

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİLİMETRE DALGADA DRONE BAZ İSTASYONLARININ
KONUŞLANMASI VE OPTİMAL ÖNKODLAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih YÜREKLİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç . Dr. Tolga GİRİCİ

NİSAN 2022

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Fatih YÜREKLİ

İmza

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİLİMETRE DALGADA DRONE BAZ İSTASYONLARININ KONUŞLANMASI VE OPTİMAL ÖNKODLAMASI

Fatih YÜREKLİ

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

Danışman: Doç.Dr. Tolga GİRİCİ

Tarih: Nisan 2022

Son yıllarda kullanım alanları gittikçe artan drone'ların haberleşme alanında özellikle anlık veri aktarımı ihtiyacı duyulan doğal afetler, kamu güvenliği ve çeşitli spor, konser vb. aktivitelerde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu çerçevede sabit noktalarda konuşlandırılmış drone baz istasyonlarından sabit noktalarda konuşlandırılmış kullanıcılara milimetre dalga bandında çok kullanıcılı MIMO yöntemiyle veri aktarımı çalışması yapılmıştır. Huzme şekillendirme olarak SDP (Semidefinite programlama) optimizasyon yöntemi ve Kod Kitapçığı yöntemleri; drone konumlama yöntemi olarak ise K-Means ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemleri incelenmiştir. Benzetimin ilk bölümünde dronelerin aynı yükseklikte olduğu durumda huzme şekillendirme ve K-Means algoritmalarının kıyaslaması yapılmış ve drone baz istasyonlarının yüksekliklerinin veri akış hızına etkileri incelenmiştir. Benzetimin ikinci bölümünde ise drone baz istasyonlarının konumlanmasının yanında yüksekliklerinin de hizmet sağladığı kullanıcılara göre belirlenmesi sağlanmış, parçacık sürü optimizasyonu ile karşılaştırması incelenmiştir. Bu bölümde ayrıca drone baz istasyonu sayısının ve anten sayısının veri akış hızına ve drone baz istasyonunun yüksekliğine etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Drone baz istasyonu, Huzme şekillendirme, Millimetre dalga, MIMO, Önkodlama

ABSTRACT

Master of Science

OPTIMAL PRECODING AND DEPLOYMENT OF MILLIMETER-WAVE DRONE BASE STATION

Fatih YÜREKLİ

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

Supervisor: Assoc.Prof.Tolga GİRİCİ

Date: April 2022

Drones are cost effective devices and can be easily deployed at various locations even places that aren't covered by the terrestrial networks. It is evaluated that wireless telecommunication sector can be one of the promising areas for the use of drones. Flexible deployment option give rise to better line-of-sight channel conditions and this makes drone base stations a promising technology for the telecommunication sector. Especially recent developments in millimeter-wave Massive MIMO transmission and beamforming techniques help drone base station become feasible, provide broadband data rates and enable simultaneous transmission to multiple ground users. In this work we consider the problem of fair deployment (i.e. positioning) of drone base stations and analog MIMO beamforming that maximizes SINR and compare K-Means clustering and Particle Swarm Optimization methods with respect to proportional fair data rates. Simulation results reveal that careful K-Means clustering of ground users, together with DFT-based beamforming provides a promising performance.

Keywords: UAV, Drone base station, Deployment, mmWave, Precoding

TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli sayın hocam Tolga GİRİCİ'ye, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 İHA'ların Önemi, Kullanım Alanları, Tipleri ve Avantajları.....	1
1.2 Literatürde İHA Baz İstasyonu Yerleşimi ile İlgili Çalışmalar (MIMO Olmayanalar).....	5
1.3 Milimetre Dalga	8
1.3.1 Tanımı	8
1.3.2 Milimetre dalganın haberleşme açısından faydaları	10
1.3.2.1 Geniş bant imkanı	10
1.3.2.2 Kısa dalga boyu	11
1.3.2.3 Sinyalin güvenliği	12
1.3.3 Milimetre dalganın dezavantajları	12
1.3.3.1 Boş Uzay (Free-Space) Yol Kaybı.....	12
1.3.3.2 Atmosfer yapısı nedeniyle meydana gelen kayıplar	13
1.3.3.3 Yağış nedeniyle meydana gelen zayıflama.....	15
1.3.3.4 Penetrasyon kaybı	16
1.3.3.5 Yüksek enerji tüketimi	18
1.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output) ve Huzme Şekillendirme	18
1.4.1 Akıllı antenler	18
1.4.1.1 Doğrusal dizi (Linear array) antenleri.....	20
1.4.1.2 Düzlemsel dizi (Planar array) antenleri.....	22
1.4.2 Analog huzme şekillendirme (Beamforming)	23
1.4.3 Dijital huzme şekillendirme / Önkodlama	24
1.4.4 Hibrit huzme şekillendirme (Hybrid Beamforming)	25
1.4.5 Yoğun MIMO (Multiple Input Multiple Output)	26
1.5 Literatür Araştırması.....	29
2. GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMANIN LİTERATÜRE KATKISI	35
3. SİSTEM VE KANAL MODELİ	37
4. K-MEANS ALGORİTMASI VE İHA'LARIN KONUMLANMASI	43
5. İHA BAZ İSTASYONUNUN YÜKSEKLİĞİNİN BELİRLENMESİ SÜRECİ	49
6. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (PSO)	51
7. HUZME ŞEKİLLENDİRME	55
8. BENZETİM SONUÇLARI	59
9. SONUÇ	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dron Yapısı.	4
Şekil 1.2 : Bir Cent ile 2 QTM052 Milimetre Anten Modülünün Karşılaştırılması.	11
Şekil 1.3 : Free-Space Yol Kaybı	13
Şekil 1.4 : Atmosferik Kayıplar	14
Şekil 1.5 : Yağış Nedeniyle Meydana Gelen Zayıflama.	15
Şekil 1.6 : 28 Ghz. Penetrasyon Test Kurulumu.	17
Şekil 1.7 : İnsan Benzeşimi.	19
Şekil 1.8 : Dalganın Çoklu Antene Ulaşımı.	20
Şekil 1.9 : Doğrusal Anten Dizisi.	21
Şekil 1.10 : Farklı Konfigürasyonlarda Dizi Faktörü.....	22
Şekil 1.11: Düzlemsel Anten Dizisi.	22
Şekil 1.12 : 64 Elemanlı 28GHz Anten.	23
Şekil 1.13 : Analog Huzme Şekillendirme Modeliyle MM Dalga Modeli	24
Şekil 1.14 : Dijital Huzme Şekillendirme-1.	25
Şekil 1.15 : Dijital Huzme Şekillendirme-2.	25
Şekil 1.16 : Hibrit Huzme Şekillendirme.	26
Şekil 1.17 : Çok Kullanıcılı MIMO Sistemi.	27
Şekil 1.18 : Uplink Senaryosu-1.	27
Şekil 1.19 : Uplink Senaryosu-2.	28
Şekil 1.20 : Downlink Senaryosu.	28
Şekil 3.1 : Sistem Modeli	37
Şekil 3.2 : Yatay Mesafe	38
Şekil 3.3 : Haberleşme Senaryosu ve Yayılım Karakteristiği	39
Şekil 4.1 : Gruplandırma Yapılacak Olan Küme	46
Şekil 4.2 : BS = 4 ve Kmax = 6 için K-means Gruplaması	46
Şekil 4.3 : BS = 6 ve Kmax = 4 için K-means Gruplaması	47
Şekil 8.1 : Enterferans Ağırlık Parametresinin Etkisi-1	61
Şekil 8.2 : Anten Sayısı-Veri Akış İlişkisi	62
Şekil 8.3 : Enterferans Ağırlık Parametresinin Etkisi-2	65
Şekil 8.4 : Anten Sayısı-Log-Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 4, RFZ : 6)	65
Şekil 8.5 : Anten Sayısı-Log-Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 6, RFZ : 4)	66
Şekil 8.6 : Anten Sayısı-Log-Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 8, RFZ : 3)	66
Şekil 8.7 : Anten Sayısı- Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 4, RFZ : 6)	67
Şekil 8.8 : Anten Sayısı- Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 6, RFZ : 4)	67
Şekil 8.9 : Anten Sayısı- Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 8, RFZ : 3)	68
Şekil 8.10 : Anten Sayısı- İHA Yüksekliği İlişkisi (İBİ : 4, RFZ : 6)	68
Şekil 8.11 : Anten Sayısı- İHA Yüksekliği İlişkisi (İBİ : 6, RFZ : 4)	69
Şekil 8.12 : Anten Sayısı- İHA Yüksekliği İlişkisi (İBİ : 8, RFZ : 3)	69

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Ölçüm Kabiliyeti Olan Firmalar	9
Çizelge 1.2 : Yağış Nedeniyle Meydana Gelen Zayıflamaya Yönelik Ölçümler	16
Çizelge 1.3 : Penetrasyon Kaybı	16
Çizelge 1.4 : 28 GHz Penetrasyon Kaybı.....	17
Çizelge 4.1 : K-Means-1 Algoritması	45
Çizelge 4.2 : K-Means-2 Algoritması	45
Çizelge 6.1 : PSO Algoritması	53
Çizelge 8.1: Birinci Benzetim Sonuçları.....	60
Çizelge 8.2 : İkinci Benzetim Sonuçları.....	64



KISALTMALAR

ABC	: Artificial Bee Colony
AoD	: Angle of Departures
dB	: Desibel
DFT	: Discrete Fourier Transform
FCC	: Federal Communications Commission
GHz	: Gigahertz
GNSS	: Global Navigation Satellite System
İHA	: İnsansız Hava Aracı
İBİ	: İHA Baz İstasyonu
km	: Kilometre
LoS	: Line of Side
LTE	: Long-Term Evolution
MHz	:Megahertz
MIMO	: Multiple Input Multiple Output
NLoS	: Non-Line of Side
NR	: New Radio
OMP	: Orthogonal Matchning Pursuit
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
RF	: Radio-Frequency
RFZ	: RF Zinciri
RMS-DS	: Root Mean Square Delay Spread
RSS	: Received Signal Strength
SDP	: Semidefinite Programming
SNR	: Signal to Noise Ratio
ULA	: Uniform Linear Array
UPA	:Uniform Planar Array
WLAN	: Wireless Local Area Network
ZF	: Zero Forcing

1. GİRİŞ

1.1 İHA'ların Önemi, Kullanım Alanları, Tipleri ve Avantajları

İnsansız Hava Araçları (İHA), Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün "İnsansız Hava Aracı Sistemlerinin Ayrılmış Hava Sahalarındaki Operasyonlarının Usul Ve Esasları" talimatında spor veya eğlence amacıyla kullanılan model uçaklar hariç, içinde insan olmadan motor gücü ile uçuş yapabilen ve bir kontrol bağlantısı ile İHA pilotu tarafından kontrol edilen veya otonom operasyonu İHA pilotu tarafından planlanarak takip edilen hava aracı olarak tanımlanırken, yine Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün "İnsansız Hava Aracı Sistemleri" talimatında İnsansız Hava Aracı Sisteminin(İHAS) bir bileşeni olarak işletilen, aerodinamik kuvvetler aracılığıyla sürekli uçuş yapma yeteneğinde olan, üzerinde pilot bulunmaksızın uzaktan İHA pilotu tarafından kontrol edilerek veya otonom operasyonu İHA pilotu tarafından planlanarak uçurulan ya da havada kalabilen hava aracı olarak tanımlanmaktadır.

Genellikle İHA ile birlikte drone ifadesi de bu türdeki sistemler için kullanılmaktadır. Bu dokümanda her iki ifade de değişimli olarak kullanılacak olup her ikisi de aynı sistemi tanımlayacaktır.

Her iki tanımdan, bir sistemin İHA veya drone olarak tanımlanabilmesi için öncelikle bu sistemin uçuş veya havada kalabilme yeteneği olması gerektiği ve bu sistemin pilotunun üzerinde olmaması, pilotun veya kullanıcının sistemi uzaktan kontrol etmesi veya sistemin belirlenen prosedür çerçevesinde kendi kendine uçabilmesi olarak anlaşılmaktadır.

İHA sistemlerin gelişiminin başlaması Birinci Dünya Savaşına dayanmakta ise de İHA'ların gerçek gelişimi 1980'li yıllardan itibaren başlamaktadır. 1980 ve 1990 yılları arasında ileri teknoloji bilgisayarların kullanımı, yüksek çözünürlüklü dijital kameraların gelişimi, ileri düzey elektronik kontrol sistemleri ve geniş kapsama alanına sahip telsiz kontrol sistemleri İHA'ların gelişimine katkı sağlarken, 2000 yılından günümüze kadar ise uzaktan komuta sistemlerindeki gelişmeler ve GNSS (Global Navigation Satellite Systems) İHA'ların gelişimine katkı sağlamıştır.[1]

İHA'lar aerodinamik yapılarına göre ve ağırlıklarına göre sınıflandırılabilirler [2]. Aerodinamik yapılarına göre;

- Sabit Kanat
- Döner Kanat
- Fırçasız Motor (Ducted Fan)
- Çoklu Rotor

Çoklu Rotor sistemleri de kendi içerisinde;

- Tricopter
- Quadcopter
- Hexacopter
- Octacopter, olacak şekilde sınıflandırılmaktadır.

İHA'lar Sivil Havacılık Genel Müdürlüğünün “İnsansız Hava Araçları” talimatında da kalkış ağırlıkları referans alınarak şu 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.

Tez kapsamında yapılan çalışmanın uygulanabileceği İHA sisteminin kalkış ağırlığına göre İHA1 sınıfında olması, aerodinamik yapısına göre quadcopter veya hexacopter türünde çoklu rotor sisteminin olması öngörülmektedir.

Bu tarz sistemlerin en önemli özelliği ise çok kısa sürede harekete hazır olabilmesi ve karadaki sınırlayıcı koşullara bağlı kalmaksızın süratli bir şekilde istenilen yerde konuşlanabilmesidir. Çoklu rotor sistemlerinin bu avantajı askeri ve sivil birçok alanda kullanımın hızlı bir şekilde artmasına vesile olmuştur. Genel olarak İHA sistemleri askeri alanda özellikle keşif ve gözetleme, haberleşme ve saldırı silahı olarak kullanım alanı bulurken, sivil alanda ise özellikle altyapı, tarım, ulaşım, güvenlik, medya, sigorta, haberleşme ve madencilikte kullanılmaktadır [2].

Kablosuz haberleşmenin ilerlemesi, duraksama (hover) pozisyonunda kalabilme ve kolayca konuşlanabilme özellikleri, yüksek manevra kabiliyeti, düşük kullanım ve bakım maliyetleri nedeniyle yukarıda İHA1 ve İHA2 olarak sınıflandırılan çoklu rotor sistemlerin yani güncel tabiri ile drone'ların özellikle sivil alanda kullanımının yaygınlaştığı gözlemlenmektedir. Bu çerçevede 2020 yılı için beklenen 30 milyar

dolarlık küresel pazarın 2025 yılında yıllık %12.7'lik bir artış ile 54.6 milyar dolar olması beklenmektedir [3].

İHA'ların akıllı şehirlere uyarlanmasına yönelik farklı konularda çalışmalar da devam etmektedir. Bu kapsamda [4]'de yazarlar İHA'ların akıllı şehirlerde uygulamalarını, buna bağlı olarak ortaya çıkan fırsat ve zorlukları incelemişlerdir. İHA'ların çevresel tehlikelerin izlenmesi, trafik yönetimi ve hava kirliliğinin izlenmesi gibi birçok alanda uygulamaları olduğu ve bunların hepsinin akıllı şehirlerin gelişimine büyük katkılar sağladığı, ancak bununla beraber İHA uygulamalarının beraberinde güvenlik, mahremiyet ve etik hususlar ile ilgili zorluklara sebebiyet verdiği değerlendirilmiştir.

[5]'de yazarlar, akıllı şehirlerin kaynak kullanımını optimize edebileceğini, sağlık, ulaşım, enerji ve su hizmetlerine yönelik uygulamaların bilgi ve haberleşme teknolojilerini kullanarak geliştirilebileceğini, bu çerçevede İHA'ların da akıllı şehirlerde birçok imkân sağlayacağını, örnek olarak İHA'ların çevrenin izlenmesinde, trafik yönetiminde, hava kirliliğinin izlenmesinde, kamu güvenliğinde ve kargo taşımacılığında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Bu çerçevede Amazon Firması kendi internet sitelerinde çoklu rotorlu sistemler ile kargo sevkiyatını nasıl yaptığına ilişkin görüntüleri paylaşmaktadır [6].

Güvenilir ve maliyeti etkin çözümler sunması hasebiyle birçok yeteneğe sahip yeni drone sistemlerinin haberleşme alanında kullanımı son dönemlerde ilgi çekmektedir. Dronların haberleşme sistemlerinde özellikle baz istasyonu olarak kullanımına yönelik olarak çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Beklentiler doğrultusunda Drone baz istasyonları ile ilgili birçok program endüstri kuruluşların tarafından başlatılmıştır. AT&T'nin LTE kapsama alanı sağlayan COW(Cell on Wing) programı, Verizon Airborne'nun ALO girişim, Nokia Bell Labs'ın F-Cell(flying cell) programı ve Facebook'un solar-powered drone projesi bunlardan bir kaç örnektir[7].

Bunlara ilave olarak [8] numaralı makalede herhangi bir doğal afet sonrasında haberleşme altyapısının belli bir bölümünün hasar görmesi durumunda İHA'ların baz istasyonu olarak kullanımı incelenmiştir.

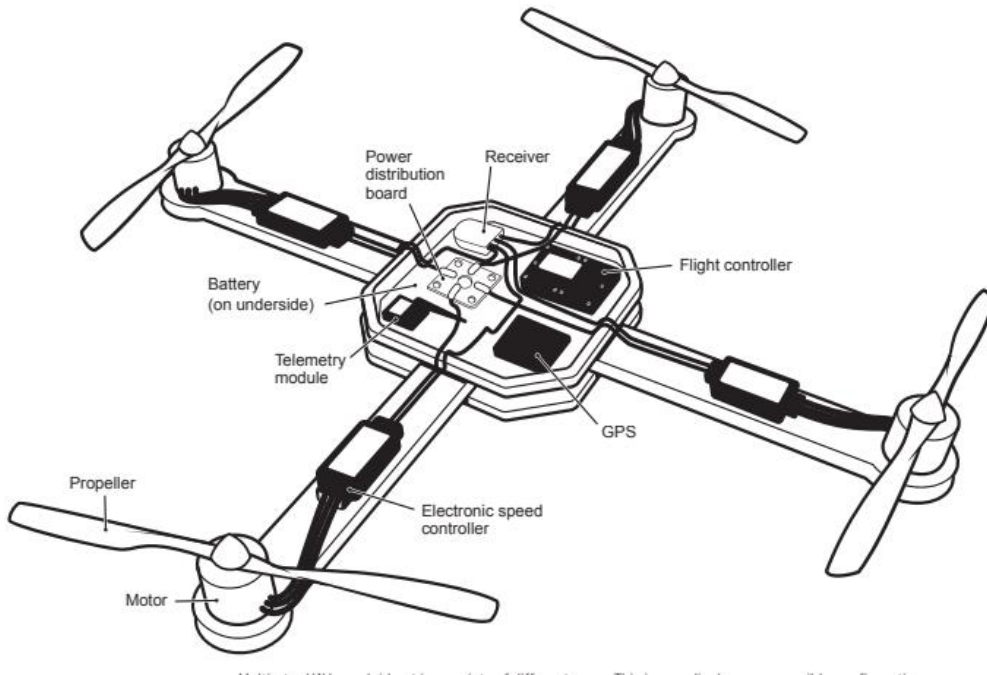
Ülkemizde ise Turkcell firması güçlü bir baz istasyonu olarak istenen yerden havalanarak, ses ve veri hizmeti sağlayacak Dronecell'i tasarlandı. Dronecell'in tasarımında üç hususun hedef alındığı görülmektedir [9].

- Deprem, sel, heyelan gibi doğal afetlerde ve acil durumlarda arama kurtarma ekiplerine iletişim desteği sağlamak.
- Konser, maç, miting gibi insanların geçici ama yoğun olarak toplandığı sosyal alanlarda daha hızlı iletişim sağlamak.
- Özellikle tarım alanları, akıllı su ve elektrik saatleri, barajlar, inşaat şantiyeleri ve madenler gibi alanlarda bulunan IoT cihazlarının akıllı sensörlerinden toplanan bilgilerin, işlenip ilgili kişilerin cep telefonuna iletilmesi sağlamak.

İHA'ların limitlerini, imkân ve kabiliyetlerini analiz edebilmek için bu cihazları yapılarına incelemeye ihtiyaç vardır. Bu çerçevede basit bir çoklu rotor İHA'nın şekli aşağıda yer almaktadır [10].

Dronların en önemli kabiliyeti istenilen yer ve zamanda çok az maliyetle rahatlıkla konuşlandırılabilmesidir. Haberleşme sistemleri özelinde değerlendirildiğinde bu imkân ve kabiliyet, doğal afet, ani gelişen durumlar vb. çeşitli sebepler nedeniyle ilave baz istasyonu ihtiyacı doğduğunda çok büyük önem arz etmektedir.

Ayrıca Şekil 1.1'de de görüldüğü üzere dron sistemini oluşturan parçalar piyasada kolaylıkla tedariki mümkün olan parçalardır. Bu da dron sisteminin hem işletme hem de bakım ve onarım maliyetlerini önemli ölçüde düşük olmasına, parçaların tedarikinde sorun yaşanmamasına imkan vermektedir.



Şekil 1.1 : Dron Yapısı. [3]

Öncelikle olarak İHA'lar Şekil-1.1'de de görüldüğü üzere jiroskop, barometre, GNSS gibi çeşitli sensörler ile konumlama yapma ihtiyacı duymaktadırlar. Bu sensörlerden aldığı verileri kullanarak İHA'nın uçuş kontrol ünitesi kendisine dikte edilen konumu korumaya çalışmaktadır. Bu sensörlerin çeşitli çevresel veya yapay nedenlerle işlevsiz hale gelmesi veya farklı veriler oluşturması dar huzmeye dayalı haberleşme imkânını olumsuz yönde etkileyebilecektir.

Dron sistemlerinin en önemli kısıtlarında bir tanesi yük taşıma kapasitesi olup dron üzerine yüklenmesi planlanan sistemlerin bu durumu göz önüne alarak planlanması gerekmektedir. Daeil Jo ve Yongjin Kwon [11]'de İHA'ların yük kapasitelerinin kısıtlı olması sebebiyle genellikle keşif ve gözetleme için kullanıldığını, özellikle tarım alanında kullanılan İHA'ların taşıma kapasitelerinin yüksek olduğunu fakat bunlarında hantal bir yapıya sahip olduğu bu nedenle bir yerden başka bir yere taşınma imkânının kısıtlı olduğunu açıklamışlardır. Daha küçük fakat daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip dron tasarımlarını bu makalede sunmuşlardır. İHA'ların faydalı yük kapasiteleri de sınırlı olması nedeniyle İHA baz istasyonu oluşturulması aşamasında normal baz istasyonunda kullanılabilen tüm sistemlerin İHA'lara yüklenmesinin mümkün olmakta ve bu nedenle İHA için faydalı yük kapasitesi kriterinin göz önüne alınması önem arz etmektedir.

Buna ilave olarak İHA'ların çalışma süresi üzerinde taşıdıkları bataryalara bağlı olması nedeniyle güç tüketiminde tasarruflu olan sistemlerin faydalı yük olarak belirlenmesi gerekmektedir.

1.2 Literatürde İHA Baz İstasyonu Yerleşimi ile İlgili Çalışmalar (MIMO Olmayanalar)

Yukarıda da belirtildiği üzere İHA sistemlerin insanların günlük yaşamlarını daha konforlu bir şekilde sürdürmesinde etkili olacaktır. Özellikle haberleşme alanında mevcut alt yapısı olmayan bölgelerde veya doğal afet, yangın gibi felaket senaryolarında alt yapının bir bölümünün kullanılmaz olduğu durumlarda hızlıca konuşlanabilme özelliği ile önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir. 2017 yılında Porto Riko'da meydana gelen şiddetli Maria Kasırğa sonucunda hücresel haberleşme altyapısının büyük hasar görmesi nedeniyle AT&T adada yaşayan insanlara hücresel haberleşme imkanı sağlayabilmek amacıyla LTE ile uyumlu dron baz istasyonları kullanmıştır [12].

Bunun yanı sıra maç, toplantı, konser gibi anlık haberleşme ihtiyacının arttığı durumlarda veya polis, jandarma veya arama kurtarma ekiplerinin belirli bölgelerde geçici olarak geniş bant haberleşmeye ihtiyaç duyması durumunda mevcut alt yapının İHA baz istasyonları ile desteklenmesi mümkün gözükmemektedir.

Dinamik ve haberleşme imkanları kısıtlı bir ortamda faaliyet icra eden İHA baz istasyonlarının rastgele dağılmış kullanıcı gruplarına hizmet vermesi gerekmektedir. Bu hizmeti de karmaşık bir sinyal yayılımının olduğu bir ortamda kısıtlı bir enerji kapasitesi ile vermek durumundadırlar [13].

Yukarıda belirtilen her iki senaryoda da İHA'ların özellikle birbirlerine en az şekilde girişime sebep olacak şekilde aynı zamanda ihtiyaç duyulan tüm alanı kapsayabilecek şekilde konuşlandırılması önem arz etmektedir. Bunun yanında kullanıcıların bölgesel ve zamansal olarak geçici durumları ihtiyaç duyulan veri trafiğinin anlık olarak tespitinde zorluklara sebep olacaktır.

