



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**MİLİMETRE DALGA HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN
MIMO KANAL KAPASİTESİ ANALİZLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Furkan KOLA

Danışman
Doç. Dr. Çetin KURNAZ

SAMSUN
2022

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**MİLİMETRE DALGA HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN
MIMO KANAL KAPASİTESİ ANALİZLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Furkan KOLA

Danışman

Doç. Dr. Çetin KURNAZ

SAMSUN
2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Furkan KOLA tarafından, Doç. Dr. Çetin KURNAZ danışmanlığında hazırlanan “MİLİMETRE DALGA HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN MIMO KANAL KAPASİTESİ ANALİZLERİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 29.8.2022 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM		<input checked="" type="checkbox"/>
	Samsun Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı		Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Çetin KURNAZ		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı		Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Serap KARAGÖL		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı		Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır

İmza

02 /09/ 2022

Ahmet Furkan KOLA

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : MİLİMETRE DALGA HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN
MIMO KANAL KAPASİTESİ ANALİZLERİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 02/09/2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 6

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

02 /09/ 2022

Doç. Dr. Çetin KURNAZ

ÖZET

MİLİMETRE DALGA HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN MIMO KANAL KAPASİTESİ ANALİZLERİ

Ahmet Furkan KOLA
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Haziran/2022
Danışman: Doç. Dr. Çetin KURNAZ

Gelişen teknoloji ile veri hızına duyulan ihtiyaç 5G teknolojisi ile karşılanması planlanmıştır. 5G ile dar bant genişliklerinden kaçınmak için milimetre dalga bantlarının kullanımına başlanmıştır. Bu yeni teknolojiyle yeni kanal modelleri ve kanal benzetimcileri oluşturulmaya başlanmıştır. NYUSIM kanal benzetimcisi bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

MIMO kanal kapasitesine; anten sayısı, LOS/NLOS durumu, frekansın yanı sıra, nem, sıcaklık, yağış ve basınç gibi çevresel faktörlerin etkisi NYUSIM programı kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde NYUSIM ile 28 ve 39 GHz frekanslarında oluşturulan kanalların kapasiteleri tüm durumlar için 2000 kere tekrar edilmiş ve ortalamaları alınmıştır. Analizler sonucunda kanal kapasitesini en çok etkileyen parametrenin yağış oranı, en az etkileyen parametrenin ise nem yüzdesi olduğu görülmüştür. Belirlenen dört ayrı parametreden de 39 GHz daha fazla etkilenen olmuştur. Anten sayısında, 28 GHz için 2x2'den 64x64'lük anten yapısına geçildiğinde kapasite artışı LOS için 26.99 kat iken NLOS için bu değer 29.59 kat olduğu görülmüştür. 39 GHz için ise bu değerler sırasıyla 28.58 ve 29.88 kattır. 4x4 dizilimi ile, 28 GHz ve LOS için kanal kapasitesi 39 GHz'den 1.77 kat NLOS için 1.84 kat fazladır. 28 GHz, 4x4 yapısı ve LOS durumu için kanal kapasitesi NLOS durumuna göre 194.14 kat daha fazla iken bu değer 39 GHz için 202.16 kattır.

Çalışmanın diğer aşamasında Samsun Şehrinin üç ayrı merkezi, NYUSIM benzetimcisi ile modellenmiştir. Analizler sonucunda LOS durumu için 28 ve 39 GHz frekanslarında Samsun Bölge ve Bafra arasında çok küçük kapasite farkı bulunurken Ondokuzmayıs için kanal kapasitesi yaklaşık 8 kat küçüktür. NLOS durumu için ise Ondokuzmayıs kanal kapasitesi Samsun Bölge'den az bir farkla daha büyük iken Bafra diğer iki bölgeden de çok daha büyüktür. Kanal kapasitelerinin aylık değişimleri meteorolojiden alınan veriler ile birlikte incelendiğinde ise, kanal kapasitesine direkt etkinin yağış oranı olduğu görülmektedir. Diğer parametreler de beraber incelendiğinde sıcaklığın arttığı, nemin ve basıncın azaldığı yaz aylarında kanal kapasitelerinin artışı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Atmosferik Sönümlenme, Kanal modelleme, Kanal kapasitesi, mmDalga, NYUSIM, 5G

ABSTRACT

MIMO CHANNEL CAPACITY ANALYZES FOR MILLIMETER WAVE COMMUNICATION SYSTEMS

Ahmet Furkan KOLA
Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrics and Electronics Engineering
Master, June/2022
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çetin KURNAZ

The need for data speed is expected to be met with 5G technology as technology develops. To avoid narrow bandwidths with 5G, the use of millimeter wave bands has begun. With this new technology, new channel models and channel simulators are being developed. NYUSIM channel simulator was used in this thesis.

MIMO channel capacity; In addition to the number of antennas, LOS/NLOS status, frequency, the effect of environmental factors such as humidity, temperature, precipitation and pressure were examined using the NYUSIM. The capacities of the channels created with NYUSIM at 28 and 39 GHz frequencies were averaged and repeated 2000 times in the analysis. The analysis revealed that the rain rate has the greatest influence on channel capacity, while the humidity percentage has the least. 39 GHz was affected more by the four separate parameters determined. When switching from a 2x2 to a 64x64 antenna structure at 28 GHz, the capacity increased 26.99 times for LOS and 29.59 times for NLOS. For 39 GHz, these values are 28.58 and 29.88 times, respectively. With the 4x4 array, the channel capacity for 28 GHz and LOS is 1.77 times higher than 39 GHz and 1.84 times for NLOS. The channel capacity is 194.14 times greater than the NLOS condition at 28 GHz, 4x4 structure, and LOS condition, and 202.16 times greater at 39 GHz.

The NYUSIM simulator was used to model three different Samsun city centers in the study's second phase. According to the analysis, the capacity difference between Samsun Bölge and Bafra at 28 and 39 GHz frequencies for the LOS situation is very small, while the channel capacity for Ondokuzmays is approximately 8 times smaller. In terms of NLOS channel capacity, Ondokuzmay is slightly larger than Samsun Bölge, while Bafra is much larger than the other two regions. When the monthly changes in channel capacity are analyzed alongside meteorological data, it is clear that the rain rate has a direct effect on channel capacity. When the other parameters are considered together, it is seen that channel capacities increase in the summer months as temperature, humidity, and pressure rise.

Keywords: Atmospheric Attenuation, Channel Capacity, Channel Modelling, mmWave, NYUSIM, 5G

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Çetin KURNAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez sürecinde desteğini esirgemeyen bölüm başkanım sayın Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Ahmet Furkan KOLA

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	3
1.2. Tezin Amacı	4
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1. MIMO-OFDMA	8
2.1.1. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO)	8
2.1.2. Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim	9
2.1.3. Masif-MIMO	11
2.2. Milimetre Dalga Haberleşmesinin Avantajları	11
2.2.1. Artan Veri Hızı	11
2.2.2. Geniş Bant Genişliği	12
2.2.3. Kısa İletim Mesafesi	12
2.3. Milimetre Dalga Haberleşmesinin Dezavantajları	13
2.3.1. İnsan Sağlığına Etkisi	13
2.3.2. Zayıflama Etkisi	13
2.3.3. Yazılım ve Donanım	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. Kanal Modelleme	20
3.2. NYUSIM Kanal Modeli	21
3.2.1. Yol Kaybı Modeli	23
3.2.2. MIMO-OFDM Kanal Modeli	24
3.3. MIMO Kanal Kapasitesi	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. Kanal Parametrelerinin Analizi	29
4.1.1. Frekans Analizi	31
4.1.2. MIMO Anten Sayısı Analiz	32
4.1.3. LOS/NLOS Görüş Hattı Analizi	35
4.1.4. Çevresel Faktörlerin Analizi	39
4.1.5. Ortam Türü	43
4.2. Samsun Şehri Kanal Kapasitesi Analizi	46
4.2.1. Samsun Bölge (UMi)	49
4.2.2. Bafra (UMa)	56
4.2.3. Ondokuzmayıs (RMa)	63
4.2.4. Genel Değerlendirme	69
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKÇA	74
ÖZ GEÇMİŞ	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

bps	: Saniye Başına Bit
dB	: Desibel
dBm	: Mili-Desibel
Hz	: Hertz
mbar	: Milibar
ns	: Nanosaniye
AMPS	: Advanced Mobile Phone System
AOA	: Ayrılma açısı
AOD	: Geliş Açısı
AT	: Atmosferik Sönümlenme
CDMA	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim
CI	: Close-In Free Space Reference Distance
CIR	: Kanal Darbe Yanıtı
EHF	: Aşırı Yüksek Frekans
FDMA	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FSPL	: Boş Uzay Yol Kaybı
InH	: Kapalı Erişim Noktası
ISI	: Semboller Arası Girişim
ITU	: Uluslararası Haberleşme Birliği
LOS	: Doğrudan Görüş Hattı
MAC	: Ortak Erişim Kontrolü
MIMO	: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
mmDalga	: Milimetre Dalga
MPC	: Çok Yollu Bileşen
NLOS	: Doğrudan Olmayan Görüş Hattı
NYU	: New York University
OFDM	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama
OFDMA	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
PDP	: Güç Gecikme Profili
PL	: Yol Kaybı
RMa	: Kırsal Makrohücre

SC	: Uzamsal Tutarlılık
SL	: Uzaysal Lob
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
SSCM	: İstatiksel Uzamsal Kanal Modeli
TC	: Zaman Kümesi
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
UMi	: Kentsel Mikrohücre
UMa	: Kentsel Makrohücre
1G	: Birinci Nesil
2G	: İkinci Nesil
3G	: Üçüncü Nesil
3GPP	: The 3rd Generation Partnership Project
4G	: Dördüncü Nesil
5G	: Beşinci Nesil
6G	: Altıncı Nesil

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Frekans bölgesi kullanımı	7
Şekil 2.2. MIMO haberleşmede alıcı, verici ve oluşan kanalların modeli	8
Şekil 2.3. MIMO anten sayısını ile artan kanal kapasitesi	9
Şekil 2.4. Frekans seçici kanal ve OFDM alt kanallarına ayrımı.....	10
Şekil 2.5. OFDM ve OFDMA yapısı	10
Şekil 2.6. Masif MIMO anten dizilimi ve baz istasyonlarındaki yerleşimleri	11
Şekil 2.7. mmDalga bölgesinde geniş bant genişlikleri	12
Şekil 2.8. Çevrede anten yerleşimi.....	13
Şekil 2.9. 5G ile artan baz istasyonu ve LOS iletim hattı sayısı	14
Şekil 2.10. Deniz seviyesinde frekans düzleminde atmosferik sönmelenme	15
Şekil 2.11. 4G ve 5G anten demet genişlikleri.....	16
Şekil 3.1. Kablosuz haberleşme modeli	17
Şekil 3.2. LOS ve NLOS iletim hatları	17
Şekil 3.3. Yankılı kanal.....	18
Şekil 3.4. Yankılı kanalın frekans yanıtı.....	19
Şekil 3.5. Gezgin iletim kanalı.....	20
Şekil 3.6. 2x2 MIMO Haberleşme	21
Şekil 3.7. NYUSIM modelleyici arayüzü	22
Şekil 4.1. UMi senaryo için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS.....	27
Şekil 4.2. UMi senaryo için yakınlaştırılmış PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS.....	28
Şekil 4.3. UMi senaryo için, LOS ve NLOS durumlarında oluşturulan kanalların frekans yanıtları a) 28 GHz b) 39 GHz	29
Şekil 4.4. Frekansın kanal kapasitesine etkisi a) LOS b) NLOS	32
Şekil 4.5. 28 GHz frekansında, MIMO anten sayısının kanal kapasitesine etkisi a)LOS b)NLOS	33
Şekil 4.6. 39 GHz frekansında, MIMO anten sayısının kanal kapasitesine etkisi a)LOS b)NLOS	34
Şekil 4.7. LOS/NLOS durumlarının 28 ve 39 GHz frekanslarında kanal kapasitesine etkisi	35
Şekil 4.8. LOS durumunda alıcı-verici mesafesinin kanal kapasitesi üzerindeki etkisi a) 28 GHz b) 39 GHz.....	36
Şekil 4.9. NLOS durumunda alıcı-verici mesafesinin kanal kapasitesi üzerindeki etkisi a) 28 GHz b) 39 GHz.....	38
Şekil 4.10. Barometrik basıncın kanal kapasitesine etkisi	40
Şekil 4.11. Nem yüzdesinin kanal kapasitesine etkisi.....	41
Şekil 4.12. Sıcaklık değişiminin kanal kapasitesine etkisi.....	42
Şekil 4.13. Yağış oranının kanal kapasitesine etkisi	43

Şekil 4.14. LOS durumunda ortam senaryosunun kanal kapasitesine etkisi.....	45
Şekil 4.15. NLOS durumunda ortam senaryosunun kanal kapasitesine etkisi.....	46
Şekil 4.16. Samsun Meteoroloji 10. Bölge Müdürlüğünden alınan yıllık iklim verileri a) Yağış oramı b) Sıcaklık c) Nispi nem d) Barometrik basınç.....	48
Şekil 4.17. Samsun Bölge ölçüm merkezinde LOS/NLOS durumları için alıcı-verici yerleşimi	50
Şekil 4.18. Samsun Bölge ölçüm merkezi için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS.....	51
Şekil 4.19. Samsun Bölge ölçüm merkezi için yakınlaştırılmış PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS	52
Şekil 4.20. Samsun Bölge ölçüm merkezi, LOS ve NLOS durumları için kanalların frekans yanıtları a) 28 GHz b) 39 GHz.....	53
Şekil 4.21. Samsun Bölge için yıllık ortalama kanal kapasiteleri a) LOS b) NLOS	54
Şekil 4.22. Samsun Bölge, 40 dB SNR için aylık kapasite değişimi a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS	56
Şekil 4.23. Bafra ölçüm merkezinde LOS/NLOS durumları için alıcı-verici yerleşimi	57
Şekil 4.24. Bafra ölçüm merkezi için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS.....	58
Şekil 4.25. Bafra ölçüm merkezi için yakınlaştırılmış PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS	59
Şekil 4.26. Bafra ölçüm merkezi, LOS ve NLOS durumları için kanalların frekans yanıtları a) 28 GHz b) 39 GHz	60
Şekil 4.27. Bafra için yıllık ortalama kanal kapasiteleri a) LOS b) NLOS.....	61
Şekil 4.28. Bafra, 40 dB SNR için aylık kapasite değişimi a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS	63
Şekil 4.29. Ondokuzmayıs ölçüm merkezinde LOS/NLOS durumları için alıcı-verici yerleşimi	64
Şekil 4.30. Bafra ölçüm merkezi için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS.....	65
Şekil 4.31. Ondokuzmayıs ölçüm merkezi, LOS ve NLOS durumları için kanalların frekans yanıtları a) 28 GHz b) 39 GHz.....	66
Şekil 4.32. Ondokuzmayıs için yıllık ortalama kanal kapasiteleri a) LOS b) NLOS	67
Şekil 4.33. Ondokuzmayıs, 40 dB SNR için aylık kapasite değişimi a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS	69
Şekil 4.34. LOS durumunda, üç ölçüm merkezinin 28 ve 39 GHz frekanslarında yıllık ortalama kanal kapasiteleri	70
Şekil 4.35. NLOS durumunda, üç ölçüm merkezinin 28 ve 39 GHz frekanslarında yıllık ortalama kanal kapasiteleri	71

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. 1G'den 5G'ye artan bant genişliği ve veri hızı.....	12
Tablo 4.1. NYUSIM kanal parametreleri.....	30
Tablo 4.2. 40 dB için farklı senaryolarda kanal kapasiteleri.....	38
Tablo 4.3. Çevresel faktörlerin analizinde kullanılacak NYUSIM kanal parametreleri.....	39
Tablo 4.4. Ortam senaryoları için NYUSIM kanal parametreleri.....	44
Tablo 4.5. Samsun Bölge için NYUSIM kanal parametreleri.....	49
Tablo 4.6. Bafra için NYUSIM kanal parametreleri.....	56
Tablo 4.7. Ondokuzmayıs için NYUSIM kanal parametreleri	63

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşmenin ilk adımları 1980 yılında birinci nesil (first generation, 1G) haberleşme teknolojileriyle başlamış ve Advanced Mobile Phone System (AMPS) olarak adlandırılmıştır. 1G ile yalnızca ses iletimi analog dar bant işaretlerin devre anahtarlama tekniğiyle sağlanmıştır. 800-900 MHz frekans bandında 30 kHz'lik alt kanalları kullanan 1G, Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) çoklu erişim tekniğiyle 2.5 kbps hızlara ulaşabilmektedir. Tek bir kanalın kullanımını haberleşme süresince talep eden tek bir kullanıcıya atayan bu sistemde senkronizasyon veya zaman kontrolü gerekmez (Çakmak & Albayrak, 2018; X. Li, Gani, Salleh, & Zakaria, 2009). Doksanlı yıllarda Global Systems for Mobile Communication (GSM) olarak adlandırılan ikinci nesil (second generation, 2G) hücreli sistemler ile birlikte haberleşme sayısal işaretler ile sağlanmaya başlanmış ve ses iletiminin yanında mesajlaşma hizmeti de kullanılmaya başlanmıştır. 2G sistemlerde IS-95 standardında Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access, CDMA), Avrupa standartlarında ise Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) tekniğiyle erişim sağlanmıştır. 2G ile veri güvenliği, 64 kbps değerine kadar çıkabilen veri hızı, 1800-1900 MHz bant genişlikli kanal paylaşımsız 25 kHz bant genişlikli alt kanallar ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda hareketli kullanıcılar için kesintisiz haberleşme olanağı yer istasyonu değiştirme ile sağlanmıştır (Agrawal, Patel, Mor, Dubey, & Keller, 2015; Sharma, 2013).

2000'li yılların başında International Mobile Telecommunication-2000 (IMT-2000) olarak adlandırılan 3G (Üçüncü Nesil) standartlarına geçilmiş ve bu sayede internet teknolojisi ve multimedya hayatımıza girmiştir. CDMA çoklu erişim tekniğinin kullanıldığı bu sistemlerde veri iletimi 2 Mbps hızlara kadar çıkartılarak görüntülü arama, mobil uygulamalar ve akıllı telefon teknolojilerinin kullanımına olanak sağlanmıştır (Mohr & Becher, 2000). Haberleşme için ayrılan frekans bantlarının tamamını ve zamanın tamamını kullanabilen CDMA, her bir kullanıcı için yeni kodlar üreterek girişimi engellemeyi amaçlamıştır (Prasad & Hara, 1996).

Teknolojinin gelişmesi ve veri hızlarının giderek iyileştirilmesiyle haberleşmede semboller arası girişimin (Intersymbol Interference, ISI) etkisinin giderek artacağı görülmüştür. Veri iletim hızının artması, dolayısıyla sembol sürelerinin kısalması doğrudan olmayan görüş hattı (Non-Line of Sight, NLOS) ile

alıcıya ulaşan yankı işaretleriyle oluşan frekans seçici kanalın ISI'yı kabul edilemeyecek düzeyde artırdığı ve haberleşmenin mümkün olmayacağı görülmüştür. Bu problemin çözümü 4G (Dördüncü Nesil) ile hayatımıza giren Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) ile çözülmüştür (Dixit & Katiyar, 2015). OFDM ile NLOS iletim hattı ile bozulan frekans seçici kanal frekans düzleminde alt bantlara bölünerek, dikgen olarak yerleştirilen alt taşıyıcılar ile veri iletimi sağlanmıştır. Bu yeni çoklu erişim tekniğiyle kullanıcılara frekans bölgesinde serbest dolaşım imkânı sunarak spektral verimlilik sağlanmış, alt kanallarla iletim sayesinde enerji ve güç verimliliği sağlanmıştır. Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) ve Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) işlemleri kullanıldığı için haberleşmenin gerçekleştirilmesi daha kolaydır (Armstrong, 2009).

Gelişen teknolojiyle birlikte mevcut veri hızları ve sağlayıcılara temin edilen bant genişlikleri yeterli gelmemeye başlamıştır. 5G (Beşinci Nesil) ile milimetre dalga (mmDalga) bölgesinde bulunan geniş frekans bandı kullanılmaya başlanmıştır ve milimetre dalga haberleşmesi teknolojisine geçilmiştir. Bu yeni teknolojiyle birlikte gelen haberleşme güçlükleri yeni nesil anten teknolojileri ve kanal modelleme ve kestirim yöntemleriyle aşılacak istenmiştir. 5G haberleşme ve ötesi teknolojiler bu milimetre dalga haberleşmesi sistemiyle 30-300 GHz frekans bandının kullanımıyla, kullanıcılara 10 Gbps ve üzerinde veri iletim hızı, çok düşük gecikme, çok düşük veri kaybı imkânları sunmaktadır (Al-Falahy & Alani, 2017; Niu, Li, Jin, Su, & Vasilakos, 2015).

Gelişen her teknoloji beraberinde zorlukları da getirmektedir. Mobil haberleşmede değişen teknoloji ile kullanılan frekanslar, bant genişlikleri, anten teknolojileri de değişmekte, dolayısıyla haberleşmenin gerçekleştiği kanallar da değişmektedir. Bu yüzden yeni nesil haberleşme ile kullanılan kanal modelleri de değişmektedir (Jaeckel, Peter, Sakaguchi, Keusgen, & Medbo, 2016). Bu tez çalışmasında mmDalga haberleşme sistemlerinde kanal modelleme problemi üzerinde durulmuştur. 5G sistemleri için kullanılacak kanal modelleri, hava koşullarına son derece duyarlı ve doğrudan görüş hattı (Line of Sight, LOS) gerektiren uygulamalar ile daha efektif olması dolayısıyla hala bir zorluktur (Al-Falahy & Alani, 2019). Dolayısıyla günümüzün güncel konularından olan milimetre dalga haberleşmesinde kanal modellerinin incelenmesi, başarımlarının kıyaslanması

ve çeşitli faktörler altında kanal modellerinin davranışları haberleşme benzetimcisi kullanılarak incelenecektir. Günümüzde bahsi geçen sistemler için kanal modellemeleri hala tartışılmakta ve en iyiyi arayış sürmektedir. Çalışmamızda da bu güncel konu hakkında çalışmalar yapılacak, en yüksek başarıyı sağlayacak kanal modelleri tartışılacak ve incelenecektir.

1.1. Literatür Taraması

5G sistemleri ile kullanılacak kanal modelleri literatürde çeşitli benzetim programları ile değerlendirilmektedir. 2017 yılında Ntaikos ve arkadaşları tarafından oluşturulan SANSA üç boyutlu bir alana yerleştirilerek mevcut altyapıları modelleyen çok antenli haberleşme için bir kanal modeli benzetimcisidir (Ntaikos, Gizas, Papageorgiou, & Papadias, 2017). QuaDRiGa ise sistem düzeyinde gerçekçi kanal darbe yanıtları üretmek için kullanılır (Jaeckel, Raschkowski, Börner, & Thiele, 2014). Bir diğer program WinProp ise elektromanyetik dalga yayılımını simüle eder ve iç ve dış mekân ve araç gibi çok çeşitli iletişim senaryolarını gerçekleyebilir ve çalışmada kullanılmıştır (Hoppe, Wölfle, & Jakobus, 2017). Tez çalışmasında kullanılacak olan NYUSIM programı ise NYU Tandon's School of Engineering tarafından 2017 yılında geliştirilmiş (Sun, MacCartney, & Rappaport, 2017) ve 2019 yılında program içerisine uzamsal tutarlılık (Spatial Consistency, SC) modu eklenerek bir üst seviyeye çıkartılmıştır (Ju, Kanhere, Xing, & Rappaport, 2019). Analizler benzetim programı ile oluşturulan farklı özellikli kanallar ile gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu ve benzeri benzetim programlarının değerlendirmelerinin yapıldığı çalışmalar da mevcuttur (He et al., 2020; Lübke et al., 2021). Birkaç çalışmada da NYUSIM kanal modelleri ve 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) kanal modelleri kıyaslanmıştır (Alizadeh, Vu, & Rappaport, 2019; Rappaport, Sun, & Shafi, 2017; Sun et al., 2018; Zeman, Masek, Stusek, Hosek, & Silhavy, 2017).

NYUSIM kanal benzetimcisi ile gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcuttur. Program çıktı olarak kanalın Güç Gecikme Profilini (PDP), ayrılış ve varış açılarının spektrumlarını ve yol kayıplarını vermektedir. Literatürde kanal parametreleri ayarlanarak sadece bu çıktılarının incelendiği birçok çalışma mevcuttur (Hasan, Mowla, & Hoque, 2020; Mowla, Dutty, & Ahmad, 2019; ZEKRI & AJGOU, 2019). Bu çalışmalar arasında 28 GHz frekansını (Lodro, Majeed, Khuwaja, Sodhro, & Greedy, 2018), 38 GHz frekansını (Rahayu & Pohan, 2021), 73 GHz frekansını

(Momo & Mowla, 2019) kullanan, aynı zamanda farklı frekansları birlikte değerlendiren (Hasan, Mowla, Rashid, Hosain, & Ahmad, 2019; Ilyas, Malik, Alammari, & Sharique, 2021) çalışmalar da mevcuttur. Aynı zamanda bu çıktıları SC modu açık halinde kullanan çalışmalar da literatürde bulunmaktadır (Ju & Rappaport, 2018; Zaman & Mowla, 2020). Bir başka çalışmada farklı ortam senaryolarının kıyaslamaları yapılmıştır (Játiva, Salazar, & Toscano, 2019).

NYUSIM programı ile farklı durumlar için kapasite analizleri de yapılmıştır. Bir çalışmada farklı anten dizilimlerinin ve anten polarizasyonlarının kanal kapasitesine etkisi incelenmiştir (Abdullah-Al-Nahid et al., 2021). Farklı frekanslarda ve yağmur oranlarında kapasiteleri karşılaştıran bir çalışma da mevcuttur (Hikmaturokhman, Suryanegara, & Ramli, 2019).

Farklı frekanslarda atmosferik parametrelerin yol kaybına etkisi de incelenmiştir (Squali & Riouch, 2019). Farklı çalışmalarda sıcaklığın (Kurniawan, Danisya, & Isnawati, 2020; Rahman, Anwar, & Nur, 2019), yağış oranının (Budalal, Rafiqul, Habaebi, & Rahman, 2019; Prasetyo, Suryanegara, & Asvial, 2019), nem yüzdesinin (Alfaresi, Nawawi, Malik, Anwar, & Nur, 2020) ve barometrik basıncın (Larasati, Yuliani, & Danisya, 2020) kanal üzerindeki etkilerini gösteren çalışmalar da vardır. Bir çalışmada da Bağdat Şehri'nin iklim koşulları kullanılarak farklı frekans ve çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) yapılarında, alıcı-verici mesafesi, sıcaklık ve nemin alınan güç üzerindeki etkileri incelenmiştir (Al-Shuwaili & Jamel, 2021). Bir çalışmada, bu tez çalışmasına benzer şekilde, Malezya bölgesinde yıllık yağış verileri alınarak kanal üzerindeki etkileri incelenmiştir (Budalal et al., 2021).

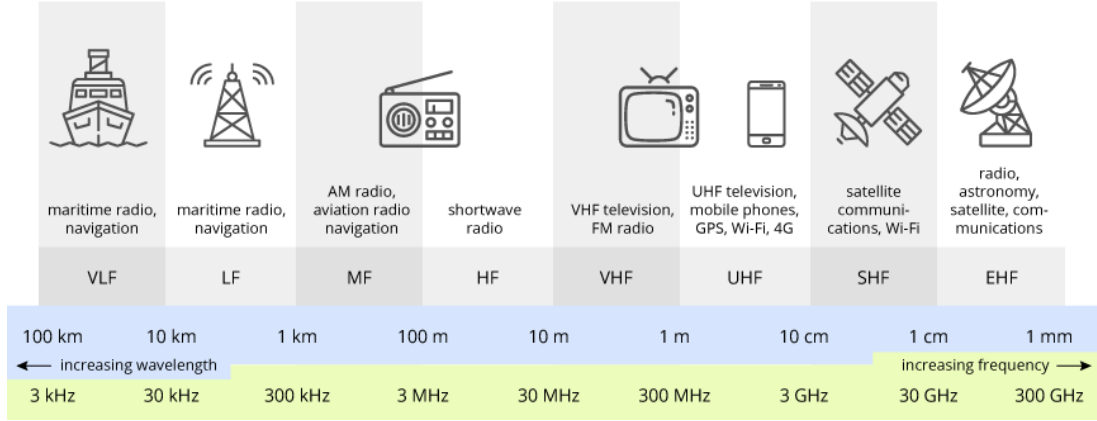
1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında 5G sistemlerince kullanılacak kanal modellerinin kanal performanslarını etkileyebilecek hususlar üzerinde durulmuştur. Bunlar mmDalga teknolojisi ile kullanılacak yüksek frekanslar, çeşitli MIMO yapıları, farklı görüş hattı uygulamaları veya alıcı-verici mesafelerdir. Aynı zamanda atmosferik sönümlenmeden etkilenen mmDalga frekanslarının yağış, nem, basınç, sıcaklık gibi iklimsel değişikliklerden de ne derecede etkilenecekleri bu çalışmada incelenmiştir. Ardından NYUSIM benzetimcisinin farklı ortam senaryoları kullanılarak Samsun Şehri'nin üç farklı bölgesinde, Samsun Meteoroloji 10. Bölge Müdürlüğü tarafından

alınan iklim verileri ile kanal modelleri oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Bahsi geçen tüm bu parametrelerin kanal üzerindeki etkileri kanal kapasitesinin hesaplanmasıyla incelenmiştir ve 5G sistemlerince kanal kapasitesinin farklı ortamlarda nasıl artırılabilceği tartışılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Artan kullanıcı sayısı, kullanıcıların giderek artan veri gereksinimi ve artan mobil trafik, haberleşmede çok daha yüksek veri hızı gereksinimi oluşturmuştur. Gelişen teknolojiyle birlikte haberleşmenin yalnızca mobil hatlar veya kişisel bilgisayarlar arasında değil, akıllı ev teknolojileri sayesinde klima, buzdolabı, fırın, gibi ev aletleriyle olan haberleşme, gerek gelişen IoT, sanal gerçeklik ve bulut teknolojileri, gerekse yüksek çözünürlüklü multimedya vb. gereksinimleri haberleşmeyi insan ile her şey arasında gerçekleştirmeye başlamıştır. Dolayısıyla haberleşme kanalına eklenen her bir yenilik yeni bitler anlamına, yeni bitler ise yeni hız gereksinimlerini ortaya çıkarmaktadır. Mevcut altyapının hızla gelişen bu teknolojinin gereksinimlerini karşılayamayacağı görülmüştür. Hâlihazırda frekans bölgesine Şekil 2.1'deki gibi yerleşmiş olan radyo frekansları, mobil haberleşme, uydu, Wi-Fi, TV frekansları gibi frekans bandında 6 GHz altında bulunan frekans bölgelerinin aşırı doluluğu 5G ve ötesi sistemler için yeterli bant genişliklerinin sağlayamaması üzerine, yeni frekans bölgeleri ITU tarafından aşırı yüksek frekans bölgelerinde belirlenmiştir. Gerek lisanssız kullanımı, gerek atmosferik etkiler, gerekse frekans bölgesinin geniş bant genişlikleri sağlayabilecek kadar büyük olması göz önüne alındığında milimetre dalga bölgesi uygun görülmüştür. 30-300 GHz frekans bandının haberleşme sistemlerinde kullanımı incelenmiştir. Bu frekanslara karşılık gelen elektromanyetik dalgaların dalga boyları 1-10 mm arasında değiştiğinden milimetre dalga haberleşmesi olarak nitelendirilir. Bu teknolojiden beklenti önceki nesil haberleşme teknolojilerine kıyasla çok yüksek hız ve çok düşük gecikme olarak belirlenmiştir. Şu an kullanılan teknoloji ile kıyaslandığında 100 kat veri hızı, 1000 kat sistem kapasitesi, yüksek enerji ve spektral verimlilik beklenmektedir (Saad, Bennis, & Chen, 2019).



Şekil 2.1. Frekans bölgesi kullanımı

Kablosuz haberleşmede veri hızı gürültüsüz kanallar için Nyquist bit hızı (2.1), gürültülü kanallar için Shannon kapasitesi (2.2) ile ifade edilir (Gupta & Bonde, 2021). Her iki denklemde de C kapasiteyi (bps/Hz), W kanalın bant genişliğini belirtir. Denklem 2.1 için L sinyal seviye sayısını, Denklem 2.2 için SNR sinyal gürültü oranını belirtir. Haberleşme kanallarında gürültü göz ardı edilemeyeceği için veri hızı Shannon kapasitesi ile ifade edilir (Gallager, 1968).

$$C = 2W \log_2 L \quad (2.1)$$

$$C = W \log_2(1 + SNR) \quad (2.2)$$

5G ve ötesi sistemler yüksek veri hızlarını gerektirmektedir. Veri hızlarının artırılabilmesi ise Shannon kapasitesinin incelenmesiyle gerçekleşebilir. Bu bağıntıya göre veri hızı bant genişliğini artırarak mümkün olabilir. Bu yüzden ki daha geniş bant genişlikleri için mmDalga bölgesi belirlenmiştir. Aşırı yüksek frekans (Extremely High Frequency, EHF) bölgesini kullanmak, yani taşıyıcı frekansını arttırmak, direkt olarak bant genişliğini arttırmak demek değildir ancak belirtildiği üzere bu bölgenin hem çok geniş hem de hâlihazırda kullanılmıyor olması haberleşmenin daha geniş bantlarda gerçekleşebilmesine olanak sağlamaktadır.

