

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA MONTELİ AKILLI YÜZEY KULLANAN  
MİLİMETRİK DALGA BANDI HABERLEŞMESİNDE ÇİZELGELEME  
YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sertap ÜNLÜ CINALIOĞLU**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ**

**AĞUSTOS 2023**



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA MONTELİ AKILLI YÜZEY KULLANAN MİLİMETRİK DALGA BANDI HABERLEŞMESİNDE ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Sertap ÜNLÜ CİNALIOĞLU

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ

Tarih: Ağustos 2023

Son yıllarda, veri hızı taleplerinin ve kullanıcı sayısının artmasıyla birlikte haberleşme alanındaki çalışmalar, beşinci nesil (5G) teknolojiler ve ötesine odaklanmıştır. Milimetrik dalga frekanslarında iletişim kurma, 5G ve daha gelişmiş teknolojiler için hedeflenen veri hızı ve kapasite sorunlarına çözümler sunabilecek tekniklerden biridir. Ayrıca, insansız hava araçlarının (İHA), doğal afetler ve kamu güvenliği gibi durumlarda iletişim amaçlı kullanımı yaygınlaşmaktadır. İHA'ların yüksek irtifalara çıkabilme ve kolayca konuşlandırılabilme yetenekleri sayesinde İHA'lar acil durumlarda kullanılabilirliğiyle öne çıkmaktadırlar. Bunun yanı sıra, beşinci nesil ve daha gelişmiş teknolojiler için yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeylerin (RIS) kullanılması da önerilmektedir. RIS, sinyalin fazını ayarlayarak sinyali belirli bir noktaya yönlendirebilen pasif elemanlardan oluşur. İHA üzerine yerleştirilen bir RIS sayesinde, baz istasyonundan alınan sinyallerin gönderileceği yönler ayarlanabilir. İHA-RIS kombinasyonunun kullanılmasıyla, milimetrik dalga iletişimindeki çeşitli zorlukların üstesinden gelinebilir. Baz istasyonu için hibrit hüzmeye şekillendirme tekniği kullanılacaktır. Hibrit hüzmeye şekillendirme, analog hüzmeye şekillendirme için Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform - DFT) kod çizelgesi tabanlı iletim hüzmeye şekillendirme yöntemi ve dijital hüzmeye şekillendirme için sıfır zorlamalı (Zero-Forcing - ZF) iletim hüzmeye oluşturma tekniğinin birlikte kullanılmasını içerir. Ayrıca, RIS elemanlarının faz kaymaları, DFT tabanlı kod kitapçığı optimizasyonu ve

alternatif optimizasyon teknikleriyle eniyilenmiştir. Kullanıcıların adil bir şekilde planlanabilmesi için girişim duyarlı adil orantılı çizelgeleme algoritması geliştirilmiştir. RIS kullanımının performansa etkisi, adil çizelgeleme ve hibrit hüzmeleme yöntemlerinin performansları çeşitli karşılaştırmalarla incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** İnsansız hava araçları, Akıllı yüzeyler, Hüzme şekillendirme, Milimetrik dalga, Kullanıcı çizelgeleme



## **ABSTRACT**

Master of Science

### **DEVELOPMENT OF SCHEDULING METHODS IN MILLIMETER-WAVE COMMUNICATION USING MOUNTABLE RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACES ON UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Sertap ÜNLÜ CİNALIOĞLU

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Master of Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ

Date: August 2023

In recent years, with the increasing demand for data speed and the number of users, research in the field of communication has focused on fifth-generation (5G) technologies and beyond. Communication using millimeter-wave frequencies is one of the techniques targeted for 5G and beyond to address the challenges of data speed and capacity. Additionally, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), also known as drones, for communication purposes has become more widespread, particularly in natural disasters and public safety situations. UAVs offer advantages in emergency situations due to their ability to operate at high altitudes and be easily deployed. Furthermore, the utilization of reconfigurable intelligent surfaces (RIS) is proposed for 5G and beyond. RIS consists of passive elements that can adjust the phase of incoming signals to direct them towards specific locations. By placing an RIS on a UAV, the directions in which signals received from the base station are transmitted can be adjusted.

The combination of UAVs and RIS aims to overcome various challenges in millimeter-wave communication. A hybrid beamforming technique will be employed for the base station. Hybrid beamforming combines discrete Fourier transform (DFT) codebook-based transmission beamforming for analog beamforming and zero-forcing (ZF) beamforming for digital beamforming. Additionally, the phase shifts of RIS elements have been optimized using DFT-based codebook optimization and alternative

optimization techniques. To ensure fair scheduling of users, an interference-aware fair proportional scheduling algorithm has been developed. The performance impact of RIS deployment has been examined through various comparisons with proportional fair scheduling and hybrid beamforming.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicles, Intelligent Surfaces, Beamforming, Millimeter Wave, User scheduling



## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof.Dr. Tolga Girici, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, destekleriyle her zaman yanımda olan eőim Mustafa Cihan Cinalioğlu'na ve oğlum Yiğit Eren Cinalioğlu'na çok teşekkür ederim.

Bu tez çalıőması kapsamındaki araőtırmalarım 122E401 numaralı "Terahertz Bandı Haberleşmede İnsansız Hava Araçları Ve Akıllı Yüzeylerin Kullanımı" başlıklı TÜBİTAK araştırma projesi tarafından desteklenmiőtir. Bu destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teőekkürlerimi sunuyorum.





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Milimetrik Dalga Haberleşmesi .....	3
1.1.1 Tanımı .....	3
1.1.2 Avantajları .....	4
1.1.3 Dezavantajları.....	6
1.2 İnsansız Hava Araçları .....	11
1.2.1 Tanımı .....	11
1.2.2 Tarihi.....	11
1.2.3 Çeşitleri.....	11
1.2.3 Avantajları.....	12
1.3 Akıllı Yüzeyler.....	13
1.3.1 Yapısı.....	14
1.3.2 Kullanım alanları.....	14
1.4 Hüzme Şekillendirme.....	16
1.4.1 Analog hüzme şekillendirme.....	17
1.4.2 Dijital hüzme şekillendirme .....	17
1.4.3 Hibrit hüzme şekillendirme .....	18
1.5 Literatür Araştırması .....	18
1.6 Gerçekleştirilen Çalışmanın Literatüre Katkısı.....	21
<b>2. SİSTEM MODELİ</b> .....	<b>25</b>
2.1 Yol Kaybı Modeli.....	28
2.2 Kanal Modeli.....	29
<b>3. DÜŞÜK KARMAŞIKLIKLI HİBRİT HÜZME ŞEKİLLENDİRME</b> .....	<b>33</b>
3.1 DFT Tabanlı Kod Kitapçığı Analog Hüzme Şekillendirme.....	33
3.2 ZF Tabanlı Dijital Hüzme Şekillendirme .....	34
<b>4. FAZ KAYDIRMA OPTİMİZASYONU</b> .....	<b>37</b>
4.1 DFT Tabanlı Kod Kitapçığı Faz Kaydırma Optimizasyon Yöntemi .....	37
4.2 Alternatif Optimizasyon Yöntemi .....	38
<b>5. ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>39</b>
5.1 Orantılı Adil Çizelgeleme Yöntemi .....	39
5.2 Round Robin Çizelgeleme Yöntemi .....	42
<b>7. NÜMERİK SONUÇLAR</b> .....	<b>45</b>
<b>9. SONUÇ</b> .....	<b>53</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>55</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>59</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Global mobil cihaz ve bağlantı büyümesi.....	2
Şekil 1.2 : mmDalga Bandı Kullanımı.....	5
Şekil 1.3 : Boş Uzay (Free-Space) Yol Kaybı .....	8
Şekil 1.4 : mmDalga frekanslarında atmosferik ve moleküler emilim .....	9
Şekil 1.5 : Mikrodalga ve mmDalga frekanslarında yağmur zayıflaması .....	9
Şekil 1.6 : RIS mimarisi .....	16
Şekil 1.7 : RIS kullanım senaryoları .....	17
Şekil 1.8 : Analog Hüzme Şekillendirme Modeli .....	18
Şekil 1.9 : Dijital Hüzme Şekillendirme Modeli.....	19
Şekil 1.10 : Hibrit Hüzme Şekillendirme Modeli .....	20
Şekil 2.1 : İHA-RIS destekli mmDalga kablosuz iletişim modeli .....	25
Şekil 2.2 : Sistemde bulunan kullanıcıların durumları.....	26
Şekil 2.3 : BS ve İHA-RIS arasındaki mesafe .....	27
Şekil 2.4 : mmDalgada İHA kullanımının uygulama senaryoları.....	27
Şekil 6.1 : BS'deki anten sayısı ile toplam veri akışı ilişkisi .....	47
Şekil 6.2 : BS'deki anten sayısı ile log-toplam veri akışı ilişkisi .....	48
Şekil 6.3 : RIS eleman sayısının performansa etkisi.....	49
Şekil 6.4 : Rice faktörünün veri akışı ile ilişkisi .....	52



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 1.1: mmDalgada yağmur zayıflaması ve oksijen emilimi .....	10
Çizelge 2.1 : Yol Kaybı Parametreleri .....	29
Çizelge 3.1 : Kanal matrislerinin oluşturulması ve ZF hüzme şekillendirme.....	36
Çizelge 5.1 : Orantılı Adil Çizelgeleme ve ZF Hüzmeleme (PF-ZF) .....	43
Çizelge 6.1 : Faz kayması optimizasyon tekniklerinin çalışma süreleri .....	50





## KISALTMALAR

<b>3GPP</b>	: Üçüncü Nesil Mobil İletişim Ortaklık Projesi
<b>4G</b>	: Dördüncü Nesil
<b>5G</b>	: Beşinci Nesil
<b>6G</b>	: Altıncı Nesil
<b>ADC</b>	: Analogtan Dijitale Dönüştürücü
<b>BS</b>	: Baz İstasyonu
<b>DAC</b>	: Dijitalden Analoga Dönüştürücü
<b>DFT</b>	: Ayrık Fourier Dönüşümü
<b>FCC</b>	: ABD Federal İletişim Komisyonu
<b>GSA</b>	: Küresel Mobil Tedarikçiler Derneği
<b>GSMA</b>	: GSM Birliği
<b>IEEE</b>	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IMT</b>	: International Mobile Telecommunications
<b>IoT</b>	: Nesnelerin İnterneti
<b>İHA</b>	: İnsansız Hava Aracı
<b>LoS</b>	: Görüş Açısı
<b>M2M</b>	: Makineler Arası Haberleşme
<b>MIMO</b>	: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
<b>mmDalga</b>	: Milimetrik Dalga
<b>nLoS</b>	: Görüş Açısı Dışında
<b>PGM</b>	: Öngörülen Gradyent Yöntemi
<b>RIS</b>	: Yeniden Konfigüre Edilebilir Akıllı Yüzey
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b>SNR</b>	: Sinyal Gürültü Oranı
<b>UPA</b>	: Düzgün Düzlemsel Dizi
<b>ZF</b>	: Sıfır Zorlamalı (Zero-Forcing)





## 1. GİRİŞ

Haberleşme teknolojilerinin gelişimi 1980'lerin başlarından itibaren ilk nesil haberleşme ile başlamıştır. Bu iletişim tekniğinde yalnızca sesli iletişim sağlayabilen analog cihazlar kullanılmaktaydı. 1990'larda ikinci nesil haberleşme ile uluslararası uyumluluk için bazı standartlar oluşturuldu. Ayrıca bu teknikle dijital haberleşmenin de önü açılmıştır. 2000'lerde üçüncü nesil haberleşme ile mobil internet iletişimi sağlandı. Veri hızında ve kapasitede artan talepler doğrultusunda dördüncü nesil (4G) haberleşme teknolojisi 2010'lu yıllarda geliştirildi. 4G haberleşmesi video akışı ve yüksek hızda internet imkanları sağladı ve mobil cihaz kullanımı yaygınlaştı. 2020'ler itibariyle daha da artan veri hızı talepleri ve cihaz sayısı sebebiyle beşinci nesil (5G) haberleşme geliştirilmektedir. 5G haberleşmesinde hedeflerin arasında düşük gecikme süreleri, sanal gerçeklik, çok sayıda cihazın aynı anda haberleşebilmesi ve güvenilirlik bulunmaktadır. Özetle, mobil haberleşme teknolojileri on yılda bir büyük değişimler yaşamaktadır.

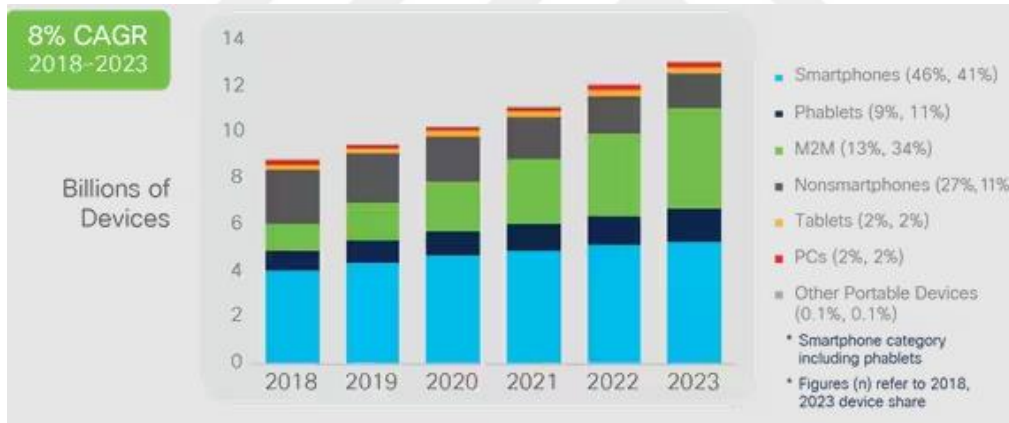
5G haberleşmesi geçmiş teknolojilerle kıyaslandığında mobil geniş bant sunmasının yanı sıra üç kategoride çeşitli kullanım senaryolarını desteklemektedir. Gelişmiş mobil geniş bant ile geniş alanda yüksek mobilite ve kesintisiz kapsama alanı sağlamaktadır. Büyük makine tipi iletişim ile birlikte çok sayıda cihazın haberleşmesi desteklenmektedir. Son derece güvenilir düşük gecikmeli iletişim ile güvenilir ve düşük gecikmenin önemli olduğu akıllı ulaşım sistemleri, uzaktan tıbbi cerrahi, akıllı şebekeler ve afet yardımı gibi senaryoların gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir [1]. 2013 yılından bu yana ulusal düzeyde 5G araştırma için bazı kuruluşlar kurulmuş ve projeler devreye alınmıştır. Avrupa Birliği 5GPPP/METIS, Çin IMT-2020 (5G) Promosyon Grubu, Kore 5G Forumu ve Japonya ARIB bunlardan bazılarıdır. 2015 yılında ITU-R 5G sistemlerini IMT-2020 olarak isimlendirdi. IMT-2020'nin 5G hedefler çerçevesinde sekiz adet temel performans parametresi belirlemiştir. Bunları aşağıda sıralanmıştır [2].

- 10 Gbit/s'den yüksek tepe veri hızı
- 100 Mbit/s kullanıcı deneyimli veri hızı
- 3 kat fazla spektrum verimliliği
- Hücre kenarlarında 100 Mbps'den büyük veri hızları

- 10 Mbit/s/km<sup>2</sup> trafik kapasitesi
- 100 kat fazla ağ enerji verimliliği
- 1 ms kablosuz gecikme
- 500 km/s hareketlilik desteği
- 106/km<sup>2</sup> bağlantı yoğunluğu

GSM Birliği'nin (GSM Association - GSMA), 2022 ekim ayında yayınladığı raporda [Url-1] mobil internet kullanımının dünya nüfusunun %55'ine ulaştığı gösterilmiştir. Ayrıca dünya nüfusunun %95'i bir mobil geniş bant ağı tarafından kapsamaktadır.

5G ile birlikte akıllı evler, uzaktan tıbbi hizmetler, sanal gerçeklik, büyük veri, yapay zeka ve yüksek çözünürlüğe sahip videoların kullanımı yaygınlaşacaktır. Cisco yıllık internet raporunda [Url-2] 2023'de makineler arası haberleşme (M2M) bağlantılarının internet payının %50'sini oluşturacağını belirtmiştir. Nesnelerin interneti (IoT) olarak anılan M2M bağlantılı cihazların giderek yaygınlaşmasıyla kablosuz haberleşmenin kullanımı telefonlarla sınırlı kalmayacaktır. Şekil 1.1'de 2018'den 2023 yılına kadar global mobil cihaz ve bağlantı büyümesi gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : Global mobil cihaz ve bağlantı büyümesi [Url-2].

Küresel Mobil Tedarikçiler Derneği (Global Mobile Suppliers Association-GSA) yayınladığı raporunda [Url-3] Ocak 2023'ün sonunda 156 ülke ve 519 operatörün 5G yatırımları olduğu belirlenmiştir. Bunlardan 95 ülke ve 245 operatör en az Üçüncü Nesil Mobil İletişim Ortaklık Projesi (The 3rd Generation Partnership Project -3GPP) uyumlu 5G hizmeti başlatmıştır. Hem artan cihaz sayısı hem de yatırımlar ile birlikte 5G hedeflerine ulaşılabilmesi için literatürde çeşitli teknolojiler önerilmektedir. Çalışmalar özellikle üç büyük teknolojiye odaklanmıştır. Bunlar milimetrik dalga (mmDalga) haberleşmesi, büyük çoklu giriş çoklu çıkış (massive MIMO) sistemleri, ultra yoğunlaştırma teknolojileridir [3].

## 1.1 Milimetrik Dalga Haberleşmesi

### 1.1.1 Tanımı

5G haberleşmesinde yüksek veri hızı, spektrumun verimli kullanımı, mobilite, gecikme süresinde azalma, bağlanan cihaz yoğunluğunda artış, enerji verimliliği ve trafik kapasitesinde artış hedeflenmektedir [4]. 5G'nin vadettiği gelişimlerin sağlanabilmesi için mmDalga haberleşmesinin kullanımı öngörülmüştür [5].

mmDalga haberleşmesi, 30 GHz ile 300 GHz arasındaki frekans aralığını kapsayan kablosuz haberleşme türüdür. mmDalga bandında, 28–30 GHz'de yerel çok noktalı dağıtım hizmeti, 60 GHz'de lisanssız bant ve 71–76 GHz, 81–86 GHz ve 92–95 GHz'de E-bandı olmak üzere geniş bant genişlikleri mevcuttur [6].

- 28 GHz bant: 27,5 - 29,5 GHz
- 37 GHz bant: 37 - 38.6 GHz bant
- 39 GHz bant: 38.6 - 40 GHz bant
- 60 GHz Bantları: 57 - 64 GHz ve 64 - 71 GHz
- 70/80 GHz eşleştirilmiş E bant: 71 - 76 GHz ve 81 - 86 GHz bantları
- 90 GHz bant: 92 - 95 GHz bant

Dünyada spektrumun mmDalga frekanslarını kapsayan kısımları için çalışmalar yapılmıştır. Örneğin 60 GHz'de çalışan IEEE 802.11ad teknolojisi halihazırda mevcuttur. H2020 programı kapsamında Avrupa Birliği ICT 2017-09 Çağrısı ile 30 GHz'den 300 GHz'e milimetre dalga bantlarını ve THz frekans bantlarını 5G'nin ötesinde kullanılabilirliğine dair araştırma başlatmıştır [2]. ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC) “Spectrum Frontiers Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking” yazısında mmDalga spektrumunun tahsis edilmesine izin vermiştir [Url-4]. FCC aşağıdaki 100 GHz'e kadar olan mmDalga spektrumu ile ilgilenmiştir [7].

Türkiye'de yüksek veri iletim hızı ve noktasal dikey sektör kapsama gereksinimini karşılamak için 15 GHz, 28 GHz ve 70 GHz frekanslarında da denemeler yapılmıştır ve çok yüksek veri iletim hızları (>70 Gbps) gözlemlenmiştir. 80 GHz ve üzeri frekanslar için ASELSAN ve IBM Research Lab tarafından ortaklaşa yürütülen ve geliştirme çalışmaları tamamlanan proje ile W-bandı alıcı ve verici çipleri, bu frekans bandında çalışacak radyo link tasarımı gerçekleştirilmektedir. Proje kapsamında anten sistemi ile taban bant kısımlarının geliştirilmesi ve bu iki kısmın entegre edilerek W-

bandında çalışan geniş bantlı küçük hücre ana taşıyıcı radyo link modülü için prototip geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca Bilgi Teknolojileri Kurumu tarafından yapılan düzenlemelerle 7GHz, 13GHz ve 80GHz frekans bantlarında yerli ürün çıkarma ihtiyacı tespit edilmiştir [Url-5].

mmDalga bantları uydu haberleşmesinde, hücresel haberleşmede arka bağlanımda ve iç mekan yüksek hızlı kablosuz haberleşme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca 60GHz bantları yüksek veri hızına sahip kablosuz yerel alan ağı (Local Area Network) sistemlerinde de kullanılmaktadır [4].

mmDalga haberleşmesinde kullanıma uygun olan ve CMOS teknolojisi ile üretilen, yüksek kazançlı ve yönlendirilebilir antenler mmDalga haberleşmesinin kullanımını desteklemektedir [8].

### 1.1.2 Avantajları

- Büyük bant genişliği

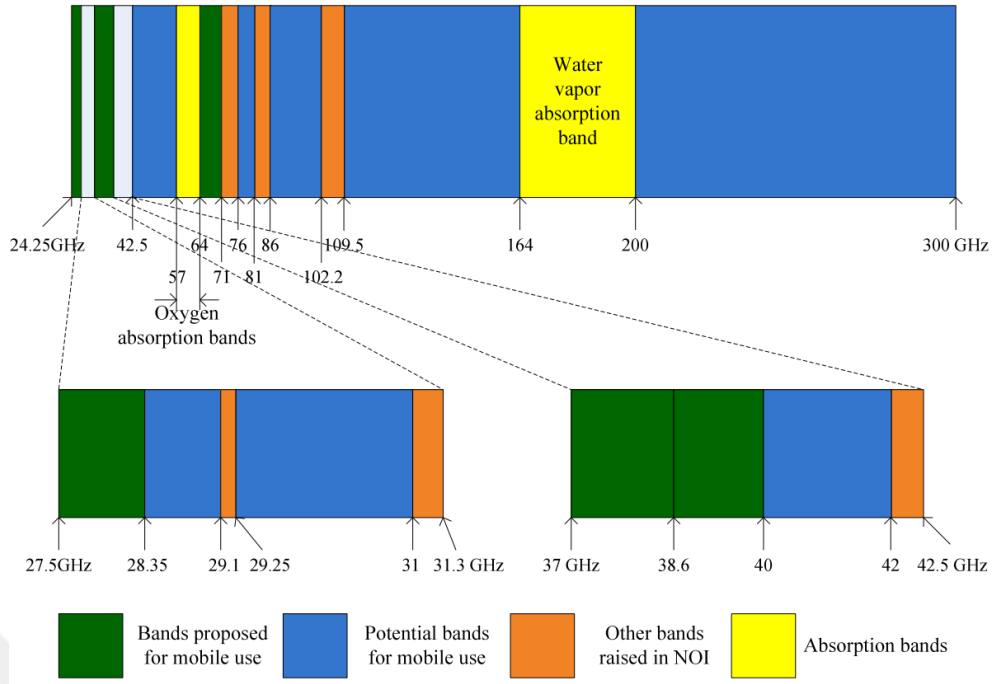
Aşırı yüksek frekans (Extremely High Frequency) aralığı olarak adlandırılan 30GHz ile 300GHz arasındaki boş bant 5G mmDalga haberleşmesinin en büyük avantajlarından biridir. Özellikle 71-76GHz ve 81-86GHz mmDalga frekans bantlarının bant genişliği, mevcut diğer tüm lisanslı spektrumların toplamından daha fazladır [9].