Bu nedenle [14]'da yer alan çalışmada yazarlar kullanıcıların alanda farklı yükseklikte konuşlanabileceğini, bu nedenle İHA ve kullanıcılar arasında farklı yükseliş açılarının ve bununla bağlantılı olarak kullanıcılar arasında farklı yol kayıplarının meydana geleceğini öne sürmüşlerdir. Bunun yanında farklı durumdaki kullanıcıların farklı performans ihtiyaçları olabileceği ve bu nedenle İHA'ların konuşlanmasının bu ihtiyacı da karşılayacak şekilde olması gerektiğini de belirtmişlerdir. Bu çalışma çerçevesinde;

- İHA'ların 3 boyutlu konuşlanmasını sağlayan yeni bir şema sunulmakta ki bu kullanıcılar için kapsamı ve bağlantıyı sağlayacaktır. Burada Optimal Kapsama ve Optimal Bağlantı olarak 2 model sunulmuştur.
- Dronların pozisyonlarını ve yüksekliklerini belirlemek için Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) algoritması kullanılmıştır.
- Bağlantı olarak her bir dron için izole edilmiş bağlantı yapısı oluşturulmuştur. Sahada yer alan kullanıcılar için minimum dron kullanılacak şekilde bir algoritma kullanılmıştır.
- Yoğunluk derecesine göre 4 çevresel ortamda benzetimi gerçekleştirmişlerdir. Bu benzetimler 50 kullanıcı için 1000x1000 m²'lik bir alanda 0-200 m arasında değişen yükseklikte 2 GHz. Frekansında gerçekleştirilmiştir.

[15] ile minimum gönderme gücü ile aşağı gönderim kapsama performansını maksimize edecek İHA'lar için konumlama yöntemi araştırılmıştır. Öncelikle anten kazancı ve yüksekliğe dayalı aşağı gönderim kapsama ihtimali türetilmiş devamında ise çember paketleme teorisi (Circle Packing Theory) ile İHA kapsama alanları birbirlerinin üzerine binmeyecek şekilde maksimum kapsama alanın sağlamak hedeflenmiştir. İstenilen alanın büyüklüğü, müsait İHA miktarı ve yönlü antenin kazancı göz önüne alınarak kapsama ihtiyacını karşılayacak şekilde İHA'ların konumları ve yükseklikleri ayarlanabilmektedir. Bunun yanında söz konusu coğrafik alan için minimum sayıda İHA ile hedeflenen kapsama sağlanabilmektedir. Bu benzetim de 2Ghz'te gerçekleştirilmiştir.

[16] numaralı çalışmada yazarlar özellikle herhangi bir felaketten sonra konuşlandırılabilir olan İHA sayısının kısıtlı olacağından yola çıkarak konuşlandırılan İHA'ların optimal yüksekliğini tahmin edecek bir matematik modeli ortaya atmışlardır. Bu çerçevede kabul edilebilir maksimum yol kaybı eşik değeri belirlenmiş, bu eşik değeri ile İHA baz istasyonunun kapsayabileceği alan arasında ilişki kurulmuştur.

[13]'da yazarlar veri trafiği ihtiyacı ve İHA'ların ihtiyaç alanında yoğunluğunu baz alarak İHA'ların nasıl konumlandırılabilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada hizmet sağlanan kullanıcı sayısını maksimize etmek için Talebe Bağlı Yoğunluk Odaklı 3D İHA konumlama algoritması sunulmuştur. Ancak bu çalışmada sadece yatay konumlanma üzerine durulmuştur.

[17]'de yer alan çalışmada ise yazarlar rastgele yerleştirilmiş kullanıcılara hizmet sağlamak için belirli bir servis kalitesi çerçevesinde İHA baz istasyonunu sayısını minimum seviyede tutan ve bunların 3D de konumlanmasına imkân veren sezgisel bir algoritma sunmuşlardır. Bu kapsamda Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) kullanılmıştır.

[12]'de yazarlar İHA'ların konuşlandırılması konusunu farklı bir açıdan ele almışlardır. Bu çalışmada sabit ve operasyonel olmak üzere iki türlü enerji maliyeti öngörülmüştür. Sabit enerji maliyeti olarak konuşlanan İHA sayısı baz alınırken, operasyonel maliyette ise İHA baz istasyonlarının gönderme gücü ele alınmıştır. Öncelikle gönderme gücünün en küçüklenmesi hedeflenirken sonrasında ise operatif İHA sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

1.3 Milimetre Dalga

1.3.1 Tanımı

Teknolojinin son yıllardaki gelişimi sanal gerçeklik, büyük veri, yapay zekâ, 3 boyutlu medya, yüksek çözünürlüklü videolar gibi uygulamaların gelişimine ön ayak olmuştur. Bu tür veya buna benzer uygulamalar beraberinde kablosuz ağlar üzerinde gittikçe artan miktarda veri akışını da getirmiştir. Bunun yanında mobil ağların insanın günlük yaşamının bir parçası olmaya devam ettiği ve edeceği öngörülmektedir. Bu tarz uygulamaların yanında insan nüfusunun artışı ve mobil cihazlara erişim sağlayabilen insan sayısındaki artışlarda ele alındığında mobil veri trafiğinin artacağı değerlendirilmektedir. 2020 yılında aylık 49 eksabayt olan aylık mobil trafiğin 2026 yılında yaklaşık beş kat artarak aylık 237 eksabayt olması beklenmektedir [18].

Mevcut yapının oluşacak olan bu talebi karşılamakta zorlanacağı değerlendirilmekte olup alternatif yöntem arayışına gidilmesi zorunluluk haline gelmiştir. Enformasyon teorisi sistem kapasitesini birkaç kat artırmak için üç ana yaklaşım sunmaktadır [19].

i. Aşırı Sık Ağ (Ultra Dense Network): Oluşturulan küçük hücre teknolojisi ile zaten bu husus 4G teknolojisinde kullanılmaktadır.

ii. Büyük miktarda yeni bant genişlikleri: Hali hazırda 6 GHz altında yer alan frekanslar mevcut yapıda kullanılmaktadır. Bu nedenle spektrum bu bölgesinde bant genişliğinin artırılması cihetine gidilmesi pek mümkün görülmemektedir. Bu çerçevede mmDalga burada en muhtemel çözüm önerisi olarak ortaya çıkmaktadır.

iii. Yüksek Spektrum Etkinliği: Bu noktada da çok fazla anten kullanarak Büyük MIMO oluşturma seçeneği ön plana çıkmaktadır. Fazla anten kullanımı da mmDalga'da mümkün görülmektedir.

Ayrıca Avrupa Birliği Horizon 2020 çerçevesinde başlattığı 'Millimeter-wave Networking and Sensing for Beyond 5G' araştırmasında yüksek veri hızına ulaşmak için milimetre dalgayı 5G'nin kritik unsuru olarak tanımlamaktadır [20].

Gelecek dönemlerde veri hızını artırmak için kullanılmasını planlanan milimetre dalga spektrumunda yaklaşık olarak 30 GHz – 300 GHz aralığına karşılık gelmektedir.

Ülkemizde mm dalganın haberleşme alanında kullanımına yönelik herhangi bir düzenlemeye bulunmamasına rağmen genelde dünya genelinde haberleşmeye yönelik olarak spektrumun 100 GHz'e kadar olan bölümünde çalışmalar yapılmıştır. 3Gpp'nin [21] yayınında yer alan 6-100 GHz'e kadar ölçüm yapma kabiliyeti olan firmalara ait bilgiler Çizelge 1.1'de yer almaktadır.

Çizelge 1.1: Ölçüm Kabiliyeti Olan Firmalar.

	6 - 20 GHz	20 - 30 GHz	30 - 60 GHz	>60 GHz
Urban macro	CMCC Nokia/Aalborg	Nokia/Aalborg	NYU	
Urban micro	Aalto University CMCC Ericsson Intel/Fraunhofer HHI Nokia/Aalborg NTT DOCOMO Orange	AT&T Aalto University CMCC Huawei Intel/Fraunhofer HHI Nokia/Aalborg NTT DOCOMO NYU Qualcomm Samsung CATT KT ETRI ITRI/CCU ZTE	AT&T Huawei Intel/Fraunhofer HHI NTT DOCOMO Qualcomm CATT ETRI ITRI/CCU ZTE	AT&T Aalto University Huawei Intel/Fraunhofer HHI NYU
Indoor	Aalto University CMCC Ericsson Huawei Intel/Fraunhofer HHI Nokia/Aalborg NTT DOCOMO Orange	AT&T Alcatel-Lucent Aalto University BUPT CMCC Huawei Intel/Fraunhofer HHI Nokia/Aalborg NTT DOCOMO NYU Qualcomm Samsung CATT KT ETRI ITRI/CCU ZTE	AT&T Ericsson Huawei Intel/Fraunhofer HHI NTT DOCOMO NYU Qualcomm CATT ETRI ITRI/CCU ZTE	AT&T Aalto University Huawei Intel/Fraunhofer HHI NYU
O2I	Ericsson Huawei Intel/Fraunhofer HHI Nokia/Aalborg NTT DOCOMO Orange	AT&T Alcatel-Lucent Ericsson Huawei Intel/Fraunhofer HHI NTT DOCOMO NYU Samsung KT	AT&T Ericsson Huawei Intel/Fraunhofer HHI NTT DOCOMO	AT&T Huawei Intel/Fraunhofer HHI

Bunun yanı sıra Amerika Birlelik Devletlerinin Federal Haberleşme Komisyonu (FCC) “Spectrum Frontiers Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking” 100GHz’e kadar haberleşme planlama bantları aşağıda yer almaktadır [22].

- 28 GHz (27.5-29.5 GHz band)
- 37 GHz band (37-38.6 GHz band):
- 39 GHz band (38,6-40 GHz band):
- 60 GHz Bands (57 - 64 GHz and 64-71 GHz (extension):
- 90 GHz band (92 -95 GHz bant)

Benzer şekilde Çin’de ve Güney Kore’de de 100 GHz’in altında milimetre dalgada haberleşmeye yönelik düzenleme çalışmaları yapılmaktadır [23].

Frekans spektrumunu düzenlemekle sorumlu kuruluşlara ilave olarak servis sağlayıcılar da Milimetre Dalga frekanslarında mevcut olan büyük çapta bant genişliklerini kullanarak kendi ticari 5G ağlarını kurmak için mücadele etmektedirler. AT&T ve Verizon 5G'nin başlangıç kurulumu için 39GHz ve 28 GHz. Frekans bantlarına odaklanmışlardır.

1.3.2 Milimetre Dalganın Haberleşme Açısından Faydaları

1.3.2.1 Geniş Bant İmkânı

Her yanıyla gelişen teknolojinin sonucu artan data transferi ihtiyacının mevcut mobil altyapı ile karşılanmasında sıkıntılar yaşanabileceğini, bu sıkıntıların yaşanmaması için Milimetre Dalganın haberleşme alanında kullanımının artırılmasının en önemli seçenek olduğu ve bu nedenle çeşitli ülkelerde ve kurumlarda Milimetre Dalganın kullanımına yönelik olarak çeşitli düzenlemeler yapıldığını önceki bölümde ifade edilmiştir.

Milimetre Dalganın artan veri transferi ihtiyacına çözüm olarak sunulmasının en önemli nedeni; spektrumun bu bölümünde büyük bant genişlikleri sunmasıdır. Milimetrik Dalgada tahsis edilmemiş frekansların mevcut olması ve 6 GHz altında yer alan spektrumda yeterli kaynağının bulunmamasından dolayı 5G'de Milimetrik Dalga haberleşmesinin halen mevcut 4G LTE sistemlerinin kullandığı 6GHz altında yer alan mikro dalgalara karşın avantaj sağlamaktadır. Özellikle 71-76 GHz ve 81-86 GHz Milimetre Dalga bant genişlikleri diğer tüm lisanslanmış kablosuz ağların bant genişliklerinden fazladır [24].

Mevcut kablosuz ağlar tarafından zaten yoğun olarak kullanılan 6 GHz altında kalan mikro dalga spektrumu gigabitler seviyesinde data transferi için yetersiz kalmaktadır. Kanal kapasitesi eklenir beyaz Gauss gürültülü kanal için şu şekilde ifade edilebilir [25];

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

C kanal kapasitesi, B bant genişliği, P sinyalin gücü ve N_o gürültü gücüdür. Sinyalin gücünün uygulanan düzenlemeler nedeniyle kısıtlı olması nedeniyle gigabitler seviyesinde hızlara ulaşabilmek için verilen Shannon-Hartley teoremi denkleminde

de anlaşılacağı üzere kapasite bant genişliğinin artırılması gerekmektedir. Kısacası bant genişliği ile kanal kapasitesi arasında doğru orantı mevcuttur.

1.3.2.2 Kısa Dalga Boyu

Elektromanyetik spektrum içerisinde daha yüksek frekansa sahip elektromanyetik dalga daha kısa dalga boyunu ifade etmektedir, bunun anlamı da birim zamanda daha fazla bilgi gönderilebilmesidir [24]. Geleneksel hücresel sistemler ve WLAN tarafından kullanılan 6 GHz altı mikro dalga ile karşılaştırıldığında mmDalga çok daha kısa dalga boyuna sahiptir. Örneğin, 28 GHz, 60 GHz ve 300 GHz sırasıyla 10,7 mm, 5 mm ve 1mm gibi çok kısa dalga boylarına sahiptir.

Kısa dalga boyu ilave bazı farklı avantajlarda sağlamaktadır. Mikrodalga frekansları ile karşılaştırıldığında Milimetre Dalganın bileşenleri ve antenleri Şekil 1.2’de gösterildiği üzere küçük fiziksel yapılarda tasarlanabilir. Bu sayede yüzlerce anten dizisi çok küçük bir kartta toplanabilir ve bu da devre, modül ve cihazların küçük olarak üretilmesine imkan verebilmektedir [26].



Şekil 1.2 : Bir Cent ile 2 QTM052 Milimetre Anten Modülünün Karşılaştırılması. [24]

Tipik yarım dalga dipol anten 900MHz’te 152.4 mm uzunluğunda iken, 60 GHz’de bu 2.5 mm’dir. Bu daha küçük antenler ile 5G NR cihazlarının üretiminde üreticiler anteni cihaz içine yerleştirmede daha fazla esnekliğe sahiptirler. Bu durum cihazlarda bataryalar için daha fazla yer ayrılmasına ve daha küçük akıllı telefonlar için seçenek oluşturmasına imkân vermektedir.

Elektromanyetik ve anten teorisine göre daha kısa dalga boyuna sahip milimetre dalga sinyalleri efektif anten aralıklarıyla daha fazla anten kazancı sağlayabilirler. Milimetre dalga frekanslarındaki daha küçük fiziksel boyutlar nedeniyle oluşturulabilen çoklu anten dizileriyle daha fazla anten kazancı sağlanabilir ve belli bir istikamete huzme oluşturulabilir. Gönderme antenlerinin aynı açıklığa ve aynı gönderme gücüne sahip

olmasına rağmen 80 GHz frekansında yer alan anten 2.4 GHz’de yer alan antene göre 30 dB daha kazançlı olabilir [27].

Yukarıda da belirtildiği üzere mm Dalga’da anten boyları çok daha küçük olmakta, bu durum antenlerin yüzlercesini bir araya toplanabilmesine ve bununla bağlantılı olarak dijital ön kodlama (precoding) ve analog huzme şekillendirme (beamforming) ile büyük MIMO entegrasyonuna imkan sağlanmaktadır. Bu anten yapılarıyla milimetre dalga huzmesini hızlıca yönlendirebilmekte ve elektromanyetik ve anten teorisine göre frekansın artması huzme genişliğinin daralması ile sonuçlanmaktadır [24]. Sonuç olarak milimetre dalga anten dizileri ile oldukça dar yönlendirilebilen huzmeler oluşturulabilir ve bu huzmeler istenilen kullanıcıya yönlendirilebilir. Huzme şekillendirme ayrıntılı olarak diğer bölümlerde ele alınacaktır.

1.3.2.3 Sinyalin Güvenliği

Yukarıda da belirtildiği üzere geniş bir huzmeye sahip olan 6 GHz altında yer alan frekansların aksine milimetre dalga boyundaki sinyalin dar huzmesi oldukça yönlendirilmiş bir sinyal elde edilmesine imkân vermektedir. Eğer kötü niyetli dinleyiciler sinyale giriş yapıp dinlemeye çalıştıklarında fiziksel olarak milimetre sinyalin transmisyon yolu üzerinde olmak zorundadırlar. Milimetre dalga boyunda dar bir huzme oluşturabilme imkanının bulunması hem araya girilip bu sinyalin çözümlenmesini zorlaştırmakta ve aynı zamanda bu sinyalin herhangi bir karıştırmaya karşı nispeten diğer sinyallere nazaran daha etkin şekilde korunmasına imkân vermektedir [24].

1.3.3 Milimetre Dalganın Dezavantajları

Milimetre dalganın küçük dalga boyuna sahip olması nedeniyle oluşan avantajlarının yanında yine klasik haberleşme bantlarına nazaran yüksek frekansta bulunması nedeniyle belirli dezavantajları da ihtiva etmektedir. Bu dezavantajlar aşağıda yer alan başlıklar altında incelenmiştir.

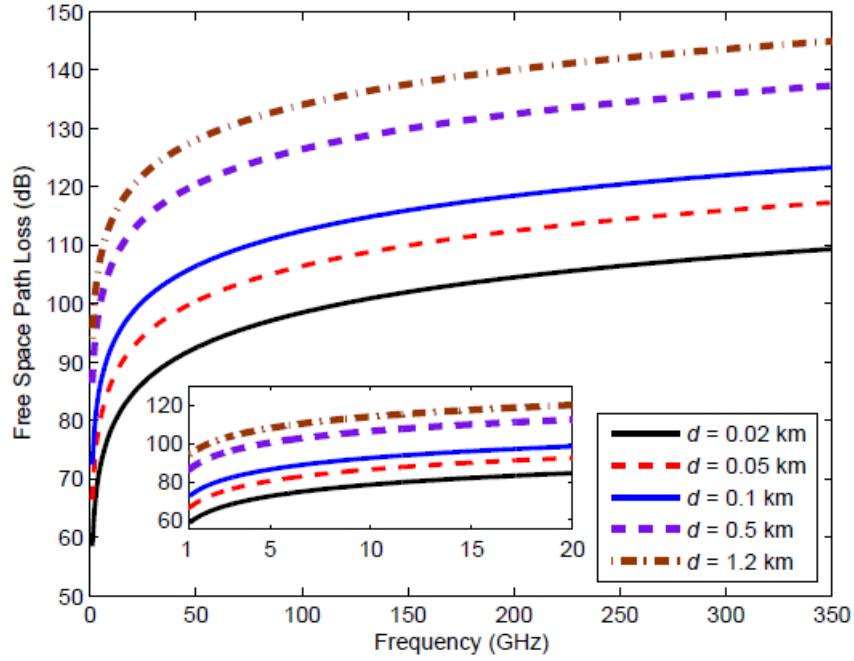
1.3.3.1 Boş Uzay (Free-Space) Yol Kaybı

İki eş yönlü anten arasında yol alan sinyalin gücünde boş uzayda meydana gelen kayıplar Boş Uzay yol kaybı olarak tanımlanmaktadır. Alınan sinyal gücünün hesaplanmasında genelde Friis transmisyon denklemi kullanılmaktadır.

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \times G_{0t} \times G_{0r} [28] \quad (1.2)$$

Pr anten tarafından alınan sinyal gücünü, Pt anten tarafından gönderilen sinyal gücü, $\frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2}$ boş uzay kayıp faktörünü ve G_{0t} ve G_{0r} anten kazançlarını ifade etmektedir. Bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere kayıp faktörü frekans ile ters dalga boyu ile doğru orantılıdır. Frekans arttıkça diğer bir ifade ile dalga boyu kısaldıkça boş uzayda (free-space) oluşan kayıplar artacaktır. Bu nedenle mmDalgada mikro dalga olarak tanımladığımız spektrumda 6 GHz ve aşağısında yer frekanslara göre daha fazla kayıp meydana gelmektedir.

Farklı transmisyon mesafelerinin için hazırlanmış olan boş uzay yol kaybı grafiği Şekil 1.3'de yer almaktadır [24].



Şekil 1.3 : Serbest Uzay (Free-Space) Yol Kaybı [24].

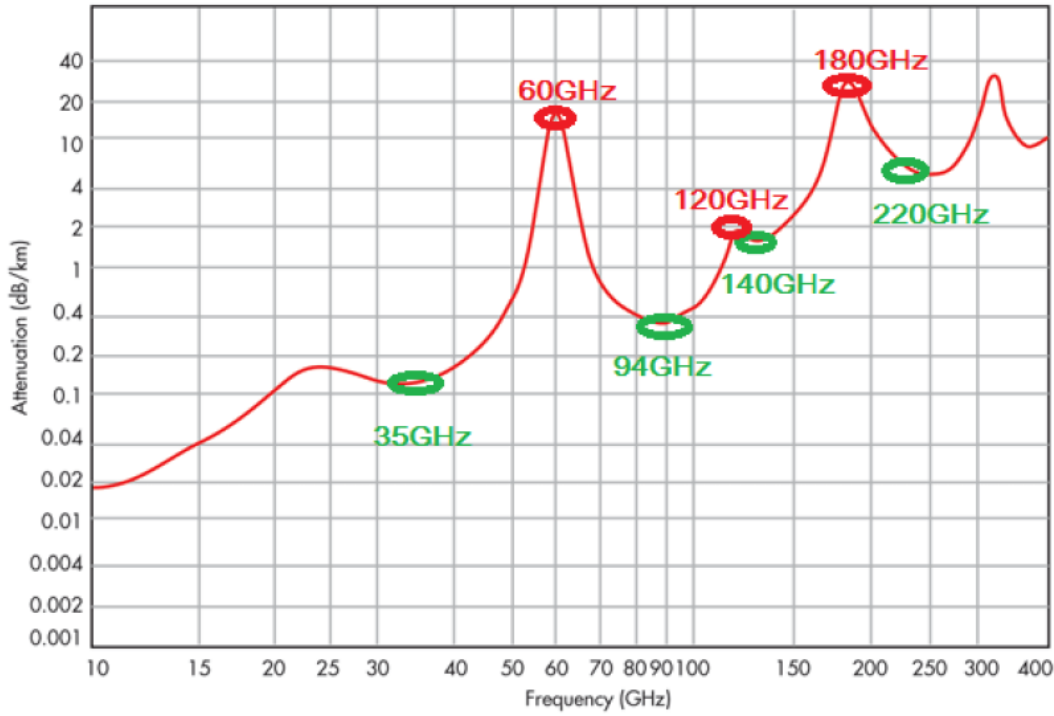
Şekilden de görüldüğü üzere boş uzay yol kaybı frekans arttıkça artmaktadır, ancak bunun yanında boş uzay yol kaybı alıcı ve verici antenler arasındaki mesafede arttıkça da artmaktadır. Milimetre dalga çok yüksek veri akışı hızlarına çıkmada uygun koşulları sağlamasına rağmen bunun mesafeler ile kısıtlı olacağı açıkça gözlemlenmektedir.

1.3.3.2 Atmosfer Yapısı Nedeniyle Meydana Gelen Kayıplar

Gönderim esnasında sinyalin atmosferde titreşen moleküller ile etkileşime geçmesi ve sinyalin enerjisinin atmosfer tarafından emilmesi sonucu meydana gelen kayıplar

atmosfer yapısı nedeniyle meydana gelen kayıplar veya atmosferik kayıplar olarak tanımlanabilir. Gazların sinyalin enerjisini emme yoğunluğu sıcaklık, hava basıncı, yükseklik ve en önemlisi taşıyıcı frekansa gibi birçok faktöre bağlıdır. Atmosferin yapısını oluşturan oksijen, su buharı vb. farklı gazların farklı moleküler rezonans frekanslarına sahiplerdir ve bu rezonans frekanslarında sinyal enerjisinin emilimi maksimuma ulaşır. Örneğin oksijenin sinyal enerjisini 60 GHz’de yaklaşık 15 dB/km ve 199 GHz 1,4 dB/km azalmaya sebebiyet verdiği tespit edilmiştir [27]. Fakat şu da göz önünde bulundurulmalıdır ki mmDalgada sinyal bu rezonans frekanslarından uzaklaştıkça sinyalde meydana gelen kayıp ta belirgin bir şekilde azalmaktadır.

10 GHz’den 400 GHz’e kadar değişen frekanslardaki kilometre başına atmosfer yapısı nedeniyle meydana gelen zayıflama Şekil 1.4’de yer almaktadır [29].



Şekil 1.4 : Atmosferik Kayıplar [29].

Grafikten de görüldüğü üzere 35 GHz, 94 GHz, 140GHz ve 220GHz gibi bantlarda sinyal seviyesinde nispeten daha az bir zayıflama meydana gelmektedir. Bu bantlarda daha uzak mesafelerde haberleşme gerçekleştirilebilir. Buna karşın 60 GHz, 120 GHz ve 180 GHz bantlarında ise sinyal seviyesindeki zayıflama çok fazla artmakta, hatta 15 dB/km ulaşmaktadır. Bu tür bantlar genellikle güvenlik faktörünün ön plana çıktığı gizli ağlarda kullanılabilir.

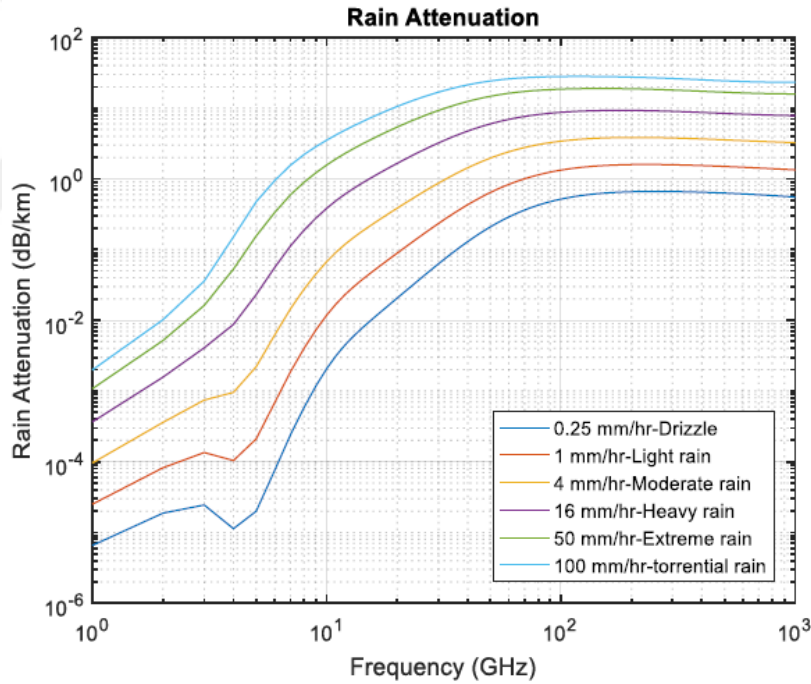
1.3.3.3 Yağış Nedeniyle Meydana Gelen Zayıflama

Yağmur damlaları ile milimetre dalgaının dalga boyunun hemen hemen birbiriyle aynı büyüklükte olması nedeniyle saçılma ve emisyonun yanında yağış da milimetre dalgaının zayıflamasına neden olan önemli bir husustur.

