

**GELECEK NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE İNSANSIZ
HAVA ARAÇLARI İÇİN KAYNAK YÖNETİM TEKNİKLERİ**

**RESOURCE MANAGEMENT TECHNIQUES FOR UNMANNED
AERIAL VEHICLES IN NEXT GENERATION
COMMUNICATION SYSTEMS**

UYGAR DEMİR

PROF. DR. CENK TOKER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

GELECEK NESİL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN KAYNAK YÖNETİM TEKNİKLERİ

UYGAR DEMİR

Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cenk Toker

Şubat 2021, 205 sayfa

İnsansız hava araçlarının uçan baz istasyonları olarak 5G ve ötesi ağlarda kullanımı, yerel haberleşme ağının karşılaştığı bazı sorunlara ümit vaadeden bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu sorunların arasında, kör nokta, kapsama alanı dışında kalma, düşük servis kalitesi ve sürdürülebilir hizmet sayılabilir. İnsansız hava araçlarının yüksek hareketlilikleri, değişken yükseklikleri ve kolay kurulumları sayesinde, bu sorunlarla baş edebileceği öngörülmektedir. Özellikle, yüksek görüş hattı (line-of-sight, LoS) bağlantısı ihtimali sayesinde, bu araçlar hizmet talebi olan bölgelerde, yüksek veri hızı, yüksek güvenilirlik ve düşük gecikme gibi hizmetleri yerine getirerek sürdürülebilir kapsamayı sağlaması beklenmektedir. İHA haberleşmesinin bu avantajlarına rağmen, düşük uçuş süreleri, eniyi üç boyutlu konuşlandırma, rota planlama ve enerji verimliliği gibi araştırılmayı bekleyen sorunları mevcuttur. Bu tezin ana amacı, bu sorunlara çözüm bulmak adına, İHA haberleşmesinde, kaynak yönetim tekniklerinin incelenmesidir. Kaynak yönetimi konusu, uçan erişim noktasının (UxNB) görevini gerçekleştirirken uçmak ve haberleşmek için tükettiği kaynakların eniyilemesini ele alır. Böylelikle, bu tez çalışmasında bilinen literatürün aksine, düşük uçuş süresi, rota planı, eniyi üç boyutlu konuşlandırma, artağ sorunu ve başarımların analizine yeni bir bakış açısı getirilmektedir.

İlk olarak, döner kanatlı bir İHA'nın uçmak için harcadığı gücün, momentum ve pala eleman teorileri kullanılarak matematiksel analizi yapılmaktadır. Burada elde edilen sonuç-

lar, uçmak için harcanan gücün haberleşmek için harcanan gücün yüzlerce kat üzerinde olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, uçuş dinamiklerinin de haberleşme problemlerine dahil edilmesi gerekmektedir.

Tek ve çok sayıda İHA için enerji verimli 3B konuşlandırma problemi farklı içeriklerde farklı bölümlerde ele alınmaktadır. Öncelikle, tek UxNB'nin konuşlandırılması, uçuş dinamikleri ve kullanıcıların hizmet kalitesi kısıtları altındaki bir haberleşme senaryosunda incelenmektedir. Sonrasında, çoklu İHA baz istasyonlarının oluşturduğu ağın çalışma süresini ve kapsama alanı yoğunluğunun enbüyütüldüğü bir doğal afet senaryosunda daire paketleme teorisinden faydalanılmıştır. Bunun yanında, farklı İHA tipleri ile oluşturulan havasal haberleşme ağının başarımlı analizi yapılmaktadır. İHA tipine özgü konuşlandırma problemlerinin çözümü için, K-means kümeleme ve DC programlama kullanılarak eniyiye yakın sonuç veren bir algoritma önerilmektedir ve bu algoritmanın yardımıyla detaylı bir karşılaştırma çevrevesi sunulmaktadır. Bilindiği kadarıyla burada yapılan kapsamlı çalışma İHA haberleşmesi alanı için ilktir.

Akıllı şehir uygulamalarından olan akıllı ulaşım sistemlerinde İHA baz istasyonlarının kullanılması fikri literatürde daha önce ortaya atılmışsa da ilk kez bu çalışmada, bir V2X haberleşme senaryosunda uçan yol kenarı birimi olarak kullanımı gerçekleştirilmiştir. Gecikme süresi ve artağ kısıtının olduğu bir haberleşme senaryosunda, UxNB, uçan yol kenarı birimi olarak araçtan altyapıya bağlantısını kurmaktadır. Eğer İHA'lar ağdaki veri hızını arttırmak için kullanılacaksa, ağın artağ kapasitesi önemli bir sınır teşkil etmektedir. Bu sorunun araştırılması adına, tezde, yükseltilmiş mobil genişbant haberleşme senaryosunda enerji verimli konuşlandırma problemi ele alınmaktadır. Bu problemin maliyet işlevinin analitik olarak tek modlu olduğu gösterilerek buluşsal bir algoritma çözümü elde etmek adına sunulmaktadır.

Uçan baz istasyonu olarak çalışacak olan İHA'lar, 5G teknolojisindeki yenilikçi yaklaşımlardan birini olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, bir UxNB ağı, ağ dilimleme işlemini de uygulayabilmelidir. Tezin son bölümünde, farklı hizmet talepleri olan kullanıcıların bulunduğu bir haberleşme senaryosu ele alınmaktadır. UxNB'nin harcadığı toplam gücü enküçültmek isteyen stokastik zaman ortalamalı bir problem önerilmektedir. Önerilen problemde, dilimlerden birinde ultra güvenli düşük gecikmeli haberleşme talep eden

kullanıcıların olduğu ve diğerinde yüksek veri hızı talep eden kullanıcıların olduğu iki ağ dilimi bulunmaktadır. Bu senaryoda, dinamik radyo kaynak tahsisinin ve UxNB'nin rota planının ortaklaşa yapıldığı yinelemeli bir algoritma önerilmektedir.

Özetle, bu tezde elde edilen analitik ve nümerik bulgular, gelecekte, kablosuz haberleşmede önemli bir yere sahip olacak insansız hava araçları ile oluşturulan yersel olmayan ağların tasarımında ve uygulama alanları hakkında genel bir çerçeve oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları, İHA Haberleşmesi, Kaynak Yönetimi, Enerji Verimliliği, Eniyi 3B Konuşlandırma, Rota Planlama, V2X Ağları

ABSTRACT

RESOURCE MANAGEMENT TECHNIQUES FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES IN NEXT GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS

UYGAR DEMİR

**Doctor of Philosophy, Department of
Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Cenk Toker

February 2021, 205 pages

The use of unmanned aerial vehicles as flying base stations in 5G and beyond networks has emerged as a promising solution to some of the problems faced by the terrestrial communication network. These problems include blind spots, low coverage, low service quality and sustainable service. It is anticipated that unmanned aerial vehicles can cope with these problems thanks to their high mobility, adjustable heights, and easy and quick deployment. In particular, due to the high possibility of establishing a line-of-sight link, these vehicles are expected to provide a sustainable coverage in regions with service demand such as high data rate, high reliability and low latency etc. Despite these advantages of UAV communications, there are still problems which require further research on, e.g. low flight times, optimal three-dimensional deployment, route planning and energy-efficiency. The main goal of this dissertation is to examine resource management techniques in UAV communications in order to find solutions to these problems. The topic of resource management deals with the optimization of the resources that the flying access point (UxNB) consumes to fly and communicate while performing its task. Thus, unlike the common literature, this study brings a new perspective to low flight time, route planning, optimal 3D deployment, backhaul problems and performance analysis.

First, the power dissipated by a rotary-wing UAV to fly is mathematically analyzed using the momentum and blade element theories. The results obtained show that the power spent

to fly can be nearly hundreds of times higher than the power spent for communication. Therefore, flight dynamics should also be included in communication problems.

The problem of energy-efficient 3D deployment for single and multiple UAVs is discussed in different context in different chapters. First, the deployment of a single UxNB is examined in a communication scenario under flight dynamics and quality of service constraints of the ground users. Next, the deployment problem of the multiple UAV base stations that maximizes the network endurance and the coverage density in a natural disaster scenario is examined where circle packing theory is utilized. Following that, performance analysis of the airborne communication network created with different types of UAVs is presented. For the solution of the deployment problems specific to each UAV type, an algorithm that gives the suboptimal result using K-means clustering and DC programming is proposed and with the help of this algorithm, a detailed comparison framework is provided. To the best of our knowledge, this comprehensive study is the first for the UAV communications field.

Although the idea of using UAV base stations in intelligent transportation systems, which is one of the smart city applications, has been proposed before in the literature, it is the first time that in this study they are used as flying roadside units in a V2X communication scenario. In a communication scenario with the latency and the backhaul constraints, UxNB establishes the vehicle-to-infrastructure (V2I) connection as the flying roadside unit. If UAVs are used to increase the data rate in the network, the backhaul capacity of the network poses a significant limitation. In order to investigate this, the thesis discusses the energy-efficient deployment problem in an enhanced mobile broadband communication scenario. Upon analytically showing that the cost function of this problem is unimodular, a heuristic algorithm is provided to obtain the solution.

UAVs, which will operate as flying base stations, forms one of the innovative approaches in 5G technology. Hence, a UxNB network should be able to implement network slicing as well. In the last chapter of the dissertation, a communication scenario with users having different service demands is discussed. A stochastic time-averaged problem is proposed to minimize the total power consumed by the UxNB. In the proposed problem, there are two network slices where one of these slices belongs to users demanding ultra-reliable low-latency communication, and the other one represents users demanding high data rate.

In this scenario, an iterative algorithm is proposed in which dynamic radio resource allocation and UxNB's route planning are jointly handled.

In summary, the analytical and numerical foundations obtained in this dissertation constitute a general framework about the design and application areas of non-terrestrial networks created by unmanned aerial vehicles, which will have an important place in wireless communication in the future.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, UAV Communications, Resource Management, Energy Efficiency, Optimal 3D Deployment, Route Planning, V2X Networks

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana daima yol gösteren ve motivasyonumu bir an bile kaybetmememi sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Cenk Toker'e teşekkürü bir borç bilirim. Aynı zamanda yüksek lisans tezinde de birlikte çalışma fırsatı bulduğum için kendimi oldukça şanslı hissediyorum.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşarak bu tez çalışmasına yön veren tez izleme komitesi ve savunma sınavı jüri üyesi kıymetli hocalarıma teşekkür ederim.

Sağladıkları güler yüzlü ortam, destek ve yardımları için geçmişte bölümümüzde çalışmış ve mevcutta çalışan tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve bölümümüz hocalarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca sevgi ve desteklerini hep hissettiğim anneme ve babama çok teşekkür ediyorum. Onların desteği ve yardımları olmadan kesinlikle şu anda olduğum kişi olamazdım. Bugüne kadar şayet bir başarımla varsa bunun temelini atanlar kesinlikle annem ve babamdır. Kendisi uzakta olsa da her görüşmemizde beni canlandıran, akademik ve entellektüel anlamda motivasyonumu yükselten sevgili ağabeyime çok teşekkür ederim. İyi ki varsınız.

Bu uzun süreçte benim en yakın arkadaşım olan, sevgilim ve eşim Emel'e ne kadar teşekkür etsem azdır. Onun yardımları ve sabrı olmadan bu tez kesinlikle bitmezdi. Özellikle, çalışmalarım sırasında bana verdiği destekle tezi bitirmemdeki en büyük motivasyon kaynağım oldun. Bana karşı olan sabrın, desteğin, sevgin ve her şey için sana minnettarım. Böyle bir aileye sahip olduğum için kendimi ne kadar şanslı hissettiğimi kelimelerle anlatamam.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER	xiii
ÇİZELGELER	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. İHA HABERLEŞMESİNE GENEL BİR BAKIŞ: AVANTAJLAR, SORUNLAR VE ARAŞTIRMALAR	1
1.1. İHA Haberleşmesinin Avantajları ve Uygulama Alanları	5
1.1.1. Kapsama Alanı ve Kapasite Arttırıcı olarak UxNB Konuşlandırma	5
1.1.2. Doğal Afetlerde Kullanım	6
1.1.3. V2X Ağlarında UxNB Kurulumu	7
1.1.4. Kullanıcı Talepleri Doğrultusunda Kullanım	8
1.2. İHA Haberleşmesindeki Sorunlar ve İlgili Çalışmalar	9
1.2.1. Kanal Modeli	11
1.2.2. Eniyi Konuşlandırma	13
1.2.3. Düşük Uçuş Süresi ve Enerji Verimliliği	14
1.2.4. Rota Planlama	16
1.2.5. Artağ Bağlantısı	17
1.3. Literatürdeki Eksik Noktalar	19
1.4. Katkılar	21
1.4.1. Kapsama Arttırımı için Üç Boyutlu Konuşlandırma	21
1.4.2. Başarım Analizi	22
1.4.3. Farklı Uygulama Alanları	23
1.4.4. Radyo Kaynak Tahsisi ve Rota Planlama	24
1.5. Tezden Üretilen Yayınlar	25

2. DÖNER KANATLI BİR İHA İÇİN GÜÇ TÜKETİM ANALİZİ	27
2.1. Problem Arka Planı ve Literatür Özeti	27
2.2. İHA Güç Tüketim Modeli	29
2.2.1. Uluslararası Standart Atmosfer Modeli	29
2.2.2. Havada Asılı Kalmak için Gereken Güç	31
2.2.3. Düşey Düzlemde Hareket için Gereken Güç	32
2.2.4. Yatay Düzlemde Hareket için Gereken Güç	33
2.3. Sayısal Bulgular	34
2.4. Bölüm Özeti	40
3. DÖNER KANATLI BİR UxNB'NİN ENERJİ VERİMLİ KONUŞLANDIRILMASI	42
3.1. Problem Arka Planı ve Literatür Özeti	42
3.2. Sistem Modeli	43
3.2.1. Havadan Yere Kanal Modeli	44
3.2.2. Asılı Kalmak için Gereken Güç	46
3.3. Enerji Verimli UxNB Konuşlandırma Problemi	47
3.4. Sayısal Bulgular	50
3.5. Bölüm Özeti	55
4. BİR DOĞAL AFETTE KAPSAMA YOĞUNLUĞU VE AĞ SÜREKLİLİĞİ SORUNLARI	57
4.1. Problem Arka Planı ve Literatür Özeti	57
4.2. Sistem Modeli	59
4.2.1. UxNB Güç Tüketim Modeli	60
4.2.2. Ağ Sürekliliği	61
4.3. Girişim Farkında Çoklu UxNB Konuşlandırma	63
4.4. Sayısal Bulgular	66
4.5. Bölüm Özeti	72
5. FARKLI TİPTE İHA'DAN OLUŞAN UxNB AĞLARININ BAŞARIM ANALİZİ	74
5.1. Giriş	74

5.1.1. İlgili Çalışmalar ve Motivasyon	74
5.1.2. Katkılar	77
5.2. Sistem Modeli	79
5.3. Çoklu UxNB Konuşlandırma ve Kullanıcı Eşleştirme Problemi	82
5.4. İHA Tipine Özgü Kısıtlar	85
5.4.1. Döner Kanatlı Bir İHA'nın Güç Tüketimi	85
5.4.2. Güç Kablosunun Boyu	87
5.4.3. Rüzgara Bağlı Değişen Pozisyon	89
5.5. Ortak Çoklu UxNB Konuşlandırma ve Kullanıcı Eşleştirme için Çözüm Yaklaşımı	92
5.5.1. <i>K</i> -Means Kümeleme	92
5.5.2. DC Programlama	93
5.6. Sayısal Bulgular	96
5.7. Bölüm özeti	108
6. V2X AĞLARI İÇİN UÇAN YOL KENARI BİRİMİ MİMARİSİ	110
6.1. Problem Arka Planı ve Motivasyon	110
6.2. Ağ Modeli	112
6.2.1. Havadan Yere Kanal Modeli	113
6.2.2. Artağ Şebeke Kapasitesi	114
6.2.3. Gecikme Modeli	116
6.2.4. Güç Tüketim Modeli	116
6.3. Problem Formülasyonu	118
6.4. Sayısal Bulgular ve Tartışmalar	120
6.5. Bölüm Özeti	126
7. YÜKSEK VERİ HIZI TALEBİ OLAN BÖLGELERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE ARTAĞ SORUNU	128
7.1. Problem Arka Planı ve Motivasyon	128
7.2. Ağ Modeli ve Problem Formülasyonu	131
7.3. Çözüm Yaklaşımı ve Buluşsal Algoritma	136
7.4. Sayısal Bulgular	140

7.5. Bölüm Özeti	146
8. TAM İZOLASYONLU AĞ DİLİMLEME İLE DİNAMİK RADYO KAYNAK TAHSİSİ VE ROTA PLANLAMASI	148
8.1. Problem Arka Planı ve Motivasyon	148
8.1.1. İlgili Çalışmalar	148
8.1.2. Katkıları	151
8.2. Sistem Modeli ve Eniyileme Problemi	152
8.2.1. Havadan Yere Kanal Modeli	153
8.2.2. Ağ Dilimleri	155
8.2.3. UxNB Hareketliliği ve Güç Tüketimi	156
8.2.4. Önerilen Eniyileme Problemi	158
8.3. Lyapunov Eniyileme Yöntemi	159
8.4. Problem P2 için Önerilen Çözüm Yaklaşımı	164
8.4.1. Dinamik Altkanal ve Güç Tahsisi	165
8.4.2. Yatay ve Düşey Düzlemde Rota Planı	168
8.4.3. JCoFC Algoritması, Karmaşıklık ve Yakınsama	170
8.5. Sayısal Bulgular	171
8.6. Bölüm Özeti	180
9. SONUÇ VE ARAŞTIRMAYA AÇIK KONULAR	183
9.1. Özet	184
9.1.1. İHA Haberleşmesine Genel Bir Bakış: Avantajlar, Sorunlar ve Araştırmalar	184
9.1.2. Döner Kanatlı Bir İHA İçin Güç Tüketim Analizi	184
9.1.3. Döner Kanatlı Bir UxNB'nin Enerji Verimli Konuşlandırılması ...	185
9.1.4. Bir Doğal Afette Kapsama Yoğunluğu ve Ağ Sürekliliği Sorunları .	186
9.1.5. Farklı Tipte İHA'dan Oluşan UxNB Ağlarının Başarım Analizi ...	186
9.1.6. V2X Ağları İçin Uçan Yol Kenarı Birimi Mimarisi	187
9.1.7. Yüksek Veri Hızı Talebi Olan Bölgelerde Enerji Verimliliği ve Artağ Sorunu	187

9.1.8. Tam İzolasyonlu Ağ Dilimleme ile Dinamik Radyo Kaynak Tahsisi ve Rota Planlaması	188
9.2. Araştırmaya Açık Konular	189
9.2.1. Kanal Modeli	189
9.2.2. Ölçüme Dayalı Güç Tüketim Modeli	189
9.2.3. Anten Tasarımı	189
9.2.4. Aynı NTN İçerisinde Farklı İHA Tipleri	190
9.2.5. UxNB'ler Arasında Haberleşme	190
9.2.6. Farklı Radyo Erişim Teknolojileri	190
KAYNAKLAR	192
ÖZGEÇMİŞ	205

ŞEKİLLER

Şekil 1.1.	İnsansız hava araçlarının sınıflandırılması	4
Şekil 2.1.	Gelecek nesil heterojen 5G ağının olası bir yapısı	29
Şekil 2.2.	Dört adet bataryaya sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde yük ağırlığına karşı yerden 120 m yukarıda havada asılı kalmak için harcanan güç grafiği.	36
Şekil 2.3.	Dört adet bataryaya sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde yük ağırlığına karşı kestirilen uçuş süresi	37
Şekil 2.4.	Sekiz kilogram yük ağırlığına sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde batarya sayısına karşı kestirilen uçuş süresi	37
Şekil 2.5.	Sekiz kilogram yük ağırlığına sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde batarya özgül enerjisine karşılık kestirilen uçuş süresi	38
Şekil 2.6.	Ankara üzerinde uçan sekiz kilogram yük ağırlığına ve dört bataryaya sahip bir İHA'nın yükseliş ya da alçalış hızına karşılık harcadığı güç.	39
Şekil 2.7.	Ankara üzerinde uçan sekiz kilogram yük ağırlığına sahip bir İHA'nın yatay düzlemdeki hızına karşılık harcadığı güç.	40
Şekil 3.1.	İHA haberleşme modeli	44
Şekil 3.2.	Moskova (124 m), Ankara (938 m) ve Mexico City (2240 m) üzerinde 120 m irtifada faydalı yük ağırlığına karşılık havada asılı kalmak için gereken güç eğrileri.	52
Şekil 3.3.	$\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için P_{max} , uçuş güç sınırına karşılık eniyi yükseklik eğrileri.	53
Şekil 3.4.	$\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için P_{max} asılı kalma güç sınırına karşılık ortalama hizmet verilen kullanıcı sayısı eğrileri.	54
Şekil 3.5.	$\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için UxNB anteninin hüzmeye genişliğine karşılık eniyi ortalama yükseklik eğrileri.	55
Şekil 3.6.	$\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için UxNB anteninin hüzmeye genişliğine karşılık ortalama hizmet verilen kullanıcı sayısı eğrileri.	56
Şekil 4.1.	Bir afet senaryosu için çoklu İHA haberleşme ağı	59
Şekil 4.2.	Yedi İHA için eniyi daire paketleme stratejisi [128].	64

Şekil 5.8.	Kablo uzunluğu 120, 250, 550 ve 1100 m olan bir balon için rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak balonun eğilme açısı eğrileri	104
Şekil 5.9.	Balon UxNB sayısı dört, kapsanmak istenen alanın yarıçapı 800 m olan bir ağda, kablo uzunluğu 120, 250, 550 ve 1100 m için rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak ağda hizmet alan kullanıcı sayısı eğrileri. .	105
Şekil 5.10.	Kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak bataryalı, bağlı ve balon İHA'ların oluşturduğu 4 tane UxNB bulunan ağlardaki hizmet alan kullanıcı yoğunluğu eğrileri. Bataryalı UxNB ağları Moskova, Madrid ve Ankara şehirlerinde kurulmaktadır.	106
Şekil 5.11.	Kapsanmak istenilen alanın yarıçapının 800 m olduğu bir ağda, ağa katılan UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak bataryalı, bağlı ve balon İHA'ların oluşturduğu UxNB ağlardaki hizmet alan kullanıcı yoğunluğu eğrileri. Bataryalı UxNB ağları Moskova, Madrid ve Ankara şehirlerinde kurulmaktadır.	108
Şekil 6.1.	UxNB yardımcı V2X haberleşme modeli	113
Şekil 6.2.	Enbüyük tolere edilebilir gecikmenin bir fonksiyonu olarak $N^{av} = 8, 16, 64$ Kbit ortalama paket uzunlukları ve iki farklı kuyruk tipi için gereken enküçük veri hızı eğrileri.	123
Şekil 6.3.	Ortalama paket uzunlukları $N^{av} = 8, 16, 64$ Kbit için ihlal olasılığının bir fonksiyonu olarak eniyi yükseklik ve toplam güç tüketimi eğrileri. . .	124
Şekil 6.4.	Ortalama paket uzunlukları $N^{av} = 8, 16, 64$ Kbit için ihlal olasılığının bir fonksiyonu olarak yüzdellik artağ şebeke yükü.	127
Şekil 7.1.	Mobil genişbant kullanıcılarının olduğu UxNB yardımcı 5G haberleşme senaryosu.	131
Şekil 7.2.	Kullanıcı sayısının bir fonksiyonu olarak (solda) UxNB'nin uçmak için harcadığı güç başına toplam veri hızı (Kbps/W) ya da ağ verimliliği eğrileri ve (sağda) Jain endeksi.	142
Şekil 7.3.	Farklı şehir senaryoları için kullanıcı sayısının bir fonksiyonu olarak ağ verimliliği eğrileri.	143
Şekil 7.4.	Farklı şehir senaryolarına göre ortalama UxNB uçuş süresi	145
Şekil 7.5.	Sistemde 50 kullanıcı varken artağ bağlantısı kurulan baz istasyonunun UxNB'nin hizmet verdiği alanın merkezine olan uzaklığının bir fonksiyonu olarak farklı şehir senaryoları için ağ verimliliği eğrileri.	145

Şekil 8.1.	Problem PI 'in çözümü için önerilen kapalı döngülü yinelemeli sistem. .	164
Şekil 8.2.	Problem 8.37'nin çözümü için dönüştürülen Problem 8.40'ın yer aldığı integral kontrolcüye sahip kapalı döngü kontrol sistemi	168
Şekil 8.3.	Sönümlemesiz kanallarda zamanın bir fonksiyonu olarak ağ dilimlerindeki veri hızı eğrileri.	174
Şekil 8.4.	Zamanın bir fonksiyonu olarak sönümlemesiz kanallarda (solda) toplam iletim gücü ve (sağda) toplam tüketilen güç eğrileri.	175
Şekil 8.5.	Senaryo 2 için her iki dilimdeki sanal kuyruk birikimlerinin zamana göre değişimi. (Solda) Multimedya diliminin sahip olduğu tek sanal kuyruk ve (sağda) RLL diliminin sahip olduğu sanal kuyruk birikimleri. Karşılaştırma için Senaryo 2 koşulu altında sönümlemesiz kanal durumu da verilmiştir.	176
Şekil 8.6.	Senaryo 2 için her iki dilime ait zamana karşı veri hızı eğrileri.	177
Şekil 8.7.	Senaryo 2 için $400 \times 400 \text{ m}^2$ 'lik bir alanda, farklı zaman dilimlerinde değişen kullanıcı sayıları için 3 boyutlu UxNB rota planı, UxNB rota başlangıç noktası $\mathbf{J}[0] = [-200, 200, 80]^T$	178
Şekil 8.8.	Senaryo 2 için elde edilen, zamanın bir fonksiyonu olarak Rice sönümlemeli kanallarda (solda) toplam iletim gücü ve (sağda) toplam tüketilen güç eğrileri.	179
Şekil 8.9.	Senaryo 2 için zamanın bir fonksiyonu olarak (solda) kalan batarya seviyesi ve (sağda) kalan uçuş süresi eğrileri.	180

ÇİZELGELER

Çizelge 1.1.	Literatürde İHA haberleşmesi ile ilgili yapılan çalışmaların özeti	19
Çizelge 2.1.	Tipik bir döner kanatlı İHA'nın teknik ve fiziksel özellik değerleri [94]	35
Çizelge 3.1.	Benzetimlerde kullanılan İHA'nın teknik ve fiziksel özellikleri	50
Çizelge 3.2.	Benzetim parametreleri	51
Çizelge 4.1.	R yarıçaplı bir alanın aynı yükseklikte uçan UxNB'ler tarafından "klasik" daire paketleme ile elde edilen enbüyük kapsama yoğunluğu D , [128].	66
Çizelge 4.2.	Benzetimlerde kullanılan döner kanatlı UxNB'nin özellikleri	67
Çizelge 5.1.	Beaufort Rüzgar Ölçeği	91
Çizelge 5.2.	Benzetimlerde Kullanılan Döner Kanatlı İHA'ların Özellikleri	98
Çizelge 5.3.	Benzetim parametreleri	98
Çizelge 6.1.	FRSU ve yer baz istasyonu arasındaki kanal parametreleri [72].	115
Çizelge 6.2.	Benzetimlerde kullanılan UxNB'nin teknik ve fiziksel özellikleri	120
Çizelge 6.3.	Benzetim değerleri	121
Çizelge 6.4.	Eşitlik 6.21c'deki gecikme kısıtını sağlamak için gereken enküçük veri hızı	122
Çizelge 7.1.	Tipik bir UxNB'nin teknik ve fiziksel özellikleri	140
Çizelge 7.2.	Şehir Tiplerine göre LoS Olasılığı Parametreleri	140
Çizelge 7.3.	Benzetim değerleri	141
Çizelge 8.1.	Tipik bir İHA'nın teknik ve fiziksel özellikleri	172
Çizelge 8.2.	Benzetim değerleri	172
Çizelge 8.3.	Ağ Dilimi Senaryoları ve İsterleri	173
Çizelge 8.4.	RLL Dilimindeki Uçtan Uca Gecikme Kısıtının Sağlanması için Gereken Veri Hızı	173

SİMGELER VE KISALTMALAR

5G	5'inci Nesil
b.ö.d.	Bağımsız ve Özdeş Dağılımlı
CoMP	Coordinated Multi-Point transmission and reception (Koordineli Çok noktalı İletim ve Alım)
D2D	Device-to-Device (Cihazdan Cihaza)
DC	Difference of Convex functions (Dışbükeylerin Farkı işlevi)
DCA	Dışbükeylerin Farkı Algoritması
eMBB	enhanced Mobile Broadband (yükseltilmiş Mobil Genişbant)
FCC	Federal Communications Commission
FRSU	Flying Roadside Unit (Uçan Yol Kenarı Birimi)
FSO	Free Space Optical (Serbest Uzay Optik)
GSM	Global System for Mobile Communications
HAP	High Altitude Platform (Yüksek İrtifa Platformu)
IoT	Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
ITS	Intelligent Transport System (Akıllı Ulaşım Sistem)
ITU	International Telecommunication Union
İHA	İnsansız Hava Aracı
JCoFC	Joint Communication and Flight Control (Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü)
LAP	Low Altitude Platform (Alçak İrtifa Platformu)
LoS	Line-of-Sight (Görüş Hattı)
LTE	Long Term Evolution
MEC	Mobil Edge Computing (Mobil Sınır Bilişim)
MINLP	Mixed Integer Non-Linear Program (Karışık Tamsayı Doğrusal olmayan Program)
mMTC	massive Machine Type Communications (yoğun Makina Tipi Haberleşme)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Çok Giriş Çok Çıkış)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NLoS	Non-Line-of-Sight (Görüş Hattı Olmayan)

NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access (Dikgen olmayan Çoklu Erişim)
NTN	Non-Terrestrial Networks (Yersel olmayan Ağlar)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Dikgen Frekans Bölümlü Çoklu Erişim)
OMA	Orthogonal Multiple Access (Dikgen Çoklu Erişim)
PLE	Pathloss Exponent (Yol Kaybı Üsseli)
PSD	Power Spectral Density (Güç İzgesel Yoğunluğu)
QoS	Quality-of-Service (Hizmet Kalitesi)
RAT	Radio Access Technology (Radyo Erişim Teknolojisi)
Rel-XX	Release-XX (XX'inci Sürüm)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RMS	Root-Mean-Square
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio (Sinyal Girişim Gürültü Oranı)
SNR	Signal-to-Noise-Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SQP	Sequential Quadratic Programming (Sıralı İkilenik Programlama)
TDL	Tapped Delay Line (Dallı Gecikme Hattı)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
uRLLC	ultra-Reliable Low-Latency Communications (ultra Güvenli Düşük Gecikmeli Haberleşme)
UxNB	UAV eNodeB (Havasal Erişim Noktası)
V2I	Vehicle-to-Infrastructure Communication (Araçtan Altyapıya Haberleşme)
V2V	Vehicle-to-Vehicle Communication (Araçtan Araca Haberleşme)
V2X	Vehicle-to-Everything Communication (Araçtan Herşeye Haberleşme)
VU	Vehicular User (Araç Kullanıcısı)

1. İHA HABERLEŞMESİNE GENEL BİR BAKIŞ: AVANTAJLAR, SORUNLAR VE ARAŞTIRMALAR

Haberleşme mühendisliğinin tarihi uzun olmasa da, insanoğlu, insanlık için kısa olarak nitelendirilebilecek bir sürede haberleşme anlamında çok ileri seviyelere ulaşmıştır [1]. Kablosuz iletişimde, birinci nesil (1G) olarak adlandırılan analog bir haberleşme sistemiyle başlayan bu süreç, günümüzde dijital veri akışının sağlandığı 5G'ye evrilmiştir. Geliştirilen her yeni nesil haberleşme sistemi, bir öncekinin açıklarını kapatıp üzerine çeşitli yenilikler getirmiştir. 2G ile başlayan dijital ses ve veri paketi transferi, 3G ile artan veri hızları sayesinde video transferine dönüşmüştür. 3G'nin kapsama alanı sorunlarına bir çözüm olarak 4G ortaya çıkmış ve 3G'de ulaşılan veri hızı da 4G'de katlamıştır. Böylelikle, 4G ile internete bağlı cihaz sayısı artmış, bu durum da özellikle cep telefonlarındaki mobil uygulamaların sayısını arttırmıştır [2]. Ancak heterojen ağlar ve koordineli çok noktalı iletim (Coordinated Multi Point Transmission, CoMP) gibi çözümler getirmesine karşın kapsama konusu, 4G'de de tam olarak çözülememiştir.

Standartlaşma süreci devam eden 5G yeni radyo ile kullanıcı veri hızının daha çok artması, dinamik bir ağ yapısı, hizmetlerin sürekliliği, düşük gecikmeler, yüksek güvenilirlik ve düşük enerji tüketimi gibi pek çok farklı kalem hedeflenmektedir. Farklı bir çok sektörü bir araya getirecek yeni teknolojiler arasında ultra güvenli düşük gecikmeli haberleşme (ultra-Reliable Low-Latency Communications, uRLLC), yoğun makina tipi haberleşme (massive Machine Type Communication, mMTC) ve yükseltilmiş mobil genişbant (enhanced Mobile Broadband, eMBB) uygulamaları vardır [3]. Bunların da, araçtan araca haberleşme (Vehicle-to-Vehicle Communication, V2V) ve nesnelerin interneti (Internet-of-Things, IoT) gibi teknolojilerle birlikte bir çok farklı sektörde kullanılması düşünülmektedir.

Şimdiye kadar kullanılan tüm nesillerde yer alan kapsama problemi 5G ağlarıyla birlikte de, önemini koruyacaktır. Bu noktada, ağa bağlı cihaz sayısındaki artış ile ana şebeke üzerine binen veri trafiğini azaltmak, yer baz istasyonlarının karşılaştığı kör nokta, sönmülemeli kanal ve görüş hattı olmayan (Non-Line-of-Sight, NLoS) kanal problemlerini giderebilmek adına insansız hava araçlarının (İHA) uçan erişim noktası (UxNB) olarak 5G şebekesine entegre edilmesi oldukça ümit vaadeden bir çözümdür [4,5]. Bununla birlikte, akademinin ve sanayinin İHA'lar üzerine ortaklaşa artan ilgisiyle, İHA'ların uçan

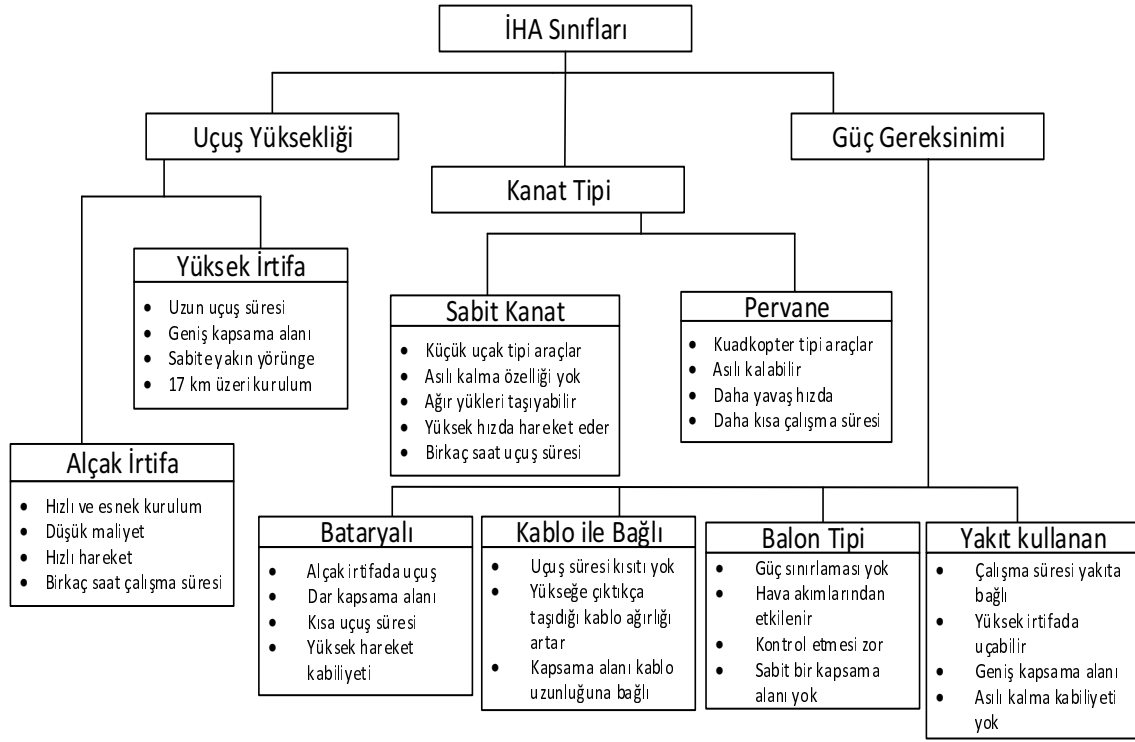
erişim noktası olarak kullanılması 5G standartlarında Rel-17'den itibaren yer almıştır [6]. Böylelikle, kapsama alanının genişlemesi ya da hizmetlerin sürekliliğinin artması hedeflenmektedir.

Bununla birlikte, insansız hava araçlarının uçan baz istasyonu olarak kullanılması fikrinin maliyetleri de düşüreceğini söylemek mümkündür. Ortalama bir makro baz istasyonunun kurulmasının maliyeti yaklaşık 150 Bin Dolar'dır. Hatta makro hücre baz istasyonlarının kiralanmasının maliyeti yıllık 600 Bin Dolar'ın üzerine çıkmaktadır [7]. Ancak bu değer daha küçük ve hızlı kurulabilen tekerlek üzeri hücre (Cell on Wheels, COW) için yaklaşık 50 Bin Dolar olmaktadır [8]. Amazon şirketinin kargo dronları üzerine yapılan bir çalışmada dronların alış maliyeti, bakım ve operatör maliyetlerinin yıllık 6 Bin Dolar olduğu belirtilmektedir [9]. UxNB maliyetinin de benzer olacağı varsayılabilir. Maliyet verimliliğinin yanında İHA'ların yer baz istasyonlarına göre daha hızlı kurulabileceği ve hizmet verilmek istenen bölgenin ihtiyacını hızlı biçimde giderebileceği de ele alınmalıdır. Orta ölçekte bir COW'un kurulum süresi 1 ila 2 saat arasında değişmekteyken [10], bir UxNB'nin hizmet verilmek istenen bölgeye varış süresi, dron merkez istasyonunun bölgeye uzaklığına bağlı olmak kaydıyla yaklaşık 10 dakika civarında olduğunu söylemek mümkündür [9].

Günümüzde, insansız hava araçları, askeri faaliyetler, keşif ve gözetleme, haberleşme, kargo taşımacılığı, arama kurtarma faaliyetleri ve tarımsal alanlar gibi birçok çalışma alanında kullanılmaktadır. Verdiği hizmetin tipine, kullanıldığı çevreye ve yapılan yasal düzenlemelere göre farklı tipte İHA ile karşılaşmak mümkündür [11–17]. Buna göre, herhangi bir kablosuz ağ uygulamasında İHA kullanmak bir çok faktöre bağlı olmaktadır. Bu tarz uygulamalarda dikkat edilmesi gereken faktörler, ilgili İHA tipinin kendine özgü hareket kabiliyeti, uçuş irtifası ve güç tüketim tipi olmalıdır. Genel olarak, İHA'lar uçuş yüksekliklerine göre iki sınıfa ayrılırlar. Bunlar, yüksek irtifa platformları (High-Altitude Platforms, HAPs) ve alçak irtifa platformlarıdır (Low-Altitude Platforms, LAPs). HAP'lar 17 km üzerinde bir irtifada çalışırlar ve yarı sabit bir yörüngeleri vardır [5, 18]. Diğer taraftan, LAP'lar ise on metreden birkaç kilometreye kadar değişen yüksekliklerde çalışabilmektedir. HAP'lara göre daha hızlı hareket edebilirler ve sabit olmayan, değişken bir hareket yapıları vardır [18]. Amerikan havacılık düzenlemelerine göre, alçak irtifa platformlarının en yüksek serbest uçuş irtifası 120 m olarak belirlenmiştir [19].

HAP ile karşılaştırıldığında, bir LAP'ın kurulumu çok daha hızlı bir şekilde yapılabil-mekte, bu durum da, LAP'ları acil durumlar gibi zamanın önemli olduğu senaryolar için uygun bir aday yapmaktadır. HAP'ların aksine LAP'lar yer tabanlı sensörlerden veri top-lamak için kullanılabilir. Dahası, ihtiyaç olduğunda hızlı bir şekilde şarj edilip tekrar kul-lanılabilir. Ancak HAP'lar daha uzun süreli çalışabilirler ve uzun dönemli uygulamalar (birkaç ay gibi) için tasarlanırlar. Bunun yanında, HAP'lardan oluşan ağlar genel olarak geniş coğrafi alanlarda kablosuz kapsama alanlarını genişletmek için tercih edilir [18]. Ancak LAP'lara göre de kurulumu daha uzun sürelidir ve daha maliyetlidir. LAP'lar ay-rıca sabit kanatlı ve döner kanatlı olmak üzere de iki kategoride değerlendirilebilir. Döner kanatlı İHA'lara nazaran, bazı küçük uçaklar gibi sabit kanatlı İHA'lar daha ağırdır ve daha hızlı hareket ederler. Ancak havada kalabilmek için sürekli ileri yönde hareket etme-leri gerekmektedir. Bunun yanında, dronlar ya da kuadkopter gibi döner kanatlı İHA'lar herhangi bir alanda havada sabit şekilde asılı kalabilirler [18].

Güç gereksinimlerine göre İHA'lar dörde ayrılabilirler. Bunlar, batarya ile ve güç kablosu ile beslenenler, balon tipi ve fosil yakıtla beslenen İHA'lardır. Batarya ile beslenen İHA'lar genellikle alçak irtifada seyrederek ve pil ömürleri yaklaşık yarım saat civarındadır. Güç kablosuyla bağlı olan İHA'lar ise herhangi bir güç kısıtı olmadan istenen sürelerde çalışabilirlerken çalışma bölgesi bağlı olduğu kablonun uzunluğu ile sınırlıdır. Balon ya da zeplin tipi İHA'lar da herhangi bir güç tüketimi göstermezken hareket kabiliyeti diğer iki tipe göre çok daha kısıtlıdır. Genellikle üzerinde motoru olmayan bu yapılar, hava akımı ile hareket ederler. Dolayısıyla belirli bir alanı kapsamak için daha geniş hüzmeli antenler kullanılmalıdır. Son olarak, sıvı yakıt kullanan İHA'lar ise genellikle yüksek irtifada bulunurlar ve dolayısıyla yüksek irtifada seyreden İHA'ların özelliklerini taşırlar. Şekil 1.1'de farklı tipte İHA'ların işlevleri ve nitelikleri özetlenmiştir. Bu tez çalışmasının kapsamında, alçak irtifalı, döner kanatlı dron ve balon tipi İHA'ların havasal baz istasyonu (UxNB) olarak çalışması ve kaynaklarının yönetilmesi ele alınacaktır. Burada kaynak yö-netimi ile kastedilen nokta, haberleşme ve uçuş birimlerinin tükettiği güçlerin kontrolü şeklindedir. Her ne kadar bu birimlerin güç tüketimi birbirinden bağımsız gibi gözükse de, İHA'ların yüksekliklerinin değişiyor olması ve hareketli olmaları, haberleşme birimi-nin de tükettiği gücü değiştirecektir. Bu noktada, enerji verimliliği iki yönlü bir problem haline gelmektedir.



Şekil 1.1. İnsansız hava araçlarının sınıflandırılması

Genel olarak, İHA'lar ile kurulan bir ağı, düşük maliyetli, kolay kurulumlu ve kullanıcı talebine uygun olması en önemli avantajlarından [4, 11, 20–25]. Özellikle, belirli bir bölgedeki hizmet talebine uygun olarak hızlı ve maliyet verimli kurulum özelliği İHA haberleşmesini oldukça değerli kılmaktadır. Bununla birlikte, yersel baz istasyonlarının karşılaştığı blokaj, NLoS kanal ve gölgeleme gibi problemlere karşı UxNB'ler ile yüksek olasılıklı LoS kanal yaratmak mümkündür [18,26]. Bu da kapsama problemlerini çözmek adına çok büyük bir avantajdır. Bununla birlikte, doğal afetlerin ardından yersel şebekenin kullanılamaz hale gelmesi ile o bölgeye hizmet götürmek adına havasal ağlar, çok önemli bir çözümdür [27–30]. Ayrıca, 5G ağlarında yer alan araçtan her şeye (Vehicle-to-Everything, V2X) ağları için yol kenarı birimi olarak şebekeye entegre olup akıllı şehir senaryolarında kullanılabilirler [31, 32]. Çekirdek şebeke ile kablosuz artağ (backhaul) bağlantısı kurarak şebeke yükünü hafifletebilirler. Bu kullanım alanları dışında, UxNB'ler, Henüz haberleşme altyapısı olmayan kırsal bir bölgeye hizmet götürmek üzere kullanılabilir. Böyle bölgelere baz istasyonu altyapısı kurmak oldukça maliyetli olacaktır. Bunun yerine, bu bölgedeki kullanıcı sayısı ya da hizmet talebine özel bir havasal ağ kurmak oldukça maliyet verimli bir yöntem olacaktır [12, 25, 33].

Son yıllarda, Wi-Fi hizmetini balon yardımı ile havadan geniş bölgelere yayma projesi olan Loon projesi, Google şirketi tarafından hayata geçirilmiştir [34]. Bunun yanında, UxNB'leri ulusal dağıtım şebekesine entegre eden yine aynı şirket, bu yapılanmaya da Project Wing ismini vermiştir. Amazon şirketi, buna benzer bir proje olan Prime Air projesini başlatmıştır [35]. Büyük haberleşme şirketlerinden AT&T ve Qualcomm gibi firmalar, dron baz istasyonları kullanarak şebekenin üzerindeki kullanıcı yükünü hafifletip, konser, spor karşılaşması gibi eğlence olaylarında yüksek hızda interneti kullanıcılarına sağlamışlardır [36]. Ayrıca Ericsson, Verizon ve SK Telekom gibi bir çok şirket 5G şebekesine dahil etmek adına döner kanatlı LAP'lar ile saha testleri yapmışlardır [37]. Türkiye'de ise Turkcell şirketi kullanıcılarına "dronecell" hizmeti ile acil durumlarda şebekeyle olan bağların kopmayacağını belirten reklamlar yapmıştır [38]. Bunun yanında, spor organizasyonu, mitinglerde kullanılmak üzere hizmet vermektedir.

1.1 İHA Haberleşmesinin Avantajları ve Uygulama Alanları

Bu kısımda, İHA haberleşmesinin avantajlarına ve uygulama alanlarına daha detaylı biçimde değinilecektir.

1.1.1 Kapsama Alanı ve Kapasite Arttırıcı olarak UxNB Konuşlandırma

Kablosuz ağların kullanımı dünya çapında arttığından, gün geçtikçe daha çok kapsama alanına ve veri hızına ihtiyaç olmaktadır. Bununla birlikte, günümüzde bile yersel ağların olmadığı dolayısıyla şebekeye erişilemeyen bölgeler mevcuttur. Şebekeden yoksun bölgeler, ekonomik olarak gelişmemiş ülkelerde olabildiği gibi, Kanada ve Amerika gibi gelişmiş ekonomiye sahip ülkelerde de mevcuttur. Şehir merkezinde yüksek veri hızı ile bir video indirme işlemi yapılabilirken, şehrin biraz dışına çıkıldığında ya da kırsal bir bölgede kablosuz kapsama alanı giderek zayıflamaktadır. Dolayısıyla, bu işlem yapılamamaktadır. Hatta kimi durumlarda, servis dışı kalma ihtimali ortaya çıkmaktadır.

Bunun dışında, yersel ağlarda iletişim sinyali, çok fazla gölgeleme ve sönümlemeye maruz kalmaktadır. Bu da şebekeye bağlı kullanıcıların hizmet kalitesinin (Quality-of-Service, QoS) oldukça değişken olmasını getirmektedir. Ancak baz istasyonu olarak kullanılacak İHA'lar, yersel baz istasyonlarına göre daha yüksekte konuşlanabileceklerinden, çok daha yüksek ihtimalle LoS kanalına sahip olacaklardır. Bu da ağdaki hizmet kalitesini oldukça

arttıracaktır [23, 26]. UxNB'lerin hareket kabiliyetlerinin oldukça fazla olmasından dolayı, yersel ağı kapsama hizmetinin olmadığı ya da şebeke yoğunluğundan dolayı hizmet kalitesinin oldukça düştüğü noktalarda, bu araçların hızlı ve pratik biçimde şebekeye yerleştirilmeleri mümkündür. Bununla birlikte, hem yüksekliğini hem de yatay koordinatlarının kolaylıkla değiştirilebilir olması, UxNB'lerin hangi bölge kapsanmak istiyorsa o bölgeye özel bir kapsama alanı yaratabilmelerine olanak sağlamaktadır.

Görüldüğü gibi ister kapsama alanı boşlukları olsun ister spor organizasyonları, mitingler gibi yüksek veri trafiğinin olduğu bölgelerde olsun, UxNB'ler o bölgedeki sorunu hızlı ve verimli biçimde çözmek için kolaylıkla kullanılacak cihazlardır [23, 33, 39–41].

1.1.2 Doğal Afetlerde Kullanım

Yangın, sel, fırtına ve deprem gibi doğal afetler, bölgesel olabildikleri gibi ülke çapında etkiye de neden olabilmektedir. Özellikle, okyanus kıyısında yer alan ülkelerde, her yıl yaklaşık bir veya iki adet kasırga olmaktadır. Bunun yanında, Türkiye gibi deprem kuşağında olan ülkelerde ise yıkıcılığı yüksek olan bir depremle karşılaşmak mümkündür. Şayet deprem, Japonya ya da Endonezya gibi denize kıyısı olan bir bölgede olmuşsa, ardından yaşanan tsunami olayı ile çok geniş bölgeler etkilenebilmektedir [42]. Tüm bu olaylar sonucunda bu bölgelerde yer alan haberleşme altyapısı zarar görür ve kullanılmaz hale gelir. Diğer yandan, altyapı zarar görmemişse bile afet bölgesindeki yakınlarına ulaşmak isteyen kişiler şebekeyi bir darboğaza sokabilir. Bu noktada, bir insansız hava aracının baz istasyonu olarak kullanılması oldukça verimli bir çözüm olabilir [39].

Yer baz istasyonları gibi kablo benzeri kurulum ekipmanlarının olmaması dolayısıyla, bir veya daha çok UxNB hızlıca istenilen bölgeye giderek o bölgedeki halka hizmet vermeyi sürdürebilir. Bununla birlikte, elde edilen bu havasal ağ, bölgedeki kullanıcı talebinin değişmesi ile kolaylıkla yer değiştirebilir ve başka noktalara geçiş yapabilir. Ayrıca, kurulan UxNB ağı, arama kurtarma çalışmalarına da destek verebilir. Bu bağlamda, bir afet bölgesinde UxNB ağı ile desteklenen bir yersel ağ oldukça faydalı, hızlı ve verimli bir çözüm olacaktır [27, 29, 30].

1.1.3 V2X Ağlarında UxNB Kurulumu

Son yıllarda, trafikte bulunan araç sayısındaki artış ile trafik sıkışıklığı ve kazalardaki artış sonucu ulaşım sistemlerindeki verimlilik oldukça düşmüştür [43, 44]. Sonuç olarak, otomotiv sektörü araştırma önceliklerini güvenli ve konforlu araçlara vermektedir. Böylelikle, otonom sürülen araçlar ile ilgili edinilen bilgi seviyesi de giderek artmaktadır. Günümüzde, yaklaşık 3 Milyar Dolar olan otonom sürücülü araç piyasasının küresel pazar payındaki yerinin 2024 yılı itibari ile 20 Milyar Dolar olması beklenmektedir [45, 46]. Bu büyük piyasanın da ana aktörleri, otomotiv endüstrisi ve mobil haberleşme endüstrisi olacaktır. Özellikle, bu iki başat sektör, akıllı ulaşım sistemlerini (Intelligent Transport Systems, ITS) hayata geçirme yolunda araçlara yeni yetenekler getireceklerdir. Haberleşme boyutuna bakıldığında, araçtan her şeye (V2X) haberleşme, otonom araç kullanımının, araç trafiğinin güvenliğinin sensörler aracılığıyla sağlanması açısından anahtar teknolojiler arasındadır.

Akıllı ulaşım sistemlerinin için de yalnızca araçların otomasyonu bulunmamaktadır. Bunun haricinde, araç trafiğine dahil olan birçok uygulama mevcuttur. Yol durumu bilgisinin paylaşımı, trafik kurallarının temini, diğer araçların durum bilgisi, kaza bilgisi gibi birçok veri tipi de bu sistemin içinde yer almaktadır. Bu bilgilerin, araç kullanıcılarına iletilmesi için de yine akıllı ve güvenilir bir cihaz olan insansız hava araçları kullanılabilir [32, 47]. Üzerinde haberleşme birimi bulunan İHA'lar, yolda bulunan bir kazayı raporlayıp çekirdek şebeke üzerinden bu durumu kurtarma ekiplerine iletebilirler. Bunun yanında, trafik kurallarını denetleyici olarak üzerinde kamera taşıyan UxNB'ler kullanılabilir. Ayrıca, araçtan araca (Vehicle-to-Vehicle, V2V) haberleşmedeki olası bağlantı kopmaları ve sinyal seviyesi bozulmaları için araç-altyapı (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) bağlantısının kurularak V2X haberleşmesinin güvenilirliğini arttırmak için kullanılabilir [31, 47]. Özellikle kavşak senaryolarında, bina, ağaç gibi engellerin etkisi ile araçların deneyimlediği sinyal seviyelerinde ani düşüşler yaşanabilmektedir. Bunun yanında, V2I bağlantısını kuran yol kenarı birimlerini (Road-Side Unit, RSU) sabit elemanlar olarak ele alıp bir şehirdeki ya da şehirlerarası yolları bu birimlerle donatmak oldukça maliyetli olacaktır. Bununla birlikte, şehrin belirli bölgesinde günün belirli saatlerinde bir RSU'ya ihtiyaç varken diğer anlarda ihtiyaç olmayabilir. Bu sebeple, kurulum maliyetleri oldukça düşük olan ve yüksek hareketlilikleri sayesinde istenen bölgeye konuşlandırılabilen UxNB'ler

bu anlamda uçan RSU (Flying RSU, FRSU) olarak sisteme dahil olabilirler. Bunların yanında, V2X haberleşmesinde, araçların birbirine gönderdiği mesajların güvenilirliğini sağlamak için de UxNB'ler kullanılabilir [48].

1.1.4 Kullanıcı Talepleri Doğrultusunda Kullanım

5G kablosuz ağları, sadece daha yüksek kapasite, düşük gecikme ve daha yüksek veri hızlarını vaad etmemektedir. Bunlarla birlikte, tüketici ve üretici odaklı bir çok sektöre hizmet etmek adına çok geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Bunların içinde, ulaşım, enerji, sağlık gibi haberleşme ile dolaylı yoldan ilgiye sahip sektörler de bulunmaktadır. Bu denli farklı çeşitte uygulama alanında başarıya ulaşabilmek için yeni bir ağ mimarisine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada, fiziksel ağ mimarisini paylaşarak birden çok mantıksal (sanal) ağ yapısı yaratan ağ dilimleme teknolojisi bu soruna oldukça ümit vaadeden bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır [49–55]. Böyle bir altyapı hem operatörlerin hem de ağ sağlayıcıların ortaklaşa desteğiyle oluşturulabilir. Yüksek çeşitlilikteki servisler aynı ekosistemin içinde kendi gereksinimlerine en uygun sanal ağda işletilmelidir. Dolayısıyla, ağ dilimleme yaklaşımı, 5G ve sonrası ağlarda farklı servis alanlarını desteklemek adına kaynak tahsisi yapılmasını gerektirmektedir. Böylesi dinamik değişken bir ağ yapısında, tek başına baz istasyonu olarak kullanılması düşünülen UxNB'ler de ağ dilimlerini sağlayıcı cihazlar olarak tasarlanmalıdır [56, 57].

Dinamik yapıları ve kolay kurulumları sayesinde, baz istasyonu olarak kullanılacak olan UxNB'ler ağ dilimleme işlevini yerine getirerek, dinamik biçimde bölgedeki kullanıcı tipi ya da ağ dilimi isterine göre radyo kaynak tahsisi sürecini de işletebilirler [58, 59]. Bunun yanında, İHA haberleşmesi, eMBB teknolojisinde kullanılarak, yüksek kaliteli video aktarımı gibi yüksek bantgenişliği talebi olan uygulamaların yayımı için kullanılabilir. Ayrıca, bir veya daha çok UxNB, yüksek sayıda cihazın bağlı olduğu mMTC teknolojisinin yürütülmesini uzun dönemli bağlantılar sağlayarak ve ağa bağlı cihazlara veri transferini yaparak gerçekleştirebilir. Yine 5G teknolojisinin Uluslararası Haberleşme Birliği (International Telecommunication Union, ITU) tarafından belirlenen en önemli teknolojilerinden olan uRLLC ile ultra güvenli haberleşme talebi olan V2X ağları gibi ağlarda, V2I bağlantısının kurulumuna yardımcı olarak bölgenin talebi UxNB yardımıyla karşılanabilir. Bununların yanında, bu sınıflara girmeyen, yalnızca veri üretimi ve aktarımını

hedefleyen ve verinin kendisinin değerli olduğu, tarım uygulamaları, uzaktan algılama gibi alanlarda da UxNB'ler kullanılabilir.

Özetle, bu kısımda, İHA'ların 5G ağlarında potansiyel kullanım alanları ve avantajlarına değinilmektedir. UxNB'lerin kapsama alanı ve kapasite artırıcı kullanımları hem hücresel ağlar hem de afet bölgesi senaryoları için detaylı biçimde tartışılmıştır. Akıllı şehir uygulamalarından olan ITS ve onun ana elemanlarından olan V2X ağlarında, uçan yol kenarı birimi (FRSU) olarak kullanımları sonucu V2I bağlantılarını sağlayabilecekleri aktarılmıştır. Bunun yanında, ITS için birçok bilgi paketinin de araç kullanıcılarına ya da yasal düzenleyicilere ulaştırabilecekleri belirtilmiştir. Son olarak, farklı kullanıcı talepleri olan ağlarda baz istasyonu olarak kurulup ağ dilimleme yoluyla hizmet bekleyen kullanıcılara hizmet götürmesi, örnek uygulama alanları arasındadır.