Büyük bant genişliğine sahip olmak yüksek veri hızlarına sahip olmak anlamına gelmektedir. Bant genişliği ile kapasite arasındaki ilişki Shannon-Hartley teoremi denklemine göre ifade edilmiştir. Kanaldaki eklenen beyaz Gauss gürültüsüne maruz kaldığı kabul edilmektedir.

$$C = B \times \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_o} \right) \quad (1.1)$$

Burada  $C$  kanal kapasitesi,  $B$  bant genişliği,  $P$  gönderilen sinyalin gücü,  $N_o$  gürültü gücünü ifade eder. Denklem 1.1'den anlaşılacağı üzere bant genişliğinin artışı ile kanal kapasitesi doğru orantılıdır [2,4,8-11].

Şekil 1.2'de gösterildiği gibi mmDalga bantlarında 60 GHz oksijen emilim bandı (57-64 GHz) ve su buharı soğurma bandı (164-200 GHz) bantlar hariç tutulsa bile kullanılabilir bant genişliği 150GHz'den fazladır. Bu bant genişliği sayesinde 150Gpbs veri hızına ulaşılabilir [2].



Şekil 1.2 : mmDalga Bandı Kullanımı [2].

- Kısa dalga boyu

Elektromanyetik spektrumda frekans arttıkça dalga boyu küçülmektedir. Küçülen dalga boyuyla daha fazla bilgi iletilebilmektedir. mmDalgalar 10 mm ile 1 mm arasında dalga boyuna sahiptir. Yani mmDalgayı 2.4GHz ile kıyasladığımızda mmDalgaların dalga boyları 10 ile 30 kat daha küçüktür. mmDalga'nın sahip olduğu yüksek frekans ve düşük dalga boyu sayesinde bu frekanslarda çalışan anten boyutları küçülmüştür. Bu teknikle çok sayıda antenin kullanımının ve küçük devrelerin, modüllerin ve ekipmanların önü açılmıştır. Çok sayıda antenin bir arada kullanımı ve anten teorisine göre anten aralıklarının etkinliği sayesinde anten kazancı sağlanır. 80GHz ile 2.4GHz frekansları anten kazancı açısından kıyaslandığında mmDalga haberleşmesi 30dB daha fazla kazanç sağlamıştır [9].

- Dar Açılı Işınlamanın oluşturulması

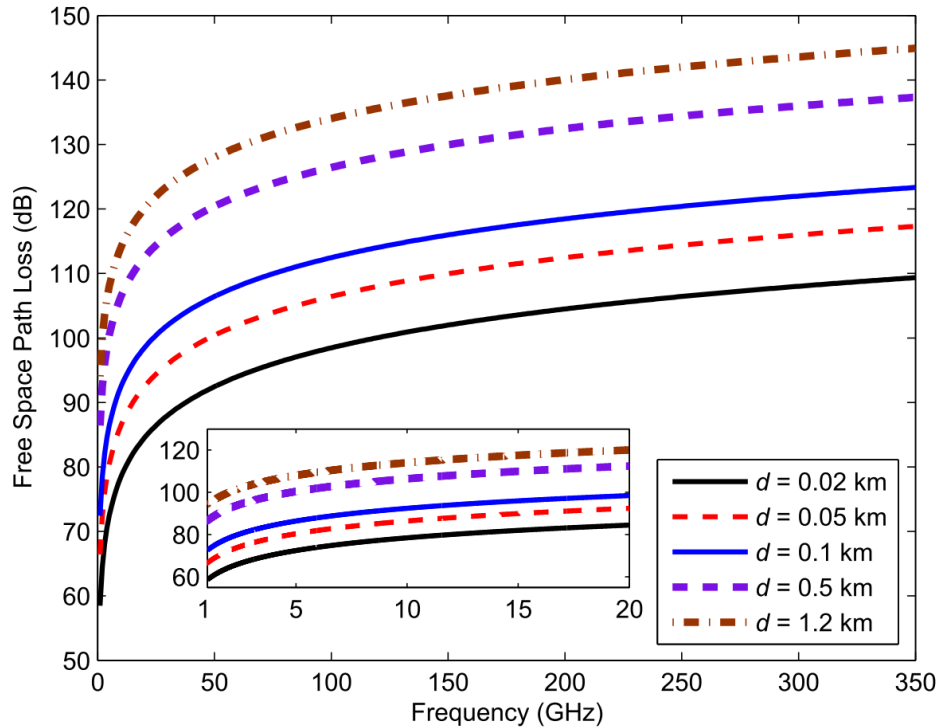
Elektromanyetik ve anten teorisine göre frekanstaki artış hüzmelerin genişliğini düşürür. Böylece belli bir noktaya doğru dar açılı hüzmeler oluşturulabilir ve sahip olunan anten gücü verimli bir şekilde kullanılır. Bu özellik sayesinde mmDalga noktadan noktaya haberleşme açısından uygun hale gelmektedir. Ayrıca hüzmelerin dar açılı oluşturulabilme avantajı hüzmeler arası girişimi de azaltmaktadır. Kısa dalga boyu ve dar açılı ışınların oluşturulabilmesi özellikleriyle



60 GHz'deki yol kaybı 2.4 GHz'deki yol kaybından 28 desibel fazladır [13]. Frekansın ve boş uzay yol kaybı üzerine etkisi Şekil 1.3'de gösterilmiştir. Ayrıca boş uzay yol kaybı verici ve alıcı antenler arasındaki mesafenin artmasıyla da artmaktadır [9].

- Atmosferik Kayıp

Bir sinyalin alıcı verici antenler arasında ilerlerken atmosferden kaynaklı uğradığı kayba atmosferik kayıp denir. mmDalga sinyali atmosfer içinde bulunan oksijen ve su buharı gibi moleküllerin etkileşiminden etkilenir [9]. Atmosferik kayıp sinyalin atmosferik moleküllerle etkileşime girerek bu moleküllerin titreşimlerinden etkilenmelerinden kaynaklanır. Sinyalin sahip olduğu frekansla orantılı bir güçle titreşmeye başlar ve sinyal enerjisinin bir kısmı emilir. Atmosferik kayıp özellikle bazı frekanslarda önemli ölçüde yüksektir. mmDalga üzerinde hem sinyalin iletim mesafesini kısıtlar hem de 5G haberleşmesinde etkin kullanımını etkiler.

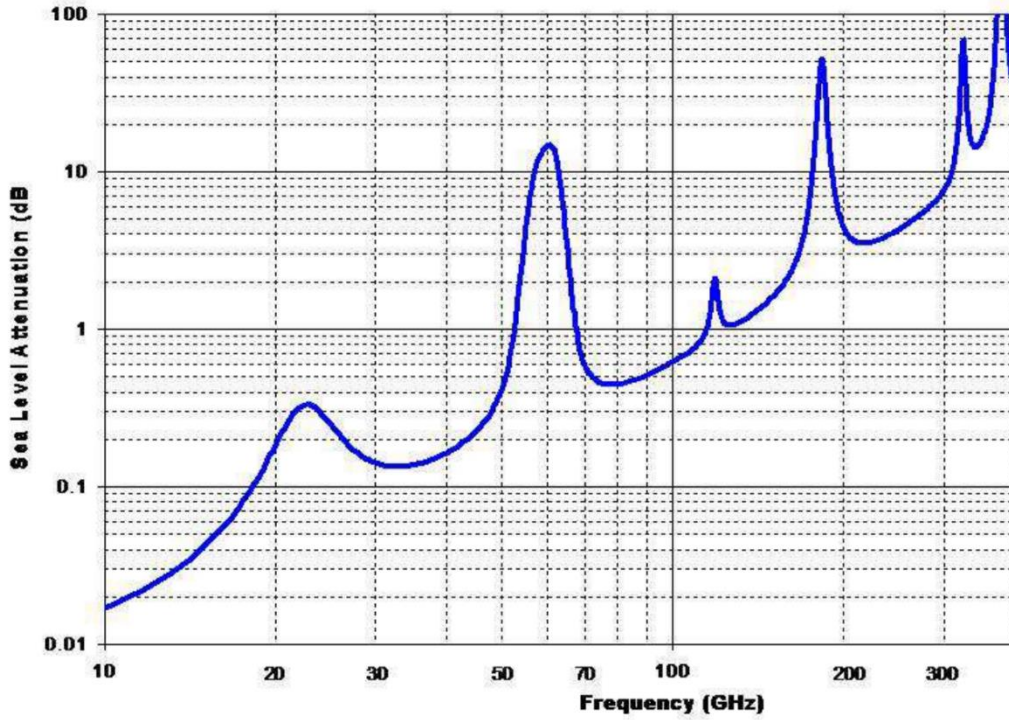


Şekil 1.3 : Boş Uzay (Free-Space) Yol Kaybı [9].

Şekil 1.4'de atmosfer nedeniyle deniz seviyesinde meydana gelen atmosferik kayıpların grafiği yer almaktadır [13]. Bu grafikten de görüleceği üzere mmDalga frekanslarının belli noktalarında kayıplar büyürken belli noktalarında ise nispeten daha düşüktür. 35GHz, 94GHz, 140GHz ve 220GHz frekanslarında daha düşük kayıplar

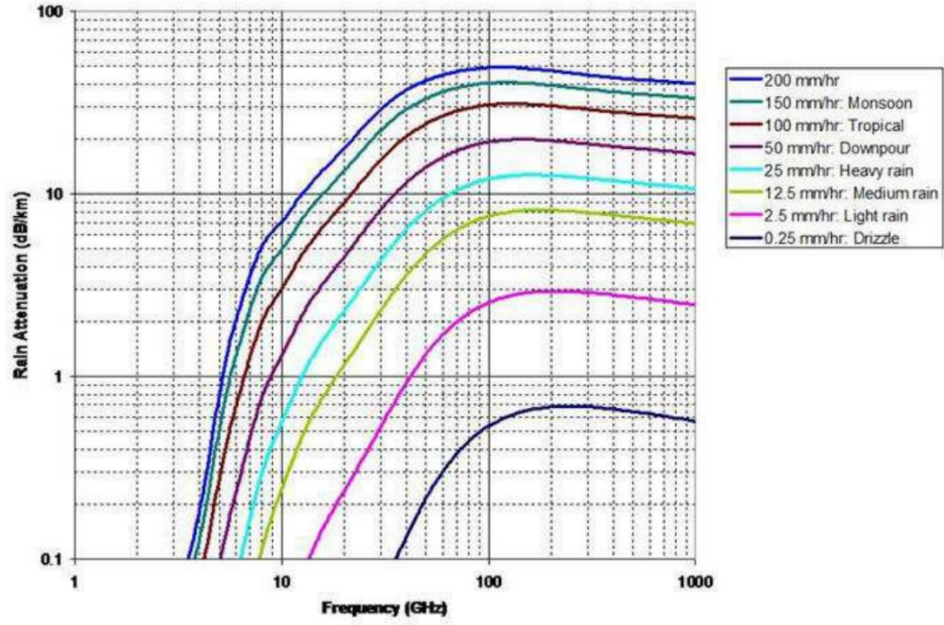
oluştugu için bu frekanslar uzak mesafe haberleşmesinde kullanılabilir [11]. 60GHz, 120GHz ve 180GHz frekans bantlarında atmosferik kayıp tepe değerlere ulaşmaktadır. 60GHz ve 120GHz değerlerinde oksijen emilimi, 180GHz’de ise su buharı emilimi yüksektir [9].

Yağmur damlaları ile mmDalga sinyalinin dalga boyunun yakın olması sebebiyle mmDalga sinyali buhar ve yağmurdan önemli ölçüde etkilenmektedir [9]. Şekil 1.5’de frekansın ve yağış yoğunluğunun, yağış zayıflaması üzerine etkisi görülmektedir. Yağış yoğunluğundaki artış sinyalin yağmur parçacıkları tarafından saçılmasına ve emilmesine neden olur. Ayrıca mmDalga bantlarında daha düşük frekanslara kıyasla zayıflama yüksektir. Mikrodalga frekansında iletim kaybının esasa faktörü boş alan kaybıyla açıklanırken, mmDalga bantlarında iletim ortamındaki gaz ve yağmur gibi ek kayıplar devreye girmektedir [14].



Şekil 1.4 : mmDalga frekanslarında atmosferik ve moleküler emilim [13].





Şekil 1.5 : Mikrodalga ve mmDalga frekanslarında yağmur zayıflaması [13].

Çizelge 1.1’de 200 metre’de ve farklı mmDalga frekanslarında yağmur zayıflamaları ve oksijen emiliminden kaynaklanan zayıflama miktarları verilmiştir. 28 GHz ve 38 GHz bantlarında düşük yağmur zayıflaması ve oksijen emilimi mevcutken, 60 GHz ve 73 GHz bantlarında yağmur zayıflaması ve oksijen emiliminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca yağmur yoğunluğu arttıkça zayıflamanın arttığı da tespit edilmiştir [13].

Çizelge 1.1 : mmDalgada yağmur zayıflaması ve oksijen emilimi [13].

Frekans Bandı	200m'deki Yağmur Zayıflaması		200m'deki Oksijen Emilimi
	5mm/saat	25mm/saat	
28GHz	0.18dB	0.9dB	0.04 dB
38GHz	0.26dB	1.4dB	0.03dB
60GHz	0.44dB	2dB	3.2dB
73GHz	0.6dB	2.4dB	0.09dB

- Blokaj Etkisi

mmDalga sinyalleri karşılaştıkları engellerden oldukça fazla etkilenir ve tıkanıklıklara duyarlıdır. Yüksek penetrasyon, yansıma ve kırınım kayıpları nedeniyle blokaj etkisine karşı hassastır. Karşılaşılan engellerin şekillerine, boyutlarına, içeriklerine bağlı olarak uğradıkları kayıp değişmektedir. Ayrıca frekans değeri arttıkça kayıp miktarı da artmaktadır. mmDalga sinyalleri örneğin 60 GHz'de 2,5 cm kalınlığındaki alçıpan 6 dB ve 0,3 cm kalınlığındaki gözenekli cam için 10,2 dB zayıflamaya uğramaktadır [9]. Ayrıca yine 60GHz frekansındaki sinyalin bir insan tarafından bloke olması 20-30 dB zayıflamaya neden olur [13]. Daha düşük frekanslara göre mmDalga sinyalleri katı yüzeylere nüfuz edemez. Bu nedenle mmDalga sinyallerinin haberleşme performansında düşük görünür ve görüş açısında (LoS) bağlantı sağlanma zorunluluğu ortaya çıkar [15].

- Işınlardan Hizalanması Gerekliği

mmDalga haberleşmesinin sahip olduğu avantajlar konusunda dar açılı ışın oluşturulmasının faydalarından söz edilmiştir. Ancak bu avantaj oluşturulan ışınların doğru hizalanması zorunluluğunu beraberinde getirir. Çünkü mmDalga sinyallerinin çeşitli kayıplardan çok fazla etkilenmesini telafi edebilmek için hüzmleme avantajından faydalanmak gerekir. Hüzmelerin LoS şartını verici alıcı antenler arasında sağlayacak şekilde ayarlanması kullanıcıların hareketli oluşu nedeniyle oldukça zordur. Açılarının doğru ayarlanamaması haberleşme performansını ve sistemin verimini önemli ölçüde düşürür. Örneğin, 7\textdegree ışın genişliğine sahip mmDalga sisteminde, 18\textdegree yanlış hizalanırsa yaklaşık 17 dB kayba neden olur ve bu da maksimum hızda 6 Gbit/s'ye kadar düşüşe neden olur [9].

- Yüksek Güç Tüketimi

mmDalga haberleşmesinin maruz kaldığı kayıplara rağmen sinyal gürültü oranının (SNR) bozulmaması için, iletim gücü bant genişliği arttıkça artmalıdır. Ayrıca MIMO yapılarının kullanımı ile çok sayıda radyo frekansı (RF) zincirine ihtiyaç duyulmaktadır. RF zincirlerinin içinde bulunan güç amplifikatörü ve veri dönüştürücüler yüksek bant genişliği nedeniyle fazla güç tüketirler [2]. mmDalga haberleşmesinin sahip olduğu önemli bir zorluk ise analogdan dijitale dönüştürme esnasında harcanacak gücün çok fazla olmasıdır. Güç tüketimi genellikle örnekleme hızıyla doğrusal, örnek başına bit sayısı ile üstel olarak artmaktadır [10].

## 1.2 İnsansız Hava Araçları

### 1.2.1 Tanımı

İnsansız hava aracı (İHA) havada sabit bir konumda kalabilen veya uzaktan kumanda ile ya da önceden belirlenmiş bir yol dahilinde seyir halinde ilerleyebilen araçlardır. Bu araçlar Türk Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün 'İnsansız Hava Aracı Sistemleri' talimatında [Url-6] rotorlu veya sabit kanatlı, üzerinde insan taşımaya elverişli olmayan araçlar olarak da tanımlanmaktadır. İHA'lar temelde veri toplama, gözetim, keşif yapma ve arama-kurtarma gibi amaçlarla günümüzde yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. İHA'ların en önemli özelliği üzerinde insan bulundurmadan uçuş yapabilme yeteneğine sahip olmalarıdır.

### 1.2.2 Tarihi

İnsansız hava araçlarının tarihi birinci dünya savaşına dayanmaktadır. İngilizler tarafından geliştirilen Kettering Bug adlı bir bomba atarı ilk kullanılan İHA'ya örnek olarak gösterilebilir. İkinci dünya savaşında İHA'lar keşif ve bomba taşıma amacıyla aktif olarak kullanılmıştır. 60'lı ve 70'li yıllarda özellikle ABD tarafından İHA'ların geliştirilmesi sağlanmıştır. 80'li ve 90'lı yıllarda bu araçlara çeşitli kameralar ve sensörler yerleştirilmiştir. Son yıllarda ise İHA'lar oldukça küçük boyutlarda ve daha hafif araçlardır. Ayrıca askeri alanda kullanımının yanı sıra artık tarım, keşif, kurtarma ve haberleşme alanlarında da aktif olarak kullanılmaktadır [16].

### 1.2.3 Çeşitleri

İnsansız hava araçları aerodinamik, iniş-kalkış tipi, ağırlık ve menzil açısından sınıflandırılabilirler [17]. Aerodinamik açıdan sabit kanatlı, hareketli kanat, aspiratörlü ve çok rotorlu olarak çeşitlendirilebilir. Çok rotorlular ise kendi içinde; tricopter, quadcopter, hexacopter, octacopter olarak sınıflandırılmaktadır. İniş-kalkış tipi açısından yatay ve dikey iniş kalkış sistemine sahip çeşitleri mevcuttur. Ağırlık ve menzil açısından çok çeşitli İHA tipleri bulunmaktadır. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün "İnsansız Hava Araçları" talimatında azami kalkış ağırlıkları referans alınarak şekilde sınıflandırılmıştır.

- İHA0: Azami kalkış ağırlığı 500 gr (dâhil) – 4kg aralığında olan İHA'lar
- İHA1: Azami kalkış ağırlığı 4 kg (dâhil) – 25 kg aralığında olan İHA'lar
- İHA2: Azami kalkış ağırlığı 25 kg (dâhil) – 150 kg aralığında olan İHA'lar

- İHA3: Azami kalkış ağırlığı 150 kg (dâhil) ve daha fazla olan İHA'lar

Bu tez kapsamında daha sonra anlatılacağı üzere İHA'ya akıllı yüzey sistemi eklenecektir. Bu isterin karşılanabilmesi için kalkış ağırlığına göre İHA1 sınıfı bir araç kullanılacaktır. Ayrıca bu İHA'nın aerodinamik açıdan quadcopter veya hexacopter türünde çok rotorlu olması öngörülmektedir.

#### 1.2.4 Avantajları

İHA'lar askeri ve sivil alanda kullanılabilir. Askeri alanda gözetleme, keşif ve saldırı amacıyla kullanılabilirken, sivil alandaki kullanımlarına tarım, ulaşım, haberleşme ve madencilik örnek olarak gösterilebilir [16]. Örneğin Porto Riko'da gerçekleşen Maria Kasırgasında haberleşme alt yapısının büyük ölçüde hasar görmesinden dolayı AT&T şirketi İHA'larla LTE haberleşme sağlamıştır [18].

İHA'ların haberleşmede kullanımına yönelik çeşitli şirketlerin çalışmaları bulunmaktadır. Amazon'un Prime Air, Alphabet'in Project Wing ve UPS'nin Flight Forward projeleri buna örnek olarak gösterilebilir. AT&T şirketine ait Cell on Wings isimli İHA tüm hava koşullarında uçabilmektedir. kablosuz haberleşmeye yönelik Verizon şirketinin ALO isimli girişimi bulunmaktadır. Nokia Bell laboratuvarının F-Cell projesi ve Facebook şirketinin Aquila'sı İHA sistemlerine örnektir [9].

