

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON

Bu belge güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Doğrulama Kod: F87D7131-E895-450A-B529-D1F5DF4C39EF

Doğrulama Adres: <https://www.turkiye.gov.tr/karadeniz-teknik-universitesi-ebys>





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon



ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Burada sunulan çalışmanın, 5G teknolojisindeki hücre yapılarının milimetre dalga frekanslarında daha iyi anlaşılması konusunda yapılacak çalışmalara yardımcı olmasını diliyorum.

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasından sonuçlarının değerlendirilmesine ve en uygun hale getirilmesine kadar benden yardımlarını ve önerilerini esirgemeyen tez danışmanı sayın Prof. Dr. Salim KAHVECİ'ye ve her zaman bana destek olan aileme teşekkür ederim.

Ahmet ÇİL

TRABZON 2021



TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “5G Ağ Haberleşmesindeki Hücre Yapılarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Salim KAHVECİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/01/2021

Ahmet ÇİL



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. 1G Teknolojisi	3
1.3. 2G Teknolojisi	4
1.4. 3G Teknolojisi	7
1.5. 4G Teknolojisi	10
1.6. 5G Teknolojisi	12
1.7. Milimetre Dalga	17
1.8. Milimetre Dalgadaki Sönümlenmeler.....	18
1.8.1. Atmosferik Sönümlenme	18
1.8.2. Yağmur Sönümlenme	21
1.8.3. Malzeme Sönümlenme.....	22
1.8.3.1. O2I Penetrasyon Kaybı.....	23
1.8.4. Yeşillik Kaybı	26
1.9. Baz İstasyonu ve Hücre	27
1.9.1. Çok Yönlü Baz İstasyonu	28
1.9.2. Yönlü Baz İstasyonu	29
1.10. 5G’de Baz İstasyonu	30
1.11. Baz İstasyonu (Hücre) Yerleşim Planlaması	31



1.12.	Frekans Planlama	32
1.13.	Hücresel Ağlar	35
1.14.	Baz İstasyonu Kanal Kapasitesi Hesabı.....	38
1.15.	Spektral Verimlilik	41
1.16.	Enerji Verimliliği	43
1.17.	5G’de Hücresel Ağ Yapısı	44
1.17.1.	Makro Hücre	45
1.17.1.1.	Kırsal Makro Hücre	46
1.17.1.2.	Kentsel Makro Hücre	47
1.17.2.	Mikro Hücre.....	48
1.17.3.	Piko Hücre	49
1.17.4.	Femto Hücre.....	49
1.18.	Yığın MIMO	52
1.19.	Yol Kaybı Tanımı	53
1.20.	Yol Kaybı Matematiksel Modelleri	54
1.20.1.	ABG Yol Kayıp Modeli.....	55
1.20.2.	Close-in Yol Kayıp Modeli.....	55
1.21.	Kanal Modeller	56
1.21.1.	3GPP 3D Model.....	57
1.21.2.	5GCM	57
1.21.3.	METIS.....	57
1.21.4.	mmMAGIC Model.....	57
1.21.5.	ITU-R.....	58
1.21.6.	NYU-Wireless.....	58
1.21.7.	IEEE.....	58
1.22.	Alınan Sinyal Gücü.....	58
1.23.	Alicı Hassasiyeti	59
1.24.	Kırılma Noktası.....	59
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA	61
2.1.	Hücre Tipleri İçin Senaryo Oluşturma.....	61
2.2.	Kırsal Makro Hücre İncelemesi	65
2.2.1.	RMa Hücre İçin Senaryo Ortamı	65
2.2.2.	RMa Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi	67



2.2.3.	RMa Hücre İçin LOS +P Durumu İncelemesi	71
2.2.4.	RMa Hücre İçin NLOS Durumu İncelemesi.....	73
2.3.	Kentsel Makro Hücre İncelemesi.....	77
2.3.1.	UMa Hücre İçin Senaryo Ortamı	77
2.3.2.	UMa Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi	80
2.3.3.	UMa Hücre için NLOS Durumu İncelemesi.....	82
2.3.4.	UMa Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme	85
2.4.	Kentsel Mikro Hücre İncelemesi	86
2.4.1.	UMi Hücre İçin Senaryo Ortamı.....	86
2.4.2.	UMi Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi.....	88
2.4.3.	UMi Hücre İçin NLOS Durumu İncelemesi	90
2.4.4.	UMi Hücre İncelemesi için Sonuç ve Değerlendirme	92
2.5.	İç Mekân Hücre-AVM İncelemesi.....	93
2.5.1.	Piko Hücre İçin Senaryo Ortamı.....	93
2.5.2.	Piko Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi	96
2.5.3.	Piko Hücre İçin NLOS Durumu İncelemesi	98
2.5.4.	Piko Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme	100
2.6.	İç Mekân – Ofis / Ev Hücre İncelemesi.....	101
2.6.1.	Femto Hücre İçin Senaryo Ortamı	101
2.6.2.	Femto Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi	104
2.6.3.	Femto Hücre İçin LOS+P Durumu İncelemesi.....	106
2.6.4.	Femto Hücre İçin NLOS Durumu İncelemesi	108
2.6.5.	Femto Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme	111
3.	SONUÇLAR	112
4.	ÖNERİLER.....	114
5.	KAYNAKÇA.....	115

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

5G AĞ HABERLEŞMESİNDEKİ HÜCRE YAPILARININ İNCELENMESİ

Ahmet ÇİL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Salim KAHVECİ
2020, 121 Sayfa

Küresel mobil ağ trafiğinde gittikçe artan yüksek hız ve yüksek veri ihtiyacının yanında yeni nesil teknolojilerin ihtiyaçlarını da karşılaması için 2020 yılında geçmeyi planladığımız 5G teknolojisi, sağladığı yüksek frekans nedeniyle tüm bu beklentileri kendinden önceki 4.5G'ye oranla çok daha iyi karşılayabilecek yapıdadır. Bu yüksek frekanslar ise milimetre dalga bantları olarak anılmaktadır. Bu dalga boyundaki frekanslar yüksek hız ve bant genişliği gibi avantajlar sağlasa da yüksek sönmüleme etkisi nedeniyle de dezavantajlı bir dalga boyudur. Bu yüksek sönmüleme etkisini azaltıp verimi artırabilmek için bu dalga boyundaki frekansların yayılım etkilerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bunun için 5G ağ haberleşmesindeki hücre yapılarına odaklanmak gerekmektedir. Bu hücre yapıları kurulum amacı, kapasite ihtiyacı ve kapsama alanı gibi etkilere göre genel olarak Makro, Mikro, Piko ve Femto gibi isimler ile adlandırılmaktadır. Çalışmamızda bu önemli yapıların her birinin genel özelliklerine değindikten sonra, kurulum yeri ve amacına uygun olarak tasarladığımız senaryo ortamlarında farklı çalışma gruplarının kanal modellerini de kullanarak hem bu yapıların yaydığı sinyallerin yayılım etkilerini hem de bu kanal modellerin karşılaştırmaları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 5G, Hücre, Kanal Modeli, Makro, Mikro, Piko, Femto, Milimetre Dalga



Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF CELL STRUCTURES IN 5G NETWORK COMMUNICATION

Ahmet ÇİL

Karadeniz Technical University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Electrical-Electronics Engineering Graduate Program

Supervisor: Professor Salim KAHVECİ

2020, 121 Pages

In addition to the ever-increasing high speed and high data needs in global mobile network traffic, the 5G technology, which we are planning to pass in 2020 to meet the needs of new generation technologies, has a structure that can meet all these expectations much better than the previous 4.5G due to the high frequency it provides. These high frequencies are referred to as millimeter wave bands. Although frequencies in this wavelength provide advantages such as high speed and bandwidth, it is also a disadvantageous wavelength due to its high damping effect. In order to reduce this high damping effect and increase efficiency, the propagation effects of frequencies at this wavelength should be well known. For this, it is necessary to focus on the cell structures in 5G network communication. These cell structures are generally named with names such as Macro, Micro, Piko and Femto according to the effects such as the purpose of the installation, capacity requirement and coverage area. After mentioning the general features of each of these important structures in our study, using the channel models of different working groups in the scenario environments we designed in accordance with the installation location and purpose, both the propagation effects of the signals emitted by these structures and the comparisons of these channel models are shown.

Key Words: 5G, Cell, Channel Model, Macro, Micro, Piko, Femto, Millimeter Wave



ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. 5G'nin 4.5G'ye oranla getireceği değişimleri gösteren şema.	13
Şekil 2. Spesifik sönümlenmenin frekansa bağlı değişimi.	19
Şekil 3. 50-70 GHz arası rakıma bağlı spesifik sönümlenme değerleri	20
Şekil 4. Frekans ve yağmur şiddetine bağlı sönümlenme etkisi.....	21
Şekil 5. 3GPP O2I modellerin frekansa bağlı kayıp değerleri	24
Şekil 6. Cam, beton ve kapı için milimetre dalgadaki penetrasyon ölçümü	25
Şekil 7. Yeşillik sönümlenme ölçüm sonuçları – Samsung	26
Şekil 8. Çok yönlü baz istasyonunun teorik ve gerçekteki kapsama alanı gösterimi.....	28
Şekil 9. Yönlü ve eğimli baz istasyonu anten örneği	29
Şekil 10. Yönlü ışınım yapan antenlerin sektör bazlı teorik ve gerçekteki gösterimi	30
Şekil 11. Frekans planlama teorik gösterimi	33
Şekil 12. Hücre kenarında bir kullanıcı (UE) gösterimi.....	33
Şekil 13. Temsili olarak aynı alan içindeki 5G ve 4G hücre sayısı gösterimi.....	35
Şekil 14. Temsili hücresel ağ mimarisi	36
Şekil 15. Tek bir NR kanal için kaynak blokları ve kanal bant genişliği tanımı.....	39
Şekil 16. Çatı görevi yapan makro hücrenin temsili gösterimi	45
Şekil 17. Gerçek bir kırsal makro hücre yapısı örneği.	47
Şekil 18. BS ve UE arasındaki mesafe gösterimi	63
Şekil 19. Kırsal Makro Hücre için düzenli ve sıralı binalardan oluşan senaryo ortamı	65
Şekil 20. RMa Hücre'nin 3 farklı durum için temsili senaryo gösterimi	66
Şekil 21. RMa Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ).....	68
Şekil 22. RMa Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)	69
Şekil 23. RMa Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ).....	70
Şekil 24. RMa Hücre LOS+P için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ)	71
Şekil 25. RMa Hücre LOS+P için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ).....	72
Şekil 26. RMa Hücre LOS+P için spektral verimliliği (sol), enerji verimliliği (sağ)	73
Şekil 27. RMa Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ).....	74
Şekil 28. RMa Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)	74
Şekil 29. RMa Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)	75



Şekil 30. Kentsel Makro Hücre senaryosu için temsili gösterim	77
Şekil 31. Kentsel Makro Hücre senaryosu üstten görünüm	78
Şekil 32. UMa Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ).....	80
Şekil 33. UMa Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ).....	81
Şekil 34. UMa Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ).....	82
Şekil 35. UMa Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ).....	83
Şekil 36. UMa Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)	83
Şekil 37. UMa Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ).....	84
Şekil 38. UMi Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE ’de alınan sinyal gücü (sağ)	88
Şekil 39. UMi Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ).....	89
Şekil 40. UMi Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)	89
Şekil 41. UMi Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE ’de alınan sinyal gücü (sağ)	90
Şekil 42. UMi Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ).....	91
Şekil 43. UMi Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)	92
Şekil 44. Temsili AVM ortamı ve Piko Hücre yerleşimi	94
Şekil 45. Piko Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)	96
Şekil 46. Piko Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ).....	97
Şekil 47. Piko Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)	98
Şekil 48. Piko Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)	98
Şekil 49. Piko Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ).....	99
Şekil 50. Piko Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ).....	100
Şekil 51. Senaryoda Femto Hücre’nin ofis/ev ortamındaki yan ve üstten gösterimi	102
Şekil 52. Femto Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)	104
Şekil 53. Femto Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ).....	105
Şekil 54. Femto Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ).....	105
Şekil 55. Femto Hücre LOS+P için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ).....	106
Şekil 56. Femto Hücre LOS+P için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)	107
Şekil 57. Femto Hücre LOS+P için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği	108
Şekil 58. Femto Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ).....	109
Şekil 59. Femto Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)	110
Şekil 60. Femto Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği.....	110



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 1G Teknolojisinin teknik özellikleri	4
Tablo 2. 2G teknolojisinin teknik özellikleri.....	6
Tablo 3. 3G teknolojisinin teknik özellikleri.....	9
Tablo 4. 4G teknolojisinin teknik özellikleri.....	12
Tablo 5. 5G için tanımlı bazı frekanslar	15
Tablo 6. 3GPP tarafından tanımlanan frekans aralıkları	15
Tablo 7. 5G’de desteklenen modülasyon şeması.....	16
Tablo 8. 5G teknolojisinin teknik özellikleri.....	17
Tablo 9. Atmosferik sönmlemenin frekansa bağlı değerleri	20
Tablo 10. 3GPP malzeme penetrasyon kaybı denklemi	22
Tablo 11. 3GPP bina penetrasyon modelleri	23
Tablo 12. Nesil’e göre baz istasyonu isimlendirilmesi.....	31
Tablo 13. FR1 için transmisyon bant genişlik yapılandırması	39
Tablo 14. FR2 için transmisyon bant genişlik yapılandırması	40
Tablo 15. 5G NR için temel bağlantı seviyesi performansını açıklayan parametreler.....	40
Tablo 16. Frekansa bağlı tipik gürültü değeri ve endüstriyel marjin.....	41
Tablo 17. LTE-A SV gereksinimleri tablosu	42
Tablo 18. Baz istasyonu taşıyıcı çıkış gücü limitleri.....	51
Tablo 19. UE tiplerine göre maksimum çıkış gücü limitleri	51
Tablo 20. Senaryolarda kullanılan hücre tipleri ve senaryo parametre değerleri.....	64
Tablo 21. Kırsal Makro Hücre için kanal modelleri.....	67
Tablo 22. Kentsel Makro Hücre için kanal modelleri	79
Tablo 23. Kentsel Mikro Hücre-Sokak Kanyonu için kanal modelleri.....	86
Tablo 24. Piko Hücre için kanal modelleri.....	95
Tablo 25. Femto Hücre için kanal modeller	103



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AMC	Uyarlanabilir Modülasyon ve Kodlama (Adaptive Modulation and Coding)
AMPS	Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi (Advanced Mobile Phone System)
BP	Kırılma Noktası (Breakpoint)
BS	Baz İstasyonu (Base Station)
BTS	Baz Alıcı-Verici İstasyonu (Base Transceiver Station)
CA	Taşıyıcı Birleştirme (Carrier Aggregation)
CATT	Çin Telekomünikasyon Teknolojisi Akademisi (Chinese Academy of Telecommunications Technology)
CDMA 2000	Kod Bölmeli Çoklu Erişim 2000 (Code Division Multiple Access 2000)
CP-OFDM	Döngüsel Önekli- Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Cyclic Prefix- Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)
dB	Desibel (Decibel)
dBm	Desibel Miliwatt (Decibel-milliwatts)
D-AMPS	Dijital- Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi (Advanced Mobile Phone System)
DFT-s-OFDM	Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü- yayılmış (Discrete Fourier Transform-spread-OFDM)
DL	Aşağı Bağlantı (Downlink)
DS	Çift Eğim (Dual Slope, DS)
DQPSK	Diferansiyel Karesel Faz Kaymalı Anahtarlama (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
EDGE	GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri Hızları (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)
eNB	Gelişmiş NodeB (Evolved NodeB)
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
FDD	Frekans Bölmeli Çiftleme (Frequency Division Duplexing)
FM	Frekans Modülasyonu (Frequency Modulation)



FR1	Frekans 1 (Frequency 1)
FR2	Frekans 2 (Frequency 2)
FSPL	Serbest Uzay Yol Kaybı (Free Space Path Loss)
GMSK	Gauss Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (Gaussian Minimum Shift Keying)
gNB	Yeni Nesil NodeB (Next Generation NodeB)
GPRS	Genel Paket Radyo Sistemi (General Packet Radio System)
GSM	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem (Global System for Mobile Communications)
HSCSD	Yüksek Hızlı Devre Anahtarlama Veri (High Speed Circuit Switched Data)
HSPA	Yüksek Hızlı Paket Erişimi (High Speed Packet Access)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
InH	İç Mekân (Indoor House)
IMT 2000	Uluslararası Mobil Telekomünikasyon 2000 (International Mobile Telecommunications 2000)
IMT – Advanced	Uluslararası Mobil Telekomünikasyon- Gelişmiş (International Mobile Telecommunications- Advanced)
IP	İnternet Protokolü (Internet Protocol)
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
LOS	Direkt Görüş (Line Of Sight)
LTE	Uzun Süreli Gelişim (Long Term Evolution)
LTE-A	Uzun Süreli Gelişim- Gelişmiş (Long Term Evolution-Advanced)
METIS	2020 Bilgi Toplumu İçin Mobil ve Kablosuz Haberleşme Sağlayıcıları (Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society)
mmMAGIC	Beşinci Nesil Entegre İletişim için Milimetre Dalga Tabanlı Mobil Radyo Erişim Ağı (Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications)
MIMO	Çoklu Giriş ve Çoklu Çıkış (Multiple-Input and Multiple-Output)



MU-MIMO	Çok Kullanıcılı MIMO (Multi User-MIMO)
NLOS	Görüş Hattı Dışı (Non-Line of Sight)
NMT	İskandinav Mobil Telefon (Nordic Mobile Telephone)
NOMA	Ortogonal Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access)
NR	Yeni Radyo (New Radio)
N_{RB}	Kaynak Bloklarının Sayısı (Numbers of Resource Blocks)
NYU-Wireless	New York Üniversitesi-Kablosuz (New York University-Wireless)
OFDMA	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
O2I	Dışardan İçeriye (Outdoor to Indoor)
QPSK	Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
QAM	Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
PDC	Pasifik Dijital Hücresel (Pacific Digital Cellular)
PL	Yol Kaybı (Path Loss)
PSK	Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase-Shift Keying)
RECSEN	Alıcı Hassasiyeti (Receiver Sensitivity)
RMa	Kırsal Makro (Rural Macro)
SC	Alt Taşıyıcı (Sub-Carrier)
SC-FDMA	Tek Taşıyıcı- Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access)
SDL	Tamamlayıcı Aşağı Bağlantı (Supplementary Downlink)
SF	Gölgeleme Etkisi (Shadow Fading)
SMS	Kısa Mesaj Servisi (Short Message Service)
SU-MIMO	Tek Kullanıcılı MIMO (Single User- MIMO)
SINR	Sinyal Girişim artı Gürültü Oranı (Signal to Interference plus Noise Ratio)
SS	Tek Eğim (Single Slope, SS)
TACS	Toplam Erişim İletişim Sistemi (Total Access Communication System)
T_N	Anten Sayısı
TDD	Zaman Bölmeli Çoğullama (Time Division Duplex)



TD-SCDMA	Zaman Bölme Senkron Kod Bölme Çoklu Erişim (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access)
TDMA	Zaman Bölme Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
UE	Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment)
UL	Yukarı Bağlantı (Uplink)
UMa	Kentsel Makro (Urban Macro)
UMi	Kentsel Mikro (Urban Micro)
UMTS	Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi (Universal Mobile Telecommunications System)
WIMAX	Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
Wi-Fi	Kablosuz Bağlantı Alanı (Wireless Fidelity)
W-CDMA	Geniş Bant- Kod Bölme Çoklu Erişim (Wideband- Code Division Multiple Access)
WRC	Dünya Radyo Konferansı (World Radio Conference)
1xRTT	1 Kez Radyo İletim Teknolojisi (1 Times Radio Transmission Technology)
3GPP	3. Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project)
3GPP2	3. Nesil Ortaklık Projesi 2 (3rd Generation Partnership Project 2)
5GCM	5G Kanal Modeli (5G Channel Model)



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Haberleşme teknolojisinin giderek daha da geliştiği günümüzde gelişen teknolojilerin ışığında kullanıcıların daha iyi haberleşmesi, daha çok kullanıcıya ulaşılması, daha geniş alana servis hizmeti verme ve daha yüksek hızda veriye ulaşma ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu artışı sağlamak amacıyla yapılan daha yüksek frekansların kullanılması durumu, ihtiyaç duyulan yüksek veri hızını karşılayabilecek avantajı sağlasa da böyle bir senaryo birçok olumsuz durumu da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajlardan biri de haberleşme teknolojilerinde giderek daha yüksek frekans kullanımının oluşturduğu ve gittikçe artan bina, ağaç gibi nesnelere kaynaklı sönümlenme etkisidir. Bu etkinin üstesinden gelmek ve istenilen ihtiyaçları karşılamanın yollarından biri de bölgeye ya çok daha fazla sayıda Baz İstasyonu (Base Station, BS) kurulumu gerçekleştirmek ya da tek bir BS’de çok daha fazla sayıda anten kurulumu yapmaktan geçmektedir. Bu kurulum miktarı 5G’de sönümlenme ve kayıpların etkisini azaltmak için 4.5G’ye oranla 10-100 kat daha fazla sayıda olacağı yönündedir [1].

Burada BS tüm bu ihtiyaçların ve beklentilerin karşılanmasını sağlayan en önemli teknolojilerden biri olarak karşımıza çıkmakta ve kullanıcılar bu baz istasyonlarından yayılan sinyallerle haberleşme imkânı bulabilmektedirler. Bu nedenle gelecekteki teknolojik ihtiyaçları da düşünerek baz istasyonlarının incelenmesi, geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca yeni nesil haberleşme teknolojilerinde ve yeni çalışma frekanslarında baz istasyonlarının ne gibi tepkiler vereceğinin de araştırılması bu teknolojinin daha da geliştirilmesi ve haberleşme kalitesinin artırılması adına oldukça önemlidir. Özellikle baz istasyonlarının özelliklerine ve kuruldukları bölgelere göre sinyallerini nereye kadar gönderebilecekleri, kullanıcıların bu sinyallerden ne derece faydalanabileceği, BS kapasitelerinin nasıl olacağı gibi konular incelenmesi gereken önemli konulardır.

1G’den 4.5G’ye kadar gelişen her yeni nesil haberleşme teknolojisinde bu konular giderek daha çok önem kazanmıştır. Daha sonra gelecek olan 5G teknolojisi ile bu önem daha çok artmış hatta birçok devlet için ülke güvenliği adına stratejik bir konuma



yükselmiştir. Bu yüzden yeni nesil haberleşmedeki en önemli teknolojilerden biri olan 5G hücre yapıları, bu çalışmamızda incelediğimiz asıl konudur.

5G baz istasyonları aslen incelenmesi gereken birçok konu ve teknolojiden oluşan karmaşık bir yapıdır. Bu çalışmada, 5G baz istasyonlarının tüm özellikleri incelenmeyecek olup daha çok 5G baz istasyonlarının genel özelliklerine, baz istasyonlarından yayılan ve 5G için tahsis edilen/edilecek olan yeni yüksek frekanslı sinyallerin BS tipine ve genel olarak kurulum yerine göre oluşturduğumuz senaryo ortamında yaşayacağı sönümlenmeleri inceleyeceğiz. Bu incelemelerde 3. Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project, 3GPP), Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU), Beşinci Nesil Entegre İletişim için Milimetre Dalga Tabanlı Mobil Radyo Erişim Ağı (Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications, mmMAGIC), 2020 Bilgi Toplumu İçin Mobil ve Kablosuz Haberleşme Sağlayıcıları (Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society, METIS), New York Üniversitesi (New York University, NYU) gibi önemli kuruluşların ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) üyelerinin BS tipine göre deneysel veya teorik olarak oluşturduğu kanal modeller kullanılmış olup bu sayede kanal modellerinin hazırladığımız senaryo ortamında gösterdikleri sonuçlar da karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmamız bu 5G baz istasyonlarının her birinin farklı kanal modelleri ile geniş kapsamda incelenmesi bakımından literatürde ilk olma özelliğindedir. Bu çalışma ile yüksek frekanslardaki 5G istasyonların sinyal yayılım durumları daha iyi anlaşılacak olup, mevcut kanal modelleri arasındaki farklılıklar da gösterileceğinden bu çalışmamızın yeni kanal modellerin geliştirilmesine, mevcut modellerin iyileştirilmesine, 5G baz istasyonların kapasite ve kapsama alanı gibi özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olması beklenilmektedir.

Çalışmamızda ilk başta 1G'den 5G'ye kadar olan haberleşme teknolojileri tanıtılmıştır. Ardından 5G'de milimetre dalga ve bu dalga boyunun oluşturduğu kayıplar gösterilmiştir. Daha sonra her hücre yapısının genel özellikleri anlatıldıktan sonra çalışmamızda kullandığımız kanal modelleri tanıtılmıştır. En sonda ise kanal modellere ve hücre yapılarının özelliklerine uygun olacak şekilde oluşturduğumuz senaryo ortamlarında her hücre yapısının Direkt Görüş (Line Of Sigt, LOS) ve Görüş Hattı Dışı (Non - Line Of Sigt, NLOS) duruma göre ve mesafeye bağlı olarak Spektral Verimliliği (SV), Enerji Verimliliği (EV), Yol Kayıpları, Kanal Kapasiteleri, Sinyal Girişim artı Gürültü Oranı



(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) değeri ve Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment, UE)'da alınan sinyal gücü gösterilerek hücre yapıları incelenmiştir.

1.2. 1G Teknolojisi

Günümüz haberleşme teknolojisinin ilk atası olan 1G yani 1.Nesil Haberleşme teknolojisi ilk olarak 1978'de ABD'de kullanılmaya başlanmıştır [2]. Daha sonra ise İskandinav ülkeleri, İngiltere, Japonya gibi ülkelere yayılmıştır. İlk tam otomatik şebeke sistemi ise 1981'de kullanılmaya başlanılarak 1G dönemi resmi olarak ortaya çıkmıştır. Ülkemizde ise ilk 1G deneyimi araç telefonları sayesinde olmuştur.

Temel olarak sadece ses iletimi sağlamak için tasarlanan 1G teknolojisi Frekans Modülasyonu (Frequency Modulation, FM) kullanmaktaydı. Çoklu erişim tekniği olarak Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) tekniğini kullanan 1G teknolojisi analog sinyal işlemekteydi. Dönemin şartlarına göre iyi bir teknoloji olarak görülse de analog sinyallerin isteyen herkes tarafından dinlenebilir olmasından dolayı güvenlik açısından oldukça zayıftı. Ayrıca dar bant genişliği, zayıf anten ve iletişim teknolojileri içermesinden dolayı konumlandırıldığı bölgeye veya coğrafyaya yeterince iyi servis hizmeti sağlayamadığı için sık sık bağlantı kopmaları ve hızla artan kullanıcı talebini karşılayamama sorunları yaşanıyordu. Bu dezavantajların yanında düşük çalışma frekansı (450-900 MHz) kullanması sayesinde kendisinden sonraki gelecek yeni nesil haberleşme teknolojilerine nazaran çok daha az sayıda BS ile çok daha geniş kapsama alanı sunmaktadır.

Maliyet açısından da az sayıda kurulması ve zayıf teknoloji içermesinden dolayı daha ucuz bir yapı içermektedir. Özellikle az gelişmiş ve az nüfuslu ülkelerde çalışma frekansı 450 MHz olan baz istasyonları kullanarak daha uzak mesafelere hizmet verilmektedir. 1G teknolojisine ait diğer özellikler Tablo 1'de verilmiştir [3].



Tablo 1. 1G Teknolojisinin teknik özellikleri

Teknoloji	Aşağı Bağlantı (kbit/s)	Yukarı Bağlantı (kbit/s)	Çalışma frekansı (MHz)	Band Genişliği (KHz)	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim	Çiftleme Modu
AMPS	2.4	2.4	800-900	30	-	FM	FDMA	FDD
TACS	2.4	2.4	450	25	-	FM	FDMA	FDD
NMT	1.2	1.2	450	25	-	FM	FDMA	FDD

Zayıf teknolojisine rağmen o dönemki şartlara göre büyük avantajlar sağlaması nedeniyle mobil haberleşmeye olan talep çok hızlı bir şekilde artmış ve abone sayısı milyonlara ulaşmıştır. Artan kullanıcı talebi, yeni nesil haberleşme tekniklerinin gelişmesi, 1G'nin kalitesiz, güvenlik yönünden çok zayıf ve sadece ses iletimi yapması nedeniyle yeni nesil haberleşme teknolojisine geçiş gereğini ortaya çıkarmıştır [4]. Günümüzde 1G teknolojisi çok eski olduğundan dolayı çoğu ülkede artık kullanılmamaktadır.

1.3. 2G Teknolojisi

İlk olarak 1990'ların başında kullanılmaya başlayan 2G teknolojisi analog haberleşmeden sonra ilk sayısal haberleşmeye geçiş yapıldığı bir teknolojidir. Sayısal haberleşme teknolojisi sayesinde çeşitli şifreleme yöntemleri geliştirilerek güvenli haberleşme imkânı sağlanmış oldu. 1G'ye göre daha iyi ses iletimi sunmanın yanında ilk Kısa Mesaj Servisi (Short Message Service, SMS) ve düşük de olsa veri iletimi hizmetini de kullanıcılarına sağlamaktadır. Ayrıca 2G ile 1990 yılında Mobil İletişim için Küresel Sistem (Global System for Mobile Communications, GSM) adında iletişim protokolü ortaya çıkmıştır. Bu protokol 2G'ye ait temel standartları içermektedir.

1991 yılından sonra ilk olarak Finlandiya'da kullanılmaya başlanan GSM standardı birkaç yıl içinde dünya çapında yayılım göstermiştir [5]. Dünya çapında kabul gören bu ortak standart sayesinde bir kullanıcı bir hat ile dünyanın birçok yerinde telefon görüşmelerini sürdürebilmektedir. Teknik anlamda GSM, FDMA ve Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access, TDMA)'i birlikte kullanır. Çalışma frekansı olarak da 1800-1900 MHz seviyelerine kadar çıkmıştır. Ancak Afrika gibi bölgelerde 450



MHz çalışma frekansının kullanıldığı yerler de mevcuttur [6]. GSM haricinde Dijital-Gelişmiş Cep Telefonu Sistemi (Advanced Mobile Phone System, D-AMPS) [6], Pasifik Dijital Hücresel (Pacific Digital Cellular, PDC) [7] ve cdmaOne [8] adında buna benzer başka sistemler de mevcuttur. Kullanıcı talebinin artması, veri taleplerindeki hızlı artış nedeniyle mevcut alt yapının bu yoğunluğu kaldıramaması sonucu 2G'nin gelişmiş versiyonu olan Yüksek Hızlı Devre Anahtarlama Veri (High Speed Circuit Switched Data, HSCSD) [9] sistemine geçilmiştir.

Ancak devre anahtarlama tekniğini kullanan bu sistem veri trafiğini yönetmede sorunlar yaşaması nedeniyle bir süre sonra paket anahtarlama tekniğini kullanan 2.5G teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlere Genel Paket Radyo Sistemi (General Packet Radio System, GPRS) ve GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri Hızları (Enhanced Data Rates for GSM Evolution, EDGE) örnek verilebilir. Burada EDGE teknolojisi Uyarlanabilir Modülasyon ve Kodlama (Adaptive Modulation and Coding, AMC) [10] tekniğini kullanmaktadır. Bu teknolojide veri artışını sağlayan en önemli faktör ise 2.5G'nin 8 PSK modülasyonunu kullanmasıdır.

Ülkemizde ise sesli görüşme sağlamanın yanında SMS ve veri iletimi de sağlayan 2G teknolojisi ilk olarak 1994 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu teknoloji de artan kullanıcı talebi ve daha yüksek hız ihtiyacını karşılamadığı için yerini 3G teknolojisine bırakmak zorunda kalmıştır. Günümüzde ise hem ülkemizde hem de birçok ülkede halen kullanılmakta olan 2G sistemlerin artık eskimesi ve o sistemi kullanan kullanıcı sayısının çok azalması nedeniyle yakın zamanda kullanımdan kalkacağını düşünmekteyiz. 2G teknolojisine ait teknik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.



Tablo 2. 2G teknolojisinin teknik özellikleri

Nesil	Teknoloji	Maksimum DL (Kbps)	Maksimum UL (Kbps)	Çalışma Frekansı (MHz)	Band Genişliği	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim	Dublex Modu
2G	GSM	9.6	9.6	450, 800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK	TDMA FDMA	FDD
	D-AMPS	13	13	800, 1500, 1900	30 KHz	-	$\pi/4$ -DQPSK	TDMA	FDD
	cdma-One	14.4-114	14.4-114	800, 1900	1.25 MHz	-	PSK	DS-CDMA	FDD
	PDC	9.6-28.8	9.6-28.8	800, 1500, 1900	25 KHz	-	$\pi/4$ -DQPSK	TDMA	FDD
	HSCSD	57.6	57.6	800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK	TDMA FDMA	FDD
2.5G	GPRS	171.2	171.2	800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK	TDMA FDMA	FDD
	EDGE	384	384	800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK 8PSK	TDMA FDMA	FDD



1.4. 3G Teknolojisi

Mobil haberleşmeye olan talebin giderek artıp milyarları bulan abone sayısına ulaşması ve artan veri trafiği ihtiyacı nedeniyle mevcut EDGE teknolojisinin de yetersiz kalacağını öngören ITU hem bu artan talebi karşılamak hem de mobil haberleşmede dünyanın farklı bölgelerinde oluşan farklı standartların önüne geçmek için Uluslararası Mobil Telekomünikasyon 2000 (International Mobile Telecommunications 2000, IMT 2000) adlı standartları da içinde barındıran 3G teknolojisi için ilk olarak 1985 yılında çalışmalara başlamıştır [11]. Geliştirilmek istenen bu standartların amacı dünyanın her yerinde aynı mobil cihaz ve hat ile kesintisiz ve kaliteli haberleşmenin yanında video görüşme imkânı da veren daha hızlı internet erişimi sağlamaktır. Bu standartları oluşturmak adına özellikle 3GPP ve 3. Nesil Ortaklık Projesi 2 (3rd Generation Partnership Project 2, 3GPP2) adlı gruplar bu amaçla önemli çalışmalar yürütmüştür [12]. 3GPP grubu GSM için 3GPP2 grubu ise cdmaOne için standart geliştirme çalışmaları yürüten ana gruplardır. Ancak bir süre sonra bu iki grup evrensel bir standart oluşturma konusunda anlaşamamış ve bu durum dünya genelinde farklı standartların oluşmasına neden olmuştur. Bunlar Asya ve Avrupa için 3GPP'nin geliştirdiği Geniş Bant- Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Wideband- Code Division Multiple Access, W-CDMA) standardı, 3GPP2'nin Amerika ve Güney Kore için geliştirdiği Kod Bölmeli Çoklu Erişim 2000 (Code Division Multiple Access, CDMA 2000) standardı, Çin'de kullanılan ve Çin Telekomünikasyon Teknolojisi Akademisi (Chinese Academy of Telecommunications Technology, CATT) tarafından geliştirilen Zaman Bölmeli Senkron Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA) standardı olmak üzere en önemli 3 grubu oluşturmaktadır [13]. 3G teknolojisi ilk olarak W-CDMA teknolojisiyle maksimum 2 Mbit/s Aşağı Bağlantı (Downlink, DL) ve 0.384 Mbit/s Yukarı Bağlantı (Uplink, UL) yapabilmekteydi. Daha sonra Yüksek Hızlı Paket Erişimi (High Speed Packet Access, HSPA) adlı teknolojiye geçilerek bu hızlar 14.4 Mbit/s download ve 5.76 Mbit/s upload hızlarına ulaşmış ve 3.5G dönemi başlamıştır. Ardından 3GPP yayınladığı yeni sürümlerle beraber çoklu anten desteğinin ve yeni modülasyon tekniklerinin eklenmesi ile HSPA+ teknolojiye geçilerek sabit, yani hareketsiz bir alıcıda 336 Mbit/s DL ve 70 Mbit/s UL hızlarına kadar veri transfer hızlarına çıkılmaktadır. Burada HSPA+ teknolojisi ise 3.75G olarak da anılmaktadır.



CDMA 2000 standardında ise 3G teknolojisi cdmaOne standardının geliştirilmiş hali olup standardın zamanla gelişmesiyle 1 Kez Radyo İletişim Teknolojisi (1 Times Radio Transmission Technology, 1xRTT) gibi teknikleri içine alarak DL ve UL'de artışlar yaşanmıştır [14]. Çin bölgesinde bulunan CATT ise TDMA-CDMA tabanlı TD-SCDMA tekniği kullanılmıştır.

3G geldikten sonra hayatımıza giren diğer teknoloji ise Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WIMAX) teknolojisidir. Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) tekniğini kullanması nedeniyle ITU'nun tavsiyesiyle IMT-2000'e eklenen bu teknoloji aynı zamanda IEEE 802.16e standartına dayalı bir kablosuz teknolojidir. Burada '802' kodu IEEE'nin elektronik alanında gelişen teknolojiler için verdiği seri kodlarından biri olup tek bir noktadan birçok noktaya kablosuz internet erişimi veren teknolojilerin kod numarasıdır. WIMAX, 802 serisi teknolojilerin 16 numaralı koda sahiptir. İlk versiyonu IEEE 802.16 standardı adını alarak 2001'de yayınlanmıştır. 3G'ye alternatif olarak düşünülen WIMAX başlangıçta 10-66 GHz çalışma frekansı ile LOS görüşte 8 kilometreye kadar hızlı bağlantı hizmeti vermesi için tasarlanmıştır. Daha sonra 2003'te yayınlanan IEEE 802.16a standardı ile 2-11 GHz aralığı da dahil edilerek lisanslı ve lisanssız frekanslarda LOS'da 40 Km mesafeye kadar, direk görüş olmayan NLOS ortamda ise 11 Km'ye kadar bağlantı hizmeti de vermesi sağlanmıştır [15]. 3G'nin internet hizmetinin yanında asıl amacı ses iletimi olduğu için WIMAX'a göre internet erişim verimi daha düşüktür. Çünkü WIMAX'ın asıl amacı geniş alanda yüksek veri hizmeti sunmaktır. 2005 yılında yayımlanan IEEE 802.16e versiyonlu standart ile 2-6 GHz aralığında lisanslı frekans tahsis edilerek WIMAX'a mobilite kazandırılmış ve böylece 3G ile olan uyumu artırılmıştır [16]. 3G'nin gelişimi ile ortaya çıkan diğer bir teknolojisi ise Uzun Süreli Gelişim (Long Term Evolution, LTE) teknolojisidir. 3GPP'nin yayınladığı bu standartta DL için OFDMA tekniği, UL için ise Tek Taşıyıcılı-Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA) tekniği kullanılmaktadır. 3G'ye göre daha gelişmiş modülasyon ve anten teknolojileri içermektedir. Bu yüzden DL ve UL'de daha yüksek kapasite sunmasının yanında barındırdığı teknolojilerle kendinden sonraki teknolojilere de katkı sağlamıştır. Dünyada 3G ile ilk tanışan ülke 1998 yılında Japonya olmuştur. Ülkemizde ise bu sistemin kullanılması 2009 yılı gibi geç bir zamanda gerçekleşmiştir. Yukarıda bahsedilen teknik özelliklerin yanında diğer teknik detaylar ise Tablo 3'te mevcuttur.



Tablo 3. 3G teknolojisinin teknik özellikleri

Nesil	Teknoloji	Sürüm	Maks DL (Mbit/s)	Maks UL (Mbit/s)	Çalışma Frekansı (MHz)	Band Genişliği (MHz)	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim	Dublex Modu
3G	W-CDMA	Rel. 99	2	0.384	1600-2500	5	-	BPSK, QPSK	CDMA	FDD
	HSPA	Rel. 5-6	14.4	5.76		5	-	QPSK, 16QAM		
	HSPA+	Rel. 8	42 ⁵	11 ⁶		2xCA=10	Var	QPSK, 16QAM, 64QAM		
		Rel. 12	336 ⁷	70 ⁸		8xCA=40	Var			
	CDMA 2000	1xRTT	0.144	0.144		1.25	-	BPSK, QPSK		
		EV-DO Rev.0	2.4	0.154		1.25	-	QPSK, 8PSK, 16QAM		
		EV-DO Rev. A	3.1	1.8		1.25	-			
		EV-DO Rev. B	4.9	1.8		1.25	-	QPSK, 16QAM, 64QAM		
	73.5		27.6	1.25, 15x1.25=20		-				
	WiMAX	Rel. 1.0	63.36 ⁹	28.22 ⁹		700, 2300-2400, 2500-2690, 3400-3600	5, 8.75, 10	4x2'e kadar		
LTE	Rel. 8	100 ¹⁰ -300	50-75	700, 800, 900, 1500, 1600, 1800-3800	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	4x4'e kadar	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDMA SC-FDMA	FDD, TDD	
<p>5- 2xCA=10 MHz ile ya da 5 MHz'de 2x2 MIMO ve 64 QAM ile 6- 2xCA= 10 MHz ile 7- 8xCA=40 MHz ve 2x2 MIMO ile 8- 10 MHz 2x2 MIMO ve 64 QAM ile 9- 10 MHz ve 2x2 MIMO ile 10- DL 100 Mbit/s ve UL 50 Mbit/s 20 MHz ile</p>										



1.5. 4G Teknolojisi

3G'deki artan veri hızının getirdiği görüntülü görüşme, multimedya içeriğe ulaşım ve veri yükleme sürelerindeki artış gibi gelişmeler birçok avantaj ve fayda sağlasa da mobil teknolojiye olan talebin ve mevcut teknolojilerin daha da geliştirilmesi ve daha yüksek veri hızlarına ulaşma hırısı 3G'nin de ötesinde bir teknolojiye geçiş yapma gereğini ortaya çıkarmıştır. Bu hususta mevcut 3G standartları daha da geliştirilerek İnternet Protokolü (İnternet Protokol, IP) ağıyla kontrol edilen 4G sistemler için 2008 yılında çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Burada belirlenecek yeni standartlar ITU tarafından Uluslararası Mobil Telekomünikasyon-Gelişmiş (International Mobile Telecommunications-Advanced, IMT- Advanced) olarak belirlenmiştir. Bu standartlarda 4G teknolojisinin getireceği gelişmeler;

- Daha yüksek servis kalitesi sağlanması,
- Hareketli ortamlarda (araba veya trende) 100 Mbit/s, sabit halde veya az hareketli ortamlarda (yaya halde veya sabit dururken) 1 Gbit/s indirme hızı ve 0.5 Gbit/s yükleme hızı sunması,
- Daha düşük gecikme sağlanması,
- Esnek çalışma yapısıyla 3G ve önceki sistemlerle uyumlu çalışma,
- Yeni güvenlik protokolleri ve teknolojileriyle daha yüksek güvenlik sağlanması

şeklinde sıralanabilir. Bu standartların oluşturulabilmesi için 3 grup çalışma yürütmüştür. Bu gruplar 3GPP, IEEE ve 3GPP2'dir. Burada,

- 3GPP: LTE'nin geliştirilmiş versiyonu olan LTE-Advanced/LTE-A/LTE-Rel.10 üzerine çalışmasını sürdürmüştür [17].
- 3GPP2: CDMA-2000 tabanlı sistem üzerine çalışma yürütmüştür.
- IEEE: Mobil WIMAX/Wireless-Man-Advanced/IEEE 802.16m/Mobil WIMAX 2 üzerine çalışma yürütmüştür.

Özellikle 3GPP ve IEEE, LTE-A teknolojisinin standartlarının oluşmasını sağlayan esas gruplardır. Yukarıda bahsedilen LTE-Advanced/LTE-A/LTE-Rel.10 teknolojisi 4.5G olarak da anılmaktadır. Yürütülen çalışmalarla birlikte çoklu anten sistemlerinin Çoklu Giriş ve Çoklu Çıkış (Multiple-Input and Multiple-Output, MIMO) ve heterojen ağ mimarisinin kullanılmasıyla da beraber spektral verimlilikte ve servis kalitesinde önemli artışlar da yaşanmıştır. Özellikle de çoklu anten yapılarında antenlerin sayısı arttıkça desteklenen kullanıcı sayısı, kapsama alanı ve kullanıcı başına düşen veri miktarının da



artış sağlandığı belirtilmektedir [18]. Hatta bu artış tek antenli sistemlere göre onlarca katı bulabilmektedir. LTE-Advanced Rel.10 ile 8x8 MIMO yapısını desteklerken WIMAX Release 2.1 ile 8x8 MIMO'yu standart olarak benimsemiştir. 3G teknolojisi çalışma frekansı bakımından maksimum 3600 MHz seviyelerinde çalışırken 4G teknolojisinde bu değer 5800 MHz değerine kadar çıkmıştır. Genel olaraksa 4G 450-5800 MHz arası frekanslarda çalışmaktadır.

Band genişliğinde ise Taşıyıcı Birleştirme (Carrier Aggregation, CA) ile 100MHz seviyelerine çıkabilmektedir. Diğer yandan WIMAX ve LTE-A her ne kadar benzer amaçları paylaşırsa da kullandıkları tekniklerde farklılıklar olabilmektedir. Örneğin DL'de her ikisi de OFDMA tekniğini kullansa da UL'de LTE-A, SC-FDMA kullanırken WIMAX yine OFDMA kullanmaktadır. 4G teknolojisi ilk olarak dünyada 2004 yılında Japonya tarafından duyurulmuştur. İlk 4G testi ise 2009 yılında ABD'de yapılmıştır ve yine aynı yıl ilk ticari 4G şebekesi Norveç ve İsveç'te kurulmuştur. Bu teknoloji ülkemize gelmesi ise bir hayli gecikmiş ve bu gecikmeden dolayı ülkemiz 4G'yi kullanamadan 2016 yılında direkt 4.5G ile tanışmıştır. 4G ye ait diğer teknik detaylar Tablo 4'de mevcuttur [3].



