve ona bağlı bir alıcı anten ile ortamdaki elektrik alan değeri ölçülmektedir. Bir çubuk anten, bunun uçlarına değişik konektörlerle bağlanmış bir koaksiyel kablo, bu kablonun bir başka konektörle alıcı girişine bağlanmasının tüm etkileri anten faktörü tanımının içinde yer

almaktadır. Kullanılan kablonun üzerindeki imalat hataları, ezilmeler veya bükülmeler anten faktörünü doğrudan değiştirmektedir. Bu nedenle ölçme sonucu elde edilen elektrik alan şiddeti değerinden alınan gücü hesaplamak için anten faktörü oldukça önemli bir parametredir.



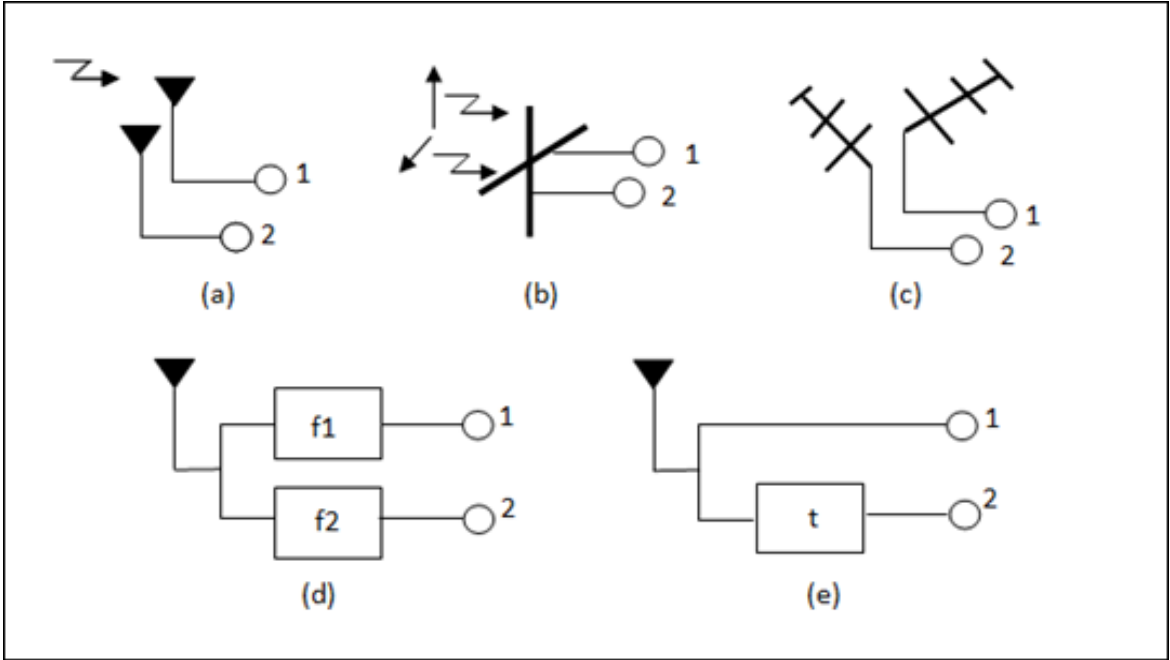
Şekil 1.14. Yatay hüzme oluşturarak kazanç elde edilmesi [14].

1.8. Çeşitleme

Çok yollu kanallar üzerinden alıcıda elde edilen işaretler derin sönümlenmelere neden olabilmekte ve bundan dolayı alıcıda hata miktarı aşırı derecede artabilmektedir. Sönümlenmeli çok yollu kanallarda hata olasılığını azaltmak için çeşitleme yöntemi kullanılmaktadır. Aynı bilgiyi taşıyan işaretin birden çok kopyasını birbirinden bağımsız sönümlenmeli kanallar üzerinden gönderilirse işaretlerin hepsinin aynı anda sönümlenmeye uğrama olasılıkları önemli bir miktarda azalacaktır. Bundan dolayı çeşitleme tekniği mantıklı bir yaklaşımdır. Çeşitleme, telsiz iletişim kanallarında derin sönümlenmeleri

azaltmanın yanında iletim gücü gereksinimini azaltmakta önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle gezgin birimden baz istasyonuna iletişim için gezgin birimin pil sığasının sınırlı olduğunu düşünürsek çeşitlemenin önemi daha da iyi anlaşılmaktadır [16].

GSM sisteminde çeşitleme temel olarak hareketli aboneden baz istasyonuna gelen işaret seviyesinin artırılması için kullanılır. Yukarı bağlantı yönündeki sorun hareketli abonenin düşük güçte çalışması ve kısa bir antene sahip olmasıdır. Çeşitleme baz istasyonunun alım bölümünde uygulanır. İletilen işaretin alıcıya direk yoldan ulaşması çoğunlukla mümkün olmayan bir durumdur. Alınan işaret genellikle direk ve yansıyan elektromanyetik dalgaların birleşimidir. Yansıyan dalgalar faz ve polarizasyon olarak ta değişmektedir. Bunun sonucunda belli bölgelerde işaretle bir artış ya da bazen tamamıyla yok oluş meydana gelebilir. Alınan elektrik alan şiddet değeri birkaç metrede 20-30 dB arasında değişebilir. Kanyon şeklindeki sokaklarda da genellikle yansıyan dalgalar sayesinde iletişim sağlanmaktadır. Şekil 1.15'te haberleşmede kullanılan belli çeşitleme yöntemleri gösterilmektedir [17].

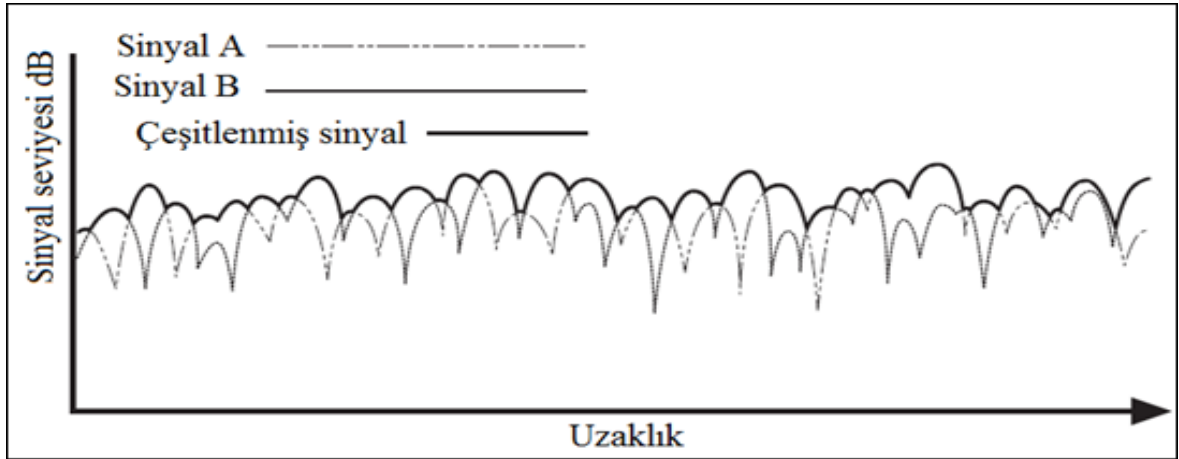


Şekil 1.15. Çeşitleme yöntemleri: (a) uzay (anten) çeşitleme, (b) polarizasyon çeşitleme, (c) anten patern çeşitleme, (d) frekans çeşitleme, (e) zaman çeşitleme [17].

1.8.1. Uzak Çeşitleme

Uzak çeşitleme, hücre radyo şebekelerinde ve GSM sistemlerinde kullanılan en yaygın teknik olmasının yanında ek frekans spektrumu gerektirmeyen bir tekniktir. Bu sistem belli aralıkla yerleştirilmiş iki alıcı antenden oluşur. Baz istasyonları için anten kazancı yaklaşık 10dB ve üzeridir, bundan dolayı iki anten arasındaki karşılıklı girişimi azaltmak için antenlerin 10-20 dalga boyundan fazla aralıklarda yerleştirilmeleri gerekmektedir [17]. Bu antenlerin alan şiddet profilleri birbirinden tamamiyle farklıdır.

İdealde bir antenin minimumunu diğer antenin maksimumu Şekil 1.16'daki gibi karşılayacaktır. Uzak çeşitlemede iki düşey polarize anten alıcı olarak kullanılır ve karşılaştırma yapılarak yüksek seviyeli işaret alınır. Bu yöntem ile ortalama sinyal seviyesini arttırmak çeşitleme kazancı olarak adlandırılır.



Şekil 1.16. Çeşitleme yöntemiyle sinyal seviyesinin arttırılması [14].

1.8.2. Polarizasyon Çeşitleme

Kentsel alanlarda meydana gelen yansımaların hepsi aynı polarizasyona sahip olmaz, yatay bileşenlerde mevcut olabilir. Ayrıca bir hareketli telefon hiçbir zaman tam olarak dik konumda yukarı yönde durmaz yani yatayda ve düşeyde polarizasyonlar mümkündür. Bu nedenle bu sinyallerinde kullanılması gerekmektedir. Polarizasyon çeşitleme dikey olarak polarizeli iki adet anten kullanır ve sonuçta oluşan işaretleri karşılaştırarak büyük olanı alır. Polarizasyon çeşitleme daha az anten yerine ihtiyaç duyduğundan şehir içi planlamalarda tercih edilmektedir.

1.9. Yayılım Kaybı Tahmin Modelleri

Yayılım kaybı tahmin modelleri, frekansın yeniden kullanımı ve iletim gücü gibi ana sistem parametrelerini önceden belirleyerek hücrenel hareketli radyo iletişim tasarımında oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Bazı modeller ölçüm bilgilerine dayalı istatistiksel usullerle elde edilmişken, diğerleri kırınım etkilerini dikkate alarak analitik yolla elde edilmiştir. Her iki tür modelde makul bir tahmin elde edebilmek için belli parametreler kullanır. Örneğin, nispeten uzak mesafeler için tahmin üreten modeller (makro hücrenel sistemler için) frekans, baz istasyonu ve hareketli alıcı anten yüksekliği gibi parametreleri kullanırken, kısa mesafeler için tahmin üreten modeller (mikro hücrenel sistemler için) bina yüksekliği, sokak genişliği ve benzeri parametreleri kullanır. Hücre boyutları daha da küçüldüğünde doğru bir tahmin için ışın izleme gibi deterministik bir model gerekli olmaktadır. Sonuç olarak hareketli sistemleri tasarlarırken, hücrenin kapsama alanı için uygun tahmin modelini seçmek önemlidir.

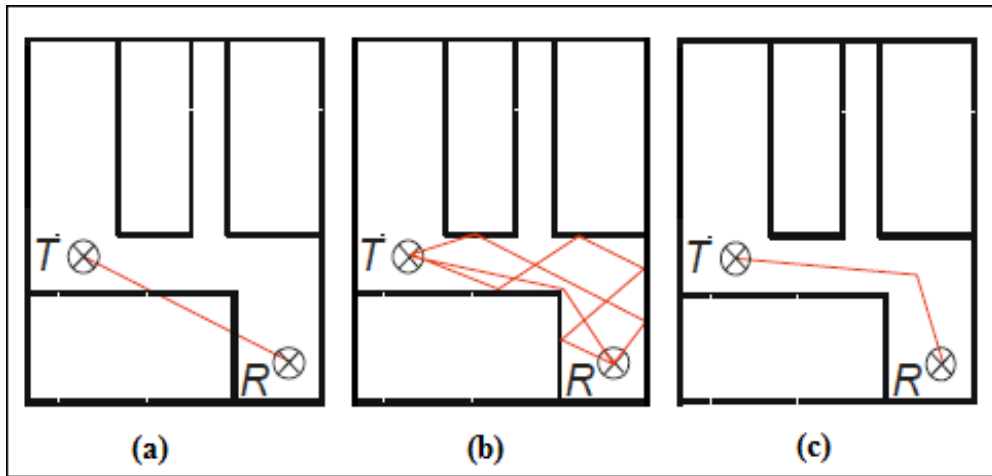
Okumura-Hata modeli tipik bir yayılım ortamında elde edilen alan ölçümlerine dayalı deneysel bir formülasyondur ve kısıtlamaları vardır. Uzaklık 1 km'den fazladır ve baz istasyonu yüksekliği çevredeki bina çatı seviyelerinden daha yüksektedir. Bu da modelin yalnızca makro hücrenel sistemler için uygun olduğunu göstermektedir. Bu gibi kısıtlamaların üstesinden gelmek ve yayılım mekanizmasını açıklayabilmek için analitik modeller öne sürülmüştür. Küçük alanlarda binaların etkisi daha belirgindir. Walfish-Bertoni modeli binaların etkisini de dikkate alarak bir model öne sürmüştür. Bu model 1 km den daha az mesafeleri de kapsamakta ve baz istasyonu seviyesinin bina seviyesinin altında olduğu durumu da değerlendirmektedir. Buda modelin mikro hücrenel sistemler için uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Fakat model, baz istasyonunun sokak lambası seviyesinde monte edildiği mikro hücrenel sokak ya da caddeye uygulandığında, tahmin hatasının oldukça büyük olduğu görülmektedir. Çünkü direk görüş hattı (LOS) kanyon sokak boyunca baz istasyonu ve mobil alıcı arasında oluşmakta ve model bu duruma uymamaktadır [18].

Kanyon sokak yayılımı serbest uzay yayılımından farklıdır. Ölçümler göstermiştir ki baz istasyonuna yakın mesafelerde yayılım serbest uzay güç yasasını takip ederken, daha uzak mesafelerde 4'üncü dereceden ters orantılı güç yasasını takip etmektedir. Yol kaybı yasasının değiştiği uzaklığa da kırılma noktası mesafesi denilmektedir.

Yayılm kaybı tahmin modellerinin gelişimi gösteriyor ki bina ve caddeler ile ilgili bilgiler tahmin için gereklidir ve alıcı ile verici arasındaki geometrik yol doğru bir tahmin için dikkate alınmalıdır. Işın izleme yöntemi bina içi gibi piko hücrese küçük alanlar için nispeten doğru yaklaşımlar öne sürmektedir. Işın izleme yönteminde, ışınlar vericiden yayılmaya başlar; direk olarak, duvarlardan yansıyarak ve bina köşelerinden kırınımına uğrayarak alıcıya ulaşır. Alan şiddeti alıcıya ulaşan bütün ışınların elektrik alanlarının toplanmasıyla hesaplanır. Sonuç olarak bu yöntem geniş bir alanda ya da üç boyutlu yayılım çevresinde uygulandığında hesaplama zamanı, artan ışın sayısı ile üstel olarak artacaktır. Birçok ışının hesaba katılması hem zor hem de zaman alıcı olmaktadır. Bu nedenle bu tür bir yöntem genellikle piko hücrese küçük alanlar için uygundur [18].

1.9.1. Yayılm Kaybı Hesaplama Yöntemleri

Alıcı anten tarafından alınan işaret seviyesinin belirlenmesinde üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Şekil 1.17’de bu yöntemler arasındaki fark gösterilmektedir. Yol kaybı deneysel modeller ile hesaplandığında çok fazla detaylı bilgiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Hesaplarda binaların ortalama yüksekliği ve kentsel alanların tipi yeterli olmaktadır. Diğer bir yandan deneysel modeller (örn. COST 231) çatı üzerinden yayılım gibi belli bir duruma adanmış yayılım etkilerine dayanmaktadır. Deneysel modellerde hesaplama süresinin çok kısa olmasına rağmen doğruluk çok yüksek olmamaktadır.



Şekil 1.17. Farklı yayılım modellerinin karşılaştırılması: (a) deneysel modeller, (b) ışın izleme modelleri, (c) baskın yol modelleri [19].

Işın izleme modellerine deterministik modellerde denilmektedir. Işın izleme modelleri vericiden alıcıya farklı yollardan gelen dalgaların çevredeki engellerden, binaların kenarlarından yansıma, kırınım ve saçılımı hesaba katmaktadır. Bu nedenle hesaplama oldukça zaman alıcıdır. Bunun yanında ışın izleme modeli hassas ve doğru vektörel bilgiye ihtiyaç duyduğundan giriş parametrelerini bulmak daha zordur. Tipik yayılım senaryolarının incelenmesi göstermiştir ki çoğu durumda tek bir yayılım yolu tüm enerjinin %90'ına kadar katkı sağlamaktadır. Yani enerjinin büyük bir kısmını dağıtan en önemli yol dikkate alınmaktadır. Baskın yol modeli verici ile alıcı arasındaki bu baskın yolu tanımlamaktadır. Bu yolla hesaplama zamanı ışın izlemeye göre çok daha azdır ve doğruluk nerdeyse ışın izlemeyle eşdeğerdir. Deneysel modeller (örn. COST 231) Şekil 1.17 (a)'daki gibi yalnızca verici ile alıcı arasındaki direk yolu hesaba katmaktadır. Işın izleme modeli birçok yolu hesaba katmaktadır. Baskın yol modeli ise sadece en olası ilgili yolu dikkate alır. Baskın yol modelinin ışın izleme modeline göre doğru vektörel bilgiye bağımlılığı daha azdır [19].

1.9.2. Serbest Uzay Yayılım Modeli

Yayılım modellerinin en geneli ve temeli serbest uzay yayılım modelidir. Bu modelde dalganın boşlukta yayıldığı ve yayılım yolunu etkileyecek hiçbir engel olmadığı varsayılmıştır. Bu model genellikle uydu haberleşmesindeki hesaplamalarda kullanılmakta ve kabaca tahmin yapılmaktadır.

Serbest uzayda verici ile alıcı anten güçleri P_t ve P_r , kazançları G_t , G_r ve verici antenden uzaklık (d) mesafesi arasındaki bağıntı denklem (1.3) ile ifade edilir.

$$10\log\frac{P_t}{P_r} = -10\log\left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}\right] \quad (1.3)$$

$$10\log\frac{P_t}{P_r} = 10\log\left[\frac{4\pi d}{\lambda}\right]^2 - 10\log G_t - 10\log G_r \quad (1.4)$$

Uzaklık (d) km, frekans (f) MHz cinsinden alınıp antenlerin izotropik olduğu varsayılırsa ($G_t = G_r = 1$) en sık kullanılan hali ile serbest uzay yol kaybı formülü denklem (1.5)'teki gibi elde edilir.

$$L_F = 32.44 + 20 \log(f_{\text{MHz}}) + 20 \log(d_{\text{km}}) \quad (1.5)$$

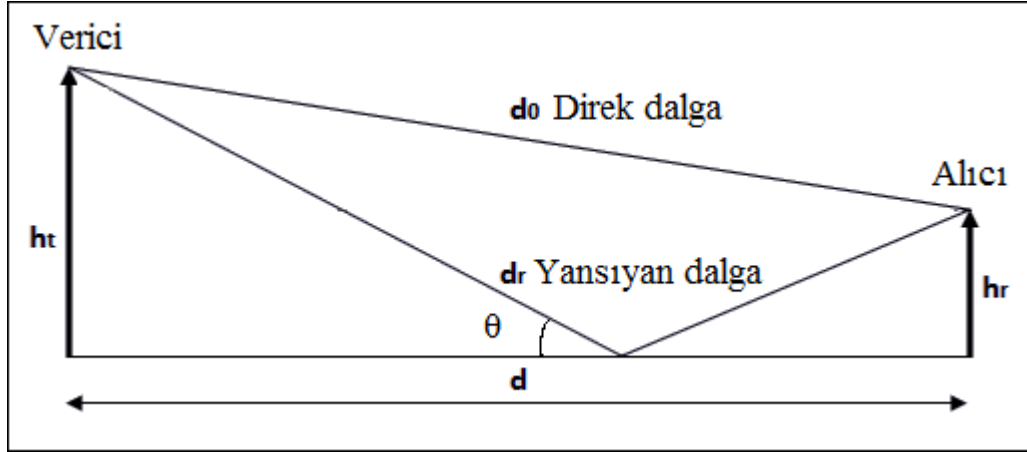
Formülden de görüldüğü gibi serbest uzay yayılım yol kaybı sadece alıcı ile verici arasındaki uzaklığa ve frekansa bağlıdır.

1.9.3. İki Işın Modeli

Serbest uzay yayılım modelindeki gibi iki ışınlı modelde de alıcı ile verici anten arasında her hangi bir engel olmadığı varsayılmaktadır. İki ışın modeli alıcı ve verici anten arası yer yüzeyi düz kabul edilebilecek yerlerde ve anten yükseklikleri aradaki uzaklıkla karşılaştırıldığında daha küçük olduğu durumlarda uygulanmaktadır. İki ışın modeli Şekil 1.18'deki gibi alıcıya direk ve yerden yansıyan dalgaların ulaştığını varsayar [20].

Alıcı antende alınan toplam alan şiddeti direk ve yerden yansıyan dalgaların toplamı E_t olarak ifade edilir.

$$E_t = [1 + \Gamma e^{-j\Delta\theta}]E_0 \quad (1.6)$$



Şekil 1.18. İki ışın modeli

Geliş açısının çok küçük olduğu kabul edilerek yansıma katsayısı $\Gamma = -1$ olarak alınabilir.

$$E_t = [1 - \cos\Delta\theta + j\sin\Delta\theta]E_0 \quad (1.7)$$

İfadenin genliği alınırsa eşitlik aşağıdaki gibi elde edilir:

$$|E_t| = 2|E_0| \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (1.8)$$

Burada $\Delta\theta$ faz farkıdır ve denklem 1.9 ile ifade edilmiştir.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} (d_r - d_0) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= d_r - d_0 = \sqrt{d^2 + (h_r + h_t)^2} - \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} \\ &= d \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t + h_r}{d} \right)^2 \right\} - d \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t - h_r}{d} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (1.10)$$

$d \gg h_t + h_r$ olarak alınır ve Taylor serisine açılırsa yol farkı Δd yaklaşık olarak denklem 1.11'deki gibi elde edilir.

$$\Delta d \cong \frac{2h_t h_r}{d} \quad (1.11)$$

Buna göre $\Delta\theta$,

$$\Delta\theta \cong \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \quad (1.12)$$

yaklaşık değerine eşit olmaktadır. Elde edilen faz farkı toplam alan şiddeti formülüne yerleştirilir.

$$|E_t| = 2|E_0| \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right) \quad (1.13)$$

Alınan güç P_r , E_t^2 ile orantılı olarak denklem 1.14'teki gibi tekrar yazılır.

$$P_r \approx P_t \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 G_t G_r 4 \sin^2 \left[\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right] \quad (1.14)$$

$\Delta\theta \ll 1$ radyan alınırsa $\sin^2 \Delta\theta = \Delta\theta^2$ olarak hesaplanabilir. Buradan antenler izotropik alınarak yol kaybı ifadesi hesaplanır. $\sin^2 \Delta\theta = \Delta\theta^2$

$$P_r \approx P_t \left[\frac{h_t h_r}{d^2} \right]^2 \quad (1.15)$$

$$L_{2-ışın} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 40 \log d - 20 \log h_t - 20 \log h_r \quad (1.16)$$

İki ışın modelinde yayılım yol kaybının frekanstan bağımsız olduğunu yalnızca uzaklığa ve alıcı verici yüksekliklerine bağlı olduğu görülmektedir.