Turkcell Dronecell Türkiyede gerçekleştirilen İHA teknolojisi ile mobil iletişime katkı sağlaması öngörülen projedir. Dronecell 4.5G hizmeti sunabilmektedir. Aktif olarak tarım alanlarında, akıllı su ve elektrik saatlerinde, barajlarda, şansiye ve madenlerde bulunan sensörlerden veri toplamaktadır. 300 Mbps'a kadar veri indirme hızına, 50kg'a kadar taşıma kapasitesine sahiptir. 8 adet pervane bulundurur ve havada 40 dakika civarında kalabilmektedir [Url-7]

İHA'ların 5G haberleşmesi ve ötesi için bazı problemlerin çözümüne yönelik umut vaat eden bir çözümdür. Bu problemler haberleşme teknolojisinden kaynaklı yüksek kayıp olmasıdır. İHA'ların kullanımı kapsama alanında genişleme sağlamaktadır. Hizmet kalitesini artırarak kör noktalardaki kullanıcılara servis verilebilmesinin önünü açmaktadır. İHA'lar mobilite ve konuşlandırılma kolaylığı avantajlarına sahiptir. İHA'lar yüksekte bulunduğu için kullanıcılarla arasında LoS bağlantısının sağlanabilme olasılığı çok yüksektir [19]. Bu da yüksek veri hızında, düşük gecikmeli ve güvenilir haberleşmeye olanak sağlanmaktadır. Buna karşın İHA'nın optimal konumunun hesaplanması, enerji verimliliği, hareketli olması kaynaklı ağ topolojinde

yaşanabilecek değişiklikler, boyut, ağırlık ve güç gibi kısıtlamaları mevcuttur. Ayrıca İHA'ların arka bağlanım (backhaul) zorluğu bir diğer dezavantajdır. Bu erişimin sağlanabilmesi için İHA'nın sahip olduğu bant genişliğinin büyük bir kısmı arka bağlanım için kullanılmaktadır.

### 1.3 Akıllı Yüzeyler

5G ve ötesi teknolojilerin vadettikleri özelliklerin sağlanabilmesi için önerilen yeni teknolojilerden biri yeniden konfigüre edilebilir akıllı yüzey (RIS) sistemleridir. RIS'in her bir elemanı üzerine gelen sinyalin genlik ve faz değerini ayarlayarak istenilen noktaya doğru hüzmeye oluşturabilen, düşük maliyetli, pasif yansıtma elemanlarından oluşan düzlemsel bir yüzeydir [20]. Bu yüzeylerin üzerinde dizi halinde ve çok sayıda pasif aygıtlar, örneğin, faz kaydırıcılar ve basılı antenler vardır [21]. RIS dizileri sıvı kristal ve yazılım tabanlı meta yüzeyleri içerir. Entegre elektronik devrelerle kontrol edilebilir ve elektromanyetik özelliklere sahiptir. RIS'lar radyo dalgalarının yayılmalarını kontrol ederek elektromanyetik yayılımının olumsuz koşullardan etkilenmesini azaltmaya çalışır. Böylece RIS akıllı ve programlanabilir bir kablosuz haberleşme ortamının önünü açar.

RIS'in sağladığı avantajların bazılarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [22].

- RIS'lar neredeyse pasif elemanlardır ve idealde enerji kaynağı gerektirmezler.
- Analogdan dijitala dönüştürücü (ADC)/dijitalden analoga dönüştürücü (DAC) ve güç amplifikatörü gerektirmediği için alıcı gürültüsünden etkilenmezler.
- RIS yüzeyinde bulunan her bir eleman için faz kayması ayarlanabilir. Bu sayede yüzeye gelen sinyalin yansıtılarak gideceği yön iletişim kurulmak istenen kullanıcıya göre ayarlanabilir.
- Belirli kullanıcıların sinyal gücü artırırken başka yönlerde yaratılan girişim de azaltılabilir.
- Bilgi güvenliği ve mahremiyet konularında faydalanılabilir.
- Çift yönlü (full-duplex) iletişim yapabilirler.
- Herhangi bir frekans bandında çalışabilirler.
- İnce, hafif ve uygun geometrik şekilde üretilebildikleri için bina cephelerine, hava araçları ve kıyafetler vb. yerleştirilebilirler.

Bir kablosuz haberleşme ortamında sinyal ilerlerken yansıma, saçılma, kırılma gibi etkiler nedeniyle solma yaşar. Bu etkilerin tahmin edilemez olmasıyla haberleşme

kalitesinde sınırlayıcı bir faktördür. RIS'leri kullanmanın ana motivasyonu elektromanyetik dalgalarının yayılımını kontrol ederek ve yeniden tasarlayarak deterministik bir süreç yaratmaktır [20].

### **1.3.1 Yapısı**

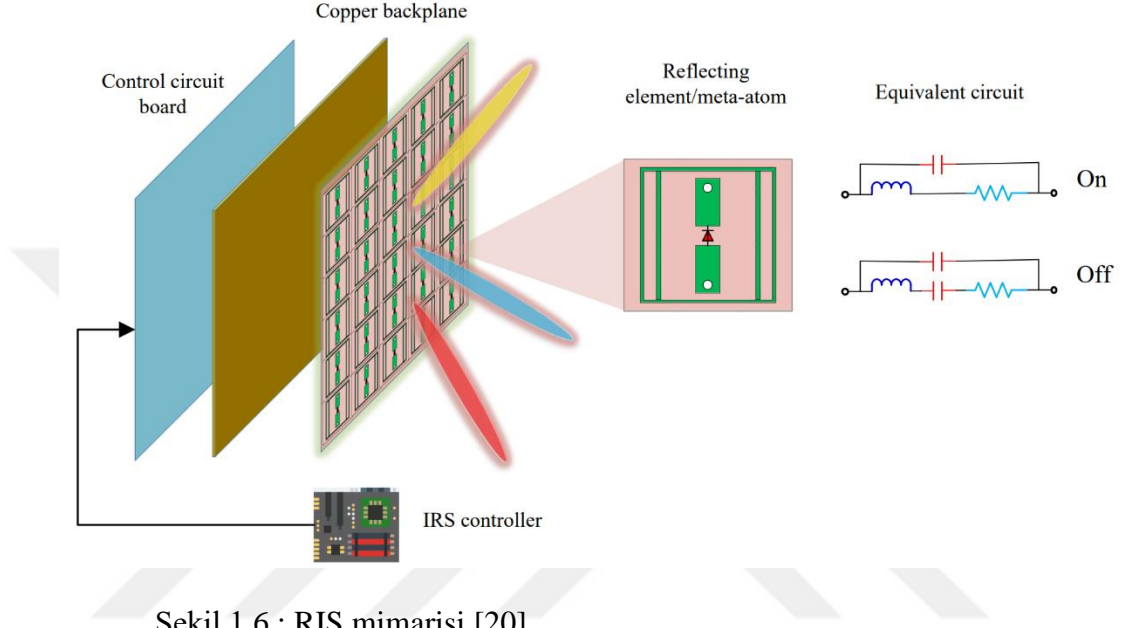
RIS'in arkasındaki temel teknoloji meta malzemelerin iki boyutlu versiyonu olan meta yüzeylerdir. Meta yüzeyler çok sayıda eleman veya meta atomlarından oluşan düzlemsel bir yapıdır. Meta yüzeyler sahip oldukları geometrik şekil, boyut, uzanım gibi özellikleriyle sinyalleri düzenleyebilmektedir. Kullanıcıların sahip oldukları mobilite nedeniyle RIS'in sinyal yansıtma özelliği gerçek zamanlı olarak yeniden yapılandırılabilir olmalıdır. Bu özelliğin sağlanabilmesi için PIN diyot (Positive Intrinsic Negative Diode), alan etkili transistör (Field Effect Transistor - FET) ve mikro-elektro mekanik sistemler (Micro Electro Mechanical Systems - MEMS) kullanılabilir [20].

Şekil 1.6'da görüleceği üzere tipik bir RIS mimarisi üç katmandan ve denetleyiciden oluşur. İlk olarak gelen sinyalle etkileşime girmek üzere dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş çok sayıda meta atomundan oluşan dış katmandır. Bu katmanın arkasında sinyal enerji sızıntısını önlemek için bakır tabaka kullanılır. Son olarak, denetleyiciye bağlı olan ve her bir elemanın genlik ve faz kaymasını ayarlamaktan sorumlu olan kontrol devre kartı bulunur. Denetleyici olarak ise alanda programlanabilir kapı dizileri (Field Programmable Gate Array - FPGA) kullanılabilir. Şekil 1.6'da ayrıca her bir meta atomunun yapısı da verilmiştir. Her bir meta atomuna bir PIN diyotu gömülüdür. Doğru akım ile beslendiğinde ön gerilim voltaj değerine göre diyot açık veya kapalı duruma getirilebilmektedir. PIN diyotları kapalı iken gelen sinyalin geçmesine izin veren nerdeyse şeffaf bir yüzey oluşur. Açık iken ise gelen sinyal büyük ölçüde yansıtılır [22]. Açık durumundan kapalı durumuna ya da tersi duruma geçme süreci fazda kayma oluşturur ve böylece bu faz kaymaları ayarlanabilmektedir. Genlik değeri ise her bir elemanın direç değeri değiştirilerek ayarlanabilir [20]-[23].

### **1.3.2 Kullanım alanları**

Şekil 1.7'de RIS'in tipik kullanım alanlarından bir kaçı verilmiştir [20]. (a)'da baz istasyonu (BS) ile kullanıcı arasında bulunan bir engelle LoS bağlantısının sağlanamama senaryosu gösterilmiştir. RIS kullanımı ile BS sinyali kullanıcıya

yansıtılır ve sanal bir LoS hattı oluşturulur. Bu durum genellikle iç mekan milimetrik haberleşme sistemlerinde, kapsama alanı genişlemek için kullanılmaktadır. (b)'de RIS güvenliği artırma amacıyla kullanılmaktadır. Kulak misafiri olan dinleyici, BS ile legal kullanıcı arasında ya da BS'e legal kullanıcıdan daha yakında konumlandırılmış olabilir. Bu durumda RIS BS'in ürettiği sinyali iptal edecek şekilde ayarlanarak ulaşılabilir güvenli veri hızı artırılabilir.

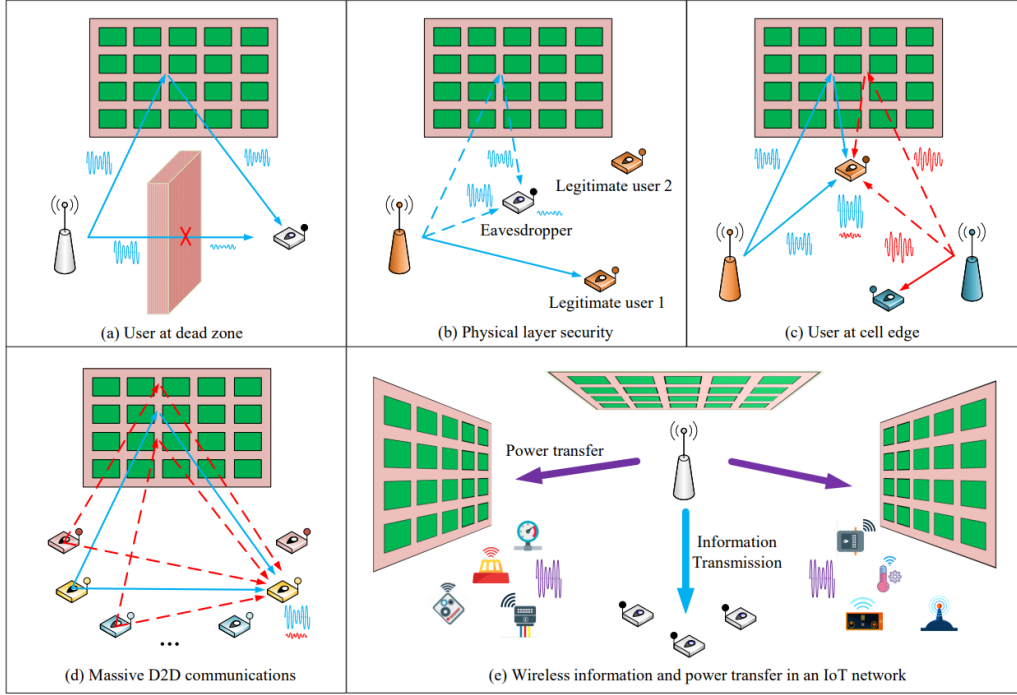


Şekil 1.6 : RIS mimarisi [20].

(c)'de hücre kenarında bulunan bir kullanıcı kendi BS'inden servis alırken başka bir BS'ten kaynaklanan girişimden etkilenmektedir. Hücre kenarına yerleştirilen RIS sayesinde SNR'ın artırılması hedeflenmiştir. (d)'de cihazdan cihaza haberleşme sistemi için RIS girişimi azaltma ve düşük güç seviyesinde iletişimi destekleme amacıyla kullanılmaktadır. IoT, 5G ve 6G haberleşmesindeki temel teknolojilerden biridir. Bu cihazların kullanımıyla birlikte artan sensör miktarıyla iletilmesi gereken veri miktarında da büyük artışa sebep olur. RIS, bu verilerin enerji harcanmadan iletilmesini sağlar. (e)'de RIS aracılığıyla IoT ağında bulunan çeşitli cihazlara eşzamanlı olarak bilgi ve güç aktarımı senaryosu gösterilmektedir.

RIS teknolojisi spektral ve enerji verimliliği sağlamaktadır. Buna karşın RIS'ın haberleşme sistemlerinde kullanımında bazı zorluklar mevcuttur. Örneğin RIS'ın doğru bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir. RIS üzerinde bulunan elemanların pasif oluşu nedeniyle kanal durumun bilgisinin elde edilmesi zordur. Ayrıca RIS'ın sahip olduğu elemanlarının tamamı için yansıma genlik ve faz değerinin

ayarlanması maliyetli ve karmaşık bir problemidir. Eleman sayısındaki artış RIS panelinin tasarımını zorlaştırır ve denetleyicideki kontrol pim sayısını artırır [20].



Şekil 1.7 : RIS kullanım senaryoları [20].

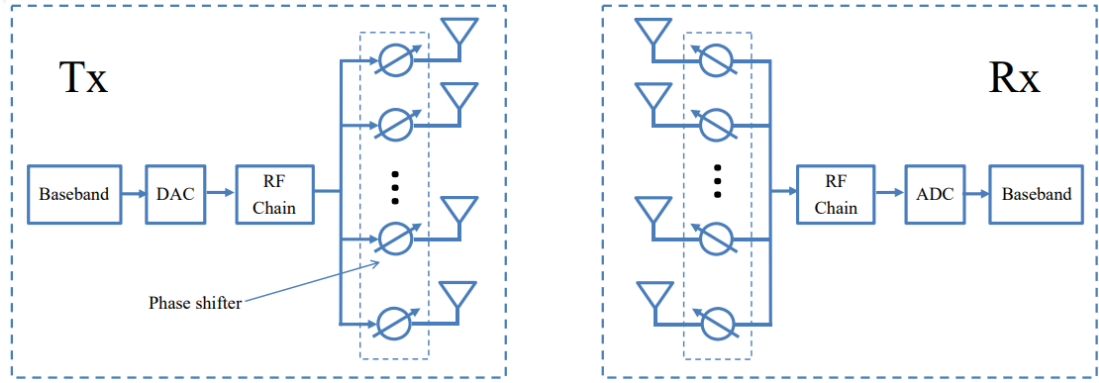
#### 1.4 Hüzme şekillendirme

mmDalga haberleşmesinin yüksek frekansta olması sayesinde küçük boyutlarda anten kullanımının önü açılmıştır. Anten boyutlarının küçülmesiyle BS'de kullanılan anten sayılarında çok fazla artış yaşanmıştır. mmDalga'in sahip olduğu yüksek yol kaybı dezavantajının üstesinden gelinebilmesi amacıyla, çoklu anten kullanabilme avantajından yararlanarak hüzme şekillendirme yöntemleri kullanılır. Hüzme şekillendirme için anten elemanlarının fazlarının isterlere uygun bir şekilde ayarlanması gerekir. Böylece odaklanmış ve yönlendirilmiş bir hüzme modeli oluşturulur. Hüzme şekillendirme faz ve genlik ayarlamalarının yapılabilmesine dayanan bir dizi sinyal işleme tekniğidir. Alıcı ve vericide çoklu antenlerin bulunduğu sistemlerde, sinyal-gürültü oranını (SNR) artırmak, yayılma yolu kaybını azaltmak ve diğer kullanıcılardan kaynaklanan girişimin azaltılması amacıyla hüzme şekillendirme teknikleri kullanılmaktadır [24]. Analog hüzme oluşturma, hibrit hüzme oluşturma ve dijital hüzme oluşturma olmak üzere mmDalga hüzme oluşturma için üç temel mimari vardır [25].



### 1.4.1 Analog hüzme şekillendirme

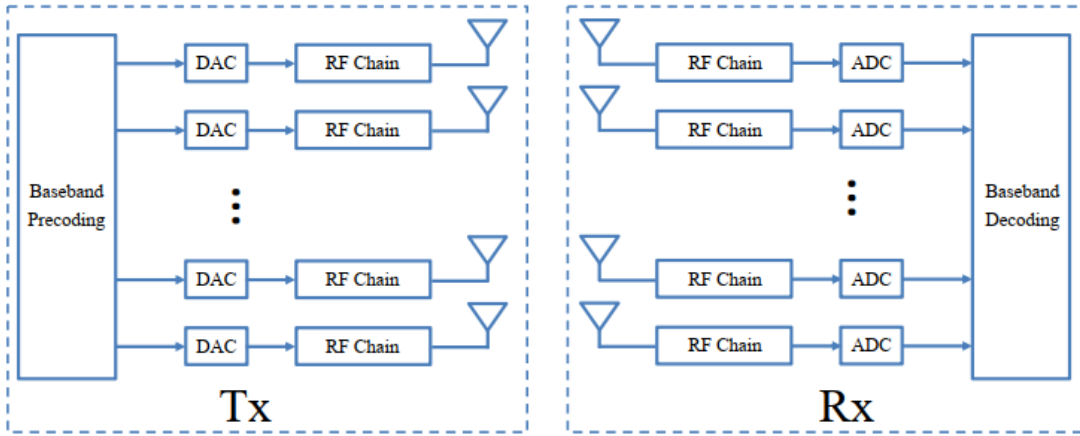
Analog hüzme şekillendirmede alıcı ve verici tarafta birer tane RF zinciri bulunmaktadır. Vericide bir DAC ve alıcıda bir ADC bulunur. Şekil 1.8'den görüleceği üzere anten elemanlarından önce faz kaydırıcılar bulunur. Bu faz kaydırıcılar sayesinde sinyalin fazı ayarlanır ve sinyal istenilen yöne doğru yönlendirilir. Faz kaydırıcıların fazları dinamik olarak ayarlanabilmektedir. Ancak sinyalin yalnızca fazı ayarlanırken, genlik üzerinde herhangi bir ayarlama yapılamamaktadır. Analog hüzmeleme tekniğinde tüm antenlerden aynı sinyal gönderilmektedir. Ayrıca analog hüzmeleme tekniğini ileride bahsedilecek diğer tekniklerle kıyaslandığında düşük maliyetli ve düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir çözümdür. Ancak adaptasyon yeteneği sınırlıdır.



Şekil 1.8 : Analog Hüzme Şekillendirme Modeli [25].

### 1.4.2 Dijital hüzme şekillendirme

Dijital hüzme şekillendirmede her anten kendi RF zincirine ve bir DAC veya ADC'ye bağlıdır. Şekil 1.9 'dan görüleceği üzere her bir anten elemanı için farklı sinyaller bu dijital devrede düzenlenir. Dijital hüzmelemede analog hüzmelemeden farklı olarak sinyalin faz kayması ve genliğini ayarlanır. Bu şekilde antenlere farklı frekans bantları, farklı güç ve faz değerleri atanabilir. Bu da sinyal işleme açısından dijital hüzmelemeyi analog hüzmeleme ve hibrit hüzmelemeden daha esnek hale getirir. Ek olarak, dijital hüzmeleme sayesinde farklı sinyaller farklı kullanıcılara aktarılabilir. Böylece uzamsal çoklama (spatial multiplexing) sağlanabilir. Kullanılan RF zincir sayısının fazlalığı ve her bir RF zincirindeki elektronik bileşenler büyük güç tüketimine sahip olmaları nedeniyle, dijital hüzmeleme maliyetli bir tekniktir. Ayrıca dijital hüzme şekillendirme önkodlama olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 1.9 : Dijital Hüzme Şekillendirme Modeli [25].

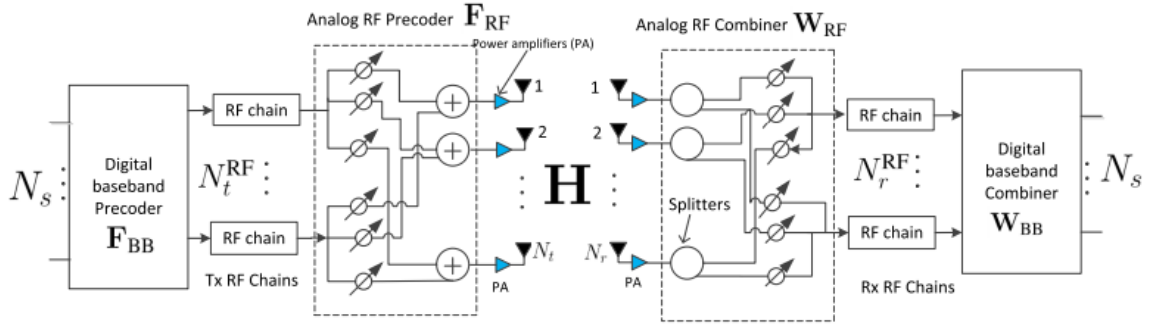
### 1.4.3 Hibrit hüzme şekillendirme

Dijital hüzmeleme sinyalin hem genliği hem de fazının ayarlanabildiği bir tekniktir. Ancak mmDalga haberleşmesinde çok sayıda anten kullanılmaktadır ve dijital hüzmelemede her anten için gereken RF zinciri gerekir. Bu da dijital hüzmelemeyi maliyetli hale getirir. Bu nedenle analog ve dijital hüzme şekillendirmenin uygulanabilir özellikleri bir araya getirilerek hibrit bir hüzme şekillendirme tekniği ortaya çıkarılmıştır.

Hibrit hüzme şekillendirme, minimum girişim ile toplam veri hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla çok akışlı ve çok ve ya tek kullanıcı sistemlerde sinyal işlemeyi dijital ve analog alanlara bölmektir. Hibrit hüzme oluşturma mimarisi Şekil 1.10'den görüleceği üzere anten hüzmesi oluşturma kazancını gerçekleştirmek için analog işleme ve çok akışlı dijital işlemeyi kolaylaştıran az sayıda RF zincirinden oluşur [26].

### 1.5 Literatür araştırması

Kablosuz ağların kullanımında yaşanan büyük artış ile kullanım alanlarında da çeşitlilik yaşanmaktadır. Gerek günlük yaşam gerekse güvenlik ve askeri alanda kablosuz haberleşme sistemlerine olan ihtiyaç artmaktadır. Mevcut sistemlerin servis sağlamada eksik kalması nedeniyle veri hızını ve kapsama alanını artırmaya yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir.



Şekil 1.10: Hibrit Hüzme Şekillendirme Modeli [7].