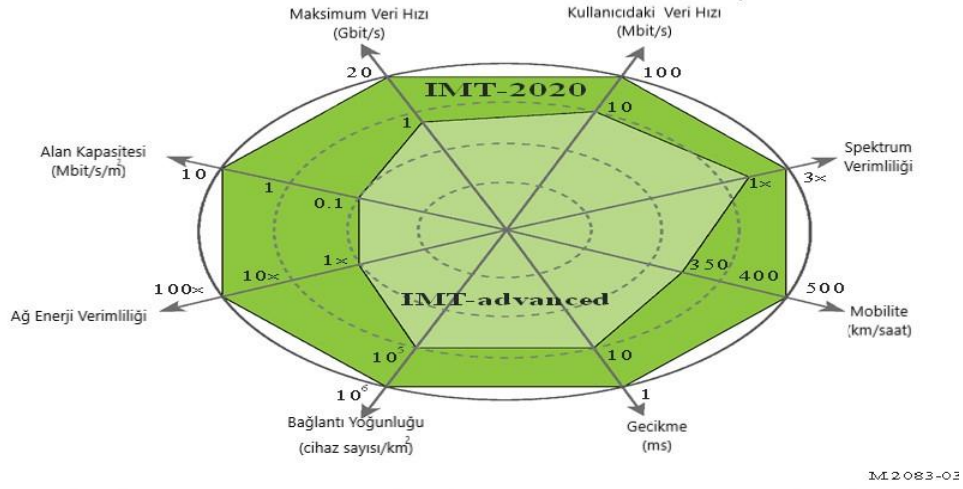
Tablo 4. 4G teknolojisinin teknik özellikleri

Nesil	Teknoloji	Sürüm	Maks Veri Hızı (Gbit/s)		Çalışma Frekansı (MHz)	Band Genişliği (MHz)	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim		Duplex Modu
			DL	UL					DL	UL	
4G	Mobil WIMAX	Rel. 2.0 ve üst sürümleri	1-4 ¹¹	0.5	450, 700, 1700, 2300, 2600, 3500, 5800	5, 7, 8.75, 10, 20, 100 (CA ile)	8x8	QPSK 16 QAM 64 QAM	OFDMA	OFDMA	TDD, FDD
4.5G	LTE Advanced	Rel. 10.0 ve üst sürümleri	1	0.5	700, 900, 1800, 2100, 2600, 3500, 3800	1.4, 3, 5, 10, 15, 20, 100 (CA ile)	8x8, FD-MIMO	QPSK 16 QAM 64 QAM 256 QAM (Rel.12)	OFDMA	SC-FDMA	
11- 256 QAM 8x8 MIMO ve 100 MHz bant genişliği ile											

1.6. 5G Teknolojisi

Artan kullanıcı talebi, yapay zekâ gibi yeni teknolojilerin gelişmesi, artan küresel rekabet ve önceki nesillerde olduğu gibi mevcut 4.5G teknolojisinin bu aşırı talepleri karşılayamaması nedeniyle 2020 yılında geçmeyi planladığımız ve bu sorunları önemli oranda çözmesi beklenen 5. Nesil haberleşme teknolojisi olan 5G, yeni bir miladın başlangıcı olacaktır. Bununla ilgili olarak 2020 vizyonu çerçevesinde ITU, IMT-2020 adında çalışma grubu oluşturarak 5G standartlarının oluşturulması için çalışma başlatmış ve 2015 yılında ITU ilk 5G temel değişimleri gösteren özellikleri yayınlamıştır [19]. Buna dair bilgi ise Şekil 1’de verilmiştir.





Şekil 1. 5G'nin 4.5G'ye oranla getireceği değişimleri gösteren şema [19].

Şekil 1 incelendiğinde 5G'nin hemen hemen her alanda (veri hızı, enerji verimliliği, gecikme vs) çok önemli avantajlar getireceği belirtilmektedir. Ancak yukarıdaki değerler teorik olup hepsinin uygulanabilirliği operatörlere, çevresel koşullara, gelişen teknolojilere ve kullanıcı yoğunluğu gibi nedenlere bağlı olduğu için pratik açıdan pek mümkün değildir. Örneğin 20 Gbit/s veri oranı olarak belirlenen değer aslen özel koşullarla mümkün olabilecek değer olup pratikte veya günlük kullanımda 5G'de 1-10 Gbit/s beklenen değerlerdir.

Bundan önceki 1G den 4.5G'ye kadar olan haberleşme teknolojilerden her biri geldiği dönemde ses ve veri iletiminde büyük yenilikler ve gelişmeler sağlasa da bu nesillerde gelen teknolojilerin ortak dezavantajı kullanım alanlarının sınırlı olmasıydı. Yani 4.5G'ye kadar olan zamanda bu ağı kullanan cihazlar genel olarak cep telefonları ve bilgisayarlardan oluşmaktaydı. Ancak 5G ile artık bu durumda değişecek ve telefonlar ile bilgisayarların yanında ev içindeki elektronik eşyalarda, arabalarda, fabrikalarda ve iş yerlerindeki birçok cihazda bu teknolojiyi standart bir özellik olarak kullanmaya başlayacak ve yapay zekâ desteğiyle beraber akıllı cihazlar, arabalar, fabrikalar, fabrika içindeki makineler birbirleriyle haberleşmeye başlayacaklardır. Bu durum Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) olarak anılmaktadır ve 5G'nin getireceği en önemli yenilik de budur. Bu önemli etken sayesinde fabrikaların üretim kapasitelerinin artması, işçi maliyetlerinin azalması, yeni iş alanlarının oluşması, günlük yaşamımızı kolaylaştıracak akıllı sistemlerin ortaya çıkması ve devletlere yeni teknolojiler sayesinde



önemli ekonomik kazanımlar sağlaması bakımından çok büyük avantajlarının olması dünyada 5G'ye olan talebi kızıştırmakta ve küresel ekonomilerin bu alana olan ilgisini epeyce artırmaktadır.

Bu kazanımları sağlayacak olan ana teknik etken ise 5G'de kullanılacak olan yüksek frekanslardır. Bu frekans aralığı ilk başlarda 3-300 GHz aralığı olarak söyleneceği de ticari kullanım ve 30 GHz üzerinde milimetre dalgaya geçilmesinin getireceği zorluklar hesaba katıldığında 100-300 GHz aralığındaki frekansların şu an için kullanılmayacağını düşünmekteyiz. 5G için düşünülen esas frekans aralıklarının ise 6-100 GHz olduğunu söylemek mümkündür. Zira ITU, 6-100 GHz aralığının kullanılabilirliği üzerine teknik fizibilitesini de yayınlamıştır [20]. Bu frekans aralığının 4.5G'de kullanılan frekans aralıklarına oranla neredeyse 10-100 katına kadar çıkması, beklenen kullanıcı yoğunluğunu karşılayabilecek bant genişliğini ve hızını yaklaşık olarak sağlayabileceğini göstermektedir [21]. Gerek ülkemizde gerekse de başka ülkelerde frekans lisanslama şu an bu aralıkta yapılmaktadır. 2015 ve 2019 Dünya Radyo Konferansı (World Radio Conference, WRC)'nda listelen bazı 5G frekans değerleri ise Tablo 5'te verilmiştir [22, 23].



Tablo 5. 5G için tanımlı bazı frekanslar

Düşük Frekans	Orta Frekans	Yüksek Frekans
410-450 MHz	2900-3100 MHz	24.25-27.5 GHz
1164-1215 MHz	3300-3400 MHz	31.8-33.4 GHz
1215-1300 MHz	3400-3600 MHz	37-40.5 GHz
1300- 1350 MHz	3600-3700 MHz	40.5-42.5 GHz
1350-1400 MHz	3700-3800 MHz	42.5-43.5 GHz
1427-1452 MHz	3800-4200 MHz	45.5-47 GHz
1452-1492 MHz	4400-4500 MHz	47-47.2 GHz
1518-1525 MHz	4500-4800 MHz	47.2-48.2 GHz
1559-1610 MHz	4800-4990 MHz	47.2-50.2 GHz
1695-1710 MHz	4990-5000 MHz	50.4- 52.6 GHz
2025-2110 MHz	5350-5470 MHz	66-71 GHz
2200-2290 MHz	5725-5850 MHz	71-76 GHz
2700-2900 MHz	5850-5925 MHz	81-86 GHz
	5925-6425 MHz	
	6425-7125 MHz	

3GPP TR 38.104 V16.1’de ise 5G için belirlenen frekans aralıkları Frekans 1 (Frequency 1, FR1) ve Frekans 2 (Frequency 2, FR2) ile gösterilmektedir [24]. FR1, 7 GHz altı için FR2 ise milimetre dalga için tanımlı frekanslardır. 3GPP Rel 15’te ilk olarak 6 GHz altı için frekans tanımları yapmışken daha sonra Rel 16 ile 7 GHz aralığını da lisanssız bantların kullanımına izin vermek için Yeni Radyo (New Radio, NR)’a eklemiştir. 3GPP tarafından tanımlaması yapılan FR1 ve FR2 frekans aralıkları ise Tablo 6’te verilmiştir [24].

Tablo 6. 3GPP tarafından tanımlanan frekans aralıkları

Frekans Aralık Tanımları	Frekans Aralıkları
FR1	410 MHz – 7125 MHz
FR2	24250 MHz – 52600 MHz



Bu aralıklardan FR2 frekansında ise 3GPP Rel.16 ile 52.6 GHz'e kadar tanımlanmışken, 71, 76, 81, 86 ve 100 GHz'e kadar tanımlama çalışmaları devam etmektedir [25]. İlerleyen dönemlerde bu tanımlamaların tamamının yapılmasını beklemekteyiz. Tanımlı frekanslarda desteklenen modülasyon ise 256 Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)'e kadar çıkmaktadır. 5G için modülasyon şeması ve düzeni ise Tablo 7'te verilmiştir [26].

Tablo 7. 5G'de desteklenen modülasyon şeması

Modülasyon Şeması	Modülasyon Düzeni
QPSK	2
16 QAM	4
64 QAM	6
256 QAM	8

Ancak daha yüksek frekanslarda ise 1024 QAM'e kadar çıkılmasını beklemekteyiz. Çoklu erişimde ise OFDMA ve Ortogonal Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) [27] gibi çoklu erişim teknikleri 5G'de üzerinde çalışılan tekniklerdir. Özellikle NOMA, gelecekteki radyo erişim ağlarında yüksek spektral verimlilik ihtiyacını karşılayabilecek yapıdadır. Ayrıca milimetre dalga haberleşmeleri, bilişsel radyo ve MIMO yapılarla birlikte de kullanılabilir.

5G'de belirlenen frekans değerleri ihtiyaçlara binaen oluşturulan değerler olup her frekans aralığının kullanım amacı değişebilmektedir. Örneğin 700 MHz değeri ABD ve Avrupa için düşük hız ve yüksek kapsama alanı için düşünülürken 600 MHz bandının ses ve görüntü için 5.9 GHz ise araçlarda kullanılması planlanmaktadır [28].

Yukarıda bahsettiğimiz frekansların seçiminde ise 3 önemli husus vardır. Bunlar frekans aralığının kapasitesi, güvenilirliği ve kapsama alanıdır. Nesnelerin interneti için en önemli kriter kapasiteyken, her kullanıcıya daha fazla geniş bant vermek için ise en önemli olan şey daha fazla kapasite ve daha fazla kapsama alanıdır. Uzaktan kumanda edilen 5G'ye bağlı araçlarda ise bu üç şartın üçü de çok önemlidir [29]. Frekans planlamaları bu kriterlere göre belirlenmektedir.

Bu kriterler içinde özellikle de yüksek frekans değerlerinde 5G için oluşacak en büyük sorun ise milimetre dalga boyunun sönmeye etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu etki, yüksek frekansların kullanım alanlarının, kapasitelerinin ve diğer özelliklerinin



belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Bu yüzden sinyal yayılımına etki eden faktörlerin, yüksek frekansların sağlayacağı kapasitenin iyi bilinmesi ve çalışmaların bu etkilere göre değerlendirilmesi önemlidir. 5G'ye dair diğer teknik detaylar ise Tablo 8' de gösterilmiştir.

Tablo 8. 5G teknolojisinin teknik özellikleri

Nesil	Teknoloji	Sürüm	Maksimum Veri Hızı (Gbit/s)		Çalışma Frekansı		Band Geniliği (MHz)	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim		Duplex Modu
			DL	UL	FR1 (MHz)	FR2 (GHz)				DL	UL	
5G	NR	Rel. 15	20 Gbit/s	10 Gbit/s	FR1	410-7125	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	256x256' ya kadar	QPSK 16 QAM 64 QAM 256 QAM	OFDMA FDMA NOMA	TDD, FDD	
				FR2	24.25-52.6	100, 200, 300, 400						

1.7. Milimetre Dalga

Çok yüksek frekanslarda dalga boyunun 1 cm'nin de altına inmesiyle oluşan dalgalara milimetre dalga denmektedir. Işık hızını yaklaşık 3×10^8 m/s kabul edilmesi durumunda 30-300 GHz aralığındaki sinyalin dalga boyu milimetre seviyesine inmektedir. Genellikle milimetre dalga boyu, radar ve uydu gibi askeri sistemler ve WIMAX tarafından da kullanılmaktadır [30]. Ancak 5G dönemi ile mobil haberleşmede de daha yaygın bir şekilde milimetre dalga kullanılmaya başlanmıştır. Bu dalga boyu yüksek frekanslarda oluşması nedeniyle yüksek veri hızı isteyen alanlarda kullanılmaktadır.

Milimetre dalga boyu 5G'den önce pek bilim dünyasının dikkatini çekmemişken günümüzde üzerinde çokça çalışma yapılmasının ve araştırılmasının nedeni, bu dalga boyunun düşük penetrasyon ve yayılım etkisinden üstesinden gelinmesi gereken bir konu olması ve de sağlayacağı yüksek veri hızı ile haberleşme imkânının getireceği yeni teknolojik kazanımlardan kaynaklanmaktadır. Bu penetrasyonun gerek materyallerde gerek atmosferik koşullarda gerekse de diğer nesnelere ne derece olacağı üzerine özellikle



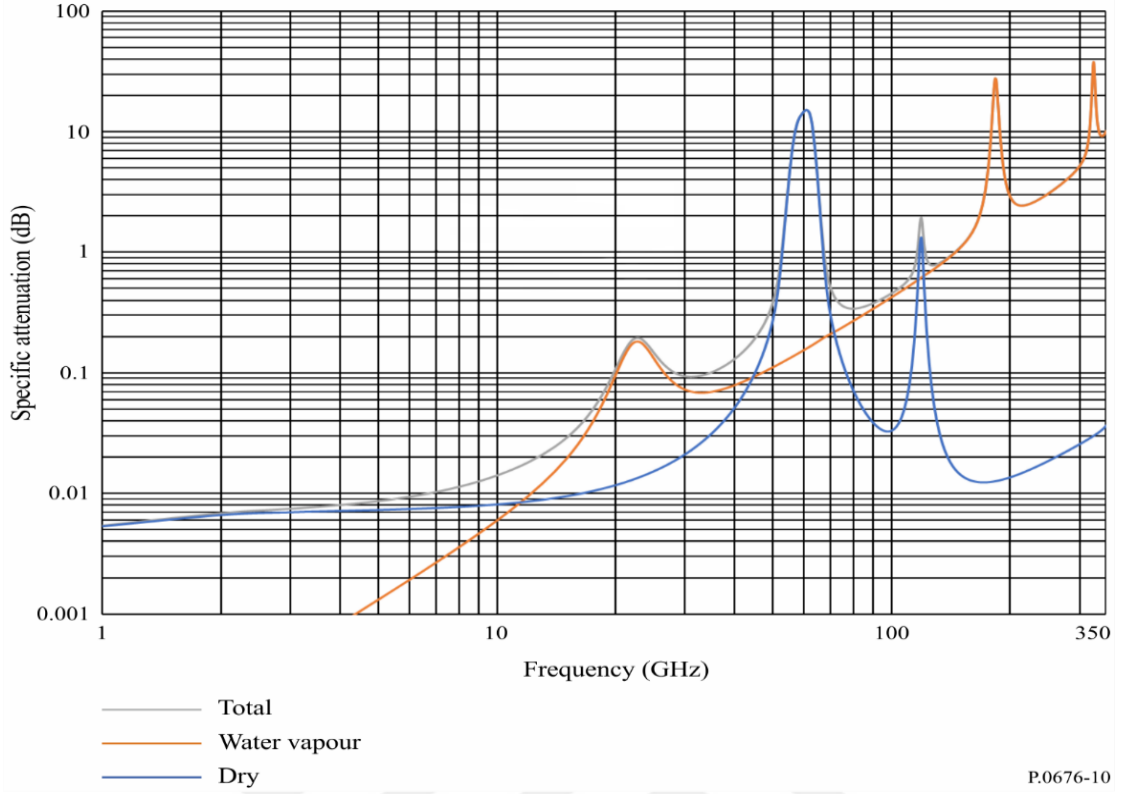
3GPP ve ITU gibi kuruluşlar önemli çalışmalar yapmıştır. Bu sönümlenmeleri etkileyen daha birçok faktör olsa da en önemlileri atmosferik sönümleme, yağmur sönümleme, malzeme sönümleme ve yeşillik sönümlenmeleridir. Bu etkenler özellikle bir dalganın yayılımını azaltan en önemli faktörler olup çalışmamızda da daha çok bu değerler incelenip kullanılmıştır.

1.8. Milimetre Dalgadaki Sönümlenmeler

1.8.1. Atmosferik Sönümleme

Elektromanyetik dalgalar gittikleri her güzergâh üzerinde çarptıkları her nesneden dolayı bir miktar sönümlemeye uğrarlar. Bu nesne metal gibi yoğun atomik ortam olabileceği gibi uçucu ve seyrek atomik gazlardan oluşan ortamda olabilir. Dalga bu gaz gibi düşük yoğunluklu ortamlardan geçerken enerjileri atomlar tarafından sönümlenmektedir. Sinyalin yol aldığı ortam ne kadar yoğun ise sönümleme de yaklaşık o kadar fazla olmaktadır. Ancak gaz gibi düşük yoğunluklu ortamlarda da gazların türleri, ortam basıncı, sıcaklık ve su buharının bulunup bulunmaması gibi etkenler sönümleme üzerinde etkili olabilmektedir. Bu konu ile ilgili ITU, yapmış olduğu çalışmada atmosferik koşullar için [31]'de Şekil 2 ve Şekil 3'te yayınladığı grafiklerde, kuru hava (oksijen, basınca bağlı azot) ve su buharı (nem) kaynaklı spesifik sönümlemenin yüksek frekanslardaki etkisini görmek mümkündür. Gösterilen ölçümler, Sıcaklık = 15°C, Su Buharı Yoğunluğu= 7.5 g/m³, Rakım= 0 metre değerleri için ölçülmüş olup %10 hata payı içermektedir.

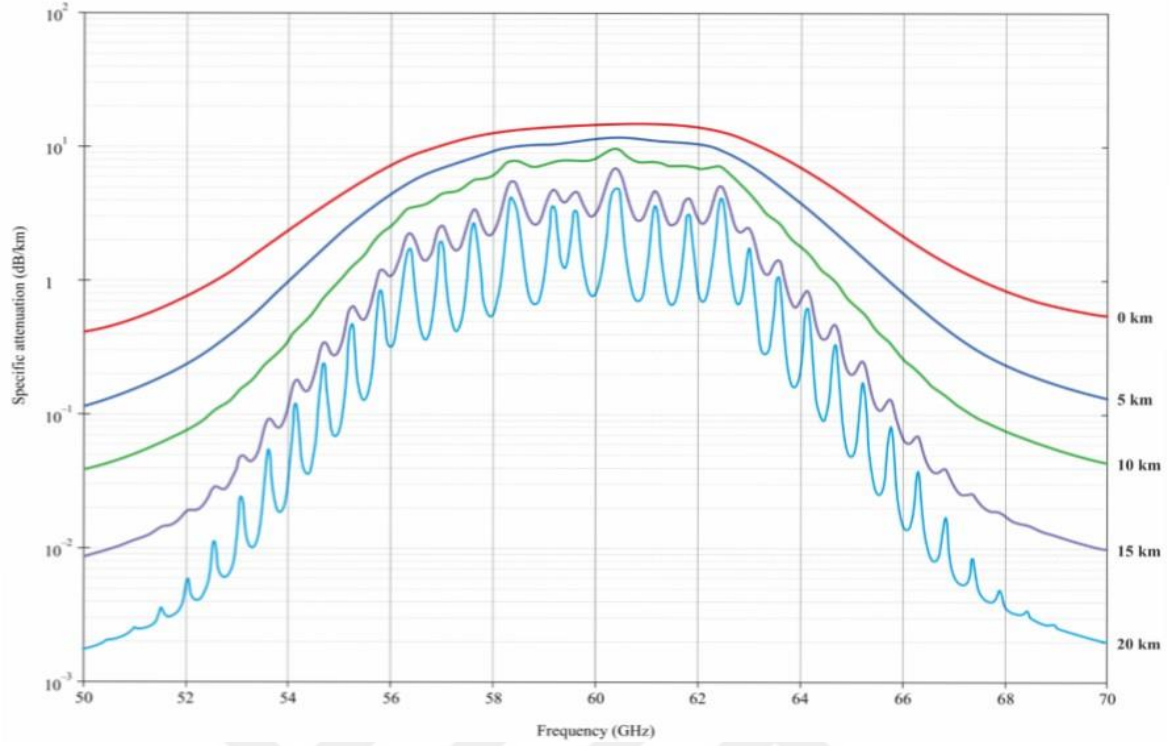




Şekil 2. Spesifik sönümlenmenin frekansa bağlı değişimi [31].

Şekil 2 incelendiğinde mavi renkli grafik kuru havanın oluşturduğu sönümlenmeyi, turuncu renkli grafik ise su buharının oluşturduğu sönümlenmeyi göstermektedir. Kuru hava kaynaklı sönümlenme 50-70 GHz aralığında ani artış gösterirken su buharı daha doğrusal bir artış vermektedir. Deniz seviyesinden daha yükseğe çıktıkça atmosferik yoğunluğun azalması nedeniyle sönümlenme değeri de azalmaktadır. 50-70 GHz aralığındaki frekansların yüksekliğe bağlı olarak gösterdikleri sönümlenme etkisi ise Şekil 3'te verilmiştir. İnsan yerleşimlerinin çoğu deniz seviyesinden 0-5 Km yüksekliğinde bölgelere yerleşim yaptığından genel olarak atmosferik sönümlenme maksimum değerlerde olmaktadır.





Şekil 3. 50-70 GHz arası rakıma bağlı spesifik sönümlenme değerleri [31].

Deniz seviyesi yükseliği (0 Km) için ölçülen sönümlenme etkisi değerleri ise Tablo 9'de verilmiştir.

Tablo 9. Atmosferik sönümlenmenin frekansa bağlı değerleri

F_c =GHz	0-52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68-100
$\alpha(F_c)$ =[dB/km]	0	1	2.2	4	6.6	9.7	12.6	14.6	15	14.6	14.3	10.5	6.8	3.9	1.9	1	0

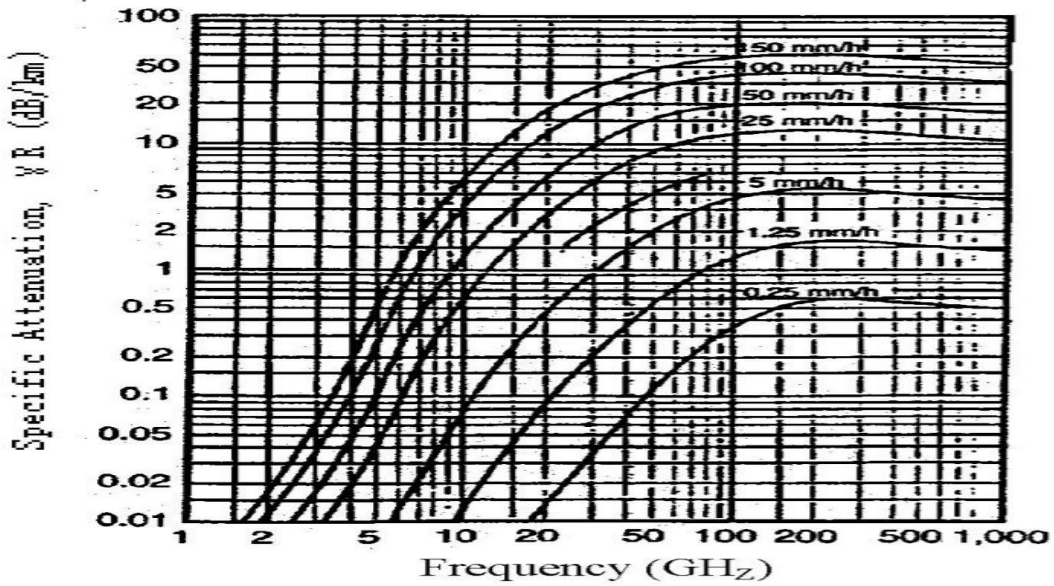
Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiği vakit özellikle 0.5-53 GHz ve 66-86 GHz aralığındaki spesifik sönümlenme değerleri 1 Km referans değere göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Ancak 53-67 GHz aralığında spesifik sönümlenmenin etkisi daha çok görülmeye başlanmaktadır. Daha yoğun atmosferik koşullarda bu sönümlenme değerinin



etkisi çok daha artacaktır. Fakat sönümlemenin yüksek olduğu 53-66 GHz aralığının şu an 5G için belirlenen uzak mesafede kullanılacak frekanslardan olmadığı için atmosferik koşullardan kaynaklı sönümleme etkisinin 5G’de önemli bir sorun teşkil etmeyeceği görülmektedir [32]. 53-66 GHz aralığı 5G için kullanılsa dahi, kısa mesafe haberleşmeleri için kullanılacağını öngörmekteyiz. Bu frekans aralığı için 5G’de şu ana kadar tanımlamalar henüz bitmemiştir.

1.8.2. Yağmur Sönümleme

Yağmur durumunda ise yağış şiddetinin artmasına bağlı olarak meydana gelen yüksek frekanslardaki sönümlenmeler Şekil 4’de gösterilmiştir [33].



Şekil 4. Frekans ve yağmur şiddetine bağlı sönümleme etkisi

Şekil 4’te 20-50 mm/h değeri sağanak yağış miktarını temsil etmektedir. Yani bir saatte yağan yağmurun miktarını belirtmektedir. Genel olarak yağış miktarı ülkemizde meteoroloji genel müdürlüğünün verilerine göre saatlik en yüksek 131 mm/h ile 1995 yılında Antalya ilimizde olmuştur. Türkiye geneli saatlik en yüksek yağışlar yine Antalya da olduğu belirtilmiştir [34]. Ülkenin diğer bölgeleri de tüm yıllara oranla saatlik ortalama 4-131 mm/h yağış aldığı görülmektedir. Şekil 4 kullanılarak sönümleme hesabı yapmak gerekirse [34]’deki verilere göre ortalama yağış miktarı 5-25 mm/h ve FR2 frekans



aralıkları hesaba katıldığında 1 Km'deki sönümlenme değeri 2-10 Desibel (Decibel, dB) arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek kayıp değeri hesaplanmaya çalışıldığında ise 66-86 GHz aralığında ve 130 mm/h yağmur durumunda 1 Km mesafede yaklaşık 50 dB sönümlenme meydana geldiğini görebiliriz. Bu değer her ne kadar yüksek gibi gözükse de malzemelerdeki yüksek penetrasyon kayıplarından dolayı, bu frekans aralığının kullanılacağı alanlar genelde kapalı (indoor) mekanlar olacaktır. Dış ortamlarda (outdoor) kullanılması durumunda ise maksimum kapsama mesafesinin 200 metre civarı olacağını düşünmekteyiz. Bu 200 metre mesafe aralığında yaşanacak 130 mm/h'lik çok şiddetli yağmurda bile en fazla 10 dB'lik kayıp meydana getirecektir. Bu kayıp değeri ise standartlardaki sınırları aşmamak kaydıyla kurulacak antenlerin güçleri ve kazançları artırılarak büyük oranda bertaraf edilebilecek bir kayıp değeridir.

1.8.3. Malzeme Sönümlenme

Yukarıda bahsettiğimiz ve milimetre dalgada yaşanabilecek bu kayıplar kabul edilebilir ve üstesinden gelinebilir kayıplar olsa da hala çözülmeyi bekleyen şey ise çok yüksek frekanslardaki dalgaların malzemelerden geçerken ki yaşadığı yüksek sönümlenmelerdir. Bununla ilgili malzemeye göre penetrasyon kayıplarını veren ve simülasyon çalışmalarında kullanılacak değerler Tablo 10'de gösterilmiştir. Verilen kayıp formülleri genel yapı malzemeleri için belirlenmiş olup detaylar [35]'de verilmektedir. Tablo 10 incelendiğinde yüksek frekanslarda malzeme penetrasyon kayıplarının ne derece yüksek olabileceği görülmektedir.

Tablo 10. 3GPP malzeme penetrasyon kaybı denklemi

Malzeme	Penetrasyon Kaybı (dB)
Standart Çok Panelli Cam	$L_{cam} = 2 + 0.2 f$
Kızılötesi Cam	$L_{Kcam} = 23 + 0.3 f$
Beton	$L_{beton} = 5 + 4 f$
Odun	$L_{odun} = 4.85 + 0.12 f$
Not: f değeri GHz cinsinden frekans değeridir.	



1.8.3.1. O2I Penetrasyon Kaybı

Dış ortamdan (Outdoor) gelen DL sinyalin bir bina içerisine girdiğinde oluşturduğu penetrasyon kaybını ifade eden durumdur. Bu yapıda sinyal, normal Yol Kaybı (Path Loss, PL)'na uğradıktan sonra bina içerisine girerken yaşadığı kayıp ve bina içerisinde yaşadığı kaybı içermektedir. Bu kayıp modeline ait denklem;

$$PL=PL_b+PL_{tw}+PL_{in}+N(0,\sigma_p^2) \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. PL_b (dB) normal yol kayıp değerini, PL_{tw} (dB) dış duvardan dolayı oluşan bina penetrasyon kaybını, PL_{in} (dB) ise bina içerisinde yaşanan yaklaşık yol kaybını, $N(0,\sigma_p^2)$ ise dB cinsinden ortalaması sıfır olan standart sapmayı vermektedir. PL_{tw} ise

$$PL_{tw}= PL_{npi}-10\log_{10} \sum_{i=1}^N \left(p_i \times 10^{-\frac{L_{malzeme\ i}}{10}} \right) \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. PL_{npi} (dB) sinyalin geliş açısından kaynaklı kaybı temsil etmektedir. p_i ise bir malzemenin tüm binanın yüzde olarak ne kadarını temsil ettiğini göstermektedir. Yani binanın yüzde kaçını beton, cam veya başka bir malzeme ise ona göre değer verilmektedir.

Bu denklemde malzeme kayıp değerlerine göre 3GPP, bina kaybı için iki farklı özelleştirilmiş model ortaya koymuştur. Bu modellerden PL_{npi} değeri sabit olarak 5 dB kabul edilmiştir. Bu modeller de Tablo 11'de verilmiştir.

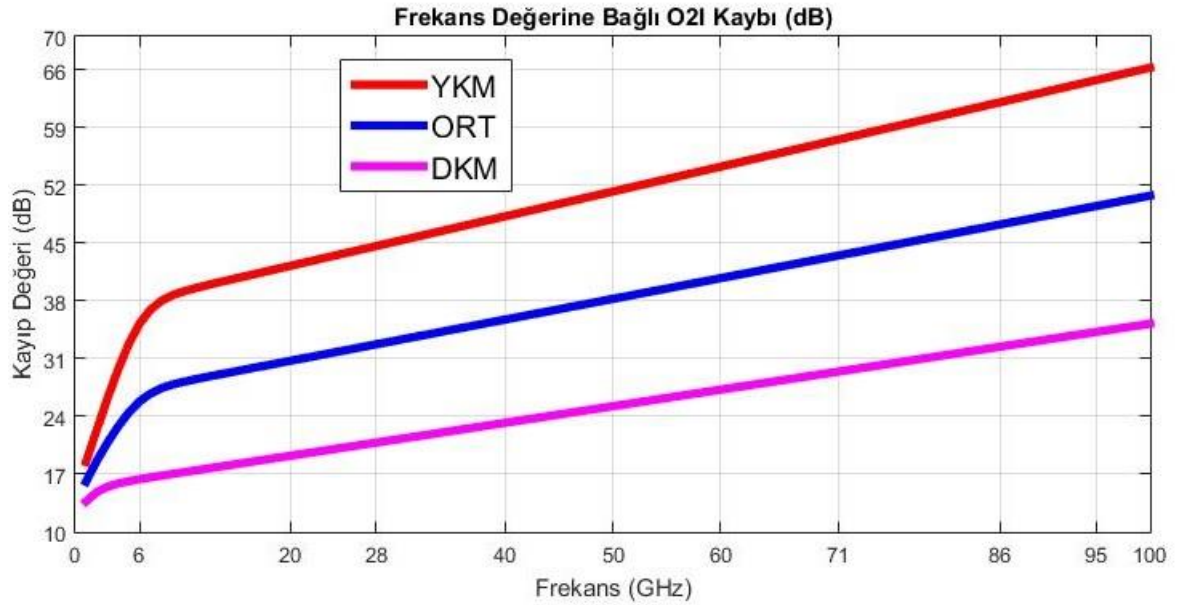
Tablo 11. 3GPP bina penetrasyon modelleri

Modeller	PL_{tw} (dB)	PL_{in} (dB)	σ_p (dB)
Düşük Kayıp Modeli (DKM)	$5-10\log_{10}(0.3 \times 10^{-\frac{L_{cam}}{10}} + 0.7 \times 10^{-\frac{L_{beton}}{10}})$	$0.5 \times d_{2d_in}$	4.4
Yüksek Kayıp Modeli (YKM)	$5-10\log_{10}(0.7 \times 10^{-\frac{L_{Kcam}}{10}} + 0.3 \times 10^{-\frac{L_{beton}}{10}})$	$0.5 \times d_{2d_in}$	6.5



Tablo 11’de belirtilen DKM, dış yüzeyinde %70 olasılıkla beton ve %30 olasılıkla da normal camdan oluşan bir yapıda meydana gelen O2I penetrasyon kaybını göstermektedir. 3GPP’ye göre bu denklem O2I kaybının minimum olduğu durumu varsaymaktadır. YKM’de ise yine dış yüzeyinde %70 olasılıkla kızıl ötesi cam ve %30 olasılıkla betondan oluşan bir yapıda meydana gelen O2I kaybını vermektedir. Yine 3GPP’ye göre bu denklem O2I kaybının maksimum olduğu durumu varsaymaktadır. Modellerde d_{2d_in} değeri ise sinyalin bina içerisindeki aldığı yolu belirtmektedir. d_{2d_in} değeri Kentsel Makro Hücre ve Kentsel Mikro Hücre için 0-25 m arasında değişirken, Kırsal Makro için 0-10 m arasında değer almakta olup Kırsal Makro Hücre için senaryolarda sadece DKM uygulanabilmektedir.

PL_{tw} için belirlenen değerler, bina yapılarının dış yüzeyinde bulunan malzemelerin oranına göre değişebilir. Ancak tez çalışmamızda 3GPP değerleri daha çok referans alınacağı için modellerde herhangi bir değişim yapılmayacaktır. DKM ve YKM için 1-100 GHz aralığındaki kayıp grafiği ise Şekil 5’te verilmiş olup grafiklerde d_{2d_in} değeri 6 metre alınmıştır.



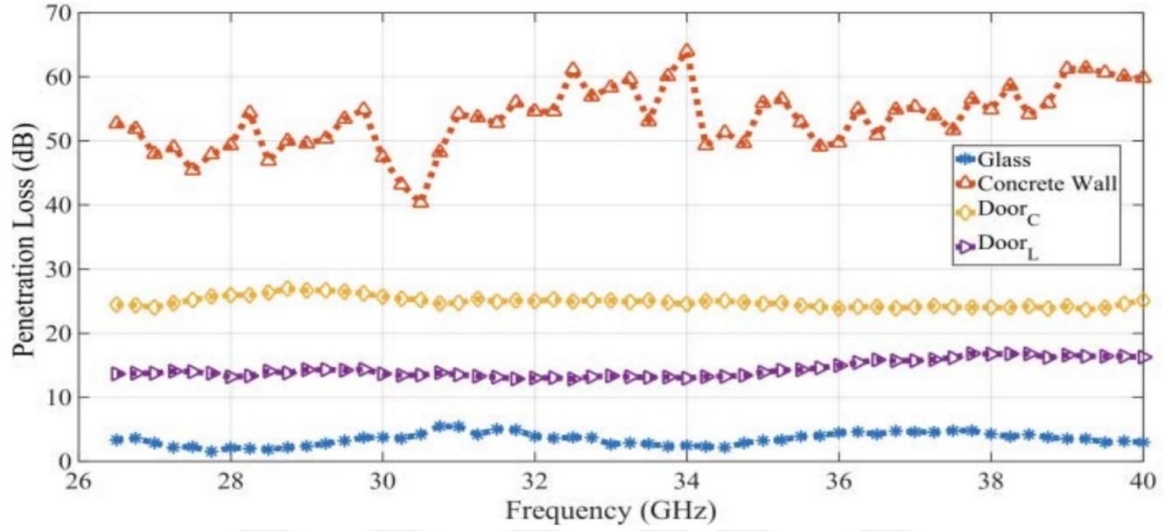
Şekil 5. 3GPP O2I modellerin frekansa bağlı kayıp değerleri

Şekil 5’teki grafik, denklem (1) ve (2) kullanılarak oluşturulmuştur ve Tablo 11’de gösterilen DKM, YKM ve de bu ikisini ortalaması olan ORT değerinin 1-100 GHz frekans aralıklarındaki O2I penetrasyon kaybını vermektedir. Bu modeller bina penetrasyon



kaybını yaklaşık olarak belirtmektedir. 3GPP tarafından yapılan bu çalışmanın yanında bazı yapı malzemeleri için milimetre dalga da yapılmış başka ölçüm çalışmaları da vardır.

Örneğin [32]'de 26.5-40 GHz frekans aralığı için çeşitli malzemelerle yapılan penetrasyon kaybı ölçümleri mevcuttur. Bu ölçümlerin sonucu Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Cam, beton ve kapı için milimetre dalgadaki penetrasyon ölçümü

Bu çalışmada 28 cm'lik bir beton duvar üzerinde 26.5-40 GHz aralığındaki frekanslar için ölçüm çalışması yapılmış ve bu ölçümlerde 40-65 dB arası penetrasyon kaybı ölçülmüştür. Yine 1 cm kalınlığındaki normal cam için ise maksimum 5.5 dB kayıp ölçülmüştür. Çalışma incelendiğinde genel olarak sabit kalınlıktaki malzemelerde 26.5 GHz'den 40 GHz değerine kadar olan frekanslar arttıkça kayıp değerlerinde yüksek bir değişim olmadığı görülmüştür. Ancak malzeme kalınlığının artması, kaybı etkilenen faktör olmuştur. Örneğin 3,5 cm kalınlığındaki tahta ile 0.8 cm'lik tahta üzerinde yapılan incelemede kalın tahtada 34 GHz frekansı için 7 dB'lik kayıp meydana gelirken 40 GHz'de bu kayıp 18 dB değerine kadar çıktığı görülmektedir. Ancak kullanılan frekansın daha da artması kaybı yine artıran faktör olacağı açıktır.

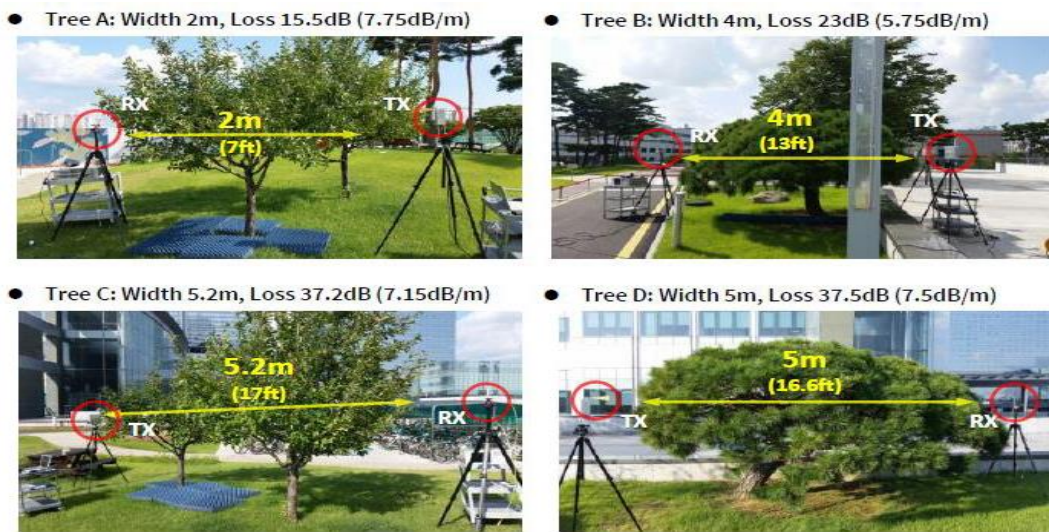
[32] ve [35]'de verilen çalışmalar karşılaştırıldığında ise 3GPP ORT değerlerinin [32]'deki değerlerle daha çok uyduğunu düşünmekteyiz. Çünkü [32]'de ölçümü yapılan malzemelerin birinde 28 cm kalınlığında sadece beton gibi yoğun bir malzeme kullanılmış ve ölçüm değerleri 40-65 dB arasında değiştiği belirtilmiştir. Ancak günümüzde duvarların kalınlığı genel olarak 20 cm altındadır ve bir duvar içerisinde, tuğla ve sıva gibi daha az



yoğunluğa sahip yapı malzemeleri de bulunmaktadır. Sinyalin bina içerisindeki yansıma kazançlarını da düşündüğümüzde bunlar ölçülen kayıpların daha az olmasına neden olacaktır. Bu hesaplara düşünüp oranlama yaparsak 40 GHz’de 28 cm’lik beton duvarda 60 dB kayıp oluşuyorsa 20 cm’lik duvarda yaklaşık 43 dB kayıp oluşur demektir. Yığma duvar normal beton duvardan daha az yoğun olduğu için de yaklaşık 10-15 dB daha az kayıp yaşayacağı varsayımı ile ORT değerinin d_{2d_in} olmadan elde edilen kayıp değeri oluşuyor demektir. Bu yüzden tez çalışmamızdaki parametre değerleri de bu verilere uygun şekilde alınmıştır.

1.8.4. Yeşillik Kaybı

Haberleşmede sinyal zayıflamasına neden olan bir diğer sönümlenme etkeni de yeşillik veya ağaçlık ortamlardır. Özellikle kırsal alanlarda ve yoğun yeşillik barındıran yerleşim bölgelerinde önemli bir sorun oluşturabilecek bir durumdur. 5G’den önce düşük sönümlenme etkisi ile çok fazla önemsenmeyen bir durum olan yeşillik sönümlenmesi 5G’den itibaren daha çok önem kazanmıştır. Bu sönümlenme etkisi üzerine birçok çalışma yapılmış olup bununla ilgili ölçüm çalışması yapan kuruluşlardan biri de Samsung firmasıdır. Şekil 7’deki görsel bu ölçüm çalışmasında kullanılan ağaçları ve nasıl bir ölçüm yapıldığını göstermektedir [36].



Şekil 7. Yeşillik sönümlenme ölçüm sonuçları – Samsung



Şekil 7 incelendiğinde yüksek frekanslarda ve çeşitli genişliklere sahip ağaçlarla yaptığı testte ortalama 7 dB/m yeşillik sönümlenmesi oluşabildiği görülmektedir. Qualcomm firması tarafında ise 29 GHz’de çeşitli ağaçlarla yapılan sönümlenme ölçümlerinde bu değer 13 dB/m’ye kadar çıkmaktadır [37]. Ortalama ağaç genişliğini 4 metre kabul edersek yaşanan sönümlenme miktarının dikkate değer bir rakam olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmalar incelendiğinde malzeme penetrasyon kayıplarının 5G için kritik önem arz ettiği görülmektedir. Bu kayıpların hepsi üstesinden gelinecek yapıda olmayıp kapsama alanına olumsuz etki yaratacakları açıktır. Her ne kadar IMT-2020 çalışma grubu [19]’da 5G’nin daha geniş kapsama alanı hizmet vereceği yönünde beyanı bulunsa da malzeme penetrasyon kaybını azaltacak bir gelişme yaşanmadığı müddetçe bu beyanın gerçekte uyuşmadığını düşünmekteyiz. Bu konu hakkındaki daha detaylı açıklama tezin ilerleyen kısmında yer alacaktır.

1.9. Baz İstasyonu ve Hücre

Sınırlı bir alanda belli sayıda kullanıcıya kablosuz haberleşme imkânı vermek için geliştirilen sisteme BS denmektedir. Bu özelliği nedeniyle 1G’den itibaren haberleşmede çok büyük öneme sahip bir teknoloji olan baz istasyonları günümüzde kablosuz haberleşmeye olan talebin katlanarak artması nedeniyle 5G’de de kritik öneme sahip bir teknoloji olmaktadır. Bu yüzden geniş alanda kablosuz haberleşme, yani mobil kullanıcıların birbirleriyle görüşme yapabilmesi ve veri gönderip almaları BS olmadan gerçekleşemez.

Baz istasyonları kurulum yeri ve tipine göre 4-3000 arası kullanıcıya ve 1 metreden 35 Km’ye kadar geniş alanda hizmet verebilecek şekilde tasarlanabilmektedirler. Her bir BS, yer altından döşenen fiber kablolarla veya kablosuz bağlantı ile komşu baz istasyonuna bağlıdır. Komşu baz istasyonlardan bazıları ise merkezi kontrol birimine bağlıdır. Bu şekildeki bir operatör, bir baz istasyonun sınırlı kapsama alanı dezavantajının üstesinden gelerek çok geniş alana servis hizmeti veren geniş bir yapı kurmakta ve o kullanıcı bu ağı kullanarak kendisinin bağlı olduğu baz istasyonunun sınırları dışında bulunan başka biriyle haberleşme sağlayabilmektedir.