1.2 İHA Haberleşmesindeki Sorunlar ve İlgili Çalışmalar

Önceki kısımda belirtildiği gibi İHA haberleşmesinin yersel haberleşme ağına göre belirli noktalarda avantajları olsa da bu yöntem ile kurulan ağların çözüm bekleyen bir çok açık noktası da mevcuttur. Bunların en başında kanal modellemesinin ne şekilde olacağı gelmektedir. Döner kanatlı İHA'lar, yüksek hareket kabiliyetine sahiptirler ancak bu avantaj kanal durumu için bir dezavantaja dönüşebilir. Yersel ağlarda yalnızca kullanıcının hareketi söz konusuysen, UxNB ağlarında hem kaynak hem de kullanıcı hareketlidir. Bunun sonucunda, kullanıcılar sabit dursalar bile en küçük sarsıntı ya da hareket kanal durumunun değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca, UxNB ağının kurulduğu şehrin binalarının da kanal durumunun değişmesinde etkisi vardır. Yüksek katlı binaların olduğu bir şehir ile kırsal bir bölgedeki kanal durumları arasında oldukça fark vardır. Bunun yanında, seçilen İHA tipinin de UxNB kanal durumuna etki ettiği söylenebilir. Sürekli hareket etmesi gereken sabit kanatlı bir İHA veya rüzgar ile hareketi değişen balon tipi bir İHA'nın kanal durumları havada sabit durabilen döner kanatlı İHA'lardan farklı olacaktır.

Döner kanatlı İHA'ların istenen noktalara konuşlandırılabilmesi önemli bir avantaj olmakla birlikte, birden çok UxNB'nin oluşturduğu bir havasal ağın eniyi konuşlandırılması oldukça zorlu bir problemdir. UxNB'lerin üç boyutlu konuşlandırılabilmesi her ne kadar sistemde bir serbestlik derecesi (degree of freedom) oluştursa da bu durum problemi daha karmaşık hale getirmektedir. Bununla birlikte, kullanılan İHA'ların kendi fiziksel özel-

likleri ile konuşlandırma problemi daha da zorlaşmaktadır. Ayrıca, eniyi konuşlandırma problemi birden fazla maliyet fonksiyonuna bağlı kalınarak yapılabilmektedir. Bunlardan bazıları, toplam veri hızı, hizmet verilen kullanıcı sayısı, iletim gücü, en az hareket, enerji verimliliği şeklindedir. Dolayısıyla, eniyi konuşlandırma problemi çok çeşitlendirilebilen bir problemdir.

UxNB'ler yer baz istasyonlarına göre daha yüksekte konuşlanabildikleri için LoS kanal ihtimali artmaktadır. Bununla birlikte, haberleşme için tüketilen güç de aynı hizmet kalitesine ulaşmak adına düşecektir. Bu anlamda enerji verimli olarak düşünülebilecek döner kanatlı UxNB'ler aslında en fazla enerjiyi hareket ederken harcarlar. Dolayısıyla, enerji verimliliği oldukça önemli bir sorundur. Piyasada bulunan dronların yaklaşık yarım saat havada kaldığı düşünüldüğünde enerji verimlilik problemi daha fazla göze batmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için kablo ile bağlı ya da balon tipi İHA'ların kullanımı düşünülse de bu İHA tiplerinin de hareket alanı sınırlıdır. Kablo uzunluğunun birkaç yüz metre mertebesine çıkması sonucu yeterli hareket alanı sağlansa da bu durum ekstra bir yük getireceği ve ayrıca, kablonun bağlı olduğu kısımda ekstra ekipman gerekeceği için maliyet verimli olmayabilir. Dolayısıyla, UxNB ağlarında enerji verimliliği hem İHA tipi hem de uçuş için harcanan güç üzerinden düşünülmesi gereken sorunlardandır.

Döner kanatlı UxNB'lerin rota planlamasının yapılması İHA haberleşmesindeki en zorlu problemlerdendir. UxNB'nin hareketi dolayısıyla kullanıcıların deneyimledikleri kanal durumları değişmektedir. Bu da hizmet kalitesinde anlık değişimlere neden olmaktadır. Bununla birlikte, süregelen bir rota planı çıkartmak matematiksel olarak oldukça zorlu bir problemdir ve genellikle bu problemler sonsuz sayıda değişkene yakınsamaktadır. Bununla birlikte, yalnızca UxNB tarafına bakıldığında bile döner kanatlı İHA'nın uçuş dinamikleri, güç tüketimi ve hareketi rota planını etkileyen ana unsurlar olarak ortaya çıkmaktadır. Görüldüğü üzere, döner kanatlı UxNB'lerin uçuş/rota planması yalnızca UxNB'nin fiziksel kısıtlarına değil, aynı zamanda kullanıcıların kanal durumu deneyimlerine ve matematiksel modelin karmaşıklığına da bağlıdır.

Yersel haberleşme ağlarında kablo yardımı ile artağ bağlantısının kurulması klasik bir çözümdür. Fakat her daim kablo ile çekirdek şebekeye bağlanmaya çalışmak ekipman maliyetleri nedeniyle verimsizdir. Bunun yanında, 5G ve ötesi ağlarda bağlı cihaz sayısındaki

artış ve ultra yoğun ağlar (ultra-dense networks) konseptiyle birlikte kablolu artağ bağlantısı oluşan trafiği kaldıramayacaktır. Bu nedenle kablosuz artağ bağlantısı önerilmiştir. Havasal ağlarda da özellikle batarya ile çalışan dron tipi baz istasyonları için kablosuz artağ bağlantısının kurulması önemli bir problemdir. Yerdeki baz istasyonu ile kurulacak olan bu bağlantı yüksek veri hızlarını sağlamalı ve böylelikle çevresel etkilerden en az etkilenecek şekilde UxNB'nin konuşlandırılması yapılmalıdır. Kablo ile bağlı döner kanatlı İHA ve balon UxNB'ler için artağ bağlantısı yere bağlı oldukları kablo üzerinden yapılabilir. Ancak yukarıda belirtilen nedenlerden ötürü bu durum pratik olmayabilir. Ayrıca, kablosuz artağ bağlantısının spektrumun hangi kısmı ile yapılması gerektiği de önemli bir tasarım problemidir [60].

Bunların dışında, güvenlik, siber saldırılar ve girişim yönetimi gibi bir çok sorun İHA haberleşmesinin çözülmeyi bekleyen sorunları arasında sayılabilir [17, 61–63]. İHA'ların haberleşme problemine dahil olmasıyla birlikte akademinin de bu alandaki çalışmaları artmıştır. Genel olarak literatürde, kanal modelleme, konumlama, kurulum, rota planlama, talep üzerine haberleşme, doğal afet durumlarında ağ kurulumu gibi problemler sıklıkla ele alınmaktadır. Bu kısmın geri kalanında, kanal modeli, eniyi konuşlandırma, düşük uçuş süresi problemi, rota planlama ve artağ bağlantı sorunları ile ilgili literatürdeki çalışmalar özetlenecektir.

1.2.1 Kanal Modeli

İHA'lar yer baz istasyonlarına göre genellikle daha yüksekte konuşlandıklarından, klasik hücreli haberleşme sisteminde kullanılan kanal modeli geçerli değildir. Literatürde, İHA haberleşmesi için önerilen birçok havadan yere kanal modeli bulunmaktadır. Genel olarak, bu kanal modelleri, deneysel ölçümler, ölçümlerin matematiksel modellere oturtulması ve analitik yöntemler olarak üç ayrı kategoride incelenebilir. Deneysel ölçümlerden, 2 GHz bandında haberleşen bir balon için, alınan sinyal gücü, ortalama sönümleme süresi, olasılık dağılım fonksiyonu, güç izgesel yoğunluğu gibi kanal değerleri [64] no.lu kaynakta incelenmiştir. Bir meteorolojik balonun 2G (Global System for Mobile Communications, GSM), 3G (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) ve 4G (Long-Term Evolution, LTE) frekanslarındaki alınan sinyal gücü [65] no.lu kaynakta ölçülmüştür. Kanal parametrelerinin makine öğrenmesi ile bulunduğu [66] no.lu çalışmada, döner kanatlı

bir dronda LTE baz istasyonu kullanılarak Rice faktörü, RMS gecikme yayılımı gibi parametreler kestirilmiştir. Bunun dışında, IEEE 802.11a bandında internet yayını yayan bir kuadkopter kullanılarak yol kaybı ve alınan sinyal şiddeti gibi kavramlar [67] no.lu kaynakta ölçülmüştür. Ayrıca, döner kanatlı bir dronun üzerine konulan 4G ve öncesi nesilleri kapsayan bir baz istasyonu ile girişim ve alınan sinyal gücü ölçümleri [68] no.lu makalede sunulmuştur.

Saha ölçümleri sonucunda, büyük ölçekli sönümleme istatistiklerini belirleyen bir çok çalışma mevcuttur. Bir banliyö senaryosunda, UxNB yüksekliği ve uzaklığın yol kaybına etkisi [69] no.lu kaynakta incelenmiştir. Elde edilen bulgularda, belirli bir yüksekliğe kadar yol kaybı üssel değerinin (path loss exponent, PLE) negatif olduğu, bu yükseliğe erişildikten sonra ise serbest uzay değerine yaklaştığı belirlenmiştir. Doppler kaymasının da ele alındığı, UxNB'nin hem hareketli hem de statik olduğu bir başka şehir senaryosunda, UxNB yüksekliği ve konumunun yol kaybına etkisi stokastik olarak incelenmiştir [70]. Bununla birlikte, [71] no.lu kaynakta, yol kaybını etkileyen faktörler arasına UxNB üzerindeki antenin hüzmeye örüntüsü, iki ışınlı kanal modeli ve kırılma kayıpları da dahil edilmiştir. Gölgeleme modelinin ve artık yol kaybı sönümlenmesinin de eklendiği [72] no.lu çalışmada ise yerde bulunan kullanıcı ile UxNB arasında kurulan bağlantının yükseliş açısına bağlı bir kanal modeli önerilmiştir. Bunun dışında, literatürde havadan yere kanal modelinde küçük ölçekli sönümlemeyi modellemeye çalışan birçok çalışma mevcuttur. Küçük ölçek sönümleme modellerinin ilki [73] no.lu makalede, stratosferde çalışan platformlar için Rice K faktörünün ölçümler yoluyla yapılmıştır. Bunun yanında, [74–76] no.lu makale serilerinde, su üstündeki platformlar, dağlık ve banliyö yerleşim yerleri için geliştirilen senaryolarda Rice K faktörü modellemesi yapılmıştır. Bunun yanında, küçük ölçek sönümleme modelleri için ultra genişbant ve IEEE 802.11 için Nakagami- m modellemesi çalışılmıştır [70, 77].

Analitik kanal modellerine bakıldığında, stokastik modeller arasında [74, 78] no.lu çalışmalar sayılabilir. Genişbant stokastik kanal modelinin önerildiği [74] no.lu çalışmada, çeşitli ortamlarda ölçümlenen veriler bir dallı gecikme hattı (tapped delay line, TDL) modeli ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, darbantlı haberleşme varsayımı altında, LoS ve NLoS bağlantılarını da modelleyerek stokastik bir kanal modeli de [78] no.lu çalışmada oluşturulmuştur. Modellenen TDL yapısında, çok yollu gecikmeler NLoS kanalı olarak

ele alınmış ve katsayılarının Rayleigh dağılımlı olarak değiştiği varsayılmıştır. Buna ek olarak, Doppler frekansındaki kayma da rasgele süreç olarak karakterize edilmiştir. Deterministik kanal modelleri arasında, [18, 26, 79] no.lu çalışmalar sayılabilir. Bunların içinde, [26] no.lu bildiriye sunulmuş olan kanal modeli, literatürdeki çalışmalarda en çok kullanılan model olarak göze çarpmaktadır [23,31,33,40,80–82]. Bu çalışmada, farklı şehir senaryolarına göre değişen, UxNB ve yerdeki kullanıcı arasındaki bağlantının yükseliş açısına bağlı olan bir kanal modeli sunulmaktadır.

1.2.2 Eniyi Konuşlandırma

Kablosuz ağlarda, uçan baz istasyonu olarak kullanılacak İHA'ların konumlandırılması ve kurulumu birçok çalışmada ele alınmıştır [21, 23, 26, 29, 83–85]. Hava platformlarının hareketliliği ve 3B konumlandırılmasını ele alarak enerji verimli güç kontrolü [84] no.lu kaynakta önerilmiştir. Bu çalışmada, Mozaffari ve diğ. nesnelere interneti araçlarının çıkış yolu haberleşmesini güvenilir hale getirerek İHA'ların toplam iletim gücünü enküçültmektedir. Belirli bir ağ kazancını sağlayarak 3B konumlandırma problemi [23] no.lu kaynak tarafından çalışılmıştır. Bu problem, üzerinde biraz oynanarak karesel kısıtlı karışık tamsayı doğrusal olmayan problem olarak formüle edilmiştir. Bor ve diğ., bu problemin çözümü için hesaplama karmaşıklığı düşük olan ancak eniyi olmayan bir yöntem sunmuşlardır. Enbüyük kapsama alanını sağlayan İHA yüksekliği, analitik olarak [26] no.lu çalışmada yapılmıştır. Buna göre, eniyi yükseklik, çevresel etkilerden gelen parametrelerin ve enyüksek izin verilen yol kaybının bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışmanın önemi, ITU tarafından tanımlanmış yol kaybı modelini İHA haberleşmesine uyarlaması ve yerdeki kullanıcı ile LAP arasındaki haberleşme kanalını LoS olasılığına bağlı modellemesidir. Rice sönümlenmeli kanallarda, eniyi İHA yüksekliğini ele alan [21] no.lu çalışma, kapsama alanını enbüyük yapmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, Azari ve diğ., eniyi İHA yüksekliğinin yol kaybı ve sönümlenme arasında bir ödünleşim getirdiğini göstermişlerdir. Bunun yanında, yükseliş açısı ve Rice faktörü arasındaki ilişki için geçerli olan yaklaşık çözümün kapalı formu da bulunmuştur.

Havasal erişim noktalarının konuşlandırmasını eniyileyen bir başka çalışmada ise acil durum bölgesindeki kullanıcıların en az güç tüketmelerine değinilmiştir [29]. Hava platformunun kapsamı gereken bölgede hareket ederek kullanıcılardan alınan gücün enbü-

yütmesini sağlayan bir algoritma önerilmiştir. Ayrıca, Helmy ve diğ., her bir kullanıcı için kesinti olasılığını vererek LoS ve NLoS durumları için bu algoritmanın ne kadar kazanç sağladığını tartışmıştır. Hava platformlarının yerdeki terminallere göre konumlandırılması [83] no.lu kaynakta ele alınmıştır. Bu çalışmada Lyu ve diğ., yer terminallerinin tümüne en az sayıda hava platformu ile hizmet verilmesini hedeflemişlerdir. Çalışılan problem, zamansal anlamda diğer yöntemlere göre daha az karmaşık bir yöntem olan polinom zamanlı bir algoritma ile çözülmüştür. Makro baz istasyonuna art ağ bağlantısı sağlayan İHA'ların yüksek veri hızı gereksinimi olan ve güvenilir düşük gecikmeli iletişim yapan iki kullanıcı grubuna hizmet vererek 3B konumlandırılmaları [85] no.lu bildiriye ele alınmıştır. Bu problemde, aynı zamanda kullanıcıların baz istasyonu ilişkilendirmesi yapılarak veri hızını enbüyütecek art taşıyıcı ağındaki bantgenişliği de belirlenmektedir.

1.2.3 Düşük Uçuş Süresi ve Enerji Verimliliği

Literatürde, genellikle, UxNB'nin haberleşme için tükettiği gücü en aza indirerek enerji verimliliğini sağlayan çalışmalar mevcuttur [41, 81, 82]. Buna göre, iletim gücünü en aza indirerek eniyi enerji verimli İHA konuşlandırması [41] no.lu kaynakta yapılmıştır. Mozaffari ve diğ., eniyi taşıma teorisini (optimal transport theory) kullanarak birden çok UxNB'nin bulunduğu haberleşme ağında kullanıcıların belirli bir kalitede servis almasını sağlayacak en düşük iletim güçlerini kullanarak UxNB konuşlandırması yapmaktadırlar. Bu çalışmada, kullanıcıların sisteme OFDMA benzeri bir yapıda eriştikleri varsayılmıştır. Bu modelde, UxNB'nin konuşlanacağı alanlar önceden belirlenmiştir. Daha sonra, bu alanların sınırları ve UxNB'nin konumu eniyi taşıma teorisi uyarınca bulunmuştur. Anten dizileri ile haberleşme ve İHA kontrolü de literatürde çalışılmıştır [82]. Bu çalışmada, birden fazla UxNB kullanılarak havada oluşturulan doğrusal anten dizisi yardımı ile yerdeki kullanıcılara en kısa sürede hizmet vermek amaçlanmaktadır. Bunun için UxNB'nin toplam çalışma süresi, servis ve kontrol süresi olarak ikiye ayrılmıştır. Servis süresini kısaltmak için UxNB grubuna verilen belirli miktarda verinin en hızlı iletilmesini sağlayacak şekilde veri hızı arttırılmaktadır. Bunu gerçekleştirebilmek için tepe dizi kazancı ilgili kullanıcının konumunda en yüksek olacak şekilde anten hüzmesi oluşturulmaktadır. Ayrıca, kontrol süresi için de UxNB ağının dinamik hareket modeli çıkarılarak UxNB'lerin hızlı hareket etmeleri sağlanmaktadır.

UxNB'lerin yerdeki kullanıcılara kablosuz ağ hizmeti sunduğu bir başka çalışmada uçuş süresinin verimli kullanımı ele alınmıştır [81]. Bu sistemde ortalama bir bit sayısının gönderilme süresi havada asılı kalma süresi ya da hizmet süresi olarak belirlenmiştir. Buna göre, kullanıcılara kaynakların belirli bir şekilde tahsis edildiği varsayıp eniyi hücre bölütlemesi yapılmıştır. Bunun yanında, bu çalışmada da eniyi taşıma teorisi kullanılarak hücre bölütleme probleminin dışbükey bir problem olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada ele alınan bir diğer problem ise, yer kullanıcılarına yapılan hizmetin tamamlanması için İHA'ların ihtiyaç duyduğu havada asılı kalma süresinin ne olduğudur. İHA haberleşmesinde dikgen olmayan çoklu erişimin (non-orthogonal multiple access, NOMA) incelenmesi [86] no.lu kaynakta gerçekleştirilmiştir. Bu makalede, iniş yolu NOMA tekniği ile kurulan haberleşme ağında kullanıcıların iniş yolu veri hızı ile UxNB'nin bulunduğu yükseklik arasında bir ilişki kurulmuştur. Ayrıca NOMA tekniği, dikgen çoklu erişim (Orthogonal Multiple Access, OMA) ile kıyaslanmıştır ve bunun sonucunda, NOMA tekniği kullanan UxNB'nin daha az enerji tükettiği gösterilmiştir. Öne sürülen problem iki aşamalı olarak çözülmektedir. Birinci aşamada yükseklik sabitlenmiş, daha sonrasında UxNB yüksekliği eniyilenerek NOMA çözümü verilmiştir.

Baz istasyonu olarak kullanılacak döner kanatlı bataryalı insansız hava araçlarının en önemli sorunu düşük uçuş süreleridir. İHA'lar ile hedef iz sürümü çalışmalarında ve bazı İHA kontrol makalelerinde bununla ilgilenilmiştir [87–94]. Literatürde, güneş ve elektrik enerjisini hibrit biçimde kullanan bir İHA'nın enerji tüketimini eniyileyen tasarımının yapılması [87] no.lu makalede çalışılmıştır. Bunun yanında, insansız hava araçlarının enerji tüketimlerinin daha çok kütle ile ilintili olduğuna yer verilip batarya tasarımlarına [88] no.lu çalışmada yer verilmiştir. Kanat eklemeli İHA'nın enerji tüketimini eniyileyen tasarımı [89] no.lu makalede yapılmıştır. Ancak, bu çalışmalarda sabit kanatlı İHA'lar ele alınmaktadır. Bir İHA'nın ağırlığı ve yüksekliği ile enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi [90,91] no.lu kaynaklar ele almışlardır. Bu çalışmalarda, bir hedefin izini süren İHA'nın enerji tüketimini en aza indiren güzergahın belirlenmesi amaçlanmıştır. İHA'nın tükettiği enerji $E = mgh$ eşitliğiyle verilmiştir. Burada, m ve g sırasıyla kütleyi ve yerçekimi ivmesini belirtirken h yüksekliği göstermektedir. Ancak bu model, oldukça basitleştirilmiştir ve İHA'nın ağırlık harici herhangi bir fiziksel özelliğini (pervane sayısı, pervanedeki pala sayısı vs.) hesaba katmamaktadır.

Çalışma yüksekliği ve enerji tüketimini ilişkilendiren bir başka çalışmada ise deneysel sonuçlar kullanılmıştır [92]. Havada asılı kalma, tırmanış ve alçalış için gereken güç miktarı ölçülmüş ve buna ek olarak eğri oturma ile bir güç tüketim modeli önerilmiştir. Bu deneylerde, İHA'nın en çok gücü havada asılı kalmak için harcadığı gözlemlenmiştir. Döner kanatlı bir İHA'nın güç tüketim modeli [93] no.lu kaynakta detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, [92] no.lu kaynakta olduğu gibi İHA'nın yapabileceği her hareketi için matematiksel formülasyonlar verilmiştir. Ancak eşitliklerdeki bazı sabitler, deneysel veriler kullanılarak eğri oturma yardımı ile bulunmuştur. Literatürde, bir oktokopter İHA'nın tükettiği gücü ve çalışma süresini ele alan çalışmalar mevcuttur [94]. Ayrıca, [93] ve [94] no.lu kaynaklarda güç tüketimi helikopter literatüründe sıkça kullanılan momentum teorisine formüle edilmiştir. Bununla birlikte, Hwang ve diğ., bir İHA'nın üzerinde bulunan batarya için tahmini boşalma modeli oluşturmuş ve uçuş süresini yinelemeli bir algoritma ile kestirmiştir.

1.2.4 Rota Planlama

Rota planlama konusu, İHA haberleşmesindeki en önemli sorunlardan biridir. Literatürde, bununla ilgili bir çok çalışma yapılmıştır [95–101]. İHA kontrolü konusunda yapılan çalışmalar daha eski olsa da haberleşme problemi olabilecek ilk çalışmalardan biri [95] no.lu kaynakta yapılmıştır. Bu çalışmada, pasif yayılım yapan bir radarın konumu sinyal işleme teknikleri ile bulunmaktadır. İHA'ların eniyi rotalarını enküçük yakıt tüketimine göre elde eden çalışma [96] no.lu kaynaktır. Bu çalışmada, çarpışmadan kaçınma, uçuşa yasak bölgeler ve yükseklik kısıtları gibi kısıtlar ele alınmıştır. Önerilen model, karmaşık tam-sayı doğrusal problem olarak formüle edilmiştir. İHA haberleşmesinde fiziksel katman güvenliğini sağlamak adına eniyi İHA rotasını elde eden çalışma [100] no.lu kaynaktır. Aynı yazarlar, fiziksel katmandaki güvenliğini sağlamak adına, rota planı ve güç kontrolünün ortaklaşa eniyilemesini yaparak çalışmalarını [101] no.lu kaynakta genişletmişlerdir. Bu çalışmalarda, Zhang ve diğ., İHA'nın rotasını yasal kanalın kazancını arttırmak ve dinleyici kanalı bastırmak için ayarlamaktadır. Bunların yanında, verilen bir alanı kapsayabilmek için rota planı yapma fikri [92] no.lu kaynakta incelenmiştir. Franco ve diğ., İHA'nın verilen noktalara eniyi biçimde nasıl gideceğini ve bu noktalar arasındaki İHA hızının ne olması gerektiğini elde etmişlerdir.

İHA yardımı ile yerdeki sensörlerin konumlarını belirleme problemi [97] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Sallouha ve diğ., İHA'nın yüksekliğine ve yerdeki sensör ile arasındaki kanal karakteristiğine bağlı değişen konumlama hatasını en aza indiren bir problem önermişlerdir. Ayrıca, İHA'nın güç tüketimini de probleme dahil etmişlerdir. İHA'ların yerde bulunan enerji ihtiyacı olan cihazlara kablosuz enerji transferi ile enerji sağladığı bir senaryo [99] no.lu çalışmada ele alınmıştır. Burada, bir şarj periyodunda İHA'nın rota planı yapılarak cihazlara iletilen gücün enbüyük olması sağlanmaya çalışılmaktadır. Yerde bulunan kullanıcıların QoS kısıtları altında İHA'nın tükettiği gücü en aza indirecek rota planı [98] no.lu makalede ele alınmıştır. Dinamik bir senaryoda, uç ve asılı kal yöntemi ile İHA'nın asılı kaldığı anlarda haberleşme işlevi yürütülmüş haberleşme yapılmadığı durumda ise İHA'nın yer değiştirmesi sağlanmıştır.

Literatürde, İHA'ların dolaşımı ve sürü kontrolü üzerine yapılan çalışmalar [102–105] no.lu kaynaklarda bulunabilir.

1.2.5 Artağ Bağlantısı

5G ve ötesi haberleşmede, ağa bağlanan cihaz sayısının artması sonucunda, kablolu artağ oldukça problemlili bir noktaya evrilecektir. Bu duruma bir çözüm olarak ise literatürde kablosuz artağ bağlantısı önerilmiştir [60, 106, 107]. Genel olarak, kablolu artağ bağlantısının cihaz yoğunluğu arttıkça sorunlu olabileceği ve bunlara çözüm olarak cihazdan cihaza (device-to-device, D2D) haberleşme ile artağ bağlantısının kablosuz yapılacağı fikri [106] no.lu makalede ortaya atılmıştır. Bununla birlikte, [60] no.lu makalede, 5G küçük hücre ağlarında, makro hücre ile küçük hücreler arasında artağ bağlantısının kablosuz biçimde sağlanabileceği bildirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, kablosuz spektrumun hangi frekanslarında bu fonksiyonun sağlanabileceği, artıları ve eksileri detaylı biçimde tartışılmıştır. Milimetre dalga ve MIMO teknolojisini ortaklaşa kullanımı sonucunda, pratikte kullanıma uygun ve uygulanabilir kablosuz artağ bağlantısı [107] no.lu çalışmada ele alınmıştır. Gao ve diğ., milimetre dalga kanal karakteristiğini ele aldıkları çalışmalarında düşük maliyetli ve karmaşıklığa sahip önkodlayıcı tasarımlarını ortaya koymuşlardır.

İHA'lar uçan cisimler olduklarından bir şekilde çekirdek şebeke ile artağ bağlantısı kurmak durumundadırlar. İlk bakışta, UxNB'nin artağ bağlantısını kablosuz yollarla yapabileceği düşünülse de literatürde bu bağlantının, kablo ile sağlandığı çalışmalar da mev-

cuttur [20, 30, 108]. Yüksek irtifa platformu olarak kullanılması düşünülen balonların yer ile bağlantısını sağlayan kablo üzerinden artağ bağlantısını yapılabileceği [20] no.lu kaynakta önerilmiştir. Bununla birlikte, bir afet senaryosunda, afet bölgesindeki hücresel bağlantının sağlanmasına yardımcı olan dron sürüsünün artağ bağlantısı kurabilmesi için yerdeki istasyonuna kablo ile bağlı bir artağ dronu tahsis edilen ağ modeli [30] no.lu çalışmada önerilmiştir. Afet bölgesindeki bağlantıyı sağlayan dronlar kendi aralarında çok atlamalı veri aktarımı yaparak artağ dronu ile serbest uzay optik (Free Space Optical, FSO) ya da radyo frekans (Radio Frequency, RF) bağlantıları kurulması sonrasında çekirdek şebekeye erişmektedir. Bunlara ek olarak, [108] no.lu çalışmada, şehirlerinde bina çatılarına kurulacak bir yönetici istasyon ile bağlı dronların artağ şebekesine ulaşabilecekleri vurgulanmıştır. Bu noktada, bağlantı kalitesi, uçuş süresi, taşınabilecek yük, artağ balantısı, LoS olasılığı ve hareketlilik gibi birçok parametre, serbest uçan döner kanatlı dronlar ve yer baz istasyonları ile karşılaştırılmıştır.

İHA yardımlı hücresel ağlarda artağ bağlantısı son yıllarda ilgi çeken bir probleme dönüşmüştür [109, 110]. İnsansız hava araçlarının ultra yoğun ağlar için havasal artağ yaratma problemi [109] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Bu çalışmada, öne sürülen artağ mekanizması UxNB'lerin talep olan bölgelere uçarak orada bir havasal ağ oluşturmaya yöneliktir. Önerilen problem özünde bir ağ oluşturma problemidir ve UxNB'lerin hem yerden hem de kendi aralarında çok atlamalı bağlantılar kurarak artağ bağlantısını sağlamaları üzerine kurgulanmıştır. Milimetre dalga baz istasyonunun bulunduğu bir hücresel ağda, İHA'ları kullanarak artağ şebekesi kurma fikri [110] no.lu makalede ortaya konmuştur. Gapeyenko ve diğ., havasal baz istasyonunu yerde bulunan milimetre dalga baz istasyonu için röleleme ve dinamik yönlendirme yapması adına kullanan bir model önermişlerdir. Buradaki amaç, artağ bağlantısını UxNB üzerinden yaparak yersel ağlarda yaşanan tıkanıklığı yok etmektedir.

Yerdeki ağlara yardım etmenin dışında, havada oluşturulan bir UxNB ağının da bir artağa ihtiyacı vardır. Bununla ilgili yapılan ilk çalışmalar [31, 111] no.lu makalelerde bulunabilir. Bu noktada, bir V2X ağında, uçan yol kenarı birimi olarak hizmet veren bir UxNB'nin hem araç kullanıcılarının gecikme kısıtlarını karşılaması hem de artağ bağlantısını yer baz istasyonu ile sağlamasını ortaklaşa eniyileyen ağ problemi [31] no.lu çalışmada incelenmiştir. Ayrıca, birden fazla yer baz istasyonu ile kablosuz artağ bağlantısı kurma ihtimali

Çizelge 1.1. Literatürde İHA haberleşmesi ile ilgili yapılan çalışmaların özeti

Problem	Çalışma
Kanal modelleme	[18, 26, 64–79]
Eniyi konuşlandırma	[21, 23, 26, 29, 83–85]
Uçuş süresi & enerji verimliliği	[41, 81, 82, 86–94]
Rota planlama	[95–105]
Artağ bağlantısı	[20, 30, 31, 60, 106–111]

üzerine eniyi UxNB konuşlandırma problemi [111] no.lu makalede çalışılmıştır. Problem öncelikle karışık tamsayı doğrusal olmayan problem olarak formüle edilmiştir. Daha sonra da gerekli parametre gevşetmeleri yardımı ile buluşsal bir algoritma kullanılarak eniyi artağ bağlantısının kurulacağı yer baz istasyonu ve UxNB konumu bulunmuştur.

Bu kısımda bahsi geçen İHA haberleşmesindeki problemler ve karşılığında literatürde yapılan çalışmalar, Çizelge 1.1’de özetlenmektedir. Bu çalışmaların dışında, mobil sınır bilişim (mobile edge computing, MEC) , nesnelerin interneti (IoT) ve enerji hasatlama gibi uygulamalarla ilgili İHA çalışmalarını literatürde bulmak mümkündür [84, 112, 113].

1.3 Literatürdeki Eksik Noktalar

Kısım 1.1 ve Kısım 1.2’de belirtildiği gibi, İHA destekli haberleşmenin mevcut yer haberleşmesine göre avantajları olduğu gibi bunlardan yararlanabilmek için üstesinden gelinmesi gereken konuşlandırma, uçuş süresi kısıtı, uygulamaya göre İHA tipi seçimi, kullanıcı talebi doğrultusunda kullanım gibi problemleri de vardır. Kısım 1.2’de kanal modeli, artağ bağlantısı ve rota planlama gibi konularda yapılan çalışmalar, bu problemlerin bazılarına dikkat çekerken, literatürde baz istasyonu olarak kullanılması hedeflenen İHA’ların uçuş kısıtları, ağdaki gecikme ve İHA tipi gözetilerek konuşlandırılması, başarımleri ve eniyilemesi hakkında yapılan çalışmalar oldukça eksiktir. Literatürde genellikle bahsi geçen problemlerin biri veya ikisi göz önünde bulundurulurken bu parametrelerin ortaklaşa eniyilemesine rastlanmamaktadır. Özellikle, UxNB konuşlandırılması hakkında yapılan birçok yayına rağmen, İHA’ların uçuş dinamikleri, güç tüketimleri çoğu haberleşme probleminde incelenmemiştir. Bunların dışında, yapılan önceki çalışmalarda, IoT gibi uygulama alanları için geliştirilen algoritmalar ve sistem modelleri olsa da V2X ağlarında UxNB’lerin kullanılması hakkında bir çalışmaya rastlanmamıştır. Sonuç olarak, bu ana kadar literatürde yapılan çalışmaların eksik noktaları şu şekilde özetlenebilir;

- Literatürde, İHA'ların uçan baz istasyonu olarak kullanılması fikri oldukça fazla makale tarafından çalışılmıştır. Ancak literatürdeki ana eksik nokta, konuşlandırma esnasında İHA'ların güç tüketimlerini ele alınmamasıdır. Enerji verimli konuşlandırma çalışmalarında genellikle haberleşme için harcanan gücün eniyilemesi yapılmaktadır. Oysaki, uçmak için harcanan güç bunun çok üzerindedir. Günümüz pil teknolojisiyle kısa süre havada kalabilen bataryalı UxNB'lerin konuşlandırılma probleminde mutlaka uçuş dinamikleri incelenmelidir.

- Baz istasyonu olarak havadan kablosuz hizmet götürecek olan UxNB'ler genellikle literatürde hareket kabiliyeti sınırsız, alçak irtifada uçan döner kanatlı dronlar olarak düşünülmüştür. Literatürde az sayıda olmakla birlikte, yere kablo ile bağlı döner kanatlı dronlar ya da balon/zeplin tipi İHA'lar görmek mümkün olsa da bu araçların birbirine göre avantajlarını ya da dezavantajlarını kıyaslayabilecek bir çalışma bulunmamaktadır. İHA tipi belirlemenin, İHA haberleşmesindeki en baştaki basamak olduğu düşünüldüğünde literatürde bu anlamda oldukça büyük bir boşluk bulunmaktadır.

- Havasal erişim noktalarının önerilen ilk kullanım alanları arasında acil durum senaryoları bulunmaktadır. Bu alandaki çalışmalar incelendiğinde, genellikle o bölgedeki kapsama alanını veya veri hızını arttıracak problemlerin yer baz istasyonları ile ortaklaşa yürütüldüğü görülmektedir. Ancak acil durum, geniş bir coğrafyayı, uzun bir süreyi ya da rakım olarak yüksekte bulunan bir şehri etkiliyor olabilir. Döner kanatlı dronların yükseğe çıktıkça azalan hava yoğunluğu ile birlikte tüketeceği gücün arttığı göz önüne bulduğunda şehir rakımı kurulacak ağlar için önemli bir parametre olmaktadır. Literatüre bakıldığında daha gerçekçi olan böyle bir senaryonun incelenmediği görülmektedir.

- İHA'ların baz istasyonu olarak kullanılmaları haricinde, veri toplama, röleme gibi işlevleri de vardır. Literatürde, bulut ağlarda kullanılacak MEC ve IoT gibi uygulama alanları hakkında çalışmalara rastlamak mümkün olsa da V2X ağları için yapılan çalışmalarda UxNB kullanımı bilindiği kadarıyla yoktur. Bununla birlikte, kapasite arttırıcı olarak eMBB haberleşmesi senaryosunda da kullanılacak UxNB'lerin enerji verimli konuşlandırılması uçuş dinamikleri gözetilerek incelenmemiştir.

- Artağ bağlantı problemi UxNB'ler için oldukça önemli bir sorundur. Literatürde genellikle UxNB'ler yerdeki ağın artağ bağlantısının yapılabilmesi için kullanılacak cihaz-

lar olarak sunulurken, kendi başına baz istasyonu olarak kullanılacak olan İHA'ların da bir artış sorunu vardır. Literatürde bununla ilgili çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

- Eğer İHA'lar uçan baz istasyonu olarak kullanılacaklarsa, 5G ve ötesi ağlarda bulunan yer baz istasyonlarının işlevlerini de yerine getirebilmeleri gerekir. Bu bağlamda, bir bölgede farklı talepleri bulunan kullanıcıların bu taleplerini karşılayabilmek için UxNB'lerin ağ dilimleme teknolojisini kullanabilmesi gerekir. Dinamik radyo kaynak tahsisinin yapıldığı bu uygulamada, döner kanatlı bir İHA'nın yüksek hareketliliği de oldukça önemli bir avantajdır. Ancak literatürde, İHA'ların ağ dilimleme tekniğini gerçekleştirdiği bir çalışma bilindiği kadarıyla mevcut değildir.

1.4 Katkılar

Bu tez çalışmasının literatüre yaptığı ana katkı İHA haberleşmesi konsepti içerisinde, kaynak yönetim tekniklerini çeşitli senaryolar altında incelemesidir. Bu noktada, kaynak yönetimi, yalnızca radyo kaynaklarının değil, bir UxNB'nin sahip olduğu tüm enerji kaynaklarının yönetimi olarak tanımlanmalıdır. Özel olarak, uçuş dinamiklerinin gözetilmesi ve buna uygun konuşlandırılma, farklı tipte İHA'lar ile oluşturulan ağlarda başarımların analizi ve eniyileme, farklı uygulama alanları için radyo kaynak tahsisi, konuşlandırma ve rota planlaması problemlerinin ele alınması ve gerek analitik gerekse algoritmik sonuçların geliştirilmesi yapılan katkıların başlıcalarındandır. Önerilen problemler ile, uçuş dinamiklerinin, İHA hareketliliğinin ve değişken konumun ele alındığı bu tezde, kapsama alanı, ağ verimliliği, enerji verimliliği, güvenilir ve düşük gecikmeli haberleşme gibi gereksinimlerin eniyilemesi yapılmaktadır. Bu problemler ele alınırken, eniyileme kuramındaki çeşitli problem kalıplarının yardımı alınmıştır. Tezin içeriğinde, dışbükeylerin farkı (Difference of Convex, DC) programlama ve tamsayı programlama gibi standartlaşmış algoritmalar yer almakla birlikte, analitik çözümler yapılarak buluşsal algoritmalar da önerilmektedir.

1.4.1 Kapsama Arttırımı için Üç Boyutlu Konuşlandırma

Tez geneline bakıldığında, Bölüm 3, 4 ve 5'te, üç boyutlu konuşlandırma problemi, kapsama alanı ya da kapasite arttırıcı amaçlı ele alınmaktadır. Bölüm 3'te döner kanatlı bir UxNB'nin uçuş dinamiklerinin hesaba katılarak konuşlandırılması ve hizmet verilen kul-

lanıcı sayısının enbüyütülmesi çalışılmaktadır. Literatürün aksine, bu problemde uçuş sırasında harcanan güç de eniyileme problemine dahil edilmektedir. Önerilen eniyileme problemi, karışık tamsayı doğrusal olmayan programlama olarak modellenmektedir ve eniyi çözüm MOSEK çözücüsü ile bulunmaktadır.

Bölüm 4, bir doğal afet anında kurulan birden çok döner kanatlı İHA'dan oluşan hasaval ağı ele almaktadır. Literatürde, böyle bir senaryo daha önce çalışılmış olsa da, İHA'nın güç tüketimini eniyileme problemine dahil eden bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bölümün vurgulamak istediği bir diğer nokta da uçuş süresinin eniyilemesidir. Bu noktada, İHA'nın güç tüketimi ile UxNB ağının uçuş süresi arasında bağlantı kurulup havasal ağın kurulduğu şehir rakımı ile uçuş süresinin nasıl etkilendiği gösterilmektedir. Bu problemde, daire paketleme teorisi yardımıyla UxNB'ler konuşlandırılmaktadır.

Bölüm 5'te verilen bir coğrafi alanda üç farklı İHA tipinin oluşturduğu çoklu UxNB ağında, hizmet verilen kullanıcı sayısını enbüyütmek için nasıl konuşlandırılması gerektiği tartışılmaktadır. Önerilen problem, döner kanatlı İHA'lar için Bölüm 3'te önerilen problemin çok sayıda UxNB'ye uyarlanması şeklindedir. Dolayısıyla, karmaşık tamsayı doğrusal olmayan problem olarak modellenmektedir. Bunun dışında, fiziksel kısıtları göz önünde bulundurarak hem kablo ile bağlı dronlar için hem de balonlar için ayrı ayrı eniyileme problemleri önerilmektedir. Önerilen konuşlandırma problemleri, K -means algoritması ve DC programlama ortaklaşa kullanılarak eniyiye yakın biçimde çözümlenmektedir.

1.4.2 Başarım Analizi

Bir havasal ağ kurulmak istendiğinde ilk belirlenecek olan uygulamaya göre kullanılacak İHA tipidir. Buna göre bu bölümün girişinde de bahsedildiği gibi farklı uygulama alanları için farklı İHA tipleri kullanmak mümkündür. Bu tez çalışması boyunca, döner kanatlı bataryalı İHA'lar ana aktör olsalar da, güç gereksinimleri düşünüldüğünde, kablo ile bağlı dronlar ile balon tipi İHA'ları kullanmak kimi durumlarda daha avantajlı olabilir. Bunun yanında, bu İHA'ların da kendine özgü dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, kablo ile bağlı dronlar, yer istasyonları sabit olduğundan, kablo uzunluğu el verdiğince hareket özgürlüğüne sahiptirler. Benzer durum, balon İHA'lar için de geçerlidir. Buna ek olarak, balonlar çevresel etkilere daha hassastırlar. Bir hava akıntısı sonucu konumları kolaylıkla

değişebilir. Bu noktada, Bölüm 5’te farklı tipte İHA’dan oluşan havasal ağların konuşlandırma problemi ile birlikte aynı zamanda bir başarımlar analizi de yapılmaktadır. Batarya ile çalışan ve kablo ile bağlı dronlar ile balonlardan oluşan havasal ağların birbirine göre avantajlarını ve dezavantajlarını ele alan bölüm, her birini ayrı ayrı inceledikten sonra, benzer koşullar altında ağ başarımlarının nasıl olacağını tartışmaktadır. Farklı rakımlarda bulunan şehirlere kurulan bataryalı UxNB ağları, farklı kablo uzunluğuna sahip kablo ile bağlı dronlardan oluşan havasal ağlar ve farklı esintideki rüzgarlar ile balon ağının başarımlarını incelenmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bataryalı UxNB ağının uçuş süresini etkileyen faktörlerin başında, şehir rakımı gelmektedir. Bununla birlikte, kablo uzunluğunun bağlı UxNB ağının başarımlarını oldukça etkilediği gözlemlenmektedir. Ayrıca, balon ağının rüzgarlı havalarda kullanılmasının pratik bir çözüm olmadığı çıkan sonuçlar arasındadır. Dolayısıyla, kullanılan uygulamaya ve çevre şartlarına göre hangi tip İHA’nın seçilmesi gerektiği hakkında net sonuçlar ortaya konmaktadır. Bilindiği kadarıyla literatürde bu denli geniş bir araştırmayı yapan bir çalışma bulunmamaktadır.

1.4.3 Farklı Uygulama Alanları

Bu tezin literatüre bir başka katkısı ise, İHA’ların kullanım alanlarına yeni eklemeler yapmış olmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalar, İHA’ları oldukça farklı uygulamalar çerçevesinde inceliyor olsa da V2X haberleşmesinde yapılan çalışma bilindiği kadarıyla yoktur. Bölüm 6, bir UxNB’nin uçan yol kenarı birimi olarak V2I bağlantısı oluşturarak bir kavşakta beklemekte olan araç kullanıcılarına gecikme kısıtlarını göz önünde bulundurulmuş hizmet vermesini konu almaktadır. Önerilen bu problemde, UxNB’nin tükettiği toplam gücün eniyilemesi yapılırken, hem art ağ sorunu hem de gecikme problemi ortaklaşa ele alınmaktadır. Bu bölümde, araç kullanıcılarının uçtan uca gecikme kısıtları, farklı kuyruk modeli varsayımları altında bireysel veri hızı kısıtlarına dönüştürülmektedir. Araç kullanıcılarının veri hızlarının toplamının ise yer baz istasyonu ile kurulan kablosuz ardağ bağlantısının kapasitesini geçmemesi gerekmektedir. Böylelikle burada modellenen senaryoda, ardağ bağlantısının bant genişliğinin veri paketi transferinde ve sistemde bulunan kullanıcılara verilen hizmette önemli olduğu da vurgulanmış olmaktadır. Önerilen problem, eniyileme kuramında standartlaşmış algoritmalarından olan çoklu başlangıç noktalı Sıralı İkilenik Programlama (Sequential Quadratic Programming, SQP) algoritması ile sayısal bulgular elde edilmektedir.

Literatürde yüksek veri hızı talebi olan eMBB haberleşmesi gibi uygulamalarda genellikle atlanan ağ verimliliği problemi ve artağ sorunu, tez kapsamında Bölüm 7’de incelenmektedir. Önerilen problem, bir UxNB’nin yüksek veri hızı talebi olan bir bölgeye konuşlandırılmasını konu almaktadır. Eniyilemesi yapılan parametre ise uçmak için harcanan güç başına toplam veri hızı olarak belirlenen ağ verimliliğidir. Artağ problemi yukarıda da belirtildiği gibi İHA haberleşmesinde genellikle üzerine düşünülmemiş bir sorundur. Burada yapılan çalışma ile, literatürdeki bu eksik nokta tamamlanmaya çalışılmıştır. Önerilen maliyet işlevinin, geometrik özellikleri incelenmiş ve tek modlu (unimodal) bir fonksiyon olduğu ortaya konmuştur. Bu sonuç kullanılarak, önerilen probleme, hızlı ve eniyeye yakın bir buluşsal algoritma önerilmektedir.

Bunun yanında, UxNB’lerin uçan baz istasyonu olarak kullanıldığı bir senaryoda, ağ dilimleme problemi bilindiği kadarıyla ilk olarak bu tez kapsamında Bölüm 8’de incelenmektedir. Bu senaryoda, ağ dilimleme yardımıyla, yerde bulunan ve farklı hizmet talepleri olan kullanıcılara servis sağlanmaktadır. Senaryoda bulunan kullanıcılar, önceki iki bölümde bulunan kullanıcıların birleşimi olarak düşünülebilir. Buna göre, iki farklı grubu oluşturan kullanıcılardan ilk gruptakiler, yüksek veri hızı talebi olan kullanıcılardan oluşmaktayken, diğerinde güvenli ve düşük gecikmeli haberleşme yapmak isteyen kullanıcılar bulunmaktadır. Önerilen problem, bir zaman ortalamalı stokastik problem olarak modellenmiştir ve Lyapunov eniyileme yöntemi ile çözüm yinelemeli biçimde bulunmaktadır.

1.4.4 Radyo Kaynak Tahsisi ve Rota Planlama

Tez kapsamında, İHA haberleşmesinde radyo kaynaklarının nasıl yönetileceği de araştırılmaktadır. Bölüm 6, 7 ve 8’de yalnızca uçmak için gerekli olan kaynakların eniyilemesi değil aynı zamanda da radyo kaynaklarının da eniyilemesi yapılmaktadır. Buna göre, Bölüm 6’da ele alınan V2X haberleşmesi senaryosunda, bir kavşakta bulunan uçan yol kenarı biriminin hem uçmak için hem de haberleşme için harcadığı güç enküçültülmek istenmektedir. Bununla birlikte, araç kullanıcılarına belirli miktarda veri hızı garantisi verildiği için bu kullanıcıların kanal durumlarına göre güç tahsisinin nasıl yapılması gerektiği de araştırılmaktadır.

Bölüm 7’de bir eMBB haberleşme senaryosunda, uçmak için harcanan güç başına, kullanıcıların toplam veri hızının enbüyütülmesi artağ şebeke sorunu ile birlikte ele alınmak-

tadır. Bu problemde de radyo kaynaklarının tahsisi hem artağ bağlantısının kapasitesine göre hem de kullanıcıların kanal durumlarına göre araştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, artağ bağlantı kapasitesinin böyle bir ağdaki en önemli belirleyici faktör olduğu ortaya konmuştur. Farklı şehir senaryolarının incelendiği bu çalışmada, şehirdeki bina yoğunluğunun az olmasının hem artağ şebeke kapasitesini hem de toplam veri hızını olumlu etkilediği görülmektedir.

Bölüm 8’de bir ağ dilimle problemi ele alınmaktadır. Ancak, buradaki senaryo, diğer bölümlerdeki problemlerin aksine zaman ortalamalı stokastik problem olarak modellenmektedir. Dolayısıyla her zaman diliminde bir eniyileme probleminin çözüldüğü bu bölümde, problem dinamik bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, hem radyo kaynak tahsisinin dinamik olarak gerçekleştirilmesi hem de UxNB’nin rotasının her zaman diliminde planlanması gerekmektedir. Aynı zamanda kullanıcı sayılarının ve kanal durumlarının değiştiği bu senaryoda, Lyapunov sapma-artı-penaltı yöntemi kullanılarak yinelemeli bir algoritma ile sonuçlar elde edilmektedir. Ortak uçuş ve haberleşme kontrolü (Joint Communication and Flight Control, JCoFC) algoritmasının türetildiği bu senaryoda, hem algoritmanın yakınsaması hem de karmaşıklığı incelenmektedir. Rota planlama problemleriyle literatürde karşılaştırılmasına karşın, bir baz istasyonu olarak kullanılacak olan UxNB’lerin bu fonksiyonlarını yerine getirirken modellenen bir senaryoya literatürde karşılaşılmamıştır. Dolayısıyla, bilindiği kadarıyla, bu bölümde ele alınan problemin bu anlamda bir ilktir.

1.5 Tezden Üretilen Yayınlar

Yukarıda belirtilen çalışmaların çıktılarında aşağıdaki yayınlar yapılmıştır. Bazı araştırmalar ise henüz yazım aşamasındadır.

- **Konferans bildirisi**, "Gelecek Nesil İHA Ağları için Güç Tüketim Analizi", 27’inci IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı, Sivas, 2019.
- **Konferans bildirisi**, "Energy-Efficient Rotary-Wing UAV Deployment Under Flight Dynamics and QoS Constraints", IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, Soçi, Rusya, 2019.

- **Konferans bildirisi**, "Kapsama Yoğunluğu ve Ağ Sürekliliğini Enbüyüten Çoklu İHA Baz İstasyonu Konuşlandırılması", 28'inci IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı, Gaziantep, 2020.
- **Konferans bildirisi**, "Energy-Efficient Deployment of UAV in V2X Network Considering Latency and Backhaul Issues", IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, Odessa, Ukrayna, 2020.
- **Konferans bildirisi**, "Fast and Energy-Efficient 3D UAV Deployment Framework for Backhaul-Aware UAV-Assisted 5G Beyond Networks", *Yazım aşamasında.*
- **Dergi Yayını**, "On the Deployment of Airborne Communication Networks Using Different Type of UAVs", *Gönderilecek.*
- **Dergi Yayını**, "Dynamic Radio Resource Allocation and UxNB Route Planning by Network Slicing with Perfect Isolation", *Yazım aşamasında.*

2. DÖNER KANATLI BİR İHA İÇİN GÜÇ TÜKETİM ANALİZİ

2.1 Problem Arka Planı ve Literatür Özeti

4G mobil ağları ile birlikte artan veri hızları ve altyapı yoğunluğu ile kablosuz ağlardaki güç tüketimi de oldukça artmaktadır. Bu trendin 5G ağlarında da daha yoğun ağ yapısı ile artması beklenmektedir [114]. Dolayısıyla, günümüzde de haberleşme ağlarının tükettiği gücün miktarını ele alan yeşil haberleşme konusu ile, doğanın korunması ve buna uygun ağ kurulumu konusu önemini giderek arttıracaktır. Güç tüketiminin kontrolü, maliyetteki düşüşü ve çevresel korumayı sağlamak adına karşılanması gereken ana sorunlardan biridir [114]. Bu hedeflere ulaşmak için yeşil haberleşme, 5G kablosuz ağ teknolojisinin gelişimindeki önemli başlıklardan biridir.

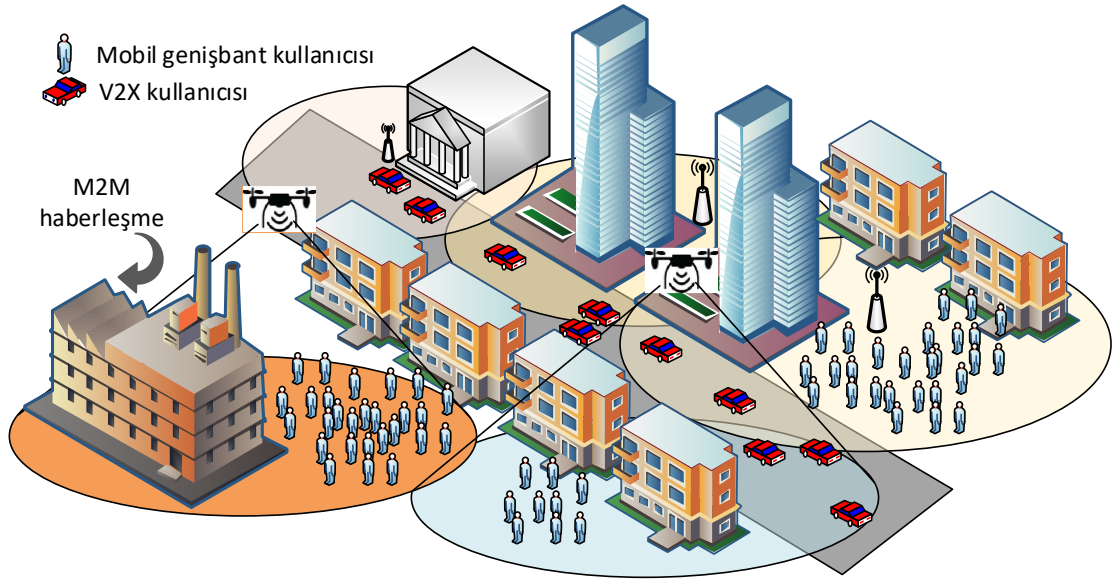
Bir diğer başlık ise 5G ve ötesi ağlarda insansız hava platformlarının heterojen yapılarda kullanımı ve enerji verimli kurulumudur. İlk olarak, yüksek hareketlilik kabiliyetlerinden dolayı bu araçların yangın, deprem ve arama kurtarma çalışmaları gibi acil durumlarda ve kargo teslimi gibi sivil uygulamalarda kullanımı düşünülmüştür [12, 115]. Ancak daha sonra, bu işlevinin yanında, kablosuz ağlarda kurulumlarının düşük maliyetli olmasından dolayı İHA baz istasyonu (UxNB) olarak kullanımları ele alınmıştır [23]. Bu araçların çok yönlü yapısının cihazdan cihaza (device-to-device, D2D), yoğun makine tipi haberleşme (mMTC) ve V2X gibi haberleşme ağlarında yüksek veri hızı, güvenilir ve düşük gecikmeli haberleşme ve art/önağ sorunlarını çözmesi beklenmektedir [11]. İHA haberleşmesinin yapıldığı bir ağ mimarisi yalnızca iki boyutta değil üç boyutta da heterojen bir yapıya sahip olacaktır. Olası bir heterojen 5G senaryosu Şekil 2.1'de gösterilmektedir. İnsansız hava araçlarının haberleşme alanında ticari anlamda kullanımı AT&T ve Qualcomm firmaları tarafından spor karşılaşmalarında ve eğlence sektöründe yüksek hızlı internet ve kullanıcı kapsama alanını genişletmek amacıyla gerçekleştirilmiştir [36].

Genellemek gerekirse, insansız hava araçlarını güç tüketim tipine göre dörde ayırmak mümkündür. Bunlar, batarya ile ve güç kablosu ile beslenenler, balon tipi ve sıvı yakıt kullanan İHA'lardır. Batarya ile çalışan döner kanatlı İHA'lar genellikle alçak irtifada seyrederler, oldukça hızlı hareket edebildiklerinden hizmet götürülmek istenen alana hızlıca ulaşabilirler. Yerdeki bir yönetici istasyona güç kablosuyla bağlı olan döner kanatlı İHA'lar ise herhangi bir güç kısıtı olmadan istenen sürelerde havada kalabilirler. Ancak

bu tipteki İHA'ların hizmet verdiği bölge kablo kısıtları nedeniyle sınırlı olmaktadır. Ayrıca, batarya ile çalışan İHA'lara oranla yer istasyonu barındırdığı için daha maliyetlidir. Balon ya da zeplin tipi İHA'lar da havada kalmak için herhangi bir güç tüketmezler. Ancak, genellikle üzerinde hareketlerini sağlamak için bir motor olmayan bu araçlar, düşük şiddetteki hava akımlarından etkilenirler. Bunun sonucu olarak, hizmet kalitesinde bir miktar düşüş yaşanabilir. Son olarak, sıvı yakıt kullanan İHA'lar ise genellikle yüksek irtifada bulunurlar. Bu İHA'lar daha çok askeri uygulamalarda kullanılırlar ve çok geniş bir alanı tarayıp hizmet verebilirler [18]. Acil durum senaryolarında, bölgesel kapasite artırımında ya da V2X ağlarında uçan yol kenarı birimi olarak kullanımında genellikle batarya ile çalışan döner kanatlı alçak irtifa platformları ya da dronlar baz istasyonu olarak kullanılmaktadır. Bu araçların karşılaştıkları en büyük sorun ise düşük uçuş süreleridir. Tezin bu bölümünde, alçak irtifada çalışan, bataryalı ve döner kanatlı İHA'ların güç tüketimleri ele alınacaktır.