Artan talebin karşılanabilmesi için mmDalga haberleşmesinin sahip olduğu avantajlarla dikkat çekmiştir. Ancak mmDalga kullanımı yanında birçok zorluk getirmektedir. Önceki bölümde bahsedilen kayıplar bunların başında gelir. Küçülen dalga boyu ile çoklu anten kullanılarak bu zorlukların bir kısmının üstesinden gelinir. Ayrıca mmDalga haberleşmesi LoS iletişimi gerektirir. BS ile kullanıcılar arasında RIS kullanımı ile sanal bir görüş hattı kullanılabilir. RIS kullanımı hüzme şekillendirme gibi avantajlar sağlayan enerji verimliliği yüksek yapılardır. Bu LoS hattının oluşturulabilmesi literatürde İHA kullanımı da önerilmiştir. Çalışmaların çoğunda İHA BS görevi görmektedir. Çünkü İHA'lar sahip oldukları yüksek irtifa sayesinde kapsama alanında genişleme sağlar ve kolay konuşlandırılabilir. RIS'ların bina cephelerine ve duvarlara yerleştirildiği senaryolar da incelenmiştir. RIS'in İHA'ya yerleştirilmesi de benzer şekilde LoS hattı oluşturmaktadır. 5G ve ötesi için haberleşme sistemlerinde İHA, RIS ve mmDalga kullanımı, hüzmeleme, RIS'ta pasif faz kaydırma optimizasyonu, kanal kestirimi gibi problemler parça parça da olsa araştırılmıştır.

[9]'da mmDalga frekanslarında BS olarak kullanılan İHA sistemleri incelenmiştir. mmDalga iletişimlerinde hedeflenen 10Gbit/sn hedefine ulaşmak İHA kullanımıyla daha kolay olduğu söylenmiştir. mmDalga'de bulunan küçük boyutlu çok sayıda anten kısa menzilli İHA'larda aktif olarak kullanılabilir. İHA'ların BS olarak kullanımına yönelik çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. [27]'de İHA'ların kablosuz iletişim ve ağ oluşturma için kullanılmasıyla ilgili kapsamlı bir araştırma sunar. [28]'de BS olarak kullanılan İHA sistemlerinde temel ağ mimarisi, kanal özellikleri gibi temel hususlar incelenmiştir. Ayrıca İHA-BS sistemlerinde MIMO iletişimleri incelenmiştir. [29]'da İHA'ların haberleşmede kullanımının getirileri ve entegrasyonu incelenmiştir.

[30]'da BS olarak kullanılan İHA'nın yarı sıra bina yüzeyine monte edilmiş RIS sistemi bulunmaktadır. Bu çalışmada meşru ve kulak misafiri olan kullanıcılar bulunmaktadır. RIS kullanımı ile meşru kullacılara ait toplam gizlilik hızının artırıldığı tespit edilmiştir. [31]'de mmDalga haberleşmesinde İHA-BS ve duvara konumlandırılmış RIS kullanımı incelenmiş ve bu senaryo için kanal modeli oluşturulmuştur. [32]'de yazarlar İHA'ların birden fazla RIS yardımıyla birkaç kullanıcıya hizmet verdiği mmDalga haberleşmesi senaryosunu incelemiştir. Toplam veri hızını en iyileme ve en düşük veri hızı kısıtını da göz önünde bulundurarak İHA konuşlandırılması, kullanıcı seçimi, hüzmleme vektörü ve RIS fazlarının optimizasyonu amaçlanmaktadır.

İHA'ların ağırlık ve arka bağlanım kısıtlarına sahip olması BS olarak kullanımını zorlaştırır. RIS'lar hafif yapıda oldukları için İHA'lara BS yerine RIS montelemek daha cazip bir fikirdir. Ayrıca RIS'lar neredeyse pasif yapıda oldukları için RF zinciri gerektirmezler. Gelen sinyali derhal yansıtarak işlem gecikmesine de sebep olmaz. [33]'de yazarlar RIS'i İHA üzerine yerleştirildiği son derece güvenilir düşük gecikmeli iletişim sistemi incelenmiştir. Bu sistemde makro BS'ten gelen sinyal kullanıcılara İHA-RIS tarafından yansıtılmaktadır. Girişimin önlenmesi için sıfır zorlamalı (ZF) hüzmleme ve zaman bölmeli çoğullamalı erişim önerilmektedir. İHA konuşlandırılması, güç tahsisi ve RIS'in faz kaymaları optimize edilmiştir. İHA konuşlandırılması optimizasyonu için derin öğrenme teknikleri uygulanmıştır. Ancak bu çalışmada sistemin çalışma frekansından söz edilmemiştir.

[34]'da mmDalga'de çoklu İHA-RIS kullanılarak çoğa gönderim senaryosu işlenmiştir. Kullanıcı kümelerinin sahip olduğu en düşük hızı en yüksek olacak şekilde İHA yerleşimi ve RIS hüzmlemesinin optimizasyonu ele alınmıştır. Dışbükey olmayan bu problemin çözümü için benzetimli tavlama (simulated annealing) tabanlı hibrit parçacık optimizasyonu algoritmaları kullanılmıştır. Optimal İHA-RIS konumu belirlendikten sonra, anlık elde edilebilir minimum hızın maksimize edilmesi için ceza tabanlı bir blok koordinat iniş algoritması önerilmiştir. Ancak bu çalışmada tek bir RF zinciri bulunmaktadır ve anten dizileri panel değil doğrusaldır.

[35]'de İHA-RIS sisteminin BS ile hareketli araçlar arasında iletişim sağladığı senaryo incelenmiştir. Tüm hareketli araçlarda iletişim adeleti sağlanabilmesi için İHA konumlandırma, güç tahsisi, RIS hüzmleme, mobil araçların çizelgelenmesi ortak bir problem olarak tanımlanmıştır. Bu problem ortak pasif hüzmleme oluşturma ve mobil araç

çizelgeleme, güç tahsis optimizasyonu, İHA konumlandırma optimizasyonu olarak üçe bölünerek ardışık dışbükey yaklaşım yöntemi ile çözülmüştür. Böylece sahip olunan minimum verim maksimize edilerek kullanıcılara adil veri hızı sağlanmıştır. Çalışma frekansı 6 GHz'in altıdır ve BS'de tek anten bulunmaktadır.

Literatürde İHA sistemlerinin dahil edilmediği RIS çalışmaları da mevcuttur. [36]'da RIS destekli bir çoklu akışlı MIMO sisteminde ulaşılabilir hızın en iyilenmesi incelenmiştir. İletilen sinyal ile RIS elemanlarının ortak değişinti matrisinin ortak bir optimizasyonu formüleleştirilmiştir. Bu amaçla öngörülen gradyan yöntemine (projected gradient method) kullanılmıştır. RIS'in ulaşılabilir hızın artırılmasında kazanç sağladığı tespit edilmiştir. [37]'de çok antenli bir BS ile tek antenli birden fazla kullanıcının olduğu bir haberleşme sistemi senaryosu vardır. Burada ayrıca RIS'da kullanılmaktadır. BS'in toplam gönderim gücünü minimize etme amacıyla BS'deki gönderim hüzmeleme ve RIS'daki yansıtma hüzmeleme ortaklaşa optimize edilmiştir. RIS idealde üzerine gelen sinyali genlik değişimine uğratmadan yansıtır ancak pratikte bu zordur. [38]'de RIS elemanları bazında yansıma katsayısındaki faza bağlı genlik değişimini yakalayan pratik bir faz kayması modeli öneriyoruz. Gönderim hüzmeleme ve RIS'in yansıtma hüzmesini ortaklaşa optimize ederek elde edilebilir oranını en üst düzeye çıkarmak amaçlanmıştır. Bu problem dışbükey değildir ve optimal olarak çözülmesi zordur. Bu nedenle alternatif optimizasyon tekniğine dayalı bir çözüm önerilmiştir.

Literatürde RIS'in THz haberleşmesine entegrasyonu da incelenmiştir. [39]'da BS ile kullanıcılar arasındaki direk bağlantının sağlanamadığı ve bu nedenle RIS üzerinden haberleşmenin sağlandığı senaryo incelenmiştir. Bu senaryoda ulaşılabilir hızın en iyilenmesi için RIS'in faz kaymaları hızlandırılmış proksimal gradyan (accelerated proximal gradient) methodu ile optimize edilmiştir.

## **1.6 Gerçekleştirilen Çalışmanın Literatüre Katkısı**

5G ve mmDalga haberleşmesiyle birlikte İHA'ların ve RIS'lerin haberleşmede kullanılmaları büyük önem kazanmıştır. Literatürde bulunan birçok çalışmada İHA'lar BS olarak kullanılmıştır. Ayrıca İHA ve mmDalga band haberleşmesinin birlikte kullanımıyla ilgili çalışmalar kısıtlıdır. Literatürde RIS ve İHA'ların birlikte kullanımına yönelik çalışmaların çoğunda ise RIS'lar sabit bir yere konumlandırılmıştır [30-32].

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu tez kapsamında RIS dört rotorlü bir İHA üzerine yerleştirilmiştir. Böylece mmDalga haberleşmesinin önemli bir dezavantajı olan LoS bağlantısı gerekliliğinin sağlanması hedeflenmektedir. BS ile kullanıcı arasında direk bir kanalın sağlanamadığı durumlarda RIS-İHA kullanılarak ilgili kullanıcılara hizmet verilecektir. Yani görüş açısı dışında (nLoS) durumunda bulunan bu kullanıcı BS'den İHA-RIS'a oradan da kullanıcıya doğru olan kaskat kanalı kullanacaktır.

Çalışma frekansının mmDalga bandında olması BS'in çok sayıda anten kullanılabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca BS birden fazla RF zincirine sahiptir ve aynı anda birden fazla kullanıcıya hizmet verebilmektedir. Bu nedenle sistemin sahip olduğu optimizasyon karmaşıklığı yüksektir. Yüksek karmaşıklığı çözmek için BS'de ön kodlama vektörleri bir optimizasyon tekniğiyle tasarlanmıştır. BS'de hibrit hüzmeleme gerçekleştirilmesi için analog ve dijital hüzmeleme tekniklerini kullanılmıştır. Analog hüzmeleme için Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform- DFT) kod çizelgesi tabanlı iletim hüzmeleme yöntemi ve dijital hüzmeleme için ZF iletim hüzmesi oluşturma tekniği kullanılmıştır.

RIS'in yüksek frekanslarda performansı olumlu yönde etkilemesi için RIS çok sayıda eleman içermektedir. RIS'in eleman sayısındaki artış kademeli kanalın karmaşıklığını artırmaktadır. Bu da çok basit ve etkili kanal tahmini yöntemi gerekmektedir. Bu nedenle RIS'in ortası bir aktif eleman yerleştirilmesini öneriyoruz. DFT ile bulunan optimal hüzme oluşturma vektörünün indeksi aktif eleman kullanılarak BS'e geri beslenir. Bu şekilde, kanal tahmini yöntemi geliştirilmiştir ve iletim hüzmesi oluşturma optimizasyonunun karmaşıklığı RIS öğelerinin sayısından bağımsız hale getirilmiştir. Ayrıca RIS'in çok sayıda eleman içermesi nedeniyle [9]'da önerilen yöntem ile faz kayması optimizasyonu da yapılmıştır.

Sistem üzerinde bulunan tüm direk ve kademeli kullanıcıların arasında adillik sağlanabilmesi amacıyla girişime duyarlı adil orantılı çizelgeleme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmada, her bir tanımlanmış zaman aralığı için ulaşılabilir hızı en yüksek olan kullanıcılar seçilmiştir. Sonraki her zaman aralığında farklı kullanıcı grupları seçilerek, kullanıcılar arasında kanalı kötü olanların da servis alabilmeleri hedeflenmiştir. Böylece kullanıcılar arasında adillik sağlanmıştır. Bu tez kapsamında tasarlanan girişime duyarlı adil orantılı çizelgeleme algoritması ve hibrit hüzmeleme

teknikleri çeşitli kıyaslamalar yapılarak detaylı analiz edilmiştir. Ayrıca RIS'in kullanımını ve eleman sayısının veri hızı üzerine etkileri incelenmiştir.

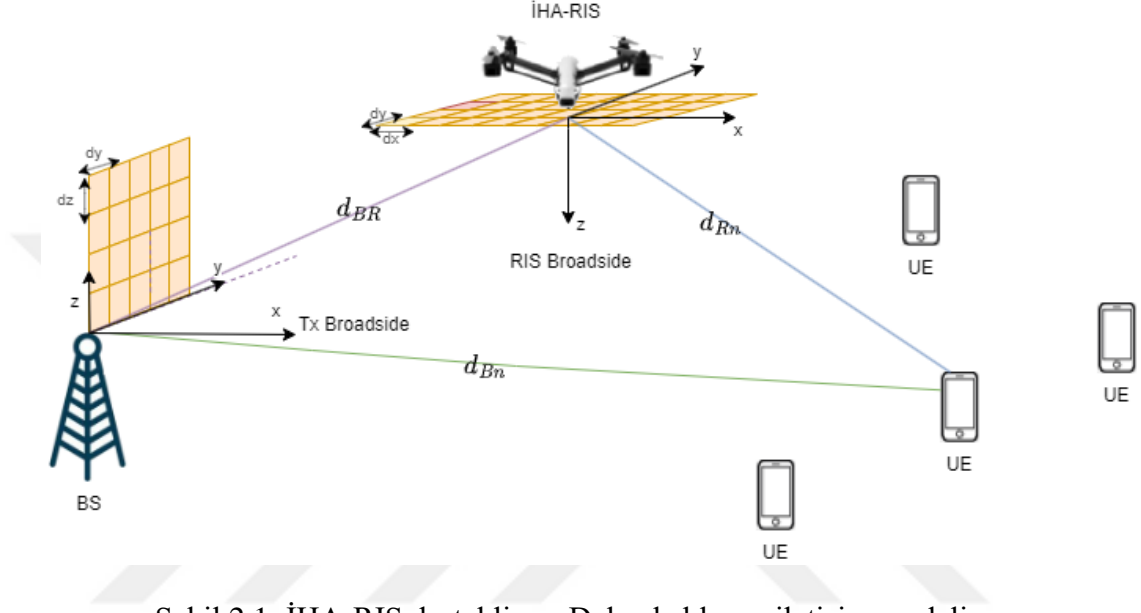






## 2. SİSTEM MODELİ

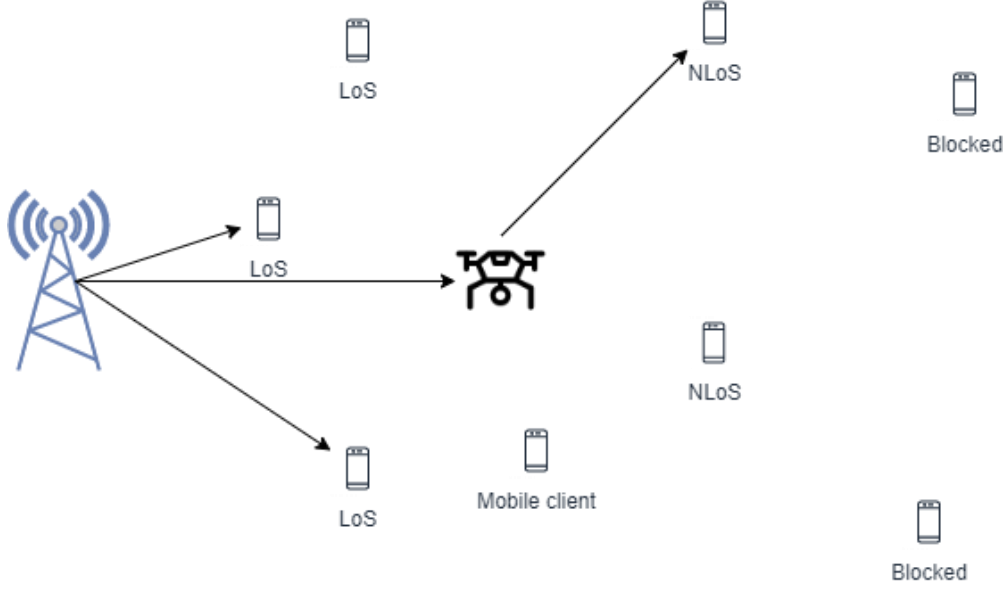
Öncelikle Şekil 2.1’de gösterildiği gibi bir çok antenli BS, çok elemanlı İHA-RIS ve çok sayıda kullanıcıdan oluşan mmDalga bant dış mekan haberleşme sistemi için sistem modeli oluşturulacaktır.



Şekil 2.1: İHA-RIS destekli mmDalga kablosuz iletişim modeli

BS y-z ekseninde bulunan ve x eksenine paralel olan  $N^B = N_y^B \times N_z^B$  adet düzgün düzlemsel dizi (UPA) antene sahiptir. BS  $\mathbf{z}^B = (x^B = 0, y^B = 0, h^B)$  koordinatında sabit olarak bulunmaktadır. BS  $N_{RF}$  adet RF zincirine sahip olduğukabul edilmektedir. Dolayısıyla aynı anda  $N_{RF}$  adet kullanıcıya iletim yapılmaktadır. İHA-RIS x-y düzlemine görüş açısı aşağı bakacak şekilde sabit  $\mathbf{z}^R = (x^R, y^R, h^R)$  koordinatında bulunmaktadır. RIS  $N^R = N_x^R \times N_y^R$  adet elemandan oluşur ve UPA yapısındadır. Kullanıcılar belirlenen alanda tekdüze ve rastgele olarak dağılmışlardır. Sistem üzerinde  $N$  adet kullanıcı vardır. Kullanıcı  $n$ 'in konumu  $\mathbf{z}^n = (x^n, y^n, h^n)$  koordinatlarıyla ifade edilmektedir. Her bir kullanıcının yalnızca bir anteni bulunmaktadır.

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi kullanıcıların bazıları BS’in LoS durumunda bulunurken diğerleri bloke ve ya nLoS durumdadır. Bloke ve nLoS durumda bulunan kullanıcılar İHA-RIS yardımıyla BS’den servis alabilmektedirler.



Şekil 2.2: Sistemde bulunan kullanıcıların durumları

BS'in gücü  $P_t$  ve sistemdeki gürültünün gücü  $N_o$ 'dir. BS'de yapılacak olan huzme şekillendirme kanal bilgisinin tam olarak BS tarafından bilindiği varsayılmıştır.

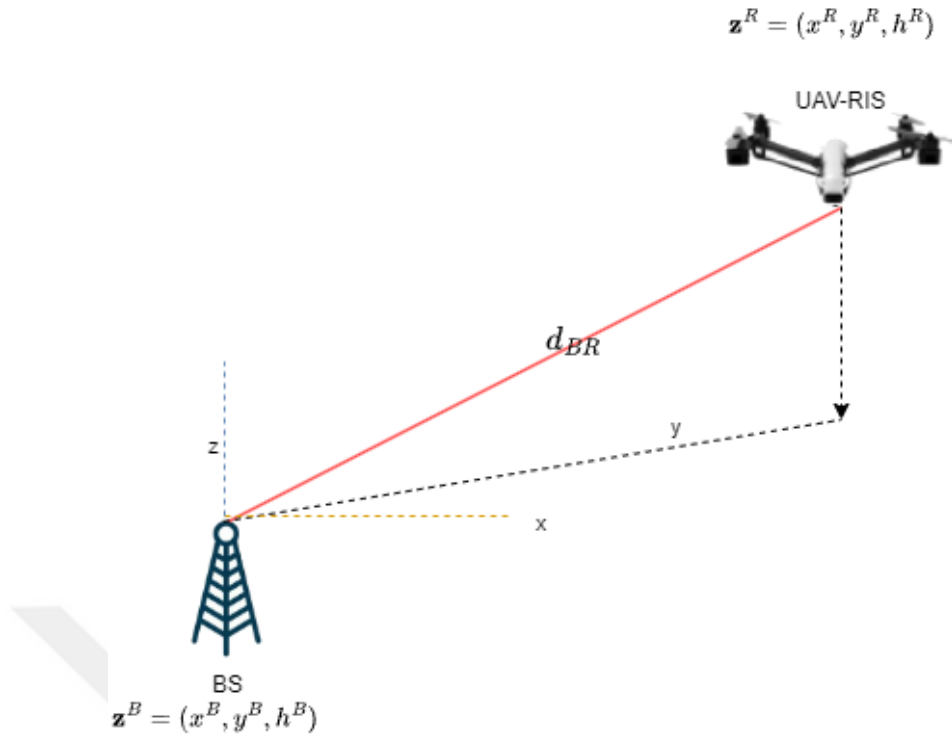
BS'in  $i$ . elemanın İHA-RIS'in  $k$ . elemanına olan öklit mesafesi Şekil 2.3'de yer alan geometrik durum baz alınarak Denklem 2.1 ile hesaplanır. Böylece BS'in her bir anteninin ve İHA-RIS'in her bir elemanına olan mesafe hesaplanabilir.

$$d_{BR}^{[i,k]} = \sqrt{((x_i^B - x_k^R)^2 + (y_i^B - y_k^R)^2 + (z_i^B - z_k^R)^2)} \quad (2.1)$$

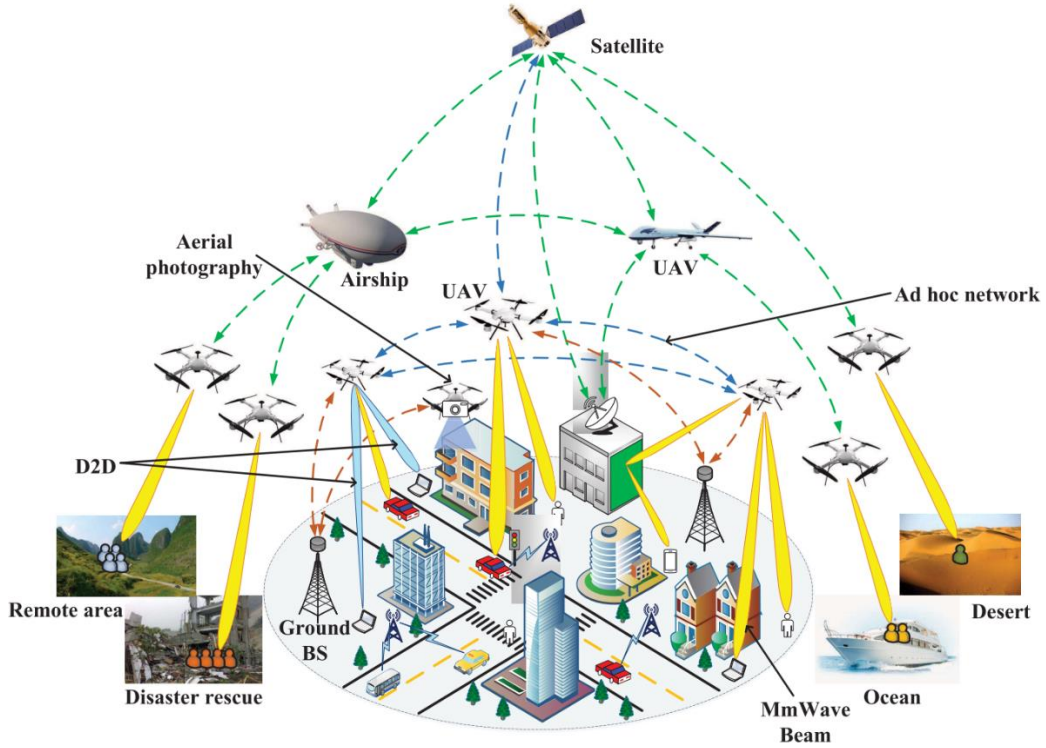
Benzer şekilde,  $d_{Rn}^{[i,n]}$ , RIS üzerindeki  $k$ . elemanın anten elemanı ile  $n$ . kullanıcı kullanıcı arasındaki mesafeye karşılık gelir ve Denklem 2.2'deki gibi hesaplanır. Burada her bir kullanıcının konum bilgisi kullanılarak İHA-RIS tüm elemanları ile kullanıcılar arasındaki mesafeler hesaplanabilir.

$$d_{Rn}^{[k,n]} = \sqrt{((x_k^R - x_n^n)^2 + (y_k^R - y_n^n)^2 + (z_k^R - z_n^n)^2)} \quad (2.2)$$

mmDalga haberleşmesinde kanal modeli klasik haberleşme kanal modellerinden farklılıklar barındırır. Ayrıca sisteme dahil olan İHA gibi farklı teknolojiler ile kanal karakteristiği değişmiştir. Şekil 2.4'de mmDalga haberleşmesine ait haberleşme senaryoları ve yayılım karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Sistemde bulunan kullanıcıların durumları



Şekil 2.4: mmDalgada İHA kullanımının uygulama senaryoları [40]

## 2.1 Yol Kaybı Modeli

mmDalga haberleşmesi önceki bölümlerde detaylı olarak anlatıldığı üzere geniş bant genişlikleri, dar açılı hüzmleme ve güvenlik gibi avantajlarının yanı sıra yol, yayılım ve atmosferik kayıplardan çok fazla etkilenme dezavantajlarını beraberinde getirmektedir. Bu nedenle mmDalga haberleşmesi yüksek veri hızı ve güvenli iletişimin sağlanabilmesi için LoS koşulunu gerektirmektedir.

nLoS ve bloke durumda bulunan kullanıcıların servis alabilmesi için bu kullanıcıların İHA-RIS ile direk bir kanal bağlantısı sağladıklarını kabul ediyoruz. Ayrıca İHA-RIS sahip olduğu yüksek irtifa sayesinde BS ile de LoS durumdadır. Bu nedenle İHA-RIS ve BS arasındaki kanal direk bağlantının sağlandığı bir kanal modelidir.