$\Delta\theta \ll 1$ radyan yaklaşımıyla elde edilen iki ışın modeli bu yaklaşımdan dolayı büyük hücrelerde daha doğru sonuçlar vermektedir. Faz farkı ancak 1 km mesafeden daha büyük değerlerde bu koşulu sağladığından yaklaşımla elde edilmiş formül küçük hücreler için doğru sonuç vermeyecektir.

1.9.4. Kırılma Noktası

Genellikle mikro hücrelerin yayılım kaybı LOS yayılımına bağlıdır ve yayılım kaybının hızlıca değiştiği bir kırılma noktası olduğu varsayılır. Kırılma noktası, direk dalga ve yerden yansıyan ikinci dalganın alıcıya ulaştığını varsayan iki ışın modeliyle açıklanabilir. Yol farkı Δd yarım dalga boyundan daha fazla olduğunda yayılım kaybı hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Faz farkı π ye eşit değere geldiğinden yerden yansıyan dalga direk dalgayı sönmölmektedir [17].

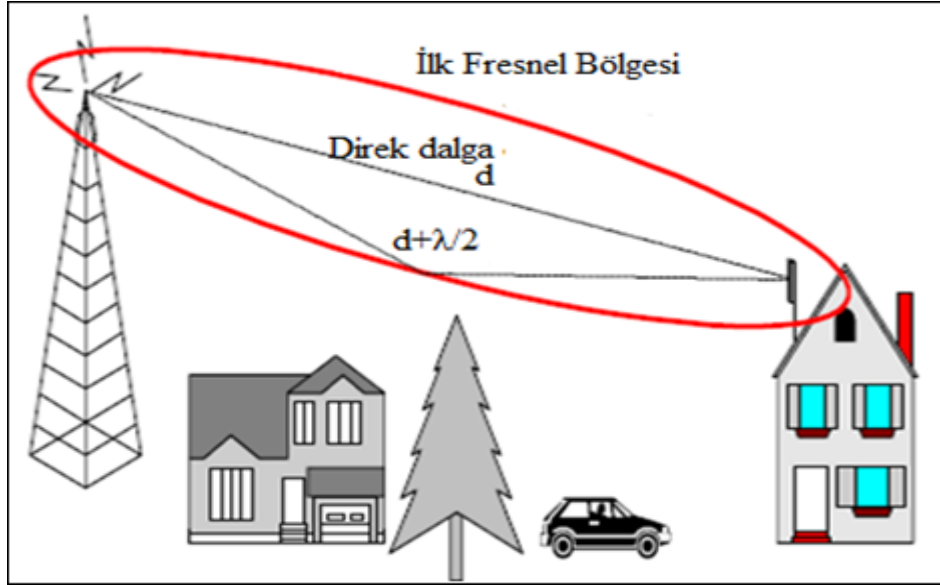
Kırılma noktası başka bir ifadeyle yerin ya da diğer objelerin ilk Fresnel bölgesine engel teşkil ettiği uzaklık olarak tanımlanır. Bu kırılma noktası mesafesinden daha az mesafelerde yani ilk Fresnel bölgesi açıklığında, yayılım kaybı, direk ve yansıyan dalganın vektör ekleme çıkarma ve dalga cephesinin (serbest uzay yayılımı) küresel dağılma kaybıdır. Kırılma noktası mesafesinden daha uzak mesafelerde yayılım kaybı daha fazla artış göstermektedir [11].

İlk Fresnel bölgesi açıklığının yansıyan dalganın direk dalgadan $\lambda/2$ kadar uzun olduğu bölgede olduğu bilindiğine göre iki ışın modelinde elde edilen yol farkı değeri Δd , $\lambda/2$ ye eşitlenerek kırılma noktası d_k hesaplanır.

$$\Delta d \cong \frac{2h_t h_r}{d_k} = \frac{\lambda}{2} \quad (1.17)$$

$$d_k(m) \cong \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (1.18)$$

Vericiden alıcıya güç akışı ilk Fresnel bölgesinde yoğunlaşır. Dolayısıyla ilk Fresnel bölgesi engellenmemişse ya da yansıma kırılma gibi yayılım etkileri yoksa LOS modeli serbest uzay modeline yakınsar [21]. Fakat engellenme mevcutsa LOS modeli iki kısımdan oluşan bir modele dönüşür.



Şekil 1.19. İlk Fresnel bölgesi açıklığının gösterimi [21].

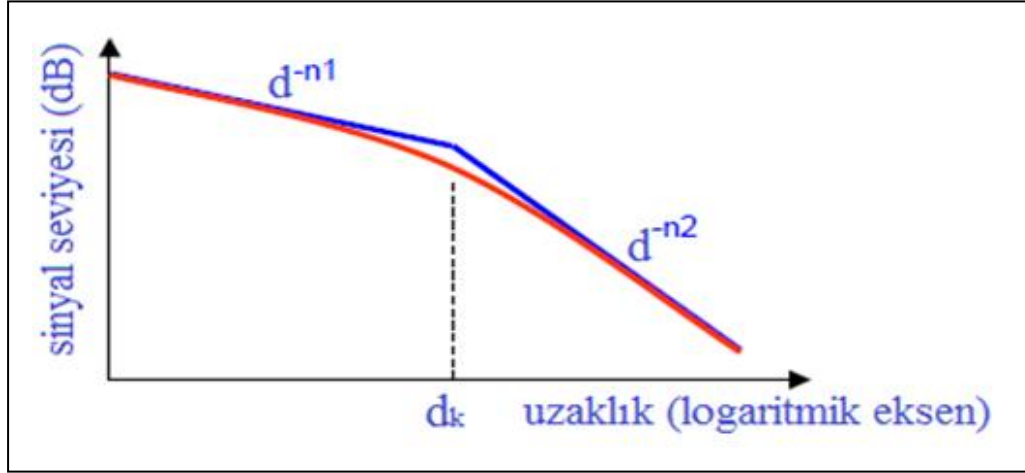
Ölçülen elektrik alanda büyük çaplı dalgalanmalara sebep olan bayılma olayı ve hücresel ortamların farklı özelliklere sahip olmasından dolayı kırılma noktasının pozisyonu her zaman formüldeki değere eşdeğer değildir. Mikro hücresel bir sokakta yapılan çalışmada 3 farklı frekans bandında alınan ölçümler sonucunda kırılma noktası

belirlenmeye çalışılmıştır ve elde edilen sonuçlardan kırılma noktası aşağıdaki gibi elde edilmiştir [17].

$$d_k(m) = \frac{1.9h_t h_r}{\lambda} \quad (1.19)$$

Elde edilen bu değerle kırılma noktası öncesi ve sonrası mesafelerde yayılım kaybı modeli iki farklı kısımdan elde edilmektedir. LOS bölgesindeki yayılım kaybı d mesafesiyle ters orantılı olarak değişmektedir. Kırılma noktası öncesi kayıp serbest uzay kaybına bağlıyken kırılma noktası sonrasında zayıflama $1/d^4$ oranıyla değişmekte ve artmaktadır. Kırılma noktası öncesi kayıp hesabı aşağıdaki şekilde ifade edilir, burada f MHz ve K kırılma noktası öncesi ($d < d_k$) sabiti ifade etmektedir [17].

$$L_{bb} = -20\log_{10}(d) - 20\log(f) + K \text{ dB} \quad (1.20)$$



Şekil 1.20. Sinyal seviyesinin kırılma noktasına bağlı değişimi [10].

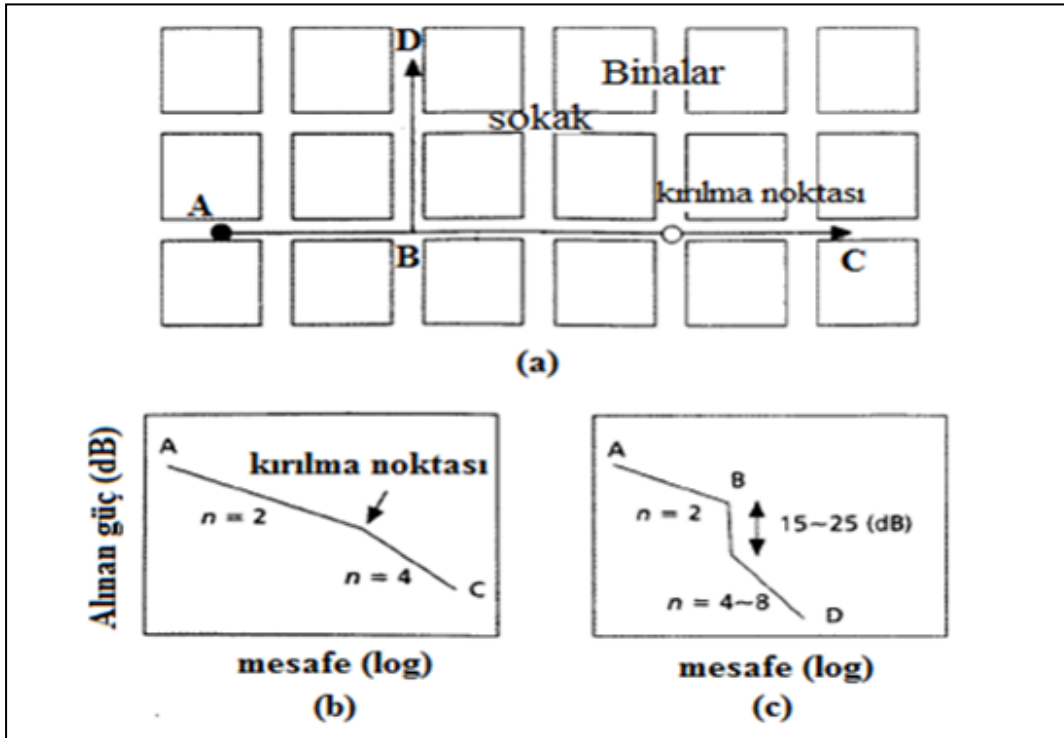
Kırılma noktası sonrasında ($d > d_k$) yol kaybı denklem 1.21 ile elde edilir.

$$\begin{aligned} L_{ba} &= -40 \log\left(\frac{d}{d_k}\right) + L_{bb} \\ &= -40 \log(d) + 20 \log(1.9h_t h_r) - 20 \log(c) + K \end{aligned} \quad (1.21)$$

1.10. Yoğun Kentsel Bölgelerde Mikro Hücrelerin Yayılım Koşulları

Küçük hücrelerde hücre boyutları küçüldüğünden baz istasyonlarının konumlandırılması da ortalama bina seviyesinden daha aşağıya, sokak lambası seviyelerine kadar inmektedir. Düşük anten seviyelerinde mesafe azaldığından yer ile anten arasındaki yakınlık güçlü bir etkileşim meydana getirmektedir. Dolayısıyla anten patern performansı antenin serbest uzaydaki paterninden oldukça farklı bir performans göstermektedir. Genellikle kentsel yoğun bölgelerde sokak ve caddelere konumlandırılmış baz istasyonları kırılma noktasına bağlı iki farklı kısımdan oluşan bir kayıp modeline sahiptir.

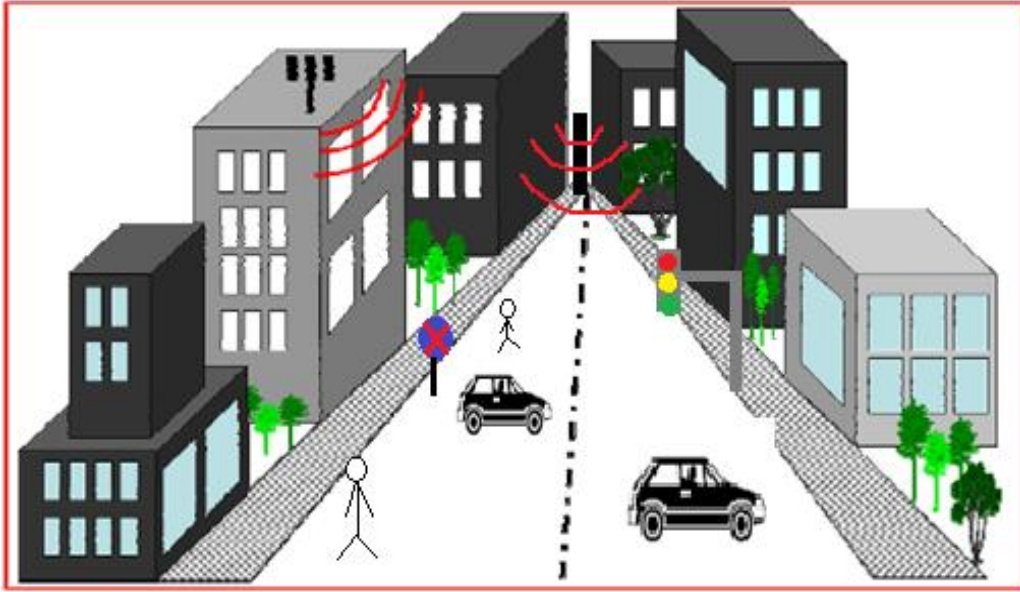
Şekil 1.21.(a)'da kentsel bir sokak görünümü ve bu sokakta oluşabilecek yayılım yolları gösterilmiştir. Şekil 1.21.(b)'de görüldüğü üzere verici A noktasından alıcı C noktasına kadar yol boyunca, kırılma noktasından önce yayılım $n = 2$ yol kaybı eğim faktörü ile azalırken kırılma noktasından sonra $n = 4$ ile azalmaktadır. Yani kırılma noktasından sonra kayıp daha hızlı bir artış göstermektedir [22].



Şekil 1.21. (a) İdeal kentsel sokak görünümü, (b) LOS durumu için tipik yol kaybı eğrisi, (c) NLOS durumu için tipik yol kaybı eğrisi [22].

Genellikle serbest uzay koşullarında kırılma noktasından önce $n = 2$ olarak alınır fakat gerçekte bu, sokak koşullarına göre daha fazla olabilmektedir. Şekil 1.21.(c)'de verici A noktasından alıcı D noktasına NLOS durumu için yayılım yol kaybı eğrisi gösterilmektedir. Şekilde de gösterildiği üzere kavşak B noktasında LOS dan NLOS koşuluna geçişte yaklaşık 15-20 dB bir kayıp yaşanmaktadır. Bu kayba köşeyi dönme kaybı da diyebiliriz. B noktasından D noktasına LOS durumu ortadan kalktığından dolayı zayıflama LOS durumunda çok daha fazla olacaktır. Genellikle bu koşullarda yol kaybı eğim faktörü $n = 4 - 8$ arasında değişmektedir.

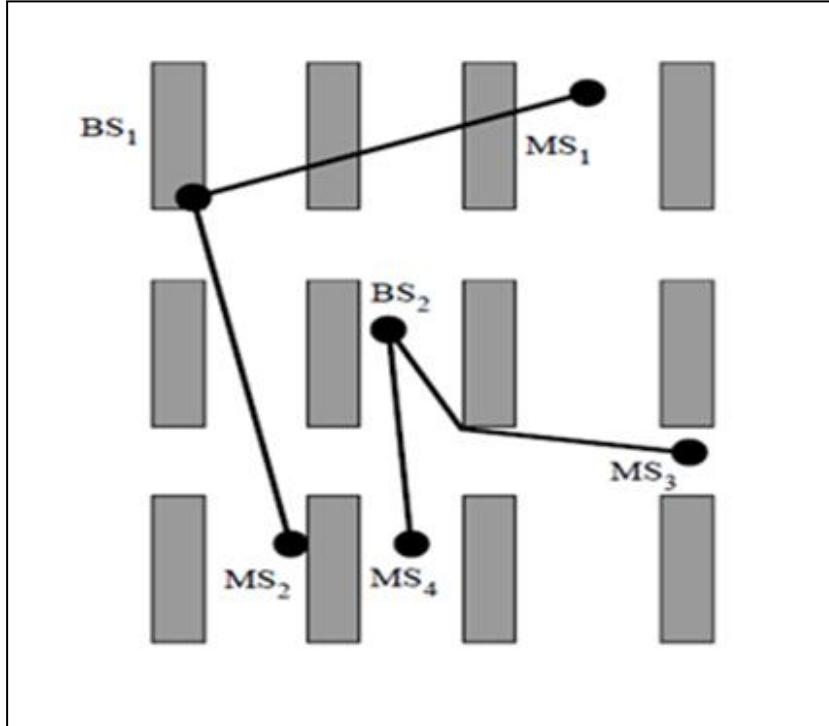
Kentsel hareketli yayılım kanalı karmaşık bir yapıdadır. Farklı yapı malzemesine ve düzensiz farklı şekillere sahip yoğun bina yapısı, farklı sokak şekilleri birçok hareketli ya da sabit araç ve yayalar, ağaç, tabela, trafik ışıkları gibi alan boyunca yayılmış birçok engel kentsel yayılım modelini daha karmaşık hale getirmektedir. Makro hücrelerde bina duvarlarından ve bina köşelerinden yansıma ile çatıdan saçılmalar baskın yayılım mekanizmasını oluşturmaktadır. Fakat bina seviyesinin altındaki küçük hücrelerde binaların dışında sokak lambaları, levhalar, trafik işaretleri vb saçıcılar yayılım mekanizmasında oldukça baskın bir rol oynamaktadır [23]. Çevredeki bu tür engellerin yanında baz istasyonu ve hareketli alıcı yüksekliği de yayılım yol kaybı değerini önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 1.22. Kent içi EM dalga yayılımı [24].

Binaların yoğun olarak yer kapladığı kentsel bölgelerde baz istasyonu (BS) ile mobil alıcı (MS) arasında genellikle dört durum oluşmaktadır. Baz istasyonu ve mobil alıcı geometrisinin bu dört farklı durumu Şekil 1.23'te gösterilmektedir.

Baz istasyonu BS_1 çatı üzerine yerleştirilmiştir ve yayın yaptığı hücre küçük makro hücredir. BS_1 ile MS_2 arasında direk görüş hattı vardır yayılım çatı üzerinden gerçekleşmektedir. BS_1 ile MS_1 arasında direk görüş hattı bulunmamaktadır ve yayılım bina üzerinden kırınımına uğrayan ışınlar yoluyla gerçekleşmektedir. Baz istasyonu BS_2 çatı seviyesinin altına yerleştirilmiştir ve yayın yaptığı hücre mikro ya da piko hücredir. Bu hücre tiplerinde, BS ile MS arasındaki yayılım temelde cadde ve sokak kanyonları boyunca oluşmaktadır. BS_2 ile MS_4 arasında direk görüş hattı varken, BS_2 ile MS_3 arasında direk görüş hattı bulunmamaktadır ve iletişim bina duvarlarından yansıyan ve kırılan dalgalar vasıtasıyla gerçekleşir. Bu şekilde bina boyutlarının baz istasyonundan çok daha yüksek olduğu mikro ve piko hücrelerde bina çatılarından kırınım söz konusu değildir [7].



Şekil 1.23. Kentsel alanda tipik yayılım koşulları [7].