İstasyonların üzerinde ise bu haberleşmeyi sağlamak için hem alıcı hem de verici antenler bulunmaktadır. Haberleşmeler bu antenler üzerinden yapılmaktadır. Baz istasyonu

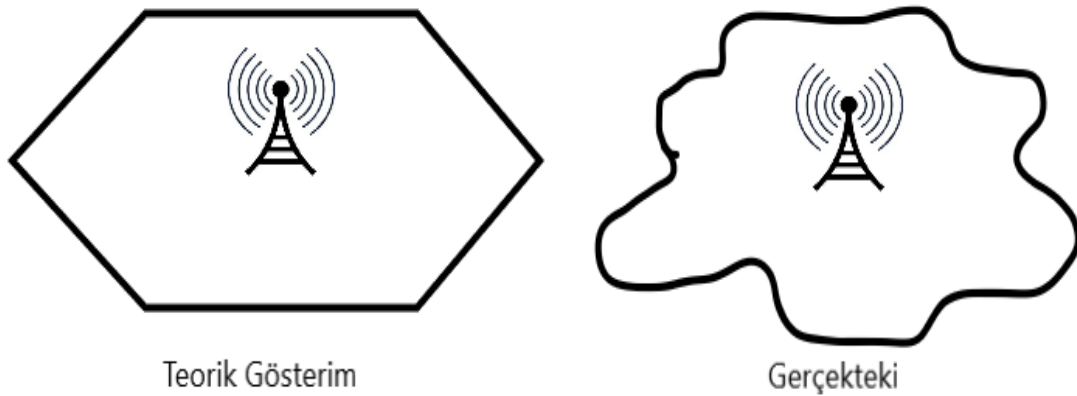


hitap ettiği bölgeye ve kullanıcı sayısına göre bu antenlerin sayısı ve yüksekliği artırılabilir. Baz istasyonu kapsama alanı ve kapasitesine göre değerlendirilmekte olup bu alana Hücre denmektedir.

Günümüzde ışınım yaptığı yöne doğru değerlendirildiğinde iki tip BS bulunmaktadır. Bunlardan ilki tüm yönlere yani çok yönlü ışınım yapan Çok Yönlü (Omnidirectional) antenlere sahip baz istasyonlardır. İkincisi ise belli bir açığa doğru ışınım yapan Yönlü (Directional) baz istasyonlardır.

1.9.1. Çok Yönlü Baz İstasyonu

Çok yönlü baz istasyonları düşük anten kazançlarının olması ve çok sayıda kullanıcıyı destekleyememesi nedeniyle genel olarak GSM haberleşmede pek tercih edilmezler. Ancak genelde kısa mesafede az sayıda kullanıcının bulunduğu bölgelerde kurulum maliyeti ucuz olması sebebiyle kullanılabilir. Bu tip baz istasyonundaki antenler hem alıcı hem de verici görevi görmektedir. Çok yönlü ışınım yapması nedeniyle anten açı ayarı gerektirmez ve ışınım açısı kaynaklı kayıplar bu antenlerde minimumdur. Ayrıca kanal modellemelerinde hesaplama kolaylığı sağladığı için modellemelerin oluşturulmasında çokça kullanılmaktadır. Çok yönlü anten yapısına sahip bir baz istasyonunun yaptığı ışınım Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Çok yönlü baz istasyonunun teorik ve gerçekteki kapsama alanı gösterimi

Teorik hesaplamalarda kolaylık sağladığı için teorik gösterimi bal peteği şeklinde yani altıgen biçimindedir. Ancak gerçekte çevresel koşullar, binalar, ağaçlar ve diğer

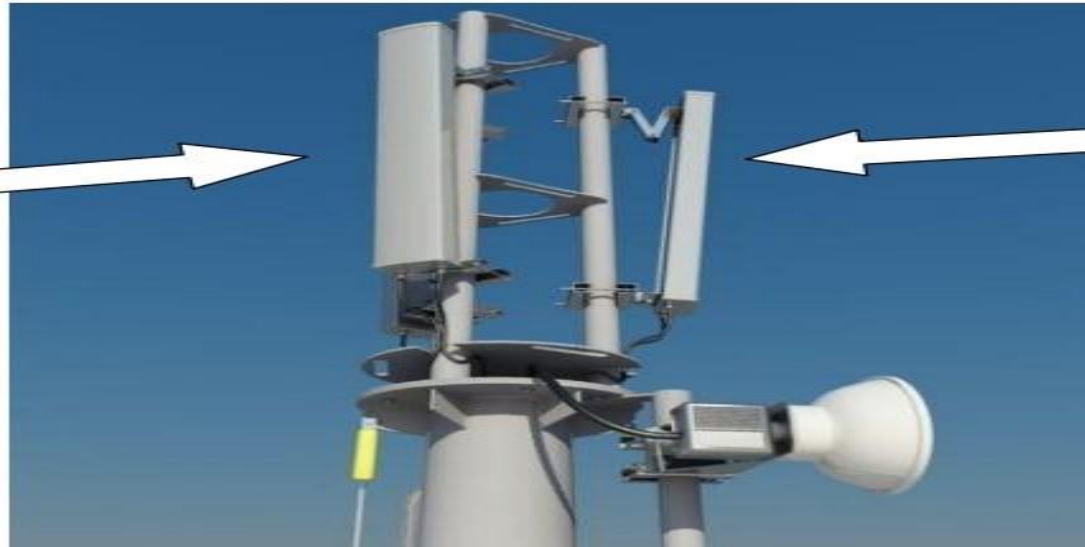


malzemelerden geçerken oluşan sinyal zayıflaması nedeniyle yayılım şekli bozulmaktadır. Şekil 8’de görsellerin ortasındaki sistem baz istasyonunu, etrafındaki kapsama alanı ise hücre olarak adlandırılmaktadır.

1.9.2. Yönlü Baz İstasyonu

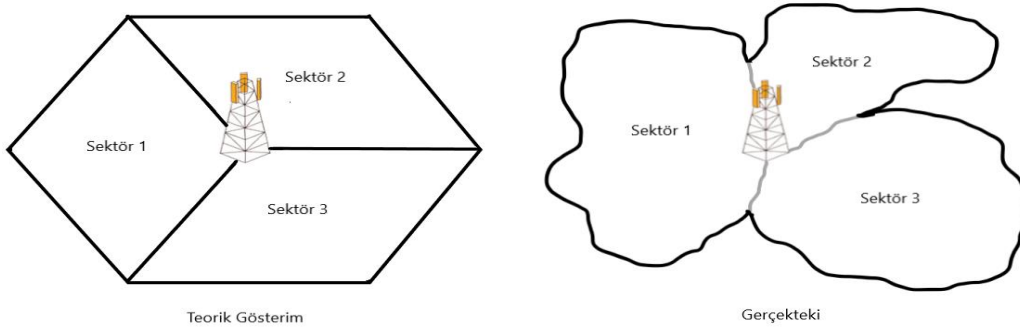
Yönlü baz istasyonları uzak mesafe haberleşmesinde en çok tercih edilen BS tipidir. Bunun en büyük nedenleri ışımayı belli bir yöne doğrultması nedeniyle çok yönlü antene göre daha fazla kazanç sağlaması ve mevcut kapasitesini de ışıma yaptığı doğrultudaki kullanıcılara sunmasıdır. Bu sayede daha uzak mesafeye sinyal gönderip servis hizmetini artırabilmektedir. Yönlü baz istasyonları genel olarak 3 farklı doğrultuya göre ışıma yapmaktadır. Bu yönler ise sektör olarak adlandırılır. Her sektör 120 derecelik alanı kapsamaktadır.

Sektörel bazlı çalışan baz istasyonlarında yönlü anten kullanımının avantajı olarak antenlere aynı zamanda eğimde verilerek kapsama alanları istenilen şekilde sınırlandırılabilirler. Şekil 9’daki görsel yönlü ışıma yapan baz istasyonunda eğim verilmiş anten yapılarını göstermektedir [38].



Şekil 9. Yönlü ve eğimli baz istasyonu anten örneği





Şekil 10. Yönlü ışıma yapan antenlerin sektör bazlı teorik ve gerçekteki gösterimi

Ancak bu sektör sayısı her zaman bu şekilde olmak zorunda değil. Baz istasyonları ihtiyaç duyulduğunda sektör sayısı, dolayısıyla anten sayısı artırılarak daha dar açıyla istenen bölgeye hizmet verecek şekilde düzenlenebilmektedirler. Anten yapılarının yönlü olması sayesinde bu tip hücre yapılarının anten kazançları da çok yönlü antenlere göre daha fazla olabilmektedir. Bu yüzden mobil haberleşmede servis kalitesinin artırılması, daha uzak mesafelere veri gönderebilmek ve yol kaybı önlenmelerinin üstesinden gelebilmek için yönlü antenler daha çok tercih edilmektedir [39]. Bir sinyalin yol kaybı arttıkça bu kaybı telafi etmek için verici gücü, anten kazançları veya anten sayısı artırma yoluna gidilir. Bunlar da olmazsa sinyalin ulaşmadığı bölgeye yeni bir hücre yapısı kurulur. 5G teknolojisinde de bu anten yapılarının çok daha fazla kullanılacağı düşünülmektedir ve bu yüzden yüksek kazançlı antenler geliştirilmektedir [40].

1.10. 5G’de Baz İstasyonu

1G’den 4.5G’ye kadar dönemde operatörlerin kullandıkları frekanslar genel olarak 6 GHz altıdır. Bu frekans aralıklarının düşük sönümlenme özellikleri nedeniyle kapsama alanları oldukça geniştir. Bu durum operatörlere avantajlar sağlamaktadır. Ancak 5G’de kullanılacak frekansın 86 GHz’e kadar çıkmasıyla oluşan yüksek sönümlenme etkisi sebebiyle, BS kurulumu ve maliyeti açısından önceki nesillere göre büyük dezavantaj meydana getirmektedir. Yüksek sönümlenme etkisiyle oluşacak kapsama alanı sorunlarının üstesinden gelebilmek için operatör firmalarının yapabilecekleri yöntemler;

- Baz istasyonunun gücünü artırmak
- Baz istasyonunun sayısını artırmak
- Anten kazançlarını artırmak



- Baz istasyonundaki kayıpları azaltmak
- Anten sayısını artırmak

şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Bu çözüm yöntemlerinin her biri maliyetli ve operatöre ek iş yükü meydana getirmektedir. Bu durumun kullanıcılara da ek maliyet olarak yansıtacağı aşıkardır.

Baz istasyonlarının adlandırmaları da gelişen teknolojilerle birlikte değişmektedir. 4G’de baz istasyonları Gelişmiş NodeB (Evolved NodeB, eNB) şeklinde adlandırılmaktayken 5G’de yani NR teknolojisinde baz istasyonları için düşünülen isim Yeni Nesil NodeB (Next Generation NodeB, gNB) veya gNodeB’dir. Nesile göre baz istasyonu isimler ise Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Nesil’e göre baz istasyonu isimlendirilmesi

Nesil	Radyo Teknolojisi	Baz istasyon İsmi
2G	GSM	BTS
3G	UMTS	NodeB
4G	LTE	eNB, Evolved NodeB
5G	NR	gNB, gNodeB

1.11. Baz İstasyonu (Hücre) Yerleşim Planlaması

Baz istasyonları kuruldukları bölgelerde sinyal zayıflaması ve kapasite sınırları nedeniyle sadece belirli bir alana hizmet verebilmektedirler. Bu durumda servis hizmetinin verileceği bölgenin büyüklüğü baz istasyonunun maksimum kapsama alanını ve kullanıcı sayısını aşılırsa o bölgeye başka baz istasyonları kurulmak zorundadır. Bu durumda birden fazla BS kurulması için servis hizmetin verileceği bölgenin coğrafik koşulları ve bina yapıları baz alınarak frekans, kapasite ve kapsama alanı planlaması yapılması gerekir. Bu planlama sayesinde baz istasyonları daha verimli bir şekilde kullanılabilmekte ve hem ekonomik anlamda hem güç tüketiminde tasarruf sağlayabilmekte hem de servis kalitesinde artış yaşatabilmektedirler. Örneğin 1 Km çapındaki alanda 100 kişiye servis hizmeti verilmesi gerektiğini düşünelim. Bu durumda kurulması gereken BS gelecekteki



nüfus ve yerleşim alanındaki artışlar da göz önüne alındığında 150 kişilik kapasite ve 1.5 kilometre karelik alanı kapsayacak şekilde belirlenip kurulmalıdır. Eğer o bölgeye 2000 kişilik kapasite sunan ve 30 Km'lik alan kapsayan bir BS kurulursa gereksiz yere 30 Km'lik alan için güç harcayan ve belki de hiç ulaşılmayacak bir nüfus için gereksiz masraf olacaktır. Ayrıca kapsama alanının ve kullanıcı sayısının artması veri hızında negatif etki yaptığı içinde veri hızı bakımından da iyi sonuçlar doğurmamaktadır.

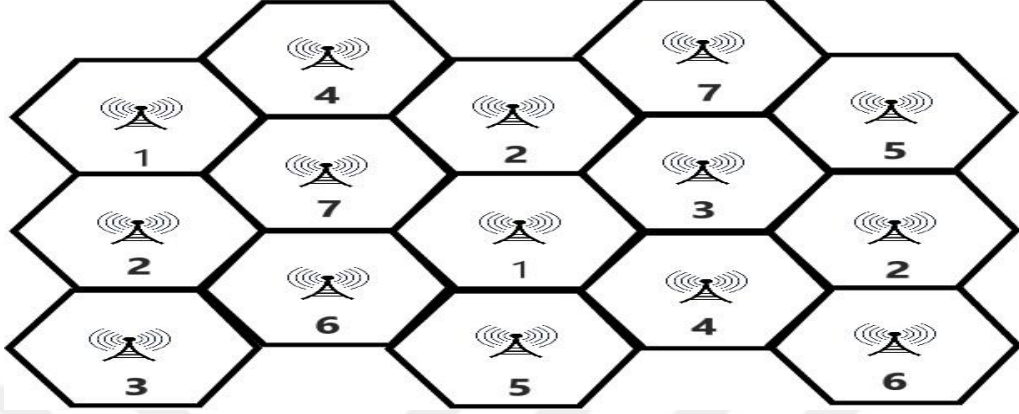
Aynı şekilde kurulan BS, 100 kişi için değil de 80 kişiyi destekleyen veya da 1 Km'lik alandan daha az bir bölgeyi kapsayan bir yapıda olursa, bu seferde servis hizmetini alamayan kullanıcılar olacaktır ki bu hiç istenmeyen durumdur. Sadece ülkemizde bulunan 80.000'den fazla baz istasyonunu dikkate aldığımızda yerleşim planlamalarındaki hatanın maliyeti oldukça fazla olacaktır. Bu yüzden baz istasyonlarının kapasite, kapsama alanı ve güç tüketimlerinin gelecekteki nüfus artışı, gelişen teknolojiler ve beklentilere göre iyi bilinip ona göre yerleşimlerinin yapılması sadece ülkemiz için değil tüm dünya için de büyük önem arz etmektedir. Özellikle güç tüketiminde 5G baz istasyonlarının 4G baz istasyonlarına göre daha fazla enerji harcaması beklenmektedir [41]. 5G'nin 4G'ye göre minimum 10 kat kadar daha fazla BS ve 1000 kat daha fazla ağ trafiği ihtiyacını da dikkate alırsak bugüne kadarki tüm ağların harcadığı gücün yarısı sadece 5G ağının harcaması beklenmektedir [42]. Bu yüzden 5G'de çok iyi güç ve yerleşim planlaması ve yeni güç yönetim stratejilerinin yapılması gerekmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda genelde 4G'deki baz istasyonlarında var olan uyku modunun daha da geliştirilmesi yönünde olmaktadır [43].

1.12. Frekans Planlama

Operatörler için lisanslı frekansların sınırlı, çok dar ve her operatör için farklı olması nedeniyle BS yerleşiminde operatörler arasında frekans karmaşası yaşanmaması çok önemlidir. Ayrıca bu dar frekans aralığı ve çok sayıda baz istasyonunun bulunduğu ortamda coğrafik koşullara uygun olması ve çevredeki diğer baz istasyonlarının çalışma frekansları ile girişim yaşamaması için frekansların yeniden kullanılması durumu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu yüzden servis hizmetinin en iyi şekilde sağlanabilmesi için gereken en önemli şartlardan biri frekans planlama işlemi olmaktadır [44]. Bu planlama sayesinde operatörler sınırlı frekansları çok daha verimli bir şekilde kullanabilmektedirler.



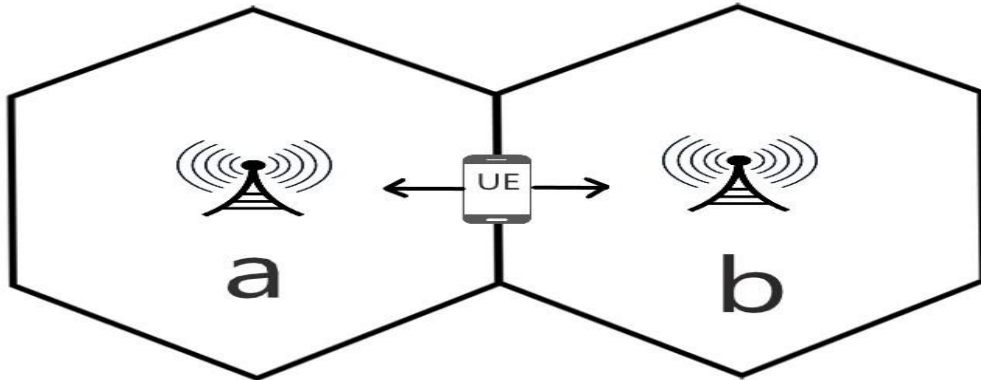
Şekil 11’de bulunan yapı, farklı frekanslarda çalışan hücrese sistemleri temsili olarak göstermektedir.



Şekil 11. Frekans planlama teorik gösterimi

Görselde bulunan her bir numara farklı frekansı belirtmektedir. Bu farklı frekansların kullanılması girişim olayını azaltan bir faktördür. Hücrese haberleşmede girişim olayı ise çok önemli bir problemdir. Özellikle hücre kapsama alanı sınırlarındaki girişim olayı komşu hücrelerin aynı frekansı kullanması durumunda çok fazla olmaktadır.

Hücre sınırlarında bulunan bir kullanıcıya aynı frekanstan iki farklı yayın geldiğinde veri karmaşası yaşanmaktadır. Bu durum ses ve veri iletiminde aksaklıklar oluşturmakta hatta görüşme hiç sağlanamamaktadır. Şekil 12’deki görselde hücre kenarında bir kullanıcının olduğu temsili durum gösterilmiştir.



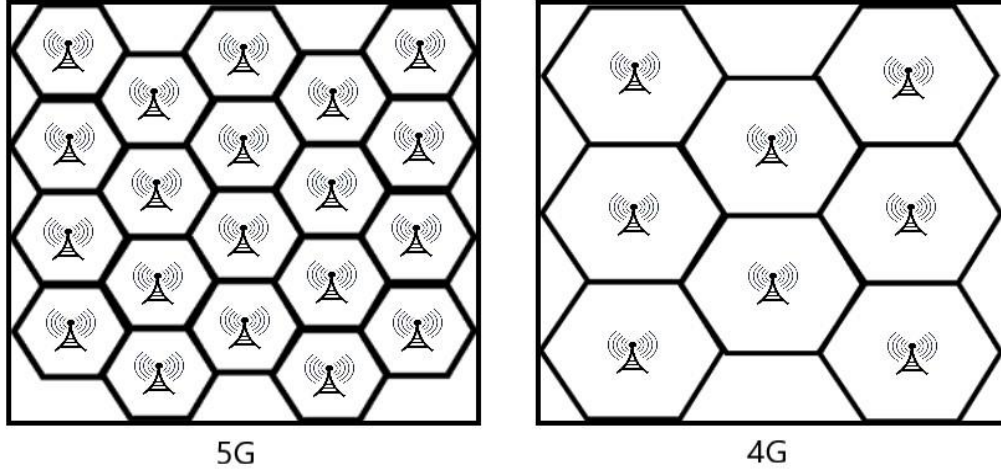
Şekil 12. Hücre kenarında bir kullanıcı (UE) gösterimi



Görseldeki olayda bir Kullanıcı Ekipmanı (User Equipman, UE) yukarıdaki şekilde olduğu gibi iki hücre yapısının kapsama alanı sınırlarında bulunması durumunda her iki hücreden gelen sinyallerin birbirini maksimum oranda etkilemesi sonucu yüksek girişim olayı yaşanmaktadır. Girişimin etkisinin azaltılması için kullanıcının (UE) ya 'a' ya da 'b' yönüne gitmesi gerekir. Örneğin 'a' yönüne gittiğini varsayalım. Bu durumda 'a' yönündeki baz istasyonundan gelen sinyalin gücü artarken 'b' yönünden gelen sinyalin gücü mesafe ve başka engellere bağlı olarak azaldığı için girişim etkisi de azalmaktadır. Bu yüzden hücre sınırındaki bir kullanıcı, girişim etkisinden kurtulmak için mutlaka bir baz istasyonuna daha yakın olmalıdır. Ancak buradaki önemli sorun, sürekli aynı frekanstaki baz istasyonun yerleşiminin yapılması durumunda hücre sınırına her gelen kullanıcının sürekli girişim sorunu yaşayacağıdır. Bu ise servis kalitesini çok kötü etkileyen bir unsurdur. Bu yüzden operatörler bu sorunu minimumda tutmak ve servis kalitesini artırmak için komşu baz istasyonlarında farklı çalışma frekansları belirlemektedirler. Şekil 11'e baktığımızda 1'den 7'ye kadar olan rakamlar bu farklı frekansları temsil etmektedir. Böyle bir sistemde farklı frekans kullanılması, girişim etkisini minimumda tutmaktadır. Bu durum sayesinde aynı frekanslar başka bölgede girişim olayı yaşanmadan yeniden kullanılabilir. Komşu baz istasyonları arasında frekans benzerliği ne kadar az olursa girişim olayı da o kadar azalmaktadır. İki hücrenin arasında bulunan bir kullanıcının iletişim sağlayabilmesi için taşıyıcının gücünün, girişimin gücünden daha yüksek olması gerekmektedir. Burada taşıyıcı gücü C, komşu hücre girişim gücü ise I ile gösterilmektedir. C/I oranı servis kalitesi bakımından en önemli konulardan biridir. Bu yüzden bu oranın $C/I > 12$ dB olduğu noktalarda veri iletimi sorunsuz bir şekilde yapılabilir. $C/I < 3$ dB de ise iletişim tamamen kopmaktadır [45].

Günümüzde operatörler ve akademik çevreler servis kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biri olan frekans planlama işlemine müşteri kaybı yaşamamak ve servis kalitesini artırmak için büyük önem vermektedirler. Özellikle her geçen dönem servise alınan BS sayısının daha da artması nedeniyle ağ planlama işlemlerinin karmaşası gittikçe artmakta ve bu durum yeni planlama yöntemlerinin araştırılması ve uygulanmasını ortaya çıkarmaktadır. 5G'de meydana gelen yüksek sönmüleme etkisi nedeniyle bir bölgeye 4G teknolojisine göre çok daha fazla hücre yerleştirilmesi gerekecektir. Şekil 13 bu durumu temsili olarak göstermektedir.





Şekil 13. Temsili olarak aynı alan içindeki 5G ve 4G hücre sayısı gösterimi

Bu yüzden hücreler arası girişim konusu tek başına incelenmesi gereken ve özellikle 5G’de çok sayıda frekans, bant genişliği, hücre sayısı ve anten sayısı ile daha da karmaşıklaşacak bir konudur [46, 47].

Tez çalışmamızda bu karmaşık konuya çok girilmemiş ve girişim olmadığı varsayılmıştır. Ancak gerçek sistemlerde girişim olayı mutlaka dikkate alınmalıdır.

1.13. Hücresel Ağlar

Hücresel ağ, BS ve UE’den oluşan bir yapıdır. Bu yapıda her kullanıcı kendisine en iyi sinyal servisi veren BS ile bağlantı kurmaktadır. Bu bağlantıda DL, baz istasyonundan kullanıcıya gelen sinyali, UL ise UE’den BS’ye giden sinyali göstermektedir. Haberleşme bu iki sinyal durumunun (DL ve UL) hem baz istasyonunda hem de kullanıcıda var olmasıyla mümkün olmaktadır. Sadece DL’nin ve UL’nin olması durumlarında bağlantı kopma sorunları yaşanmaktadır. Günümüz hücresel ağ sistemi bu sorunu yaşamamak için kapsama alanı, kapasite ve kullanıcı sayısı bakımından farklı özelliklere sahip baz istasyonları kullanmaktadır. Bunlar ise kısaca ikiye ayrılır;

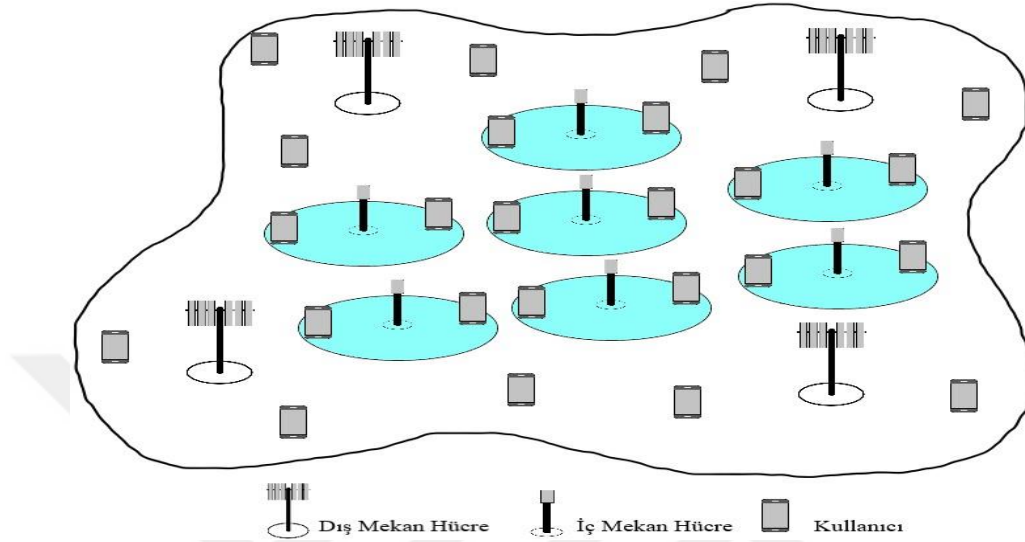
- Dış mekân (Outdoor) hücresel baz istasyonları: Geniş ve açık alanda (kırsal alan, kentsel alan, havalimanı, stadyum vb...) çok sayıda kullanıcıya servis hizmeti veren ancak düşük veri hızı sunan yapılardır. Makro, Mikro ve Piko Hücre bu yapıya örnektir

- İç mekân (Indoor) hücresel baz istasyonları: Küçük ve/veya kapalı alanda (ev, ofis, avm, havalimanı içi, stadyum vb...) az sayıda kullanıcıya servis hizmeti veren ancak



yüksek veri hızı sunan yapılardır. Piko ve Femto Hücre yapıları bu yapıya örnek olup Piko Hücre aynı zamanda dış mekânda da konumlandırılabilir.

Böyle bir yapıya ait temsili gösterim Şekil 14’te gösterilmiştir.



Şekil 14. Temsili hücreli ağ mimarisini

Bu yapılarda Dış mekân hücreler, servis hizmeti ile olan bağlantı kopma sorununu engellerken, İç mekân hücreler de kullanıcılara (UE) yüksek veri hızı sağlamaktadır. Böyle bir ağ yapısı kullanıcılara kesintisiz ve en iyi servis hizmeti veren yapıdır. Bu ağ GSM, Evrensel Mobile Telekomikasyon Sistemi (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS), LTE, WIMAX ve Kablosuz Bağlantı Alanı (Wireless Fidelity, Wi-Fi) gibi standartları da içinde barındırmaktadır.

Hücreli ağ sistemi aslen kablosuz ses haberleşmesi için tasarlanmış bir sistemdir [48]. Ancak günümüzde 3G’den itibaren hücreli ağ yapısı daha çok veri haberleşmesi üzerine kullanılmaktadır. Tüm bölgelerde özellikle video verisi, daha fazla veri trafiğine ihtiyaç duyması bakımından bu ağın yoğunluğu kapsamaktadır [49]. Teknoloji geliştikçe bir bölgede bu yüksek veriye daha hızlı ve daha çok erişim talebi de giderek artmaktadır. Bu talep 5G’de daha fazla meydana gelecek ve kurulacak hücreli ağ yapısının bu talebi sağlayacak yapıda olması gerekmektedir. Özellikle Qualcomm gibi firmalar yıllık büyüme oranının %40-60 civarı olduğu günümüzde 15-20 yıllık süreç düşünüldüğünde bir bölgedeki toplam kapasitesinin 1000 katlık artması gerektiğini belirtmektedir [50]. Burada en önemli faktör yıllık beklenen büyüme oranı ve 5G’nin kullanım süresi dikkate alındığında ihtiyaca cevap verebilecek bir hücreli ağın belli bir alana sağladığı toplam veri miktarının



artırılması gerektirir. Bu yüzden bir bölgenin Alan Kapasitesi (Area Throughput) değerinin hesaplanması, talebin karşılanıp karşılanmadığının anlaşılması için bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden bu hesaplama, hücresele ağ yapısının gelecekteki gelişimi açısından oldukça önemli bir etkidir. Bir bölgenin alan kapasitesi ise;

$$\text{Alan kapasitesi [bit/s/m}^2\text{]} = \text{BW [Hz]} \times \text{D [hücre/m}^2\text{]} \times \text{SV [bit/s/Hz/hücre]} \quad (3)$$

denklemi ile verilmektedir. Bu denklem tek katmanlı tek bantlı sistem için ifade edilmektedir [51]. Denklemde BW bant genişliğini, D m²'ye düşen ortalama hücre yoğunluğunu belirtmektedir. SV ise Spektral Verimlilik olup bir hücrede 1 Hz'lik BW üzerindeki saniyede iletilen veri miktarını vermektedir. Yani diğer bir tanımla verilen bant genişliğinde gönderilen Hz başına toplam bit miktarı da denebilir.

Denklem (3) incelendiğinde hücresele ağ yapısında bir bölgedeki Alan Kapasitesini artırmak için 3 yol olduğu görülmektedir. Bunlar;

- Daha fazla bant genişliği kullanmak (BW)
- Bir alandaki hücre sayısını artırmak (D)
- Hücrenin Spektral Verimliliğini (SV) artırmak

şeklinde sıralanabilir. Bu maddelerin her biri de kullanılan frekansla doğrudan bağlantılı olup frekans arttıkça bu değerlerde artış göstermektedir. Qualcomm tarafından belirtilen 1000 katlık kapasite artışı ihtiyacının karşılanması için BW, D ve SV'nin her birinin ortalama 10 kat artması gerekmektedir. Bu 3 parametreden her birinin bu artışı sağlayıp sağlayamayacağı incelendiğinde BW değerinin zaten 4.5G'de 100 MHz seviyelerine kadar çıktığını bilmekteyiz (Tablo 4).

5G de ise şu an için maksimum bant genişliği 400 MHz olarak tanımlansa da 1 GHz değerine kadar tanımlamalar sürecektir [52]. Bu durumda Bant genişliğinin 10 kat artması sağlanmış olacaktır. D'de ise 5G'deki hücre sayısının 4G'ye göre 10 kat artması beklenmektedir [1]. Ancak Km²'ye düşen hücre sayısının 5G'nin milimetre dalga frekanslarından kaynaklı olarak artacak olması her ne kadar beklenen bir durum olsa da hücre sayısının artması başta maliyet ve kurulum zorluğu problemleri nedeniyle istenmeyen durumdur. Bu yüzden bu konudaki tutum operatör firmalarına daha çok bağlı olacaktır. Geriye kalan 10 katlık artış ihtiyacı ise SV değerinin artırılması ile mümkündür.

Buradan da anlaşılacağı üzere bir bölgenin alan kapasitesini artırmanın en verimli yöntemi SV ve BW değerlerini artırmak olacaktır. Böylece kapasite artırmanın yanında



ekonomik olarak da avantaj sağlayacaktır. Ancak milimetre dalgaların yüksek sönümlenme etkisi nedeniyle de D'deki artış şu an için kaçınılmazdır.

1.14. Baz İstasyonu Kanal Kapasitesi Hesabı

Yukarıda bahsedilen SV değeri Claude Shannon tarafından 1948'de yayımlanan çalışmasındaki Kanal Kapasitesi denklemi ile tanımlanmaktadır [53].

$$C=BW*\log_2(1+SINR) \quad (5)$$

$$SINR=\frac{P_R}{P_I+P_N} \quad (6)$$

Burada,

C = Kanal Kapasitesini (bit/s),

BW = Bant Genişliğini (Hz),

SINR = Alınan Sinyalin Gücünün Gürültü + Girişim Gücüne Oranını,

P_R = Alınan Sinyal Gücünü (W),

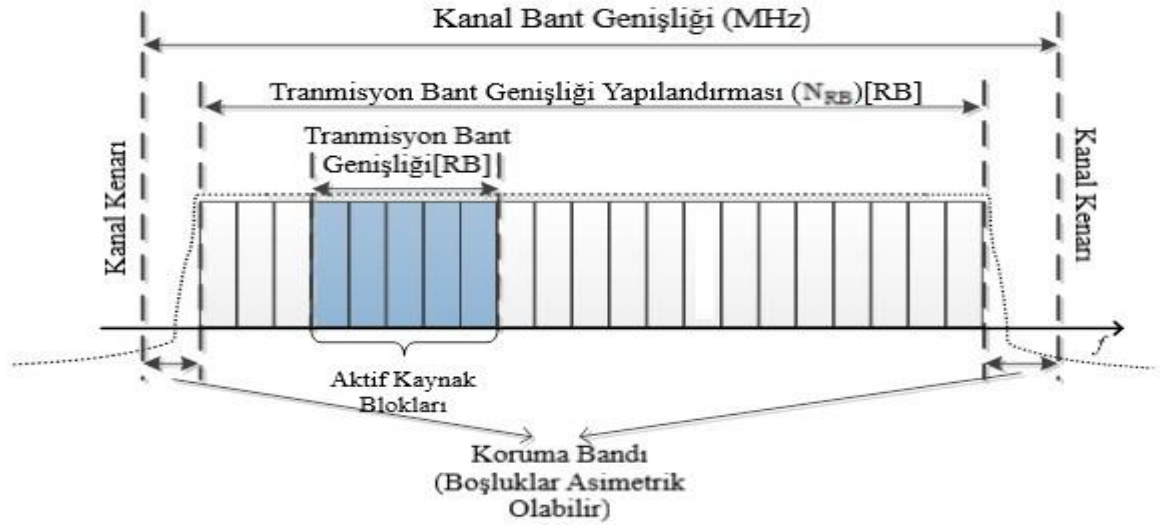
P_I = Girişim Gücünü (W),

P_N = Gürültü Gücünü (W),

göstermektedir. Shannon'a göre kanal kapasitesi, kabul edilebilir hata olasılığı içerisinde tek bir kanalın saniyede gönderebileceği maksimum bit değeridir. (5)'deki denklem kanal kapasitesinin en basit formu olup teorik olarak kanalın üretebileceği maksimum bit değerini vermektedir.

Baz istasyonu kanal kapasitesi hesabında ise bant genişliği değeri alt taşıyıcı frekans (Sub-Carrier, SC), Kaynak Bloklarının Sayısı (Numbers of Resource Blocks, N_{RB}) ve Koruma Bandı'na bağlı olarak değişmektedir. Şekil 15 tek bir NR kanalda bu bant genişliğinin nasıl tanımlandığını şematik olarak göstermektedir.





Şekil 15. Tek bir NR kanal için kaynak blokları ve kanal bant genişliği tanımı

Bu yapıda N_{RB} değeri, kaynak bloklarının sayısını vermektedir. Her bir kaynak blok da 12 adet alt taşıyıcıdan (SC) oluşmaktadır. Koruma Bandı ise farklı ya da aynı sistemlerde kullanılan bitişik frekanslarda girişimi önlemek amacıyla aralarında bırakılan boş frekans bandıdır. Koruma Bandı kendinden önceki ve sonraki bantla arasında simetrik olmayan bir yapıda konulabilir. Tüm bunlar değerlendirildiğinde baz istasyonundaki bant genişliği;

$$BW = SC \times 12 \times N_{RB} \quad (7)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. FR1 ve FR2'nin her bir bant genişliği için tanımlı SC frekans değerleri ve N_{RB} sayıları [24]'de yer almaktadır. Bunlara ait değerler Tablo 13 ve Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 13. FR1 için transmision bant genişlik yapılandırması

SC (KHz)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135



Tablo 14. FR2 için transmisyon bant genişlik yapılandırması

SC (KHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
60	66	132	264	N/A
120	32	66	132	264

FR1 için belirtilen SC değeri şu an için maksimum 60 KHz olarak, bant genişliği ise maksimum 100 MHz olarak tanımlanmıştır. Ancak FR1’de bant genişliğinin 200 MHz’e çıkabileceği belirtilmiştir. FR2 için ise maksimum SC değeri 120 KHz olarak tanımlanmış olup 240 KHz değerinin ise aday olduğu belirtilmiştir. Aynı şekilde bant genişliği değeri de maksimum 1 GHz’e kadar çıkabileceği 3GPP Rel.15’te belirtilmektedir [52]. Kanal kapasitesi hesabında kullanılan SNIR hesabında ise girişimli kanalın tam kanal kapasitesi hesap edilemeyeceği için çalışmalarda girişim etkisi hesap edilmeyecek olup tez çalışmasında sadece alınan sinyal gücünün gürültünün gücüne oranı (SNR) hesaplanacaktır. 5G NR’da ise SINR bağlantı gereksinimi ise Tablo 15’te belirtilmiştir [54].

Tablo 15. 5G NR için temel bağlantı seviyesi performansını açıklayan parametreler

Parametre	DL (dB)	UL (dB)	Notlar
SINR (min)	-10	-10	QPSK, 1/8 (DL) & 1/5 (UL)
SINR (maks)	30	22	256 QAM 0.93 (DL) & 64 QAM 0.93 (UL)

Buna göre QPSK modülasyonunda -10 dB değerine kadar SINR değeri kullanılmaktadır. Çalışmamızda da SNR değeri minimum -10 dB olacak şekilde inceleme yapılmıştır.

Denklem (6)’da P_N değeri Toplam Gürültü Gücü olup aşağıdaki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$N_0 = 10 \log_{10} \left(\frac{kTBW}{1mW} \right) \quad (8)$$

$$P_N \text{ (dBm)} = N_0 + NF + IM \quad (9)$$



$$P_N (\text{miliwatt}) = 10^{\frac{P_N(\text{dBm})}{10}} \quad (10)$$

Denklem (8)'de belirtilen kTBW çarpımı, bant genişliğine bağlı termal gürültünün Watt cinsinden gücünü vermektedir. Denklem (8)'de N_0 Termal Gürültüyü (dBm), k Boltzman Sabitini ($1.38064852 \times 10^{-23}$), T ortam sıcaklığını (Kelvin), NF Gürültü Figürünü (dB), IM ise Endüstriyel Marjini (dB) temsil etmektedir. Frekansa bağlı BS de oluşan NF ve IM değerleri ise Tablo 16'te gösterilmiştir [55].

Tablo 16. Frekansa bağlı tipik gürültü değeri ve endüstriyel marjin

Frekans Bandı (GHz)	Tipik Gürültü Değeri (NF) (dB)	Endüstriyel Margin (IM) (dB)
1,3 to 3	~4	+3
3 to 5	~5	+3
6 to 15	~5	+3
18 to 23	~6	+3
26 to 28	~7	+3
32	~7	+3
38 to 42	~8	+3
48 to 50	~9	+3
52 to 55	~10	+3
71 to 76	~13	+4
81 to 86	~13	+4

Tablo 16'te gösterilen frekansa bağlı NF değerleri aslen BS için geçerli olsa da UE'de kullanım için bu değerler baz alınmıştır.

1.15. Spektral Verimlilik

Alan kapasitesinin artırılması için gereken bir diğer etken olan Spektral Verimlilik (SV), güvenilir şekilde aktarılan bilgi miktarı olup bir hücrede saniyede Hz başına düşen bit sayısını verir. SV değeri modülasyon teknikleri, anten sayısı, kanal sayısı gibi birçok etkenle artabilecek değer olup yeni hücre kurulumu yapmadan ve bir bölgedeki kapasiteyi



çok fazla maliyet ve iş yükü çıkarmadan artırabilecek en önemli etkidir. Bu yüzden operatör firmalar maliyeti düşürmek için SV'ye dikkat etmektedirler [1].

Bir hücrede ve tek kanalda elde edilebilecek maksimum SV değeri Shannon Kanal Kapasitesi denklemi ile hesaplanabilmektedir. SV değeri en temel haliyle (5)'deki kanal kapasitesi denkleminin, bant genişliğe oranı şeklinde gösterilir.

$$SV = \frac{C}{BW} = \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (11)$$

$$SV(\text{bit/s/Hz}) = \frac{\text{Maksimum Veri Miktarı}(\text{bit/s})}{\text{Bant Genişliği}(\text{Hz})} \quad (12)$$

(5) ve (11)'deki denklemler bu haliyle teorik olup gerçek sistemlerde hata oranlarının daha fazla olması ve daha birçok negatif etken dolayısıyla bu teorik değere ulaşılamamaktadır. 3GPP TR 36.912 Release 13'te LTE-A için Spektral Verimlilik ITU gereksinimi tek tabakalı çoğullama için DL'de 15 bit/s/Hz, UL'de ise 6.75 bit/s/Hz olmaktadır [56]. Tabaka sayısı arttıkça oluşan SV gereksinim değerleri ise Tablo 17' de verilmiştir. Tablodaki gereksinimler 20 MHz bant genişliğine göre belirlenmiştir.

Tablo 17. LTE-A SV gereksinimleri tablosu

ŞEMA		SPEKTRAL VERİMLİLİK (bit/s/Hz)			
		TDD		FDD	
(DL için)	(UL için)	DL	UL	DL	UL
ITU Gereksinimi	ITU Gereksinimi	15	6.75	15	6.75
Rel-8 4 Tabakalı Çoğullama	2 Tabakalı Çoğullama	16.0	8.1	16.3	8.4
8 Tabakalı Çoğullama	4 Tabakalı Çoğullama	30.0	16.1	30.6	16.8



5G'de ise Spektral Verimlilik değeri ITU gereksinimi gereği DL'de 30 bit/s/Hz, UL'de ise 15 bit/s/Hz olarak belirlenmiştir. Çok tabakalı durumlarda ise LTE Advanced'a göre minimum üç katlık SV hedeflenmektedir [19, 51, 56].

1.16. Enerji Verimliliği

Son zamanlarda üzerinde çokça durulan konulardan biri olan enerji verimliliği, artan veri trafiği nedeniyle oluşan enerji ihtiyacını optimum seviyeye getirebilmek için incelenmesi gereken çok önemli bir konudur. Özellikle hücre yapılarında bir hücrenin en az enerji tüketimi ile en çok veri göndermesi daha düşük maliyet ve daha yüksek hizmet kalitesi sunması bakımından avantajlar sağlaması nedeniyle operatör firmaların ve endüstriyel kuruluşların en çok isteyeceği şeylerden biridir.

Ancak buradaki sorun [57]'de yayınlanan rapora göre Avrupa'da bulunan BS'lerin tükettiği enerjinin, tüm Avrupa'nın enerji tüketiminin %18'ine denk geldiği ve kablosuz haberleşmedeki enerji tüketiminin her yıl %20 oranda artmasıdır [58].

Küresel bazda kablosuz haberleşmeye olan talebin giderek artması nedeniyle tüketilen enerjinin her yıl artması küresel ısınma ve yüksek maliyet nedeniyle şu an tüm dünyada önemli bir sorun haline gelmektedir. Bu nedenle Enerji Verimliliği optimizasyonu hem akademik hem endüstriler hem de ülkeler için önemli bir konu olmaktadır. Bu durum hücre yapılarında enerji verimliliğinin ne derece önemli olduğunu gösterir. Genel olarak bir hücredeki Enerji Verimliliği (EV);

$$EV=(YS) \times \frac{\text{Toplam Veri Miktarı(bit/s/hücre)}}{\text{Güç Tüketimi(Watt/hücre)}} \quad (13)$$

denklemleri ile gösterilmektedir [59]. Hücredeki toplam veri miktarının hücrenin toplam tükettiği güce oranı şeklinde hesaplanmaktadır. YS ise Yük Seviyesi olup % olarak hesap edilir. Denklem (13) bu haliyle bir hücredeki tüm kanalları ve bir baz istasyonundaki tüm güç tüketen unsurları içinde barındıran genel bir formüldür.

Son zamanlarda EV incelemesi ise tek kanallı bir hücrede, kanal kapasitesinin hücrenin tükettiği güce oranı şeklinde olmaktadır [60]. Kanal kapasitesinin de Bant Genişliği (BW) ve Spektral Verimlilik (SV) çarpımına eşit olduğunu daha önce (11)'de belirtmiştik. Bu durumda EV denklemi;



$$EV=(YS)\times\frac{C}{P_C+P_T}=(YS)\times\frac{B\times SV}{P_C+P_T} \quad (14)$$

halini almaktadır. Burada P_T (Watt) verici gücünü, P_C (Watt) ise hücrenin diğer donanımsal güç tüketimlerini temsil etmektedir. Burada P_C değeri baz istasyonu üreten firmalar tarafından oluşturulmakta olup sınırlama veya kriter bulunmamaktadır. Bu yüzden çalışmamızda değişkenlik gösteren ve yaklaşık olarak P_T ile doğru orantılı olan P_C değeri bu çalışmamızda sıfır kabul edilerek bir kanalda tek bir verici gücü limitleri içindeki EV değeri hesaplanarak hücrelerin karşılaştırılması yapılmıştır.

1.17. 5G'de Hücrel Ağ Yapısı

3G'den itibaren gelişen hücrel ağ yapısıyla beraber bir bölgede oluşan toplam veri miktarı giderek artmaya devam etmiştir. Bu artışa sebep olan şeyler ise giderek daha yüksek bant genişliğine sahip haberleşme teknolojilerine geçmemiz, operatörlerin giderek daha fazla sayıda hücre yerleştirmesi ve SV'nin daha da gelişmesi olmaktadır. Bu durumun 5G'de devam etmesi için daha fazla kapasite ihtiyacı ve kullanıcı desteğinin sağlanması adına oldukça önemlidir.