Shannon bağıntısı incelendiğinde bant genişliğinin yanı sıra Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) değerinin artırılmasının da veri hızını arttıracığı görülür. SNR değerinin artması ise alınan güce (P_R) bağlıdır. Haberleşmede alıcı tarafında alınan güç Friis bağıntısı ile ifade edilir (2.3). Bu bağıntıda P_T vericide iletilen gücü G_R ve G_T kanal kazançlarını, d haberleşmenin mesafesini, f haberleşmenin gerçekleştiği frekans seviyesini, c ise ışık hızını belirtir (Lassabe,

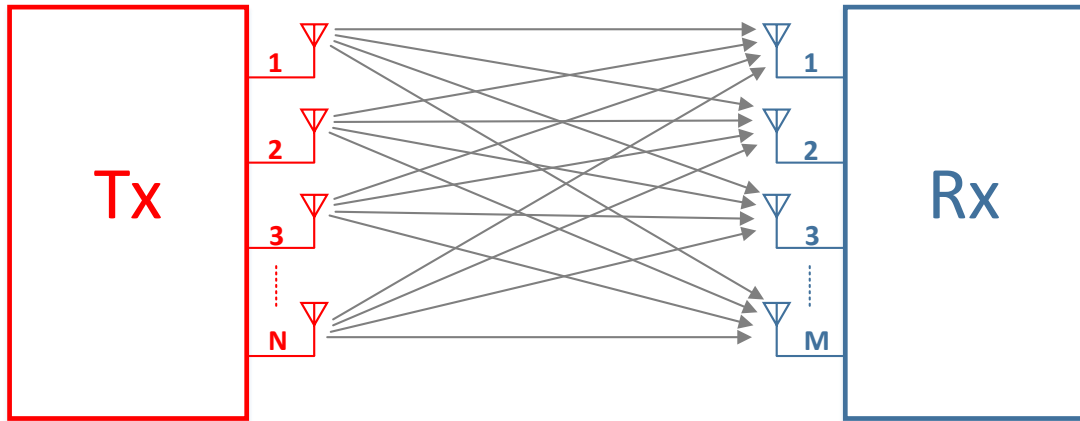
Canalda, Chatonnay, Spies, & Baala, 2005). Alınan gücü arttırabilmek diğer parametrelerin iyileştirilmesiyle de mümkün olabilir ancak bu artış sınırlı bir miktardadır. Bu noktada hayatımıza MIMO teknolojisi girmektedir. MIMO ile bir kullanıcı için alınan güç her bir haberleşme kanalı için katlanarak arttırılabilmektedir. 5G ve ötesi sistemlerin haberleşme tekniği MIMO-OFDMA teknolojisi olarak belirlenmiştir.

$$P_R = P_T G_R G_T \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 \quad (2.3)$$

2.1. MIMO-OFDMA

2.1.1. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO)

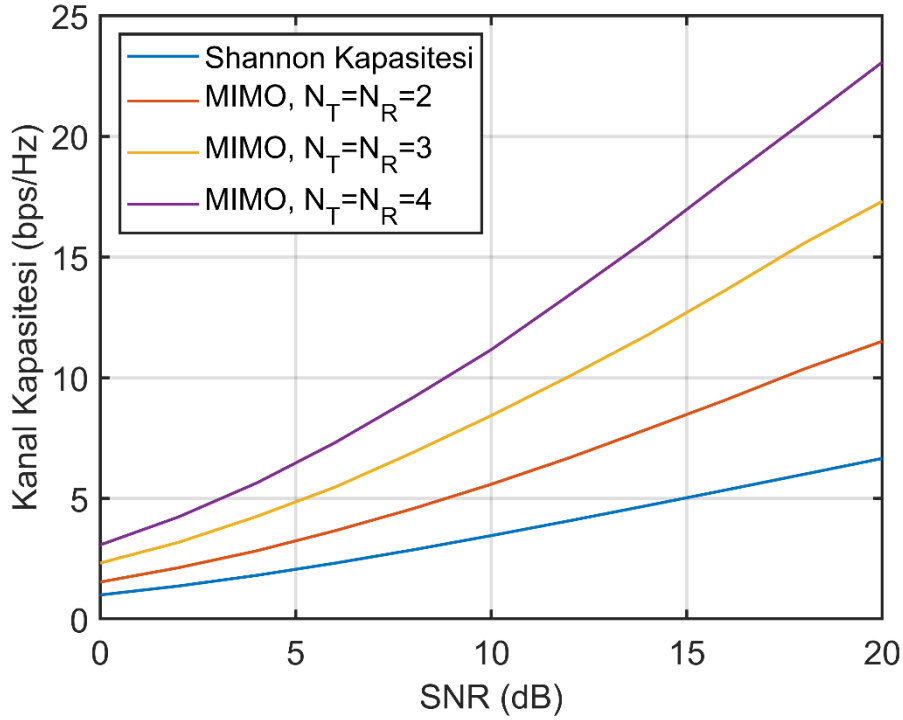
Çoklu giriş çoklu çıkış anlamına gelen MIMO, alıcı ve vericide birden fazla anten kullanarak, haberleşmenin kalitesini ve verimini arttırmak için kullanılır. Giriş ve çıkıştaki anten sayıları aynı olabileceği gibi farklı da olabilir. Anten sayısına bağlı olarak MIMO isimlendirilir. Örneğin iki giriş anteni üç çıkış anteni için 2x3 MIMO olarak adlandırılır (Tsoulos, 2018). Şekil 2.2’de N adet verici M adet alıcı antene sahip iki haberleşme cihazı ve oluşan çoklu yollar modellenmiştir.



Şekil 2.2. MIMO haberleşmede alıcı, verici ve oluşan kanalların modeli

Haberleşmede anten sayıları arttırılarak iletim çoklu yollarla sağlanır ve bu sayede sinyal birden çok yolla iletilerek her bir yoldaki verimlilik arttırılır. Aynı zamanda çoklu anten kullanımı çoklu yol kazançlarıyla alıcıda alınan gücü arttırmaktadır. Şekil 2.3 ile farklı anten sayılarına bağlı olarak MIMO tekniğinin farklı SNR değerleri boyunca kapasitedeki artışı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere anten sayıları sabit tutulduğunda SNR değerinin iyileşmesiyle kapasitedeki artışı

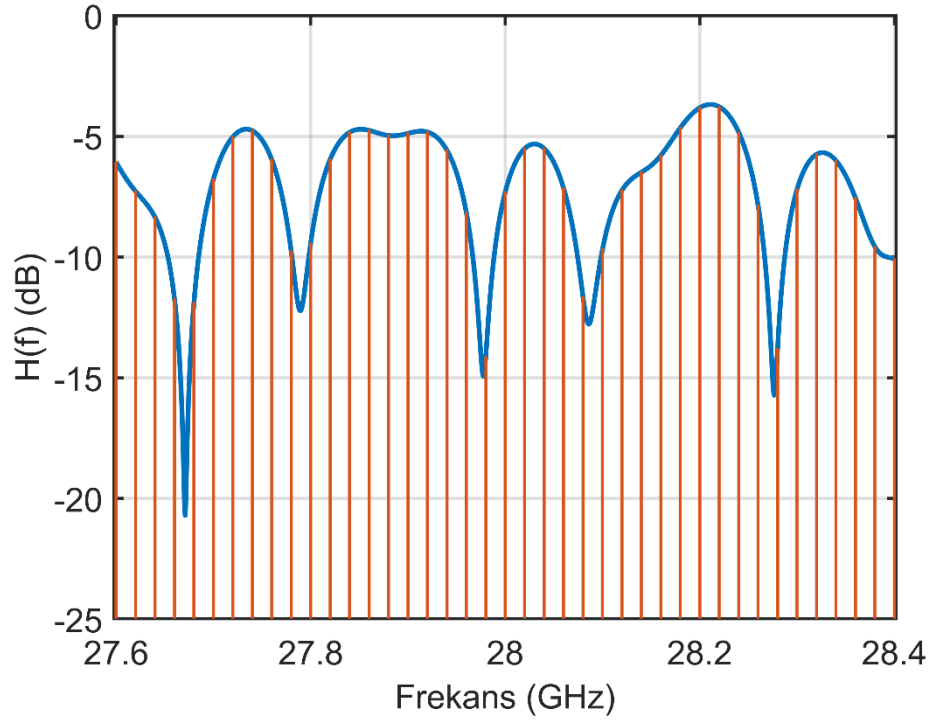
küçük miktarlarda gerçekleşmektedir. Ancak anten sayılarının artırılmasıyla kapasitedeki artışın önemli ölçüde büyümüşür.



Şekil 2.3. MIMO anten sayısı ile artan kanal kapasitesi

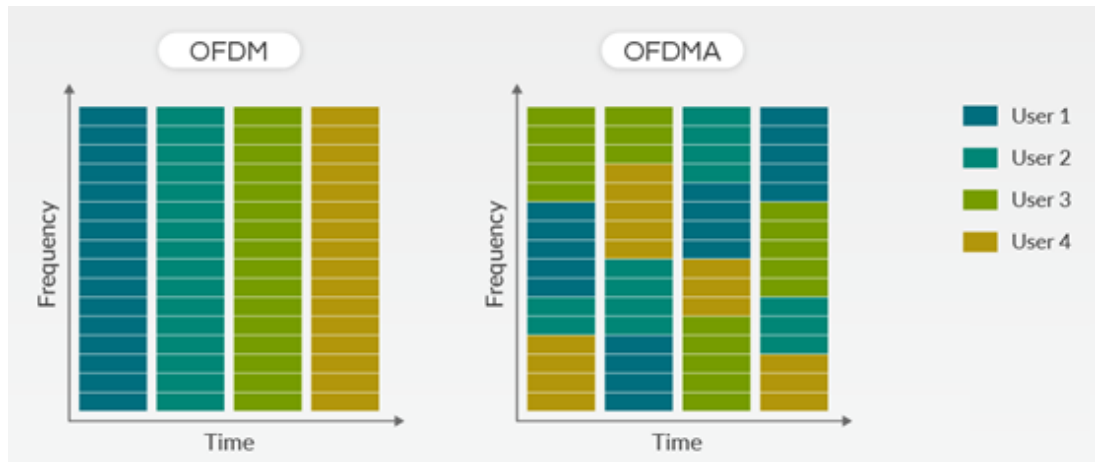
2.1.2. Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim

4G haberleşme ile kullanılmaya başlanan OFDMA çoklu erişim tekniği yeni nesil haberleşmelerinde temelini oluşturmaktadır. Haberleşmede veri hızının artmasıyla birlikte bant genişlikleri de artmakta, dolayısıyla kanalın bozucu etkisini de beraberinde getirmektedir. 4G haberleşme ile 20 MHz'e kadar çıkan bant genişliklerinde frekans seçici kanalda Şekil 2.4 ile görülen, derin sönümlenme adı verilen bölgelerin haberleşmeye katılmasıyla haberleşmenin verimi oldukça düşmektedir. Bu yüzden tüm kanal üzerinden sinyali direkt göndermek mümkün gözükmemektedir. Bu noktada kanalın bozucu etkisini en aza indirmek için OFDM tekniği geliştirilmiştir. OFDM teknolojisinde kanal şekildeki gibi N adet alt kanala bölünür ve iletim bu alt kanallar ile sağlanır. Her bir alt kanal tek tek incelendiğinde bölünmemiş haline göre oldukça tahmin edilebilir oldukları görülmektedir (Yin & Alamouti, 2006). OFDM, bir sinyali birden çok alt sinyallere bölerek daha basit bir haberleşme imkânı sağlar. Haberleşmenin sağlandığı kanal, şekildeki gibi birbirlerine dik olarak yerleştirilmiş birden çok alt kanallara bölünerek alt sinyalleri farklı frekanslarda eş zamanlı olarak gönderir.



Şekil 2.4. Frekans seçici kanal ve OFDM alt kanallarına ayrımı

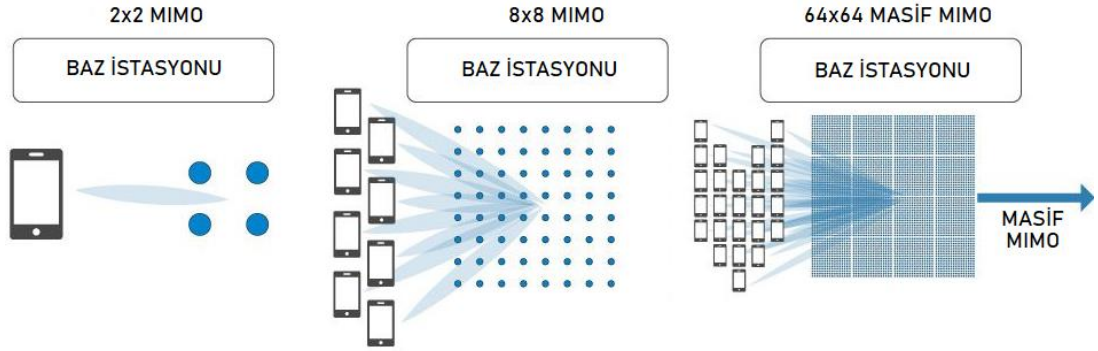
OFDMA, OFDM tabanlı çoklu erişim tekniğidir. Fakat aradaki fark OFDMA ile Şekil 2.5'te görüldüğü üzere haberleşme esnasında değişken bant genişlikleri ve aynı zaman diliminde farklı kullanıcıların haberleşmesidir. Zamanın aynı anında müsait olan frekans bantlarında farklı kullanıcıların haberleşmesi Orta Erişim Kontrolü (Medium Access Control, MAC) çoklu erişim tekniğiyle gerçekleştirilir. MAC ile kanalları kullanıcılara atama, şifreleme ve adresleme, sönmülenme ve girişimi engelleme problemleri giderilir (B. Li, Qu, Yan, & Yang, 2015).



Şekil 2.5. OFDM ve OFDMA yapısı

2.1.3. Masif-MIMO

MIMO-OFDMA 5G ve ötesi sistemlerin temeli konumundadır. Bant genişliğinin artırılması, antenler arası mesafelerin düşürülmesi ve diğer iyileştirmeler ile veri hızı yeteri kadar arttırılamamaktadır. MIMO teknolojisiyle iyileştirmeler devam etmiş fakat belirli bir noktada gelişen teknolojiye ayak uyduramamaya başlamıştır. Çözüm olarak masif MIMO teknolojisi önerilmiştir. Bu teknolojiyle şimdiye kadar çıkılmamış MIMO anten sayılarına çıkılmıştır. mmDalga teknolojisinde kullanılacak olan antenlerin hem ebat olarak küçük olmasıyla Şekil 2.6'daki gibi baz istasyonunda MIMO diziliminin arttırılabilmesi sağlanmış, hem de dar ışın demet genişliğiyle MIMO dizilimi kaçınılmaz hale gelmiştir. Anten sayısının bu denli artması anten başına düşen kullanıcı sayısını da azaltmakta ve bu sayede girişim problemlerinin de önüne geçebilmektedir (Ramteke, Deshmukh, & Dekate, 2018).



Şekil 2.6. Masif MIMO anten dizilimi ve baz istasyonlarındaki yerleşimleri

2.2. Milimetre Dalga Haberleşmesinin Avantajları

2.2.1. Artan Veri Hızı

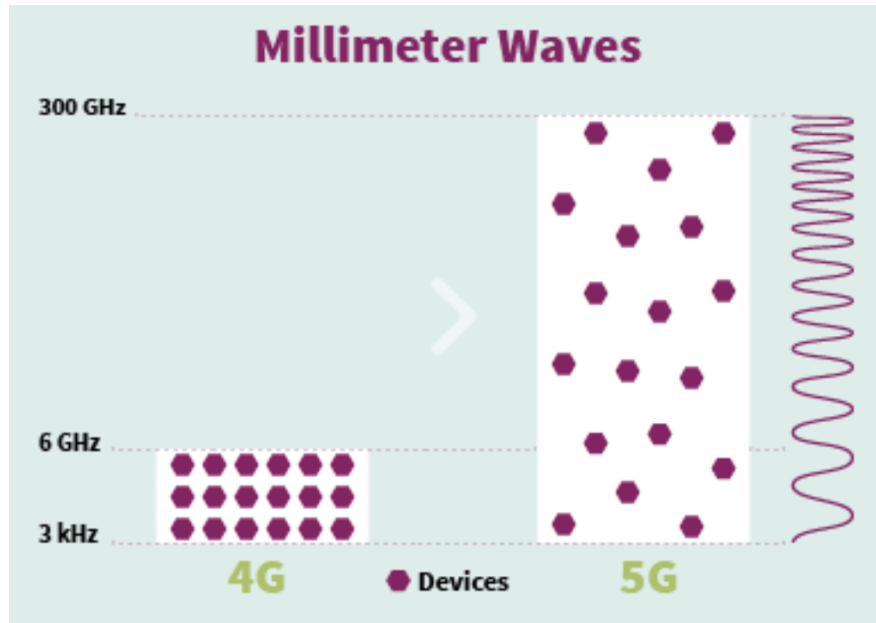
Yeni haberleşme teknolojisi temelde veri hızının eski nesil haberleşmelerde yaşanan artışa nazaran çok büyük miktarda arttırılabilmesi için getirilmiştir. İlk aşamada 10 Gbps ve üzerinde veri hızını hedefleyen sistem ilerleyen aşamalarda saniye başına Terabit hızlarına ulaşabilmeyi amaçlamaktadır. Tüm avantajlar ve dezavantajlar doğrudan veri hızının arttırılmasıyla ilgilidir (Gawas, 2015). 1G sisteminden 5G sistemine kadar, haberleşmede veri hızının artışı ve kullanılan bant genişlikleri Tablo 2.1 ile gösterilmiştir.

Tablo 2.1. 1G'den 5G'ye artan bant genişliği ve veri hızı

Nesil	Yıl	Bant Genişliği	Veri Hızı
1G	1980	800-900 MHz	2.5 kbps
2G	1990	800-900/1800-1900 MHz	64 kbps
3G/3.5G	2000	1.6-2.5 GHz	2 Mbps
4G/4.5G	2010	2-6 GHz	100 Mbps
5G ve ötesi	2020	3-300 GHz	>10 Gbps

2.2.2. Geniş Bant Genişliği

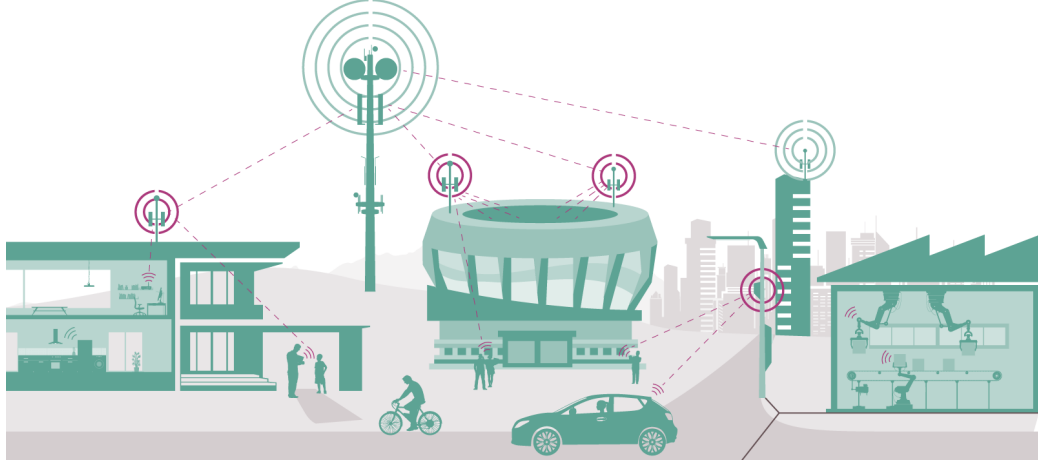
Milimetre dalgaların kullanımının getirdiği en büyük avantajlardan biri geniş bant genişliğidir. Bant genişliğinin artması direkt olarak haberleşmenin hızını arttırmaktadır. Aynı zamanda her bir haberleşme işlemi daha Şekil 2.7'deki gibi geniş bantlara yayılabildiği için girişime karşı oldukça etkilidir.



Şekil 2.7. mmDalga bölgesinde geniş bant genişlikleri

2.2.3. Kısa İletim Mesafesi

Girişime karşı bir diğer etki ise birbirlerine yakın antenler ile anten başına kullanıcı sayısının azalmasından dolayı aynı frekansta girişim olmaksızın farklı kullanıcılara hizmet verebilme imkânıdır. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi birbirine yakın antenlerin kullanımı yayılım ve sönümlenmeyi de azaltmaktadır.



Şekil 2.8. Çevrede anten yerleşimi

2.3. Milimetre Dalga Haberleşmesinin Dezavantajları

Milimetre dalga teknolojisi günümüzde yeni yeni kullanılmaya başlanmış, taze bir haberleşme teknolojisidir. Bu denli güncel olması henüz belirlenememiş uzun vadeli veya iyileştirme çalışmaları devam eden problemleri beraberinde getirmektedir. Kısalan dalga boylarının, dolayısıyla artan frekansların, gerek haberleşmenin kalitesini ve zorluğunu, gerek sağlık etkileri, gerekse üretim ve maliyet etkilerini bulundurmaktadır.

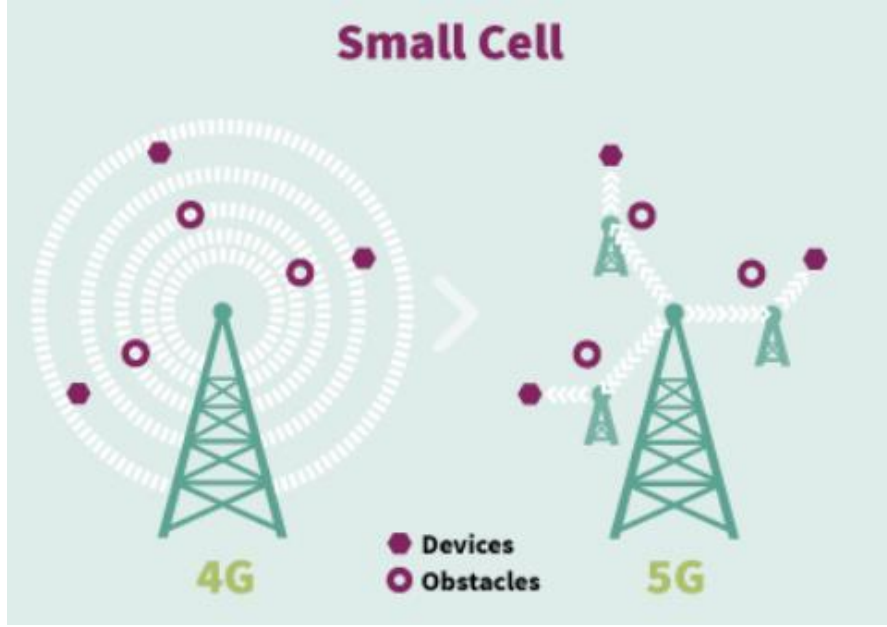
2.3.1. İnsan Sağlığına Etkisi

Milimetre dalga bandının başlıca problemlerinden birisi insan sağlığına etkisidir. Bu etki kısa vadeli veya uzun vadeli olarak ortaya çıkabileceği için kesin kanılara varmak mümkün değildir. Ancak milimetrik dalgaların boyları ultraviyole ve X ışınlarından büyüktür, fakat frekans bandının giderek artması henüz tespit edilemeyen sorunların oluşabileceğini düşündürmektedir (Di Ciaula, 2018).

2.3.2. Zayıflama Etkisi

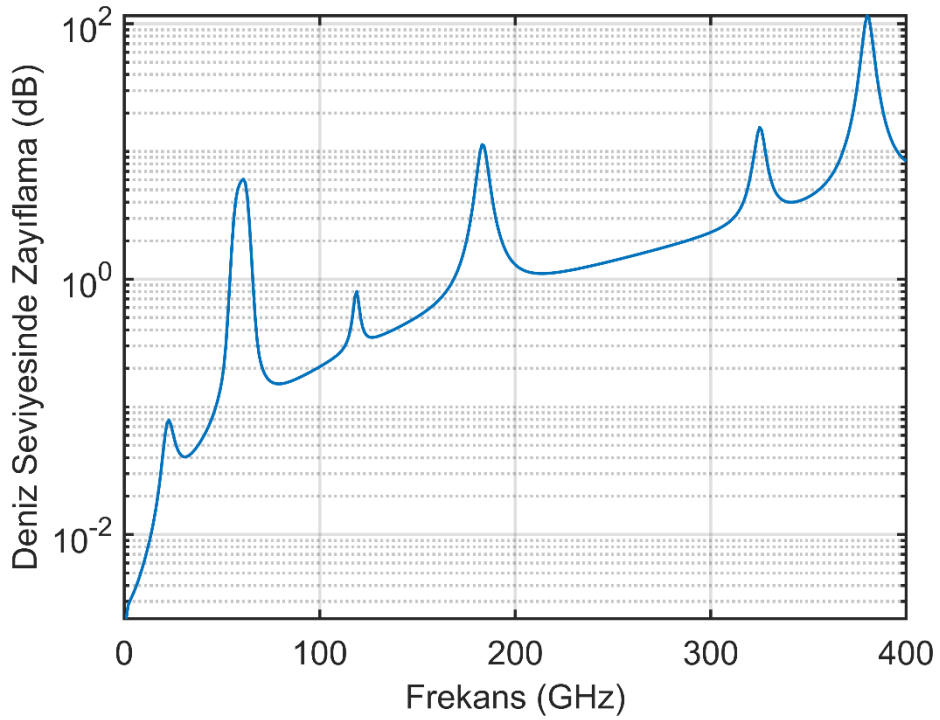
Haberleşmede aşırı yüksek frekans bölgesini kullanmanın en önemli problemlerden birisi yüksek frekanslardaki zayıflama etkileridir. Friis bağıntısında görüldüğü üzere antenden alınan sinyalin gücü frekansın ve mesafenin karesi ile ters orantılıdır, iletilen güç ve kazançlar sabit kabul edildiğinde frekanstaki ve mesafedeki artışın alınan sinyalde önemli bozulmalara yol açtığı görülmektedir. mmDalga bölgesinde, frekans böyle büyük oranda artarken mesafenin artması veya şu anki haliyle kalması mümkün değildir. Bu sebeple mmDalgalar uzun mesafeli uygul amalarda kullanımı pek mümkün görülmemektedir.

Bir diğerk zayıflama etkisi ise mmDalgaların ev duvarları gibi cisimlere nüfuz etmede zayıf kalmasıdır. Cisimlerde yoğun zayıflamaya maruz kaldığı için NLOS görüş hatları azaltılıp Şekil 2.10'daki gibi LOS görüş hatlarını artırmak, dolayısıyla anten sayısını arttırmak gerekmektedir.



Şekil 2.9. 5G ile artan baz istasyonu ve LOS iletim hattı sayısı

Özellikle bu frekans bandında atmosferik sönümlenme önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalarda, atmosferik zayıflamanın desibel olarak zayıflama etkisi aşırı yüksek frekans bölgesi boyunca Şekil 2.10 ile gösterilmiş ve bu etkilere göre kullanılabilir frekans aralıkları 5G ve ötesi sistemlerinde belirlenmeye çalışılmıştır (Roy, Vishwakarma, Jain, & Singh, 2016).



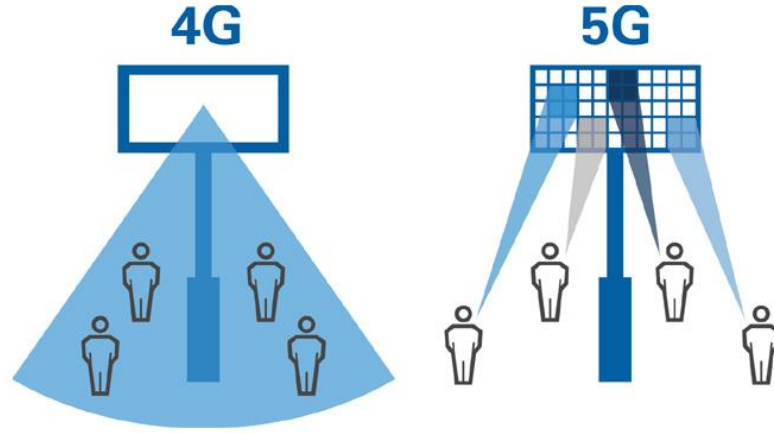
Şekil 2.10. Deniz seviyesinde frekans düzleminde atmosferik sönümlenme

2.3.3. Yazılım ve Donanım

Bir diğer problem ise frekansın artışıyla birlikte küçülen anten boyları ve dolayısıyla küçülen diğer donanımların üretim maliyetleridir. Anten boyu haberleşmenin gerçekleştiği frekans düzeyi ile doğrudan bir ilişkiye sahiptir. Matematiksel olarak anten boyu (l), dalga boyuyla, dolayısıyla ışık hızı ve frekans ile doğrudan ilişkilidir. Denklem 2.4 ile görüldüğü üzere $c=3 \times 10^8$ iken frekans bölgesinde 30-300 GHz arasında anten boyu milimetrik boyutlarda oluşmaktadır. Anten tasarımlarını bu denli küçültmek beraberinde donanımsal zorlukları da getirmektedir.

$$l \cong \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

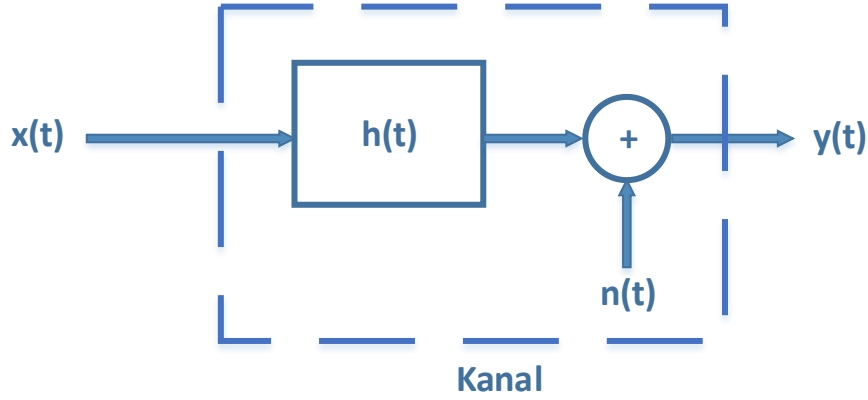
Donanımın yanı sıra gelişen masif MIMO teknolojisinin ve dar anten ışın demetlerinin özellikle hareketli kullanıcılar için getirdiği yazılım güçlükleri de mevcuttur. Hareketli kullanıcıların küçük hücreli baz istasyonları arasında, hatta bir baz istasyonundaki dar ışın genişlikli antenler arasında sürekli Şekil 2.11 ile görüldüğü gibi yer değiştirmesi bu zorluğu getirmektedir.



Şekil 2.11. 4G ve 5G anten demet genişlikleri

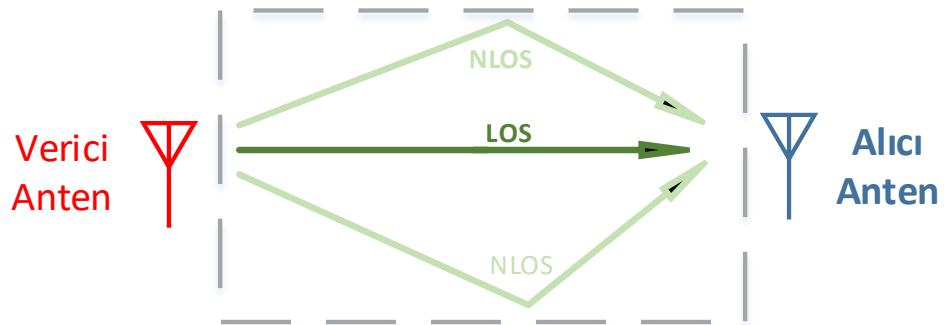
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kablosuz haberleşmenin temeli işareti yollayan verici, işareti alması beklenen alıcı ve bu alış verişin gerçekleştiği kanal olarak ifade edilebilir ve Şekil 3.1 gibi modellenebilir. Burada $x(t)$ vericiden iletilen sinyali $y(t)$ is alıcıda elde edilen sinyali ifade eder.



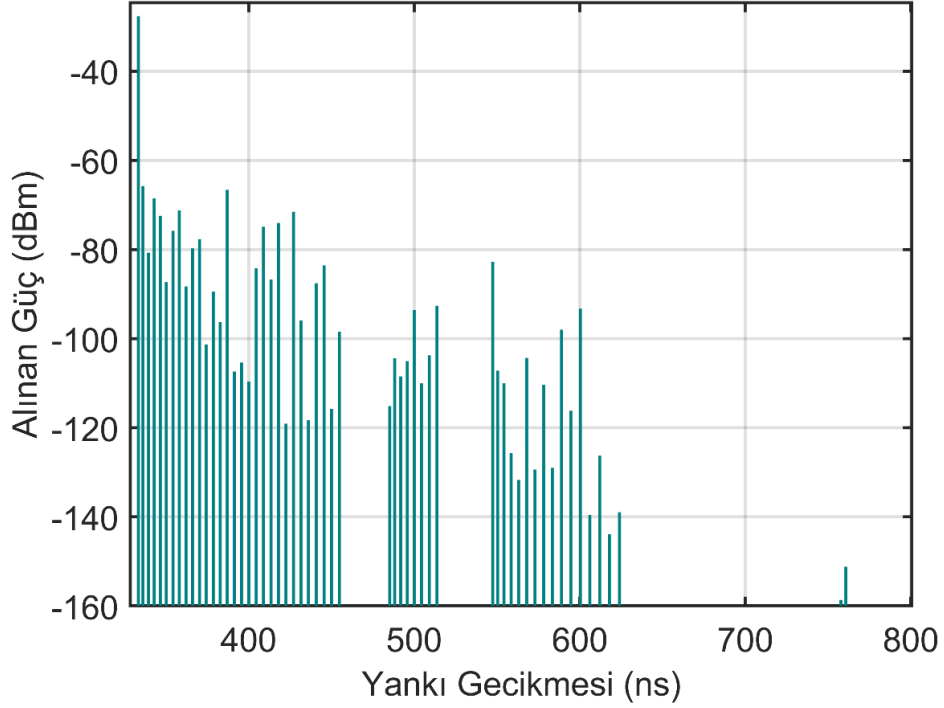
Şekil 3.1. Kablosuz haberleşme modeli

Haberleşme sistemlerinde kanal alıcı ve verici arasındaki haberleşmenin şekline, konumuna ve dış etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterir fakat temelde $h(t)$ darbe yanıtı ve $n(t)$ gürültü olarak ifade edilebilir. Haberleşme kanalı içerisinde sönmüleme, yansıma, kırılma, girişim ve saçılma gibi haberleşmenin kalitesini etkileyecek önemli etmenleri barındırmaktadır. Ayrıca serbest uzay yayılımı ve atmosferik etkiler de bozulmalara sebep olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı alıcıda çok yollu bir kanaldan bahsedilebilir. Şekil 3.2'deki gibi antenler arasındaki iletim hatları LOS ve NLOS yollar olarak isimlendirilir. Alıcıdaki sinyal tüm hatlardan gecikmeli gelen sinyallerin toplamı şeklindedir ve bu yüzden bozulmalara uğramıştır.