Literatürde, döner kanatlı bir İHA güç tüketimi ile ilgili çalışmalar mevcut olsa da bu çalışmaları tam bir haberleşme senaryosunda görmek mümkün değildir [116]. Hedef iz sürümü senaryoları incelendiğinde, İHA'nın güç tüketimi [90, 91] no.lu kaynaklarda ele alınmıştır. Bu çalışmalarda, bir hedefin izini süren İHA'nın enerji tüketimini en aza indiren rota planı belirlenmektedir. Zorba ve diğ., İHA'nın tükettiği enerjiyi İHA'nın kütlesi ve çalıştığı yüksekliğin bir fonksiyonu olarak belirlemişlerse de bu oldukça basitleştirilmiş bir modeldir. Bu modelde, İHA'nın ağırlık harici herhangi bir fiziksel özelliği hesaba katılmamaktadır. Deneysel sonuçların kullanılarak İHA'nın çalışma yüksekliği ve enerji tüketimini ilişkilendiren çalışma [92] no.lu makalededir. İHA'nın hareketli olduğu bir senaryoda, yatay ve düşey düzlemde yaptığı hareketlerin sonucunda tükettiği güç ölçülerek eğri oturtma yöntemi ile matematiksel model elde edilmektedir. Bu deneylerde elde edilen sonuçlarda, yüksek hızlara çıkmadığı takdirde, İHA'nın en çok gücü havada asılı kalmak için harcadığı gözlemlenmiştir.

Bu bölümde yapılan çalışmalar, haberleşme alanında göz ardı edildiği düşünülen uçmak için tüketilen gücün miktarını ön plana çıkarmak için yapılmaktadır. Bu bölümün organizasyonu şu şekildedir. İkinci kısımda, öncelikle uluslararası standart atmosfer modeli sunulmakta, daha sonra, bir UxNB'nin birimlerinde tükettiği güç açıklanmakta ve havada asılı kalmak ve tüm düzlemlerdeki hareketi için gereken güç, ağırlık ve yüksekliğin bir



Şekil 2.1. Gelecek nesil heterojen 5G ağının olası bir yapısı

fonksiyonu olarak her durum için formüle edilmektedir. Üçüncü kısımda, İHA'nın tükettiği gücün farklı rakımlardaki şehirler için kıyası yapılmakta ve çalışma süresine çeşitli parametreler altında değinilmektedir. Son olarak, dördüncü kısımda, sonuçlar sunulmaktadır.

2.2 İHA Güç Tüketim Modeli

2.2.1 Uluslararası Standart Atmosfer Modeli

Uluslararası standart atmosfer modeli, özellikle helikopterlerin ve uçakların irtifası değiştiğinde harcadıkları gücün değişmesi sonucunda hava yoğunluğunun, sıcaklık, basınç ve dolayısıyla yüksekliğe göre değişimini modellemek için Minzner ve diğ. [117] tarafından tanımlanmıştır. Daha sonra Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) ve Amerikan Uzay ve Havacılık Ajansı (NASA) da bu standardı kabul etmişlerdir. Buna göre standart bir günde, yani deniz seviyesinde sıcaklık 15.04°C , atmosferik basınç 101.301 kPa olduğunda hava basıncı

$$p = 101.29 \left(\frac{T + 273.1}{288.08} \right)^{5.256} \quad (2.1)$$

ile ifade edilmektedir. Burada T , hava sıcaklığını belirtir ve birimi Celcius'tur. Ayrıca

yükseklik ile

$$T = 15.04 - 0.00649h \quad (2.2)$$

şeklinde değişmektedir. Burada, h , deniz seviyesinden yüksekliği belirtmektedir ve sıcaklığın yükseklikle ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. Hava yoğunluğu ise, sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olarak

$$\rho = \frac{p}{0.2869(T + 273.1)} \quad (2.3)$$

ile ifade edilir. Eşitlikler 2.1 ve 2.2, Eşitlik 2.3'te yerine yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında, hava yoğunluğu, deniz seviyesinden yüksekliğin bir fonksiyonu olarak

$$\rho = -101.29 \frac{(1.0002 - 2.2528 \times 10^{-5}h)^{5.256}}{1.8620 \times 10^{-3}h - 82.667} \quad (2.4)$$

biçiminde bulunur. Bu eşitliğin literatürde $h \leq 6000$ metre için

$$\rho = \rho_0 \exp(-u_0h) \quad (2.5)$$

şeklinde yaklaşılaştırılması yapılmıştır [116, 118]. Burada ρ_0 deniz seviyesindeki hava yoğunluğunu göstermektedir ve 1.225 kg/m^3 'e eşittir. Ayrıca $u_0 = 9.7 \times 10^{-5}$ 'tir ve sabittir.

Bir UxNB, üzerinde birden fazla güç tüketen birim bulundurur. Temel olarak, güç tüketimi, hareket, haberleşme ve veri işleme gibi birimlerde olurken, iç ve dış etmenler de güç tüketimini arttırmaktadır. Haberleşme için gereken güç, yükselticide, veri iletişimi ve kontrol sinyallerinin gönderilmesinde tüketilir. Bunun yanında, alınan verilerin işlenmesinde de UxNB üzerinde bulunan elektronik devreler güç tüketirler. Genellikle bu birimlerin toplam tükettiği güç 10 W mertebesinde [91]. Bunun dışında iç ve dış etmenler, sırasıyla, İHA'nın taşıdığı faydalı yük ve rüzgar, yağmur gibi hava olayları olarak düşünülebilir. Bu kısımda, bir İHA'nın havada uçarken motorların tükettiği güç, çalışma yüksekliği, araç ağırlığı ve aracın diğer fiziksel parametrelerinin bir fonksiyonu olarak belirlenecektir. Öncelikle, havada asılı kalmak için gereken güç miktarı bulunacaktır. Daha

sonra, düşey ve yatay düzlemde yapılan hareket sonucu tüketilen güç miktarları sunulacaktır.

2.2.2 Havada Asılı Kalmak için Gereken Güç

Bir UxNB'nin taşınması gereken toplam yük genellikle üç kısımdan oluşur. Bunlar, hava aracının kendi ağırlığı, bataryaların ağırlığı ve güç yükseltici, anten ve elektronik devre kısımlarından oluşan taşınacak ekstra yük ağırlığı şeklindedir. Dolayısıyla toplam ağırlık

$$W_{\text{top}} = W_v + W_b + W_p \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, W_v , W_b ve W_p sırasıyla, araç, batarya ve yük ağırlıklarını temsil etmektedir. Bir hava aracının havada asılı kalabilmesi için pervanelerinde üretilen yukarı yönlü çekiş kuvvetinin toplamının hava platformunun toplam ağırlığına eşit olması gerekir. Buna göre disk alanı A , rotor sayısı N olan bir hava platformunun ürettiği çekiş kuvveti, momentum kuramına göre

$$T = W_{\text{top}} = 2\rho N A v_h^2 \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır [116]. Burada ρ ve v_h , sırasıyla, hava yoğunluğunu ve İHA'nın asılı kaldığı durumda havanın pervane içine indüklenme hızını belirtir. Bir hava platformunun havada asılı durması için gereken güç, momentum kuramı kullanılarak

$$P_i = \frac{W_{\text{top}}^{3/2}}{\sqrt{2\rho N A}} \quad (2.8)$$

şeklinde elde edilir. Buna *indüklenen güç* denir. Ancak bu denklemde pervane etkileri (pervane sürüklenmesi, alanı, dönüş hızı) ele alınmamıştır. Pala eleman kuramına göre hava platformunun havada asılı kalmak için gereksinim duyduğu güç

$$P_{\text{asılı}} = \frac{W_{\text{top}}^{3/2}}{\sqrt{2\rho N A}} + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_b V_T^3 \quad (2.9)$$

şeklinde yazılır [118]. Buradaki ikinci terime ise *profil gücü* adı verilir. Profil gücünde bulunan ρ , havanın yoğunluğunu, A_b , bir pervanenin yüzey alanını, V_T , kanat ucu hızını

ve C_{D0} , sürüklenme katsayısını belirtir. Ayrıca pervanelerin yüzey alanı ve kanat ucu hızı, sırasıyla R yarıçaplı bir pervane için $A_b = 2c_b R$ ve $V_T = \omega R$ ile hesaplanır. Burada, c_b ve ω sırasıyla, kanat genişliğini ve pervane dönüş hızını belirtir.

İhtiyaç duyulan gücü sağlamak için gereken kanat ucu hızı ile hava yoğunluğu arasındaki ilişkiye dikkat etmek gerekir. Eşitlik 2.7'den de anlaşılacağı gibi hava yoğunluğu azaldıkça pervane içinde indüklenen hava hızının artması gerekmektedir. Bu da ancak pervane dönüş hızının artması ile mümkündür. Bu noktada, $J = v_h/\omega R$ olarak tanımlanan pervane ilerleme oranı deniz seviyesindeki değerinde sabit kaldığı varsayılarak indüklenen hava hızı ile pervane dönüş hızı arasında bir bağıntı bulunabilir. Pervane ilerleme oranı ve Eşitlik 2.5, Eşitlik 2.9'da yerine yazılıp gerekli işlemler yapıldığında

$$P_{asılı} = P_0 (1 + \mu) e^{\frac{u_0 h}{2}} \quad (2.10)$$

elde edilir. Burada, P_0 , deniz seviyesindeki gereken temel gücü belirtir ve μ , bu güce ek olarak gelen pervane yapısıyla ilgili bir katsayıdır. Bu değişkenler,

$$P_0 = \frac{W_{top}^{3/2}}{\sqrt{2\rho_0 N A}}, \quad (2.11)$$

$$\mu = \frac{C_{D0} c_b}{8J^3 \pi R} \quad (2.12)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, döner kanatlı bir İHA, deniz seviyesinin hemen üzerinde havada asılı biçimde duruyor olsa bile $P_0(1 + \mu)$ miktarda gücü tüketecektir.

2.2.3 Düşey Düzlemde Hareket için Gereken Güç

Havada asılı duran bir İHA ile düşey düzlemde alçalış ya da yükseliş hareketi yapan bir İHA'nın tükettikleri güç birbirine eşit değildir. Bunun en temel nedeni, pervane düzleminde indüklenen havanın hızının farklı olmasıdır. Buna göre V_v hızı ile düşey düzlemde hareket eden döner kanatlı N rotorlu bir İHA'nın pervanelerinde indüklenen havanın hızı,

v_h 'den farklı olarak

$$v_i = \begin{cases} \frac{V_v}{2} + \sqrt{\frac{V_v^2}{4} + \frac{W_{\text{tot}}}{2\rho NA}}, & V_v \geq 0, \\ \frac{V_v}{2} - \sqrt{\frac{V_v^2}{4} - \frac{W_{\text{tot}}}{2\rho NA}}, & V_v < -2v_h \end{cases} \quad (2.13)$$

şeklinde belirlenir [118]. Burada, V_v 'nin negatif değerleri alçalış anlamına gelmektedir. Ayrıca dikkat edilmesi gereken nokta, Eşitlik 2.13'ün hesabında kullanılan momentum teorisinin $-2v_h \leq V_v < 0$ aralığında geçerli olmamasıdır. Bunun nedeni, pervanenin yel değirmeni etkisi altına girmesidir [116]. Bu hız aralığı için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, indüklenen havanın hızı, eğri oturtma yöntemi ile

$$v_u = v_h \left[1 - 1.125 \frac{V_v}{v_h} - 1.372 \left(\frac{V_v}{v_h} \right)^2 - 1.718 \left(\frac{V_v}{v_h} \right)^3 - 0.655 \left(\frac{V_v}{v_h} \right)^4 \right] \quad (2.14)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [118]. Buna göre, döner kanatlı N rotorlu bir İHA'nın düşey düzlemde hareket etmesi sonucu tüketeceği güç,

$$P_v = \begin{cases} \frac{W_{\text{top}}}{2} V_v + \frac{W_{\text{top}}}{2} \sqrt{V_v^2 + \frac{2W_{\text{top}}}{\rho NA}} + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_b V_T^3 & , V_v \geq 0, \\ W_{\text{top}} (V_v + v_u) + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_b V_T^3 & , -2v_h \leq V_v < 0, \\ \frac{W_{\text{top}}}{2} V_v - \frac{W_{\text{top}}}{2} \sqrt{V_v^2 - \frac{2W_{\text{top}}}{\rho NA}} + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_b V_T^3 & , V_v < -2v_h \end{cases} \quad (2.15)$$

ile verilmektedir.

2.2.4 Yatay Düzlemde Hareket için Gereken Güç

Düşey düzlem için yapılan tartışmanın benzeri yatay düzlemdeki hareket için de geçerlidir. Dolayısıyla, İHA'nın yatay düzlemde yaptığı hareketin hızına bağlı olarak, indüklenen havanın hızı farklı olmaktadır. Ayrıca yanal yüzey sürtünmesinden dolayı parazit güç adı verilen bir miktar güç de harcanmaktadır. Bu durumda, döner kanatlı N rotorlu bir İHA'nın yatay düzlemde yaptığı hareket sonucu tüketeceği güç

$$P_h = v_i W_{\text{top}} + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_b V_T^3 \left[1 + 3 \left(\frac{V_h}{V_T} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \rho C_d A_d V_h^3 \quad (2.16)$$

ile tanımlanır. Burada, C_d ve A_d , sırasıyla aracın sürüklenme katsayısı ve yanal alanını belirtmektedir, v_i , İHA'nın pervanelerinde dönme hareketinden kaynaklanan indüklenen havanın hızıdır ve yatay düzlemdeki hareket sonucu olan bu hız

$$v_i^2 = -\frac{1}{2}V_h^2 + \frac{1}{2}\sqrt{V_h^4 + 4\left(\frac{W_{\text{top}}}{2\rho NA}\right)^2} \quad (2.17)$$

ikinci dereceden denklemin çözümü ile bulunur. Son olarak, V_h yatay düzlemde hareket eden İHA'nın hızıdır. Ayrıca, Eşitlik 2.16'daki son terim *parazit güç* olarak adlandırılır.

Burada yapılan hesapların platformun uçuş süresini de içinde barındırdığına dikkat edilmelidir. İHA'nın üzerinde bulundurduğu bataryaların kapasitesinin E_C (Watt×h) olduğu düşünülürse, uçuş süresi

$$\int_0^{T_{\text{uçuş}}} P_{\text{toplamlam}}(t)dt \leq E_C \quad (2.18)$$

ile sınırlıdır. Burada, $P_{\text{toplamlam}}$ terimi, döner kanatlı bir UxNB'nin hareketi, haberleşme ve elektronik birimleri tarafından tüketilen toplam gücü temsil etmektedir. Literatürde, genellikle $P_{\text{toplamlam}}$ terimine havada asılı kalmak için gerekli güç miktarı eklenmemektedir. Bunun yerine sadece haberleşme için harcanan güç üzerinden eniyileme yapılmaktadır. Ancak bu bölümün devamında gösterileceği gibi uçmak için gereken güç binlerce Watt civarındayken haberleşme, kontrol işlemleri ve veri işlemi için gerekli güç 10 Watt mertebindedir. Bu yüzden, uçmak için harcanan güç uçuş süresini belirlemede ana etmendir. Havada asılı kalma işlemi sırasında harcanan gücün sabit olduğu düşünülürse, insansız hava aracının çalışma süresi, batarya enerjisini asılı kalmak için gereken güce bölerek $T_{\text{uçuş}} = E_C/P_{\text{asılı}}$ ile bulunur.

Bir sonraki kısımda, yapılan bu teorik hesaplamalar, fiziksel özellikleri bilinen bir döner kanatlı İHA için sayısal sonuçlar elde etmek amacıyla kullanılacaktır.

2.3 Sayısal Bulgular

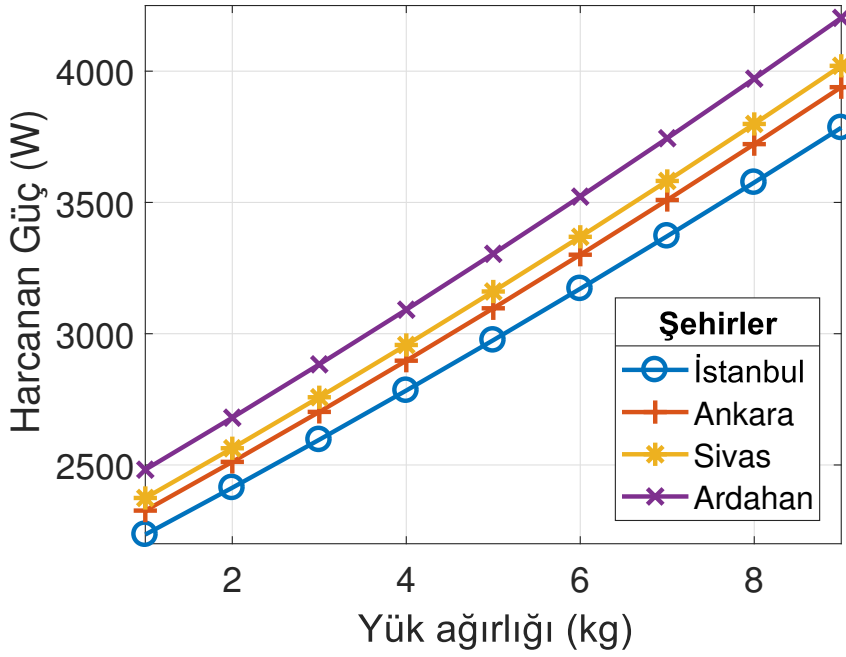
Döner kanatlı dört rotorlu bir insansız hava aracı için tipik fiziksel ve teknik özellikler Çizelge 2.1'de verilmektedir. Kullanılan motor sürücülerinin en az 48 volt ile beslendik-

Çizelge 2.1. Tipik bir döner kanatlı İHA'nın teknik ve fiziksel özellik değerleri [94]

Teknik veya Fiziksel Özellik	Değer
Pervane çapı, $2R$	558.8×10^{-3} m
Pervane genişliği, c_b	167.6×10^{-3} m
Pala, Rotor ve Batarya Sayısı	2, 4, 4
Kanat Sürüklenme Katsayısı, C_{D0}	1.57×10^{-3}
Aracın Ağırlığı, W_v	10 kg
Faydalı yük, W_p	8 kg
Batarya Ağırlığı, W_b	2 kg
Batarya Gerilimi, V_b	24.5 V
Batarya Kapasitesi, C	16000 mAh
Maksimum motor devri, ω_{\max}	6800 rpm
Sürüklenme Katsayısı \times Yanal Alan, $C_d \times A_d$, [94]	0.67 m ²

leri kabul edildiğinde iki batarya aynı gerilimi elde edebilmek için seri olarak bağlanmak durumundadır. Buna göre $E_c = C \times 2V_b$ (mW·h) ile bulunur. Böylece birbirine seri iki bataryaya paralel bir seri batarya çifti ile (toplamda 4 batarya) havada asılıda kalmak için gerekli güç, rakımları farklı olan 4 şehir (İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan) için yük ağırlığının fonksiyonu olarak Şekil 2.2'de çizdirilmiştir. Görüldüğü gibi havada asılı kalmak için gereken güç, İHA'nın taşıdığı ağırlığın artması ile Eşitlik 2.10'da belirtildiği gibi ağırlığın $3/2$ 'inci kuvveti ile artmaktadır. Bunun yanında, yüksekliğin etkisi ele alındığında 40 m rakımlı İstanbul'da 120 m yüksekliğe konumlandırılmış olan bir İHA'nın tüketeceği gücün 2020 m rakımlı Ardahan'da yine aynı yüksekliğe konumlandırılan İHA'dan 6 kg yük ağırlığı taşıdıkları durum için 351 W daha az güç tükettiği görülmektedir. Hatta aynı miktarda tüketilen güç için, Ardahan'daki bir İHA, Ankara'dakinden 1 kilogram, İstanbul'dakinden neredeyse 2 kilogram daha az yük taşımaya gerekmektedir.

Şekil 2.3'de batarya sayısının dört olduğu durum için aynı dört şehirde yük ağırlığına karşılık bir İHA'nın çalışma/uçuş süresi gösterilmektedir. Beklenildiği gibi ağırlığın artmasıyla büyüyen güç ihtiyacı çalışma sürelerini azaltmaktadır. Burada yine İHA'nın konumlandırıldığı yüksekliğin etkisi net bir biçimde görülmektedir. Çalışma süresi İstanbul'da en fazla iken, sırasıyla Ankara, Sivas ve Ardahan şehirlerinde 120 m'ye konumlandırılan bir İHA'nın çalışma süresi azalmaktadır. Örneğin, bu fark rakım olarak birbirine yakın olan Ankara ve Sivas arasında yaklaşık 33 saniyeye karşılık gelmektedir. Ancak LTE ile ulaşılabilecek veri hızlarının 100 Mbps seviyesinde olduğu düşünüldüğünde bu sürede 3.3

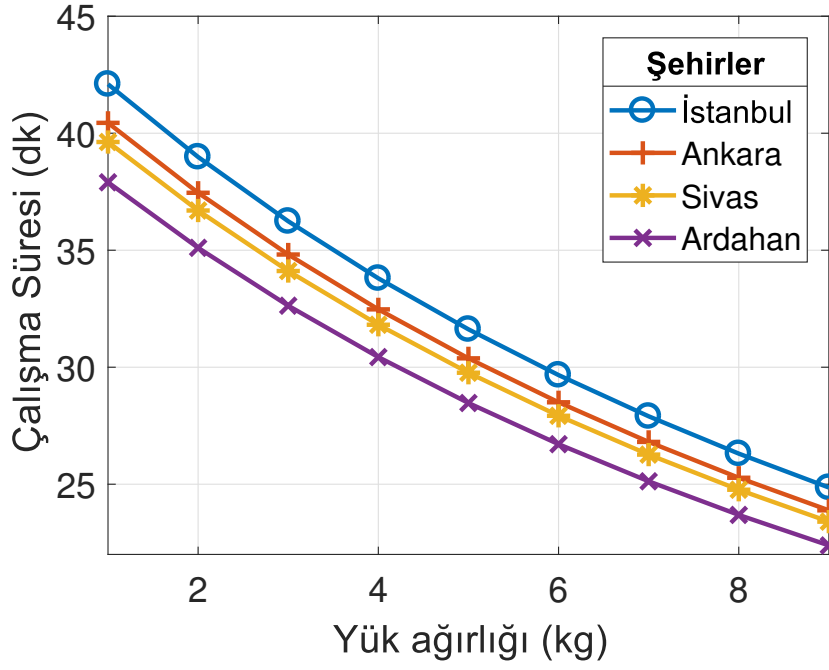


Şekil 2.2. Dört adet bataryaya sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde yük ağırlığına karşı yerden 120 m yukarıda havada asılı kalmak için harcanan güç grafiği.

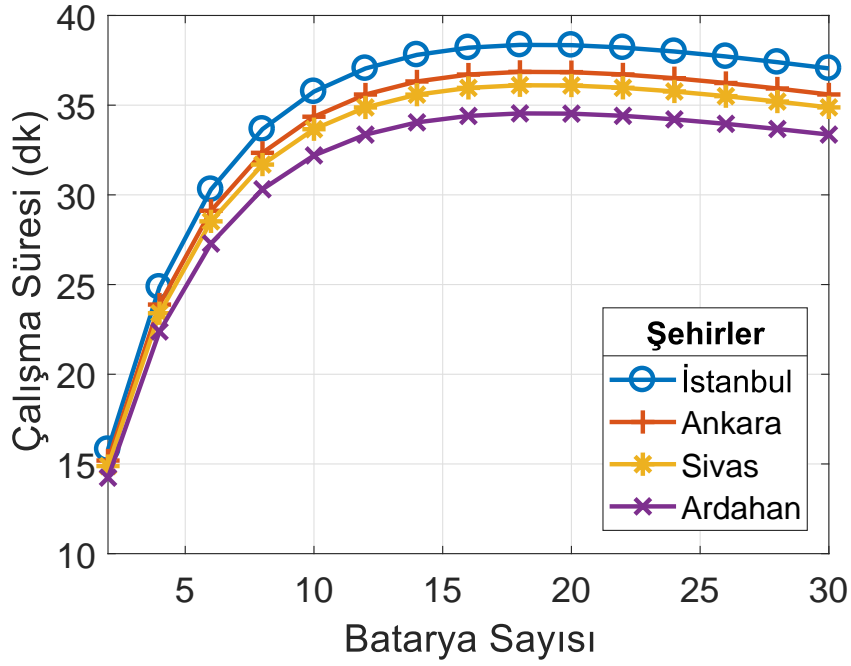
Gbit veri iletmek mümkün hale gelmektedir. Dolayısıyla uçuş süresindeki küçük farklılıklar bile oldukça fazla veri kaybı anlamına gelmektedir.

Yük ağırlığına ek olarak bataryanın da ağırlığı uçuş süresini direkt etkileyen parametrelerden biridir. Sekiz kilogram yük ağırlığına sahip olan bir İHA için Şekil 2.4'de yine dört farklı şehir için taşıdığı batarya sayısına karşılık çalışma süresi verilmiştir. Bu grafikte İHA'nın 30 tane 2 kg ağırlığındaki bataryayı kaldırabilecek kadar pervanelerinde çekiş kuvveti yaratabileceği varsayılmaktadır. Buna göre İHA'nın taşıdığı batarya sayısının artması toplam ağırlığı da arttıracığından belirli bir sayıdaki bataryadan sonra çalışma sürelerinde düşüş gözlemlenmektedir. Bu sayı, Çizelge 2.1'deki özellikleri taşıyan bir İHA ve batarya düşünüldüğünde 18 taneye karşılık gelmektedir. Ayrıca bu grafikte de diğer grafiklerde yapılan şehir rakımları ve çalışma süresi arasındaki yorumlar olduğu gibi geçerlidir.

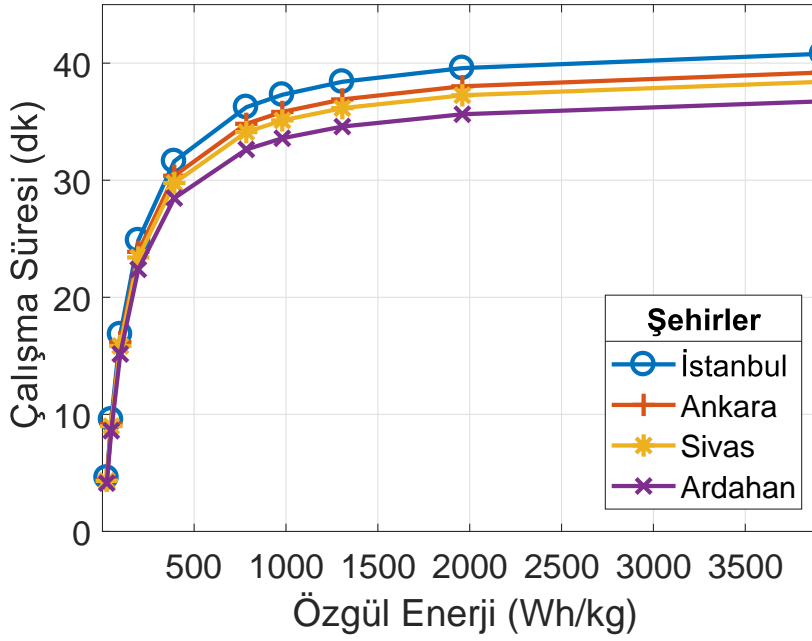
Batarya sayısının artması, bataryaların kilogram başına verdiği enerjiyi değiştirmemektedir. Bu sebeple, Şekil 2.5'te, 8 kilogram yük ağırlığına sahip olan bir İHA için özgül enerjiye karşılık farklı rakımlardaki şehirler için çalışma süreleri verilmiştir. Bunun için,



Şekil 2.3. Dört adet bataryaya sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde yük ağırlığına karşı kestirilen uçuş süresi



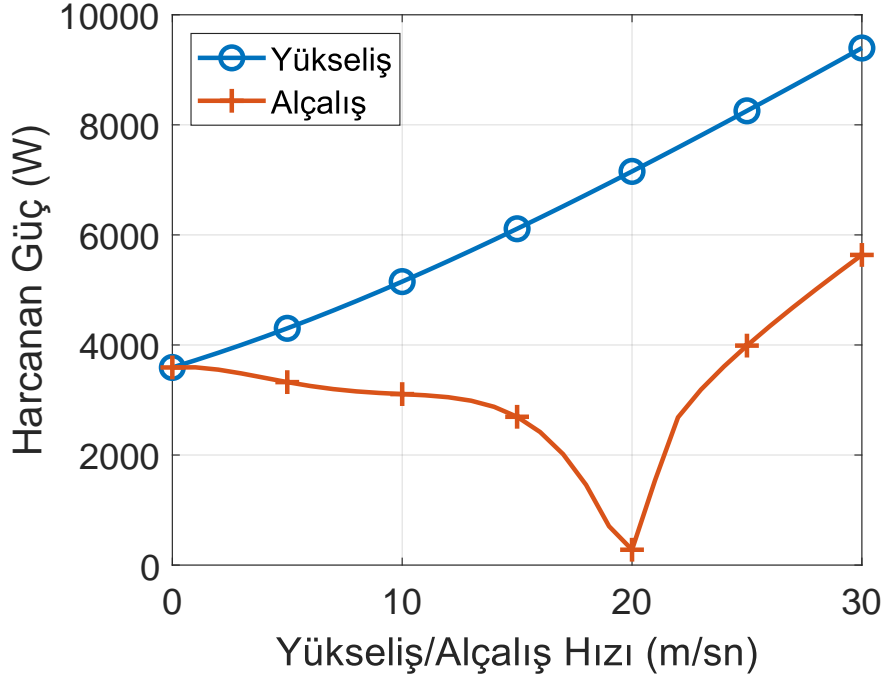
Şekil 2.4. Sekiz kilogram yük ağırlığına sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde batarya sayısına karşı kestirilen uçuş süresi



Şekil 2.5. Sekiz kilogram yük ağırlığına sahip bir İHA'nın İstanbul, Ankara, Sivas ve Ardahan illerinde batarya özgül enerjisine karşılık kestirilen uçuş süresi

önceki benzetimlerde kullanılan batarya yerine, aynı kapasiteye ve gerilim değerine sahip bir teorik batarya ele alınıp ağırlığı değiştirilmiştir. Grafikte yatay eksen sağa gidilmesi kapasitesi daha yüksek batarya teknolojilerini ifade etmektedir. Örneğin, günümüzde Li-Po teknolojisinin teorik enerji yoğunluğu 265 W/kg mertebesindedir. Burada, kilogram başına daha çok kapasiteye sahip bataryalar kullanıldığında bile belirli bir noktadan sonra elde edilen uçuş sürelerindeki artış oldukça az olmaktadır. Yani İstanbul'da Çizelge 2.1'deki fiziksel özelliklere sahip bir İHA en fazla 42 dakika uçabilecektir. Bunun nedeni ise, Eşitlik 2.6'daki batarya ağırlığının azalması ile toplam ağırlığın değişmemesi ve araca verilen enerjinin değişmiyor oluşudur.

Şekil 2.6'da Ankara üzerinde uçan 8 kilogram faydalı ağırlığa, dört tane bataryaya sahip bir İHA için yükseliş ya da alçalış hızına göre harcanan güç gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yükseliş hızının artışı harcanan gücü arttırmaktadır. Buna karşın, alçalış hızına göre tüketilen güç eğrisi benzer bir düzenli azalış ya da artış göstermemektedir. Bunun en büyük nedeni, alçalış hızı belirli bir seviyeye ulaşıncaya kadar yel değirmeni etkisinin ortaya çıkması ve pervane içine indüklenen havanın hızının deneysel yollarla elde edilmesidir. Havada asılı kalma esnasında pervane içine indüklenen havanın hızının yaklaşık 2 katı kadar hız ile alçalış yapıyorsa momentum teorisi kullanılabilir noktaya

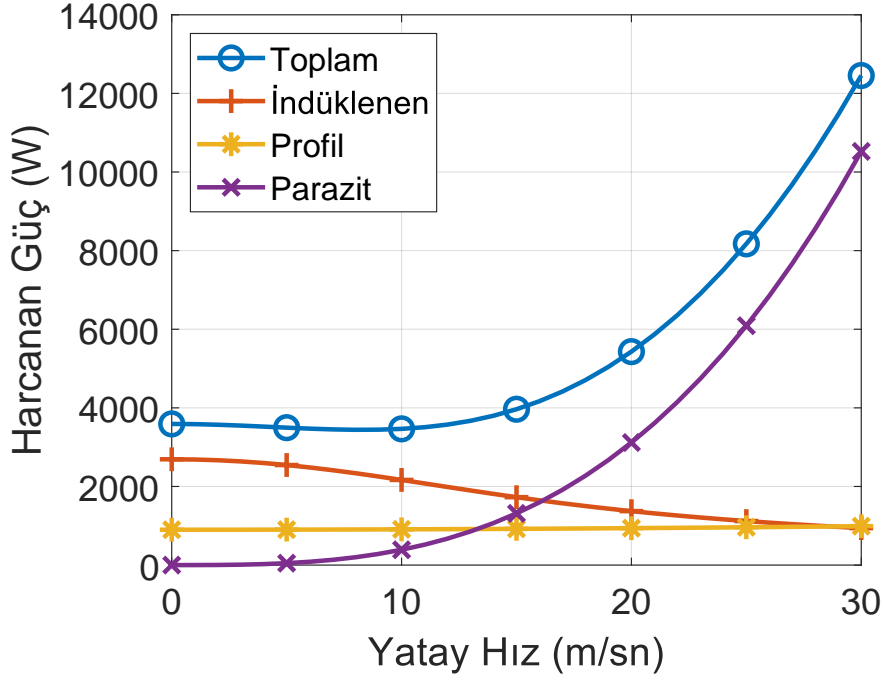


Şekil 2.6. Ankara üzerinde uçan sekiz kilogram yük ağırlığına ve dört bataryaya sahip bir İHA'nın yükseliş ya da alçalış hızına karşılık harcadığı güç.

ulaşmaktadır. Bu sebeple 22 m/sn alçalış hızı seviyesinin ardından momentum teorisi ile hesaplanan noktaya ulaşılmış olur ve görüldüğü gibi harcanan güç artmaktadır. Bununla birlikte, alçalış esnasında harcanan gücün dip yaptığı nokta ise otorotasyon noktası olarak bilinir ve bu noktada, sadece profil gücüne denk miktarda güç harcanmaktadır.

Şekil 2.7, Ankara üzerinde yatay düzlemde hareket eden sekiz kilogramlık faydalı yüke sahip bir İHA'nın harcadığı güç görülmektedir. Toplam gücün yanı sıra, indüklenen, profil ve parazit güçler de görsele dahil edilmiştir. Görüldüğü gibi yatay düzlemdeki hız arttıkça pervanelerde indüklenen havanın hızı düşmektedir ve bu durum yaklaşık 10 m/sn (36 km/sa) hıza kadar toplam tüketilen gücü azaltmaktadır. Bu noktadan sonra, yanal alanın hava direncinden dolayı tüketilen güç giderek artmaktadır ve toplam tüketilen gücü domine etmektedir. Profil gücünün ise değişmediği gözlemlenmektedir. Buradaki gözlemlere dayanarak, belirli bir alanda hizmet verecek bir İHA baz istasyonunun hizmet vereceği bölgeye gidiş rotasının ilk olarak hizmet vereceği yüksekliğe yükselme ve daha sonra yatayda ilerleme şeklinde olması güç tüketimi adına daha ekonomik olacaktır.

Özet olarak, İHA'nın uçmak için tükettiği gücün taşıdığı faydalı yüke göre 2500 W ile 4000 W arasında değiştiği görülmektedir. Bu noktada, bir yer baz istasyonu ile bir uçan



Şekil 2.7. Ankara üzerinde uçan sekiz kilogram yük ağırlığına sahip bir İHA'nın yatay düzlemdaki hızına karşılık harcadığı güç.

erişim noktasının (UxNB) güç tüketimlerini karşılaştırmak faydalı olacaktır. Faydalı yükün haberleşme birimi olacağı varsayıldığında, bir İHA'nın üzerinde taşıyacağı uzak radyo ekipmanının (Remote Radio Equipment, RRE) 8 kg olduğu bir senaryo uygundur [119]. Bu durumda da UxNB'nin, farklı şehirlerde 3500 W ile 4000 W arası güç tükettiği görülmektedir. Önceki nesil ağlara da destek veren bir 4G/LTE yer baz istasyonun soğutma, veri işleme ve kablo kayıpları ile birlikte tükettiği toplam güç yaklaşık olarak 6800 W civarındadır [120]. Bu değer, 5G hizmeti veren bir baz istasyonu için 11000 W'ın üzerine çıkmaktadır. Ancak gelecekte, 5G baz istasyonlarının yalnızca 5G şebekesine hizmet edeceği düşünüldüğünden istasyonun tükettiği gücün yaklaşık 4200 W civarında olduğu söylenebilir. Tükettikleri güç ele alındığında, döner kanatlı İHA'ların yer baz istasyonlarına göre güç verimli çözümler olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, kısıtlı süre çalışan bu araçların enerjileri verimli kullanılmalıdır. Bunun dışında, farklı tipte İHA (balon vb.) kullanılarak ağdaki enerji verimliliği artırılabilir.

2.4 Bölüm Özeti

Tezin bu bölümünde, gelecek nesil haberleşme sistemlerinde kullanılacak olan İHA baz istasyonlarının (UxNB) uçmak için harcadığı gücün çeşitli parametreler karşısında ince-

lemesi yapılmıştır. İlk olarak uluslararası standart atmosfer modeli okuyucuya sunulmuş ve momentum ve pala eleman kuramı kullanılarak havada asılı kalma gücü formüle edilmiştir. Sonrasında düşey ve yatay düzlemde hareket sonucu harcanan gücün matematiksel formülleri verilmiştir. Daha sonra batarya sayısı, yük ağırlığı ve özgül enerji karşısında harcanan gücün ve çalışma sürelerinin değişimi paylaşılmıştır. Görüldüğü gibi bir hava platformunun havada asılı kalmak için ihtiyaç duyduğu güç, haberleşme için gerekli olan gücün kat be kat üzerindedir. Dolayısıyla, gelecek nesil kablosuz ağlarında enerji verimliliği konusu tartışılırken İHA'ların hareketlerini sağlamak için tükettikleri güç de mutlaka ele alınması gereken bir konudur. Bununla birlikte, farklı şehirlerde kurulacak ağların çalışma sürelerinin farklı olacağı gösterilmiştir. Batarya teknolojisinin İHA'lar için kritik olduğu verilen grafiklerle desteklenmiştir. Ayrıca, yükseliş için harcanan gücün diğer tüm hareketlere göre daha yüksek olduğu belirtilmiş ve kurulacak bir UxNB ağı için olası bir rota planlaması sunulmuştur. Bunlarla beraber, İHA'ların yer baz istasyonları ile karşılaştırıldığında güç tüketimlerinin neredeyse birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu anlamda, döner kanatlı İHA'ların enerji verimli olmadıkları belirtilmiştir. Burada yapılan hesapların ve verilen sonuçların UxNB ağlarının tasarımında önemli bir yer bulacağı düşünülmektedir.

3. DÖNER KANATLI BİR UxNB’NİN ENERJİ VERİMLİ KONUŞLANDIRILMASI

3.1 Problem Arka Planı ve Literatür Özeti

Bölüm 2’de gelecek nesil haberleşme sistemlerinde kullanılacak olan döner kanatlı bir İHA’nın üzerindeki havasal erişim noktasının uçmak için harcadığı gücün miktarı tartışılmıştır. Bu tartışmada değinilen en önemli nokta, İHA’nın hareketi için harcadığı gücün diğer güç tüketim birimleri karşısında binlerce kat fazla olduğudur.

Kullanıcı veri hızları her yeni gelen haberleşme neslinde daha da yükselmektedir. 5G ve ötesi ağ teknolojileri ise yüksek veri hızlarının dışında, ultra güvenilir ve düşük gecikmeli haberleşme ve uzun pil sürelerini destekleyecek enerji verimli uygulamaları da içinde barındıran bir ağ kurgusuna sahiptir. Bu kurgu, yersel ağların sürdürülebilir kapsama problemi düşünüldüğünde yalnızca 1 Gbps veri hızı için bile oldukça zorludur. Kör nokta, gölgeleme ve ağ kurulumunun bulunmaması gibi sorunlar göz önüne alındığında statik bir ağ yapısı ile bu sorunların üstesinden gelinemeyeceği aşikardır. Bu sebeple, kurulum kolaylığı ve hareketliliği nedeniyle insansız hava araçlarının uçan baz istasyonu olarak konuşlandırılması bu sorunları çözmek için umut vaadeden bir seçenektir [11]. 5G ve ötesi ağlarda, İHA baz istasyonu (UxNB) sayısındaki artışın oldukça fazla olacağı beklenmektedir. Bölüm 2’deki tartışma göz önüne alındığında, enerji verimli UxNB konuşlandırılması problemi oldukça önemlidir [12]. İnsansız hava araçlarının pratikte kullanım alanları önceleri daha çok acil durumlar, felaket alanları ve arama kurtarma çalışmaları olsa da yersel ağların zaafı gelecek nesil ağ yapısında UxNB’lere yer verilerek yersel olmayan ağların (Non-Terrestrial Networks, NTN) sisteme entegre edilmesini gerektirmektedir [23, 84, 121]. Dolayısıyla, bu araçların yersel ağların sürdürülebilir kapsama sorununa getirilen çözümlerin başında olacağı düşünülmektedir. Döner kanatlı uçan baz istasyonu UxNB’lerin birçok avantajının yanında ise haberleşme uygulamalarındaki en büyük problemi düşük uçuş süreleridir [11]. Dolayısıyla, daha uzun hizmet süreleri için İHA’ların enerji verimli konuşlandırılması ve konumlandırılması ele alınmalıdır.

Farklı senaryo içeriklerinde, İHA’ların eniyi konuşlandırılması literatürde bir çok çalışma tarafından ele alınmıştır [21, 23, 84]. Rice sönümlenmeli kanal koşullarında kapsama alanını enbüyüten eniyi İHA yüksekliği [21] no.lu kaynakta elde edilmiştir. Azari ve diğerleri

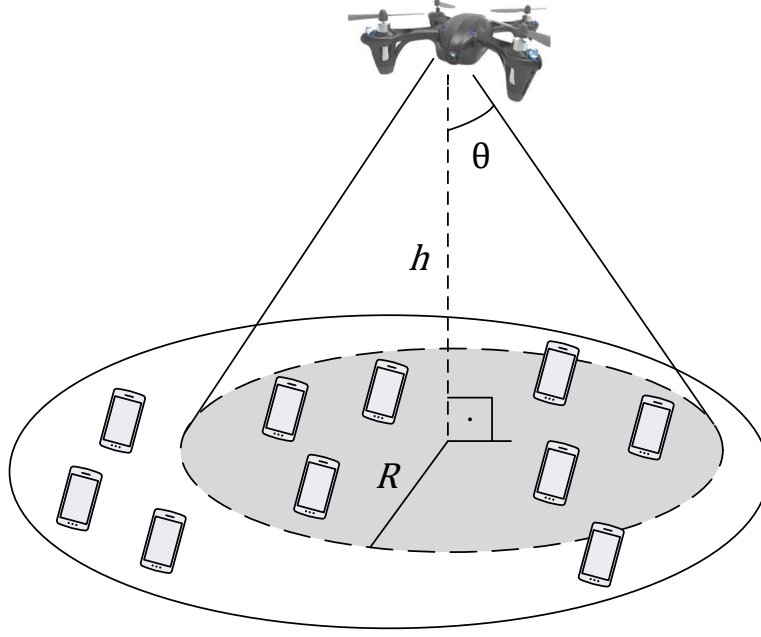
ayrıca yol kaybı ve sönümlenme arasında bir ödünleşim olduğunu göstermişlerdir. Belirli bir ağ kazancını sağlamak adına 3 boyutlu İHA konuşlandırılması [23] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Bu problem ikinci dereceden kısıtlandırılmış karışık tamsayı doğrusal olmayan problem (quadratic constrained mixed integer nonlinear problem, QMINLP) olarak formüle edilmiştir. Buna göre, hesaplama verimliliği yüksek bir algoritma ile eniyiye yakın bir sonuç elde edilmiştir. Enerji verimli güç kontrolünün ele alındığı [84] no.lu kaynakta, İHA'ların hareketliliği ve 3 boyutlu yerleştirilmesi de hesaba katılmıştır. Mozaffari ve diğ., IoT cihazlarının güvenilir çıkış yolu haberleşmesini İHA'ların toplam çıkış gücünü enküçülterek mümkün kılmışlardır.

İHA'ların güç tüketimi genellikle rota planlama problemlerinde ele alınmıştır [91,92]. Bir İHA'nın çalışma yüksekliği ve ağırlığını enerji tüketimi ile ilişkilendiren çalışma, Ello-umi ve diğ. tarafından yapılmıştır [91]. Bu çalışmada, İHA'nın harcadığı enerji $E = mgh$ eşitliği ile verilmiştir. Ancak önerilen bu tüketim modeli oldukça basittir ve aracın rotor sayısı, kanat açıklığı gibi hiç bir fiziksel özelliği hesaba katılmamaktadır. Bunun yanında, [92] no.lu kaynakta, döner kanatlı bir dronun güç tüketimini inceleyen deneysel bir çalışmayı görmek mümkündür. Bu çalışmada, İHA'ların en fazla gücü havada asılı kalmak için tükettiği sonucu ortaya konmuştur.

Bu gözlemler ışığında, bu bölümde, kullanıcı hizmet kalitesi (Quality-of-Service, QoS) isterleri ve uçuş dinamikleri altında havada asılı duran bir UxNB'nin enerji verimli konuşlandırılması çalışılmıştır. Öncelikle, matematiksel olarak İHA platformlarının güç harcamaları momentum ve pala eleman teorilerinin yardımıyla gerçekçi olarak modellenmiştir. Daha sonra, haberleşme için harcanan gücün yanında havada asılı kalmak için gereken gücün etkisini de kapsayacak şekilde bir haberleşme senaryosu belirlenmiş ve eniyileme problemi sunulmuştur.

3.2 Sistem Modeli

Anten hüzmeye genişliği 2θ olan bir UxNB, toplam kullanıcı sayısı K olan $\mathcal{D} \subset \mathbb{R}^2$ ile tanımlanan herhangi bir coğrafi alanda, herhangi bir h yüksekliğinde asılı durarak Şekil 3.1'deki gibi hizmet vermektedir. İHA'nın kapsama alanına giren kullanıcılar yani başka bir deyişle hizmet alan kullanıcılar \mathcal{K} kümesini oluşturmaktadır. Bunun yanında, İHA'nın bu kullanıcılara hizmet verebilmesi için kendisine operatör tarafından tahsis edil-



Şekil 3.1. İHA haberleşme modeli

miş toplam bant genişliği β ile tanımlanmıştır. UxNB, servis verdiği kullanıcılara dikgen frekans bölümlü çoklu erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) tekniği kullanarak altkanallar tahsis etmektedir.

3.2.1 Havadan Yere Kanal Modeli

İHA ya da dron haberleşmesinde, UxNB yüksekliğinin yersel haberleşme ağına göre daha fazla olmasından dolayı kanal modeli farklılık göstermektedir. Yer baz istasyonu ile kullanıcılar arasındaki kanaldan farklı olarak bu kanala havadan yere kanal modeli adı verilmektedir. Baz istasyonu yüksekliği düşünüldüğünde özellikle şehir dışı gibi yüksek bina yoğunluğunun az olduğu bölgelerde görüş hattı (line-of-sight, LoS) bağlantısının ortaya çıkma ihtimali yersel ağlara göre daha fazladır. Bu sebeple, literatürde bu kanal Rice dağılımlı bir rastgele değişken olarak düşünülmüştür [25]. Bununla birlikte, yol kaybına ek olarak Rayleigh dağılımlı çok giriş çok çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) kanalları olarak da ele alınmıştır [122]. Bunların yanında, havadan yere kanal modelini serbest uzay yol kaybı olarak alan çalışmalar da mevcuttur [123]. Ancak, bu modellerin hiç biri çevresel etkileri ve görüş hattı olasılığını hesaba katmamaktadır. Bu noktada, bina bloke etkisini ele alan bir model, ITU tarafından önerilmiştir. Bu modelde, yeryüzü şekilleri ve kullanıcı ekipmanlarının anten yüksekliği hesaba katılmamış olmasına rağmen

daha sonra çeşitli modifikasyonlara uğrayarak literatürde oldukça geniş biçimde kullanılır hale gelmiştir [18, 21, 23, 84]. Tez çalışmasının devamında, bu çalışmalarda önerilen ortalama yol kaybı modeli kullanılacaktır.

Bu modele göre, (x_D, y_D) koordinatlarında bulunan bir İHA ile (x_k, y_k) noktasında bulunan k 'inci kullanıcı arasındaki bağlantının görüş hattı olasılığı [18] no.lu kaynakta verildiği gibi

$$\mathbb{P}(h_D, r_k) = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta \left(\arctan\left(\frac{h_D}{r_k}\right) - \alpha\right)\right)} \quad (3.1)$$

yazılabilir. Burada, α ve β , çevresel karakteristiklerin belirlediği sabitlerdir, h_D , hava platformunun zeminden yüksekliğini verir ve r_k , k 'inci kullanıcı ile UxNB arasındaki iki boyutlu uzaklığı vermektedir ve $r_k = \sqrt{(x_D - x_k)^2 + (y_D - y_k)^2}$ şeklinde tanımlanır. Buna göre, UxNB ile k 'inci kullanıcı arasındaki ortalama yol kaybı

$$L_{\text{dB}}(h_D, r_k) = 20 \log\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right) + 20 \log\left(\sqrt{h_D^2 + r_k^2}\right) + P(h_D, r_k)\mu_{\text{LoS}} + [1 - P(h_D, r_k)]\mu_{\text{NLoS}} \quad (3.2)$$

şeklinde yazılır. Burada, f_c , taşıyıcı frekansdır ve birimi Hz'dir ve c , m/sn cinsinden ışık hızını belirtir. Ayrıca, μ_{LoS} ve μ_{NLoS} , dB cinsinden LoS ve NLoS bağlantılar için kayıplardır ve bu değerler çevresel etkilere göre değişmektedir. Bu denklem,

$$L_{\text{dB}}(h_D, r_k) = 20 \log\left(\sqrt{h_D^2 + r_k^2}\right) + AP(h_D, r_k) + B \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir [23]. Burada $A = \mu_{\text{LoS}} - \mu_{\text{NLoS}}$ ve $B = 20 \log\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right) + \mu_{\text{NLoS}}$ şeklinde tanımlanır.

Bu noktada, Eşitlik 3.3'teki yol kaybı terimi kullanılarak, k 'inci kullanıcının iniş yolu sinyal gürültü oranı (Signal-to-Noise-Ratio, SNR)

$$\bar{\gamma}_k = \frac{P_k}{w_k N_0 L(h_D, r_k)}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, P_k , w_k 'lik bant genişliğine sahip altkanalda k 'inci kullanıcıya tahsis edilen güçtür ve N_0 , ortalaması sıfır olan beyaz Gauss gürültüsünün güç izgesel yoğunluğudur. Eşitlik 3.4'teki yol kaybı teriminin dB cinsinden olmadığına dikkat edilmelidir. Ayrıca k 'inci kullanıcının SNR'ının UxNB'nin yüksekliği ve konumu ile direkt ilgili olduğu açıkça görülmektedir. Bu senaryoda, UxNB, hizmet verdiği kullanıcıların iniş yolu SNR'ının γ_{min} eşik değerinden düşük olmayacağını garanti etmektedir.

3.2.2 Asılı Kalmak için Gerekli Güç

Bir İHA platformunun güç harcaması birkaç iç ve dış etkenin bileşimi ile ortaya çıkar. Şasi, motorlar, elektronik devre, bataryalar ve faydalı yükün ağırlığı ile birlikte ağırlık iç etkenlerin başında gelir. Uçuş irtifasındaki havanın yoğunluğu ve herhangi bir rüzgar ya da platformun dikey ya da yatayda yaptığı hareketten kaynaklanan hava sürtünmeleri dış etkenler arasında sayılabilir. Platformun kontrolü, veri işleme ve haberleşme işlerinin yürütüldüğü elektronik devre kısmında tipik olarak 10 Watt civarında güç tüketimi gözlenmektedir. Ancak, bir önceki bölümde de gösterildiği gibi UxNB'yi havada istenilen pozisyonda tutmak için harcanan güç ise binlerce Watt'ı bulmaktadır. Bundan dolayı, haberleşme için tüketilen gücün yanında havada asılı kalmak için harcanan gücün ele alınması kaçınılmazdır.

Döner kanatlı bir İHA'nın havada asılı kalması için gereken güç, *yüksekliğin ve toplam ağırlığın* bir fonksiyonu olarak

$$P_{asılı} = P_0 (1 + \mu) \exp \left\{ \frac{u_0 [h_D + h_{şehir}]}{2} \right\} \quad (3.5)$$

şeklinde elde edilir. Burada

$$P_0 = \frac{W_{top}^{3/2}}{\sqrt{2\rho_0 N A}}, \quad (3.6)$$

$$\mu = \frac{1}{8} \frac{C_{D0} c_b}{J^3 \pi R} \quad (3.7)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu eşitliklerde, W_{top} , insansız hava aracının üzerindeki haberleşme ekipmanı, bataryalar ve aracın kendi ağırlığı dahil toplam ağırlığını, N , rotor sa-

yısını ve A bir pervanenin taradığı alanı belirtmektedir. Bununla birlikte, C_{D0} , pervanelerin sürüklenme katsayısıdır, c_b , kanat genişliğidir ve R , pervanenin yarıçapını belirtmektedir. Ayrıca, J , pervane ilerleme oranını ifade etmektedir. Burada $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ şeklindedir ve ortalama deniz seviyesindeki hava yoğunluğunu belirtmektedir. Ayrıca $u_0 = 9.7 \times 10^{-5}$ olarak verilen bir sabittir.

Bu denklemlerde, P_0 'ın ortalama deniz seviyesindeki güç tüketimi olduğuna ve bunun yükseklik ile üssel biçimde arttığına dikkat etmek gerekir. Bir sonraki kısımda, bu formül, UxNB konuşlandırma probleminin kurulumunda kullanılacaktır.

3.3 Enerji Verimli UxNB Konuşlandırma Problemi

Bir UxNB'de gücün büyük çoğunluğu motorları sürmek için kullanılmaktadır ve fiziksel kısıtlardan dolayı, her motor sürücüsü, bir motora belirli miktarda güç sağlayabilir. Bu matematiksel olarak $P_{\text{asılı}} \leq P_{\text{max}}$ biçiminde gösterilebilir. Buna benzer olarak, platform üzerindeki haberleşme biriminin de anlık toplam iletim gücü $P_t \leq P_{t,\text{max}}$ şeklinde sınırlıdır. Bu sınır, çıkış güç yükselticisinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, P_t kullanıcılar arasında $P_t = \sum t_k P_k$ olacak şekilde dağıtılır. Eğer işlemci ve kontrol birimlerindeki harcanan güç P_c , sabit kabul edilirse, bir başka kısıt olarak bataryalardan çekilebilecek toplam güç

$$P_{\text{toplam}} = P_{\text{asılı}} + P_{t,\text{max}} + P_c \leq P_{\text{batarya}} \quad (3.8)$$

şeklinde ortaya çıkmaktadır. Eşitlik 3.5'e göre, İHA havada asılı kalmak için en az $P_0(1 + \mu)$ kadarlık bir güç harcamalıdır. Bu da deniz seviyesine çok yakın olduğu yani $h \approx 0$ durumu için geçerlidir. Her bir alt birimin kendi güç kısıtını ve platform tarafından harcanan gücün P_{batarya} değerini aşamayacağına dikkat edilmelidir. Bu noktada, kullanıcıların servis kalitesini gözeterek hizmet verilen kullanıcı sayısını enbüyüten enerji verimli UxNB

konuşlandırma problemi

$$\begin{array}{l} \text{enbüyüt} \\ t, h_D, x_D, y_D \end{array} \quad \sum_{k=1}^K t_k \quad (3.9)$$

kısıtlar

$$P_0 (1 + \mu) e^{\frac{u_0 h}{2}} \leq P_{\text{batarya}} - P_{t, \max} - P_c = P_{\max}, \quad (3.9a)$$

$$\sum_{k=1}^K t_k P_k \leq P_{t, \max}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.9b)$$

$$\bar{\gamma}_k \geq \gamma_{\min}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (3.9c)$$

$$t_k \in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.9d)$$

$$x_{\min} \leq x_D \leq x_{\max}, \quad (3.9e)$$

$$y_{\min} \leq y_D \leq y_{\max} \quad (3.9f)$$

şeklinde yazılır. Burada x_D ve y_D , UxNB'nin üç boyutlu konumunun zemine izdüşümü yapıldığında elde edilen 2 boyutlu koordinatlarını belirtmektedir, h_D , UxNB'nin bulunduğu şehir üzerindeki yüksekliğini, h ise deniz seviyesinden yüksekliği ifade eder. Bunun yanında, x_{\max} , y_{\max} , x_{\min} ve y_{\min} ilgilenilen alanın sınırlarını belirtmektedir. Problem 3.9'da ilk iki kısıt havada asılı kalma gücü ve haberleşme gücü üzerindeki sınırlandırmaları vermektedir ve üçüncü kısıt hizmet verilen kullanıcıların QoS gereksinimlerini belirtmektedir. Bir kullanıcının hizmet alıp almadığını belirlemek için ise ikili değişken olan t_k kullanılmıştır. Eğer k kullanıcısı hizmet alıyorsa, t_k bire eşittir. Aksi takdirde sıfırdır.