5G'de kullanacağımız yüksek frekansların etkisiyle daha fazla bant genişliği ve düşük yayılım etkisi nedeniyle bir bölgeye daha fazla BS kurulumu, BS'de anten sayısının ve SV'nin daha da artması beklenmektedir [21].

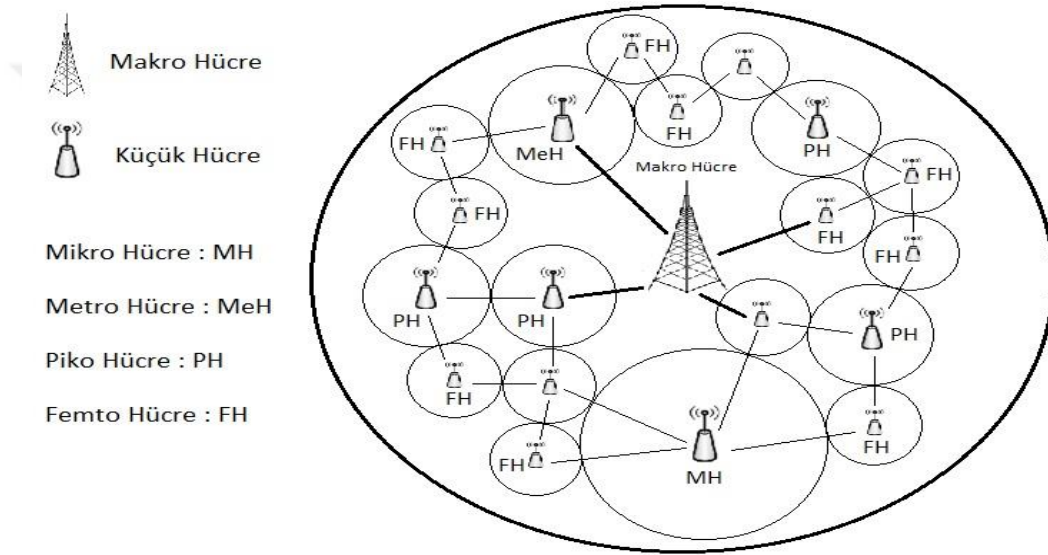
Hücrel Ağ yapısı içinde bulunan hücre yapıları ise belirlenen bu frekans aralıklarında çalışarak özelliklerine göre buldukları bölgeye servis hizmeti vermektedir. Hücrel yapılar kurulum yerleri, çalışma frekansları, harcadıkları güçler, kullanıcı sayıları, sundukları kapasiteleri, maliyetleri vb nedenlerle çeşitlilik gösterse de hepsinin amacı kullanıcılara belirlenen hedefler doğrultusunda servis hizmeti sunmaktır.

Hücrel ağ yapısında bulunan bu yapılar başlıca Makro Hücreler ve Küçük Hücreler (Metro, Mikro, Piko ve Femto) şeklinde iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar içinde Metro Hücre yapısı Mikro ve Piko Hücrelerin arası bir formda olması ve bu yapı ile alakalı kanal model çalışmalarının pek olmaması nedeniyle tez içeriğindeki incelemede değinilmemiştir. Ancak diğer hücre tiplerinin kanal modelleri mevcuttur.



1.17.1. Makro Hücre

Hücre yapıları içinde kapsama alanı (maksimum 35 Km yarıçapında) en yüksek hücre yapısı olan Makro Hücre, geniş alanda çok sayıda kullanıcıya (>2500) servis hizmeti sunması, yerleşim ve frekans planlaması kolaylığı sağlaması nedeniyle mobil haberleşme için oldukça önemlidir. Bu özelliği sayesinde konumlandırıldığı bölgede servis kalitesini artıran ve diğer hücre yapılarına da çatı görevi gören bir yapıya bürünmektedir. Şekil 16'daki resim bu durumu temsili olarak göstermektedir [61].



Şekil 16. Çatı görevi yapan makro hücrenin temsili gösterimi

Böyle bir yapı sayesinde bir UE küçük hücre yapısının kapsama alanından çıksa dahi Makro Hücre'nin kapsama alanından çıkmayacak ve bu durum kullanıcının servisle olan bağlantısının kopma olmadan sürdürmesini sağlayacaktır. Bu, Makro Hücre'nin ne kadar önemli olduğunu gösteren önemli bir özelliktir. Ancak makro hücrenin bu önemli avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Bir Makro Hücre geniş alanda kapsama hizmeti verebilmesi için diğer hücre yapılarına göre daha düşük frekansta çalışmaktadır. Bu düşük frekans kullanması, onun daha düşük kapasite vermesi anlamına gelmektedir. Şöyle ki, tek bir hücre yapısının maksimum sayıda kullanıcıya hizmet veren yapıda olması, kullanıcı başına düşen veri hızını azaltan bir etmendir. Operatörler, bu kapasite kaybını azaltmak için hücre de bulunan anten sayısını artırmaya çalışsalar da bu durum genel olarak küçük hücre yapılarının sağladığı yüksek kapasite avantajını



sağlayamamaktadır. Bu yüzden operatör firmaları Makro Hücre yapısını daha çok servis hizmetinde herhangi bir aksama olmaması açısından tercih etmektedirler.

Bu yapıların en büyük dezavantajlarından biri diğer hücre yapılarına göre harcadıkları yüksek güç tüketimlerdir. Makro Hücre'lerin güç tüketimleri genel olarak anten başına 7-100 Watt olarak değişmektedir. Ancak üst limit 3GPP tarafından belirtilmemiştir. Tablo 18 ve Tablo 19'da bu hücre yapısı için belirlenen limitler mevcuttur. Bunların yanında kurulum maliyetleri ise en yüksek hücre tipidir.

Makro hücreler yerleşim yerine göre de ikiye ayrılırlar. Bunlar Kırsal Makro (Rural Macro, RMa) Hücre ve Kentsel Makro (Urban Macro, UMa) Hücre şeklinde isimlendirilmektedirler.

1.17.1.1. Kırsal Makro Hücre

Adından da anlaşılacağı üzere genel olarak kırsal alanlara yerleştirilen hücre tipidir. Kırsal alandaki yerleşimlerde bina ve kullanıcı yoğunluğu az olduğu için sinyal zayıflaması düşük olmaktadır. Ayrıca bu hücredeki antenlerin verici güçleri, anten kazançları ve yükseklikleri diğer hücre tiplerine göre daha yüksektir. Bu durum onu kapsama alanı en yüksek hücre tipi yapmaktadır. Ancak konumlandırıldıkları bölgelerde ağaç veya yeşillik oranı yüksek olduğu için sönmülemde yeşillik kaybının etkisi bu tip hücre yapısında diğer hücre tiplerine göre daha yüksektir. UE'den yükseklikleri verici gücüne bağlı olarak değişmekle beraber genel olarak 35 metre olarak belirtilmiştir [24]. Etrafında bulunan binaların yükseklikleri ise genel olarak 15 metreden azdır. Şekil 17 kurulu haldeki gerçek bir RMa hücre yapısını göstermektedir.





Şekil 17. Gerçek bir kırsal makro hücre yapısı örneği [62].

Bu hücre tipi çok geniş alana hizmet vermek için tasarlandığı için düşük frekans bantlarının kullanımının bu hücre tipi için 5G'de de devam edeceğini ve 6 GHz üstünde en fazla 52.6 GHz'e kadar çıkacağını düşünmekteyiz. Ancak 3GPP, yol kayıp formüllerinde en fazla 30 GHz değeri için sonuç vermektedir [63].

1.17.1.2. Kentsel Makro Hücre

Yerleşim oranının yoğun olduğu bölgelerde konumlandırılır. Bunlar da genel olarak şehirler ve ilçeler olmaktadır. Bina ve kullanıcı yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelere konumlandırıldıkları için kırsal makro hücreye göre kapsama alanları daha azdır. Sinyal sönümlemesine daha çok binalar neden olmaktadır.

Konumlandırıldıkları bölgede genel de binalardan daha yüksek olacak şekilde ya ayrı olarak ya da binaların çatılarına yerleştirilecek şekilde konumlandırılırlar. Yerden yükseklikleri ise genel olarak 25 m olup kanal model çalışmaları da bu değer baz alınarak yapılmaktadır. Çalışma frekanslarının ise Kırsal Makro Hücre'ye göre benzer olduğunu söyleyebiliriz. Ancak 3GPP, Kırsal Makro Hücre için kanal model denklemlerinde 30 GHz sınırı koymamıştır. Ancak METIS kırsal makro hücrenin 6 GHz ve altı frekanslarda çalışacağını düşündüğü için kanal modellerine 6 GHz üstünü dahil etmemiştir [64].



1.17.2. Mikro Hücre

Orta alan BS kategorisine giren Mikro Hücre, aynı zamanda küçük hücreler sınıfında ise en yüksek kapsama alanına sahip hücre tipidir. Gerek kırsalda gerekse de kentsel bölgelerde makro hücrenin sinyal ve kapasitesinin yetmediği veya hiç olmadığı düşük yoğunluklu dış ortamlarda destekleyici hücre tipi olarak görev yapmaktadır. Kentsel bölgelerde genelde binaların çatı katlarına etraftaki binalardan ya yüksekte olacak şekilde ya da çatı hizasında yerleştirilir. Çalışmamızda kullandığımız hücre ise çatı hizasına yerleştirilen Kentsel Mikro (UMi) Hücredir. Ancak bina yüksekliğinin altında da yerleşimleri çokça mevcuttur. UE'ye göre genel yükseklikleri 5 metre ve üzeri olarak belirtilmiştir [24].

Makro hücrelere göre daha düşük alanda hizmet verdiği için Mikro Hücre için kullanılan frekans daha büyük olmaktadır. Bu sayede Mikro Hücre'lerin sunduğu veri hızı da artmaktadır. Mikro Hücre gibi orta alan hücreleri için güç tüketimi 3GPP tarafından FR1 ve FR2 aralıklarına göre verici gücü limitleri Tablo 18'da belirtilmiştir.

Mikro Hücre yapıları şu anda 128-2568 arası kullanıcıya servis hizmeti verebilmektedir. Ancak 5G ile kullanıcı sayılarında artış beklenmektedir. Kapsama alanı bakımından da 5G'den önceki diğer mobil haberleşme teknolojilerini dahil ettiğimizde ortalama 200 m – 2 Km arası kapsama alanı sunmaktadır [65]. Çalışma frekansı olarak 5G'den önceki teknolojilerde 6 GHz altında hizmet veren Mikro Hücre'ler 5G ile daha yüksek frekanslarda da çalışmaya başlayacaktır. 3GPP bunun için herhangi bir üst limit belirlemese de yüksek frekansların açık alanda oksijen, yağmur, yeşillik ve bina sönümlenmelerini dikkate aldığımızda ve de 3GPP'de belirtilen FR2 frekans değerlerinden anlaşıldığı kadarıyla ilk başlarda 5G'de Mikro Hücre'lerin operatörler tarafından genel olarak 6-30 GHz aralığında hizmet verecek şekilde konuşlandırılacakları düşünülmektedir [66]. Ancak zamanla daha yüksek frekanslarında bu hücre tipinde kullanılması muhtemeldir.

Küçük hücreler içerisinde kullanıcı sayısı ve kapsama alanı bakımından büyük avantaj sağlasa da güç tüketimi ve mesafeye bağlı kapasite bakımından da en büyük dezavantaja sahip bir hücre tipidir. 5G teknolojisinin gelişile beraber 5G'nin yüksek hızını en geniş alana sunması bakımından giderek daha önemli bir hücre haline gelmiştir.



1.17.3. Piko Hücre

Kapsama alanı bakımından mikro hücreden sonra gelen ve yerel alan sınıfında olan hücre tipidir. Genel olarak 200 metreden daha az bir yarıçap alanı için servis hizmeti vermektedir. Genelde havalimanı, stadyum, alışveriş merkezleri ve istasyonlar gibi alanlarda hizmet vermesi için yerleştirilir. Aslen literatürdeki kanal model çalışmalarında İç Mekân–Avm (Indoor House -Shopping Mall, InH-SM) şeklinde belirtilen bu hücre, kurulum yeri benzerliği nedeniyle tez çalışmamızda Piko Hücre olarak adlandırılmıştır. Hem dış ortamda (outdoor) hem de kapalı ortamlarda konumlandırılabilirler. Yerden yükseklikleri ise 2 metre ve üzeri olacak şekilde belirtilmiştir [24]. İç mekânda yerleştirilen Piko Hücre’ler genel olarak 100-250 mW enerji tüketirken, dış mekân Piko Hücre’ler maksimum 2 Watt enerji harcayabilmektedir. Kullanıcı sayısı bakımından da 32-128 adet kullanıcıya hizmet verebilmektedir [66].

Piko Hücre’ler daha çok küçük bölgedeki kalabalık kullanıcı topluluğuna yüksek veri hızı sunmak ve servis kalitesini artırmak için yerleştirilirler. Bu özelliği nedeniyle mobil haberleşme teknolojileri geliştikçe önemi de bir o kadar artmaktadır. 5G için tanımlanan frekans aralıklarında milimetre dalga frekansları içinde ilk başlarda 24.25-52.6 GHz yani FR2 frekans aralıklarında çalışacağını öngördüğümüz Piko Hücre, yeni frekans tanımlanmasıyla beraber zamanla 52.6-86 GHz aralığındaki frekanslara kadarda çıkmasını beklemekteyiz. Ancak Piko Hücre yüksek frekanslara çıktıkça milimetre dalganın bina duvarlarındaki yüksek sönümlenmesi nedeniyle dış mekanlarda pek kullanılamayacağı düşünülmektedir [66, 67]. Ancak iç mekanlar için yüksek kapasite ve servis sağlaması için uygun çözüm olmaktadır.

1.17.4. Femto Hücre

Aslen kanal model çalışmalarında İç Mekân–Ofis (Indoor House-Ofis, InH-Office) şeklinde belirtilen bu hücre, kurulum yeri benzerliği nedeniyle tez çalışmamızda Femto Hücre olarak adlandırılmıştır. Hücre yapıları içinde en küçük kapsama alanı (100 metreden az) ve en az kullanıcı desteği (4-32) gibi büyük dezavantajlar sunan Femto Hücre’ler, diğer hücre yapıları içinde en az güç tüketimi (Tablo 18), en düşük kurulum maliyeti, kurulum ve bakım kolaylığı ve de yüksek veri hızı sunması gibi büyük avantajlarıyla da öne çıkmaktadır [68].



Femto Hücre yapıları sahip oldukları bu özellikler nedeniyle servis kalitesinin artırılması ve kullanıcılara yüksek veri hızı sunması için çokça tercih edilen yapılardır. Özellikle 5G’de bu teknoloji yüksek frekanslardaki milimetre dalgaların düşük yayılım etkinin üstesinden gelebilmek için giderek daha da önem arz etmeye başlamıştır. Bu yüzden 5G’de en çok yerleşimi yapılacak hücre tipi olarak düşünülmektedir [69].

Genel olarak ev ve ofis gibi iş yerlerinde kullanılan Femto Hücre’ler, kullanıcıya ve IoT’deki UE’ye daha yakın bir alanda ve genelde LOS görüşte bağlantı sunduğu için kaliteli servis hizmeti vermektedir. Bu sayede kullanıcı veya nesnenin servisle bağlantı kurması için harcadığı enerji de azalmaktadır. Bu da hücre yapısından alınan verimin artmasını sağlamaktadır. Bu nedenle Femto Hücre yapısının enerji verimliliğinde en iyi değerleri vereceğini düşünmekteyiz.

Ancak bu avantajların yanında Piko Hücre gibi çokça ve sık aralıklara yerleştirilmesi düşünülen Femto Hücre’ler, frekans planlama ve girişim konularında ise 5G’deki en büyük problemleri ortaya çıkarmaktadır. Bir bölgeye diğer hücrelere göre çok daha fazla sayıda yerleştirilen Femto Hücre’ler arasında girişim etkisi çok fazla olacağından, operatörlerin çok iyi frekans planlama yapmaları gerekmektedir. Bu durum Femto Hücre’nin getireceği en büyük zorluk olup üzerinde iyi araştırılması ve çalışılması gereken detaylı bir konudur.

Femto hücreleri yerleşim yeri ve kullanım amacına göre değerlendirdiğimizde yüksek frekanslarda çalışma frekansının ilk etapta FR2 frekanslarında (24.25-52.6 GHz) olacağını daha sonra da 52.6-86 GHz aralıklarının kullanılacağını düşünmekteyiz.

Genel olarak anten verici güçlerine göre tüm hücrelerin harcadıkları güçler Tablo 18’de belirtilmiştir [24, 70]. Tez çalışmasında kullandığımız kanal modellerin tek anten yapısına göre oluşturulması nedeniyle çalışmamızda da bu tek anten bağlantı gereksinimlerine göre oluşturulmuştur.



Tablo 18. Baz istasyonu taşıyıcı çıkış gücü limitleri

Baz İstasyon (BS) Sınıfı	BS Tip 1C	BS Tip 1H	BS Tip 1O	BS Tip 2O
Geniş Alan BS (Makro Hücre)	Üst limit yok	Üst limit yok	Üst limit yok	Üst limit yok
Orta Alan BS (Mikro Hücre)	$\leq + 38$ dBm	$\leq + 38$ dBm $+10\log_{10}(T_N)$	$\leq + 47$ dBm	Üst limit yok (Bazı bölgeler hariç)
Yerel Alan BS (Piko Hücre)	$\leq + 24$ dBm	$\leq + 24$ dBm $+10\log_{10}(T_N)$	$\leq + 33$ dBm	Üst limit yok (Bazı bölgeler hariç)
Ev/Ofis Tipi BS (Femto Hücre)	$\leq + 20$ dBm (Tek vericili anten portu) $\leq + 17$ dBm (İki vericili anten portu) $\leq + 14$ dBm (Dört vericili anten portu) $\leq + 11$ dBm (Sekiz vericili anten portu)			
Not 1: Güç değerleri normal koşullar için geçerli olup ekstrem koşullar için FR1’de ± 2 dB, FR2’de ± 3 dB değişiklik olabilir. Not 2: Gerek görüldüğünde BS Tip 1O’daki limitler BS Tip 2O içinde uygulanabilir Not 3: T_N anten sayısıdır.				
BS Tip 1C	FR1’de çalışan ve tek anten bağlantısı gereksinimlerini karşılayan NR baz istasyonlarıdır.			
BS Tip 1H	FR1’de çalışan ve çoklu anten bağlantısı gereksinimlerini karşılayan NR baz istasyonlarıdır.			
BS Tip 1O	FR1’de çalışan NR baz istasyonlarıdır.			
BS Tip 2O	FR2’de çalışan NR baz istasyonlarıdır.			

Tez çalışmamızda yapılan incelemeler genel olarak DL için olmaktadır. Ancak UL hesabında kullanılması durumunda bilgi amaçlı olarak UE'lere ait verici güçleri de Tablo 19'de gösterilmiştir [71].

Tablo 19. UE tiplerine göre maksimum çıkış gücü limitleri

UE Tipleri	Maksimum Çıkış Gücü (dBm)
Sabit Kablosuz Erişim UE	35
Araç-Vasıta UE	23
Elde Taşınan UE	23
Yüksek Güçlü El Tipi Olmayan UE	23



1.18. Yığın MIMO

MIMO, IEEE 802.11n standartına dayanan bir radyo teknolojisidir. Bu yapılar bir bölgenin kapasitesinin, kullanıcı sayısının ve sinyal kalitesinin artırılması amacıyla konumlandırılmaktadırlar. Yani bir bölgeye aynı anda daha fazla veri gönderip almayı amaçlarlar. Bu özellikleri nedeniyle yerleştirildikleri bölgenin spektral verimliliğini ve servis kalitesini artıran bir teknolojidir. Verimlilikteki bu artışı sağlayan şey ise üzerinde bulunan çok sayıda verici ve alıcı anten sayesinde olmaktadır.

MIMO yapılarının bir bilgiyi, aynı frekansta yayın yapan çok sayıdaki antenle daha az hata ile gönderebildiği durumu olduğu gibi çok sayıdaki vericilerin her birinin bir bilgiyi farklı sinyaller şeklinde ayırarak gönderdiği ve alıcı tarafta bulunan yine çok sayıda alıcı anten sayesinde farklı zamanda ve açıda, farklı antenlere gelen bilgilerin daha sonra birleştirildiği kullanım durumu da vardır. Bu durum kullanıcının anlık veri alışverişini artıran önemli bir özelliktir.

MIMO teknolojisinde alıcı ve verici sayısındaki bu fazlalıkta her bir antenin ışınma açısı daha dar bir alana yönlendirildiği için anten kazançları normal hücre yapılarına göre daha yüksektir. Bu da sinyalin iletilme mesafesini ve kalitesini artıran önemli bir avantajdır.

Mevcut haberleşme teknolojilerinde MIMO teknolojisi 2X2 (2 Verici, 2 Alıcı), 4X2 (4 Verici, 2 Alıcı), 4X4 (4 Verici, 4 Alıcı) şeklinde yapılardan oluşmaktadır. Bu yapı hali hazırda Wi-Fi, 3G ve 4G’de yaygın bir şekilde zaten kullanılmaktadır. Ancak bu yapıdaki ağ artık ihtiyaca cevap verebilecek yeterli seviyede spektral verimlilik sunamadığı için gelecekteki ihtiyaçları karşılayabilecek daha yüksek hızlarda ve çok daha fazla spektral verimlilik sağlayan MIMO yapılarına 5G ile geçilmeye başlanacaktır [1].

Aynı anda ve aynı frekansta yayın yapan bir baz istasyonunun tek kullanıcı için Tek Kullanıcı MIMO (Single-User MIMO, SU-MIMO) ile iletişimi sağlanabildiği gibi aynı anda ve frekanstaki bir baz istasyonunun da 5G’de çok kullanıcı için Çok Kullanıcı MIMO (Multi-User MIMO, MU-MIMO) bağlantısı yapması beklenmektedir [29]. Bu bağlantının sağlanabilmesi içinde UE’de az veya kısıtlı sayıda bulunan antene karşın baz istasyonunda yüzlerce anten konularak kullanıcıyla 4X4, 4X2 şeklinde MIMO bağlantılar sağlanabilecektir. Örneğin 128X128 anten yapısına sahip bir MIMO baz istasyonu, 4X4 MIMO desteği olan yaklaşık 32 kullanıcıya aynı anda ve frekansta servis hizmeti sağlayabilir. Yüzlerce adeti bulan bu anten sayısı ise Yığın MIMO dediğimiz kavramı oluşturmaktadır.



3GPP, [72]'de 5G'nin tek kullanıcı için SU-MIMO ve DL'de maksimum 8 anten, UL'de ise 4 anten desteği olduğu, çok kullanıcı MU-MIMO için ise DL ve UL'de maksimum 12 anten desteği bulunduğunu belirtmektedir. Ancak MIMO yapılarında anten sayısı ile ilgili herhangi bir kısıtlama yoktur. Operatörler gelişen teknolojiler ve ihtiyaca göre anten sayısını bu yapılarda artırabilmektedir. 5G'de öngördüğümüz anten sayısı ise gelecek yıllarda maksimum 256 adete kadar çıkacağı yönündedir.

1.19. Yol Kaybı Tanımı

Yol kaybı, elektromanyetik dalgaların bir ortamda hareket ederken yaşadığı güç yoğunluğundaki azalmadır. Elektromanyetik dalgalar serbest olarak hareket ederken güçleri zamanla kaybolur ve yok olurlar. Özellikle haberleşme teknolojilerinin en önemli sorunlarından biri olan bu kayıp, haberleşmenin sağlanabilmesi için bilinmesi gereken önemli terimlerden biridir. Çünkü haberleşmenin veya veri alıp göndermenin sağlanabilmesi için haberleşme sistemlerinin birbirlerine yeterli güç seviyesinde ve düşük gürültüde sinyal gönderip almaları gerekmektedir. Sinyallerin haberleşme sistemlerince alınamaması veya gürültüden dolayı işlenememesi durumunda veri alışverişi veya haberleşme işlemi gerçekleşemeyecektir. Bu istenmeyen durumun üstesinden gelmek için sinyalin yaşadığı yol kaybının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bir sinyalin yaşadığı kayıp oranı bilirse eğer gidebileceği maksimum yol hesaba katılarak alıcı ve verici arasında veri alışverişi daha kaliteli bir şekilde sürdürülebilir.

Sinyallerin hareket ettiği ortamlar uzay gibi içinde başka nesnelerin olmadığı yer olabileceği gibi bina, ağaç, insan gibi binlerce nesnenin olduğu ortamlarda olabilir. Bu farklı ortamlar yol kayıp miktarını etkileyen faktörler olup hesaplama işlemleri de bu faktörlere bağlı olmaktadır. Örneğin serbest uzayda yaşanan bu kayıp olayı sadece mesafeye ve frekansa bağlı olarak meydana gelmekteyken başka nesnelerin eklenmesi ile oluşan kayıp miktarı

- Sinyalin frekansına
- Sinyalin yol aldığı mesafeye
- Sinyalin yol aldığı ortama (Alışveriş merkezleri, Ev veya Ofis gibi kapalı mekân ortamlar veya kırsal ve kentsel ortamlar)
- Atmosferik koşullara (kuru, nemli, yağmurlu veya karlı hava)



- Atmosferik gazlara (oksijen, azot vb)
- Bina, ağaç ve tepe yüksekliklerine ve yoğunluklarına
- Binalar arası mesafeye
- Binalarda buluna yapı malzemelerine
- Şehir içinde bulunan direk, kule, araç, canlıların sayısı ve yoğunluğuna
- Sokak genişliğine
- Alıcı ve vericinin yerden yüksekliklerine
- Sinyalin nesnelere çarparak yaşadıkları kırılma, yansıma ve sönümlenme etkilerine

bağlı olarak değişmektedir. Bu durumlar hesaba katılarak haberleşme sistemleri arasındaki yol kaybı hesabı veya kanal modelleri oluşturulabilmektedir.

1.20. Yol Kaybı Matematiksel Modelleri

Yol kayıp modelleri bir sinyalin bulunduğu ortama göre vericiden çıkıp alıcıya gelene kadar karşılaştığı bina, araç, yeşillik vb. nesnelere kaynaklı kaybı yaklaşık olarak tahmin etmede kullanılan deneysel veya teorik sonuçlarla elde edilen matematiksel modellerdir.

Bugüne kadar yapılmış modellerin çoğu belirli bir bölgede (kırsal, kentsel, banliyö) frekans, mesafe, bina yüksekliği, binalar arası mesafe ve sokak genişliği gibi değişkenleri de içinde barındıracak şekilde oluşturulmuşlardır. Bunlar arasında en bilinenleri; Okumura-Hata modeli [73], Cost-231 model [74] gibi modellerdir ve bu modellerin çoğu orta ve düşük frekans aralıkları için kullanılan kayıp modelleridir. Ancak bu modeller düşük frekans aralıkları için tanımlanmış modeller olup milimetre dalga bantlarında uzak mesafe ve geniş frekans aralıkları için uygun modeller değildirler.

5G için düşünülen asıl modeller ise ABG ve Close-in modelleridir [75]. Bu modeller hem geniş frekans ve mesafe aralıklarında geçerli olması hem modellemelerinin kolay olması hem de az sayıda parametre içermeleri nedeniyle 5G için aday modeller olup 3GPP, METIS, mmMAGIC, IEEE, ITU-R ve NYU-Wireless gibi önemli kuruluşların da kullandıkları modeller bunlardır. Bu yüzden çalışmamızda 5G için aday olan bu iki matematiksel modele göre oluşturulmuş kanal modelleri dikkate alınmıştır. Diğer modeller bu çalışmada kullanılmamıştır.



1.20.1. ABG Yol Kayıp Modeli

Özellikle yüksek frekanslarda uzun mesafe için doğru sonuçlar vermesiyle bilinen ve 5G için aday yol kayıp modellerinden biri olan Alfa-Beta-Gama (ABG) model [76, 77], 3 değişkenli yapıdan oluşmaktadır. Bu modele ait denklem;

$$PL_{ABG}[\text{dB}] = 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \beta + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{F_C}{F_{C_0}} \right) + \sigma_{ABG} \quad (15)$$

şeklinde olup F_C (GHz) frekansı, d_0 (metre) referans mesafeyi, F_{C_0} (GHz) referans frekans değerini, α (Alfa) ve γ (Gama) mesafe ve frekans bağımlılığını karakterize eden yol kayıp çarpanlarını, σ^{ABG} mesafe boyunca yol kaybında meydana gelen sinyal dalgalanmalarının standart sapmasını (gölgeleme etkisi olarak da tabir edilir) ve β (Beta) ise dB cinsinde optimize edilmiş dengeleme değerini vermektedir. Bu üç değişken, modellemenin yapılacağı bölgeye, kullanılan frekansa, mesafeye, verici ve alıcı yüksekliğine ve ortam koşullarına göre değişkenlik gösteren değerler olup ölçüm yapılarak elde edilebilen değerlerdir.

1.20.2. Close-in Yol Kayıp Modeli

5G için diğer aday yol kayıp modellerinden biri olan Close-in (CI) model, ABG modelde olduğu gibi geniş frekans ve uzun mesafe aralıklarında doğru tahmin sonuçları vermesi nedeniyle milimetre dalga boylarında yol kaybı tahmini için çokça kullanılmaktadır [76, 77]. Bu modele ait denklem Serbest Uzak Yol Kaybı (FSPL) denkleminin referans mesafeye ($d_0=1$ metre) göre hesaplanmış dB cinsinden değerini içermektedir. FSPL içeren CI modele ait denklem;

$$FSPL = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d F_C \times 10^9}{c} \right) \quad (16)$$

$$FSPL(F_C, 1\text{m}) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi F_C \times 10^9}{c} \right) = 32.4 + 20 \log_{10} \left(\frac{F_C}{F_{C_0}} \right) \quad (17)$$



$$PL_{CI}[\text{dB}] = \text{FSPL}(F_C, 1\text{m}) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sigma_{CI} \quad (18)$$

$$PL_{CI}[\text{dB}] = 32.4 + 20 \log_{10} \left(\frac{F_C}{F_{C0}} \right) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sigma_{CI} \quad (19)$$

şeklinde olup 'c' Işık Hızını (3×10^8 m/s) göstermektedir. 'n' değeri ise CI tahmin modelini oluşturan tek parametredir ve yol kaybı çarpanı olarak adlandırılmaktadır.

Bu model, tek parametre içermesi nedeniyle modelleme işlemlerinde kolaylık ve formülde sadelik sağlamaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda CI modelin 3 parametre içeren ABG modele göre de daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir [75, 78]. Referans mesafede ise daha önce yapılan çalışmalarda 1 metreden çok daha büyük seçilen referans değerlerinde ölçülen sonuçlar, referans mesafesin 1 metre alındığı sonuçlara göre yol kaybı tahminlerinde daha hatalı sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Bunun yanında milimetre dalga bantlarında referans mesafenin 1 metre, frekansta ise 1 GHz değerinin kullanılması daha doğru yol kaybı tahmini için önerilmektedir [78, 79].

Hem ABG hem de CI modeli baz alarak kanal modeli oluşturan birçok çalışma grubu bulunmaktadır. Çalışmamız gereği bu grupların tamamı yerine benzer ortamlar, benzer hücre tipleri ve uygulama aralıklarını barındıran bazı çalışma grupları teze dahil edilerek, incelemelerde bu grupların kanal modelleri gösterilmeye çalışılmıştır.

1.21. Kanal Modeller

Çalışmamız da kullanılan çalışma grupları 3GPP, ITU-R, IEEE, METIS, mmMAGIC, 5GCM ve NYU-Wireless şeklinde olup bu çalışma gruplarındaki herkesin var olan tüm hücre tipleri için tahmin çalışması bulunmamaktadır. Kanal model çalışması yapılan hücre tipleri RMA, UMA, UMi, InH-Avm ve InH-Ofis şeklindedir. Çalışma grubundakilerin bu bahsettiğimiz hücre tiplerinin her biri için kanal model çalışması bulunmayıp sadece belli hücre tipleri için kanal model sonuçları vardır. Bu yüzden çalışmamızda kullanılmak üzere bu hücre tipleri için çalışma yapan grupların kısaca özellikleri anlatılmış ve bu grupların kanal modelleri özelliklerine göre sınıflandırılarak tablolar halinde sunulmuştur.



1.21.1. 3GPP 3D Model

3GPP, yaptığı çalışmalarla 5G endüstrisine katkı sağlayan en önemli çalışma gruplarından biridir. Çalışmalarında RMa, UMa, UMi, InH-Avm ve InH-Ofis hücreler için 0.8-100 GHz ve 10 Km mesafeye kadar geniş uygulama aralıkları veren kapsamlı kanal modelleri bulunmaktadır. Genel olarak bu modeller WINNER+ modele benzerdir ve halen hücresel yapılar için uluslararası standart oluşturma çalışmalarına devam etmektedir [63].

1.21.2. 5GCM

5GCM, 3GPP'ye ait kanal modellerin daha iyi anlaşılması adına 15 farklı şirket ve üniversitenin bir araya gelip geniş kapsamlı ölçüm çalışmaları yaparak elde ettiği modelleri içermektedir. Bu yüzden sunduğu modellerde 3GPP 3D Model'i temel alması nedeniyle bazı hücre tiplerinde sunduğu kanal model denklemleri birebir aynıdır. RMa hücre tipi hariç diğer hücre tipleri için geniş kapsamlı kanal modelleri bulunmaktadır [80].

1.21.3. METIS

METIS, Avrupa birliğinin sponsor olduğu büyük bir araştırma grubudur. Çalışmalarında hem harita tabanlı (determinist) model hem stokastik model hem de her ikisinin de kombinasyonunu içeren hibrit modeller içermektedir. Stokastik modellerde 3GPP ve WINNER+ kanal modellerini benimsemiştir. Hücre tiplerine ait kanal modellerinin bazılarında milimetre dalga frekanslarının kullanılmayacağını düşünmektedir. RMa ve InH hariç diğer modellerde geniş kapsamlı kanal modelleri bulunmaktadır [64].

1.21.4. mmMAGIC Model

mmMAGIC, METIS gibi Avrupa birliği tarafından desteklenen çalışma grubudur. 5G'de 3GPP ve ITU'ya standardizasyon çalışmalarında destek vermeyi amaçlayan bir projedir. İstatiksel kanal modeli benimsemiştir. 3GPP 3D Model'i teorik yaklaşımla ele alarak inceler ve bu konuda çok sayıda senaryo ortamı için çalışma yapmıştır. Sunduğu



kanal modelleri genel olarak küçük hücre yapılarını içermektedir. Modelleri 6-100 GHz aralığındaki frekanslar için oluşturulmuştur [81].

1.21.5. ITU-R

ITU-R P-1411 yayınında 1 km'den az mesafe için propagasyon çalışması yapılmıştır. Modelleri genel olarak kentsel hücre tiplerinin çatı katı üstü ve altı modelleri için çalışmalar içermektedir. Modele göre değişiklik göstermekle beraber 0.3-100 GHz aralığı için kanal modelleri mevcuttur. Milimetre dalgada yol kaybı hesabının sadece LOS durum için geçerli olduğunu belirtmektedir [82].

1.21.6. NYU-Wireless

NYU tarafından yürütülen bir projedir. RMA kanal modellerini inceleyip, bu modellemelerdeki sorunlara değinmiştir. Özellikle 3GPP ve ITU-R modellerindeki sorunlar üzerine durmuştur. Kendi yaptığı ölçüm çalışmalarında RMA için geniş uygulama aralıklı yeni modeller oluşturmuştur [83].

1.21.7. IEEE

IEEE üyelerinin bir araya gelerek oluşturduğu bir çalışma projesidir. 5G'de büyük ölçekli kanal modellerinde kullanılan ABG ve CI modellerin hassasiyet, tahmin doğruluğu ve parametre kararlılığını deneysel ölçümlerle incelemiş ve UMa, UMi, InH (Ofise/Ev), InH (Alışveriş Merkezi) için kanal modelleri oluşturmuştur [78].

1.22. Alman Sinyal Gücü

Verici antenden çıkan sinyal alıcı antene ulaşana kadar yol boyunca birçok kayba uğramakta ve gücü zayıflamaktadır. Alıcıya ulaşan bu zayıflamış sinyalin, alıcı sistemde işlenebilmesi için gücünün bilinmesi gerekmektedir. Gerçek sistemlerde sinyalin alıcıya ulaşırken ne tür kayıplar yaşadığını tam olarak kestirmek zordur. Ancak bu kayıpların neler olduğunu bilmek ve her kayba neden olan nesne veya unsurun sebep olduğu kayıp



miktarını hesaplayıp bu değerlere göre yaklaşık bir hesaplama yapmak mümkündür. Bu hesaplama aşağıdaki formüle göre yapılmaktadır. Alınan Sinyal Gücü (P_R);

$$P_R = \text{Anten Verici Gücü } (P_T) + \text{Verici Anten Kazancı } (G_T) + \text{Alıcı Anten Kazancı } (G_R) - \text{Yol Kaybı } (PL) - \text{Gölgeleme Etkisi } (Shadow \text{ Fading, } SF) - \text{Atmosferik Kayıp} - \text{Yağmur/Kar Kaybı} - \text{Yeşillik Kaybı} - \text{Penetrasyon Kaybı } (Duvar, \text{ Cam, Bina vs...}) - \text{Girişim Kaybı} - \text{gNodeB Kablo Kaybı} - \text{Diğer Kayıplar}$$

şeklinde hesaplanabilmektedir.

1.23. Alıcı Hassasiyeti

Alıcıya gelen sinyalin, alıcı cihaz tarafından işlenebilmesi için sinyal gücünün olması gereken minimum değeri bilinmelidir. Bu minimum değer alıcı hassasiyeti olarak adlandırılmaktadır. Bu hassasiyet değerinden daha zayıf güçte bir sinyal alıcıya ulaşması halinde gelen sinyal işlenememektedir. Alıcı Hassasiyeti (Receiver Sensitivity, RECSEN);

$$RECSEN = \text{Termal Gürültü} + \text{Gürültü Figürü } (NF) + IM + SINR \quad (20)$$

$$RECSEN = -174 \text{ dBm} + 10 \log_{10}(BW) + NF + IM + SINR \quad (21)$$

şeklinde gösterilmekte olup RECSEN hesabı [84]'da belirtilmektedir.

1.24. Kırılma Noktası

Kanal modellemelerinde Kırılma Noktası (Breakpoint, BP), kablosuz propagasyonda kanal modellemenin kalitesini doğrudan etkileyen iki farklı yayılma alanına dönüşür. Bu farklılaşmanın olduğu yer olan kırılma noktası çoğunlukla çevresel koşullara (BS ve UE yükseklikleri) ve frekansa bağlıdır. Genel olarak kanal modellerde BP sonrası sinyal sönümlenme miktarı, BP öncesine göre daha hızlı olmaktadır. Bu farklılık modellemelerde kullanılan parametrelerin de değişmesine neden olmaktadır. Tek eğimli (Single Slope) modelleri olduğu gibi Çift Eğimli (Dual Slope) modelleri de mevcuttur. Ancak Kırılma



noktası mesafesi, milimetre dalga frekanslarındaki yol kaybı hesabında, kanal modellerin belirttiği geçerli mesafe aralıklarının da üstüne bir mesafede oluşması nedeniyle tartışmalı bir konudur [30]. Tez alışmasında BP etkisi incelemelerde gösterilmiştir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA

2.1. Hücre Tipleri İçin Senaryo Oluşturma

Hücre tiplerinin 5G frekanslarına göre yapacakları davranış durumlarını incelemek adına 5 farklı hücre tipi için 4 farklı senaryo ortamı oluşturulmuştur. Bu senaryolarda hücre tipleri için yapılmış kanal modellemelerinde, modellemelerin yapıldığı ortam koşullarına veya geçerli olduğu parametrelere bağlı olarak senaryolar belirlenmiştir. Bunun amacı, 5G için belirlenen limitler ve parametreler dahilinde belirlediğimiz senaryo ortamının kanal modelleriyle olabildiğince uyumlu olmasını sağlayarak sonuçların doğruluk payını olabildiğince artırmaktır. Oluşturmuş olduğumuz senaryolar karşılaştırdığımız kanal modellerin hangi ortamlarda oluşturulduğunu yaklaşık olarak göstermek ve daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla yaptığımız temsili ortamlardır. Senaryolarda kullandığımız kanal modeller ise geniş uygulama aralıkları vermesi ve benzetim ortamına benzer senaryolarda elde edilmiş modeller olması nedeniyle tercih sebebidir. Her bir hücre tipi için yapılan benzetim çalışmalarında o hücre tipi için yapılmış kanal modellemeleri ve benzetim çalışmasında kullanılacak diğer parametreler tablolar halinde sunulurken elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Tüm benzetim çalışmalarında hücre tiplerinin her birinde tek bir taşıyıcı ve tek bir kanal olduğu varsayılarak çalışma yürütülmüştür. Bunun amacı hücre tiplerindeki anten sayısının veya kanal sayısının artması durumlarının incelenmesi gereken birçok konuyu (kanal düzenleme, girişim, anten polarizasyonu, anten yerleşimi vb.) içinde barındırmasından dolayıdır. Çünkü bu çalışma hem hücre yapılarına yönelik genel bir yaklaşım sunmak hem de kanal modellerin daha doğru karşılaştırmasını yapmak amacıyla oluşturulmuştur. Bu yüzden hem tez içeriğinde karmaşıklığın önüne geçmek hem de kanal modeller arasında çok fazla farklılık oluşmasının engellemek amacıyla bu konular tez çalışmasına dahil edilmemiştir.

Çalışmamızda hücre tipleri için belirlenen parametreler gerçek verilere dayanarak seçilse de incelemelerden elde edilen sonuçlar genel yaklaşım sunmak amacıyla oluşturulmuştur.

Senaryolarda her hücre tipi için seçilen anten kazancı varsayım olup, anten kazançları hücre tipinin büyüklüğü ve kurulum yerine göre seçilmiştir. Aynı şekilde anten



güçleri de hücrenin kurulum yeri ve 3GPP tarafından belirtilen limitler dahilinde belirlenmiştir. Hesaplamalarda büyük oranda çok yönlü kanal modeller kullanılması nedeni ise bu anten yapısına göre çok sayıda kanal model çalışmasının olması, modellerin geniş frekans ve mesafelerde uygulama aralığı sunması ve de çok sayıda hücre tipi için kanal model çalışması içermesinden dolayıdır.

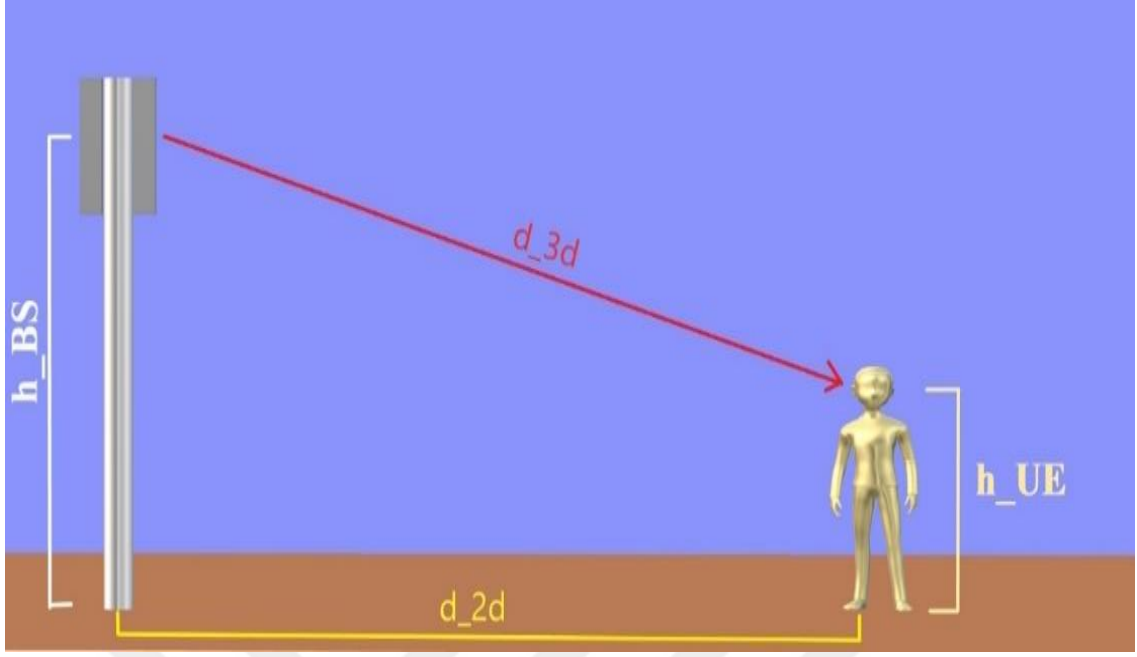
Çok yönlü kanal modellerde yüksek anten kazançlarının dahil edilmesinin nedeni ise bu yaklaşım tarzının teorik kapsama alanı hesabında daha iyi sonuç verebileceğinin belirtilmesi üzerinedir [85]. Çok yönlü kanal modellerin kullanım amaçlarından biri de kapsama alanı hesabında alıcı ve verici antenlerin ışınma açılarını ve açılal kayıplarını hesaplamaya dahil etmeyerek teorik hesaplamalarda kolaylık sağladığı içindir.

Her hücre tipi için yapılan senaryo ortamı yüzlerce adet olabilmektedir. Ancak tez çalışmasında tüm bu senaryolar ile ilgili çalışmalar gösterilemeyeceği için sadece kanal modellerine en uygun, temel ve sade yapıda olan senaryo ortamları oluşturularak incelemelerde bulunulmuştur.

Senaryo ortamlarında kullanılan frekanslar ise 6, 28, 40 ve 71 GHz değerleridir. Bu frekansların hepsi o hücre tipindeki kanal modellerin frekans aralıklarına uygundur. Ayrıca genel olarak hücre tipleri için en çok çalışması yapılan frekanslarıdır [86].