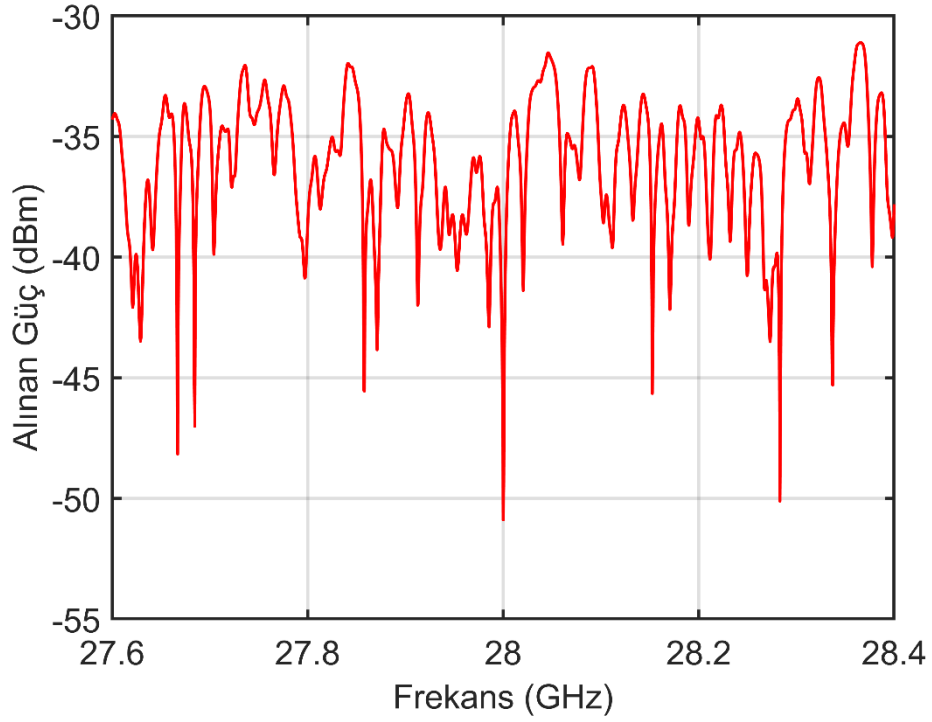
Şekil 3.2. LOS ve NLOS iletim hatları

Bozulmaya uğrayan bu sinyaller gecikme ve zayıflamalarıyla Şekil 3.3'deki gibi görülebilir. Bahsi geçen yazılım ile örnek bir kanal üretilmiştir. Görüldüğü üzere durağan haldeki alıcı ve verici arasındaki haberleşmede alıcıya ulaşan farklı gecikme ve güçteki sinyaller kanalda bozulmalara neden olmaktadır.



Şekil 3.3. Yankılı kanal

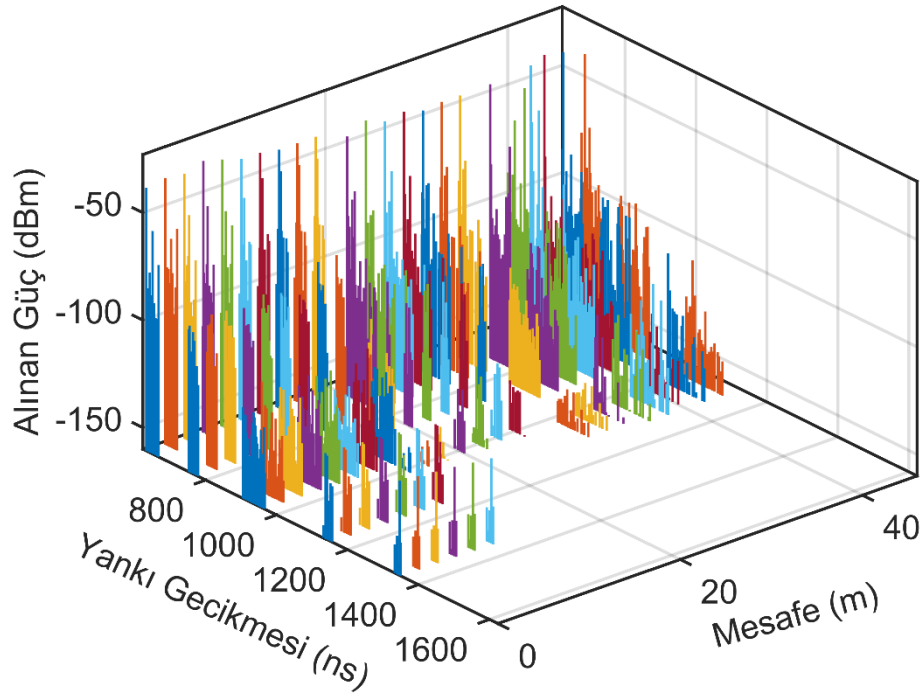
Kanal frekans bölgesinde incelendiğinde Şekil 3.4'deki gibi görülebilir. Kanal eğer frekans bölgesinde sabit ise sabit sönümlü (flat fading) adını alır ve kanal sadece bir katsayıdan ibarettir, fakat bu durum gerçek haberleşme kanalları ile uyuşmamaktadır. Frekans seçici kanalın sabit olmadığı durumlarda çeşitli faktörlerle kanalın durumu çeşitli bölgelerde bozucu etkiye sahiptir. Yüksek binalar ve çevresel faktörler ile zaman zaman bozulmaya uğrayan kanal ise yavaş sönümlü (slow fading) olarak adlandırılır. Bu bozucu etkilerin kanal içerisinde çok hızlı değiştiği durumlarda ise kanal hızlı sönümlü (fast fading) olarak adlandırılır.



Şekil 3.4. Yankılı kanalın frekans yanıtı

Hızlı sönümlenmeli kanallar aynı zamanda yankılı kanal sönümlenmesi olarak adlandırılır. Bu sönümlenmeler Rayleigh ve Rician dağılımı ile modellenir. Radyo sinyalinin saçılmasına sebep olan birçok nesne olduğunda Rayleigh sönümlenmesi makul bir modeldir. Ek olarak alıcı ile verici arasında baskın bir direkt görüş yolu yoksa Rayleigh sönümlenmesi uygulanabilir. Alıcı ile verici arasında baskın bir direkt görüş yolu olduğu durum için Rician sönümlenmesi daha uygundur. Artan sistem bant genişliği, LOS görüş ihtimali ile mmDalga kanallarının sönümlenme istatistiklerinin Rayleigh dağılımından Rice dağılımına doğru giderek daha fazla sapması beklenmektedir.

Hareketli kullanıcılar için kanal Doppler katmasının etkisine uğrar. Gezinim iletim kanalı olarak adlandırılan bu kanalda ns cinsinden yankı gecikmesinin yanı sıra, metre veya saniye cinsinden, kullanıcı hızına göre, Doppler kaymasının etkisi ile yeni bir dağılım modeli oluşur. NYUSIM benzetimcisi ile oluşturulan bir kanal örneği Şekil 3.5 ile gösterilmiştir. Bu çalışmada bu modeller kullanılmamış, haberleşme durağan kullanıcılar arasında analiz edilmiştir.



Şekil 3.5. Gezgin iletim kanalı

3.1. Kanal Modelleme

Matematiksel olarak çıkış işareti zaman bölgesinde Denklem 3.1 ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 y(t) &= x(t) * h(t) + n(t) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau + n(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Aynı eşitlik Fourier dönüşümü alındığında frekans bölgesinde Denklem 3.2 ile gösterilir.

$$Y(w) = X(w)H(w) + N(w) \tag{3.2}$$

Alıcının hesaplanan $\hat{X}(w)$ işareti ise Denklem 3.3 şeklinde ifade edilir.

$$\hat{X}(w) = Y(w)H(w) + N(w) \tag{3.3}$$

Şekil 3.6'daki iki alıcılı ve iki vericili bir haberleşme kanalının blok diyagramı görülmektedir. Çıkış işaretleri giriş işaretleri cinsinden Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 ile ifade edilir.

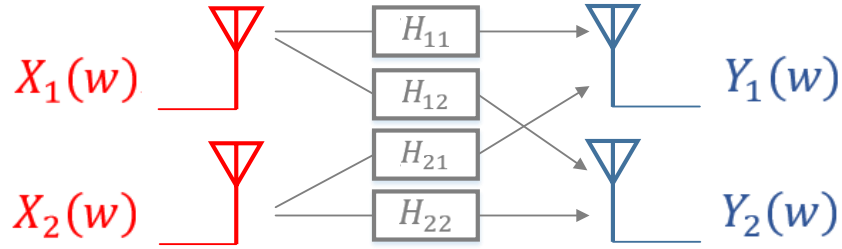
$$Y_1(w) = X_1(w)H_{11}(w) + X_2(w)H_{12}(w) + N_1(w) \quad (3.4)$$

$$Y_2(w) = X_1(w)H_{21}(w) + X_2(w)H_{22}(w) + N_2(w) \quad (3.5)$$

Denklemler matris formunda yazılacak olursa Denklem 3.6 şeklinde gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} Y_1(w) \\ Y_2(w) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(w) & H_{12}(w) \\ H_{21}(w) & H_{22}(w) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(w) \\ X_2(w) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1(w) \\ N_2(w) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Burada dürtü yanıtlarının oluşturduğu matris kanal matrisi olarak ifade edilebilir.



Şekil 3.6. 2x2 MIMO Haberleşme

MIMO haberleşmede Şekil 3.6’da görüldüğü üzere alıcı ve verici anten sayısının çarpımı adedince iletişim hattı vardır. N adet alıcı ve vericiden oluşan bir sistemin de N^2 adet haberleşme kanalı vardır. $N \times N$ ’lik bir MIMO haberleşmesinin oluşturduğu kanal matrisi ise Denklem 3.7 ile ifade edilir.

$$H_{N \times N} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots \\ h_{21} & h_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & h_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

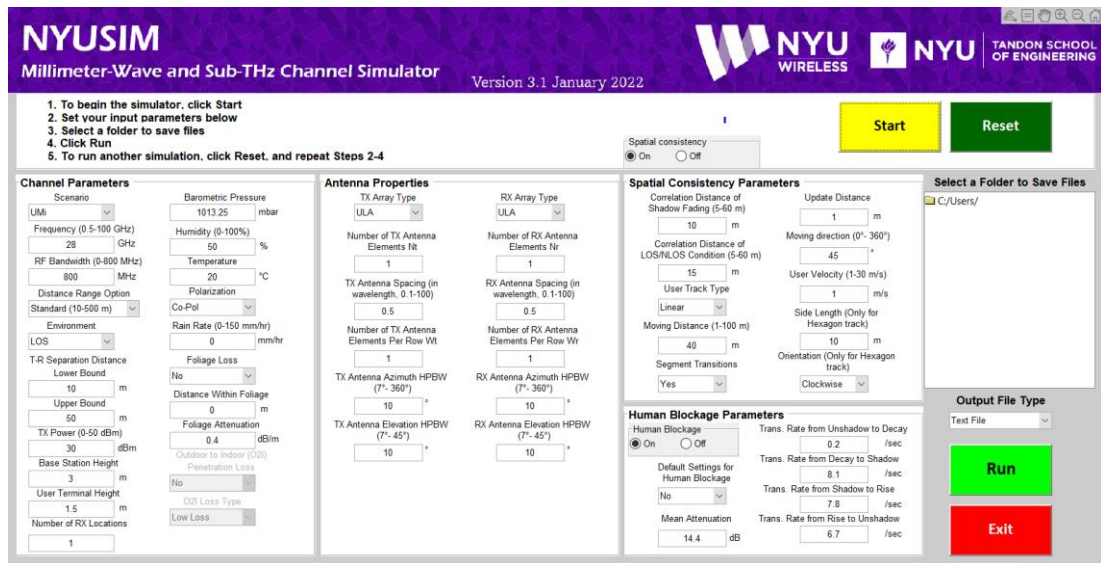
3.2. NYUSIM Kanal Modeli

NYUSIM Kanal Modeli, New York Üniversitesi akademisyenleri tarafından 2017 yılında geliştirilmiştir. Kanal benzetimci MATLAB 2021b ile yazılmış bir GUI dosyası halinde açık erişime sunulmuştur. Bu tez çalışmasında NYUSIM sürüm 3.1 kullanılmıştır.

NYUSIM kanal benzetimci Monte Carlo benzetimlerini gerçekleştirir ve temel olarak iki farklı modu bulunmaktadır; uzamsal tutarlılık modu açık veya kapalı. Uzamsal tutarlılık açık olduğu takdirde zamanda ve frekansta seçici kanal oluşturur.

Bu çalışmada kullanılan kapalı modda ise, kanal Doppler kaymasından bağımsız, gecikmeli ve sönümlenmeli yankılardan oluşan, zaman seçici bir kanal oluşturur.

NYUSIM, çeşitli dış mekân senaryolarında 28-73 GHz frekanslarında gerçekleştirilen ölçümlere dayanan İstatistiksel Uzamsal Kanal Modeli (Statistical Spatial Consistency Mode, SSCM) kullanır. Bu sebeplerden NYUSIM kanal benzetimcisi rastsal kanal modelleri oluşturur. Kanal modeli, zamansal ve uzamsal istatistikleri bölerek Kanal Darbe Yanıtlarını (Channel Impulse Response, CIR) oluşturmak için Zaman Kümeleri (Time Cluster, TC) ve Uzaysal Loblar (Spatial Lobe, SL) kavramını kullanır. Zaman kümeleri, zamanda yakın hareket eden ve potansiyel olarak farklı açılardan kısa bir fazla gecikme süresi penceresinde gelen Çok Yollu Bileşenlerden (Multipath Carrier, MPC) oluşur. Zaman kümeli uzamsal lob yaklaşımı, saha gözlemlerinden türetilen fiziksel tabanlı bir kümeleme şeması uygular ve TC ve SL istatistiklerini çıkarmak için kullanılır. Yankı gecikmesi profilleri oluşturulurken Rician dağılım modeli kullanılır.



Şekil 3.7. NYUSIM modelleyici arayüzü

Kanal modelleyici temel olarak dört başlık altında incelenebilir, bunlar; kanal parametreleri, anten özellikleri, uzamsal tutarlılık ve insan blokaj parametreleridir.

Kanal parametreleri içerisinde haberleşmenin gerçekleştiği ortamın türü ile ilgili senaryo seçilebilir. Bunlar Kentsel Mikrohücre (Urban Microcell, UMi), Kentsel Makrohücre (Urban Macrocell, UMa), Kırsal Makrohücre (Rural Macrocell, RMa) ve kapalı erişim noktasıdır (Indoor Hotspot, InH). En temel parametrelerden

olan frekans ise 500 kHz ile 100 GHz aralığında değerler alabilir. Yani bu kanal benzetimcisi 5G için kullanılan milimetre dalga bandını modelleyebilir. Bir diğer parametre bant genişliğidir ve 0-800 MHz aralığında değerler alabilir. Mesafe aralığı seçeneği ve üst-alt sınır seçenekleri ise verici-alıcı anten mesafesini ayarlamak için kullanılabilir. Çevre ayarlama seçeneğinden ise LOS/NLOS durumu ayarlanabilir. Aynı zamanda verici anten gücü dB cinsinden, baz istasyonu ve kullanıcı yükseklikleri metre cinsinden girilebilir. İklim şartları ise barometrik basınç (max 1013.25mbar), nem yüzdesi, sıcaklık (-100°C-50°C), yağış oranı (0-150 mm/s) olarak belirlenebilir. Verici ve alıcı antenler arasındaki polarizasyon ilişkisi de belirlenebilir. Çevresel bitki örtüsünün kaybı da kanala elenebilir. İç mekân ve dış mekân arasındaki geçiş kaybı kapatılıp açılabilir ve aynı zamanda açık olduğu durumlarda düşük veya yüksek kayıp olarak ayarlanabilir.

Anten özelliklerinde verici ve alıcı anten gruplarının özellikleri belirlenir. Burada alıcı ve verici anten sayıları ve bu antenlerin baz istasyonundaki yerleşim düzeni seçilebilir. Bir anten grubundaki antenler arasındaki mesafelerde taşıyıcı dalga boyu cinsinden ayarlanabilir. Aynı zamanda azimuth ve yüksekli açıları da değiştirilebilir.

Uzamsal tutarlılık sekmesinde kullanıcı hızı, hareket mesafesi ve yönelimi ve özislili mesafeleri değiştirilebilir. Fakat bu tez çalışmasında bu sekme kapalıdır. İnsan blokaj etkisi ise genel olarak alıcı antenin azimuth açıları ile ilgilidir.

3.2.1. Yol Kaybı Modeli

Aynı zamanda büyük ölçekli yol kaybı modeli olarak ta adlandırılan NYUSIM tarafından kullanılan, close-in free space reference distance (CI) yol kaybı modeli 1 metre mesafe referans alınarak ve ayrıyeten çeşitli atmosferik koşullara göre değişen Denklem 3.8 gibidir. NYUSIM yakın mesafeler CI parametresini ve yol kaybı üssünü aynı anda kullanır. Bunlar nihayetinde farklı ortam koşullarında daha fazla kararlılık sağlar.

$$PL^{CI}(f, d) = FSPL(f, 1m)[dB] + 10n\log_{10}(d) + AT[dB] + X_{\sigma} \quad (3.8)$$

Burada n yol kaybının derecesini temsil eder ve bu değer boş uzay için 2 olarak belirlenmiştir. Alıcı verici arasındaki mesafe ise d ile gösterilmiştir. X_{σ} ise shadow fading olarak adlandırılır. Bu değer dB cinsinden σ standart sapma ve sıfır

ortalamalı log-normal rastgele değişken olarak modellenir. 1 metre referans mesafeli boş uzay yol kabı modeli (Free Space Path Loss, *FSPL*) ise Denklem 3.9 ile ifade edilir.

$$FSPL(f, 1m)[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f \times 10^9}{c} \right) \quad (3.9)$$

$$= 32.4[dB] + 20 \log_{10}(f)$$

Burada f GHz cinsinden taşıyıcı frekansını c ise ışık hızını gösterir. Atmosferik sönümlenme ise Denklem 3.10 ile gösterilir. Burada α sönümlenme katsayısını hava kurluğu, nem, yağmur, oksijen ve buhar cinsinden gösterir.

$$AT[dB] = \alpha[dB/m] + d[m] \quad (3.10)$$

Alınan sinyalin gücü Friis bağıntısıyla doğrudan ilişkili ve yol kaybı ile bağlantılı şekilde Denklem 3.11 gibidir.

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] + G_t[dB] + G_r[dB] + PL(d)[dB] \quad (3.11)$$

Burada P_t verici anten gücünü G_t ve G_r sırasıyla verici ve alıcı anten kazançlarını gösterir. Ortalama yol kaybı ise $PL(d)$ şeklinde ifade edilir. 500 metreden daha düşük mesafeler için modellenen kanallarda mümkün olan en yüksek yol kaybı NYUSIM tarafından 190 dB olarak belirlenmiştir. Bu değer gerçek saha ölçümleri yardımıyla hesaplanmıştır.

3.2.2. MIMO-OFDM Kanal Modeli

Her bir yankı için kapasite analizini ayrı ayrı yapmak yerine tüm frekans bölgesiyle tek seferde kapasite hesaplamak daha ergonomiktir. NYUSIM modelleyicisinde her bir MIMO-OFDM alt taşıyıcısının kanal katsayısı Denklem 3.12 ile hesaplanır.

$$h_{m,k}(f) \quad (3.12)$$

$$= \sum_p \alpha_{m,k,p} e^{j\Phi_{m,k,p}} e^{-j2\pi f \tau_{m,k,p}} e^{-j2\pi d_T m \sin(\theta_{m,k,p})} e^{-j2\pi d_R k \sin(\varphi_{m,k,p})}$$

Burada m verici, k alıcı anten sayısını f ise alt taşıyıcı frekansını belirtir. Anlamalı çok yollu bileşenler ise p ile gösterilir, bu sayede gürültü seviyesindeki

yankı bileşenleri bu hesaba katılmaz. α anten kazancının genliğini, Φ her bir çok yollu bileşenin fazını, τ yankıların gecikmesini, d_T ve d_R ise anten gruplarında her bir anten arasındaki mesafeyi verici ve alıcı anten grupları için sırasıyla gösterir. \emptyset ve φ ise yine sırasıyla bu antenlerin ayrılma ve varış azimuth açılarını ifade eder (Angel of Departures, AOD, Angel of Arrivals, AOA). Böylece oluşturulan $h_{m,k}$ matrisi kanal matrisi olarak kullanılır.

3.3. MIMO Kanal Kapasitesi

Haberleşme kanalının, haberleşme kalitesine olan etkisi kanal kapasitesi analizi ile değerlendirilebilir. Tek girişli tek çıkışlı sistemler için kanal kapasitesi Shannon kapasitesi olarak Denklem 3.13'deki gibi ifade edilir.

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (3.13)$$

MIMO kanallar için ise teoride kanal kapasitesi verici(N_t) ve alıcı(N_r) sayıları kıyaslandığında, hangisi daha küçük ise ($\min(N_t, N_r)$), Tek Giriş Tek Çıkış (Single Input Single Output, SISO) kapasitenin o sayıyla çarpılması ile elde edilir. Fakat gerçek koşullar altında gerçekçi bir yaklaşım değildir. MIMO kanallar için kapasite formülü Denklem 3.14 şeklinde değiştirilmiştir.

$$C = B \log_2[\det(I_m + SNR.H.H')] \quad (3.14)$$

H kanal matrisi ifade ederken H' kanal matrisinin konjuge transpozunu ifade eder. I_m ise identity $N_t \times N_r$ boyutlarında birim matrisi ifade eder. Formül sonrasında Denklem 3.15 ile geliştirilmiştir.

$$C = B \sum_1^r \log_2(1 + SNR.\lambda_i^2) \quad (3.15)$$

Burada λ_i^2 , $H.H'$ matrisinin öz değerlerini ifade eder. Bu işlem kanal kapasitesinde öz kanalların ilişkileri kullanıldığı için yapılır ve Denklem 3.16 ile ifade edilir.

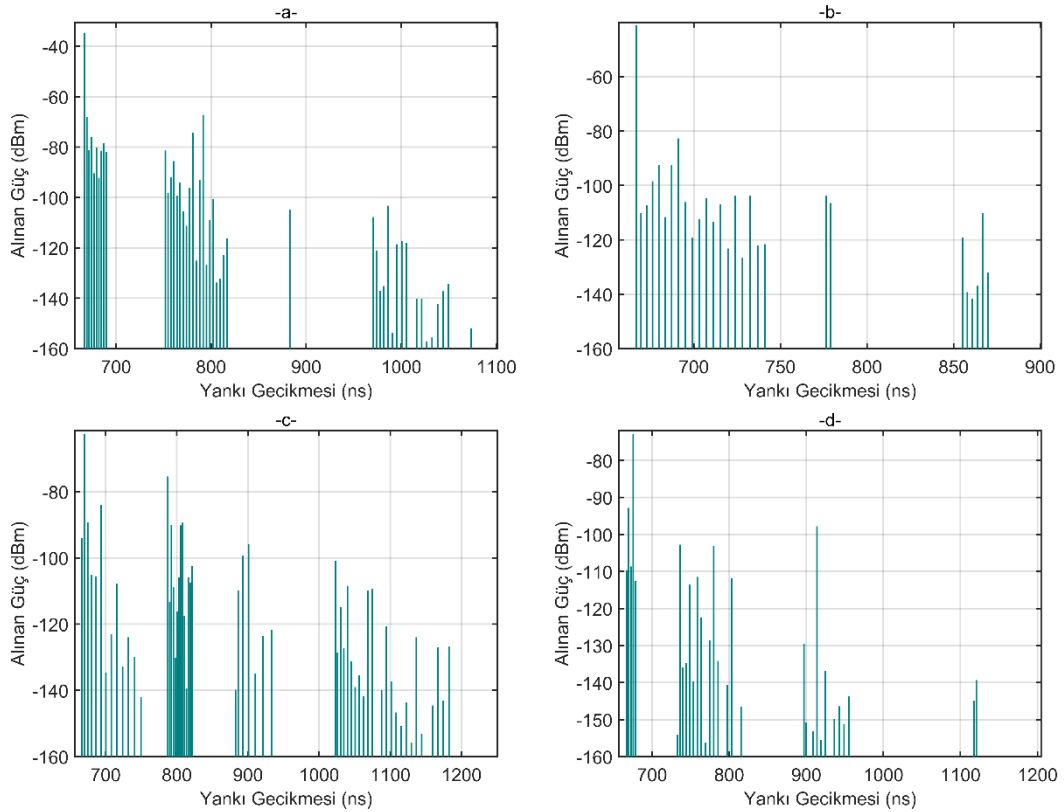
$$\lambda_i^2 = eig(H.H') \quad (3.16)$$

Kapasite analizi zaman veya frekans bölgesinde gerçekleştirilebilir. Zaman bölgesinde kapasite hesabı gecikmeli gelen her bir yankının analizi ile mümkündür.

Frekans bölgesinde ise tüm OFDM alt taşıyıcılarının analizi ile kapasite hesaplamak mümkündür ve bu tez çalışmasında analizler bu yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

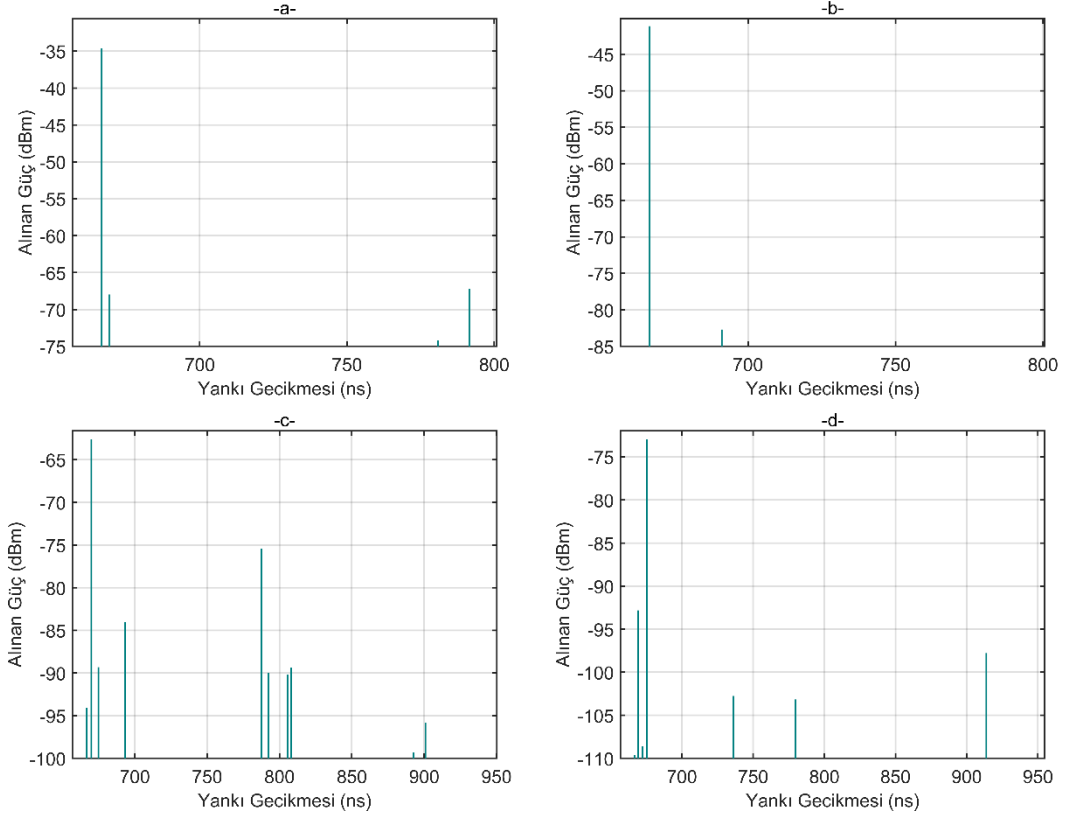
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sonuçlar temel olarak iki aşamada incelenmiştir. İlk aşamada sistem parametrelerinin kanal üzerindeki etkisi kapasite analiziyle incelenmiştir. Bu aşamada 5G sistemlerince kullanılması planlanan 28 ve 39 GHz frekansları (Juneja, Pratap, & Sharma, 2021), MIMO anten sayıları (Ameen, 2017) ve farklı görüş hattı uygulamaları ile sınanmıştır. Aynı zamanda iklim etkileri ve alıcı-verici mesafelerinin de kanal kapasitelerine etkileri incelenmiştir. Yine bu aşamada NYUSIM kanal modelleyicisinin farklı ortam senaryolarının da kapasite analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise Samsun Meteoroloji 10. Bölge Müdürlüğü'nden alınan iklim verileri ile üç ayrı ölçüm merkezi modellenmiştir. Sonuçlar için oluşturulan kanallara birer örnek olacak şekilde 28 ve 39 GHz frekanslarının LOS ve NLOS olma durumlarına göre PDP'ler Şekil 4.1 ile gösterilmiştir. Gecikmeli gelen her bir yankı ve bu yankıların vericiden alıcıya ulaşma süreleri dBm cinsinden gösterilmektedir.



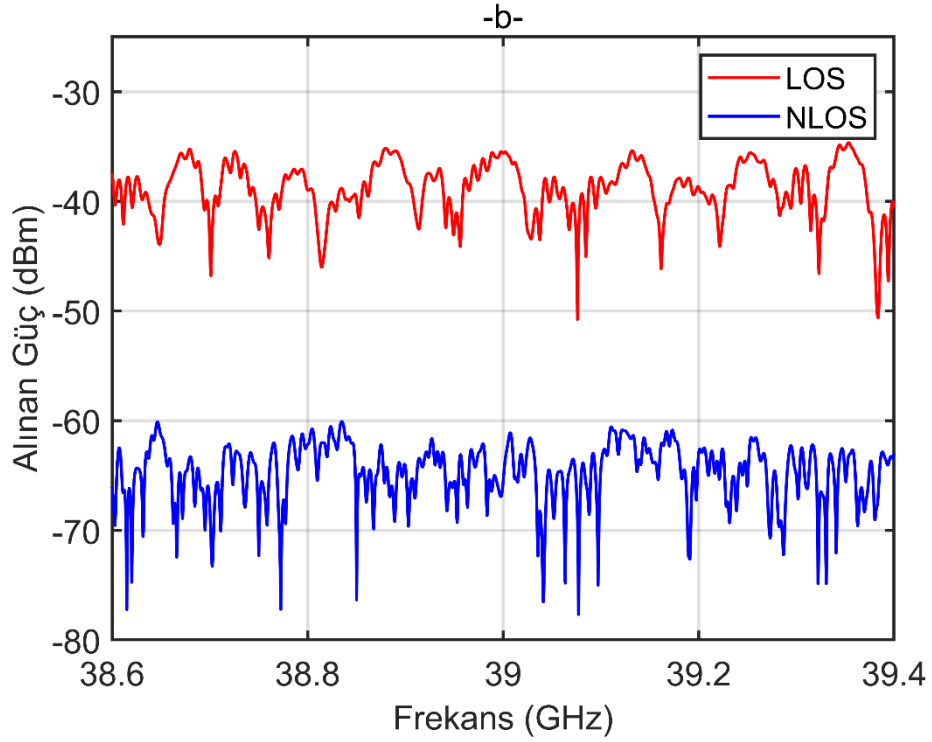
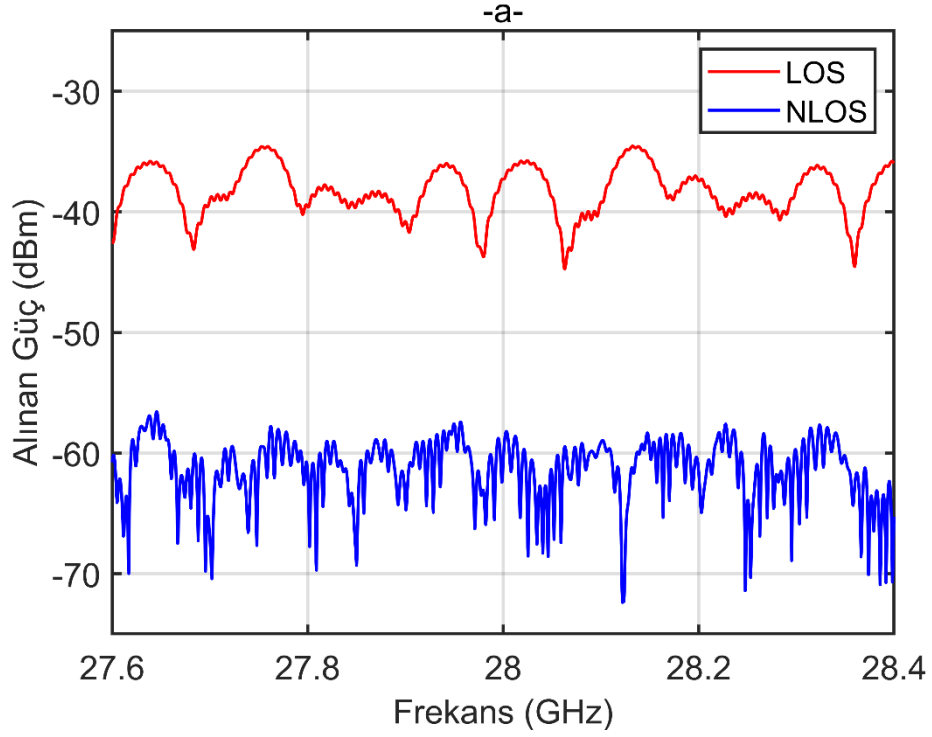
Şekil 4.1. UMi senaryo için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

PDP'leri verilen kanallar, en güçlü yankı referans olacak şekilde, bu yankının 40 dB altına kadar olan veriler saklanarak PDP'ler tekrardan çizdirilmiştir. Şekil 4.2 ile görüldüğü üzere LOS durumunda 28 ve 39 GHz için en güçlü yankılar neredeyse tek başlarına kalmışlardır. Fakat NLOS durumda en güçlü yankının yanında farklı yayılım zamanlarında farklı güçlerde yankılar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. UMi senaryo için yaklaşılandırılmış PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

PDP'leri verilen kanalların frekans bölgesi yanıtları Şekil 4.3 ile gösterilmiştir. 800 MHz bant genişliği altında 500 kHz'lik 1601 adet OFDM alt taşıyıcısıyla kanallar oluşturulmuştur. Kapasite analizi de frekans yanıtı ile hesaplanmıştır. Bu frekans yanıtları 4x4 MIMO yapısı içerisindeki 16 adet kanaldan yalnızca bir tanesidir. Diğer kanallarda, hem alıcı hem de verici antenlerin özdeş ve birbirlerine çok yakın olmaları, yani çıkış ve varış açılarının birbirlerine benzer olması sebebiyle birbirlerine benzer özellik göstermektedir.