Haberleşme senaryosu basitleştirmek adına hizmet alan kullanıcılara β/K kadarlık bir bantgenişliğinde $P_{t, \max}/K$ kadar güç tahsis edildiği varsayılmaktadır. Bu varsayımın birlikte, Eşitlik 3.9c'deki kısıt

$$h_D^2 + r_k^2 \leq 10^{\frac{(\bar{\gamma} - AP(h_D, r_k) - B)}{10}} \quad (3.10)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. Burada

$$\bar{\gamma} = 10 \log \left(\frac{P_{t, \max}}{\beta N_0 \gamma_{\min}} \right) \quad (3.11)$$

ile verilmektedir. Bu noktada, [23] no.lu kaynaktaki yaklaşımı kullanarak, kapsanan ala-

nın yarıçapının R_c olduğu varsayalım. Yani $R_c \geq r_k, \forall k \in \mathcal{K}$. Böylece, bu ifade büyük M yöntemi kullanılarak yeni bir kısıt olarak probleme

$$R_c \geq r_k - M_1(1 - t_k) \quad (3.12)$$

şeklinde eklenebilir [23]. Burada, M_1 , enbüyük olası kapsama alanı değerinden biraz daha büyük değer alması gereken bir sabittir. Eşitlik 3.12'ye göre, eğer k 'inci kullanıcı hizmet alırsa, yani $t_k = 1$, $R_c \geq r_k$ koşulu sağlanmaktadır. Başka bir deyişle, kullanıcı kapsama alanının içindedir. Eğer kullanıcı hizmet almıyorsa, yani $t_k = 0$ ise, R_c , r_k 'den daha küçük bir değer alır. Böylece, k 'inci kullanıcı için bu kısıt gevşetilmiş olur. Dolayısıyla, R_c değeri diğer kullanıcılar ve M_1 değeri ile belirlenir.

UxNB'nin üzerindeki antenin hüzmegenişliği 2θ olduğu ve bunun sabit olduğu düşünüldüğünde, UxNB'nin kapsama alanının yarıçapı R_c ile bulunduğu yükseklik h_D arasında direkt olarak ilişki kurmak mümkündür. Bu da

$$\sigma = \tan \theta = \frac{R_c}{h_D} \quad (3.13)$$

şeklinde yazılır. Bu ilişkiyi kullanarak ve Eşitlik 3.10'un sadece $t_k = 1$ koşulunu sağlayan kullanıcılar için geçerli olduğunu göz önünde bulundurarak Eşitlik 3.10,

$$R_c^2 \leq \Sigma(\sigma) + M_2(1 - t_k) \quad (3.14)$$

şeklinde düzenlenebilir. Burada

$$\Sigma(\sigma) = \frac{10^{\frac{(\bar{\gamma} - AP(\sigma) - B)}{10}}}{1 + \frac{1}{\sigma^2}} \quad (3.15)$$

ile verilir. Eşitlik 3.14'teki M_2 değeri, ağdaki kullanıcıların durumunu belirlemek için kullanılır ve bu değer seçimi, Eşitlik 3.12'deki M_1 'in seçimi gibi yapılır. Yukarıdaki

Çizelge 3.1. Benzetimlerde kullanılan İHA'nın teknik ve fiziksel özellikleri

Teknik veya Fiziksel Özellik	Değer
Kanat çapı, $2R$	558.8×10^{-3} m
Kanat genişliği, c_b	167.6×10^{-3} m
Pala, Rotor ve Batarya Sayısı	2, 4, 4
Sürüklenme Katsayısı, C_{D0}	1.57×10^{-3}
Aracın Ağırlığı, W_v	10 kg
Batarya Ağırlığı, W_b	2 kg

tartışmanın sonucunda, Problem 3.9 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$\text{enbüyüt}_{t, R_c, x_D, y_D} \sum_{k=1}^K t_k \quad (3.16)$$

kısıtlar

$$R_c \leq \frac{2 \tan \theta}{u_0} \log \left(\frac{P_{\max}}{P_0 (1 + \mu)} \right) - h_{\text{şehir}}, \quad (3.16a)$$

$$R_c \geq r_k - M_1(1 - t_k), \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.16b)$$

$$R_c^2 \leq \Sigma(\sigma) + M_2(1 - t_k), \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.16c)$$

$$t_k \in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.16d)$$

$$x_{\min} \leq x_D \leq x_{\max}, \quad (3.16e)$$

$$y_{\min} \leq y_D \leq y_{\max}. \quad (3.16f)$$

Böylece, Problem 3.16, Karışık Tamsayı Doğrusal olmayan Programlama (Mixed Integer Non-Linear Programming, MINLP) olarak formüle edilmiş olur. Bir sonraki kısımda, bu problemin çözümüne bireysel QoS gereksiniminin ve asılı kalma gücünün etkisini gösterebilmek için benzetim sonuçları MOSEK çözücüsü kullanılarak elde edilecektir.

3.4 Sayısal Bulgular

Bu kısımda, Problem 3.16, çeşitli başarımlar bakımından incelenecektir. Tipik bir İHA'nın teknik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ayrıca, benzetimde kullanılan değişkenler Çizelge 3.2'de bulunabilir. Benzetimlerde, hizmet verilen alanda bulunan kullanıcılar tezdüze dağılım ile alana dağıtılmaktadır.

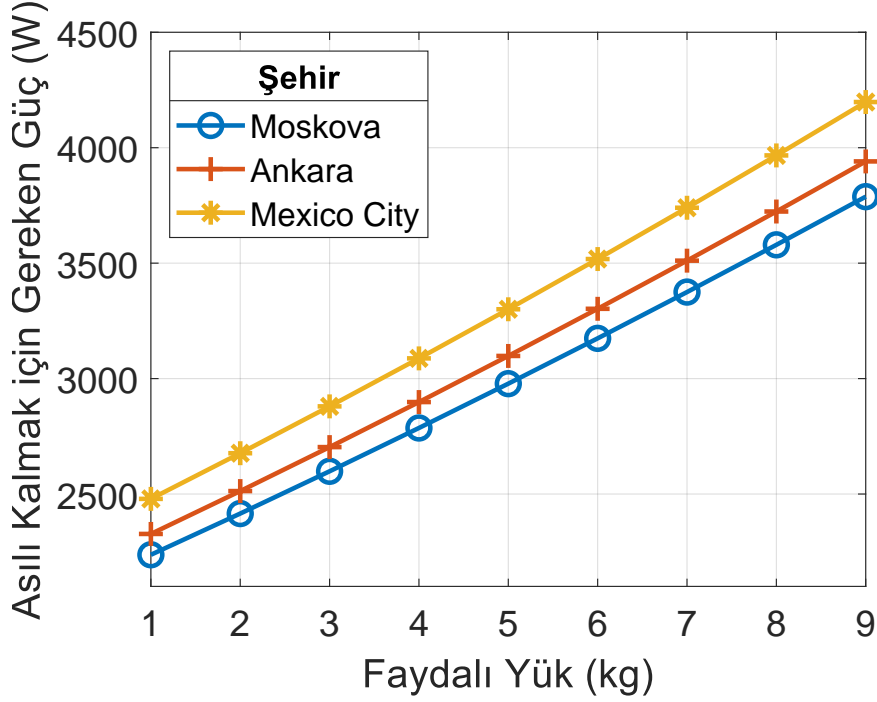
İlk olarak, rakımları farklı üç başkent (Moskova(124 m), Ankara (938 m) ve Mexico City

Çizelge 3.2. Benzetim parametreleri

Parametre	Değeri
$(\zeta, \delta, \mu_{\text{LoS}}, \mu_{\text{NLoS}})$	(12.08, 0.11, 1.6, 23)
Taşıyıcı frekansı, f_c	2.5 GHz
Bantgenişliği, β	20 MHz
Kullanıcı sayısı	50
Hüzme genişliği, 2θ	120
Faydalı yük ağırlığı, W_P	8 kg
Gerçekleştirme sayısı	100
Gürültü güç izgesel yoğunluğu (PSD)	-174 dBm

(2240 m)) için zeminden 120 m yukarıda asılı kalabilmek için gerekli gücün grafiği faydalı yükün bir fonksiyonu olarak Şekil 3.2’de verilmiştir. Burada faydalı yükün ve rakımın güç tüketiminde baş rol oynadığı kolaylıkla gözlenebilir. Sabit ağırlığı olan bir UxNB için, bulunduğu coğrafi alanın rakımıyla asılı kalmak için gerekli güç artmaktadır. Örneğin, Mexico City’de bulunan bir UxNB, Ankara’da ve Moskova’da aynı yükseklikte bulunan bir UxNB’ye göre sırasıyla, yaklaşık yüzde 6 ve 9 daha fazla güç tüketmek durumundadır. Bu fark küçük görünmesine karşın, Şekil 3.2’ye göre, haberleşme biriminin tükettiğinden yüzlerce Watt daha fazla bir değere ulaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 3.2’den, aynı miktarda faydalı yük için, deniz seviyesinden daha yüksekte çalışan bir UxNB’nin daha alçakta çalışana göre daha kısa süre çalışacağını çıkarmak mümkündür. Bu sebeplerle, bir şehire kurulacak UxNB ağı için ağ tasarımı, UxNB’nin sayısı ve yükseklikleri de dahil edilerek daha uzun uçuş süreleri için mutlaka şehrin rakımı göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

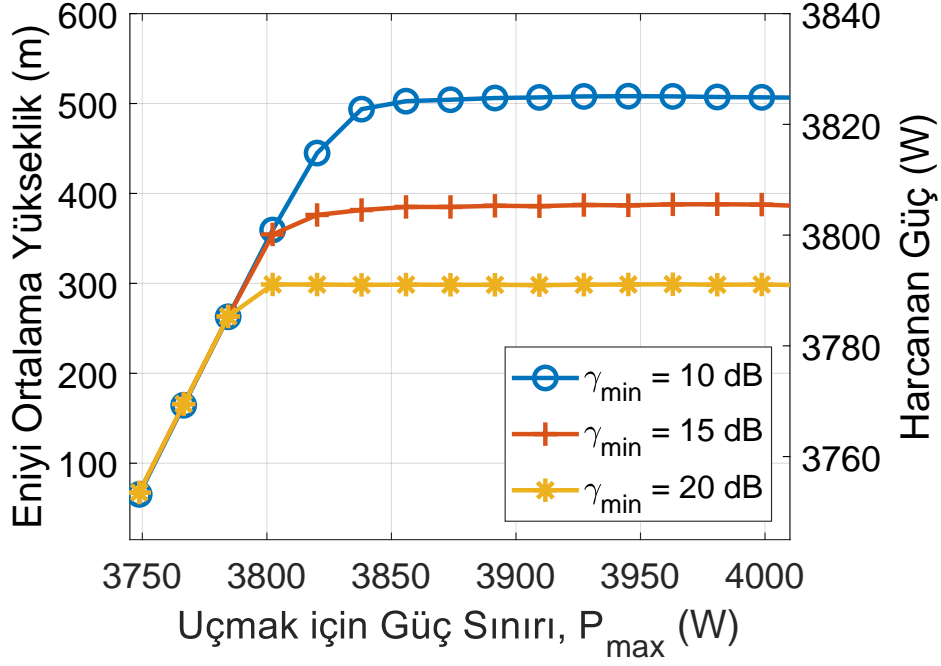
Şekil 3.3’te, Ankara (938 m) üzerinde uçan bir platform için gereken güç miktarı incelenmiştir. Soldaki dik eksen, Problem 3.16’nın çözümü sonucunda bulunan eniyi yüksekliği vermektedir. Sağdaki dik eksen, aynı yükseklikteki havada asılı kalmak için gerekli güç miktarını vermektedir. Yatay eksen ise platforma harcaması için izin verilen maksimum güç miktarını göstermektedir. Burada, ağdaki tüm kullanıcılar için en az $\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB SNR seviyesinin sağlanacağı garanti edilmiştir. Elli kullanıcı, 1 km \times 1 km’lik bir coğrafi alana iki boyutta birbiciimli dağılım ile dağıtılmıştır. Sonuçlar ise, 100 birbirinden bağımsız gerçekleştirmenin ortalaması alınarak sunulmuştur. Şekil 3.3’ten, $\gamma_{min} = 20$ dB için asılı kalma güç kısıtının $h = 300$ m’ye kadar sonucu domine ettiği ve UxNB’nin daha fazla güç tüketmesine izin verildikçe daha yükseğe çıktığı gözlenebilir. Bu noktadan



Şekil 3.2. Moskova (124 m), Ankara (938 m) ve Mexico City (2240 m) üzerinde 120 m irtifada faydalı yük ağırlığına karşılık havada asılı kalmak için gereken güç eğrileri.

sonra ise, asılı kalma güç kısıtı problemdeki etkisini yitirmektedir ve eniyi yükseklik 300 m olarak, bu yükseklikte uçmaya harcanan güç 3790 W olacak şekilde ortaya çıkmaktadır. Benzer gözlemler diğer γ_{min} değerleri için de yapılabilir. QoS kısıtını $\gamma_{min} = 10$ dB'ye düşürmek daha yüksekte bir uçuşa neden olmaktadır. Bu da $h = 500$ m olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda, kapsama alanı daha fazla genişlemiş ve sonuç olarak daha çok kullanıcıya hizmet verme şansı doğmuştur. Ancak, platformun bu yükseklikte uçabilmesi için 40 W daha fazla güce ihtiyacı olduğu gözlemlenmektedir.

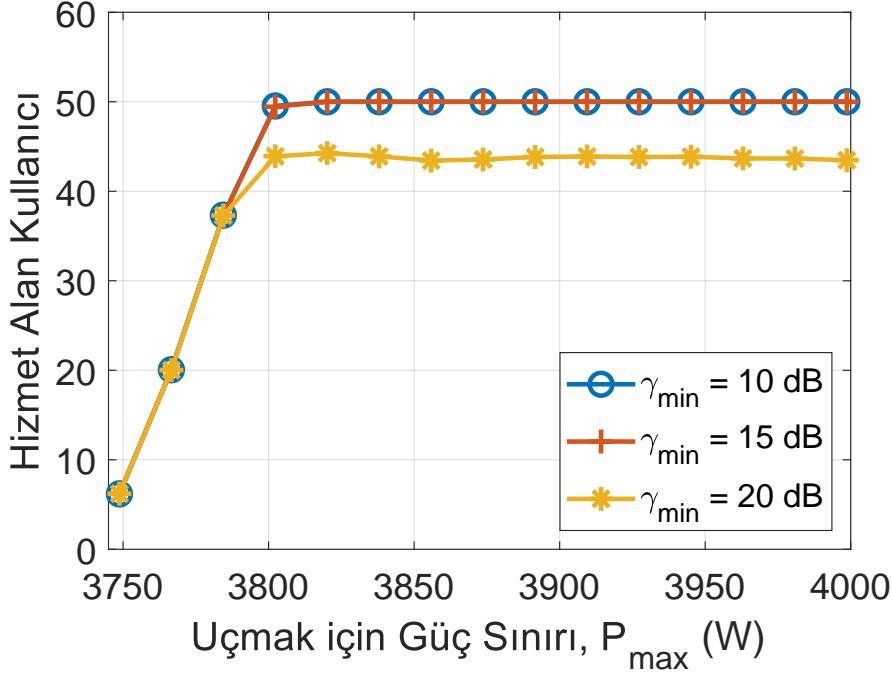
Şekil 3.4'te, asılı kalma gücü üzerindeki sınırlamanın hizmet alabilecek kullanıcı sayısına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.3'teki koşullarla aynı olmak üzere, çeşitli QoS gereksinimleri için, havada asılı kalmak için harcanmasına izin verilen güce karşılık hizmet verilen ortalama kullanıcı sayısı gösterilmektedir. Yukarıda tartışıldığı gibi, asılı kalmak için izin verilen enbüyük güç U_{xNB} 'nin yüksekliğini direkt olarak etkilemektedir. Sonuç olarak, kapsama alanı yani hizmet verilen kullanıcı sayısı da sınırlanmaktadır. Böylece, Şekil 3.4'ten de görüleceği gibi, γ_{min} 'den bağımsız olarak, hizmet verilen kullanıcı sayısı P_{max} ile $P_{max} = 3785$ W oluncaya kadar artmaktadır. Bu noktadan sonra, $\gamma_{min} = 20$ dB için hizmet verilen ortalama kullanıcı sayısı neredeyse 43 kullanıcıda sabitlenmektedir.



Şekil 3.3. $\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için P_{max} , uçma güç sınırına karşılık eniyi yükseklik eğrileri.

Ayrıca γ_{min} değerinin 15 dB'den 10 dB'ye düşmesi ile $\gamma_{min} = 10$ dB için UxNB'nin daha yukarıda konuşlanmasına rağmen kullanıcı sayısının artmaması da dikkat çekmektedir. Bunun nedeni ise ağdaki kullanıcı yoğunluğunun 50 kullanıcı/km² olmasıdır. Başka bir deyişle, UxNB, $\gamma_{min} = 15$ dB durumunda olduğu gibi daha düşük yüksekliklerde çalışsa bile ağdaki tüm kullanıcıların hizmet görebiliyor olmasıdır. Bu senaryoda, güç tüketim eğrilerine bakıldığında, kullanıcıların enküçük ortalama SNR'ını 10 dB yapmaya çalışmanın, 10 dB durumunun 15 dB durumundan daha kısa süreli uçuş süresi yaratacağı da ele alındığında gücü verimsiz kullanan bir yöntem olduğu açıkça ortadadır.

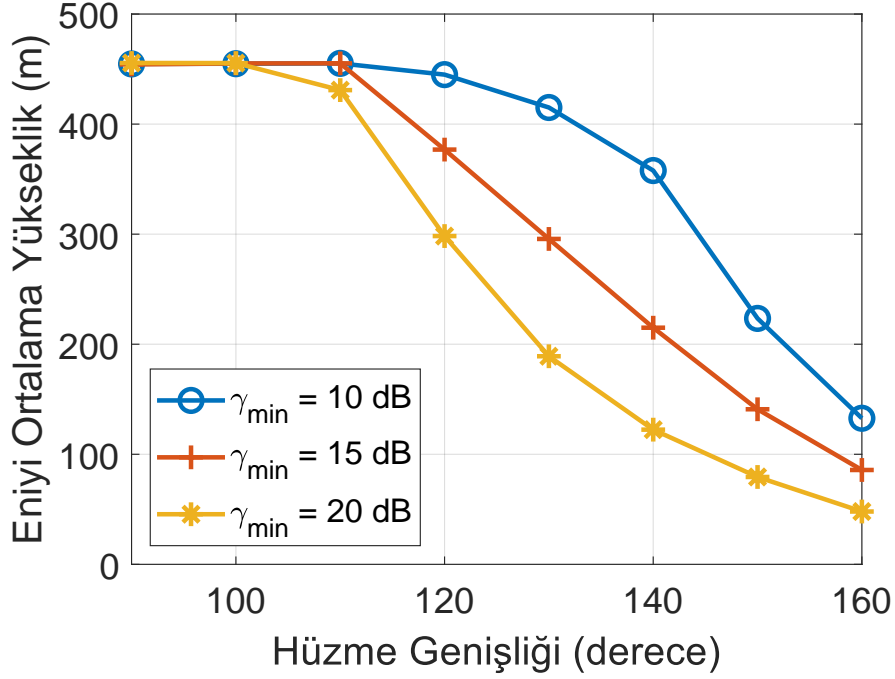
Şekil 3.5'te Ankara üzerinde uçan bir UxNB için üzerindeki antenin farklı hüzmeli genişliklerine göre UxNB'nin konuşlandığı ortalama eniyi yükseklik gösterilmektedir. Hüzmeli genişliği, Eşitlik 3.13 kullanılarak bulunabilir. Bu eşitlik incelendiğinde, hüzmeli genişliği ne kadar artar ise aynı miktarda alanı kapsamak için doğal olarak UxNB'nin yükselişinin azalması gerekir. Bu durumda, Şekil 3.5'te de net biçimde görülmektedir. Ancak bu şekilde, farklı QoS kısıtları için farklı eğrilerin elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni ise, hüzmeli genişliğinin aynı zamanda kullanıcılara gelen sinyalin LoS olasılığı ile olan ilgisidir. Örneğin, $\theta_1 < \theta_2$ olsun. Hüzmeli genişliği θ_1 olan antene sahip bir UxNB'nin kapsadığı alanın yarıçapı R_1 olsun. Aynı yarıçaptaki alanı kapsamak için hüzmeli genişliği



Şekil 3.4. $\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için P_{max} asılı kalma güç sınırına karşılık ortalama hizmet verilen kullanıcı sayısı eğrileri.

θ_2 olan bir UxNB, $h_2 = R_1 / \tan \theta_2$ yüksekliğine konuşlandırılırsa bu yükseklikteki sinyal kalitesi istenen seviyede olmayabilir. Bu durumu daha iyi kavrayabilmek için, Eşitlik 3.1'de bahsedilen LoS olasılığı incelenebilir. Bağlantı yükseliş açısı, hücre sınırındaki, yani UxNB ile R_c kadar mesafede olan kullanıcı için $90^\circ - \theta$ açısı değerine eşit olur. Buna göre, hüzmeye genişliği ne kadar artarsa yükseliş açısı o kadar azalacak ve LoS olasılığı da buna uygun olarak düşecektir. Dolayısıyla, θ_2 hüzmeye genişliğine sahip bir UxNB'nin QoS kısıtını karşılayacak şekilde h_2 yükselişinden daha alçağa konuşlanması gerekir. Bu durum Şekil 3.5'te net biçimde görülmektedir.

Şekil 3.6'da Ankara üzerinde uçan bir UxNB için üzerindeki antenin farklı hüzmeye genişliklerine göre UxNB'nin hizmet verebildiği kullanıcı sayısı eğrileri farklı QoS gereksinimlerine göre gösterilmektedir. Hüzmeye genişliği dar olan antene sahip bir UxNB yerde bulunan kullanıcıların hepsine hizmet verememektedir. Bunun yanında, kullanıcılara garanti edilen en küçük SNR 10 dB olduğunda, UxNB'nin anteni 110° ve daha geniş ise tüm kullanıcıların hizmet alabildikleri görülmektedir. Ancak, en küçük SNR, $\gamma_{min} = 20$ dB olduğunda, en iyi performans hüzmeye genişliği 110° olan anten ile elde edilmektedir. Hüzmeye genişliği arttıkça sistemin başarımının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, üstteki LoS olasılığı tartışmasına dayanmaktadır. Hüzmeye genişliğinin belirli bir derecenin

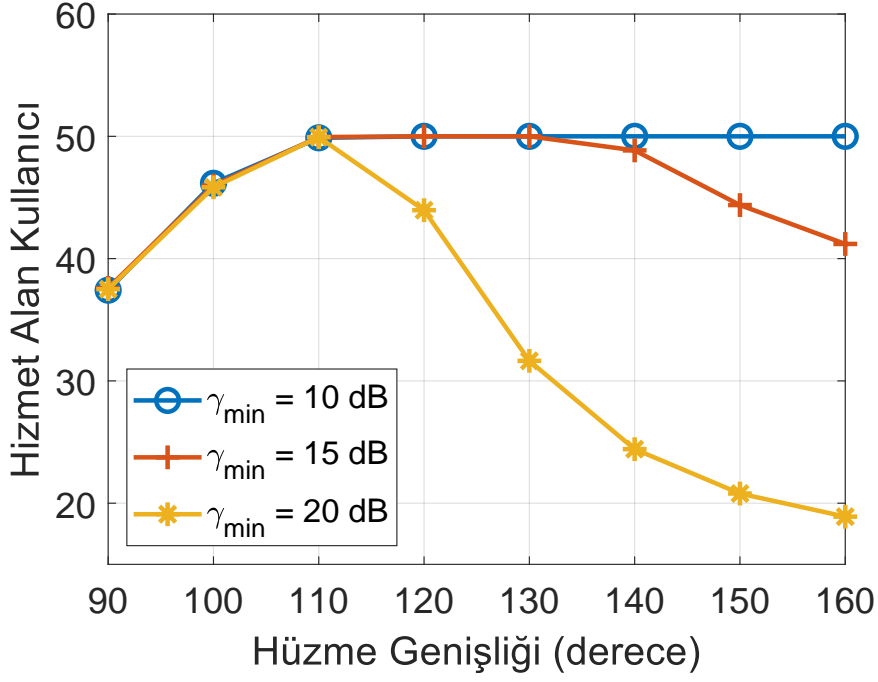


Şekil 3.5. $\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için UxNB antenin hüzme genişliğine karşılık eniyi ortalama yükseklik eğrileri.

üzerine çıkması yerdeki hücre kenarı kullanıcılarının LoS olasılığını azaltmaktadır. Bu durum da sinyal kalitesini düşürmektedir. Sonuç olarak, UxNB, 20 dB QoS gereksinimini karşılayabilmek için daha alçağa konuşlanmaktadır ve hizmet verdiği kullanıcı sayısı da azalmaktadır. Buna göre, benzer etki, $\gamma_{min} = 10$ dB durumu için de gözlemlenmektedir. UxNB üzerinde bulunan antenin hüzme genişliği 130° 'den yüksek olması durumunda, garanti edilen en küçük SNR 10 dB değerindeyken 20 dB durumundaki kadar olmasa da sistemin başarımı düşmektedir. UxNB'lerin üzerindeki antenin hüzme genişliğinin daha yüksek olmayacağı beklendiğinden diğer açı değerleri için sonuçlar elde edilmemiştir.

3.5 Bölüm Özeti

Tezin bu bölümünde, döner kanatlı bir UxNB'nin enerji verimli konuşlandırılma problemi incelenmiştir. Bu problemde, verilen bir coğrafi alanda uçuş dinamikleri ve QoS kısıtları altında hizmet verilen kullanıcı sayısının enbüyütmesi yapılmıştır. Öncelikle, bir UxNB tarafından havada asılı kalmak için harcanan güç ağırlığın ve uçuş yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak formüle edilmiştir. Sonrasında, enerji verimli UxNB konuşlandırılma problemi MINLP problemi olarak formüle edilmiştir. Benzetim sonuçlarında, üç farklı başkent -Moskova, Ankara ve Mexico City- için rakımın ve ağırlığın güç tüketimine et-



Şekil 3.6. $\gamma_{min} = 10, 15, 20$ dB, QoS gereksinimleri için UxNB anteninin hüzme genişliğine karşılık ortalama hizmet verilen kullanıcı sayısı eğrileri.

kisi grafiklerle sunulmuştur. Elektronik devrenin ve haberleşme ekipmanlarının tükettiği gücün yanında, havada asılı kalma gücünün aracın toplam güç tüketimini domine ettiği gösterilmiştir. Döner kanatlı bataryalı bir UxNB'nin Ankara'da bulunan bir bölgede, kullanıcılara hizmet verdiği düşünülen bir haberleşme senaryosunda, asılı kalma gücü, anten hüzme genişliği ve QoS gereksinimi kısıtlarının ağ başarımına etkisi incelenmiştir.

4. BİR DOĞAL AFETTE KAPSAMA YOĞUNLUĞU VE AĞ SÜREKLİLİĞİ SORUNLARI

4.1 Problem Arka Planı ve Literatür Özeti

Deprem, sel, yangın gibi doğal afetlerde genellikle afetin yaşanmasının ardından haberleşme şebekeleri kullanılamaz hale gelir [27–30]. Bu durum, iki nedenden dolayı ortaya çıkar. Bunlardan ilki, afet bölgesindeki tanıdıklarına ulaşmak isteyen ve afet bölgesinde bulunmayan kişilerin aramaları sebebiyle şebekenin kullanıcı trafiğini kaldıramamasıdır. Diğeri ise, bu bölgede mevcut olan baz istasyonlarının hasar almış olmasıdır [28]. Her iki durumda da ana sorun, şebekenin o bölge için yetersiz olmasıdır. Ülkemiz de 2020 yılında birden fazla doğal afet yaşamıştır. Elazığ, Van ve İzmir depremleri, Trabzon'daki sel felaketi bunlardan bazılarıdır. Bu afetlerden özellikle depremler sonrasında, yukarıda bahsedilen şebeke problemleri baş göstermiştir ve afet bölgesine afetin hemen ardından hizmet verilememiştir [124]. Bu gibi acil durumlarda, şebekenin yükünü azaltmak ya da zarar görmüş baz istasyonlarının yerine kullanmak için Havasal Erişim Noktası (UxNB) ağı kurulabilir ve bu bölgeye hizmet sağlanabilir. İnsansız hava araçlarının (İHA) uçan baz istasyonu olarak kullanılması, maliyet verimli kurulması, yüksek hareketlilikleri ve yersel baz istasyonlarından farklı kanal karakteristiğine sahip olmaları nedeniyle, bir afet anındaki şebeke sorunlarını çözmek adına gelecek vaadeden bir yöntem olduğu açıktır [4, 29, 30]. Elbette, UxNB'lerin afet bölgesi dışında, 5G ve ötesi ağ mimarisinde yersel baz istasyonlarının yaşadığı kör noktalar, ani veri hızı düşüşleri gibi problemlerin de üstesinden gelmesi beklenmektedir [11]. Dolayısıyla, kullanım alanlarının oldukça geniş olacağı gerçektir [11, 23, 91, 92].

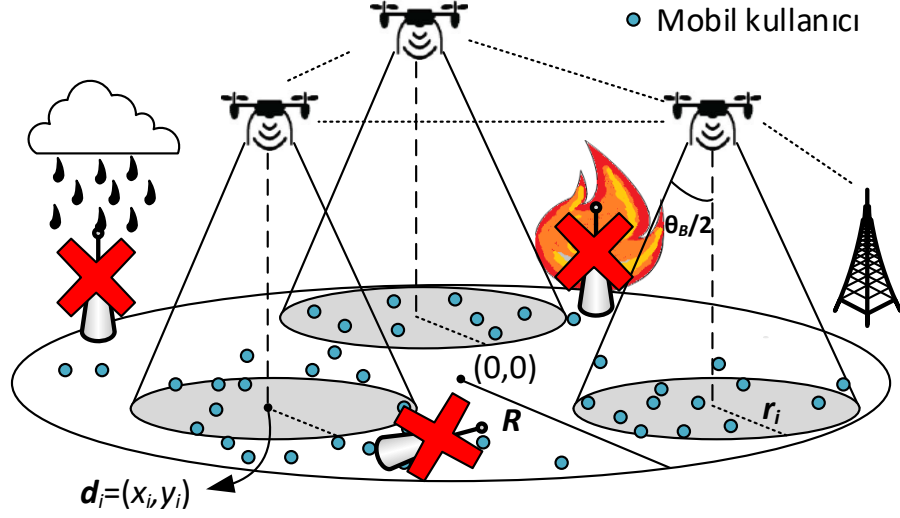
İHA kullanımının haberleşme ağlarında birçok avantajının yanında, çözüm bekleyen bir o kadar da sorun vardır. Özellikle bir afet anında, mümkün olan en fazla alanı en uzun sürede kapsamak bu sorunların en başındadır. Dolayısıyla, düşük uçuş süreleri, ağdaki güç tüketimi ve girişim yönetimi daha iyi ağ başarımı elde etmek için üzerinde durulması gereken konulardır. Literatürde, bu sorunları kendi başına ele alan birçok çalışma olmasına rağmen, sınırlı sayıda çalışma, bu sorunların ortak eniyilemesini ele almaktadır. Örneğin, [23] no.lu kaynakta, kapsama başarımını enbüyütmeye çalışan 3 boyutlu konuşlandırma problemi ele alınmıştır. Bu çalışmada, problem uçuş süresi ele alınmadan karesel kısıtlı karışık tamsayı doğrusal olmayan problem olarak formüle edilmiştir ve eniyi olma-

yan ancak hesaplama anlamında hızlı çözüm veren bir yöntem önerilmiştir. Mozaffari ve diğ. çoklu İHA konuşlandırma problemini endüyük iletim güçleri ile enbüyük kapsama alanını elde etmek olarak tasarlamışlardır [33]. Problemlerini hücrelerarası girişimi yok edecek şekilde kurmuşlar ve UxNB'lerin 3B konuşlandırmasını daire paketleme teorisinden faydalanarak belirlemişlerdir.

UxNB'nin uçuş süresini belirleyen ise uçmak için harcadıkları güçtür. Dolayısıyla, bir afet alanında kurulacak olan UxNB ağının mümkün olan en uzun sürede hizmet vermesi gerekmektedir. Literatürde ise çoğunlukla uçuş süreleri UxNB'nin haberleşme için harcadığı güç göz önüne alınarak bulunmuştur [33, 125]. Maliyeti enküçültecek ve tüm hedeflerin izsürümünü garanti edecek şekilde konuşlandırılması [125] no.lu kaynakta ele alınmıştır. Zorba ve diğ. tamsayı doğrusal ve karışık tamsayı doğrusal olmayan eniyileme modeli olarak tanımladıkları iki farklı problemi, merkezi ve dağıtık iki sezgisel algoritma ile çözmüşlerdir. Üstte de belirtildiği gibi Mozaffari ve diğ., çalışmalarında uçuş dinamiklerini göz ardı etmişlerdir [33]. Bunun yanında, literatürde, İHA kontrolü ile ilgili makalelerde, güç tüketimi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [87–89, 94].

Bu bölümün literatüre sağladığı ana katkı, bir havasal ağın sürekliliği ve kapsama alanını ortaklaşa enbüyüten 3 boyutlu çoklu UxNB'nin konuşlandırmasının incelenmiş olmasıdır. İlgili literatürün aksine, dron platformun uçuş dinamikleri de eniyileme problemine dahil edilmiştir. Bu bölümde, herhangi bir şehirdeki bir afet alanında ve ağdaki belirli sayıdaki UxNB için eniyi üç boyutlu konuşlandırma çevçevesi geliştirilmiştir. Öncelikle, gerçekçi bir UxNB güç tüketim modeli sunulmuş daha sonra da uçuş süresi kısıtlarını aşmadan enyüksek kapsama alanını sağlayan bir haberleşme problemi formüle edilmiştir. Böyle bir senaryoda, platformun güç tüketimi, ortalama deniz seviyesi üzerinde ölçülen irtifaya göre üssel olarak arttığından, şehir rakımının 3B konuşlandırma probleminde en önemli faktör olduğu sonuçlarda gözlemlenmektedir. Buna ek olarak, kapsama ve uçuş süresi kavramları çalışma yüksekliğine ters orantılı olarak bağlı olduklarından bu parametreler arasında bir ödünleşim olduğu gösterilmektedir.

Bu bölümün geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. Kısım 4.2'de Kısım 2.2'de bahsi geçen İHA güç tüketim modelinin kısa bir özeti verilmektedir ve ağ sürekliliğini enbüyütmek için UxNB'lerin bulunması gereken yükseklik belirlenmektedir. Kısım 4.3 önerilen



Şekil 4.1. Bir afet senaryosu için çoklu İHA haberleşme ağı

konuşlandırma yöntemini açıklamaktadır. Kısım 4.4'te sayısal bulgular sunulmaktadır ve son olarak, Kısım 4.5, bu bölümü sonlandırmaktadır.

4.2 Sistem Modeli

Afet bölgesinde hizmet verilmek istenen alanın yarıçapı R ve merkez koordinatları orijinde olan bir daire olduğu varsayılmaktadır. Böyle bir bölgede, birden fazla UxNB'den oluşan haberleşme ağı Şekil 4.1'de gösterilmektedir. UxNB'ler, üzerlerinde bulunan yanal tümyönlü antenler sayesinde birbirleri ile veri transferi yapabildikleri ve artağ bağlantısının ana şebeke ile mükemmel biçimde sağlandığı varsayılmaktadır. Her UxNB platformunun pervane şekli, rotor sayısı, batarya kapasitesi ve taşıdığı anten tipi gibi fiziksel özellikleri birbiri ile aynıdır. Haberleşme ağındaki her UxNB'nin üzerinde bulunan kullanıcılara veri iletimi sağlayan anten, aşağı yönlü ışına yapmaktadır ve bu ışımının hüzmeye genişliği θ_B (derece) olarak belirlenmiştir ve sabittir. Ayrıca anten kazancı $G(\phi)$,

$$G(\phi) \approx \begin{cases} G_0/\theta_B^2 & , -\theta_B/2 \leq \phi \leq \theta_B/2 \\ 0 & , \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

olarak tanımlanmaktadır [126]. Burada ϕ , yerdeki bir nokta ile platform arasında oluşan haberleşme hattının geliş açısıdır ve $G_0 \simeq 30000$ olarak tanımlanır. Böylece, bir UxNB'nin kapsama alanının zemindeki izdüşümü bir daire ile belirlenir ve bu dairenin yarıçapı platformun yerden yüksekliği h_i ile değişmektedir. UxNB'lerin üzerindeki anten-

lerin hüzme genişlikleri değişken olmadığından, bu yükseklik ile kapsama alanı yarıçapı arasında $r_i = h_i \tan\left(\frac{\theta_B}{2}\right)$ şeklinde bir ilişki bulunmaktadır.

4.2.1 UxNB Güç Tüketim Modeli

Kısım 3.2’de anlatıldığı gibi UxNB platformunun güç tüketimi birçok içsel ve dışsal etki-lerle değişmektedir. Aracın şasisi, motorları, elektronik devresi ve faydalı yük gibi ağırlık oluşturan birimler içsel faktörleri oluştururken, rüzgar, türbülans ve uçuş irtifasındaki hava yoğunluğu gibi hava koşulları da dışsal etmenler arasında gruplandırılabilir. Bunların içinde hava yoğunluğu, güç tüketimini etkileyen önemli faktörlerden biridir ve Uluslararası Standart Atmosfer hava yoğunluğunu

$$\rho = -101.29 \frac{(1.0002 - 2.2528 \times 10^{-5}h)^{5.256}}{1.8620 \times 10^{-3}h - 82.667} \quad (4.1)$$

şeklinde tanımlamaktadır. Burada, h , ortalama deniz seviyesinin üzerindeki irtifayı belirtmektedir. UxNB’ler için makul yükseklikler olan 6000 m’den alçak irtifalar için Eşitlik 4.1,

$$\rho = \rho_0 \exp(-u_0 h) \quad (4.2)$$

şeklinde bir dışbükey fonksiyona yaklaşılaştırılabilir [116]. Burada, ρ_0 , ortalama deniz seviyesindeki ortalama hava yoğunluğunu belirtir ve $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ şeklindedir. Ayrıca $u_0 = 9.7 \times 10^{-5}$ ile belirlenen bir sabittir. Sonuç olarak, Eşitlik 4.2, deniz seviyesinden yükseldikçe havanın incelendiğini göstermektedir.

Bölüm 2’de bahsedildiği gibi, havada sabit kalmak için harcanması gereken güç, N tane rotora sahip ve her rotorundaki pervanenin dönüş alanı A olan döner kanatlı bir İHA için *yüksekliğin ve toplam ağırlığın* bir fonksiyonu olarak

$$P_{\text{asılı}} = P_0 (1 + \mu) e^{\frac{u_0 h}{2}} \quad (4.3)$$

şeklinde tanımlanmıştır [40]. Burada,

$$P_0 = \frac{W_{top}^{3/2}}{\sqrt{2\rho_0 N A}}, \quad (4.4)$$

$$\mu = \frac{1}{8} \frac{C_{D0} c}{J^3 \pi R} \quad (4.5)$$

ile ifade edilir. Bu eşitliklerde ise, W_{top} , UxNB'nin toplam ağırlığını, C_{D0} , pervanelerin sürüklenme katsayısını, c_b , kanat genişliğini, R ise yarıçapını belirtmektedir. Ayrıca, J , pervanenin ilerleme oranıdır. Fiziksel kısıtlardan dolayı, motor sürücü devreleri, haberleşme birimi, işlemci ve kontrol birimlerinde harcanan güçlerin toplamı bataryalardan çekilebilecek anlık güç ile sınırlıdır. Bu matematiksel olarak,

$$P_{top} = P_{asılı} + P_t + P_c \leq P_{batarya} \quad (4.6)$$

olarak yazılabilir. Burada, P_t , haberleşme biriminin, P_c ise işlemci ve kontrol biriminin tükettiği gücü temsil etmektedir. Sonuç olarak, bataryaların kapasitesinin E_c (Watt·h) olduğu düşünülürse, uçuş süresi

$$T_{uçuş} \leq \frac{E_c}{P_{top}} \quad (4.7)$$

ile sınırlıdır. Bu noktada, UxNB'lerin hareket etmediği ve rüzgar vs. dış etkilerden etkilenmediği dolayısıyla P_{top} değişkenin zamandan bağımsız olduğu varsayılmaktadır.

4.2.2 Ağ Sürekliliği

Kullanılacak UxNB sayısının sınırlı olduğu ve eldeki tüm UxNB'lerin kullanıldığı bir senaryoda, haberleşme ağının sürekliliğinin kaybolması, herhangi bir dronun bozulması ya da bataryasının bitmesi olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla, ağdaki UxNB'lerden birisi daha düşük yükseklikte çalışıyorsa, diğerleri aynı miktarda alanın kapsanması için daha yüksekte çalışmak durumunda kalırlar. Sonuç olarak, daha yüksekte uçan dronların bataryaları daha fazla güç tükettiklerinden daha hızlı tükenir. Bu durumda, ağ sürekliliği en kısa süre uçan dron tarafından belirleneceğinden, ağ yaşam ömrünün en uzun tutulabilmesi ancak ve ancak her bir UxNB'nin uçuş sürelerini eşitleyerek mümkün olur. Yani bir

başka deyişle, dronların uçuş yükseklikleri ya da kapsama alanlarının yarıçapı birbirine eşit olmalıdır. Bu durumun matematiksel olarak gösterimi aşağıdaki teoremdedir.

Teorem 4.2.1 UxNB sayısının N olduğu bir senaryoda, ağ sürekliliğini enbüyük yapabilmek için UxNB'lerin konuşulanacağı yükseklik birbirine eşittir, yani $h_i = h_d, \forall i \in \{1, \dots, N\}$.

İspat 4.2.1 Yukarıda bahsedildiği gibi, UxNB ağındaki ağ sürekliliğinin bozulması herhangi bir dronun bataryasının tükenmesi nedeniyle hizmet verememesi olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla, ağın sürekliliğini enbüyütmek için, endüyük uçuş süresine sahip dronun uçuş süresini enbüyük yapmak gerekir. UxNB'lerin tüm fiziksel özellikleri birbirine eşit olduğundan, toplam tüketilen güç yalnızca konuşlanılan yüksekliğin bir fonksiyonudur. Böylelikle, bir UxNB'nin uçuş süresi $T_i = E_c/P_{\text{top}}(h_i)$ ile hesaplanabilir. Buna göre ağ sürekliliğini enbüyüten problem

$$\underset{h_i}{\text{enbüyüt}} \quad \underset{h_i}{\text{enküçük}} \{E_c/P_{\text{top}}(h_i)\} \quad (4.8)$$

şeklinde yazılır. Bu problemin çözümü için Problem 4.8, bir yapay değişken eklenerek

$$\underset{t, h_i}{\text{enküçült}} \quad -t \quad (4.9)$$

$$\text{kısıtlar} \quad E_c/P_{\text{top}}(h_i) \geq t, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.9a)$$

biçimine dönüştürülür [127]. Bu problemde, Lagrange denklemi

$$J(t, h_i, \lambda_i) = -t + \lambda_i (t - E_c/P_{\text{top}}(h_i)) \quad (4.10)$$

şeklinde dir. Buna göre KKT durum denklemleri

$$\frac{\partial J}{\partial t} = -1 + \lambda_i = 0, \quad (4.11)$$

$$\lambda_i (t - E_c/P_{\text{top}}(h_i)) = 0 \quad (4.12)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik 4.11'e göre Lagrange değişkeni $\lambda_i = 1$ sonucu çıkmaktadır. Bu sonucun Eşitlik 4.12'yi sağlaması için $E_c/P_{top}(h_i) = t$ olması gerekir. Buna göre, N tane UxNB'nin bulunduğu bir ağda ağ sürekliliğini enbüyük yapabilmek için tüm UxNB'lerin eşit uçuş süresine sahip olması, yani başka bir deyişle, $h_i = h_d, \forall i \in \{1, \dots, N\}$ olması gerekmektedir. ■

Önceki kısımlarda da değinildiği gibi uçmak için harcanan güç haberleşme ve elektronik devrelerin çalışması için tüketilen gücün onlarca kat üzerindedir. Bu yüzden, havada asılı kalma gücü uçuş süresini belirlemede ana etmendir. Bu bölümün geri kalanında UxNB üzerindeki devrelerin ve haberleşme biriminin tükettiği gücün sabit olduğu ve 10 W'a eşit olduğu kabul edilmektedir.

Sonraki kısımda, bu bölümde ağ sürekliliğini enbüyütmek için yapılan tartışma, çoklu UxNB ağının tasarımında kullanılacaktır.

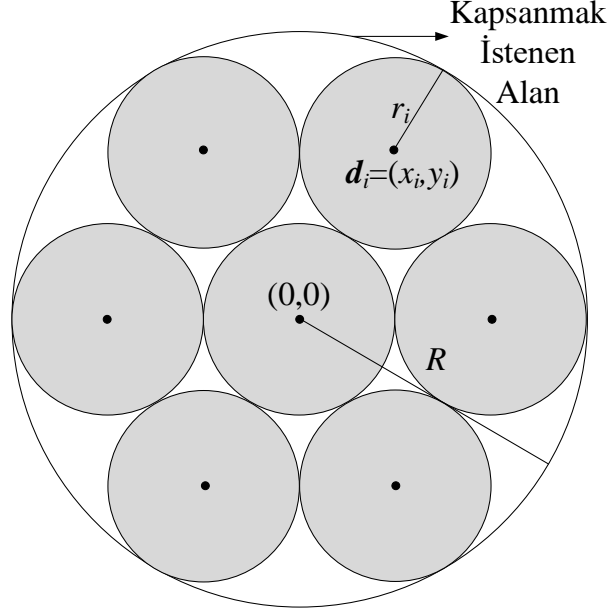
4.3 Girişim Farkında Çoklu UxNB Konuşlandırma

Eşitlik 4.3'te bahsedildiği gibi, asılı kalma gücü, bir UxNB'nin çalışma irtifası h ile üssel bir ilişki içerisindedir. Bu irtifa, İHA'nın bulunduğu şehrin rakımı, h_c ile o şehirdeki çalışma yüksekliği h_i 'nin toplamı ile hesaplanır. Dolayısıyla, bataryalardan kaynaklanan güç kısıtı $P_{asılı} \leq P_{max}$ ele alındığında, her bir İHA'nın çalışma yüksekliği

$$h_i \leq \frac{2}{u_0} \ln \left(\frac{P_{max}}{P_0(1 + \mu)} \right) - h_c = h_{max} \quad (4.13)$$

ile üstten sınırlandırılmış olur.

Hücrelerarası girişimi yok etmek adına UxNB'lerin kapsama alanlarının birbiri ile örtüşmeyecek şekilde birbirinden ayrı olduğu bir senaryoda, verilen alandaki kapsama yoğun-



Şekil 4.2. Yedi İHA için eniyi daire paketleme stratejisi [128].

luğunu enbüyütecek girişim farkında çoklu UxNB konuşlandırma problemi

$$\text{enbüyüt}_{\mathbf{d}_i, r_i} D = N \frac{r_i^2}{R^2} \quad (4.14)$$

kısıtlar

$$\|\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_j\| \geq 2r_i, \quad i \neq j, i = 1, \dots, N \quad (4.14a)$$

$$\|\mathbf{d}_i\| \leq R - r_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.14b)$$

$$r_i \leq h_{\max} \tan\left(\frac{\theta_B}{2}\right) \quad (4.14c)$$

şeklinde formüle edilir. Burada \mathbf{d}_i , kapsanması istenen coğrafi alanın merkezi Şekil 4.1'de gösterildiği gibi orijin olduğu varsayıldığında UxNB'nin kapsama alanının merkez koordinatları (x_i, y_i) 'yi içeren 2 boyutlu vektörü belirtmektedir, r_i her bir UxNB'nin kapsama alanı yarıçapını ve N , ağdaki UxNB sayısını belirtmektedir. Problem 4.14'teki UxNB'lerin eniyi kapsama yarıçaplarını ve bulunması gerektikleri 2 boyutlu koordinatları vermektedir. Eşitlik 4.14a'daki kısıt, havasal baz istasyonlarının kapsama alanlarının birbiri ile örtüşmemesini garanti etmektedir ve Eşitlik 4.14b de hiç bir UxNB'nin kapsama alanının kapsanması istenen coğrafi alanın dışına çıkmayacağını garanti etmektedir. Ayrıca, Eşitlik 4.14c ise her UxNB'nin kapsama alanının yarıçapına bataryalardan dolayı Eşitlik 4.13 uyarınca bir üst sınır koymaktadır.

Problem 4.14, dairelerin yarıçapı kısıtlanmış olan *daire içine daire paketleme* problemi olarak adlandırılır. Bu problem, literatürdeki klasik daire paketleme problemlerinden biraz farklıdır [129] ve herhangi bir N için tek bir sonucu yoktur. Ancak, literatürde, bilinen sayıda daireler için eniyi paketleme stratejileri oldukça fazla çalışılmıştır ve birçok sayıda daire için çözümler bulunmuştur [128]. Görsel amaçlı, örnek bir paketleme stratejisi yedi eş daire için Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Görseldeki örnek için her UxNB için enbüyük kapsama alanı yarıçapı $r_i \simeq 0.333R$ olarak hesaplanmaktadır ve enbüyük kapsama alanı yoğunluğu $D = 0.778$ şeklindedir. Eniyi yarıçap ve yoğunluk değerleri, 20 tane UxNB’ye kadar Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Çizelge incelendiğinde, ulaşılabilecek en yüksek kapsama yoğunluğuna $D = 0.803$ ile 19 adet UxNB kullanılarak erişildiği görülmektedir.

Burada, önerilen problem ile varolan sonuçlar arasındaki fark, küçük dairelerin yarıçaplarına gelen sınırdır. Başka bir deyişle, Problem 4.14’ün olurlu kümesi genel daire paketleme problemlerinin bir altkümesidir. Kapsanmak istenen afet bölgesi çok geniş olduğunda ve UxNB sayısı yeterli olmadığında, enbüyük yarıçap boyutu eniyi stratejiye ulaşmaya engel olabilmektedir. Yani bu alanın büyük bir kısmı havasal baz istasyonları tarafından kapsanamamaktadır. Bunun aksine, eğer verilen alan yeterince dar ise, dairelerin yarıçapları küçülecektir ve Eşitlik 4.14c’de verilen kısıttan çok daha düşük bir değer alacaktır. Sonuç olarak eniyiye yakın ve hesaplama karmaşıklığı düşük olan bir stratejiye ulaşılabilir.

Yukarıdaki tartışmaya dayanarak, hem kapsama yoğunluğunu hem de ağ sürekliliğini enbüyüten verimli bir konuşlandırma stratejisini bulan bir sezgisel algoritma önerilmiştir. Bu algoritma, Algoritma 1’de bulunabilir. Problem 4.14’te ağın yaşam ömrü tam olarak gözükmemesine rağmen, r_i ’ler üzerinden yapılacak bir eniyilemenin h_i ’leri de direkt olarak etkileyeceği ve dolayısıyla ağ sürekliliğine direkt etkisi olacağı unutulmamalıdır. Bu algoritma kapsanmak istenen afet bölgesinin yarıçapı, R ’yi ve hizmet verecek UxNB sayısı N ’yi girdi olarak alıp UxNB ağının yerleşimini çıktı olarak vermektedir. Bunun için, [128] no.lu kaynakta sağlanan bilinen sayıda UxNB (ya da daire) için daire paketleme probleminin sonucunda elde edilen eniyi kapsama yarıçapı ve kapsama yoğunluğu değerleri kullanılmaktadır. Öncelikle, Problem 4.14, Eşitlik 4.14c’de belirtilen yarıçap sınırı olmaksızın yani klasik daire paketleme problemi olarak, [128] no.lu kaynak yardımıyla çözülmektedir. Sonrasında, eğer sonuç Eşitlik 4.14c’deki kısıtla uyumlu ise bu

Çizelge 4.1. R yarıçaplı bir alanın aynı yükseklikte uçan UxNB'ler tarafından "klasik" daire paketleme ile elde edilen enbüyük kapsama yoğunluğu D , [128].

UxNB Sayısı	Kapsama Alanı Yarıçapı Oranı, r_i/R	Enbüyük Kapsama Yoğunluğu, D
2	0.5	0.5
3	0.464	0.646
4	0.413	0.686
5	0.370	0.685
6	0.333	0.666
7	0.333	0.778
8	0.302	0.733
9	0.275	0.689
10	0.261	0.687
11	0.255	0.714
12	0.248	0.739
13	0.236	0.724
14	0.231	0.747
15	0.221	0.733
16	0.216	0.751
17	0.209	0.740
18	0.205	0.761
19	0.205	0.803
20	0.195	0.762

sonuç çıktı olarak sunulmaktadır. Ancak, sonuç yarıçap kısıtını yani uçuş süresi kısıtını eğer ihlal ediyorsa, Eşitlik 4.14c'yi sağlayan yeni bir sonuç üretilmektedir. Bir sonraki kısımda Algoritma 1 kullanılarak elde edilen sayısal bulgular sunulacaktır.

4.4 Sayısal Bulgular

Bu kısımda, Problem 4.14, çeşitli senaryolar altında incelenecektir. UxNB'lerin teknik ve fiziksel özellikleri birbirine eş olarak düşünülmüştür ve bunlar Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Benzetimlerde, UxNB ağının hizmet vereceği afet bölgesinin yarıçapı $R = 2400$ m olarak seçilmektedir. Ağda bulunan tüm UxNB'lerin antenleri birbirinin eşidir ve her birinin hüzmeye genişliği $\theta_B = 80^\circ$ ile belirlenmektedir. Ayrıca havada asılı kalmak için izin verilen azami güç $P_{\max} = 5650$ W olarak seçilmiştir. Bu değer, ortalama deniz seviyesine yakın bir yükseklikte ($h \approx 0$) uçtuğunda UxNB tarafından harcanan gücün %5.7 fazlasına denk gelmektedir. Her bir UxNB'nin çalışma süresi $T_{\text{uçuş}} = E_c/P_{\text{top}}$ ile hesaplanmaktadır. Burada, E_c aracın taşıdığı bataryaların toplam kapasitesini belirtmektedir ve P_{top} , UxNB'nin çalışma yüksekliğinde haberleşme biriminin, elektronik devrelerin ve

Algoritma 1 Kapsama yoğunluğunu ve ağ sürekliliğini enbüyüten önerilen konuşlandırma algoritması

Girdi: Kapsanması istenen alanın yarıçapı, R ve UxNB sayısı, N .

Çıktı: UxNB'lerin konuşlandırma koordinatları, \mathbf{d}_i^* , $i = 1, \dots, N$ için kapsama alanı yarıçapı, r_i^* ve ağın kapsama yoğunluğu, D^* .

- 1: [128] no.lu kaynaktaki sonuçlara göre problemi uçuş dinamiklerini gözetmeksizin çöz. $(r_{\text{circ}}, \mathbf{d}_{\text{circ}})$ 'i elde et.
- 2: **if** $(r_{\text{circ}} > h_{\text{max}} \tan\left(\frac{\theta_B}{2}\right))$ **then**
- 3: $r_i^* \leftarrow \left(\frac{2}{u_0} \ln\left(\frac{P_{\text{max}}}{P_0(1+\mu)}\right) - h_c\right) \tan\left(\frac{\theta_B}{2}\right)$,
 $\mathbf{d}_i^* \leftarrow \mathbf{d}_{\text{circ}}$,
 $D^* = N(r_i^*)^2/R^2$
- 4: **else**
- 5: $r_i^* \leftarrow r_{\text{circ}}$, $\mathbf{d}_i^* \leftarrow \mathbf{d}_{\text{circ}}$, $D^* = N(r_{\text{circ}})^2/R^2$.
- 6: **end if**
- 7: **return** $(r_i^*, \mathbf{d}_i^*, D^*)$

Çizelge 4.2. Benzetimlerde kullanılan döner kanatlı UxNB'nin özellikleri

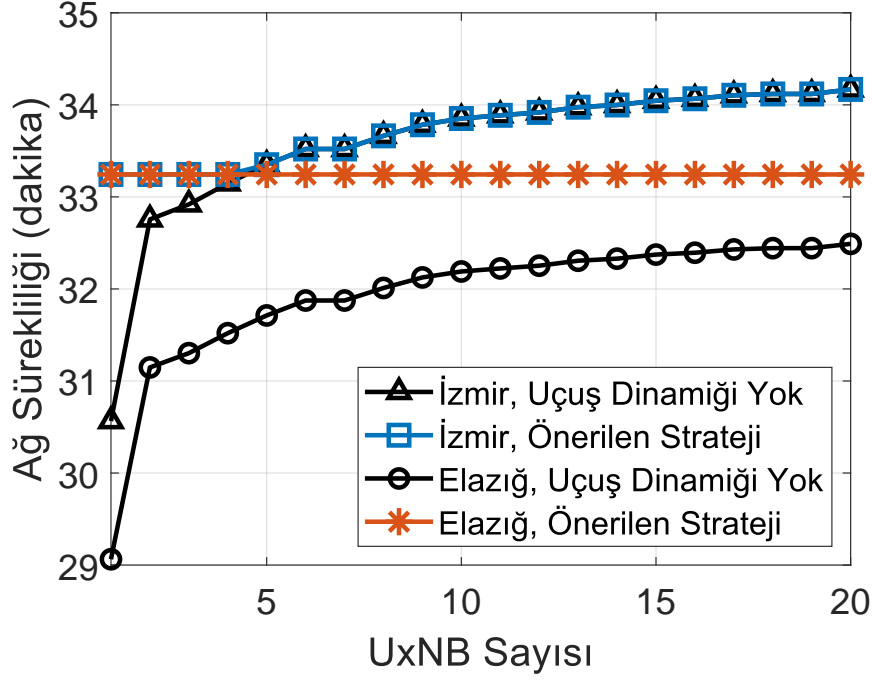
Teknik/Fiziksel Özellik	Değeri
Kanat Çapı, $2R$	558.8×10^{-3} m
Kanat genişliği, c_b	167.6×10^{-3} m
Pala, Rotor ve Batarya Sayısı	2, 4, 8
Sürüklenme Katsayısı, C_{D0}	1.57×10^{-3}
Araç Ağırlığı	10 kg
Batarya Ağırlığı	2 kg
Batarya Gerilimi, V_b	24.5 V
Batarya Kapasitesi, C	16000 mAh

asılı kalmak için tükettiği güçlerin toplamıdır. Benzetimlerde, 2020 yılında yıkıcı depremler yaşamış rakımları sırasıyla, 30 m ve 1070 m olan İzmir ve Elazığ kentleri ele alınmıştır.