Kaskat kullanıcının İHA-RIS üzerinde BS ile kanalının yol kaybı ikiye ayrılmıştır. Bunlar BS ile İHA-RIS ve İHA-RIS ile kullanıcı kanallarıdır. [40-41]. BS'deki  $i$ . anten elemanı ile İHA-RIS'daki  $k$ . eleman arasındaki yol kaybı Denklem 2.3'de verilmiştir. İHA-RIS'daki  $k$ . eleman ile  $n$ . kullanıcı arasındaki kanalın yol kaybı sırasıyla Denklem 2.4'de verilmiştir.

$$PL_{BR}^{[i,k]} = \frac{d_x \times d_y}{4\pi(d_{BR}^{[i,k]})^2} \quad (2.3)$$

$$PL_{Rn}^{[k,n]} = \frac{d_y \times d_z}{4\pi(d_{Rn}^{[k,n]})^2} \quad (2.4)$$

Burada her bir anten elemanının boyutu  $d_x \times d_y$  ve her bir RIS elemanın boyutu  $d_x \times d_y$  kabul edilmiştir. Anten elemanları arasındaki mesafe  $\lambda$  dalga boyunun yarısı olacaktır. Bu nedenle  $\frac{d_x}{\lambda} = \frac{d_y}{\lambda} = \frac{d_z}{\lambda} = \frac{1}{2}$  şeklinde yazılabilir.  $d_{BR}^{[i,k]}$  ve  $d_{Rn}^{[k,n]}$  mesafeleri sırasıyla Denklem 2.1 ve Denklem

2.2 'de verilmiştir.

Kullanıcılar LoS, nLoS ve bloke olmak üzere üç koşuldan birinde bulunabilmektedirler. Kullanıcıların bu durumlarda rastgele olasılıklarla bulunduğu bir sistem tasarlanmıştır. Denklem 2.5'de gösterilen kesinti durumunda, BS ve kullanıcı arasında bağlantı olmadığı, yani yol kaybının sonsuz olduğu varsayılır. Denklem 2.6 ve Denklem 2.7'de sırasıyla LoS ve nLoS olasılıkları verilmiştir [15].

$$p_{out} = \max(0, 1 - e^{-a_{out}d_{Bn}^{[i,n]} + b_{out}}) \quad (2.5)$$

$$p_{LoS} = (1 - p_{out}(d_{Bn}^{[i,n]}))e^{-a_{LoS}d_{Bn}^{[i,n]}} \quad (2.6)$$

$$p_{nLoS} = 1 - p_{out}(d_{Bn}^{[i,n]}) - p_{LoS}(d_{Bn}^{[i,n]}) \quad (2.7)$$

Burada  $1/a_{out} = 30.0$  m,  $b_{out} = 5.2$ ,  $1/a_{LoS} = 67.1$  m'dir [15].

BS ve kullanıcılar arasındaki direk kanalın yol kaybının hesaplanması için [15]'deki model uygulanmıştır. Bu modele ait yol kaybı formülü Denklem 2.8'de verilmiştir. Yukarıda bahsedilen ve rastgele belirlenen olasılık hesabından çıkan sonuca göre Denklem 2.8'de bulunan  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\xi$  parametreleri farklı değerler almaktadır. Yani LoS olasılığı ve nLoS olasılığının gerçekleştiği durumlar için kullanılacak olan  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\xi$  parametrelerinin değerleri Çizelge 2.1'den bulunur.

$$PL_{Bn}^{[i,n]}[dB] = \alpha + 10\beta \log(d_{Bn}^{[i,n]}) + \xi \quad (2.8)$$

Burada  $\xi \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$  Gauss gürültüsüdür ve  $\sigma^2$  lognormal gölgeleme varyansdır.

Çizelge 2.1 : Yol Kaybı Parametreleri [15].

Model Parametre Değerleri		
	28GHz	73GHz
nLoS	$\alpha = 72.0, \beta = 2.92, \sigma = 8.7\text{dB}$	$\alpha = 82.7, \beta = 2.69, \sigma = 7.7\text{dB}$
LoS	$\alpha = 61.4, \beta = 2, \sigma = 5.8\text{dB}$	$\alpha = 69.8, \beta = 2, \sigma = 5.8\text{dB}$

## 2.2 Kanal Modeli

BS ile İHA-RIS arasında yer alan kanal  $\mathbf{H}_{BR}$ ,  $N^R \times N^B$  boyutunda MIMO kanaldır. BS'in her bir anteninden İHA-RIS'in her bir elemanına olan kanal  $\mathbf{h}_{BR}$  olarak isimlendirilmiştir. Yani  $\mathbf{h}_{BR}^{[i,k]}$  BS'in  $i$ . elemanı ile İHA-RIS'in  $k$ . elemanı arasındaki kanaldır.  $\mathbf{H}_{BR}$  MIMO kanalı Denklem 2.9'da gösterildiği gibi  $\mathbf{h}_{BR}^{[i,k]}$ 'lerden oluşmuştur.

$$\mathbf{H}_{BR} = \begin{bmatrix} h_{BR}^{[1,1]} & h_{BR}^{[1,2]} & \dots & h_{BR}^{[1,N^B]} \\ h_{BR}^{[2,1]} & h_{BR}^{[2,2]} & \dots & h_{BR}^{[2,N^B]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{BR}^{[N^R,1]} & h_{BR}^{[N^R,2]} & \dots & h_{BR}^{[N^R,N^B]} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Rician sönümlmeli kanal modeli, kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan, sinyal yayılımı etkilerini tanımlamak için kullanılan bir kanal modelidir. Rician sönümlmeli kanal modelinde, sinyal yayılımı iki ana bileşene ayrılır. Birinci bileşen, LoS kanalı ifade ederken ikinci bileşen saçılımlı kanalı ifade etmektedir. LoS kanal, sinyalin

direkt olarak alıcıya ileildiği ve düşük kayba sahip olan kanaldır. Saçılımlı kanal ise yansımalar, kırınım ve dağılma gibi etkilerin bulunduğu durumlarda oluşan kanaldır ve sinyallerin farklı yollar boyunca saçılarak alıcıya ulaşmasını temsil eder. Rician sönümlenmeli kanalı Rician faktörü gibi parametrelerle karakterize edilir.

İHA-RIS ile her bir kullanıcı arasındaki kanal  $\mathbf{h}_{Rn}$  ile ifade edilir.  $\mathbf{h}_{BR}$  ve  $\mathbf{h}_{Rn}$  kanallarını modellemek için Rice faktörü  $\kappa$  olan bir Rician sönümleme modeli uygulanmıştır.  $\mathbf{h}_{BR}^{[i,k]}$  Denklem 2.10'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\mathbf{h}_{BR}^{[i,k]} = \sqrt{PL_{BR}^{[i,k]}} (e^{-j(2\pi/\lambda)d_{BR}^{[i,k]}} \mathbf{a}_{BR}^{[i,k]} \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} \mathbf{h}[i,k]) \quad (2.10)$$

Burada  $\mathbf{h}[i,k] \sim \mathcal{CN}(0,1)$  karmaşık Gauss rastgele değişkenidir.  $\mathbf{a}_{BR}^{[i,k]}$ ,  $\mathbf{h}_{BR}^{[i,k]}$  kanalına ait yönlendirme vektörü (steering vector)'dür.

Benzer şekilde,  $\mathbf{h}_{Rn}$  Denklem 2.11'deki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{h}_{Rn}^{[k,n]} = \sqrt{PL_{Rn}^{[k,n]}} (e^{-j(2\pi/\lambda)d_{Rn}^{[k,n]}} \mathbf{a}_{Rn} \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} \mathbf{h}[k,n]) \quad (2.11)$$

Burada  $\mathbf{h}[k,n] \sim \mathcal{CN}(0,1)$  karmaşık Gauss rastgele değişkenidir.  $\mathbf{a}_{Rn}$ ,  $\mathbf{h}_{Rn}$  kanalına ait yönlendirme vektörüdür.

$\mathbf{H}_{Rn}$  kanal matrisinin her bir satırına ilgili kullanıcının  $\mathbf{h}_{Rn}$  vektörü yerleştirilmiştir.

Böylece Denklem 2.12'de gösterildiği gibi  $\mathbf{H}_{Rn}$   $N \times N^R$  boyutunda oluşturulmuştur.

$$\mathbf{H}_{Rn} = \begin{bmatrix} h_{Rn}^{[1,1]} & h_{Rn}^{[1,2]} & \dots & h_{Rn}^{[1,N^R]} \\ h_{Rn}^{[2,1]} & h_{Rn}^{[2,2]} & \dots & h_{Rn}^{[2,N^R]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{Rn}^{[N,1]} & h_{Rn}^{[N,2]} & \dots & h_{Rn}^{[N,N^R]} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

BS ile kullanıcılar arasında oluşan LoS kanal  $\mathbf{H}_{Bn}$  olarak adlandırılmıştır. Eğer ilgili kullanıcı bloke olasılığının gerçekleştiği ve bağlantının sağlanamadığı durumdaysa  $PL_{Bn}$  sonsuza gidiyor kabul edilir ve  $\mathbf{H}_{Bn}$  sıfırdır.

Kullanıcı ile BS'in LoS durumunda olduğu olasılık için  $\mathbf{h}_{BR}$  ve  $\mathbf{h}_{Rn}$  kanallarıyla aynı şekilde Rice faktörü  $\kappa$  olan bir Rician sönümleme modeli uygulanmıştır. BS'in  $i$ . anteni ile  $n$ . kullanıcı arasındaki kanal olan  $\mathbf{h}_{Bn}$  kanalı Denklem 2.13 ile hesaplanır.

$$\mathbf{h}_{Bn}^{[i,n]} = \sqrt{PL_{Bn}^{[i,n]}} (e^{-j(2\pi/\lambda)d_{Bn}^{[i,n]}} \mathbf{a}_{Bn}^{[i,n]} \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} \mathbf{h}[i,n]) \quad (2.13)$$

Burada  $\mathbf{a}_{Bn}$  ise  $\mathbf{h}_{Bn}$  kanalına ait yönlendirme vektörüdür.

Kullanıcı ile BS arasında nLoS olasılığı gerçekleşmiş ise LoS yolu olmadığı için kanal yalnızca saçılma bileşeninden oluşmuştur. Bu senaryo için  $\mathbf{h}_{Bn}$ , Denklem 2.14 ile hesaplanır.

$$\mathbf{h}_{Bn}^{[i,n]} = \sqrt{PL_{Bn}^{[i,n]}} \mathbf{h}[i,n] \quad (2.14)$$

Denklem 2.13 ve Denklem 2.14'de yer alan  $\mathbf{h}^{[i,n]} \sim \mathcal{CN}(0,1)$  karmaşık Gauss rastgele değişkenidir.

$\mathbf{H}_{Bn}$  Denklem 2.13 ve Denklem 2.14 ile hesaplanan kanal vektörlerinin Denklem 2.12'dekine benzer şekilde ilgili satıra yerleştirilmesi ile oluşturulur. Böylece Denklem 2.15'de gösterildiği üzere  $\mathbf{H}_{Bn}$  kanalı  $N \times N^B$  boyutundadır.

$$\mathbf{H}_{Bn} = \begin{bmatrix} h_{Bn}^{[1,1]} & h_{Bn}^{[1,2]} & \dots & h_{Bn}^{[1,N^B]} \\ h_{Bn}^{[2,1]} & h_{Bn}^{[2,2]} & \dots & h_{Bn}^{[2,N^B]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{Bn}^{[N,1]} & h_{Bn}^{[N,2]} & \dots & h_{Bn}^{[N,N^B]} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Tek verici anten çok alıcı antenden oluşan haberleşme sistemlerinde göndericideki tek antenin alıcıdaki her bir antene olan mesafesi eşit değildir. Bu nedenle aynı sinyali alıcıdaki antenler farklı faz kaymaları ile almaktadırlar. Bu faz kaymalarını tanımlamak için antenlere geliş ve ayrılış açılarına göre değişen anten cevap vektörleri kullanılabilir. Ancak bu tez kapsamında hem BS'de hem de İHA-RIS'da bulunan UPA yapı nedeniyle yönlendirme vektörünün açıları ile ifade edilmesi ve hesaplanması zorlaşmaktadır. Bu karmaşık problemin üstesinden gelinebilmesi amacıyla BS'deki antenlerin, İHA-RIS'da bulunan elemanların ve kullanıcıların 3 boyutlu konum bilgileri hesaplanmıştır. BS'in  $(x^B = 0, y^B = 0, h^B)$  ve RIS'in  $(x^R, y^R, h^R)$  koordinatlarında bulunan köşelerdeki elemanlar arasındaki mesafe olan  $d_{BR}^{[1,1]}$  referans olarak kabul edilmiştir. BS ile İHA-RIS arasındaki kanalların dizin cevabı Denklem 2.16 ile verilmiştir.

$$\mathbf{a}_{BR} = e^{\frac{j2\pi(d_{BR}^{[1,1]})}{\lambda}} \times \begin{bmatrix} 1 & e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[1,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[1,N^B]}}{\lambda}} \\ e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[2,1]}}{\lambda}} & e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[2,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[2,N^B]}}{\lambda}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[N^R,1]}}{\lambda}} & e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[N^R,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{BR}^{[N^R,N^B]}}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Benzer şekilde  $d_{Rn}^{[1,1]}$  İHA-RIS'in köşe elemanındaki anten ile kullanıcı anteni arasındaki referans mesafedir. İHA-RIS ile kullanıcılar arasındaki kanalların dizin cevabı Denklem 2.17 ile verilmiştir.

$$\mathbf{a}_{Rn} = e^{\frac{j2\pi(d_{Rn}^{[1,1]})}{\lambda}} \times \begin{bmatrix} 1 & e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[1,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[1,N^R]}}{\lambda}} \\ e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[2,1]}}{\lambda}} & e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[2,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[2,N^R]}}{\lambda}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[N,1]}}{\lambda}} & e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[N,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{Rn}^{[N,N^R]}}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Son olarak,  $d_{Bn}^{[1,1]}$  BS'in köşe elemanındaki anten ile kullanıcı anteni arasındaki referans mesafedir. BS ile kullanıcılar arasındaki kanalların dizin cevabı Denklem 2.18 ile verilmiştir.

$$\mathbf{a}_{Bn} = e^{\frac{j2\pi(d_{Bn}^{[1,1]})}{\lambda}} \times \begin{bmatrix} 1 & e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[1,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[1,N^B]}}{\lambda}} \\ e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[2,1]}}{\lambda}} & e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[2,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[2,N^B]}}{\lambda}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[N,1]}}{\lambda}} & e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[N,2]}}{\lambda}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi d_{Bn}^{[N,N^B]}}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Böylece Denklem 2.10'daki  $\mathbf{a}_{BR}$ , Denklem 2.11'deki  $\mathbf{a}_{Rn}$  ve Denklem 2.13  $\mathbf{a}_{Bn}$  sırasıyla Denklem 2.16, Denklem 2.17 ve Denklem 2.18 ile hesaplanır.



### 3. DÜŞÜK KARMAŞIKLIKLI HİBRİT HÜZME ŞEKİLLENDİRME

Bu tez kapsamında BS'de düşük karmaşıklığa sahip hibrit hüzme şekillendirme tekniği uygulanmıştır. Hibrit hüzme şekillendirme, analog ve dijital hüzme şekillendirme olarak iki bölümden oluşur. Analog hüzmeleme bölümü için DFT tabanlı kod kitapçığı (Discrete Fourier Transform Based Codebook) hüzme şekillendirme tekniği iletim hüzmesi oluşturmak için kullanılmıştır. Dijital hüzme şekillendirme bölümü için ise ZF algoritması kullanılmıştır.

#### 3.1 DFT tabanlı kod kitapçığı Analog Hüzme Şekillendirme

DFT tabanlı kod kitapçığı şekillendirme tekniği analog hüzme şekillendirme için basit bir yöntem olarak öne çıkmıştır. DFT tabanlı kod kitapçığı hüzmeleme yöntemi ile kanal bilgisi yükü önemli ölçüde azaltmaktadır.

$\sqrt{N^B}$  tek boyutunda bir düzgün doğrusal dizi (Uniform Linear Array) için DFT tabanlı kod kitapçığı ön kodlayıcı yöntemi Denklem 3.1'deki gibi tanımlanır.

$$w_{1D}^{\sqrt{N^B}}(k) = [e^{j2\pi \cdot 0 \cdot \frac{k}{\sqrt{N^B}}}, e^{j2\pi \cdot 1 \cdot \frac{k}{\sqrt{N^B}}}, \dots, e^{j2\pi \cdot (\sqrt{N^B}-1) \cdot \frac{k}{\sqrt{N^B}}} ]^T, k = 0, 1, \dots, \sqrt{N^B} - 1 \quad (3.1)$$

İki boyutlu UPA için ön kodlayıcı seti Kronecker çarpımı ile elde edilir. Sonuç olarak, bir  $\sqrt{N^B} \times \sqrt{N^B}$  dizisi için ön kodlama vektörünün toplam  $N^B$  adet alternatifi vardır. Bu, açısal alanda bir tür nicemlemedir.

$$w_{2D}^{N^B}(k, l) = w_{1D}(k) \otimes w_{1D}(l) \quad (3.2)$$

Analog iletim hüzmeleme vektörü  $\mathbf{w}^B \in \mathcal{V}^B$  kümesinden seçilir.  $\mathbf{W}^B$  Denklem 3.3'de verilmiştir.

$$\mathbf{W}^B = \left[ \frac{1}{\sqrt{N^B}} \mathbf{w}_{2D}^{N^B}(1), \dots, \frac{1}{\sqrt{N^B}} \mathbf{w}_{2D}^{N^B}(v), \dots, \frac{1}{\sqrt{N^B}} \mathbf{w}_{2D}^{N^B}(N^B) \right] \quad (3.3)$$

Oluşturulan hüzmelerden biri kaskat bağlantılı kullanıcıya hizmet vermek üzere İHA-RIS'a yönlendirilecektir. mmDalgade İHA-RIS, kaskat kanal optimizasyonunu çok karmaşık hale getiren çok sayıda eleman içerir. Hüzme şekillendirmeyi basitleştirmek için, İHA-RIS panelinin ortasına bir adet aktif eleman yerleştirilmesini öneriyoruz. Bu aktif eleman sayesinde İHA-RIS'ın da kullanıcılara benzer şekilde BS'e en iyi önkodlamasını geri beslemektedir. BS ile aktif eleman arasındaki kanalı  $\mathbf{g}$  ile ifade edelim. Bu kanal  $1 \times N^B$  çoklu girişli tek çıkışlı kanaldır ve  $\mathbf{g} = \mathbf{H}_{BR}[N^R/2, :]$  şeklinde yazılır.

Hüzme eğitimi, DFT tabanlı kod kitapçığı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Kaskat kullanıcı için BS'den RIS'e optimum iletim hızı oluşturucu Denklem 3.4 ile bulunur.

$$\mathbf{w}^B = \arg \max_{\mathbf{w}^B \in \mathcal{V}^B} |\mathbf{g} \mathbf{w}_{2D}(v)|^2 \quad (3.4)$$

Direk kullanıcılar için optimum iletim hızı oluşturucu Denklem 3.5 ile bulunur. Her bir kullanıcı kendi en iyi önkodlamasını BS'e geri besleme yapar.

$$\mathbf{w}^B = \arg \max_{\mathbf{w}^B \in \mathcal{V}^B} |\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{2D}(v)|^2 \quad (3.5)$$

Çizelgelenen tüm kullanıcılar için elde edilen  $\mathbf{w}^B$  vektörlerinden  $\mathbf{W}^{RF}$  DFT tabanlı kod kitapçığı analog hüzme şekillendirme matrisi elde edilir.  $\mathbf{W}^{RF} = [\mathbf{w}_1^B, \dots, \mathbf{w}_N^B]$  şeklinde oluşturulur.