1.11 Mikro Hücreler İçin Yayılım Yol Kaybı Tahmin Modelleri

1.11.1. ITU Tarafından Önerilen Modeller

ITU (International Telecommunication Union) tarafından UHF bandında yayın yapan küçük hücreler için önerilen modellerde kullanılan parametrelerin sınırları aşağıdaki gibidir:

- h_t (baz istasyonu anten yüksekliği): 4-50 metre
- h_r (mobil alıcı anten yüksekliği) : 1-3 metre
- f (frekans) : 800-2000 MHz
- d (antenden uzaklık) : 20-1000 metre

1.11.1.1. Kanyon Sokak için LOS durumu

Şekil 1.23’de kanyon sokak için LOS yayılım durumu BS₂–MS₄ arasında görülmektedir. UHF frekans aralığında, ITU-R P.341 tarafından tavsiye edilen, temel iletim kaybı, bir kırılma noktasına bağlı iki farklı türde karakterize edilir. Yol kaybı alt sınır ($L_{los,l}$) ve üst sınır ($L_{los,h}$) olmak üzere iki ayrı kısma ayrılır. Alt sınır ifadesinde yol kaybı hesaplanırken bina yüksekliklerinin etkisi göz önüne alınmayıp yalnızca uzaklık (d) ve dalga boyuna (λ) bağlı yaklaşım yapılmıştır. Üst sınır ifadesinde binaların etkisi de hesaba katılmıştır, bu nedenle üst sınır yol kaybı ifadesi kanyon sokak modeli için daha uygundur. Yaklaşık alt sınır ifadesi denklem 1.22 ile hesaplanır [7].

$$L_{los,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{d_k} \right) & d \leq d_k \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{d_k} \right) & d > d_k \end{cases} \quad (1.22)$$

d_k kırılma noktası mesafesi denklem 1.23’teki gibi alınır.

$$d_k = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (1.23)$$

Yaklaşık üst sınır ifadesi denklem 1.24 ile hesaplanır.

$$L_{\text{los,h}} = L_{\text{bp}} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{d_k} \right) & d \leq d_k \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{d_k} \right) & d > d_k \end{cases} \quad (1.24)$$

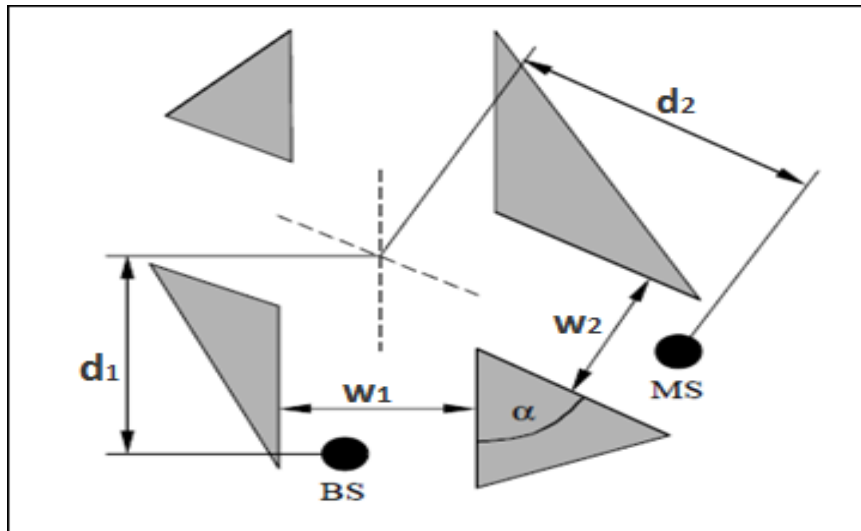
L_{bp} kırılma noktasındaki temel iletim kaybının değerini verir.

$$L_{\text{bp}} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_t h_r} \right) \right| \quad (1.25)$$

1.11.1.2. Kanyon Sokak İçin NLOS Durumu

Mikro hücreler için ITU tarafından öngörülen NLOS durumu Şekil 1.34'de gösterilmiştir (Şekil 1.33'te BS_2 - MS_3 arası). Bu durum için ilgili parametreler şöyledir:

- w_1 : BS in bulunduğu sokağın genişliği (m)
- w_2 : MS in bulunduğu sokağın genişliği (m)
- d_1 : Sokak kavşağı ile BS arası mesafe (m)
- d_2 : Sokak kavşağı ile MS arası mesafe (m)
- α : Köşe açısı (radyan)



Şekil 1.24. Kanyon sokak için ITU tarafından öngörülen NLOS durumu

Kanyon sokak için tanımlanan bu NLOS durumu, yüksek katlı binalarla çevrili kentsel bölgelerde oldukça baskındır ve kentsel düşük katlı çevrelerde mikro ve piko hücrelerde de sık sık meydana gelmektedir. Anten seviyelerinin çatı seviyesinden düşük olduğu bu koşullarda sokağın kavşak köşelerinden yansıyan ve kırınımına uğrayan dalgalar mutlaka dikkate alınmak zorundadır. NLOS durumunda toplam yol kaybı denklem 1.26 yardımıyla hesaplanır [7].

$$L_{nlos} = -10 \log_{10}(10^{L_r/10} + 10^{L_d/10}) \quad \text{dB} \quad (1.26)$$

L_r , yansımalarından dolayı oluşan yol kaybını verir ve denklem 1.27 ile hesaplanır.

$$L_r = -20 \log_{10}(d_1 + d_2) + d_1 \cdot d_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} - 20 \log_{10}\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda}\right) \quad \text{dB} \quad (1.27)$$

$f(\alpha)$, köşe açısına bağlı bir fonksiyondur ve açının radyan değerine göre denklem 1.28'deki gibi hesaplanır.

$$f(\alpha) = \begin{cases} -41 + 110\alpha & \alpha \leq 0.33 \\ -13.94 + 28\alpha & 0.33 < \alpha \leq 0.42 \\ -5.33 + 7.5\alpha & 0.42 < \alpha \leq 0.71 \\ 0 & \alpha > 0.71 \end{cases} \quad (1.28)$$

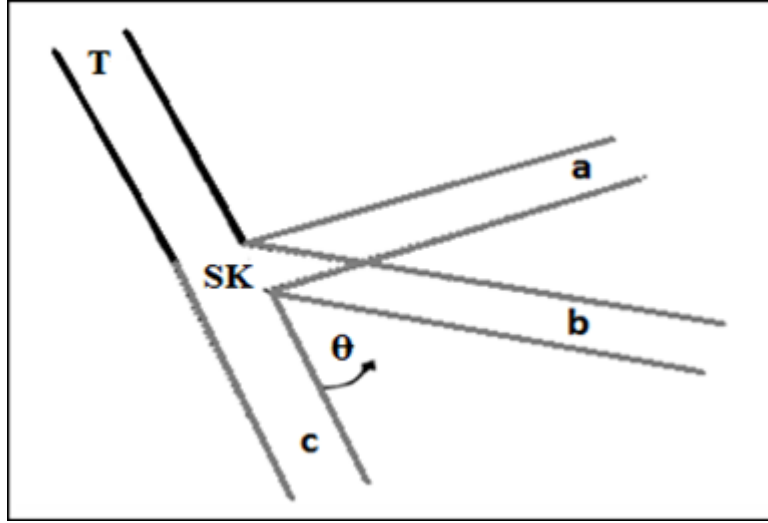
L_d , kırınımlardan dolayı oluşan yol kaybını verir ve denklem 1.29 ile hesaplanır.

$$L_d = -10 \log_{10}[d_1 \cdot d_2 (d_1 + d_2)] + 2 \cdot D_\alpha + 0.1(90 - \alpha \frac{180}{\pi}) - 20 \log_{10}\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda}\right) \quad (1.29)$$

$$D_\alpha \approx -\left(\frac{40}{2 \cdot \pi}\right) \left[\arctan\left(\frac{d_2}{w_2}\right) + \arctan\left(\frac{d_1}{w_1}\right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad (1.30)$$

1.11.2. Kanyon Sokak İçin BERG Modeli

Bu modelde de baz istasyonu anteninden daha yüksek binalarla çevrili kanyon tipi sokak için matematiksel bir yol kaybı modeli verilmektedir. Yol kaybı metodu tekrarlamalıdır ve yol boyunca farklı ara sokaklara da ışın ya da yol izleme metoduyla uygulanabilir. Yalnızca ana yola dik olarak gelen ara sokaklara değil, her türlü açı ve konumdaki ara sokaklara da uygulanabilir. Model düzgün ilerleyen ara sokağın daha sonra farklı θ açılarıyla bükülerek farklı yönlere giden ara sokaklarındaki yol kayıplarını da hesaplayabilmektedir. Şekil 1.25'te ana yol c de alınan LOS sinyali vericiden (T) doğrudan alınırken, ana sokağa dik olan a sokağı boyunca alınan sinyal genellikle sokak kavşağı (SK) yakınına yerleştirilmiş farazi (varsayımlı) bir vericiden gelen güç olarak alınır. Bu önerilen model, her iki durum içinde θ açısının fonksiyonu olan sürekli bir yol kaybı modeli sunmaktadır [25].



Şekil 1.25. Farklı açılara sahip sokak kavşağı örnekleri [25].

İzotropik antenler arası yol kaybı hayali (illusory) mesafe d_n ile belirlenir ve (1.31)'de verilen formülle hesaplanır. Bu modelde amaç alıcı ile verici arasında hayali bir d_n mesafesi hesaplayarak, tek bir ışın yayılımı olduğu varsayımıyla, yol kaybını bulmaktır. Burada n değeri Şekil 1.26'da gösterildiği gibi geçiş noktaları arasındaki bölümlerin sayısıdır. Şekilde $n=j_{max}=3$ dür. Geçiş noktaları keyfi olarak alınabilir fakat en az iki olmalıdır.

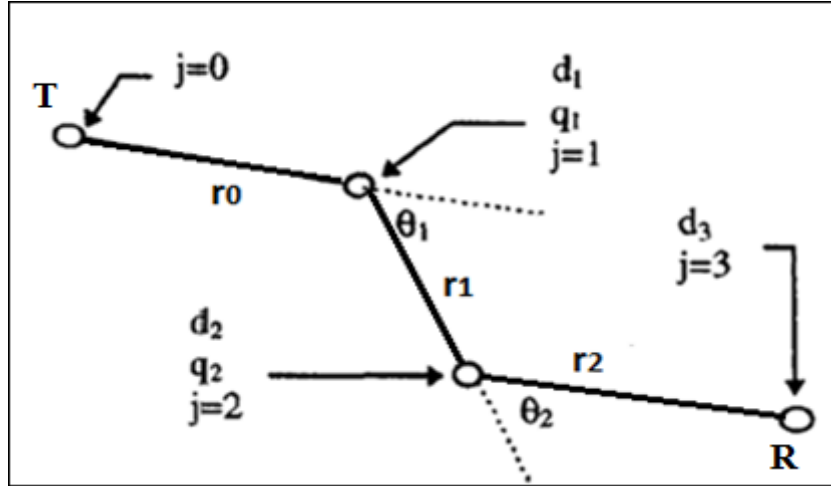
$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d_n}{\lambda} \right) \quad dB \quad (1.31)$$

Hayali mesafe d_n , başlangıç değerleri $k_0=1$ ve $d_0=0$ olarak verilen aşağıdaki tekrarlamalı ifadeler ile hesaplanır.

$$k_j = k_{j-1} + d_{j-1} \cdot q_{j-1} \quad (1.32)$$

$$d_j = k_j \cdot r_{j-1} + d_{j-1} \quad (1.33)$$

Şekil 1.26'da çizilen yol verici (T) ile alıcı (R) arasındaki yayılım yolunu göstermektedir. Yol, geçiş noktalarında θ_1 ve θ_2 açılarıyla yön değiştirmektedir. Burada r_j değeri alıcı ile verici arasındaki fiziksel mesafedir, d_j ise alıcı ile verici arasındaki hayali mesafesidir. Model resiprok olduğundan yolun yönü değişse de hesaplanan yol kaybı değeri değişmez. Formüldeki q_j değeri yol kaybının açığa bağımlılığını tanımlar. Eğer $q_j=0$ ise ek kayıp yok demektir yani θ açısıyla ayrılan bir ara sokak yok demektir. Bu değer dümdüz ilerleyen ana yol $\theta_j=0$ için kullanılır.

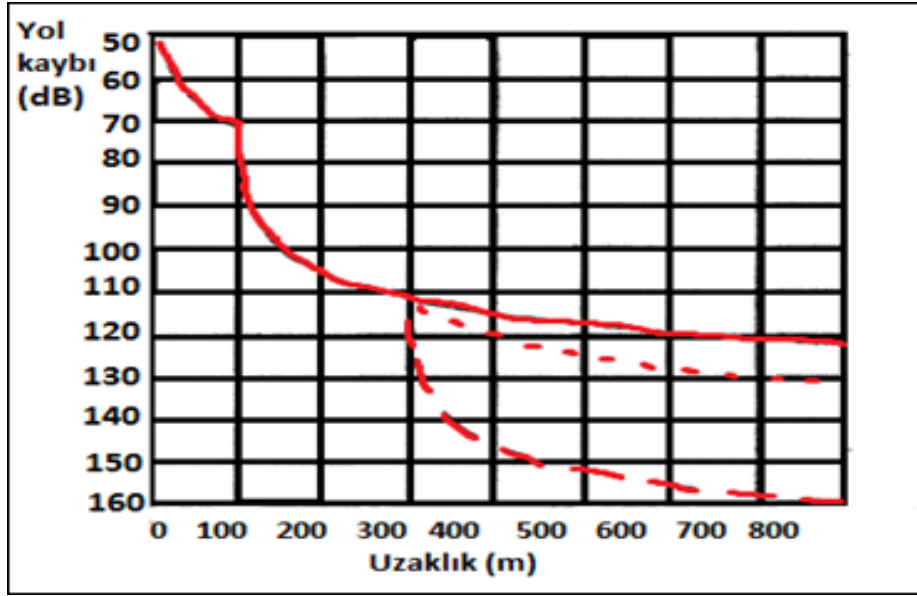


Şekil 1.26. Berg modeli için alıcı verici arası sokak konumu [25].

$\theta_j=90$ derece olduğunda q_j değeri 0.5-1 aralığında değer alır ve açı değeri arttıkça q_j değeri de artar. Açığa bağlı q_j ifadesinin basit şekli aşağıdaki gibidir, θ_j değeri derece cinsindedir.

$$q_j(\theta_j) = \left(\theta_j \cdot \frac{q_{90}}{90}\right)^v \quad (1.34)$$

Formül açığa bağımlılığın nasıl modelleneceğini gösterir ve ölçüm sonuçlarından elde edilmez. Burada v fonksiyonun şeklini belirler. Örnek olarak Şekil 1.26’da gösterilen sokak için $r_0=100\text{m}$, $r_1=200\text{m}$, $\theta_1=90$ ve $\theta_2=0$, 10 ve 90 derece alınarak hesaplanan yol kaybı değerleri Şekil 1.27’de grafikte gösterilmektedir. Formül için $q_{90}=0.5$ ve $v=1.5$ olarak seçilmiştir [25].



Şekil 1.27. Yol kaybı hesap örneği (düz çizgi $\theta_2=0$, noktalı çizgi $\theta_2=10$ ve kesikli çizgi $\theta_2=90$ derece için) [25].

Hesaplamalarda r_0 uzunluklu ana sokak ile r_1 uzunluklu ilk ara sokak değerleri sabit, ikinci ara sokak yol eğimi 0, 10 ve 90 derece olarak değiştirilerek kayıptaki değişim gözlenmiştir. Şekil 1.27’de grafikte görüldüğü gibi eğim açısı arttıkça yol kaybı da artmaktadır. Açı azaldıkça yol düzgünleşmeye başladığından yol kaybı değeri de daha az olacaktır.

Bilindiği gibi mesafeye bağlı yol kaybı hesapları serbest uzay yayılımı göz önüne alındığında genellikle iki kısımdan oluşur. Belli bir kırılma noktası, d_k , verildiğinde bu sayı ikiden de fazla olabilmektedir. Ayrıca sokak boyunca mesafe arttıkça görüş mesafesi de azaldığından dolayı kayıp artmaktadır. Berg modelini geliştirmek amacıyla görünürlülük faktörü e^{sr} ifadesi de kullanılmıştır. Görünürlülük faktörü katsayısı ‘s’ değeri genellikle

450 MHz ve 10,7 GHz frekans aralığında 0,002 değerinde sabit bir değerdir fakat ortam şartlarına göre değeri değişebilmektedir [26]. Genel yol kaybı ifadesinin kırılma noktasına ve görünürlülük faktörü katsayısına bağlı olarak genişletilmiş ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$D(r) = \begin{cases} r/d_k, & r > d_k \\ 1 & r \leq d_k \end{cases} \quad (1.35)$$

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{4\pi d_n}{\lambda} \cdot D \left(\sum_{j=1}^n r_{j-1} \right) \prod_{j=1}^n e^{sr_{j-1}} \right] \quad (1.36)$$

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(d_n \cdot \prod_{j=1}^n e^{sr_{j-1}} \right) & r \leq d_k \\ 20 \log_{10} \left(\frac{d_n \cdot r}{d_k} \cdot \prod_{j=1}^n e^{sr_{j-1}} \right) & r > d_k \end{cases} \quad (1.37)$$

1.11.3. Kanyon Sokak İçin Kang ve Tzaras Modeli

Bu model ITU tarafından önerilen model ile Berg modelini referans alarak yeni ve daha kullanışlı bir yayılım modeli sunmaktadır. ITU tarafından önerilen modelde LOS ve NLOS durumu iki ayrı denklemlerle ifade edilmiştir. Ayrıca NLOS durumu için önerilen kayıp hesabında yalnızca NLOS₁ durumu dikkate alınmıştır. Berg modelinde ise her tür sokak için NLOS durumu hesaplanabilse de köşe sayısı arttıkça hesaplanan yol kaybı değeri de gerçeğinden çok daha fazla artmaya başlamakta ve abartılı değerlere ulaşmaktadır. Bu model her iki metodu uygun bir şekilde birleştirerek olumsuz yönlerini gideren daha gerçekçi, basit ve her türlü sokak tipine uygulanabilen genel bir model önermektedir [27].

Modelde LOS ve NLOS durumu tek bir formülle birleştirilmiştir. NLOS₁ durumu için LOS'a göre, ara sokak geçiş açısı (θ_j) ve yol uzunluğunun (r_j) bir fonksiyonu olan ekstra yol kaybı ifadesi verilmiştir. NLOS₂ durumu için NLOS₁'e göre W_j katsayılı ekstra yol kaybı ifadesi tanımlanmıştır. Benzer şekilde her NLOS_n durumu için bir önceki

NLOS_{n-1}'e göre W_j katsayılı ekstra yol kaybı değeri hesaplanmaktadır. W_j katsayı değeri ara sokak geçiş sayısı arttıkça azalmaktadır.

$$L = c_1 + 20 \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \right) + \sum_{j=1}^{n-1} W_j \cdot L_{ekstra}(r_{j-1}, r_j, \theta_j) + \begin{cases} 10n_1 \cdot \log(d_r) & d_r \leq d_k \\ 10n_1 \cdot \log(d_k) + 10n_2 \cdot \log\left(\frac{d_r}{d_k}\right) & d_r > d_k \end{cases} \quad (1.38)$$

$$L_{ekstra}(r_{j-1}, r_j, \theta_j) = c_2 \cdot \log(r_{j-1}) + c_3 \cdot \log(r_j) + c_4 \cdot \log(\theta_j) \quad (1.39)$$

$$W_j = \begin{cases} 0 & j \leq 0 \\ 1 & j = 1 \\ c_5 e^{-j} & j > 1 \end{cases} \quad (1.40)$$

Burada L toplam yol kaybını, n_1 ve n_2 yol kaybı üstel katsayılarını, c_1, c_2, c_3, c_4 ve c_5 sabitleri ifade etmektedir. Üstteki yol kaybı ifadeleri için LOS, NLOS₁ ve NLOS₂ aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_{los} = c_1 + 20 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \right) + \begin{cases} 10n_1 \cdot \log(d_r) & d_r \leq d_k \\ 10n_1 \cdot \log(d_k) + 10n_2 \cdot \log\left(\frac{d_r}{d_k}\right) & d_r > d_k \end{cases} \quad (1.41)$$

$$L_{nlos1} = L_{los} + L_{ekstra}(r_0, r_1, \theta_1) \quad (1.42)$$

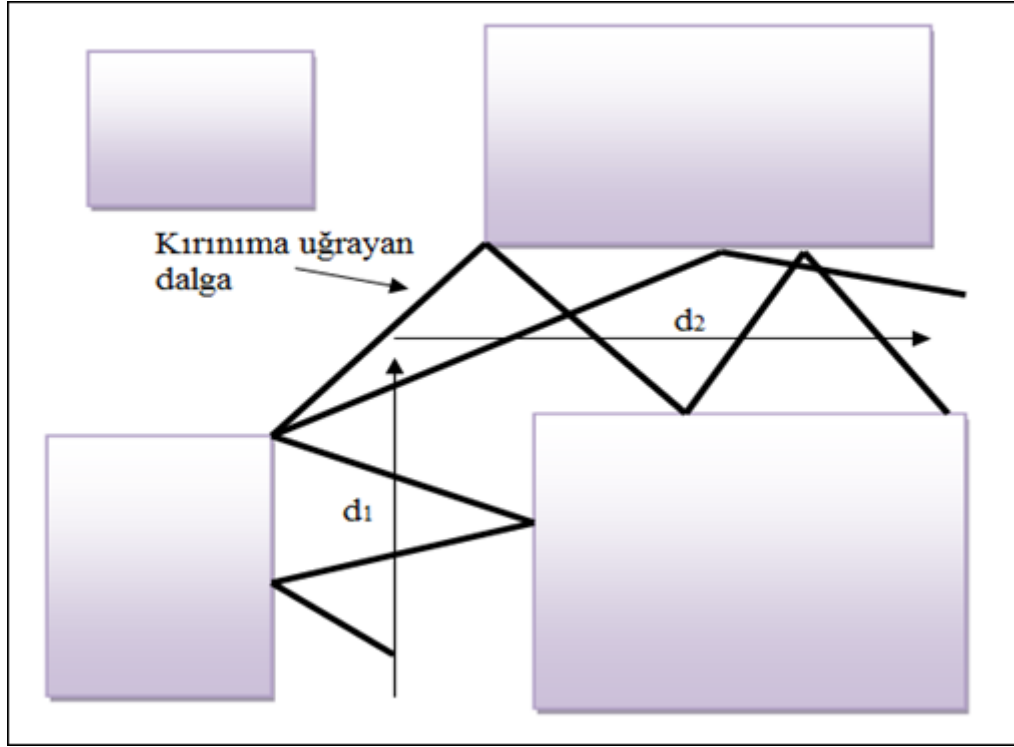
$$L_{nlos2} = L_{nlos1} + W_2 \cdot L_{ekstra}(r_1, r_2, \theta_2) \quad (1.43)$$

$$L_{nlosn} = L_{nlosn-1} + W_n \cdot L_{ekstra}(r_{n-1}, r_n, \theta_n) \quad (1.44)$$

Görüldüğü gibi 'n'nci sokak geçiş noktası için kayıp ifadesi $n - 1$ 'inci yol geçiş noktasındaki kayıp değerine bağlı tekrarlamalı bir ifadedir. Formülde yer alan n_1, n_2 üstel katsayıları ve c_1, c_2, c_3, c_4 ve c_5 sabitleri uygun bölgede gerçekleştirilen ölçümlerden yararlanılarak elde edilir [27].

1.11.4. NLOS Durumu İçin Deneysel Bir Yayılım Yol Kaybı Modeli

Mikro hücreli sistemler için oluşturulan yayılım modellerinde genel görüntü, her hangi bir doğrultuda ilerleyen bir sokak ve daha sonra bir kavşak ya da köşeyle farklı yönlere ilerleyen sokaklar şeklindedir. Ana sokaktan köşe ya da kavşak vasıtasıyla yan sokaklara dönüşlerde yayılım yolu şekilde gösterildiği gibi çoklu yansıyan ve kırınımına uğrayan dalgalardan oluşmaktadır [17].



Şekil 1.28. Kavşak noktalarında yayılım yolu [17].