Şekil 4.3'te, ağ sürekliliği eğrileri UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak farklı rakımlardaki iki şehir, İzmir ve Elazığ için gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için, herhangi bir uçuş dinamiği etkisini ele almayan klasik daire paketleme probleminin eniyi çözümü de alt sınır olarak gösterilmektedir. Her UxNB'nin tükettiği güç şehir rakımı ile üssel olarak arttığından, ağ sürekliliği UxNB sayısının artışı ile aynı oranda artmamaktadır. Elazığ için toplam ağ sürekliliği 33 dakika 15 saniye sabitlenmiş görünmektedir. Elazığ, İzmir'e göre daha yüksek rakımda (1070 m) olduğu için, dronlar havada asılı kalmak için daha çok güç tüketmelidir. Sonuç olarak, Eşitlik 4.14c'ye

göre enbüyük kapsama yarıçapı sınırlanmaktadır. Eğer yeteri sayıda havasal baz istasyonu bulunmuyorsa, tüm UxNB'ler Eşitlik 4.13 tarafından dikte edilen uçulabilecek azami yükseklikte uçmak durumundadırlar ve kapsama yoğunluğu bir sonraki grafikte de görüleceği gibi klasik daire paketleme probleminin çözümünün ulaştığı değerden çok çok küçük olmaktadır. İzmir (30 m) için benzer sonuç, 5 tane UxNB'ye kadar, yani tüm alanı kapsamaya yetecek UxNB bulunmayan duruma kadar elde edilebilmektedir. Bu noktada dron baz istasyonları, Eşitlik 4.13'te verilen yükseklik sınırının üstünde uçamamaktadır. Bu durumda, ağın yaşam ömrü İzmir için Şekil 4.3'te de görüleceği gibi klasik daire paketleme sonucuna göre daha uzun olmaktadır. Bu gözlemlerin yanında, önerilen algoritma ile uçuş dinamiklerini yani Eşitlik 4.13 ve 4.14c'deki kısıtları ihmal eden yaklaşımın sonuçlarının karşılaştırımı oldukça ilginçtir. Bu sonuçlar, Şekil 4.3'te siyah eğrilerle verilmiştir. Bu duruma göre, ağda bulunan bir UxNB, herhangi bir yükseklik sınırı olmadan kapsanması istenen alanın üzerinde uçabileceği en yüksek noktada uçabilir. Bu durum, kapsama alanını arttırmak anlamında iyi bir yolmuş gibi gözükse de aslında bataryalardan daha çok güç çekeceği için bataryaların daha hızlı tükenmesine neden olacaktır. Sonuç olarak ağ yaşam ömrü, Şekil 4.3'te de görüleceği üzere önerilen algoritmaya kıyasla gözle görülür biçimde azalacaktır. Ayrıca, bu yaklaşımın motor sürücülerindeki $P_{asılı} \leq P_{max}$ kısıtını da ihmal ettiği unutulmamalıdır. Bu durumda da motorlar kendi fiziksel kısıtlamalarının üzerinde çalışmaya zorlanacak ve muhtemelen motor sürücü devreleri zarar göreceklerdir. Dolayısıyla, bu yaklaşım gerçeklikten uzaktır.

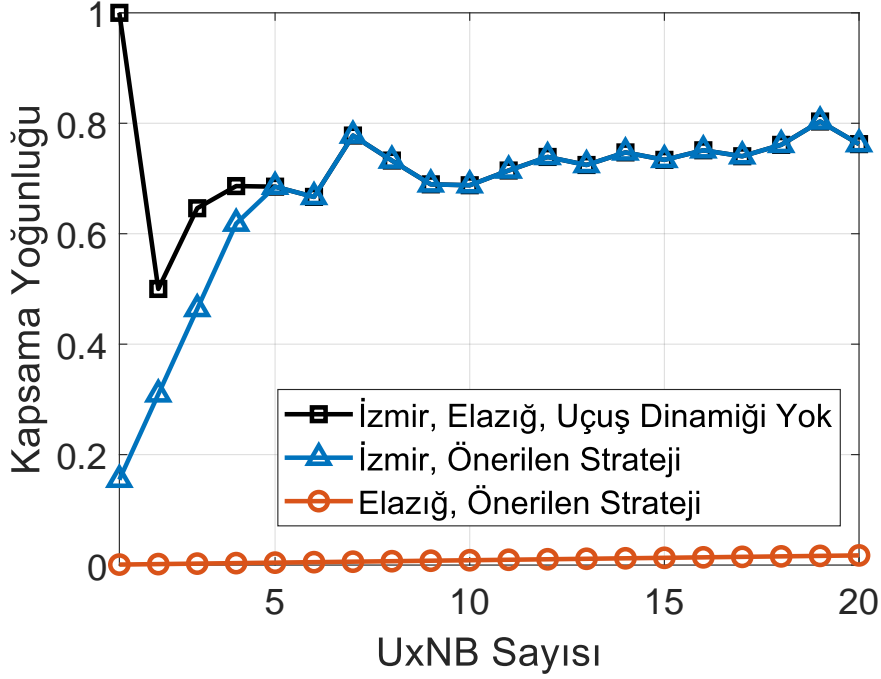
Şekil 4.4'te, İzmir ve Elazığ için kapsama yoğunluğu eğrileri ağdaki UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Elazığ (1070 m) için Algoritma 1 ile elde edilen eğri ilgi çekicidir. 20 tane UxNB ile bile, ancak afet bölgesinin %1'lik bir kısmı kapsanabilmektedir. Havanın Elazığ'da daha ince olmasından dolayı, dronlar kapsama yarıçaplarını arttırmak için daha yüksekte uçamamaktadırlar. Diğer taraftan, eğer platform üzerindeki uçuş dinamikleri hesaba katılmazsa çok daha iyi bir sonucun elde edileceği Şekil 4.4'ten gözlemlenmektedir. Bu durumda, sadece 4 tane UxNB ile ilgili afet bölgesinin %70'ini kapsamak mümkün olmaktadır. Ayrıca, uçuş dinamikleri gözetildiğinde, İzmir'de kurulacak benzer bir ağın 4 tane UxNB ile afet bölgesinin %70'ini kapsamasından dolayı, Elazığ'a kıyasla daha başarılı olacağı Şekil 4.4'te açıkça gözlemlenmektedir. Ancak, daha az sayıdaki UxNB için kapsama yoğunluğu tatmin edici değildir. Bu durum, büyük bir dairesel alan, küçük ve eş dairelerle kapsanmak istendiğinde büyük miktarda kapsanma-



Şekil 4.3. Afet bölgesinin yarıçapı $R = 2400$ m olduğunda İzmir (30 m) ve Elazığ (1070 m) için UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak ağ sürekliliği eğrileri. Kıyaslama için uçuş dinamiklerini ele almayan klasik daire paketleme probleminin sonucu da verilmiştir.

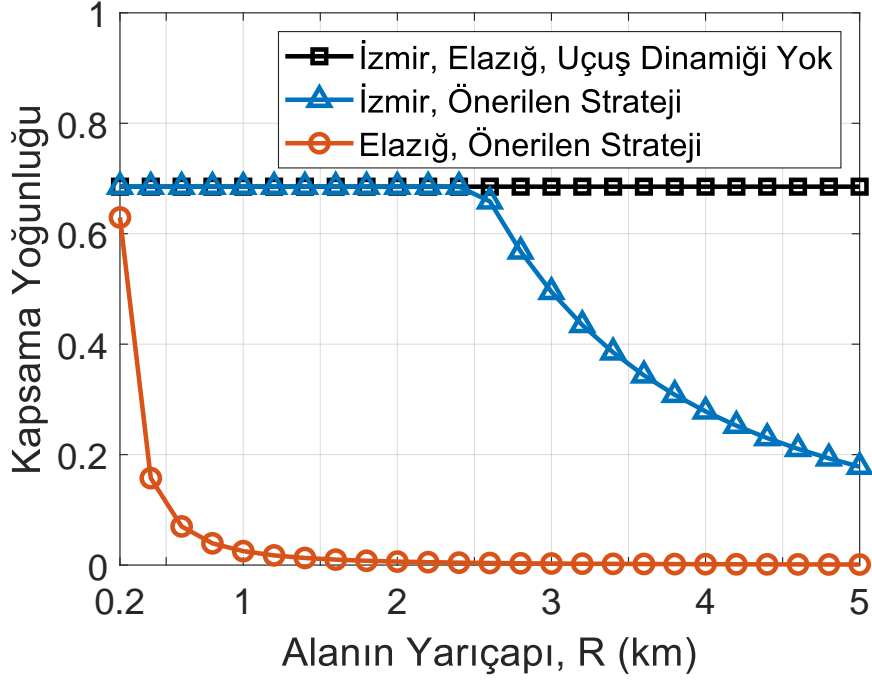
yan alanın kalması ile açıklanabilir. Bu, İzmir’de 2 ve 3 tane havasal baz istasyonu ile kurulan ağlardaki kapsama yoğunluğu değerlerinde de görülebilir. Buna göre, önerilen algoritma kullanıldığında afet alanının en fazla %50’si kapsamaktadır. Ağdaki UxNB sayısı arttıkça, UxNB’lerin uçuş yükseklikleri azalmakta ve sonuç olarak da kapsama yarıçapları azalmaktadır. Daha küçük dairelerle kapsamamış alan oranı da düşmektedir. Tekrar uçuş dinamiklerinin ihmal edildiği senaryo incelendiğinde, İzmir ve Elazığ için de daha iyi sonuçlar elde edildiğini görmek mümkündür. Ancak bu sonuçların, platformların fiziksel limitlerini ihlal ettiği dolayısıyla problem çözümünün aslında olumsuz olduğu gözden kaçmamalıdır. İlginç bir biçimde, ağ sürekliliğinin enbüyük olabilmesi için gereken tüm UxNB’lerin aynı yükseklikte uçması gerektiği durumu hafifletilir ve serbest bırakılırsa, kapsama yoğunluğu anlamında daha iyi sonuçlar almak mümkün olacaktır. Ancak bu durumun da ağ yaşam süresini düşüreceğini unutmamak gerekir. Bu durum, Şekil 4.3 incelenerek gözlemlenebilir.

Şekil 4.5’te, ağdaki uçan baz istasyonlarının sayısı $N = 5$ olduğunda, aynı şehirler için kapsamak istenen alanın boyutunun kapsama yoğunluğuna etkisi incelenmiştir. Uçuş dinamiklerinin ihmal edilmesi durumunda, 5 tane UxNB, afet bölgesinin yarıçapından ba-



Şekil 4.4. Afet bölgesinin yarıçapı $R = 2400$ m olduğunda İzmir (30 m) ve Elazığ (1070 m) için UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak kapsama yoğunluğu eğrileri. Kıyaslama için uçuş dinamiklerini ele almayan klasik daire paketleme probleminin sonucu da verilmiştir.

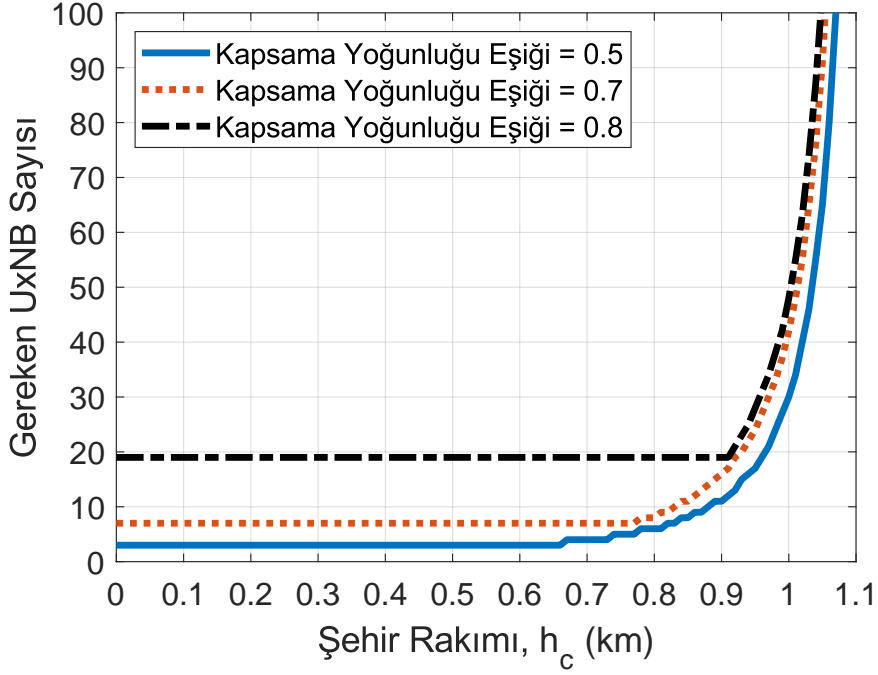
ğimsız olarak alanın %68'ini kapsayabilmektedir. Elbette bu durumda, R 'nin artması ile UxNB'lerin herhangi istenen yüksekliğe konuşlandırılabilirdikleri unutulmamalıdır. Ancak uçuş dinamikleri üzerindeki kısıtlar Algoritma 1'deki gibi uygulandığında, UxNB'lerin uçabilecekleri enbüyük yükseklik sırasıyla İzmir ve Elazığ için 1124 m ve 84 m olmaktadır. İzmir'de enbüyük kapsama yoğunluğuna ulaşabilmek için afet bölgesinin yarıçapı, R en fazla 2400 metre olmalıdır. Bu değer üzerinde, ağ tasarımı kapsama yoğunluğu bakımından verimsiz olmaya başlamaktadır. Elazığ'da ise 5 tane UxNB ile İzmir'de ulaşılan kapsama yoğunluğuna ulaşmak mümkün olmamaktadır. Başka bir yorum da ağ yaşam ömrü için yapılabilir. Şehir rakımları, h_c ile platformların uçuş yüksekliği, h_i toplandığında, iki şehir için de ortalama deniz seviyesinden yükseklik birbirine eşit çıkmaktadır. Dolayısıyla, kapsama yoğunluğunun azalmaya başladığı yükseklikteki UxNB'lerin çalışma süreleri birbirine eşittir ve kapsanmak istenen alanın boyutlarından bağımsızdır. Böylece, bu iki şehrin üzerine kurulacak UxNB ağı 33 dakika 15 saniye boyunca kesintisiz biçimde hizmet verebilecektir. Bu süre ana şebekedeki yoğunluğun giderilmesi için yeterli bir süredir. Eğer Eşitlik 4.14c'deki kısıt hafifletilirse, yani UxNB'lerin havada asılı kalmak için daha çok güç tüketmesine izin verilirse, toplam ağ yaşam ömrü düşe-



Şekil 4.5. UxNB sayısı $N = 5$ olduğunda İzmir (30 m) ve Elazığ (1070 m) için afet alanın yarıçapına karşılık kapsama yoğunluğu eğrileri. Kıyaslama için uçuş dinamiklerini ele almayan klasik daire paketleme probleminin sonucu da verilmiştir.

cektir. Aksi durumda, Eşitlik 4.14c'deki P_{max} sınırını düşürerek olurlu kümeyi daraltmak UxNB'lerin uçuş süresini arttıracaktır ancak Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi oldukça ciddi bir kapsama yoğunluğu düşüşüne neden olacaktır.

Şekil 4.6'da belirlenen kapsama yoğunluğu eşik değerlerini elde etmek için gerekli olan en az UxNB sayısı eğrileri şehir rakımına karşılık çizdirilmiştir. Burada, alanın hepsini kapsayabilen tek UxNB'nin olduğu durum yok sayılmaktadır. İstenilen en düşük kapsama yoğunluğu 0.5 olduğunda, şehir rakımının İzmir, İstanbul gibi deniz seviyesine yakın olduğu değerler için 3 adet UxNB'nin olduğu bir ağ yeterli kapsama yoğunluğunu sağlamaktadır. Ancak Malatya (977 m) gibi rakımın yüksek olduğu bir şehirde, istenen kapsama yoğunluğunu sağlamak için 24 tane UxNB'ye ihtiyaç vardır. Bunun yanında, 1070 m rakımdaki Elazığ şehrinde ise 100 tane UxNB ile kapsama yoğunluğu 0.5 olarak elde edilmektedir. Kapsama yoğunluğu eşiğinin arttırılması, ihtiyaç olan UxNB sayısını da arttırmaktadır. Yoğunluk eşiğinin 0.8'de tutulması ile, deniz seviyesi bulunan bir yerleşim yerinden yaklaşık 910 m rakımdaki bir yerleşim yerine kadar 19 adet UxNB ile bu oranın gerçekleştiği görülmektedir. Belirli bir rakımdan sonra ihtiyaç olan UxNB sayısı tüm eğriler için üssel biçimde artmaktadır. Rakımın 1070 m olduğu Elazığ'da, Şekil 4.6'de



Şekil 4.6. Afet bölgesinin yarıçapı, $R = 1000$ m olduğunda şehir rakımına karşılık kapsama yoğunluğu eşik değerleri, 0.5, 0.7, 0.8 için gerekli UxNB sayısı eğrileri.

gösterilmese de, 0.8 kapsama yoğunluğu değeri ancak 159 UxNB kullanılması ile ulaşılmaktadır. Bu noktada, artan UxNB sayısının ağıdaki toplam tüketilen gücü de arttırdığına dikkat etmek gerekmektedir. Ancak UxNB sayısının artması ile ağ sürekliliğinin de arttığı unutulmamalıdır. Bu bağlamda, UxNB sayısı ile ağ sürekliliği arasında bir ödünleşim bulunmaktadır.

4.5 Bölüm Özeti

Bu bölümde, uçuş dinamikleri gözetilerek verilen bir afet bölgesi için kapsama yoğunluğu ve ağ sürekliliğini enbüyüten girişim duyarlı UxNB konuşlandırması incelenmiştir. Öncelikle, bir UxNB tarafından havada asılı kalmak için gerekli güç ağırlık ve platformun yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak formüle edilmiştir. Sonrasında, UxNB ağının sürekliliğini enbüyütmek için her bir UxNB'nin uçuş yüksekliklerinin birbirinin eşi olması gerektiği ortaya konmuştur. Havasal baz istasyonu platformlarının girişim duyarlı konuşlandırma problemi *daire içine daire paketleme* problemi olarak gerçek dinamikleri de içine katarak formüle edilmiştir. Bu problemi çözmek için buluşsal ve eniyiye yakın sonuç veren bir algoritma önerilmiş ve bu algoritma kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal sonuçlarda, UxNB sayısı ve kapsanacak alanın ağ yaşam ömrüne ve

kapsama yoğunluğuna etkisi, 2020’de ¼lkemizde b¼y¼k Őiddette deprem yaşamış iki Şehir; İzmir (30 m) ve Elazığ (1070 m) için incelenmiştir. Havasal baz istasyonlarının y¼nl¼ antenler ile donatıldıkları doğal afetin hemen sonrası için ele alınan UxNB’lerin birbirine girişim yapmayacak Şekilde konuşlandırıldıkları bir haberleşme senaryosunda, afetin geręekleřtięi Şehir rakımının ağ tasarımı ve kurulumundaki en ¼nemli parametrelerden biri olduğu ortaya konmuştur. Bunun yanında, ağ yaşam ¼mr¼ ve kapsama yoğunluğu arasında bir ¼d¼nleřim olduğu sayısal bulgular kullanılarak g¼sterilmiřtir.

5. FARKLI TİPTE İHA'DAN OLUŞAN UxNB AĞLARININ BAŞARIM ANALİZİ

5.1 Giriş

5G ve ötesi ağlarda, ağa bağlı cihazların sayısının oldukça artacağı beklenmektedir [114]. Dahası, ağda işletilmesi beklenen hizmetlerin çeşitlenmesinden dolayı, hem veri trafiği hem de kullanıcı ve erişim noktalarının tipleri oldukça değişecektir. Sonuç olarak, artan veri trafiğini yönetmek giderek daha zorlu bir görev olacaktır. Bu miktarda veriyle başa çıkabilmek için kolay kurulumları, yüksek hareketlilikleri ve yersel baz istasyonlarından farklı kanal karakteristikleri olmasından ötürü uçan baz istasyonu olarak insansız hava araçlarının (İHA) kullanılması 5G ağlarının olası sorunlarını çözmek adına umut verici bir yöntemdir. Yayınlanan son 5G sürümlerinde (Rel-17), insansız hava araçlarının havasal erişim noktası (UxNB) olarak kullanılması kabul edilmiş ve bu konuyla ilgili ilk standartlar yayımlanmıştır [6, 130]. Havasal erişim noktası olarak kullanılacak İHA'ların çeşidi, kullanılan uygulamaya ve hizmet tiplerine göre değişebilir. Daha hızlı konuşlandırmanın ve anlık müdahalenin yapılması istendiği acil durum senaryoları ve bölgesel kapasite arttırımı gibi durumlarda döner kanatlı bataryalı İHA'lar kullanılabilir [13, 126]. Bununla birlikte, bu cihazların çalışma süreleri kısıtlı olduğundan, benzer senaryolarda, yerde bulunan bir yönetici istasyona güç kablosu ile bağlı dronlar da kullanılabilir [30, 131]. Bunların dışında, daha büyük alanlara kablosuz haberleşme hizmeti götürmek adına çeşitli kurumların balon baz istasyonu projeleri mevcuttur [34, 132]. Yere yine bir kablo ile bağlı olan balonlar havada süzülerek altında bulunan bölgeye Wi-Fi, WiMax, 4G-LTE gibi hizmetleri sunmaktadır.

5.1.1 İlgili Çalışmalar ve Motivasyon

Döner kanatlı İHA'ları haberleşme ağlarında kullanımının bir çok avantajı olmasına rağmen, çözüm bekleyen bir o kadar da açık nokta bulunmaktadır. Özellikle, verimli konuşlandırma ve düşük uçuş süresi problemleri döner kanatlı İHA'lar için, ağdaki güç tüketimi ve girişim yönetiminin yanı sıra en dominant sorunlardandır. Literatürde, bu sorunları tek başına ele alan bir çok çalışma olmasına karşın, yalnızca sınırlı sayıda araştırma uçuş süresi ve konuşlandırma problemlerini ortaklaşa ele almaktadır. Örneğin, [41] no.lu çalışmada, endüyük iletim güçlerini sağlayan çoklu UxNB konuşlandırma problemi tartı-

şılmaktadır. Mozaffari ve diğ., bu problemde eniyi taşıma teorisini kullanarak önceden belirlenmiş hücre sınırlarının içerisinde eniyi iki boyutlu koordinatlara UxNB konuşlandırmasını yaparak kullanıcı iletim güçlerini en aza indirmektedir. Bu problem yapısında, kullanıcılara dikgen kanallar tahsis edilmektedir. UxNB'lerin bir haberleşme ağında kapasite arttırıcı elemanlar olarak kullanımı [133] no.lu kaynakta incelenmektedir. Wu ve diğ. iki kullanıcıyı yayın kanalını ele alarak İHA yardımıyla ağın kapasitesinin sınırlarını teorik olarak göstermektedir. Problem boyutunu düşürmek adına İHA tipi, yerden yüksekliği yere bağlı olduğu kablo uzunluğu ile sınırlı olan bağlı dron olarak seçilmektedir. Bataryalı dronlardaki düşük uçuş süresinin üstesinden gelebilmek için oluşturulan haberleşme ağında bağlı dronların kullanımı [30] no.lu kaynakta önerilmektedir. Bir doğal afet senaryosunda, Selim ve diğ., sadece dronların enerji harcamalarını enküçülten değil aynı zamanda dronların konumlarını da belirleyen bir yöntem sunmaktadır. Bu problemde, kullanıcılara belli bir düzeyin üzerinde hizmet kalitesi sağlanacağı garanti edilmektedir. Ancak, bu çalışmada kullanılan kanal modeli oldukça basittir ve [26] no.lu kaynaktakinin aksine yalnızca serbest uzay yol kaybı ele alınmaktadır. Enbüyük kapsama alanını sağlayan eniyi UxNB yüksekliği [26] no.lu kaynakta tartışılmaktadır. Bu çalışmada, Al-Hourani ve diğ., olasılıksal yol kaybı modelini geliştirmektedir ve yol kaybını enküçük yaparak UxNB kapsama alanını enbüyük yapmaya odaklanmaktadır. Bağlı UxNB'ler için LoS olasılığını enbüyüten eniyi kablo uzunluğu ve yatma açısı [131] no.lu kaynakta incelenmiştir. Önerilen modelde, bağlı UxNB'nin yönetici istasyonu bir binanın çatısına yerleştirilmiştir ve UxNB, asılı durma alanı olarak adlandırılan 3 boyutlu sınırlandırılmış bir düzlemde hareket edebilmektedir. Aynı yazarlar, havasal ağların bağlı UxNB'ler ile kurulan havasal ağların kapasite ve kapsama alanı iyileştirme özelliklerini de [108] no.lu kaynakta ele almaktadır.

Döner kanatlı bir İHA'nın uçmak için harcadığı güç, uçuş süresini etkileyen birincil etmendir. Literatürde, döner kanatlı İHA'ların güç tüketimi ele alan çalışmalar genel olarak içerisinde haberleşme senaryosu bulunmayan çalışmalardır [87–89, 91, 92]. Genel olarak İHA güç tüketim verimliliğini arttıracak tasarım çalışmaları ve hibrit çözümler [87–89] no.lu kaynaklarda bulunabilir. Bunların dışında, rota eniyilemesi ve hedef iz sürümü problemlerinin ele alındığı [90–92] no.lu çalışmalarda, öne sürülen modeller ya oldukça basitleştirilmiştir ya da deneysel sonuçlardan eğri oturtma ile elde edilmektedir. Bunların dışında, [93] ve [94] no.lu kaynaklarda güç tüketimi helikopter literatüründe sıkça kul-

lanılan momentum teorisiyle formüle edilmektedir. Özellikle, [94] no.lu kaynakta, tipik özellikleri verilen döner kanatlı bir İHA'nın taşıdığı bataryaların boşalım süresi için bir model önerilmektedir. Döner kanatlı dronların uçmak için çok miktar güç tüketmesinin bir sonucu olarak [20] no.lu kaynakta balon tipi İHA'lardan oluşan havasal erişim noktalarının oluşturduğu haberleşme ağı incelenmiştir. Alshami ve diğ., balon UxNB ağını, alçak irtifa, orta irtifa ve yüksek irtifa platformları olarak üç kategoride incelemişlerdir. Bunların içinde yüksek irtifa platformu ağının, özellikle bir acil durum senaryosunda, mevcut yersel ağa göre üstün geldiği sonucu ortaya konmuştur. Üzerinde WiMAX baz istasyonu taşıyan kablo ile bağlı balonlar [134] no.lu kaynakta ağdaki kapsama alanını genişletmek için kullanılmıştır. OPNET isimli bir gerçek zamanlı simülatör, modelin analizinde ve tasarımında kullanılmıştır. Bu çalışmada, balonların oluşturdukları farklı örüntülerin kapsama alanı başarımına etkisi incelenmektedir.

Bu bölümde, farklı tipte İHA'lardan oluşan UxNB ağ mimarilerinin başarımları karşılaştırılacaktır. Ele alınacak İHA tipleri, *döner kanatlı bataryalı dron*, *döner kanatlı kablo ile bağlı dron* ve *bağlı balon* olmak üzere üç tiptir. Bu İHA tiplerine haberleşme tarafından bakılacak olduğunda, bağlantı kaliteleri birbirine benzerdir. Kısım 5.2, bu hesaplamaları sunmaktadır. Ancak, özellikle asılı kalmak için İHA'ların harcaması gereken güce bakıldığında, birbirlerinden oldukça farklı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, Kısım 5.4.1'de detaylı biçimde tartışılmıştır. Tipik olarak, bataryaları sınırlı miktarda enerjiye sahip olduğundan batarya ile çalışan İHA'ların tüketebileceği güç sınırlıdır. Bunun yanında ise, istenen konuma, hızlı ve kolay biçimde ulaşabilme avantajları vardır. Ancak, batarya ömrü sonsuz olmadığından, uçuş süreleri düşüktür. Düşük çalışma süresi bataryalı dronların en büyük handikapıdır. Bu sorunun üstesinden gelinbilmesi adına, yerdeki bir istasyona güç kablosu ile bağlı dronlar kullanılabilir. Kablolu dronlar, bataryalı dronlar gibi uçmak, haberleşmek ve veri işlemek için enerji harcaması gerekse de ihtiyacı olan enerjiyi yerdeki yönetici istasyondan sağlayabilirler. Bu durum da bataryalı dronların yaşadığı sınırlı kapasiteli batarya problemini çözmektedir. Böylece çalışma süreleri, yerdeki yönetici istasyonun çalışma süresine ya da dronun fiziksel olarak çalışamaz duruma gelmesine eşdeğer olur. Bunların da yaklaşık birkaç yıl olduğu düşünülmektedir [108]. Ancak bağlı dronların en büyük sorunu ise sınırlı hareket özgürlüğüdür. Bu tip İHA'lar, kablo uzunluğunun izin verdiği ölçüde istenen noktalara hizmet götürebilirler. Diğer taraftan, balon tipi İHA'lar eğer üzerinde bir motor ya da pervaneli bir sistem bulundurmuyorsa,

uçmak için herhangi bir güç tüketmezler [13, 20]. Bu bölümdeki çalışmada, balonların Helyum gazı doldurulmuş yere güç kablosu ile bağlı serbest uçan objeler olduğu varsayılmaktadır. Bunların yanı sıra, balonlar, bağlı dronlar gibi yalnızca haberleşme ve elektronik devrelerin çalışması sonucu güç tüketirler -ki bu işlemler için tüketilen gücün on Watt mertebesinde olduğu önceki bölümlerde vurgulanmıştır. Güç tüketimi konusundaki bu büyük avantajına rağmen, bir itki sisteminin olmamasından kaynaklı olarak balonların havadaki pozisyonu herhangi bir dış kuvvet tarafından kolaylıkla değiştirilebilir. Bu çalışmadaki dış kuvvet rüzgar olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla, 3 boyutlu çoklu UxNB konuşlandırma, bataryalı ve kablo ile bağlı dronlar için uçuş dinamikleri ve kablo kısıtları altında eniyi olarak yapılabilirken balon İHA ile kurulmuş UxNB ağlarında, balonun konumundaki belirsizlikten ötürü, yalnızca balon UxNB'lerin yer istasyonlarının 2 boyutta konumlarını bulmak ve balonun bulunması gereken yüksekliğin kablo yardımı ile ayarlanması ile mümkün olmaktadır.

5.1.2 Katkılar

Bu bölümün literatüre katkısı, üç farklı tipteki İHA ile oluşturulmuş UxNB ağında, hizmet verilen kullanıcı sayısını enbüyütmek için hem 3 boyutlu UxNB konuşlandırması hem de kullanıcıların UxNB'ler ile eşleştirilmesinin ortaklaşa yapılmasıdır. Literatürdeki ilgili çalışmaların çoğunun aksine, dron platformlarının uçuş dinamikleri ve İHA tipinden kaynaklanan fiziksel kısıtlamalar eniyileme problemlerine eklenmiştir. Herhangi bir şehirde verilen bir bölge ve ağdaki UxNB sayısı için verimli biçimde 3 boyutlu UxNB konuşlandırılmasını sağlayan yeni bir çerçeve geliştirilmiştir. Öncelikle, döner kanatlı İHA'ların havada asılı kalması için gereken güç tüketim modeli gerçekçi biçimde türetilmiştir. Buradaki tüketim modelinin diğer bölümlerden farkı ise rüzgarın etkisinin de bu bölümde incelenmiş olmasıdır. Bunun yanında, bu çalışmada, yer istasyonuna bağlı bir balonun eğilme açısının rüzgar hızı ile olan ilişkisi, haberleşme literatüründe ilk defa elde edilmiştir.

Bir haberleşme senaryosunda, her İHA tipi için dışbükey olmayan ve doğrusal olmayan NP zor tamsayı problemleri kullanıcıların hizmet kalitesi kısıtlarını ve İHA tiplerinin kendi fiziksel dinamiklerini çığnmeden enbüyük kapsama başarıyı garanti edilecek biçimde formüle edilmiştir. Sonrasında, Dışbükeylerin Farkı Programlama (Difference of

Convex (DC) Programming) yardımı ile etkili bir çözüm yöntemi sunulmuştur [135–137]. Sonuçların elde edilmesi için öncelikle, kullanıcı kümesine K-Means algoritması uygulanmıştır ve UxNB'lerin bulunması gereken 2 boyutlu koordinatları elde edilmiştir. Daha sonra, öne sürülen problemlerin maliyet fonksiyonlarına bir penaltı fonksiyonu eklenerek tamsayı kısıtı gevşetilmiş ve DC Algoritması (DCA) koşturulmuştur. Bu algoritma, sıralı dışbükey yaklaşıklıklaştırma (successive convex approximation, SCA) algoritmasının bir benzeridir [138, 139] ve eniyiye yakın sonucu hızlı ve etkili biçimde vermektedir. Bağlı dron ile oluşturulan UxNB ağında, gerçek bir ağ mimarisi elde edebilmek adına yer yönetici istasyonunun konumunun sabit olduğu varsayılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, üç farklı tipteki İHA ile oluşturulan haberleşme ağlarının başarımlarının kıyası açısından okuyuculara bir bakış açısı kazandırmaktadır. Örneğin, batarya ile çalışan UxNB ağları ile elde edilen sonuçlar, harcanan gücün deniz seviyesinden yükseldikçe ciddi biçimde artmasından dolayı, şehir rakımının 3 boyutlu konuşlandırma probleminde en önemli faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, kapsama ile uçuş süresi birbiri ile ters ilişkili olduğundan, bu parametreler arasındaki ödünleşim de net biçimde ortaya konmuştur. Sonuçlardan elde edilen bir diğer önemli bulgu ise, bağlı dronlar ya da balonlarla oluşturulan UxNB ağının başarımlarını etkileyen en önemli faktörün kablo uzunluğu olduğudur. Yeterince uzun bir kablo ile tasarlanan ağda, başarımın oldukça tatmin edici olduğu söylenebilir. Kablo uzunluğunun yanında, rüzgar hızının Beaufort ölçeğine göre çok şiddetli olmadığı durumlarda bile balon tipi İHA'ların kullanımının pratik olmadığı gözler önüne serilmiştir [140]. Yalnızca ılıman ya da sakın hava koşullar altında, balonlardan oluşan ağ, durağımsız pozisyonun bir sonucu olarak bağlı dronlardan oluşan ağa göre bir miktar daha kötü performans göstermektedir.

Bu bölümün geri kalanı şu şekildedir. Kısım 5.2'de her üç İHA tipi için ağ modeli ve döner kanatlı İHA'lar için güç tüketim modeli sunulmaktadır. Kısım 5.3'te, ortaklaşa konuşlandırma ve kullanıcı eşleştirme problemlerinin formülasyonları, her İHA tipi için gerçekleştirilmektedir. Önerilen problemleri çözmek için kullanılan DC programlama yöntemi Kısım 5.5'te detaylıca işlenmektedir. Sayısal bulgular ve tartışmalar, Kısım 5.6'te sunulmaktadır ve son olarak, Kısım 5.7 bu bölümün özetini yaparak bitirmektedir.

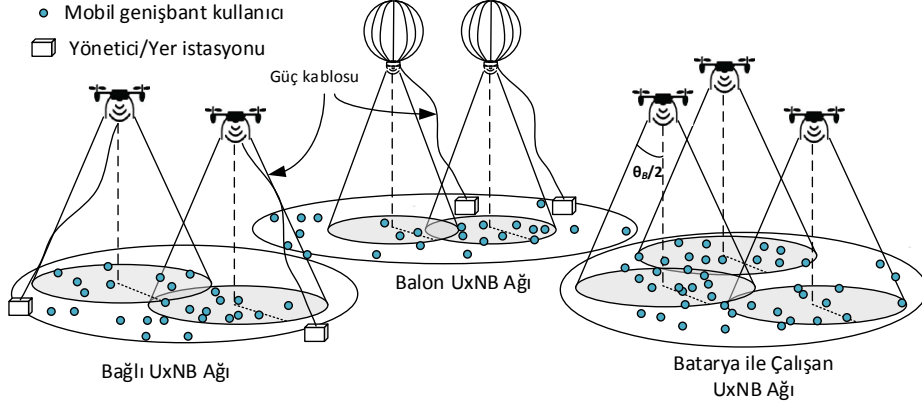
5.2 Sistem Modeli

Şekil 5.1’te gösterildiği gibi yarıçapı R_a olan dairesel bir alana farklı tipteki İHA’lardan oluşan birden çok UxNB ile hizmet verilmek istenmektedir. Bu alanın, merkezinin orijin olduğu varsayılmaktadır. Buna göre, UxNB’ler yerden h_i kadarlık bir yükseklikte, $[x_i, y_i]$ koordinatlarında uçmaktadırlar. Yerde bulunan kullanıcıların belirli sayıda kümenin etrafında öbeklendikleri varsayılmaktadır. Her öbeğin içindeki kullanıcı sayısı Poisson dağılımı ile belirlenirken koordinatları kesilmiş Normal dağılım ile dağıldığı varsayılmaktadır [11]. Döner kanatlı İHA’ların oluşturduğu UxNB ağında her platformun birbiri ile özdeş fiziksel özelliklerinin (kanat boyları, rotor sayıları, batarya kapasitesi ve anten tipi vb.) olduğu kabul edilmektedir. Ağda bulunan her UxNB’nin üzerindeki antenler aşağı yönde yönlendirilmiş antenlerdir ve hüzmeye genişlikleri θ_B ile ölçülmektedir. Antenlerin kazanç örüntüsü,

$$G(\phi) \approx \begin{cases} G_0/\theta_B^2 & , -\theta_B/2 \leq \phi \leq \theta_B/2 \\ 0 & , \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (5.1)$$

biçimindedir [126]. Burada, ϕ , yerdeki kullanıcı ile platform arasında kurulan bağlantının arasındaki hüzmeye açısıdır ve $G_0 = 30000$ biçimindedir. Bu durumda, İHA’ların üzerinde bulunan antenlerin örüntüsünün belirli bir bölgeye sabit miktarda ışımaya yapmasından dolayı UxNB’nin kapsadığı alan ile bulunduğu yükseklik arasında direkt olarak matematiksel bir bağ kurulabilir. Buna göre, i ’inci UxNB’nin yerden yükseliği h_i olarak alındığında ve UxNB’nin kapsadığı alanın yarıçapı R_i olduğunda, bu iki değişken arasındaki ilişki $R_i = h_i \tan(\theta_B/2)$ şeklindedir. Dolayısıyla, bir kullanıcı eğer bir UxNB’den hizmet alacaksa UxNB’nin kapsama yarıçapının içine düşmesi gerekmektedir ya da başka bir deyişle UxNB’ye olan iki boyutlu yer uzaklığı R_i ’den küçük olmalıdır.

Havadan yere kanal modeli, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi UxNB’nin bulunduğu 3 boyutlu konuma, kullanıcıların konumuna ve çevresel etkilere, yani şehir senaryolarına bağlıdır. ITU’nun önerdiği modele göre, ortalama yol kaybı, haberleşme bağlantılarının görüş hattı (Line-of-Sight, LoS) olasılığı kullanılarak elde edilebilir. Buna göre, ortalama



Şekil 5.1. Üç farklı tipteki İHA ile oluşturulan UxNB ağ senaryoları; (solda) kablo ile bağlı, (ortada) balon, (sağda) batarya ile çalışan UxNB ağları.

yol kaybı

$$PL_{i,k} = K_0 (h_i^2 + r_{i,k}^2) \left(P_{\text{LoS}}^{i,k} \mu_{\text{LoS}} + P_{\text{NLoS}}^{i,k} \mu_{\text{NLoS}} \right) \quad (5.2)$$

ile ifade edilir. Burada, i , UxNB'lerin endeksidir yani, $i \in \mathcal{N}$, k yerdeki kullanıcıların endeksidir. Ayrıca, K_0 , f_c taşıyıcı frekansına ve c ışık hızına bağlı olmak üzere, $\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right)^2$ ile tanımlanır. Ayrıca, $r_{i,k}$, k 'inci kullanıcı ile i 'inci UxNB arasındaki 2 boyutlu uzaklığı temsil eder ve $r_{i,k} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$ ile hesaplanır. Bununla birlikte, μ_{LoS} ve μ_{NLoS} sırasıyla LoS ve NLoS bağlantıların kayıplarını belirten katsayılardır. Son olarak, k 'inci kullanıcı ile i 'inci UxNB arasındaki bağlantının LoS olasılığı

$$P_{\text{LoS}}^{i,k} = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta \left(\arctan\left(\frac{h_i}{r_{i,k}}\right) - \alpha\right)\right)} \quad (5.3)$$

ile tanımlanır ve $P_{\text{NLoS}}^{i,k} = 1 - P_{\text{LoS}}^{i,k}$ biçimindedir. Burada, α ve β , şehir senaryosuna göre değişen katsayılardır. Her UxNB kendine tahsis edilen bant genişliğinde dikgen haberleşme yapmaktadır. Dolayısıyla, aynı hücre içindeki kullanıcılar girişimden etkilenmezler. Ancak, sistemdeki her UxNB aynı bantı kullandığı için hücreler arası girişim mevcuttur ve bu da bir kullanıcı iki veya daha fazla UxNB'nin kapsama alanına girdiğinde ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, i 'inci UxNB'den hizmet alan k 'inci kullanıcı için Sinyal Girişim Gürültü Oranı (Signal-to-Interference-Noise-Ratio, SINR)

$$\gamma_{i,k} = \frac{P_t G_0 / (\theta_B^2 PL_{i,k})}{P_t G_0 / \theta_B^2 \sum_{j \neq i} \rho_{j,k} / PL_{j,k} + W N_0} \quad (5.4)$$

biçiminde ifade edilir. Burada, P_t , UxNB antenin iletim gücünü belirtir, W , k 'inci kullanıcıya tahsis edilen bant genişliğidir ve N_0 , ortalaması sıfır eklenir beyaz Gauss gürültüsünün güç izgesel yoğunluğudur. Bunun yanında, $\rho_{j,k}$, k 'inci kullanıcının j 'inci UxNB'den girişim alıp almadığını belirten bir karar değişkenidir ve

$$\rho_{j,k} = \begin{cases} 1 & , r_{j,k} \leq R_j, \\ 0 & , \text{aksi takdirde,} \end{cases} \quad (5.5)$$

şeklinde tanımlanır. Görüldüğü gibi eğer k 'inci kullanıcı i 'inci UxNB'den hizmet alırken aynı zamanda $i \neq j$ şartıyla j 'inci UxNB'nin de kapsama alanına giriyorsa, bu havasal baz istasyonundan girişim aldığı anlamına gelmektedir.

Girişim teriminde bulunan yol kaybı SINR terimini oldukça karmaşık geometrilili bir fonksiyona dönüştürmektir. Bu nedenle, bu terim en kötü durum SINR terimine basitleştirilebilir. Bu noktada, girişim teriminde bağlantıların yalnızca LoS bağlantısı olduğu varsayılmaktadır. Bu durum, banliyö şehir senaryoları için oldukça tutarlı bir basitleştirmedir. Böylece, bazı düzenlemelerden sonra, SINR terimi

$$\gamma_{i,k} = \frac{\Gamma_{i,k}/d_{i,k}^2}{\sum_{j \neq i}^N \rho_{j,k}/d_{j,k}^2 + \Sigma_0} \quad (5.6)$$

biçiminde tekrar yazılabilir. Burada,

$$\Sigma_0 = \frac{\mu_{\text{LoS}} K_0 \theta_B^2 W N_0}{P_t G_0}, \quad (5.7)$$

$$\Gamma_{i,k} = \frac{\mu_{\text{LoS}}}{\mathbb{P}_{\text{LoS}}^{i,k} (\mu_{\text{LoS}} - \mu_{\text{NLoS}}) + \mu_{\text{NLoS}}} \quad (5.8)$$

ile ifade edilmektedir. Ayrıca, $d_{i,k}$, k 'inci kullanıcı ile i 'inci UxNB arasındaki 3 boyutlu uzaklığı tanımlar. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, eğer bir kullanıcı aynı anda birden fazla UxNB'nin kapsama alanına girerse, o durumda girişimden bahsedilebilir. Aksi takdirde, anten kazanç örüntüsünden dolayı, Eşitlik 5.6'daki girişim terimi ortadan kalkar ve bu terim SNR terimine dönüşür. Önerilen senaryolarda, SINR seviyesi, bir başarımlık kriteri olarak hesaba katılacaktır. Bunun için, UxNB konuşlandırma probleminde, hizmet alan bir kullanıcının en kötü durum SINR değerinin belli bir eşik değerinin üzerinde

olması garanti edilmektedir. Bu durum matematiksel olarak $\gamma_{i,k} \geq \gamma_{min}$ şeklinde yazılabilir. Bu kısıt, bir sonraki kısımda sunulacak olan konuşlandırma problemlerinin hepsinde kullanılacaktır.

Bir UxNB'nin hizmet verebileceği kullanıcı sayısı, iletim yapacağı güç sınırlı olduğundan dolayı N_{max} ile sınırlıdır. Bu kısıt da matematiksel olarak

$$\sum_k t_{i,k} P_{i,k} \leq P_{t,max} \quad (5.9)$$

biçiminde gösterilebilir. Burada, $t_{i,k}$, k 'inci kullanıcının i 'inci UxNB'den hizmet alıp almadığını belirten bir karar değişkenidir ve $t_{i,k} \in \{0, 1\}$ olarak tanımlıdır. Ayrıca, $P_{i,k}$, k 'inci kullanıcıya tahsis edilen gücü belirtmektedir. Önerilen problemlerde problemi basitleştirmek adına $P_{i,k} = P_{t,max}/N_{max}$ olarak sabit alınmaktadır.

5.3 Çoklu UxNB Konuşlandırma ve Kullanıcı Eşleştirme Problemi

Bu kısımda, çoklu UxNB konuşlandırma ve kullanıcı eşleştirme problemi oluşturulacaktır. Bu bölümdeki amaç, N tane UxNB'nin oluşturduğu bir haberleşme ağında, hizmet verilen kullanıcı sayısını enbüyütmek olduğundan, İHA tipinden bağımsız genel eniyileme problemi

$$\text{enbüyüt}_{T,h,x,y} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K t_{i,k} \quad (5.10)$$

kısıtlar

$$\sum_i t_{i,k} \leq 1, \quad k = 1, \dots, K, i \in \mathcal{N}, \quad (5.9a)$$

$$\sum_k t_{i,k} \leq N_{max}, \quad k = 1, \dots, K, i \in \mathcal{N}, \quad (5.9b)$$

$$\gamma_{i,k} \geq \gamma_{min}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{N}, \quad (5.9c)$$

$$t_{i,k} \in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K, i \in \mathcal{N}, \quad (5.9d)$$

$$x_{min} \leq x_i \leq x_{max}, \quad i \in \mathcal{N}, \quad (5.9e)$$

$$y_{min} \leq y_i \leq y_{max}, \quad i \in \mathcal{N}, \quad (5.9f)$$

$$\text{İHA'ya özgü kısıtlar sağlanmalıdır,} \quad (5.9g)$$

şelinde formüle edilir. Burada, Eşitlikler 5.9a ve 5.9b, sırasıyla, bir kullanıcının en fazla bir UxNB ile eşleşebileceğini ve bir UxNB'nin kaynaklarını kullanarak en fazla N_{\max} kullanıcıya hizmet verebileceğini garanti etmektedir. Eşitlik 5.9c, hizmet alacak kullanıcılar, yani $k \in \mathcal{K}$, üzerindeki bireysel QoS kısıtını ifade eder. Eşitlik 5.9d'deki $t_{i,k}$, ikili bir karar değişkenidir ve $\mathbf{T} = [t_1^T \cdots t_k^T \cdots t_K^T]^T$ şeklinde karar matrisini oluşturur. Burada, $t_k^T = [t_{1,k} \cdots t_{N,k}] \in \{0, 1\}$ şeklinde tanımlıdır. Bununla birlikte, Eşitlikler 5.9e ve 5.9f, dronların konuşlanabileceği 2 boyutlu koordinatların limitlerini göstermektedir. Her İHA tipinin kendine özgü bir kısıtı bulunmaktadır. Bu noktada, Eşitlik 5.9g'deki kısıt, kullanılan İHA tipine göre bu kısıtların sağlanması gerektiğini belirtmektedir.

Her UxNB için, $i \in \mathcal{N}$, kapsama alanı yarıçapı R_i ile ifade edilsin. Bu göre, eğer k 'inci kullanıcı, i 'inci UxNB'nin kapsama alanının içindeyse, $R_i \geq r_{i,k}, \forall i \in \{1, \dots, N\}$ şeklinde ifade edilebilir. Sonrasında, büyük M yöntemi kullanılarak, bu ifade tüm kullanıcılar için

$$R_i \geq r_{i,k} - M_1 (1 - t_{i,k}) \quad (5.11)$$

biçiminde genelleştirilebilir. Burada, M_1 , i 'inci UxNB ile herhangi bir kullanıcı arasındaki olası enbüyük uzaklığın biraz üzerinde değer alır. Bu yöntem ile, eğer $t_{i,k}$, 1 değerini alıyorsa, bu kısıt ilgili kullanıcı ve UxNB çifti için aktif hale gelmektedir ve bu durum, k 'inci kullanıcının i 'inci UxNB'nin kapsama alanı yarıçapının içinde bulunduğu anlamını taşır. Aksi takdirde, Eşitlik 5.11'deki kısıt gevşeyecektir ve k 'inci kullanıcı için önemsiz bir hal alacaktır.

Eşitlik 5.9c'deki QoS kısıtı,

$$h_i^2 + r_{i,k}^2 \leq \frac{\Gamma_{i,k}}{\gamma_{\min} \left(\sum_{j \neq i}^N \rho_{j,k} / d_{j,k}^2 + \Sigma_0 \right)} \quad (5.12)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. Bu noktada, $t_{i,k}$ ile $\rho_{j,k}$ arasındaki ayrımı yapmak önemlidir. $t_{i,k}$ karar değişkeni, k kullanıcısının i 'inci UxNB'den hizmet alıp almadığını belirlemede kullanılırken, $\rho_{j,k}$, aynı k kullanıcısının başka bir UxNB'den sinyal/girişim alıp almadığını belirtmektedir. Bu noktada, bir kez daha, $\rho_{j,k} = 0, \forall j, k$ durumunda, SINR teriminin

SNR'a dönüşeceğini unutmamak önemlidir. Kapsama alanı yarıçapı ve UxNB'nin çalışma yüksekliği birbiri ile $R_i = h_i \tan(\theta_B/2)$ şeklinde ilişkide olduğundan, yine büyük M yöntemi kullanılarak Eşitlik 5.12,

$$R_i^2 \leq \Phi(\mathbf{d}_k) + M_2(1 - t_{i,k}) \quad (5.13)$$

biçiminde tekrar yazılabilir. Burada,

$$\Phi(\mathbf{d}_k) = \frac{\Gamma_{\theta_B}/(1 + \cot^2(\theta_B/2))}{\gamma_{\min}\left(\sum_{j \neq i}^N \rho_{j,k}/d_{j,k}^2 + \Sigma_0\right)}, \quad (5.14)$$

$$\mathbf{d}_k = [d_{1,k} \cdots d_{N,k}]^T \quad (5.15)$$

ile ifade edilir. UxNB'lerin üzerinde bulunan antenin hüzmeye genişliği θ_B sabit olduğundan, Γ_{θ_B} hüzmeye genişliğinin bir fonksiyonuna dönüşür. Bunun yanında, M_2 değerinin seçimi Eşitlik 5.11'dakine benzer şekilde yapılır. Bu katsayı, $\Phi(\mathbf{d}_k)$ 'nin alabileceği en büyük değerin biraz üzerinde değer alır. Bu da, girişimin olmadığı duruma denk düşmektedir, yani $\rho_{j,k} = 0, \forall j, k$.

Böylece, eniyileme değişkeni \mathbf{h} 'yi \mathbf{R} ile değiştirerek Problem 5.10 aşağıdaki gibi tekrar formüle edilebilir.

$$\text{enbüyüt}_{\mathbf{T}, \mathbf{R}, \mathbf{x}, \mathbf{y}} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K t_{i,k} \quad (5.16)$$

kısıtlar

Eşitlikler 5.9a, 5.9b, 5.9d 5.9e, 5.9f ve 5.9g,

$$R_i \geq r_{i,k} + M_1(1 - t_{i,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{N}, \quad (5.15a)$$

$$R_i^2 \leq \Phi(\mathbf{d}_k) + M_2(1 - t_{i,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{N}. \quad (5.15b)$$

Yapılan bu değişikliklere karşın, Problem 5.16, içbükey ya da dışbükey olmayan bir karışık tamsayı programı problemidir. Bunun yanında, Eşitlik 5.9g'nin matematiksel olarak takip edilebilir bir forma sokulması gerekmektedir. Dolayısıyla, bir sonraki kısımda, İHA tipine özgü olası hareket kısıtları ve bunların matematiksel karşılıkları sunulacaktır.

Sonrasında, Kısım 5.5'te ise, Problem 5.16'i verimli biçimde çözebilmek için yeni bir algoritma önerilecektir.

5.4 İHA Tipine Özgü Kısıtlar

Bu kısım, her İHA tipinin fiziksel kısıtından kaynaklı yaşadıkları hareket kısıtlamaları hakkında bir bakış açısı vermektedir. İlk olarak, döner kanatlı batarya ile çalışan İHA'lar ele alınmaktadır. Her ne kadar bir hareket kısıtı yokmuş gibi görünse de, önceki kısımlarda belirtildiği gibi, bu araçların hareket kabiliyetlerinin önündeki en büyük engel batarya sürelerinin kısıtlı olmasıdır. Bu araçların düşük uçuş süresi probleminin üstesinden gelenebilmesi için, ikinci olarak, yer istasyonuna güç kablosu ile bağlı dronlar veya balonlar ele alınacaktır. Bu araçların ise hareket kabiliyeti bağlı oldukları güç kablosunun uzunluğu ile orantılıdır. Bu kısımda ele alınacak son kısıt ise, balon İHA'lar ile ilgilidir. Rüzgarlı bir havada, balon ağının başarımlarının analizinin yapılabilmesi için rüzgar hızı ile balon İHA'nın konumu arasında bir ilişki kurulacaktır. Tezin bu bölümünde, balonların Helyum gazı ile dolu olduğu ve herhangi bir itki sağlayan motor bulundurmadıkları varsayılmaktadır. Bu nedenle, yandan esen bir rüzgar, kolaylıkla balonun konumunu değiştirecektir.

Döner kanatlı bir İHA'nın güç tüketimine değinmeden önce, tüm UxNB tiplerinin haberleşme ve kontrol birimlerinin birbirinin özdeşi olduğunu ve aynı miktarda gücün tükettiklerini belirtmekte fayda vardır. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, bu birimlerde tüketilen gücün miktarı yaklaşık olarak 10 Watt olarak kabul edilmektedir ve çalışmanın devamında yalnızca uçmak için tüketilen güç ile ilgilenilmektedir.

5.4.1 Döner Kanatlı Bir İHA'nın Güç Tüketimi

Bu noktaya kadarki çalışmalar göstermektedir ki, hava yoğunluğu döner kanatlı bir İHA'nın güç tüketimini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Uluslararası Standart Atmosfer modeli hava yoğunluğunun yükseklikle değişimi belirlemektedir. Bu model, çeşitli irtifa aralıklarına göre değişim göstermektedir. İnsansız hava araçlarının kullanılması düşünülen yükseklikler ele alındığında bu modelin 6000 m'ye kadar olan kısmı bu çalışmada kullanılacaktır. Buna göre, Uluslararası Standart Atmosfer modeline göre daha karmaşık bir

yapıya sahip olan hava yoğunluğu

$$\rho = \rho_0 \exp(-u_0 h) \quad (5.17)$$

biçiminde deniz seviyesinden yüksekliğin üssel bir fonksiyonu olarak yaklaşıklştırılabilir [116]. Burada, $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ile ortalama deniz seviyesindeki hava yoğunluğunu belirtmektedir ve $u_0 = 9.7 \times 10^{-5}$ şeklinde bir katsayıdır. Sonuç olarak, Eşitlik 5.17'dan deniz seviyesinden yukarı çıkıldıkça havanın incelendiği sonucu çıkarılmalıdır.

Rüzgarlı bir havada, döner kanatlı N rotorlu bir İHA'nın havada asılı kalması için gereken toplam güç [40]

$$P_{\text{asılı}} = [(P_0 (1 + \mu) + P_{\text{rüzgar}}] \exp \left\{ \frac{u_0 h}{2} \right\} \quad (5.18)$$

ile hesaplanır. Burada,

$$P_0 = \frac{W_{\text{toplam}}^{3/2}}{\sqrt{2\rho_0 N A}}, \quad (5.19)$$

$$\mu = \frac{1}{8} \frac{C_{D0} c_b}{J^3 \pi R}, \quad (5.20)$$

$$P_{\text{rüzgar}} = \frac{1}{2} \rho_0 C_d A_d V^3 \quad (5.21)$$

biçimindedir. Bu eşitliklerde, A , tek bir pervanenin taradığı alandır, C_{D0} ve R , sırasıyla, pervane sürüklenme katsayısı ve her pervanenin yarıçapıdır, c_b kanat genişliği ve J pervane ilerleme oranını ifade eder. Bunun yanında, C_d ve A_d sırasıyla aracın sürüklenme katsayısını ve yanal alanını ifade etmektedir. Son olarak, V , yandan esen rüzgarın hızını belirtir ve birimi m/sn'dir.