Yağmur damlasının şekli, dağılımı, yağış oranı, sinyalin polarizasyonu ve frekansı yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflamayı etkileyen unsurlardır [24].

Yağış durumu da özellikle 10 GHz ve üzeri bantlarda sinyal yayılımında etkili bir faktördür. Yağmur damlasının büyüklüğü yaklaşık olarak milimetrik frekanslarda radyo dalga boyu ile hemen hemen aynıdır ve bu nedenle sinyalin yayılımında saçılma etkisi yaratmaktadır [30]

Frekansa ve yağış yoğunluğuna göre bir kilometrede meydana gelen sinyal zayıflamasını gösteren grafik Şekil 1.5'de yer almaktadır [31].



Şekil 1.5 : Yağış Nedeniyle Meydana Gelen Zayıflama [31].

Grafikten de anlaşılacağı üzere yağış miktarında meydana gelen artış sinyali olumsuz yönde etkilemektedir, buna ilave olarak frekansta belli bir noktaya kadar olan artışta sinyali yağış ortamında olumsuz yönde etkilemektedir.

Yağış nedeniyle çeşitli frekanslarda meydana gelen zayıflamalara ilişkin ölçümleri gösteren bilgiler Çizelge 1.2'de yer almaktadır [23].

Çizelge 1.2 Yağış Nedeniyle Meydana Gelen Zayıflamaya Yönelik Ölçümler. [23]

Frequency	Path length and Location	Rain Rate	Rain-Induced Attenuation
28 GHz	0.0564 km link at rooftop of the Electrical Engineering Department building in the ITS campus area in Surabaya, Indonesia	~	4 dB to 36 dB
28 GHz	0.2 km, 0.4 km, 0.6 km, 0.8 km, and 1 km in Hyderabad, Pakistan.	65 mm/hr	2.2 dB, 4.44 dB, 6.7 dB, 8.8 dB, and 11 dB
38 GHz	Icheon, Gyeonggi Province, South Korea, where the 3.2 km link is set between Khumdang tower and Icheon tower	50 mm/hr	20.89 dB
36 GHz and 55 GHz	4.1 km path across central London between Imperial College of Science and Technology and University College London.	12.5 mm/hr	13.8 dB and 14.8 dB
35 GHz	0.23 km communication link in tropical regions, Ajmer city, India	29 mm/hr	38 dB
52 GHz, 90.8 GHz	1.008 km link at Massachusetts Institute of Technology, Cambridge	0.3 mm/h to 20 mm/h 0.3 mm/h to 20 mm/h	0.2 dB to 17 dB 0.4 dB to 17 dB

1.3.3.4 Penetrasyon Kaybı

Milimetre dalga boyunda sinyalin yayılımında etki eden en önemli unsurlardan biri de penetrasyon kaybıdır. Özellikle milimetre dalganın ortamda bulunan engellere karşı hassasiyetinin fazla olması yani penetrasyon kaybının fazla olması nedeniyle sistemin performansına önemli derecede negatif etki etmektedir.

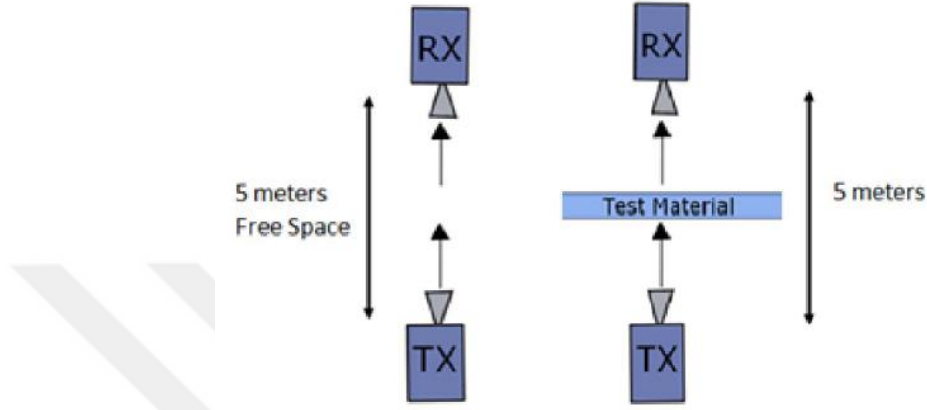
Milimetre dalga sinyali iletim halinde iken karşısına çıkan engelleri oluşturan materyallerin yapısı, şekli ve tipi sinyalin penetrasyon kaybını belirleyen unsurlardır. Bunun yanında milimetre dalgada frekans arttıkça kayıp da artar.

Farklı materyaller için penetrasyon kaybını gösteren bilgiler Çizelge 1.3'de yer almaktadır [32].

Çizelge 1.3 : Penetrasyon Kaybı. [32]

Zayıflama (dB)				
Materyal	Kalınlık (cm)	< 3 GHz	40 GHz	60 GHz
Alçıpan	2.5	5.4	-	6.0
Ofis beyaz yazı tahtası	1.9	0.5	-	9.6
Temiz Cam	0.3/0.4	6.4	2.5	3.6
Buzlu Cam	0.3	7.7	-	10.2
Sunta	1.6	-	0.6	-
Ağaç	0.7	5.4	3.5	-
Kartonpiyer	1.5	-	2.9	-
Sıva duvar	10	-	160	-
Tuğla duvar	10	-	178	-
Beton	10	17.7	175	-

[33] numaralı çalışmada New York Üniversitesi'nin Manhattan ve Brooklyn kampüslerinde 28 GHz'teki sinyalin normal cam, renkli cam, tuğla ve duvardan penetrasyon ölçümleri yapılmıştır. Şekil 1.6'da görüldüğü üzere önce alıcı ve verici arasında 5 metre mesafe olacak şekilde ölçüm yapılmış, daha sonra bu alıcılar arasına ilgili malzeme konularak bir ölçüm yapılmıştır.



Şekil 1.6 : 28 Ghz. Penetrasyon Test Kurulumu [33].

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Çizelge 1.4'te yer almaktadır.

Çizelge 1.4 : 28 GHz Penetrasyon Kaybı.

ÇEVRE	MALZEME	KALINLIK (CM)	FREE SPACE ALININ GÜÇ (dBm)	MALZEME ALINAN GÜÇ (dBm)	PENETRASYON KAYBI (dBm)
Dış Mekan	Renkli Cam	3.8	-34.9	-75.0	40.1
	Tuğla	185.4	-34.7	-63.1	28.3
İç Mekan	Renkli Cam	<1.3	-34.7	-59.2	24.5
	Normal Cam	<1.3	-34.7	-38.3	3.6
	Normal Cam (Farklı Nokta)	<1.3	-35.0	-38.9	3.9
	Duvar	38.1	-34.0	40.9	6.8

1.3.3.5 Yüksek Enerji Tüketimi

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere yol kaybı nedeniyle haberleşme yapılan frekans arttıkça sinyalin zayıflaması daha fazla olmakta yani SNR (Signal to Noise Ratio) azalmaktadır.

$$C = \frac{1}{2} W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad 1.2$$

Denklem 1.2’de “W” bant genişliği ve “P/N” SNR olup kanal kapasitesi denkleminde [34] de anlaşılacağı üzere SNR’ın azalmasını engellemek için ya sinyalin bant genişliğinin artırılması gerekmekte yada buna alternatif olarak sinyalin gücünü bölgesel olarak yönlendirebilmek için yönlendirilmiş anten veya MIMO teknolojisi kullanılabilir ki bu bize dizi kazancı ve müteakibinde bölgesel çoklama (Spatial Multiplexing) imkanı kazandırır [35].

Milimetre dalgada çeşitli sebeplerden dolayı meydana gelen kayıplar nedeniyle haberleşme mesafesi klasik haberleşme sistemlerine nazaran çok daha kısadır. Bu nedenle milimetre dalga haberleşmesine yönelik literatür incelendiğinde, milimetre dalga boyunun çok kısa olması ve bu nedenle çoklu anten kullanımına elverişli olması nedeniyle milimetre dalga haberleşmesiyle MIMO teknolojisi özdeşleşmiş durumdadır.

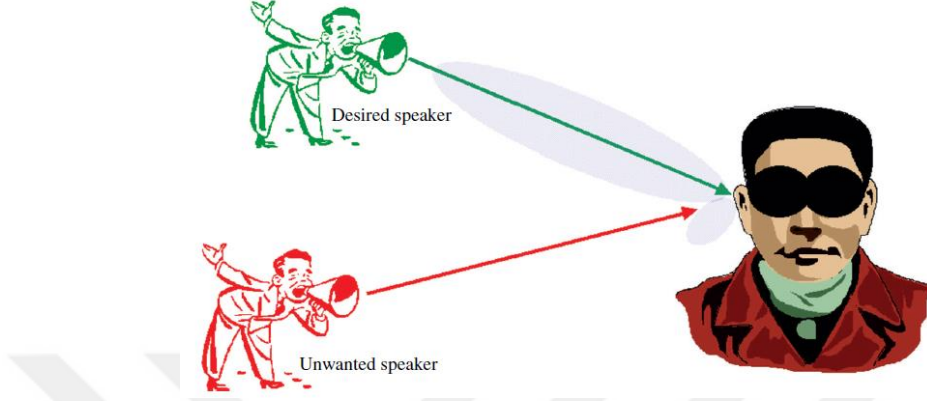
Normalde 6 GHz ve altında yer alan frekanslarda yapılan MIMO haberleşmesinde her bir anten için tahsis edilmiş bir dijital RF (Radio-Frequency) zinciri vardır ancak milimetre dalgada planlanan MIMO sistemlerde aynı durumun söz konusu olması durumunda çok fazla enerji tüketimi sorununu ortaya çıkaracaktır. Bu nedenle milimetre dalga MIMO haberleşmesinde genellikle hibrit huzme şekillendirme tercih edilmektedir. İlerleyen bölümlerde bu husus detaylı olarak ele alınacaktır.

1.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output) ve Huzme Şekillendirme (Beamforming)

1.4.1 Akıllı Antenler

Özellikle son yıllarda insanların akıllı telefon, tablet vb. cihazlar ile birlikte gündelik hayatını kolaylaştıracak, kaliteli zaman geçirmesine imkan verecek uygulamalara yönelik eğilimlerinin arttığı açıkça gözlenmektedir. Bu artış en fazla kablosuz veya hücreli haberleşmeyi etkilemektedir çünkü kullanıcı sayısının her gün giderek artması her bir kullanıcı için yeterli veri aktarım hızının sağlanmasında problemler

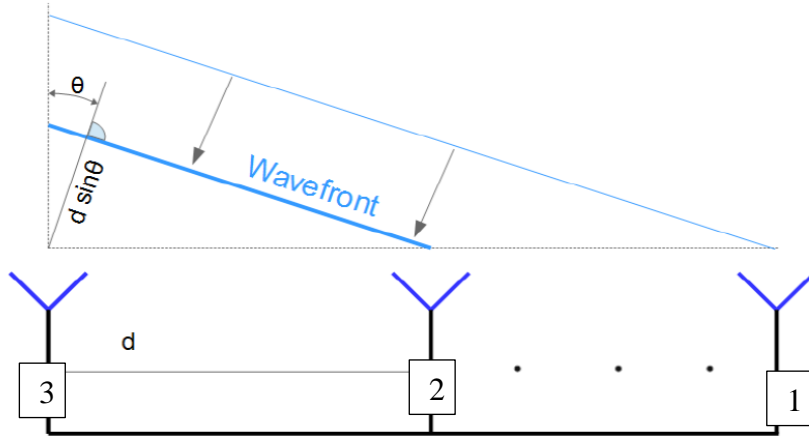
yaratabilmektedir. Bir önceki bölümde belirtildiği üzere bu soruna çözüm olacak yöntemlerden bir tanesi de Bölgesel Çoklamadır (Spatial Multiplexing). Constantin A. Balanis “Antenna Theory Analysis and Design” kitabında bölgesel çoklamayı insan duyma duyusuna benzeşim yaparak (Şekil 1.7) anlatmaya çalışmıştır.



Şekil 1.7 : İnsan Benzeşimi.

Karanlık bir odada iki kişinin konuştuğu, dinleyici olan kişinin ise hareket halinde olduğunu var sayalım. Dinleyici hareket ettikçe konuşmanın nereden geldiğini tespit etme imkânı bulunmakta çünkü konuşmacıların sesi her bir kulağa farklı zamanlarda gelmektedir. Beyinde bu farklı zamanlarda kulaklara gelen akustik sinyal vasıtasıyla konuşmacının istikametini tespit edebilmekte ve alıcılarını yani dinlemesini istenilen yöne yönlendirebilmektedir.

Benzer şekilde çoklu anten yapılarında da sadece belli bölgelerden gelen istenilen sinyaller alınırken diğer bölgelerden gelen istenmeyen sinyaller ise dinleme dışında bırakılabilir. Aynı husus gönderme durumu için de geçerlidir. Çoklu anten yapıları ile belli bölgelere doğru gönderim yapılabilirken, istenmeyen bölgelere gönderim yapılmayabilir. Bu da yukarıda benzeşimde de açıklandığı üzere sinyalin çoklu anten yapısında yer alan her bir antene geliş zamanındaki farklılığa veya gönderim durumunda her bir antenden farklı zaman fasılları ile gönderim yapılması sonucunda sağlanabilir.



Şekil 1.8 : Dalganın Çoklu Antene Ulaşımı.[36]

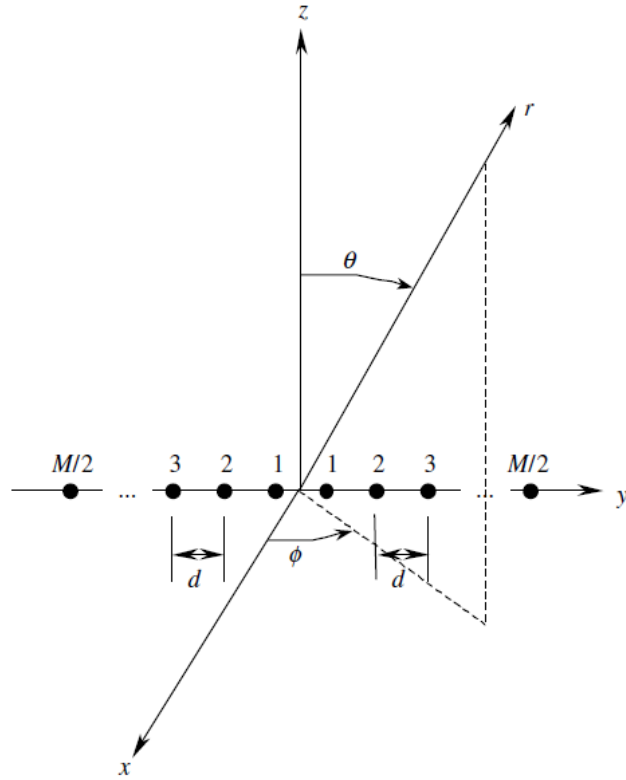
Şekil 1.8 incelendiğinde vericiden gönderilen dalganın ilk önce 1 numaralı anten, müteakiben sırasıyla 2 ve 3 numaralı antene ulaştığı ve dalganın geliş açısının “ θ ” olduğu görülmektedir. Her bir anten arasındaki mesafenin “ d ” olduğu var sayıldığında dalganın 1 numaralı antene ulaştığında dalganın 2 numaralı antene mesafesi $d \cdot \sin \theta$ ve 3 numaralı antene mesafesi ise $2 \cdot d \cdot \sin \theta$ olacaktır. Bu durumda aynı sinyal farklı antenlere belirli faz kayması ulaşacaktır. Bu faz kayması ise;

$$\Delta\phi = 2\pi d \sin(\theta) / \lambda \quad (1.3)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Bu denklemde yer alan “ $\Delta\phi$ ” sinyalin faz kaymasını, “ d ” mesafeyi, “ θ ” geliş açısını ve “ λ ” ise dalga boyunu ifade etmektedir. Denklemlerden de anlaşılacağı üzere faz kayması ile sinyalin frekansı arasında ilinti bulunmaktadır. Benzer durum antenler gönderim halinde iken de geçerlidir. Antenlerin faz kaymasının düzenlenmesiyle antenin alma/gönderme istikameti belirlenebilir.

1.4.1.1 Doğrusal Dizi (Linear Array) Antenleri

Y eksenini istikametinde dizilmiş M adet antenden oluşan eşit aralıklı doğrusal anten dizisi Şekil 1.9’da yer almaktadır [28].



Şekil 1.9 : Doğrusal Anten Dizisi.

Elektromanyetik dalga izleyeceği yola bağlı olarak dizi antenlerde bir faz farkına sebep olabilmekte ve bu faz farkı Denklem 1.4 ile ifade edilmektedir.

$$\Psi_n = -(2*\pi/\lambda)(n-1)*d*\cos\theta \quad (1.4)$$

Bu faz farkından da istikamet vektörüne (steering vector) Denklem 1.5 ile ulaşılabilir.

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{1}{N}} \times \left[1, e^{-j*(\frac{2\pi}{\lambda})d \cos \theta}, \dots, e^{-j(\frac{2\pi}{\lambda})(N-1) d \cos \theta} \right]^T \quad (1.5)$$

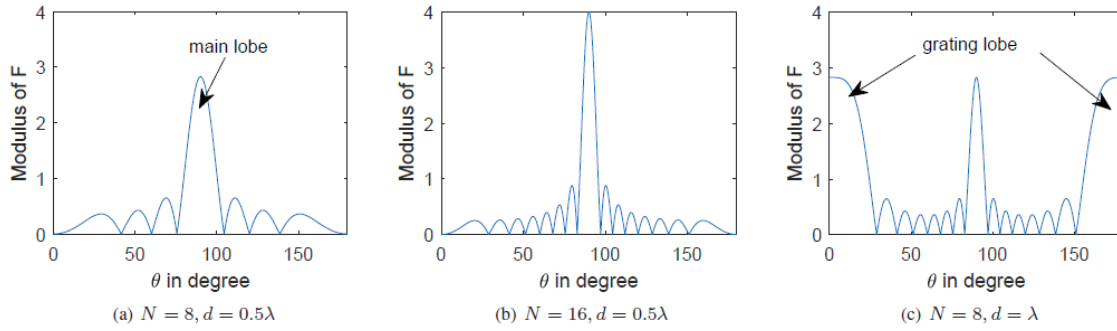
İzotropik doğrusal anten dizisinin uzak alan yayılımı Dizi Faktörü (Array Factor) olarak tanımlanır. Dizi Faktörü antenin Ağırlık Vektörü (Weight Vector) ile istikamet vektörünün içsel çarpımından (Inner Product) oluşur (Denklem 1.6). Ağırlık Vektörü her bir anten elemanına uygulanan genlik ve faz uyarımını ifade etmektedir.[37]

$$f(\phi, \theta) = \sqrt{N} \times \bar{w} \times \bar{a} \quad (1.6)$$

Yukarıda yer alan denklemlerde yer alan “f” dizi faktörünü, “ \bar{a} ” istikamet vektörü, “ \bar{w} ” uyarım katsayısını, “ λ ” taşıyıcı frekans dalga boyunu, “d” antenler arası mesafeyi, “N” toplam anten elemanı sayısını, “n” dizide kaçınıcı anten elemanı olduğunu ifade etmektedir.

Farklı anten sayılarına ve antenler arası mesafelere göre değişen anten dizi faktörleri

Şekil 1.10'da yer almaktadır[37].

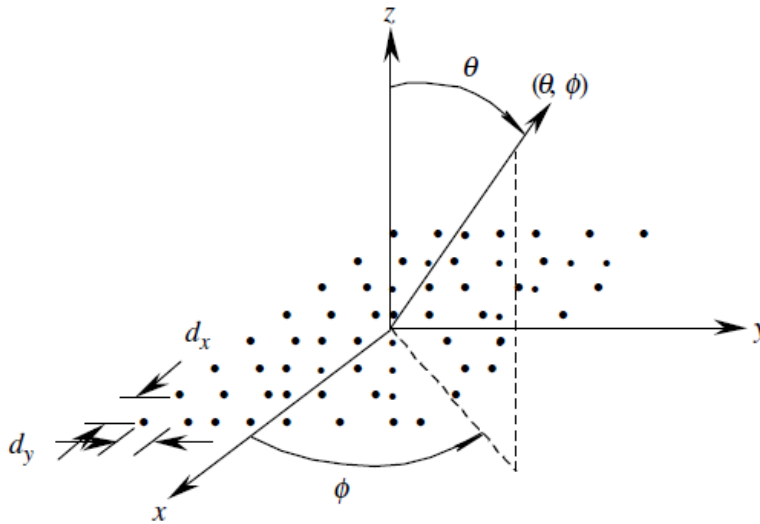


Şekil 1.10 : Farklı Konfigürasyonlarda Dizi Faktörü. [37]

Şekil 1.10 a ve b'den de anlaşılacağı üzere anten sayısının artması ana huzmenin daha dar olmasına aynı zamanda daha fazla enerjinin belirlenen istikamette ilerlemesine neden olmaktadır. Bu durum Dizi Kazancı (Array Gain) olarak tanımlanmaktadır.

1.4.1.2 Düzlemsel Dizi (Planar Array) Antenleri

Doğrusal dizi anten sisteminde sadece 2 boyutlu bir huzme taraması yapabilirken düzlemsel dizi anten sisteminde hem “ θ ” hem de “ ϕ ” açılarında huzme taraması imkânı bulunmaktadır, yani 3 boyutlu bir tarama yapılabilmektedir. “XY” düzleminde $M \times N$ boyutlarından düzlemsel anten dizisi Şekil 1.11’de yer almaktadır [28].



Şekil 1.11: Düzlemsel Anten Dizisi. [28]

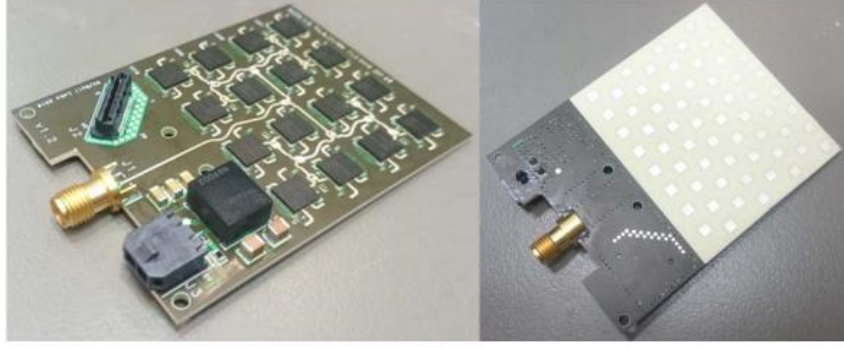
Düzlemsel Dizi Antenin dizi faktörü doğrusal dizi anten yapısına benzer şekilde türetilbilir olup aşağıda yer alan denklem serisinde olduğu gibidir.

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{1}{NM}} \times \left[1, \dots, \dots, e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)d \sin \theta [(M-1) \cos \phi + (N-1) \sin \phi]} \right]^T \quad (1.7)$$

$$f(\phi, \theta) = \sqrt{N} \times \bar{w} \times \bar{a} \quad (1.8)$$

Son yıllarda 5G için özellikle 28 GHz ve 39 GHz bantlarında faz dizili antenlere yönelik ilgi artmaktadır. Genellikle mini/mikro İHA'lar için yama ve mikroşerit anten yapıları tercih edilmektedir. Çünkü bu tip antenler boyut, ağırlık, maliyet, üretim ve entegrasyonu bakımından avantajlılardır.

Bu çerçevede [38]'de Risto Valkonen, 5G teknolojisi için bütünleşik 28 GHz faz dizili anten yapımına yönelik uygulamalı çalışmaya yer vermiştir. Anten ticari olarak piyasada bulunan parçalarla üretilmiştir. Bu yapı, 26-29 GHz bandında çalışan 64 anten elemanı ve her biri 4 anten elemanını kontrol eden 16 adet quad-core active TRX MMIC' ten oluşmaktadır. Bu antene ait fotoğraf Şekil 1.12'de yer almaktadır.



Şekil 1.12 : 64 Elemanlı 28GHz Anten.

1.4.2 Analog Huzme Şekillendirme (Beamforming)

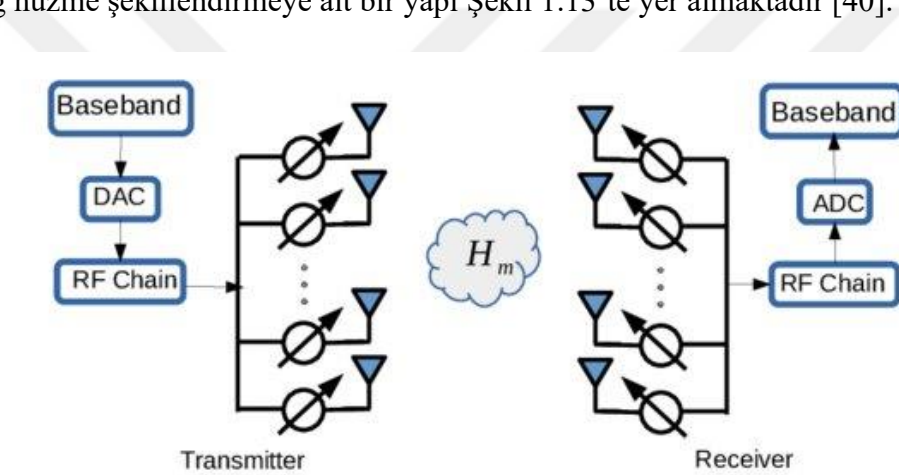
Milimetrik dalganın haberleşme alanında büyük bant genişlikleri sağlaması ve yüksek frekansta olması nedeniyle daha küçük bileşenlerin kullanılmasına imkân vermesi açısından avantajları olmasına rağmen özellikle yol kaybı, atmosferik etkiler, yağış ve engel nedeniyle meydana gelen kayıpların klasik haberleşme frekanslarına nazaran daha fazla olması nedeniyle haberleşme mesafesinde önemli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıpların telafisi bakımından anten boyutlarının çok küçük olması avantajını da kullanarak huzme şekillendirme kullanılabilir.