BW değerinde ise 6 GHz için FR1’de tanımlı maksimum değer olan 100 MHz, 28 GHz için FR2’de tanımlı maksimum 400 MHz bant genişlikler belirlenmiştir. 71 GHz için ise henüz tanımlaması yapılmasa bile ilerde yapılabileceğini varsaydığımız 800 MHz bant genişliği kullanılmıştır. Bu değerinin kullanılma amacı ise çok daha yüksek BW’nin hücre tipine olan etkisini gösterebilmek amacıyla. Senaryolarda belirtilen tüm kanal modellerinde BS ve UE arasındaki mesafe değerleri Şekil 18’de belirtilen duruma göre yapılmış olup d_{2d} değeri BS ve UE arasındaki yatay mesafeyi, d_{3d} ise hipotenüs değerini vermektedir. UE yüksekliği ise tüm senaryolarda 1.5 metre olarak varsayılmıştır.





Şekil 18. BS ve UE arasındaki mesafe gösterimi

Ayrıca tüm senaryolarda sıcaklık 290 Kelvin, hücrelerin yük seviyesi %100 ve anten sayısı ise 1 olarak varsayılmıştır. Çizdiğimiz tüm grafiklerdeki mesafe değeri, d_{2D} değeridir. h_{BS} değeri ise her hücre tipine göre değişmekle beraber RMa için 35 metre, UMA için 25 metre, UMi için 10 metre, Piko için 3 metre ve Femto içinde 1.5 metre olarak varsayılmıştır. Senaryolarda kullanılan diğer parametreler ise Tablo 20’de verilmiştir.



Tablo 20. Senaryolarda kullanılan hücre tipleri ve senaryo parametre değerleri

SENARYO PARAMETRELERİ	HÜCRE TİPLERİ						
	RMa		UMa	UMi	InH (AVM)- PICO	InH-FEMTO	
	LOS NLOS	LOS+P	LOS NLOS	LOS NLOS	LOS NLOS	LOS NLOS	LOS+P
Frekans	6 GHz 28 GHz			28 GHz	40 GHz	40 GHz 71GHz	
Alt Taşıyıcı Frekansı (SC)	60 KHz 120 KHz			120 KHz		120 KHz 240 KHz	
Kaynak Bloklarının Sayısı(N_{RB})	135 264			264			
Bant Genişliği ($B=SC \times 12 \times N_{RB}$)	97.20 MHz 380.16 MHz			380.16 MHz		380.16 MHz 760.32 MHz	
BS Anten Verici Gücü (Pt)	50 dBm		42 dBm	40 dBm	33 dBm	20 dBm	
BS Anten Kazancı (Gt)	20 dBi		15 dBi	12 dBi	10 dBi	8 dBi	
UE Alıcı Anten Kazancı (Gt)	5 dBi						
IM (Endüstriyel Margin)	3 dB					3 dB 4 dB	
Gürültü Figürü (NF)	5 dB 7 dB			7 dB	8 dB	8 dB 13 dB	
Yeşillik Kaybı	-	3 dB 7 dB	-	-	-	-	
Cam Kaybı	-	2 dB 5 dB	-	-	-	-	
Duvar Kaybı	-	14 dB 20 dB	-	-	-	30 dB	
Atmosferik Kayıp (dB / km)	0.02 dB				0.05 dB		
Yağmur Kaybı (dB / km))	-	0.2 dB 6 dB	-	-	-		
Kablo Kaybı	2 dB						
Alıcı Hassasiyeti (RS)	-96.09 dBm -88.175 dBm			- 88.175 dBm	-87.175 dBm	-87.175 dBm -78.165 dBm	
SNR (min)	-10 dB						

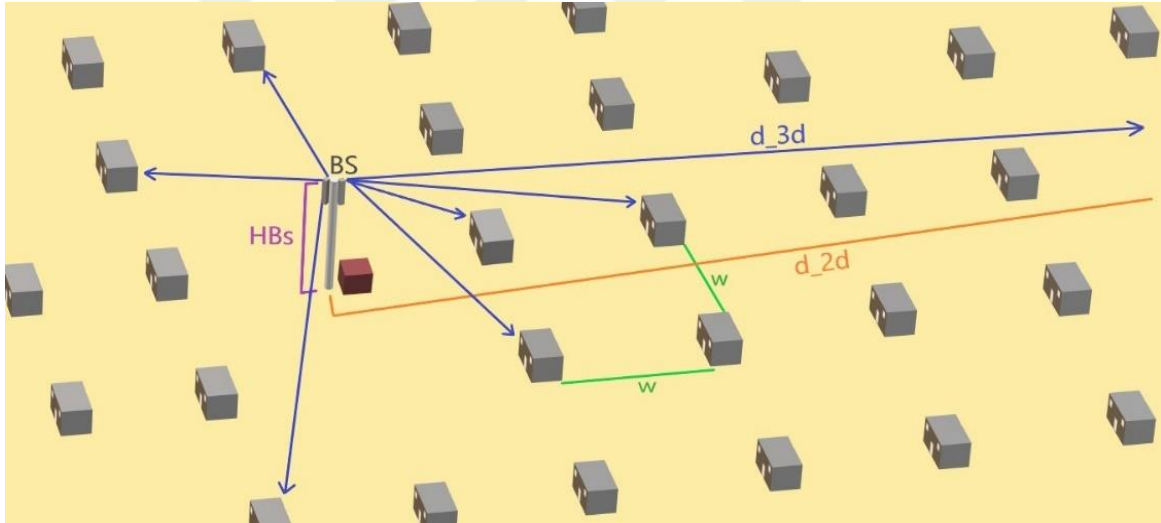


2.2. Kırsal Makro Hücre İncelemesi

2.2.1. RMa Hücre İçin Senaryo Ortamı

Bu hücre tipinde, hücre genel olarak zeminden 35 metre yükseklikte ve etrafındaki binalardan yüksekte olacak şekilde yerleştirildiğinden bahsetmiştik.

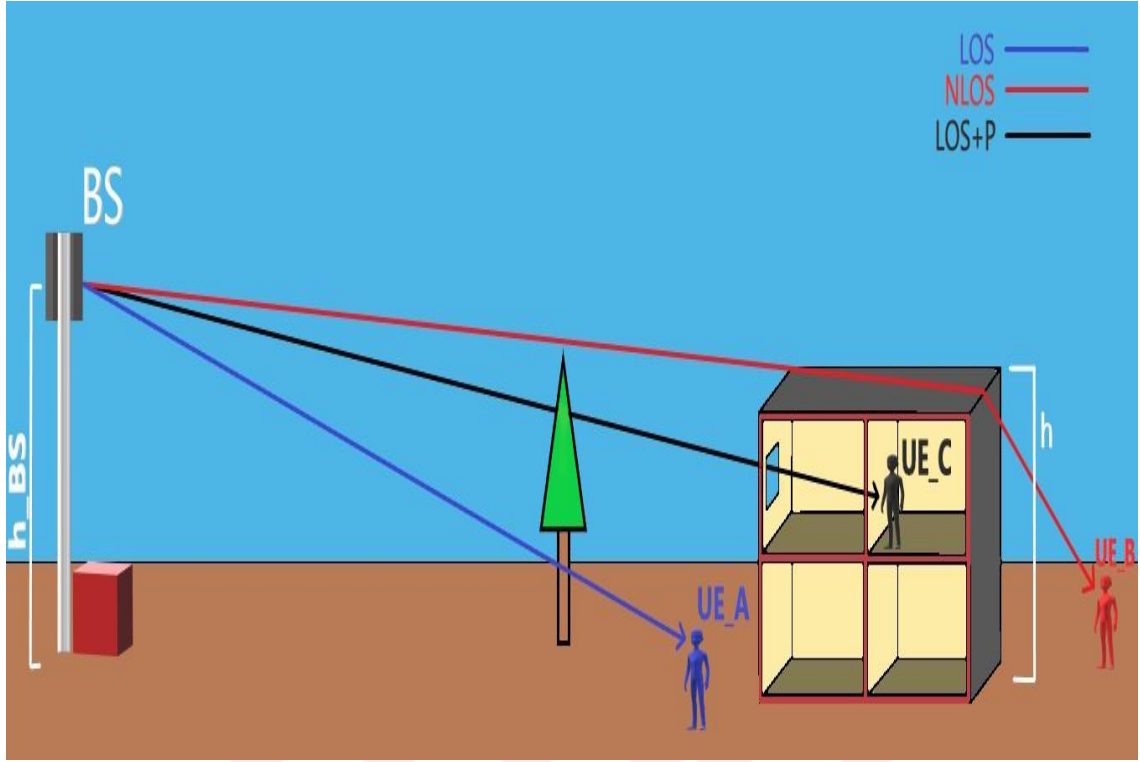
Bu hücre tipi yapılan kanal modeller 3GPP 3D model ve NYU-Wireless olup bu modellemeler genel olarak sabit yükseklikte binalar (20 metre) ve sabit sokak genişliğindeki ($W=20$ metre) kırsal bir alanda bu hücrenin çalıştığı varsayılarak oluşturulmuştur. Çalışmamızda bu ortamın benzeri oluşturularak bu iki çalışma grubunun kanal modellerine göre inceleme yapılmıştır. Şekil 19 bu ortamı temsili olarak göstermektedir.



Şekil 19. Kırsal Makro Hücre için düzenli ve sıralı binalardan oluşan senaryo ortamı

Benzer yapıda ve sıralı bir şekilde duran evlerin olduğu yere yerleştirilmiş bir Kırsal Makro Hücre'nin evlere olan uzaklık parametreleri gösterimi Şekil 19'daki resimle anlatılmaya çalışılmıştır. Bu ortamda bir sinyalin DL veya UL'de gidebileceği güzergâh birçok farklı şekilde olabilir. Ancak bu durumların hepsi için inceleme yapılması olanaksızdır. Bu yüzden tez çalışmamızda belirlemiş olduğumuz senaryo ortamı, bir tane Kırsal Makro Hücre, kırsal alanda bulunan herhangi bir konumdaki bir kesiti açık şekilde gösterilen bir bina ve bu binanın çevresinde bulunan 3 kullanıcıdan (UE_A , UE_B ve UE_C) oluşmaktadır. Bu benzetim ortamı Şekil 20'de gösterilmiştir.





Şekil 20. RMa Hücre'nin 3 farklı durum için temsili senaryo gösterimi

Şekil 20 incelendiğinde UE_A mavi renk ile belirtilmiş olup BS'den gelen DL sinyalin herhangi bir engel ile karşılaşmadan doğrudan UE_A 'ya iletiildiği LOS durumu belirtmektedir. UE_B ise kırmızı renkle gösterilmiş olup binanın arka tarafında kalmaktadır ve BS ile arasında doğrudan görüşün olmadığı, gelen veya giden sinyalin kırılma veya yansıma durumu ile alıcıya vardığı NLOS durumu belirtmektedir.

UE_C ise siyah renkle gösterilmiş olup sinyalin önce bir ağaçtan sonra bir camdan ve daha sonra bir yığma duvardan geçerek penetrasyon kaybıyla alıcıya ulaştığı LOS+P durumunu göstermektedir.

Burada LOS+P durumu varsayım olup bir sinyalin malzemedan geçerken ne derece kayıp yaşayabileceğini göstermek amacıyla oluşturulmuştur. LOS+P durum incelemesinde ayrıca 25 mm/h yağmur yağdığı ve sinyallerin resimde görülenlerin dışında herhangi bir nesne ile temas etmediği varsayılmıştır.

Bu senaryo ortamında kullanılan diğer parametreler Tablo 19'da kanal modellemelerine ait veriler ise Tablo 20'de gösterilmiştir. İncelemelerde 3GPP 3D Model, RMa için O2I kaybında sadece DKM modelin uygulanabileceğini belirtmektedir [35].



Tablo 21’da belirtilen kanal modeller içinde sadece NYU-Wireless kanal model, yönlü antene göre oluşturulmuştur.

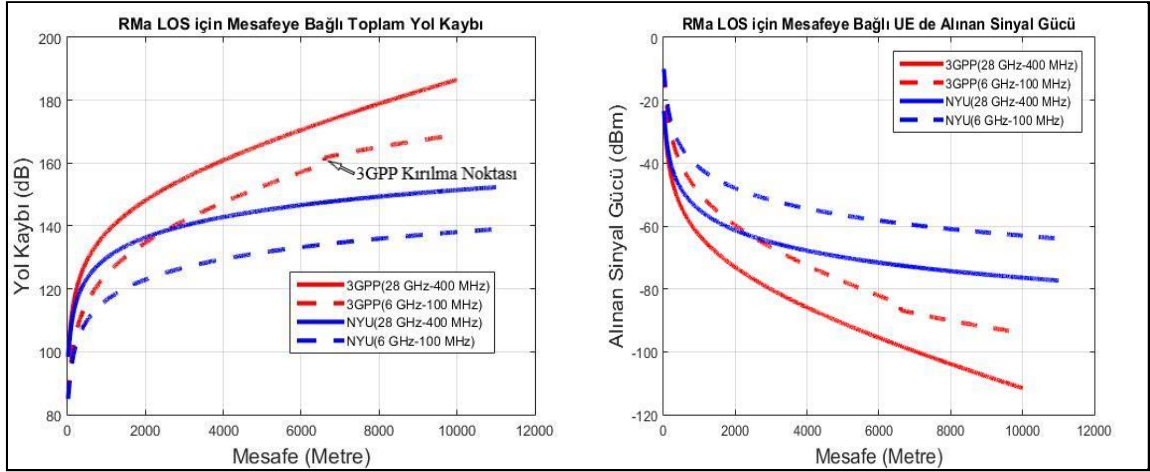
Tablo 21. Kırsal Makro Hücre için kanal modelleri

Kırsal Makro Hücre (Yönlü (D) & Çok Yönlü (O))				
Model	Durum	PL (dB), F _C (GHz), d (Metre)	SF (dB)	Uygulanabilir Aralıklar
3GPP(O)	LOS	$PL_{LOS} = \begin{cases} PL_1, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2, & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10 \text{ Km} \end{cases}$ $PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d_{3D} F_C / 3) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D}$	4	0.8 < F _C < 30 GHz 5 m ≤ h ≤ 50 m 5 m ≤ W ≤ 50 m 1 m ≤ h _{UE} ≤ 10 m 10 m ≤ h _{BS} ≤ 150 m
	NLOS	$PL_{NLOS} = 161.04 + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(F_C) + 7.5 \log_{10}(h) - 7.1 \log_{10}(W) - (24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2) \log_{10}(h_{BS}) - (3.2 (\log_{10}(11.75 h_{UE}))^2 - 4.97)$ $PL = \max(PL_{LOS}, PL_{NLOS})$	6	W= Ortalama Sokak Genişliği h=Ortalama Bina Yüksekliği Varsayılan W=20 h=20 Ölçüm 24 GHz
NYU(D)	LOS	CI model (d₀=1 metre) $PL = 32.4 + 21.6 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	1.7	Ölçüm 73 GHz 0.5 ≤ F _C ≤ 100 10 m ≤ d _{3D} ≤ 11 Km
	NLOS	CI model (d₀=1 metre) $PL = 32.4 + 27.5 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	6.7	
Not: d _{BP} = 2πh _{BS} h _{UE} F _C /c and c = 3 × 10 ⁸ m/s , NLOS için 10 m ≤ d _{2D} ≤ 5 Km				

2.2.2. RMa Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi

Kırsal Makro Hücrede için belirlediğimiz senaryoda UE_A’ya gelen DL sinyalin durumu incelenmiştir. Şekil 21’deki grafik, oluşturduğumuz senaryoya göre mesafeye bağlı olarak RMa Hücrenin LOS durumdaki Toplam Yol Kaybı’nı ve bu kayıplar neticesinde UE’de Alınan Sinyal Gücü’nü göstermektedir.





Şekil 21. RMA Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)

LOS durum incelendiğinde milimetre dalga frekansında birbirinden oldukça büyük farklılıklar olduğu iki kanal model görülmektedir. Başlangıç değerinde bile iki model arasında yol kaybında 20 dB fark olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle 3GPP 3D kanal modelin NYU-Wireless modele göre çok daha fazla kayıplı bir sonuç verdiği görülmüştür. NYU, 3GPP 3D modelin deneysel çalışmalardan oldukça fazla değerler verdiğini, bu yüzden 3GPP RMA modelin 6 GHz ve altı değer için sadece geçerli olabileceğini belirtmektedir [85].

Grafik incelendiğinde 3GPP modelin 6 GHz’deki değerinin bile NYU-Wireless 28 GHz değerinden oldukça fazla kayıp değerleri verdiğini anlaşılmaktadır. Mesafe arttıkça 3GPP 3D kanal modelin yol kaybı değeri NYU-Wireless kanal modele göre daha hızlı arttığı görülmüş ancak NYU-Wireless kanal modelde bu artış nispeten daha yavaş gerçekleşmiştir.

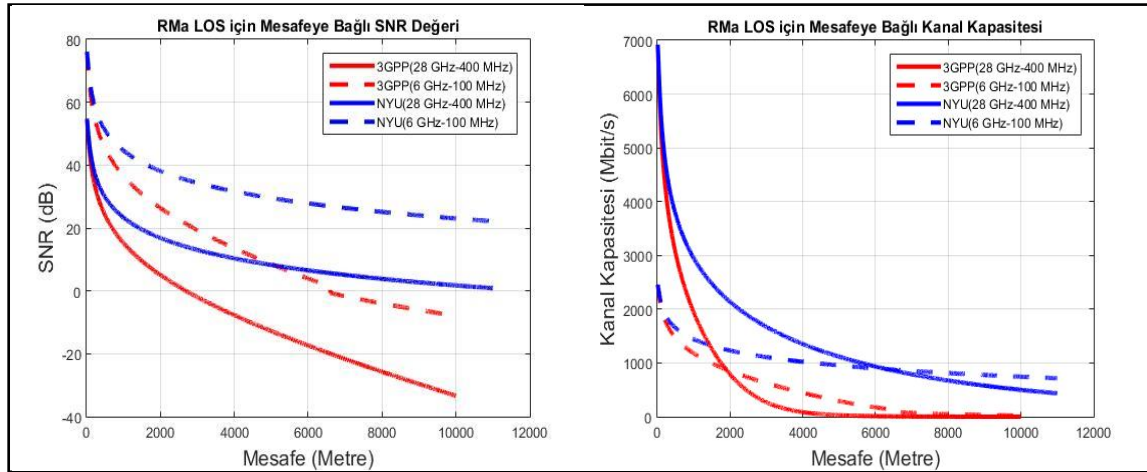
BP noktasında ise frekans etkisi daha iyi görülmektedir. 6 GHz’de BP, 6600 m’de meydana gelmişken, 28 GHz’de 30000 m üzerinde oluşmuştur. Bu mesafe milimetre dalga bandındaki BP noktasının, kanal modelin uygulama sınırlarını aşması nedeniyle BP noktası kavramının neden tartışmalı olduğunu gösteren önemli bir detaydır.

Yine yol kaybı değerinin yüksek olduğu 3GPP 3D modelden dolayı, UE’den Alınan Sinyal Gücü değeri NYU-Wireless kanal modele göre daha düşük olmaktadır. Alıcı hassasiyetinin 28 GHz frekansı için -88.175 dBm olduğunu hesaba katarsak 3GPP 3D kanal modele göre sinyalin gidebileceği maksimum mesafe 4435 metreyi bulurken NYU-Wireless’da sinyal 10000 metre’yi rahatça aşmaktadır. 6 GHz’de ise RECSN değeri -



96.09 dBm olduğunu düşünürsek, 3GPP 3D modelin DL'de 10 km'den fazla işlenebilir sinyal gönderimini gerçekleştirebildiği anlaşılmaktadır.

Şekil 22'deki grafik mesafeye bağlı olarak BW ve frekansa göre oluşan dB cinsinden SNR değerini ve yine bu SNR değerine göre hesaplanan Kanal Kapasiteyi göstermektedir.

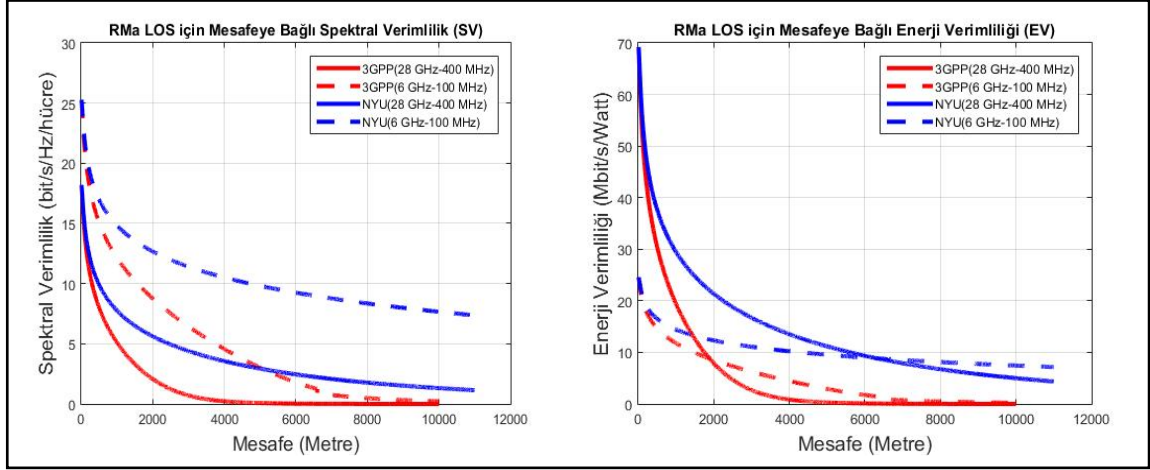


Şekil 22. RMa Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Senaryomuzda belirtilen sınırlar dahilinde bir verinin UE'de işlenebilmesi için sinyaldeki SNR değerinin -10 dB den büyük olması gerekir.

Şekil 22'de kanal modelleri incelendiğinde sadece 3GPP 3D model SNR'da 0 dB değerinin altına inmektedir. Kanal Kapasitesi olarak ise 28 GHz'de iki model arasında maksimum 1.19 Gbit/s fark oluşabildiği görülmektedir. Kapasitede 3GPP 3D model 4435 m'de yaklaşık sıfıra ulaşırken NYU-Wireless modele göre ise o mesafede RMa hücre 1.24 Gbit/s'lik kapasite sunmaktadır.





Şekil 23. RMa Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

Şekil 23 ise mesafeye bağlı olarak elde edilen Kanal Kapasitesi değerine göre yine aynı mesafede hesaplanan SV ve EV değerlerini göstermektedir.

Spektral verimlilik SNR, BW ve mesafe değerine bağlı olarak değiştiğini daha önce belirtmiştik. ITU gereksinimi gereği 5G'de SV değeri tek tabakalı DL'de 30 bit/s/Hz olması hedeftir. Şekil 23 incelendiğinde tek tabakalı sistemde RMa Hücre yapısının SV değeri, iki kanal modelde ve diğer parametre değerlerinde yakalayamadığı görülmektedir. Ancak 6 GHz frekansında ise SV değeri daha yüksek çıkmaktadır. Bu durumun 6 GHz'deki yol kaybının 28 GHz'e göre daha düşük olmasından kaynaklandığını anlaşılmaktadır.

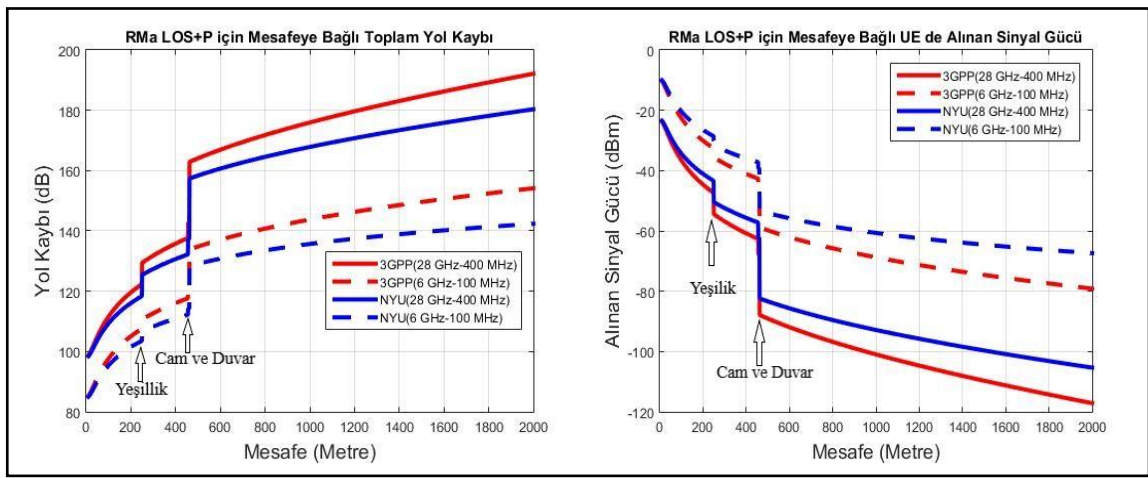
Anten sayısı ve gücünde artış yapılması durumunda ise SNR değeri artacağından SV değerinde de milimetre dalga frekansında artış sağlayacağını düşünmekteyiz.

Enerji Verimliliğinde de watt başına düşen veri miktarı önemli olduğundan BW değeri yüksek olan hücrenin EV değeri daha iyi olacaktır. Ancak BW aynı seçilmesi durumunda ise 6 GHz çalışma frekansının daha az gürültü içermesi ve kayıp değerinin daha az olması aynı mesafede 6 GHz için daha fazla kapasite sunacağı için EV değerinde de yine milimetre dalgaya göre daha iyi sonuç verecektir. Onun haricinde watt başına düşen kapasite değeri, yüksek bant genişliğinde daha fazla olduğu için sağdaki grafikte 28 GHz çalışma frekansında EV değeri daha yüksek çıkmaktadır.



2.2.3. RMa Hücre İçin LOS +P Durumu İncelemesi

Bu senaryoda RMa Hücresinin DL sinyalinin çeşitli engellerle karşılaşması durumunda gidebileceği maksimum mesafe ve bu mesafe aralığında göstereceği tepki gösterilmeye çalışılmıştır. Senaryoda RMa Hücre’den gönderilen bir DL sinyalinin sağanak yağmurlu bir havada 250 m (d_{2D}) yol aldıktan sonra yeşilliğin içinden geçtiği, ardından buradan da 256 m sonra bir binanın camından geçtiği, son olarak ise bina içinde 6 m yol alıp bina içinde bulunan bir duvardan geçerek UE’ye ulaştığı varsayılmıştır.



Şekil 24. RMa Hücre LOS+P için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)

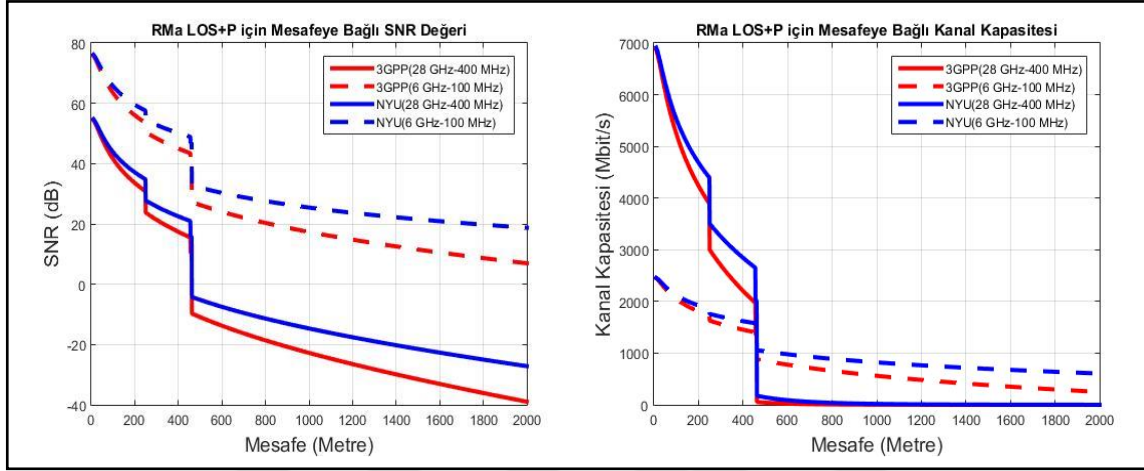
Sinyalin her bir nesneden geçerken yaşadığı yol kaybı artışı ve bu kayıplara göre UE’de Alınan Sinyal Gücü değerleri Şekil 24’te görülmektedir.

Ok işaretleri ile belirtilen kısımlar DL sinyalinin o nesne ile karşılaştığı yeri göstermektedir. Nesnelere geçerken yaşanan bu kayıplar neticesinde RMa’da çıkan DL sinyalinin gidebileceği maksimum mesafe 3GPP 3D modele göre 28 GHz’de maksimum 470 m, NYU-Wireless modele göre ise maksimum 724 m olduğu görülmektedir. 6 GHz’de ise DL sinyalinin grafikte belirtilmesi de 3GPP 3D model göre 4700 m gidebilirken, NYU-Wireless modele göre ise 10 Km’yi geçmektedir.

Nesnelerin uzaklıkları ve yerleri değişse dahi maksimum mesafe aynı kalmaktadır. Daha uzak mesafe için değerlerin gösterilmemesinin sebebi ise hem nesnelere kaynaklı kayıpların grafikte daha iyi anlaşılabilmesi hem de daha uzak mesafelerdeki kayıpların ölçüm sınırlarını çok fazla aşması nedeniyle bu senaryo ortamı için gereksiz olduğundan



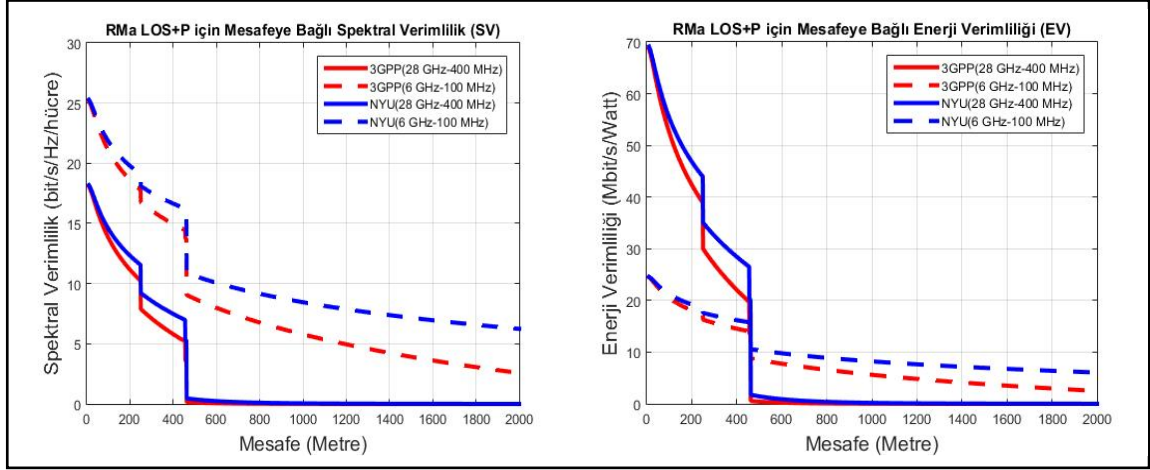
çalışmada gösterme gereği duyulmamıştır. Bu değerlerde NYU-Wireless model bize nispeten daha uygun sayılabilecek değerler verse de özellikle 3GPP 3D model oldukça büyük yol kaybı vermektedir. Senaryoda sinyal için maksimum yol kaybı değeri ise yaklaşık 163.175 dB'dir. Mesafeye göre oluşan yol kaybı ve alınan sinyal gücüne göre oluşan SNR ve Kanal Kapasitesi değerleri ise Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. RMa Hücresi için Mesafeye Bağlı SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 25 incelendiğinde 3GPP ve NYU-Wireless modellerin mesafeye bağlı SNR değerleri 28 GHz çalışma frekansında 500 m'den sonra 0 dB altına inerken, 6 GHz'de ise 0 dB üzerinde kalmayı sürdürdüğü görülmektedir. Modellerde dikkat edilecek olursa milimetre dalgada ve yüksek bant genişliğinde yaşanan sönmülmenin ne derece yüksek olabileceği görülmektedir. Özellikle penetrasyon sonucu milimetre dalgada SNR ve Kanal Kapasitesi değerlerinde ciddi düşüşler olabildiği anlaşılmaktadır.





Şekil 26. RMa Hücre LOS+P için spektral verimliliği (sol), enerji verimliliği (sağ)

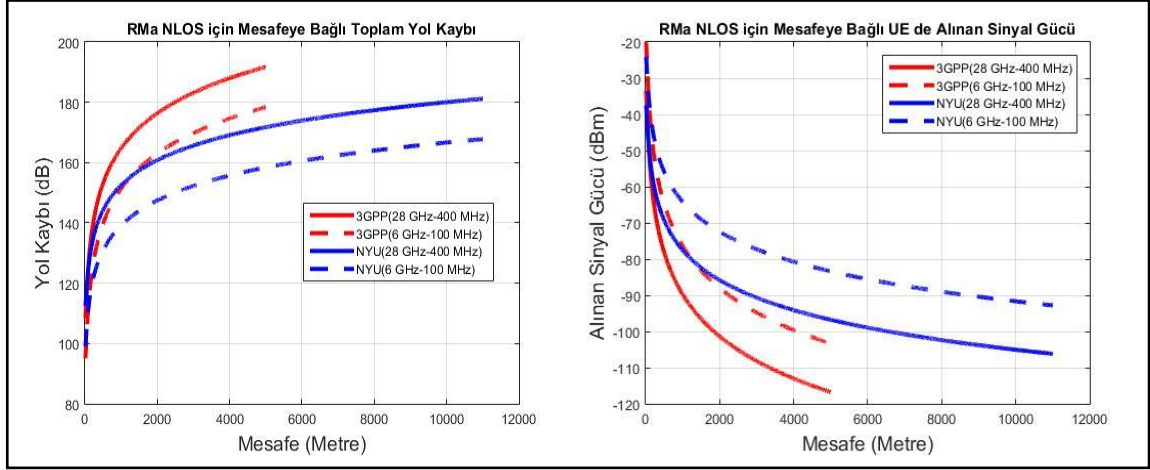
Mesafeye bağlı olarak elde edilen Kanal Kapasitesi'ne göre hesaplanan SV ve EV değerleri ise Şekil 26'daki grafiklerde gösterilmiştir. Şekil 26 incelendiğinde SV değeri LOS duruma benzer şekilde ilerlerken nesnelere bağlı kayıplar nedeniyle verimlilik değeri hızlı bir şekilde düşmüş ve hatta 6 GHz durumundakilerden bile düşük sonuç vermiştir.

EV değeri ise yine aynı şekilde LOS duruma benzer değerlerde başlayıp o da mesafe arttıkça ve karşılaşılan nesnelere neticesinde hızlı bir düşüş yaşamıştır. Ancak BW değerinin 28 GHz çalışma frekansında daha yüksek olmasının EV'nin artmasında önemli bir etken oluşturduğu anlaşılmaktadır.

2.2.4. RMa Hücre İçin NLOS Durumu İncelemesi

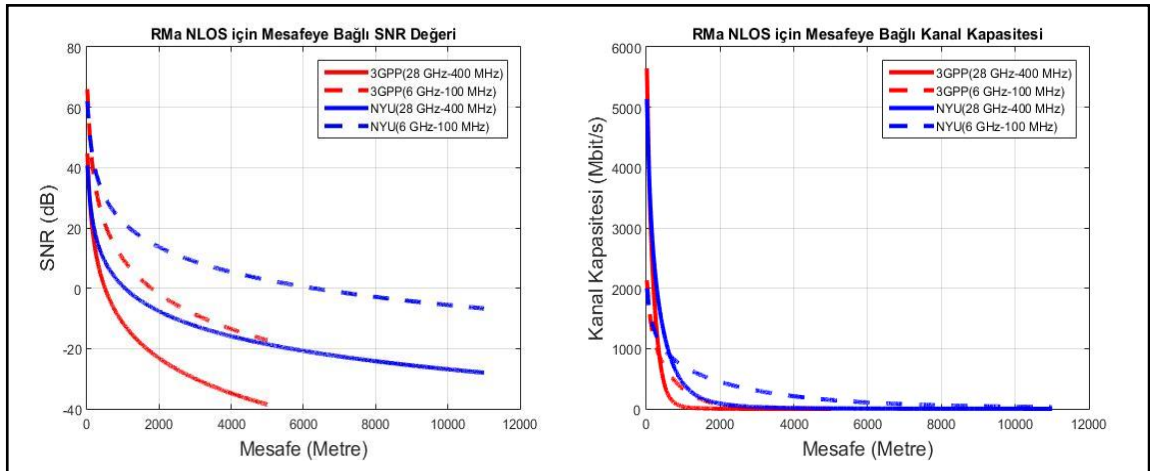
Kırsal Makro Hücre için belirlediğimiz senaryoda UE_B 'ya gelen DL sinyalin durumu incelenmiştir. Şekil 27'deki grafik, oluşturduğumuz senaryoya göre mesafeye bağlı olarak RMa Hücrenin NLOS durumdaki Toplam Yol Kaybı'nı ve bu kayıplar neticesinde UE'de Alınan Sinyal Gücü'nü göstermektedir.





Şekil 27. RMA Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ)

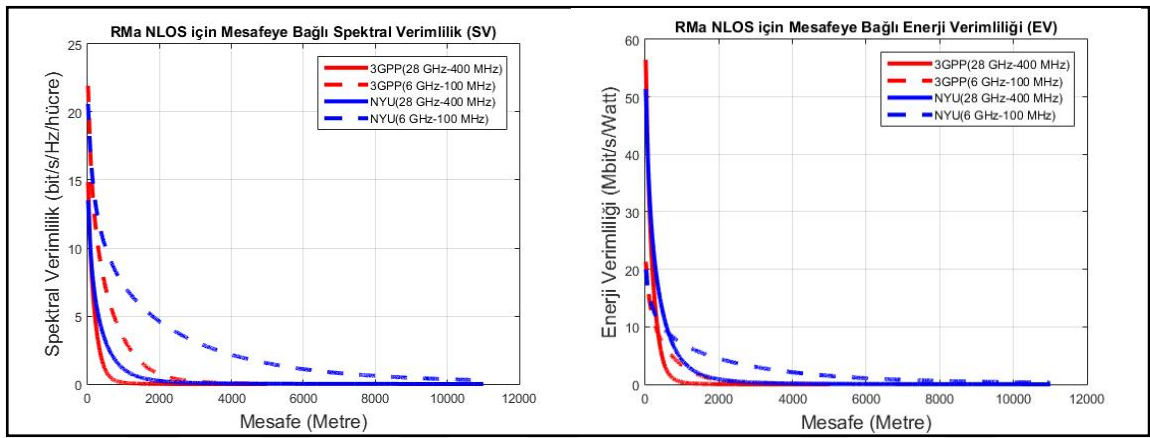
Şekil 27 incelendiğinde NLOS durumda yol kaybı değerleri arasında iki modelde de oldukça fazla fark olduğu görülmektedir. Modellere ek olarak başka kayıplar eklenmeyip sadece model için verilen denklemlerle çizdirilmesine rağmen yol kaybı değerleri RMA Hücre için kısa sayılabilecek mesafede ölçülebilir sınırların çok üstüne çıkmaktadır. Alıcı hassasiyetinin 28 GHz çalışma frekansı için -88.175 dBm olması nedeniyle 3GPP 3D modele göre sinyalin RMA Hücre'den maksimum 910 m, NYU-Wireless modele göre ise maksimum 2434 m uzağa gidebildiği görülmüştür. 3GPP 3D modele göre ise yol kaybı değeri 910 m'de 163.175 dB iken NYU-Wireless modele göre ise aynı mesafe için hesaplanan yol kaybı değeri 151.42 dB'dir. 5 Km'de ise 3GPP 3D model 192 dB, NYU-Wireless ise 172 dB yol kaybı sonucu vermektedir.



Şekil 28. RMA Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)



Alınan sinyal gücüne göre mesafeye bağlı olarak oluşan SNR değeri ve bu değişen SNR değerinin oluşturduğu Kanal Kapasitesi Şekil 28’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 28 GHz çalışma frekansında 910 m’de 3GPP 3D model -10 dB, NYU-Wireless modelde ise 1.75 dB SNR sonucu elde edilmektedir. Kanal Kapasitesi’nde ise 3GPP 3D modelde 50 Mbit/s, NYU-Wireless’da ise 500 Mbit/s kapasite hesaplanmıştır. Mesafeye bağlı olarak oluşan Kanal Kapasite’lerine göre hesaplanan SV ve EV değerleri ise Şekil 29’da gösterilmiştir.



Şekil 29. RMa Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

Şekil 29 incelendiğinde 28 GHz çalışma frekansında 910 metrede 3GPP 3D model 0.14 bit/s/Hz/hücre SV değeri vermekteyken NYU-Wireless’da ise 1.32 bit/s/Hz/hücre SV değeri hesaplanmıştır. Grafiklerde hem SV hem de EV değerinde 2000 m’den sonra sıfıra doğru yaklaşıldığı gözükmemektedir. Mevcut SV değerinin her iki modelde de ITU tek tabakalı SV gereksimini karşılamaktan uzak olduğunu göstermektedir. Ancak 6 GHz çalışma frekansında 28 GHz’e göre SV değeri daha yüksek iken EV değeri daha düşük olmaktadır. Bu durum 6 GHz frekansının yine daha az sönümlenmesinin sonucudur.

2.2.5. RMa Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme

RMa hücre yapısının LOS, LOS+P ve NLOS durumları iki farklı modele göre incelendiğinde, bu hücre yapısında milimetre dalga bantları ve yüksek bant genişlikleri kullanılması durumunda etki mesafesinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Özellikle



LOS+P durumunda nesnelere kaynaklı sönümlenmelerin hücrenin etki mesafesini çokça daralttığı anlaşılmaktadır. Yol kaybına etki eden faktörler sınırlandırılmasına ve genel bir yaklaşımla senaryo ortamı ve parametreleri belirlenmesine rağmen RMa hücrenin DL'de oldukça düşük sonuç vermesi çalışmamızda kullandığımız verici gücü, anten kazancı ve anten yüksekliğine göre milimetre dalga frekanslarının uzun mesafeler için bu hücre yapısına uygun olmadığını göstermektedir. Özellikle UE_C ile benzer durumundaki kullanıcıların kapalı ortamlarda veya daha iç odalarda ani sinyal zayıflaması ve çok fazla hız düşmesi gibi sorunlar yaşaması muhtemeldir. UL değeri hesaplanmaya çalışıldığında ise UE verici gücünün RMa verici gücüne göre oldukça düşük olması uygun haberleşme mesafesini çok daha azaltacağı unutulmamalıdır. Her ne kadar verici gücü ve anten sayısını artırmak RMa için mümkün olsa da UE'de bu artışlar çok fazla olmayacaktır. Bu yüzden FR2'de çalışan RMa Hücre'nin UE ile olan haberleşmesinde baz istasyonu anten sayısını ve SV değerini artırmanın yanında anten yüksekliklerinin de artırılmasının RMa ile UE arasında LOS durumu artıracığından sinyal kalitesinin ve mesafesinin de artmasını sağlayacağı anlaşılmaktadır.

Genel olarak ise FR2 frekanslarının kullanılması durumunda bu frekans aralıklarında en düşük milimetre dalga olan 24-28 GHz frekanslarının, diğer daha yüksek frekanslara göre daha düşük sönümlenme etkisi göstermesi nedeniyle bu hücre tiplerinde daha çok kullanılacağını düşünmekteyiz.

NYU, kanal model çalışmalarında 73 GHz için çalışma yapmış olsa da bu kadar yüksek frekansların yüksek penetrasyon kayıpları nedeniyle RMa Hücre'de LOS durum haricinde iyi bir servis kalitesi sunmayıp verimli olmayacağını, özellikle bir bina içerisinde bulunan bir kullanıcının bu frekanslardan verimli bir şekilde faydalanamayacağını düşünmekteyiz. Bu yüzden RMa Hücre tipinin FR1 frekansları veya 28 GHz altı frekanslarının daha verimli servis hizmeti vereceğini düşünmekteyiz.

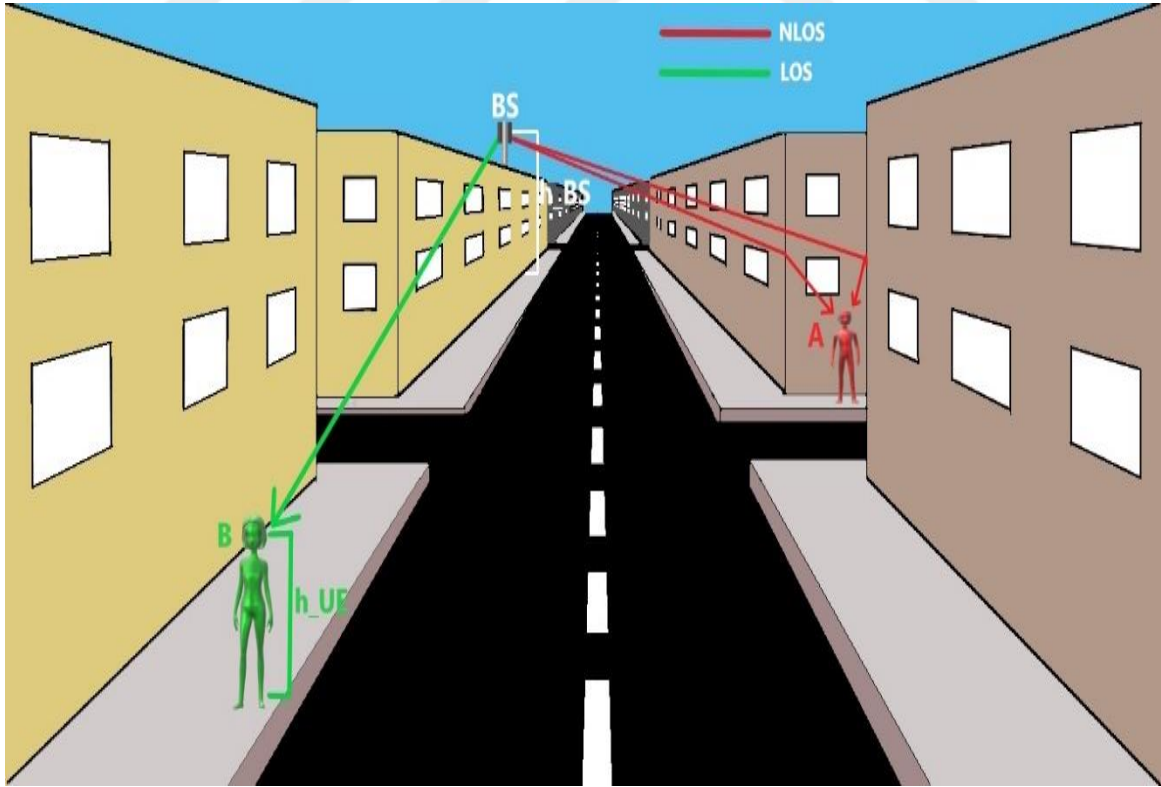
Kanal modellerde ise özellikle 3GPP oldukça yüksek sonuçlar vermektedir. NYU-Wireless kanal model ise bu konuda bizce daha doğru sonuçlar vermektedir. Ancak burada NYU-Wireless modelin yönlü anten kullanılarak oluşturulmasındaki etkisinin de olabileceği unutulmamalıdır.