Şekil 4.3. UMi senaryo için, LOS ve NLOS durumlarında oluşturulan kanalların frekans yanıtları a) 28 GHz b) 39 GHz

4.1. Kanal Parametrelerinin Analizi

Kanal parametrelerinin kanal kapasitesine olan etkisinin incelendiği ilk aşamada çevresel faktörler, ortam senaryoları ve anten özellikleri sabit tutulmuştur

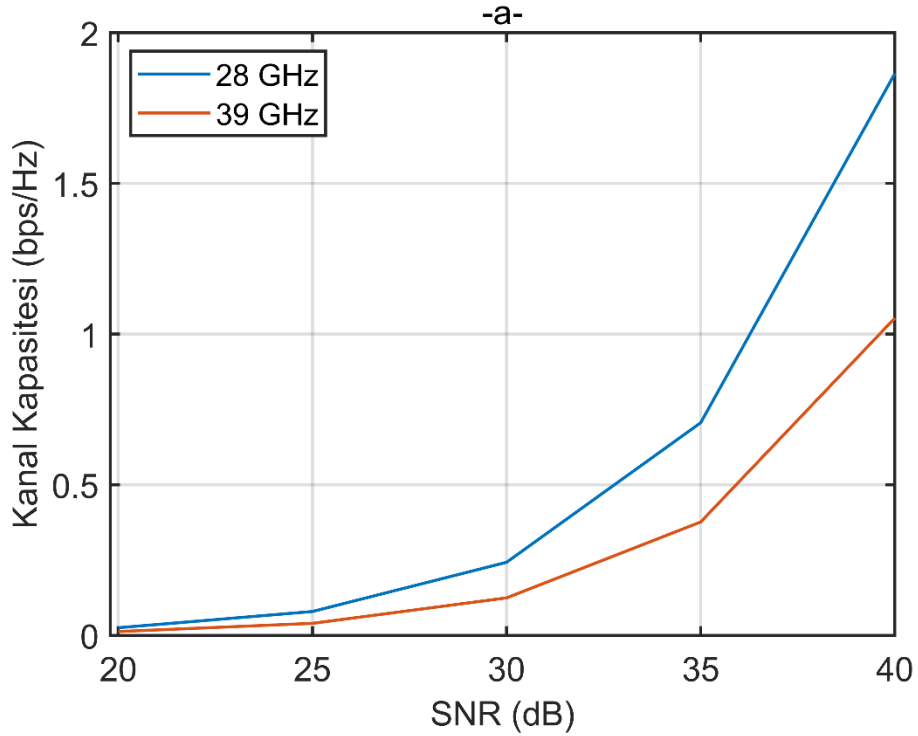
ve parametreler Tablo 4.1 ile gösterilmiştir. Sıcaklık, basınç, nem ve yağış parametreleri NYUSIM kanal modelleyicisi oluşturulurken, NYU tarafından ölçümlerin alındığı ortamın parametreleri ile aynı alınmıştır. Dört farklı senaryo için çeşitli MIMO anten sayıları ile bu analizler gerçekleştirilmiştir. Bu dört farklı senaryoda LOS ve NLOS görüş hattı olan uygulamalar için ayrı ayrı 28 ve 39 GHz taşıyıcı frekanslı kanallar kullanılmıştır. NYUSIM kanal modelleyicisi rastsal bir model ürettiğinden her bir benzetim sonucunda kanal kapasiteleri birbirinden farklı çıkmaktadır. Bu yüzden her bir senaryo en az 2000 kere tekrar edilmiş ve bu tekrarlar boyunca üretilen her bir kanalın kapasitesi hesaplanıp tüm kanalların kapasitelerinin ortalaması sonuç olarak alınmıştır. Bu sistem sonuçlar kısmındaki her bir kapasite için ayrı ayrı uygulanmıştır.

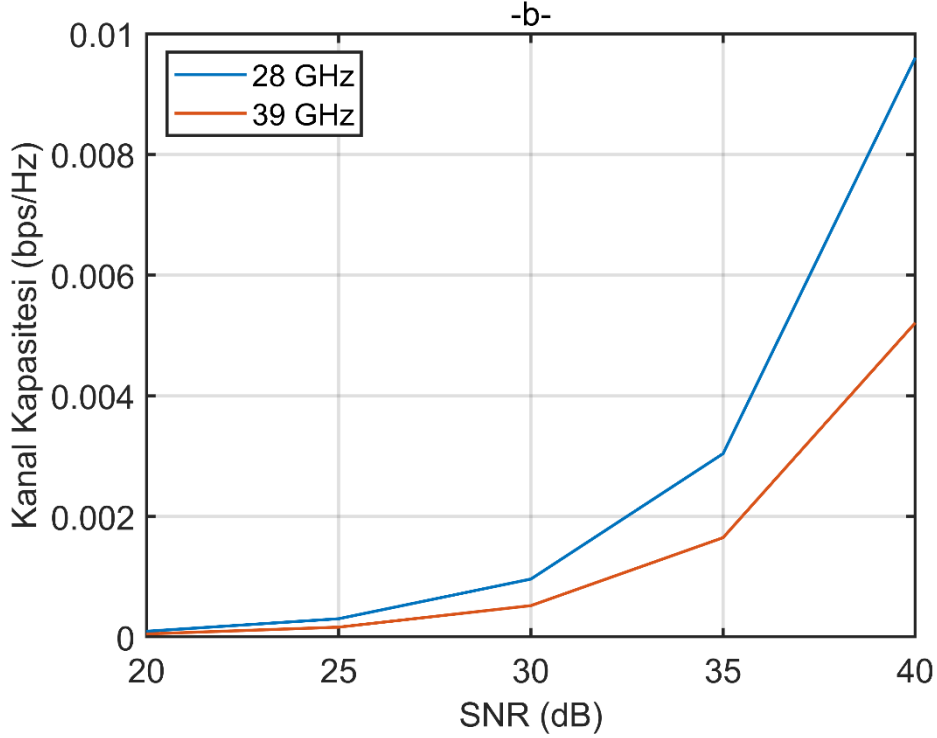
Tablo 4.1. NYUSIM kanal parametreleri

Kanal Parametresi	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4
Bant Genişliği (MHz)	800	800	800	800
Frekans (GHz)	28	28	39	39
Verici Gücü (dB)	30	3	3	3
Ortam	UMi	UMi	UMi	UMi
Görüş Hattı	LOS	NLOS	LOS	NLOS
Mesafe (metre)	200	200	200	200
Baz İstasyonu Yüksekliği (metre)	20	20	20	20
Kullanıcı Yüksekliği (metre)	1.50	1.50	1.50	1.50
Barometrik Basınç (mbar)	1013.25	1013.25	1013.25	1013.25
Nem (%)	80	80	80	80
Sıcaklık (°C)	20	20	2	20
Polarizasyon	Co-Pol	Co-Pol	Co-Pol	Co-Pol
Yağmur Oranı (mm/saat)	5	5	5	5
Yeşillik Kaybı	Yok	Yok	Yok	Yok
Tx/Rx Anten Tipi	ULA	ULA	ULA	ULA
Tx/Rx Anten Boşluğu	0.5	0.5	0.5	0.5
Tx/Rx Azimuth Açısı	10°	10°	10°	10°
Tx/Rx Anten Yükseltisi	10°	10°	10°	10°
Uzamsal Tutarlılık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı
MIMO Anten Çifti Sayısı	2-64	2-64	2-64	2-64

4.1.1. Frekans Analizi

Başlangıç olarak milimetre dalga haberleşmesinin getirdiği en büyük yenilik olan yüksek frekans bölgesinde kapasite analizi gerçekleştirilmiştir. Kıyaslama olarak literatürde çokça kullanılan, atmosferik sönümlenmenin bölgesel olarak en aza indiği, aynı zamanda 5G sistemleri için kullanılması planlanan 28 ve 39 GHz taşıyıcı frekansları altında kanal kapasiteleri 4x4 anten dizilimleri ile incelenmiştir. SNR değeri 20 dB ile 40 dB arasında değişirken kanal kapasiteleri hesaplanmıştır ve Şekil 4.4 ile gösterilmiştir. LOS ortam, 40 dB için kanal kapasitelerine bakıldığında 28 GHz frekansı kullanıldığında kapasite 1.8647 iken 39 GHz için bu değer 1.0531 olarak hesaplanmıştır. Eşit şartlar altın LOS ortam için 28 GHz frekansı 1.77 kat daha büyük kanal kapasitesine sahiptir. NLOS ortam için aynı incelemeler yapıldığında 28 GHz için kanal kapasitesi 0.0096 iken 39 GHz için 0.0052'dir. NLOS ortam için de 28 GHz frekansının 1.85 kat daha büyük kapasiteye sahip olduğu görülmektedir.

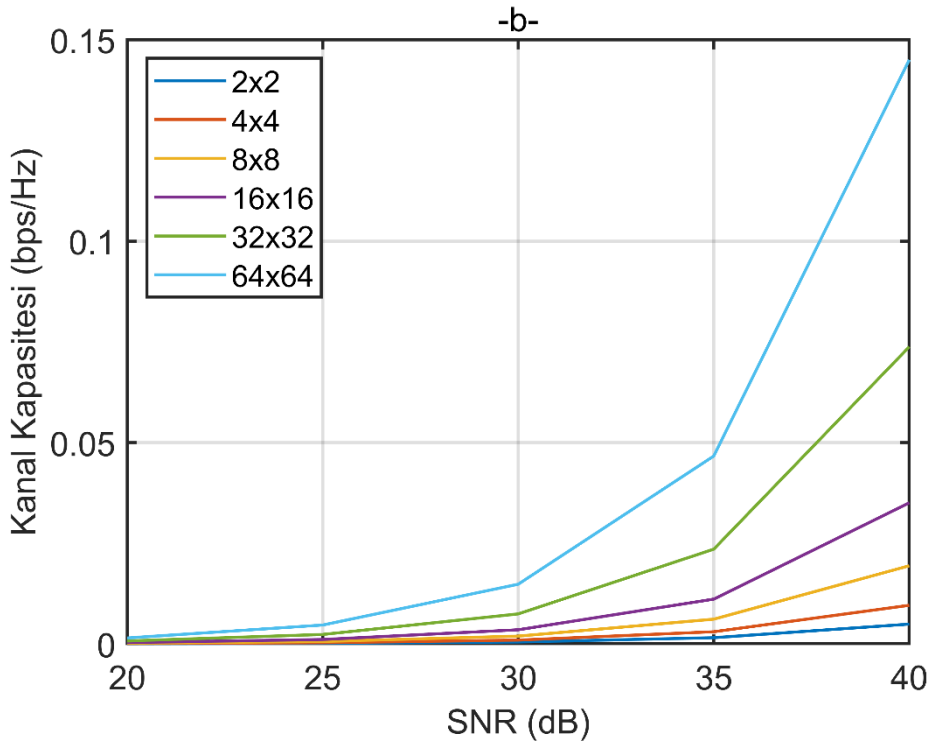
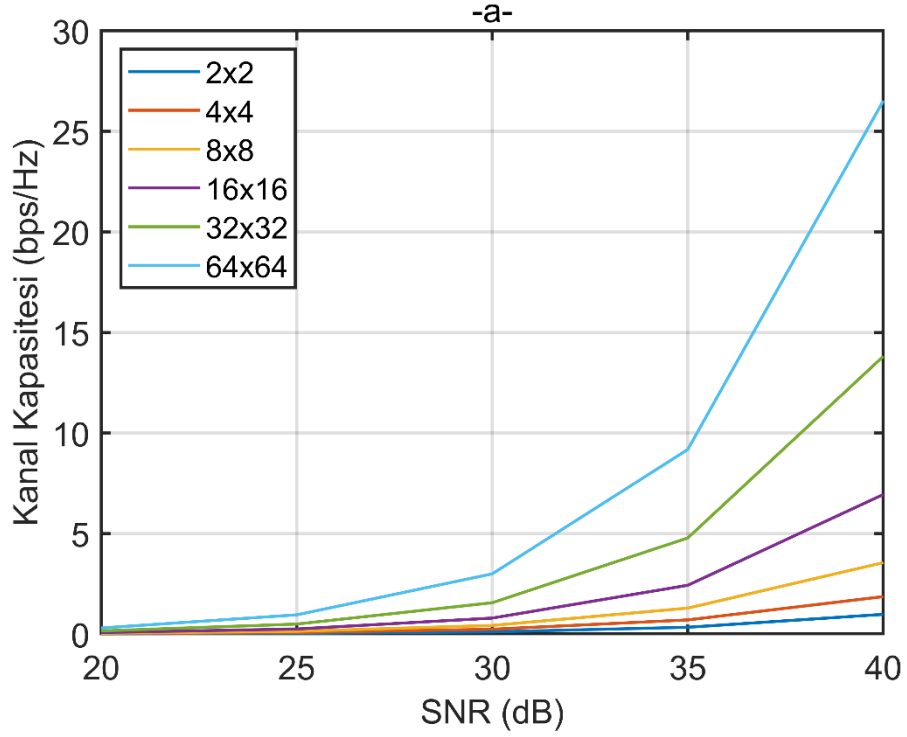




Şekil 4.4. Frekansın kanal kapasitesine etkisi a) LOS b) NLOS

4.1.2. MIMO Anten Sayısı Analiz

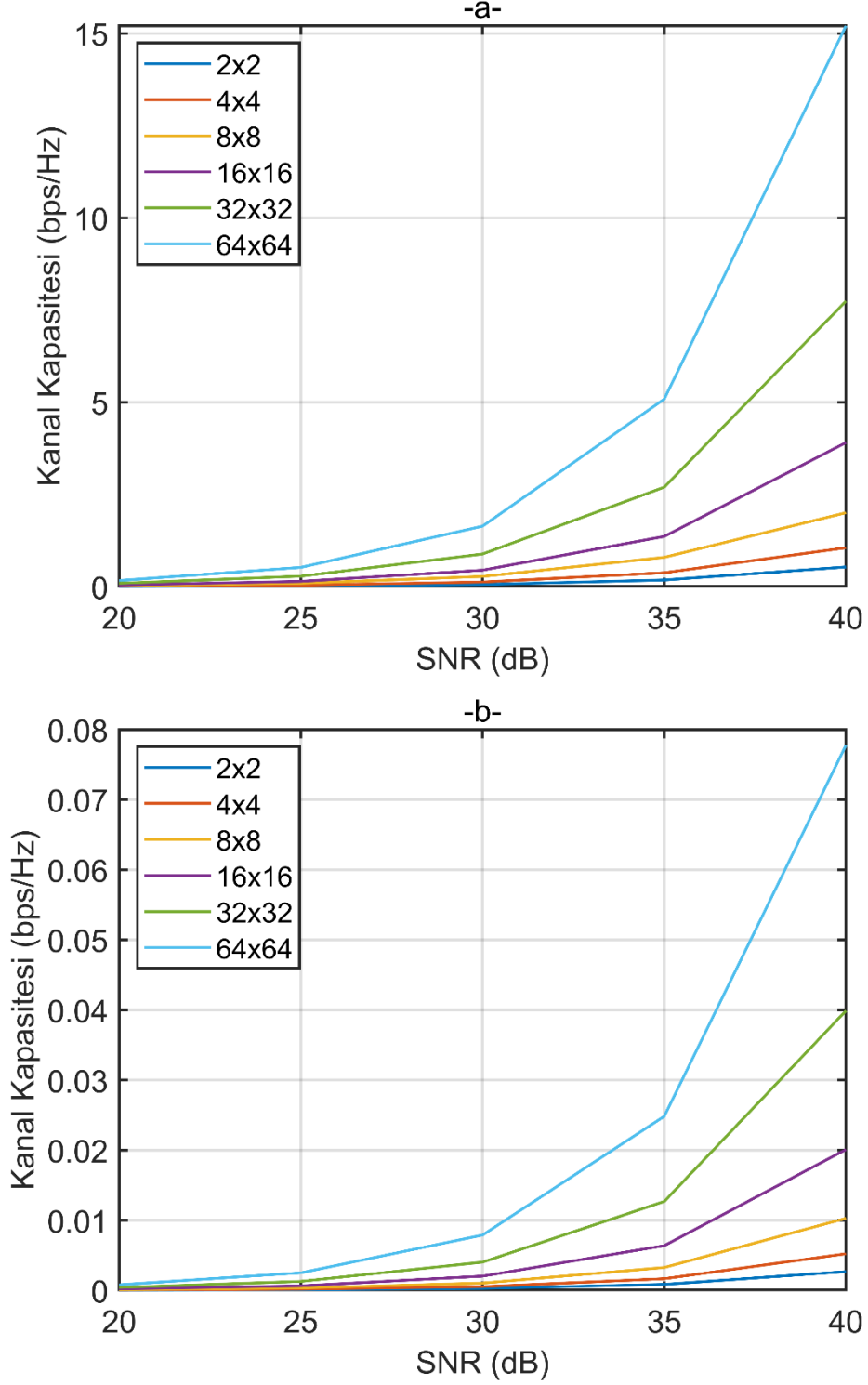
5G ve sonrası için planlanan mmDalga teknolojisinin bir diğer getirisi masif MIMO anten kullanımınıdır. Fakat masif MIMO iç mekan için kullanımı planlanmakta olup, dış mekan senaryolarda 2x4, 2x8, 4x2, 4x4 gibi uygulamalar planlanmaktadır (Qamar et al., 2017; Yılmaz et al., 2015). Bu çalışmada analizler 4x4 MIMO uygulamaları ile gerçekleştirilmiştir. Frekanslar yine 28 ve 39 GHz seçilmiş ve antenler arasında doğrudan bir görüşün olup olmamasına göre veriler analiz edilmiştir. Bu durumda çeşitli büyüklükteki MIMO anten sayılarında kanal kapasitesi analiz edilmiştir. Şekil 4.5'te, belirtilen kanal parametreleri altında 20-40 dB SNR aralığında anten dizilimlerinin kanal kapasiteleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde artan SNR ile birlikte kanal kapasitesinin de üstel şekilde arttığı görülmektedir. LOS durumu, 2x2 MIMO yapısı ve 40 dB için kanal kapasitesi 0.9821'dir. Bu değer 64x64 için 26.5160 olup 2x2'lik MIMO'ya göre kanal kapasitesi 27 kat büyüktür. NLOS durumu, 2x2 MIMO yapısı ve 40 dB için kanal kapasitesi 0.0049'dir. 64x64 için ise bu değer 0.1450 olup 2x2 ile arasındaki fark 29.59 kattır.



Şekil 4.5. 28 GHz frekansında, MIMO anten sayısının kanal kapasitesine etkisi a)LOS b)NLOS

39 GHz frekansı için LOS ve NLOS durumları için kanal kapasitesin SNR ile değişimleri Şekil 4.6 ile verilmiştir. LOS iletim hatlı 2x2 MIMO kanalının kapasitesi NYUSIM modelinde 40 dB SNR için 0.5320 hesaplanmıştır. Bu değer 64x64 için ise

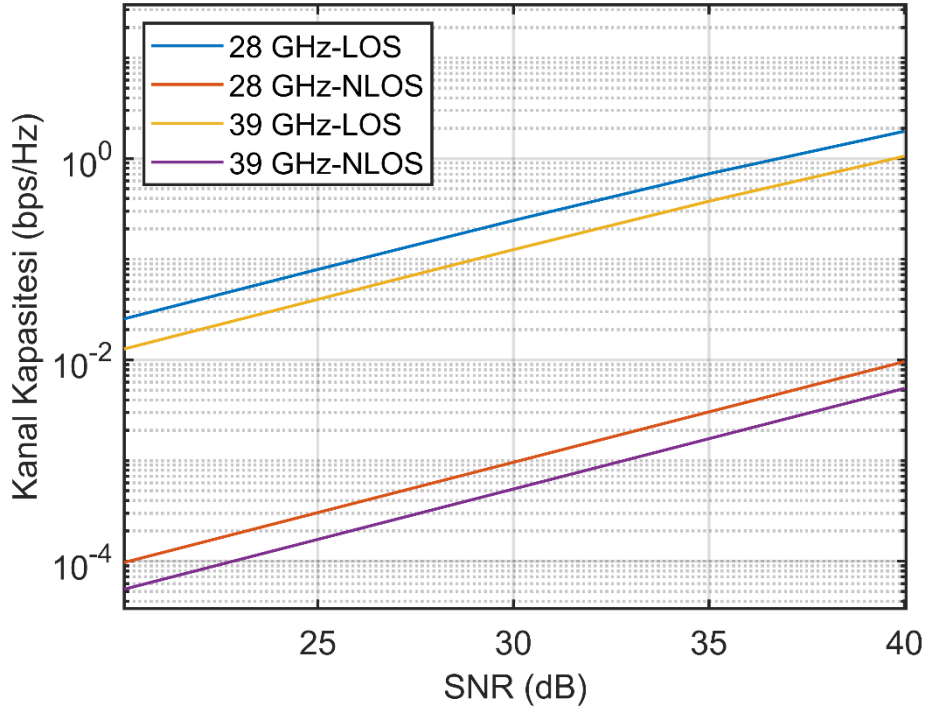
15.2066 olup 2x2'lik yapıya göre kanal kapasitesi 28.58 kat büyüktür. NLOS, 40 dB, 2x2 MIMO için kanal kapasitesi 0.0026 iken 64x64 için bu değer 0.0777 olup kanal kapasitesindeki fark 29.88 kattır.



Şekil 4.6. 39 GHz frekansında, MIMO anten sayısının kanal kapasitesine etkisi a)LOS b)NLOS

4.1.3. LOS/NLOS Görüş Hattı Analizi

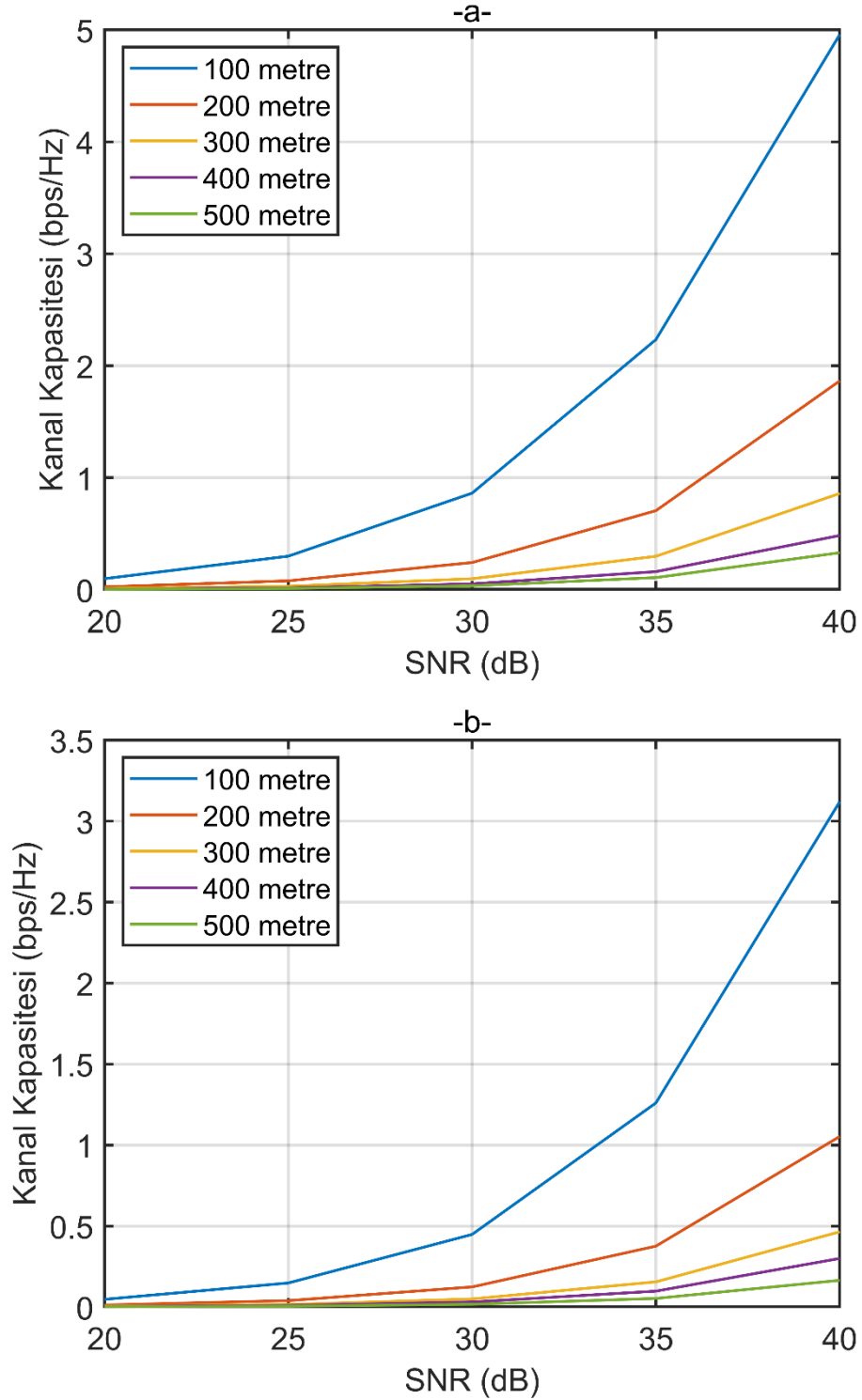
Yine mmDalga haberleşmesinin bir yeniliği olan, verici-alıcı mesafesinin kısalmışından kaynaklanan doğrudan görüş hattının artmasıdır. Bire bir aynı parametrelerle değerlendirilen LOS ve NLOS hatlı iki farklı kanalın kapasiteleri analiz edilmiştir ve Şekil 4.7 ile gösterilmiştir. LOS ve NLOS senaryolar arasında çok büyük kapasite farkları bulunduğu için MATLAB yazılımının ‘semilog’ komutu kullanılarak şekil oluşturulmuştur. Kanallar 4x4 MIMO anten dizilimleri altında incelenmiştir. 28 GHz, LOS ve 40 dB için kanal kapasitesi 1.8647 iken NLOS ortam için bu değer 0.0096’dır. Doğrudan görüşün olduğu durumda kapasite 194.24 kat daha büyük hesaplanmıştır. Aynı değerlendirme 39 GHz için gerçekleştirildiğinde ise LOS için kapasite 1.0531 iken NLOS için bu değer 0.0052’ dir. LOS için hesaplanan kapasite değeri NLOS duruma göre 202.51 kat daha büyüktür.



Şekil 4.7. LOS/NLOS durumlarının 28 ve 39 GHz frekanslarında kanal kapasitesine etkisi

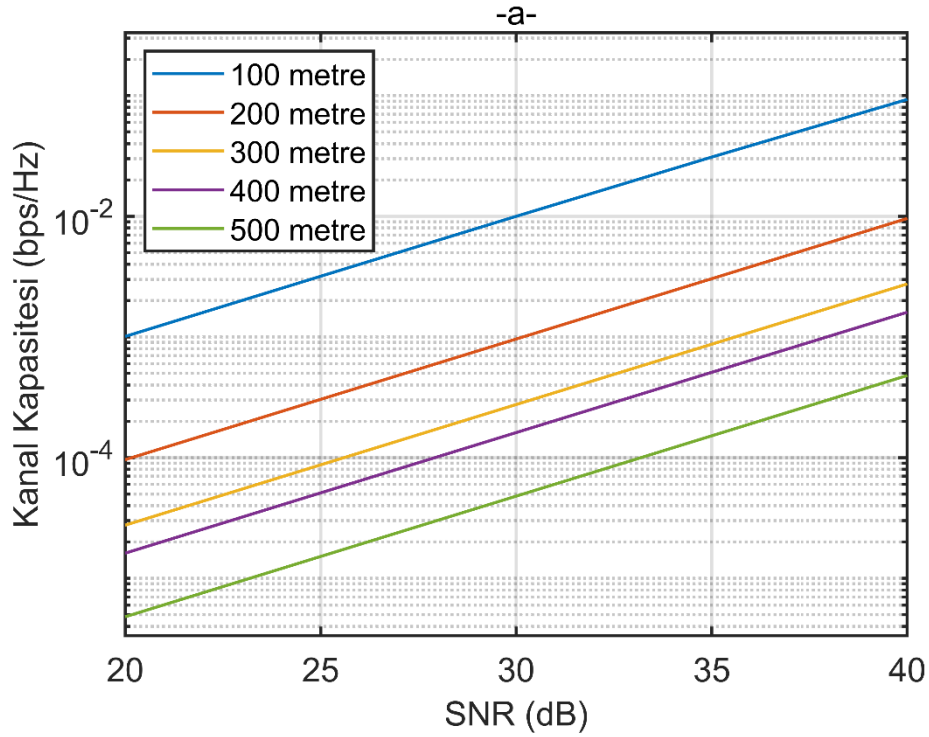
LOS ve NLOS parametrelerinin mesafe ile ilişkisini de incelemek adına diğer tüm parametreler sabit tutularak alıcı-verici mesafesi 100-500 metre arasında değiştirilmiştir. LOS haberleşme için 28 ve 39 GHz frekanslarında analizler gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.8 ile gösterilmiştir. 28 GHz frekansı için 100 metre mesafeli kanal kapasitesi 40 dB SNR ile 4.9577’dir. Bu değer 200 metre için

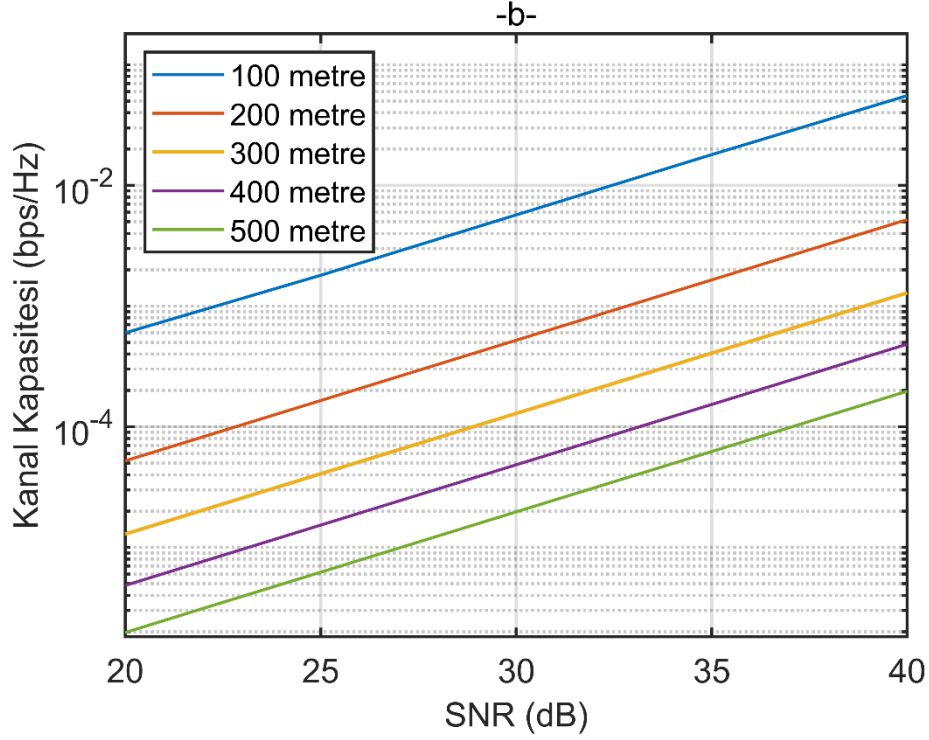
1.8647, 500 metre için ise 0.3303'tür ve 100 metre mesafeli kanal kapasitesi sırasıyla 2.66 ve 15.01 kat daha büyüktür. 39 GHz için aynı sonuçlar 100 metre için 3.1202, 200 metre için 1.0531 ve 500 metre için 0.1651'tir. 100 metre mesafeli kanal kapasitesi 200 metreden 2.96, 500 metreden 18.89 kat daha büyüktür.



Şekil 4.8. LOS durumunda alıcı-verici mesafesinin kanal kapasitesi üzerindeki etkisi a) 28 GHz b) 39 GHz

NLOS haberleşme için Şekil 4.9'da 28 ve 39 GHz frekanslarında analizler gerçekleştirilmiştir. NLOS ortamlarda mesafe ile kapasitenin hızlı düşüşünü göstermek için yine 'semilog' komutu kullanılmıştır. 28 GHz frekansı için 100 metre mesafeli kanal kapasitesi 40 dB SNR ile 0.0930 iken bu değer 200 metre için 0.0096, 500 metre için ise 0.00048'dir. 100 metre mesafeli kanal kapasitesi ile sırasıyla 9.68 ve 193.98 kat fark vardır. 38 GHz için incelendiğinde 100 metre için kanal kapasitesi 0.0555, 200 metre için 0.0052 ve 500 metre için 0.0002'dir. 100 metre mesafeli kanal kapasitesi 200 metreden 10.65, 500 metreden 281.67 kat daha büyüktür. Sonuçlardan görülmüştür ki NLOS haberleşmeye mesafenin etkisi LOS haberleşmeye göre oldukça büyüktür.





Şekil 4.9. NLOS durumunda alıcı-verici mesafesinin kanal kapasitesi üzerindeki etkisi a) 28 GHz b) 39 GHz

Oluşturulan tüm kanalların 40 dB SNR için incelenebilmesi için Tablo 4.2 oluşturulmuştur. Burada aynı koşullar altında kanalların artan anten sayısına, artan frekansa ve LOS/NLOS görüş hattına olan cevapları incelenebilir. Tablo 4.2 incelendiğinde her bir anten sayısı artışında yaklaşık 2 kat artış gözlemlenebilirken, frekansın ve görüş hattının değişimi sonucu kanal kapasitesinin gözle görünür değişimi de incelenebilir. Tüm uygulamalarda frekansın artışı ile kapasite azalırken LOS uygulamalar NLOS uygulamalardan kapasite olarak çok büyüktürler.