Kırınımına uğrayan dalgaların etkisi küçüktür ve dolayısıyla ihmal edilebilir. Yayılım kaybı köşedeki kayıp ve köşenin ardındaki kayıp olarak ayrılabilir. Genellikle köşedeki kayıp yayılım koşullarına, alıcı verici ve köşe arası uzaklıklara bağlı olarak 10 ile 30 dB arasında değişmektedir. Köşeden alıcı noktasına kadarki kayıp d_2 mesafesine bağlı olarak (1.45) eşitliği ile ifade edilir. Denklemden verilen K , yol kaybı sabitini ifade etmektedir.

$$L_{nlos} = \alpha \log(d_2) + K \quad dB \quad (1.45)$$

Burada α az bir frekans yayılımına sahiptir ve yineleme eğrisi ölçüm değerleriyle yaklaşım yapılarak elde edilir:

$$\alpha = 14.5 \log(d_1) - 51 \quad dB \quad (1.46)$$

Yayılım kaybını tahmin etmede diğer bir yöntem LOS konumunda olup olmadığını dikkate almadan tüm yolun toplamını kullanan $r = d_1 + d_2$ yöntemidir. Bu durumda ilk 30m ye kadar yol kaybı serbest uzay yol kaybı değerine eşdeğerdir, bu mesafeden sonra ise kayıp $1/r^5$ değeriyle orantılı olarak azalmaktadır. Dolayısıyla ilgili ifade kırılma noktasına bağlı değildir [17].

$$L_{nlos} = -50 \log(d) - 20 \log(f) + 30 \log(30) + K \quad dB \quad (1.47)$$

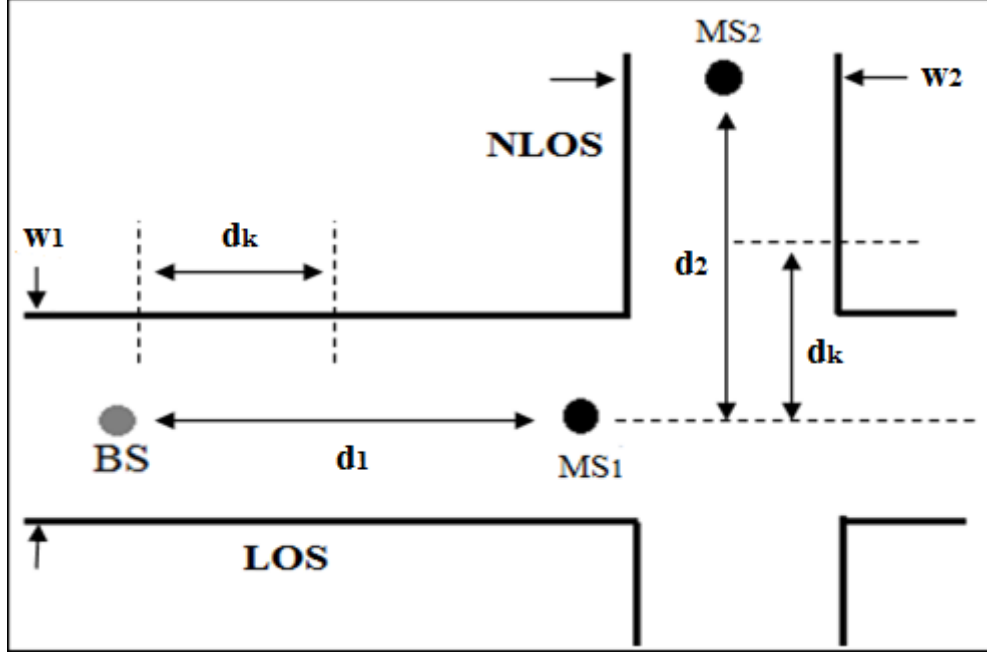
1.11.5. Masaharu HATA Modeli

Masaharu HATA modeli kanyon sokak için LOS ve NLOS durumunu kırılma noktasına göre belirlemektedir. Şekil 1.29'da d_k ile gösterilen uzaklık kırılma noktasını ifade etmektedir. d_1 ve d_2 sırasıyla BS ile MS arası LOS ve NLOS uzaklığını, w_1 ve w_2 ise sokak genişliklerini ifade etmektedir. LOS durumu için yayılım yol kaybı ifadesi denklem 1.48'deki gibidir.

$$L_{los} = P(d_1) - 15.5 \log w_1 + 60 + F_{loss} \quad (1.48)$$

$$P(d_1) = \begin{cases} 20 \log d_1 & L_1 < d_k \\ 43.3 \log d_1 - 23.3 \log d_k & L_1 > d_k \end{cases} \quad (1.49)$$

NLOS durumu için yayılım yol kaybı dört farklı ifadeden oluşmaktadır. Model NLOS durumu için de kırılma noktasını dikkate almıştır. Formüllerde yer alan F_{loss} ifadesi frekansa bağlı bir kayıp değerini göstermektedir ve henüz araştırma aşamasındadır [18]. NLOS yayılım yol kaybı ifadesi denklem 1.50 ile hesaplanır.



Şekil 1.29. Kanyon sokak için LOS ve NLOS durumu [18].

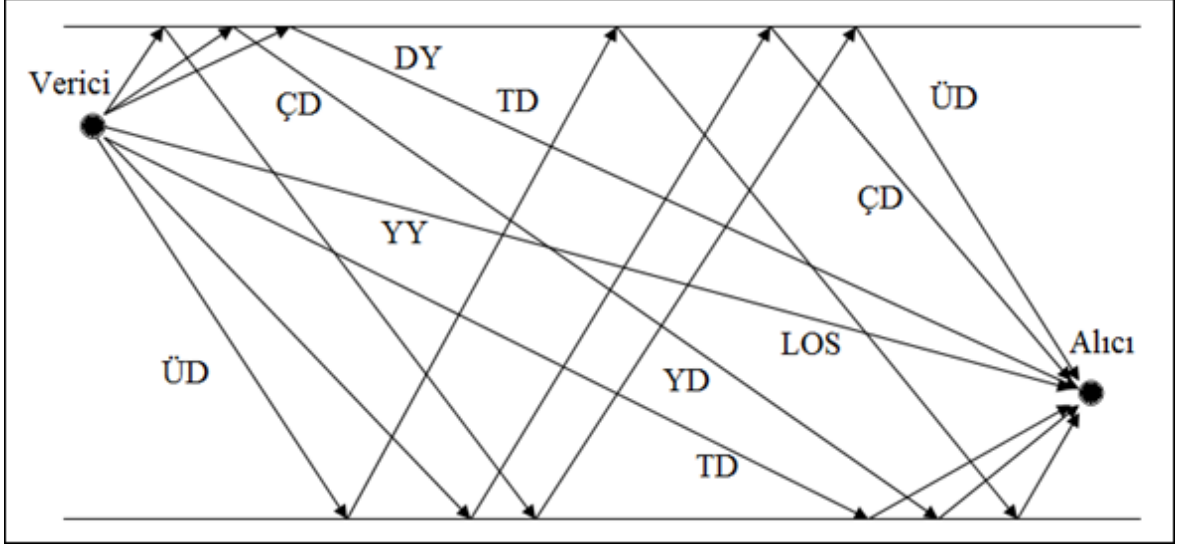
$$L_{nlos} = P(d_1, d_2) - 20.2 \log w_1 - 7.8 \log w_2 + 59.5 + F_{loss} \quad (1.50)$$

$$P(d_1, d_2) = \begin{cases} 20 \log d_1 + 20 \log d_2 & L_1, L_2 < d_k \\ 32.5 \log d_1 + 37.5 \log d_2 - 30 \log d_k & L_1, L_2 > d_k \\ 32.5 \log d_1 + 20 \log d_2 - 12.5 \log d_k & L_1 > d_k, L_2 < d_k \\ 20 \log d_1 + 37.2 \log d_2 - 17.5 \log d_k & L_1 < d_k, L_2 > d_k \end{cases} \quad (1.51)$$

1.11.6. Çok Işın Modeli

Işın izleme yöntemine dayalı bu model esasen iki ışınlı modelin ışın sayısı çoğaltılmış halidir. İki ışın modelindeki direk ve yerden yansıyan dalgalara ilave olarak çoklu ışın modelinde duvardan yansıyan dalgalarda hesaba katılmaktadır. Bu model doğrusal düzgün sokak yapısına sahip her iki tarafı da binalarla çevrili bir kanyon sokak modelini referans alır. Baz istasyonu ve hareketli alıcı boyları sokak seviyesine yakın bina seviyesinden aşağı konumdadır. Sokağın her iki tarafındaki bina yapısı sokağı dielektrik kanyon yapısına sokmaktadır. Genellikle binaların ön cephelerinden yansıyan dalgalar bir ya da birkaç kez yansyarak alıcıya ulaşır fakat üçten fazla yansıma durumu çok fazla hesaplarda yer almaz. Şekil 1.30'da örnek olarak on ışınlı bir model gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi ışınlar şu şekilde sıralanabilir: Direkt dalga (LOS), yerden yansıyan

dalga (YY), tek duvardan yansıyan dalga (TD), çift duvardan yansıyan dalga (ÇD), üç duvardan yansıyan dalga (ÜD), duvardan yere yansıyan dalga (DY) ve yerden duvara yansıyan dalga (YD). Bu dalgalardan LOS, YY, DY ve YD bir taneyken, TD, ÇD ve ÜD sokağın her iki tarafında bina olduğundan ikişer tanedir böylece toplam 10 ışın elde edilmektedir [28].



Şekil 1.30. On ışın modelinde sokağın üstten görünümü [28].

Çok ışın modeli için alınan sinyal denklem 1.52 ile verilir.

$$r_n(t) = \text{Re} \left\{ \frac{\lambda}{4\pi} \left[\frac{\sqrt{G_l} u(t) e^{-\frac{j2\pi l}{\lambda}}}{l} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i \sqrt{G_{x_i}} u(t - \tau_i) e^{-\frac{j2\pi x_i}{\lambda}}}{x_i} \right] e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (1.52)$$

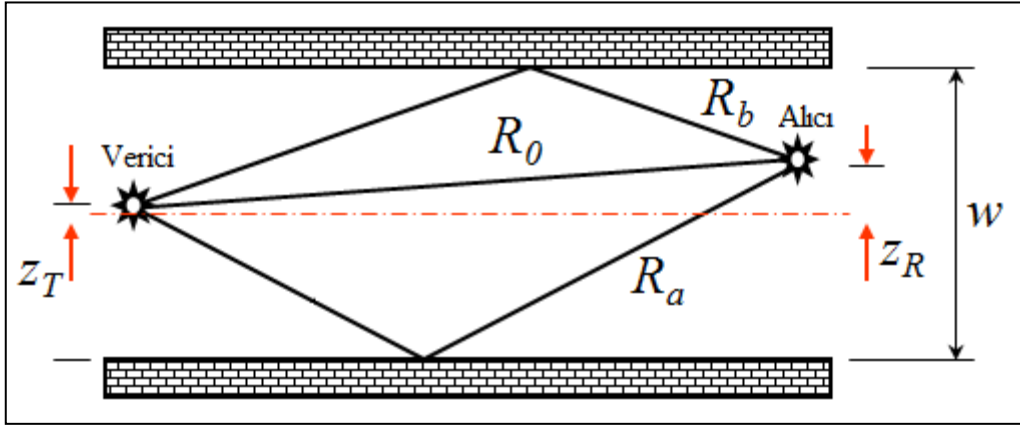
Burada x_i yansıyan i 'nci ışının yol uzunluğunu ifade eder $\tau_i = (x_i - l)/c$, ve $\sqrt{G_{x_i}}$ i 'nci ışına göre verici ve alıcı anten kazançlarının çarpımıdır. Her bir yansıma yolu için R_i katsayısı ya tek bir duvardan yansıma katsayısıdır ya da çoklu yansımada katsayıların çarpımıdır. Eğer her i 'nci yol için $u(t) \approx u(t - \tau_i)$ olan bir dar bant model olduğu düşünülürse alınan güç denklem 1.53 ile hesaplanır [28].

$$P_r = P_t \left[\frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_l}}{l} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i \sqrt{G_{x_i}} e^{-j\Delta\phi_i}}{x_i} \right|^2 \quad (1.53)$$

Burada $\Delta\varphi_i = 2\pi(x_i - l)/\lambda$ olarak ifade edilir.

Çok ışın modellerinde ışın sayısının ikiden fazla olduğu, bina duvarlarından yansımanın gerçekleştiği durumlarda baz istasyonu ve hareketli alıcı konumları yansıyan ışınların yol uzunluğunu değiştirmekte dolayısıyla yol kaybı hesap sonucu çok fazla olmasa da değişmektedir. Şekil 1.31’de bu durumu açıklamak amacıyla kanyon şeklindeki bir sokakta alıcı ve vericinin sokağa ve binalara göre konumları ile duvardan yansıyan ışınlar gösterilmektedir. Kesikli çizgi yolun tam ortasını göstermektedir. Şekilde kullanılan ifadeler şöyledir [29]:

- z_T : Vericinin yolun tam ortasına olan uzaklığı (m)
- z_R : Alıcının yolun tam ortasına olan uzaklığı (m)
- R_b, R_a : Duvardan yansıyan ışınların uzunluğu (m)
- R_0 : Direk dalganın uzunluğu (m)
- w : Sokak genişliği (m)



Şekil 1.31. Çok ışın modeli için kanyon sokakta alıcı ve verici konumları [29].

Duvardan yansıyan ışınların R_b ve R_a uzunlukları şu şekilde hesaplanır:

$$R_a = \sqrt{x^2 + (w + z_T + z_R)^2} \quad (1.54)$$

$$R_b = \sqrt{x^2 + (w - z_T - z_R)^2} \quad (1.55)$$

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada Trabzon il merkezinde Tanjant ve Devlet Sahil Yolu arasında kalan şehrin en yoğun ve merkezi bölgesinde, Yavuz Selim Bulvarı, Maraş Caddesi ve İnönü Caddeleri boyunca nüfusun ve yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde farklı frekans bantları için ortalama elektrik alan şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerle şehrin yoğun bölgelerinde elektrik alan dağılımı incelenmeye çalışılmış ve sınır değerlere göre sonuçlar karşılaştırılmıştır. GSM 900 MHz ve GSM 1800 MHz bandında 935-960MHz ve 1805-1822 MHz frekans aralıklarında ortalama elektrik alan şiddeti ölçümleri alınmıştır. FM bandında 87,5-108 MHz, VHF-III bandında 174-230 MHz, UHF bandında 470-800 MHz frekansları için ortalama elektrik alan şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca UMTS 2 GHz bandında 2110-2160 MHz frekans aralığı için ölçümler alınmıştır. İl merkezinde yapılan bu çalışmaya ait elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm sonuçları Google Earth programı kullanılarak haritalar üzerinde gösterilmiştir. Farklı frekans bantları için ayrı ayrı elde edilen haritalar Ek 1.'de verilmiştir.

Ayrıca Trabzon il merkezinde verici yüksekliği ortalama bina seviyesinin altında bulunan dört mikro hücrede mesafeye bağlı olarak elektrik alan şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sırasıyla il merkezinde Cumhuriyet Caddesi'nin sonuna konumlandırılmış TRBCA istasyonunun caddeye yayın yapan ikinci sektöründe (TRBCA2), Yavuz Selim Bulvarı'na konumlandırılmış TRMIG istasyonunun bulvarın doğu ve batı güzergâhına yayın yapan birinci (TRMIG1) ve üçüncü (TRMIG3) sektörlerinde ve Yeşil Caddesi'ne yayın yapan ikinci sektöründe (TRMIG2) ölçümler alınmıştır. Ölçümler cadde boyunca baz istasyonundan yaklaşık 30 metre mesafeden başlanarak görüş hattı boyunca belli aralıklarda yapılmıştır.

Ölçümler baz istasyonlarından farklı uzaklık ve konumlar için NARDA SRM-3000 spektrum analizör ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılan SRM-3000 cihazında kullanılan standart eş yönlü (3-eksenli) anten ile 75MHz-3GHz aralığında elektromanyetik alanları ölçmek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada ölçümler seçilen baz istasyonlarının yayın yaptığı 935MHz ile 946MHz frekans bant genişliğinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler SRM-3000 spektrum analizörünün "Safety Evaluation" modunda belirtilen frekans aralığı

için elektrik alan şiddetinin 6 dakikalık ortalama değer (E_{ort}) sonuçları alınarak gerçekleştirilmiştir. Spektrum analizör ile elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti değerleri V/m cinsindedir ve ölçüm yapılan frekans bandında frekans çözünürlüğü 200 kHz olarak seçilmiştir. Ölçümlerin alındığı anten yüksekliği ortalama 1,5 metredir. Ölçümlerin alındığı noktaların baz istasyonuna olan uzaklıkları Google Earth programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Yol kaybı değerlerinin hesaplanabilmesi için ölçüm sonucu elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti değerlerinin antende alınan güç değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Antende alınan güç değerleri denklem (2.3)'teki gibi hesaplanmaktadır. Denklemden kullanılan anten faktörü değeri, SRM-3000 cihazı için verilen üç eksenli antene ait frekansa bağlı kazanç ve anten faktörü değerlerini gösteren Tablo 2.1'den alınmıştır. Denklem (2.3), anten faktörü ifadesinden yola çıkılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Denklemlerde; 'E' ölçülen elektrik alan şiddetini, 'U_o' spektrum analizör girişinde oluşan potansiyel farkını, 'k' anten faktörünü, 'P_r' alınan güç değerini, 'R_o' anten giriş direncini ifade etmektedir.

$$k = \frac{E}{U_o} = \frac{E}{\sqrt{P_r \cdot R_o}} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2.1)$$

Buradan P_r değeri çekilerek denklem (2.2) elde edilir.

$$P_r = \frac{E^2}{k^2 \cdot R_o} \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

Denklem (2.2) desibel olarak aşağıdaki gibi verilir:

$$P_r(\text{dBW}) = 20 \log(E) - 20 \log(k) - 10 \log(R_o) \quad (2.3)$$

Hesaplamalarda antenin giriş direnci R_o=50 Ω olarak alınmıştır. Ölçümler 900 MHz bandında gerçekleştirildiğinden Tablo 2.1'den anten faktörü değeri K= 48,21 dB olarak seçilmiştir. Bu değerler (2.3) eşitliğinde yerine koyularak antende alınan güç değerlerinin hesaplanmasında kullanılan denklem (2.4) ifadesi elde edilmiştir.

$$P_r(dBW) = 20 \log(E) - 65.2 \quad (2.4)$$

SRM-3000 cihazıyla ölçüm güzergâhları boyunca belirlenen noktalarda ölçülen ortalama elektrik alan şiddeti değerleri kullanılarak denklem (2.4) yardımıyla o noktalarda alınan güç (P_r) değerleri elde edilmiştir. Ölçüm noktalarında alınan güç değerleri belirlendikten sonra deneysel yol kaybı değerleri elde edilmiştir. Belirlenen noktalarda ölçülen ortalama elektrik alan şiddeti değerleri, ölçüm noktaları için hesaplanan güç ve yol kaybı değerleri Bölüm 2.2’de her bir hücre için farklı tablolarda verilmiştir. Ayrıca hücrelere yayın yapan sektör antenlerine ait teknik bilgilerde tablolarda verilmiştir.

Ölçüm yapılan güzergâhta, caddenin konumu, genişliği, trafik ve yaya yoğunluğu, trafik ışığı, sokak lambası ve tabela sıklığı gibi özellikler önemli olduğundan bu konu hakkında bilgi vermesi amacıyla ölçüm güzergâhlarının fotoğrafları da Bölüm 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. SRM 3000 spektrum analizör [30].

Tablo 2.1. SRM-3000 için üç eksenli antene ait frekansa bağılı kazanç ve anten faktörü değerleri [30].

Frekans (MHz)	Kazanç (dBi)	Anten Faktörü "K" dB (1/m)
100	-50.00	60.23
300	-32.50	52.27
900	-18.90	48.21
1000	-17.50	47.73
1800	-12.50	47.83
2100	-13.80	50.47
2500	-15.50	53.69
2800	-16.15	55.32
3000	-16.65	56.42

2.2.Yapılan Ölçümler

2.2.1. TRBCA2 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri

TRBCA istasyonu Şekil 2.2’de görüldüğü gibi Cumhuriyet Cadde’sinin sonuna konumlandırılmış olup iki sektörden oluşmaktadır. İstasyonun ikinci sektörü TRBCA2 Cumhuriyet Caddesi’ne yayın yapmaktadır. Cadde dardır ve ölçüm yapılan zaman diliminde hem yaya hem de araç trafiği bakımından yoğundur. Cadde rampa şeklindedir ve baz istasyonu rampa eğiminin başlangıcına konumlandırılmıştır. Caddenin genişliği 10 metre, uzunluğu ise 230 metredir. Ölçümler baz istasyonundan 25 metre mesafeden başlanarak caddenin Maraş Caddesi’ne ulaştığı kavşak noktasına kadar belli aralıklarda alınmıştır. TRBCA2 sektörüne ait özellikler Tablo 2.2’de verilmektedir. Cumhuriyet Caddesi boyunca ölçülen ortalama elektrik alan şiddeti değerleri, alınan güç ve yol kaybı değerleri mesafeye bağlı olarak Tablo 2.3’te verilmektedir.



Şekil 2.2. TRBCA2 hücresi ölçüm güzergâhı

Tablo 2.2. TRBCA2 sektörünün özellikleri

Sektör Adı (Yönü)	Anten Tipi	Tilt	h_t (m)	G_t (dBi)	P_t (dBW)	P_{EIRP} (dBW)	3dB Açıklığı
TRBCA2 (180°)	K739 622	0°	7.3	15.5	10	25.5	65°/15°

Yukarıda verilen tabloda; h_t anten yüksekliğini, G_t anten kazancını, P_t antene iletilen gücü, P_{EIRP} ($P_t \cdot G_t$) antenin çıkış gücünü ifade etmektedir.