Huzme Şekillendirme, yoğunlaştırılmış ve yönlendirilmiş huzme oluşturmak için anten elemanlarının fazlarının uyarlanabilir bir şekilde uyarımına dayanan dizi sinyal işleme tekniği olarak ifade edilebilir [39]. Kısaca birden fazla antenden oluşan bir göndermeçten kullanıcıya sinyal göndermek için kullanılan çeşitli teknikler şeklinde de ifade edilebilir. Bu noktada amaç istenilen kullanıcıya aktarılan sinyalin gücü

artırılır ilen söz konusu sinyalin aktarılması istenemeyen kullanıcılarda yaratacağı girişimi minimum seviyeye indirgemektir. Huzme Şekillendirme hem alıcıda hem de vericide kullanılabilir.

Bir önceki bölümde aktarıldığı üzere anten sayısı ile sinyalin istenilen istikamette daha fazla yol alması arasında doğru orantı, huzmenin genişliği ile ters orantı bulunduğu aktarılmıştır. Milimetre dalga bu bakımdan çok verimli bir ortam sağlamaktadır. Çünkü milimetre dalgada anten boyutlarının küçük olması nedeniyle 100 ve üzerinde anten çok kolaylıkla bir platform üzerinde toplanabilmektedir. Bu nedenle hem istenilen istikamette SNR artırılabilir, istenmeyen istikametlerde oluşabilecek girişim minimuma indirgenebilir.

Analog huzme şekillendirmeye ait bir yapı Şekil 1.13'te yer almaktadır [40].

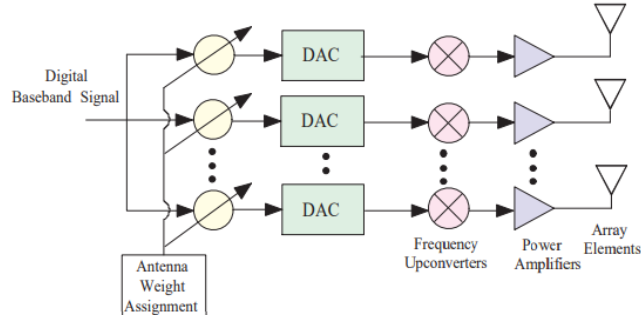


Şekil 1.13 : Analog Huzme Şekillendirme Modeliyle MM Dalga Modeli.

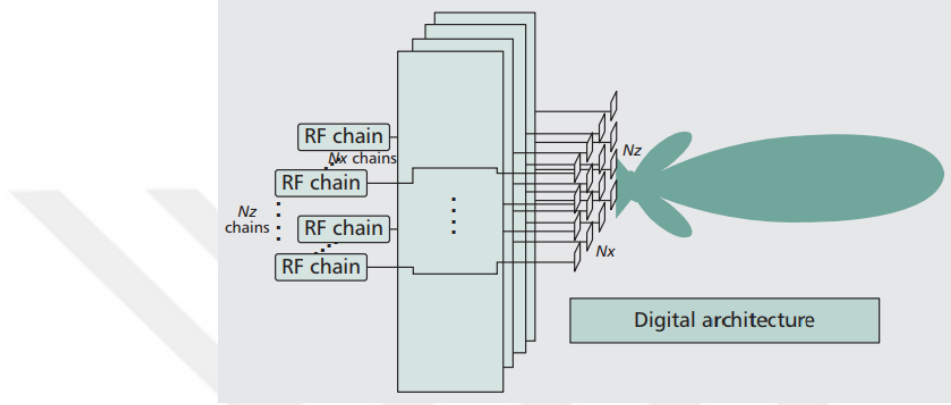
Analog huzme şekillendirmede Şekil 1.13'te de görüldüğü üzere bir adet RF zinciri bulunmakta ve sadece bir sinyal tüm antenlere gönderilmektedir. Anten elemanlarından önce bulunan faz kaydırıcılar vasıtasıyla sinyal istenilen istikamette yönlendirilebilir. Analog huzme şekillendirmede dikkat edilmesi gereken husus sadece bir sinyal için bir ana lob oluşturulabilir. Diğer yöntemlere nazaran maliyet-etkin bir yöntemdir.

1.4.3 Dijital Huzme Şekillendirme / Önkodlama

Dijital huzme şekillendirmede farklı sinyaller her bir anten elemanı için dijital devrede düzenlenmekte olup dijital huzme şekillendirmeye ait şema Şekil 1.14 [41] ve 1.15'te [39] yer almaktadır.



Şekil 2.14 : Dijital Huzme Şekillendirme-1.



Şekil 2.15 : Dijital Huzme Şekillendirme-2.

Şekil 1.14'te de görüldüğü üzere analog huzme şekillendirmeden farklı olarak sinyalin faz kayması ve genliği sistemin dijital tarafında gerçekleşmektedir. Bu şekilde farklı antenlere ve farklı frekans bantlarına veya alt taşıyıcılarına farklı güç ve fazlar atanabilir. Bu durum da gerçekten sistem üzerinde büyük bir esneklik sağlamaktadır [42].

Analog huzme şekillendirmede sadece bir ana huzme elde edebilirken, dijital huzme şekillendirmede birden fazla ana huzme elde edilebilir. Şekil 1.15'ten de anlaşılacağı üzere farklı sinyaller farklı kullanıcılara aktarılabilir. Bu durum Uzamsal Çoklama (Spatial Multiplexing) olarak da adlandırılmaktadır. Dijital huzme şekillendirme aynı zamanda önkodlama olarak da tanımlanmaktadır.

Dijital huzme şekillendirme her bir anten için ayrı ayrı RF zinciri gerektirmesi bakımından maliyeti etkin bir yapısı yoktur.

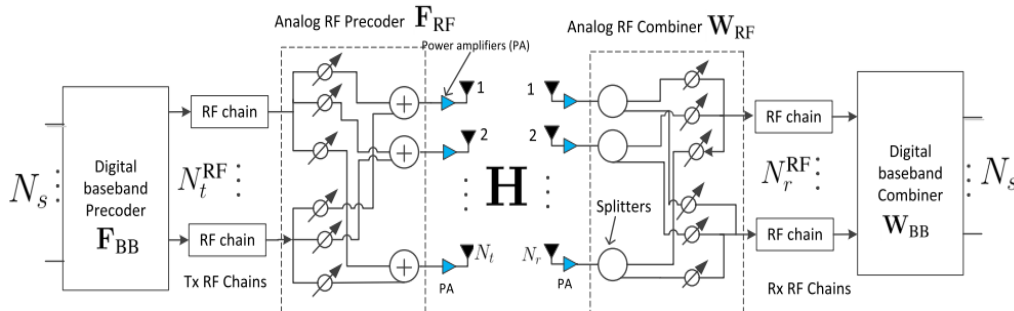
1.4.4 Hibrit Huzme Şekillendirme (Hybrid Beamforming)

Dijital huzme şekillendirmede sinyalin hem genliğinin hem de fazının dijital bölgede ayarlayabilmesi avantaj sağlamasına rağmen milimetre dalgada uygulanacak çözümlerde çok fazla anten elemanının kullanılmasının planlanması nedeniyle her bir

anten elemanı için ayrı ayrı RF zinciri planlanması maliyet-etkin olmayacaktır. Bunun yanında özellikle bu yapının mini/mikro İHA sistemlerinde kullanılacağı düşünüldüğünde her bir anten elemanı için bir RF zinciri kullanılması hem kaplayacağı yer hem de kullanacağı enerji miktarı düşünüldüğünde çok da uygulanabilir çözüm olarak ortaya çıkmamaktadır.

Bu nedenle hem dijital huzme şekillendirme hem de analog huzme şekillendirmenin uygulanabilir özellikleri bir araya getirilerek hibrit bir yapı ortaya konulmuş olup özellikle milimetre dalga haberleşme için son yıllarda büyük ilgi toplamıştır.

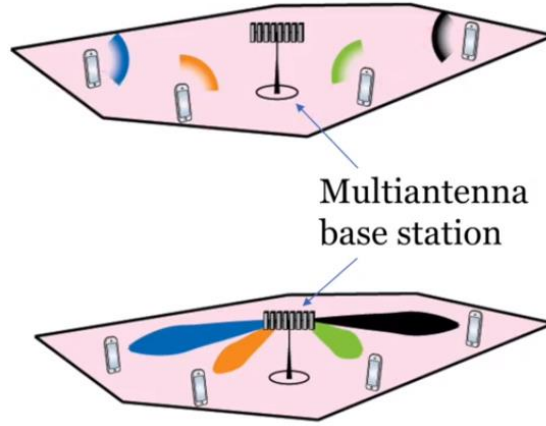
Hibrit huzme şekillendirme yönteminde RF zinciri sayısı anten elemanı sayısından çok daha azdır. RF zincirlerin her biri tüm anten elemanlarına bağlı olabileceği gibi bu RF zincirler sadece kendileri için belirlenmiş anten elemanlarına da bağlı olabilirler. Bunun yanında hibrit huzme şekillendirme tekli kullanıcı ve çoklu kullanıcı olarak ikiye ayrılabilir. Hibrit huzme şekillendirmesine ait yapı Şekil 1-16'da yer almaktadır.



Şekil 1.16 : Hibrit Huzme Şekillendirme.[23]

1.4.5 Yoğun MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Yoğun MIMO bir tür çok kullanıcı (Multiple User) MIMO sistemidir. Öncelikle Yoğun kelimesi burada baz istasyonunun çok elemanlı anten dizisine sahip olmasını ifade etmektedir. Yoğun MIMO baz istasyonunun çoklu anten dizisine sahip olması nedeniyle birçok kullanıcıya aynı anda aynı frekanstan hizmet sağlama olanağı sağlamaktadır.

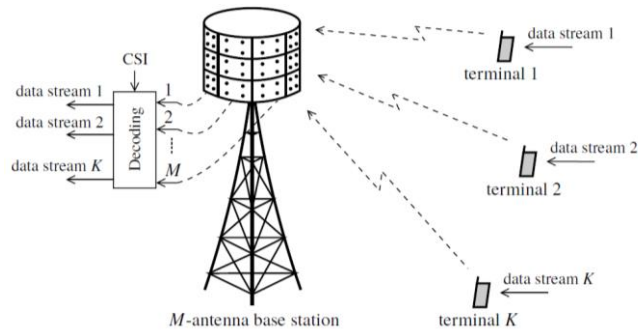


Şekil 1.17 : Çok Kullanıcı MIMO Sistemi.

Çok kullanıcı MIMO sisteminde çoklu anten sistemine sahip bir baz istasyonu ve bu baz istasyonunun hizmet sağladığı birden fazla kullanıcı vardır (Şekil 1.17). Kullanıcılarda genellikle tek bir veya az sayıda anten bulunmaktadır. Bu sistemde Uplink (Yukarı Gönderim) ve Downlink (Aşağı Gönderim) olmak üzere iki senaryo mevcuttur. Yukarı gönderim senaryosunda data akışı kullanıcıdan baz istasyonuna doğru olmaktadır, yani birçok noktadan MIMO yapısına doğru oluşmaktadır. Aşağı gönderim senaryosunda ise bunun tam tersi meydana gelmektedir. MIMO anten yapısının bulunduğu baz istasyonundan kullanıcıların bulunduğu noktalara doğru veri akışı sağlanmaktadır.

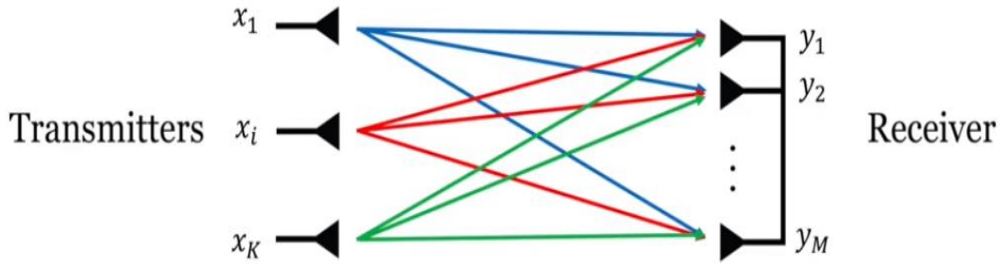
Yoğun MIMO'nun klasik MIMO'dan 3 temel farkı vardır. İlk olarak kanal bilgisi sadece baz istasyonu için gereklidir, ikinci olarak anten sayısı kullanıcı sayısından çok çok fazladır ve son olarak basit doğrusal sinyal işleme yöntemleri hem aşağı hem de yukarı gönderimde kullanılabilir [43].

Şekil 1.18'de gösterilen yukarı gönderim senaryosunda;



Şekil 1.18 : Uplink Senaryosu-1.[43]

K adet kullanıcının gönderdiği (x_1, x_2, \dots, x_K) sembolleri (y_1, \dots, y_M) olarak alıcı antenlerine ulaşmaktadır (Şekil 1.19).



Şekil 1.19 : Uplink Senaryosu-2.

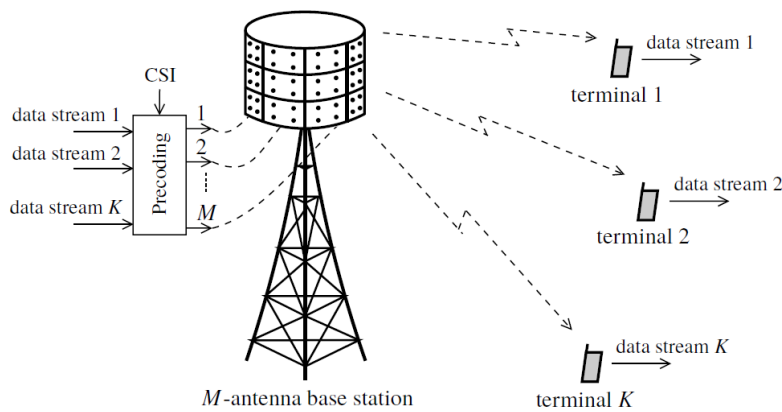
Bu durumda alınan sinyal aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho_{ul}} \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (1.9)$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & g_{K1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M1} & \dots & g_{MK} \end{pmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} \quad \mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_M \end{pmatrix}$$

Bu denklemde “ \mathbf{y} ” alınan sinyali, “ \mathbf{G} ” kanal matrisini, “ \mathbf{x} ” gönderilen sinyali, “ \mathbf{w} ” karmaşık Gauss gürültüsünü ve $\sqrt{\rho_{ul}}$ normalize edilmiş gücü ifade etmektedir. Yukarı gönderim durumunda, baz istasyonu her bir terminal tarafından gönderilen sinyali doğru olarak çözümlenmek zorundadır.

Şekil 1.20’de gösterilen aşağı gönderim senaryosunda baz istasyonu her bir kullanıcıya aynı anda farklı veri aktarımlarında bulunmaktadır.



Şekil 1.20 : Downlink Senaryosu.[43]

Kullanıcılar tarafından alınan sinyal şu şekilde ifade edilebilir;

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho_{dl}} \mathbf{G}^T \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_K \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & g_{K1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M1} & \dots & g_{MK} \end{pmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} \quad \mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_K \end{pmatrix}$$

Bu denklemde de y alınan sinyali, \mathbf{G} kanal matrisini, \mathbf{x} gönderilen sinyali, \mathbf{w} karmaşık Gauss gürültüsünü ve $\sqrt{\rho_{dl}}$ normalize edilmiş gücü ifade etmektedir.

Aşağı gönderim durumunda, baz istasyonu her bir terminalin kendisine ait sinyali almasını temin etmelidir. Baz istasyonunda sinyal işleme hem çok anten sayısına sahip olması hem de kanal bilgisine sahip olması ile sağlanabilir. İyi bir kanal bilgisi baz istasyonu için çok kritiktir.

1.5 Literatür Araştırması

Son yıllarda özellikle kablosuz ağların kullanımında büyük bir gelişme yaşandığı, kablosuz ağ temelli uygulamaların günlük yaşam, güvenlik ve askeri alanda arttığı çok net bir şekilde gözlemlenmektedir. Mevcut kablosuz ağların, yeni uygulama alanları ve yeni ihtiyaçlara yönelik gerekli servisi sağlamada yetersiz kalabileceği tüm çevreler tarafından öngörülmektedir. Bu nedenle çeşitli alanlarda veri akışını artırmaya yönelik birçok çalışma yapılmış ve halen de devam etmektedir. Bu çalışmalardan çok fazla bant genişliği sağlama, huzme şekillendirme ve yoğun MIMO'ya imkân vermesi açısından milimetre dalgada haberleşme özellikle dikkat çekmektedir.

Bunun yanında İHA'lar veya dron tabir edilen sistemler tedarik, işletme ve bakım giderlerinin az olması ve kolaylıkla karasal etkilere maruz kalmadan istenilen bölgede diğer alternatiflerine nazaran daha çabuk sürede konuşlandırılabilmesi nedeniyle bu tür sistemlerin sivil ve askeri alandan farklı amaçlarla kullanımı yaygınlaşmıştır. Dronların kullanıcılara daha iyi kapsama alanı, bağlantı sağlama ve kolayca konuşlandırılabilmesi açısından haberleşme sistemlerinde, özellikle baz istasyonlarının bir şekilde hizmet göremez hale gelmesi veya gerekli hizmeti anlık olarak sağlayamaması durumunda kullanımı üzerine çalışmalar artarak devam etmektedir.

Hem milimetre dalganın hem de İHA sistemlerinin haberleşme sistemleri açısından avantajları bulunmasıyla milimetrik dalgada İHA baz istasyonları çalışmalarının popülaritesi artmaktadır. Ancak milimetrik dalgada yol, atmosfer vb. çeşitli kayıpların 6 GHz bandının altında yer alan klasik haberleşme frekanslarına nazaran daha fazla

olması, İHA'ların taşıma kapasitelerinin ve enerjilerinin kısıtlı olması ve İHA'ların çeşitli etkenler nedeniyle sabit bir noktada durmakta zorlanması gibi dezavantajları bulunması nedeniyle literatürde genellikle bu dezavantajları ortadan kaldırmaya yönelik çalışmalar yer almaktadır.

[44] numaralı çalışma kapsamında yazarlar "Over sea","Rural","Suburban" ve "Urban" ortamlarında 28 GHz ve 60 GHz'de 2 m. 50 m. 100 m. ve 150 m.'lerde İHA ile karadan havaya gelen kanalın ölçümü yapılmıştır. Çalışma çerçevesinde "Ray Tracing" benzetimi kullanılmış ve bu benzetimde İHA 15 m/sn ile hareket ettirilmiştir. Benzetim dayann sonuçlarda alınan sinyal gücünün (RSS) "Two Ray Propagation" modelini takip ettiği gözlemlenmiştir.

Benzetim çerçevesinde; mesafeye göre sinyal gücünde azalmanın 60 Ghz.de 28 GHz'e göre daha fazla olduğu 1 km. mesafede yaklaşık 20 dBm'lik bir fark meydana geldiği, İHA'nın irtifası arttıkça Görüş Alanı (LoS) ihtimalinin arttığı, "Urban" alanında İHA irtifası arttıkça yüksek binalardan kaynaklanan saçılımlar nedeniyle RMS-DS (Root Mean Square Delay Spread) arttığı, diğer ortamlar için bu tür bir olgunun söz konusu olmadığı gözlemlenmiştir.

[45] numaralı çalışmada yazarların başlıca amacı 2 İHA arasında oluşturulacak olan linkte İHA'ların sürekli hareketli olmaları nedeniyle huzmelerin hizalanmasında oluşan probleme çözüm üretecek yapıyı sunmaktır. Çalışma çerçevesinde bu problemi çözmek için Düzlemsel Anten (UPA) ile gelişmiş huzme dizaynı sunulmaktadır. İHA'lar arasında LOS hakim olması nedeniyle buna uygun bir kanal modeli yapılan benzetimde seçilmiştir. Çalışma çerçevesinde huzmenin salınım yapacağı göz önünde bulundurularak optimal önkodlama vektörü geliştirilmiş, bu vektör ile optimal huzmeyi elde etmek için OMP (Orthogonal Matching Pursuit) algoritması kullanılmıştır.

[46] Numaralı makalede yazarlar tarafından;

- a. Anten elemanlarının artışının oluşturulacak olan huzmeye etkisi hakkında fikir sağlamak ve İHA tarafında kesinti ihtimalini ortaya koymak,
- b. Anten dizisinin boyutları arttıkça yüksek doğrulukta huzme takibinin önemini vurgulamak,
- c. Baz istasyonu tarafında anten tasarlarken İHA'nın irtifasının göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermek,

d. İHA tarafından tecrübe edilen devir (handover) sayısına olan farklı anten dizi topolojilerinin etkisini işaret etmek hedeflenmiştir.

Bu çalışma kapsamında kullanıcıdaki alınan sinyal seviyesini tespit için 3GPP kanal modeli uygulanmıştır. Uygulama alanı olarak Belçika'nın Leuren şehrindeki baz istasyonları temel alınmış olup her bir baz istasyonun 3 veya 4 sektörü bulunmaktadır. Senaryoya göre İHA'lar sabit irtifada olmak üzere 40m ve 150m yükseklikten düz bir hat boyunca 14m/s hızla Leuren Şehrinin üzerinden uçuş gerçekleştirmiştir. Bu benzetimde 64 ve 128 elemanlı anten dizileri karşılaştırılmıştır. 8X8 ve 16X16'lık anten dizilerinde sırasıyla kazanç 26.1 dBm ve 32.1 dBm ve 3dB huzme genişliği ise 18 derece ve 10 derece olduğu tespit edilmiştir. Kapsama alanındaki kesinti durumu ele alındığında aynı irtifada 16X16'lık antenin 8X8'lik antene göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

[47] Çalışma kapsamında oluşturulan sistemde Hibrit Huzme Şekillendirme uygulanmıştır. Buna göre, her bir antenden gelen sinyali huzme doğrultusunda yönlendirmek için analog faz kaydırıcılarla kontrol edilen analog huzme şekillendirici ve bu analog huzme şekillendirici RF zincirinin azaltılması yoluyla dijital önkodlamaya bağlanmıştır. Çalışma kapsamında, İHA'nın baz istasyonu gibi davrandığı temel alınarak düzlemsel anten (UPA) yapısı ile donatıldığı kabul edilmiştir. Yer kullanıcısı ise tek bir antene sahiptir. İHA baz istasyonunda 1 adet RF zinciri bulunmakta olup tüm antenler analog faz kaydırıcıyı kullanarak bu RF Zincire bağlanmıştır. LoS şartları varsayılmış ve buna uygun olarak kanal modeli belirlenmiştir.

Kod Kitabı tasarlanması iki bölümde ele alınmıştır. İlk olarak Yetersiz Eğitimle Kod Kitabı tasarımı. Eğitim Huzmelerinin sayısının "x" eksenine doğrultusundaki anten elemanlarının sayısından küçük olması durumunda kullanılacak tasarımdır. Aksi durumda ise Yeterli Eğitim ile Kod Kitabı Tasarımı kullanılacaktır. Bu kapsamda yapılan benzetim çerçevesinde; oluşturulan kod kitabı tasarımlarıyla geleneksel metotlara göre ortalama veri aktarım kapasitenin arttığı, özellikle bu durumun da düşük SNR bölgelerinde gözlemlendiği tespit edilmiştir.

[48]'de yazarlar İHA platformundan mmWave haberleşmesi ele alınmış olup, İHA baz istasyonunun yerdeki çok kullanıcıya hizmet vereceği farz ve kabul edilmiştir. Bu çerçevede hem İHA baz istasyonunun yerleşimi hem de huzme şekillendirme yöntemi

sistemdeki veri akışı için önem arz etmektedir. Bu sebeple problem, kullanıcıların toplam aldıkları datalarının maksimize edildiği, her bir kullanıcı için minimum akış kısıtlaması (Minimum Rate Constraint) olduğu, İHA baz istasyonunun pozisyon kısıtlaması olduğu ve huzme şekillendirme vektörü için de constant-modulus (CM, sabit büyüklük) kısıtlaması olduğu varsayılarak dizayn edilmiştir.

Toplam veri akışını enbüyükleme için hem İHA'nın konuşlanması hem de huzme şekillendirmenin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede problem iki aşamada değerlendirilmiştir; ilk olarak, hem toplam veri aktarımını maksimize edecek, hem de her bir kullanıcı için minimum servisi sağlayacak İHA konumlama noktasının tespit edilmesi ve ardından "Artificial Bee Colony" (ABC) algoritması kullanılarak huzme şekillendirme vektörünün dizayn edilmesidir.

Dokümanda 2-D Huzme Şekillendirme başlığı altında, Kanal tepki vektörü, Görüş Alanı (LoS) ve Görüş Alanı Dışı (NLoS) ihtimalleri, LoS durumun kanal tepkimesi, NLoS durumunda kanal tepkimesi belirlenmiştir. 3-D Huzme şekillendirme kapsamında, UPA için genel bir kanal tepkimesi tanımlanmıştır. Yapılan benzetimin değerlendirmesi kapsamında;

- a. Senaryo kapsamında İHA baz istasyonunun birden çok kullanıcıya 28 GHz. taşıyıcı frekansında kentsel alanda servis sağlayacağı kabul edilmiştir.
- b. Rastgele konumlama ile optimal konumlama arasında toplam veri akışında yaklaşık 20 bps/hz bir fark meydana geldiği tespit edilmiştir.
- c. İHA'nın yüksekliğine göre yapılan analizde İHA'nın 150 metreyi geçmesinden sonra toplam veri akışının düştüğü görülmüştür.