Tablo 4.2. 40 dB için farklı senaryolarda kanal kapasiteleri

MIMO	28 GHz		39 GHz	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
2 x 2	0.9821	0.0049	0.5320	0.0026
4 x 4	1.8647	0.0096	1.0531	0.0052
8 x 8	3.5537	0.0194	2.0032	0.0102
16 x 16	6.9418	0.0350	3.9061	0.0200
32 x 32	13.8104	0.0737	7.7416	0.0398
64 x 64	26.5160	0.1450	15.2066	0.0777

4.1.4. Çevresel Faktörlerin Analizi

NYUSIM kanal benzetimleri çeşitli çevresel faktörlerin etkisini kanal üzerinde gösterir. Diğer parametreler sabit tutulurken Tablo 4.3 ile gösterilen barometrik basınç, nem yüzdesi, sıcaklık ve yağmur oranı değişken olarak tutulmuş ve diğer kanal parametreleri sabit tutulmuştur. Analizler 28 ve 39 GHz için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

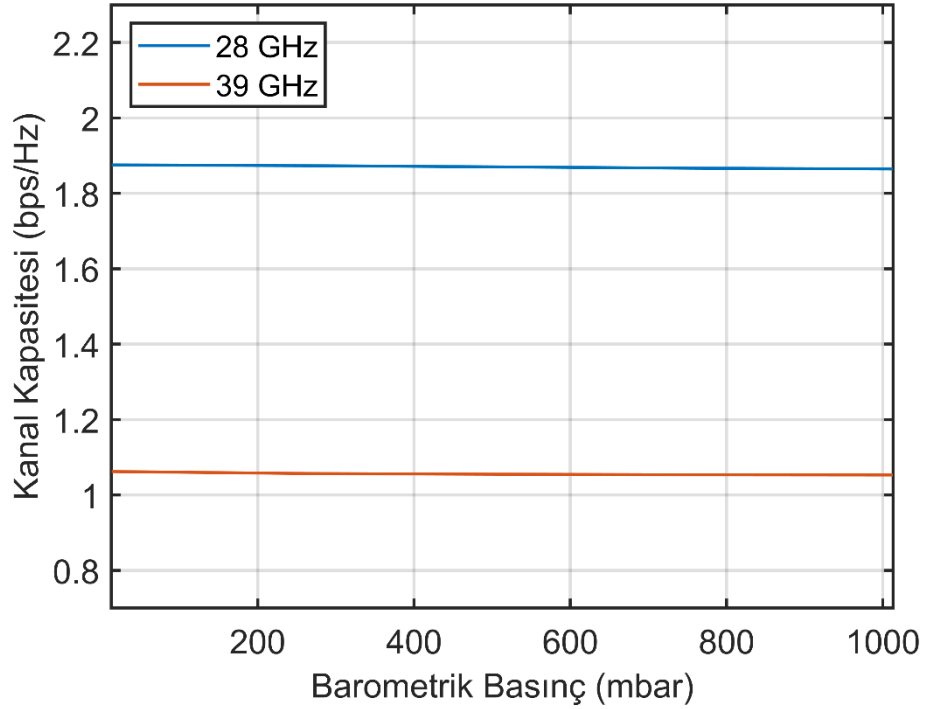
Tablo 4.3. Çevresel faktörlerin analizinde kullanılacak NYUSIM kanal parametreleri

Kanal Parametresi	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4
Bant Genişliği (MHz)	800	800	800	800
Frekans (GHz)	28/39	28/39	28/39	28/39
Verici Gücü (dB)	30	3	3	30
Ortam	UMi	UMi	UMi	UMi
Görüş Hattı	LOS	LOS	LOS	LOS
Mesafe (m)	200	200	200	200
Baz İstasyonu Yüksekliği (m)	20	20	2	2
Kullanıcı Yüksekliği (m)	1.5	1.50	1.50	1.50
Barometrik Basınç (mbar)	Değişken	1013.25	1013.25	1013.25
Nem Yüzdesi (%)	80	Değişken	80	80
Sıcaklık (°C)	20	20	Değişken	20
Yağmur Oranı (mm/saat)	5	5	5	Değişken
Yeşillik Kaybı	Yok	Yok	Yok	Yok
Tx/Rx Anten Tipi	ULA	ULA	ULA	ULA
Tx/Rx Anten Boşluğu	0.5	0.5	0.5	0.5
Tx/Rx Azimuth Açısı	10°	10°	10°	10°
Tx/Rx Anten Yükseltisi	10°	10°	10°	10°
Uzamsal Tutarlılık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı
Tx/Rx Anten Sayısı	4 x 4	4 x 4	4 x 4	4 x 4

4.1.4.1. Barometrik Basınç Etkisi

Barometrik basıncın kanal kapasitesi üzerindeki etkisi Tablo 4.3 ile gösterilen kanal parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Analizler sonucunda belirlenen iki farklı frekansın kapasitelerinin artan basınç ile düşüşü Şekil 4.10 ile gösterilmiştir. Sonuçlar 13 mbar ve 1013.25 mbar basınç değerleri arasında incelenmiştir. Şekilden

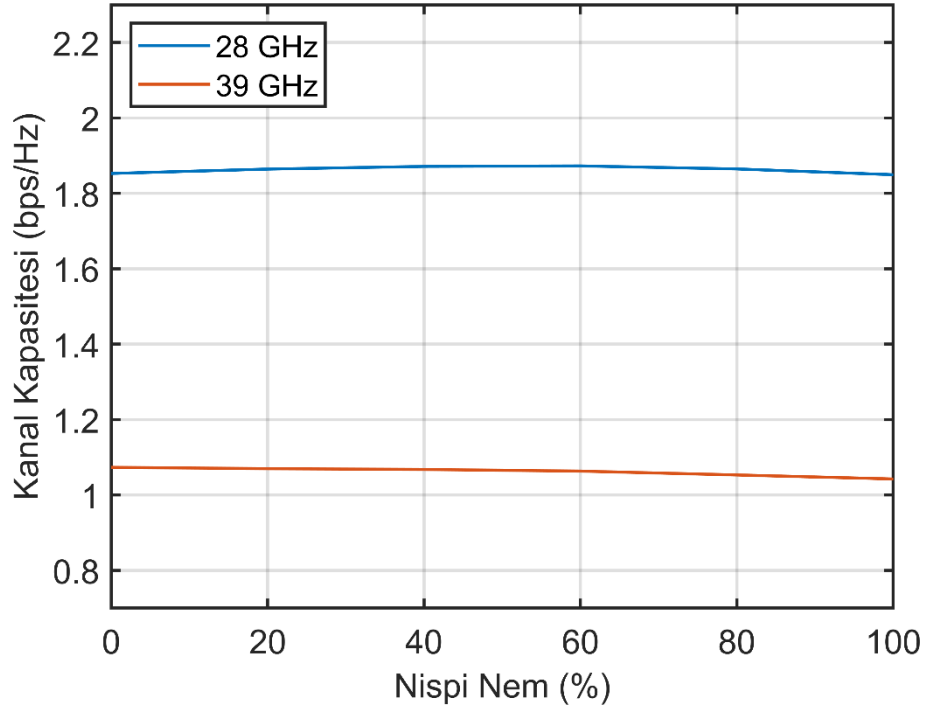
de görüldüğü frekanslarda önemli bir kapasite düşüşü görülmemiştir. 28 GHz frekansı kapasitesi 13 mbar basınç için 1.8753 iken 1013.25 mbar için 1.8647'dir ve kanal kapasitesinde %0.57'lik bir düşüş yaşanmıştır. 39 GHz frekansı incelendiğinde 13 mbar için kapasite 1.0622 iken 1013.25 mbar basınç için 1.0531'dir. Kanal kapasitesinde %0.86 azalma mevcuttur. Artan basınçla birlikte kanal kapasitesindeki daha büyük düşüş 39 GHz frekansı için gerçekleşmiştir fakat iki frekans için de önemli bir düşüş gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.10. Barometrik basıncın kanal kapasitesine etkisi

4.1.4.2. Nispi Nem Etkisi

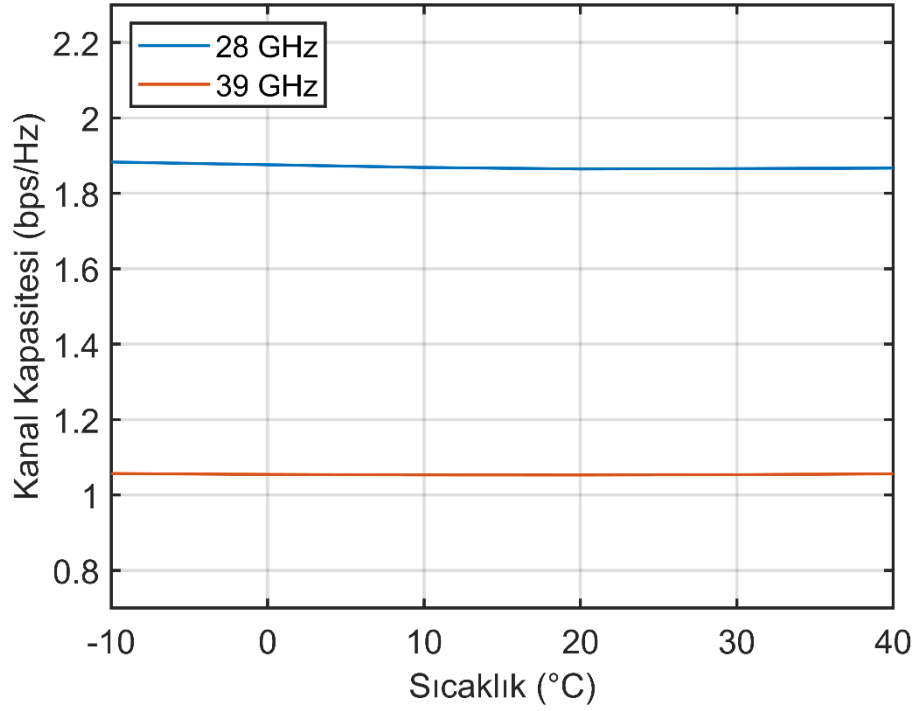
Nem yüzdesinin kanal kapasitesine olan etkisi 28 ve 39 GHz frekansları için incelenmiştir. Nem oranı %0 ve %100 değerleri arasında incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.11 ile gösterilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde 28 GHz frekansı, kanal kapasitesi en yüksek %60 nemli ortamda 1.8727 iken %100 nem olan ortamda 1.8494 olarak en düşük değerini almıştır. Kanal kapasitesinde % 1.24'lük bir düşüş yaşanmıştır. 39 GHz frekansı incelendiğinde %0 nem oranı için kapasite 1.0733 iken %100 için 1.0425'dir ve % 2.86 azalma mevcuttur. Sonuç olarak nem değişiminden daha çok etkilenen frekans 39 GHz olmuştur.



Şekil 4.11. Nem yüzdesinin kanal kapasitesine etkisi

4.1.4.3. Sıcaklık Etkisi

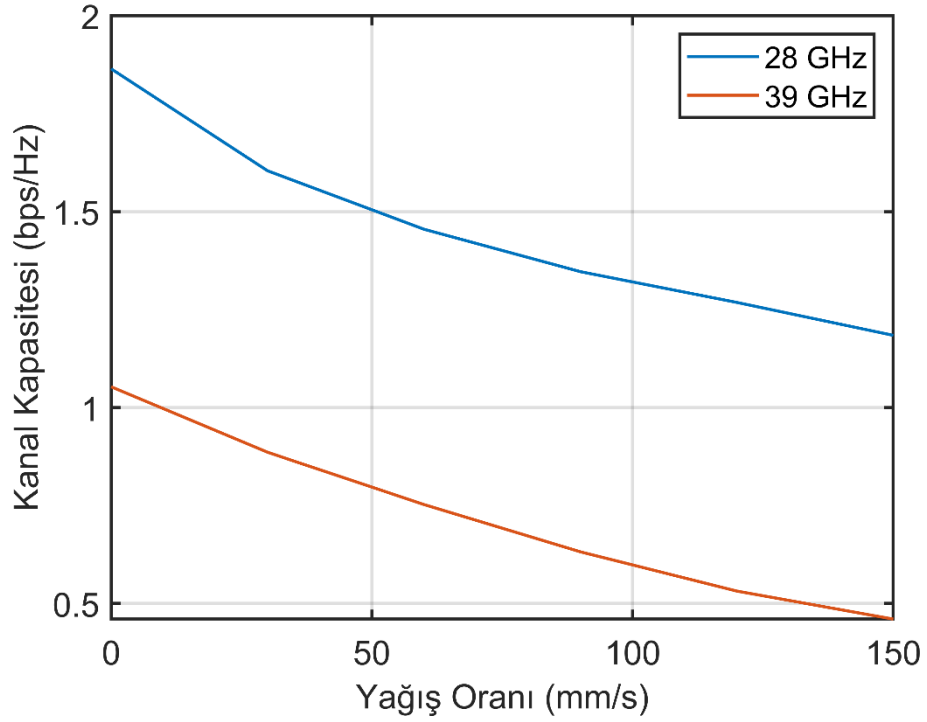
Sıcaklığın kanal kapasitesi üzerindeki etkisi -10°C ve 40°C sıcaklık değerleri arasında incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.12 ile gösterilmiştir. 28 GHz frekansı kapasitesi en düşük değeri 20°C sıcaklıkta 1.8647'dir ve bu sıcaklıktan artan ve azalan değerler için kapasite artmıştır. En yüksek kapasite -10°C için 1.8830 olarak elde edilmiştir ve kapasitedeki değişim %0.97'dir. 39 GHz frekansı için de en düşük kapasite değeri 20°C sıcaklıkta iken en yüksek kapasite -10°C içindir. Kapasite değerleri sırasıyla 1.0531 ve 1.0569'dir ve kanal kapasitesinde %0.35 azalma mevcuttur. Sıcaklık değişiminden nispeten daha çok etkilenen frekans 28 GHz iken, iki frekans için de önemli bir değişim yaşanmamıştır.



Şekil 4.12. Sıcaklık değişiminin kanal kapasitesine etkisi

4.1.4.4. Yağmur Oranı Etkisi

Yağmur oranı dışındaki diğer tüm parametreler sabit tutularak yağışın kanal kapasitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Analizler sonucunda belirlenen iki farklı frekansın yağış oranından kanal kapasitesinin etkilenme derecesi Şekil 4.13'te verilmiştir. Sonuçlar yağışın olmadığı durumlar ve saat başına 150 mm yağışın olduğu durumlar arasında incelenmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde 28 GHz frekansında kanal kapasitesi yağışsız ortamda 1.8787 iken 150 mm/hr yağış durumunda 1.1844 olup kanal kapasitesinde %36.96 düşüş yaşanmıştır. 39 GHz frekansı incelendiğinde 0 mm/hr için kapasite 1.0531 iken 150 mm/hr için 0.4601'dir ve kanal kapasitesinde %56.31 düşüş söz konusudur. Sonuçlardan yağmurdan daha çok etkilenen frekansın 39 GHz olduğu görülmüştür.



Şekil 4.13. Yağış oranının kanal kapasitesine etkisi

İklimsel etkiler ayrı ayrı incelendiğinde yağmur yağış oranı iklim etkileri arasında kanal kapasitesini açıkça en çok etkileyen parametre olmuştur. Diğer parametrelerinin kanal kapasitesini büyük miktarlarda etkilememesine karşın, diğer en fazla etkiye sahip parametre nem yüzdesi olmuştur. Sıcaklık ve basınç etkileri birbirlerine oldukça yakın olsa da basınç değişkeni kanal kapasitesini en az etkilemektedir.

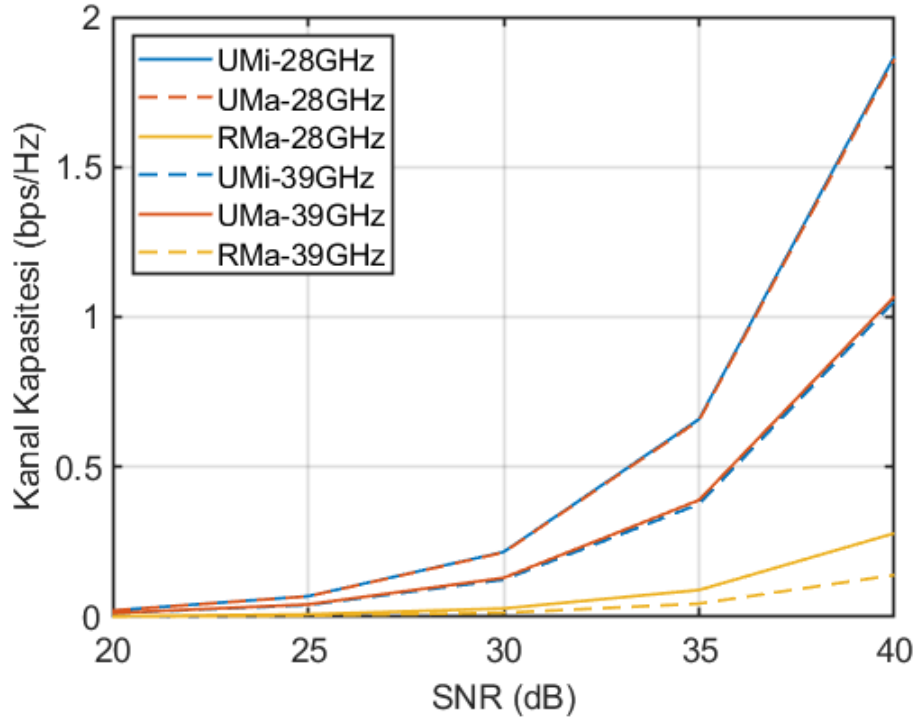
4.1.5. Ortam Türü

Haberleşmenin kalitesi gerçekleştiği ortama bağlıdır. Çünkü ortamda ne kadar yansıtıcı, soğurucu, kırıcı madde bulunursa haberleşme o kadar etkilenir. Bu maddeler binalar, ağaçlar, yüksek yapılar veya doğal yapıtlar olabilir. NYUSIM programı kanal benzetimini gerçekleştirirken bu dış ortam türlerini seçmemize olanak sağlar. Bunlar; binaların daha iç içe bulunduğu sıkışık ortamları modellemek için kullanılan UMi, daha tek düze evlerin ve yapıların bulunduğu ortamları modellemek için UMA, herhangi bir yapının bulunmadığı kırsal alanları modellemek için ise RMa'dır. Kanal parametreleri Tablo 4.4 ile gösterilen, bu üç senaryo için diğer kanal parametreleri sabit tutulurken ortam türleri değiştirilmiş ve kapasiteleri analiz edilmiştir.

Tablo 4.4. Ortam senaryoları için NYUSIM kanal parametreleri

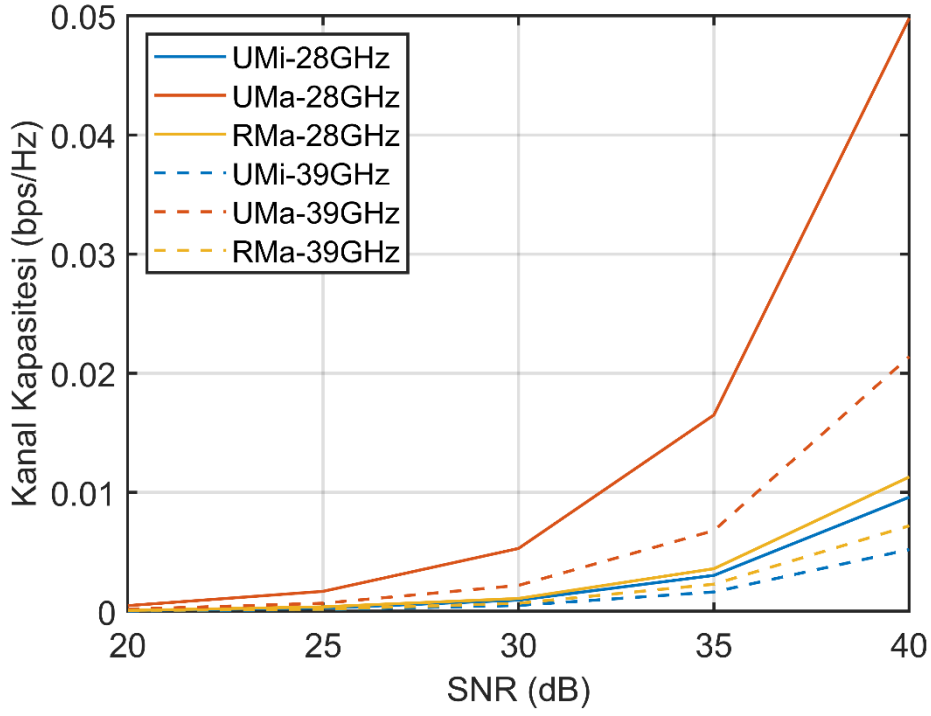
Kanal Parametresi	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Bant Genişliği (MHz)	800	800	800
Frekans (GHz)	28/39	28/39	28/39
Verici Gücü (dB)	30	30	30
Ortam	UMi	UMa	RMa
Görüş Hattı	LOS/NLOS	LOS/NLOS	LOS/NLOS
Mesafe (m)	200	200	200
Baz İstasyonu Yüksekliği (m)	20	20	20
Kullanıcı Yüksekliği (m)	1.50	1.50	1.50
Barometrik Basınç (mbar)	1013.25	1013.25	1013.25
Nem (%)	80	80	80
Sıcaklık (°C)	20	20	20
Yağmur Oranı (mm/saat)	5	5	5
Tx/Rx Anten Sayısı	4 x 4	4 x 4	4 x 4

Bu üç senaryo LOS ve NLOS olarak iki başlık altında incelenebilir. LOS senaryolar için 28 ve 39 GHz’te alınan kapasite değerleri Şekil 4.14 ile görülebilir. Görüldüğü üzere LOS durumu için UMi ve UMa senaryolarında, hem 28 hem de 39 GHz için kanal kapasiteleri arasında çok az farklar görölmektedir. UMi, 28 GHz ve 40 dB için kanal kapasitesi 1.8647 iken UMa senaryo için bu değer 1.8588’dir. 39 GHz durumu için ise UMi senaryoda kapasite 1.0531 iken UMa için 1.0685’dir. RMa senaryoda ise 28 GHz için kapasite 0.2792 olarak hesaplanmıştır. UMi ve UMa senaryolar RMa senaryodan sırasıyla 6.68 ve 6.66 kat daha büyük kanal kapasitesine sahiptirler. Aynı şekilde 39 GHz için 0.1401 olan kanal kapasitesi, diğer senaryolar ile aynı sırayla 7.52 ve 7.63 kat fark bulunmaktadır.



Şekil 4.14. LOS durumunda ortam senaryosunun kanal kapasitesine etkisi

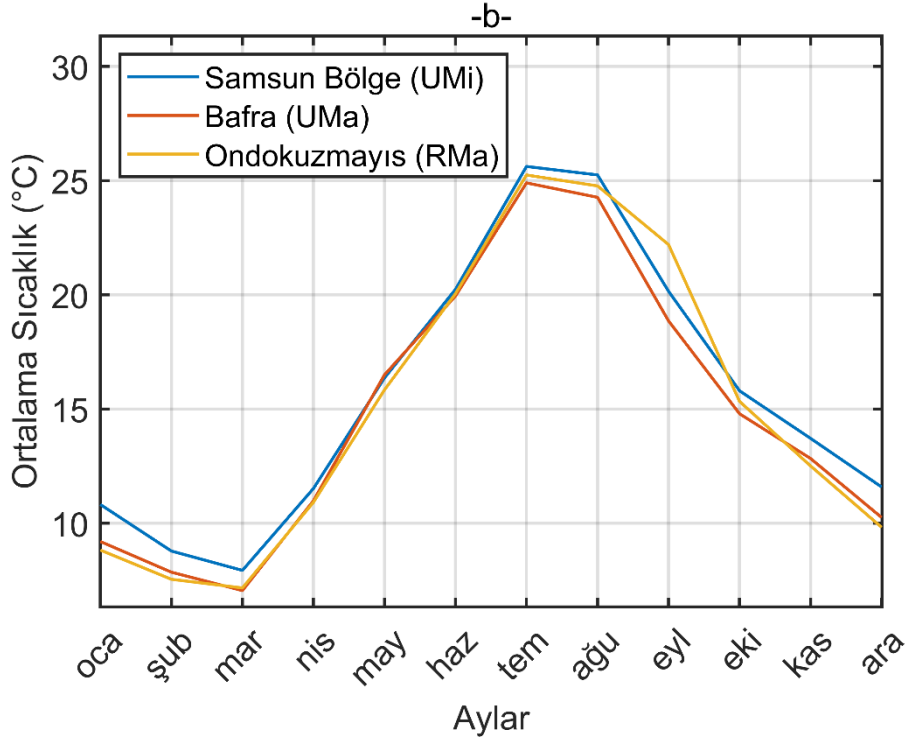
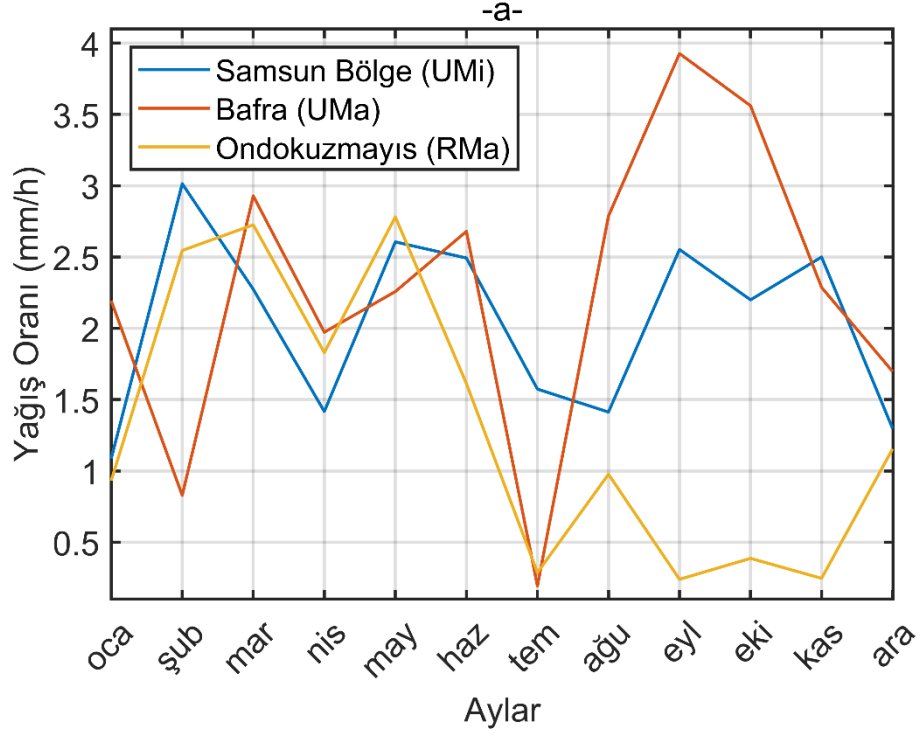
NLOS durumu için UMi ve UMa senaryolarının, hem 28 hem de 39 GHz için LOS durumunun aksine aralarında büyük farklar olduğu Şekil 4.15'te görülmektedir. UMi, 28 GHz ve 40 dB için kanal kapasitesi 0.0096 iken UMa senaryo için bu değer 0.0498'dir ve arada 5.19 kat fark bulunmaktadır. RMa senaryosunda ise 28 GHz için kanal kapasitesi 0.0113'tür ve bu değer UMi senaryonun 1.18 kat üstünde, UMa senaryonun 4.41 kat altındadır. 39 GHz durumu için ise UMi senaryoda kapasite 0.0052 iken UMa için 0.0214'dir. İki değer arasında 4.12 kat fark vardır. RMa senaryoda ise 39 GHz için kapasite 0.0072 olarak hesaplanmıştır. Bu değer UMi senaryodan 1.38 kat daha büyük iken UMa senaryodan 2.97 kat daha düşüktür. LOS senaryoda UMi ve UMa ortamlarından çok daha düşük kapasiteye sahip RMa senaryo, NLOS senaryoda her iki frekans değerinde de UMi senaryodan daha iyi iken, UMa senaryoya da kapasite farkını daha düşük olarak hesaplanmıştır. Bunun sebebi NLOS durumlarda kırılma, soğurma ve yansıma gibi etkilerin engelleyici yapıların artmasıyla daha da artmasıdır. Dolayısıyla en çok UMi, en az RMa senaryosunun etkilenmesi beklenmektedir.

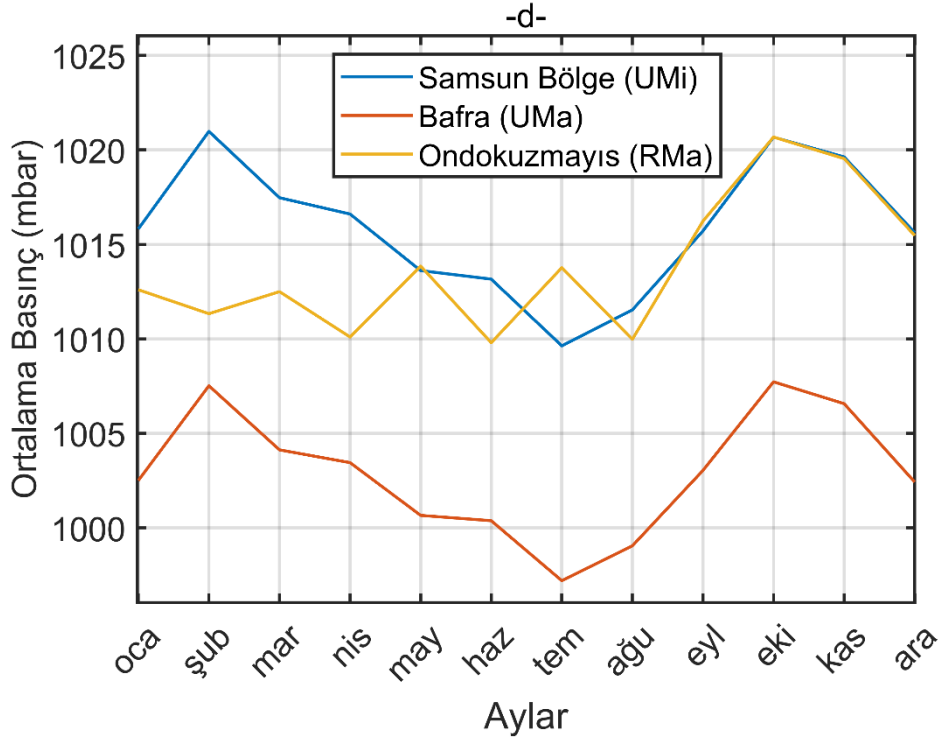
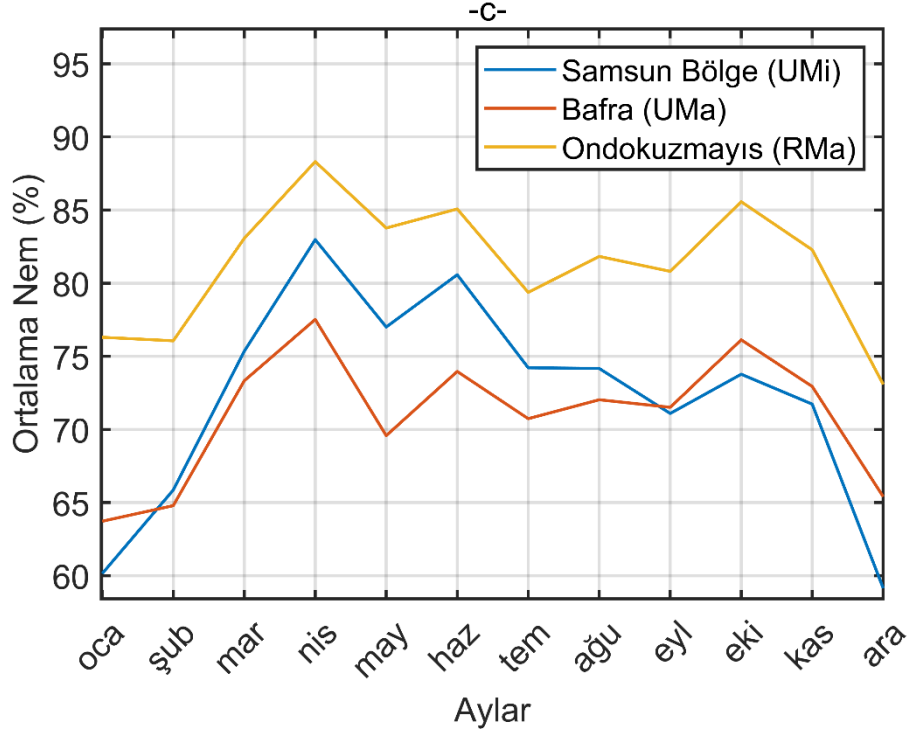


Şekil 4.15. NLOS durumunda ortam senaryosunun kanal kapasitesine etkisi

4.2. Samsun Şehri Kanal Kapasitesi Analizi

Samsun şehrinde ortam türleri NYUSIM senaryolarına göre ayarlanmış ve üç farklı senaryo analiz edilmiştir. Benzetim sonuçları için Samsun Meteoroloji 10. Bölge Müdürlüğü tarafından alınan iklimsel parametrelerin ölçüm noktaları senaryoları oluşturmakta kullanılmıştır. Bunlardan birincisi kentsel mikro hücreler için (UMi) Samsun Bölge gözlem merkezi, ikincisi kentsel makro hücreler (UMa) için Bafra gözlem merkezi, üçüncüsü ise kırsal makro hücreler (RMa) için Ondokuzmayıs gözlem merkezidir. Tüm bu ölçüm noktalarında meteoroloji tarafından alınan yağmur yağış oranı, nispi nem, barometrik basınç ve sıcaklık verileri aylık ortalamaları alınarak yıl içerisindeki değişimleri Şekil 4.16 ile gösterilmiştir. Samsun Bölge ölçüm merkezi için yıllık ortalama yağış 2.036 mm/h iken ortalama sıcaklık 15.65 °C, ortalama nem %72.168 ve ortalama basınç 1015.872 mbar'dır. Bafra ölçüm merkezi için ortalama yağış 2.276 mm/h, sıcaklık 14.7888 °C, nem %70.97 ve basınç 1002.887 mbar olarak ölçülmüştür. Ondokuzmayıs ilçesi için yıllık ortalama değerler; yağış 1.31 mm/h, sıcaklık 15.02 °C, nem %81.293 ve basınç 1016.381 mbar'dır. Kapasite analizleri ilk aşamada tüm senaryolar için ayrı ayrı incelenmiş, ardından ortak grafik üzerinde değerlendirilmiştir.