2.3. Kentsel Makro Hücre İncelemesi

2.3.1. UMa Hücre İçin Senaryo Ortamı

Bu hücre tipinde, hücre genel olarak zeminden 25 yükseklikte ve etrafındaki binalardan yüksekte olacak şekilde yerleştirilmektedir. Kent bölgelerinde binaların çatılarına yerleşimleri olduğu gibi ayrı kule şeklinde yerleşimleri de vardır. Bu çalışmamızda ise UMa Hücre'nin kanal modellemelerine uygun şekilde bina üstüne yerleşimi olduğu varsayılmıştır. Ayrıca yine çalışmamızda kullandığımız ve bu hücre tipi için çalışma yapan gruplar 3GPP, METIS, 5GCM, IEEE ve ITU'dur. Bu çalışma gruplarının modellemeleri genel olarak sabit yükseklikteki binalar (20 m) ve sabit sokak genişliğindeki (20 m) kentsel bir alanda bu hücrenin çalıştığı varsayılarak oluşturulmuştur. Tez çalışmamızda da bu ortamın benzerini varsayarak bu çalışma gruplarının kanal modellemelerine göre incelemeler yapılmıştır. Şekil 30'daki resim bu ortamı temsili olarak göstermek amacıyla oluşturulmuştur.



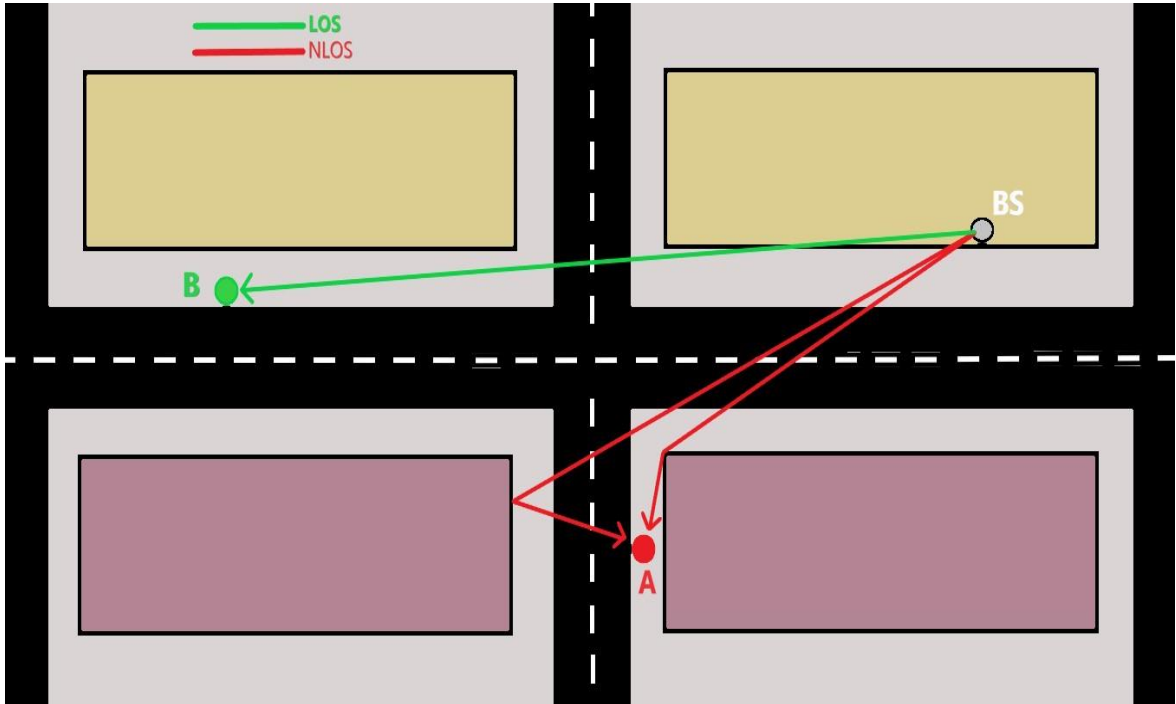
Şekil 30. Kentsel Makro Hücre senaryosu için temsili gösterim



Bu senaryoda binalar RMa Hücre’de olduğu gibi benzer fiziki özelliklere sahiptir ve kent bölgesi yine benzer ve düzenli yapılardan oluşan bir yer olarak tasvir edilmiştir. Böyle kentsel bölgelerde sinyalin yayılımını etkileyebilecek birçok nesne (sokak lambası, tabelalar, ağaçlar, araba vb.) ve bina yerleşim durumları (çarpık yerleşimler, düzenli yerleşimler vb.) mevcuttur. Temel anlamda bu kadar çeşitli durumların olması ve nesnelerin her biri için inceleme yapılamayacak olması ve de her bir durum için meydana gelebilecek değişimin incelenemeyeceğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden senaryonun en temel hali olan durum yukarıda gösterilmeye çalışılarak iki farklı UE için inceleme çalışması yapılmıştır.

Bunlarda kırmızı renkle gösterilen A kullanıcısı (UE_A), BS ve UE arasında doğrudan görüşün olmadığı, sinyalin kırılma ve yansıma gibi durumlarla alıcıya ulaştığı NLOS durumu belirtmektedir. Yeşil renkli B kullanıcısı (UE_B) ise BS ve UE arasında doğrudan görüşün olduğu LOS durumu temsil etmektedir.

Bu senaryoda bina durumu ve A ile B kullanıcılarının konumlarının daha iyi anlaşılması için senaryonun üstten görünümü Şekil 31’de gösterilmiştir. Kullanılan kanal modellere ait bilgiler ise Tablo 22’de verilmiştir.



Şekil 31. Kentsel Makro Hücre senaryosu üstten görünüm



Tablo 22. Kentsel Makro Hücre için kanal modelleri

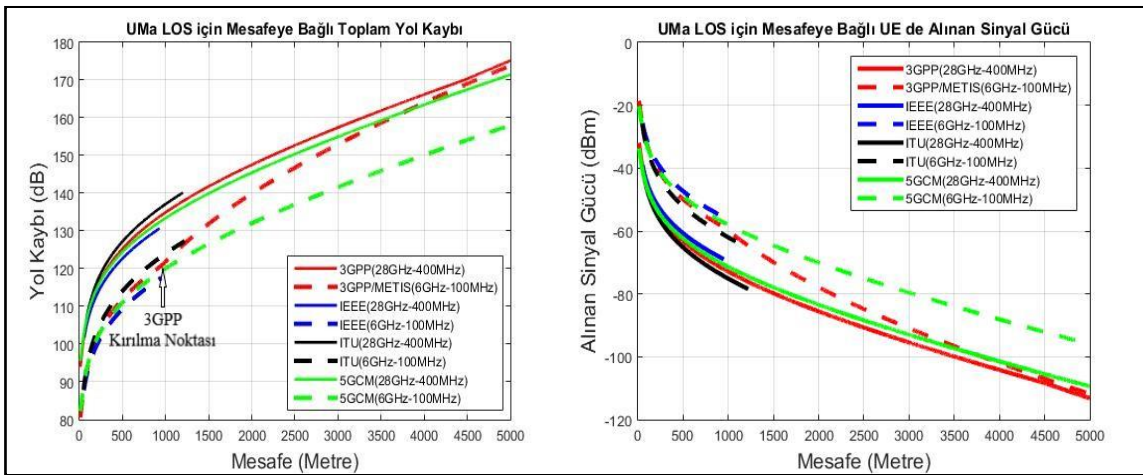
Kentsel Makro Hücre (Yönlü (D), Çok Yönlü (O))				
Model	Durum	PL (dB), F _C (GHz), d(Metre)	SF (dB)	Uygulanabilir Aralıklar
3GPP (O)	LOS	$PL_{LOS} = \begin{cases} PL_1, & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2, & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ Km} \end{cases}$ $PL_1 = 28 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$ $PL_2 = 28 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2)$	4	$0.8 < F_C < 100 \text{ GHz}$ $10m < d_{2D} < 5 \text{ Km}$ $1.5m \leq h_{UE} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 25m$ $d'_{BP} = \frac{(4h_{BS}h_{UE}F_C 10^9)}{c}$
	NLOS	$PL_{NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C) - 0.6(h_{UE} - 1.5)$ $PL = \text{maks}(PL_{LOS}, PL_{NLOS})$	6	$h'_{BS} = h_{BS} - h_E$ $h'_{UE} = h_{UE} - h_E$
IEEE (O)	LOS	CI model (d₀=1 metre) $PL = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	2.4	$2 \leq F_C \leq 38$ $60m \leq d_{3D} \leq 930m$
	NLOS	CI model (d₀=1 metre) $PL = 32.4 + 29 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	5.7	$2 \leq F_C \leq 38$ $60 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 1238 \text{ m}$
5GCM (O)	LOS	IEEE LOS ile aynı	4.1	$6 < F_C < 100 \text{ GHz}$
	NLOS	CI model (d₀=1 metre) $PL = 32.4 + 30 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	6.8	
METIS (O)	LOS	3GPP LOS ile aynı	4	$0.45 < F_C < 6 \text{ GHz}$ $10 \text{ m} < d_{2D} < 5 \text{ Km}$ $1.5 \text{ m} \leq h_{UE} \leq 22.5 \text{ m}$ $h_{BS} = 25 \text{ m}$
	NLOS	$PL_{NLOS} = 161.94 + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(F_C) + 7.5 \log_{10}(h) - 7.1 \log_{10}(W) - 0.6(h_{UE}) - (24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2) \log_{10}(h_{BS})$ $PL = \text{maks}(PL_{LOS}, PL_{NLOS})$	6	NLOS için $W = 20$ (Sokak Genişliği) $h = 20$ (Ort Bina yüksekliği)
ITU-R (D)	LOS	$PL = 28.6 + 22.9 \log_{10}(d_{3D}) + 19.6 \log_{10}(F_C)$	3.48	$2.2 \leq F_C \leq 73$ $55 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 1200 \text{ m}$
	NLOS	$PL = -6.27 + 43.9 \log_{10}(d_{3D}) + 23 \log_{10}(F_C)$	6.89	$2.2 \leq F_C \leq 66.5$ $260 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 1200 \text{ m}$
Not: Efektif çevre yüksekliği $h_E = 1$ metre				



Senaryo parametreleri içinde frekansların 6 ve 28 GHz olarak seçilmesinin sebepleri arasında bu frekansların bu hücre tipi için kullanılacağını düşünmemizin yanında bu frekansların Tablo 22’de belirtilen kanal modellerinin hepsi için ortak frekanslar olmasından da dolaydır. Geçerli mesafe konusunda ise çoğu kanal model farklı aralıklar belirtse de hepsi için uygun aralık 260-930 m aralığında olmaktadır.

2.3.2. UMa Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi

UMa Hücre için yapılacak olan incelemede FR1’den 6 GHz çalışma frekansı ve 100 MHz BW değeri ve FR2’den ise 28 GHz çalışma frekansı ve 400 MHz BW değeri kullanılmıştır. Bu frekanslardan 28 GHz değeri METIS’de tanımlı olmadığı için sadece 6 GHz frekansı kullanılmıştır. 6 GHz’de ise METIS ve 3GPP aynı sonucu verdiği için grafiklerde ikisi bir kabul edilerek inceleme yapılmıştır. Bu incelemelerden ilki olarak senaryo parametreleri ve kanal modellere göre hesapladığımız Toplam Yol Kaybı ve UE’de Alınan Sinyal Gücü değerleri Şekil 32’de gösterilmiştir. UMa Hücre tipi için yapılan ve gösterdiğimiz kanal modeller genel olarak 3GPP hariç maksimum 1200 m civarına kadar olmaktadır. Bu yüzden UMa için yapılan incelemeler bu aralığa göre değerlendirilmelidir.

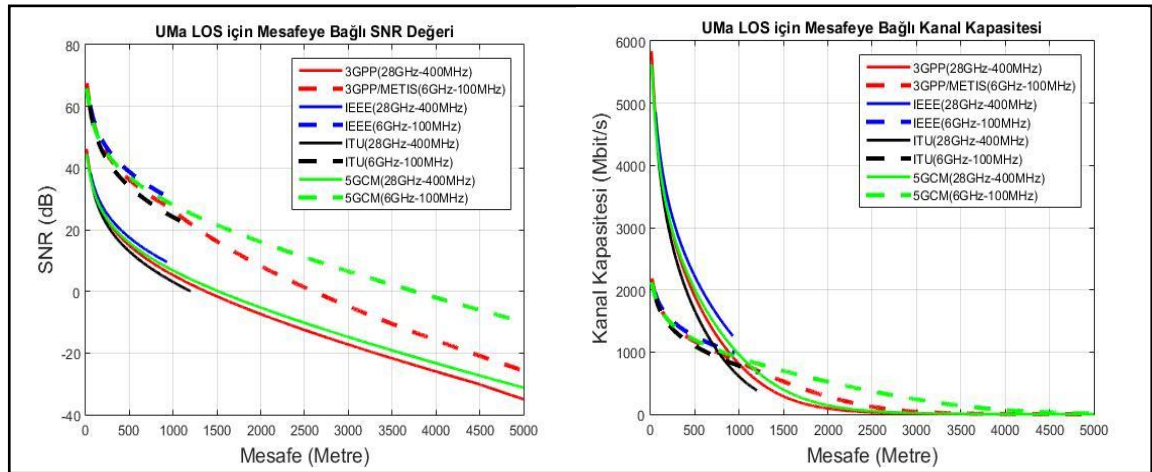


Şekil 32. UMa Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)

Şekil 32 incelendiğinde kanal modellerin birbirlerine benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. En büyük fark ise 930 m’de ITU-R ve IEEE arasında olmaktadır (yaklaşık



5 dB). 3GPP 3D model için 5 Km sınırı var iken 5GCM model için mesafe sınırı belirtilmemiştir. Bu yüzden bu iki model için mesafe 5 Km maksimum olacak şekilde ayarlanarak karşılaştırma yapılması sağlanmıştır. 28 GHz çalışma frekansı için 3GPP 3D modelde 4480 m’de sinyal BP noktasına ulaştığı için bu aşamadan sonra yol kaybı değeri ani yukarı yönlü artış göstermiştir. 6 GHz çalışma frekansında ise 3GPP 3D modelde Breakpoint noktası 960 m’de oluşmakta ve bu aşamadan sonra yaşanan ani artış 28 GHz’deki modeller gibi davranmasına sebep olmuştur. Genel anlamda ise LOS durum olması nedeniyle yol kaybı değerleri düşük ve alınan sinyal gücünde belirtilen sınırlar dahilinde ve ölçülebilir sınırlar arasındadır. 28 GHz çalışma frekansında RMa Hücre LOS durumunda 3GPP 3D modele göre 930 m’de 132 dB yol kaybı değeri vermekteyken UMA Hücre aynı mesafede 134 dB yol kaybı değeri vermektedir. 3GPP 3D modele göre DL için maksimum servis mesafesi 2248 m, 5GCM model için ise maksimum 2476 m’dir. 6 GHz’de ise sadece 3GPP model 4495 m’de RECSEN değerine ulaşmaktadır. 6 GHz ve 28 GHz yol kaybı değerleri arasında ise ortalama olarak 17 dB fark olduğu gözlemlenmiştir. Modellerde oluşan yol kayıpları ve alınan sinyal gücüne göre UE’de oluşan SNR ve Kanal Kapasitesi değerleri Şekil 33’te verilmiştir.

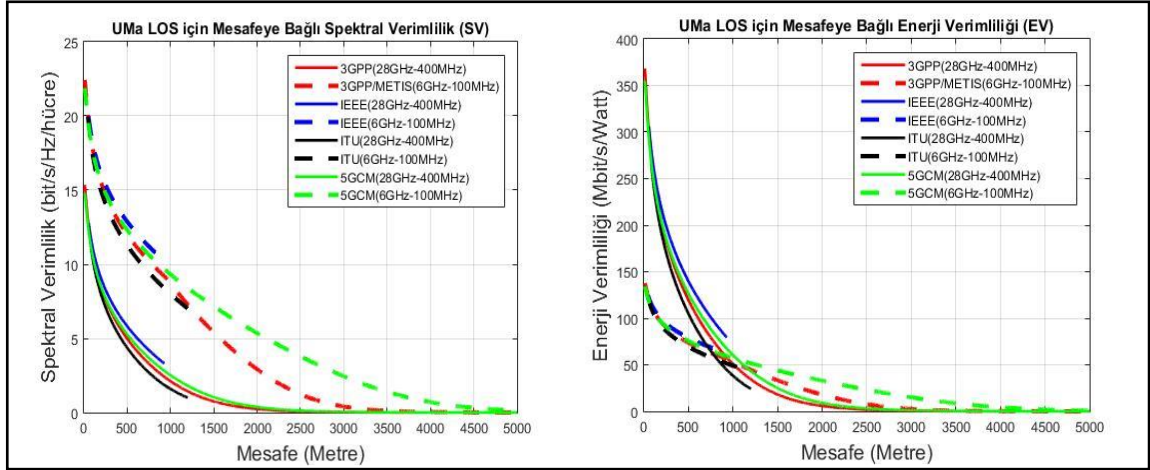


Şekil 33. UMA Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 33 incelendiğinde UMA Hücre tipinde LOS durumunda elde edilen SNR ve Kanal Kapasite değerleri sönmüleme etkilerinin az olması nedeniyle yol kaybı için belirlenen maksimum mesafelere kadar ölçülebilir sinyal gönderebildiği görülmektedir. Modellere göre ise en büyük fark IEEE ve ITU-R modeli arasında olmaktadır. 930 metrede IEEE ve



ITU-R modelleri arasında SNR'da 5.3 dB, Kanal Kapasitesi'nde ise 547 Mbit/s fark oluşmaktadır. Bu kapasite değerlerine göre oluşan SV ve EV değerleri ise Şekil 34'te verilmiştir.



Şekil 34. UMa Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

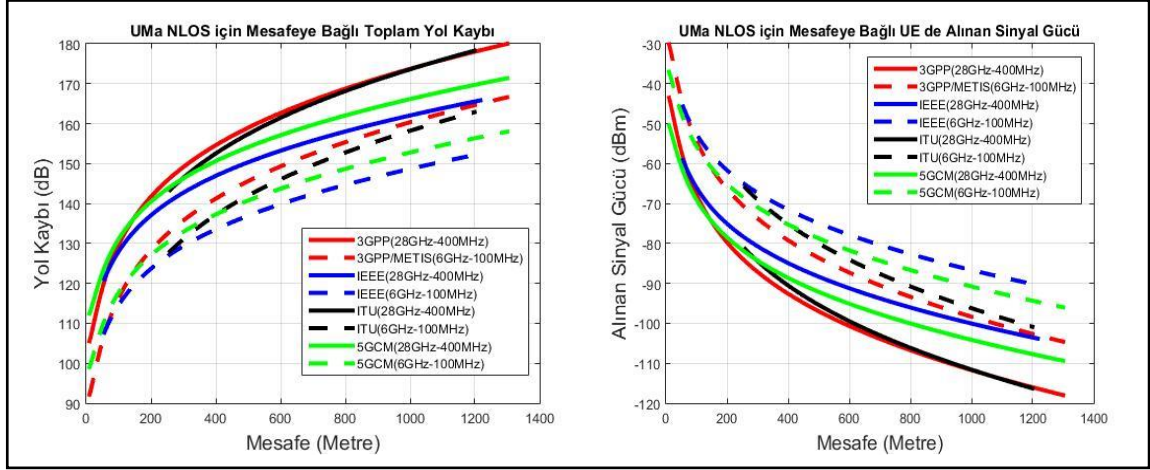
Şekil 34 incelendiğinde 28 GHz çalışma frekansındaki SV değerinde ve yine 930 metrede 3GPP 3D modele göre UMa LOS durum 2.41 bit/s/Hz/hücre SV değerini verirken, RMa LOS durumunda aynı mesafede 5.4 bit/s/Hz/hücre SV değerini vermektedir.

Aynı şekilde UMa Hücre tipinde 58 Mbit/s/Watt EV değeri alınırken, RMa'da ise 20.6 Mbit/s/Watt değeri alınmaktadır.

2.3.3. UMa Hücre İçin NLOS Durumu İncelemesi

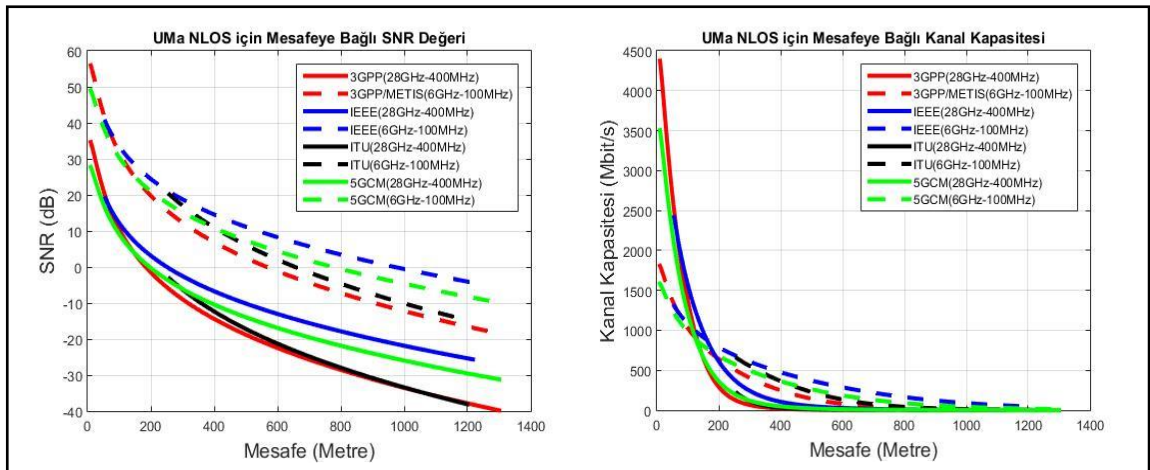
Bu incelemede ise UMa Hücre tipinin Şekil 30 ve Şekil 31'de gösterilen A kullanıcısı veya o kullanıcı gibi benzer konumda bulunan kullanıcılar için meydana getirdiği mesafeye bağlı sonuçlar incelenmiştir. İncelemelerde maksimum mesafe olarak 1300 metre seçilmesinin sebebi bu mesafeden sonra elde edilen sonuçların çok düşük değerler vermesi nedeniyledir. Şekil 35'teki grafikler maksimum 1300 metre mesafeye kadar NLOS durumda oluşan Toplam Yol Kaybı'nı ve A kullanıcısının bu mesafeye kadar alacağı sinyal gücünü göstermektedir.





Şekil 35. UMa Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ)

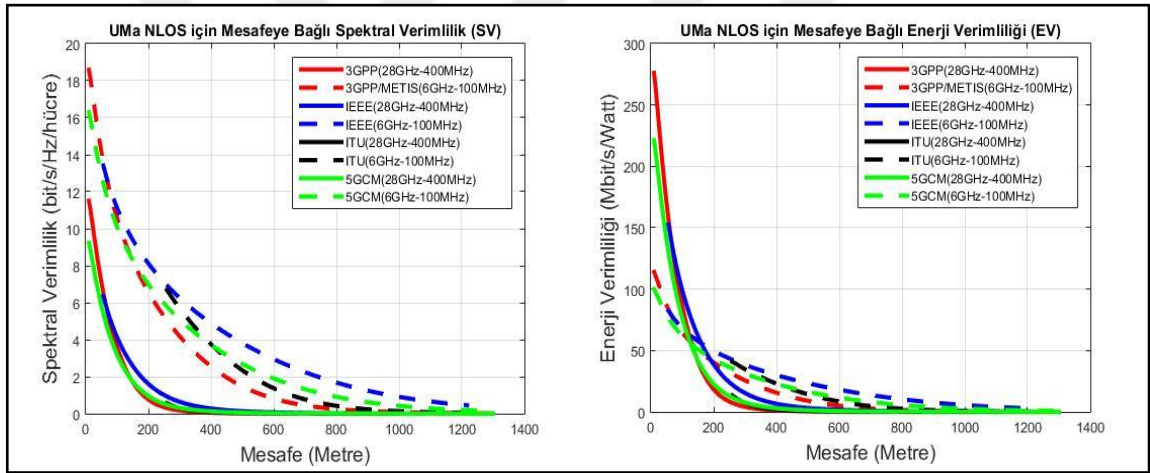
Şekil 35 incelendiğinde UMa Hücre tipinin şehir içinde yoğun bina ve çeşitli nesnelerin olduğu bir ortamda kuruluyor olması NLOS durumda meydana gelen yol kaybı değerini RMa Hücre tipine göre oldukça artırdığı görülmektedir. Yukarıdaki grafikte de anlaşılacağı üzere yol kaybı değeri bütün kanal modellerinde yüksek sonuç vermektedir. Özellikle 3GPP 3D ve ITU-R en yüksek kayıp değeri veren modeller olmaktadır. ITU-R model NLOS durumda her ne kadar milimetre dalga için geçerli olmasa da 3GPP'ye benzer bir sonuç verdiği görülmektedir. Bu hücre tipi için ölçülebilir maksimum yol kaybı değeri ise 150.175 dB 'dir.



Şekil 36. UMa Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)



Şekil 36'daki grafik ise A kullanıcısı gibi NLOS durumundaki kullanıcılarda mesafeye bağlı olarak alınan sinyal gücüne göre oluşan SNR değeri ve Kanal Kapasitesi sonuçlarını vermektedir. Şekil 36 incelendiğinde SNR değerleri de kanal modellere göre benzer sonuçlar vermektedir. Minimum SNR değerinin -10 dB olduğu sınır incelendiğinde 28 GHz'de 3GPP 3D model 317 m ile en kısa mesafeyi, IEEE model ise 441 m ile en uzak mesafeyi vermektedir. 6 GHz'de ise 3GPP 3D model 900 m ile en kısa mesafeyi, IEEE ise tahmini 1700 m ile en uzak mesafeyi vermektedir. Kanal kapasitesinde ise 3GPP model 317 m'de 46 Mbit/s, ITU-R model 5 Mbit/s, 5GCM model 93 Mbit/s ve IEEE model ise aynı mesafede 131 Mbit/s kanal kapasite değeri vermektedir. 1250 m'den itibaren neredeyse tüm modeller kanal kapasitesinde sifıra yaklaştığı için bu mesafeden sonrası için çizim yapılmamıştır.



Şekil 37. UMa Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

Şekil 37 ise UMa Hücre tipinde NLOS durumda mesafeye bağlı olarak elde edilen Kanal Kapasitesi'ne göre hesaplanan SV ve EV değerlerini vermektedir. Şekil 37 incelendiğinde UMa Hücre tipi 317 m için 28 GHz çalışma frekansında 3GPP modele göre 0.18 bit/s/Hz/hücre SV değerini verirken RMa Hücre aynı mesafede LOS durum için 2.76 bit/s/Hz/hücre SV değerini vermektedir. Aynı şekilde 317 m'de UMa Hücre tipinde 2.94 Mbit/s/Watt EV değeri alınırken, RMa'da ise o mesafede 10.5 Mbit/s/Watt EV değeri alınmaktadır.



2.3.4. UMa Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme

Oluşturduğumuz senaryo ve kanal modellere göre UMa Hücre tipini incelediğimizde bu hücre tipinin şehir içinde konumlandırılmasından dolayı verici gücü ve anten kazancının düşük olması ve de şehir içerisindeki birçok nesne nedeniyle RMa Hücre'ye göre daha yüksek yol kaybı yaşamaktadır.

Milimetre dalgada ise bu kayıp değeri daha da artacaktır. Oluşturduğumuz senaryo ortamı ve parametre değerlerinde DL sinyalinin B'deki gibi LOS durumdaki kullanıcılara en uzak mesafe olarak hücre yapısından 28 GHz'de ortalama 2300 m uzağa, 6 GHz'de ise 4500 m civarına kadar hizmet verebileceği görülmektedir. Doğrudan görüşün olmadığı A konumundaki yani NLOS durumdaki kullanıcıların ise 28 GHz'de 400 m'den az bir mesafeye kadar 6 GHz'de ise ortalama 900 m civarına kadar servis hizmeti verebileceği anlaşılmaktadır.

Bir bina içerisinde bulunan bir kullanıcı için ise kayıp değerinin çok daha fazla olacağı için milimetre dalgada ve FR2 için tanımlanan maksimum bant genişliğinde UMa Hücre tipinden yüksek DL servis hizmeti almanın çok uzak mesafeler için mümkün olamayacağı sonucu çıkmaktadır. UL sinyalinde ise UE verici gücü ve kazancının daha da düşük olması servis mesafesini ve kalitesini oldukça düşürecektir. DL ve UL de servis hizmetinin artırılması için RMa'da olduğu gibi UMa'nın LOS görüşü artıracak şekilde konumlandırılma yapılması ve hücre antenlerinin daha yüksekte olacak şekilde konumlandırılmasının milimetre dalgada bu hücre için gerekli olduğunu düşünmekteyiz. METIS'in de söylediği gibi kentsel bölgelerde bina gibi yapılarda milimetre dalga penetrasyon kaybının yüksek olması nedeniyle bu hücre tipinin daha çok FR1 frekanslarında kullanılacağını, FR2 frekanslarını ise daha çok LOS görüşün olduğu belli bölgelerde kullanılabileceğini düşünmekteyiz.

Bu hücre yapısı için oluşturulan modellerin ise kısa mesafede (200 metreden az) benzer sonuçlar verdiği ancak RMa Hücre de olduğu gibi yine 3GPP modelin daha yüksek kayıp değeri verdiği görülmüştür.



2.4. Kentsel Mikro Hücre İncelemesi

2.4.1. UMi Hücre İçin Senaryo Ortamı

Kentsel Makro Hücre için oluşturulan senaryoya benzer bir senaryo ortamı oluşturulmuştur. Bu sefer BS binaların üstünde olacak şekilde değil de BS yüksekliğinin bina yüksekliği ile aynı olduğu durum kabul edilmiştir. Bu senaryoda Mikro Hücre yol kayıp modellemelerine uygun olacak şekilde 10 metre yüksekliğinde olduğu varsayılmış olup Sokak Kanyonu denen ve kullanıcı sayısının çok olduğu bölge varsayılmıştır. Mikro Hücre için yapılan yol kayıp modellemeleri genel olarak Sokak Kanyonu üzerinden yapılan çalışmalarla oluşturulduğundan hücre incelemesi sadece bu bölge varsayılarak yapılacaktır.

Bu senaryoda Mikro Hücre için kanal modeli bulunan çalışma grupları 5GCM, 3GPP, METIS, mmMAGIC ve ITU-R'dur. Bu çalışma gruplarının UMi için kanal modelleri Tablo 23'te verilmiştir.

Tablo 23. Kentsel Mikro Hücre-Sokak Kanyonu için kanal modelleri

Kentsel (Sokak Kanyonu) Mikro Hücre (Yönlü (D), Çok Yönlü (O))				
Model	Durum	PL (dB), F_C (GHz), d (Metre), d_0 (Referans Mesafe), c (ışık hızı)	SF (dB)	Uygulanabilir Aralıklar
5GCM (O)	LOS	CI model ($d_0=1$ metre) $PL=32.4+21\log_{10}(d_{3D})+20\log_{10}(F_C)$	3.76	$6 < F_C < 100$ GHz
	NLOS	CI model ($d_0=1$ metre) $PL=32.4+31.7\log_{10}(d_{3D})+20\log_{10}(F_C)$	8.09	
3GPP (O)	LOS	$PL_{LOS} = \begin{cases} PL_1, & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2, & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ Km} \end{cases}$ not 1 $PL_1=32.4+21\log_{10}(d_{3D})+20\log_{10}(F_C)$ $PL_2=32.4+40\log_{10}(d_{3D})+20\log_{10}(F_C)$ $-9.5\log_{10}((d'_{BP})^2+(h_{BS}-h_{UE})^2)$	4	$0.8 < F_C < 100$ GHz $10 m < d_{2D} < 5$ Km $1.5 m \leq h_{UE} \leq 22.5$ m $h_{BS}=10$ m $d'_{BP} = \frac{(4h_{BS}h_{UE}F_C)}{c}$ $h'_{BS}=h_{BS}-h_E$ $h'_{UE}=h_{UE}-h_E$
	NLOS	$PL_{NLOS} = 22.4+35.3\log_{10}(d_{3D})+21.3\log_{10}(F_C)$ $-0.3(h_{UE}-1.5)$ $PL=\max(PL_{LOS}, PL_{NLOS})$	7.82	



Tablo 23'ün devamı

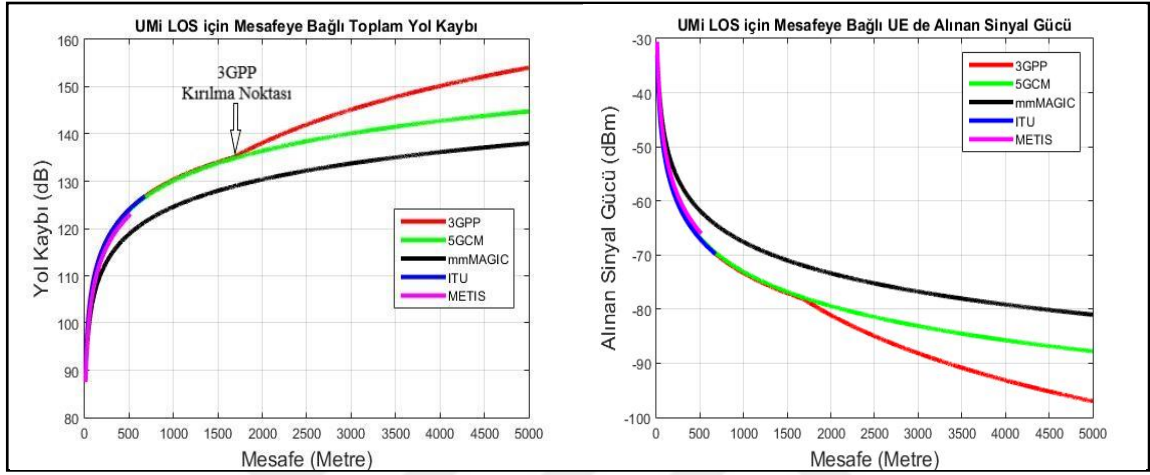
METIS (O)	LOS	$PL_{LOS} = \begin{cases} PL_1, & 10m \leq d_{3D} \leq d_{BP_M} \\ PL_2, & d_{BP_M} \leq d_{3D} \leq 500 \text{ m} \end{cases}$ $PL_1 = 28 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C) + PL_0$ $PL_2 = 7.8 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 2 \log_{10}(F_C) - 18 \log_{10}(h_{BS} h_{UE}) + PL_1(d_{BP_M})$	3.1	$0.8 \leq F_C \leq 60$ $PL_0 = -1.38 \log_{10}(F_C) + 3.34$ $h_{BS} = 10 \text{ m}$
	NLOS	$PL_{NLOS} = 23.15 + 36.7 \log_{10}(d_{3D}) + 26 \log_{10}(F_C) - 0.3(h_{UE})$ $PL = \max(PL_{LOS}, PL_{NLOS})$	4	$0.45 \leq F_C \leq 6$ $10m < d_{2D} < 2 \text{ Km}$ $1.5 \text{ m} \leq h_{UE} \leq 22.5 \text{ m}$ $h_{BS} = 10 \text{ m}$
mmMAGIC (O)	LOS	$PL = 32.9 + 19.2 \log_{10}(d_{3D}) + 20.8 \log_{10}(F_C)$	2	$6 < F_C < 100 \text{ GHz}$
	NLOS	$PL = 31 + 45 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	7.82	
ITU-R (D)	LOS	$PL = 29.2 + 21.2 \log_{10}(d_{3D}) + 21.1 \log_{10}(F_C)$	5.06	$0.8 \leq F_C \leq 73$ $5 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 660 \text{ m}$
	NLOS	$PL = 10.2 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 23.6 \log_{10}(F_C)$	7.60	$0.8 \leq F_C \leq 38$ (Yüksek Katlı Bina) $30 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 715 \text{ m}$
		$PL = -4.68 + 50.6 \log_{10}(d_{3D}) + 20.2 \log_{10}(F_C)$	9.33	$10 \leq F_C \leq 73$ (Düşük Katlı Bina) $30 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 250 \text{ m}$
IEEE (O)	LOS	CI model ($d_0=1 \text{ metre}$) $PL = 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	4.4	$F_C = 28-73 \text{ GHz}$ $27 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 54 \text{ m}$
	NLOS	CI model ($d_0=1 \text{ metre}$) $PL = 32.4 + 32 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(F_C)$	8	$2.9 \leq F_C \leq 73$ $48 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 235 \text{ m}$
<p>Not 1: Efektif çevre yüksekliği $h_E=1 \text{ metre}$ $d_{BP_M} = 0.37 \exp(-1 \times \log_{10}(F_C) / 1.13) (2\pi(h_{BS})(h_{UE}) / \lambda)$, $h_{BS} \geq 5 \text{ m}$ için geçerli, λ Dalgaboyu Yüksek Katlı Bina = 10 metreden uzun Düşük Katlı Bina = 10 metreden kısa</p>				

Bu çalışma grupları içinde METIS, UMi için NLOS senaryoda 6 GHz üzerinde frekans kullanılmayacağını düşündüğü için 6 GHz üstünde modelleme oluşturmamıştır. ITU ise Yüksek Katlı Bina ve Düşük Katlı Bina olacak şekilde iki farklı modelleme belirlemiştir. Çalışmamızda karşılaştırma yapmak amacıyla bu ikisinin sonucu da gösterilmiştir. Çalışma frekansı olarak da tüm modeller için ortak olan 28 GHz değeri seçilmiştir.



2.4.2. UMi Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi

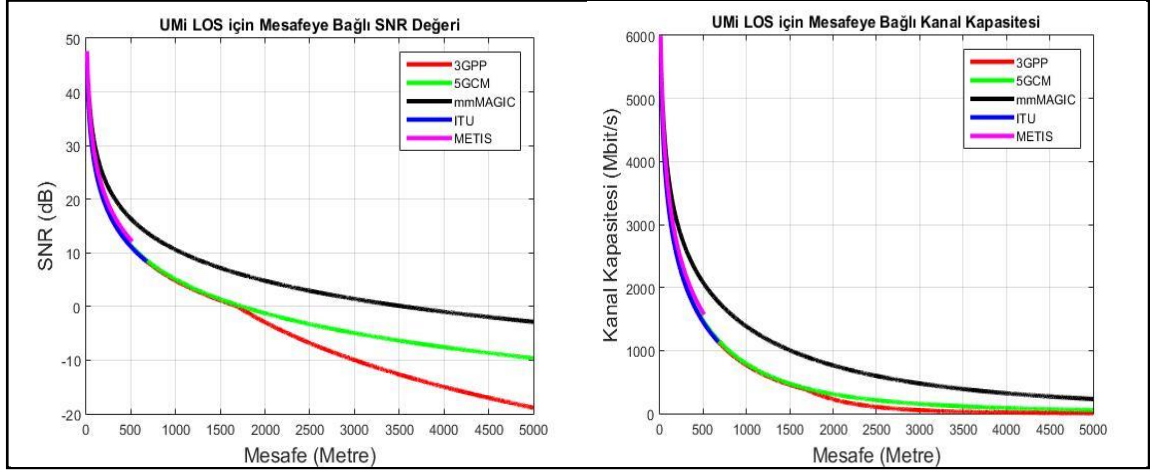
5 farklı çalışma grubunun kanal modelleri mesafeye bağlı olarak LOS durumunda incelenmiştir. Kullanılan senaryo UMa Hücre tipi ile aynı olduğundan senaryoda B'deki kullanıcının durumu incelenmiştir.



Şekil 38. UMi Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE 'de alınan sinyal gücü (sağ)

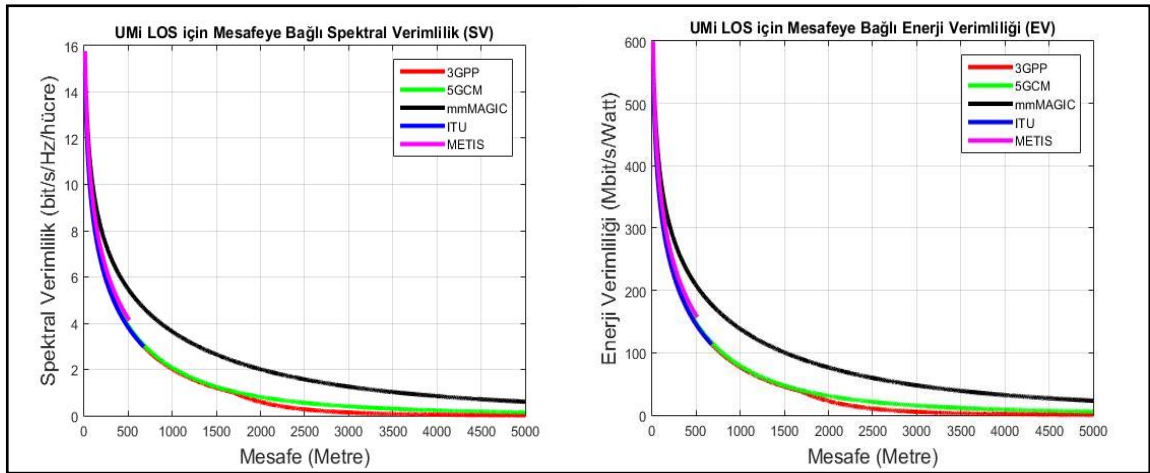
Şekil 38'deki grafikler bu senaryoda DL sinyalin karşılaştığı Toplam Yol Kaybı ve UE'de Alınan Sinyal Gücünü göstermektedir. Şekil 38 incelendiğinde UMi (Sokak Kanyonu) Hücre tipinin konumlandırıldığı yer itibari ile daha çok açık görüşün olduğu LOS durum için servis hizmeti veren bir hücre tipi olması nedeniyle milimetre dalga da kullanılsa dahi uzak mesafelere yüksek veri hızında servis hizmeti verebileceğini göstermektedir. Alınan sinyal gücünde ise RECSEN değerine 3GPP 3D model, BP mesafesi ve diğer kanal modellerinin de ortalama yol kayıp değerleri hesaba katıldığında minimum 1700 m ve üzerinde ulaşabildiği görülmektedir. Modellerde BP gösterimi sadece 3GPP 3D modele aittir. Kanal modellerde 3GPP ve 5GCM, BP noktasına kadar aynı sonucu gösterebilir. 5GCM, BP noktasını kanal modele dahil etmediği için BP noktasından sonra 3GPP model daha yüksek yol kaybı değeri vermektedir.





Şekil 39. UMi HÜCRE LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 39, LOS durumdaki B kullanıcısının mesafeye bağlı olarak aldığı sinyal gücüne göre oluşturduğu SNR değeri ve Kanal Kapasitesi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 39 incelendiğinde yine SNR değeri ve Kanal Kapasitesi'nin ortalama 3000 m'ye kadar mobil haberleşme için uygun değer aralığında olabildiği görülmektedir. Ancak gerçek ortamda bir sokak kanyonu etrafında çok sayıda nesne olması sık sık sinyal kaybına ve gürültü artışına neden olacaktır. Bu nedenle her ne kadar LOS görüşte dahi olsa gerçek bir UMi (Sokak Kanyonu) senaryosu durumunda SNR ve Kanal Kapasitesi değerlerinin bölgenin kalabalık oluşu ve yoğunluğuna göre teorik hesaplamalardan çok daha düşük çıkması kaçınılmazdır. Bu yüzden tam bir hesap yapmak mümkün değildir.



Şekil 40. UMi HÜCRE LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)



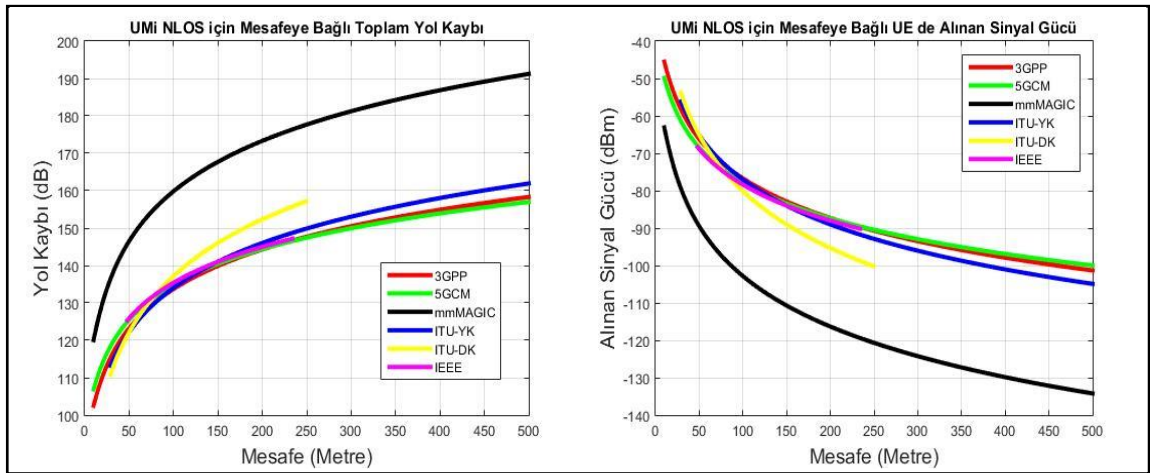
Şekil 40 ise UMi Hücre'nin mesafeye bağlı SV ve EV değerlerini göstermektedir. Şekil 40 incelendiğinde UMi Hücre'nin RMa ve UMa Hücre tipine göre daha küçük bir alanda çok sayıda kullanıcıya servis hizmeti vermesi nedeniyle SV ve EV değerlerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Kanal modeller arasında özellikle mmMAGIC, diğer modellere göre en iyimser sonucu vermektedir. METIS kanal model ise sadece 660 m için uygulama aralığı belirlediğinden dolayı daha uzak mesafe için diğer modellere göre kıyaslaması yapılamamaktadır.