[49]'da yer alan çalışmada yazarlar İHA baz istasyonunda milimetre dalga haberleşmesi çerçevesinde özellikle analog huzme şekillendirme ve hibrit huzme şekillendirme yöntemlerini enerji tüketimi açısından karşılaştırarak bunlara analitik bir ifade sağlamıştır. Buna ilave olarak İHA baz istasyonunun milimetre dalgada haberleşmesinde ergodik kapasitesinin matematiksel ifadesini ortaya koymuştur. Bu çalışma çerçevesinde kapsama alanı ve enerji tüketiminin birbirlerine etkisi incelenmiştir. Yazarlar spektral etkinliği kaybetmeden enerji tüketimini minimize edecek en uygun huzme şekillendirme stratejisini de sunmuşlardır.

Söz konusu çalışma kapsamında benzetim 28 GHz frekansında 1 GHz bant genişliğinde, düzgün düzlemsel anten yapısı ile 1000 m² yarı çapındaki alanda

yüksekliği 10m ve 100m arasında değişen duraklama pozisyonundaki İHA baz istasyonu için gerçekleştirilmiştir. Bu alışma sonucunda dizi büyüklüğünün ve dijital önkodlama biriminin artması toplam g tüketimini arttırdığı, İHA'nın yüksekliği arttıka g tüketiminin azaldığı, hibrit huzme şekillendirmenin analog huzme şekillendirmeye nazaran daha az g tüketimi olduğu, ergodik kapasitesinin İHA yaklaşık 40 ile 60 m. kadar yükselerek arttığı bu ykselikten sonra azda olsa azalma eğiliminin olduğu tespit edilmiştir.

[50]'de yer alan çalışmada milimetre dalga bazlı İHA baz istasyonundan kablosuz kullanıcılara 3 boyutlu yönlü kapsama alanı kullanıcıların İHA'nın görüş alanında olacak şekilde yani tamamen LoS durumunu sağlayacak şekilde modellenmiştir. Bu noktada problem öncelikle İHA'nın konumlanması ve müteakibinde kullanıcıya doğru görüş alanını sağlayacak şekilde antenin yönlendirilmesi şeklinde tanımlanmiştir. Bu şekilde LoS kapsaması garanti edilmekte, doğal olarak SNR maksimize edilmekte ve ihtiyaç duyulabilecek İHA sayısı minimize edilmektedir.

Milimetrik dalganın doğası gereği insan gibi bazı kk objeler LoS'u bozabilir. İHA baz istasyonlarının konuşlanmasının planlanmasında bu durum kritiklik arz etmektedir. Bu çerçevede [51]'de yazarlar İHA baz istasyonlarının konuşlanmasına insanların milimetre dalgayı engelleme durumunu incelemişlerdir.



2. GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMANIN LİTERATÜRE KATKISI

5G ve mmDalga haberleşmesiyle birlikte İHA'lar mobil baz istasyonu olarak büyük önem kazanmıştır. Özellikle alt yapının zarar görmesi veya anlık olarak duruma binaen ihtiyaç duyulacak artan veri akışı talebinin karşılanması bakımından İHA baz istasyonları önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çerçevede daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde İHA baz istasyonlarının yerleşimi genellikle 6 GHz frekansının altında gerçekleştirilen haberleşme yöntemleri ile çalışılmış, milimetre dalga haberleşmesinde kullanımı ile ilgili olarak tek bir İHA baz istasyonu üzerinde çalışma gerçekleştirilmiş ve buna uygun olarak yerleşim ve kanal modeli belirlenmiştir.

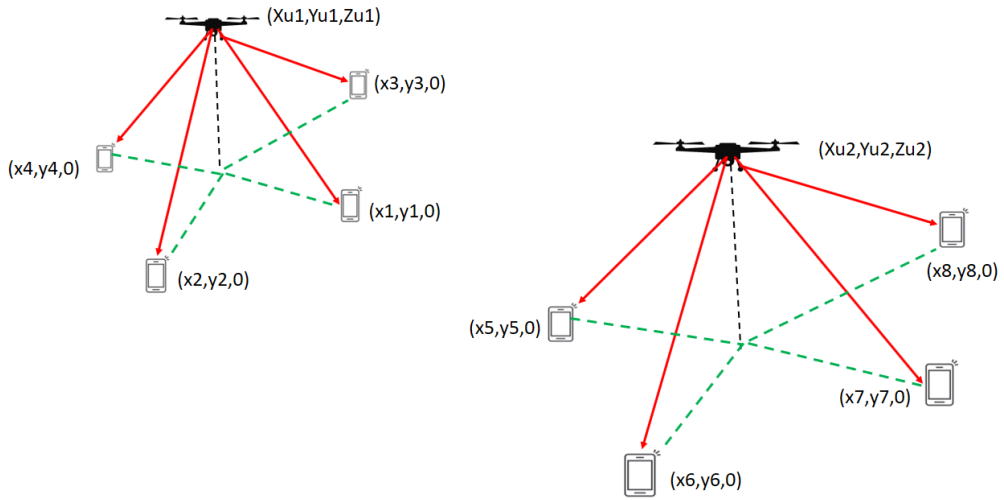
Bu tez kapsamında yapılan çalışmada ise milimetre dalganın özelliğinden dolayı geniş alanları kapsayamayacağından kapsanmak istenilen alan için çok sayıda İHA'ya ihtiyaç duyulacağı varsayımına dayanmaktadır. Bu çerçevede yaptığımız çalışma kapsamında alanda duyulan ihtiyaca göre birden çok İHA'nın konuşlanması incelenmiş olup konuşlanmanın uygun şekilde yapılabilmesi için K-Means algoritması kullanılmıştır. Bunun yanı sıra İHA baz istasyonların hizmet verdiği kullanıcı sayısı ve bu kullanıcıların pozisyonuna göre her bir İHA'nın ayrı ayrı yüksekliklerini hesaplayacak bir çözümde çalışma kapsamında sunulmuştur. Ayrıca Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) İHA'ların optimal lokasyonu bulunarak elde edilen veriler diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bunlara bağlı olarak milimetre dalgada İHA'lardan kullanıcılara çoklu kanal modeli de oluşturulmuştur.

Bu çalışmada literatürden farklı olarak dron baz istasyonunun milimetrik Dalga'da çalıştığı ve yüksek sayıda anten elemanı içerdiği varsayılmıştır. Bunun yanında diğer bir katkı olarak baz istasyonunun birden fazla RF zincirine sahip olduğu ve birden fazla kullanıcıya aynı anda hizmet verebildiği varsayılmıştır. Dolayısıyla, baz istasyonunun çoklu kullanıcı için ön kodlama vektörleri bir optimizasyon yöntemiyle tasarlanmış ve aynı baz istasyonuna bağlanan kullanıcıların birbirine girişim yaratmaması sağlanmıştır. Bunun yanında daha düşük karmaşıklıkta bir yöntem de önerilmiş ve benzetimlerle başarımlar değerlendirilmiştir. Sonuçlar grafiklerle sunulmuş ve yorumlanmıştır.



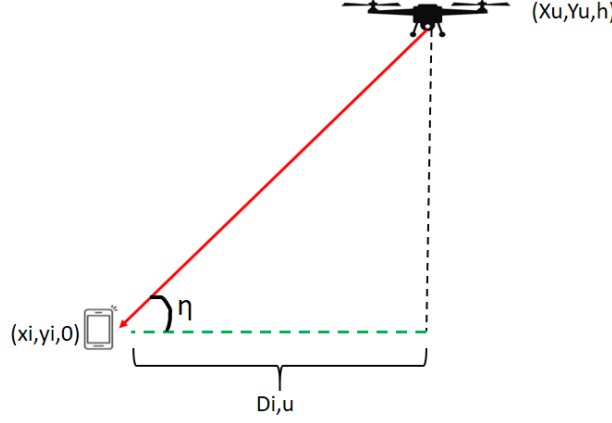
3.SİSTEM VE KANAL MODELİ

Öncelikle sistem modelimiz birden çok İHA'dan ve İHA sayısından çok daha fazla kullanıcıdan oluşmaktadır. Kullanıcılar belirlenen alanda tekdüze rastgele olarak dağılmışlardır. Sistemde her bir kullanıcı $(x, y, 0)$ koordinatı ile yerleştirilir. Her bir kullanıcının tek bir anteni vardır. İHA baz istasyonları önce sabit bir yükseklikte konuşlandırılmakta müteakiben değişken yükseklikte konuşlandırılmaktadır. Bu noktada mini/mikro sınıfı İHA'ların duraklama (hover) konumunda havada sabit bir koordinatta hareketsiz kaldığı, rüzgâr, fırtına vb. hava şartlarından etkilenmediği varsayılmaktadır. İHA'lar çoklu anten sistemine sahip olup kapsadığı alana dik olarak yerleştirilmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Sistem Modeli.

İHA'nın koordinatının (x_u, y_u, z_u) olduğu varsayıldığında bu durumda İHA'ların kullanıcılara olan yatay mesafesi Şekil 3.2'de yer alan geometrik durum baz alınarak Denklem 4.1 ile hesaplanabilir.



Şekil 3.2 Yatay Mesafe.

$$D_{i,u} = \sqrt{((x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2)} \quad (3.1)$$

Bu durumda kullanıcıdan İHA baz istasyonuna olan yükseliş açısı derece cinsinden Denklem 3.2 ile hesaplanabilir.

$$\eta_i = \arctan\left(\frac{h}{D_{i,u}}\right) \quad (3.2)$$

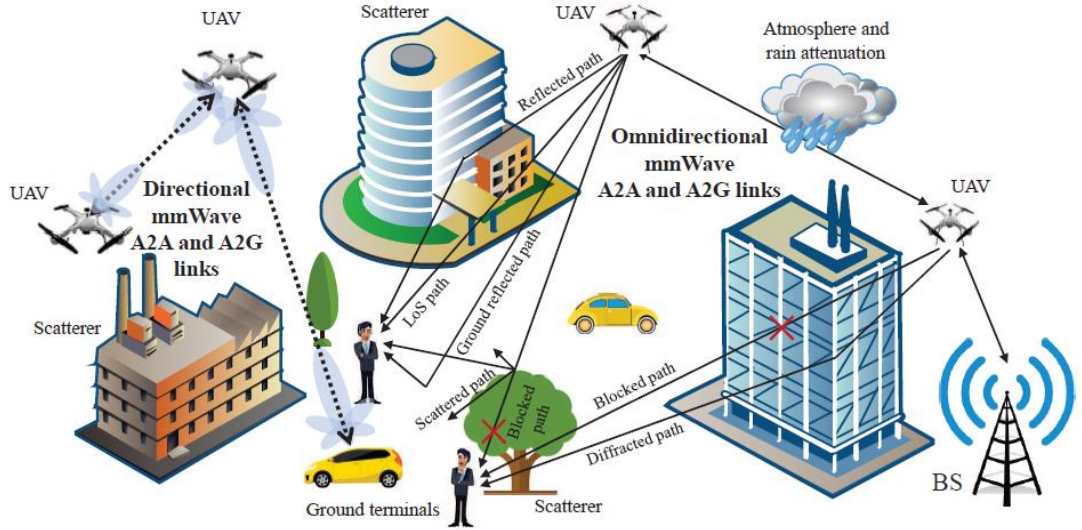
İHA baz istasyonunda eşit aralıklı düzlemsel anten bulunacak olup $N \times N$ boyutunda olacak, anten elemanları arasındaki mesafe dalga boyunun yarısı olacaktır. İHA baz istasyonunun gücü “P” olacaktır. İHA baz istasyonunda yapılacak olan huzme şekillendirme kanal bilgisinin tam olarak baz istasyonu tarafından bilindiği varsayımına dayanacaktır.

İHA baz istasyonundan “i” kullanıcıya olan $N^2 \times 1$ huzme şekillendirme vektörünün

$$\mathbf{w}_{i,u} = [w_{i,u,1}, w_{i,u,1}, \dots, w_{i,u,N^2}] \in \mathcal{C} \text{ olduğu varsayılmaktadır.}$$

“ $\mathbf{w}_{i,u}$ ” vektörünün her bir elemanın mutlak değerinin aynı olması sağlanmaktadır, yani $|\mathbf{w}_{i,u,n}| = \frac{1}{N} \forall n = 1, \dots, N^2$ olacaktır (“n” her bir anten elemanı ifade etmektedir). Bu husus “constant modulus” kısıtlaması olarak ifade edilmektedir. Bu sistemde RF zinciri sayısı toplam anten elemanı sayısından çok daha az olacaktır ($K_{max} \ll N^2$).

Telekomünikasyon sistemlerinin tasarlanmasında kanal modeli önemli bir yer teşkil etmektedir. İHA baz istasyonları ile yer kullanıcıları arasındaki milimetre dalgadaki kanal modeli klasik haberleşme sistemlerinin kanal modellerinden farklılık arz eden hususları mevcuttur. İHA milimetre dalga haberleşme senaryosunu ve buna karşılık gelen yayılım karakteristiğini canlandıran çizim Şekil 3.3’de yer almaktadır [37].



Şekil 3.3 Haberleşme Senaryosu ve Yayılm Karakteristiği.

İHA ve kullanıcılar arasındaki milimetre dalgada kanal modeli üzerine olan çalışmalar halen başlangıç seviyesinde olmasına rağmen aşağıda yer alan hususlar mm dalgada kanal modelinin genel karakteristiği ortaya koymaktadır.

Milimetrik dalgada haberleşme klasik haberleşme ile karşılaştırıldığında önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere geniş bant genişlikleri ve yol, atmosfer, engel vb. kayıpların daha fazla olması ile ön plana çıkmaktadır. Ancak bunların yanında milimetre dalgada etkili çoklu yol bileşenlerin çok kısıtlı olup NLoS durumunda sinyal gücünde bariz düşüşlere neden olmaktadır. Bu nedenle kullanıcının LoS durumunda olup olması Denklem 3.3'e göre belirlenmiştir [52].

$$P_{LoS,i} = \frac{1}{1+a \exp(-b(\eta_{i,u}-a))} \quad (3.3)$$

Burada a ve b değişkenleri model parametresi olup tecrübi değerlere dayanmaktadır.

“i” bağlantısı için $N^2 \times 1$ kanal vektörü “ $h_{i,u}$ ” Denklem 3.4’te tanımlanmıştır.

$$h_{i,u} = \sum_{l=1}^{L_i} \lambda_{i,u,l} \mathbf{a}(N, N, \theta_{i,u,l}, \phi_{i,u,l}) \quad (3.4)$$

“ L_i ” : “i” bağlantı notası için yol sayısını, $\lambda_{i,u,l}$: “u” İHA baz istasyonundan i bağlantı noktasına olan “l” yolunun karmaşık Gauss kanal katsayısını, “ $\theta_{i,u,l}, \phi_{i,u,l}$ ” ise sırasıyla İHA’dan “l”nci yolun yatay ve yükseliş ayrılma açısını ifade etmektedir. $\mathbf{a}(N, N, \theta_{i,u,l}, \phi_{i,u,l})$ ise yönlendirme vektörünü (steering vector) ifade etmek olup ifadesi Denklem 3.5’te yer almaktadır.

$$\mathbf{a}(N, N, \theta_{i,u,l}, \phi_{i,u,l}) = \begin{bmatrix} 1, \dots, e^{j\pi \sin \theta_{i,u,l} [(n_1-1) \cos \phi_{i,u,l} + (n_2-1) \sin \phi_{i,u,l}],} \\ \dots, e^{j\pi \sin \theta_{i,u,l} [(N-1) \cos \phi_{i,u,l} + (N-1) \sin \phi_{i,u,l}]} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Sinyalin L adet yolu izleyerek geldiği kabul edildiğinden, sistem ilk yolun LoS veya nLoS olabileceğini, diğer yolların ise nLoS olacağını kabul ederek tasarlanmıştır. Bu durumda sadece 1nci yol için kanal katsayısı denklemi LoS veya NLoS olma durumuna göre Denklem 3.6’da sunulmuş olup, “ α ” LoS kayıp üsselini, “ β ” nLoS kayıp üsselini ifade etmektedir.

$$\lambda_{i,u,l} = \begin{cases} \frac{\sigma_f}{c} d_i^\alpha & \text{LoS için} \\ \frac{\sigma_f}{c} d_i^\beta & \text{nLoS için} \end{cases} \quad (3.6)$$

Benzer şekilde ilk yol hariç diğer yolların NLoS olacağı kabul edildiğinde kanal kat sayı denklemi 3.7’de yer almaktadır.

$$\lambda_{i,u,l} = \frac{\sigma_f}{c} d_i^\beta, l = 2, \dots, L \quad (3.7)$$

“ σ_f ” karmaşık Gauss rastgele değişkeni, “f” taşıyıcı frekansı ve “c” ışık hızını ifade etmektedir.

Anten örüntüsünün ifadesi Denklem 3.8’de yer almaktadır [21].

$$G(90^\circ - \eta_{i,u})dB = -\min \left[\frac{12(90^\circ - \eta_{i,u})}{70^\circ}, 20 \right] \quad (3.8)$$

Amaçlanan istikamete, İHA baz istasyonunun anteninin maksimum kazanç ekseninde oluşan farkı yansıtmak için anten örüntüsünün kare kökü ile kanal kazancı $h_{i,u}$ çarpılır.

Yapılan çalışmada gönderici tarafından kanal durumu bilindiği ve nLoS durumunda etkili bir gönderimin mümkün olmadığı kabul edilmektedir.

Her bir kullanıcı i ve bu kullanıcının bağlı olduğu İHA baz istasyonunun ise u_i olarak tanımladığımızda Sinyalin enterferans ve gürültüye oranı (Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)) Denklem 3.9’da yer almaktadır.

$$SINR_i = \frac{P |h_{i,U_i}^H w_{i,u_i}|^2}{N_0 + P |h_{i,U_k}^H w_{i,u_k}|^2}, i = 1, \dots, K \quad (3.9)$$

Bu durumda ulaşılabilecek veri akış hızı $R_i(w_{i,u_i}) = \log_2(1 + SINR_i)$ olur. Buradaki amacımız hem İHA'ların konuşlanması hem de en optimal huzme şekillendirmenin sağlanmasıyla logaritmik olarak maksimum veri akış hızına ulaşabilmektir. Logaritmik olarak maksimum veri akışı kullanıcılar arasında orantısal olarak adaletli dağılımı göstermektedir. Yapılan çalışma her bir İHA için sınırlı sayıda RF zinciri olduğu kıstasına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Her bir kullanıcının bağlandığı İHA baz istasyonunu tanımlamak için ikili sayı sistemi tanımlanmıştır. Eğer kullanıcı i İHA baz istasyonu u 'ya bağlı ise $X_{i,u} = 1$ olur. Bu durumda;

$$x_{i,u} \in \{0,1\}, \forall i = 1, \dots, K, u = 1, \dots, U \quad (3.10)$$

Logaritmik maksimum veri akışı amaçlanmaktadır;

$$\max_{x_{i,u}, w_{i,u_i}, c_u \forall i,u} \left\{ \sum_{i=1}^K \sum_{u=1}^U x_{i,u} \log(R_i(w_{i,u_i})) \right\} \quad (3.11)$$

Maksimizasyonun sınırlandırılmasına yönelik olan kısıtlamalar Denklem 3.12-3.14'de yer almaktadır.

$$|[w_x]_n|^2 = 1, \forall n = 1, \dots, N^2, i = 1, \dots, K \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^K x_{i,u} \leq K_{max}, \forall u = 1, \dots, U \quad (3.13)$$

$$\sum_{u=1}^U x_{i,u} = 1, \forall i = 1, \dots, K \quad (3.14)$$

Denklem 3.12'de yer alan kısıt "Constant Modulus" kısıtıdır. Denklem 3.13'de İHA baz istasyonlarının servis sağlayabileceği kullanıcı miktarı kısıtlandırılmaktadır. Denklem 3.14'te ise her bir kullanıcının birden çok İHA baz istasyonuna bağlanmasını engellemektedir.



4. K-MEANS ALGORİTMASI VE İHA'LARIN KONUMLANMASI

K-means algoritmasının amacı mevcut olan verileri kümelemek olup yinelemeli bir algoritmadır. Ana felsefesi mevcut veri noktalarını, her bir data noktası sadece bir gruba ait olmak şartıyla, K gruba ayırmaktır. Birbirine yakın noktalar aynı grup altında kümelenirken, bu kümelerde mümkün olduğunca birbirlerinden farklı olurlar.

Genel olarak bu algoritma aşağıdaki şekilde çalışır;

- Küme sayısı (K) belirlenir.
- K adet rastgele konum belirlenir ve bu konumlara en yakın noktalar bağlantısı sağlanır.
- Oluşan bu K adet grubun merkezleri belirlenir ve bu merkezlere göre yeniden gruplar oluşturulur.
- Bu işlem grupların merkezleri değişmeyene kadar tekrarlanır.

Yapılan çalışmada “ K_u ” her bir İHA’ya bağlı kullanıcı sayısını, “U” İHA sayısı ve “ K_{max} ” ise RF zincire irtibatlanabilecek maksimum kullanıcı sayısını yani bir İHA’ya irtibatlayabileceğimiz maksimum kullanıcıyı belirler.

Bu durumda sistemde $K = K_{max} \times U$ kadar kullanıcı bulunacaktır. 3 boyutlu yapıda her noktadan kullanıcıların kanal bilgisine sahip olmak mümkün değildir. Bu nedenle İHA baz istasyonlarının konumlarının ve İHA baz istasyonları ile kullanıcıların irtibatlanması kullanıcıların konumuna göre belirlenmektedir. İHA baz istasyonlarının oluşturulan grupların merkezlerine konuşlandırılacağı kullanıcı gruplarının belirlenmesi için K-mean algoritması ideal bir uygulamadır [53]. Her bir İHA baz istasyonu oluşturulan kullanıcı gruplarının merkezinde yer alacaktık. Ancak standart K-Means algoritmasından farklı olarak bu oluşturulacak grupların grup eleman sayısı K_{max} sayısından fazla olamaz.

Bu çerçevede hazırlanan iki opsiyonlu K-means algoritması aşağıdaki gibidir.

- **Başlatma:** Kullanıcıların bulunduğu koordinatlardan, ayrı ayrı İHA baz istasyonu kadar nokta, rastgele belirlenerek küme merkezleri süreci başlatılır.
- **Atama :** Öncelikle her bir kullanıcının rastgele belirlenen merkezlere yani muhtemel İHA baz istasyonu konuş yerlerine olan mesafeleri hesaplanır. Her

bir kullanıcının her bir rastgele belirlenen merkeze olan mesafesi hesaplanır. Bu durumda “i” kullanıcısının en yakın olduğu merkeze mesafesi “ D_{i,U_i^1} ” ikici olarak yakın olduğu merkezde “ D_{i,U_i^2} ” olsun. Bu noktada iki tane metrik oluşturulmaktadır.

$$\text{Seçenek-1: } m_i = D_{i,U_i^1} - D_{i,U_i^2}$$

$$\text{Seçenek-2: } m_i = \frac{1}{D_{i,U_i^1}}$$

Seçenek-1 kullanıcıyı en uygun olan İHA baz istasyonu ile irtibatlandırmadığımız takdirde kaçan fırsat maliyetini ifade ederken, Seçenek-2 ise kullanıcının en uygun olan İHA baz istasyonuna olan mesafesini ifade etmektedir.

Her bir kullanıcı belirlenen metriklere göre kendisi için en uygun olan İHA baz istasyonuna atanır. Eğer kullanıcının atandığı baz istasyonunun kapasitesi dolmuş ise bu durumda ikinci en iyi olana atanır ve bu süreç bu şekilde devam eder.

- **Güncelleme** : Bir önceki adımda gruplar belirlenmiş durumdadır ve bu adımda bu belirlenen grupların merkezleri tekrar hesaplanarak yeni İHA baz istasyonu noktaları belirlenir.
- **Tekrarlama ve Sonlandırma**: Atama ve Güncelleme adımları belirlenen yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

Bu işlem sürecinin tamamlanmasını müteakip İHA baz istasyonlarının konumları ve bu baz istasyonuna bağlanacak olan kullanıcılar belirlenmiş olur.

Bu kapsamda hazırlanan K-Means-1 ve K-Means-2 algoritmaları Çizelge 4.1 ve 4.2’de yer almaktadır.