Fiziksel sınırlardan dolayı, bataryaların motorlara iletebileceği gücün miktarı sınırlıdır. Bu durum, $P_{\text{asılı}} \leq P_{\text{max}}$ kısıtını ortaya çıkarmaktadır. Eşitlik 5.18'de aktarıldığı gibi, asılı kalma gücü $U_x N B$ 'nin çalışma irtifası, h ile üssel bir ilişki içerisinde. Çalışma irtifası, şehir rakımı h_c ile çalışma yüksekliği h_i 'nin toplamı ile elde edilir. Buna göre, $P_{\text{asılı}} \leq P_{\text{max}}$ kısıtı ele alındığında, her $U_x N B$ 'nin çalışma yüksekliği üstten sınırlı olmalıdır. Bu

sınır, matematiksel olarak

$$h_i \leq \frac{2}{u_0} \ln \left(\frac{P_{\max}}{P_0 (1 + \mu) + P_{\text{rüzgar}}} \right) - h_c = h_{\max} \quad (5.22)$$

ile ifade edilir. Böylelikle, Eşitlik 5.9g’de verilen hareket kısıtı, batarya ile çalışan UxNB için matematiksel bir forma dönüştürülmüş olur. Bunun yanında, h_i ile R_i arasındaki bağıntı kullanılarak Problem 5.16,

P1: (Batarya ile çalışan UxNB)

$$\text{enbüyüt}_{T, R, x, y} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K t_{i,k} \quad (5.23)$$

kısıtlar

Eşitlikler 5.9a, 5.9b, 5.9d 5.9e, 5.9f, 5.15a ve 5.15b,

$$R_i \leq h_{\max} \tan(\theta_B/2), \quad \forall i \in \mathcal{N}, \quad (5.23a)$$

biçimine dönüşmüş olur. Bu noktada, **P1** eniyileme problemine Eşitlik 5.9g’deki ifadenin yerine Eşitlik 5.23a kısıtının eklendiğine dikkat etmek önemlidir. Bu kısıt, yalnızca batarya ile çalışan İHA tipine özgü bir kısıttır.

5.4.2 Güç Kablosunun Boyu

Bu altkısımda, havasal ağı oluşturan UxNB’lerin batarya ile çalışan döner kanatlı İHA’lar yerine kablo ile sabit bir yer istasyonuna bağlı döner kanatlı ya da balon İHA’lardan oluştuğu durum ele alınacaktır. Bu tip araçlarda, aracın enerji gereksinimi yerde bulunan sabit istasyondan bir güç kablosu aracılığıyla yapıldığından, uçuş süresini etkileyen batarya kapasitesi gibi güç harcama kaygıları geçerli değildir. Ancak, sabit bir noktaya bu kablo ile bağlı olduklarından hareket kabiliyetleri bataryalı dronlar kadar fazla değildir.

İlk olarak, kablo ile bağlı döner kanatlı İHA’lar için, her bir UxNB’nin yere bağlı olduğu nokta olan yer istasyonunun koordinatları (x_s, y_s) , $\forall s \in \{1, \dots, N\}$ şeklinde tanımlansın. Buna göre, i ’inci UxNB’nin koordinatlarının yer üzerinde izdüşümü, yani (x_i, y_i) ile drona güç akışını sağlayan istasyonun arasındaki mesafe $(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 = r_{i,s}^2$ ile ifade edilir. Kablo uzunluğu L_{kablo} , UxNB’nin hareketinde sınırlayıcı etmen olduğundan,

bu durum,

$$r_{i,s}^2 + h_i^2 \leq L_{\text{kablo}}^2 \quad (5.24)$$

biçiminde bir hareket ya da konuşlanma kısıtı olarak ortaya çıkar. Bunun yanında, yer istasyonu ile UxNB arasındaki 2 boyutlu mesafenin enbüyük kablo uzunluğundan küçük olması gerekir, yani $r_{i,s} \leq L_{\text{kablo}}$. Böylece, kablo ile bağlı UxNB'lerin oluşturduğu bir ağda eniyi konuşlandırma ve kullanıcı eşleme problemi

P2: (Bağlı UxNB)

$$\text{enbüyüt}_{T, R, x, y, x_s, y_s} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K t_{i,k} \quad (5.25)$$

kısıtlar

Eşitlikler 5.9a, 5.9b, 5.9d 5.9e, 5.9f, 5.15a ve 5.15b,

$$R_i^2 \leq (L_{\text{kablo}}^2 - r_{i,s}^2) \tan^2(\theta_B/2), \quad i \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{N}, \quad (5.25a)$$

$$r_{i,s} \leq L_{\text{kablo}}, \quad i \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{N}, \quad (5.25b)$$

biçiminde formüle edilir.

Böylelikle, güç kablosunun uzunluğu, UxNB'lerin çalışma yüksekliğini kısıtlayan bir parametre olduğundan, konuşlama problemindeki en önemli değişkenlerden biri olmaktadır. Problem **P2**'de, yer istasyonunun koordinatları eniyileme değişkenlerinden olsa da gerçek hayattaki bir senaryoda yer istasyonunun konuşlanma koordinatları değişken parametreler olarak ele alınmaz. Çünkü yer istasyonunun pozisyonunu kullanıcı konumlarına göre değiştirmek oldukça maliyetli bir süreci beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, benzetim çalışmalarında, yer istasyonlarının konumları sabit olarak kabul edilmiştir.

Bağlı balon UxNB durumunda ise, üzerinde herhangi bir itki sağlayan motor bulunmadığında, araç yer istasyonu üzerinde uçuş hareketi yapar. Sonuç olarak, yer istasyonunun koordinatları ile balon UxNB'nin iki boyutlu koordinatları birbirinin aynısıdır, yani $(x_s, y_s) = (x_i, y_i)$. Bu durumda, bu iki nokta arasındaki mesafeyi sıfırlamaktadır, yani $r_{i,s}$. Bununla birlikte, eniyileme problemine balonun yüksekliği dahil edilebilir ve bu da maksimum kablo boyu ile sınırlıdır. Böylece, konuşlandırma probleminde, kablo ile bağlı

dron probleminin aksine, yer istasyonun konumunu ve balonun yüksekliği aynı anda yapılmaktadır. Bu nedenle, r_s değişkeni bir eniyileme parametresi olmaktan çıkmaktadır. Böylelikle, balon UxNB'ler için Problem 5.16,

P3: (Balon UxNB)

$$\text{enbüyüt}_{T, R, x, y} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K t_{i,k} \tag{5.26}$$

kısıtlar

$$\begin{aligned} &\text{Eşitlikler 5.9a, 5.9b, 5.9d 5.9e, 5.9f, 5.15a ve 5.15b,} \\ &R_i \leq L_{\text{kablo}} \tan(\theta_B/2), \quad i \in \mathcal{N}, \tag{5.26a} \end{aligned}$$

olarak tekrar yazılabilir.

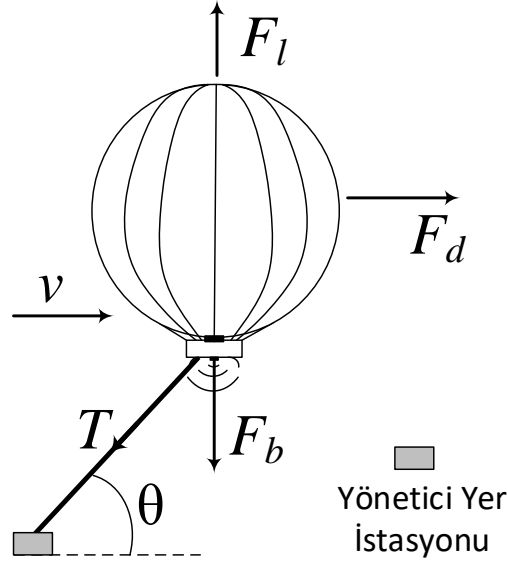
Özetle, her İHA tipine özgü üç farklı eniyileme problemi tanımlanmıştır. Batarya ile çalışın İHA'ların batarya ömrü, bu İHA tipine maksimum uçabileceği yükseklik olarak bir kısıt getirmektedir. Bunun yanında, hem döner kanatlı dron hem de balon ağları için, kablo uzunluğu önerilen problemlerde ele alınmıştır. Son olarak, bir sonraki altkısımda, balon UxNB ağı için, pozisyon belirsizliğine yol açın yeni bir kısıt ortaya konacaktır.

5.4.3 Rüzgara Bağlı Değişen Pozisyon

Balonlar, yukarıda da belirtildiği gibi uçmak için herhangi bir güç harcamazlar. Ancak, rüzgar hızı ve yönüne bağlı olarak belli bir miktarda eğilmelerinden dolayı buldukları pozisyon değişmektedir. Bu iki değişkeni (eğilme açısı ve rüzgar hızı) birbirine ilişkilendirebilmek için, Şekil 5.2'deki gibi Helyum dolu bir balonun yerde rasgele bir noktada bulunan yer istasyonuna bağlı olduğu varsayılınsın. Buna göre, balonun üzerine etki eden kuvvetler Şekil 5.2'de gösterildiği gibidir. Hızı V olan yandan esen bir rüzgar, F_d sürüklenme kuvvetine neden olmaktadır ve bu kuvvet

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_{db} A_b V^2 \tag{5.27}$$

ile ifade edilir. Burada ρ , hava yoğunluğu, C_{db} , balonun sürüklenme katsayısı ve A_b , balonun kesit alanıdır. Arşimet prensibine göre, V_b hacmindeki bir balona etki eden kaldırma



Şekil 5.2. Bağlı balonun üzerine etki eden kuvvetler.

kuvveti $F_l = \rho V_b g$ ile hesaplanır. Burada, g yer çekimi ivmesidir. Bu kuvvetlere ek olarak, aşağı yönlü F_b kuvveti, balonun üzerindeki radyo erişim birimi, balonu tutan halatlar, balon lateksi ve Helyum gazının ağırlıklarının toplamı olarak tanımlanmaktadır. Bu da matematiksel olarak $F_b = mg + \rho_{\text{He}} V_b g$ gösterilir. Burada, ρ_{He} , Helyum gazının yoğunluğunu ifade etmektedir ve 0.1645 kg/m^3 'e eşittir. Son olarak, T , balonu yere bağlayan güç kablosunun üzerindeki gerilimdir. Balonu tutan güç kablosu kopmadığı sürece, balona etki eden kuvvetlerin dengede olduğu açıktır. Böylelikle, bu kuvvetler arasında

$$F_d = T \cos \theta, \quad (5.28)$$

$$F_b - F_l = T \sin \theta, \quad (5.29)$$

bağıntıları yazılabilir. Burada, θ , Şekil 5.2'de gösterildiği gibi eğilme açısını belirtmektedir. Gerekli işlemler yapıldıktan sonra, rüzgar hızı ile eğilme açısı arasındaki matematiksel ifade

$$\cot \theta = v^2 \left(\frac{\rho C_{db} A_b}{2 (V_b (\rho - \rho_{\text{He}}) - m) g} \right), \quad (5.30)$$

şeklinde formüle edilebilir.

Çizelge 5.1. Beaufort Rüzgar Ölçeği

Derece	Rüzgar Tanımı	Hız (m/sn)	Etki
0	Sakin	0 – 0.2	Duman dikine yükselir.
1	Esinti	0.3 – 1.5	Duman hafif eğilir.
2	Hafif Rüzgar	1.6 – 3.3	Rüzgar gülü harekete geçer.
3	Latif Rüzgar	3.4 – 5.4	Bayraklar hafif dalgalanır.
4	Mutedil Rüzgar	5.5 – 7.9	Yapraklar devamlı sallanır.
5	Fırışka Rüzgar	8 – 10.7	Yapraklı küçük ağaçlar sallanır.
6	Kuvvetli Rüzgar	10.8 – 13.8	Büyük dallar sallanır.
7	Mutedil Fırtına	13.9 – 17.1	Bütün ağaçlar sallanır.
8	Fırtına	17.2 – 20.7	Rüzgara karşı yürümek çok zordur.
9	Kuvvetli Fırtına	20.8 – 24.4	Çatıdaki kiremitler uçar.
10	Büyük Fırtına	24.5 – 28.4	Ağaçları kökünden söker.
11	Bora	28.5 – 32.6	Geniş çapta hasara neden olur.
12	Kasırğa	32.7 ve üzeri	Büyük tahribat yapar.

Literatürde, rüzgar hızları, meteorolojik çalışmalar sonucunda, denizler, kıyıları ve karalar üzerinde farklı tanımları olacak şekilde sınıflandırılmıştır [140]. Rüzgarın şiddetini belirtmek için birden fazla yöntem olmakla birlikte, bu çalışmada Beaufort ölçeğine göre yapılan şiddet sınıflandırılması kullanılmaktadır. Beaufort ölçeği, rüzgarları "Sakin"den "Kasırğa"ya kadar 13 farklı kategoriye ayırmıştır [141]. Sakin şiddetinde rüzgarlar 0 – 0.2 m/sn ile eserken, kasırğa şiddetinde rüzgar hızı 32 m/sn ve daha fazlasıdır. Beaufort ölçeği, Çizelge 5.1’de rüzgarların yaptığı etki de eklenerek verilmektedir.

Elbette çok şiddetli rüzgarlar altında, ne döner kanatlı dronlar ne de balonlar hizmet veremez. Bu sebeple, tezin bu bölümünde, kuvvetli rüzgar kategorisine kadar olan rüzgar hızları altında sistem başarımı incelenmiştir. Döner kanatlı İHA’ların yandan esen bir rüzgara karşı statik durabilmek için harcadığı güç de Eşitlik 5.18’de $P_{\text{rüzgar}}$ olarak verilmektedir. Bu terim, hem hava yoğunluğunun hem de rüzgar hızının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, rüzgarın varlığı döner kanatlı dronlar için ekstra bir güç terimi olarak ortaya çıktığından Problem **P1** ve **P2**’de herhangi bir değişikliğe neden olmaz.

Balon İHA durumunda ise, rüzgarın varlığı, balon UxNB’nin pozisyonunda değişikliğe neden olmaktadır. Bu da Problem **P3** ile elde edilen kullanıcı eşleştirme sonucunu etkilemektedir. Eniyileme probleminin çözümü sonucunda balon UxNB’ler tarafından hizmet alan kullanıcılarının bazıları, esen rüzgar ile konumun değişmesinden dolayı kapsama

alanı dışında kalmaktadır. Dolayısıyla, çözüm yaklaşımında bu durumda incelenmesi gerekmektedir. Sonraki kısımda çözüm yaklaşımının detayları sunulacaktır.

5.5 Ortak Çoklu UxNB Konuşlandırma ve Kullanıcı Eşleştirme için Çözüm Yaklaşımı

Bu kısımda, Problem 5.16 için getirilen çözüm yaklaşımı sunulacaktır. Bu yaklaşım, literatürde bilinen iki tekniğin birleşimi ile oluşturulmuştur. Bunlar, K -means kümeleme yöntemi ve dışbükeylerin farkı (difference of convex functions, DC) programlamadır. Üç eniyileme problemi arasındaki benzerliklere karşın, Problem **P1**, **P2** ve **P3**'ün çözüm yöntemleri arasında küçük farklılıklar bulunmaktadır. Bu kısmın devamında, öncelikle, önerilen çözümün ilk adımı olan K -means kümeleme yönteminin kullanımı, daha sonra DC programlama tanıtılacaktır.

5.5.1 K -Means Kümeleme

Önerilen algoritmada, yerdeki kullanıcıların 2 boyutlu konumlarının mükemmel biçimde bilindiği ya da kestirilebildiği varsayılmaktadır. Böylelikle, K -means algoritması kullanıcı koordinatlarını kümelemek için kullanılmaktadır. Burada, küme sayısı ile UxNB sayısının aynıdır. Sonuçta ortaya çıkan küme merkezleri, UxNB'lerin 2 boyutlu yersel koordinatlarını, yani, $(x_i, y_i), \forall i \in \mathcal{N}$ değerlerini belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu şekilde elde edilen UxNB konumları, yer istasyonları sabit olan güç kablosu ile bağlı dronlar göz önüne alındığında Eşitlik 5.25b dolayısıyla Problem **P2**'nin olursuz olmasına yol açabilir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için önerilen algoritmada, elde edilen UxNB konumu ile Eşitlik 5.25b'nin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Eğer sağlanmıyorsa, elde edilen UxNB koordinatları yer istasyonuna doğru bu kısıt sağlanacak şekilde yaklaştırılmaktadır.

İki boyutlu UxNB konumlarının bulunmasının ardından, eniyileme problemleri yalnızca kapsama alanı yarıçapını ve kullanıcı eşleşmelerini belirleme problemine dönüşmektedir. Geometrik açıdan bakıldığında ise, Eşitlik 5.15b dışında tüm kısıtlar doğrusal fonksiyon haline gelmektedir. Böylelikle, eniyileme problemleri bir sonraki altkısımda bahsedilecek DC programlama uygulamaya uygun bir biçime getirilmiş olur.

5.5.2 DC Programlama

DC programlama ve DC algoritması (DCA) ilk olarak 1985'te geliştirilmiştir [137] ve o zamandan beri doğrusal olmayan ve dışbükey olmayan problemler içeren bir çok çalışmada kullanılmaktadır [135, 136, 142, 143].

Tanım 1 $C \subset \mathbb{R}^n$ şeklinde dışbükey bir altkümede tanımlı, gerçek değerli bir fonksiyon olan $f : C \rightarrow \mathbb{R}$, eğer $h, g : C \rightarrow \mathbb{R}$ şeklinde tanımlı iki dışbükey fonksiyon tarafından

$$f(x) = g(x) - h(x) \quad (5.31)$$

şeklinde tanımlanabiliyorsa, C kümesinde DC olarak tanımlanır. Eğer $C = \mathbb{R}^n$ ise DC fonksiyon olarak adlandırılır. Genel anlamda DC program,

$$\min \{f_0(x) : x \in C, f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m\} \quad (5.32)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $C \subseteq \mathbb{R}^n$ olmak üzere boş küme olmayan bir dışbükey kümedir ve $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ($i = 0, 1, \dots, m$), DC fonksiyonlardır.

Bu tanımlara göre, tüm dışbükey, içbükey ve doğrusal fonksiyonlar, DC fonksiyon olarak tanımlanabilirler.

DCA, Eşitlik 5.32'de bulunan genel DC problemini çözmek için geliştirilen yinelemeli bir algoritmadır. DCA'nın arkasındaki ana fikir dışbükey olmayan programı, dışbükey program serileri olacak şekilde yaklaşıkştirmektedir. Her yinelemede, önceki adımdaki yaklaşıkleştirilmiş dışbükey problemin çözümü, yeni adımın başlangıç noktası olacak şekilde kullanılır. DC algoritmasının yakınsama özellikleri [137] no.lu kaynakta detaylıca anlatılmıştır (bkz. Kısım 3).

DCA, [135] no.lu kaynakta, maliyet fonksiyonuna bir penaltı ekleyerek tamsayı değişkenleri süregelen biçimine dönüştürerek gevşetilmiş karışık tamsayı doğrusal problemi olarak çözmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki yöntem benzer şekilde, eğer Problem **P1**, **P2** ve **P3**'ün maliyet fonksiyonuna bir penaltı terimi eklenerek tamsayı değişkenler gevşetirse, bu problemler, sürekli değişkenlerin olduğu biçime girerler. Bu noktada, [135]

no.lu kaynakta önerilen penaltı terimi $p(t_{i,k}) = -\beta t_{i,k}(1 - t_{i,k})$ şeklindedir ve β yeterince büyük seçildiğinde $t_{i,k}$ değerleri 0 veya 1'e yakınsayacaktır. Böylece, Problemler **P1**, **P2** ve **P3**'ün maliyet fonksiyonları doğrusal ve içbükey fonksiyonların toplamı olduğundan, bu problemlerin maliyet fonksiyonları DC olarak tanımlanır.

Tüm problemlerdeki, Eşitlik 5.15b dışında her kısıt, ya dışbükey ya da doğrusaldır. Ancak Eşitlik 5.15b bir DC fonksiyondur. Bu eşitlik

$$R_i^2 - \Phi(\mathbf{d}_k) - M_2(1 - t_{i,k}) \leq 0 \quad (5.33)$$

şeklinde tekrar yazıldığında, hem R_i^2 hem de $\Phi(\mathbf{d}_k)$ dışbükey fonksiyonlar olduğundan, sonuçta ortaya çıkan fonksiyon da DC bir fonksiyon olacaktır. Bu noktada, problemler doğrusal bir hale dönüştürülebilir. Bunun için, eniyileme değişkeni R_i 'den R_i^2 'ye değiştirilmelidir. Bununla birlikte, $R_i^2 = U_i$ dönüşümü de yapıldığında problemler doğrusal hale gelir. Bu noktada,

$$\text{enbüyüt}_{T,U} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K t_{i,k} + p(t_{i,k}^l) + \nabla p(t_{i,k}^l)(t_{i,k} - t_{i,k}^l) \quad (5.34)$$

kısıtlar

Eşitlikler 5.9a, 5.9b, 5.9d 5.9e ve 5.9f,

$$U_i \geq r_{i,k}^2 + M_3(1 - t_{i,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{N}, \quad (5.34a)$$

$$U_i \leq \Phi(\mathbf{d}_k^l) + \nabla \Phi(\mathbf{d}_k^l)(U_i - U_i^l) + M_4(1 - t_{i,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{N}, \quad (5.34b)$$

$$U_i \leq E_{\text{İHA}} \tan^2(\theta_B/2), \quad i \in \mathcal{N}, \quad (5.34c)$$

$$0 \leq t_{i,k} \leq 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{N}, \quad (5.34d)$$

eniyileme problemi, l 'inci yinelemede çözülmek üzere DC algoritması koşturulur. Burada, $E_{\text{İHA}}$ bataryalı dronlar için h_{max}^2 , bağlı dronlar için $(L_{\text{kablo}}^2 - r_{i,s}^2)$ ve balon için L_{kablo}^2 değerlerine eşittir. Bununla birlikte, M_3 ve M_4 değerleri, Eşitlik 5.11'de belirtilen şekilde

seçilmektedir. Ayrıca,

$$\nabla p(t_{i,k}^l) = -\beta(1 - 2t_{i,k}^l), \quad (5.35)$$

$$\nabla \Phi(\mathbf{d}_k^l) = \begin{cases} 0 & , \text{ eğer } i = j \\ A \frac{\rho_{j,k}}{[\Sigma'_0 (r_{j,k}^2 \tan^2(\theta_B/2) + U_i^l) + \rho_{j,k}]^2} & , \text{ eğer } i \neq j \end{cases} \quad (5.36)$$

biçimindedir. Burada

$$A = \frac{\Gamma_{\theta_B} / (1 + \cot^2(\theta_B/2))}{\gamma_{min} \tan^2(\theta_B/2)}, \quad (5.37)$$

$$\Sigma'_0 = \Sigma_0 / \tan^2(\theta_B/2) \quad (5.38)$$

ile ifade edilmektedir. Algoritma belli bir değere yakınsadığında, $t_{i,k}$ 0 veya 1'e yuvarlanmaktadır. Uçuş dinamikleri ve bireysel QoS kısıtları altında ağda çalışan kullanıcı sayısını enbüyüten çoklu UxNB konuşlandırma problemi için önerilen algoritmanın detayları Algoritma 2'de verilmiştir.

Algoritma 2 K -means algoritması ve DC programlama yardımı ile hizmet alan kullanıcı sayısını enbüyük yapan konuşlandırma algoritması.

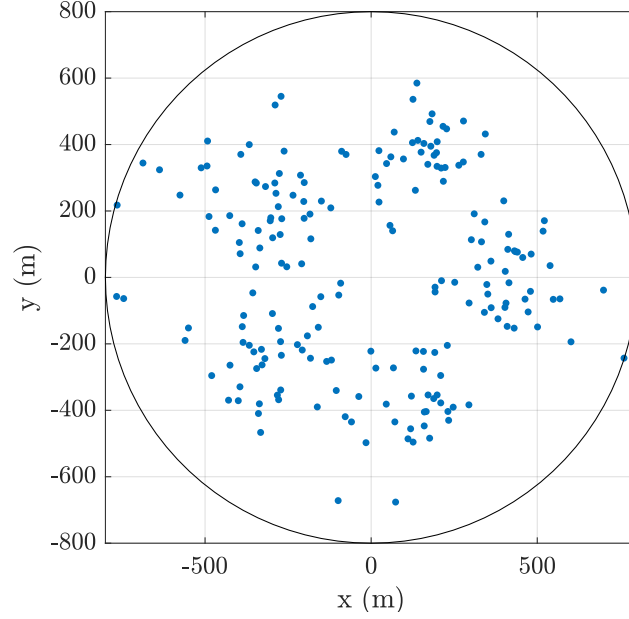
Girdi: Kullanıcıların konumları $(x_k, y_k), \forall k \in \{1, \dots, K\}$, UxNB sayısı, $N, \beta, M_3, M_4, \epsilon_1$ ve ϵ_2 .

Çıktı: UxNB'lerin konuşlanma koordinatları, $(x_i, y_i, h_i), \forall i \in \mathcal{N}$, ve kullanıcı eşleştirme matrisi \mathbf{T} .

- 1: Kullanıcı koordinatlarına K -means algoritmasını uygula ve kümelerin merkez noktalarını elde et, (x_i, y_i) .
 - 2: **if** Bağlı UxNB konuşlandırılması yapılıyorsa, **then**
 - 3: $r_{i,s} \leq L_{\text{kablo}}$ koşulunu kontrol et.
 - 4: **if** Sağlanmıyorsa **then**
 - 5: (x_i, y_i) 'yi sağlanacak şekilde güncelle.
 - 6: **end if**
 - 7: **end if**
 - 8: Olurlu bir başlangıç noktası seç, $(t_{i,k}^0, U_i^0)$.
 - 9: $j = 0, \text{tol}_1 = 10^5$ ve $\text{tol}_2 = 10^5$ şeklinde belirle.
 - 10: **while** $\text{tol}_1 \geq \epsilon_1$ **and** $\text{tol}_2 \geq \epsilon_2$ **do**
 - 11: Hesapla $\nabla p(t_{i,k}^j), \nabla \Phi(\mathbf{d}_k^j)$
 - 12: Problem 5.34'ü çöz ve $(t_{i,k}^{j+1}, U_i^{j+1})$ çiftini elde et.
 - 13: $\text{tol}_1 = \|U^{j+1} - U^j\|_2$ ve $\text{tol}_2 = \|\mathbf{t}^{j+1} - \mathbf{t}^j\|_2$ şeklinde belirle. Burada $\mathbf{t} = [t_1^T \dots t_K^T]^T \in \mathbb{R}^{KN}$ şeklinde yaz.
 - 14: $j = j + 1$.
 - 15: **end while**
 - 16: $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^{KN}$ değerlerini $\tilde{\mathbf{t}} \in \{0, 1\}$ olacak biçimde yuvarla.
 - 17: $h_i^* = \sqrt{U_i^j} / \tan(\theta_B/2), \forall i \in \mathcal{N}$ ve $\mathbf{t} = \tilde{\mathbf{t}}$ şeklinde belirle.
 - 18: **if** Balon UxNB konuşlandırılması yapılıyorsa **then**
 - 19: Rastgele bir yön belirle.
 - 20: Rüzgar hızına göre eğilme açısını Eşitlik 5.30'a göre belirle.
 - 21: Eğilme açısına göre (x_i, y_i) 'yi güncelle.
 - 22: Kullanıcı eşleştirme vektörü \mathbf{t} 'yi yeni koordinatlara göre güncelle.
 - 23: **end if**
 - 24: **return** $(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*, \mathbf{h}^*, \mathbf{t}^*)$
-

5.6 Sayısal Bulgular

Bu kısımda, İHA tipine özgü ağ kurulum problemleri Problem **P1**, **P2** ve **P3**, çeşitli başarım kriteri altında incelenmektedir. Tipik bir İHA'nın teknik ve fiziksel özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Ayrıca, benzetimlerde kullanılan değişkenler, Çizelge 5.3'te bulunabilir. Yoğun alan (hotspot area) sayısının 5, ağdaki toplam kullanıcı sayısının 200 olarak belirlendiği bir senaryoda, kullanıcılar, her bir yoğun alandaki kullanıcı sayısı Poisson dağılımlı olarak ve kullanıcıların konumları ise bu yoğun alanların etrafına kesilmiş Gauss dağılımı (truncated Gauss distribution) kullanılarak dağıtılmışlardır. Eğer 5 adet yoğun



Şekil 5.3. Kullanıcıların 5 yoğun alana sahip 800 m yarıçaplı bir alana kesik Gaus dağılımı ve tekdüze dağılım ile dağıtılmasına bir örnek

alana bu şekilde dağıtılan kullanıcılardan ardakalan kullanıcılar varsa, bu kullanıcılar tüm alana tekdüze olarak dağıtılmaktadırlar. Buna göre, 800 m yarıçaplı bir alanda kullanıcı dağılımı örneği, Şekil 5.3'te görülebilir.

Benzetimlerde bataryalardan çekilen güç, P_{max} , 2 m/sn hızla esen rüzgarlı bir havada, deniz seviyesinde tüketilecek olan gücün, yani $P_o (1 + \mu) + P_{rüzgar}$ değerinin %5'i olan 2540 W ile sınırlandırılmıştır. Bu noktada, rüzgardan kaynaklanan ekstra güç harcaması $P_{rüzgar}$ 'ın değerinin 3.35 W olduğunu belirtmekte fayda vardır. Görüldüğü gibi havada asılı kalmak için harcanan güç, haberleşme için tüketilen güçte olduğu gibi rüzgara karşı koymak için de harcanan gücün binlerce katıdır. Bunun yanında hizmet kalitesi kısıtı, γ_{min} tüm benzetimlerde 10 dB olarak alınmıştır. Benzetimlerde ilk olarak batarya ile çalışan UxNB ağının başarımı, daha sonra sırasıyla, kablo ile bağlı UxNB ve balon UxNB ağlarının başarımları Kısım 5.4'te bahsi geçen parametrelere göre incelenmektedir. Daha sonra, ortak ağ parametreleri altında üç UxNB ağı kıyaslanmaktadır.

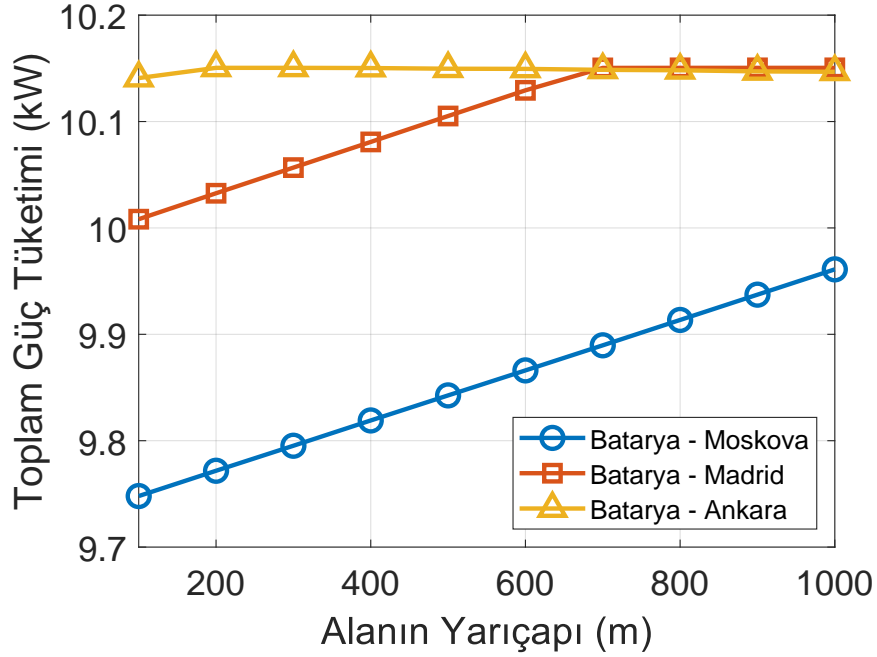
Şekil 5.4'te, kapsanmak istenen alanın yarıçapına göre batarya ile çalışan 4 tane UxNB bulunan bir ağdaki toplam güç tüketimi eğrileri üç farklı başkent, Moskova (124 m), Madrid (667 m) ve Ankara (938 m) için gösterilmektedir. Havada asılı kalmak için gerekli gücün 2500 W civarında kısıtlanmasının sonucu olarak 4 adet UxNB bulunan Ankara'ya kurulan bir ağda toplam güç harcaması görüldüğü gibi kapsanmak istenen alanın yarı-

Çizelge 5.2. Benzetimlerde Kullanılan Döner Kanatlı İHA'ların Özellikleri

Teknik veya Fiziksel Özellik	Değer
Pervane çapı, $2R$	558.8×10^{-3} m
Pervane genişliği, c_b	167.6×10^{-3} m
Pala, Rotor ve Batarya Sayısı	2, 4, 8
Kanat Sürüklenme Katsayısı, C_{D0}	1.57×10^{-3}
Aracın Ağırlığı, W_V	10 kg
Faydalı yük, W_P	2, 04 kg
Batarya Ağırlığı, W_B	2 kg
Batarya Gerilimi, V_b	24.5 V
Batarya Kapasitesi, E_C	16000 mAh
Maksimum motor devri, ω_{\max}	6800 rpm
Kablo Uzunluğu, L_{kablo}	1100 m
Kablo Ağırlığı, m	17.8 kg/km
Sürüklenme Katsayısı \times Yanal Alan, $C_d \times A_d$, [94]	0.67 m^2

Çizelge 5.3. Benzetim parametreleri

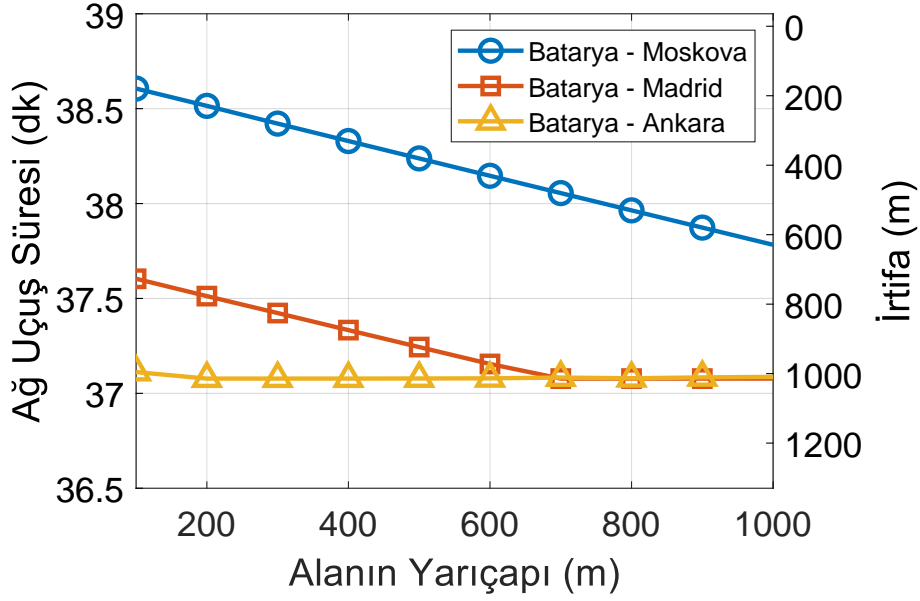
Parametre	Değer
$(\alpha, \beta, \mu_{\text{LoS}}, \mu_{\text{NLoS}})$	(4.88, 0.43, 0.1, 21)
Taşıyıcı frekansı, f_c	2.5 GHz
Bantgenişliği, W	20 MHz
Kullanıcı sayısı	200
Hüzme genişliği, θ_B	80°
Gerçekleştirme sayısı	100
Rüzgar Hızı, v	2 m/sn
Gürültü güç izgesel yoğunluğu (PSD)	-174 dBm
Yoğun Alan Sayısı	5
Bir İHA'nın hizmet verebileceği kullanıcı sayısı, N_{\max}	150



Şekil 5.4. Bataryalı dört tane UxNB bulunan bir ağda Moskova (124 m), Madrid (667 m) ve Ankara (938 m) için kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak ağdaki toplam güç tüketimi eğrileri.

çapı ile değişmemektedir. Bunun nedeni, bu şehirde kurulan ağdaki UxNB'lerin hepsinin uçabilecekleri maksimum yükseklikte uçuyor olmasıdır. Ayrıca buradan, havasal baz istasyonlarının uçmak için kendilerine verilen sınırlarda güç tükettiği söylenebilir. Bunun da haberleşme birimi ve elektronik devrelerinde tüketilen gücün binlerce kat üzerinde olduğu görülmektedir. Madrid'te kurulan ağda ise tüketilen toplam güç 700 m'lik yarıçapa sahip bir alanda sınırına ulaşmaktadır. Buna karşılık daha dar alanlarda kurulan UxNB haberleşme ağında UxNB'ler daha alçak konumlarda konuşlanabileceğinden toplam tüketim daha azdır. Deniz seviyesine en yakında bulunan Moskova'da ise UxNB'lerin uçabilecekleri en yüksek irtifa 1000 m'yi bulduğundan UxNB'ler bu kadar yükseğe çıkmadan ağdaki kapsamayı enbüyütmektedir. Bunun sonucu olarak da ağdaki tüketilen toplam güç diğer şehirlerde kurulan ağlara göre en az olmaktadır.

Ağdaki harcanan toplam gücün yanında, ağ ömrü de UxNB ağında önemli parametrelerden biridir. Şekil 5.5'te ağ ömrü eğrileri üç farklı şehir için kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 5.5'te sağ dikey ekseninde en yüksekte uçan UxNB'nin deniz seviyesine göre uçuş yüksekliği belirtilmektedir. Burada, ağ ömrü hesaplanırken ağdaki herhangi bir UxNB'nin bataryasının tükenmesi ve

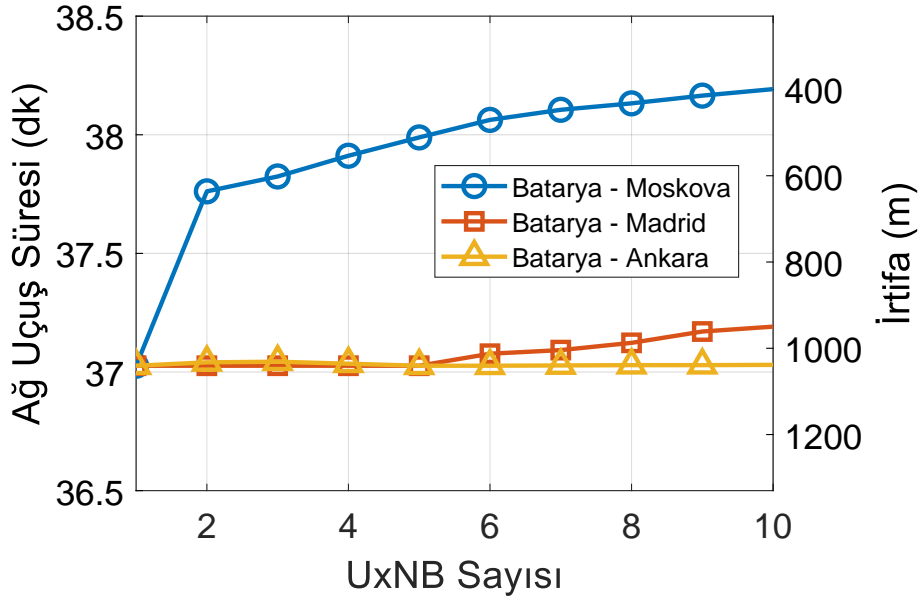


Şekil 5.5. Bataryalı İHA sayısı dört olan bir ağda, Moskova (124 m), Madrid (667 m) ve Ankara (938 m) için kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak ağ uçuş süresi (solda) ve buna karşılık gelen deniz seviyesinden yükseklik (sağda) eğrileri.

hizmet verememesi durumu ele alınmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi ağdaki harcanan toplam güç ile ağ ömrü arasında ters orantı vardır. Uçmak için gücü kısıtlanan insansız hava araçlarının Ankara'da deniz seviyesinden yaklaşık 1000 m, zeminden ise -şehir rakımı çıkarıldığında- yaklaşık 62 m yükseklikte uçabilmektedir. Bu durum ağ ömrünün kapsanmak istenen alanın yarıçapı ile değişmemesine neden olmaktadır. Çünkü U_{xNB} 'ler tüm yarıçap değerleri için uçabileceği en yüksek irtifada seyretmektedir. Bunun yanında, Moskova'da ise kapsanmak istenen alanın yarıçapı arttıkça ağ ömrünün azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni kapsanmak istenen alanın genişliği arttıkça U_{xNB} 'lerin hizmet verilen kullanıcı sayısını enbüyütmek için daha yükseğe konuşlanması gerekmektedir. Yarıçapı 100 m olan bir alan için 200 m'de uçuşması gereken U_{xNB} 'ler, yarıçap arttıkça 600 m'nin de üzerinde bir yükseklikte konuşlanmaktadır. Madrid şehrinde ise, U_{xNB} 'lerin 700 m'lik alan yarıçapına kadar serbestçe istenen yüksekliğe konuşlandırılabilirdiği görülmektedir. Daha büyük yarıçaplarda, Problem 5.10'daki enbüyük yükseklik kısıtı aktif olmaktadır ve dronların uçtukları yükseklikler sabitlenmektedir. Bunların yanında, Şekil 5.5'te bataryalı dronlar kullanılarak oluşturulan bir ağda, ağ ömrünün düşük rakımlı şehirlerde yüksek rakımlı şehirlere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Kapsanmak istenilen alanın yarıçapının 800 m olarak belirlendiği bir ağda, bataryalı UxNB sayısının 1'den 10'a kadar değişimi sonucu elde edilen ağ ömrü eğrileri Şekil 5.6'da sunulmaktadır. Ağ ömrü ile en yüksek irtifaya konuşlanan UxNB'nin bulunduğu yükseklik arasındaki ters orantı Şekil 5.6'da iki dikey eksene bakılarak anlaşılabilir. Moskova'da bulunan ağdaki UxNB sayısının 2'ye çıkması ile ağ ömrünün yaklaşık olarak 45 saniye arttığı görülmektedir. Ancak daha çok UxNB'nin ağa katılması ağ ömründe buna benzer bir artış sağlamamaktadır. Bataryalı UxNB sayısının 10 olduğu Ankara'daki bir ağ ile Moskova'daki bir ağın arasındaki ağ ömrü farkı yaklaşık 1 dakika 25 saniye mertebesinde olmaktadır. Bunun yanında, Madrid'te 5 tane UxNB'ye kadar kullanılan UxNB'lerin içinde en az biri deniz seviyesinden 1000 m yukarıda konuşlanmaktadır. Bu durumda da ağ ömrü Madrid ve Ankara'da 37 dakika olarak gerçekleşmektedir. Ancak daha fazla havasal baz istasyonunun ağa katılması ile en yüksekte uçan UxNB'nin bulunduğu yükseklik azalmaya başlamaktadır ve bununla birlikte ağ ömrü artmaktadır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da da görüldüğü gibi bataryalı bir UxNB'nin motorlarından çekilen güç sınırlansa dahi yüksek rakımlı şehirler için ağ ömrü ancak belirli bir seviyede tutulabilmektedir. Buna göre ağ ömrünü arttırabilmek için ya kapsanmak istenilen alanın dar tutulması ya da UxNB sayısının çok arttırılması gerekmektedir. Ancak, bunlar da pratik senaryolar için gerçekçi çözümler olmayabilir.

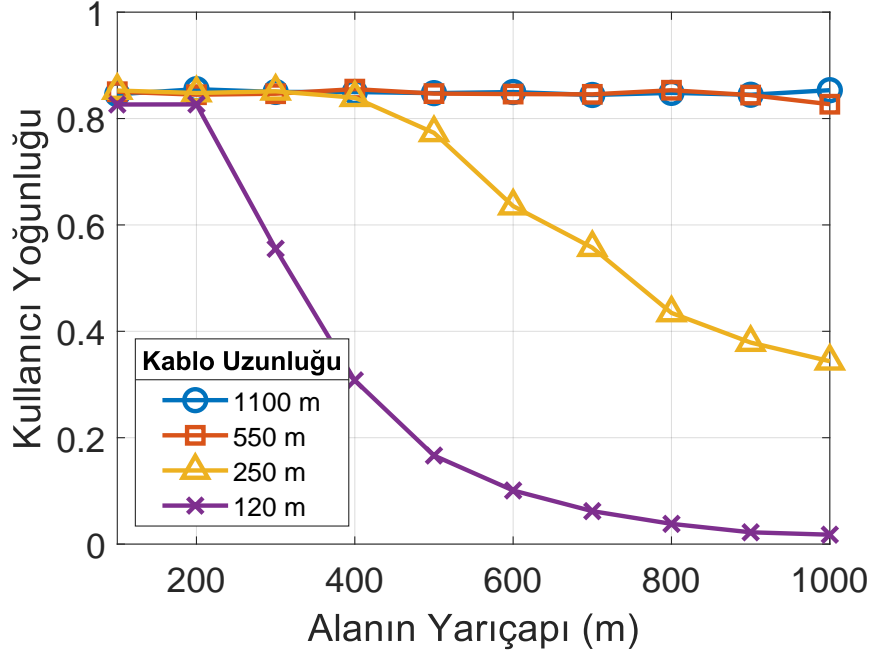
Kablo ile bağlı UxNB'ler için ağ ömrü, bağlı bulunduğu yer istasyonunun çalışma ömrü ile orantılıdır. Bu sürenin birkaç yıl olacağı düşünüldüğünde, bağlı UxNB'ler ile oluşturulan ağ için, bataryalı havasal baz istasyonlarının oluşturduğu ağdaki gibi bir uçuş ömrü olmadığı söylenebilir. Bağlı UxNB sayısının dört olduğu bir senaryoda, kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak hizmet verilen kullanıcı yoğunluğu eğrileri Şekil 5.7'de kablo uzunluğu 120, 250, 550 ve 1100 m için elde edilmiştir. En uzun kablo uzunluğu, [94] no.lu çalışmada kullanılan motorların en yüksek devir hızı ile ürettikleri çekiş kuvveti hesaplanarak ve buna karşılık gelen aracın kaldırabileceği en fazla yük miktarı gözetilerek belirlenmiştir. Ağdaki kullanıcı sayısı, alanda bulunan kullanıcıların yoğunluk yüzdesine göre değişmektedir. Benzetimlerde kullanıcı yoğunluğu 0.125 kullanıcı/m² olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla alan yarıçapı 200 m iken 50 kullanıcı sistemde mevcutken, alan yarıçapı 1000 m olduğunda sistem bulunan kullanıcı sayısı 250'ye çıkmaktadır. Bunun yanında yer istasyonlarının konumları, eşit yarıçaplı çember paketleme problemindeki çemberlerin koordinatları olarak belirlenmiştir. Buna göre, Şe-



Şekil 5.6. Kapsanmak istenilen alanın yarıçapının 800 m olduğu bir ağda, Moskova (124 m), Madrid (667 m) ve Ankara (938 m) için ağa katılan UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak ağ uçuş süresi (solda) ve buna karşılık gelen deniz seviyesinden yükseklik (sağda) eğrileri.

Şekil 5.7’de UxNB’leri yer istasyonuna bağlayan güç kablolarının uzunluğunun 550 ve 1100 m olduğu değerler için hizmet alan kullanıcı yoğunluğunun kapsanmak istenen yarıçap ile değişmediği ve aynı değeri verdiği görülmektedir. Güç kablosunun boyunun kısaldığı durumlarda ise beklenildiği gibi hizmet alan kullanıcı yoğunluğunda bir düşme meydana gelmektedir. Özellikle UxNB’ler için ABD’de belirlenen uçuş yüksekliği için yasal sınır olan 120 m’lik güç kablosu kullanıldığında 400 m yarıçapa sahip bir alanda hizmet alan kullanıcı oranı %30 olmaktadır. Diğer yandan, 250 m uzunluğunda bir güç kablosu kullanıldığında ancak 700 m’den sonra hizmet alan kullanıcıların yoğunluğu %50’den düşük olmaktadır.

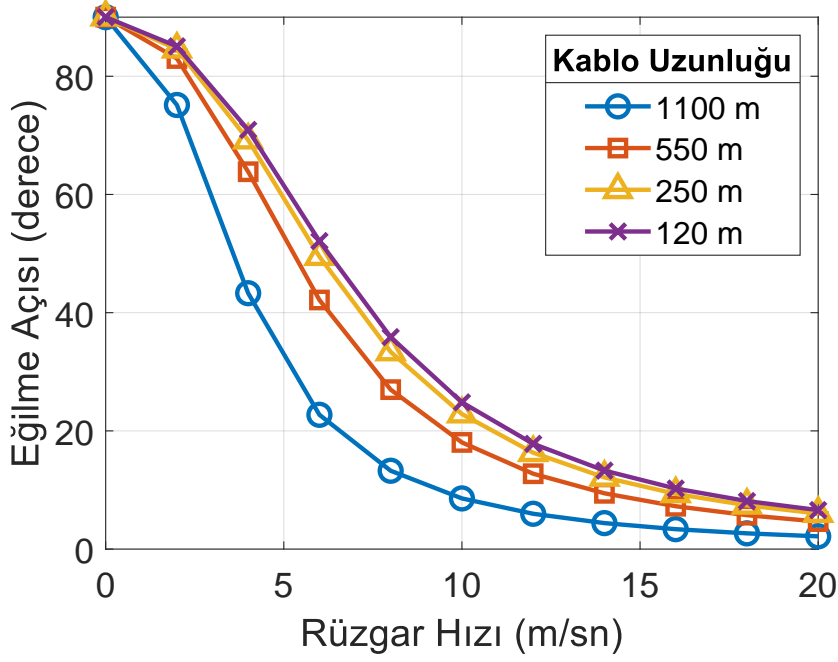
Balon tipi havasal baz istasyonları, incelenen diğer İHA türlerinden oluşan UxNB ağlarına göre uçmak için güç tüketmemeleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Ancak serbest uçan balonların üzerinde bulunan bu baz istasyonları da Kısım 5.1’de bahsedildiği gibi hava akımlarından etkilenirler ve bu yüzden kontrol edilmeleri zordur. Şekil 5.8’de Eşitlik 5.30’dan yararlanarak rüzgar hızındaki değişime göre bir balonun yerden eğilme açısı kablo uzunluğu 120, 250, 550 ve 1100 m için incelenmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kablo uzunluğu arttıkça rüzgar hızının etkisi artmaktadır. Bunun nedeni, kablo uzunluğu ile balonun toplam ağırlığının artmasıdır. Ağırlığı artan balon, rüzgarın etkisi ile konu-



Şekil 5.7. Bağlı UxNB sayısı dört olan bir ağda, kablo uzunluğu 120, 250, 550 ve 1100 m için kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak ağda hizmet alan kullanıcıların yoğunluğu eğrileri.

mundan daha çok sapmaktadır. Bunun sonucunda eniyi konumunu kaybeden balonun güç kablosu uzunluğu ne kadar fazla ise kaybedeceği kullanıcı oranı da o kadar fazla olacaktır. Ancak, kablo uzunluğu ile kapsanan alanın doğru orantılı olduğu ve bunun sonucunda uzun kablolu bir balon UxNB'nin daha çok kullanıcıya hizmet vereceği unutulmamalıdır. Ayrıca Şekil 5.8'de 8 – 10 m/sn hızdaki sert rüzgarlı havalarda balon baz istasyonlarının kablo uzunluğuna göre $13^\circ - 35^\circ$ arası açılarda eğildiği görülmektedir. Bu da, bu şekilde sert rüzgarlı havalarda bu İHA tipinin kullanılmasının elverişsiz olacağına bir göstergesidir.

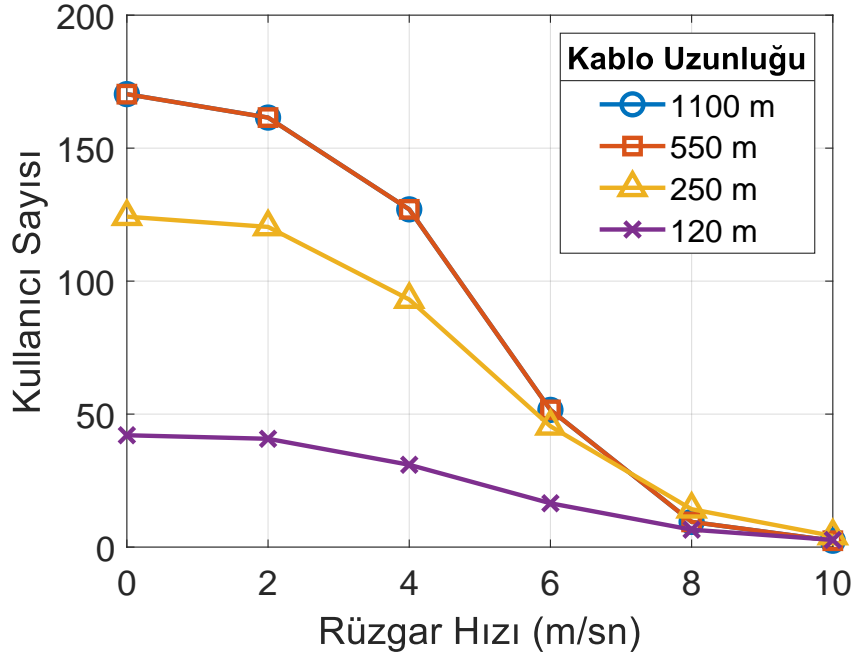
Şekil 5.9'da kapsanmak istenen alanın yarıçapı 800 m olan bir ağda, rüzgar hızına karşılık 120, 250, 550 ve 1100 m kablo uzunlukları için ağda hizmet alan kullanıcı sayılarının değişimi incelenmiştir. Görüldüğü üzere, rüzgar hızının üstte belirtildiği gibi 8 – 10 m/s hızlara ulaşması hangi uzunlukta kablo olursa olsun ağda hizmet verilen kullanıcı sayısını oldukça düşürmektedir. Bunun yanında, düşük rüzgar hızları için kablo uzunluğu ile hizmet verilen kullanıcı sayısı arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Kapsanmak istenilen alan, 1100 m'de uçan bir balonun yerdeki kapsama alanından daha dar olduğundan balon baz istasyonları daha alçak yüksekliklerde konumlanmaktadır. Dolayısıyla



Şekil 5.8. Kablo uzunluğu 120, 250, 550 ve 1100 m olan bir balon için rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak balonun eğilme açısı eğrileri

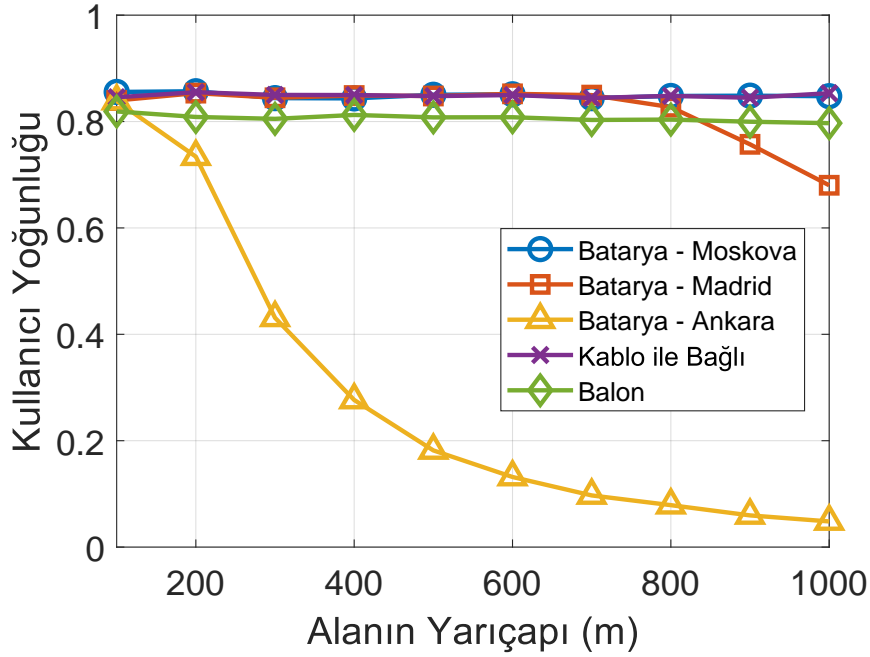
baz istasyonlarına daha fazla kablo uzunluğu tahsis edilmiş olsa bile bu uzunluğu kullanmamaktadırlar. Bunun sonucu olarak, 550 ve 1100 m uzunluğundaki kabloya sahip balon baz istasyonlarından oluşan iki ağ için sistem başarımı aynıdır. Bunların yanında, Şekil 5.8 ile uyumlu olarak rüzgar hızındaki artışın yüksek kablo uzunluğuna sahip balon ağlarını sistem başarımı yönünden daha olumsuz etkilediği görülmektedir. Örneğin, rüzgar hızı 4 m/s'den 6 m/s'ye çıktığında, 550 m kablo uzunluğuna sahip balonlardan oluşan ağda hizmet verilen kullanıcı sayısı tüm kullanıcılar üzerinden %38 azalırken, 250 m kablo uzunluğu için bu oran %24 olmaktadır.

Şimdiye kadar ele alınan İHA tiplerini birbiri ile karşılaştırmak adına, Şekil 5.10'da kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak Moskova, Madrid ve Ankara'da kurulan bataryalı UxNB'lerden oluşan ağlar, bağlı ve balon UxNB'lerden oluşan baz istasyonu ağlarında hizmet verilen kullanıcı yoğunlukları incelenmiştir. Ele alınan her ağda herhangi bir İHA türünden dört adet bulunmaktadır ve rastgele belirlenmiş herhangi bir yönden $V = 2$ m/s hızla esen bir rüzgarın olduğu varsayılmaktadır. Bataryalı UxNB'den oluşan ağlar Moskova, Madrid ve Ankara gibi farklı şehirlere kurulmuşlardır ve her bir UxNB'nin güç kısıtı $P_{max} = 2540$ W'a sınırlanmıştır. Bunun yanında, kablo ile bağlı döner kanatlı dronlarla oluşturulan ağda ise, aynı güç sınırı için araçların kaldırabilecekleri



Şekil 5.9. Balon UxNB sayısı dört, kapsamak istenen alanın yarıçapı 800 m olan bir ağda, kablo uzunluğu 120, 250, 550 ve 1100 m için rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak ağda hizmet alan kullanıcı sayısı eğrileri.

en fazla yük göz önünde bulundurularak 1100 m güç kablosu uzunluğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, balon UxNB'lerden oluşturulan baz istasyonu ağında da karşılaştırma yapılabilmesi için kablo uzunluğu 1100 m olarak belirlenmiştir. Tüm ağlara bakıldığında kapsamak istenilen alanın yarıçapı arttıkça bağlı ve balon havasal baz istasyonlarından oluşturulan ağların performansında bir değişim gözükmemektedir. Kablo ile bağlı UxNB ile kurulan bir ağda, kapsamak istenilen alanın yarıçapı 1000 m olsa bile sistem başarımında bir düşüş olmamakta ve hizmet verilen kullanıcıların yoğunluğu %85 olmaktadır. Balon baz istasyonlarının konumları Şekil 5.8'de de gösterildiği gibi rüzgardan etkilendiği için bu ağ, %80'lik bir kapsama yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca Moskova'da bulunan bataryalı dronlar ile kurulan ağın performansı da bağlı dronlarla kurulan ağa eşittir. Bunun nedeni, Moskova'daki bataryalı UxNB'lerin, kablo ile bağlı UxNB'ler kadar yükseğe çıkabilmesidir. Bataryalarından çekebilecekleri güç sınırlanmış olan UxNB'lerden oluşan diğer şehirlerdeki ağlarda ise performans düşüşü, kapsamak istenilen alanın yarıçapı arttıkça gözlenmektedir. Madrid'te kurulan ağda, 700 m'ye kadar performans düşüklüğü yaşanmamaktadır. Ancak yarıçapın 800 m'nin üzerine çıkmasıyla birlikte, kapsanan kullanıcı yoğunluğunda düşüş artmaktadır. Örneğin, kapsamak istenilen alanın yarıçapı 900 m olduğunda, bu metrik %75'e düşerken, 1000 m olduğunda %68'e düşmektedir. Bu dü-



Şekil 5.10. Kapsanmak istenilen alanın yarıçapının bir fonksiyonu olarak bataryalı, bağlı ve balon İHA'ların oluşturduğu 4 tane UxNB bulunan ağlardaki hizmet alan kullanıcı yoğunluğu eğrileri. Bataryalı UxNB ağları Moskova, Madrid ve Ankara şehirlerinde kurulmaktadır.