Tablo 2.3. TRBCA2 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	d (m) Uzaklık	E (V/m) Ortalama	P_r (dBw) Ortalama	LOS Yol Kaybı Ölçüm (dB)
A	25	3,993	-52,974	78,474
B	35	3,102	-55,167	80,667
C	51	1,745	-60,164	85,664
J	70	1,578	-61,038	86,538
K	100	0,639	-68,890	94,390
L	120	0,575	-69,807	95,307
O	145	0,403	-72,894	98,394
P	170	0,386	-73,268	98,768
Q	190	0,268	-76,437	101,937
R	225	0,195	-79,199	104,699

2.2.2. TRMIG1 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri

TRMIG1 sektörü TRMIG istasyonunun bulunduğu Yavuz Selim Bulvarının doğu cephesine yayın yapan birinci sektördür. TRMIG1 sektörünün yayın yaptığı Yavuz Selim Bulvarı'nın doğu cephesi Şekil 2.3'te görüldüğü gibi geniş ve düz bir caddedir. TRMIG1 istasyonu bulvarın ortasında 4 yol ağzına yerleştirilmiştir. Bulvarın genişliği 30 metredir. Bulvar doğu ve batı yönünde oldukça uzun bir yer kaplamaktadır. Ölçümler baz istasyonundan 70 metre mesafeden başlanarak görüş hattının kaybolmaya başladığı 570 metreye kadar alınmıştır. Ölçüm yapılan zaman diliminde cadde boyunca yaya ve araç trafiği yoğunluğu oldukça düşüktür. TRMIG1 sektörünün özellikleri Tablo 2.4'de verilmektedir. Yavuz Selim Bulvarı'nın doğu cephesi boyunca ölçülen ortalama elektrik alan şiddeti değerleri, alınan güç ve yol kaybı değerleri mesafeye bağlı olarak Tablo 2.5'de verilmektedir.



Şekil 2.3 TRMIG1 hücresi ölçüm güzergâhı

Tablo 2.4. TRMIG1 sektörünün özellikleri

Sektör Adı (Yönü)	Anten Tipi	Tilt	h_t (m)	G_t (dBi)	P_t (dBW)	P_{EIRP} (dBW)	3dB Açıklığı
TRMIG1 (60°)	K739 620	0°	8	12.5	10	22.5	65°/27°

Tablo 2.5. TRMIG1 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	d (m) Uzaklık	E (V/m) Ortalama	P_r (dBw) Ortalama	LOS Yol Kaybı Ölçüm (dB)
ta7	70	1,537	-61,267	83,767
tab	100	1,216	-63,301	85,801
ta6	145	0,735	-67,674	90,174
ta5	280	0,176	-80,090	102,590
tac	310	0,158	-81,027	103,527
ta4	425	0,089	-86,012	108,512
ta3	565	0,052	-90,680	113,180

2.2.3. TRMIG2 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri

TRMIG2 sektörü TRMIG istasyonunun ikinci sektörüdür ve Yeşil Caddesi'ne yayın yapmaktadır. Yeşil Caddesi Şekil 2.4'te görüldüğü gibi geniş ve rampa şeklinde bir caddedir. Yeşil Caddesi Yavuz Selim Bulvarı'nın güneyinde bulunmaktadır ve bulvardan yukarıya doğru rampa şeklinde ayrılmaktadır. Baz istasyonu rampa eğiminin başlangıcına konumlandırılmıştır. Caddenin genişliği 20 metredir. Cadde uzun olsa da farklı açılarla farklı doğrultulara saptığından dolayı ölçüm yapılan doğrultuda görüş hattı 130 metre mesafeden sonra kaybolmaktadır. Ölçüm yapılan zaman diliminde cadde boyunca yaya ve araç trafiği yoğunluğu düşüktür. Ölçümler baz istasyonundan 30 metre mesafeden başlanarak görüş hattının kaybolmaya başladığı mesafeye (130 metre) kadar alınmıştır. TRMIG2 sektörünün özellikleri Tablo 2.6'da verilmektedir. Yeşil Caddesi boyunca ölçülen ortalama elektrik alan şiddeti değerleri, alınan güç ve yol kaybı değerleri mesafeye bağlı olarak Tablo 2.7'de verilmektedir.



Şekil 2.4. TRMIG2 hücresi ölçüm güzergâhı

Tablo 2.6. TRMIG2 sektörünün özellikleri

Sektör Adı (Yönü)	Anten Tipi	Tilt	h_t (m)	G_t (dBi)	P_t (dBW)	P_{EIRP} (dBW)	3dB Açıklığı
TRMIG1 (160°)	K739 620	0°	8	12.5	10	22.5	65°/27°

Tablo 2.7. TRMIG2 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	d (m) Uzaklık	E (V/m) Ortalama	P_r (dBw) Ortalama	LOS Yol Kaybı Ölçüm (dB)
tl12	30	2,298	-57,773	80,273
ta8	40	2,111	-58,510	81,010
tl2	60	1,546	-61,216	83,716
tl3	75	0,978	-65,193	87,693
tl4	90	0,903	-65,886	88,386
tl5	100	0,756	-67,430	89,930
tl6	130	0,479	-71,393	93,893

2.2.4. TRMIG3 Hücresi İçin LOS Ölçüm Değerleri

TRMIG3 sektörü TRMIG istasyonunun Yavuz Selim Bulvarı'nın batı cephesine yayın yapan üçüncü sektördür. TRMIG3 sektörünün yayın yaptığı Yavuz Selim Bulvarının batı cephesi Şekil 2.5'te görüldüğü gibi geniş ve düzdür. Ölçüm yapılan zaman diliminde yaya trafiği azdır, araç trafiği ise yolun başında trafik ışıklarının bulunmasından dolayı ilk 100 metrede yoğunken daha uzak mesafelere gidildikçe yoğunluk düşmektedir. Bulvarın batı cephesinin genişliği de 30 metredir. Bulvar batı yönünde de oldukça uzundur. Görüş hattı yaklaşık 300 metre mesafeden sonra yol dönemecinden dolayı kaybolmaktadır. Ölçümler baz istasyonundan 55 metre mesafeden başlanarak görüş hattının kaybolmaya başladığı 300 metre mesafeye kadar alınmıştır. TRMIG3 sektörünün özellikleri Tablo 2.8'de verilmektedir. Yavuz Selim Bulvarı'nın batı cephesi boyunca ölçülen ortalama elektrik alan şiddeti değerleri, alınan güç ve yol kaybı değerleri mesafeye bağlı olarak Tablo 2.9'da verilmektedir.



Şekil 2.5. TRMIG3 ölçüm güzergâhı

Tablo 2.8. TRMIG3 sektörünün özellikleri

Sektör Adı (Yönü)	Anten Tipi	Tilt	h_t (m)	G_t (dBi)	P_t (dBW)	P_{EIRP} (dBW)	3dB Açıklığı
TRMIG1 (220°)	K739 620	0°	8	12.5	10	22.5	65°/27°

Tablo 2.9. TRMIG3 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	d (m) Uzaklık	E (V/m) Ortalama	P_r (dBw) Ortalama	LOS Yol Kaybı Ölçüm (dB)
tl1	55	1,835	-59,727	82,227
ta9	75	1,240	-63,132	85,632
tu5	105	1,084	-64,299	86,799
tbb	130	0,848	-66,432	88,932
tu1	160	0,575	-69,807	92,307
tu2	220	0,335	-74,499	96,999
tu3	300	0,245	-77,217	99,717

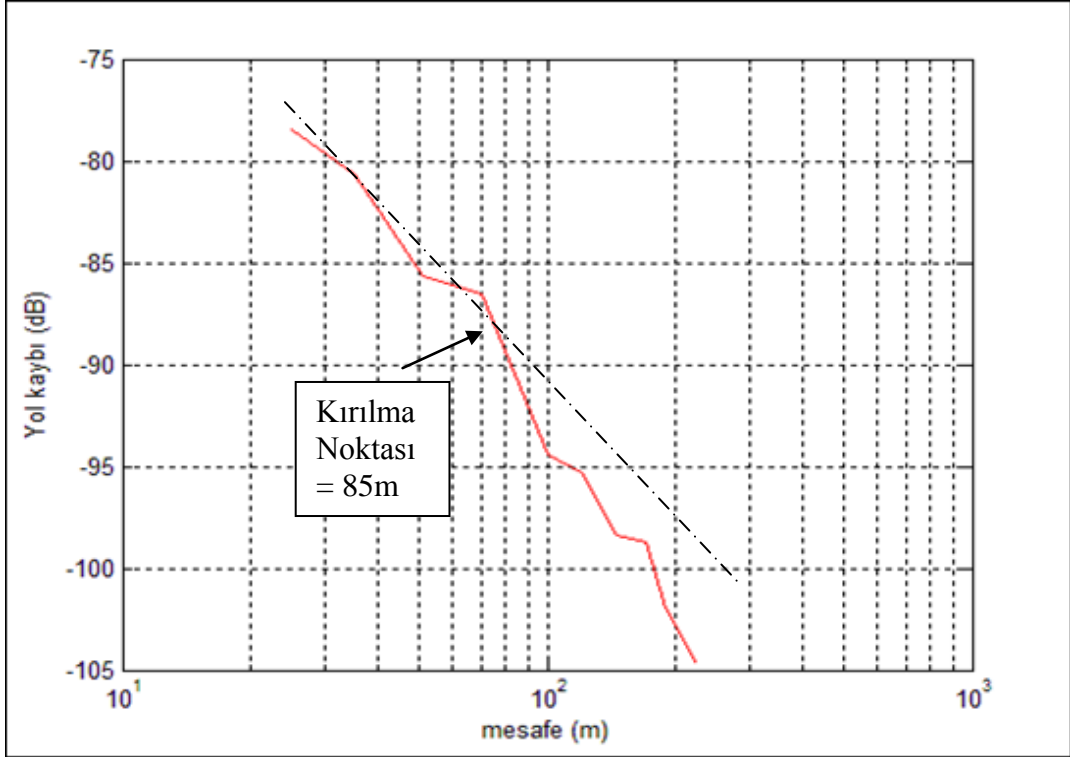
2.3. Yapılan Ölçümlerin Değerlendirilmesi

2.3.1 Kırılma Noktası Mesafelerinin Belirlenmesi

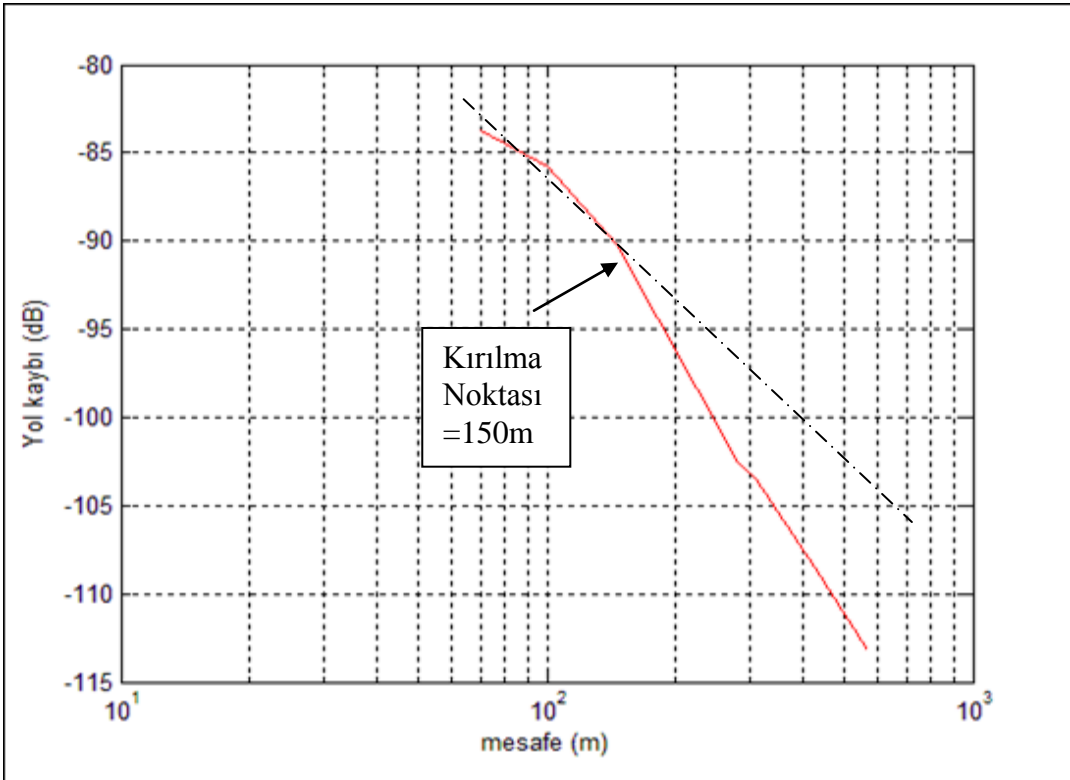
Ölçüm sonuçlarının teorik sonuçlarla sağlıklı olarak karşılaştırılıp değerlendirilebilmesi için öncelikli olarak elde edilen ölçüm sonuçlarından kırılma noktası mesafeleri belirlenmiştir. Kırılma noktası mesafesi baz istasyonu yüksekliği, hareketli alıcı yüksekliği ve dalga boyuna bağlı sabit bir formül olsa da ölçülen elektrik alanda büyük çaplı dalgalanmalara sebep olan bayılma olayı ve hücresele ortamların farklı özelliklere sahip olmasından dolayı kırılma noktasının pozisyonu her zaman formüldeki değere eşdeğer değildir. Bu çalışmada farklı özelliklere sahip 4 hücrede alınan elektrik alan şiddeti değerleri kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerlerinden hücrelerin kırılma noktası mesafeleri belirlenmiştir. Bulunan değerler kıyaslanarak kırılma noktası mesafesini baskın bir şekilde değiştiren ana etkenler elde edilmeye çalışılmıştır. Trafik ve yaya yoğunluğu, caddenin genişliği, tabela ve levha gibi yol boyunca mevcut saçıcılar ve yolun düz ya da rampa şeklinde olmasının kırılma noktası üzerindeki etkileri gözlenmiştir.

Kırılma noktası mesafeleri, hücreler için hesaplanan yol kaybı değerlerinin mesafeye bağlı olarak çizdirilmesiyle elde edilmiştir. Mesafeye bağlı yol kaybı grafiklerinde eğimin belirgin bir şekilde değişmeye başladığı noktalar kırılma noktaları olarak alınmıştır. Grafikler Matlab programı yardımıyla yatay eksenle logaritmik olarak çizdirilmiştir. TRBCA2, TRMIG1, TRMIG2 ve TRMIG3 hücreleri için ölçüm sonuçlarından elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri sırasıyla Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da verilmiştir.

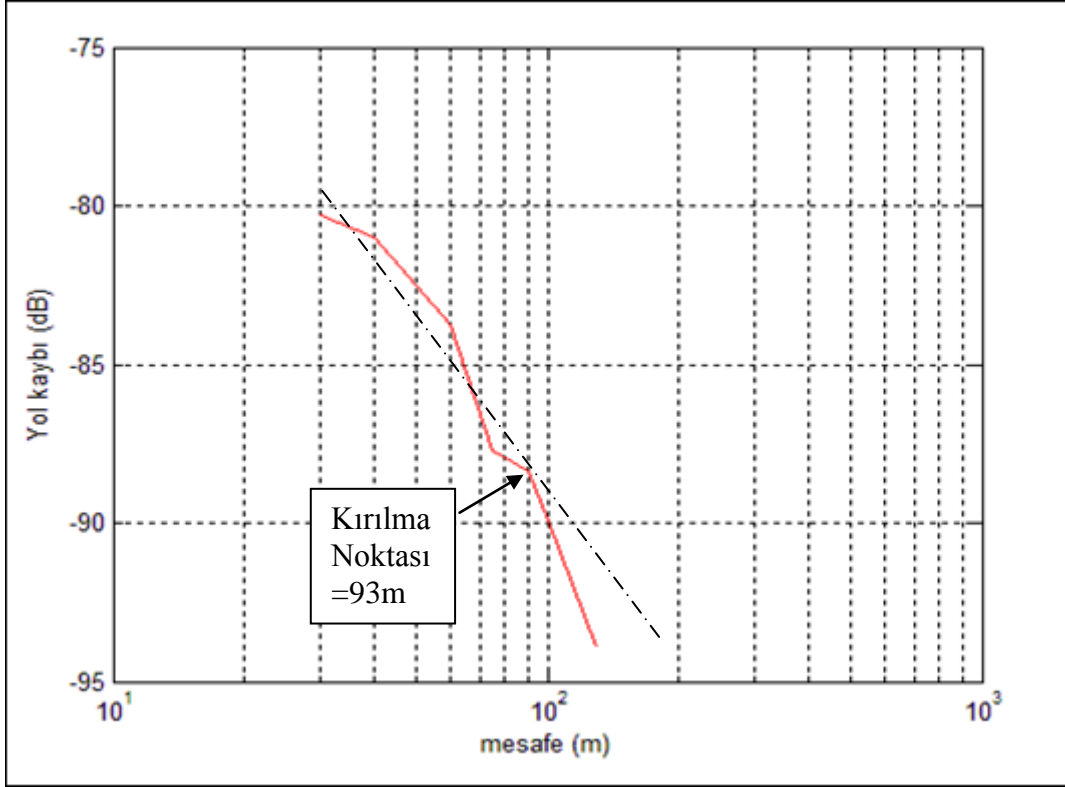
Grafiklerde düz çizgi ile gösterilen eğri mesafeye bağlı yol kaybı eğrisini göstermektedir. Kesikli çizgiyle gösterilen doğru, yol kaybı eğrisinin kırılma noktası öncesinde sahip olduğu eğimi göstermek amacıyla çizilmiştir. Elde edilen eğrinin doğrudan saptmaya başladığı noktaya karşılık gelen mesafe kırılma noktası mesafesi olarak alınmıştır. Eğimin değişmeye yani artmaya başladığı noktaya karşılık gelen mesafe değeri kırılma noktası mesafesi olarak seçilmiştir. Bu mesafeden sonra eğrinin önceki konumundan saptığı ve eğimin arttığı grafiklerde açıkça görülmektedir.



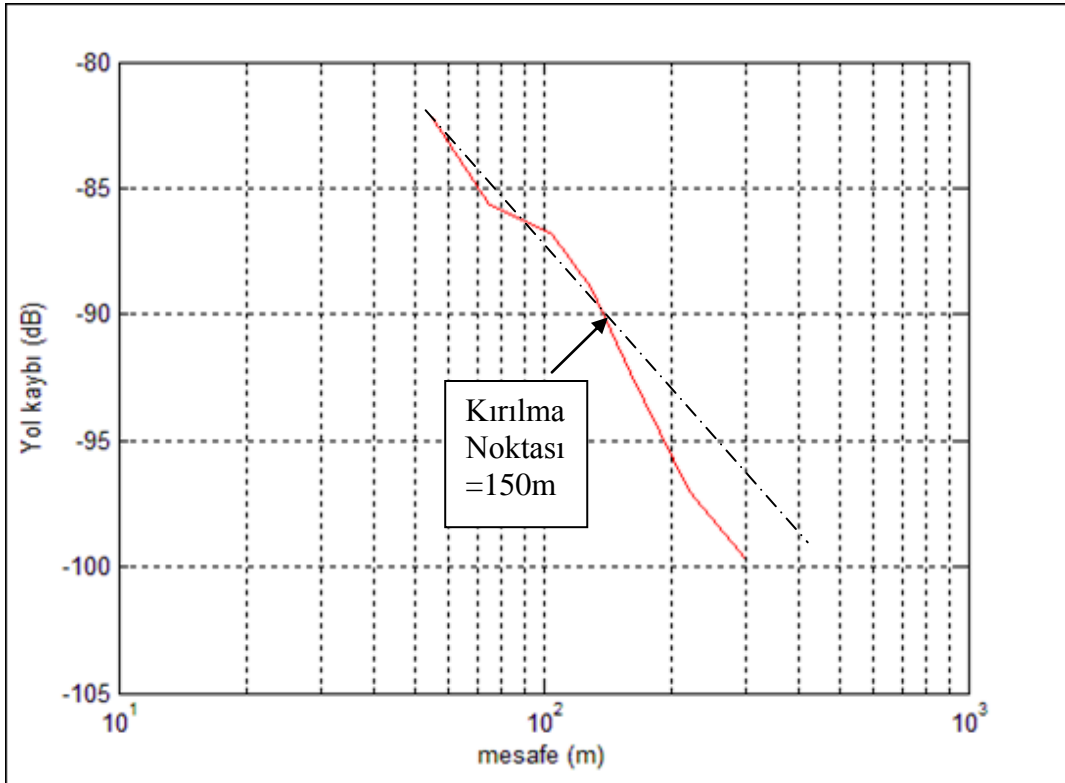
Şekil 2.6. TRBCA2 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği



Şekil 2.7. TRMIG1 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği



Şekil 2.8. TRMIG2 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği



Şekil 2.9. TRMIG3 hücresi için mesafeye bağlı ölçüm yol kaybı (LOS) grafiği

TRBCA2 hücresi için kırılma noktası mesafesi grafikten 85 metre olarak hesaplanmıştır. TRMIG1 hücresi için kırılma noktası mesafesi 150 metre, TRMIG2 hücresi için 93 metre ve TRMIG3 hücresi için 150 metre olarak hesaplanmıştır.

Kırılma noktası mesafeleri grafiklerden sayısal olarak elde edildikten sonra bu değerler kırılma noktası hesabı için verilen formül sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. TRMIG1 ve TRMIG3 hücreleri için grafiklerden elde edilen kırılma noktası mesafelerinin formül sonuçlarıyla eşdeğer olduğu görülmüştür. Fakat TRBCA2 ve TRMIG2 hücreleri için grafiklerden elde edilen kırılma noktası mesafelerinin formül sonuçlarıyla örtüşmediği görülmüştür. TRBCA2 için formüle göre 140m olması gereken değer 85m çıkarken TRMIG2 için 150m olması gereken değer 93m olarak elde edilmektedir. Her iki hücre içinde kırılma noktası mesafeleri gerçekte formüldeki değerlerden daha küçük çıkmaktadır. Buradan TRBCA2 ve TRMIG2 hücrelerinde ilk Fresnel bölgesi açıklığının daha yakın mesafelerde engellenmeye başladığı anlaşılmaktadır.