Şekil 4.16. Samsun Meteoroloji 10. Bölge Müdürlüğünden alınan yıllık iklim verileri a) Yağış oranı b) Sıcaklık c) Nispi nem d) Barometrik basınç

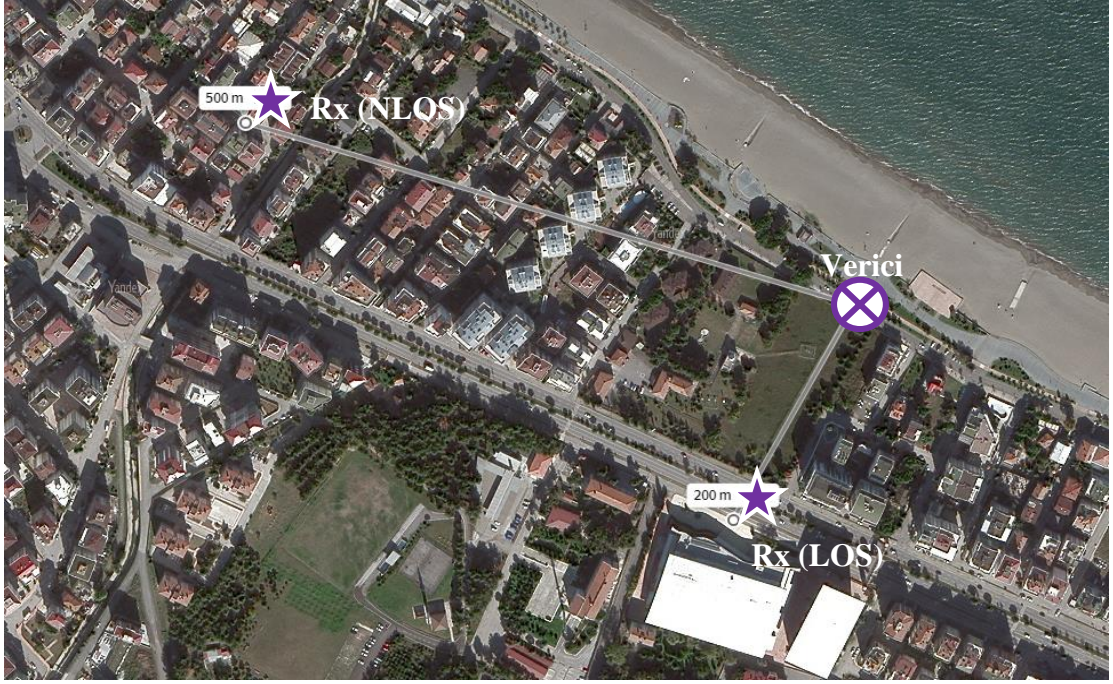
4.2.1. Samsun Bölge (UMi)

Samsun Bölge gözlem merkezi için meteoroloji verileri dışında kullanılan parametreler Tablo 4.5 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Samsun Bölge için NYUSIM kanal parametreleri

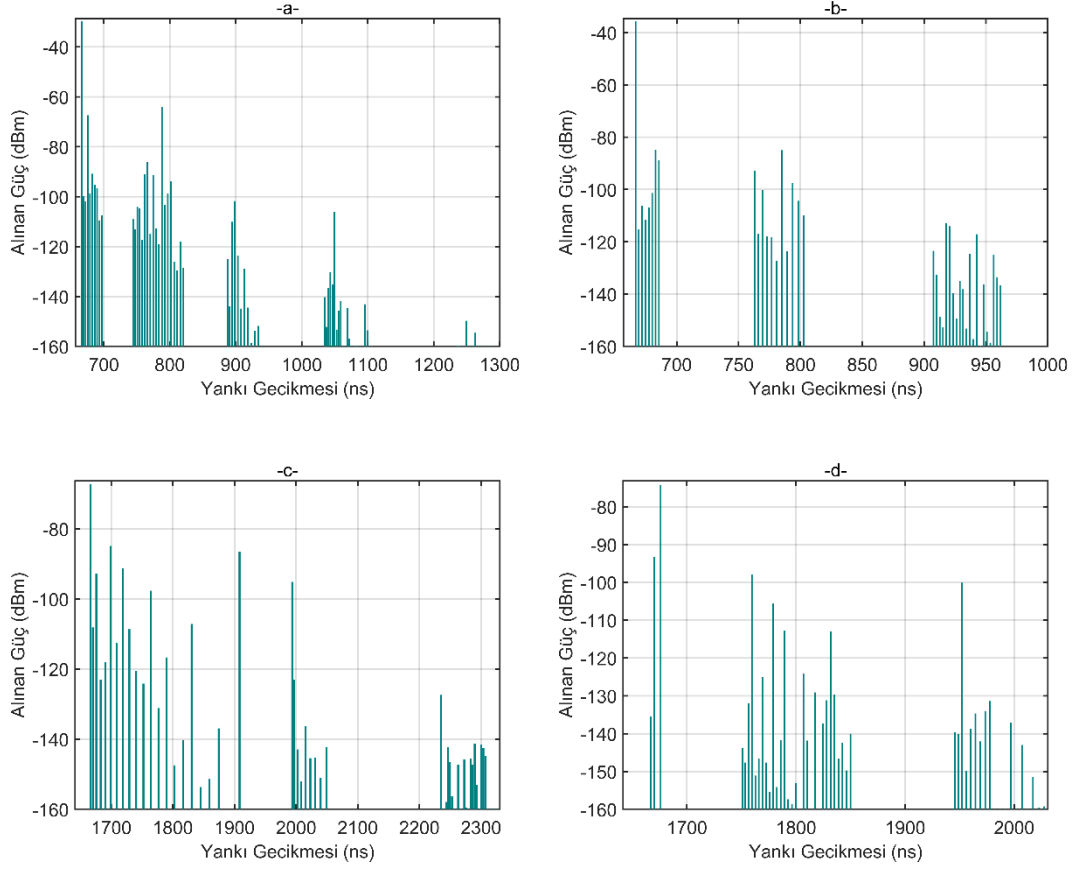
Kanal Parametresi	Senaryo 1	Senaryo 2
Bant Genişliği (MHz)	800	800
Frekans (GHz)	28/39	28/39
Verici Gücü (dB)	30	30
Ortam	UMi	UMi
Görüş Hattı	LOS	NLOS
Mesafe (m)	200	500
Baz İstasyonu Yüksekliği (m)	20	20
Kullanıcı Yüksekliği (m)	1.50	1.50
Tx/Rx Anten Sayısı	4 x 4	4 x 4

Benzetim programında gerçekleştirilmek istenen senaryo için kullanılacak alıcı-verici yerleşim noktaları Yandex Haritalar kullanılarak Şekil 4.17 ile gösterilmiştir. Görüldüğü üzere LOS durumu için, 200 metre mesafede alıcı ve verici arasında doğrudan bir görüş ayarlanmıştır. NLOS durumu için ise, UMi senaryosuna uygun olacak şekilde, binaların yoğun ve mesafenin 500 metre olduğu bir senaryo hazırlanmıştır. Yuvarlak sembol verici anteni, yıldız sembol ise alıcı antenleri temsil eder. Yandex Haritalar'ın cetvel özelliği kullanılarak LOS ve NLOS durumu için alıcı-verici mesafeleri de şekil üzerinde gösterilmiştir.



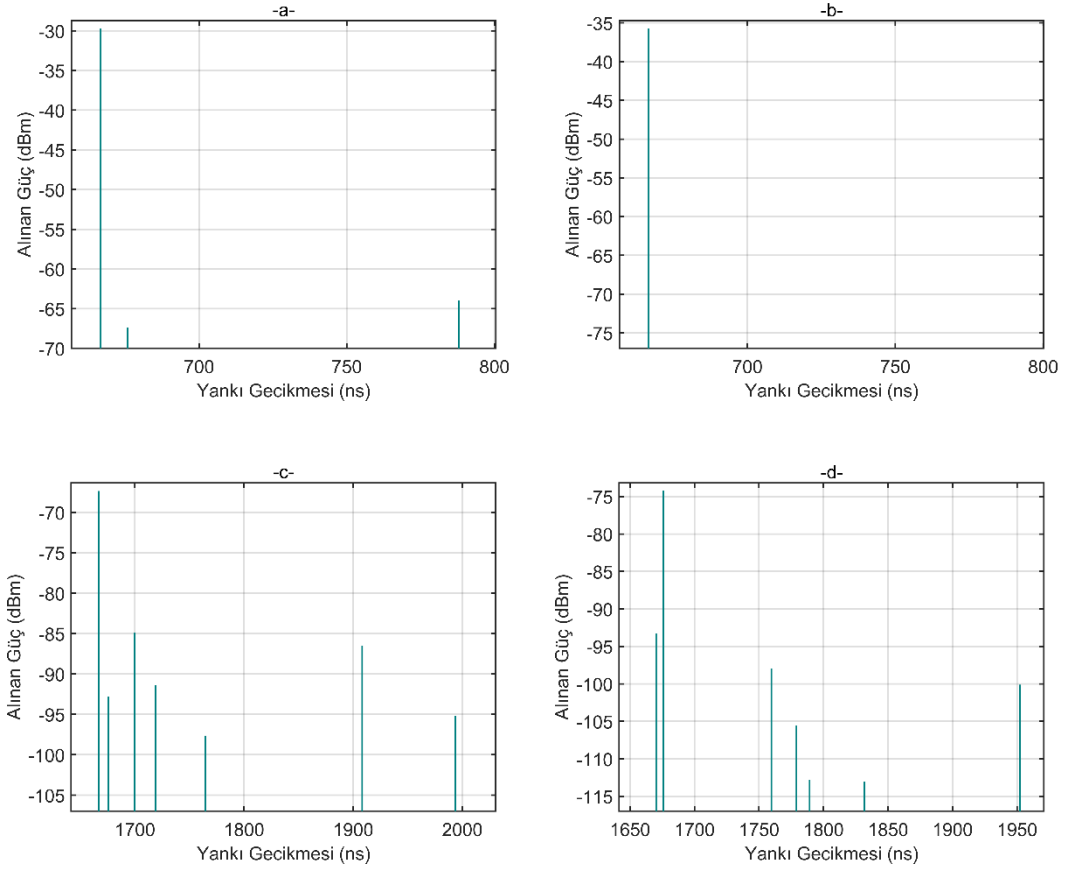
Şekil 4.17. Samsun Bölge ölçüm merkezinde LOS/NLOS durumları için alıcı-verici yerleşimi

Belirlenen senaryo ve kullanılan parametreler sonucunda NYUSIM tarafından üretilen kanalın PDP'leri LOS/NLOS ve 28/39 GHz durumlarına birer örnek olmak üzere, Şekil 4.18 ile gösterilmiştir. Kanallar Samsun Bölge meteoroloji verilerinin yıllık ortalamaları alınarak oluşturulmuştur. Gerek yansıtıcı yüzeylerin çok olması, gerekse bozucu ve kırıcı etkilerin UMi senaryosu için fazla olması sonucu, PDP'ler fazlaca yankıya sahiplerdir. Aynı zamanda bu yankılarda birbirlerinden farklı güçlere sahiplerdir. Umi senaryolarında genel itibarıyla üç veya daha fazla zaman kümesi ve bu kümeler içerisinde bahsedildiği gibi çok sayıda ve farklı güçlerde yankılar gözlemlenmektedir. LOS durumunda 28 GHz için en güçlü yankı 666 ns'de -29.74 dBm iken 39 GHz için yine 666 ns'de -35.75 dBm olarak ölçülmüştür. 28 GHz frekansı 39 GHz'ten 6.01 dBm daha güçlüdür. Her iki frekans için de LOS durumunda yankılar aynı sürede vericiye ulaşmıştır. NLOS durumunda ise 28 GHz için en güçlü yankı 1666 ns'de -67.35 dBm iken 39 GHz için 1675 ns'de -74.19 dBm'dir. Bu durumda 28 GHz frekansı 39 GHz'den 6.84 dBm daha güçlüdür. 28 GHz için LOS durumundaki en güçlü yankı NLOS durumundan 31.60 dBm, 39 GHz için ise 38.44 dBm daha güçlüdür.



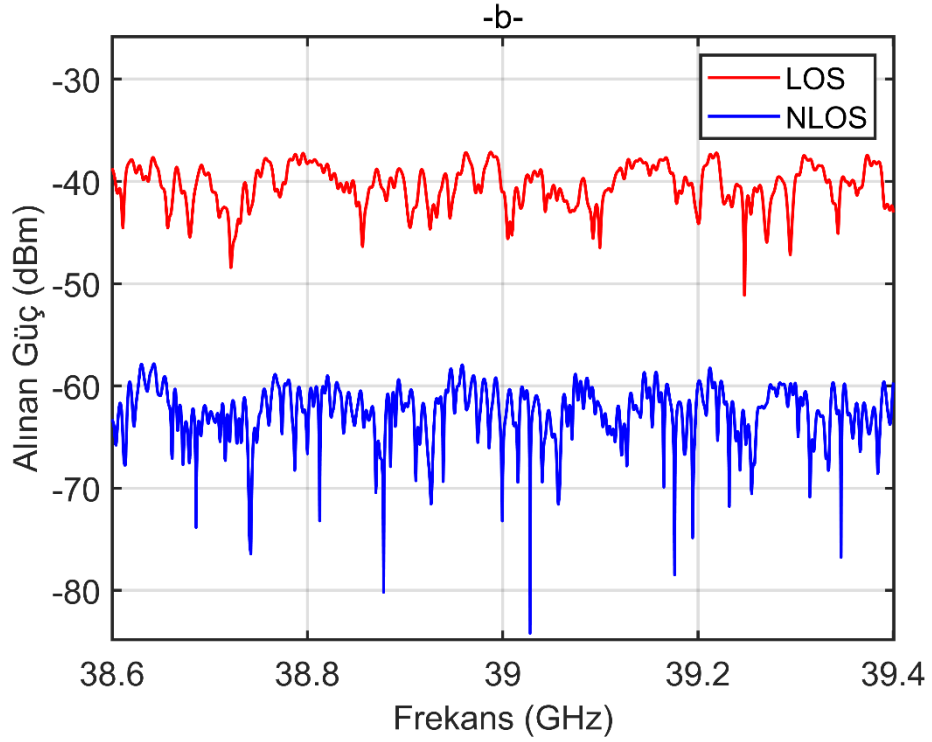
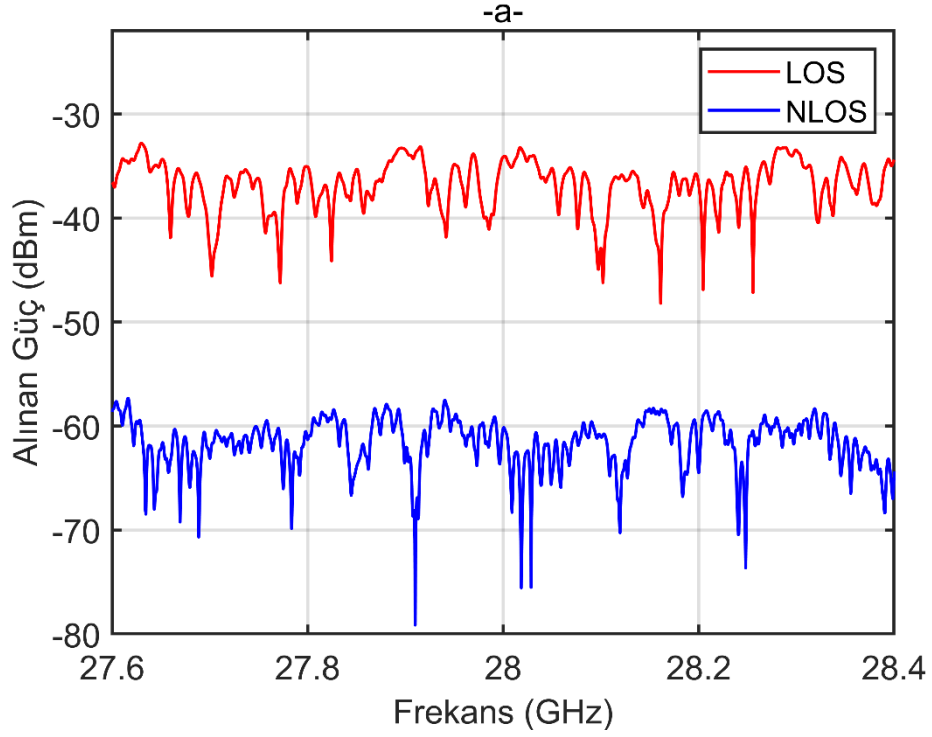
Şekil 4.18. Samsun Bölge ölçüm merkezi için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

PDP'leri verilen kanallar en güçlü yankıyı referans alarak, 40 dBm altında kalan yankılar ihmal edilecek şekilde yakınlaştırılmış ve Şekil 4.19 ile gösterilmiştir. Görüldüğü üzere hem 28 hem de 39 GHz frekansları için LOS durumlarında en güçlü yankılar neredeyse tek kalırken, NLOS durumları için farklı yankı gecikme sürelerinde farklı güçlerde yankılar, en güçlü yankıya eşlik etmektedir. LOS durumunda 28 GHz için en güçlü ikinci yankı -63.94 dBm iken en güçlü yankı ile aralarında -34.2 dBm gibi büyük bir fark vardır. 39 GHz için ise en güçlü ikinci yankı -40 dBm veya altında olduğundan gösterilmemiştir. NLOS durumunda ise 28 GHz durumunda en güçlü ikinci ve üçüncü yankılar sırasıyla -84.91 dBm ve -86.48 dBm olarak ölçülmüştür. En güçlü yankı ile aralarında sırasıyla -17.56 ve -19.13 dBm fark görülmüştür. 39 GHz için ise en güçlü ikinci yankı ile en güçlü yankı arasında -19.06 dBm fark bulunmaktadır. Dolayısıyla NLOS durumunda her iki frekans içinde en güçlü yankının dışındaki diğer yankılar ihmal edilemeyecek durumdadır.



Şekil 4.19. Samsun Bölge ölçüm merkezi için yakınlaştırılmış PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

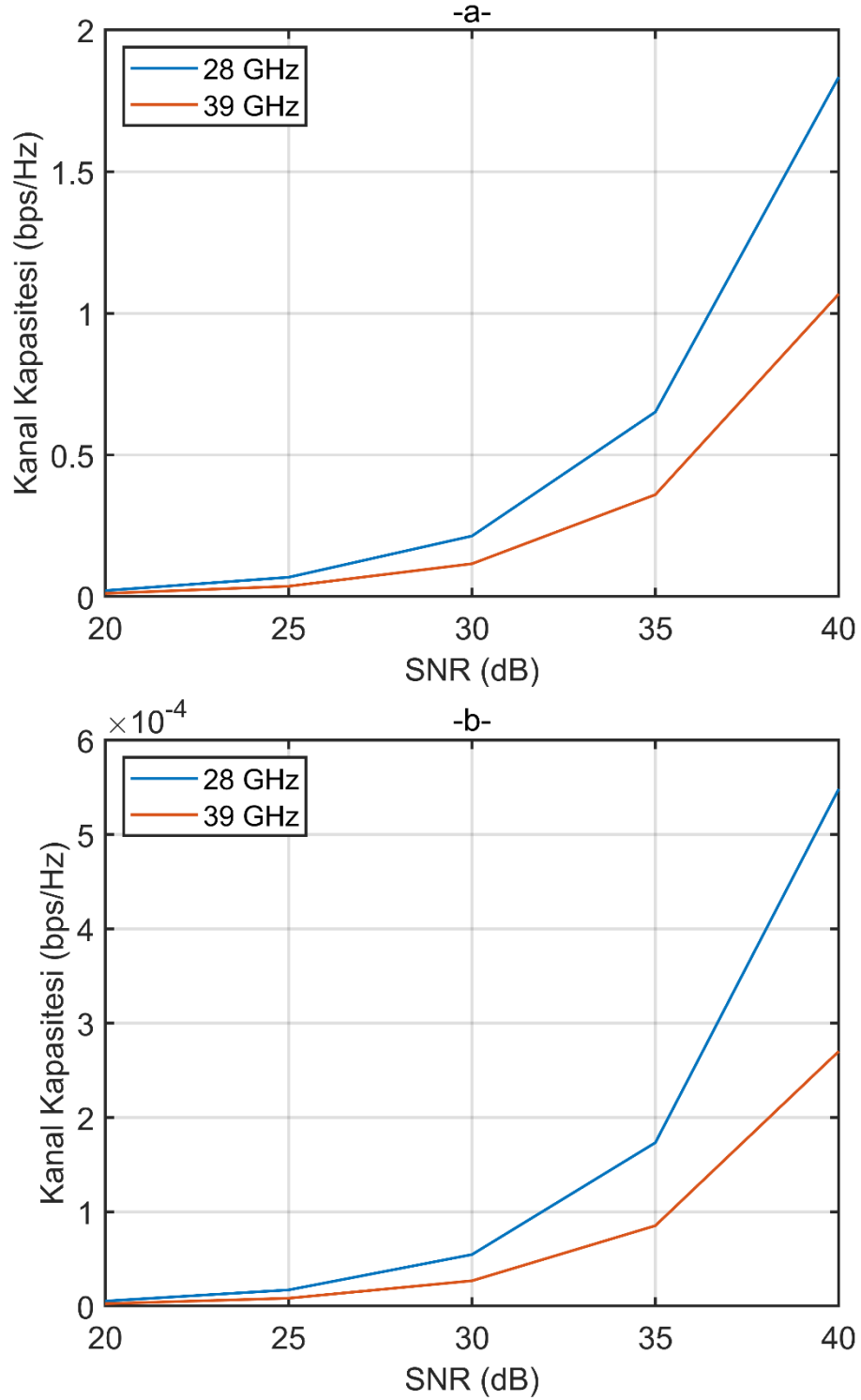
PDP'leri verilen kanalların frekans bölgesi yanıtları Şekil 4.20 ile verilmiştir. Samsun Bölge merkezli kanal ve 28 GHz frekansı için, LOS durumunda ortalama güç -36.85 dBm, NLOS durumunda ise -61.62 dBm'dir ve aralarında -24.77 dBm fark bulunmaktadır. LOS durumundaki en güçlü frekans ile en zayıf frekans arasında -15.41 dBm fark bulunurken, NLOS durumunda bu fark -21.80 dBm'dir. 39 GHz frekansı için ise LOS durumunda ortalama güç -40.44 dBm, NLOS durumunda ise -62.63 dBm'dir ve aralarında -22.19 dBm fark bulunmaktadır. LOS durumunda en güçlü frekans ile en zayıf frekans arasında -13.99 dBm fark bulunurken, NLOS durumunda bu fark -26.35 dBm'dir. Her iki frekans içinde NLOS durumlarda frekanslar daha geniş bir güç aralığına yayılırken, LOS durumlarda daha dar bir güç aralığına yerleşmiştir.



Şekil 4.20. Samsun Bölge ölçüm merkezi, LOS ve NLOS durumları için kanalların frekans yanıtları a) 28 GHz b) 39 GHz

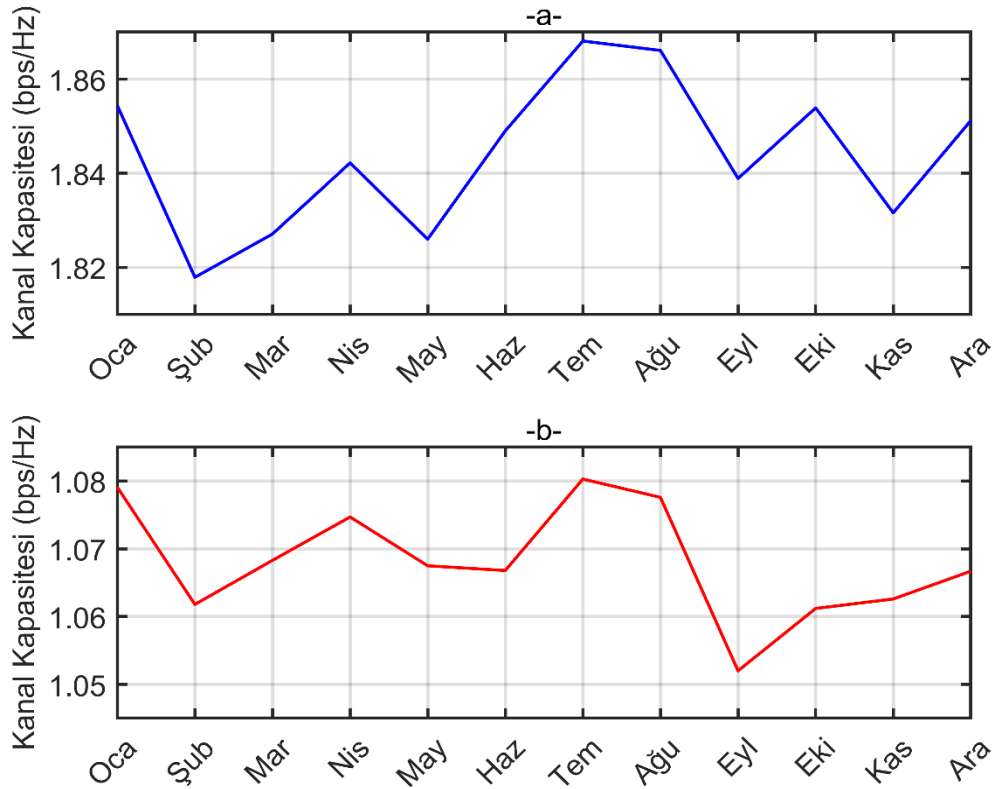
Oluşturulan kanallar ile Samsun Bölge için yıllık ortalama kanal kapasiteleri Şekil 4.21 ile gösterilmiştir. Kapasiteler Şekil 4.20 ile gösterilen ve 4x4 MIMO yapısı içerisinde diğer 15 adet kanalın da frekans yanıtları ile birlikte hesaplanmıştır. Samsun Bölge için LOS durumunda, 28 GHz frekansının kanal kapasitesi 40 dB

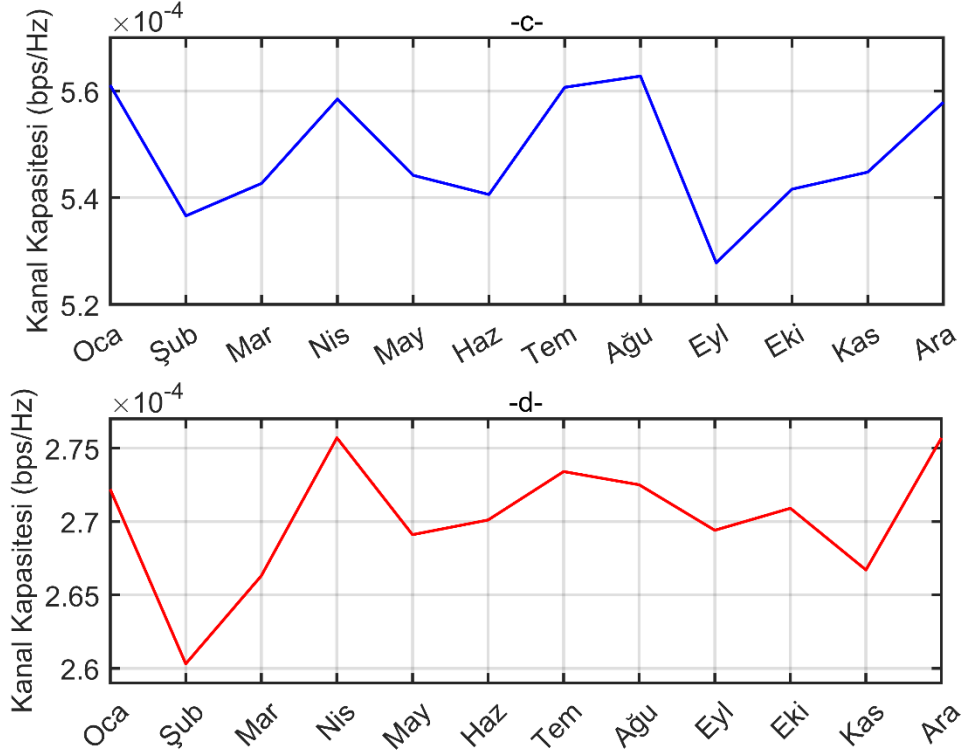
SNR için 1.8339 iken 39 GHz frekansı için 1.0682 olarak hesaplanmıştır. NLOS durumunda ise 28 GHz ve 40 dB SNR için kapasite 0.5483×10^{-3} iken 39 GHz için 0.2702×10^{-3} hesaplanmıştır. 28 GHz frekansı sırasıyla LOS ve NLOS durumları için, 39 GHz'ten kapasite olarak 1.72 ve 2.03 kat büyüktür.



Şekil 4.21. Samsun Bölge için yıllık ortalama kanal kapasiteleri a) LOS b) NLOS

Hesaplanan kanal kapasitelerini meteoroloji tarafından alınan yıllık iklim verileriyle kıyaslamak için, kanal kapasitelerinin aylık ortalamaları 40 dB SNR için, Şekil 4.22 ile gösterilmiştir. Şekiller Samsun Bölge aylık ortalama meteoroloji verileri ile kıyaslandığında, yağış oranı ile kanal kapasitelerinin ters orantılı bir şekilde değiştiği gözlemlenmektedir. Aynı zamanda yağışın azaldığı, sıcaklığın arttığı, basıncın azaldığı ve nemin bölgesel olarak azaldığı yaz aylarında kanal kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. Yıllık verilerde LOS durumunda 28 GHz için en yüksek kanal kapasitesi Temmuz ayında 1.8681, en düşük kapasite ise Şubat ayında 1.8179 olarak hesaplanmıştır. 39 GHz için ise en yüksek kanal kapasitesi Temmuz ayında 1.0803, en düşük kapasite ise Eylül ayında 1.0520'dir. NLOS durumunda 28 GHz için en yüksek kanal kapasitesi Ağustos ayında 0.5628×10^{-3} , en düşük kapasite ise Eylül ayında 0.5278×10^{-3} olarak hesaplanmıştır. 39 GHz için ise en yüksek kanal kapasitesi Nisan ayında 0.2757×10^{-3} , en düşük kapasite ise Şubat ayında 0.2603×10^{-3} olarak hesaplanmıştır.





Şekil 4.22. Samsun Bölge, 40 dB SNR için aylık kapasite değişimi a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

4.2.2. Bafra (UMa)

Bafra gözlem merkezi için meteoroloji verileri dışında kullanılan parametreler Tablo 4.6 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Bafra için NYUSIM kanal parametreleri

Kanal Parametresi	Senaryo 1	Senaryo 2
Bant Genişliği (MHz)	800	800
Frekans (GHz)	28/39	28/39
Verici Gücü (dB)	30	30
Ortam	UMa	UMa
Görüş Hattı	LOS	NLOS
Mesafe (m)	200	500
Baz İstasyonu Yüksekliği (m)	20	20
Kullanıcı Yüksekliği (m)	1.50	1.50
Tx/Rx Anten Sayısı	4 x 4	4 x 4

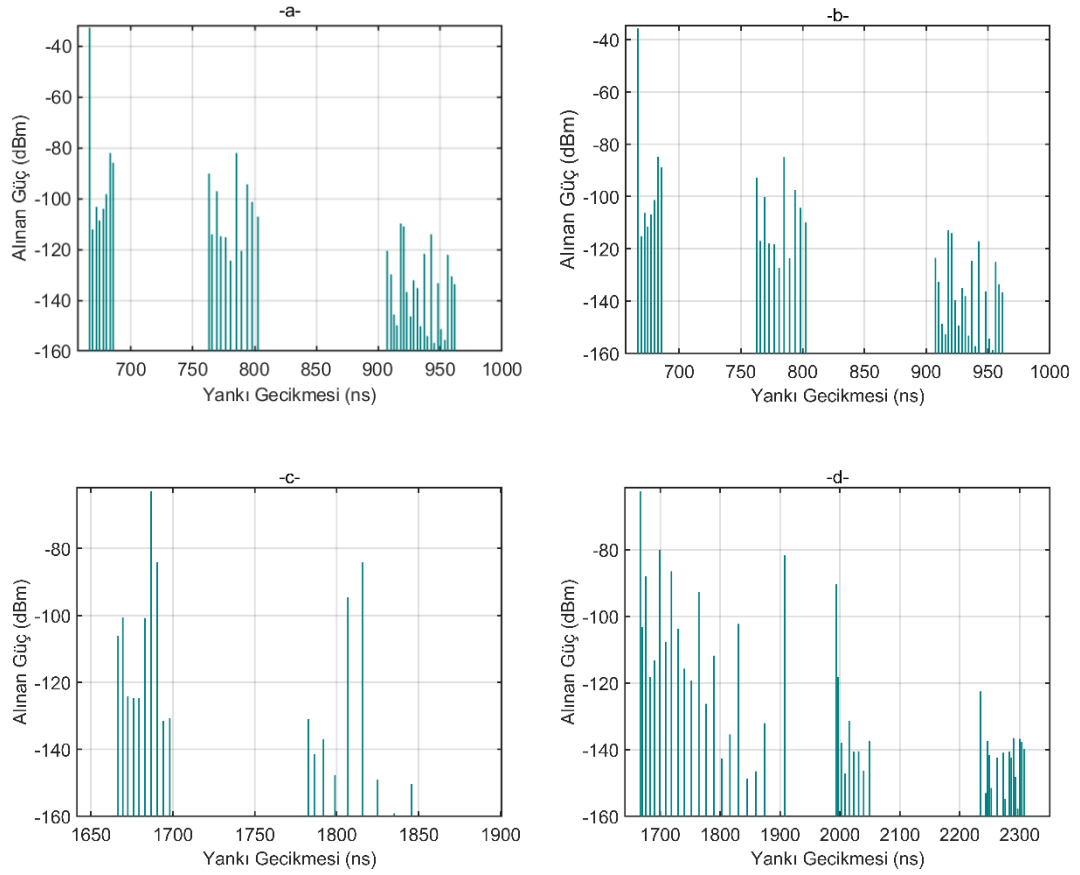
Benzetim programında gerçekleştirilmek istenen senaryo için kullanılacak alıcı-verici yerleşim noktaları yeniden Yandex Haritalar kullanılarak Şekil 4.23 ile

gösterilmiştir. LOS durumu için, 200 metre mesafede alıcı ve verici arasında doğrudan bir görüş ayarlanmış, NLOS durumu için ise, UMa senaryosuna uygun olacak şekilde, binaların UMi senaryosuna nispeten daha az yoğun ve mesafenin 500 metre olduğu bir senaryo hazırlanmıştır. Yuvarlak sembol verici anteni, yıldız sembol ise alıcı antenleri temsil eder ve alıcı-verici mesafeleri de yine şekil üzerinde çizdirilmiştir.