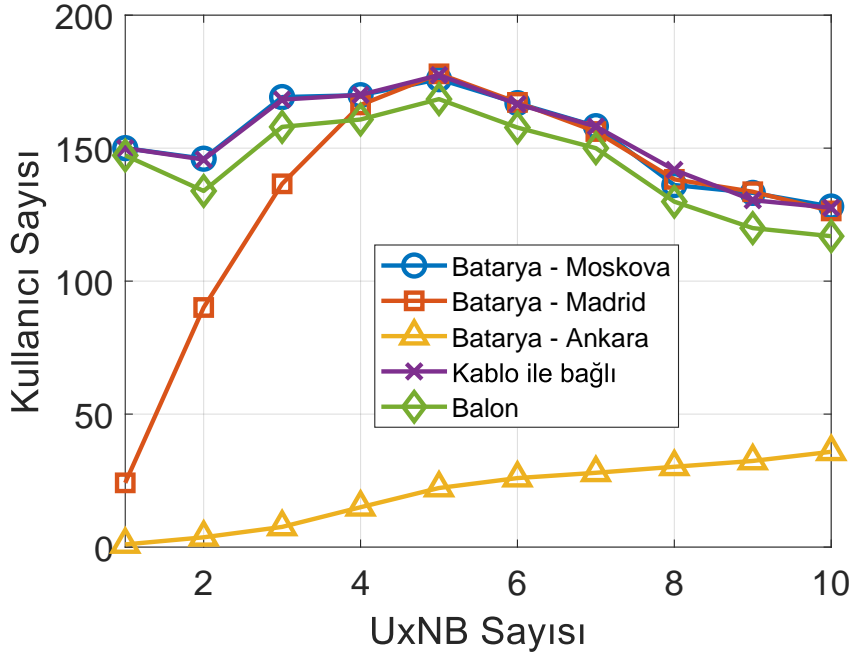
şüşün ana nedeni, Madrid'te bulunan bir UxNB'nin artan alan yarıçapı ile daha yükseğe konuşlanması gerektiğidir. Ancak bu, Eşitlik 5.22'de belirtilen yükseklik kısıtı tarafından engellenmektedir ve bu da UxNB ağında performans düşüklüğüne neden olmaktadır. Bu durum, Ankara gibi daha yüksek rakımlı bir şehirde ise çok daha belirgindir. Ankara'da, 200 m yarıçapındaki bir alana hizmet vermek için kurulan bataryalı UxNB'lerden oluşan bir ağın kullanıcı hizmet yoğunluğu %73 olmaktadır. Bu oran, yarıçap 300 m olduğunda %43 olmaktadır ve sonrasında hızlıca azalmaktadır.

Bu gözlemlere ek olarak, bu ağlardaki uçuş süresi ile hizmet alan kullanıcı yoğunlukları da kıyaslanabilir. Daha önce bahsedildiği gibi kablo ile bağlı döner kanatlı ve balon tipi İHA'ların herhangi bir uçuş süresi kısıtı yoktur. Bu sebeple, buradaki karşılaştırmayı bataryalı İHA'larla kurulan ağlar özelinde yapılması daha mantıklıdır. Buna göre, yarıçapı 800 m olan bir alanda Madrid ve Ankara'da kurulan ağların uçuş sürelerinin birbiri ile aynı olduğu Şekil 5.5'te görülebilir. Buna karşın, bu iki şehirde kurulan ağlardaki hizmet verilen kullanıcı yoğunluğuna bakıldığında, Madrid için %82, Ankara için %7.8 elde edilmektedir. Bununla birlikte aynı alan yarıçapı için Moskova'da kurulan bir ağ %85 ile

hem daha fazla kullanıcıya hem de 38 dakika boyunca (yaklaşık 1 dakika daha uzun süre) havada hizmet verebilmektedir.

Ele alınan İHA tiplerinin karşılaştırıldığı Şekil 5.11’de kapsanmak istenilen alanın yarıçapı 800 m olduğunda, ağdaki UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak bataryalı, bağlı ve balon UxNB’lerin hizmet verdiği ortalama kullanıcı sayıları gösterilmektedir. Bataryalı UxNB’lerin oluşturduğu ağlar Moskova, Madrid ve Ankara şehirlerinde kurulmaktadır. Her havasal baz istasyonunun en fazla 150 kullanıcıya hizmet verebildiği göz önüne alındığında, tek UxNB’nin olduğu ağlardan sadece bağlı UxNB ve Moskova şehrinde kurulan bataryalı UxNB ağları, bu sınıra ulaşabilmektedir. Bunun haricinde, balon UxNB’nin rüzgarın etkisi ile ortalamada 147 kullanıcıya hizmet verebilmektedir. Madrid’te ve Ankara’da kurulan bataryalı UxNB ağları, sırasıyla 24 ve 1 kullanıcıya hizmet vermektedir. Görüldüğü gibi sisteme dahil olan UxNB sayısındaki artış genel olarak hizmet alan kullanıcı sayısını arttırmaktadır. Moskova’da kurulan ağ veya bağlı UxNB’lerle oluşturulan ağ üst sınır olarak düşünüldüğünde Madrid veya Ankara’da kurulan ağların başarımları UxNB sayısı arttıkça bu ağlara yakınsamaktadır. Özellikle Madrid’te 5 tane UxNB ile birlikte üst sınır performansı yakalanmaktadır. Ancak Ankara için 10’dan da fazla UxNB’ye ihtiyaç duyulmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise, en iyi performansın sistemde 5 adet UxNB varken alındığıdır. Bunun nedeni, kullanıcılar sisteme dağıtılırken 5 tane yoğun alanın çevresine dağıtılmalarıdır. Algoritma 2’de belirtildiği gibi problemin çözümünde kullanıcılar kümeleme işlemine tabi tutulmaktadır ve bunun sonucunda elde edilen küme merkezlerine UxNB’ler yerleştirilmektedir. UxNB sayısı ile kullanıcıların dağıtıldığı yoğun alan sayısının eşit olması sistemin başarımını olumlu yönde etkilemektedir. Bağlı İHA’ların bulunduğu ağda UxNB sayısının 5’in üzerine çıkması sonucu sistemde hizmet alan kullanıcı sayısında belirli bir düşüş yaşanmaktadır. Bunun nedeni ise Eşitlik 5.9c’deki hizmet kalitesi kısıtıdır. Ağa dahil olan kullanıcıların SINR değerlerini en az 10 dB’de tutulmaya çalışıldığı için UxNB sayısının artması sistemdeki girişimi arttırdığından daha az sayıda kullanıcı bu kısıtı sağlamaktadır.

Bunların yanında, bataryalı UxNB’ler ile üç farklı şehirde kurulan ağların başarımı ve uçuş süreleri ortaklaşa incelendiğinde Moskova’da kurulan ağda UxNB sayısının 5’ten 10 çıkması sistem başarımına olumsuz etki ederken ağ uçuş süresine 18 saniye katkıda bulunduğu gözlemlenmektedir. Daha yüksek rakımlı şehirlerde ise ağ uçuş süresini belirli



Şekil 5.11. Kapsanmak istenilen alanın yarıçapının 800 m olduğu bir ağda, ağa katılan UxNB sayısının bir fonksiyonu olarak bataryalı, bağlı ve balon İHA'ların oluşturduğu UxNB ağlardaki hizmet alan kullanıcı yoğunluğu eğrileri. Bataryalı UxNB ağları Moskova, Madrid ve Ankara şehirlerinde kurulmaktadır.

bir seviyede tutmak mümkün olurken sistem başarımından ödün vermek gerekmektedir. Örneğin, Ankara'da kurulan ağın süresini 37 dakikada tutmak için getirilen güç kısıtlaması, havasal baz istasyonları yeterince yükseğe çıkamadıkları için diğer ağların en iyi performansı gösterdikleri 5 UxNB'li senaryoda bile ancak 22 kullanıcının hizmet alabilmesi ile sonuçlanmaktadır.

5.7 Bölüm özeti

5G ve ötesi ağlarda, UxNB ile kurulacak olan haberleşme ağlarının önemi giderek artacaktır. Kullanılacak her İHA tipi kendine göre avantajları ve dezavantajları beraberinde getirmektedir. Bu durumları gözetererek, birden fazla UxNB'yi konuşlandırarak havasal ağ oluşturmak önemli bir problemdir. Tezin bu bölümünde, üç farklı İHA tipi -batarya ile çalışan, kablo ile bağlı döner kanatlı İHA ve balon İHA- için çoklu UxNB'den oluşan ağlarda ağ başarım analizi yapılmıştır. Bu ağları birbiri ile kıyaslayabilmek için her İHA tipine özel, verilen bir coğrafi alanda kullanıcıların sadece QoS'lerini değil aynı zamanda İHA tipine özgü kısıtları da göz önüne alarak hizmet verilen kullanıcı sayısını enbüyüten eniyileme problemleri formüle edilmiştir. Bu problemler, karışık tamsayı dışbükey olma-

yan problemlerdir. Eniyiye yakın çözümlerin bulunması için DC programlama yaklaşımı ve K-means kümeleme birleştirilerek bir algoritma sunulmuştur.

UxNB'nin aşağı yönlü antenlere sahip olduğu bir haberleşme senaryosunda, batarya ile çalışan UxNB'lerden oluşan ağın başarımını etkileyen en önemli faktör önceki bölümlerde de görüldüğü üzere şehir rakımı olmuştur. Bu sonuca göre, UxNB sayısının tek ya da çok olmasının bu durumu etkilemediği de gözlemlenmiştir. Bunun yanında, ağ yaşam ömrünün ağdaki UxNB sayısının ikiye çıkması ile zıplama yaptığı ancak daha sonra sisteme eklenen UxNB'lerin aynı etkiyi yapmadıkları görülmektedir. Bu da eldeki tüm havasal erişim noktalarını aynı anda kullanmamak için iyi bir nedendir. Kablo ile bağlı İHA'larla kurulan UxNB ağında ise beklenildiği gibi başarımı etkileyen ana faktörün kablo uzunluğu olduğu benzetim sonuçlarından da elde edilmiştir. Yüksek kablo uzunluğuna sahip UxNB'lerin daha geniş alanlara herhangi bir başarım düşüşü olmaksızın hizmet verebilmeleri gösterilmiştir. Bunların yanında, balonlar ile kurulan UxNB ağı için rüzgar hızının ağ performansına etkisi incelenmiştir. Beaufort ölçeğine göre "latif rüzgar" olarak tanımlanan bölge için balon tipi İHA kullanmanın çok pratik olmadığı belirtilmiştir.

Bunlara ek olarak, üç UxNB ağının başarımlarının karşılaştırımı, benzer şartlar altında yapılmıştır. Buna göre, alçak rakımlı bir şehir olan Moskova'da kurulan batarya ile çalışan UxNB ağının başarımının güç kısıtı olmayan kablo ile bağlı UxNB ağı ile benzer başarımı gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla, kablo ile bağlı İHA'ların oluşturduğu ağ bir üst sınır oluşturmaktadır. Balon İHA'lar ile kurulan havasal erişim ağı rüzgar etkisinden dolayı bu üst sınırın biraz altında başarım göstermektedir. Batarya ile çalışan UxNB ağının başarımı, yüksek rakımlı şehirlerde kurulmuş olsa bile UxNB sayısının artması ile üst sınıra yakınsamayı beraberinde getirir. Bunların yanı sıra, taşıyabileceği toplam yükün kablo uzunluğunu belirlediği bağlı UxNB ağı tüm diğer ağlara göre daha iyi performans göstermektedir. Düşük rakımlı şehirlere kurulan batarya ile çalışan UxNB ağı ile aynı başarımı gösteriyor olsa da uçuş kısıtları olmadığından bağlı ağlar daha avantajlıdır. Buna ek olarak, aralarında en az güç tüketimine sahip balon UxNB ağı, rüzgar hızının düşük olduğu durumlarda bağlı UxNB ağına yakın performans göstermesinden ötürü tercih edilebilir.

6. V2X AĞLARI İÇİN UÇAN YOL KENARI BİRİMİ MİMARİSİ

6.1 Problem Arka Planı ve Motivasyon

Tezin bu bölümüne kadar, farklı İHA tipi kullanılarak ağa konuşlandırılan havasal erişim noktalarının başarım analizleri yapılmıştır. Bu noktadan sonra ise UxNB ağının daha çok uygulama alanları ile ilgili çalışmalara yer verilmektedir.

Günümüzde, insansız hava aracı (İHA) uygulamaları kablosuz haberleşmenin hemen her alanında kendine yer bulmaktadır. Çoğu durumda, hücresele kablosuz ağlar makrohücredeki kör noktalara bağlı düşük kapsama, yüksek veri hızı talebi, güvenilirlik ve düşük gecikme gibi problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. İHA'ların uçan baz istasyonu olarak kullanılması umut verici biçimde bu uygulamalardaki sorunlara yüksek hareketlilikleri, kolay ve düşük maliyetli kurulumları sayesinde bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadırlar [11,21,40]. Gelecekte, birbiri ile haberleşebilen ağa bağlı cihazların sayısında artış öngörülemez biçimde çok olacaktır. Bu da veri trafiğini arttıracak ve servis sağlayıcılarının ele alması gereken bir probleme dönüşecektir. Bu türde yüksek veri trafiğini oluşturacak uygulamalardan biri de araçtan-her şeye (vehicle-to-everything, V2X) ağları olacaktır. Son yıllarda, V2X haberleşmesi araç trafiğini daha güvenilir kıldığından, enerji harcamalarını azalttığından ve Akıllı Ulaşım Sistemleri'ni (Intelligent Transportation Systems, ITS) mümkün kıldığından ötürü literatürde oldukça dikkat çekmektedir [144, 145]. Bu sebeple, İHA yardımcı V2X haberleşmesi bu ağdaki veri trafiği yükünü yönetmek için kullanılabilir etkin yöntemler arasında sayılabilir.

Akıllı şehir uygulamalarından biri olan V2X ağına havasal erişim noktalarının (UxNB) entegrasyonu uçan yol kenarı birimi (flying roadside unit, FRSU) olarak yapılabilir [32]. Bilindiği üzere, V2X haberleşmesi sadece araçların birbiri ile haberleştiği bir yapı değil aynı zamanda da altyapı ile bağlantı kurduğu bir yapıdır. Bu tip haberleşme, literatürde araç-altyapı (vehicle-to-infrastructure, V2I) ağı olarak adlandırılmaktadır. Bu yapı ile birlikte, araçların daha yüksek veri hızları ile iletim yapması, ana ağda depolanmış veriye ulaşmaları ya da hız limiti, kaza bilgisi vb. yol bilgilerini elde etmeleri mümkün olmaktadır [32]. Dolayısıyla, bu bağlantının kalitesi gecikmeleri azaltarak ve veri güvenilirliğini arttırarak daha güvenli ulaşımı ve yüksek hizmet kalitesini (Quality-of-Service, QoS) sağlar. Ancak bir şehirdeki yolları, yerde bulunan RSU'lar ile kaplamak hem parasal anlamda

maliyetli hem de araç trafiğinin çok olmadığı bölgeler açısından konumsal anlamda yararsız olacaktır. Bu bağlamda, fiziksel yetenekleri nedeniyle, UxNB'ler V2I bağlantısını sağlamak için FRSU olarak konuşlandırılabilir.

Tezin ilk bölümlerinde bahsi geçtiği gibi UxNB'lerin, enerji harcamaları, düşük uçuş süreleri, eniyi 3 boyutlu konuşlandırma ve rota planlaması gibi birçok sorunu vardır [11]. Bunların yanına, V2X ağlarına özel, gecikme ve artağ sorunu da eklenmektedir. Literatürde, bu problemler genellikle tek başlarına ele alınmaktadır. Ancak, az sayıda çalışma bu sorunların birkaçını aynı anda ele almaya çabalamaktadır [30,40,80,108,146]. Uçuş dinamikleri ve yerdeki kullanıcıların QoS kısıtları altında enerji verimli 3D konuşlandırma problemi [40] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Bu çalışmada, UxNB ağının kurulduğu şehrin deniz seviyesinden yüksekliğinin bu ağın uçuş süresini en çok etkileyen parametre olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, bağlı dronlar hem uçuş süresi hem de artağ problemlerini çözmek için [108] no.lu kaynakta önerilmiştir. Kishk ve diğ. kapsama alanı ve kapasiteyi arttırmak için bağlı dronlardan oluşan bir ağı incelemiştir. Bağlı dronun kablosunun yardımıyla artağ sorununun çözüleceğini önermişlerdir.

Batarya ve artağ sorunlarının ele alındığı başka bir çalışma da Selim ve diğ. tarafından ele alınmıştır [30]. Bu çalışmada da afet sonrası kurulan bir ağın artağ sorunu bağlı dronların kullanımı ile çözümlenmeye çalışılmıştır. Ancak, bağlı dronun sağladığı artağ bağlantısının çok yüksek olduğu varsayılmış ve bölgedeki kullanıcıların yüksek bantgenişliği gerektiren uygulamalar kullanmayacağı varsayılarak bu kısıt ortadan kaldırılmıştır. Başka bir artağ duyarlı UxNB yerleştirme problemi [80] no.lu kaynakta incelenmiştir. Kalantari ve diğ., konuşlandırma problemini hem hizmet verilen kullanıcı sayısını hem de bu kullanıcıların toplam veri hızını enbüyütecek şekilde kurgulamışlardır. Ayrıca, önerilen eniyi çözüme kullanıcı hareketliliğinin etkisini de incelemiştir. Ağıdaki gecikmenin ele alındığı problem [146] no.lu kaynakta sunulmuştur. Bu çalışmada, bekleme süresini enküçültecek bir ağ modeli ortaya atılmıştır. Bununla birlikte, artağ kapasitesi sınırlı tutulmuş ve eniyi UxNB yüksekliği ve trafik yükü ile ilgili sayısal sonuçlar verilmiştir.

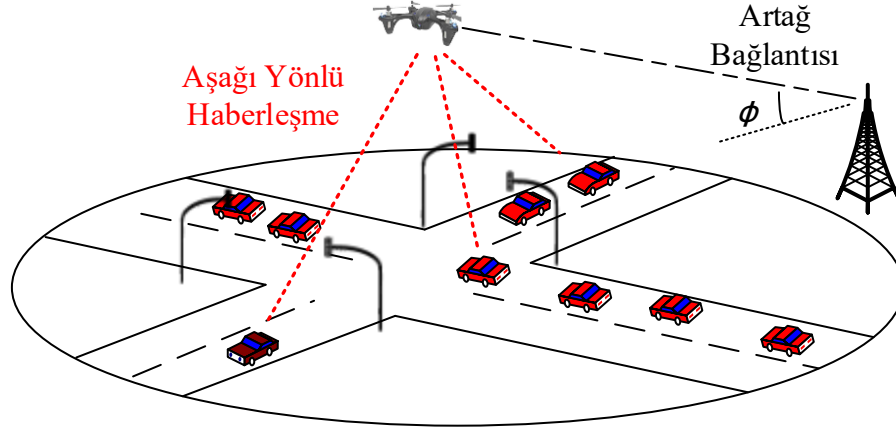
Bu bölümün literatüre ana katkısı, bir UxNB'nin uçan bir yol kenarı birimi olarak toplam güç tüketimini enküçülten üç boyutlu konuşlandırılmasının V2X ağı kullanıcılarının gecikmelerini ve artağ problemini de ele alarak araştırmasıdır. İlgili literatürün aksine,

enerji verimliliği, gecikme ve artağ problemleri tek bir eniyileme probleminde birleştirilmiştir. Bir şehirde belirli bir alanda ve belirli sayıda araç kullanıcısı (vehicular user, VU) olduğunda, FRSU'nun etkin biçimde konuşlandırılması için yeni bir çerçeve geliştirilmiştir. Öncelikle, gecikme kısıtı kullanıcıların bireysel veri hızı kısıtı olarak ve artağ kapasitesi, FRSU ve yer baz istasyonu arasındaki uzaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Sonrasında, sadece FRSU'nun konuşlandırma koordinatlarını değil ayrıca VU'ların güç tahsis vektörünün de elde edildiği bir haberleşme problemi önerilmiştir. Böyle bir senaryoda, sonuçlar ortalama paket uzunluğunun üç boyutlu konuşlandırma problemindeki ana faktörlerden biri olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, hem VU'ların bireysel veri hızı kısıtının hem de FRSU yüksekliğinin ortalama paket uzunluğuna bağlı olmasıdır. Buna ek olarak, VU'ların toplam veri hızının artağ kapasitesine oranı ile elde edilen yeni bir metrik, "*artağ şebeke yükü*" şeklinde adlandırılmıştır. Elde edilen bulgular, gecikme kısıtının sıkılaştırılması ile artağa binen yükün arttığını göstermektedir.

Bu bölümün geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci kısımda havadan yere kanal modeli, artağ şebeke kapasitesi, gecikme modeli ve güç tüketim modeli ile birlikte sistem modeli sunulmaktadır. Üçüncü kısımda önerilen konuşlandırma modeli formüle edilmiştir. Dördüncü kısımda sayısal bulgular okuyucu ile paylaşılmış ve son olarak, beşinci kısım ile bu bölüm bitirilmektedir.

6.2 Ağ Modeli

Bu kısımda, UxNB destekli V2X haberleşmesi için bir ağ modeli sunulmaktadır. Şekil 6.1'de V2X haberleşmesi yapılan bir kavşak senaryosu gösterilmektedir. Burada UxNB, V2X ağına, V2I bağlantısını oluşturmak adına FRSU olarak katılmaktadır. Böylece, UxNB, yol durumu gibi araç kullanıcıları adına kritik önem taşıyan bilgileri onlarla paylaşabilmektedir. FRSU ile çekirdek ağına bağlı yer baz istasyonu arasındaki artağ şebeke kapasitesi C_{BH} ile sınırlı olduğundan, bu denli yüksek miktardaki veri trafiği bir çıkmaza neden olacaktır. Böyle bir senaryoda, hem FRSU'nun tükettiği gücü en aza indirecek şekilde konuşlandırılması hem de kullanıcılara tahsis edilecek güçlerin bulunması istenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, kullanıcıların uçtan uca gecikmelerinin belli bir seviyede olması ve toplam veri hızlarının artağ şebeke kapasitesini geçmemesi gerekmektedir. Bu noktada öncelikle havadan yere kanal modeli, ardından artağ şebeke kısıtı sunulacaktır. Sonra-



Şekil 6.1. UxNB yardımlı V2X haberleşme modeli

sında V2X haberleşmesi için kritik öneme sahip olan gecikme kısıtı, önerilen eniyileme probleminin çözülebilir olması açısından bireysel veri hızı olarak formüle edilecektir.

6.2.1 Havadan Yere Kanal Modeli

Uçan bir UxNB'nin olduğu bir haberleşme sisteminde, bilinen yersel kanal modelleri geçersiz hale gelir. Literatürde, havadan yere yol kaybı modeli, görüş hattı (Line-of-Sight, LoS) ve görüş hattı olmayan (Non-Line-of-Sight, NLoS) bağlantıların ortalaması alınarak elde edilmektedir [18]. Bunun için, FRSU ile VU arasındaki kanalların LoS olasılığı hesaplanmalıdır. Dolayısıyla, (x_D, y_D) koordinatlarında h_D kadarlık yükseklikte konumlanmış bir UxNB ile (x_k, y_k) koordinatlarındaki k 'inci VU arasındaki LoS bağlantısı

$$\mathbb{P}_{\text{LoS}}^k = \frac{1}{1 + \alpha \exp(-\beta(\psi_k - \alpha))} \quad (6.1)$$

olasılığı ile gözlemlenmektedir [18]. Burada α ve β kanalın çevresel koşullar ile belirlenen sabitlerdir, $\psi_k = \arctan\left(\frac{h_D}{d_k}\right)$ şeklinde tanımlanır ve bağlantının yükseliş açısını vermektedir. Burada, d_k , FRSU ile k 'inci VU arasındaki yersel uzaklıktır ve $d_k = \sqrt{(x_D - x_k)^2 + (y_D - y_k)^2}$ şeklinde ifade edilir. Her bağlantının yol kaybı

$$L(h_D, d_k) = \begin{cases} A_0 \mu_{\text{LoS}} l^2 & , \text{LoS bağlantısı ise,} \\ A_0 \mu_{\text{NLoS}} l^2 & , \text{NLoS bağlantısı ise,} \end{cases} \quad (6.2)$$

şeklinde belirlenmiştir. Burada $A_0 = \left(\frac{4\pi f_c}{c}\right)^2$ şeklindedir, μ_{LoS} ve μ_{NLoS} sırasıyla LoS

ve NLoS bağlantılarının kayıplarını tanımlamaktadır ve sonra olarak $l = \sqrt{h_D^2 + d_k^2}$ ile verilmektedir. Burada, f_c , taşıyıcı frekansdır ve birimi Hz'dir, c , m/sn olarak ışık hızıdır. Buna göre, ortalama yol kaybı

$$\bar{L}(h_D, d_k) = A_0 (h_D^2 + d_k^2) (\mathbb{P}_{\text{LoS}}^k \mu_{\text{LoS}} + \mathbb{P}_{\text{NLoS}}^k \mu_{\text{NLoS}}) \quad (6.3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $\mathbb{P}_{\text{NLoS}}^k = 1 - \mathbb{P}_{\text{LoS}}^k$ ile hesaplanır.

6.2.2 Artağ Şebeke Kapasitesi

V2X haberleşmesi senaryosunda, Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, UxNB, h_D yüksekliğinde FRSU olarak çalışırken Poisson doğru süreci ile bir kavşağa dağıtılmış olan toplamda N tane VU'ya V2I bağlantısı hizmeti vermektedir. Bu ağda, FRSU, aşağı yöne bakan yönlü bir antene sahiptir ve bu antenin kazanç örüntüsü

$$G_D(\theta) = \begin{cases} G_0/\theta_B^2 & , -\theta_B/2 \leq \theta \leq \theta_B/2 \\ G_r & , \text{aksi takdirde.} \end{cases}$$

şeklinindedir. Burada θ_B aşağı yönlü antenin yarım güç hüzme genişliğidir, $G_0 \approx 30000$ ile tanımlanır ve G_r , antenin yan loblarından ışıyan geri kalan gücü temsil etmektedir. FRSU'nun dikgen sinyalleşme tekniği kullandığı varsayılmaktadır ve toplam bantgenişliği W ile verilmektedir. Buna göre, k 'inci VU'nun aldığı sinyalin gücü

$$P_{r,k} = P_k G_D(\theta) / \bar{L}(h_D, d_k) \quad (6.4)$$

ile ifade edilebilir. Burada P_k , k 'inci VU'ya tahsis edilen gücü temsil etmektedir. Böylece, k 'inci VU'nun inişyolu veri hızı

$$r_k = w_k \log_2 \left(1 + \frac{P_{r,k}}{w_k N_0} \right) \quad (6.5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, w_k , k 'inci VU'ya tahsis edilen altkanalın bantgenişliğidir ve N_0 , sıfır ortalamalı eklenir beyaz Gauss gürültüsünün güç izgesel yoğunluğunu ifade etmektedir.

Çizelge 6.1. FRSU ve yer baz istasyonu arasındaki kanal parametreleri [72]

Parametre	Değer
Fazlalık yol kaybı çarpanı, A	-23.29
Açı ofseti, ϕ_0	-3.61
Açı sabiti, B	4.14
Fazlalık yol kaybı ofseti, η_0	20.70
Gölgeleme varyansının eğimi, a	-0.41
Gölgeleme ofseti, σ_0	5.86

Artağ şebeke kapasitesi, C_{BH} ile sınırlı olduğundan, ağdaki toplam veri hızı bu değeri geçmemelidir. Dolayısıyla, artağ şebeke kapasitesi kısıtı

$$\sum_{k=1}^N r_k \leq C_{BH} \quad (6.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$C_{BH} = W_{BH} \log_2 \left(1 + \frac{P_{bs} G_s / L_{d,bs}}{W_{BH} N_0} \right) \quad (6.7)$$

ile ifade edilmektedir. Ayrıca, W_{BH} , artağ bağlantısı için önceden belirlenmiş bantgenişliğidir ve bilindiği varsayılmaktadır. Bununla birlikte, P_{bs} , yer baz istasyonunun iletim gücüdür. FRSU ve yer baz istasyonu arasındaki bağlantının her zaman baz istasyonunun yere doğru eğilmiş olan anteninin yan lobları ile oluşturulduğu varsayılmaktadır. Dolayısıyla, G_s , yan lob kazancıdır ve ana hüzmene dışında bu değer sabit olduğu varsayılmaktadır. Sonuçta, FRSU ve yer baz istasyonu arasındaki yol kaybı dB cinsinden

$$L_{d,bs}(\text{dB}) = \underbrace{20 \log(d_{d,bs})}_{\text{Yersel yol kaybı}} + \underbrace{A(\phi - \phi_0) \exp\left(-\frac{\phi - \phi_0}{B}\right) + \eta_0 + \mathcal{N}(0, a\phi + \sigma_0)}_{\text{Fazlalık yol kaybı}} \quad (6.8)$$

ile hesaplanır [72]. Burada, $d_{d,bs}$, bu iki birimin birbiri ile olan yersel iki boyutlu uzaklığı belirtir ve ϕ ise Şekil 6.1'de görüldüğü gibi alçalış açısıdır. Kanal parametrelerin açıklaması ve sayısal değerleri Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.

6.2.3 Gecikme Modeli

Gecikme, V2X haberleşmesinde en önemli performans kriterlerinden biridir. Bu kısımda, k 'inci VU'nun arabelleğine gelen paketlerin olasılıksal sürecinin zaman aralıkları üzerinden, birbirinden bağımsız ve özdeş dağılımlı (b.ö.d.) olduğu ve ortalama paket varış oranının λ_k olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, k 'inci VU'nun paket uzunluğu süreci de b.ö.d.'dür ve ortalama değeri N_k^{av} şeklindedir. Her iki sürecin de dağılımlarının genel dağılımlar olduğu varsayılmaktadır. Zaman aralığı t 'de arabellekteki paket sayısını belirtmek için, $Q_{k,t}$ ifadesi kullanılmaktadır. Paket indisi n için, arabellekteki bekleme ve iletim zamanları sırasıyla, $W_k(n)$ ve $\delta_k(n)$ ile ifade edilmektedir. Bununla birlikte, k 'inci VU'nun arabelleğindeki bekleme süresi

$$D_k(n) = W_k(n) + \delta_k(n) \quad (6.9)$$

ile hesaplanır [147]. V2X haberleşmesinin gereksinimlerden biri düşük gecikme olduğundan, her VU için arabellekteki gecikme, belirli bir eşik değerin altında olmalıdır. Buradan hareketle, gecikme kısıtı

$$\mathbb{P}(D_k(n) \geq D_{\text{max}}) \leq \epsilon \quad (6.10)$$

ile olasılıksal olarak ifade edilebilir. Burada, D_{max} , enbüyük tolere edilebilecek gecikmeyi belirtmektedir. V2I bağlantıları için bu değer LTE standartlarında 100 ms olarak belirlenmiştir [148]. Bunun yanında ϵ , ihlal olasılığını ifade eder ve bu nedenle küçük bir değer alması gerekmektedir.

6.2.4 Güç Tüketim Modeli

Önerilen senaryoda, FRSU belirlenen alanın üzerinde havada sabit biçimde uçmaktadır. Dolayısıyla, güç tüketimi yapan iki birim olduğu varsayılabilir. Bunlardan ilki haberleşme birimi, diğeri de havada uçmak için çalışan motorlardır. FRSU, frekans düzleminde dikgen haberleşme yaparak kullanıcılara hizmet sağladığından, haberleşme için harcanan toplam güç, her bir altkanalda kullanıcılara tahsis edilen güçlerin toplamı olarak

$$P_{\text{hab}} = \sum_{k=1}^N P_k \quad (6.11)$$

şeklinde ifade edilir. Bu noktada, problemin karmaşıklığını düşürmek adına sistemdeki kullanıcı sayısı ile altkanal sayısının birbirine eşit olduğu varsayılmaktadır. Bununla birlikte, asılı kalmak için gereken güce önceki bölümlerde de değinilmektedir. Ancak bölüm içi tutarlılığı ve okuma kolaylığını sağlayabilmek için kısa da olsa bu bölümde de yer verilmiştir. Bir UxNB platformunun havada asılı kalmak için harcadığı güç rüzgarlı bir günde hem aracın ağırlığı hem de yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak

$$P_{\text{asılı}} = [P_0 (1 + \mu) + P_{\text{rüzgar}}] e^{\frac{u_0 h}{2}} \quad (6.12)$$

şeklinde formüle edilir [40]. Burada,

$$P_0 = \frac{W_{\text{top}}^{3/2}}{\sqrt{2\rho_0 N A}}, \quad (6.13)$$

$$\mu = \frac{1}{8} \frac{C_{D0} c_b}{J^3 \pi R}, \quad (6.14)$$

$$P_{\text{rüzgar}} = \frac{1}{2} \rho_0 C_d A_d v^3 \quad (6.15)$$

şeklinindedir. Ayrıca, A , tek pervanenin taradığı alanı belirtmektedir, C_{D0} ve R sırasıyla, sürüklenme katsayısı ve her pervanenin yarıçapıdır. Bunların yanında, c_b pervane genişliğini ve J , pervane ilerleme oranını belirtir. Bu metrik pervanede indüklenen hava ile kanat ucu hızının oranı ile hesaplanır. Bunun dışında, C_d ve A_d aracın sürüklenme katsayısı ve yanal alanını ifade etmektedir. Ayrıca, $u_0 = 9.7 \times 10^{-5}$ şeklinde sabittir ve $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ olarak tanımlanan deniz seviyesindeki hava yoğunluğunu belirtir ve son olarak h deniz seviyesinden yüksekliği belirtmektedir. Buna göre, döner kanatlı bir UxNB'nin toplam güç tüketimi yani eniyileme probleminin maliyet fonksiyonu

$$P_{\text{toplam}} = P_{\text{asılı}} + P_{\text{hab}} \quad (6.16)$$

şeklinde elde edilir.

Bu noktada $P_{\text{asılı}}$ değeri fiziksel kısıtlardan dolayı sınırlanmaktadır. Bataryalar ve motor sürücülerini sınırlı miktarda güç verebileceğinden bu kısıt $P_{\text{asılı}} \leq P_{\text{h,max}}$ şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Benzer şekilde, haberleşme için harcanabilecek güç de yükselti-

cilerden ya da yasal limitlerden dolayı sınırlıdır ve bu kısıt da $P_{\text{hab}} \leq P_{\text{t,max}}$ şeklinde ifade edilir.

6.3 Problem Formülasyonu

Bu kısımda, ele alınan konuşlandırma problemi matematiksel olarak formüle edilecektir. Bu problemde FRSU'nun tükettiği güç enküçültülürken FRSU, VU'lara tolere edilebilir bir gecikme miktarı ile hizmet verir ve artağ şebeke kapasitesini ihlal etmez. Eşitlik 6.12'de görüldüğü üzere, deniz seviyesinden yükseklik harcanan güce üssel olarak etki etmektedir. Ayrıca UxNB platformunun çalışma yüksekliği h_D , şehir rakımı h_c 'ye de doğa olarak bağlıdır. Buna göre UxNB'nin konuşlanabileceği şehir zemininden yükseklik h_D ,

$$h_D \leq \frac{2}{u_0} \ln \left(\frac{P_{\text{h,max}}}{P_0 (1 + \mu) + P_{\text{rüzgar}}} \right) - h_c = h_{\text{max}} \quad (6.17)$$

ile hesaplanabilir. Bu hesapta, $P_{\text{hov}} \leq P_{\text{h,max}}$ kısıtı göz önüne alınmıştır. Bunun yanında FRSU, bina gibi bir engelden kaçınmak adına belirli bir yüksekliğin üzerinde konuşlanması gerekmektedir. Bu da yer baz istasyonu anteni yüksekliği ile belirlenebilir. Buna göre, FRSU çalışma yüksekliği $h_D \geq h_{\text{min}}$ şeklinde alttan sınırlıdır. Böylece, UxNB ile yer baz istasyonu arasında kurulacak bağlantının da kalitesinin belirli bir seviyenin üzerinde olması da sağlanmaktadır.

Eşitlik 6.10'daki uçtan uca gecikme kısıtının hesaplaması zordur. Fakat bu kısıt problemin çözülebilir olması açısından bireysel veri hızı kısıtına dönüştürülebilir. Bunun için, [149] no.lu kaynaktaki rasgele ağ hesaplamalarında kullanılan enbüyük-topla kuyruk yöntemi (max-plus queueing method) kullanılabilir. Öncelikle, her bir VU için, arabellekte GI/GI/1 kuyruğu olduğu varsayılınsın. Buna göre eğer bir kullanıcının t anındaki arabelleği boş değilse, yani $Q_t > 0$ ise, bu kullanıcının anlık veri hızı $r(t)$, Eşitlik 6.10'daki enbüyük tolere edilebilir gecikme süresini garanti etmek için R_{min} , enküçük veri hızı değerinden büyük olmalıdır. Burada,

$$R_{\text{min}} = -\frac{N^{\text{av}}}{D_{\text{max}}} \left[W_{-1} \left(\frac{\lambda D_{\text{max}} \epsilon}{1 - e^{\lambda D_{\text{max}}}} e^{\frac{\lambda D_{\text{max}}}{1 - e^{\lambda D_{\text{max}}}}} \right) + \frac{\lambda D_{\text{max}}}{e^{\lambda D_{\text{max}}} - 1} \right] \quad (6.18)$$

ile tanımlanmaktadır. Bu denklemde, $W_{-1}(\cdot)$ fonksiyonu Lambert W fonksiyonun alt

dalıdır ve $[-e^{-1}, 0] \rightarrow [-\infty, -1]$ şeklinde tanımlanmıştır (bkz. Teorem 1 [149]). Ayrıca paket varış süreci Poisson dağılımlı olduğu ve paket uzunluğunun üssel dağılım süreci ile gerçekleştiği varsayıldığında ele alınan kuyruk yapısı M/M/1 olmaktadır. Bu durumda, gecikme olasılığı,

$$\mathbb{P}(D_k(n) \geq D_{\max}) = \exp \left\{ - \left(\frac{r_k}{N^{av}} - \lambda_k \right) D_{\max} \right\} \quad (6.19)$$

olarak hesaplanır. Tüm kullanıcılar için paket varış sürecinin ortak varsayıldığı durumda, yani $\lambda_k = \lambda, \forall k$, her bir kullanıcının sahip olması gereken enküçük veri hızı

$$R_{\min} = \left(\lambda - \frac{\ln(\epsilon)}{D_{\max}} \right) N^{av} \quad (6.20)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Böylece, zaman indisi atılarak, uçtan uca gecikme kısıtı k 'inci VU için $r_k \geq R_{\min}$ şeklinde elde edilir. Sayısal bulgular kısmında iki kuyruk tipi için de benzetimler yapılıp aralarındaki farklar incelenecektir.

Böylece, hem önceki kısımda hem de bu kısımda elde edilen eşitlikler kullanılarak ortak eniyi FRSU konuşlandırma ve güç tahsisi problemi

$$\underset{P, x_D, y_D, h_D}{\text{enküçült}} \quad [P_0 (1 + \mu) + P_{\text{rüzgar}}] e^{\frac{u_0 h}{2}} + \sum_{k=1}^N P_k \quad (6.21)$$

kısıtlar

$$P_k > 0, \quad k = 1, \dots, N \quad (6.21a)$$

$$\sum_{k=1}^N P_k \leq P_{t, \max} \quad (6.21b)$$

$$r_k \geq R_{\min}, \quad k = 1, \dots, N \quad (6.21c)$$

$$\sum_{k=1}^N r_k \leq C_{\text{BH}}, \quad (6.21d)$$

$$h_{\min} \leq h_D \leq h_{\max}, \quad (6.21e)$$

şeklinde formüle edilir.

Problem 6.21'de, Eşitlik 6.21a'da belirtildiği gibi bir altkanala tahsis edilecek güç miktarı sıfırdan büyük olmalıdır. Dolayısıyla tüm kullanıcılara aynı anda hizmet verilebilmek-

Çizelge 6.2. Benzetimlerde kullanılan UxNB'nin teknik ve fiziksel özellikleri

Teknik ve Fiziksel Özellik	Değer
Pervane Çapı, $2R$	558.8×10^{-3} m
Pervane Genişliği, c_b	167.6×10^{-3} m
Pala, Rotor ve Batarya Sayısı	2, 4, 8
Sürüklenme Katsayısı, C_{D0}	1.57×10^{-3}
$C_d \times A_d$, [94]	0.67 m ²
Araç Ağırlığı, W_V	10 kg
Batarya Ağırlığı, W_B	2 kg
Faydalı Yük Ağırlığı, W_P	8 kg

tedir. Aynı zamanda bu her kullanıcı için gecikme kısıtının sağlanması gerektiği anlamına da gelir. Bunun yanında, Eşitlik 6.21d'deki artağ şebeke kısıtından dolayı Problem 6.21 dışbükey olmayan bir problemdir. Bu sebeple, problem, global çözümü bulmak adına, [150] no.lu kaynakta tanımlanan çoklu başlangıç noktalı Sıralı İkilenik Programlama (Sequential Quadratic Programming, SQP) algoritması ile çözülebilir.

6.4 Sayısal Bulgular ve Tartışmalar

Bu kısımda, yukarıdaki tartışmalara göre yapılan benzetimlerin sonuçları sunulmuştur. Benzetimlerde kullanılan UxNB'nin fiziksel ve teknik özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Ayrıca, benzetim parametreleri Çizelge 6.3'te listelenmiştir.

Öncelikle, Çizelge 6.4'te enbüyük tolere edilebilir gecikme 100 ms iken, gereken enküçük VU veri hızı değişen ihlal olasılıkları ve ortalama paket uzunlukları için verilmektedir. Burada, hem GI/GI/1 hem de M/M/1 kuyrukları göz önüne alınmıştır. Bu çalışmada, paket geliş oranı, λ ve ortalama paket uzunluğu N^{av} , her VU için aynı kabul edilmektedir. Çizelge 6.4'te de görülebileceği gibi tüm paket uzunlukları için gereken enküçük veri hızı, her iki kuyruk tipi için de ihlal olasılığı ile ters orantılı biçimde değişmektedir. Örneğin, ortalama paket uzunluğu 64 Kbit olduğunda, 10^{-5} 'lik ihlal olasılığını yakalayabilmek için gereken enküçük veri hızı GI/GI/1 kuyruğu için en az 10.1 Mbps olmaktadır. Bu metrik, M/M/1 kuyruğu varsayıldığında ise 8.968 Mbps'e eşittir. Ancak ihlal olasılığı 0.1'e çıktığında, aynı ortalama paket uzunluğu için GI/GI/1 kuyruğunda, enküçük veri hızı 3.55 Mbps iken M/M/1 kuyruğu için 3.07 Mbps olmalıdır. Ortalama paket uzunluğunun artması ile gereksinim duyulan enküçük veri hızı da aynı şekilde iki kuyruk tipi

Çizelge 6.3. Benzetim değerleri

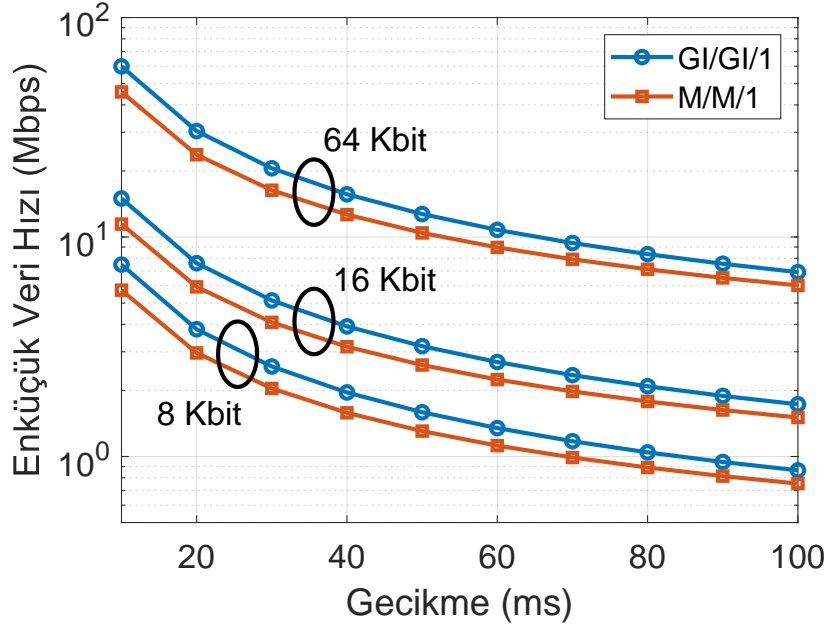
Parametre	Değer
$(\alpha, \beta, \mu_{\text{LoS}}, \mu_{\text{NLoS}})$	(12.08, 0.11, 1.6, 23)
Taşıyıcı Frekansı, f_c	5.9 GHz
Bantgenişliği, w_k	10 MHz
Artağ Bantgenişliği, W_{BH}	20 MHz
VU Sayısı	50
Hüzme Genişliği, θ_B	120°
Baz İstasyonu İletim Gücü, P_{bs}	46 dBm
FRSU İletim Gücü, $P_{t,\text{max}}$	16 dBm
Baz İstasyonu Yan Lob Kazancı, G_s	-5 dBi
FRSU Yan Lob Kazancı, G_r	-16.8 dBi
Hizmet Bölgesinin Yarıçapı	200 m
Hizmet Bölgesinin Merkezine göre Bİ Konumu	(800, 800, 30) m
Gürültü PSD	-174 dBm
Enbüyük Tolere edilebilir Gecikme, D_{max}	100 ms
Ortalama Varış Oranı, λ	25
Gerçekleme Sayısı	100
Bataryalardan Çekilebilecek Enbüyük Güç, $P_{h,\text{max}}$	2540 W
Şehir Rakımı, h_c	40 m
Enküçük Yükseklik, h_{min}	35 m
Enbüyük Yükseklik, h_{max}	965 m

Çizelge 6.4. Eşitlik 6.21c'deki gecikme kısıtını sağlamak için gereken enküçük veri hızı

ϵ	R_{\min} (Mbps)					
	$N^{av} = 8$ Kbit		$N^{av} = 16$ Kbit		$N^{av} = 64$ Kbit	
	GI/GI/1	M/M/1	GI/GI/1	M/M/1	GI/GI/1	M/M/1
10^{-5}	1.263	1.12	2.525	2.24	10.1	8.968
5×10^{-5}	1.125	0.992	2.250	1.984	8.99	7.938
10^{-4}	1.065	0.936	2.130	1.873	8.521	7.494
5×10^{-4}	0.925	0.808	1.851	1.6161	7.402	6.464
0.001	0.865	0.752	1.73	1.5052	6.916	6.021
0.005	0.722	0.623	1.443	1.2477	5.773	4.99
0.01	0.660	0.568	1.318	1.136	5.273	4.547
0.05	0.510	0.439	1.021	0.879	4.084	3.517
0.1	0.444	0.384	0.889	0.768	3.55	3.073

için de artmaktadır. Örneğin, ortalama paket uzunluğunun 8 Kbit olduğu bir haberleşme ortamında 10^{-3} ihlal olasılığını elde edebilmek için GI/GI/1 ve M/M/1 kuyruk tiplerinde sırasıyla en az 865 ve 752 Kbps veri hızına sahip olmak gerekmektedir. Diğer taraftan, ortalama paket uzunluğu 64 Kbit olduğunda, aynı ihlal olasılığı için VU'nun enküçük tolere edilebilir gecikmeyi geçmeden haberleşme yapabilmesi için gereken veri hızı GI/GI/1 ve M/M/1 kuyruk tiplerinde sırasıyla en az 6.916 ve 6.021 Mbps şeklindedir.

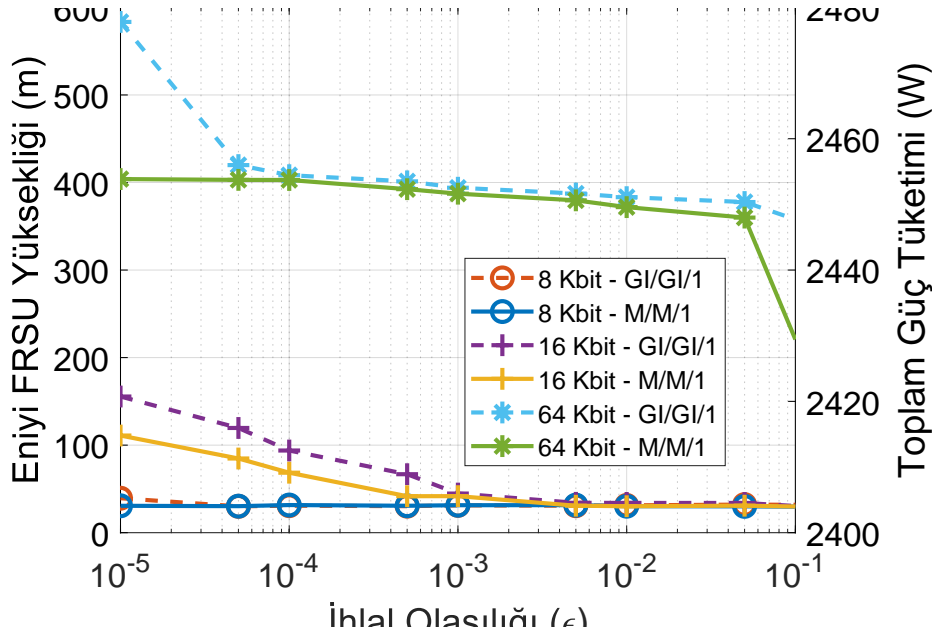
Şekil 6.3'te, iki kuyruk tipi için ihlal olasılığının 10^{-3} olduğu durumda, üç farklı ortalama veri uzunluğu 8, 16, 64 Kbit için VU'ların sahip olması gereken enküçük veri hızları gecikmenin bir fonksiyonu olarak çizdirilmiştir. Buna göre, tüm ortalama veri uzunlukları ve kuyruk tipleri için gecikme süresinin uzaması ihtiyaç olan veri hızını düşürmektedir. Çizelge 6.4'te görüldüğü üzere ortalama paket uzunluğunun artması da her gecikme değeri için enküçük veri hızını arttırmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, uçtan uca gecikmenin 10 ms mertebesine inerken ihtiyaç olan veri hızının hızlanarak artmasıdır. Bu durumda, örneğin, 64 Kbit ile iletişim yapılmak istendiğinde, ihlal olasılığını aşmamak için erişilmesi gereken veri hızı GI/GI/1 kuyruğu için yaklaşık 60 Mbps olurken, M/M/1 kuyruğu için 47 Mbps olmaktadır. Görüldüğü üzere bu kadar düşük gecikme değerlerini 10^{-3} ihlal olasılığı ile garanti edebilmek için çok yüksek veri hızı gerektirmektedir. Bu da ancak bantgenişliğini arttırarak gerçekleştirilebilir. Aksi takdirde çözülmek istenen Problem 6.21 doğal olarak olursuz olacaktır. Kuyruk yapıları karşılaştırıldığında, Şekil 6.2'de beklenildiği gibi hem paket varış süreci hem de ortalama paket uzunluğu süreçlerinin ge-



Şekil 6.2. Enbüyük tolere edilebilir gecikmenin bir fonksiyonu olarak $N^{av} = 8, 16, 64$ Kbit ortalama paket uzunlukları ve iki farklı kuyruk tipi için gereken enküçük veri hızı eğrileri.

nel dağılım olarak kabul edildiği durumda hedeflenen veri hızları daha yüksek olmaktadır. Bunun yanında, bu süreçlerin sırasıyla, Poisson ve üssel dağılım kabul edildiği M/M/1 kuyruk tipinde ise ihlal olasılığını sağlamak için ulaşılmaması gereken iniş yolu veri hızı GI/GI/1 kuyruğuna göre daha düşük olmaktadır. Burada, bu grafiğin dikey eksenini logaritmik ölçekte olduğundan, kuyruk tipleri arasındaki farkın üssel olduğuna dikkat etmek önemlidir.

Şekil 6.3'te, 40 m rakıma sahip İstanbul'da, 200 m yarıçapındaki hizmet bölgesinin üzerinde uçan ve yarımgüç hüzmeye genişliği 120° olan UxNB platformunun eniyi yüksekliği ile ihlal olasılığı, ϵ , arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonuçlar, veri boyutunun 8, 16 ve 64 Kbit olduğu durumlar için toplam veri hızının hem artağ şebeke kapasitesini geçmeyecek hem de ağdaki tüm VU'ların en az R_{min} kadar veri hızına sahip olacakları biçimde, her iki kuyruk tipi için Problem 6.21'un çözümü ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 100 bağımsız gerçekleştirimin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. UxNB platformu için, veri gönderimi için harcanan gücün uçmak için tüketilen güçten çok daha az olduğu Çizelge 6.3'e bakılarak görülebilir. Dolayısıyla, havada asılı kalmak için harcanan güç FRSU'nun toplam güç tüketimini domine etmektedir. Problem 6.21'in amacı toplam tüketilen gücü enküçültmek olduğundan, FRSU ne kadar yere yakın olursa amaca o



Şekil 6.3. Ortalama paket uzunlukları $N^{av} = 8, 16, 64$ Kbit için ihlal olasılığının bir fonksiyonu olarak eniyi yükseklik ve toplam güç tüketimi eğrileri.

kadar ulaşılır. Buna göre, Şekil 6.3'te ihlal olasılığının artması ile ortalama paket uzunlukları 16 ve 64 Kbit için hem eniyi FRSU yüksekliğinin hem de toplam güç tüketiminin azaldığı görülmektedir. Yukarıdaki tartışmada da belirtildiği gibi VU'ların gecikme kısıtı sağlamak için gereken enküçük veri hızı, ihlal olasılığındaki artışa ters orantılı biçimde düşmektedir. İlk bakışta, düşük ihlal olasılığına erişmek için yüksek veri hızının gerektiği ve bununla birlikte, FRSU yüksekliğinin azalacağı düşünülse de bu noktada, havasal baz istasyonunun antenin hüzm genişliği ön plana çıkmaktadır. FRSU ne kadar yere yakın olursa, ana hüzmünün yerde aydınlattığı alan o kadar dar olacaktır. Bu sebeple VU'lar yan loblardan yayılan sinyaller ile iletişim kurmak durumunda olacaktır. Yan lobların kazancı ise ana hüzmeye oldukça düşüktür. Bu da VU'ların veri hızını gözle görülür ölçüde düşürecektir. Örneğin, 10^{-5} ihlal olasılığı ve 16 Kbit ortalama veri uzunluğu için, VU'nun veri hızı en az 2.525 Mbps olmalıdır. Bu durumda, FRSU yüksekliği yerden 160 m yukarıda olmalıdır ve toplam güç tüketimi 2420 Watt olmaktadır. Ancak ihlal olasılığı 0.01 olduğunda, çalışma yüksekliği 35 m ile yükseklik alt limiti olan h_{min} 'e eşit iken buna karşılık gelen güç tüketimi ise 2405 Watt olmaktadır. Yani iki durum arasındaki tüketim farkı 15 Watt olmaktadır. Diğer taraftan, 8 Kbit ortalama paket uzunluğu için ihlal olasılığının değişmesi havasal baz istasyonunun konuşlandığı yüksekliği etkilememektedir. Bunun nedeni, sinyaller yan loblardan yayılsa bile enküçük veri hızı kısıtının sağlanabilmesidir. Çünkü ağda GI/GI/1 kuyruğu varsayıldığında, 8 Kbit ortalama veri uzunluğu için

enküçük veri hızı Kbps mertebesindedir. Bu nedenle, bu miktarda veri hızına ulaşabilmek için FRSU yüksekliğini değiştirmek yerine güç kontrolü yapılmak daha enerji verimli bir stratejidir. Bu da maliyet fonksiyonunu daha az arttırdığından tercih edilen yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Kuyruk tipleri göz önüne alındığında, veri hızı gereksinimi daha az olan M/M/1 kuyruğu durumunda tüm paket uzunlukları ve ihlal olasılıkları için GI/GI/1 kuyruğu durumuna göre FRSU daha alçağa konuşlanmaktadır. Bununla uyumlu olarak daha az güç tüketmektedir. Ancak iki kuyruk varsayımında da elde edilmesi gereken veri hızları arasındaki fark çok fazla olmadığından bazı durumlardaki ortalama yüksekliklerin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Örneğin, 64 Kbit'lik paketlerin kullanıldığı durum için ihlal olasılığının 10^{-4} ile 0.05 arasında değişmesi ile iki kuyruk varsayımında elde edilen yüksekliklerin yaklaşık 400 ila 380 m arasında değiştiği görülmektedir.