Çizelge 4.1 : K-Means-1 Algoritması.

```

1: Kümenin Merkezlerini Başlat  $(x_u, y_u), \forall i \in U$ 
2: while not converge do
3:    $A=U, m_i=0, u_i=0, , \forall i \in K$ 
4:   Hesapla  $D_{i,u} = \sqrt{((x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2)} \forall i \in K, u \in U$ 
5:   Artarak Sırala  $D_{i,u}, \forall i \in K$ 
6:    $m_i = D_{i,u^{(1)}} - D_{i,u^{(2)}}, \forall i \in K$ 
7:   Azalarak Sırala  $m_i$ 
8:   for k = 1:K do
9:      $u^* = \min_{u \in A} \{D_{i^{(k)},u}\}$ 
10:     $u_{i^{(k)}} = u^*$ 
11:    if  $|i : \exists i \text{ s.t. } u_i = u^*| = K_{max}$  then
12:       $A = A/u^*$ 
13:    End if
14:  End for
15:  2D  $(x_u, y_u)$  İHA Baz İstasyonu Koordinatlarını Güncelle
     $\frac{1}{k_{max}} \sum_{i \text{ s.t. } u_i=u} (x_i, y_i), \forall u \in U$ 
16:  end while
17: Find  $argmax_{h_u} \{C_u, (h_u)\}, \forall u \in U$ 
18: Return  $(x_u, y_u, h_u), \forall u \in U$ 

```

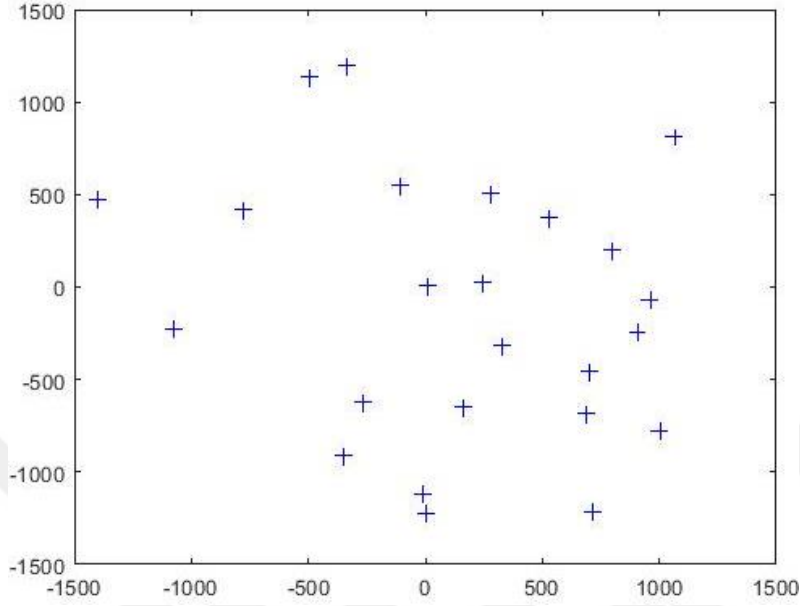
Çizelge 4.2 : K-Means-2 Algoritması.

```

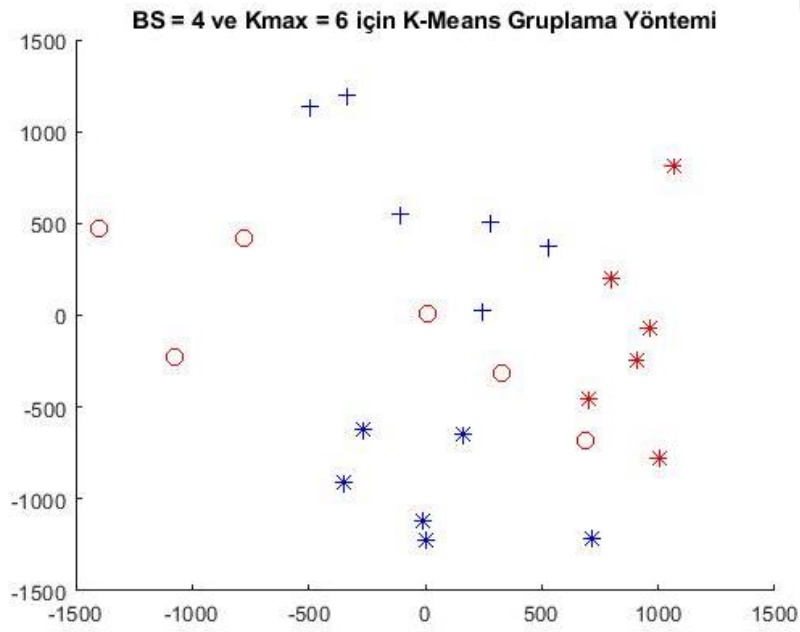
1: Kümenin Merkezlerini Başlat  $(x_u, y_u), \forall i \in U$ 
2: while not converge do
3:    $A=U, F=K, m_i=0, u_i=0, , \forall i \in K$ 
4:   for k = 1:K do
5:     Hesapla  $D_{i,u} = \sqrt{((x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2)} \forall i \in K, F, u \in U$ 
6:     Artarak Sırala  $D_{i,u}, \forall i \in F, u \in A$ 
7:      $m_i = D_{i,u^{(1)}} - D_{i,u^{(2)}}, \forall i \in F$ 
8:      $i^* = \max_{i \in F} \{m_i\}$ 
9:      $u^* = \min_{u \in A} \{D_{i^*,u}\}$ 
10:     $u_{i^*} = u^*$ 
11:    if  $|i : \exists i \text{ s.t. } u_i = u^*| = K_{max}$  then
12:       $A = A/u^*$ 
13:    End if
14:  End for
15:  2D  $(x_u, y_u)$  İHA Baz İstasyonu Koordinatlarını Güncelle
     $\frac{1}{k_{max}} \sum_{i \text{ s.t. } u_i=u} (x_i, y_i), \forall u \in U$ 
16:  end while
17: Find  $argmax_{h_u} \{C_u, (h_u)\}, \forall u \in U$ 
18: Return  $(x_u, y_u, h_u), \forall u \in U$ 

```

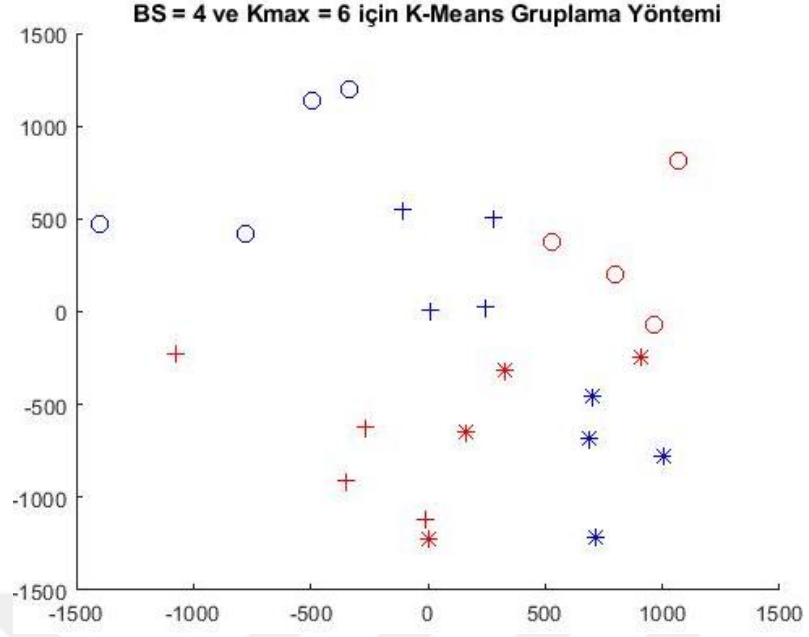
Şekil 4.1-4.3’de sırasıyla Gruplandırma Yapılacak Olan Küme, $BS = 4$ ve $K_{max} = 6$ olduğu K-means gruplandırması ve $BS = 6$ ve $K_{max} = 4$ olduğu K-means gruplandırması yer almaktadır.



Şekil 4.1 Gruplandırma Yapılacak Olan Küme.



Şekil 4.2 $BS = 4$ ve $K_{max} = 6$ için K-means Gruplaması.



Şekil 4.3 BS = 6 ve Kmax = 4 için K-means Grublama.



5. İHA BAZ İSTASYONUNUN YÜKSEKLİĞİNİN BELİRLENMESİ SÜRECİ

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere milimetre dalgada yol kaybı haberleşme mesafesini belirlemekte olan en önemli faktörlerden biridir. Bunun yanında milimetre dalganın dalga boyunun klasik haberleşme sistemlerine göre oldukça küçük olması nedeniyle ortamda doğal olarak bulunacak insan, ağaç, duvar vb. engelleri aşmasında problemler yaşaması ve yansımalarda sinyalin enerjisinde büyük kayıplar oluşması nedeniyle LoS ve nLoS durumları da efektif haberleşmeyi sağlamada etkili olmaktadır. Bu noktada mesafe ve görünürlük arasında bir ikilem yaşanmaktadır. LoS ihtimalini artırmamız için yüksekliği artırmamız gerekmekte, yüksekliği artırdığımız anda ise yol kayıpları ile karşı karşıya kalınmaktadır.

Bu nedenle her iki durum arasında optimal noktayı yakalayacak bir sistem üzerinde çalışma yapılmıştır. Öncelikle grup içerisindeki her bir kullanıcı için LoS ve nLoS durumlarına göre yol kaybı hesaplaması [54] benzer şekilde Denklem 5.1’de sunulmuştur.

$$g_{i,u}(h_u, d_{i,u}) = \begin{cases} \left(\frac{c}{4\pi f_c}\right)^2 D_{i,u}^{-1.9} & LoS \\ \left(\frac{c}{4\pi f_c}\right)^2 D_{i,u}^{-3.3} & NLoS \end{cases} \quad (5.1)$$

Yine [55] numaralı çalışmaya göre $\frac{NM-K_{max}+1}{K_{max}}$ ifadesi ile huzmelemeden kaynaklı SNR kazancı hesabı yapılmıştır. “ K_{max} ” İHA baz istasyonu tarafından hizmet sunulacak maksimum kullanıcı sayısını ifade ederken “NM” ise toplam anten elemanı sayısını ifade etmektedir.

Denklem 5.2 ile her bir kullanıcı kendi ait olduğu gruba göre LoS ve nLoS durumlarını gözeterik veri akış hızı “R” oluşturulmuştur. Müteakibinde bu değerler her bir grup içerisinde toplanmıştır (Denklem 5.3).

$$R_{i,u}(h_u, d_{i,u}) = p_{LOS} \times \log_2 \left(1 + \frac{N^2 - K_{max} + 1}{K_{max}} \frac{P_t g_{i,u}^{LOS}(h_u, d_{i,u})}{\sigma_n^2} \right) + (1 - p_{LOS}) \times \log_2 \left(1 + \frac{NM - K_{max} + 1}{K_{max}} \frac{P_t g_{i,u}^{NLOS}(h_u, d_{i,u})}{\sigma_n^2} \right) \quad (5.2)$$

$$R_{tot}(h_u) = \sum_{i \in \mathcal{K}_u} R_{i,u}(h_u, d_{i,u}) \quad (5.3)$$

R_{tot} değerini maksimize edecek yükseklik değeri (Denklem 5.4) bulunarak bu değer İHA baz istasyonlarının yüksekliği olarak kullanılmıştır.

$$\max_{h_u} \{ \sum_{i \in \mathcal{K}_u} R_{i,u}(h_u, d_{i,u}) \} \quad (5.4)$$



6. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (PSO)

Sürü optimizasyon türlerinden biri olan Parçacı Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) genellikle kuşların sürü psikolojisini temel olarak geliştirilmiş bir sürü optimizasyon yöntemidir. Craig W.Reynolds kuş sürülerinin animasyonuna yönelik olarak yayımlanmış olduğu [56] makalesinde kuş sürülerini incelemiş, bunların sürü halinde hareket etmelerini sağlayan organizasyon üzerinde durmuştur. PSO tamamen sürü psikolojisine dayanmakta olup sürünün belli bir istikamette ilerlemesi ve sürü içerisinde yer alan bireylerin hem kendi geçmiş en iyi konumuna göre hem de komşularının geçmiş en iyi konumunu göre gideceği istikameti belirlemesi düşüncesiyle ortaya çıkmıştır.

Parçacık Sürü Optimizasyonu diğer bir çalışmada Russell Eberhart ve James Kennedy tarafından [57] ve [58] makalelerinde yer almaktadır. Bu optimizasyon yöntemi ilk başlarda lineer olmayan süregelen optimizasyon problemi olarak öne çıkmasına rağmen son zamanlarda birçok alanda kullanılmaktadır. Dinamik sistemlerin takibi, sinir ağlarının yapısı, ağırlıklandırılması ve değerlendirilmesi, insan titremesinin analizi, reaktif güç ve voltajın kontrolü gibi bir çok alan da PSO kullanılmaktadır [59].

Bu optimizasyonda ana amaç parçacıkların azami faydayı sağlayacakları noktaya ulaşmalarıdır. Bu kapsamda PSO'da iki önemli unsur bulunmaktadır. Bunlardan birincisi parçacığın hızının tespit edilmesi ve ikincisi ise tespit edilen bu hıza göre parçacığın yeni konumunun belirlenmesi olup her iki ifade de Denklem 6.1 ve 6.2'de yer almaktadır [59] .

$$v_{id}(t + 1) = v_{id}(t) + c_1R_1(P_{id}(t) - X_{id}(t)) + c_2R_2(P_{gd}(t) - X_{gd}(t)) \quad (6.1)$$

$$X_{id}(t + 1) = X_{id}(t) + v_{id}(t + 1) \quad (6.2)$$

V_{id} : i'nci parçacığın d'nci boyutunun pozisyonundaki değişimi yani hızını ifade etmektedir.

X_{id} : i'nci parçacığın d'nci boyutunun pozisyonunu ifade etmektedir.

P_{id} : i'nci parçacığın d'nci boyutunun geçmişe dayalı olarak en iyi pozisyonunu ifade etmektedir.

P_{gd} : Sürünün geçmişe dayalı olarak en iyi pozisyonunu ifade etmektedir.

R_1 ve R_2 0 ile 1 arasında rastgele sayıyı ifade etmektedir.

Hız denkleminde ilk terim olarak yer alan $V_{id}(t)$, parçacığın Global en iyi noktasına gelmesine rağmen ortamda araştırmaya devam etmesini sağlamaktadır. Kısacası parçacığın hareket durumunu korumasını sağlamaktadır. Yine aynı denkleminde ikinci sırada yer alan $c_1R_1(P_{id}(t) - X_{id}(t))$ terimi bilişsel bölümü ifade etmekte ve parçacığın lokal olarak en iyi olduğu noktaya doğru yönelmesini sağlar. Denklemin son bölümünü oluşturan $c_2R_2(P_{gd}(t) - X_{gd}(t))$ ise sosyal bölümüdür ve parçacığın lineer olarak sürünün global en iyi olduğu noktaya doğru yönelmesini sağlamaktadır. c_1 ve c_2 katsayıları ifade etmektedir. $c_1 > c_2$ durumunda araştırma davranışı parçacığın lokal en iyisine doğru yönelir, $c_1 < c_2$ olduğu takdirde ise araştırma davranışı sürünün global olarak en iyi olduğu noktaya doğru yönelir.

Yapılan benzetimde dron baz istasyonlarının 3 boyutlu olarak konumlarının bulunabilmesi amacıyla PSO kullanılmıştır. Algoritmada tanımlan her bir parçacık konuşlandırılması istenen kadar dron baz istasyonunun 3 boyutlu konumunu içermektedir. Parçacıkların lokal ve global en iyi oldukları noktaların tespitinde Bölüm-7’de Denklem serileri ile ifade edilen R_{tot} kullanılmıştır. Bu çerçevede hazırlanan algoritma Çizelge 6.1’de yer almaktadır.

Çizelge 6.1 : PSO Algoritması.

```

1: Rastgele Parçacıkları Başlat  $P^p = (x_u^p, y_u^p, h_u^p), \forall i \in U, P = 1, \dots, N_p$ 
2: Başlat  $gbest, gbest_f, lbest_f^p, lbest^p, \forall p = 1, \dots, N_p$ 
3: while not converge do
4:   for  $p = 1:N_p$  do
5:     Hesapla  $R'_i(x_u^p, y_u^p, h_u^p), \forall i \in K, u \in U$ 
6:      $A = U, F = K, m_i = 0, u_i = 0, \forall i \in K$ 
7:     for  $k = 1:K$  do
8:       Hesapla  $R'_i(x_u^p, y_u^p, h_u^p), \forall i \in K, u \in U$ 
9:       Artarak Sırala  $R'_i(x_u^p, y_u^p, h_u^p), \forall i \in F, u \in A$ 
10:       $m_i = R'_i(x_u^p, y_u^p, h_u^p) - R'_i(x_u^p, y_u^p, h_u^p), \forall i \in F$ 
11:       $i^* = \max_{i \in F} \{m_i\}$ 
12:       $u^* = \min_{u \in A} \{D_{i^*, u}\}$ 
13:       $u_{i^*}^p = u^*$ 
14:      if  $|i: \exists i \text{ s.t. } u_i = u^*| = K_{max}$  then
15:         $A = A/u^*$ 
16:      end if
17:    end for
18:     $f^p = \sum_{i \in K} \log(R'_i(x_u^p, y_u^p, h_u^p)), \forall p \in 1, \dots, N_p$ 
19:    if  $f^p > lbest_f^p$  then
20:      En iyi lokal değerini güncelle
21:       $lbest_f^p = f^p, lbest^p = (x_u^p, y_u^p, h_u^p)$ 
22:    end if
23:    if  $f^p > gbest_f$  then
24:      En iyi global değerini güncelle
25:       $gbest_f = f^p, gbest^p = (x_u^p, y_u^p, h_u^p)$ 
26:    end if
27:  end for
28: Parçacıkları Güncelle
29:  $P^p += c_0 * rand + c_1(lbest^p - P^p) + c_2(gbest^p - P^p)$ 
30: end while

```

Algoritmanın birinci satırında N_p adet parçacık başlatılmakta, her bir parçacık ise $3K$ x İHA Baz İstasyonu kadar sayıdan oluşmaktadır. $3K$ İHA Baz İstasyonlarının 3 boyutlu koordinatlarını temsil etmektedir.

Satır – 5’de her bir kullanıcı ve İHA Baz İstasyonu için veri akış değerleri hesaplanır. 7-19’da K-Means algoritmasına benzer şekilde kullanıcıların İHA Baz İstasyonlarına atamaları yapılır. Satır-18’de her bir parçacığın metrik değeri ölçülür ve buna bağlı olarak lokal en iyi ve global en iyi güncellenir. Satır-26’da oluşan yeni duruma göre parçacıkların yeni pozisyonları belirlenir [60].

Öğrenme katsayıları c_0, c_1 ve c_2 makale [62]'e göre belirlenmiştir.



7. HUZME ŞEKİLLENDİRME

Sinyalin girişim artı gürültüye oranı (Signal to interference plus noise ratio) (SINR) hesaplanmasında Denklem 7.1 kullanılmaktadır.

$$\text{SINR}_i = \frac{|h_{i,u_i}^H w_{i,u_i}|^2}{N_o + \sum_{k \neq i}^K |h_{i,u_k}^H w_{k,u_k}|^2}, i = 1, \dots, K \quad (7.1)$$

“ u_i ” i kullanıcısı ile bağlantılı olan dron baz istasyonunu ifade etmektedir. Bu durumda ulaşılacak veri aktarım oranı $R_i = \log_2(1 + \text{SINR}_i)$ olarak tanımlanabilir. Girişimin olduğu ortamlarda toplam veri akış oranını maksimize etmek bir iç bükey olmayan optimizasyon problemidir [60]. Çünkü hedeflenen iki unsur vardır, birincisi huzme şekillendirme kazancını maksimize etmek diğeri ise oluşan girişimi minimize etmektir. Bu noktada Denklem 7.1’in paydasında yer alan $h_{i,u_k}^H w_{k,u_k}$ değerinin sıfır olmaya zorlandığı “zero forcing (ZF)” metodu ele alınabilir ancak bu durum huzme kazancı ve veri akışı anlamında optimal bir çözüm olmayabilir. Burada aranan husus huzme kazancı ve girişimi optimal düzeyde tutacak ve bunun sonucu olarak akışı maksimum seviyeye çıkaracak yapı ortaya konulmasıdır. Çalışma [61]’de hem huzme kazancını maksimize eden hem de girişimi minimize eden bir metot sunulmuştur. Bu metot sadece ayrılış açısına (Angle of Departures (AoDs)) ve buna karşılık gelen her bir İHA baz istasyonundan kendisine bağlı her bir kullanıcıya ait dizi yönlendirme vektörüne (Array Steering Vector) dayanmaktadır. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere İHA baz istasyonu kanal modelinde ilk gelen yolun diğer yollardan çok daha güçlü olması nedeniyle sadece ilk gelen yolun dizi yönlendirme vektörünü ele alıyoruz ve Denklem 7.2’de olduğu gibi ifade ediyoruz.

$$\tilde{\mathbf{I}}_{i,U} = [a(\theta_{1,u,1}, \phi_{1,u,1}), \dots, a(\theta_{i-1,u,1}, \phi_{i-1,u,1}), \\ a(\theta_{i+1,u,1}, \phi_{i+1,u,1}), \dots, a(\theta_{K_u,u,1}, \phi_{K_u,u,1})] \quad (7.2)$$

$i = 1, \dots, K_u$ İHA baz istasyonu “ u ’ya” bağlı kullanıcıları ifade etmektedir. $\tilde{\mathbf{I}}_{i,U}$ ait boş uzayı (Null Space) için “Singular Value Decomposition (SVD)” uygulanmaktadır (Denklem 7.3).

$$\tilde{\mathbf{I}}_{i,u} = \tilde{\mathbf{U}}_{i,u} \tilde{\Sigma}_{i,u} [\tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(0)}]{}^H \quad (7.3)$$

$\tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(1)}$ ilk K_{max} adet sağ tekil vektörü (Right Singular Vector) içerirken $\tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(0)}$ $N^2 - K_{max}$ adet sağ tekil vektörü (Right Singular Vector) içermektedir. Bu noktada girişimi minimize etmek $\mathbf{w}_{i,u}$ 'nun boş uzay olan $\tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(0)}$ 'a olan $\mathbf{w}_{i,u}^H \tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(0)} (\tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(0)})^H \mathbf{w}_{i,u}$ projeksiyonunun maksimize edilmesi anlamına gelmektedir. Huzme şekillendirmenin kazancının maksimize edilmesi de $\mathbf{w}_{i,u}^H \mathbf{a}(\theta_{i-1,u,1}, \phi_{i-1,u,1}) \mathbf{a}(\theta_{i-1,u,1}, \phi_{i-1,u,1})^H \mathbf{w}_{i,u}$ değerinin maksimize edilmesine eşdeğerdir. Sızan (leakage) girişim ve huzmeleme kazancı iki farklı amaç fonksiyonudur. λ_1 ve λ_2 ağırlık oranlarında $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ olacak şekilde bir araya getirilerek bir amaç fonksiyonu oluşturulabilir. Bu durumda optimizasyon problemi Denklem 7.4'te belirtildiği şekilde oluşmuştur.

$$\max_{\mathbf{W}} Tr \left(\left(\lambda_1 \tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(0)} (\tilde{\mathbf{V}}_{i,u}^{(0)})^H + \lambda_2 \mathbf{a}(\theta_{i-1,u,1}, \phi_{i-1,u,1}) \mathbf{a}(\theta_{i-1,u,1}, \phi_{i-1,u,1})^H \right) \mathbf{W} \right) \quad (7.4)$$

$\mathbf{W} = \mathbf{w}_{i,u} \mathbf{w}_{i,u}^H$ olup $[\mathbf{W}]_{i,i} = \frac{1}{N^2}$, $\mathbf{W} \geq 0$ ve $\text{Rank}(\mathbf{W}) = 1$ kısıtlamaları mevcuttur. $\text{Rank}(\mathbf{W}) = 1$ kısıtı gevşetilerek problem konveks hale dönüştürülür ki bu durumda yarı kesin (Semidefinite) gevşeme olarak tanımlanabilir. Artık problem, yarı kesin programlamaya (Semidefinite programming) dönüştürülerek konveks bir hal almıştır. Bundan sonra problem cvx tarzı mevcut programlar ile çözülebilir ve optimal ön kodlama bulunabilir.

Bir diğer yöntem olarak da Aşırı Örnekleme DFT Tabanlı Kod Kitapçığı (Oversampled Discrete Fourier Transform(DFT) Based Codebook) kullanılmıştır. 5G New Radio (5G NR)'da Tip-1 ön kodlama bu yöntemi kullanmaktadır. N adet antenli Uniform Doğrusal Dizi (ULA)'da DFT ön kodlama Denklem 7.5'teki gibidir.

$$\mathbf{w}_{1D}(k) = \left[e^{j\frac{2\pi 0k}{ON}}, e^{j2\pi 1\frac{k}{ON}}, \dots, e^{j2\pi(N-1)\frac{k}{ON}} \right]^T, k = 0, 1, \dots, ON - 1 \quad (7.5)$$

O değeri "aşırı örnekleme faktörü" olup tipik olarak 4 alınır. İki boyutlu dizi (UPA) için önkodlama setleri Kronecker Çarpımı ($\mathbf{w}_{2D}(k, l) = \mathbf{w}_{1D}(k) \otimes \mathbf{w}_{1D}(l)$) ile elde edilebilir. Sonuç olarak $N \times N$ anten elemanı ve $O = 4$ olduğunda önkodlama vektörü için $N^2 O^2$ adet seçenek mevcut olur. Yani bir çeşit açısız alanda nicemleme yapılmaktadır ve bu kanal bilgisi yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Her bir kullanıcı kendi en iyi önkodlamasını dron baz istasyonuna geri besleme yapar fakat

bunda diğer kullanıcıların ve diğer İHA baz istasyonlarının girişimi doğal olarak hesaba katılmaz.





8. BENZETİM SONUÇLARI

8.1 Benzetim-1

Benzetim-1 tüm İHA Baz istasyonlarının aynı yükseklikte olduğu farz ve kabul edilerek gerçekleştirilmiş olup gruplama algoritmaları ve huzme şekillendirme yöntemlerine göre karşılaştırmaları yer almaktadır. Benzetim-1'in gerçekleştirildiği koşullar aşağıda yer almaktadır.

- 1500 metre yarıçapında dairesel bir alanda 24 kullanıcı rastgele konuşlandırılmıştır.
- İHA Baz İstasyonu Sayısı =4
- RF Zincir $K_{max} = 6$
- Taşıyıcı frekans olarak 28GHz olarak belirlenmiştir.
- Her bir İHA baz istasyonunda 8×8 elemandan oluşan düzlemsel anten (UPA) mevcuttur.
- Her bir RF zincirine 10W'lık gönderme gücü düşmektedir.
- Gürültü gücü $N_o = 1 \times 10^{-13}$ 'tür.
- LoS ihtimali parametreleri $a = 11.95$ ve $b = 0.14$ 'tür.
- Her bir İHA baz istasyonunda her bir kullanıcıya oluşan kanal $L_i = 4$ olarak tasarlanmıştır.
- Benzetim birbirinden bağımsız olarak 100 defa çalıştırılmış olup benzetim sonucu olarak ortalama değerler kullanılmıştır.

4 ve 7'nci bölümlerde açıkladığı üzere 2 farklı K-Means algoritması ve 2 ayrı huzme şekillendirme yöntemi belirlenmiş olup aşağıda belirlenen 4 yöntem incelenmiştir.