2.4.3. UMi Hücre İçin NLOS Durumu İncelemesi

UMi Hücre tipi NLOS durum incelemesinde 5 farklı kanal model kullanılmıştır. Bu kanal modellerden ITU-R, yüksek katlı ve düşük katlı binalar için iki model sunmuştur. Bu modellerin ikisinde karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir.

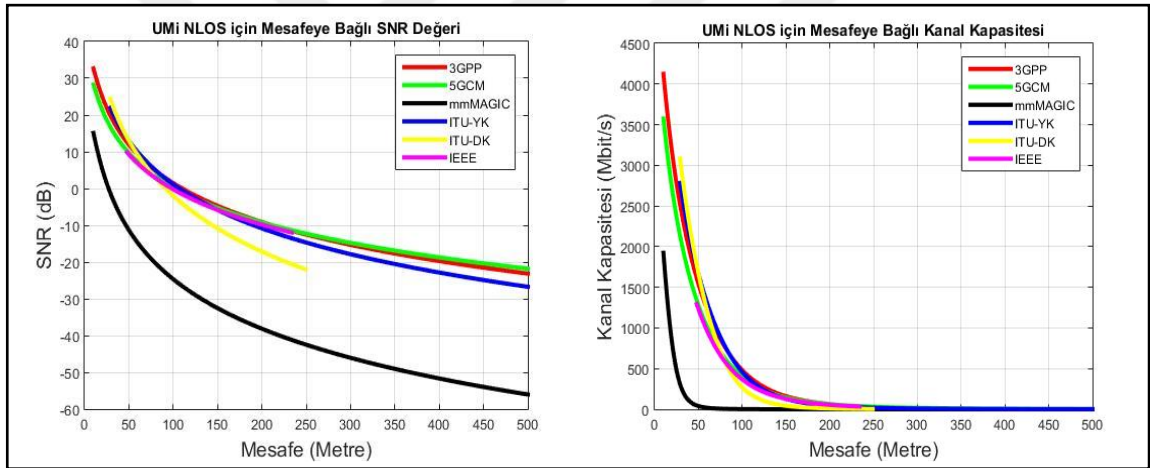
Kanal modellerinin incelemesinde ise maksimum 500 m mesafe seçilmiştir. Bu mesafenin seçilme sebebi 500 m'den sonra modellerin verdikleri sonuçların genel itibariyle ölçüm sınırlarının çok üstüne çıkması nedeniyledir. Bu yüzden sonuçların daha iyi anlaşılması için gösterilen mesafe aralığı UMa Hücre'nin NLOS durumu gibi daraltılmıştır. Şekil 41'de gösterilen grafik UMi Hücre'nin NLOS durumdaki mesafeye bağlı Toplam Yol Kaybı ve UE'de Alınan Sinyal Gücü'nü vermektedir.



Şekil 41. UMi Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE 'de alınan sinyal gücü (sağ)



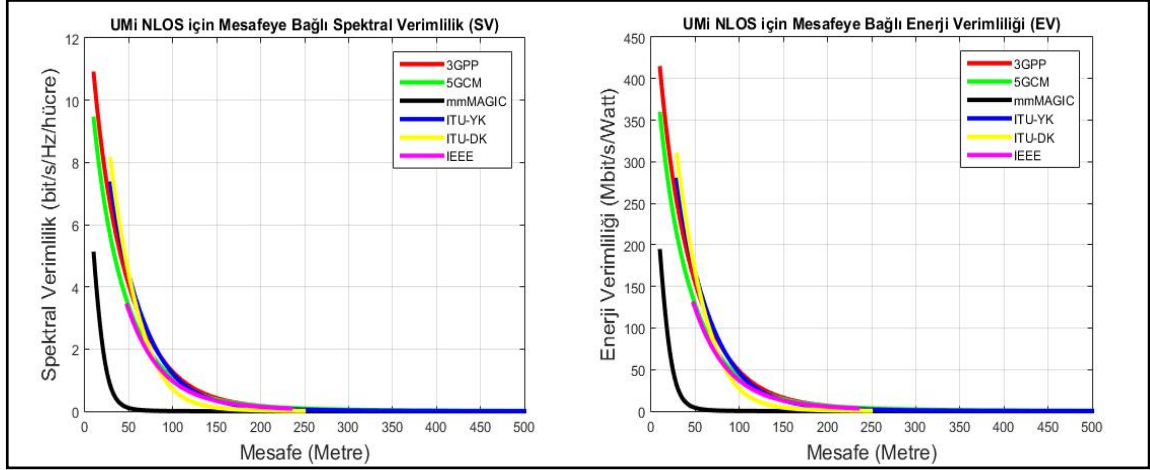
Şekil 41 incelendiğinde NLOS durumda oluşan kayıp değeri LOS duruma göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bunun UMi Hücre tipinin çatı hizasına yerleştirilmesinde etkisi büyüktür. UMi Hücre tipi için bu senaryoda ölçülebilir maksimum yol kaybı değeri 150.175 dB'dir. Bu değere göre kısa mesafede NLOS durumda ne kadar yüksek sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Özellikle mmMAGIC modelin yol kaybı grafiği diğer modellere göre 45 dB kadarlık bir fark oluşturabildiği görülmektedir. ITU-R kanal modellerinin UMa modellerine benzer şekilde NLOS durum için geçerli olmamasına rağmen diğer kanal modellerine benzer sonuçlar vermektedir. Özellikle ITU-DK model çatı hizasının altında konumlandırılması nedeniyle ITU-YK modeline göre bir miktar daha yüksek sonuç vermektedir. Alınan sinyal gücünde ise RECSEN değerine mmMAGIC 47 m'de ulaşırken diğer modeller ise ortalama 200 m'de ulaşabilmektedir.



Şekil 42. UMi Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 42 ise UMi Hücre'nin kanal modellere göre NLOS durumdaki mesafeye bağlı olarak SNR ve Kanal Kapasitesi'nin değişimini vermektedir. Şekil 42 incelendiğinde kanal kapasitesinde ise mmMAGIC yüksek yol kaybı vermesi nedeniyle, diğer modellere göre daha düşük sonuçlar vermektedir. Hatta 50 m'de mmMAGIC model kanal kapasitesinde sıfıra yakın değeri verirken diğer modellere göre bu değer ortalama 1500 Mbit/s olmaktadır.





Şekil 43. UMi Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

Şekil 43'deki grafikler ise yine Kanal Kapasitesi'nde elde edilen değerlere göre hesaplanan SV ve EV değerlerini vermektedir.

2.4.4. UMi Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme

Bu hücre tipinin Sokak Kanyonu bölgesi için yapılan kanal modellerini kullanarak yapılan incelemede, hücre tipinin LOS görüşteki kullanıcılara (B) oldukça uzak mesafelere kadar servis hizmeti verebildiği ancak NLOS durumdaki kullanıcılar (A) için ise servis mesafesi ve kapasitesinin 200 m'ye kadar düşebildiği anlaşılmaktadır.

Bu hücre tipi için NLOS durumda milimetre dalga kullanılması durumunda bant genişliğinin düşük seçilmesi (örneğin 100 MHz) RECSEN değerini düşüreceğinden bu durum servis mesafesini arttıracaktır ancak NLOS durumdaki kullanıcılara daha düşük kapasite sunacaktır. Böyle bir durumda o kapasiteyi milimetre dalgada vermek yerine FR1 frekanslarında sunmak servis mesafesini çok daha fazla artıracaktır ki çatı hizasında yerleştirilen bu hücre tipi için yüksek sönmüleme etkisinden kurtulmanın en iyi yolu bizce budur.

Bu yüzden bu hücre tipi için yapılacak olan kurulumlarda LOS görüşteki ortamda çok sayıda kullanıcı barındırdığı için bu bölgeye yüksek frekans ve yüksek bant genişliği sunan anten yapıları kurulurken, NLOS durum için ise FR1 frekanslarında ve daha düşük bant genişliği sunan antenler kurmak gerekmektedir. Bu durumda METIS'in savunduğu düşüncüyü doğru bulmaktayız. Zira senaryo ortamında bulunan UE'lerin verici güçlerinin



daha düşük olmasının UL bağlantıda ve özellikle NLOS durumda mesafenin çok düşmesi nedeniyle servis kalitesinde çokça sorun oluşturacağı açıktır.

Her ne kadar LOS görüşte de 2000 m'yi bulan bir mesafeye servis hizmeti verebiliyor olarak gözüke de gerçek ortamdaki sokak kanyonlarında araba, insan, ağaç, tabela ve sokak lambası gibi birçok nesne var olduğundan kayıp değerlerinin teorik hesaptan genelde daha fazla olacak olması kaçınılmazdır. Ayrıca daha yüksek bant genişliğinin alıcı hassasiyetini düşürmesi nedeniyle de DL servis mesafesinin 5G milimetre dalgada ve yüksek bant genişliğinde LOS ve NLOS ortalaması alındığında 1000 m'yi pek geçmeyeceğini düşünmekteyiz.

Kanal modellerine baktığımızda ise çatı hizasının üstünde veya altında olduğu modellerde anten yüksekliğinin NLOS durumda servis mesafesine olan etkisinin ne derece olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.

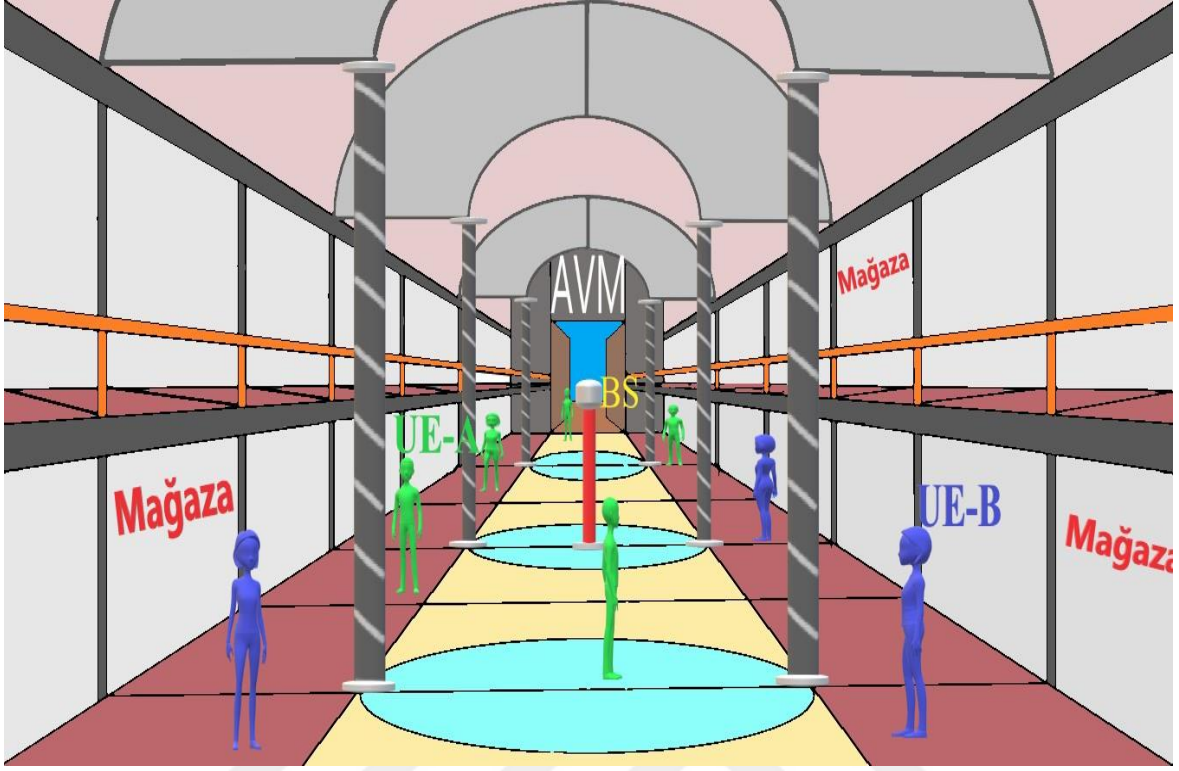
Şekil 42 tekrar incelendiğinde ise ITU-DK model 150 m'de -10 dB SNR değerine ulaşırken ITU-YK model 200 m'de ulaşmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere hücre yapısının çevresindeki binalardan birazcık üste olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda servis mesafesinin %30 civarı artması dikkat çekicidir.

2.5. İç Mekân Hücre-AVM İncelemesi

2.5.1. Piko Hücre İçin Senaryo Ortamı

Bu hücre tipi genel olarak AVM gibi alanlarda çok sayıda kullanıcıya hizmet vermesi için yerleştirilmektedir. 5G'de de bu hücre tipi yine bu gibi kapalı alanlarda daha çok kullanılacağından bu hücre tipi için yapılan yol kayıp modellemeleri de genel olarak AVM için olmaktadır. Bu hususta tez çalışması için oluşturduğumuz senaryo ortamı da yine AVM ortamı olmuştur. Bu yerlerde genelde hücre, olabilecek en iyi servis hizmetini verebilmek için AVM'lerin en geniş ve çok sayıda kullanıcıyı barındırdığı alanlarında ve daha çok LOS görüş sağlayacak şekilde konumlandırılırlar. Özellikle 5G gibi sönmüleme etkisinin yüksek olduğu frekanslar kullandığında yine daha çok LOS görüş sağlayacak şekilde hücre yerleşimleri olacağını düşünmekteyiz. Bu yüzden Şekil 44'te oluşturduğumuz temsili AVM ortamında, AVM'nin en geniş ve en çok kullanıcıyı barındırdığı alanda ve LOS görüşün çok olacağı şekilde BS yerleşimi yaparak hücreyi AVM'nin tam ortasına yerleştirdik.





Şekil 44. Temsili AVM ortamı ve Piko Hücre yerleşimi

Bu yerleşimde BS'nin hemen etrafında yeşil renkli kullanıcılara (UE_A) dikkat edilirse bu kullanıcılar LOS görüşte durmaktayken, mavi renkli kullanıcılar (UE_B) ise kalın bir beton duvarın arkasında kalarak BS ile doğrudan görüş sağlayamadıkları için NLOS durum oluşturmaktadırlar. Genel olarak bu hücre tiplerinde BS ile UE arasında yükseklik farkı ise 1.5-2 metre mesafe olmaktadır.

Bu senaryoda Piko Hücre'nin genel yerleşim durumu gösterilerek, bu hücre tipi için AVM ortamında yapılan kanal modelleri ve 5G'de kullanılması düşünülen frekans değerlerine göre vereceği tepkiler ve Tablo 20'de belirlediğimiz Senaryo Parametreleri'nde kullanılan diğer değerler eşliğinde gösterilmeye çalışılmıştır.

Bu hücre tipi için kanal model çalışması yapan gruplar 3GPP, 5GCM, mmMAGIC, METIS ve IEEE'dir. Bu gruplara ait kanal modeller ise Tablo 24'te gösterilmiştir.



Tablo 24. Piko Hücre için kanal modelleri

İç Mekân (Alışveriş Merkezi) Piko Hücre (Omnidirectional-Çok Yönlü)				
Model	Durum	PL (dB), F_C (GHz), d (Metre)	SF (dB)	Uygulanabilir Aralıklar
5GCM	LOS	CI model ($d_0=1$ metre) $PL=32.4+17.3\log_{10}(d_{3D}) +20\log_{10}(F_C)$	2.01	$6 < F_C < 100$ GHz
	NLOS (SS)	$PL=18.09+32.1\log_{10}(d_{3D}) +22.4\log_{10}(F_C)$	6.97	
	NLOS (DS)	$1 < d_{3D} \leq d_{BP}$ $22.17+29\log_{10}(d_{3D}) +22.4\log_{10}(F_C)$ $d_{3D} > d_{BP}$ $PL = \left(22.17+29\log_{10}(d_{BP}) +22.4\log_{10}(F_C) +114.7\log_{10}\left(\frac{d_{3D}}{d_{BP}}\right) \right)$	6.36	$6 < F_C < 100$ GHz $d_{BP}=147$ m
3GPP	LOS	5GCM LOS ile aynı	2.0	$0.5 < F_C < 100$ GHz $1 \text{ m} < d_{3D} < 150$ m
	NLOS	5GCM NLOS (SS) ile aynı	8.03	$0.5 < F_C < 100$ GHz $1 \text{ m} < d_{3D} < 86$ m
mmMAGIC	LOS	$PL_{LOS}=33.6+13.8\log_{10}(d_{3D}) +20.3\log_{10}(F_C)$	1.18	$6 < F_C < 100$ GHz
	NLOS	$PL_{NLOS}= 15.2+36.9\log_{10}(d_{3D})+26.8\log_{10}(F_C)$ $PL=\text{maks}(PL_{LOS}, PL_{NLOS})$	8.03	
METIS	LOS	$PL=68.8+18.4\log_{10}(d_{2D})$	2.0	$F_C=63$ GHz $1.5 \text{ m} < d_{2D} < 13.4$ m
	NLOS	$PL=94.3+3.59\log_{10}(d_{2D})$	2.0	$F_C=63$ GHz $4 \text{ m} < d_{2D} < 16.1$ m
IEEE	LOS	CI model ($d_0=1$ metre) $PL=32.4+19\log_{10}(d_{3D}) +20\log_{10}(F_C)$	3.4	$2.9 \leq F_C \leq 61$ $19 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 149$ m
	NLOS	CI model ($d_0=1$ metre) $PL=32.4+23\log_{10}(d_{3D}) +20\log_{10}(F_C)$	4.8	$2.9 \leq F_C \leq 61$ $24 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 229$ m

Tablo 24'te belirtilen modeller içinde METIS'in sadece 63 GHz için uygulama frekansı belirlemesi, sunmuş olduğu modelin çok kısa mesafe aralığı için uygulanabilir



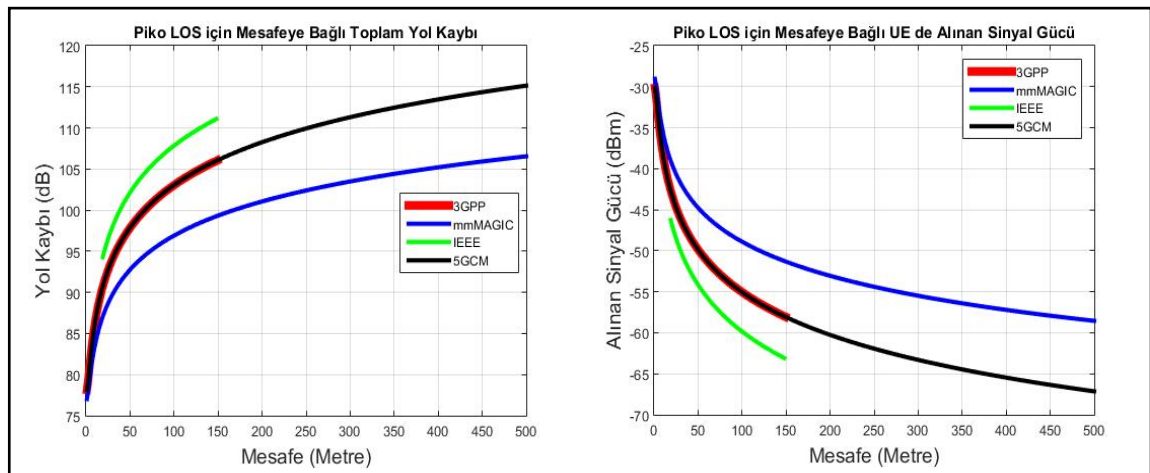
olması ve diğer modellerle ortak frekans oluşturmaması nedeniyle tez çalışmasında kullanılmamıştır. Ancak sunmuş olduğu kanal model bilgi verme amacıyla Tablo 24'te gösterilmiştir. 5GCM modelde ise NLOS durum için hem Tek Eğim (Single Slope, SS) hem de Çift Eğim (Dual Slope, DS) modeli mevcut olup ikisinde karşılaştırma yapmak amacıyla çalışmamıza dahil edilmiştir.

Bu hücre tipinin FR2'de çalışmasını öngördüğümüz çalışma frekansı genel olarak 40 GHz, daha yüksek frekansta ise 52.6-86 GHz civarı olması yönündedir. Bu 40 GHz frekans değeri de METIS hariç diğer kanal modellerin hepsine uygun olup modellerin daha doğru karşılaştırılması adına özellikle belirlenmiştir.

Modellemelerin karşılaştırmasında dikkat edilecek mesafe ise 24-86 metre aralığıdır. Bu senaryo için belirlenen Senaryo Parametreleri ise Tablo 20'de gösterilmiştir.

2.5.2. Piko Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi

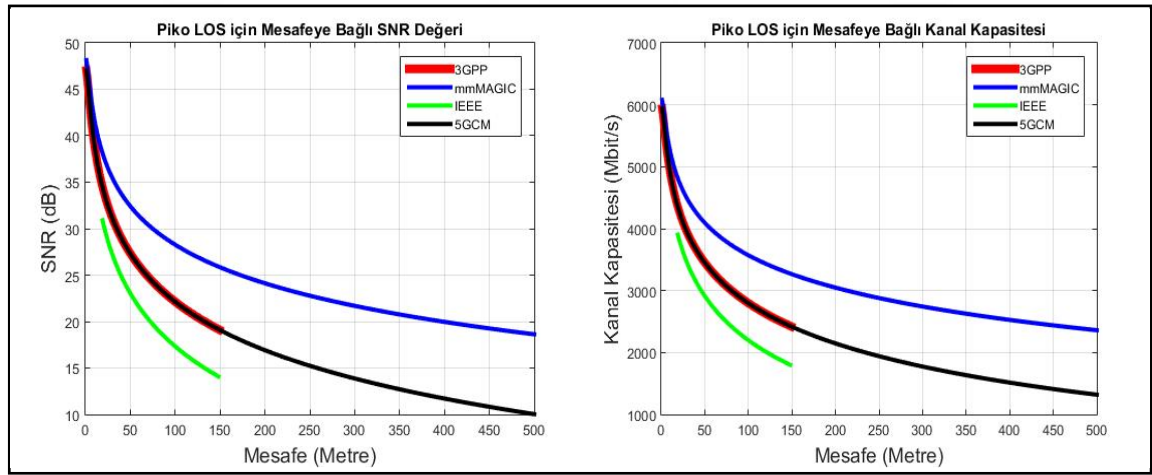
Diğer hücrelerde olduğu gibi Piko Hücre için yapılan ilk inceleme Şekil 44'te gösterdiğimiz LOS durumdaki Yeşil renkli kullanıcılar (UE_A) için olmaktadır. İlk olarak BS'den gelen DL sinyalin mesafeye bağlı olarak yaşadığı Toplam Yol Kaybı ve bu kayıp sonucu UE'de Alınan Sinyal Gücü Şekil 45'te farklı kanal modelleri ile gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 45. Piko Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ)



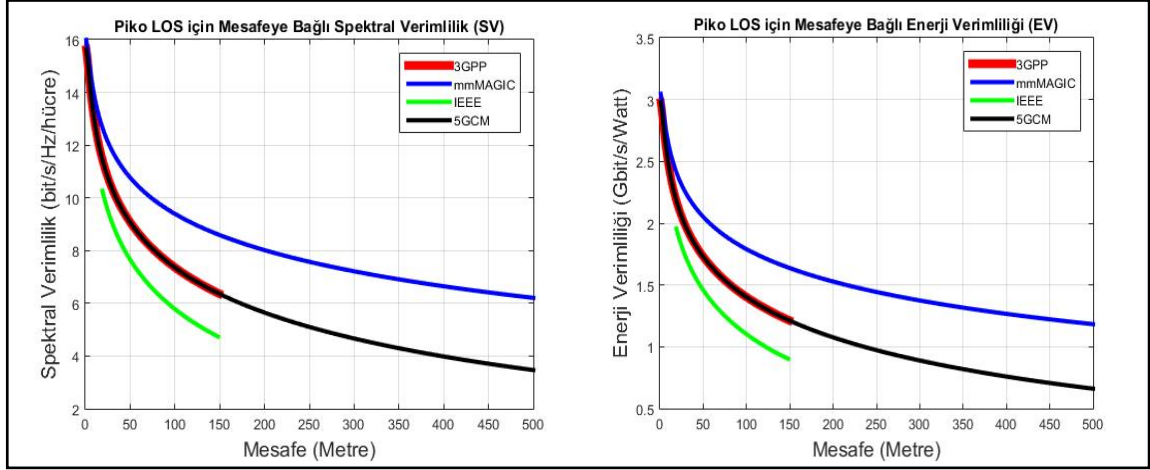
Şekil 45 incelendiğinde modeller arasında ortalama 5 dB fark olduğu görülmektedir. Grafiklerde 3GPP ile 5GCM uygulama mesafesi haricinde benzer olduğu ancak IEEE modelin ise daha yüksek kayıp değeri verdiği görülmektedir. Bu durum UE’de Alınan Sinyal Gücü içinde geçerli olup Şekil 45’teki grafiklere bakıldığında 5GCM ve mmMAGIC modellerin 500 m’de dahi Alınan Sinyal Gücünde ortalama olarak RECSEN değerine ulaşamadığı görülmüştür. Bu da bu hücre tipinin LOS görüşte sinyal gücünün oldukça iyi olacağını göstermektedir. Özellikle AVM, Havalimanı ve geniş meydanlarda milimetre dalga bandı kullanılması durumunda LOS durum için DL ve UL de yüksek sinyal gücü sunacağı göstermektedir.



Şekil 46. Piko Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 46’da gösterilen grafikler ise bu sinyal güçlerinde oluşan SNR ve bu SNR değerinde hesaplanan Kanal Kapasitesi’ni göstermektedir. Grafikler incelendiğinde SNR değeri ve Kanal Kapasitesi değerlerinin modellerin belirttiği sınırlara göre oldukça yüksek çıktığı görülmektedir. Genel manada 200 m’den az mesafeler için kurulan Piko Hücre’ler bu haliyle 5G’de milimetre dalgalarda LOS görüşte 250 m’den çok daha uzak mesafeler için yüksek servis kalitesi verebileceğini de göstermektedir.



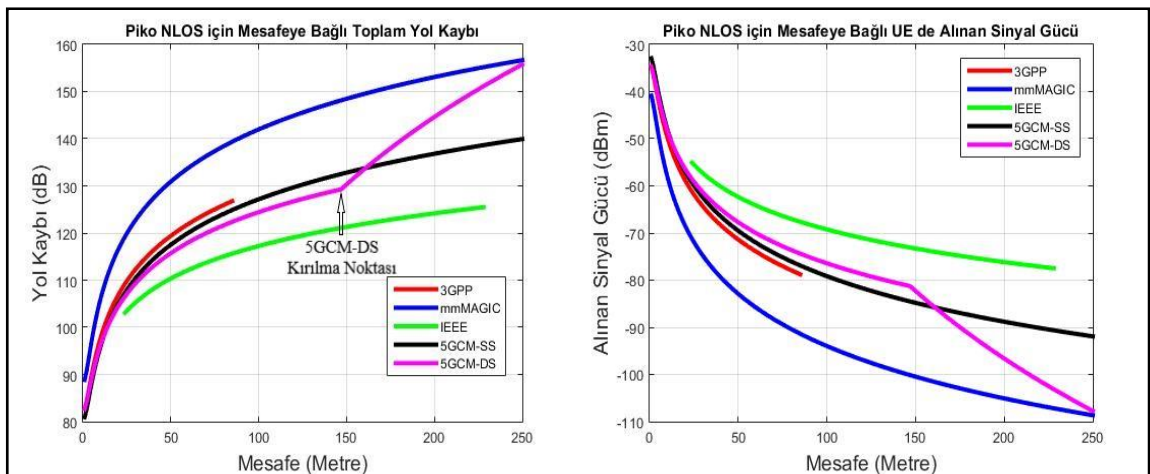


Şekil 47. Piko Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

Şekil 47 ise hesaplanan kapasite değerine göre hücrenin mesafeye bağlı SV ve EV değerini göstermektedir. SV değerinde de UMi LOS'da 100 metrede 3GPP 3D model 8.57 bit/s/Hz/hücre değerini veriyor iken Piko hücrede aynı mesafede 6.8 bit/s/Hz/hücre değerini vermektedir. EV'de ise diğer hücre yapılarına göre verimliliği daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

2.5.3. Piko Hücre için NLOS Durumu İncelemesi

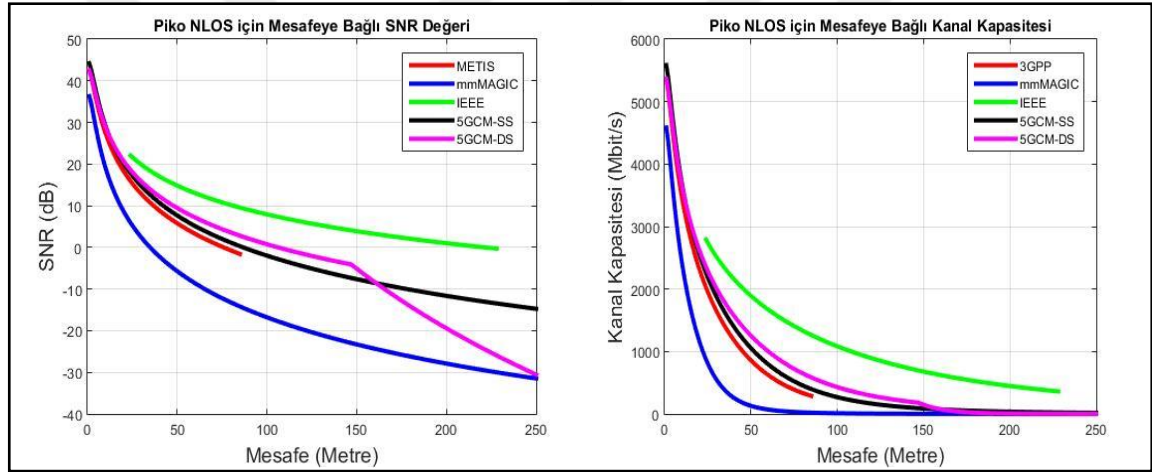
Bu kısımda ise Şekil 44'te gösterilen NLOS görüşteki kullanıcılar (UE_B) ile BS arasındaki durum incelemesi yapılmıştır.



Şekil 48. Piko Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ)



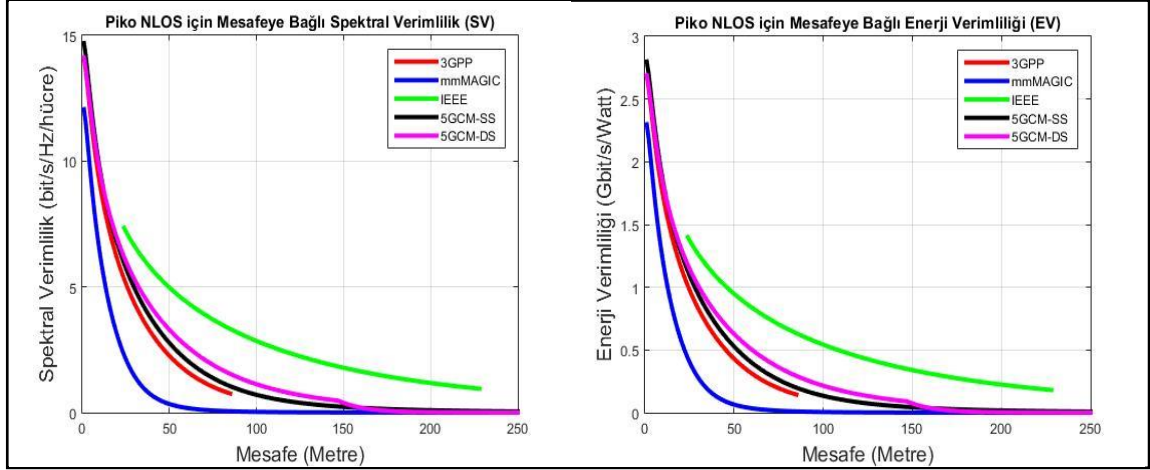
Şekil 48’de gösterilen grafikler NLOS görüşte BS’den gelen DL sinyalin yaşadığı Toplam Yol Kaybı’nı ve UE_B kullanıcılarında Alınan Sinyal Gücü’nü göstermektedir. Şekil 48 incelendiğinde NLOS durumda Tolam Yol Kaybı 40 GHz Frekansından dolayı LOS görüşe göre aynı mesafede oldukça artmaktadır. Hatta mmMAGIC’de 200 m mesafede LOS ve NLOS durumları arasında 50 dB fark olduğu görülmektedir. Ancak bu farkın oluşmasında bu kanal modelin AVM ve Ofis ölçümlerinin ortalaması olarak alınmasından kaynaklandığını düşünmekteyiz [86]. 5GCM’in SS ve DS modellerinde ise BP noktasından itibaren DS modeldeki ani artış dikkat çekmektedir. Alınan sinyal gücünde ise RECSEN değerine mmMAGIC model 58, 5GCM-SS model 178, 5GCM-DS model ise 158 m’de ulaşmaktadır.



Şekil 49. Piko Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 49 ise Piko Hücre senaryosunda Alınan Sinyal Gücü’ne göre oluşan SNR değeri ve bu SNR değeri ile oluşan Kanal Kapasitesi değerlerini göstermektedir. Grafikler incelendiğinde IEEE model 200 m’de 0 dB civarında SNR değeri vermekteyken diğer kanal modeller 180 metreden daha az mesafede -10 dB SNR değerine ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde 200 m’de IEEE model 321 Mbit/s kapasite sunarken diğer modeller yaklaşık sıfır değerini vermektedir. Piko Hücre tipi mesafeye bağlı olarak diğer hücrelerin LOS durumlarına göre daha fazla kapasite sunduğu görülmektedir.





Şekil 50. Piko Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

Şekil 50'deki grafiklerde NLOS durumda mesafeye bağlı oluşan Kanal Kapasitesi'ne göre hesaplanan SV ve EV değerini göstermektedir. Grafikler incelendiğinde UMi Hücre NLOS durumdayken 50 m'de 4.05 bit/s/Hz/hücre SV değerini alırken Piko Hücre'de aynı mesafede 1.8 bit/s/Hz/hücre SV oluşmaktadır. EV'de ise diğer hücre yapılarına göre verimliliğinin daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

2.5.4. Piko Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme

Mevcut senaryo ortamına göre milimetre dalgada çalışan Piko Hücre tipi genel olarak incelendiğinde LOS durumda Pico Hücre'nin 250 metrenin çok üzerinde bile servis hizmeti verebildiği ancak NLOS durumda ise ortalama 150 metreye (d_{2D}) kadar mesafede servis hizmeti verebileceği görülmektedir. Mevcut bant genişliği, kullanılan çalışma frekansı ve belirlediğimiz senaryo ortamına benzer olacak şekilde hem dış hem de iç ortamlarda kullanılması durumunda yüksek servis kalitesi sunacağını düşünmekteyiz. Ancak Piko Hücre'den yayılan sinyallerin kırılma ve yansıma dışında duvar, cam ve tahta gibi çeşitli nesnelere geçmesi gerektiği durumda ise etki mesafesi oldukça düşecektir. Örneğin Şekil 5 ve Şekil 6'daki 40 GHz için oluşan sönmüleme kaynaklı kayıp değerleri incelendiğinde, Servis sinyalinin tek bir duvar veya beton yapıdan geçmesi durumunda sinyal ortalama 30 dB kayba uğradığı görülmektedir. Bu kayıp değeri LOS sinyalin kayıp değerine eklendiğinde, sinyalin servis hizmeti verdiği mesafe yaklaşık 50 metreye kadar düşmektedir. Bu da ikinci bir penetrasyon yaşanması durumunda sinyal kalitesinin oldukça



düŖeceđi hatta yeterli servis hizmeti verememe gibi sorunların ortaya çıkmasına yol açacağını göstermektedir. Bu durumda Piko Hücre yerleşimi yapılırken bu duruma dikkat edilerek yerleşim yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu hücre tipi için yapılan kanal modellerinde ise mmMAGIC modelin LOS durumda diğer modellere göre en düşük yol kaybı değerı vermekten, NLOS durumda ise en yüksek kayıp değerı verdiği görölmektedir. Aynı Ŗekilde IEEE model bunun tam tersi Ŗeklinde sonuç vermekte olup, LOS durumda diğer modellere göre en yüksek yol kaybı değerı verirken, NLOS durumda ise en düşük değerı vermektedir. Diğer iki model ise ortalama değerler vermektedir.

Kullanıldığı yerlerin genel olarak geniş alan ve kalabalık mekanlar olması ve diğer hücre tiplerine göre daha iyi sinyal seviyesi göstermesi nedeniyle hem LOS hem de NLOS durumda milimetre dalga frekanslarında ve yüksek bant genişliğinde kullanılmasının bu hücre tipi için uygun çözümler olacağını düşünmekteyiz. 5G'den önce de 200 m'den az mesafeler için zaten servis hizmeti veren bir hücre iken 5G'de de yaklaşık benzer mesafeler sunması olumlu bir durumdur.

Diğer teknik özelliklerine göre düşünöldüğünde sunduğu servis mesafesi ve yüksek kapasite avantajı nedeniyle 5G'de en çok kurulumu yapılacak hücre tipi olacağını düşünmekteyiz

2.6. İç Mekân – Ofis / Ev Hücre İncelemesi

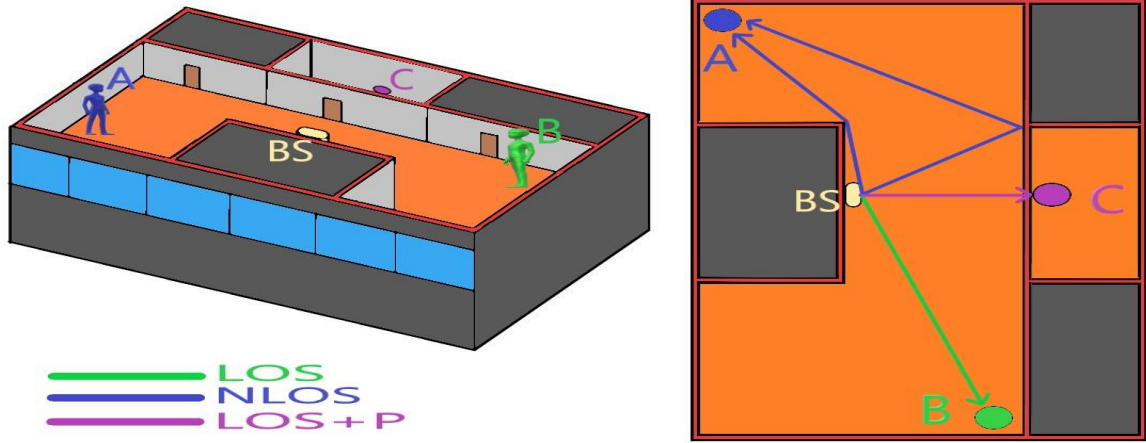
2.6.1. Femto Hücre İçin Senaryo Ortamı

Bu hücre tipi ise genel olarak ofis veya ev gibi az kişinin bulunduğu kapalı alanlara yerleştirilmektedir. Bu mekanlarda yapılan yerleşimlerde hücre tipi diğer tüm hücrelere göre daha az taşıyıcı gücü kullandığı için sinyal sönümlemesinden daha fazla etkilenmektedir.

Genel olarak az sayıda kullanıcıya yüksek veri hızı sunması için konulan Femto Hücre, bu özelliği sağlamak için diğer hücrelere göre daha yüksek frekans ve bant genişliğinde çalışmaktadır. Bu yüksek frekans, düşük verici gücü ve kapalı mekân kurulumu nedeniyle oluşan yüksek sönümlenmenin önüne geçmek için operatörler, Femto Hücre'leri bir ofis veya binanın orta noktası veya LOS görüşün çok olduğu ve maksimum kullanıcıya hizmet verecek Ŗekilde konumlandırmaları gerekmektedir. Bu nedenle çalışmamız için oluşturduğumuz senaryo da bu mimariye uygun olarak oluşturulmuştur.



Şekil 51’te oluşturduğumuz senaryo ortamı temsili olarak böyle bir hücre yerleşimini göstermektedir. Bu senaryoda soldaki resimde bir ofis ortamının temsili yan kesiti, sağdaki resimde ise üstten görünümünü göstermektedir.



Şekil 51. Senaryoda Femto Hücre’nin ofis/ev ortamındaki yan ve üstten gösterimi

Bu yapıda görüldüğü üzere BS, ofisin tam ortasına konularak maksimum kapsam veya hizmet verecek şekilde konumlandırılmıştır. Mavi renkli kullanıcı (UE_A), BS ile doğrudan görüşü olmayıp, sinyalin o kullanıcıya kırılma ve yansıma yoluyla ulaştığı NLOS durumu, yeşil renkli kullanıcı (UE_B) BS ile doğrudan görüşün olduğu LOS durumu mor renkli kullanıcı (UE_C) ise bir ofis içindeki bir odada yığma duvarın hemen bitişiinde bulunarak sinyalin yaşadığı sönümlenmeyi göstermek amacıyla oluşturduğumuz LOS+P durumu göstermektedir.

Bu senaryo ortamına uygun şekilde kanal modellemesi yapan çalışma grupları ise 5GCM, 3GPP ve mmMAGIC’dir. Bu gruplar modellemelerini genel olarak geniş bir frekans aralığı için sunmuştur. Mesafe için ise genel olarak uygulama limiti belirtmeseler de maksimum 100 m bu hücre tipi için genel kamıdır.

Çalışma gruplarının bu hücre tipi için oluşturdukları kanal modeller Tablo 25’te verilmiştir.



Tablo 25. Femto Hücre için kanal modeller

İç Mekân (Office / Ev) Femto Hücre (Çok Yönlü)				
Model	Durum	PL (dB), F _C (GHz), d (Metre)	SF (dB)	Uygulanabilir Aralıklar
5GCM	LOS	CI model (d₀=1 metre) PL=32.4+17.3log ₁₀ (d _{3D}) +20log ₁₀ (F _C)	3.02	6 < F _C <100 GHz 1m<d _{3D} <86 m
	NLOS (SS)	PL=17.3+38.3log ₁₀ (d _{3D}) +24.9log ₁₀ (F _C)	8.03	
	NLOS (DS)	$PL = \begin{cases} 33+17\log_{10}(d_{3D}) +24.9\log_{10}(F_C) & 1 < d_{3D} \leq d_{BP} \\ 33+17\log_{10}(d_{BP}) +24.9\log_{10}(F_C) & d_{3D} > d_{BP} \\ \left(33+17\log_{10}(d_{BP}) +24.9\log_{10}(F_C) +41.7\log_{10}\left(\frac{d_{3D}}{d_{BP}}\right) \right) & \end{cases}$	7.78	6 < F _C <100 GHz d _{BP} =6.9m
3GPP	LOS	5GCM LOS ile aynı	3.0	0.8 < F _C < 100 GHz 1m<d _{3D} <150m
	NLOS	PL=32.4+31.9log ₁₀ (d _{3D}) +20log ₁₀ (F _C)	8.29	0.8 < F _C < 100 GHz 1m<d _{3D} <150m
mmMAGIC	LOS	PL=33.6+13.8log ₁₀ (d _{3D}) +20.3log ₁₀ (F _C)	1.18	6 < F _C <100 GHz
	NLOS	PL _{LOS} =33.6+13.8log ₁₀ (d _{3D}) +20.3log ₁₀ (F _C) PL _{NLOS} =15.2+36.9log ₁₀ (d _{3D}) +26.8log ₁₀ (F _C) PL=maks(PL _{LOS} , PL _{NLOS})	8.03	6 < F _C <100 GHz
IEEE	LOS	CI model (d₀=1 metre) PL=32.4+15log ₁₀ (d _{3D}) +20log ₁₀ (F _C)	4.6	2.9 ≤ F _C ≤ 73 4m ≤ d _{2D} ≤ 49m
	NLOS	CI model (d₀=1 metre) PL=32.4+31log ₁₀ (d _{3D}) +20log ₁₀ (F _C)	8.3	2.9 ≤ F _C ≤ 73 4m ≤ d _{2D} ≤ 67m

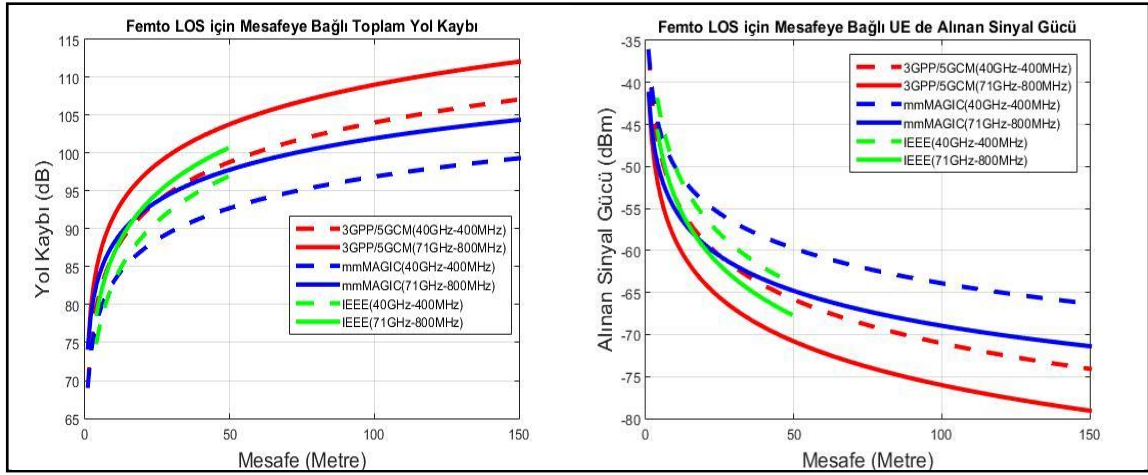
Senaryo için belirlenen frekanslar ise FR2 için tanımlı frekansları içinde 40 GHz değeri seçilmiştir. Bunun haricinde daha sonra yapılacak tanımlamalarla birlikte kullanılacağını düşündüğümüz 71 GHz frekansı da karşılaştırma amacıyla çalışmamıza eklenmiştir. 71 GHz için ise yine daha sonra tanımlanmasını beklediğimiz 800 MHz bant genişliği kullanılmıştır. Bu değerler, yol kayıp modellemelerinin hepsinin uygulama



aralıklarına uymaktadır. Senaryoda belirtilen binada sadece tek kat için geçerli olup katlar arası durumu içermemektedir. Yansıma ve kırılma kazançları da hesaplanmamıştır.