Aktif eleman kullanımı ile birlikte iletim hızı oluşturma optimizasyonunun karmaşıklığı, RIS öğelerinin sayısından bağımsız hale gelir. DFT tabanlı kod kitapçığı hüzmelemenin RIS faz kaydırma tasarımında da kullanıldığını varsayalım. Bu durumda hem iletim hızı oluşturucu ve faz kaymaları için ayrı ayrı optimal hızı aramak gerekecek. Bu da çok elemanlı yapılar için karmaşıklığı çok artırmıştır. Ortak arama yapılan durumda  $O(N^B \times N^R)$  karmaşıklığı gerektirir. Ancak, önerilen şema iki aramayı ayırır ve  $O(N^B + N^R)$  karmaşıklığına yol açar. Böylece karmaşıklık önemli ölçüde azaltılmış olur.

### 3.2 ZF Tabanlı Dijital Hüzme Şekillendirme

Dijital hüzmeleme için ZF ve su doldurma gücü tahsisi, basitliği nedeniyle literatürde iyi bilinen bir yöntemdir. Ayrıca ZF, çok kullanıcılu hüzme oluşturma'nın neden olduğu çapraz kullanıcı girişimlerini sıfıra ayarlamak için kullanılmaktadır. ZF hüzme şekillendirme tekniğinin uygulanması için [43]'den faydalanılmıştır.

ZF kanal bilgisi gerektirdiği için öncelikle bu çalışmada kullanılan kanal modelleri tanımlanmalıdır. İlk olarak  $\mathcal{K}$  kümesindeki  $n$ . kullanıcı bir kaskat kullanıcı olsun. Bu durumda  $\bar{\mathbf{H}}_n$  ve  $\mathbf{H}'_n$  sırasıyla Denklem 3.6 ve Denklem 3.7'de verilmiştir.

$$\bar{\mathbf{H}}_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Rn} \mathbf{\Phi}_n \mathbf{h}_{BR} \mathbf{W}^{RF})^T] \quad (3.6)$$

$$\mathbf{H}'_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Rn} \mathbf{\Phi}_n \mathbf{h}_{BR})^T] \quad (3.7)$$

Burada  $\mathbf{\Phi}_n$  faz kaydırma vektörüdür.  $\mathbf{W}^{RF}$  ilgili kullanıcının DFT kod kitapçığı tabanlı analog ön kodlama matrisidir.  $\mathbf{h}_{BR}$  BS ile İHA-RIS arasındaki kanal ve  $\mathbf{h}_{Rn}$  İHA-RIS ile ilgili kullanıcı arasındaki kanaldır.  $\bar{\mathbf{H}}_n$  dijital ön kodlamayı içeren kanalı ifade ederken  $\mathbf{H}'_n$  hüzmelemeleri içermeyen kanalı temsil etmektedir.

Benzer şekilde,  $\mathcal{K}$  kümesindeki  $n$ . kullanıcı bir direk kullanıcı ise  $\bar{\mathbf{H}}_n$  ve  $\mathbf{H}'_n$  sırasıyla Denklem 3.8 ve Denklem 3.9'daki gibidir.

$$\bar{\mathbf{H}}_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{W}^{RF})^T] \quad (3.8)$$

$$\mathbf{H}'_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Bn})^T] \quad (3.9)$$

Burada  $\mathbf{h}_{Bn}$  BS ile kullanıcı arasındaki kanaldır.  $\mathbf{W}^{RF}$  ilgili kullanıcının DFT kod kitapçığı tabanlı analog ön kodlama matrisidir.

Tüm kullanıcıların kanalları hesaplandıktan sonra genel kanal matrislerini oluşturmak için bu bireysel kanal matrisleri birleştirilir.  $\bar{\mathbf{H}}$  ve  $\mathbf{H}'$  genel kanallar sırasıyla Denklem 3.10 ve Denklem 3.11'deki gibi oluşturulur.

$$\bar{\mathbf{H}} \triangleq [\bar{\mathbf{H}}_1, \dots, \bar{\mathbf{H}}_N] \quad (3.10)$$

$$\mathbf{H}' = [\mathbf{H}'_1, \dots, \mathbf{H}'_N] \quad (3.11)$$

$\bar{\mathbf{H}}$  kanalına ait ZF hüzmleme matrislerinin oluşturulması için Denklem 3.12 ile bulunur.

$$\mathbf{W}_{imp}^{BB} = \bar{\mathbf{H}}^H (\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{H}}^H)^{-1} \quad (3.12)$$

ZF dijital hüzmleme matrisi olan  $\mathbf{W}^{BB}$ ,  $\mathbf{W}^{BB} = [\mathbf{w}_1^{BB}, \dots, \mathbf{w}_N^{BB}]$  şeklinde oluşturulur.

Her bir  $\mathbf{w}_n^{BB}$  Denklem 3.13 ile hesaplanır.  $\mathbf{W}_{imp}^{BB}(:, n)$ 'nin  $\mathbf{W}^{RF} \mathbf{W}_{imp}^{BB}(:, n)$  ile normalizasyonu Frobenius normu kullanılarak elde edilir. Frobenius normu, bir matrisin elemanlarının karelerinin toplamının karekökü olarak hesaplanan bir normdur. Matrisin her bir elemanının karesini alır, bu değerleri toplar ve son olarak karekökünü alır. Frobenius normu, matrisin büyüklüğünü veya şeklini dikkate almaz, yalnızca elemanların değerlerini kullanır.

$$\mathbf{w}_n^{BB} = \frac{\mathbf{W}_{imp}^{BB}(:, n)}{\|\mathbf{W}^{RF} \mathbf{W}_{imp}^{BB}(:, n)\|_F}, n = 0, 1, \dots, N \quad (3.13)$$

Daha sonra  $N$  adet kullanıcı için toplam eşdeğer kanal olan  $\mathbf{H}^{total}$  hesaplanır.

$$\mathbf{H}^{total} = \mathbf{H}' \mathbf{W}^{RF} \mathbf{W}^{BB} \quad (3.14)$$

$\mathbf{H}^{total}$ 'ın su doldurma güç tahsisini kullanarak her bir kullanıcı için  $P_n$  hesaplanır. Su doldurma yöntemi, iletim kapasitesi yüksek olan ve gürültü seviyesi düşük olan altbantlarına daha fazla güç tahsis ederek enerji dengesini optimize etmeyi amaçlar. Yani, yüksek iletim kapasitesine sahip olan bölgelere daha fazla güç gönderilir.

$P_n$ 'lerin toplamının BS'in toplam gücünden daha küçük ve ya eşit olması beklenir.

Yani  $P_n$ 'ler  $\sum P_n \leq N_{RF} P_t$  şartını sağlamalıdır. Burada BS'deki  $N_{RF}$  RF zinciri sayısı ve  $P_t$  RF zinciri başına düşen güçtür.

ZF tabanlı hüzme şekillendirme tekniğinin adımları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Özetle, burada kanal matrisleri  $\bar{\mathbf{H}}$  ve  $\mathbf{H}'$ 'in oluşturulması için bir döngü mevcuttur. Daha sonra bu kanal matrislerinin transpozları alınır ve boyutları düzenlenir. ZF formülü ile  $\mathbf{w}_n^{BB}$  hesaplanır ve  $\mathbf{W}^{BB}$  matrisi oluşturulur. Son olarak da eş değer kanal matrisi ve güç hesabı yapılır.

Çizelge 3.1: Kanal matrislerinin oluşturulması ve ZF hüzme şekillendirme.

1:	Giriş: $\mathcal{K}, \mathcal{K}^C, \mathbf{h}_{Rn}, \mathbf{h}_{BR}, \mathbf{h}_{Bn}, \Phi_n, \mathbf{W}^{RF}, N_{RF}$
2:	Çıkış: $\mathbf{W}^{BB}, \mathbf{H}^{total}, P_n$
3:	Başla for $n \in \mathcal{K}$ do
4:	if $n \in \mathcal{K}^C$ then
5:	$\bar{\mathbf{H}}_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{h}_{BR} \mathbf{W}^{RF})^T]$
	$\mathbf{H}'_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{h}_{BR})^T]$
6:	else
	$\bar{\mathbf{H}}_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{W}^{RF})^T]$
	$\mathbf{H}'_n \triangleq [(\mathbf{h}_{Bn})^T]$
7:	end
8:	end
9:	$\mathbf{H}' = \mathbf{H}'^T, \bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{H}}^T$
10:	$\mathbf{W}_{imp}^{BB} = \bar{\mathbf{H}}^H (\bar{\mathbf{H}} \bar{\mathbf{H}}^H)^{-1}$
11:	$\mathbf{W}^{BB} = [\mathbf{w}_1^{BB}, \dots, \mathbf{w}_N^{BB}]$ , burada $\mathbf{w}_n^{BB} = \frac{\mathbf{W}_{imp}^{BB}(:, n)}{\ \mathbf{W}^{RF} \mathbf{W}_{imp}^{BB}(:, n)\ _F}, n = 0, 1, \dots, N$
12:	$\mathbf{H}^{total} = \mathbf{H}' \mathbf{W}^{RF} \mathbf{W}^{BB}$
13:	Hesapla: $P_n, \forall u$ (su doldurma algoritması) s.t. $\sum P_n \leq N_{RF} P_t$
14:	Son

#### 4. FAZ KAYDIRMA OPTİMİZASYONU

Bu tez kapsamında bir MIMO BS, çok sayıda kullanıcı var bir İHA-RIS'in yer aldığı aşağı yönlü bir mmDalga bandı sistemi ele alıyoruz. Burada BS ve kullanıcılar arasındaki kanalın bloke ve nLoS durumunda olduğu koşulda kullanıcılar İHA-RIS yardımıyla BS'den servis alabilmektedirler. Bu kaskat kanal Denklem 4.1 ile ifade edilir.

$$C = \mathbf{h}_{Rn} \Theta \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}^B \quad (4.1)$$

Burada  $\Theta = \text{diag}(\Phi)$  faz kaydırma matrisidir.  $\Phi$ 'ise  $\Phi = [e^{j\phi_1}, \dots, e^{j\phi_k}, \dots, e^{j\phi_{N^R}}]^T$  ile ifade edilir ve her bir RIS elemanının faz kaydırma değerlerinden oluşturulmuş bir vektördür.  $\mathbf{w}^B$ , BS'de  $N^B \times 1$  ön kodlama vektörüdür.  $\mathbf{H}_{BR}$ , BS ve RIS arasındaki  $N^R \times N^B$  MIMO kanal matrisi ve  $\mathbf{h}_{Rn}$ , RIS ve UE arasındaki  $1 \times N^R$  kanal vektörüdür. Ulaşılabilir maksimum hız Denklem 4.2 ile ifade edilir. Amacımız optimal  $\Phi$ 'yi bularak ulaşılabilir maksimum hızı elde etmektir.

$$R = \log_2 \left( 1 + \frac{P_t}{N_o |C|^2} \right) \quad (4.2)$$

Burada  $N_o$  gürültü gücünü,  $P_t$  iletim gücünü ifade eder.

##### 4.1 DFT Tabanlı Kod Kitapçığı Faz Kaydırma Optimizasyon Yöntemi

DFT tabanlı kod kitapçığı yönteminin analog hüzme şekillendirme için kullanılmasına benzer şekilde aynı yöntem faz kaydırma optimizasyonunda kullanılmıştır.

$\sqrt{N^R}$  tek boyutunda bir düzgün doğrusal dizi (Uniform Linear Array) için DFT tabanlı kod kitapçığı faz kaydırma yöntemi Denklem 4.3'deki gibi tanımlanır.

$$\Phi_{1D}^{\sqrt{N^R}}(k) = [e^{j2\pi \cdot 0 \cdot \frac{k}{\sqrt{N^R}}}, e^{j2\pi \cdot 1 \cdot \frac{k}{\sqrt{N^R}}}, \dots, e^{j2\pi \cdot (\sqrt{N^R}-1) \cdot \frac{k}{\sqrt{N^R}}}]^T, k = 0, 1, \dots, \sqrt{N^R} - 1 \quad (4.3)$$

İki boyutlu UPA için faz kaydırma seti Kronecker çarpımı ile elde edilir. Sonuç olarak, bir  $\sqrt{N^R} \times \sqrt{N^R}$  dizisi için faz kaydırma vektörünün toplam  $N^R$  adet alternatifi vardır. Bu, açısız alanda bir tür nicemlemedir.

$$\Phi_{2D}^{N^R}(k, l) = \Phi_{1D}(k) \otimes \Phi_{1D}(l) \quad (4.4)$$

Faz kaydırma vektörü  $\Phi \in \mathcal{V}^{RIS}$  kümesinden seçilir.  $\Phi$  Denklem 4.5'de verilmiştir.

$$\Phi = \left[ \frac{1}{\sqrt{N^R}} \Phi_{2D}^{N^R}(1), \dots, \frac{1}{\sqrt{N^R}} \Phi_{2D}^{N^R}(v), \dots, \frac{1}{\sqrt{N^R}} \Phi_{2D}^{N^R}(N^R) \right] \quad (4.5)$$

Optimal faz kaydırma değerlerini bulabilmek için DFT tabanlı kod kitapçığı yöntemi tasarımı kolay bir yöntem olmasına rağmen, çalışma süresi konusunda büyük bir dezavantajı beraberinde getirir. Bu yöntemin kullanılması için İHA-RIS'ta bulunan  $N^R$  boyutunda bir kod kitapçığının oluşturulması gerekir. Eleman sayısındaki artış bu yöntemi çalıştırma süresini uzatmaktadır. Bu tez kapsamında DFT tabanlı kod kitapçığı yöntemin performansı araştırılmıştır ancak MmDalga frekanslarında RIS boyutunun büyümesi ile birlikte bu yöntemin kullanılmasının optimal bir çözüm olmadığı değerlendirilmiştir.

#### 4.2 Alternatif Optimizasyon Yöntemi

Daha düşük karmaşıklık elde etmek için, bu alt bölümde alternatif bir algoritma önerilmiştir ve faz kaydırma optimizasyonu için [37]'den yararlanılmıştır. [37]'e göre her hangi faz kaydırma vektörü  $\Phi$  için, maksimum hız iletimi (maximum ratio transmission) optimal optimal iletim hızı oluşturmadır. Böylece optimal hızı belirleme vektörü Denklem 4.6 ile ifade edilir. Böylece veri hızını maksimize edebilmek amacıyla  $\|\mathbf{h}_{Rn} \Theta \mathbf{H}_{BR}\|^2$  ifadesi maksimum yapılmalıdır.

$$\mathbf{w}^{B*} = \frac{(\mathbf{h}_{Rn} \Theta \mathbf{H}_{BR})^H}{\|\mathbf{h}_{Rn} \Theta \mathbf{H}_{BR}\|} \quad (4.6)$$

Ayrıca [37]'ye göre tek antenli kullanıcılar için, iletim ön kodlama vektörü  $\mathbf{w}^B$  biliniyorsa, her RIS elemanı için optimal faz kaydırma değeri Denklem 4.7'deki gibi oluşturulur.

$$\phi_k = -arg(\mathbf{h}_{Rn}[k] \mathbf{H}_{BR}[k, :] \mathbf{w}^B) \quad (4.7)$$

## 5. ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİ

### 5.1 Orantılı Adil Çizelgeleme Yöntemi

Orantılı adil çizelgeleme yöntemi ile hem adilliği hem de veri hızı performansını garanti eder. Kötü kanal koşullarına sahip kullanıcıları da çizelgeleyen bir yöntemdir. Bu yöntemdeki ana fikir, her zaman dilimi için çizelgelenen kullanıcılar yinelenmektedir. İlgili zaman dilimi için seçilen kullanıcılar o anki ulaşılabilir veri hızları en yüksek olan kullanıcılardır. Bir sonraki zaman dilimi için bu kullanıcılar elenir ve yerlerine daha önce BS'den servis almamış kullanıcılar yine ulaşılabilir hızlarının yüksekliğine göre seçilir. Böylece kötü kanal koşullarına sahip olan kullanıcılar çizelgeleme için adil bir şansa sahip olurlar.

Kullanıcı çizelgelemeyi ve hibrit hüzmelenmeyi ortaklaşa optimize eden PF-ZF adlı yeni bir şema öneriyoruz.

İlk olarak, başlangıçta  $n$ . kullanıcıya ait veri hızı  $R_n = \epsilon$  olarak ve orantılı adalet metriği olan Denklem 5.1 ile tanımlanır.

$$\gamma_n = \frac{1}{R_n} \quad (5.1)$$

Aynı DFT ön kodlama vektörlerini kullanan kullanıcıların birlikçe çizelgenmemeleri için  $A_n$  parametresi tanımlanmıştır.

BS, hem doğrudan hem de BS-RIS kanalları için en uygun analog ön kodlama vektörünü bulmak için DFT tabanlı kod kitapçığı olan bir kod çizelgesinde tarama gerçekleştirir. Böylece DFT analog ön kodlama kümesinden optimal dizinler elde edilir. Kaskat ve direk kullanıcılar için bu dizinler sırasıyla  $v_{Bn}$  ve  $v_{BR}$ 'dir. Sonra, kaskat kullanıcı için faz kaydırma optimizasyonu yapılır. İlgili kullanıcı için optimum faz kaydırma değerleri Denklem 5.2 ile bulunur.

$$\phi_{k,n} = -\arg(\mathbf{h}_{Rn}[k] \mathbf{H}_{BR}[k, :] \mathbf{w}_{2D}(v_{BR})), \forall k, n \quad (5.2)$$

Daha sonra, direk ve kaskat kanallar dikkate alınarak her kullanıcı için ulaşılabilir veri hızları hesaplanır. Direk ve kaskat kullanıcıların ulaşılabilir veri hızları sırasıyla Denklem 5.3 ve Denklem 5.4 ile bulunur.

$$\rho_n^D = \log_2 \left( 1 + \frac{P_t |\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{2D}(v_{Bn})|^2}{N_o} \right), \forall n \quad (5.3)$$

$$\rho_n^c = \log_2 \left( 1 + \frac{P_t |\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{2D}(v_{BR})|^2}{N_o} \right), \forall n \quad (5.4)$$

Kullanıcılar arasındaki adalet öncelik verilerek çizelgeleme yapılabilmesi için orantılı adalet metriği, ulaşılabilir veri hızının toplam veri hızına oranı şeklinde tanımlanmıştır.  $\gamma_n$  her iterasyon sonucunda yeniden hesaplanan  $R_n$ 'e göre değişir. Kaskat kullanıcı seçilirken, her kullanıcının direk ve kaskat veri hızları kıyaslanarak yüksek olan veri hızlarından oluşan yeni bir vektör tanımlanır. Bu vektör ile  $\gamma_n$  ifadesi çarpılarak en yüksek veri hızına sahip olan kullanıcı kaskat kullanıcı olarak belirlenir. Benzer şekilde direk kullanıcı seçilirken, sadece direk kullanıcıların veri hızları ile  $\gamma_n$  ifadesi çarpılır. Böylece orantılı adalet metriği uygulanır ve yine en yüksek veri hızlarına sahip kullanıcılar da direk kullanıcı olarak belirlenir.

Her bir zaman diliminde kaskat kanal aracılığıyla yalnızca bir kullanıcıya hizmet verilebilir. Kaskat kanalı kullanarak en yüksek veri hızına sahip olan kullanıcı kaskat kanal için seçilir. Bir kullanıcı kaskat iletim için çizelgelendiğinde, RF zincir sayısından bir eksik kadar da direk kullanıcı seçilmelidir. Bu nedenle sonraki çizelgelerde yalnızca direk kanalı kullanan direk kullanıcının hızı dikkate alınarak kullanıcılar seçilir. Kullanıcılar belirlendikçe DFT tabanlı kod kitapçığı analog ön kodlama matrisi  $\mathbf{W}^{RF}$  oluşturulur. Girişimi önlemek için, aynı ön kodlama vektörünü kullanan kullanıcılar aynı zaman diliminde çizelgelenmemesi o zaman dilimi için elenir. Yani aynı ön kodlama vektörüne sahip kullanıcılar aynı zaman diliminde seçilemezler. Çizelgeleme algoritması, tüm kullanıcılar bir zaman dilimi için çizelgelendiğinde veya hiçbir düğüm kullanılmadığında sona erer. Kullanıcılar çizelgelendikten sonra, ZF algoritması kullanılarak dijital huzme oluşturma vektörleri de belirlenir.

Kullanıcılar orantılı adil bir şekilde çizelgelendikten ve kullanıcılar için hibrit hüzme şekillendirme hesabı yapıldıktan sonra her bir kullanıcı için sonuç veri hızları hesaplanır. Kaskat bir kullanıcının herhangi bir zaman dilimindeki sonuç veri hızı Denklem 5.5'de verilmiştir.

$$r_n^c = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_t |\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{BR}|^2}{N_o + I_c^d} \right), n \in \mathcal{K}^c \quad (5.5)$$

Burada  $I_c^d$  girişim ifadeleridir ve Denklem 5.6'da verilmiştir. Denklem 5.5'de kaskat kullanıcının veri hızını hesaplanırken, sistemde sadece bir adet kaskat kullanıcı bulunduğu için girişime sebep olan mutlaka direk kullanıcılarıdır. Bu nedenle Denklem 5.6'daki  $|\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{Bn'}|^2$  ifadesi direk kullanıcının direk yolunun sebep olduğu girişimi gösterirken,  $|\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{Bn'}|^2$  ifadesi ise direk kullanıcının kaskat yolunu gösterir.



$$I_c^d = \sum_{n' \in \mathcal{K}^D} P_t (|\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{Bn'}|^2 + |\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{Bn'}|^2) \quad (5.6)$$

Herhangi bir zaman diliminde çizelgelenmiş bir direk kullanıcının sonuç veri hızı Denklem 5.7'de verilmiştir.

$$r_n^d = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_t |\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{Bn}|^2}{N_o + I_d^d + I_d^c} \right), n \in \mathcal{K}^D \quad (5.7)$$

Burada  $I_d^d$  ve  $I_d^c$  ifadesi girişim ifadeleridir ve sırasıyla Denklem 5.8 ve Denklem 5.9'da verilmişlerdir. Eğer girişime maruz kalan kullanıcı direk kullanıcı ise, Denklem 5.8'deki  $|\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{Bn'}|^2$  ifadesi diğer direk kullanıcılardan kaynaklanan direk yolu gösterir.  $|\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{Bn'}|^2$  ifadesi yine direk kullanıcıların kaskat yolunu gösterir. Denklem 5.9'da bulunan  $|\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{BR}|^2$  ifadesi kaskat kullanıcının direk yolunu ve  $|\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{BR}|^2$  ifadesi de kaskat kullanıcının kaskat yolunu gösterir.

$$I_d^d = \sum_{n' \neq n \in \mathcal{K}^D} P_t (|\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{Bn'}|^2 + |\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{Bn'}|^2) \quad (5.8)$$

$$I_d^c = \sum_{n' \in \mathcal{K}^C} P_t (|\mathbf{h}_{Bn} \mathbf{w}_{BR}|^2 + |\mathbf{h}_{Rn} \Phi_n \mathbf{H}_{BR} \mathbf{w}_{BR}|^2) \quad (5.9)$$

Denklem 5.5 ve Denklem 5.6'da,  $\mathbf{w}_{BR} = \mathbf{w}_{2D}(v_{BR}) \mathbf{w}_n^{BB}$  çizelgelenmiş kaskat kullanıcı  $n$  için hesaplanan hibrit ön kodlama vektörüdür.  $\mathbf{w}_{Bn'} = \mathbf{w}_{2D}(v_{Bn'}) \mathbf{w}_{n'}^{BB}$  ise çizelgelenmiş direk kullanıcı  $n$  için hesaplanan hibrit ön kodlama vektörüdür. Ayrıca  $B$  bant genişliğini gösterir.