- **Kmeans1+SDP** : Seçenek-1 K-Means algoritması ve optimizasyona dayanan önkodlama.
- **Kmeans2+SDP** : Seçenek-2 K-Means algoritması ve optimizasyona dayanan önkodlama.
- **Kmeans1+DFT** : Seçenek-1 K-Means algoritması ve DFT tabanlı önkodlama.
- **Kmeans2+DFT** : Seçenek-2 K-Means algoritması ve DFT tabanlı önkodlama.

Yapılan birinci benzetim için sonuçlar Çizelge 8.1'de yer almaktadır.

Çizelge 8.1: Birinci Benzetim Sonuçları.

hu	Toplam Veri Akışı					
	200	300	400	500	600	700
Kemans1+SDP	59,85	84,56	94,21	97,87	94,91	90,52
Kemans2+SDP	40,59	72,32	85,30	89,24	89,33	84,70
Kemans1+DFT	48,39	67,03	73,87	75,80	72,74	68,35
Kemans2+DFT	41,47	58,61	67,60	70,09	68,47	65,25
hu	Minimum Veri Akışı					
	200	300	400	500	600	700
Kemans1+SDP	2,03E-07	4,00E-07	5,50E-07	2,80E-02	6,90E-02	1,44E-01
Kemans2+SDP	8,15E-08	9,63E-08	1,65E-07	6,20E-07	8,40E-02	1,10E-01
Kemans1+DFT	1,02E-06	1,60E-06	2,21E-06	2,61E-02	5,64E-02	1,29E-01
Kemans2+DFT	5,81E-07	5,48E-07	8,06E-07	1,93E-06	6,66E-02	8,81E-02
hu	Log-Toplam Veri Akışı					
	200	300	400	500	600	700
Kemans1+SDP	-150	-80	-41	-14,9	-2,66	6,69
Kemans2+SDP	-179	-115	-68,4	-33,3	-10,7	-3,12
Kemans1+DFT	-134	-74	-39	-17	-6,6	1,95
Kemans2+DFT	-160	-105	-64	-34	-14	-7

Tabloda yer alan “Toplam Veri Akışı” 100 deneme sonunda elde edilen veri akış oranının ortalamasını, “Minimum Veri Akışı” her denemede elde edilen en düşük olan akışların ortalamasını vermekte olup en az ortalama ne kadar veri akışı sağlanabilmesi açısından metrik oluşturmaktadır, “Log-Toplam Veri Akışı” ise orantısal adil paylaşım için metrik oluşturmaktadır. “ h_u ” ise İHA baz istasyonunun yüksekliğini belirtmekte olup 200 m. ile 700 m. arasında değişmektedir. $\lambda_1 = 0.99$ ’dur.

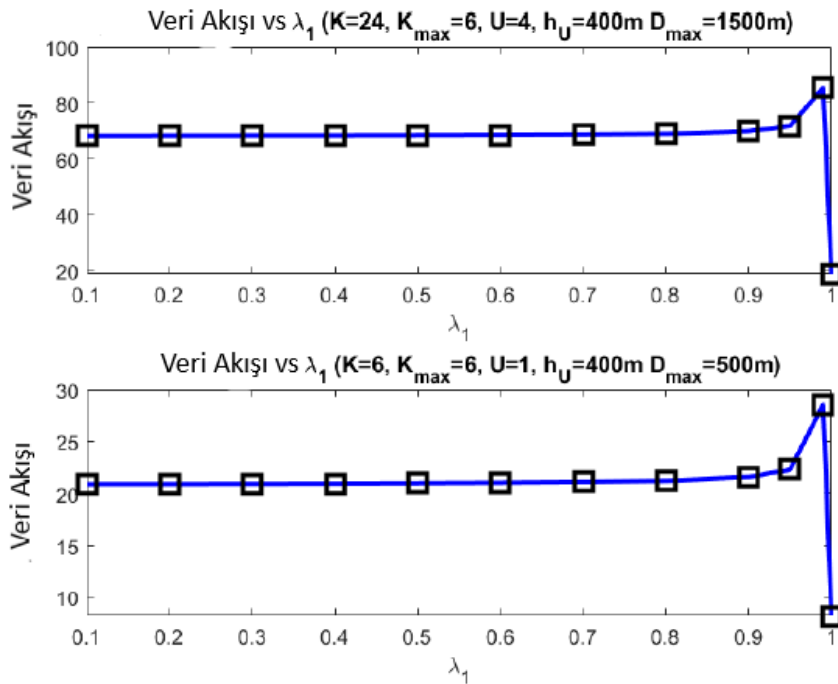
Çizelge 8.1 incelendiğinde kullanıcıların gruplanması ve İHA baz istasyonlarının yerleşimi açısından ilk seçenek olarak sunulan K-Means-1 algoritmasının ikinci seçenek olarak sunulan K-Means-2 algoritmasına nazaran yüksekliklere ve uygulanan önkodlamalara bağlı olarak toplam akışta %5 ila % 16 oranında daha iyi performans sergilediği gözlemlenmektedir.

Benzer şekilde önkodlama için teklif edilen birinci seçenek “SDP Tabanlı Çözüm”, ikinci seçenek olan “DFT Tabanlı Çözüm” göre yüksekliklere ve uygulanan

konumlama algoritmasına bağı olarak %20 ila %34 arasında daha iyi performans gerçekleştirmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde toplam veri akışı açısından en uygun yüksekliğin 400 ila 500 m. arasında olduğı gözlemlenmektedir. İHA'ların yere yakın olması durumunda nLoS durumunda kalan kullanıcı sayısı artmakta ve bu da minimum akış oranının ve log-toplam akış oranının düşük olmasına neden olmaktadır. İHA'ların yüksekliğı arttıkça LoS ihtimali artmakta bu da minimum akış oranı ve log-toplam akış oranının artmasına neden olmaktadır. Her ne kadar yükseklik artışına bağı olarak minimum akış oranı ve log-toplam akış oranı metrikleri artış gösterse de, yükseklikteki artış bir noktadan sonra yol kaybının etken olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Tablo-1'de de gözlemlendiğı üzere 500m. yükseklikten sonra toplam akış oranında düşüş meydana gelmektedir.

Yapılan bu incelemeler ilaveten SDP tabanlı çözüm için Girişim (λ_1) ve Huzme Şekillendirme ($\lambda_2 = 1 - \lambda_1$) ağırlık parametrelerinin veri akış performansına etkisi incelenmiş olup Şekil 8.1'de yer almaktadır.

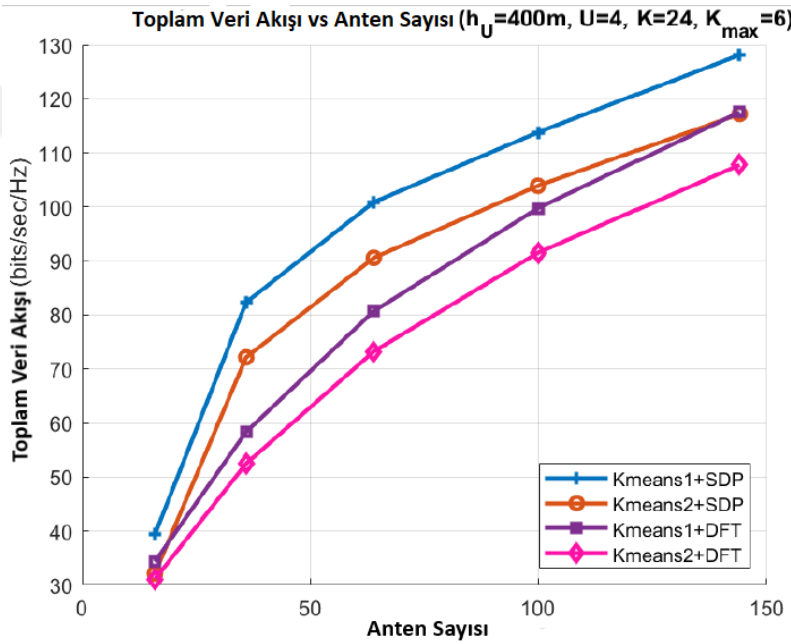


Şekil 8.1: Enterferans Ağırlık Parametresinin Etkisi-1.

Şekil 8.1'de üst tarafta yer alan bölüm çoklu İHA baz istasyonunun, altta yer alan bölüm tek bir İHA baz istasyonunu baz alarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak λ_1 değeri 0.1 ile 0.9 arasında etkisi açısından her hangi bir fark bulunmamaktadır. λ_2 ise

çok küçük seçildiğinde, yani yaklaşık $\lambda_2 = 0.01$ gibi bu durumda veri akış oranı tavan yapmaktadır. Ancak λ_2 'nin sıfıra eşit olması durumunda bu huzme şekillendirme kazancının hesaba katılmadığı anlamına gelmekte olup performansta önemli bir düşüş meydana gelmektedir.

Son olarak da anten elemanı sayısındaki artışın toplam veri akış oranını nasıl etkilediği incelenmiştir. Yapılan uygulama 4 adet İHA baz istasyonu, her bir baz istasyonunda 6 adet RF zincir ve 24 kullanıcı üzerinden icra edilmiş olup sonuçlar Şekil 8.2'de yer almaktadır. İcra edilen diğer benzetimlere benzer şekilde bu benzetim de 4 alternatif üzerinden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.2 Anten Sayısı-Veri Akış İlişkisi.

Beklenildiği gibi anten sayısının artmasıyla her 4 yöntemde de toplam veri akış oranı artışı göstermektedir.

Bunun yanında daha önce elde edilen sonuçlarla doğru orantılı olarak gruplama algoritması açısından Kmeans1 algoritması Kmeans2 algoritmasına nazaran daha iyi performans sergilemektedir. Anten sayısının artmasıyla bu performans farkı %15'lere kadar ulaşmaktadır. Benzer şekilde SDP tabanlı huzme şekillendirme algoritması da DFT tabanlı huzme şekillendirme algoritmasına nazaran daha iyi bir performans sergilemektedir.

8.2 Benzetim-2

Benzetim-2’de Benzetim-1’de yer alan İHA Baz İstasyonlarının hepsinin aynı yükseklikte bulunma kısıtı ortadan kaldırılarak İHA Baz İstasyonlarının buldukları konuma ve hizmet sağladıkları kullanıcılara göre en optimal yükseklikte konuşlanmaları sağlanmıştır. Bu çerçevede Benzetim-1’de yer alan grublama ve huzme şekillendirme yöntemlerine ilave olarak Bölüm-6’de izah edilen İHA Baz İstasyonunun Yüksekliğinin Belirlenmesi Süreci ve Bölüm-7’de izah edilen Parçacık Sürü Optimizasyonu ilave edilmiştir.

Benzetim-2’in gerçekleştirildiği koşullar aşağıda yer almaktadır.

- 1000 metre yarıçapında dairesel bir alanda 24 kullanıcı rastgele konuşlandırılmıştır.
- İHA Baz İstasyonu x RF Zincir = 4x6, 6x4, 8x3
- Taşıyıcı frekans olarak 28GHz olarak belirlenmiştir.
- Her bir İHA baz istasyonunda 8×8 elemandan oluşan düzlemsel anten (UPA) mevcuttur.
- İlk benzetimde 4 İHA baz istasyonu ve her bir İHA baz istasyonunda 6 RF zinciri mevcuttur ancak ikinci yapılan benzetimde İHA baz istasyonu ve RF zinciri miktarı değişkendir.
- Her bir RF zincirine 10W’lık gönderme gücü düşmektedir.
- Gürültü gücü $N_o = 1 \times 10^{-13}$ ’tür.
- LoS ihtimali parametreleri $a = 11.95$ ve $b = 0.14$ ’tür.
- Her bir İHA baz istasyonunda her bir kullanıcıya oluşan kanal $L_i = 4$ olarak tasarlanmıştır.
- Benzetim birbirinden bağımsız olarak 100 defa çalıştırılmış olup benzetim sonucu olarak ortalama değerler kullanılmıştır.

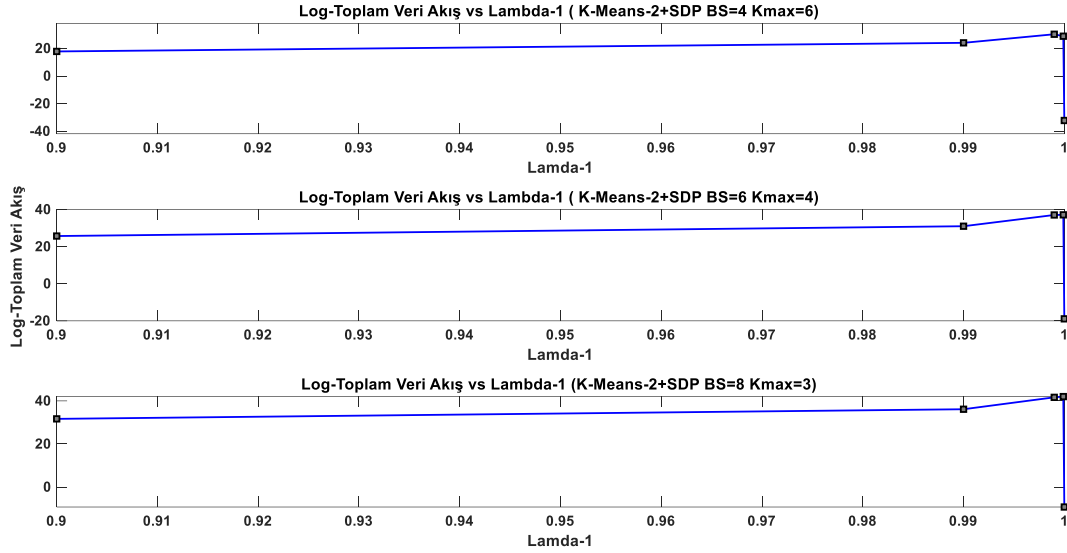
Çizelge 8.2 : İkinci Benzetim Sonuçları.

	BS =4/Kmax = 6	BS=6/Kmax=4	BS =8/Kmax = 3
Toplam Veri Akışı			
Kmeans1+SDP	128,9146	154,8287	177,4684
Kmeans2+SDP	129,7805	155,1381	173,6372
Kmeans1+DFT	99,1988	130,9454	158,0517
Kmeans2+DFT	100,5481	132,0329	155,1101
PSO+SDP	139,3237	166,837	192,8058
Minimum Veri Akışı			
Kmeans1+SDP	0,2749	0,7224	1,0440
Kmeans2+SDP	0,4575	0,7172	0,9876
Kmeans1+DFT	0,1420	0,3767	0,6431
Kmeans2+DFT	0,1705	0,3841	0,6302
PSO+SDP	0,6712	1,0054	1,5632
Log-Toplam Veri Akışı			
Kmeans1+SDP	30,0858	37,5962	42,7723
Kmeans2+SDP	30,2616	37,0476	41,6523
Kmeans1+DFT	23,609	33,113	39,686
Kmeans2+DFT	24,0826	33,1617	38,9425
PSO+SDP	33,7598	40,3618	45,7192

BS : İHA Baz İstasyonu, Kmax : RF Zinciri ve PSO : Parçacık Sürü Optimizasyonunu ifade etmektedir.

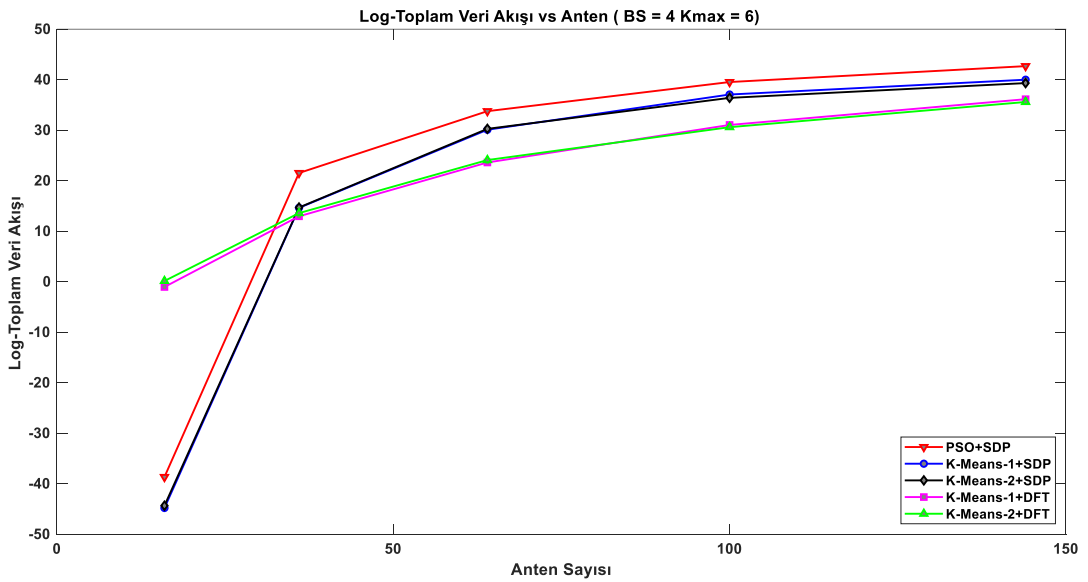
Çizelge 8.2 incelendiğinde İHA Baz İstasyonu sayısı artması sonucunda uygulanan tüm yöntemlerde Toplam Veri Akışı, Minimum Veri Akışı ve Log-Toplam Veri Akışı değerlerinin belirgin olarak arttığı gözlemlenmektedir. Bunun temel sebebi İHA Baz İstasyonunun sayısının artması baz istasyonunun hizmet vermesi gereken kullanıcı sayısında azalmaya sebebiyet vermesi ve bu nedenle İHA Baz İstasyonlarının daha alçakta konuşularak yol kaybınının daha az olmasına neden olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Log-Toplam veri akışı açısından incelendiğinde K-Means-1 ve K-Means-2 gruplama yöntemlerinin birbirlerine gayet yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir. İHA Baz İstasyonu sayısı az olduğunda K-Means-2'nin K-Means-1'den biraz daha iyi olduğu ancak İHA Baz istasyonu sayısı arttıkça bu durum tersine döndüğü görülmektedir. Her ne kadar PSO yöntemi gruplama yöntemlerine göre %10'luk daha iyi performans sergilemişse de yakınsama için çok daha fazla zamana ihtiyaç duyması ve bir merkezden uygulanmasını gerektirmesi nedeniyle K-Means yöntemleri daha optimal bir tercih olarak ortaya çıkmaktadır.

SDP yöntemi için Girişim (λ_1) ve Huzme Şekillendirme (λ_2) katsayılarının etkisi Şekil 8.3'de yer almaktadır. Benzetim-1'de oluşan duruma benzer bir durum burada da oluşmuştur. λ_2 'nin çok küçük seçilmesi veri akış hızını arttırmaktadır.

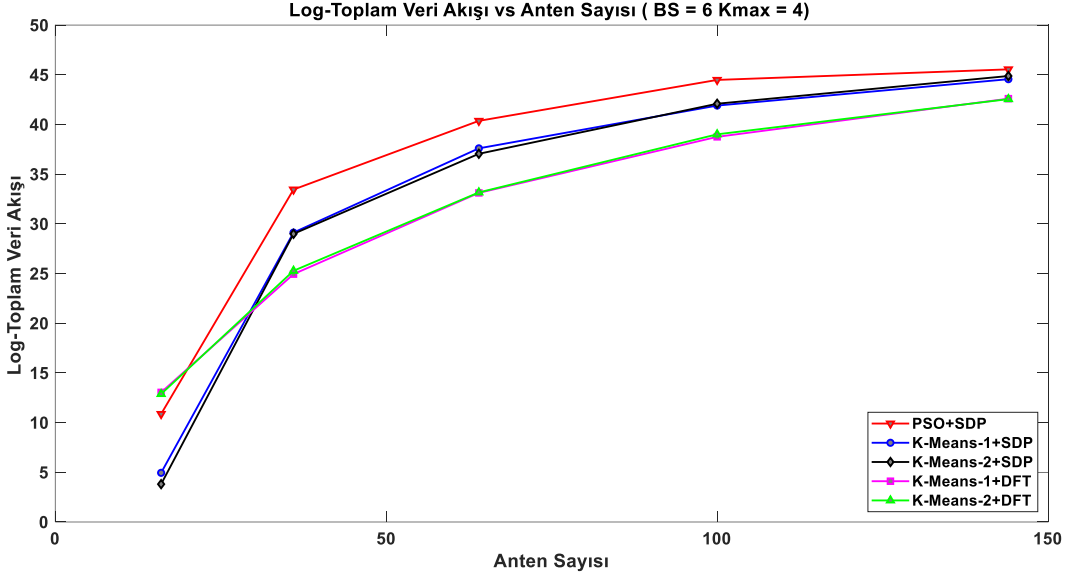


Şekil 8.3 Enterferans Ağırlık Parametresinin Etkisi-2.

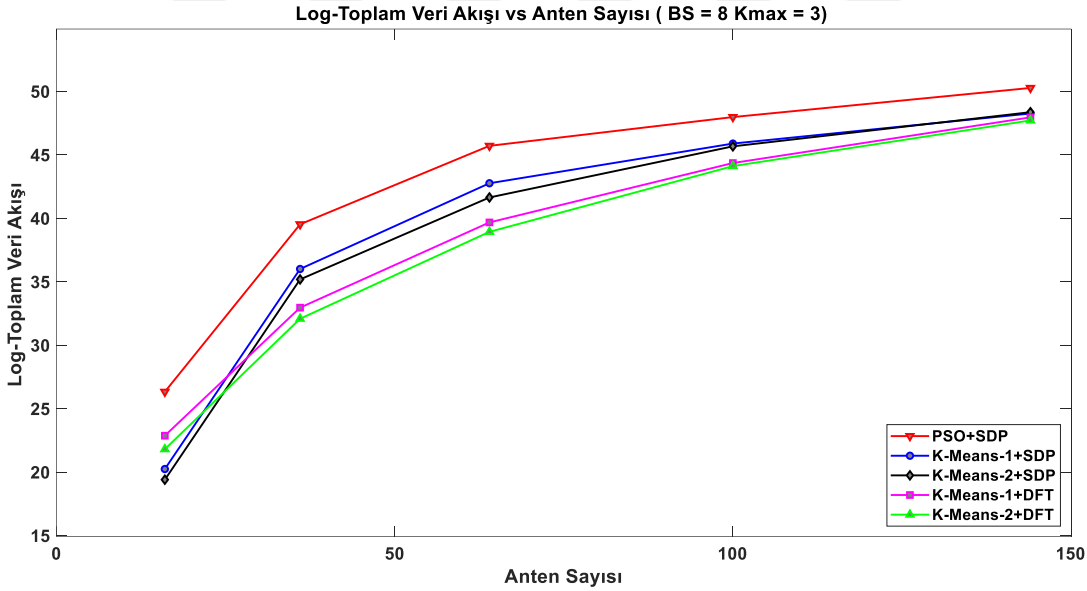
Anten Sayısı-Log-Toplam Veri Akışı ilişkisi Şekil 8.4-8.6'da yer almaktadır.



Şekil 8.4 Anten Sayısı-Log-Toplam Veri Akışı İlişkisi (İBİ : 4, RFZ : 6).



Şekil 8.5 Anten Sayısı-Log-Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 6, RFZ : 4).

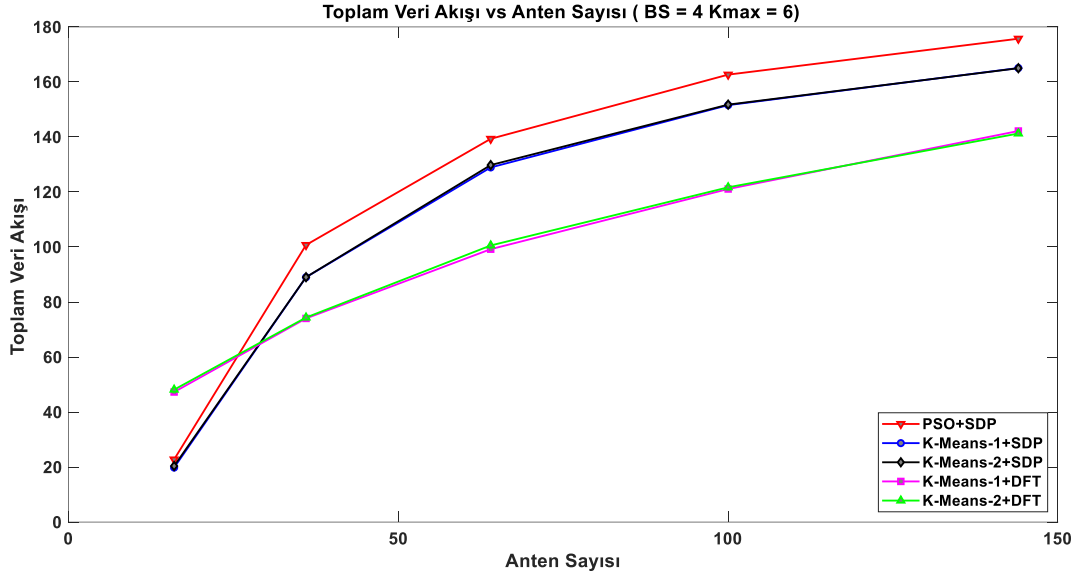


Şekil 8.6 Anten Sayısı-Log-Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 8, RFZ : 3).