2.6.2. Femto Hücre İçin LOS Durumu İncelemesi

Şekil 51’de oluşturduğumuz senaryo ortamında ilk olarak LOS görüşteki UE_B kullanıcı incelenmiştir. Burada BS ile UE arasındaki mesafe maksimum 150 m ile sınırlandırılmıştır.

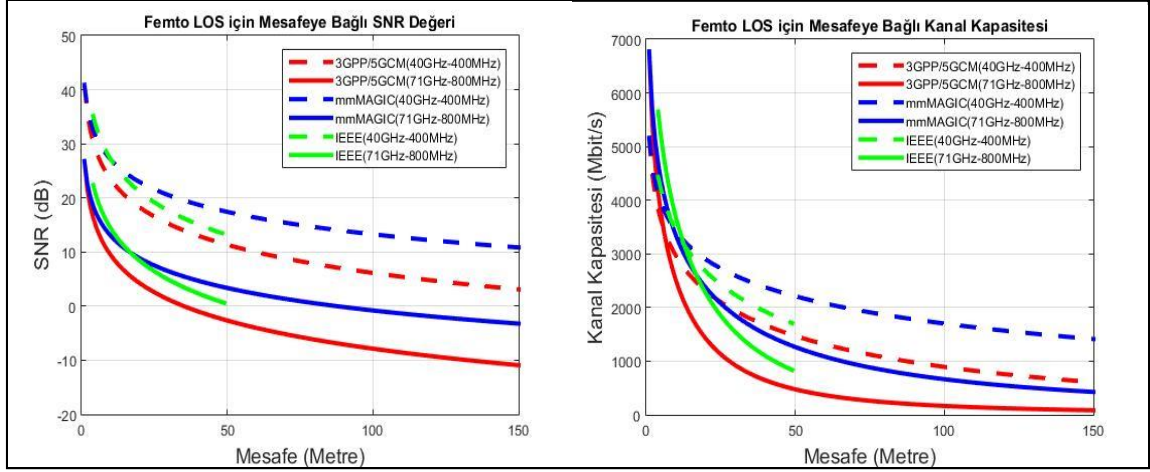


Şekil 52. Femto Hücre LOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)

Şekil 52’deki grafikler LOS durumdaki UE_B’ye gelen DL sinyalin yaşadığı Toplam Yol Kaybı’nı ve UE’de Alınan Sinyal Gücü’nü göstermektedir. Bu hücre için yapılan benzetim ortamında yol kaybı değerleri incelendiğinde 3GPP ve mmMAGIC modelleri arasında ortalama 5 dB fark olduğu görülmektedir. Bu durum UE’de Alınan Sinyal Gücü içinde geçerlidir.

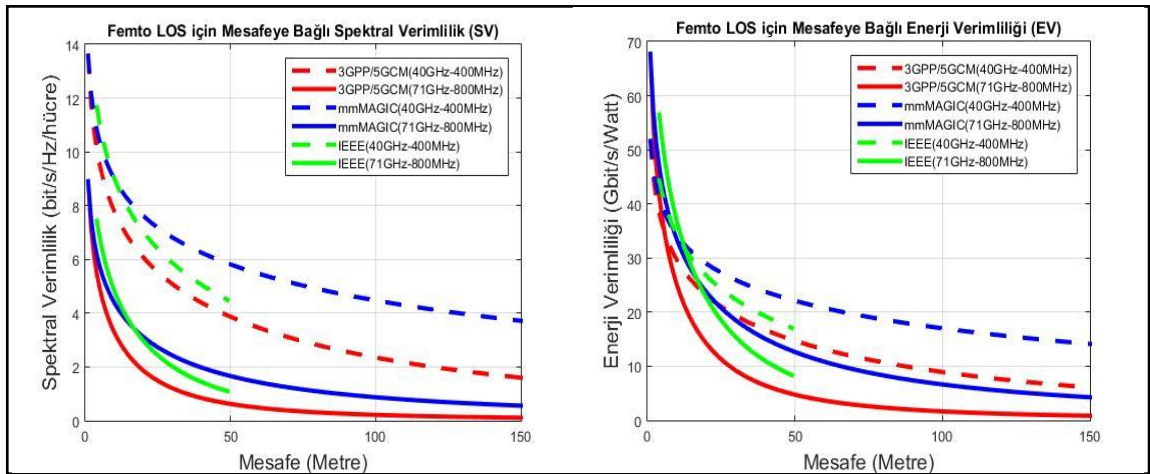
Şekil 52’ye bakıldığında modellerin alınan sinyal gücü değerlerinde ortalama olarak RECSN değerine dahi ulaşamadığı görülmüştür. Bu da bu hücre tipinin LOS görüşte sinyal kalitesinin oldukça iyi olacağını ve 100 m’den fazla alana hizmet verebileceğini göstermektedir. Özellikle alış-veriş merkezi, havalimanı, hastane, geniş meydanlarda ve geniş ofis ortamlarında milimetre dalga bandı kullanılması durumunda DL ve UL de yüksek sinyal seviyesi sunacağı anlaşılmaktadır. Diğer hücre tiplerine göre en düşük yol kaybı verdiği için alıcıda da en yüksek sinyal gücü bu hücre tipinde elde edilmektedir.





Şekil 53. Femto Hücre LOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 53'teki grafikler UE_B 'de alınan sinyal gücüne göre oluşan SNR değerini ve bu SNR değerine göre hesaplanan Kanal Kapasitesi'ni vermektedir. Grafikler incelendiğinde SNR ve Kanal Kapasitesi değerleri modellerin belirttiği sınırlara göre oldukça yüksek çıkmaktadır. Ancak kanal bant genişliğini 400 MHz'den 800 MHz değerine çıkırsa da kanal kapasitesi mevcut verici gücü ve anten kazancında iki katlık artış yaşanmamaktadır. Logaritmik olarak düşünüldüğünde kanal kapasitesini artırabilmek için anten kazancı ve/veya verici gücünün çok daha artırılması gerekmektedir. Tüm bu şartların sağlandığı düşünüldüğünde kısa mesafe için sunduğu yüksek kapasite sayesinde yüksek hız ve çok düşük gecikme gerektiren hastane gibi yerlerde, yerleşim şekline göre kullanıma uygun olabilir.



Şekil 54. Femto Hücre LOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği (sağ)

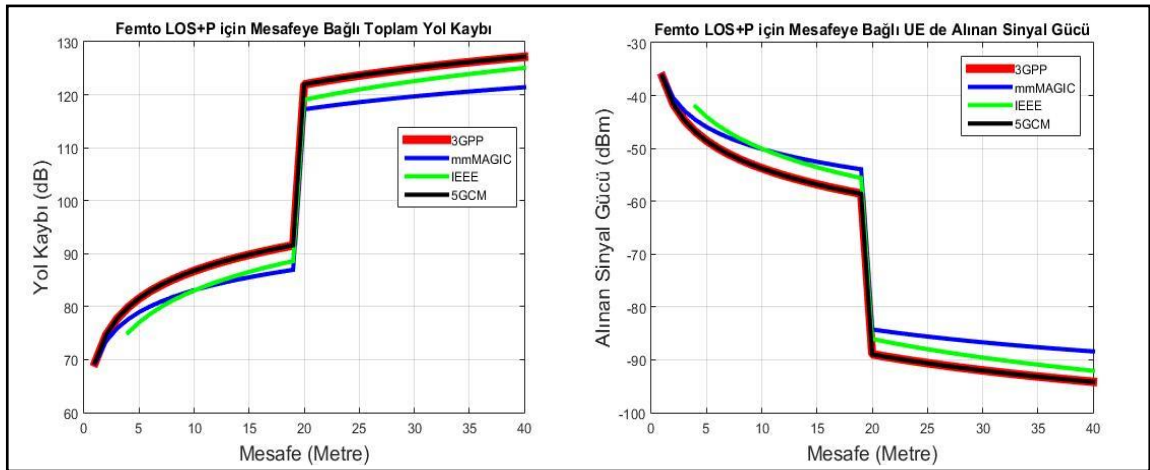


Bu kapasite değerlerine göre elde edilen SV ve EV değerleri Şekil 54'te verilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde LOS görüş için 50 metrede Piko Hücre 3GPP 3D modele göre 8.2 bit/s/Hz/hücre, Femto Hücre'ye göre ise 3.9 bit/s/Hz/hücre SV değeri verdiği görülmektedir. Diğer tüm hücre tipleri ve durumlara göre ise en yüksek EV değeri Femto Hücre LOS durumunda elde edilmektedir.

2.6.3. Femto Hücre İçin LOS+P Durumu İncelemesi

RMA Hücre bulunan LOS+P durumuna benzer şekilde yapılan senaryo ortamı UE_C 'nin durumunu incelemektedir. Bu hücre tipi RMA'dan farklı olarak sadece duvar kaybı içermektedir ve duvar kalınlığı ise RMA Hücre ile aynı olup 20 cm kalınlığında olduğu varsayılmıştır. Çalışmada kullanılan frekans ise 40 GHz'dir

Ofis ve benzeri ortamda UE_C kullanıcısının bir oda içerisinde duvarın arkasında olduğu varsayılan senaryoda, LOS görüşte BS ile duvar arasında 20 m olduğu, LOS görüşte sinyal 20 m gittikten sonra duvarla karşılaşır duvardan geçtikten hemen sonra UE_C kullanıcıya ulaştığı varsayılmıştır. Bu aşamadan sonra ise sinyalin 20 m daha gittiği ve yol boyunca herhangi bir nesne ile karşılaşmadığı düşünülmüştür. Senaryoda ayrıca yansıma ve kırılmadan kaynaklı kazançlar da grafiklere dahil edilmemiştir.

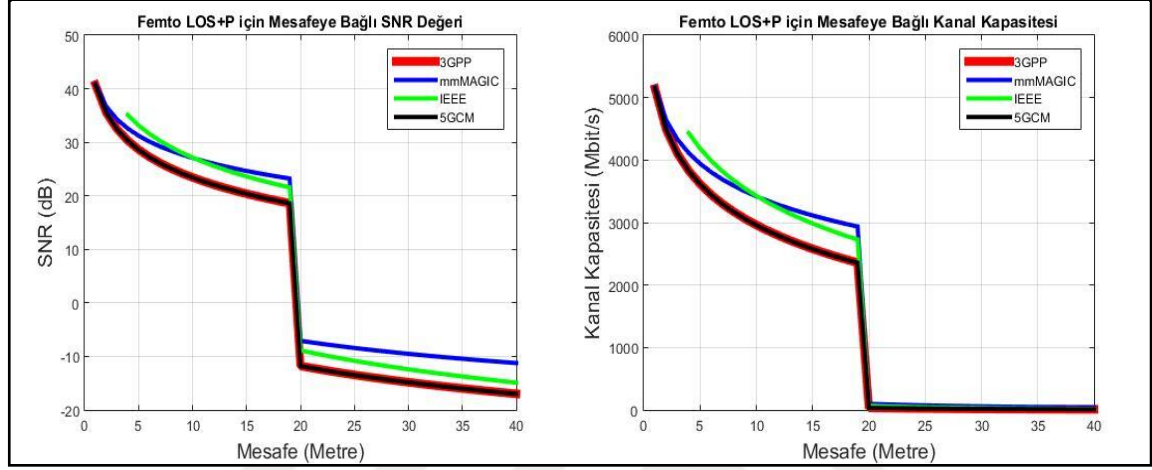


Şekil 55. Femto Hücre LOS+P için yol kaybı (sol), UE'de alınan sinyal gücü (sağ)

Şekil 55'teki grafik, DL sinyalin bir duvar ile karşılaşınca yaşadığı penetrasyonun Yol Kaybı'nı ve UE_C 'de Alınan Sinyal Gücü'nü ne derece etkilediğini gösteren grafikdir. Bu duruma göre yol kaybı grafiği incelendiğinde 20 m'den itibaren Toplam Yol Kaybı



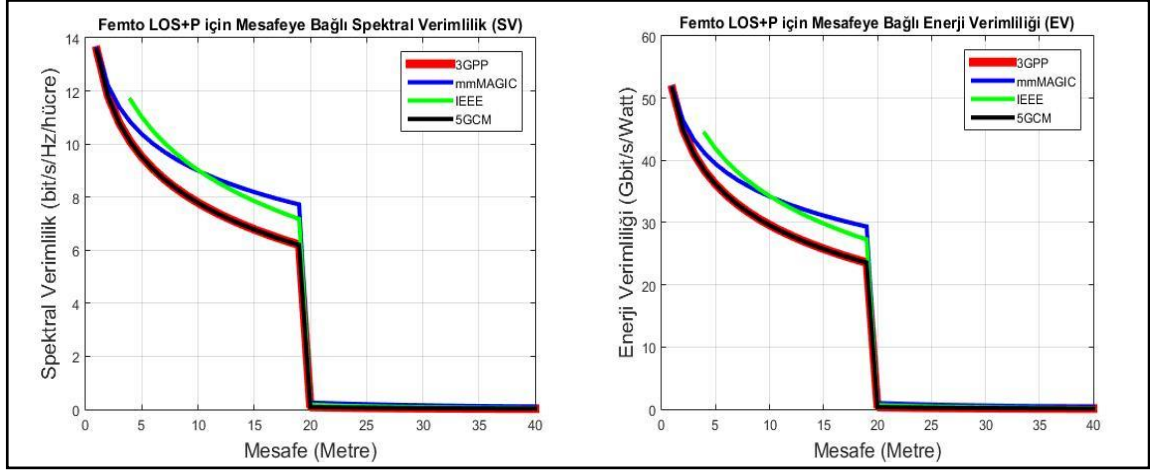
değerindeki ani artış dikkat çekmektedir. Bu ani kayıp nedeniyle UE’de Alınan Sinyal Gücü de yine ani bir şekilde düşmektedir. Senaryo gereği belirlenen 20 m’lik mesafe sinyalin standart bir 20 cm’lik duvarla karşılaşmadan gidebileceği ortalama maksimum mesafedir. 20 m’den itibaren sinyal RECSN’den bile küçük değer aldığından bağlantı sorunu oluşturacaktır.



Şekil 56. Femto Hücre LOS+P için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 55’te elde edilen sinyal gücünde oluşan SNR ve Kanal Kapasitesi değerleri de Şekil 56’daki grafiklerde gösterilmiştir. Grafiklerde SNR değeri ise yine 20 m’den itibaren kayıp değerinin çok düşmesi nedeniyle o da -10 dB değerine kadar düşmektedir. Bu nedenle oluşan kapasite değeri de aynı şekilde azalmaktadır. Bu durum penetrasyon durumunda milimetre dalgadaki sinyal kalitesinin ne kadar zayıflayabildiğini göstermektedir.





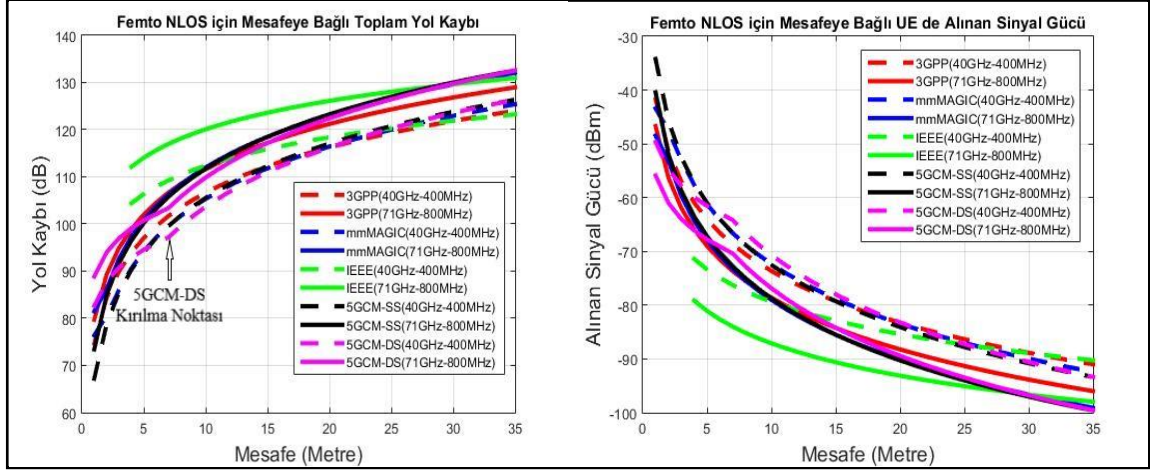
Şekil 57. Femto Hücre LOS+P için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği

Şekil 57 ise elde edilen kapasiteye göre SV ve EV değerlerindeki değişimleri göstermektedir. Grafikler incelendiğinde 20 m’de ortalama 7 bit/s/Hz SV değeri ve 27 Gbit/s/Watt EV değeri hesaplanırken bu 40 GHz frekans ile oluşan penetrasyon ile DL sinyalin SV ve EV değeri penetrasyona maruz kalınca neredeyse sıfıra kadar indiği görülmektedir. Çalışmada kanal modellerin ise LOS durum için benzer sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

2.6.4. Femto Hücre için NLOS Durumu İncelemesi

Şekil 51’deki senaryo ortamında NLOS görüşteki mavi renkli kullanıcı (UE_A) için yapılan incelemeyi içermektedir. Bu incelemede çalışma frekansı olarak 40 ve 71 GHz değerleri, BW’de ise 400 ve 800 MHz değerleri karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Şekil 56 ve Şekil 57’deki grafiklerde 35 m’den sonra oluşan Kanal Kapasitesi, SV ve EV değerlerinin çok düşüp sıfıra çok yaklaşması nedeniyle bu mesafeden sonrası gösterilmemiştir.

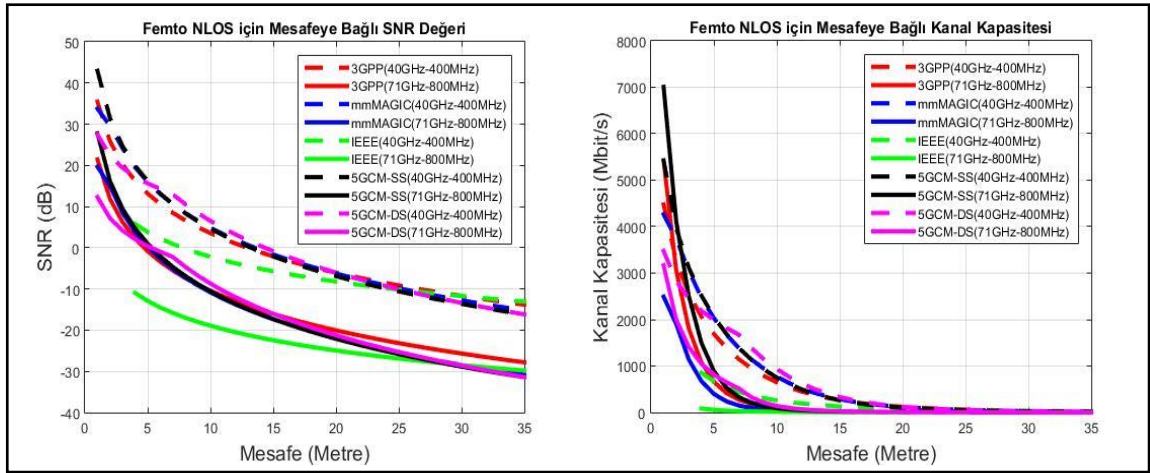




Şekil 58. Femto Hücre NLOS için yol kaybı (sol), UE’de alınan sinyal gücü (sağ)

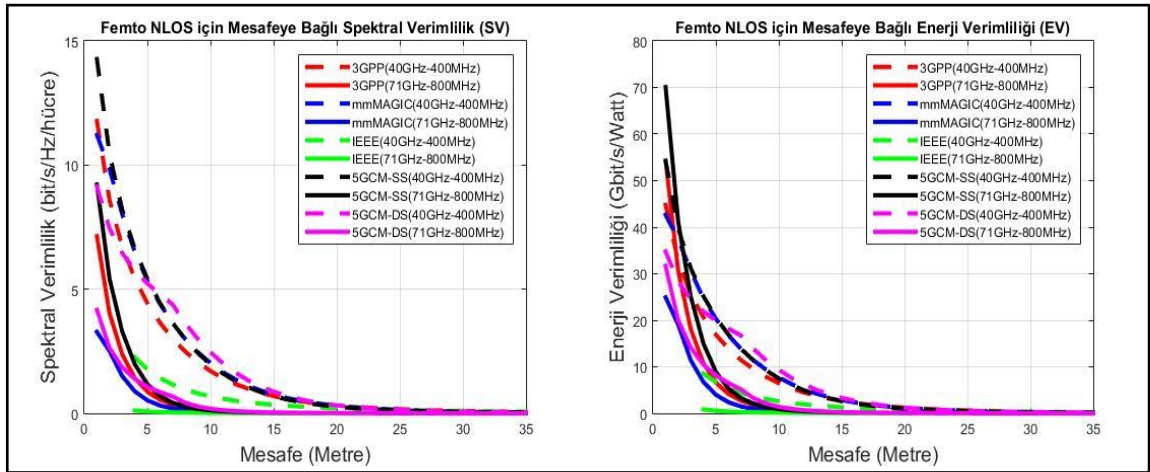
Şekil 58’deki grafikler NLOS durumdaki UE_A kullanıcılarına gelen DL sinyalin Toplam Yol Kaybını ve UE’de Alınan Sinyal Gücü’nü göstermektedir. Grafikler incelendiğinde LOS durumdan farklı olarak 5GCM’nin hem DS hem de SS durumlarını içerdiği görülmektedir. BP noktasından itibaren yol kaybı değeri 5GCM-SS modele göre sadece bir miktar artış göstermektedir. Alınan sinyal gücünde ise yol kaybı grafiklerine baktığımızda NLOS durumdaki A kullanıcısının LOS+P durumunda bulunan C kullanıcısı ile benzer mesafe değerleri ve sinyal seviyeleri aldığı görülmektedir. Ancak senaryoda C kullanıcısı kırılma ve yansıma kazançlarını içermezken, A kullanıcısı NLOS durumdan dolayı bunları içermektedir. Bu nedenle gerçek dünya koşullarında C kullanıcısının senaryomuzda elde edilen değerlere göre daha iyi servis kalitesi alması muhtemeldir. Grafikte bulunan modellerde de farklı frekans ve BW kullanılmasına rağmen NLOS durumda Yol Kaybı için çok fazla farklılığın oluşmadığı görülmüştür.





Şekil 59. Femto Hücre NLOS için SNR değeri (sol), kanal kapasitesi (sağ)

Şekil 59'daki grafikler ise A kullanıcısı için SNR ve Kanal Kapasitesi değerlerini vermektedir. Grafikler incelendiğinde 40 GHz ve 71 GHz arasındaki farkın daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durumun Tablo 16'te de gösterildiği üzere frekans arttıkça NF ve IM değerlerinin de artmasından kaynaklandığı için olduğu açıktır. SNR ve Kanal Kapasitesi değerleri incelendiğinde ise IEEE modelin 71 GHz'de en yüksek SNR değerinin -10 dB'nin altında olması dikkat çekmektedir. Aynı frekans grubundaki kanal modeller ise genel olarak benzer sonuçlar vermektedir.



Şekil 60. Femto Hücre NLOS için spektral verimlilik (sol), enerji verimliliği

Şekil 60'daki grafik ise yine NLOS görüşte bulunan A kullanıcısı için oluşan SV ve EV değerlerini göstermektedir. Grafikler incelendiğinde aynı verici gücü ve anten kazancı



kullanılması durumunda düşük frekans ve BW değerine sahip olan hücrelerde daha yüksek SV değeri elde edildiği görülmektedir. EV’de ise çok kısa mesafelerde (5 metreden az) 40 GHz ve 71 GHz frekansları arasında çok fazla fark oluşmadığı ancak mesafe arttıkça yine düşük frekanslı modellerin daha yüksek EV değeri verdiği görülmüştür.

2.6.5. Femto Hücre İncelemesi İçin Sonuç ve Değerlendirme

Hazırladığımız senaryo ortamı ve parametre değerlerine göre 4 farklı çalışma grubunun 5 farklı kanal modeli kullanılmıştır. Modeller genel olarak benzer sonuçlar vermekte olup, bu modellere göre genel bir yaklaşımda bulunmak gerekirse, bir bölgeye Femto Hücre tipi kurulumları yapılması durumunda bu hücre tipi için LOS durumda ortalama olarak maksimum 100 metre, NLOS durumda ise ortalama olarak maksimum 20 metre için servis verebileceği görülmüştür. Yansıma kazançlarının olmadığı ve yoğun bir nesnenin geçerek sinyalin kullanıcıya ulaştığı LOS+P durumunda ise nesnenin penetrasyon etkisi servis kalitesini belirleyen en önemli etken olacaktır. Böyle durumdaki bir kullanıcının ani sinyal kaybı ve kapasite düşümü gibi sorunlar yaşaması muhtemeldir. Çünkü penetrasyon kayıpları minimum seçilmesine rağmen bu mesafelere kadar servis hizmeti verebileceği görülmüştür. Ancak kısa mesafede ve az sayıda kişiye yüksek kapasite ve düşük gecikme gerektiren sistemlere hizmet vermesi için kullanılabilir bir hücre yapısıdır. Bu yüzden bu avantajlardan faydalanmak için en çok kurulacak hücre tipi olacaktır. 71 GHz gibi daha yüksek frekansların kullanılması durumunda, kalın veya yoğun duvar gibi nesnelere arkasında kalan kullanıcıların servis kalitesinde çok düşüşler görülebilir. Kanal kapasitesinde ise çok kısa mesafede ve daha güçlü verici antenler kullanılması durumunda 10 Gbit/s üzerine çıkabilecektir. Bu haliyle diğer hücre tiplerine göre kısa mesafede en yüksek veri hızı sunacağı görülmektedir.

Kanal modellerinde ise IEEE modelin 71 GHz gibi yüksek frekanslarda doğru sonuçlar verdiğini düşünmemekteyiz. Zira çok kısa mesafede bile yüksek yol kaybı değeri vermektedir. Diğer modeller ise çalışma frekansına göre genel olarak benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.



3. SONUÇLAR

Bu çalışma genel olarak incelendiğinde nesnelere kaynaklı penetrasyon kayıplarının 5G’de hücre yapılarından sağlanan servis hizmeti için kritik önem arz ettiği göstermektedir. Bu kayıpların hepsi, üstesinden gelinecek yapıda olmayıp kapsama alanına olumsuz etki yaratacakları açıktır. Malzeme penetrasyon kaybını azaltmak için verici gücü veya anten kazancını artırma gibi yöntemler denense bile bu kazançlar, sönümlenme etkisinin daha fazla olduğu durumların üstesinden gelebilecek artışlar olmayacağı düşünmekteyiz. Çünkü sadece O2I kaybında bile yoğun yapıların olduğu bölgelerde YKM uygulandığı zaman milimetre dalgada minimum 45 dB kayıp oluşacağını gösteriyor. Bu ortamda etrafta sadece bina gibi yapılar değil ağaç gibi yoğun yeşillikler barındıran nesnelere de olacaktır. Bu durumda kayıp miktarı çok daha fazla olacaktır ki bu kayıp değeri üstesinden gelinecek bir değer olmayıp böyle bir durum servis kalitesinde 4.5G’ye göre çok daha fazla sorun ve bir bölgede çok daha fazla kör nokta oluşmasına neden olacaktır. Her ne kadar IMT-2020 çalışma grubu ITU-R M.2083-0’de 5G’nin daha geniş kapsama alanına hizmet vereceği yönünde beyanı bulursa da bu beyan sadece LOS durum için geçerli olabileceği, milimetre dalga frekanslarında NLOS durumda bulunan kullanıcılar için kapsama alanının artacağı yönündeki beyanın gerçeğe uyuşmadığı tekrar görülmüştür.

Dış ortamda bulunan bir hücre ile milimetre dalgada servis hizmeti alan bir UE, hareket halinde iken ve kalın duvarlardan oluşan bir bina içine girdiğinde veya yoğun bir nesnenin kullanıcı ve servis sinyali arasına girdiği durumlarda servis sinyalinin ve kapasitenin çok ani düşmesi gibi sorunlar oluşabileceği görülmüştür. Bu durum hareket halinde yüksek kapasite ihtiyacı isteyen kullanıcıların sürekli sorun yaşayacağını ve bu durumun servis kalitesini düşüreceğini göstermektedir.

UE’lerde bulunan anten sayıları UE’lerin daha küçük fiziksel boyutları nedeniyle hücre yapılarında kurulacak anten sayıları kadar artmayacaktır. Bu durum UE’deki anten dizi kazancının daha büyük fiziksel boyuta sahip olan hücredeki dizi kazancı kadar artmayacağını göstermektedir. Bu da 5G’de DL ve UL arasındaki kapasite ve kapsama alanı arasındaki farkın 4.5G’ye oranla daha fazla olacağını göstermektedir.

Milimetre dalga frekanslarında çalışan hücre yapıları kapsama alanını artırabilmek için anten kazançlarını ve sayısını artırabileceği gibi verici güçlerini de artırabilir ancak bu



durum hücre tipinin Enerji Verimliliği'ni düşüreceği gibi daha fazla enerji tüketmesine de neden olacaktır. Bu durumun 5G'de genel olarak maliyet artışına sebep olabileceği anlaşılmaktadır.

Kapalı mekanlarda UL bağlantıda yüksek hız sağlanabilmesi veya BS ile bağlantının korunabilmesi için UE cihazlarının da 4.5G'ye oranla daha fazla güç tüketeceği anlaşılmıştır. Bu durum batarya verimliliğini olumsuz etkileyeceğini ve UE enerji tüketiminin daha fazla olacağını göstermektedir.

Bazı çalışma gruplarının aynı hücre ve benzer ortam senaryolarındaki kanal modelleri arasında çok farklılıklar olduğu da gözlemlenmiştir.

Tek hücre ve tek kanal ile yapılan bu çalışmanın hücre tiplerinin davranışlarını incelemek ve anlamak adına önemli olduğunu ve de daha sonra yapılacak olan çalışmalara da öncü olacağını düşünmekteyiz.



4. ÖNERİLER

5G hücre yapılarının milimetre dalgada yüksek sönümlenme etkisini azaltmak için Piko ve Femto gibi hücrelerde LOS görüş olasılığını artıracak şekilde yerleşim yapılmalı ve bu hücrelerin anten ışıma yönlerinde mümkün olduğunca duvar gibi yoğun nesnelere olmamalıdır.

RMa, UMa ve UMi gibi hücrelerde ise 4.5G'deki hücre yapılarına göre daha yüksekte olacak şekilde anten yerleşimleri yapılması LOS görüşü artıracağından penetrasyon kaybını azaltmak için hücrenin daha fazla güç harcamasının önüne geçecektir. Bu durum hücrenin servis kalitesini ve verimini oldukça artıracaktır. Bu çalışmanın girişimli kanal ve çok sayıda anten için incelemesi yapılabilir.

Bazı kanal modeller arasındaki farklılıklar modellerin oluşturulduğu senaryo ortamlarında yaşanan farklılıklardan ve modelleme de kullanılan yöntemlerden kaynaklı olabileceği gibi modellerdeki sorunlardan kaynaklı da olabilir. Bu yüzden modeller arasında bu kadar farkın hangi sebeplerden olabileceği konusu incelenebilecek bir konudur.

Her ülkede ve bölgede kullanılan yapı malzemeleri coğrafik koşullara göre değişiklik gösterebilmektedir. Milimetre dalga frekanslarının bölgeye göre oluşturabileceği penetrasyon kayıplarını daha iyi anlayabilmek için bölgelere göre kullanılan her yapı malzemesinin milimetre dalgadaki kayıplarının ölçüm çalışması yapılabilir.



5. KAYNAKÇA

1. Björnson, E., Hoydis, J. ve Sanguinetti, L., Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency, Foundations and Trends in Signal Processing, 11,3-4 (2017), 154-655.
2. Blecher, F.H., Advanced mobile phone service, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 29,2 (1980), 238-244.
3. Geylani, M., Çıbuk, M., Çınar, H. ve Ağgün, F., Geçmişten Günümüze Hücreli Haberleşme Teknolojilerinin Gelişimi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 18,54 (2016), 606-623.
4. Alkan, M., Genç, Ö. ve Tekedere, H., Bilgi ve iletişim teknolojilerinin eğitimde kullanımı için alt yapı ihtiyaçları ve yeni iletişim teknolojileri, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendislikleri Eğitimi, 1,(2006), 177-181.
5. Huurdeman, A.A., The worldwide history of telecommunications, John Wiley & Sons, 2003.
6. Rhee, M.Y., Mobile communication systems and security, John Wiley & Sons, 2009.
7. Harte, L., Smith, A. ve Jacobs, C., IS-136 TDMA Technology, Economics and Services Artech House, (1998).
8. Terasawa, D. ve Tiedemann, E., CDMAOne (R)(IS-95) technology overview and evolution, IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (Cat No. 99CH37001), 1999, 213-216.
9. Halonen, T., Romero, J. ve Melero, J., GSM, GPRS and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS, John Wiley & Sons, 2004.
10. Yang, J., Tin, N. ve Khandani, A.K., Adaptive modulation and coding in 3G wireless systems, Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference 2002, 1, 544-548.
11. Hjelm, B., Development of standards for third-generation mobile systems-rough road to IMT-2000 RTT standard, 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No. 00TH8525), 2000, 1, 334-337.
12. Osseiran, A., Monserrat, J.F. ve Mohr, W., Mobile and wireless communications for IMT-advanced and beyond, John Wiley & Sons, 2011.



13. Zheng, P., Peterson, L.L., Davie, B.S. ve Farrel, A., *Wireless networking complete*, Morgan Kaufmann, 2009.
14. Schulz, D., Bowne, 1xEV-DO Revision A + B, White Paper, 1MA213_0e, (2013).
15. Ma, L. ve Jia, D., *The competition and cooperation of WiMAX, WLAN and 3G*, (2005).
16. Varshney, U., *4G wireless networks*, IT Professional, 14,5 (2012), 34-39.
17. Kanchi, S., Sandilya, S., Bhosale, D., Pitkar, A. ve Gondhalekar, M., *Overview of LTE-A technology*, IEEE global high tech congress on electronics, 2013, 195-200.
18. Adnan, N.H.M., Rafiqul, I.M. ve Alam, A.Z., *Massive MIMO for fifth generation (5G): Opportunities and challenges*, 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2016, 47-52.
19. Series, M., *IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, Recommendation ITU, 2083, (2015).
20. Series, M., *Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz*, Recommendation ITU, 2376-0, (2015).
21. Andrews, J.G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S.V., Lozano, A., Soong, A.C. ve Zhang, J.C., *What will 5G be?*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32,6 (2014), 1065-1082.
22. Henri, Y., *ITU World Radiocommunication Conference (WRC-15) Allocates Spectrum for Future Innovation*, Air & Space L., 41, (2016), 119.
23. Frieden, R., *Win, Lose and Draw: Outcomes from the 2019 World Radio Conference*, Available at SSRN 3661880, (2020).
24. 3GPP, TR 38.104 V16.5.0, NR; Base Station (BS) radio transmission and reception, (2020).
25. 3GPP, TR 38.807 V16, Study on NR beyond 52.6 GHz, (2019).
26. 3GPP, TR 38.211 V16.3.0, NR; Physical channels and modulation, (2020).
27. Benjebbour, A., Saito, K., Li, A., Kishiyama, Y. ve Nakamura, T., *Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials*, 2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), 2015, 1-6.
28. Jones, D., *T-Mobile Says Its 600 MHz LTE Sites Will Be 5G-Ready*, Light Reading, (2017).



29. <https://www.turktelekom.com.tr/hakkimizda/duyurular/Documents/tt-5g-final-version-03082018.pdf> Türk Telekom 5G final versiyon, 17 Ekim 2019.
30. Rappaport, T.S., Xing, Y., MacCartney, G.R., Molisch, A.F., Mellios, E. ve Zhang, J., Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—With a focus on propagation models, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65,12 (2017), 6213-6230.
31. Sector, I.R., Recommendation ITU-R P. 676–12, Attenuation by Atmospheric Gases, International Telecommunications Union, (2019).
32. Vargas, C.E.O., da Silva Mello, L. ve Rodriguez, R.C., Measurements of construction materials penetration losses at frequencies from 26.5 GHz to 40 GHz, IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), 2017, 1-4.
33. Qingling, Z. ve Li, J., Rain attenuation in millimeter wave ranges, 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, 2006, 1-4.
34. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/maksimum-yagislar.aspx>, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Maksimum yağışlar, 17 Ekim 2019.
35. 3GPP, TR 38.901 V16.1.0, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, (2019).
36. Samsung, RF Propagation at 28 GHz, (2017).
37. Hamzeh, B., Pavlich, B. ve Viorel, D., Can a Fixed Wireless Last 100m Connection Really Compete with a Wired Connection and Will 5G Really Enable this Opportunity?, EXPO, 2017, Kazakistan.
38. <https://electronicsystematic.blogspot.com/2016/10/bts-base-transreceiver-station-baz.html> Baz istasyonu alıcı-vericisi (antenler), 17 Ekim 2019.
39. Alakija, C. ve Stapleton, S., A mobile base station phased array antenna, IEEE International Conference on Selected Topics in Wireless Communications, 1992, 118-121.
40. Liu, D., Hong, W., Rappaport, T.S., Luxey, C. ve Hong, W., What will 5G antennas and propagation be?, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65,12 (2017), 6205-6212.
41. Johnson, D., The 5G Dilemma: More Base Stations More Antennas—Less Energy, IEEE Spec., (2018).
42. Lähdekorpi, P., Hronec, M., Jolma, P. ve Moilanen, J., Energy efficiency of 5G mobile networks with base station sleep modes, 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 2017, 163-168.



43. Debaille, B., Desset, C. ve Louagie, F., A flexible and future-proof power model for cellular base stations, IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015, 1-7.
44. Haider, M., Yousaf, J. ve Qureshi, N., Performance Evaluation of Automatic Frequency Planning Using Automatic Frequency Optimization System Tool, 12th International Conference on Frontiers of Information Technology, 2014, 1-6.
45. Aksoy, S., Özkaraca, O., Biroğul, S. ve Çetin, G., Baz İstasyonlarında Hücre Planlama Kavramları ve Örnek Bir Frekans Planı, Akademik Bilişim Konferansı, Aydın, 2016.
46. Imam, S. ve El-Mahdy, A., Selective interference alignment in 5G networks, Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), 2016, 147-151.
47. Rebato, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., Boccardi, F. ve Zorzi, M., Understanding noise and interference regimes in 5G millimeter-wave cellular networks, European Wireless; 22th European Wireless Conference, 2016, 1-5.
48. Barboutov, K., Furuskär, A., Inam, R., Lindberg, P., Öhman, K., Sachs, J., Sveningsson, R., Torsner, J. ve Wallstedt, K., Ericsson mobility report, Niklas Heuveldop, Sweden, (2017).
49. Forecast, G., Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017–2022, Update, (2019).
50. Staff, Q., Rising to meet the 1000x mobile data challenge, QUALCOMM Incorporated, (2012).
51. 3GPP, TR 38.913 V15.0.0, Study on scenarios and requirements for next generation access technologies, (2018).
52. 3GPP, TR 38.912 V16.0.0, Study on New Radio (NR) access technology, (2020).
53. Shannon, C.E., A mathematical theory of communication, ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review, 5,1 (2001), 3-55.
54. 3GPP, TR 38.828 V16.1.0, Cross Link Interference (CLI) handling and Remote Interference Management (RIM) for NR, (2019).
55. 3GPP, TR 38.820 V16.0.0, NR; 7 - 24 GHz frequency range (2020).
56. 3GPP, TR 36.912 V15.0.0, Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced), (2018).
57. Lister, D., An operator's view on green radio, Keynote Speech, GreenComm, (2009).



58. Kilper, D.C., Atkinson, G., Korotky, S.K., Goyal, S., Vetter, P., Suvakovic, D. ve Blume, O., Power trends in communication networks, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 17,2 (2010), 275-284.
59. 3GPP, TR 32.972 V16.1.0, Telecommunication management; Study on system and functional aspects of energy efficiency in 5G networks, (2019).
60. Li, G.Y., Xu, Z., Xiong, C., Yang, C., Zhang, S., Chen, Y. ve Xu, S., Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues, IEEE Wireless Communications, 18,6 (2011), 28-35.
61. Çil, A. ve Kahveci, S., Some Challenges Foreseen in 5G Technology, 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2018, 1-4.
62. Bayram, O., Elektromanyetik ışınım ve insan sağlığına etkileri, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
63. 3GPP, TR 38.900 V15.0.0, Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz, (2018).
64. Nurmela, V., Karttunen, A., Roivainen, A., Raschkowski, L., Hovinen, V., EB, J.Y., Omaki, N., Kusume, K., Hekkala, A. ve Weiler, R., Deliverable D1.4 METIS channel models, Proc. Mobile Wireless Commun. Enablers Inf. Soc.(METIS), 2015, 1.
65. Rodriguez, J., Fundamentals of 5G mobile networks, John Wiley & Sons, 2015.
66. Çil, A. ve Kahveci, S., 5G Teknolojisindeki Hücre Yapılarının Yol Kayıpları, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, 2018, Bursa, 438-442.
67. Fujitsu, High-Capacity Indoor Wireless Solutions: Picocell or Femtocell?, (2020).
68. Bouras, C. ve Diles, G., Resource management in 5G femtocell networks, 10th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2015, 353-358.
69. Jundhare, M.D. ve Kulkarni, A., An overview and current development of femtocells in 5G technology, IEEE International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT), 2016, 204-209.
70. 3GPP, TS 38.141-1 V16.2.0, NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing, (2019).
71. 3GPP, TS 38.101-1 V16.5.0, NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone, (2020).
72. 3GPP, TR 21.915 V15.0.0, Summary of Rel-15 Work Items, (2019).



73. Okumura, Y., Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service, Rev. Electr. Commun. Lab., 16 (1968), 825-873.
74. Correia, L.M., A view of the COST 231-Bertoni-Ikegami model, 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009, 1681-1685.
75. Sun, S., Rappaport, T.S., Rangan, S., Thomas, T.A., Ghosh, A., Kovacs, I.Z., Rodriguez, I., Koymen, O., Partyka, A. ve Jarvelainen, J., Propagation path loss models for 5G urban micro-and macro-cellular scenarios, IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016, 1-6.
76. Maccartney, G.R., Rappaport, T.S., Sun, S. ve Deng, S., Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks, IEEE Access, 3 (2015), 2388-2424.
77. Sun, S., MacCartney, G.R. ve Rappaport, T.S., Millimeter-wave distance-dependent large-scale propagation measurements and path loss models for outdoor and indoor 5G systems, 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2016, 1-5.
78. Sun, S., Rappaport, T.S., Thomas, T.A., Ghosh, A., Nguyen, H.C., Kovács, I.Z., Rodriguez, I., Koymen, O. ve Partyka, A., Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5G wireless communications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65,5 (2016), 2843-2860.
79. Rappaport, T.S., MacCartney, G.R., Samimi, M.K. ve Sun, S., Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design, IEEE Transactions on Communications, 63,9 (2015), 3029-3056.
80. Ghosh, A., 5G channel model for bands up to 100 GHz, 5GCM White Paper, (2015).
81. Peter, M., Measurement results and final mmMAGIC channel models, Deliverable D2.2, (2017), 12.
82. Series, P., Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, Recommendation ITU, 1411-10, (2019).
83. MacCartney, G.R. ve Rappaport, T.S., Study on 3GPP rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications, 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2017, 1-7.
84. 3GPP, TS 38.817-02 V15.9.0, General Aspects for Base Station (BS) Radio Frequency (RF) for NR, (2020).



85. Behta, K., Rybakowski, M., Hsieh, F. ve Chizhik, D., Modeling of radio link budget with beamforming antennas for evaluation of 5G systems, IEEE 5G World Forum (5GWF), 2018, 427-432.
86. Xiao, M., Mumtaz, S., Huang, Y., Dai, L., Li, Y., Matthaiou, M., Karagiannidis, G.K., Björnson, E., Yang, K. ve Chih-Lin, I., Millimeter wave communications for future mobile networks, IEEE Journal on selected areas in communications, 35,9 (2017),1909-1935.



ÖZGEÇMİŞ

2010 yılında Erzurum (Anadolu) Lisesi'nden mezun oldu. 2011-2012 yılları arasında Atatürk Üniversitesi'nde İngilizce Hazırlık okudu. 2016 yılında Atatürk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm'ünden mezun oldu. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2019 Mayıs ayından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Ulusal ve Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

1. Çil, A. ve Kahveci, S., Some Challenges Foreseen in 5G Technology, 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2018, İzmir, 1-4
2. Çil, A. ve Kahveci, S., 5G Teknolojisindeki Hücre Yapılarının Yol Kayıpları, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, 2018, Bursa, 438-442.