Böylece hem orantılı adil çizelgeleme yönteminin hem de hibrit hüzmleme tekniğinin kullanıldığı bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaya ait adımlar Çizelge 5.1'de verilmiştir. Özetle PF-ZF algoritmasında,  $T$  adet tanımlanmış zaman dilimi içinde bir döngü ile çizelgenecek kullanıcılar seçilecek ve bu kullanıcılara ait sonuç veri hızları hesaplanacaktır. DFT analog ön kodlama tekniği ile kaskat ve direk kullanıcılar için optimal dizinler olan  $v_{Bn}$  ve  $v_{BR}$  hesaplanır. Faz kaydırma optimizasyon tekniği ile  $\phi_{k,n}$  bulunur. Kullanıcıların veri hızları olan  $\rho_n^D$  ve  $\rho_n^C$  hesaplanır. Tüm kullanıcılar'dan  $N_{RF}$  adet kullanıcı çizelgelenmek üzere bir tarama başlatılır. Tüm kullanıcıların içinde veri hızı en yüksek olan kaskat kullanıcı seçilir. Kaskat kullanıcıdan sonra veri hızı en yüksek olan kullanıcı direk kullanıcı olarak seçilir. Kullanıcılara ait DFT analog ön kodlama matrisleri oluşturulur. Kullanıcılar arasındaki girişimin azaltılabilmesi için kullanıcılar aynı DFT analog ön kodlama

vektörlerini kullanmayanlardan seçilir. Çizelgeleme tamamlandıktan sonra ZF hüzme şekillendirme tekniği uygulanır. Son olarak, kullanıcıların sonuç veri hızları ve konumları belirlenir.

## 5.2 Round Robin Çizelgeleme Yöntemi

Round Robin çizelgeleme yönteminde kullanıcılara nümerik bir sıra ile hizmet verilir. Yani kullanıcılar veri hızları, konumları, kanal durumları vb. herhangi bir süreç bilgisine bakılmaksızın yalnızca sıra ile servis alabilmektedir. Zaman her kullanıcı için eşit aralık dilimlerine ayrılmıştır. Bu yöntem, kullanıcılar arasında zaman diliminin adil bir paylaşılmasını sağlar ve her bir kullanıcının belirli bir hizmet süresi almasını garanti eder. Böylece, haberleşme kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması ve kullanıcılar arasındaki dengenin sağlanması amaçlanır.

$N_{RF}$  RF zinciri sayısı kadar kullanıcı seçilir. Bu kullanıcılardan en yüksek veri hızına sahip olan kullanıcı kaskat kullanıcı olarak belirlenir. Geri kalan  $N_{RF} - 1$  adet kullanıcı da direk kullanıcı olur. Seçilen kullanıcılar elenir ve sonraki zaman dilimlerinde nümerik sırayla diğer kullanıcılar çizelgelenir.

Bu yöntemi kullanarak elde edilen sonuçlar orantılı adil çizelgeleme yönteminin sonuçları ile kıyaslanarak kullanıcılar arasındaki adillığın sistem performansına etkisinin incelenmesi hedeflenmektedir.

Çizelge 5.1 : Orantılı Adil Çizelgeleme ve ZF Hüzmeleme (PF-ZF).

```

1: Giriş:  $\epsilon, R_n, \gamma_n, \mathcal{K}_n, A_n, \mathcal{U}, T, \mathbf{W}^{RF}, v_{Bn}, v_{BR}, \phi_{k,n}, \mathbf{h}_{Rn}^{[k]}, \mathbf{H}_{BR}^{[k,:]}, \mathbf{w}_{2D}(v_{Bn})$ 
,  $\rho_n^D, \rho_n^C, \mathcal{K}^C, \mathcal{K}^D, n^*$  Çıkış:  $\mathcal{K}, \mathbf{W}^{BB}, R_n^*, (x_u, y_u, h_u)$ 
2: Başla
3: Veri hızlarını başlat  $R_n = \epsilon, \gamma_n = \frac{1}{R_n}, \mathcal{K}_n = \emptyset, A_n = 1, \forall n \in \mathcal{U}$ 
4:   for t = 1:T do
5:     Başlat,  $\gamma_n = \frac{1}{R_n}, A_n = 1, \forall n \in \mathcal{U}, \mathbf{W}^{RF} = []$ 
6:     Hüzmeleri tara,  $v_{Bn}$  ve  $v_{BR}$ 'yi bul
7:     Hesapla:  $\phi_{k,n} = -arg(\mathbf{h}_{Rn}^{[k]} \mathbf{H}_{BR}^{[k,:]} \mathbf{w}_{2D}(v_{Bn})), \forall k, n$ 
8:     Hesapla:  $\rho_n^D$  ve  $\rho_n^C$ 
9:     while  $\exists k.s.t. A_n = 1$  do
10:       if  $\mathcal{K}^C = \emptyset$ 
11:         Bul:  $[\rho^* = n^*] = \max_{n|A_n=1} \{\gamma_n \max\{\rho_n^D, \rho_n^C\}\}$ 
12:       else
13:         Bul:  $n^* = arg \max_{n|A_n=1} \{\gamma_n \rho_n^D\}$ 
14:       end
15:       if  $\rho^* = \rho_{n^*}^C$  then
16:          $\mathcal{K}^C = \mathcal{K}^C \cup \{n^*\}, \forall k.s.t. v_{BR} = v_{Bn}, set A_n = 0$ 
17:          $\mathbf{W}^{RF} = [\mathbf{W}^{RF}, \mathbf{w}_{2D}(v_{BR})]$ 
18:       else
19:          $\mathcal{K}^D = \mathcal{K}^D \cup \{n^*\}, \forall n.s.t. v_{Bn^*} = v_{Bn}, set A_n = 0$ 
20:          $\mathbf{W}^{RF} = [\mathbf{W}^{RF}, \mathbf{w}_{2D}(v_{Bn^*})]$ 
21:       end
22:        $\mathcal{K} = \mathcal{K} \cup n^*$ 'yi güncelle
23:       if  $|\mathcal{K}| = N_{RF}$  then
24:          $A_n = 0, \forall n \in \mathcal{U}$ 
25:       end
26:     end
27:     ZF'i çalıştır ve  $\mathbf{W}^{BB}$ 'yi bul
28:      $R_n = R_n + \rho_{n^*}$  veri hızlarını güncelle
29:   end
30:    $(x_u, y_u, h_u), \forall u \in \mathcal{Y}$ 'yi bul
31: Son

```



## 6. NÜMERİK SONUÇLAR

Bölüm 5.1'de verilen orantılı adil çizelgeleme ve Bölüm 5.2'de verilen Round Robin çizelgeleme ve farklı hüzmleme şemalarının performansını karşılaştırmak için MATLAB aracılığıyla Monte Carlo koşulları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonun gerçekleştirildiği koşullar aşağıda verilmiştir.

- BS ( $x^B = 0, y^B = 0, h^B = 10$ ) metre koordinatlarında bulunmaktadır.
- Maksimum BS-kullanıcı mesafesi  $D_{max}=100$  metredir.
- İHA-RIS ( $x^R = 20, y^R = 0, h^R = 20$ ) metre koordinatlarında bulunmaktadır.
- Sistem üzerindeki 20 adet tek antenli kullanıcı bulunmaktadır ve bu kullanıcıların yüksekliği  $h^U = 1.5$  metredir.
- RF zinciri sayısı 4'tür.
- Rice faktörü  $\kappa$  10'dur.
- Gürültü gücü  $N_o = -75$  dBm ve gönderici gücü RF zincir başına  $P_t = 24$  dBm'dir.
- Taşıyıcı frekansı  $F_c = 73$  GHz ve bant genişliği  $W = 1$  GHz'dir.
- RIS panel boyutu  $N_x = 100 \times N_y = 100$  boyutunda ve UPA yapıdadır.
- Zaman dilim sayısı  $T = 50$ 'dir.
- Yol kaybı parametreleri Çizelge 2.1'de yer alan  $F_c = 73$  GHz frekansı için nLoS için  $\alpha = 82.7, \beta = 2.69, \sigma = 7.7$  dB ve LoS için  $\alpha = 69.8, \beta = 2, \sigma = 5.8$  dB'dir.
- Kullanıcıların LoS, nLoS ve bloke ihtimallerinin hesaplanması için gerekli olan parametreler  $1/a_{out} = 30.0$  m,  $b_{out} = 5.2, 1/a_{LoS} = 67.1$  m'dir.
- Benzetim birbirinden bağımsız olarak 100 defa çalıştırılmış olup benzetim sonucu olarak ortalama değerler kullanılmıştır.

Aşağıdaki yöntemler kullanılarak ve BS'deki anten sayısı artırılarak ilgili yöntemlerin toplam veri hızları karşılaştırılmıştır.

- RR-DFT: DFT tabanlı kod kitapçığı analog ön kodlama ile iletim hüzmesi oluşturma ile Round Robin Çizelgeleme
- PF-DFT: DFT tabanlı kod kitapçığı analog ön kodlama ile Orantılı Adil Çizelgeleme

- PF-DFT (conflict-unware): DFT tabanlı kod kitapçığı analog ön kodlama ile iletim huzmesi oluşturma ile Orantılı Adil Programlama. Ancak burada kullanıcıların aynı ön kodlama vektörünü kullanmalarına izin verilmiştir.
- RR-ZF: ZF hibrit hüzmleme ile Round Robin Çizelgeleme
- PF-ZF: ZF hibrit hüzmleme ile Orantılı Adil Çizelgeleme
- PF-ZF (no RIS): RIS'in kullanılmadığı durumda ZF hibrit hüzmleme ile Orantılı Adil Çizelgeleme

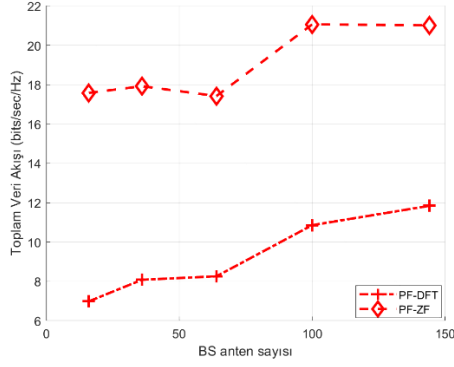
Şekil 6.1 BS antenlerinin sayısı ile toplam veri akışını arasındaki ilişkiyi gösterir. BS'in anten sayısındaki artış tüm yöntemler için toplam veri akışını artırmıştır.

Şekil 6.1a'de PF-DFT ve PF-ZF yöntemleri kıyaslanmıştır. Hibrit hüzmleme tekniğinin kullanımı sadece analog ön kodlama kullanımından daha fazla kazanç sağlamıştır. İş hacmi açısından PF-ZF, PF-DFT'den %150'den daha iyidir.

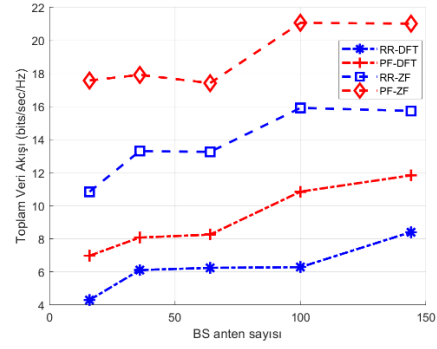
Şekil 6.1b'den RR-ZF'in RR-DFT'den %150'den daha iyi sonuç verdiği görülür. Ayrıca Şekil 6.1b'de RR ile PF tekniklerinin kıyaslanması mevcuttur. Bu şekil Orantılı Adil Çizelgeleme yönteminin kullanılmasının toplam veri akışı üzerinde önemli bir gelişme sağladığını ortaya koymaktadır. PF-DFT ile RR-DFT kıyaslandığında toplam veri akışı arasında Orantılı Adil Çizelgeleme kullanımının Round Robin yönteminden ortalama 2 bits/sec/Hz daha fazla veri akışına sahip olduğu görülür. Orantılı Adil Çizelgeleme verim açısından %30'dan fazla iyileştirme sağlamıştır.

Şekil 6.1c'de PF-DFT ve PF-DFT (conflict-unware) teknikleri kıyaslanmıştır. Çizelgeleme yönteminde aynı DFT ön kodlayıcıya sahip kullanıcılar birlikte çizelgenmesinin %25 performans düşüşüne sebep olduğu görülmektedir. Bu nedenle Bölüm 5.1'de çizelgeleme sırasında kullanıcılar arasında girişimin azaltılması ve performansın artırılması için aynı DFT ön kodlamayı kullanan kullanıcıların ilgili zaman dilimi için elenmesi önerilmiştir.

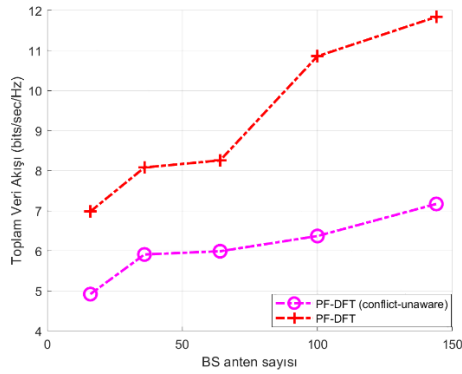
Şekil 6.1d'de ilgili koşullar altında RIS kullanımının performansa olan etkisi incelenmiştir. Ancak RIS kullanımı, verim açısından hafif bir performans artışı sağlar. Çünkü RIS kullanıldığında bile  $F_c=73$  GHz yüksek frekansında yol kaybı yüksektir. Performansın artırılması için RIS boyutunun artırılması gerekmektedir.



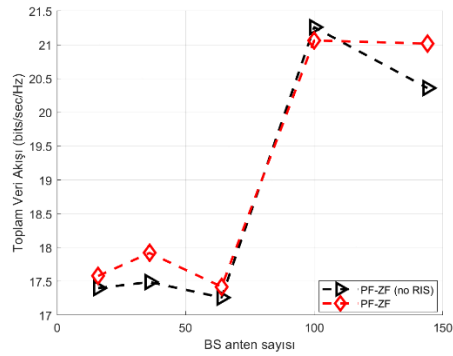
(a)PF-DFT ve PF-ZF



(b)PF-RR



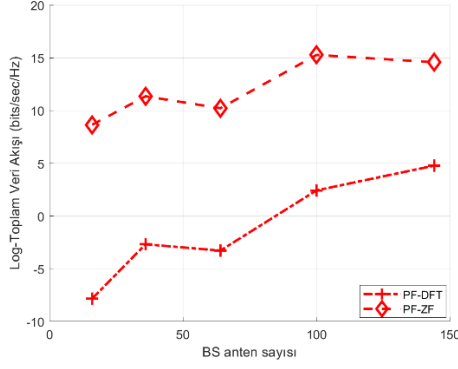
(c)PF-DFT ve PF-DFT (conflict-unaware)



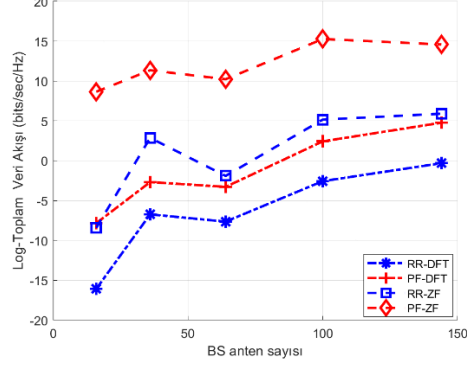
(d)PF-ZF ve PF-ZF (no RIS)

Şekil 6.1: BS'deki anten sayısı ile toplam veri akışı ilişkisi

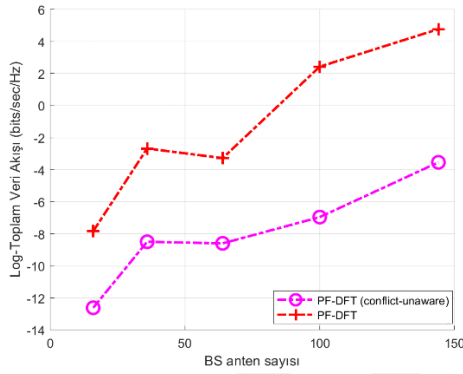
Aynı koşullar altında, kullanıcılar arasındaki orantısız olarak adil veri akışının dağılımının incelenebilmesi için Şekil 6.1'deki grafiklerin Şekil 6.2'de log-toplam veri akışı grafikleri oluşturulmuştur. Log-Toplam veri akışı kullanıcıların iletim hızlarının logaritmik toplamını hesaplar. Bu yöntem, çoklu antenli sistemlerde çoklu kullanıcının hızlarını dengeli bir şekilde dağıtmayı hedefler. Logaritmik işlem, kullanıcıların farklı hızlara sahip olmasını dengelemeye yardımcı olur. Log-Toplam veri akışı, kullanıcıların farklı hızları dikkate alarak sistem performansını değerlendirir. Log-Toplam veri akışı hesaplanırken, her kullanıcının iletim hızı belirlenir. Bu hızlar logaritmasına dönüştürülür, logaritmlar toplanır ve toplam değer orijinal hızlara dönüştürülür.



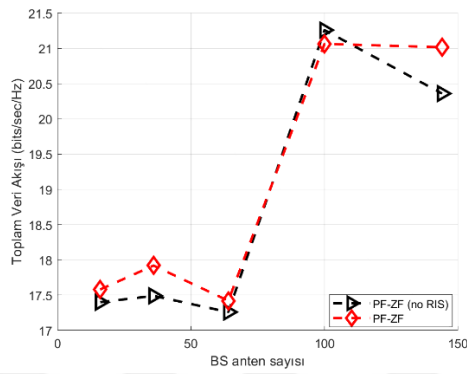
(a)PF-DFT ve PF-ZF



(b)PF-RR



(c)PF-DFT ve PF-DFT (conflict-unaware)



(d)PF-ZF ve PF-ZF (no RIS)

Şekil 6.2: BS'deki anten sayısı ile log-toplam veri akışı ilişkisi

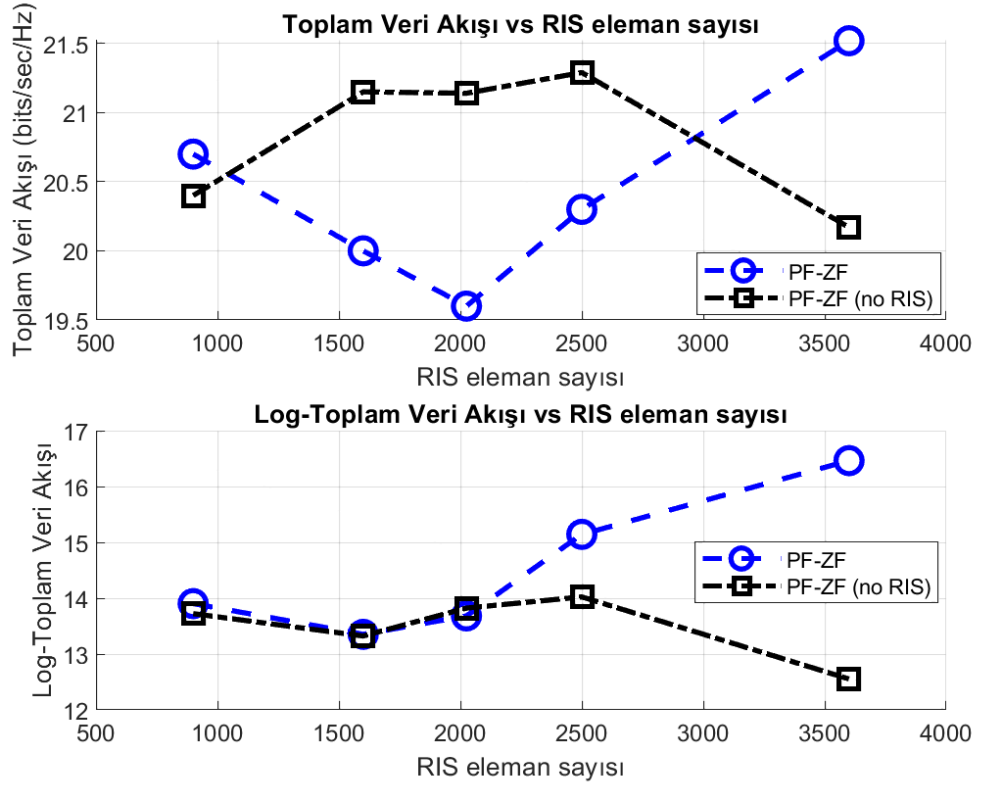
Sonuçlar, Şekil 6.1'deki toplam veri akışı sonuçlarına benzerdir. Ancak Şekil 6.2'den görüldüğü üzere RIS kullanmanın adaleti önemli ölçüde iyileştirmiştir. BS'deki anten sayısı arttıkça RIS kullanmanın performansı % 100'e yakın artırdığı gözlemlenmiştir.

RIS kullanım performansının daha iyi değerlendirilebilmesi için RIS eleman sayısındaki artışın toplam veri akışı ve log-toplam veri akışı üzerine etkileri incelenmiştir. PF-ZF ve PF-ZF'in RIS kullanılmadığı durumdaki performansları kıyaslanmıştır. RIS eleman sayısının artışı simülasyon süreçlerini uzattığı için Şekil6.3 için aşağıdaki koşullar altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Böylece hem zaman dilimi sayısı artırılmış hem de çalışma süresi kısaltılmıştır.

- Taşıyıcı frekansı  $F_c=28\text{GHz}$ 'dir.
- RIS'daki eleman sayısı  $30^2$  ile  $60^2$  arasında değişir.
- BS UPA panel boyutu  $N_y = 8 \times N_z = 8$ 'dir.