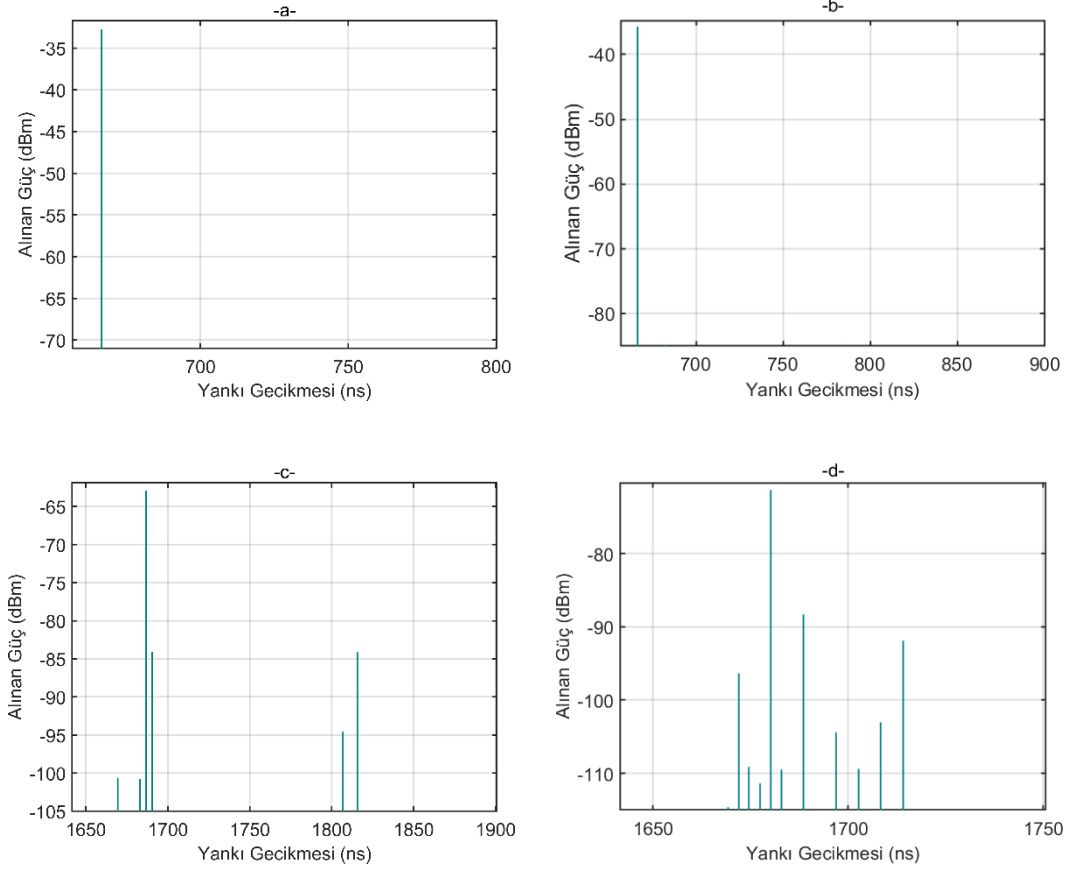
Şekil 4.23. Bafra ölçüm merkezinde LOS/NLOS durumları için alıcı-verici yerleşimi

Bafra için yapılan ölçümler sonucunda NYUSIM ile üretilen kanalların PDP'leri LOS ve NLOS durumları, aynı zamanda 28 ve 39 GHz frekanslarına birer örnek olmak üzere, Şekil 4.24 ile gösterilmiştir. Kanallar incelendiğinde yine çok sayıda zaman kümesi ve yankı gözlemlenmektedir. Fakat oluşturulan kanallar Samsun Bölge için oluşturulan kanallara nispeten daha az gecikmeli yankıdan oluşmaktadır. LOS durumunda 28 GHz için en güçlü yankı 666 ns'de -32.73 dBm iken 39 GHz için 666 ns'de -35.74 dBm olarak ölçülmüştür. Geliş süreleri aynı olan bu iki yankı arasında -3.01 dBm fark bulunmaktadır. NLOS durumunda ise 28 GHz için en güçlü yankı 1686 ns'de -62.90 dBm iken 39 GHz için 1680 ns'de -71.36 dBm'dir. Bu durumda 28 GHz frekansı 39 GHz'den -8.46 dBm daha güçlüdür.



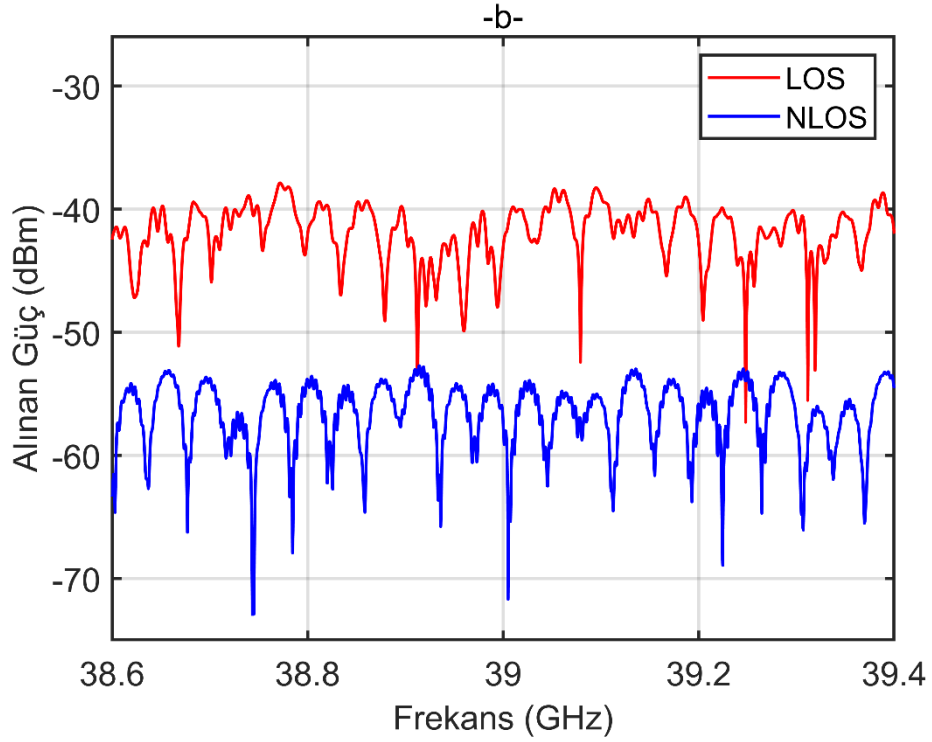
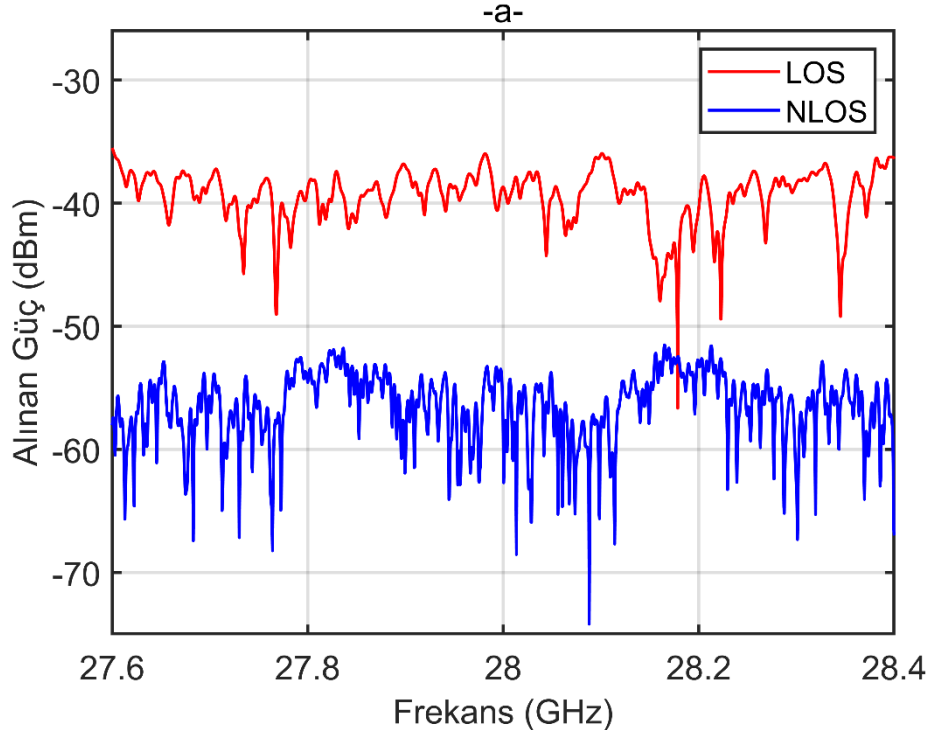
Şekil 4.24. Bafra ölçüm merkezi için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

PDP'leri 40 dBm altında kalan yankılar ihmal edilecek şekilde yakınlaştırılmış ve Şekil 4.25 ile gösterilmiştir. Görüldüğü üzere hem 28 hem de 39 GHz frekansları için LOS durumlarında en güçlü yankılar tek kalırken, NLOS durumları için farklı güçlerde yankılar bulunmaktadır. NLOS, 28 GHz durumunda en güçlü ikinci ve üçüncü yankıların ikisi de -84.11 dBm olarak ölçülmüştür. En güçlü yankılar ile aralarında -21.21 dBm fark görülmüştür. 39 GHz için ise en güçlü ikinci ve üçüncü yankı ile en güçlü yankı arasında sırasıyla -16.94 ve -20.56 dBm fark bulunmaktadır. NLOS durumunda her iki frekans içinde ihmal edilemeyecek birden çok yankı bulunmaktadır.



Şekil 4.25. Bafra ölçüm merkezi için yakınlştırılmış PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

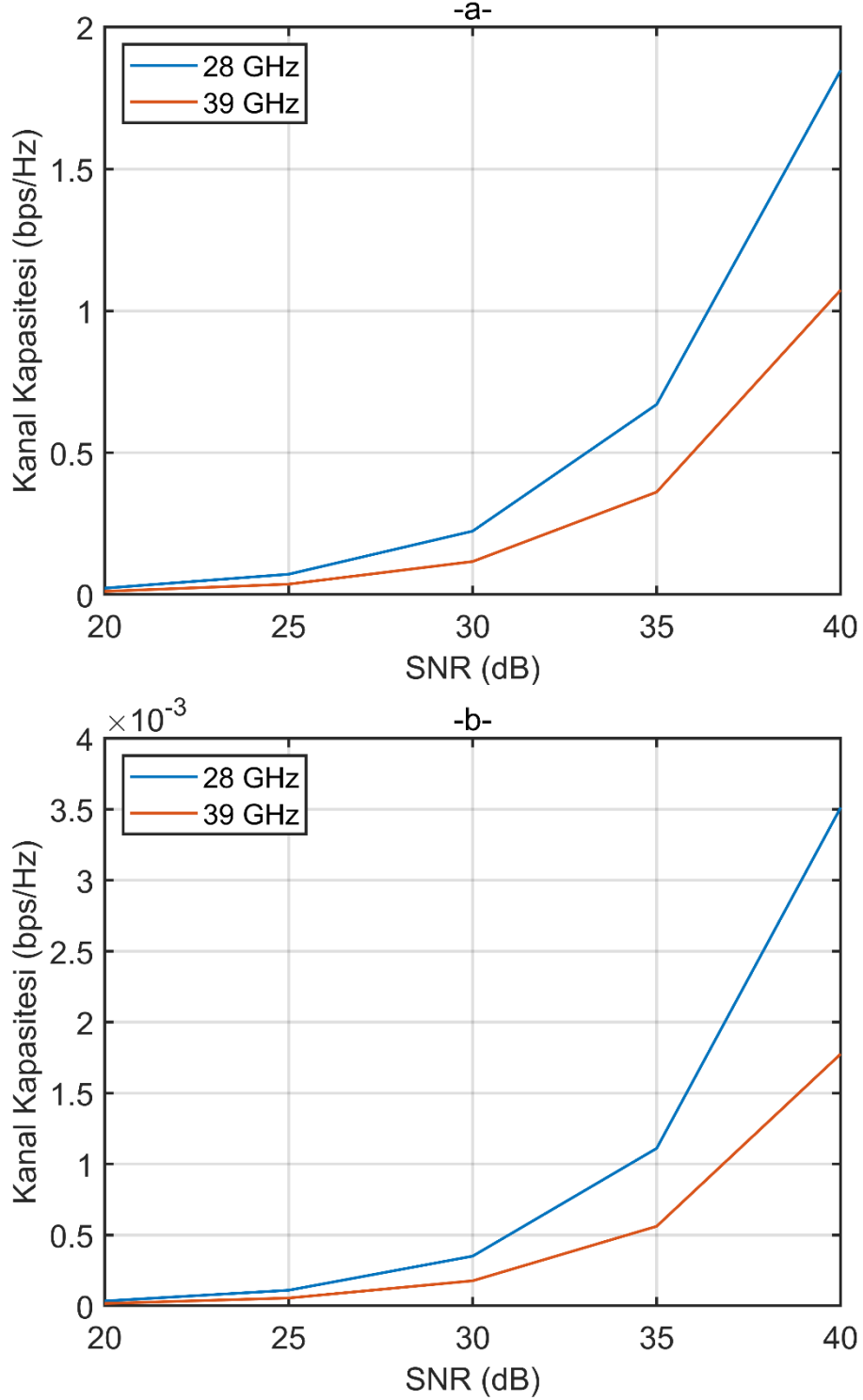
Bafra için PDP'leri verilen kanalların frekans bölgesi yanıtları Şekil 4.26 ile verilmiştir. Şekil incelendiğinde 28 GHz frekansı için, LOS durumunda ortalama güç -39.41 dBm iken NLOS durumunda -56.56 dBm'dir ve aralarında -17.14 dBm güç farkı bulunmaktadır. LOS durumunda en güçlü frekans zayıf frekans arasında -21.13 dBm fark hesaplanmıştır. NLOS durumunda ise bu fark -22.68 dBm'dir. 39 GHz frekansı için LOS durumunda ortalama güç -41.95 dBm, NLOS durumunda -56.62 dBm'dir ve aralarında -14.67 dBm fark bulunmaktadır. Burada dikkat çeken özellik Samsun Bölge için LOS ve NLOS arasındaki farklar, Bafra için hesaplanan farklardan her iki frekans için de büyüktür. Anlaşılmıştır ki, UMa senaryolar için doğrudan görüşün kaybolması, UMi'ye göre güç bakımından kanalı daha az etkilemektedir. LOS durumunda en güçlü frekans ile en zayıf frekans arasında -19.43 dBm fark bulunurken, NLOS durumunda bu fark -20.27 dBm'dir. Her iki frekans içinde, Samsun Bölge'nin aksine LOS ve NLOS durumlarda kanallar, birbirlerine yakın değerlerde güç aralıklarına yerleşmişlerdir.



Şekil 4.26. Bafra ölçüm merkezi, LOS ve NLOS durumları için kanalların frekans yanıtları
a) 28 GHz b) 39 GHz

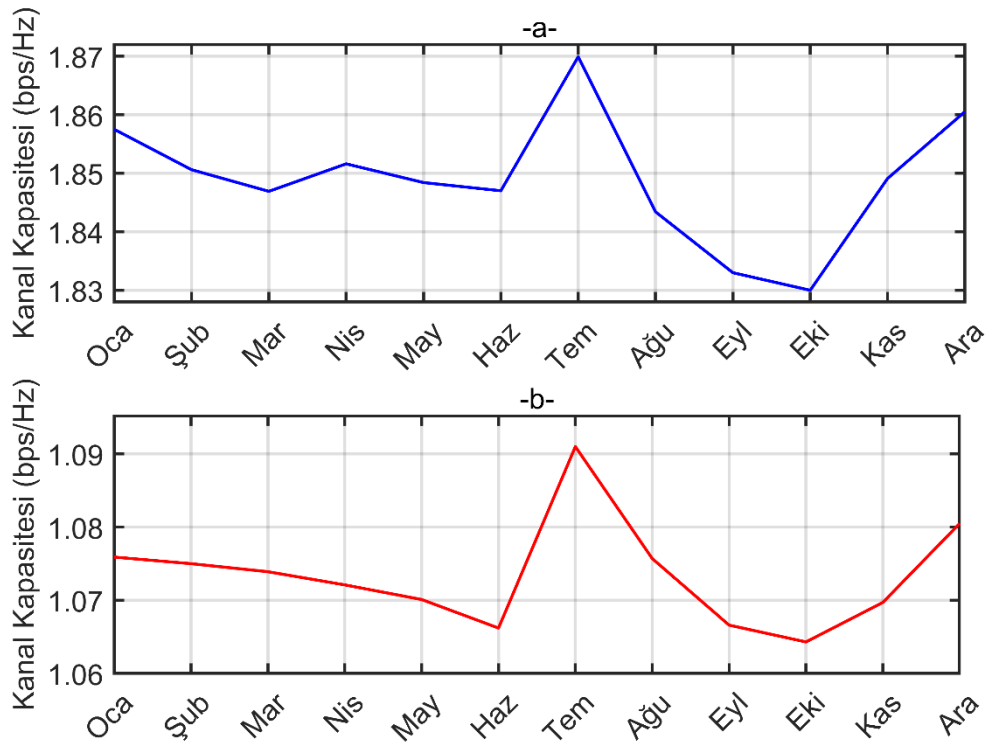
Bafra için frekans yanıtları ile hesaplanan yıllık ortalama kanal kapasiteleri Şekil 4.27 ile gösterilmiştir. LOS durumunda, 28 GHz frekansının kanal kapasitesi 40 dB SNR için 1.8481 iken 39 GHz frekansı için 1.0737 olarak hesaplanmıştır ve 28 GHz, 39 GHz'ten 1.72 kat büyüktür. NLOS durumunda ise 28 GHz ve 40 dB SNR

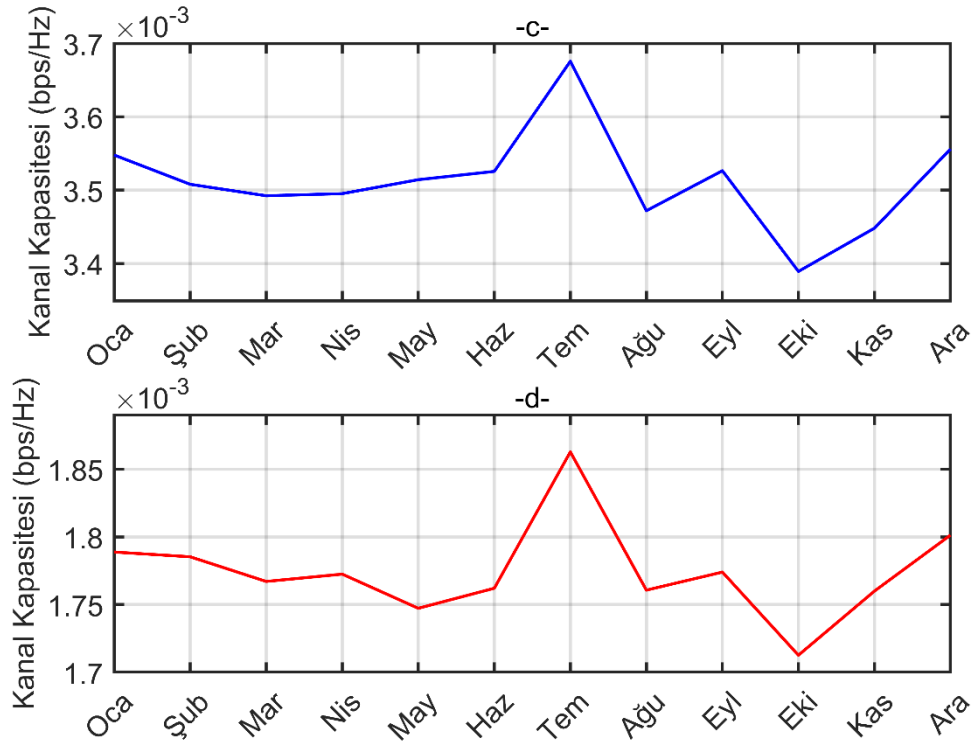
için kapasite 3.5126×10^{-3} iken 39 GHz için 1.7762×10^{-3} hesaplanmıştır. 28 GHz, 39 GHz'ten 1.98 kat büyük kanal kapasitesine sahiptir. LOS durumunda Bafra ve Samsun Bölge için kapasiteler birbirlerine çok yakınken, NLOS durumunda Bafra, Samsun Bölge'den, 28 ve 39 GHz için sırasıyla 6.41 ve 6.57 kat büyük kapasitelidir.



Şekil 4.27. Bafra için yıllık ortalama kanal kapasiteleri a) LOS b) NLOS

Kanal kapasitelerini meteoroloji verileriyle kıyaslamak için, Bafra ölçüm merkezi kanal kapasitelerinin aylık ortalamaları 40 dB SNR için, Şekil 4.28 ile gösterilmiştir. Yıllık verilerde dört senaryo için de en yüksek kanal kapasitesi Temmuz aylarında, en düşük ise Ekim aylarında hesaplanmıştır. LOS durumunda 28 GHz için en yüksek kanal kapasitesi 1.8699 iken en düşük kapasite 1.8300 olarak hesaplanmıştır. 39 GHz için de en yüksek kanal kapasitesi 1.0910, en düşük kapasite ise 1.0643'tür. NLOS durumunda 28 GHz için en yüksek kanal kapasitesi 3.6757×10^{-3} , en düşük kapasite ise 3.3893×10^{-3} olarak hesaplanmıştır. 39 GHz için ise en yüksek kanal kapasitesi 1.8627×10^{-3} , en düşük kapasite ise 1.7127×10^{-3} olarak hesaplanmıştır. Kanal kapasiteleri Bafra aylık ortalama meteoroloji verileri ile kıyaslandığında, kapasite üzerinde yağış oranının büyük etkisi görülebilmektedir. Yine sıcaklığın arttığı, basıncın ve nemin nispeten azaldığı yaz aylarında kanal kapasiteleri artış eğilimindedir.





Şekil 4.28. Bafra, 40 dB SNR için aylık kapasite değişimi a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

4.2.3. Ondokuzmayıs (RMa)

Ondokuzmayıs gözlem merkezi için meteoroloji verileri dışında kullanılan parametreler Tablo 4.7 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Ondokuzmayıs için NYUSIM kanal parametreleri

Kanal Parametresi	Senaryo 1	Senaryo 2
Bant Genişliği (MHz)	800	800
Frekans (GHz)	28/39	28/39
Verici Gücü (dB)	30	30
Ortam	RMa	RMa
Görüş Hattı	LOS	NLOS
Mesafe (m)	200	500
Baz İstasyonu Yüksekliği (m)	20	20
Kullanıcı Yüksekliği (m)	1.50	1.50
Tx/Rx Anten Sayısı	4 x 4	4 x 4

Ölçümler için kullanılacak alıcı-verici yerleşim noktaları Şekil 4.17 ile gösterilmiştir. LOS durumu için, 200 metre mesafede alıcı ve verici arasında

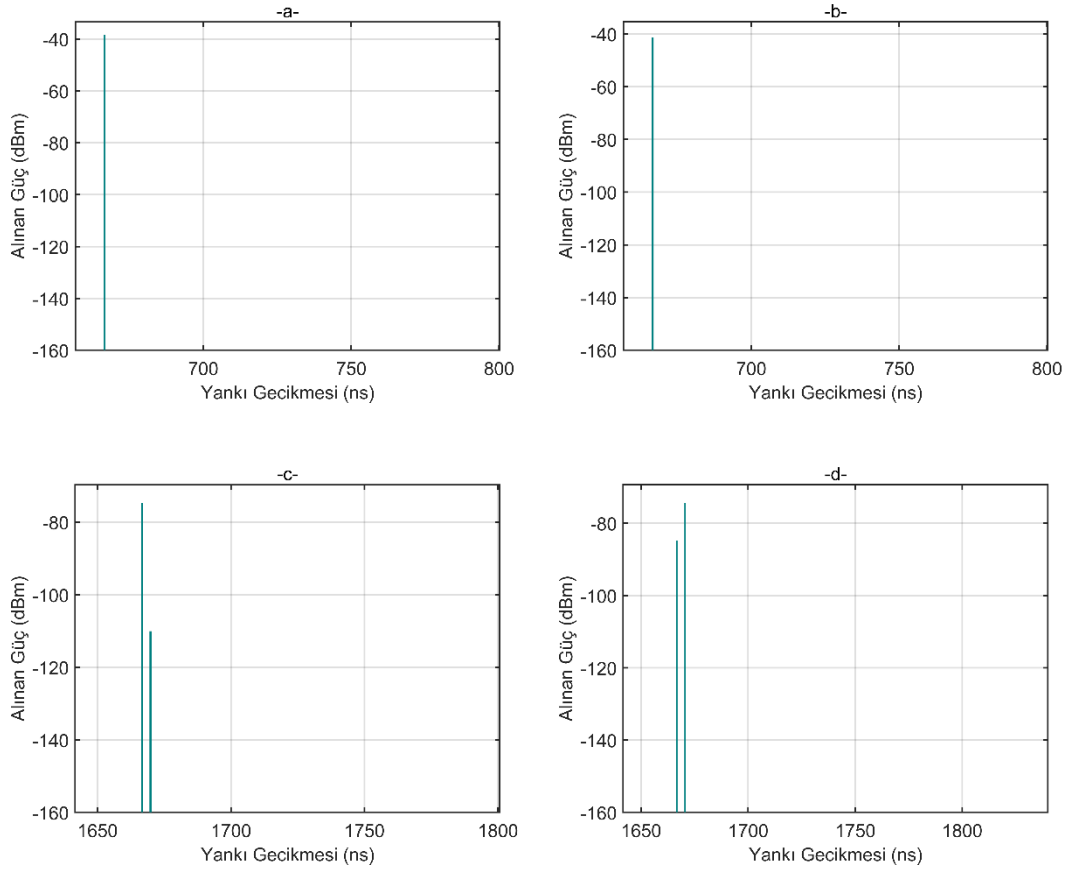
doğrudan bir görüş ayarlanmıştır. NLOS durumu için ise, RMa senaryosuna uygun olacak şekilde, herhangi bir binanın bulunmadığı, NLOS durumun ağaçlar ile oluşturulduğu, mesafenin 500 metre olduğu bir senaryo hazırlanmıştır. Yuvarlak sembol verici anteni, yıldız sembol ise alıcı antenleri temsil eder ve alıcı-verici mesafeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Ondokuzmayıs ölçüm merkezinde LOS/NLOS durumları için alıcı-verici yerleşimi

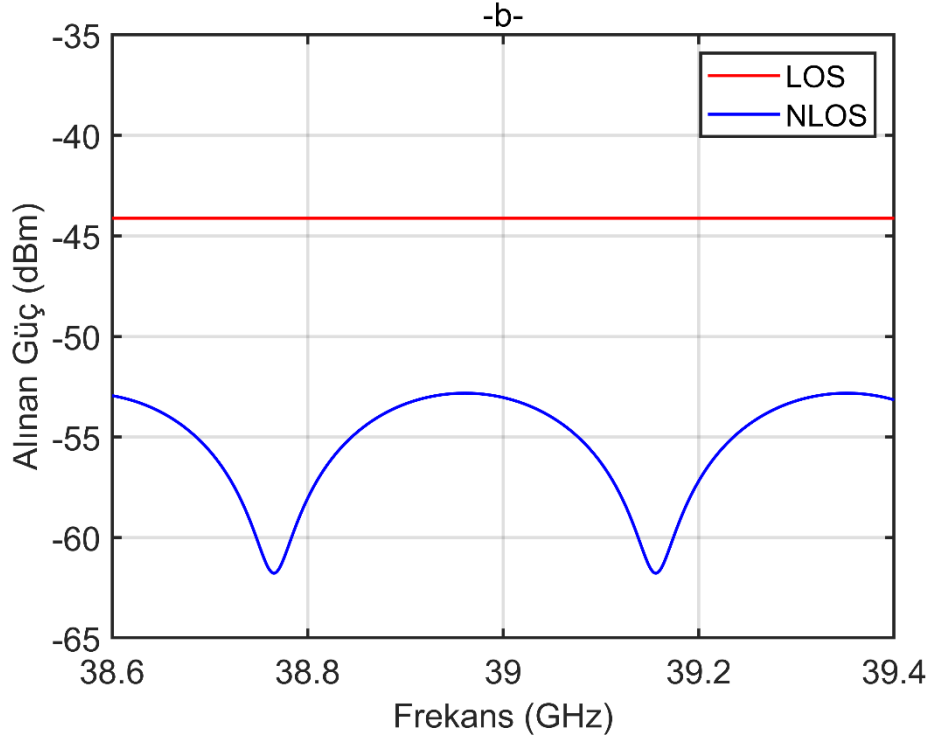
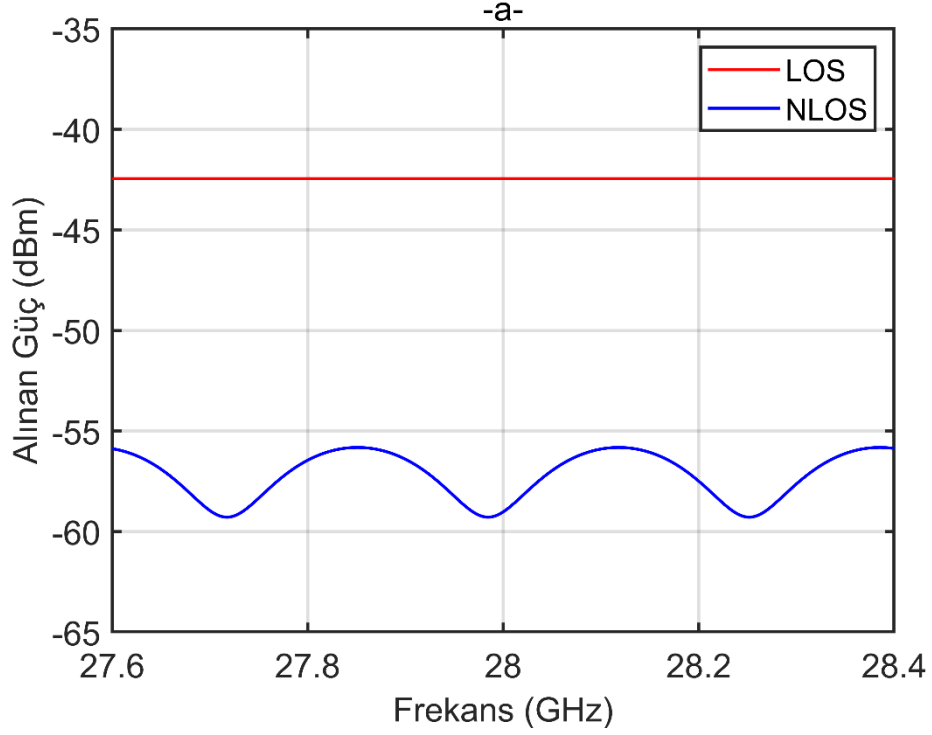
Ondokuzmayıs için yapılan ölçümler sonucunda üretilen kanalların PDP'leri dört farklı senaryoya da birer örnek olmak üzere, Şekil 4.24 ile gösterilmiştir. Kanallar incelendiğinde dört farklı kanalda da yalnızca birer adet zaman kümesi, LOS durumlarda bir adet, NLOS durumlarda ise ikişer adet yankı gözlemlenmektedir. Bunun sebebi RMa senaryoda alıcı ve verici arasında herhangi bir yansıtıcı yüzeyin bulunmaması veya çok az sayıda bulunmasıdır. NYUSIM kanal modelleyicisinde de, modeller oluşturulurken RMa senaryoda en fazla iki adet yankı oluşturulabilecek şekilde ayarlanmıştır. LOS durumunda 28 GHz için bulunan tek yankı 666 ns'de -38.38 dBm iken 39 GHz için 666 ns'de -41.42 dBm olarak ölçülmüştür. İki yankı arasında -3.04 dBm fark bulunmaktadır. NLOS durumunda ise 28 GHz için en güçlü yankı 1666 ns'de -74.82 dBm iken 39 GHz için 1670 ns'de -75.40 dBm' dir. Bu durumda 28 GHz frekansı 39 GHz 'den yalnızca 0.58 dBm daha güçlüdür. Ondokuzmayıs için oluşturulan kanallar çok sayıda yankı içerdiği için

diğer bölgelerin kanalları için yapılan 40 dB'lik yakınlaştırma işlemi bu kanallar için yapılmamıştır.



Şekil 4.30. Bafra ölçüm merkezi için PDP'ler a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

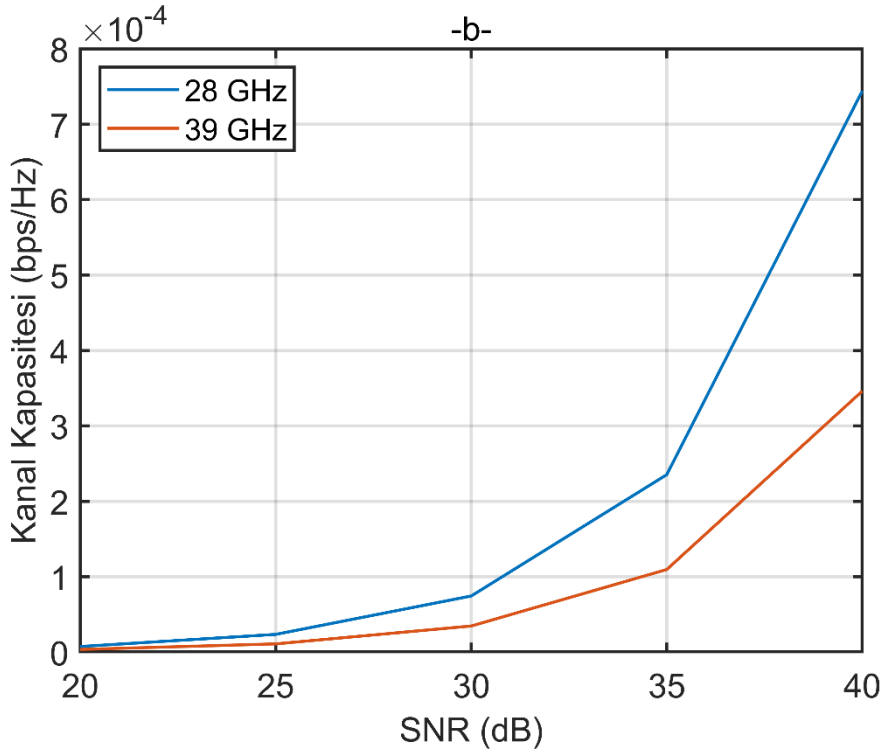
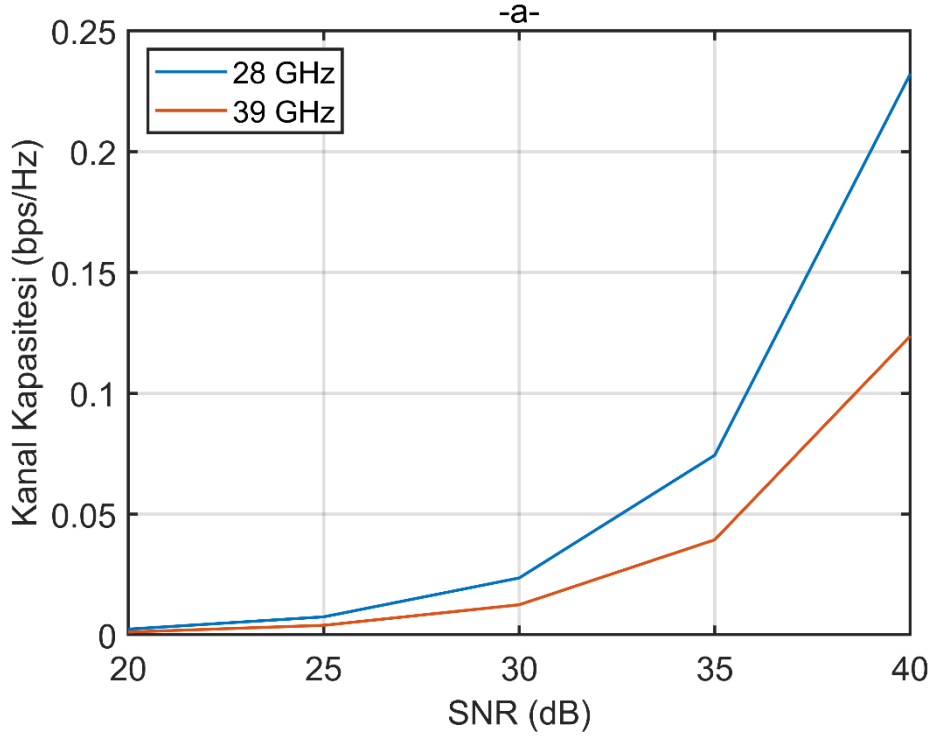
Ondokuzmayıs bölgesi kanallarının frekans bölgesi yanıtları Şekil 4.31 ile verilmiştir. Her iki frekans için de LOS durumunda tek bir yankı gözlemlendiği için frekans yanıtları tüm frekanslarda aynı güçtedir. NLOS durumlarında ise toplamda ikişer yankıdan oluştukları için sinüzoidal bir yapıdadırlar. 28 GHz frekansı için, LOS durumunda tüm frekanslarda güç -42.45 dBm, NLOS durumunda ise ortalama güç -57.22 dBm'dir ve aralarında -14.77 dBm fark bulunmaktadır. NLOS durumunda en güçlü frekans ile en zayıf frekans arasında -3.46 dBm fark bulunmaktadır. 39 GHz frekansı için ise LOS durumunda güç -44.12 dBm, NLOS durumunda ise ortalama güç -55.26 dBm'dir ve aralarında -11.13 dBm fark bulunmaktadır. NLOS durumunda en güçlü frekans ile en zayıf frekans arasında -8.95 dBm fark bulunmaktadır. Burada dikkat çeken durum ise LOS durumunda diğer ölçüm merkezlerinden oldukça düşük güce sahip Ondokuzmayıs bölgesi, NLOS durumunda, alınan güç bakımından, Samsun Bölge'yi geçmiş, Bafra'ya ise yakınlaşmıştır.