TRBCA2, TRMIG1, TRMIG2 ve TRMIG3 hücreleri birbirleriyle karşılaştırılarak TRMIG2 ve TRBCA2 hücrelerinde kırılma noktası mesafelerini azaltan etken bulunmaya çalışılmıştır. Önemli bir etken olarak görülen araç ve yaya trafiği TRBCA2 hücresinde yoğunken TRMIG2 hücresinde düşüktür. Dolayısıyla her iki hücrede de kırılma noktası mesafelerinin düşük çıkmasının yaya ve araç trafiği ile bağlantılı olmadığı görülmüştür. Ayrıca tabela, levha ve trafik ışıkları gibi engeller ölçüm yapılan tüm hücrelerde mevcut olduğundan bu engellerin de kırılma noktası üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak 900 MHz bandında tabela, levha, trafik ışığı, sokak lambası gibi engeller ile araç ve yaya trafiği yoğunluğunun kırılma noktası mesafesini etkilemediği anlaşılmıştır.

Kırılma noktası mesafeleri düşük çıkan TRBCA2 ve TRMIG2 hücrelerinin ortak özelliği her iki hücrede de yolların oldukça eğimli olmasıdır. TRMIG1 ve TRMIG3 sektörlerinin yayın yaptığı caddeler düzdür ve kırılma noktası mesafeleri formülle eşdeğerdir. TRBCA2 ve TRMIG2 sektörlerinin yayın yaptığı caddeler rampa şeklindedir ve kırılma noktası mesafeleri formül sonuçlarından daha düşük değerlerdedir. Sonuç olarak yapılan çalışma ile 900 MHz bandında kırılma noktasını baskın şekilde etkileyen faktörün yol eğimi olduğu görülmüştür. TRBCA2 ve TRMIG2 hücreleri için ölçüm sonuçlarından deneysel olarak elde edilen kırılma noktası değerleri kullanılarak, kırılma noktası mesafesini veren teorik denklemin katsayısı yeniden elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda rampa şeklinde bir yapıya sahip olan caddeler için kırılma noktası katsayısının 4 yerine 2,5 olarak alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

2.3.2 LOS Ölçüm Sonuçlarının Modellerle Karşılaştırılması

Bu bölümde hücreler için ölçüm verilerine dayanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri, teorik modeller kullanılarak elde edilen yol kaybı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yol kaybı tahmin modellerinden; ITU tarafından önerilen model, Berg modeli ve Masaharu Hata modelinin ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığı grafikler ve tablolar aşağıda verilmektedir. Şekillerde ölçüm yol kaybı değerleri modellerle karşılaştırılarak modeller ile ölçüm sonuçları arasındaki ilişki ve uyum grafiksel olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Hücreler için ölçüm noktalarında hesaplanan yol kaybı değerleri ve ilgili modele göre hesaplanmış yol kaybı değerleri tablolarda karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ölçüm alınan her bir nokta için, ölçüme ve modele dayalı yol kaybı değerleri arasındaki farklar hesaplanmıştır. Hesaplanan fark değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak model için ortalama bir fark değeri elde edilmiştir.

Çok ışın modeli için hesaplama kolaylığı açısından ışın sayısı 2 ve 4 olarak seçilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. İki ve dört ışın modelleri kullanılarak elde edilen grafikler salınımlı eğrilere sahip olduğundan, salınımların son bulup yol kaybı eğrilerinin düzgün bir şekilde ilerlemesi çok daha uzun mesafelerde gerçekleştiğinden bu modellere ait karşılaştırma grafikleri ayrı şekillerde verilmiştir. Ölçüm sonuçlarından elde edilen yol kaybı değerleriyle teorik modeller kullanılarak elde edilen yol kaybı sonuçlarının karşılaştırıldığı grafikler Matlab programı yardımıyla elde edilmiştir.

2.3.2.1. TRBCA2 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleri ile Karşılaştırılması

TRBCA2 hücresi için ITU tarafından önerilen model, Masaharu Hata modeli ve Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar sırasıyla Tablo 2.10, Tablo 2.11 ve Tablo 2.12’de verilmiştir. Modellerin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 2.10’da gösterilmiştir.

Tablo 2.10. TRBCA2 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	ITU Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
A	25	78,474	75,296	3,178
B	35	80,667	78,949	1,718
C	51	85,664	82,822	2,842
J	70	86,538	86,475	0,063
K	100	94,390	91,406	2,984
L	120	95,307	94,573	0,734
O	145	98,394	97,861	0,533
P	170	98,768	100,624	-1,856
Q	190	101,937	102,556	-0,619
R	225	104,699	105,493	-0,794
Farkların Ortalaması				0,878

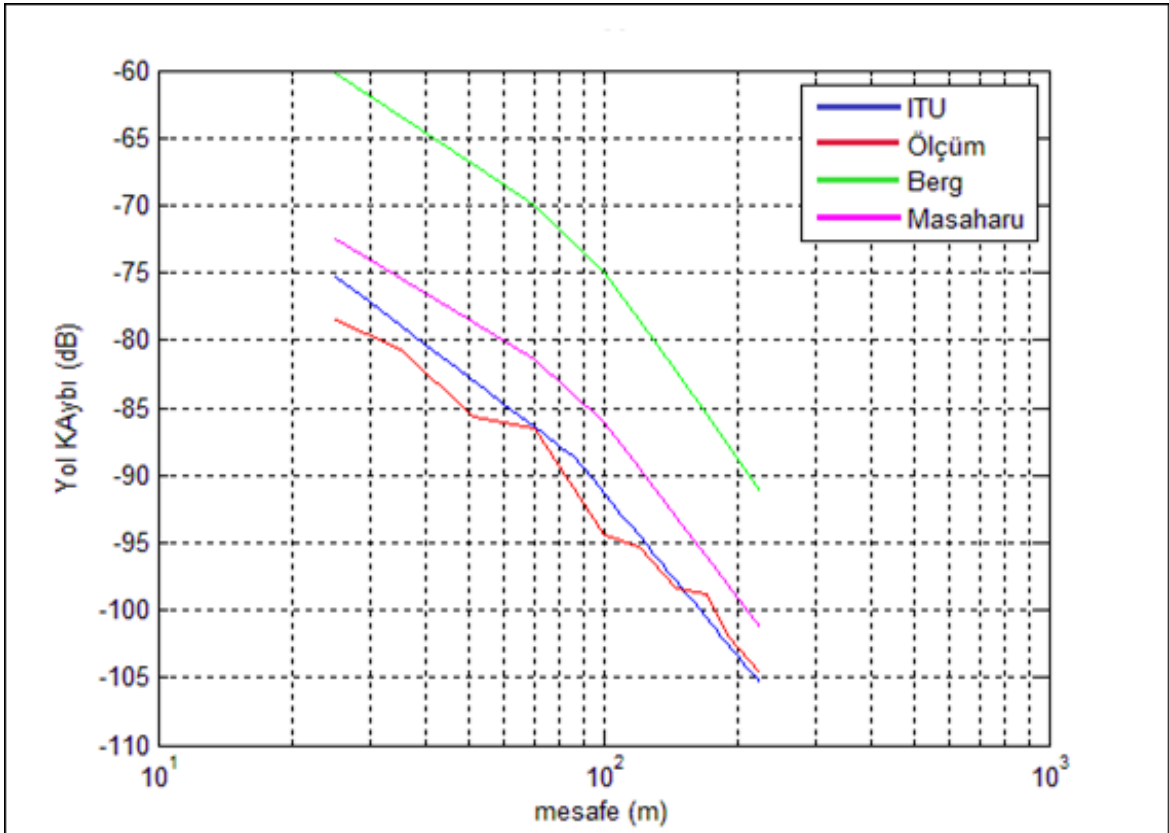
Tablo 2.11. TRBCA2 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Masaharu Hata Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
A	25	78,474	72,459	6,015
B	35	80,667	75,381	5,286
C	51	85,664	78,651	7,013
J	70	86,538	81,402	5,136
K	100	94,390	86,079	8,311
L	120	95,307	89,508	5,799
O	145	98,394	93,067	5,327
P	170	98,768	96,058	2,710
Q	190	101,937	98,149	3,788
R	225	104,699	101,329	3,370
Farkların Ortalaması				5,276

Tablo 2.12. TRBCA2 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Berg Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
A	25	78,474	60,269	18,205
B	35	80,667	63,366	17,301
C	51	85,664	66,914	18,750
J	70	86,538	69,995	16,543
K	100	94,390	75,026	19,364
L	120	95,307	78,540	16,767
O	145	98,394	82,262	16,132
P	170	98,768	85,459	13,309
Q	190	101,937	87,739	14,198
R	225	104,699	91,284	13,415
Farkların Ortalaması				16,398

TRBCA2 hücresi için ITU tarafından önerilen model, Berg modeli ve Masaharu Hata modeli kullanılarak elde edilen sonuçlara ve ölçüm değerleri ile arasındaki farklara bakılarak, kırılma noktası mesafesi doğru olarak belirlendiğinde ITU modelinin oldukça doğru ve gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ortalama fark değerleri ITU modeli için 0,878 dB, Masaharu Hata modeli için 5,276 dB ve Berg modeli için 16,398 dB olarak elde edilmiştir. Masaharu Hata modelinde frekansa bağlı kayıp ifadesi '*Floss*' değerinin belirli olmaması nedeniyle fark değeri ITU modeline göre daha fazla çıkmaktadır. Berg modelinde görünürlük faktörü katsayısı öneride olduğu gibi 0,002 olarak alınmıştır. Fakat en büyük fark değeri Berg modeli kullanıldığında ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni temelde Berg modelinde kullanılan LOS yol kaybı ifadesinin serbest uzay LOS yol kaybı ifadesine eşit olmasıdır. Ayrıca sonuçlardan görünürlük faktörü katsayısı '*s*' değerinin hücreye pek uygun olmadığı görülmüştür. ITU modeline göre Berg ve Masaharu Hata modellerinin fark değerleri daha fazla çıksa da Şekil 2.10'a bakıldığında bu modellerinde ölçüm sonuçlarıyla uyumlu bir eğri izlediği görülmektedir.



Şekil 2.10. TRBCA2 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması

2.3.2.2. TRMIG1 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleri ile Karşılaştırılması

TRMIG1 hücresi için ITU tarafından önerilen model, Masaharu Hata modeli ve Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar sırasıyla Tablo 2.13, Tablo 2.14 ve Tablo 2.15’de verilmiştir. Modellerin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 2.11’de gösterilmektedir.

Tablo 2.13. TRMIG1 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	ITU Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
ta7	70	83,767	81,103	2,664
tab	100	85,801	84,976	0,825
ta6	145	90,174	89,009	1,165
ta5	280	102,590	100,220	2,370
tac	310	103,527	101,989	1,538
ta4	425	108,512	107,470	1,042
ta3	565	113,180	112,416	0,764
Farkların Ortalaması				1,481

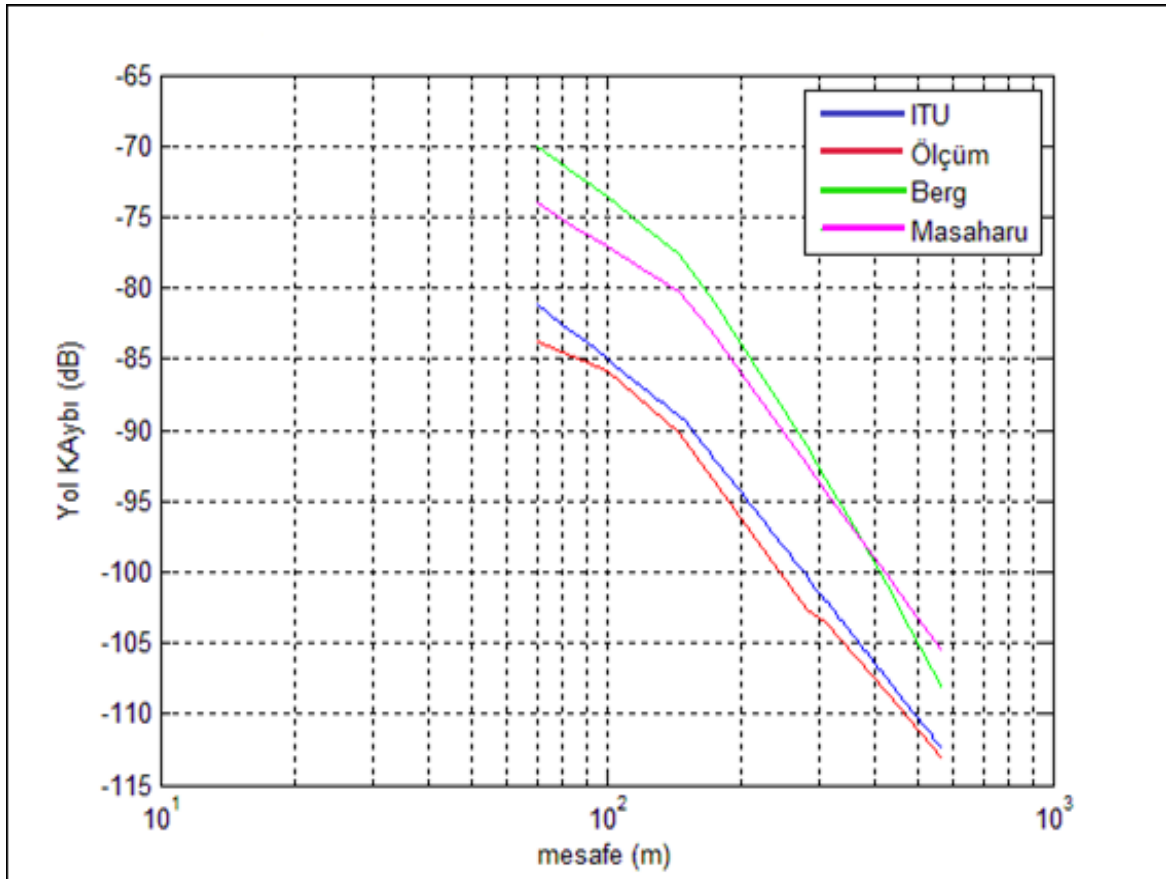
Tablo 2.14. TRMIG1 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Masaharu Hata Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
ta7	70	83,767	74,001	9,766
tab	100	85,801	77,105	8,696
ta6	145	90,174	80,332	9,842
ta5	280	102,590	92,364	10,226
tac	310	103,527	94,278	9,249
ta4	425	108,512	100,211	8,301
ta3	565	113,180	105,565	7,615
Farkların Ortalaması				9,099

Tablo 2.15. TRMIG1 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Berg Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
ta7	70	83,767	69,995	13,772
tab	100	85,801	73,614	12,187
ta6	145	90,174	77,623	12,551
ta5	280	102,590	91,105	11,485
tac	310	103,527	93,394	10,133
ta4	425	108,512	100,873	7,639
ta3	565	113,180	108,252	4,928
Farkların Ortalaması				10,385

TRMIG1 hücresi için yapılan yol kaybı hesapları sonucunda elde edilen ortalama fark değerleri ITU modeli için 1,481 dB, Masaharu Hata modeli için 9,099 dB ve Berg modeli için 10,385 dB olarak elde edilmiştir. TRMIG1 hücresi içinde en uygun modelin ITU modeli olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir. Masaharu Hata modeli ve Berg modeli için elde edilen fark değerleri ITU modeline göre oldukça büyük ve yaklaşık olarak birbirlerine eşit değerdedir. TRMIG1 hücresi için de Berg modelinde görünürlük faktörü katsayı öneride olduğu gibi 0,002 olarak alınmıştır. ITU modelinin oldukça uyumlu sonuçlar verdiği Şekil 2.11’de görülmektedir. Berg ve Masaharu Hata modellerinin fark değerleri fazla olsa da Şekil 2.11’e bakıldığında bu modellerinde ölçüm sonuçlarıyla uyumlu bir eğri izlediği görülmektedir.



Şekil 2.11. TRMIG1 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması

2.3.2.3. TRMIG2 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleriyle Karşılaştırılması

TRMIG2 hücresi için ITU tarafından önerilen model, Masaharu Hata modeli ve Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar sırasıyla Tablo 2.16, Tablo 2.17 ve Tablo 2.18’de verilmiştir. Modellerin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 2.12’de gösterilmektedir.

Tablo 2.16. TRMIG2 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	ITU Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
t12	30	80,273	77,007	3,266
ta8	40	81,010	80,130	0,880
t12	60	83,716	84,532	-0,816
t13	75	87,693	86,955	0,738
t14	90	88,386	88,935	-0,549
t15	100	89,930	90,499	-0,569
t16	130	93,893	95,056	-1,163
Farkların Ortalaması				0,255

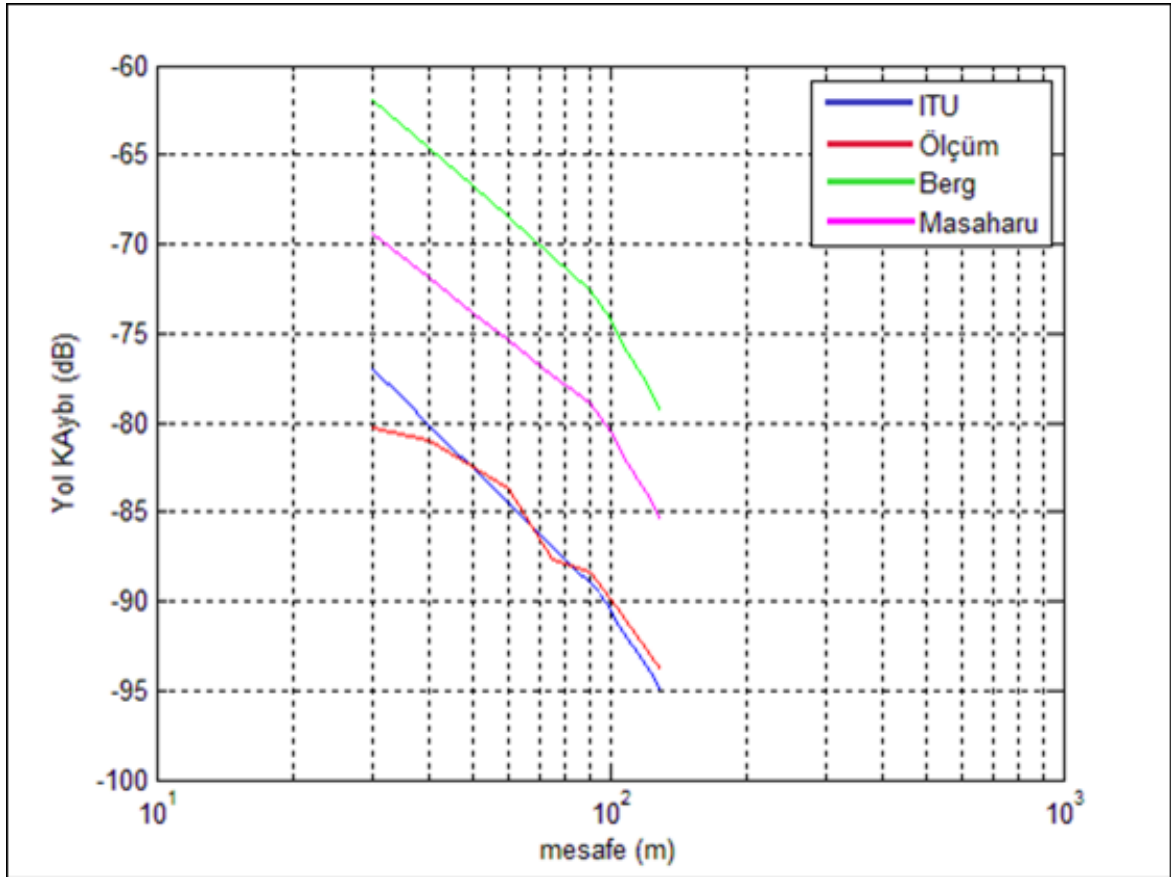
Tablo 2.17. TRMIG2 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Masaharu Hata Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
tl12	30	80,273	69,376	10,897
ta8	40	81,010	71,875	9,135
tl2	60	83,716	75,397	8,319
tl3	75	87,693	77,335	10,358
tl4	90	88,386	78,919	9,467
tl5	100	89,930	80,487	9,443
tl6	130	93,893	85,421	8,472
Farkların Ortalaması				9,442

Tablo 2.18. TRMIG2 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Berg Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
tl12	30	80,273	61,941	18,332
ta8	40	81,010	64,613	16,397
tl2	60	83,716	68,482	15,234
tl3	75	87,693	70,681	17,012
tl4	90	88,386	72,525	15,861
tl5	100	89,930	74,244	15,686
tl6	130	93,893	79,323	14,570
Farkların Ortalaması				16,156

TRMIG2 hücresi için yapılan yol kaybı hesapları sonucunda elde edilen ortalama fark değerleri ITU modeli için 0,225 dB, Masaharu Hata modeli için 9,442 dB ve Berg modeli için 16,156 dB olarak elde edilmiştir. TRMIG2 hücresi için de en uygun modelin ITU Modeli olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir. TRMIG2 hücresi için de Berg modelinde görünürlük faktörü katsayı öneride olduğu gibi 0,002 olarak alınmıştır. Her üç modelinde hem ölçüm sonuçlarıyla hem de kendi aralarında uyumlu bir değişim izlediği Şekil 2.12'de açıkça görülmektedir.



Şekil 2.12. TRMIG2 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması

2.3.2.4. TRMIG3 Hücresi İçin Ölçüm Sonuçlarının ITU, Berg ve Masaharu Hata Modelleriyle Karşılaştırılması

TRMIG3 hücresi için ITU tarafından önerilen model, Masaharu Hata modeli ve Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar sırasıyla Tablo 2.19, Tablo 2.20 ve Tablo 2.21’de verilmiştir. Modellerin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 2.13’te gösterilmektedir.