- Benzetim birbirinden bağımsız olarak 250 defa çalıştırılmış olup benzetim sonucu olarak ortalama değerler kullanılmıştır.



Şekil 6.3: RIS eleman sayısının performansa etkisi

Sonuçlar,  $F_c=28\text{GHz}$  taşıyıcı frekansında, RIS'nin faydalı olabilmesi için en az 2500 RIS ögesinin gerekli olduğunu açıkça göstermektedir. Toplam verim çok fazla değişmemektedir. Ancak RIS destekli iletiminin orantısal adillik performansı  $>2500$  için önemli ölçüde iyileşir. PF-ZF (no RIS) tekniğinde RIS kullanılsa bile RIS'ın eleman sayısındaki artış nedeniyle RIS'tan yansıyan ışınlar kullanıcıda daha fazla girişime sebep olmaktadır. Ayrıca rastgele süreçten kaynaklanan dalgalanmalar da mevcuttur.

Taşıyıcı frekansı iki katına çıktıkça, RIS elemanlarının sayısı kabaca dört katına çıkarılmalıdır. Yani, taşıyıcı frekansı 28'dan 73 GHz'e yükseltirse, eleman sayısı en az  $17000 \sim 130^2$  seviyesine çıkarılmalıdır. Çok sayıda RIS eleman ögesi gerektiği için RIS'in kullanımının performansa katkı sağlayabilmesi için çok basit ve etkili kanal tahmini ve faz kayması optimizasyon yöntemleri gerektirmektedir.

Bölüm 4.1 bahsedilen DFT tabanlı kod kitapçığı yöntemi ile faz kaydırma optimizasyonun çalışma süresi Bölüm 4.2'de açıklanan alternatif yöntemden çok daha

fazladır. ZF hibrit hümeleme tekniği PF izelgeleme kullanılarak, aşağıdaki parametreler altında çalışma süresi kıyaslaması izelge 6.1’de verilmiştir.

- Taşıyıcı frekansı  $F_c=28\text{GHz}$ 'dir.
- BS UPA panel boyutu  $N_y = 8 \times N_z = 8$ 'dir.
- Benzetim birbirinden bağımsız olarak 50 defa çalıştırılmış olup benzetim sonucu olarak ortalama değerler kullanılmıştır.

Çizelge 6.1 : Faz kayması optimizasyon tekniklerinin çalışma süreleri.

	RIS boyutu	alıŐma Suresi	Toplam Veri Akışı	Log-Toplam Veri Akışı
DFT tabanlı faz kaydırma optimizasyonu	10x10	1.2206 s	16.86	8.76
	15x15	15.789 s	17.50	11.84
Alternatif Optimizasyon	10x10	0.0046 s	16.42	8.78
	15x15	0.0098 s	18.49	13.07

Çizelge 6.1’den de grldđđ üzere çalışma süreleri arasında çok fazla fark bulunmaktadır. DFT tabanlı kod kitapçığı yöntemi ile faz kayma optimizasyonunda RIS sayısındaki artış çalışma süresini çok fazla arttırmaktadır. Toplam veri akışı ve log toplam veri akışı farkları değerlendirildiğinde RIS’ın eleman sayısındaki artış alternatif optimizasyon yönteminin performansını daha iyi hale getirmiŐtir. RIS eleman sayısı olarak 2500 elemandan fazla kullanılması n grldđđ için DFT tabanlı kod kitapçığı yöntemi ile faz kayma optimizasyonunun kullanılmasının optimal olmadığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle faz kaydırma optimazyonu için simülasyon sonuçlarında alternatif optimizasyondan faydalanılmıştır.

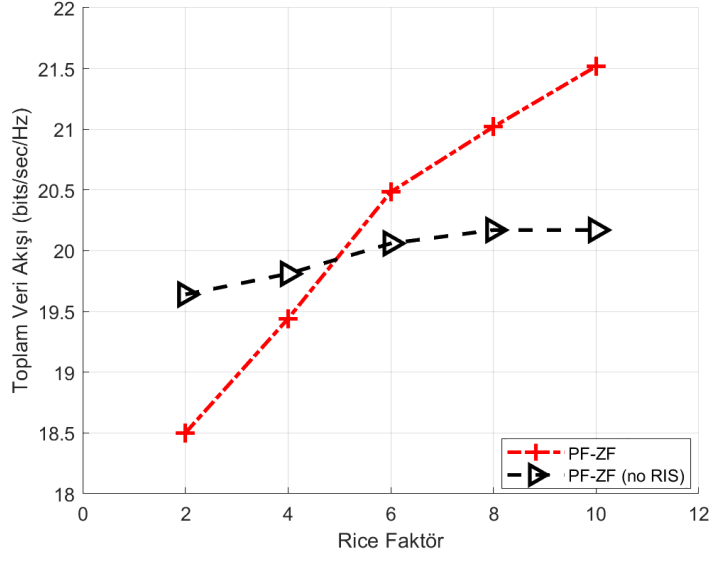
Bölüm 2.2’de aıklanıđđ üzere bu tez kapsamında kaskat ve direk kanalları tanımlarken Rice sönümlemeli kanal modeli kullanılmıştır. Rice sönümlemeli kanal modeli, kablosuz iletiŐimde ortaya çıkan çoklu yolların etkisini temsil eder. İletilen sinyal, direk bir yol boyunca ilerlerken çevredeki engeller nedeniyle yansıma, kırılma

ve sönümlenme gibi etkilere maruz kalır ve bu nedenlerle aynı sinyal farklı yollar üzerinden de alıcıya ulaşabilir. Rice sönümlenmeli kanalı bu çoklu yolların etkisinin ifade edildiği istatistiksel bir modeldir. Rice faktörü, Rice fading kanal modelinde önemli bir parametredir ve LoS ve NLoS kanalların oranını ifade eder. Rice faktörü ne kadar yüksekse, direk kanalın toplam kanal üzerindeki katkısı o kadar fazladır ve LOS durumları daha baskındır. Rice faktörü ne kadar düşükse, kaskat kanalın katkısı o kadar fazladır ve NLOS durumları daha baskındır.

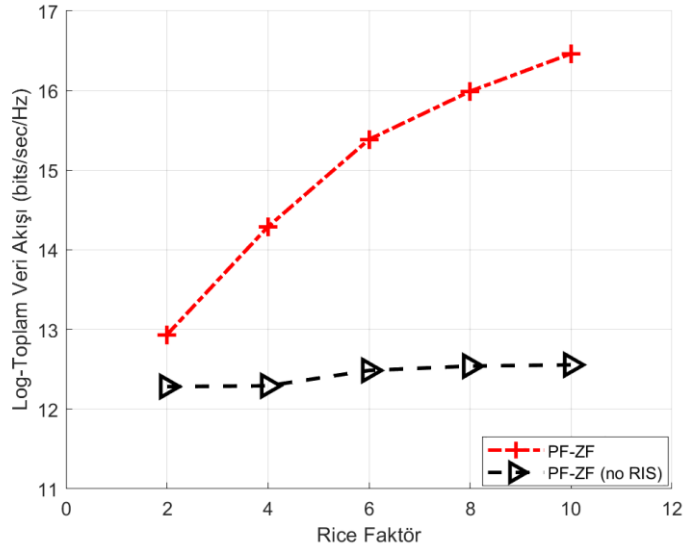
Rice faktörü  $\kappa$ 'nın RIS kullanımına olan etkisinin incelenmesi için PF-ZF ve PF-ZF(no RIS) yöntemlerinin değişen  $\kappa$  karşısında performansı Şekil 6.4'de görülmektedir. Toplam veri akışı Şekil 6.4a ile ve log-toplam veri akışı Şekil 6.4b ile oluşturulmuştur.

- Taşıyıcı frekansı  $F_c=28\text{GHz}$ 'dir.
- BS UPA panel boyutu  $N_y = 8 \times N_z = 8$ 'dir.
- RIS UPA panel boyutu  $N_y = 60 \times N_z = 60$ 'dir.
- Maksimum BS-kullanıcı mesafesi  $D_{max}=100$  metredir.
- RF zinciri sayısı 4'tür.
- Benzetim birbirinden bağımsız olarak 250 defa çalıştırılmış olup benzetim sonucu olarak ortalama değerler kullanılmıştır.

Rice faktörünün artışı hem PF-ZF hem de PF-ZF (no RIS) üzerinde toplam veri akışı ve log-toplam veri akışında artışa sebep olmuştur. Ancak RIS kullanımının rice faktörünün artışı ile RIS'in kullanılmadığı durumdan çok daha yüksek performansa sahip olduğu açıkça görülmektedir. RIS'in kullanılmadığı durumda LoS, nLoS ve bloke durumları olasılıksal olarak hesaplanır. mmDalga haberleşmesi kullanıldığı için kullanıcı ile BS arasındaki kanalın LoS olma ihtimali düşüktür. Bu nedenle rice faktöründeki artışın performans üzerindeki etkisi kısıtlıdır. Ancak İHA-RIS kullanımı LoS kanal sağlar. Böylece de rice faktörü arttıkça LoS yolun kanal üzerindeki etkisi arttığı için RIS kullanmanın performansı daha yüksektir. Rice faktöründeki artışın performans üzerindeki katkısı çok daha yüksektir.



(a) Toplam veri akışı



(b) Log-toplam veri akışı

Şekil 6.4: Rice faktörünün veri akışı ile ilişkisi

## 7. SONUÇ

Bu tez kapsamında mmDalga haberleşmesinde aşağı yönlü iletişim için İHA-RIS destekli bir sistemin hüzmeleme ve çizelgeleme yöntemleri geliştirilmiştir. İncelenen sistemde bir adet BS ve İHA-RIS ve çok sayıda kullanıcı bulunmaktadır. İHA kullanımını mmDalga haberleşmesinden kaynaklanan dezavantajları gidermek için bir çok avantaj sağlamaktadır. mmDalga haberleşmesi kanalda alıcı ve verici arasında LoS koşulunun sağlandığı durumlarda yüksek performans göstermektedir. İHA'nın sahip olduğu yüksek irtifa sayesinde mmDalgada ihtiyaç duyulan LoS koşulu elde edilebilmektedir. Aynı zamanda İHA'ların hızlı konuşlandırılabilmesi sayesinde acil durum ve doğal afetler gibi koşullar altında haberleşmenin sağlanabilmesi için kullanımları öngörülmüştür. RIS'lar ise üzerine gelen sinyali istenilen doğrultuya yönlendirecek şekilde sinyalin faz açısını düzenlemek için kullanılmaktadır. İHA'ya montelenmiş RIS sayesinde mmDalga haberleşmesinde yüksek performans elde edilmiştir.

BS'deki düşük karmaşıklıkla hibrit hüzmeleme işlemi için analog hüzmeleme tekniği olan DFT tabanlı kod kitapçığı tekniği ve dijital hüzmeleme tekniği olan ZF hüzmeleme birlikte kullanılmıştır. BS'deki ön kodlama işleminde hibrit hüzmeleme ve DFT tabanlı kod kitapçığı tekniğinin kullanıldığı analog hüzmeleme performansları kıyaslanmıştır. Kullanıcıların aynı ön kodlama vektörlerini kullandığı ve kullanmadığı durumlar karşılaştırılmıştır. Kullanıcıların aynı ön kodlama vektörlerini kullanmalarına izin verilmediği koşulda girişimin azaltıldığı bu nedenle performansın iyileştirildiği tespit edilmiştir.

RIS'in faz kayma optimizasyonu için DFT tabanlı kod kitapçığı tekniği ile alternatif optimizasyon teknikleri kıyaslanmıştır. Alternatif optimizasyonun hem performansının daha iyi hem de çalışma süresinin daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca RIS elemanının artışının performans üzerine etkileri de incelenmiştir. mmDalga haberleşmesinde RIS kullanımının avantaj sağlayabilmesi için RIS'in çok yüksek sayıda eleman içermesi gerekliliği ortaya konulmuştur.

Hem adilliği hem de iş hacmi performansını garanti edildiği, kötü kanal koşullarına sahip kullanıcıların da çizelgelendiği, kullanıcı çizelgeleme ve hibrit hüzmelemeyi

ortaklaşa optimize eden için PF-ZF adlı yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen bu algoritma, düşük hesaplama karmaşıklığına ve küçük geri besleme yüküne sahiptir. Kullanıcılar arasında veri hızlarının yüksekliğine öncelik verilerek kötü kanal koşullarına sahip kullanıcılarında servis alabileceği bir senaryo geliştirilmiştir. Bu yöntem ile kullanıcıların sıra ile devreye alındıkları Round Robin yönteminin performansı kıyaslanmıştır. PF-ZF diğer yöntemler ile kıyaslanarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

İlerleyen çalışmalar kapsamında kullanıcı sayısı artırılabilir. Kullanıcıların konum bilgileri zamanla değişken hale getirilerek daha gerçekçi bir senaryo ele alınabilir. Kullanıcılar gruplara ayrılarak grupların farklı zamanlarda iletişim kurmalarının veri akışı üzerine etkileri incelenebilir. Çok sayıda İHA-RIS'ın kullanıldığı bir sistem modeli kurgulanabilir. RIS'in eleman sayısının artırılabilmesi için daha basit ve kısa süren hüzmleme ve çizelgeleme teknikleri geliştirilebilir. İHA-RIS'ın tek bir konumda bulunması zor bir senaryo olduğu için hareketli İHA-RIS için farklı kanal modelleri çalışılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Benjebbour, A., De Silva, P., Haustein, T., Molisch, A. F., Smith, P. J., Shafi, M., Tufvesson, F., Wunder, G., Zhu, P. (2017). "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(6):1201–1221.
- [2] Björnson, E., Dai, L., Ghosh, A., Karagiannidis, G. K., Huang, Y., I, C.-L., Li, Y., Matthaiou, M., Mumtaz, S., Xiao, M., Yang, K. (2017). "Millimeter wave communications for future mobile networks." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(9):1909–1935.
- [3] Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., Zhang, J. C. (2014). "What will 5G be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6):1065–1082.
- [4] Dai, L., Mumtaz, S., Rodriguez, J. (2017). "Chapter 1 - Introduction to mmWave massive MIMO." In Shahid Mumtaz, Jonathan Rodriguez, and Linglong Dai (Eds.), *mmWave Massive MIMO*, pages 1–18. Academic Press.
- [5] Aryanfar, F., Cheun, K., Cho, J., Kim, Y., Lee, B., Lee, J., Park, J., Roh, W., Seol, J.-Y. (2014). "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results." *IEEE Communications Magazine*, 52(2):106–113.
- [6] Boccardi, F., Heath, R. W., Lozano, A., Marzetta, T. L., Popovski, P. (2014). "Five disruptive technology directions for 5G." *IEEE Communications Magazine*, 52(2):74–80.
- [7] Uwaechia, A. N., Mahyuddin, N. M. (2020). "A comprehensive survey on millimeter wave communications for fifth-generation wireless networks: Feasibility and challenges." *IEEE Access*, 8:62367–62414.
- [8] Azar, Y., Gutierrez, F., Mayzus, R., Rappaport, T. S., Samimi, M., Schulz, J. K., Sun, S., Wang, K., Wong, G. N., Zhao, H. (2013). "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!" *IEEE Access*, 1:335–349.
- [9] Hou, S., Wu, Q., Wu, X., Xu, H., Zhang, L., Zhang, R., Zhao, H., Zhao, Z. (2019). "A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks." *IEEE Access*, 7:117460–117504.
- [10] Erkip, E., Rangan, S., Rappaport, T. S. (2014). "Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges." *Proceedings of the IEEE*, 102(3):366–385.
- [11] Yürekli, F. (2022). "Milimetre dalgada drone baz istasyonlarının konuşlanması ve optimal ön kodlanması." Master's thesis, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara.
- [12] Friis, H. T. (1946). "A note on a simple transmission formula." *Proceedings of the IRE*, 34(5):254–256.
- [13] Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su, L., Vasilakos, A. V. (2015). "A survey of millimeter wave (mmWave) communications for 5G: Opportunities and challenges."
- [14] Marcus, M., Pattan, B. (2005). "Millimeter wave propagation: Spectrum management implications." *IEEE Microwave Magazine*, 6(2):54–62.

- [15] Akdeniz, M. R., Liu, Y., Samimi, M. K., Sun, S., Rangan, S., Rappaport, T. S., Erkip, E. (2014). "Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6):1164–1179.
- [16] Estrada, M. R., Ndoma, I. (2017). "The role of unmanned aerial vehicles (UAV's) in the case of natural disasters response."
- [17] Singhal, G., Bansod, B., Mathew, L. (2018). "Unmanned aerial vehicle classification, applications and challenges: A review."
- [18] Perabathini, B., Tummuri, K., Agrawal, A., Varma, V. S. (2019). "Efficient 3D placement of UAVs with QoS assurance in ad hoc wireless networks." In 2019 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), pages 1–6.
- [19] Wang, H., Wang, J., Ding, G., Wang, L., Tsiftsis, T. A., Sharma, P. K. (2018). "Resource allocation for energy harvesting-powered D2D communication underlaying UAV-assisted networks." *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2(1):14–24.
- [20] Wu, Q., Zhang, R. (2020). "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network." *IEEE Communications Magazine*, 58(1):106–112.
- [21] Liaskos, C., Nie, S., Tsioliariidou, A., Pitsillides, A., Ioannidis, S., Akyildiz, I. (2018). "A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces." *IEEE Communications Magazine*, 56(9):162–169.
- [22] Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M.-S., Zhang, R. (2019). "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces." *IEEE Access*, 7:116753–116773.
- [23] Basharat, S., Hassan, S. A., Mahmood, A., Ding, Z., Gidlund, M. (2022). "Reconfigurable intelligent surface-assisted backscatter communication: A new frontier for enabling 6G IoT networks." *IEEE Wireless Communications*, 29(6):96–103.
- [24] Sun, S., Rappaport, T. S., Heath, R. W., Nix, A., Rangan, S. (2014). "MIMO for millimeter-wave wireless communications: beamforming, spatial multiplexing, or both?" *IEEE Communications Magazine*, 52(12):110–121.
- [25] Cai, M. (2018). "Modeling and Mitigating Beam Squint in Millimeter Wave Wireless Communication." PhD thesis.
- [26] Kutty, S., Sen, D. (2016). "Beamforming for millimeter wave communications: An inclusive survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2):949–973.
- [27] Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H., Debbah, M. (2019). "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3):2334–2360.
- [28] Zeng, Y., Zhang, R., Lim, T. J. (2016). "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges." *IEEE Communications Magazine*, 54(5):36–42.
- [29] Zeng, Y., Wu, Q., Zhang, R. (2019). "Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond." *Proceedings of the IEEE*, 107(12):2327–2375.
- [30] Guo, X., Chen, Y., Wang, Y. (2021). "Learning-based robust and secure transmission for reconfigurable intelligent surface aided millimeter wave UAV communications." *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(8):1795–1799.
- [31] Xiong, B., Zhang, Z., Jiang, H., Zhang, J., Wu, L., Dang, J. (2022). "A 3D non-stationary MIMO channel model for reconfigurable intelligent surface auxiliary



- UAV-to-ground mmWave communications." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(7):5658–5672.
- [32] **Jiang, L., Jafarkhani, H.** (2021). "Reconfigurable intelligent surface assisted mmWave UAV wireless cellular networks." In *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, pages 1–6.
- [33] **Li, Y., Yin, C., Do-Duy, T., Masaracchia, A., Duong, T. Q.** (2021). "Aerial reconfigurable intelligent surface-enabled URLLC UAV systems." *IEEE Access*, 9:140248–140257.
- [34] **Guo, K., Wang, C., Li, Z., Ng, D. W. K., Wong, K.-K.** (2021). "Multiple UAV-borne IRS-aided millimeter wave multicast communications: A joint optimization framework." *IEEE Communications Letters*, 25(11):3674–3678.
- [35] **Yu, Y., Liu, X., Leung, V. C. M.** (2022). "Fair downlink communications for RIS-UAV enabled mobile vehicles." *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(5):1042–1046.
- [36] **Perovic, N. S., Tran, L.-N., Di Renzo, M., Flanagan, M. F.** (2021). "Achievable rate optimization for MIMO systems with reconfigurable intelligent surfaces." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(6):3865–3882.
- [37] **Wu, Q., Zhang, R.** (2019). "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(11):5394–5409.
- [38] **Abeywickrama, S., Zhang, R., Yuen, C.** (2020). "Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization." In *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6.
- [39] **Praia, J., Pavia, J., Souto, N., Ribeiro, M.** (2021). "Phase shift optimization algorithm for achievable rate maximization in reconfigurable intelligent surface-assisted THz communications." *Electronics*, 11:18.
- [40] **Xiao, Z., Zhu, L., Liu, Y., Yi, P., Zhang, R., Xia, X.-G., Schober, R.** (2022). "A survey on millimeter-wave beamforming enabled UAV communications and networking." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(1):557–610.
- [41] **Ellingson, S. W.** (2021). "Path loss in reconfigurable intelligent surface-enabled channels." In *2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 829–835.
- [42] **Najafi, M., Jamali, V., Schober, R., Poor, H. V.** (2021). "Physics-based modeling and scalable optimization of large intelligent reflecting surfaces." *IEEE Transactions on Communications*, 69(4):2673–2691.
- [43] **Gao, X., Wu, X., Zhang, Z., Liu, D.** (2020). "Low complexity joint user scheduling and hybrid beamforming for mmWave massive MIMO systems." In *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 1–6.
- Url-1** [https://www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2022/12/The-State-of-Mobile-Internet-Connectivity-Report-2022.pdf?utm\\_source=website&utm\\_medium=download-button&utm\\_campaign=somic22](https://www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2022/12/The-State-of-Mobile-Internet-Connectivity-Report-2022.pdf?utm_source=website&utm_medium=download-button&utm_campaign=somic22)  
alındıgıtarih:14.05.2023.

- Url-2** <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>  
alındığı tarih: 11.06.2023.
- Url-3** <https://gsacom.com/paper/5g-market-snapshot-february-2023/>  
alındığı tarih: 11.06.2023.
- Url-4** <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-16-89A1.pdf>  
alındığı tarih: 11.06.2023.
- Url-5** <https://www.btk.gov.tr/uploads/announcements/5g-ve-otesi-beyaz-kitap/beyaz-kitap-son.pdf> alındığı tarih: 11.06.2023.
- Url-6** [https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/SHT-IHA\\_WEB.pdf](https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/SHT-IHA_WEB.pdf) alındığı tarih: 14.06.2023.
- Url-7** <https://partner.turkcell.com.tr/NewsDetail.aspx?id=c02b0363-a92d-4f99-bb76-62045499b8c4&month=4&year=2018> alındığı tarih: 09.04.2023.