Şekil 4.31. Ondokuzmayıs ölçüm merkezi, LOS ve NLOS durumları için kanalların frekans yanıtları a) 28 GHz b) 39 GHz

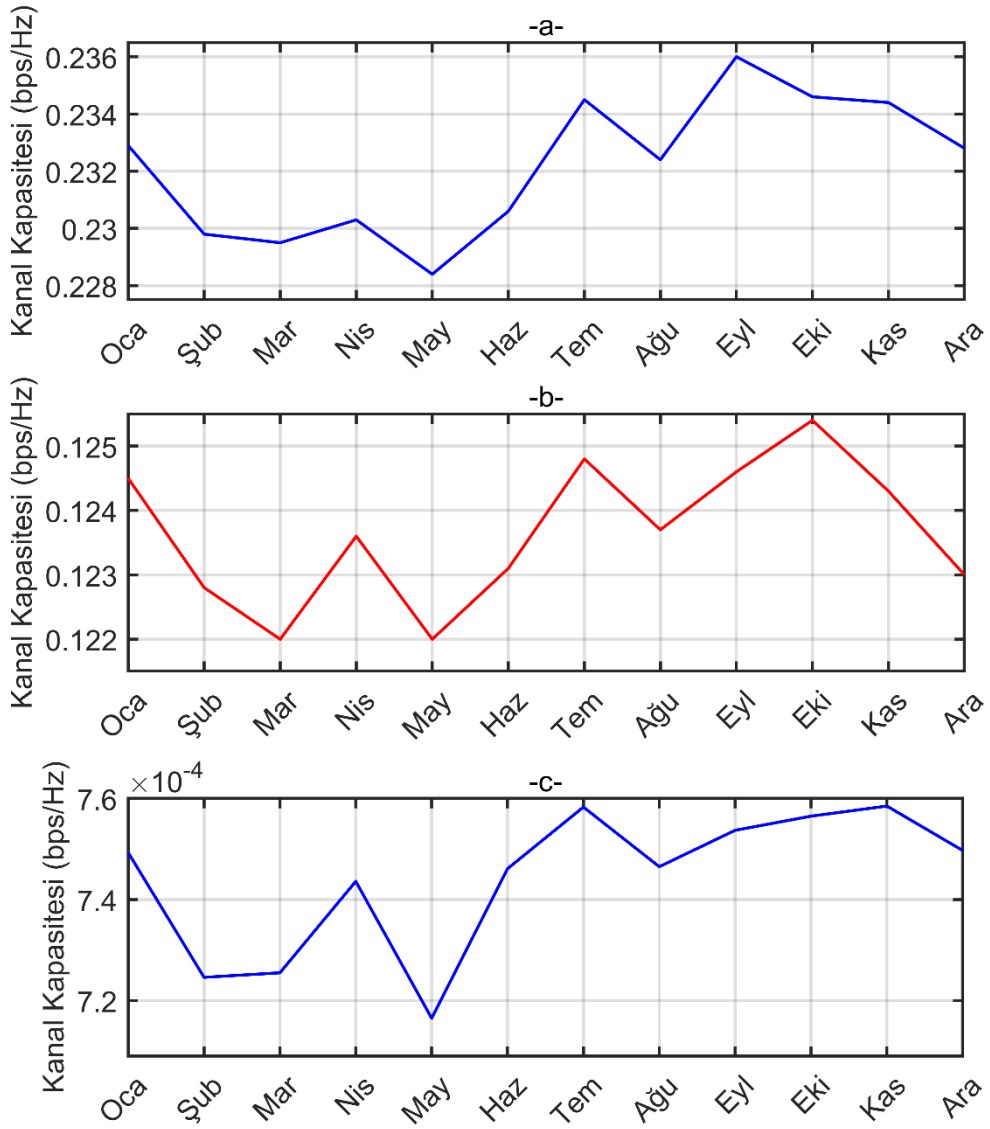
Ondokuzmayıs için hesaplanan yıllık ortalama kanal kapasiteleri Şekil 4.32 ile gösterilmiştir. LOS durumunda, 28 GHz frekansının kanal kapasitesi 40 dB SNR için 0.2322 iken 39 GHz frekansı için 0.1237'tir ve 28 GHz, 39 GHz'ten 1.88 kat daha büyük bir kapasiteye sahiptir. NLOS durumunda ise 28 GHz ve 40 dB SNR için

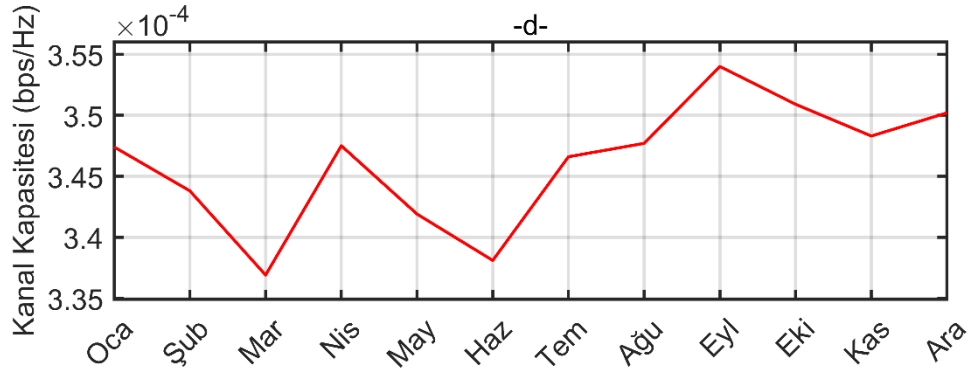
kapasite 0.7441×10^{-3} iken 39 GHz için 0.3461×10^{-3} hesaplanmıştır. 28 GHz, 39 GHz'ten 2.15 kat daha büyük kapasiteye sahiptir.



Şekil 4.32. Ondokuzmayıs için yıllık ortalama kanal kapasiteleri a) LOS b) NLOS

Ondokuzmayıs için de diğer bölgelerde yapıldığı gibi, kanal kapasitelerinin aylık ortalamaları 40 dB SNR için, Şekil 4.33 ile gösterilmiştir. LOS durumunda 28 GHz için en yüksek kanal kapasitesi Eylül ayında 0.2360 iken en düşük kapasite Mayıs ayında 0.2284 olarak hesaplanmıştır. 39 GHz için ise en yüksek kanal kapasitesi Ekim ayında 0.1254, en düşük kapasite ise Mart ve Mayıs aylarında eşit olacak şekilde 0.1220'dir. NLOS durumunda 28 GHz için en yüksek kanal kapasitesi Kasım ayında 0.7585×10^{-3} , en düşük kapasite ise 0.7165×10^{-3} olarak hesaplanmıştır. 39 GHz için ise en yüksek kanal kapasitesi Eylül ayında 0.3540×10^{-3} , en düşük kapasite ise Mart ayında 0.3369×10^{-3} olarak hesaplanmıştır. Diğer bölgelerde de olduğu gibi kanal kapasitesi en çok yağmurdan etkilenmek üzere, yaz aylarında artış gösterme eğilimindedir.

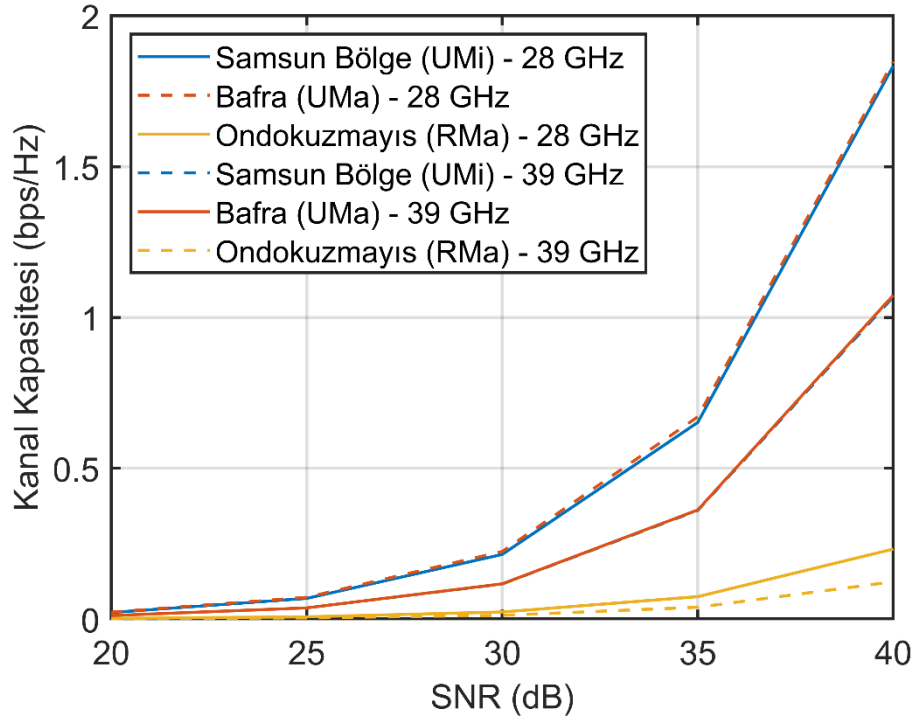




Şekil 4.33. Ondokuzmayıs, 40 dB SNR için aylık kapasite değişimi a) 28 GHz/LOS b) 39 GHz/LOS c) 28 GHz/NLOS d) 39 GHz/NLOS

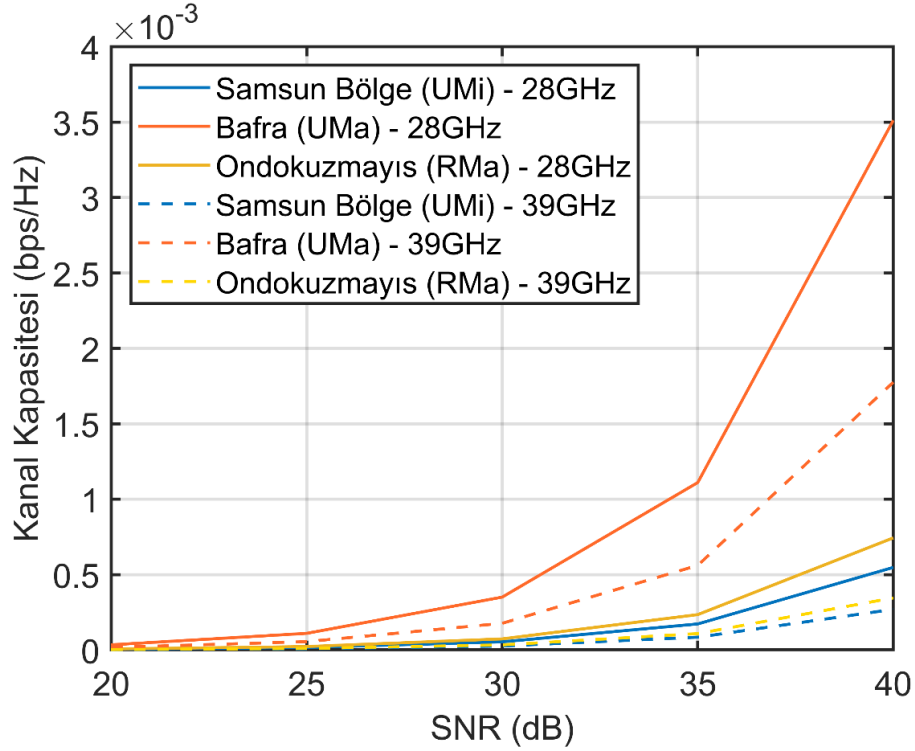
4.2.4. Genel Değerlendirme

Samsun Şehri'nin üç ayrı bölgesi, NYUSIM kanal benzetimcinin üç ayrı ortam senaryosu ile modellenmiştir. Samsun Meteoroloji 10. Bölge Müdürlüğü tarafından, üç ayrı ölçüm noktasında alınan veriler kanal modellerinde kullanılmıştır. Samsun Bölge ölçüm merkezi UMi senaryo, Bafra ölçüm merkezi UMa, Ondokuzmayıs ölçüm merkezi ise RMa ortam senaryosu ile modellenmiştir. Her üç ölçüm noktası incelendiğinde, kanal kapasitesinin yağış oranı ile ters orantı gösterdiği, aynı zamanda sıcaklığın arttığı yaz aylarında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Tüm ölçüm noktalarında gerçekleştirilen analizlerin yıllık ortalamaları alınmış ve Şekil 4.34 ile gösterilmiştir. LOS durumu ve 40 dB SNR için, Samsun Bölge ölçüm merkezinde, 28 GHz frekansında kanal kapasitesi 1.8339 iken 39 GHz için 1.0682 olarak hesaplanmıştır. Aynı durumlarda Bafra bölgesinde 28 GHz için kapasite 1.8481, 39 GHz için 1.0737, Ondokuzmayıs ölçüm merkezinde 28 GHz için 0.2322 ve 39 GHz için 0.1237'dir. LOS durumunda, 28 GHz için Samsun Bölge ve Bafra arasında yalnızca çok az bir kapasite farkı bulunurken, Ondokuzmayıs için ölçülen kanal kapasitesi ile Samsun Bölge arasında 7.90, Bafra ile arasında 7.96 kat fark bulunmaktadır. 39 GHz için ise Samsun Bölge ve Bafra arasında çok küçük bir fark bulunurken, Ondokuzmayıs için bulunan kanal kapasitesinden Samsun Bölge 8.64, Bafra 8.68 kat büyük kanal kapasitesine sahiptir.



Şekil 4.34. LOS durumunda, üç ölçüm merkezinin 28 ve 39 GHz frekanslarında yıllık ortalama kanal kapasiteleri

NLOS durumu için yıllık ortalamaları alınan kanal kapasiteleri Şekil 4.35 ile gösterilmiştir. 40 dB SNR için, Samsun Bölge ölçüm merkezinde, 28 GHz frekansında kanal kapasitesi 0.5483×10^{-3} iken 39 GHz için 0.2702×10^{-3} olarak hesaplanmıştır. Aynı durumlarda Bafra bölgesinde 28 GHz için kapasite 3.5126×10^{-3} , 39 GHz için 1.7762×10^{-3} , Ondokuzmayıs ölçüm merkezine 28 GHz için 0.7441×10^{-3} ve 39 GHz için 0.3461×10^{-3} 'dir. NLOS durumunda, 28 GHz için Samsun Bölge ve Bafra arasında LOS senaryonun aksine 6.41 kat gibi büyük bir fark bulunmaktadır. Ondokuzmayıs için ölçülen kanal kapasitesi ile Bafra arasında 4.72 kat fark vardır olarak hesaplanmıştır. LOS için 7.96 olan fark NLOS durumu için önemli derecede azalmıştır. Samsun Bölge ile kıyaslandığında ise, LOS durumda 7.90 kat küçük kapasiteye sahip iken NLOS durumda, Ondokuzmayıs için hesaplanan kapasite Samsun Bölge'den 1.36 kat büyüktür. 39 GHz için ise benzer şekilde Samsun Bölge ve Bafra arasında 6.57 kat fark bulunurken, Ondokuzmayıs için bulunan kanal kapasitesi, Samsun Bölge'den 1.28 kat büyük, Bafra'dan 5.13 kat küçüktür.



Şekil 4.35. NLOS durumunda, üç ölçüm merkezinin 28 ve 39 GHz frekanslarında yıllık ortalama kanal kapasiteleri

28 GHz frekansı için, Samsun Bölge ölçüm merkezinde kanal kapasitesi LOS durumda, NLOS durumdan 3345 kat büyük iken, 39 GHz için bu değer 3953 hesaplanmıştır. Bafra için ise bu değerler 28 ve 39 GHz için sırasıyla 526 ve 604 olarak hesaplanmıştır. Ondokuzmayıs ölçüm merkezi için ise, 28 GHz frekansı kullanılırken LOS durumda hesaplanan kapasite NLOS durumdan 312 kat küçüktür. 39 GHz için ise bu değer 357 kattır. Sonuçlardan anlaşılmıştır ki LOS durumdan NLOS duruma geçişten 39 GHz frekansı her durumda 28 GHz frekansından biraz daha fazla etkilenmiştir. Aynı zamanda görüş hattı değişiminden en çok etkilenen ölçüm merkezi UMi senaryo ile modellenen Samsun Bölge olurken, en az etkilenen RMa ile modellenen Ondokuzmayıs ölçüm merkezi olmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında 5G sistemlerinde kullanılacak kanal modellerinin kanal kapasitesi analizleri üzerine çalışılmıştır. NYUSIM kanal benzetimcisi yardımıyla, kanal parametrelerinin teorik olarak değerlendirildiği ilk aşamada, öncelikle taşıyıcı frekansları, MIMO anten sayıları ve kanalın LOS/NLOS durumu UMi senaryosu ile değerlendirilmiştir. Her bir modelin kanal kapasitesinin 2000 kez tekrar edilip ortalaması alınarak hesaplanan benzetim sonuçlarına göre 28 GHz frekansı, 39 GHz frekansından LOS durumunda 1.77 NLOS durumda ise 1.84 kat büyük kapasiteye sahiptir. MIMO anten sayısının 2x2 diziliminden, 64x64 dizilimine çıktığı diğer bir değerlendirme sonucuna göre, anten sayıları 32 kat artarken kanal kapasiteleri de benzer sonuçlar göstermiştir. 28 GHz ve LOS durumu için kanal kapasitesi 32 kat anten sayısındaki artış ile 26.99 kat artarken, NLOS durumu için 29.59 kat artış göstermiştir. 39 GHz için ise, LOS durumunda artış 28.58 kat iken NLOS durumunda 29.88 kattır. Görüş hattı uygulamaları değerlendirildiğinde, 28 GHz için kanal kapasitesi NLOS durumdan LOS duruma geçildiğinde 194.24 kat, 39 GHz için geçildiğinde ise 202.51 kat büyük kanal kapasitesi gözlemlenmektedir. LOS ve NLOS duruma alıcı-verici mesafesinin de etkisi incelendiğinde, mesafe 100 metreden 500 metreye çıkarıldığında, LOS durumunda, 28 GHz için kapasite 15.01 kat 39 GHz içinse 18.89 kat artmıştır. NLOS durumda ise, 28 GHz için kanal kapasitesi 193.98 kat artarken, 39 GHz için kanal kapasitesi 281.67 kat artmıştır.

İklim verilerinin değerlendirildiği diğer aşamada, barometrik basınç, nem yüzdesi, sıcaklık ve yağış oranının kanal kapasitesine etkisi incelenmiştir. Farklı varyasyonların denendiği bu aşamada yağış oranı dışında ki diğer üç parametre, kanal kapasitesini en fazla %2.86 etkilemektedir. Yağış oranında ise, yağışın hiç olmadığı ve 150 mm/s olduğu durumlarda kapasiteler hesaplanmıştır ve 28 GHz için kanal kapasitesi %36.96 azalırken 39 GHz için %56.31 azalmaktadır. NYUSIM ortam senaryoları da bu aşamada incelenmiştir. 28 GHz ve LOS durumunda UMi ve UMa senaryolarının kanal kapasiteleri neredeyse aynı iken, RMa senaryodan sırasıyla 6.70 ve 6.66 kat daha büyüktür. 39 GHz için de bu değerler sırasıyla 7.52 ve 7.63 kattır. NLOS durumunda ise 28 GHz için UMa senaryo RMa'dan 4.41, UMi'den 5.18 kat büyük kapasiteye sahiptir. 39 GHz için bu değerler sırasıyla 2.97 ve 4.11 kattır.

Bu çalışmadan anlaşılmıştır ki 5G teknolojisi ile hayatımıza girmiş olan mmDalga teknolojisi birçok parametreden oldukça fazla etkilenmektedir. Özellikle frekansın artışı ile ters orantılı olarak düşen sinyal gücü, kanal parametrelerindeki değişiklikler ile tekrar güçlendirilebilir. Çalışma göstermiştir ki; MIMO anten sayılarını arttırılarak kanal kapasitesi önemli miktarda artabilir. Aynı zamanda alıcı ve verici arasında doğrudan bir görüş ayarlamak kapasitede çok büyük bir artışa neden olmaktadır. Alıcı-verici mesafesini azaltmak ve uygun frekansta çalışmak ta kanal kapasitesini arttırır. Özellikle bozucu etkilerin çok olduğu kentsel kesimlerde NLOS durumlarda kanal kapasitesinin bir hayli düşüş yaşadığı, dolayısıyla gerek anten sayıları, gerek alıcı-verici mesafeleri ile hem LOS ihtimalini arttırmak, dolayısıyla da kanal kapasitesinin arttırmak gerekmektedir. Bozucu etkilerin nispeten daha az olduğu, seyrek kentleşmiş bölgelerde NLOS durumunda kanal kapasitesi nispeten daha az olsa da önemli ölçüde düşmektedir. Bu ortamlar için de aynı yöntemler, daha seyrek uygulanarak kanal kapasitesi arttırılabilir. Bozucu etkilerin çok az bulunduğu kırsal alanlarda ise kapasite düşüşüne alınacak önlemler, yalnızca ağaç, tepe vb. olguların bulunduğu yerlerde alınacak önlemler ile giderilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdullah-Al-Nahid, S., Khan, T. A., Taseen, M. A., Tasnim, S., Marium, T., & Baki, A. (2021). *Comparison of Condition Numbers and Ranks of the MIMO Channel at 77 GHz Carrier Frequency*. Paper presented at the 2021 5th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT).
- Agrawal, J., Patel, R., Mor, P., Dubey, P., & Keller, J. (2015). Evolution of mobile communication network: From 1G to 4G. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 3, 1100-1103.
- Al-Falahy, N., & Alani, O. Y. (2017). Technologies for 5G networks: Challenges and opportunities. *It Professional*, 19(1), 12-20.
- Al-Falahy, N., & Alani, O. Y. (2019). Millimetre wave frequency band as a candidate spectrum for 5G network architecture: A survey. *Physical Communication*, 32, 120-144.
- Al-Shuwaili, A., & Jamel, T. M. (2021). *5G Channel Characterization at Millimeter-Wave for Baghdad City: An NYUSIM-based Approach*. Paper presented at the 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD).
- Alfaresi, B., Nawawi, Z., Malik, R. F., Anwar, K., & Nur, L. O. (2020). Humidity Effect to 5G Performance under Palembang Channel Model at 28 GHz. *Sinergi*, 24(1), 49-56.
- Alizadeh, A., Vu, M., & Rappaport, T. S. (2019). *A study of interference distributions in millimeter wave cellular networks*. Paper presented at the 2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS).
- Ameen, J. J. H. (2017). 5G Next Generation Mobile Wireless Technology with Massive MIMO Continue 4G Revolution, Key Technologies and Challenges. *Eurasian Journal Of Science And Engineering*, 2(2).
- Armstrong, J. (2009). OFDM for optical communications. *Journal of lightwave technology*, 27(3), 189-204.
- Budalal, A. A., Rafiqul, I. M., Habaebi, M. H., & Rahman, T. A. (2019). The effects of rain fade on millimetre wave channel in tropical climate. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 8(2), 653-664.
- Budalal, A. A., Shayea, I., Islam, M. R., Azmi, M. H., Mohamad, H., Saad, S. A., & Daradkeh, Y. I. (2021). Millimetre-Wave Propagation Channel Based on NYUSIM Channel Model With Consideration of Rain Fade in Tropical Climates. *IEEE Access*, 10, 1990-2005.
- Çakmak, M., & Albayrak, Z. (2018). A Review: Mobile Communication Past, Present Future. *Network*, 5, 28Ghz.
- Di Ciaula, A. (2018). Towards 5G communication systems: Are there health implications? *International journal of hygiene and environmental health*, 221(3), 367-375.
- Dixit, S., & Katiyar, H. (2015). *Performance of OFDM in time selective Multipath fading channel in 4G Systems*. Paper presented at the 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies.
- Gallager, R. G. (1968). *Information theory and reliable communication* (Vol. 588): Springer.
- Gawas, A. U. (2015). An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(5), 3130-3133.

- Gupta, V., & Bonde, P. (2021). Impact of Channel Capacity and Signal Bandwidth on Power Consumption in New Generation Wireless Networks. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, 19(2).
- Hasan, R., Mowla, M. M., & Hoque, N. (2020). *Performance Estimation of Massive MIMO Drop-based Propagation Channel Model for mmWave Communication*. Paper presented at the 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP).
- Hasan, R., Mowla, M. M., Rashid, M. A., Hosain, M. K., & Ahmad, I. (2019). *A statistical analysis of channel modeling for 5g mmwave communications*. Paper presented at the 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE).
- He, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Pang, L., Chen, Y., & Ren, G. (2020). *Investigation and Comparison of QuaDRiGa, NYUSIM and MG5G Channel Models for 5G Wireless Communications*. Paper presented at the 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall).
- Hikmaturokhman, A., Suryanegara, M., & Ramli, K. (2019). *A comparative analysis of 5G channel model with varied frequency: a case study in Jakarta*. Paper presented at the 2019 7th International Conference on Smart Computing & Communications (ICSCC).
- Hoppe, R., Wölfle, G., & Jakobus, U. (2017). *Wave propagation and radio network planning software WinProp added to the electromagnetic solver package FEKO*. Paper presented at the 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-Italy (ACES).
- Ilyas, R., Malik, A., Alammari, A. A., & Sharique, M. (2021). *5G and mmWave MIMO Channel Models: Simulations and Analysis*. Paper presented at the 2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET).
- Jaeckel, S., Peter, M., Sakaguchi, K., Keusgen, W., & Medbo, J. (2016). *5G channel models in mm-wave frequency bands*. Paper presented at the European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference.
- Jaeckel, S., Raschkowski, L., Börner, K., & Thiele, L. (2014). QuaDRiGa: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 62(6), 3242-3256.
- Játiva, R., Salazar, A., & Toscano, W. (2019). *Reference models for 5G wireless communications channels*. Paper presented at the 2019 IEEE Fourth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM).
- Ju, S., Kanhere, O., Xing, Y., & Rappaport, T. S. (2019). *A millimeter-wave channel simulator NYUSIM with spatial consistency and human blockage*. Paper presented at the 2019 IEEE global communications conference (GLOBECOM).
- Ju, S., & Rappaport, T. S. (2018). *Millimeter-wave extended NYUSIM channel model for spatial consistency*. Paper presented at the 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM).
- Juneja, S., Pratap, R., & Sharma, R. (2021). Semiconductor technologies for 5G implementation at millimeter wave frequencies—Design challenges and current state of work. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 205-217.
- Kurniawan, A., Danisya, A. R., & Isnawati, A. F. (2020). *Performance of mmWave Channel Model on 28 GHz Frequency Based on Temperature Effect in Wonosobo City*. Paper presented at the 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat).

- Larasati, S., Yuliani, S. R., & Danisya, A. R. (2020). Outage Performances of 5G Channel Model Influenced by Barometric Pressure Effects in Yogyakarta. *JURNAL INFOTEL*, 12(1), 25-31.
- Lassabe, F., Canalda, P., Chatonnay, P., Spies, F., & Baala, O. (2005). *A Friis-based calibrated model for WiFi terminals positioning*. Paper presented at the Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks.
- Li, B., Qu, Q., Yan, Z., & Yang, M. (2015). *Survey on OFDMA based MAC protocols for the next generation WLAN*. Paper presented at the 2015 IEEE wireless communications and networking conference workshops (WCNCW).
- Li, X., Gani, A., Salleh, R., & Zakaria, O. (2009). *The future of mobile wireless communication networks*. Paper presented at the 2009 International Conference on Communication Software and Networks.
- Lodro, M. M., Majeed, N., Khuwaja, A. A., Sodhro, A. H., & Greedy, S. (2018). *Statistical channel modelling of 5G mmWave MIMO wireless communication*. Paper presented at the 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET).
- Lübke, M., Dimce, S., Schettler, M., Lurz, F., Weigel, R., & Dressler, F. (2021). *Comparing mmWave Channel Simulators in Vehicular Environments*. Paper presented at the 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring).
- Mohr, W., & Becher, R. (2000). *Mobile communications beyond third generation*. Paper presented at the Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No. 00CH37152).
- Momo, S. H. A., & Mowla, M. M. (2019). *Statistical analysis of an outdoor mmWave channel model at 73 GHz for 5G networks*. Paper presented at the 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2).
- Mowla, M. M., Dutty, H. B. H., & Ahmad, I. (2019). *A statistical mmWave channel modeling for backhaul networks in 5G communications*. Paper presented at the 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2).
- Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su, L., & Vasilakos, A. V. (2015). A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges. *Wireless networks*, 21(8), 2657-2676.
- Ntaikos, D., Gizas, B., Papageorgiou, G., & Papadias, C. B. (2017). *Channel model simulator for multi-antenna terrestrial links*. Paper presented at the 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops).
- Prasad, R., & Hara, S. (1996). *An overview of multi-carrier CDMA*. Paper presented at the Proceedings of ISSSTA'95 International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications.
- Prasetyo, A. H., Suryanegara, M., & Asvial, M. (2019). *Evaluation of 5G Performance at 26 GHz and 41 GHz frequencies: The Case of Tropical Suburban Areas in Indonesia*. Paper presented at the 2019 IEEE 14th Malaysia International Conference on Communication (MICC).
- Qamar, F., Abbas, T., Hindia, M. N., Dimiyati, K. B., Noordin, K. A. B., & Ahmed, I. (2017). *Characterization of MIMO propagation channel at 15 GHz for the 5G spectrum*. Paper presented at the 2017 IEEE 13th Malaysia international conference on communications (MICC).

- Rahayu, Y., & Pohan, I. A. (2021). *38 GHz Channel Modeling for 5G Communication at Pekanbaru City*. Paper presented at the 2021 IEEE Symposium On Future Telecommunication Technologies (SOFTT).
- Rahman, M. N., Anwar, K., & Nur, L. O. (2019). *Indonesia 5G channel model considering temperature effects at 28 GHz*. Paper presented at the 2019 Symposium on Future Telecommunication Technologies (SOFTT).
- Ramteke, S. B., Deshmukh, A., & Dekate, K. (2018). *A review on design and analysis of 5G mobile communication MIMO system with OFDM*. Paper presented at the 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA).
- Rappaport, T. S., Sun, S., & Shafi, M. (2017). *Investigation and comparison of 3GPP and NYUSIM channel models for 5G wireless communications*. Paper presented at the 2017 IEEE 86th vehicular technology conference (VTC-Fall).
- Roy, P., Vishwakarma, R., Jain, A., & Singh, R. (2016). *Multiband millimeter wave antenna array for 5G communication*. Paper presented at the 2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES).
- Saad, W., Bennis, M., & Chen, M. (2019). A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE network*, 34(3), 134-142.
- Sharma, P. (2013). Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2(8), 47-53.
- Squali, L., & Riouch, F. (2019). *Atmospheric parameters influence on mm-wave propagation in 5G communication*. Paper presented at the 2019 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT).
- Sun, S., MacCartney, G. R., & Rappaport, T. S. (2017). *A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications*. Paper presented at the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC).
- Sun, S., Rappaport, T. S., Shafi, M., Tang, P., Zhang, J., & Smith, P. J. (2018). Propagation models and performance evaluation for 5G millimeter-wave bands. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(9), 8422-8439.
- Tsoulos, G. (2018). *MIMO system technology for wireless communications*: CRC press.
- Yilmaz, O. N., Wang, Y.-P. E., Johansson, N. A., Brahmi, N., Ashraf, S. A., & Sachs, J. (2015). *Analysis of ultra-reliable and low-latency 5G communication for a factory automation use case*. Paper presented at the 2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW).
- Yin, H., & Alamouti, S. (2006). *OFDMA: A broadband wireless access technology*. Paper presented at the 2006 IEEE sarnoff symposium.
- Zaman, K., & Mowla, M. M. (2020). *A millimeter wave channel modeling with spatial consistency in 5G systems*. Paper presented at the 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP).
- ZEKRI, A. B., & AJGOU, R. (2019). *Study of mmWave channels for different scenarios*. Paper presented at the 2019 6th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA).
- Zeman, K., Masek, P., Stusek, M., Hosek, J., & Silhavy, P. (2017). *Accuracy comparison of propagation models for mmWave communication in NS-3*. Paper presented at the 2017 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT).

ÖZ GEÇMİŞ

Ahmet Furkan Kola, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi'nden 2020 yılında mezun oldu. 2021 yılında OMÜ LEE Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans programını bitirdi/girdi. Mezuniyetinden bu yana Araştırma Görevlisi olarak görev yapan Ahmet Furkan Kola, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0003-0510-3255

Yayımlar:

1. Kola A. F., Kurnaz Ç., “NYUSIM Kanal Benzetimcisi ile 28/73 MIMO Kanal Kapasitelerinin Analizi”, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, Aralık, 2022.