Tablo 2.19. TRMIG3 hücresi için ITU modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	ITU Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
tl1	55	82,227	78,485	3,742
ta9	75	85,632	81,852	3,780
tu5	105	86,799	85,505	1,294
tbb	130	88,932	87,824	1,108
tu1	160	92,307	90,449	1,858
tu2	220	96,999	96,031	0,968
tu3	300	99,717	101,419	-1,702
Farkların Ortalaması				1,578

Tablo 2.20. TRMIG3 hücresi için Masaharu Hata modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

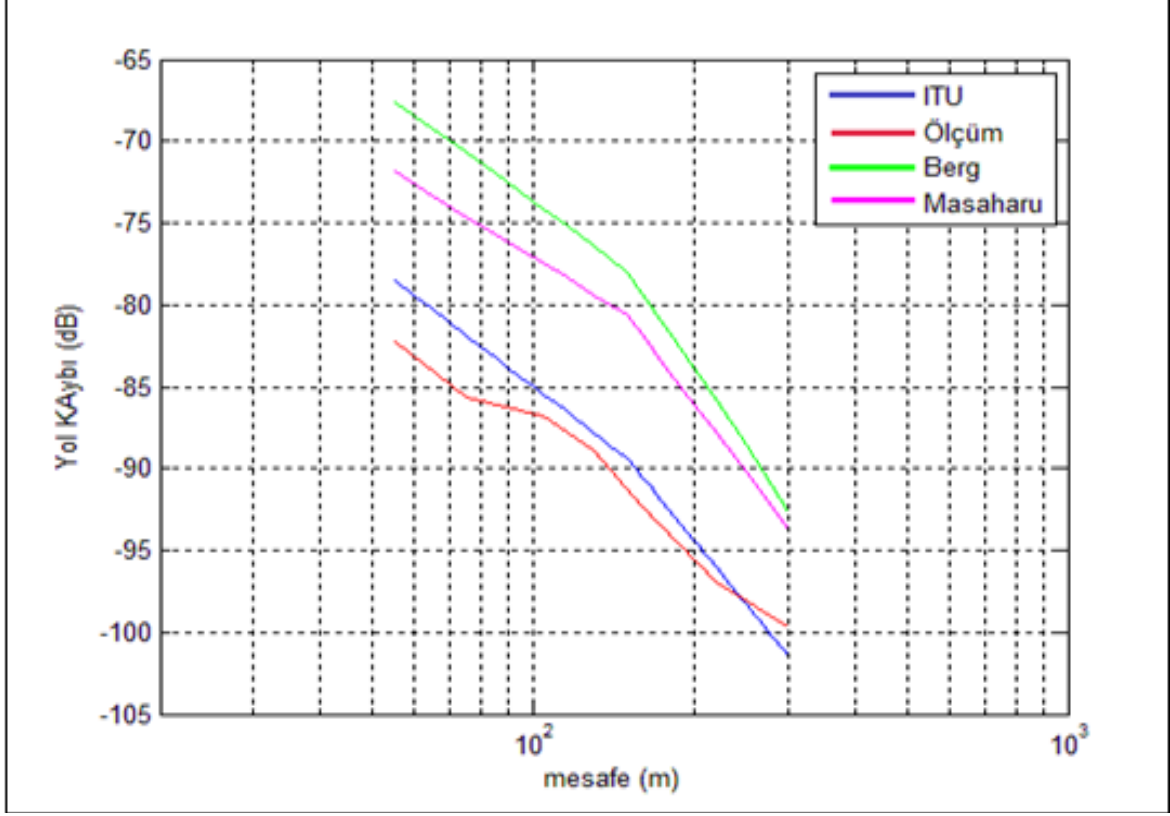
Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Masaharu Hata Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
tl1	55	82,227	71,914	10,313
ta9	75	85,632	74,625	11,007
tu5	105	86,799	77,578	9,221
Tbb	130	88,932	79,319	9,613
tu1	160	92,307	81,842	10,465
tu2	220	96,999	87,834	9,165
tu3	300	99,717	93,663	6,054
Farkların Ortalaması				9,405

Tablo 2.21. TRMIG3 hücresi için Berg modeli kullanılarak hesaplanan yol kaybı değerleri ve bu değerlerin ölçüm sonuçları ile arasındaki farklar.

Ölçüm Noktası	Uzaklık (m)	Ölçüm LOS Yol Kaybı (dB)	Berg Modeli LOS Yol Kaybı (dB)	Fark (dB)
tl1	55	82,227	67,639	14,588
ta9	75	85,632	70,672	14,960
tu5	105	86,799	74,135	12,664
Tbb	130	88,932	76,435	12,497
tu1	160	92,307	79,299	13,008
tu2	220	96,999	85,873	11,126
tu3	300	99,717	92,651	7,066
Farkların Ortalaması				12,273

TRMIG3 hücresi için yapılan yol kaybı hesapları sonucunda elde edilen ortalama fark değerleri ITU modeli için 1,578 dB, Masaharu Hata modeli için 9,405 dB ve Berg modeli için 12,273 dB olarak elde edilmiştir. TRMIG3 hücresi için de en uygun modelin ITU Modeli olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir. TRMIG3 hücresi için de Berg Modelinde görünürlülük faktörü katsayı öneride olduğu gibi 0,002 olarak alınmıştır. Her

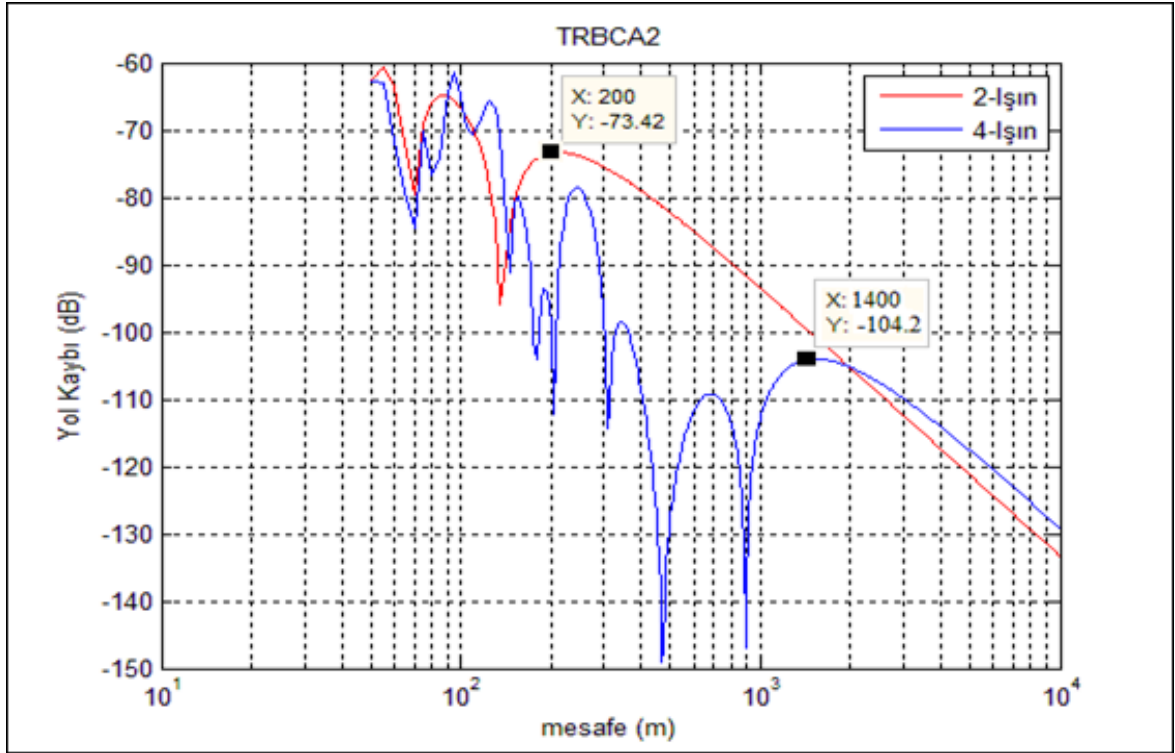
üç modelinde hem ölçüm sonuçlarıyla hem de kendi aralarında uyumlu bir değişim izlediği Şekil 2.13'te açıkça görülmektedir.



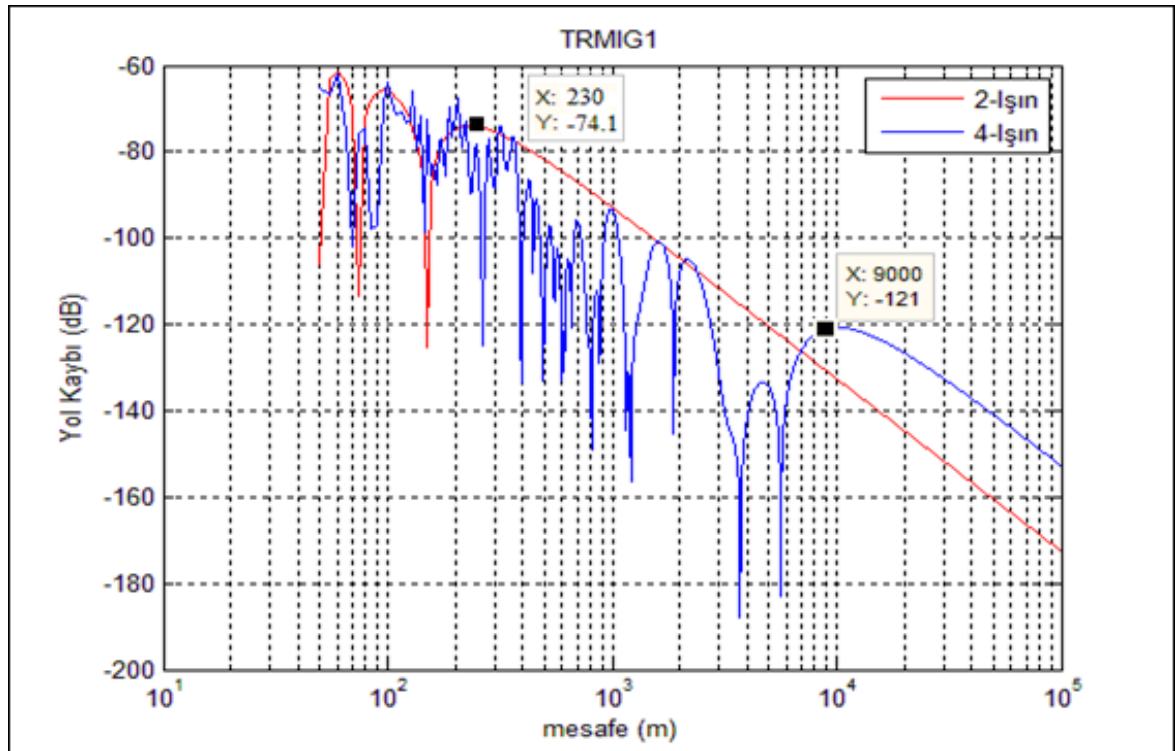
Şekil 2.13. TRMIG3 hücresi için yayılım modelleri ile ölçme sonuçlarının karşılaştırılması

2.3.2.5. TRBCA2, TRMIG1, TRMIG2 ve TRMIG3 Hücrelerine İki ve Dört Işın Modellerinin Uygulanması

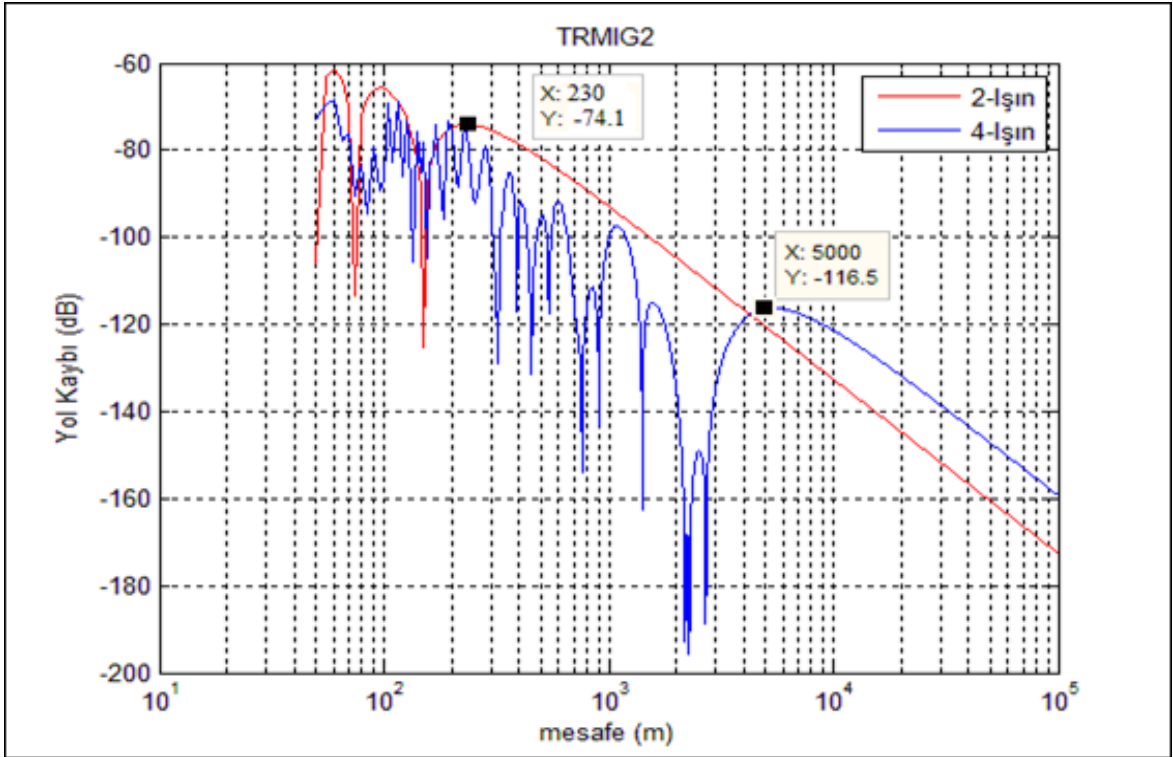
Çok ışın modelleri için hesaplama kolaylığı açısından ışın sayısı 2 ve 4 olarak seçilmiştir. Bölüm 1’de anlatılan İki Işın modelinde elde edilen faz farkı ifadesinin $\Delta\theta \ll 1$ radyan olduğu belirtilerek denklemdeki sinüslü ifade için $\sin^2\Delta\theta = \Delta\theta^2$ yaklaşımı yapılmıştır. Fakat baz istasyonu ve alıcı yüksekliğinin bina seviyesinin altında olduğu durumlarda $\Delta\theta \ll 1$ yaklaşımı ancak 1km mesafeden sonra geçerli olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada ölçüm yapılan güzergâh boyunca en uzak mesafe yaklaşık 600 metre olduğundan çok ışın modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlarda $\sin^2\Delta\theta = \Delta\theta^2$ yaklaşımı yapılmamıştır. TRBCA2, TRMIG1, TRMIG2 ve TRMIG3 hücreleri için iki ve dört ışın modelleri kullanılarak Matlab programında elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri sırasıyla Şekil 2.14, Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de verilmiştir.



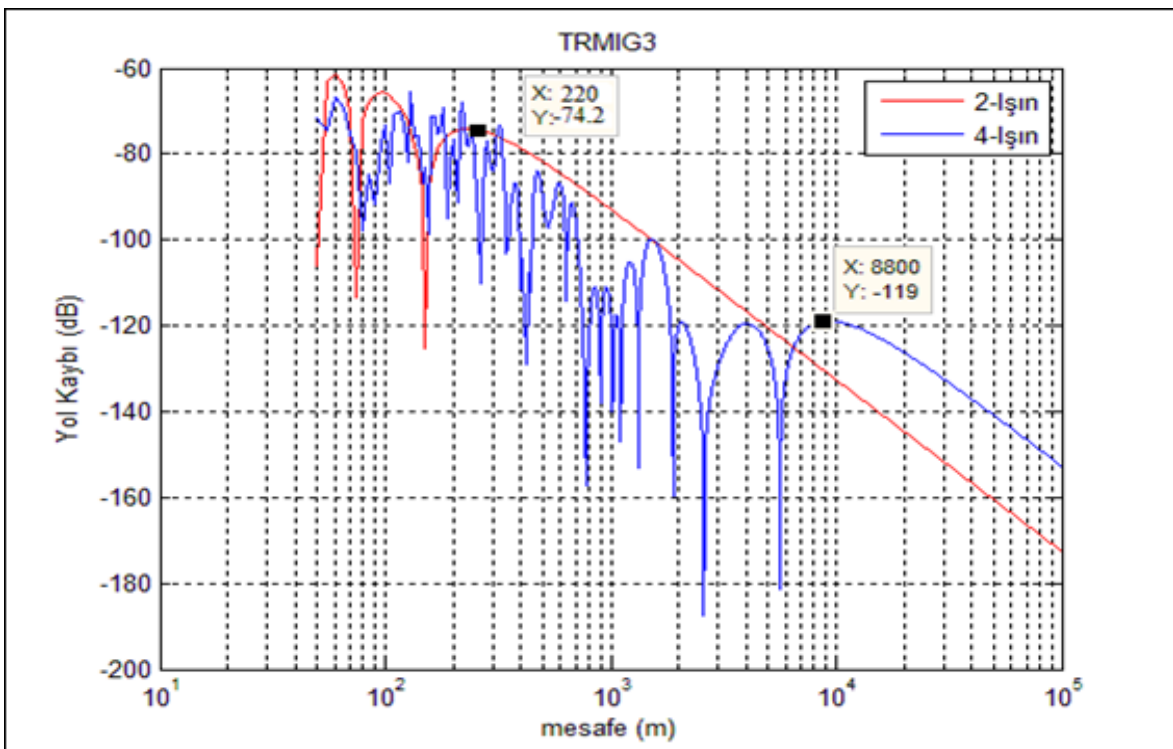
Şekil 2.14. TRBCA2 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri



Şekil 2.15. TRMIG1 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri



Şekil 2.16. TRMIG2 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri



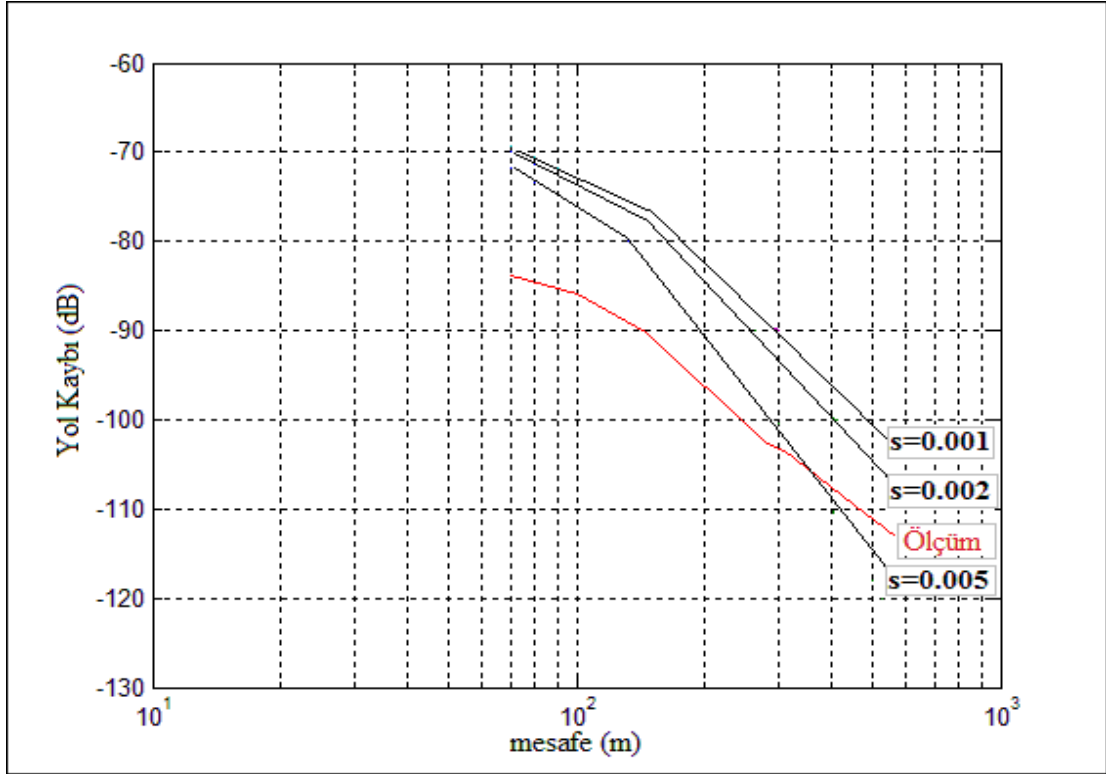
Şekil 2.17. TRMIG3 hücresi için İki ve Dört Işın modelleri kullanılarak elde edilen mesafeye bağlı yol kaybı grafikleri

İki ışın modelinde alıcıya direk ve yerden yansiyarak ulaşan iki dalga olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle caddelerin genişliği iki ışın modelinde önem arz etmemektedir. İki ışın modeli kullanılarak hücreler için elde edilen grafiklerde tüm hücrelere ait yol kaybı eğrilerinin yaklaşık 200 metre mesafeden sonra salınımlarının durduğu ve düzgün bir şekilde kayıpların arttığı grafiklerden görülmektedir. 200 metre mesafeye kadar salınımlara neden olması açısından iki ışın modelinin küçük hücrelerde ve kısa mesafelerde doğru sonuçlar vermeyeceği açıkça görülmüştür.

Dört ışın modelinde alıcıya ulaşan dalgaların sırasıyla; direk dalga, yerden yansıyan dalga, caddenin sağ ve sol tarafında bulunan yüksek bina duvarlarından yansiyarak alıcıya ulaşan iki dalga olduğu varsayılmaktadır. Yukarıdaki grafiklerde dört ışın modeli kullanılarak yapılan benzetim sonuçlarına bakıldığında ışın sayısı arttıkça salınımlarında artış gösterdiği ve daha uzak mesafelerde sönümlemeye başladığı görülmüştür. Dört ışın modelinde salınımların son bulunduğu ve eğrilerin düzgün bir şekilde ilerlediği noktalara bakıldığında yol kaybı değerlerinin iki ışın modeline göre daha az çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla ışın sayısı arttıkça kayıpların azalacağı da görülmektedir. Dört ışın modelinde caddenin her iki tarafında bulunan binalardan yansıyan dalgalar dikkate alındığından bu modelde yol kaybı hesaplamalarında cadde genişlikleri oldukça önemli bir etken olmaktadır. Dört ışın modeli kullanılarak elde edilen grafiklerde salınımların son bulunduğu noktalara bakıldığında cadde genişliklerinin önemi açıkça görülmektedir. Salınımların son bulunduğu noktalar TRBCA2 hücresi için 1,4 km, TRMIG1 hücresi için 9 km, TRMIG2 hücresi için 5 km ve TRMIG3 hücresi için 8,8 km olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerlere bakıldığında TRBCA2 hücresinde salınımların daha kısa mesafelerde son bulunduğu görülürken TRMIG1 hücresinde 9 km ye kadar çıktığı görülmektedir. Cadde genişliği TRBCA2 hücresinde 10 metre, TRMIG2 hücresinde 20 metre iken TRMIG1 ve TRMIG3 hücrelerinde 30 metredir. Buradan cadde genişliği arttıkça salınımların son bulunduğu mesafenin de arttığı açıkça görülmektedir. Dolayısıyla cadde dar bile olsa salınımların birkaç km mesafeden sonra son bulması modelin küçük hücreler için uygun bir model olmadığını göstermektedir.