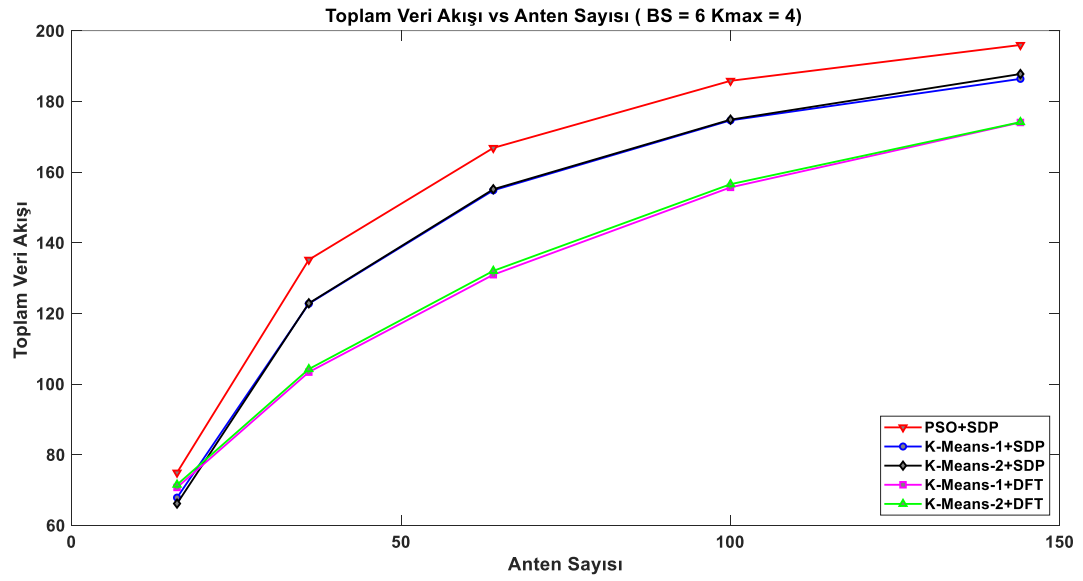
Beklendiği üzere her üç durumda da anten sayısının artması Log-Toplam veri akış hızının artmasına neden olmaktadır. Bunların yanında her üç grafikte de anten sayısındaki artışıyla Log-Toplam veri akış grafiğinin iç bükey olduğu gözlemlenmekte olup anten sayısı arttıkça marjinal faydası azalmaktadır.

Ayrıca anten sayısı arttıkça Log-Toplam veri akışı açısından yöntemler arasındaki farkın azalma eğiliminde olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.

Anten Sayısı-Toplam Veri Akışı ilişkisi Şekil 8.7-8.9'da yer almaktadır.

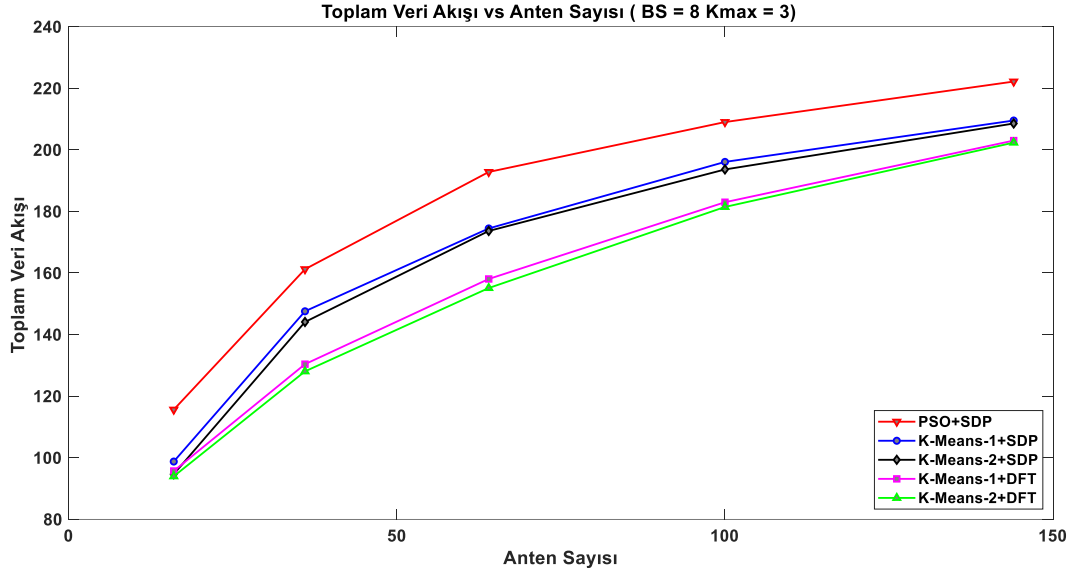


Şekil 8.7 Anten Sayısı- Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 4, RFZ : 6).



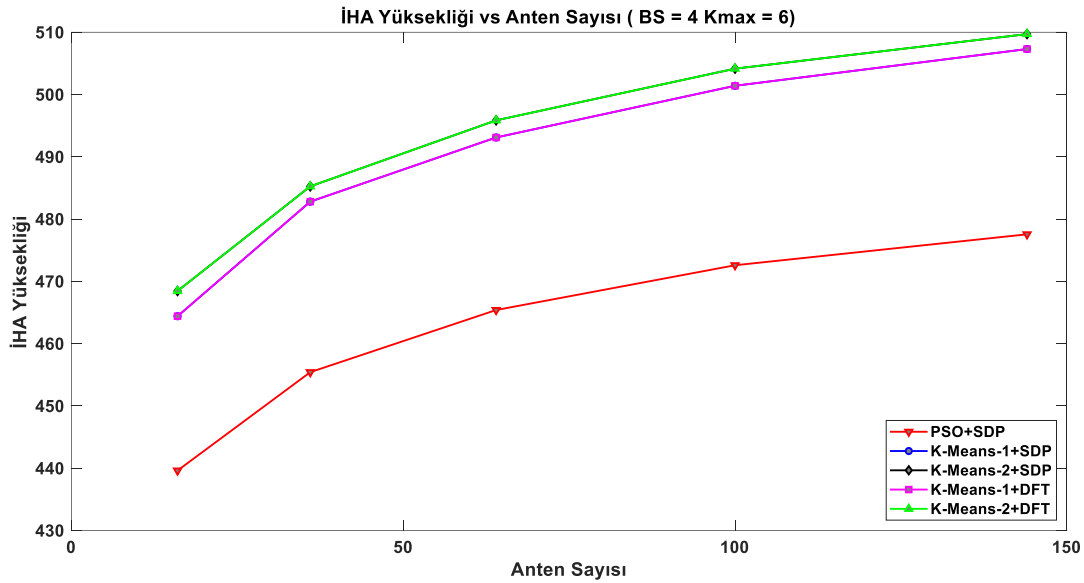
Şekil 8.8 Anten Sayısı- Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 6, RFZ : 4).

Anten sayısı-Log Toplam Veri akış ilişkisinde olduğu gibi toplam veri akış da miktarı anten sayısının artmasıyla artış göstermektedir. PSO en optimal sonuçları ortaya çıkartırken, her iki gruplandırma yöntemiyle yapılan SDP huzme şekillendirme yöntemi de PSO'ya yakın sonuçlar vermiş, ancak DFT huzme şekillendirme yöntemi %8 ila %20 oranında geride kalmıştır.



Şekil 8.9 Anten Sayısı- Toplam Veri Akış İlişkisi (İBİ : 8, RFZ : 3).

Anten Sayısı-İHA Yüksekliği ilişkisi Şekil 8.10-8.12’de yer almaktadır.

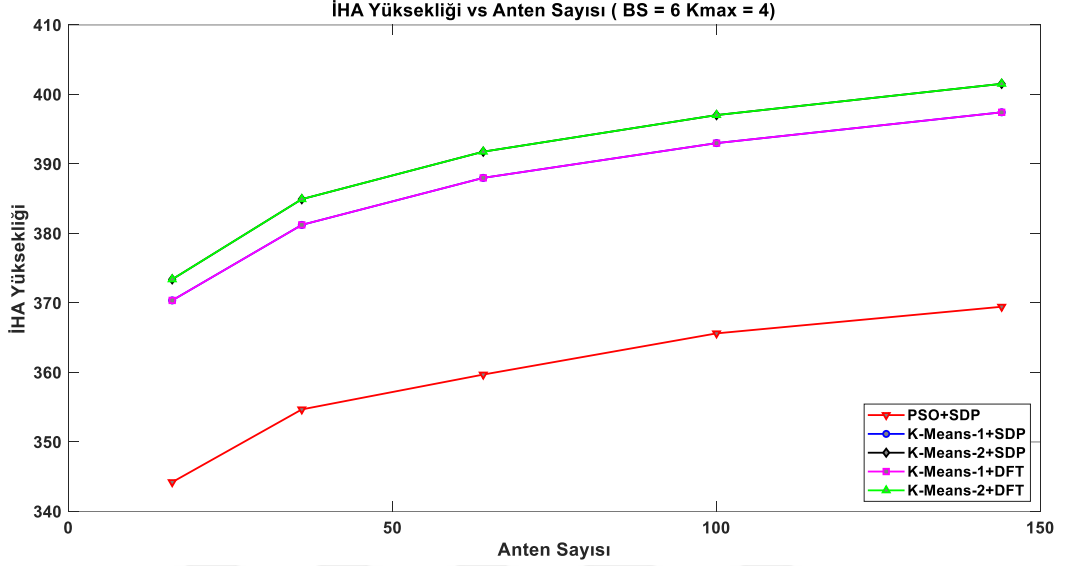


Şekil 8.10 Anten Sayısı- İHA Yüksekliği İlişkisi (İBİ : 4, RFZ : 6).

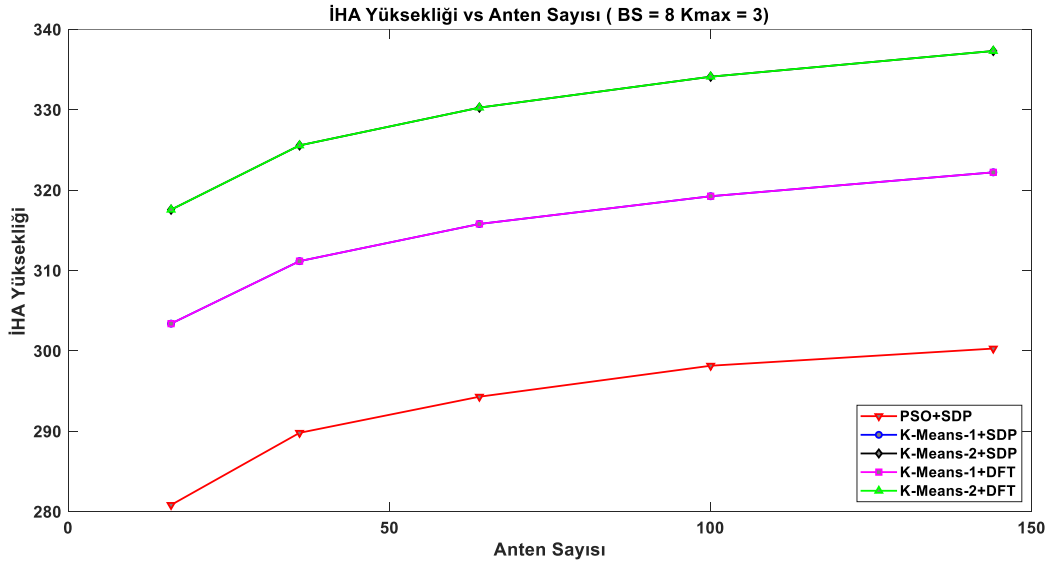
Şekil 8.10 -8.12 incelendiğinde;

- SDP ve DFT huzme şekillendirme yöntemlerinde K-Means-1 ve K-Means-2 gruplama yöntemlerinin İHA’yı aynı yükseklikte konumlandığı,
- PSO+SDP’nin diğer iki yönteme nazaran İHA’ları daha alçakta konumlandığı,

- Her üç yöntemde de (PSO+SDP, SDP ve DFT) anten sayılarının artmasıyla İHA'ların yüksekliklerinin arttığı,
- Konumlandırılacak olan İHA sayısı arttıkça İHA'ların daha alçakta konumlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 8.11 Anten Sayısı- İHA Yüksekliği İlişkisi (İBİ : 6, RFZ : 4).



Şekil 8.12 Anten Sayısı- İHA Yüksekliği İlişkisi (İBİ : 8, RFZ : 3).



9. SONUÇ

Son yıllarda meydana gelen teknolojik gelişmeler neticesinde dronların hem sivil alanda hem de askeri alanda kullanımını artmaktadır. Özellikle mini/mikro İHA olarak tabir edilen dronların maliyet-etkin olması ve en önemlisi istenilen yer ve zamanda hızlıca konuşlandırılabilmesi nedeniyle doğal afetler, kamu güvenliği, konser, toplantı, gösteri vb. tarzındaki çeşitli aktivitelerde geçici olarak mevcut telekomünikasyon alt yapısını desteklemek veya yerini almak suretiyle kullanılması son dönemde sektörün ilgisini çekmektedir. Bu tez kapsamında İHA baz istasyonundan rastgele konumlanmış olan kullanıcılara çoklu anten kullanımı ile huzme şekillendirme yaparak aynı anda yüksek hızda veri aktarımı incelenmiştir. Bu kapsamda problem, kullanıcılara göre İHA baz istasyonlarının konuşlanması ve huzme şekillendirmesi olmak üzere iki başlık altından ele alınmıştır. İHA baz istasyonlarının konuşlanmasında K-Means kümeleme yöntemleri ve Parçacık Sürü Optimizasyonu; huzme şekillendirme yöntemi olarak SDP (Semidefinite Programlama) ve Kod Kitapçığı yöntemleri kullanılmıştır. Tez kapsamında yapılan birinci benzeşim konuşlandırılacak olan tüm İHA baz istasyonlarının aynı yükseklikte olduğu farz ve kabul edilerek 400-800 m. yüksekliklerde konuşlandırılarak icra edilmiştir. Bu çerçevede oluşturulan K-Means Kümeleme algoritmalarının ve huzme şekillendirme yöntemlerini karşılaştırılması yapılmış, ayrıca toplam veri akış hızının belli bir yüksekliğe kadar arttığı belli bir yükseklikten sonra azalmaya başladığı tespit edilmiştir. Tüm İHA baz istasyonlarının aynı yükseklikte konuşlandırılmasının oluşturulan bazı kümeler için gereksiz yol kaybına, bazı kümeler için ise kullanıcıların NLoS durumunda kalmasına sebebiyet verdiği değerlendirilmesinde yola çıkarak her kullanıcı kümesine göre İHA baz istasyonlarının yüksekliklerinin belirlenmesi durumunu ikinci benzetimde incelenmiştir. Bu kapsamda İHA yükseklik yöntemi belirlenmiş mevcut K-Mean kümeleme yöntemleri ve huzme şekillendirme yöntemleriyle beraber kullanılmış ve karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla İHA baz istasyonu konumları Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemi ile belirlenmiştir. Her ne kadar PSO yöntemi ile elde edilen sonuçlar diğer yöntemlere göre daha iyi olsa da PSO uygulamasının işlem hacminin çok olması ve anten ve kullanıcı sayısı artışına bağlı olarak bu işlem yükünün

daha da artması nedeniyle teklif edilen metotlar optimal çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Tez kapsamında yapılan çalışmada kullanıcı sayısı kısıtlı tutulmuştur. Kullanıcı sayısı arttırılabilir ve kullanıcılar kademeli bir gruplamaya tabi tutularak veri akışında zamansal planlama yapılabilir. Ayrıca bu çalışma kapsamından her ne kadar İHA baz istasyonlarının enerjisinin kısıtlı olacağı değerlendirilerek hibrit huzme şekillendirme öngörülse de İHA baz istasyonunun enerji tüketimini optimize edecek yöntemler araştırılmalıdır. Kanal modellemesi İHA baz istasyonlarının sabit bir noktada durduğu varsayılarak modellenmiştir ancak çeşitli etkenler nedeniyle İHA baz istasyonlarının sabit bir noktada durması oldukça zordur. Bu nedenle daha gerçekçi bir kanal modeli üzerinde çalışılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Arturo M., Esterada R., Ndoma I.** (2017). The Role of Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) in the Case of Natural Disasters Response.
- [2] **Singhal G., Bansod B. S.** (2018). Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review.
- [3] **McWilliams A.** (June 2020). Drone Technology and Global Markets.
- [4] **Mohammed F., Idries A., Mohamed N., Al-Jaroodi J., and Jawhar I.** (2014). UAVs for Smart Cities: Opportunities and Challenges, International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) May 27-30, 2014. Orlando, FL, USA.
- [5] **Mohamed N., Al-Jaroodib J., Jawhar I., Idries A., Mohammed F.** (2020). Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities, Technological Forecasting & Social Change 153 (2020) 119293.
- [6] <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-ir/b?ie=UTF8&node=8037720011>, alındığı tarih:30.03.2022
- [7] **Zhang L.; Zhao H.; Hou S.; Zhao Z.; Xu H.; Wu X.; Wu Q.; Zhang R.** (2019). A Survey on 5G Millimeter Wave Communications for UAV-Assisted Wireless Networks: IEEE Access (Volume: 7).
- [8] **Merwaday A., Güvenç I.** (2015). UAV Assisted Heterogeneous Networks for Public Safety Communications, 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).
- [9] <https://www.turkcell.com.tr/dronecell>, alındığı tarih:30.03.2022
- [10] **Kakaes K.** (2015). Drones and Aerial Observation, New America
- [11] **Jo D., Kwon Y.** (2017). Development of Rescue Material Transport UAV, World Journal of Engineering and Technology, 2017, 5, 720-729.
- [12] **Perabathini B., Tummuri K., Agrawal A., Varma V. S.** (2019). Efficient 3D Placement of UAVs with QoS Assurance in Ad Hoc Wireless Networks, 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN).

- [13] **Lai C.C., Chen C.T., Wang L.C.** (2019). On-Demand Density-Aware UAV Base Station 3D Placement for Arbitrarily Distributed Users With Guaranteed Data Rates, *IEEE Wireless Communications Letters* (Volume: 8, Issue: 3, June 2019).
- [14] **He X., Yu W., Xu H. , Lin J., Yang X., Lu C., Fu X.** (2018). Towards 3D Deployment of UAV Base Stations in Uneven Terrain, 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN).
- [15] **Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M.** (2016). Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage, *IEEE Communications Letters* (Volume: 20, Issue: 8, Aug. 2016).
- [16] **Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S.** (2014). Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage, *IEEE Wireless Communications Letters* (Volume: 3, Issue: 6, Dec. 2014).
- [17] **Bor-Yaliniz I., El-Keyi Amr A., Yanikomeroglu E.** (2016). Efficient 3-D Placement of an Aerial Base Station in Next Generation Cellular Networks, *IEEE International Conference on Communications (ICC)At: Kuala Lumpur, Malaysia.*
- [18] <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/mobility-visualizer?f=8&ft=2&r=1&t=1,20&s=4&u=3&y=2020,2026&c=3,alındığıtarih:01.03.2022>
- [19] **Mumtaz S., Rodrigues J., Dai L.** (2017). mmWave Massive MIMO A Paradigm for 5G Chapter 1 Introduction to mmWave Massive MIMO, ELSEVIER.
- [20] <https://cordis.europa.eu/project/id/861222>, alındığıtarih:01.03.2022
- [21] 3GPP TR 38.901 V16.1.0 (2019-12) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16).
- [22] Federal Communications Commission. (Jul. 2016). Spectrum Frontiers Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking: FCC16- 89. [Online].

- [23] **Uwaechia A. N., Mahyuddin N. M.** (2020). A Comprehensive Survey on Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation Wireless Networks: Feasibility and Challenges, Article in IEEE Access · March 2020.
- [24] **Zhang L., Zhao H., Hou S., Zhao Z., Xu H., Wu X., Wu Q., Zhang R.** (2019). A Survey on 5G Millimeter Wave Communications for UAV-Assisted Wireless Networks, IEEE Access (Volume: 7).
- [25] **Xiao M.; Mumtaz S., Huang Y., Dai L., Li Y., Matthaiou M., Karagiannidis G. K., Björnson E.** (2017). Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Volume: 35, Issue: 9, Sept. 2017).
- [26] **Rangan S., Rappaport T. S., Erkip E.** (2014). Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges, Proceedings of the IEEE (Volume: 102, Issue: 3, March 2014).
- [27] **Hemadneh A., Satyanarayana K., El-Hajjar M., and Hanzo L.** (2018). Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 2, pp. 870–913, Secondquarter 2018.
- [28] **Balanis C. A.**, Antenna Theory Analysis and Design Fourth Edition 2016 by John Wiley & Sons, (2016).
- [29] **Wang X., Kong L., Kong F., Qiu F., Xia M., Arnon S., Chen G.** (2018). Millimeter Wave Communication: A Comprehensive Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 20, Issue: 3, thirdquarter 2018).
- [30] **Nandi D., Maitra A.** (2019). The effects of rain on millimeter wave communication for tropical region, in Proc. URSI Asia-Pacific Radio Sci. Conf. (AP-RASC).
- [31] **Nagaraj P.** (2018). Impact of atmospheric impairments on mmWave based outdoor communication, arXiv:1806.05176.

- [32] **Pi Z., Khan F.** (2011). An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems, *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, Jun. 2011.
- [33] **Zhao H., Mayzus R., Sun S., Samimi M., Schulz J. K., Azar Y., Wang K., Wong G. N., Gutierrez F. Jr., Rappaport T. S.** (2013). 28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city, *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference*.
- [34] **Rioul O., Magossi J. C.** (2014). On Shannon’s Formula and Hartley’s Rule: Beyond the Mathematical Coincidence, ISSN 1099-4300.
- [35] **Rusek F., Persson D., Lau B. K., Larsson E. G., Marzetta T. L., Edfors O., Tufvesson F.** (2013). Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan. 2013.
- [36] **Reil M., Lloyd G.**, Millimeter-Wave Beamforming: Antenna Array Design Choices & Characterization White Paper, Rohde & Schwarz GmbH & Co.
- [37] **Xiao Z., Zhu L., Liu Y., Yi P., Zhang R., Xia X.G., Schober R.** (2021). A Survey on Millimeter-Wave Beamforming Enabled UAV Communications and Networking, arXiv:2104.09204.
- [38] **Valkonen R.** (2018). Compact 28-GHz phased array antenna for 5G access, 2018 *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium – IMS*.
- [39] **Sun S., Rappaport T.S., Heath R. W., Rangan S.** (2014). MIMO for Millimeter-Wave Wireless Communications: Beamforming, Spatial Multiplexing, or Both?, December 2014 *IEEE Communications Magazine* 52(12):110-121.
- [40] **Hashemi M., Koksall C. E., Shroff N. B.** (2017). Energy-Efficient Power and Bandwidth Allocation in an Integrated Sub-6 GHz – Millimeter Wave System.
- [41] **Kutty S., Sen D.** (2016). Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (Volume: 18, Issue: 2, Secondquarter 2016).
- [42] <https://ma-mimo.ellintech.se/2017/10/03/what-is-the-difference-between-beamforming-and-precoding/> alındığı tarih:30.03.2022

- [43] **Marzetta T. L., Larsson E. G., Yang H., Ngo H. Q.**, Fundamentals of Massive MIMO, Cambridge University Press (2016).
- [44] **Khawaja W., Ozdemir O., Guvenc I.** (2017). UAV Air-to-Ground Channel Characterization for mmWave Systems, IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall).
- [45] **Zhong W., Xu L., Zhu Q., Chen X., Zhou J.** (2019). MmWave Beamforming for UAV Communications with Unstable Pointing, China Communication p.37-46 ,January 2019.
- [46] **Colpaert A., Vinogradov E., Pollin S.** (2020). 3D Beamforming and Handover Analysis for UAV Networks, IEEE Globecom Workshops, 2020.
- [47] **Zhang W., Zhang W.**(2020). UAV Beam Alignment for Highly Mobile Millimeter Wave Communications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 69, Issue: 8, Aug. 2020.
- [48] **Xiao Z., Dong H., Bai L., Wu O. D., Xiang-Gen X.** (2020). Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) Deployment With Millimeter-Wave Beamforming, IEEE Internet of Things Journal Volume: 7, Issue: 2, Feb. 2020.
- [49] **Wang Y., Giordani M., Zorzi M.** (2020). On the Beamforming Design of Millimeter Wave UAV Networks: Power vs. Capacity Trade-Offs,
https://www.researchgate.net/publication/344878630_On_the_Beamforming_Design_of_Millimeter_Wave_UAV_Networks_Power_vs_Capacity_Trade-Offs/comments
- [50] **Sabzehali J., Vijay Shah K., Dhillon H. S., Reed J. H.** (2021). 3D Placement and Orientation of mmWave-based UAVs for Guaranteed LoS Coverage, arXiv:2104.12993 2021.
- [51] **Gapeyenko M., Bor-Yaliniz I., Andreev S., Yanikomeroglu H., Koucheryavy Y.** (2018). Effects of Blockage in Deploying mmWave Drone Base Station for 5G Networks and Beyond, IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops) 2018.

- [52] **Al-Hourani A., Kandeepan S., Jamalipour A.** (2014). Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments, in 2014 IEEE global communications conference. IEEE, 2014, pp. 2898–2904.
- [53] **Akarsu A., Girici T.** (2018). Fairness aware multiple drone base station deployment, IET Communications, vol. 12, no. 4, pp. 425–431.
- [54] **Zhang Z. L., , Xiao J., , Cao Z., Xia X., X. G., Schober, R.** (2020). Millimeter-wave full-duplex UAV relay: Joint positioning, beamforming, and power control. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 38(9), 2057-2073.
- [55] **C.Qiu, , Wei Z., Yuan X., Feng Z., Zhang P.** (2020). Multiple UAV-mounted base station placement and user association with joint fronthaul and backhaul optimization. IEEE Transactions on Communications, 68(9), 5864-5877.
- [56] **Reynolds C. W.** (1987). Flocks, herds, and schools: a distributed behavioural model, Computer Graphics (ACM SIGGRAPH '87 Conference Proceedings), Vol. 21, No. 4, pp. 25–34, July 1987.1
- [57] **Kennedy J., Eberhart R. C.** (1995). Particle Swarm Optimization, In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, pp. 1942–1948.
- [58] **Eberhart R. C., Kennedy J.** (1995). A new optimizer using particle swarm theory, In Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, pp. 39–43.
- [59] **Ahmed H., Glasgow Janice** (2012). Swarm Intelligence: Concepts, Models and Applications,
<https://www.researchgate.net/publication/264457775>.
- [60] **Enescu M.** (2020). 5G New Radio: A Beam-based Air Interface. John Wiley & Sons.
- [61] **Jiang L., Jafarkhani H.** (2018). Multi-user analog beamforming in millimeter wave mimo systems based on path angle information, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 1, pp. 608–619.
- [62] **Clerc M., Kennedy J.** (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, IEEE

transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 1, pp. 58–
73.