2.3.3. Elde Edilen Sonuçlara Göre Modellerin Değerlendirilmesi

Modeller uygulanarak elde edilen grafiksel sonuçlara bakıldığında ölçüm yapılan dört farklı hücrede de en uygun modelin ITU modeli olduğu görülmektedir. Çok Işın modelleri, baz istasyonu yüksekliğinin bina seviyesi altında olduğu küçük hücreler ve 1 km'nin altındaki mesafeler için uygun sonuçlar vermemektedir. Ölçüm sonuçlarıyla arasındaki farkın en büyük olduğu model Berg modelidir. Berg modelinde kullanılan görünürlülük katsayısı 's' için önerilen 0,002 değerinin dışında farklı değerler kullanılarak ölçüm sonuçlarıyla arasındaki farkın değişip değişmediğine bakıldı. Şekil 2.18'de görünürlülük katsayısı değerleri 0,001, 0,002 ve 0,005 alınarak Berg modeli ve ölçüm sonuçları TRMIG1 hücresi için yeniden karşılaştırıldı. Görünürlülük katsayısı 0,001 olarak seçildiğinde farkın daha da arttığı görülmüştür. Görünürlülük katsayısı 0,005 olarak seçildiğinde farkın dengesiz olarak azaldığı ve ölçüm sonuçlarıyla uygun bir değişime sahip olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla Berg modeli, görünürlülük katsayısı değiştirilse de ölçümlerle uyumlu sonuçlar vermemektedir.



Şekil 2.18. Görünürlülük katsayısı değerleri değiştirilerek Berg modelinin ölçüm sonuçlarıyla grafiksel olarak karşılaştırılması

Masaharu Hata modelinde dört hücre için de elde edilen fark değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Masaharu Hata modelinde frekansa bağlı kayıp faktörü 'Floss' değerinin belirlenmesi için elde edilen bu fark değerleri kullanılabilir. Modeller kullanılarak dört hücre için de hesaplanan fark ve standart sapma değerleri Tablo 2.22'de verilmektedir.

Tablo 2.22. Hücreler için hesaplanan fark ve standart sapma değerleri

Hücre Adı		ITU Modeli	BERG Modeli	Masaharu Hata Modeli
TRBCA2	Ortalama Fark (dB)	0,878	16,398	5,276
	Standart Sapma	1,751	2,158	1,683
TRMIG1	Ortalama Fark (dB)	1,481	10,385	9,099
	Standart Sapma	0,756	3,109	0,939
TRMIG2	Ortalama Fark (dB)	0,225	16,156	9,442
	Standart Sapma	1,537	1,238	0,936
TRMIG3	Ortalama Fark (dB)	1,578	12,273	9,405
	Standart Sapma	1,873	2,638	1,627

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Günümüzde haberleşme teknolojisinin hızla gelişmesine ve kullanıcı taleplerinin gün geçtikçe artmasına paralel olarak yeni kablosuz haberleşme sistemleri kurulmaya devam etmektedir. Özellikle kentsel alanlarda kullanıcıların yoğun olduğu bölgelerde artan talepleri karşılamak amacıyla yeni mikro hücresel sistemler kurulmaktadır. Kurulan bu sistemler işletilmeye başlamadan önce teorik olarak denenmekte ve en uygun parametreler belirlenerek hizmete açılmaktadır. Bu amaçla birçok yayılım ve tahmin yöntemi kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında verici yüksekliğinin ortalama bina seviyesinin altında olduğu mikro hücreler için önerilen tahmin modelleri ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Trabzon il merkezinde yerleşimin yoğun olduğu birçok bölgede farklı frekans bantları için ortalama elektrik alan şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerlerin sınır değerleri aşmadığı görülmüştür. Baz istasyonu yüksekliğinin bina seviyesinin altında olduğu mikro hücrelerde, genellikle sokak lambası şeklinde giydirme yapılmış baz istasyonları cadde seviyesine çok daha yakın olduğundan bu tip hücrelerin yakınında elde edilen ölçme sonuçlarının, baz istasyonunun bina çatısında bulunduğu bölgelerden daha yüksek değerde çıktığı görülmüştür.

Mikro hücreler için önerilen ITU modeli, Berg modeli, Masaharu Hata modeli ve Çok Işın modelleri kullanılarak hücreler için LOS yol kaybı değerleri elde edilmiş ve ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Öncelikle doğru sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla modellerde kullanılan kırılma noktası mesafeleri ölçüm sonuçları yardımıyla elde edilmiş ve kırılma noktası mesafesini baskın bir şekilde değiştiren etken bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 900 MHz bandında kırılma noktası mesafesini baskın olarak değiştiren etkenin yolun eğimi olduğu sonucuna varılmıştır. Rampa şeklinde bir yapıya sahip olan caddeler için kırılma noktası katsayısının 4 yerine 2,5 olarak alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca 900MHz bandında ölçüm yapılan bölgede cadde genişliğinin, araç ve yaya yoğunluğunun, trafik ışıkları, tabela ve levha gibi engellerin kırılma noktası mesafesi üzerinde bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

ITU modeli, Berg modeli ve Masaharu Hata modeli Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekillere bakıldığında bu üç modelin de ölçüm sonuçlarıyla uyumlu eğrilere sahip olduğu görülmüştür. Tablo 2.10, Tablo 2.13, Tablo 2.16 ve Tablo 2.19'da hücreler için ölçüm sonuçları ITU modeli kullanılarak elde

edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hem tablo hem de şekillere bakıldığında ITU tarafından önerilen modelin 900 MHz bandında mikro hücreler için oldukça doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tablo 2.11, Tablo 2.14, Tablo 2.17 ve Tablo 2.20’de Masaharu Hata modeli yardımıyla elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekillere bakıldığında model yardımıyla elde edilen sonuçların ölçüm sonuçlarıyla uyumlu bir eğriye sahip olduğu görülmüştür fakat ‘Floss’ katsayısının belirsiz olması nedeniyle ölçüm sonuçları ve model yardımıyla elde edilen sonuçlar arasında yaklaşık 9dB gibi bir fark elde edilmiştir.

Tablo 2.12, Tablo 2.15, Tablo 2.18 ve Tablo 2.21’de Berg modeli yardımıyla elde edilen sonuçlara bakıldığında en büyük fark değerlerinin bu model kullanıldığında elde edildiği görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına daha yakın değerler elde edilebilmek amacıyla Berg modelinde kullanılan görünürlülük katsayısı değiştirilerek yeniden hesaplama yapılmış ve farklı katsayılar için Şekil 2.18’deki grafik elde edilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında görünürlülük katsayısı değiştirilse de ölçüm sonuçlarıyla uygun bir eğri elde edilemeyeceği görülmüştür.

Çok ışın modelinin değerlendirilmesinde hesap kolaylığı açısından ışın sayısı iki ve dört olarak seçilmiştir. İki ışın ve dört ışın modeli kullanılarak elde edilen yol kaybı grafikleri Şekil 2.14, Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 17’de verilmiştir. Şekillere bakıldığında çok ışın modelleri kullanılarak elde edilen yol kaybı eğrilerinin 1km’den daha kısa mesafelerde, ışınlar arasında oluşan faz farkından dolayı salınım yaptığı ve doğru sonuçlar vermediği görülmektedir. Dört ışın modelinin daha fazla salınımına sebep olması ışın sayısı arttıkça salınımların da artacağını göstermiştir. Ayrıca her bir hücre için dört ışın modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında cadde genişliği arttıkça salınımlarında arttığı ve daha uzak mesafelerde son bulunduğu görülmüştür. İki ışın modelinde yaklaşık 220 metre ve dört ışın modelinde yaklaşık 1km’ye kadar salınım olduğundan kısa mesafelerde bu modeller uygun sonuçlar vermemektedir.

Sonuç olarak yapılan bu tez çalışmasında kırılma noktası mesafesi doğru olarak belirlendiğinde, 900 MHz bandında direk görüş hattının olduğu koşullarda en iyi ve en doğru sonuçların ITU modeliyle elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

4. ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışması sonucunda 900 MHz bandında mikro hücreler için en uygun modelin ITU modeli olduğu sonucuna varılmıştır. ITU modeli yol kaybı hesaplamalarında çok az veriye ihtiyaç duyması, hesaplamalar açısından oldukça kolay ve basit olması, ayrıca farklı özelliğe sahip her tür mikro hücrede uygun ve doğru sonuçlar vermesi açısından LOS yol kaybı tahmin hesaplamalarında öncelikli olarak kullanılabilir.

Mikro hücreler için yapılan ölçümler ve değerlendirmeler 900 MHz bandında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla farklı frekans bantlarında LOS ölçümleri gerçekleştirilerek modellerin tutarlılığı ve ölçümlerle uygunluğu o frekans bantları için de belirlenebilir. Ayrıca farklı frekans bantlarında yapılacak olan ölçümlerle, Masaharu Hata modelindeki frekansa bağlı kayıp faktörü 'Floss' değeri bu çalışmada elde edilen fark değerlerinden de yararlanılarak frekansa bağlı bir katsayı olarak belirlenebilir.

Ölçüm yapılan hücrelerde düz caddeler için kırılma noktası mesafesi katsayısı değişmezken rampa şeklinde eğimli caddelere sahip olan hücrelerde 900 MHz bandına kırılma noktası katsayısı 2,5 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada ölçüm yapılan rampa şeklindeki iki ayrı caddede de baz istasyonları cadde eğiminin başladığı yani yokuşun başladığı noktalara konumlandırılmıştır. Rampa şeklindeki caddelerde baz istasyonu konumunun bu konumdan farklı olduğu durumlarda kırılma noktası katsayısını 2,5 olarak almak yanlış sonuçlara sebep olabilir. Baz istasyonunun rampanın başında ya da sonunda yani yokuşun başında ya da sonunda olması kırılma noktası mesafesini değiştirebilir. Bu nedenle baz istasyonunun rampanın yukarısına konumlandırıldığı ve yokuş aşağı yayın yaptığı hücrelerde ölçümler gerçekleştirilerek kırılma noktası mesafesinin değişimi bu durum için incelenebilir.

Bu çalışma ile modellerin LOS koşullarında elde edilen sonuçları ve bu sonuçlara dayanılarak sunulan öneriler ve geliştirilen yorumlar dikkate alınarak NLOS koşullarında da ölçümler yapılabilir ve modeller karşılaştırılıp yeni öneriler sunulabilir.

GSM 900 MHz-1800 MHz, UMTS 2 GHz, FM, VHF ve UHF bantlarında Trabzon il merkezi çapında yoğunluğun fazla olduğu bölgelerde gerçekleştirilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçümleri Yenicuma Mah., Yenimahalle Mah., Erdoğan Mah., Gazipaşa Mah., Boztepe Mah. gibi yerleşimlerin yoğun olduğu diğer bölgelerde de gerçekleştirilerek veri sayısı artırılabilir ve il merkezinin elektrik alan dağılım haritası çıkartılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Ericsson Radio Systems AB, GSM System Survey, EN/LTZ 123 3321 R2A,1998.
2. A.R. Mishra, Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation 2G/ 2.5G/ 3G Evolution to 4G, John Wiley & Sons Ltd., England, 2004
3. Turkcell Akademi, GSM Gelişim Programı Eğitim Dokümanı, İstanbul, 2007.
4. On Attack Causality in Internet-Connected Cellular Networks <http://www.usenix.org/>, 28 Mart 2011.
5. Pak, N. K., Elektromanyetik Dalgalar ve İnsan Sağlığı Sıkça Sorulan Sorular ve Yanıtları, Tübitak-Bilten, Ankara, 2001.
6. Işık, A. H., GSM Sisteminde Hücre Planlamasının Bulanık Mantık ile Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
7. Rec. ITU-R P.1411-1, Propagation Data and Prediction Methods for Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in The Frequency Range 300 MHz to 100 GHz, Geneva, October, 1999.
8. T.C. MEB, Kablosuz Ağ Sistemleri Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara, 2007.
9. Han, A., Binaların ve Arazi Yapısının Kentsel Bölgelerdeki Kablosuz Haberleşmede Oluşan Yol Kayıplarına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
10. Willis, M., Mobile Systems Course Notes, <http://www.mike-willis.com/Tutorial/MP.pdf> 20 Mart 2011.
11. Deminco, N., Propagation Loss Prediction Considerations for Close-In Distances and Low-Antenna Height Applications, NTIA Report TR-07-449, July, 2007.
12. Cora, A., Hareketli Radyo Yayılımı, Gezgin Yer İletişimi Ders Notları, KTÜ, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, 2008.
13. NAVY, Introduction to Wave Propagation, Transmission Lines and Antennas, Electricity and Electronics Training Series, September, 1998.
14. Basic Antenna Principles for Mobile Communications, <http://www.kathrein.de/en/mcs/techn-infos/index.htm>, 25 Ocak 2011.

15. Base Station Antennas
<http://www.larsen-antennas.com/docfiles/ASB10/BaseStationAntennas.pdf>,
10 Şubat 2011.
16. Proakis, J. G., Communication Systems Engineering, Second Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
17. Hiroyuki, A., Measurement of Mobile Antenna Systems, Artech House, Boston London, 2001.
18. Hata, M., Propagation Loss Prediction Models for Land Mobile Communications, ICMMT'98, November 1998, Kanawaga, 15-18.
19. AWE Communications, An Introduction to the Urban Dominant Path Prediction Model, Böblingen, November, 2006.
20. Fontan, F. P. and Espineira, P. M., Modeling the Wireless Propagation Channel, Wiley, Chichester, 2008.
21. Struzak, R., Radio-Wave Propagation Basics, ICTP-ITU-URSI, Trieste, February 2007.
22. Andersen, J. B., Rappaport, T. S. and Yoshida, S., Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels, IEEE Communication Magazine, January, 1995, 42-49.
23. Ghoraishi, M., Takada, J. and Imai, T., Identification of Scattering Objects in Microcell Urban Mobile Propagation Channel, IEEE Trans. on A. P., 54/11, November, 2006, 3473-3480.
24. Sevgi, L., Haberleşme Sistemleri ve Elektromanyetik Dalga Yayılımı, Endüstriyel&Otomasyon, Ağustos, 2004.
25. Berg, J. E., A Recursive Method for Street Microcell Path Loss Calculation, PIMRC'95, Toronto, September, 1995, 140-143.
26. IEEE C802, Below Rooftop Path Loss Model, IEEE C802.16j-06/010, Tel Aviv, May, 2006
27. Kang, S. and Tzaras, C., A Recursive Street Canyon Model for Low Height Terminal System, PIERS, 3/7, March, 2007.
28. Goldsmith, A., Wireless Communications, Cambridge University Press, New York, 2005.
29. Bertoni, H. L., Spherical Waves and Radiation, Polytechnic University, 2002.

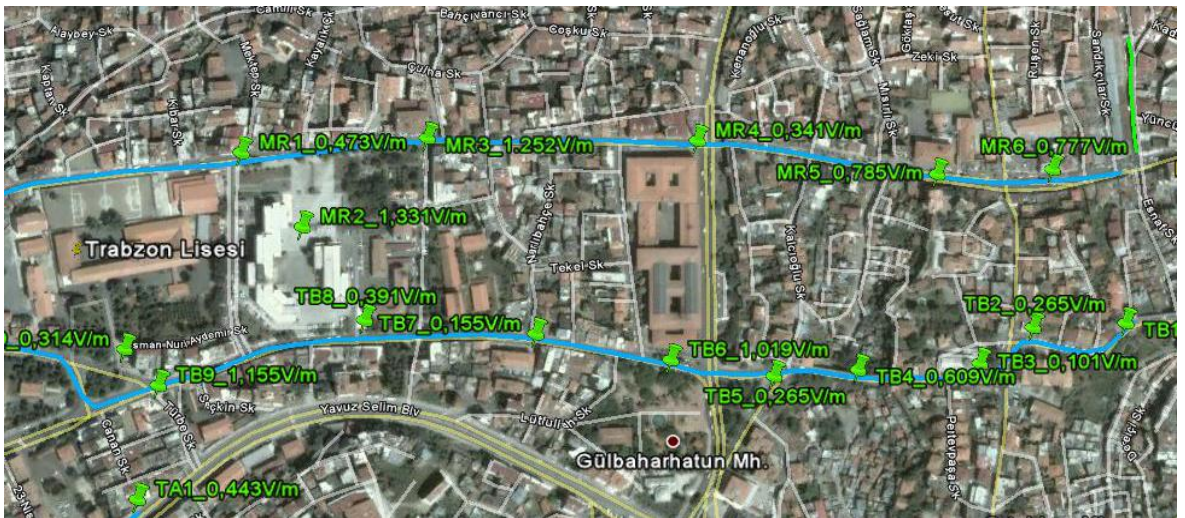
30. NARDA, Antenna Parameters: Antenna Gain, Directivity and Conversion Factor, Application Note, Pfullingen, Deutschland, 2008.
31. Propagation of Radio Waves,
http://www.dipolnet.com/self-help_book_for_wlan_installers-providers_bib86.htm, 25 Mart 2011.

6. EKLER

Ek 1. Trabzon İl Merkezinde Yapılan Ortalama Elektrik Şiddeti Ölçme Sonuçlarının Haritalar Üzerinde Gösterimi



Ek Şekil 1. Tanjant ve Devlet Sahil Yolu arasında bulunan bölgede GSM 900MHZ bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



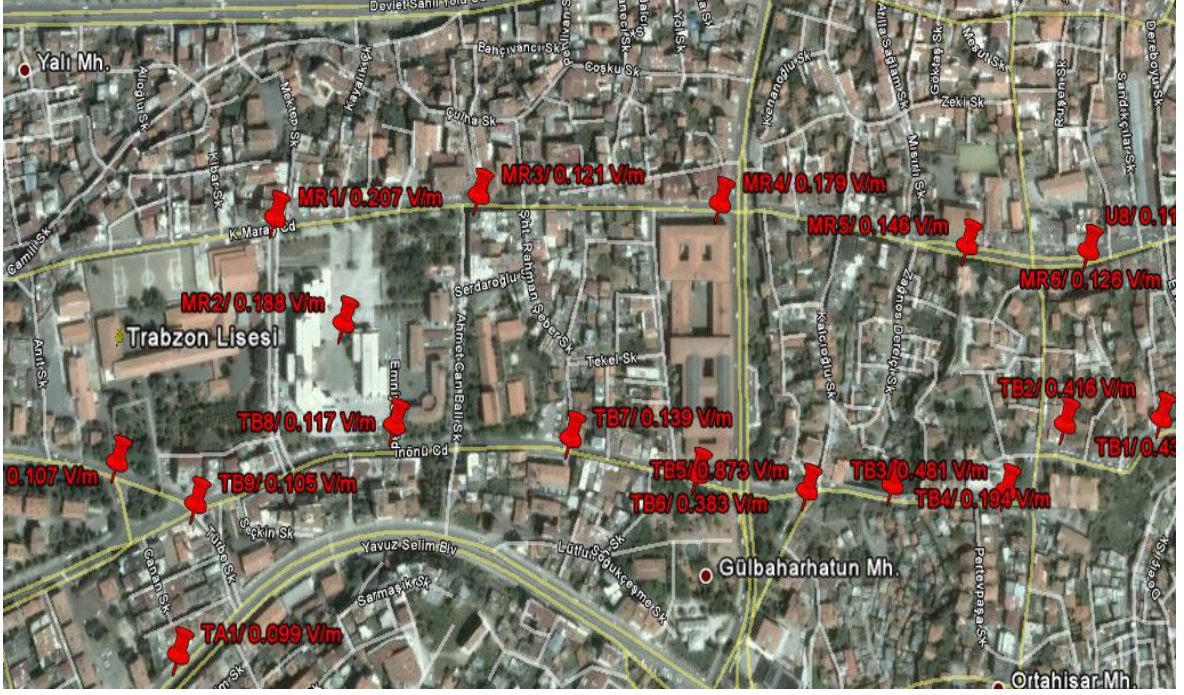
Ek Şekil 2. Maraş Caddesi ve İnönü Caddesi boyunca GSM 900MHZ bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



Ek Şekil 3. Yavuz Selim Bulvarı ve İnönü Caddesi boyunca GSM 900 MHz bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



Ek Şekil 4. Tanjant ve Devlet Sahil Yolu arasında bulunan bölge civarında FM, VHF ve UHF bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



Ek Şekil 5. Maraş Caddesi ve İnönü Caddesi boyunca FM, VHF ve UHF bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



Ek Şekil 6. Yavuz Selim Bulvarı boyunca FM, VHF ve UHF bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



Ek Şekil 7. Tanjant ve Devlet Sahil Yolu arasında bulunan bölge civarında 2GHz bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



Ek Şekil 8. Maraş Caddesi ve İnönü Caddesi boyunca 2GHz bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi



Ek Şekil 9. Yavuz Selim Bulvarı ve İnönü Caddesi boyunca 2GHz bandında elde edilen ortalama elektrik alan şiddeti ölçüm değerlerinin harita üzerinde gösterimi

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Trabzon'da doğdu. Lise öğrenimini, 2002 yılında Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Lisans Program'ına başladı ve 2008 yılında Lisans Programı'nı tamamladı. 2008 yılı güz döneminde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Program'ına başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.