Eşitlik 6.7'de görüldüğü gibi artağ şebeke kapasitesi yer baz istasyonu ile İHA arasındaki uzaklığın bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, bu problemin çözümünde elde edilen artağ kapasitesinin sabit olduğu söylenemez ve her gerçekleştirilmede farklı bir sonuç çıkmaktadır. Bu sebeple, bu bağlantının yeterliliğini gözleyebilmek için *artağ şebeke yükü* isimli yeni bir metrik ortaya atılmıştır. Bu metrik, VU'ların toplam veri hızının artağ şebeke kapasitesine bölünmesi ile bulunur ve

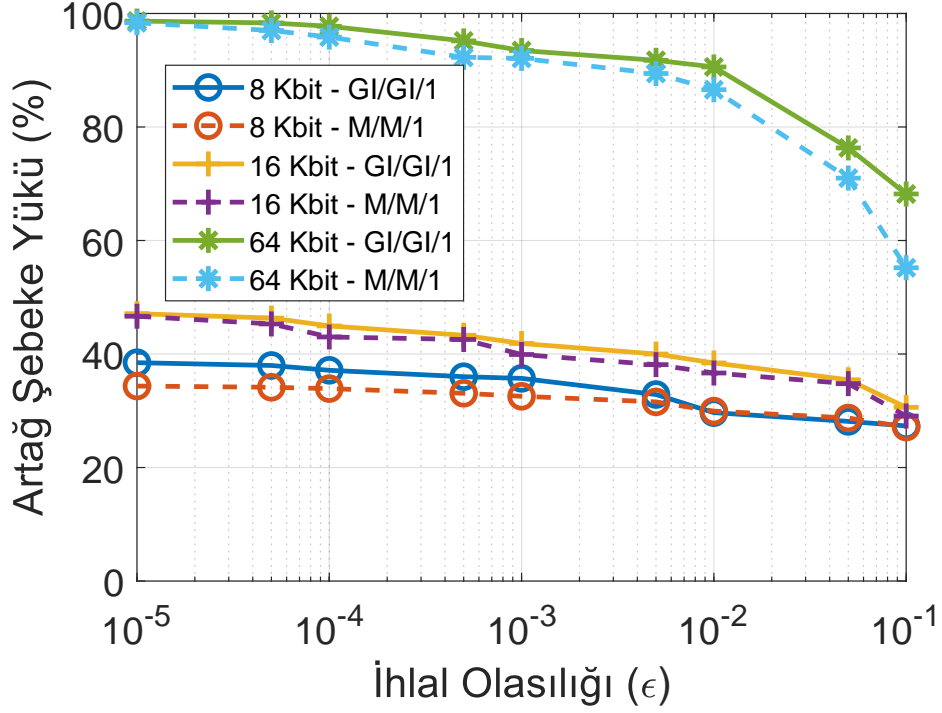
$$\Lambda = \frac{\sum_k r_k}{C_{BH}} \quad (6.22)$$

ile ifade edilir. Şekil 6.4'te, her iki kuyruk tipi için farklı uzunluklardaki veriler kullanılarak ihlal olasılığının artağ şebeke yüküne etkisi incelenmiştir. Genel olarak, paket boyundan ve kuyruk tipinden bağımsız olarak, ihlal olasılığındaki artışın artağ yükünde düşüşe neden olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, iki bölümde incelenebilir. İlki, Çizelge 6.4 özelinde yapılan tartışmadan, ihlal olasılığı arttıkça VU'ların gecikme kısıtını sağlamak için daha düşük veri hızına sahip olmaları gerektiği görülmektedir. Bununla uyumlu biçimde, gecikme kısıtını sağlamak için gerekli olan R_{\min} veri hızı düşük olacağından kullanıcıların toplam veri hızı da düşük olacaktır. Bu durumda sonuç olarak, artağ şebeke yükünün payındaki değer düşecektir. İkinci neden ise şu şekilde açıklanabilir. Şekil 6.3'te, FRSU yüksekliği, ihlal olasılığındaki artış ile düşmektedir ve buna göre, yer baz istasyonu ile platform arasındaki uzaklık ortalama düşmektedir. Bu nedenle, artağ bağlantısının kalitesi yükselmektedir. Bu durumu gözlemek için en iyi örnek, kuyruk

tipinden bağımsız olarak, ihlal olasılıkları 0.05 ve 0.01 iken paket boylarının 8 ve 16 Kbit olduğu durumlardır. Şekil 6.3'te bu iki durumda UxNB platformunun aynı yükseklikte uçtuğu gözlemlenmektedir. Buna göre, artağ şebeke kapasitesinin ortalama her iki durum için de aynı olduğu varsayılabılır. Ancak, Şekil 6.4 incelendiğinde, aynı ihlal olasılıkları için artağ şebeke yükünün 16 Kbit ortalama paket uzunluğu olan durumda 8 Kbit'lik olana göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, üstte de bahsedildiği gibi, 16 Kbit paket boyu için VU'ların bireysel veri hızlarının (dolayısıyla, toplam veri hızının) 8 Kbit paketler için gerekenden daha fazla olmasıdır. Ortalama paket boyu yönünden incelendiğinde, artağ üzerine binen yükün 8 ve 16 Kbit'lik paketler ile yapılan iletişimde 64 Kbit ile yapılabına göre daha az olduğu görülmektedir. Örneğin, 16 Kbit paketlerin kullanıldığı GI/GI/1 kuyruğu varsayılan durum için, artağ şebeke yükü, 10^{-5} ve 10^{-2} 'lik ihlal olasılıklarında sırasıyla yüzde 53.26 ve 40.2 olmaktadır. Bu durum, 64 Kbit paketlerle iletim yapıldığında ihlal olasılığı 10^{-5} için artağ yükünü yüzde 97'ye çıkarırken 10^{-2} ihlal olasılığı için yüzde 92 çıkmaktadır. Kuyruk tipleri özelinde bakıldığında ise artağ yüküne etkilerinin fazla olmadığı görülmektedir. Bunun en temel nedeni ise üstte belirtildiği gibi VU'ların bireysel veri hızlarının kuyruk tiplerine göre fazla değişmemesinden dolayı artağ şebeke yükü metriğindeki pay değerinin az miktarda azalmasıdır. Bu da Şekil 6.4'te iki kuyruk tipi için çizdirilen eğriler arasında az da olsa farklılığa neden olmaktadır. Sonuç olarak, artağ yüküne etki eden ana etmenin iletim yapılan paket uzunluğu olduğu ortaya çıkmaktadır.

6.5 Bölüm Özeti

Bu kısımda, V2X ağında bir UxNB'nin yol kenarı birimi olarak enerji verimli konuşlandırılması incelenmiştir. Önerilen problemde, gecikmenin belli bir değerden yüksek olma olasılığının ihlal olasılığını geçmeyeceği garanti edilip, aynı zamanda artağ şebeke kapasitesinin tüm VU'ların toplam veri hızından daha büyük olacağı garanti edilirken UxNB'nin toplam tükettiği güç enküçültülmek istenmektedir. Öncelikle, kanal, artağ kapasitesi, gecikme ve güç tüketimi modellerini içeren ağ modeli tanımlanmıştır. Sonrasında, bu modeller birleştirilerek eniyileme problemi oluşturulmuştur. Bu problem Matlab Optimization Toolbox kullanılarak çoklu başlangıç noktalı SQP algoritması ile çözülmüştür. Gecikme kısıtı matematiksel olarak, hem GI/GI/1 hem de M/M/1 kuyruk yapıları varsayılarak bireysel veri hızı kısıtına dönüştürülmüştür. Sonuçlar, haberleşme yapılan ortalama paket



Şekil 6.4. Ortalama paket uzunlukları $N^{av} = 8, 16, 64$ Kbit için ihlal olasılığının bir fonksiyonu olarak yüzdelerle ifade edilen ortalama ağ yükü.

boyunun V2X ağlarındaki gecikme kısıtı adına çok önemli bir başarımla belirleyici olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, "ortalama ağ yükü" isimli yeni bir metrik tanımlanmıştır ve çeşitli paket boylarının buna etkisi incelenmiştir. Sayısal bulgular, FRSU ve baz istasyonu arasındaki ağ yükünün ihlal olasılığının düşmesi ve ortalama paket boyunun artması ile oldukça maliyetli bir noktaya geldiğini göstermektedir.

7. YÜKSEK VERİ HIZI TALEBİ OLAN BÖLGELERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE ARTAĞ SORUNU

7.1 Problem Arka Planı ve Motivasyon

Günümüzde, yüksek veri hızı talebi olan bir çok uygulama mevcuttur. Sanal gerçeklik, canlı video yayınları ve aynı anda birden fazla oyuncunun olduğu gerçek zamanlı oyunlar, bu uygulamalara örnek olarak verilebilir [151]. Ağa bağlı olan cihazların ve kullanıcıların sayısının gün geçtikçe artacağı düşünüldüğünde, zaten çok olan veri hızı talebini karşılamak daha da zor olacaktır [151, 152]. Bu sebeple, 4G ağlarının veri hızı talebini karşılayamayacağı ve 5G ve ötesi ağlarda, farklı ağ topolojilerine ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple, heterojen ağlar, koordineli çok noktalı iletişim gibi yapılar önerilmiştir [152]. Yersel ağlar teorik düzeyde istenilen veri hızlarını sağlayabilir olsalar da pratik senaryolarda bu durum gözlenmez [5]. Dolayısıyla, 5G ağları için çıkan son sürümlerde, baz istasyonlarının artık sadece yerde değil havada da olabilmesi için çalışmalar yapılmıştır [6]. Havasal baz istasyonları, baz istasyonunun kurulacağı yüksekliğe göre bir drona, balona, uçağa ya da uyduya konulabilir. Tüm bu ağ yapısı Yersel Olmayan Ağlar (Non-Terrestrial Network, NTN) olarak adlandırılır [22, 24].

Yersel ağların karşılaştığı, kör nokta, düşük kapsama, gecikme, ultra güvenilirlik ve gölgeleme gibi problemlerin üstesinden gelinmesi için özellikle şehir merkezlerinde dron tipi döner kanatlı insansız hava araçları havasal erişim noktası (UxNB) olarak kullanılabilir. UxNB'ler hızlı kurulumları, hareketlilikleri ve maliyet yönünden verimli olduklarından dolayı tercih sebebidir [11]. Örneğin, kullanıcı yoğunluğunun fazla olduğu alanlarda yersel baz istasyonu ile koordineli çalışarak o kullanıcıların daha iyi sinyal kalitesinde iletişim yapmalarını ve dolayısıyla, veri hızlarını arttırmalarını sağlayabilir [23, 40]. Bunun dışında, acil durum senaryolarında afet bölgesine hizmet götürmek için [29], V2X ağlarında gecikme ve güvenlik gibi sorunların çözümünde, UxNB kullanılması seçenekler arasındadır [31, 32]. Bununla birlikte, akıllı şehir, akıllı fabrika, nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) gibi uygulamalarda UxNB'lerin etkin biçimde kullanılacağı düşünülmektedir [84, 115]. Geçtiğimiz yıllarda, Google, Loon projesi ile balon kullanarak Wi-Fi ağlarını havadan yaymayı planlamıştır [34]. Ayrıca, yine aynı şirket Project Wing ismini verdikleri projeleri ile UxNB'leri ulusal dağıtım şebekesine entegre etmeyi başarmışlardır. Buna benzer bir proje de Amazon tarafından Prime Air isimli bir proje olarak

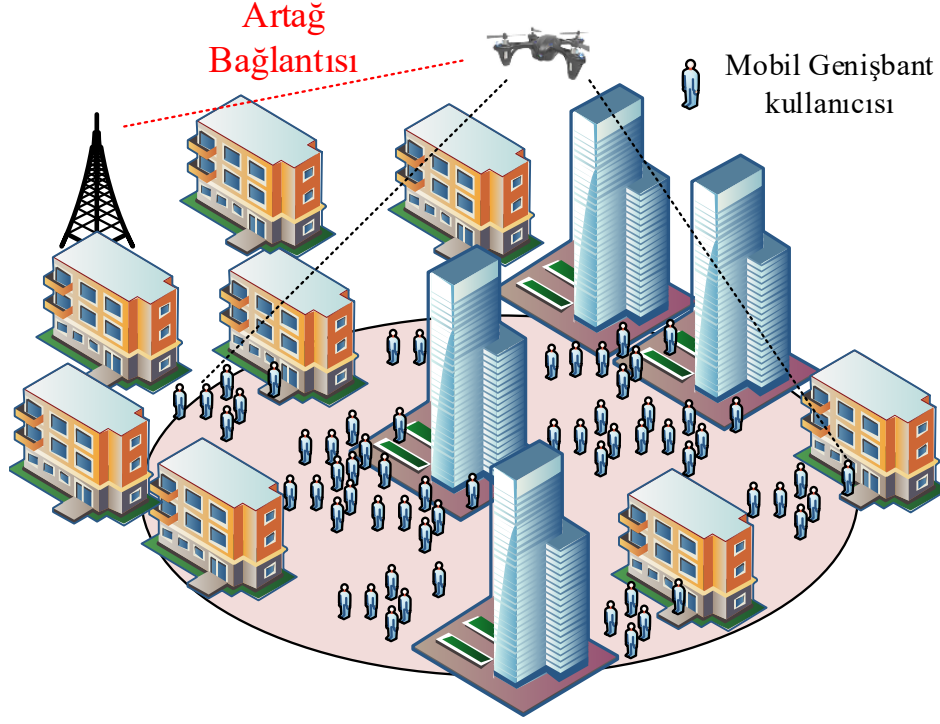
başlatılmıştır [35]. Bunun dışında, Qualcomm ve AT&T gibi şirketler spor sektöründe stadyumlarda veri trafiğini kontrol edebilmek için UxNB'lerden ticari anlamda faydalanmışlardır [82]. Türkiye'de ise Turkcell şirketi droncell projesini 2019 yılında afet bölgelerinde, spor, miting gibi halkın kalabalık olduğu ortamlarda kullanılmak üzere halka tanıtmıştır [38].

Havasal baz istasyonlarının yersel ağlara göre bu avantajlarının yanında, birçok da cevap bekleyen sorunu vardır. Bunların arasında, düşük uçuş süresi, 3 boyutlu konuşlandırma, kanal modelleme, rota planlama ve artağ şebeke bağlantı sorunları sayılabilir. Literatürde, döner kanatlı UxNB'lerin kullanıldığı birçok çalışma vardır ve genellikle bu çalışmalar, kapsama alanı ve hizmet verilen kullanıcı sayısını arttırmaya yönelik çalışmalardır [133, 153–155]. İki kullanıcının olduğu aşağı yönlü yayın için kapasite sınırları [133] no.lu çalışmada elde edilmiştir. UxNB'nin sabit bir noktada yer aldığı ve yine sabit noktalarda bulunan kullanıcılar için kapasite bölgesi bulunmuştur. Daha sonra uç ve asılı kal haberleşme yöntemi ile kapasiteyi enbüyüten eniyi rota yörüngesi oluşturulmuştur. Dronların röle olarak hücresel ağlara entegrasyonu [153] no.lu makalede ele alınmıştır. Arribas ve diğ., dronlararası girişimi ve dronların bağlantı kısıtlarını göz önünde bulundurdukları bir eniyileme problemi önermişlerdir. Önerilen problem karışık tamsayı dışbükey olmayan programlamadır ve çözmek için Bézier eğrilerini kullanılmıştır.

Masif IoT ağlarında UxNB konumlama ve IoT cihazlarının aktivasyon problemi [154] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Ahmed ve diğ., ağa bağlı olan IoT cihaz sayısını enbüyütmeyi amaçlamışlardır. Bununla birlikte, en az sayıda havasal baz istasyonu kullanarak ağ gereksinimlerini karşılamışlardır. Önerilen problem NP-Zor bir problemdir ve tamsayı programlama olarak oluşturulmuştur. Bu problemin çözümü için doğrusallaştırma tekniği kullanılarak düşük karmaşıklığa sahip buluşsal bir algoritma ortaya atılmıştır. Kapsama ve enerji hasatlama olasılıklarını enbüyütmek için eniyi havasal erişim noktası yüksekliğini araştıran çalışma [155] no.lu kaynaktır. Enayati ve diğ., bu olasılıkları ele aldıkları iki aşamalı haberleşme çerçevesi önermişlerdir. Yer baz istasyonu ile UxNB arasında artağ bağlantısının kurulduğu bu çalışmada, birinci aşamada baz istasyonu tarafından UxNB'ye hem RF enerjisi hem de veri iletilirken, ikinci atlamada UxNB aldığı verileri kullanıcıya iletmektedir. Bu şekilde, UxNB'nin uçuş süresi de incelenen parametreler arasındadır. UxNB'nin uçuş süresini ve artağ şebeke bağlantısını ele alan bir başka çalışma ise [108]

no.lu kaynakta bulunabilir. Kishk ve diğ. kapsama alanı ve kapasiteyi arttırmak için bağlı dronlardan oluşan bir ağı incelemişlerdir. Bağlı dronun kablosunun yardımıyla artağ sorununun çözüleceğini önermişlerdir. Bir acil durum senaryosu için batarya ve artağ sorunlarının ele alındığı başka bir çalışma da Selim ve diğ. tarafından ele alınmıştır [30]. Bu çalışmada da artağ sorunu, bağlı dronların kullanımı ile çözümlenmeye çalışılmıştır. Ancak, bağlı dronun sağladığı artağ bağlantısının çok yüksek olduğu varsayılmış ve felaket bölgesindeki kullanıcıların yüksek bantgenişliği gerektiren uygulamalar kullanmayacağı varsayılarak bu kısıt ortadan kaldırılmıştır.

Tezin bu bölümünde, döner kanatlı bir UxNB'nin herhangi bir şehir senaryosunda (banliyö, şehir merkezi vb.) önceden belirlenmiş bir bölgede artağ bağlantısı sağlarken uçmak için harcadığı güç başına ağıdaki toplam veri hızı enbüyütölmek istenmektedir. Böylelikle, literatürde ele alınan sorunların birçoğunun birleşimi ile ilgilenilmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi bu cihazların uçuş süresini etkilediğinden UxNB ağlarında güç tüketimi en önemli sorunların başında gelmektedir. Bu kısımda yapılan çalışmanın literatüre ana katkısı, ağ verimliliğini enbüyüten UxNB konuşlandırma probleminin bir eMBB senaryosu altında ele alınmasıdır. Böylelikle, hem uçuş süresi hem ağıdaki toplam veri hızı hem de artağ bağlantı sorununa topluca değinilmektedir. Önerilen ağ modeli, yüksek veri hızı talep eden kullanıcıların olduğu bir eMBB haberleşmesi senaryosunda UxNB yardımcı 5G ağı olarak tasarlanmaktadır. Elde edilen konuşlandırma problemi, artağ şebeke kısıtı dolayısıyla dışbükey olmayan bir problemdir. Bu nedenle, çözüm için iki farklı yöntem geliştirilmektedir. Bunlardan ilki, MATLAB paket yazılımında bulunan global arama algoritmasının kullanılmasıdır. Bunun yanında, problemin geometrik özellikleri kullanılarak hızlı sonuç veren bir buluşsal algoritma önerilmektedir. Sayısal bulgular kısmında, iki algoritmanın çıktıları birbiri ile karşılaştırılmış ve sonuçların problem boyutu arttıkça birbirine yakınsadığı görölmektedir. Bunun yanında, ağ başarımı en fazla etkileyen unsurun artağ şebeke kapasitesi olduğu sayısal bulgularda ortaya konmaktadır. Farklı şehir senaryoları için elde edilen sonuçlar, şehir yoğunluğunun artması ile uçuş sürelerinin -yüksek katlı binaların olduğu şehir senaryosu dışında- azaldığını göstermektedir.



Şekil 7.1. Mobil genişbant kullanıcılarının olduğu UxNB yardımcı 5G haberleşme senaryosu.

7.2 Ağ Modeli ve Problem Formülasyonu

Bu kısımda, 5G ve ötesi ağlar için kullanılacak ekipmanlardan biri olan döner kanatlı UxNB'nin bir eMBB haberleşmesi senaryosunda yüksek veri hızı talebi olan bir bölge için enerji verimli konuşlandırılması ele alınacaktır. Ağ modeli, verilen bir alana dağıtılmış kullanıcılar ve bunların üzerinde h_D yüksekliğinde uçan bir UxNB'den oluşmaktadır. UxNB, yer baz istasyonu ile Şekil 7.1'de görüldüğü gibi artağ bağlantısını kurmaktadır ve kurulan bağlantının kalitesi bu iki eleman arasındaki kanal durumuna göre değiştiği varsayılmaktadır. Bu ağda, havasal erişim noktası, ağ verimliliğini enbüyük yapmaya çalışmaktadır. Ağ verimliliği, yerde bulunan kullanıcıların aşağı yöndeki toplam veri hızının UxNB'nin uçmak için harcadığı güce bölünmesi ile elde edilen bir metriktir. Dolayısıyla, önerilen konuşlandırma probleminde, uçmak için harcanan güç, kullanıcıların toplam veri hızı ve artağ şebeke kapasitesi sorunları ortaklaşa ele alınmaktadır.

Bilindiği gibi UxNB platformları için literatürde yerden havaya kanal modeli geliştirilmiştir [18]. Bunun nedeni, daha önce yersel ağlar için kullanılan kanal modellerinin bu platformlar için geçersiz olmasıdır. Buna göre, h_D yüksekliğinde ve (x_D, y_D) merkez ko-

ordinatlarında bulunan bir UxNB ile yerde (x_k, y_k) koordinatlarında bulunan k kullanıcısı arasındaki kanalın görüş hattı (Line-of-Sight, LoS) olasılığı [18]

$$\mathbb{P}_{\text{LoS}}^k = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta \left(\arctan\left(\frac{h_D}{d_k}\right) - \alpha\right)\right)} \quad (7.1)$$

ile bulunmaktadır. Burada, α ve β , kanal karakteristiğine göre değişen sabitlerdir, $d_k = \sqrt{(x_D - x_k)^2 + (y_D - y_k)^2}$ ile ifade edilir ve UxNB ile k 'inci kullanıcı arasındaki yersel uzaklığı belirtmektedir. Bu kullanıcı ile UxNB arasındaki kanalın yol kaybı LoS ve NLoS bağlantılarının olasılıksal ortalaması alınarak bulunur ve

$$\bar{L}(h_D, d_k) = A_0 (h_D^2 + d_k^2) (\mathbb{P}_{\text{LoS}}^k \mu_{\text{LoS}} + \mathbb{P}_{\text{NLoS}}^k \mu_{\text{NLoS}}) \quad (7.2)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada $\mathbb{P}_{\text{NLoS}}^k = 1 - \mathbb{P}_{\text{LoS}}^k$ ile ifade edilir. Ayrıca, $A_0 = \left(\frac{4\pi f_c}{c}\right)^2$ ile tanımlanır ve f_c taşıyıcı frekansı ile c ışık hızının bir fonksiyonudur, μ_{LoS} ve μ_{NLoS} sırasıyla LoS ve NLoS bağlantılarından kaynaklanan kayıpları belirtmektedir.

Bu ağda bulunan UxNB, aşağıya bakan, yönlü bir antena sahiptir ve bu antenin kazanç örüntüsü

$$G_D(\theta) = \begin{cases} G_0/\theta_B^2 & , -\theta_B/2 \leq \theta \leq \theta_B/2 \\ G_r & , \text{aksi takdirde,} \end{cases}$$

şeklinde. Burada θ_B , yarım güç hüzmeye genişliğini belirtmektedir. Ayrıca, $G_0 \approx 30000$ ile belirlenmiştir ve G_r ana hüzmeye dışında yayılan sinyaller için belirlenmiş sabit güç kazancını belirtmektedir. UxNB, dikgen sinyalleşme yaparak kullanıcılara alt taşıyıcı tahsis etmektedir ve bu noktada altkanalların sayısının kullanıcı sayısına eşit olduğu problemi basitleştirmek adına varsayılmaktadır. Buna göre, UxNB, kullanıcı sayısına göre toplam W olan bantgenişliğini kullanıcılara eşit olacak şekilde paylaşmaktadır. Böylece, UxNB'nin hizmet verdiği alanda bulunan k 'inci kullanıcının veri hızı

$$R_k = w_k \log_2 \left(1 + \frac{P_k G_D(\theta)}{\bar{L}(h_D, d_k) w_k N_0} \right) \quad (7.3)$$

ile ifade edilebilir. Burada, P_k , k 'inci kullanıcıya tahsis edilen gücü, w_k tahsis edilen bant genişliğini ifade eder. Ayrıca, N_0 , ortalama değeri sıfır olan eklenir beyaz Gaus gürültüsünün güç izgesel yoğunluğunu belirtir.

UxNB üzerinde bulunan haberleşme biriminin fiziksel kısıtlarından dolayı, hem altkanala tahsis edilen güç hem de UxNB'nin altkanallara tahsis edeceği toplam iletim gücü, belirli bir üst sınır ile kısıtlanmaktadır. Bu durumda, önerilen konuşlandırma problemindeki altkanal ve toplam güç kısıtları

$$0 \leq P_k \leq P_{sb,max}, \quad (7.4)$$

$$\sum_{k=1}^N P_k \leq P_{t,max} \quad (7.5)$$

şeklinde ifade edilir.

UxNB ile yer baz istasyonu arasındaki artağ şebeke kapasitesi sınırlı olduğundan, ağdaki toplam aşağı yönlü veri hızının bu değeri aşmaması gerekmektedir. Bu da önerilen problemdeki artağ şebeke kapasitesi kısıtını ortaya çıkarır. Buna göre

$$\sum_{k=1}^N R_k \leq C_{BH} \quad (7.6)$$

eşitsizliği yazılabilir. Burada,

$$C_{BH} = W_{BH} \log_2 \left(1 + \frac{P_{bs}G_s/L_{d,bs}}{W_{BH}N_0} \right) \quad (7.7)$$

ile ifade edilir. Ayrıca bu eşitlikte, W_{BH} , artağ bağlantısı için tahsis edilmiş bilinen bir bant genişliğini ifade eder ve P_{bs} yer baz istasyonunun çıkış gücüdür. Bunun yanında, UxNB ile baz istasyonu arasındaki bağlantının baz istasyonun anteninin yan loblarından sağlandığı varsayıldığından, G_s , baz istasyonu anteni ile UxNB'nin yan lobları ile elde edilen yan lob kazancını belirtir ve bu değer için tüm açı değerleri için sabit olduğu varsayılmaktadır. Yer baz istasyonu ile UxNB arasındaki ortalama yol kaybı $L_{d,bs}$, Eşitlik 7.2 ile bulunabilir.

Önerilen sistem modelinde, UxNB'nin havada asılı kaldığı varsayılmaktadır. Bu durumda,

UxNB'nin uçmak için tükettiği güç, deniz seviyesinden bulunduğu yükseklik ve aracın ağırlığının bir fonksiyonu olmaktadır. Buna göre, tüketilen güç [40]

$$P_{asılı} = [P_0 (1 + \mu) + P_{rüzgar}] e^{\frac{u_0 h}{2}} \quad (7.8)$$

ile ifade edilir. Bu denklemden

$$P_0 = \frac{W_{toplama}^{3/2}}{\sqrt{2\rho_0 N A_p}}, \quad (7.9)$$

$$\mu = \frac{1}{8} \frac{C_{D0} c_b}{J^3 \pi R}, \quad (7.10)$$

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho_0 C_d A_d v^3 \quad (7.11)$$

değişkenleridir. Buradaki değişkenlere önceki bölümlerde yer verildiğinden burada tekrarlanamayacaktır. Daha detaylı bir analize erişebilmek için Bölüm 2'ye bakılabilir.

Bunun yanında, UxNB'nin üzerindeki motorların ve sürücü devrelerin fiziksel sınırlarından ötürü, havada asılı kalma gücü belirli bir eşik değerin üzerinde olamaz. Buna göre, uçmak için harcanan güç kısıtı da $P_{asılı} \leq P_{h,max}$ ile belirtilir. Ancak Eşitlik 7.8'de de gösterildiği gibi asılı kalmak için gerekli güç deniz seviyesinden yüksekliğin (irtifanın) bir fonksiyonudur. Bu da, asılı kalmak için harcanabilecek enbüyük güç kısıtının aslında bir yükseklik kısıtı olarak ortaya çıkmasını sağlar. Buna göre, döner kanatlı bir UxNB'nin konuşlanabileceği enbüyük yükseklik

$$h_D \leq \frac{2}{u_0} \ln \left(\frac{P_{h,max}}{P_0 (1 + \mu) + P_{rüzgar}} \right) - h_c = h_{max} \quad (7.12)$$

ile hesaplanabilir. Burada, h_c , UxNB ağırlığının kurulmak istendiği şehrin rakımını belirtmektedir. Bu kısıtta da görüldüğü üzere, bir UxNB fiziksel kısıtından dolayı yüksek rakımlı şehirlere kurulmak için çok verimli araçlar değildir. Dolayısıyla, bu kısımdaki çalışmada da UxNB'nin kurulduğu şehrin İstanbul olduğu varsayılmıştır. Enbüyük yükseklik kısıtı dışında, yer baz istasyonu ile artaş bağlantısı kuracak olan UxNB'nin en az yer baz istasyonu kadar yüksekliğe konuşlandırılacağı varsayılmıştır. Bu sayede, en az h_{min} yüksekli-

ğine konuşlanacak havasal baz istasyonu ile yer baz istasyonu arasında kurulacak olan bu bağlantının kalitesinin belirli bir eşik değerin üzerinde olacağı düşünülmektedir.

Önerilen eniyileme probleminde, amaç harcanan güç başına ağ verimliliğini enbüyük yapmaktır. Bu amaç doğrultusunda, UxNB belirtilen kısıtlar arasında konuşlanmalı ve kullanıcılara güç tahsislerini bu sınırlara göre yapmalıdır. Buna göre harcanan güç başına ağ verimliliği

$$\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D) = \frac{\sum_{k=1}^N R_k}{P_{\text{asılı}}(h_D)} \quad (\text{bps/W}) \quad (7.13)$$

olarak tanımlanır. Burada, $\mathbf{J}_D = [x_D, y_D, h_D]$ olarak tanımlıdır. Buna göre, ele alınan UxNB konuşlandırma problemi

$$\underset{\mathbf{P}, x_D, y_D, h_D}{\text{enbüyüt}} \quad \Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D) \quad (7.14)$$

kısıtlar

$$0 \leq P_k \leq P_{\text{max}}, \quad k = 1, \dots, N \quad (7.14a)$$

$$\sum_{k=1}^N P_k \leq P_{t,\text{max}}, \quad (7.14b)$$

$$\sum_{k=1}^N R_k \leq C_{\text{BH}}, \quad (7.14c)$$

$$h_{\text{min}} \leq h_D \leq h_{\text{max}} \quad (7.14d)$$

şeklinde formüle edilir.

Problem (7.14)'te, hem maliyet fonksiyonu hem de Eşitlik 7.14c dışbükey olmayan kısıtlardır. Bu nedenle tanımlanan bu problem bilinen dışbükey programlama algoritmaları ile çözülemez. Ancak, [150] no.lu kaynakta bulunan algoritma ile eniyi ya da eniyiye yakın çözümü elde etmek mümkündür. Bu algoritma, MATLAB ortamında yerleşik bulunan bir algoritmadır ve birden fazla aşamayı içinde barındırır. Öncelikle, birden fazla başlangıç noktasını saçılma algoritması (scattering algorithm) ile bulmaktadır. Daha sonra, her noktayı yinelemeli biçimde çözüp bir veya daha fazla noktada yakınsama sağlandığında sonlanan bir yapısı vardır ve `global search` olarak adlandırılmıştır.

Bununla birlikte, maliyet fonksiyonunun ve Problem 7.14'ün geometrik yapısı gereği buluşsal bir algoritma da türetmek mümkündür. Bir sonraki kısımda, maliyet fonksiyonunun h_D UxNB yüksekliğine göre tek modlu olduğu gösterilerek hesaplama karmaşıklığı daha az olan ve dolayısıyla daha hızlı sonuç veren buluşsal bir algoritma sunulacaktır. Böylece, sayısal bulgular kısmında, türetilen buluşsal algoritma ve MATLAB Global Optimization Toolbox'ta bulunan global arama (`global search`) algoritması birbiri ile karşılaştırılacaktır.

7.3 Çözüm Yaklaşımı ve Buluşsal Algoritma

Bu kısımda, Problem 7.14'e bir çözüm yaklaşımı getirilerek eniyiye yakın sonucu elde eden hesaplama karmaşıklığı düşük bir algoritma önerilecektir. Bunun için öncelikle, maliyet fonksiyonunun UxNB yüksekliğine göre tek modlu (unimodal) olduğu gösterilecektir. Böylece maliyet fonksiyonunun yüksekliğe göre enbüyük noktası basit bir altın kesit arama (Golden Section Search) algoritması ile bulunabilecektir.

Teorem 7.3.1 Problem 7.14'teki maliyet işlevi $\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D)$, UxNB yüksekliği, h_D 'ye göre $[h_{\min}, h_{\max}]$ tanım aralığında tek modlu bir işlevdir. Burada, $h_{\min} = \beta R_c$ ve h_{\max} , Eşitlik 7.12'deki gibidir.

İspat 7.3.1 Bir fonksiyon $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ biçiminde tanımlanmış olsun. Bu tanım kümesinde $a \in \mathbb{R}$ değeri olsun. Eğer $f(x)$, $x \in \mathbb{R}$ değeri, $x < a$ için monoton azalan (artan) ve $x > a$ için monoton artan (azalan) ise f fonksiyonu tek modludur ve a noktasında bir enbüyük (enküçük) noktası vardır. Başka bir lokal enbüyük (enküçük) noktası yoktur.

Maliyet fonksiyonu $\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D)$ 'nin diğer tüm değişkenlerin sabit olduğu durumda, h_D yüksekliğine göre $[h_{\min}, h_{\max}]$ aralığında tek modlu olduğu, bu fonksiyonun birinci türevinin tek bir noktada sifıra eşit olduğu gösterilerek yapılabilir. Buna göre maliyet işlevi

$$\Phi(h_D) = \sum_{k=1}^A \log_2(f_k(h_D)) \exp(-u_0 h_D / 2) \quad (7.15)$$

biçiminde yazılır. Burada, $A = w_k / [P_0(1 + \mu) + P_{\text{wind}}]$ şeklindedir ve

$$f_k(h_D) = 1 + \frac{B_k(1 + \alpha \exp(\alpha\beta) g_k(h_D))}{(h_D^2 + d_k^2)(\mu_{LoS} + \mu_{NLoS} \alpha \exp(\alpha\beta) g_k(h_D))} \quad (7.16)$$

ile ifade edilmektedir ve $B_k = P_k G_D(\theta) / w_k N_0$ ve $g_k(h_D) = \exp(-\beta \arctan(h_D/d_k))$ biçimindedir. Buna göre, $\Phi(h_D)$ 'nin türevi

$$\Phi' = \left[\sum_k A \frac{f'_k}{f_k} - \frac{u_0}{2} \sum_k A \log(f_k) \right] \exp(-u_0 h_D/2) \quad (7.17)$$

$$= A \exp(-u_0 h_D/2) \sum_k \frac{f'_k}{f_k} - \frac{u_0}{2} \log(f_k) \quad (7.18)$$

biçiminde yazılır. Burada, ' sembolü ilgili fonksiyonun h_D 'ye göre tüverini belirtmektedir. Bu terimin başındaki üssel terim yalnızca $h_D \rightarrow \infty$ durumunda sıfır olacağından yani h_D için belirlenen sınırların dışına çıkacağından Φ' sıfır olabilmesi için toplam ifadesinin sıfıra eşit olması gerekmektedir. Buna göre,

$$\sum_k f'_k - \frac{u_0}{2} f_k \log(f_k) = 0 \quad (7.19)$$

yazılabilir. Eşitlik 7.19'da, f'_k ise

$$f'_k = \frac{U_k g_k(h_D)}{(h_D^2 + d_k^2)^2 (D_k g_k(h_D) + 1)^2} \quad (7.20)$$

ile hesaplanır. Burada,

$$U_k = \frac{2d_k B_k (\mu_{NLoS} - \mu_{LoS})}{A u_0 \mu_{LoS}^2} \alpha \beta \exp(\alpha \beta) \quad (7.21)$$

$$D_k = \frac{\mu_{NLoS} \alpha \exp \beta \alpha}{\mu_{LoS}} \quad (7.22)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik 7.20, Eşitlik 7.19'da yerine yazıldığında ve bazı manipülasyonlar yapıldığında

$$\sum_k U_k g_k(h_D) = \sum_k \frac{u_0}{2} (h_D^2 + d_k^2)^2 f_k \log(f_k) (D_k g_k(h_D) + 1)^2 \quad (7.23)$$

elde edilir. Eşitlik 7.23'te eşitliğin sol tarafı, $h_D = 0$ için $g_k(0) = 1$ olduğundan $\sum_k U_k$ değerini alır ve bu değer pozitif bir değerdir. Aynı terimde h_D büyüdükçe g_k fonksiyonu monoton olarak sıfır değerine azalmaktadır. Bununla birlikte, monoton azalan fonksiyonların

toplamı da yine monoton azalan bir fonksiyon oluşturacağından Eşitlik 7.23'ün sol tarafının monoton azaldığı söylenebilir. Bu eşitliğin sağ tarafına bakıldığında ise, bu terimin monoton arttığını gösterebilmek adına birinci türevini almak gerekmektedir. Şayet, Eşitlik 7.23'ün sağ tarafındaki toplam terimi monoton artıyorsa birinci türevinin $[h_{\min}, h_{\max}]$ tanım aralığındaki tüm h_D değerleri için sıfırdan büyük olması gerekmektedir. Buna göre, toplam teriminin türevi

$$\sum_k (2h_D + (2h_D - \beta d_k) D_k g_k) (D_k g_k + 1) u_0 (h_D^2 + d_k^2) f_k \log(f_k) + \sum_k U_k g_k (\log(f_k) + 1) \quad (7.24)$$

biçimindedir. Bu ifadedeki ikinci toplam teriminin içindeki tüm değerler ve fonksiyonlar sıfırdan büyük değer almaktadır. Bunun yanında, bu durum birinci toplam terimi için de geçerlidir ancak buradaki $2h_D - \beta d_k$ teriminin sonucunun her zaman sıfırdan büyük ya da eşit olması gerekmektedir, yani $h_D \geq \beta d_k/2$. Bilindiği gibi d_k , k 'inci kullanıcı ile UxNB arasındaki 2 boyutlu yersel uzaklığı vermektedir. Herhangi bir kullanıcı ile UxNB arasındaki enbüyük mesafe hizmet verilen alanın çapı olan R_c kadar olacaktır. Bu durumda, $h_{\min} = \max\{\beta d_k/2\} = \beta R_c$ için Eşitlik 7.23'ün sağ taraftaki toplam teriminin monoton artan olduğu gösterilmiş olur. Bu eşitliğin sol tarafındaki toplam terimi monoton azalan, sağ tarafındaki toplam terimi ise monoton artan olduğundan, *bu iki fonksiyon tek bir noktada birbirine eşit olabilir* ve bu nokta maliyet fonksiyonu $\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D)$ 'nin türevini sıfır yapan noktadır. Başka bir deyişle, $\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D)$ fonksiyonu tek modludur ve bu nokta maliyet işlevini enbüyük yapan noktadır. Böylece ispat tamamlanmış olur. ■

UxNB'nin koordinatlarının $\mathbf{J}_D^\dagger \in \partial F$ ile olurlu kümenin içinde sabit olduğunu varsaya-

Algoritma 3 UxNB'nin koordinatlarını ve güç tahsis vektörünü arayan algoritma.

Girdi: Kullanıcıların koordinatları $(x_k, y_k), \forall k$, baz istasyonu koordinatları $\mathbf{J}_{bs} = [x_{bs}, y_{bs}, h_{bs}]$, $\Delta h, h_{\min}, h_{\max}$.

Çıktı: UxNB'nin koordinatları, (x_D, y_D, h_D) , ve güç tahsisi vektörü, \mathbf{P} .

```

1: while  $h_{\max} - h_{\min} \geq \Delta h$  do
2:    $h_D^l \leftarrow h_{\min} + \gamma (h_{\max} - h_{\min})$ ,
3:    $h_D^u \leftarrow h_{\max} + \gamma (h_{\max} - h_{\min})$ ,
4:    $[\mathbf{P}^l, \mathbf{J}_D^l] \leftarrow \text{Algoritma 2}(\mathbf{J}_{bs}, h_D^l)$ ,
5:    $[\mathbf{P}^u, \mathbf{J}_D^u] \leftarrow \text{Algoritma 2}(\mathbf{J}_{bs}, h_D^u)$ ,
6:   if  $\Phi(\mathbf{P}^l, \mathbf{J}_D^l) \geq \Phi(\mathbf{P}^u, \mathbf{J}_D^u)$  then
7:      $h_{\min} = h_D^u$ ,
8:   else
9:      $h_{\max} = h_D^l$ ,
10:  end if
11: end while
12:  $h_D^* = (h_{\max} + h_{\min}) / 2$ .
13:  $[\mathbf{P}^*, \mathbf{J}_D^*] \leftarrow \text{Algoritma 2}(\mathbf{J}_{bs}, h_D^*)$ .
14: return  $(\mathbf{P}^*, \mathbf{J}_D^*)$ 

```

Algoritma 4 UxNB'nin yatay koordinatlarını ve güç tahsis vektörünü arayan algoritma.

Girdi: Baz istasyonu koordinatları $\mathbf{J}_{bs} = [x_{bs}, y_{bs}, h_{bs}]$, h_{\min}, h_{\max} .

Çıktı: UxNB koordinatları, (x_D^*, y_D^*) , ve güç tahsisi vektörü, \mathbf{P}^* .

```

1: Izgara arama kullanarak,  $[x_D^*, y_D^*] \leftarrow \arg \max_{x_D, y_D} C_{BH}$ 
2: İç-nokta algoritması ile  $\mathbf{P}^* \leftarrow \arg \max_{\mathbf{P}} \Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D^\dagger)$ 
3: return  $(\mathbf{P}^*, x_D^*, y_D^*)$ 

```

lım. Bu durumda, Problem 7.14

$$\text{enbüyüt } \Phi(\mathbf{P}, \mathbf{J}_D^\dagger) = \frac{\sum_{k=1}^N R_k(P_k, \mathbf{J}_D^\dagger)}{P_{\text{hov}}(h_D^\dagger)} \quad (7.25)$$

kısıtlar

$$0 \leq P_k \leq P_{\max}, \quad k = 1, \dots, N \quad (7.25a)$$

$$\sum_{k=1}^N P_k \leq P_{t, \max}, \quad (7.25b)$$

$$\sum_{k=1}^N R_k(P_k) \leq C_{\text{BH}}^\dagger, \quad (7.25c)$$

şeklinde sadece güç tahsis vektörünün değişken olduğu bir probleme dönüşür. Burada ayrıca Eşitlik 7.25c'deki artağ şebeke kapasitesi de sabit bir değere dönüşür. Bu problem, tek bir başlangıç noktası seçilerek MATLAB Optimization Toolbox yardımı ile doğrusal olmayan programlama (non-linear programming, NLP) kullanılarak çözülebilir. Bunun

Çizelge 7.1. Tipik bir UxNB'nin teknik ve fiziksel özellikleri

Teknik ve Fiziksel Özellik	Değer
Pervane Çapı, $2R$	558.8×10^{-3} m
Pervane Genişliği, c_b	167.6×10^{-3} m
Pala, Rotor ve Batarya Sayısı	2, 4, 8
Sürüklenme Katsayısı, C_{D0}	1.57×10^{-3}
$C_d \times A_d$, [94]	0.67 m ²
Araç Ağırlığı, W_V	10 kg
Batarya Ağırlığı, W_B	2 kg
Faydalı Yük Ağırlığı, W_P	8 kg

Çizelge 7.2. Şehir Tiplerine göre LoS Olasılığı Parametreleri

Şehir Tipi	Parametre ($\alpha, \beta, \mu_{LoS}, \mu_{NLoS}$)
Banliyö	(4.88, 0.43, 0.1, 21)
Şehir Merkezi	(9.61, 0.16, 1, 20)
Yoğun Bina	(12.08, 0.11, 1.6, 23)
Yüksek Katlı Bina	(27.23, 0.08, 2.3, 34)

yanında, bu problem bir enbüyütme problemi olduğundan ve Eşitlik 7.25c, aynı zamanda maliyet fonksiyonundaki toplam veri hızına bir üst sınır getirdiğinden, Problem 7.25'in eniyi noktası artağ Şebeke kapasitesinin enbüyük olduğu durumda ortaya çıkar. Bu durumda, sabit h_D^\dagger UxNB yüksekliği için UxNB'nin koordinatları $\mathbf{J}_D^\dagger = [x_D^*, y_D^*, h_D^\dagger] = \arg \max C_{BH}$ biçiminde olmalıdır. Bu koordinatlar, bir ızgara arama (grid search) algoritması ile elde edilebilir. Böylece, Problem 7.25, bu koşul altında çözüldüğünde, h_D^\dagger sabit UxNB yüksekliği için UxNB'nin hem yere izdüşümü olan $[x_D^*, y_D^*]$ koordinatları hem de eniyi güç tahsisi vektörü \mathbf{P}^\dagger bulunmuş olur. Maliyet fonksiyonu Φ 'nin h_D değişkenine göre tek modlu olduğu bilindiğinden Problem 7.14 bir altın kesit arama algoritması ile çözülebilir. Bu algoritmalar, Algoritma 3 ve 4'de sunulmuştur.

7.4 Sayısal Bulgular

Bu kısımda, önerilen problem ile ilgili sonuçlar, hem MATLAB Global Optimization Toolbox hem de buluşsal algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Benzetimlerde kullanılan UxNB'nin özellikleri, Şehir tipine göre sinyal yayılım parametreleri ve benzetim parametreleri sırasıyla Çizelge 7.1, Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3'de sunulmuştur. Benzetimlerde kullanıcılar ilgilenilen alana homojen (birbiçimli dağılım ile) Şekilde dağıtılmışlardır. Tüm sonuçlar 100 birbirinden bağımsız gerçeklemeden ortalama alınarak elde edilmiştir.

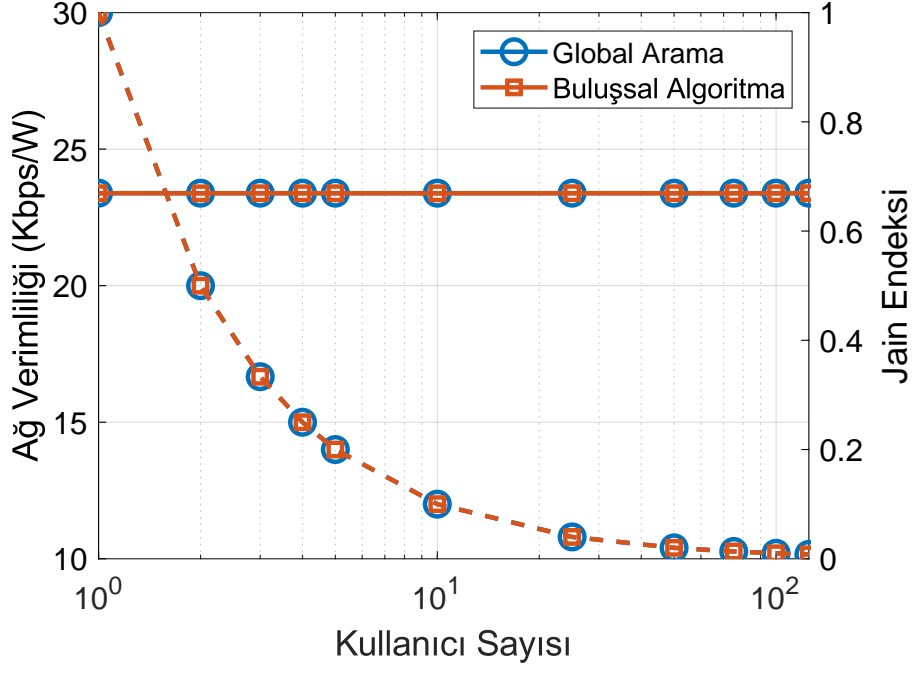
Çizelge 7.3. Benzetim değerleri

Parametre	Değer
Taşıyıcı Frekansı, f_c	2.5 GHz
Bantgenişliği, W	20 MHz
Artağ Bantgenişliği, W_{BH}	10 MHz
Hüzme Genişliği, θ_B	120°
Baz İstasyonu İletim Gücü, P_{bs}	46 dBm
UxNB İletim Gücü, $P_{t,max}$	16 dBm
Baz İstasyonu Yan Lob Kazancı, G_s	-5 dBi
UxNB Yan Lob Kazancı, G_r	-16.8 dBi
Hizmet Bölgesinin Çapı, R_c	400 m
Hizmet Bölgesinin Merkezine göre Bİ Konumu	(400, 400, 35) m
Gürültü PSD	-174 dBm
Gerçekleme Sayısı	100
Bataryalardan Çekilebilecek Enbüyük Güç, $P_{h,max}$	2540 W
Şehir Rakımı, h_c	124 m
Enküçük Yükseklik, h_{min}	44 m
Enbüyük Yükseklik, h_{max}	881 m

Şekil 7.2’de kullanıcı sayısının bir fonksiyonu olarak sol düşey ekseninde ağ verimliliği sağ düşey ekseninde ise Jain endeksi gösterilmektedir. Bu grafikte, düz çizgiler ağ verimliliği için, parçalılar ise Jain endeksi için çizilmiştir. Şekil 7.2’de yoğun şehir merkezi senaryosu için MATLAB yazılım paketinde var olan Global Arama ile buluşsal algoritma birbiri ile karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü gibi iki algoritma ile elde edilen bulgular birbirinin aynısıdır. Bununla birlikte, kullanıcı sayısının artmasının ağ verimliliğini olumlu ya da olumsuz etkilemediği görülmektedir. Bunun nedeni, artağ şebekesinin ağdaki toplam veri hızına bir üst sınır getirmesidir. Yeni kullanıcıların sisteme katılması, sistemin genel başarımını bu üst sınır nedeniyle etkilememektedir. Benzer etkiyi Jain endeksi eğrilerinde de görmek mümkündür. Jain endeksi kullanıcılar arasındaki adaleti ölçmek için getirilen bir metriktir ve

$$\mathcal{J} = \frac{[\sum_k \log_2(1 + \text{SNR}_k)]^2}{N \sum_k [\log_2(1 + \text{SNR}_k)]^2} \quad (7.26)$$

biçiminde yazılır. Şekil 7.2’de görüldüğü gibi kullanıcı sayısının artması ya da sisteme başka kullanıcıların girmesi, sistemdeki adaletsizliği arttırmaktadır. Bu da bazı kullanıcılara diğerlerine göre daha fazla güç tahsis edildiğinin bir göstergesidir. Dolayısıyla, artağ şebeke kısıtı kullanıcılara haddinden fazla güç tahsis edilmesini engellemektedir. Ayrıca artağ bağlantısı izin verse bile UxNB’nin kullanıcılara tahsis edebileceği güç miktarı sı-

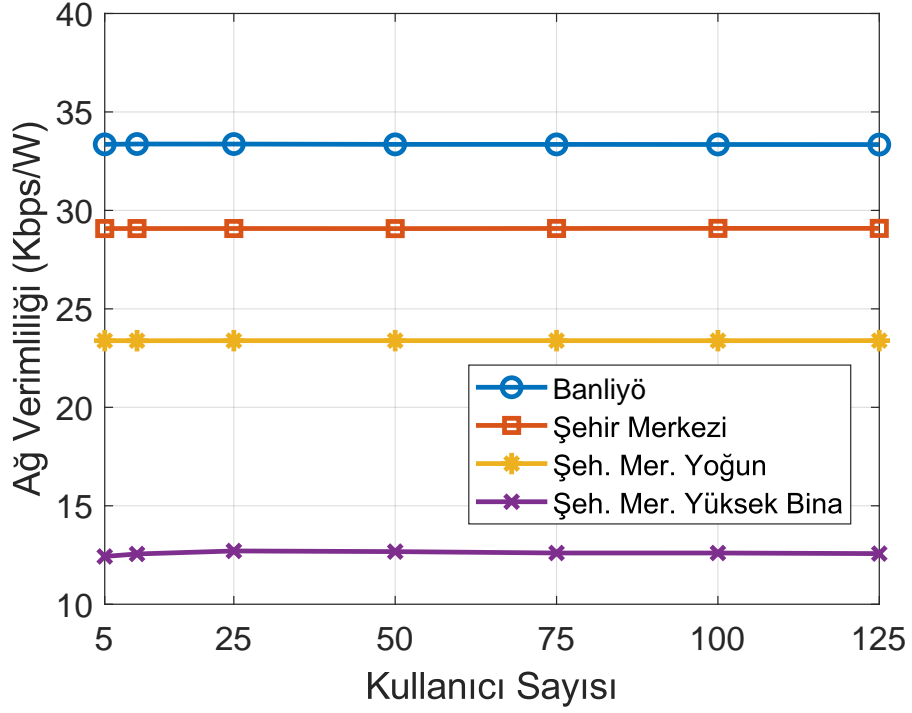


Şekil 7.2. Kullanıcı sayısının bir fonksiyonu olarak (solda) UxNB'nin uçmak için harcadığı güç başına toplam veri hızı (Kbps/W) ya da ağ verimliliği eğrileri ve (sağda) Jain endeksi.

nırlıdır. Bu sebeple kullanıcılar arasında adaleti sağlayabilmek, bu senaryoda mümkün olmamaktadır.

Algoritmaların hesaplama süreleri göz önüne alındığında, Intel Core i7-4790K işlemcili 16 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda, global arama (`global search`) bir yinelemeyi 10 kullanıcı için ortalama 3 sn'de tamamlarken, 50 kullanıcı için 16 sn'de ve 125 kullanıcı için 34 sn'de sonuç vermektedir. Bunun yanında, Algoritma 3'de verilen buluşsal algoritma kullanıldığında, bir yineleme 10 kullanıcı için ortalama 0.38 sn'de tamamlanırken, 50 kullanıcı için 0.85 sn'de ve 125 kullanıcı için 2.46 sn'de sonuç edilmektedir. Bu durumda, iki algoritma da problem boyutu az iken daha hızlı sonuç verirken problem boyutu arttıkça yavaşlamaktadır. Problem boyutunun 50 kullanıcı olduğu durumda Algoritma 3, `global search` algoritmasından yaklaşık 18 kat hızlıken, 125 kullanıcı için 13 kat hızlıdır.

Şekil 7.3'te kullanıcı sayısına karşılık ağ verimliliği eğrileri farklı şehir senaryoları için Algoritma 3 kullanılarak bulunmuştur. Şehir tipi ya da senaryoları, Eşitlik 7.1'deki α ve β parametrelerini değiştirmektedir. Dolayısıyla, yüksek katlı binaların bulunduğu bir şehir senaryosunda LoS olasılığı düşmektedir. Bununla birlikte, banliyöde, şehir merkezine



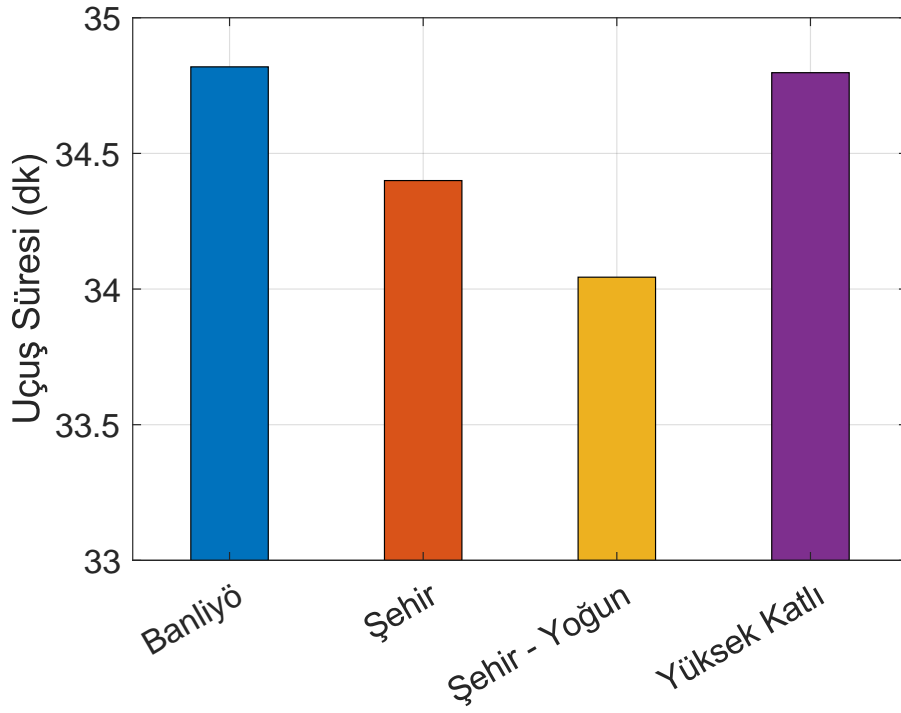
Şekil 7.3. Farklı şehir senaryoları için kullanıcı sayısının bir fonksiyonu olarak ağ verimliliği eğrileri.

göre daha alçakta binalar olacağından LoS ihtimali diğer senaryolara göre daha fazladır. UxNB ile yer baz istasyonundaki kanalın da LoS ihtimaline bağlı olarak değiştiğini varsayıldığından, artağ şebeke kapasitesinin en fazla olabileceği şehir bölümü banliyö olacaktır. UxNB ile yer baz istasyonu arasındaki kanal kalitesi en yüksek olduğundan, en yüksek ağ verimliliğine Şekil 7.3'te de görüldüğü gibi banliyö senaryosunda ulaşılmaktadır. LoS bağlantısını elde etmenin en zor olduğu yüksek binalı şehir senaryosunda ise ağ verimliliği en düşük çıkmaktadır. Şehirdeki binaların yoğunluğu ve yükseklikleri azaldıkça artağ şebeke kapasitesi artacağından ağ verimliliği de artmaktadır. Ayrıca Şekil 7.3'te, Şekil 7.2'de görüldüğü üzere ağdaki kullanıcı sayısının artmasının ağ verimliliğine etkisi diğer şehir senaryolarında da olmamaktadır. Bu durum aynı zamanda kullanıcılara yapılan hizmet arasında bir adalet olmadığını göstermektedir.

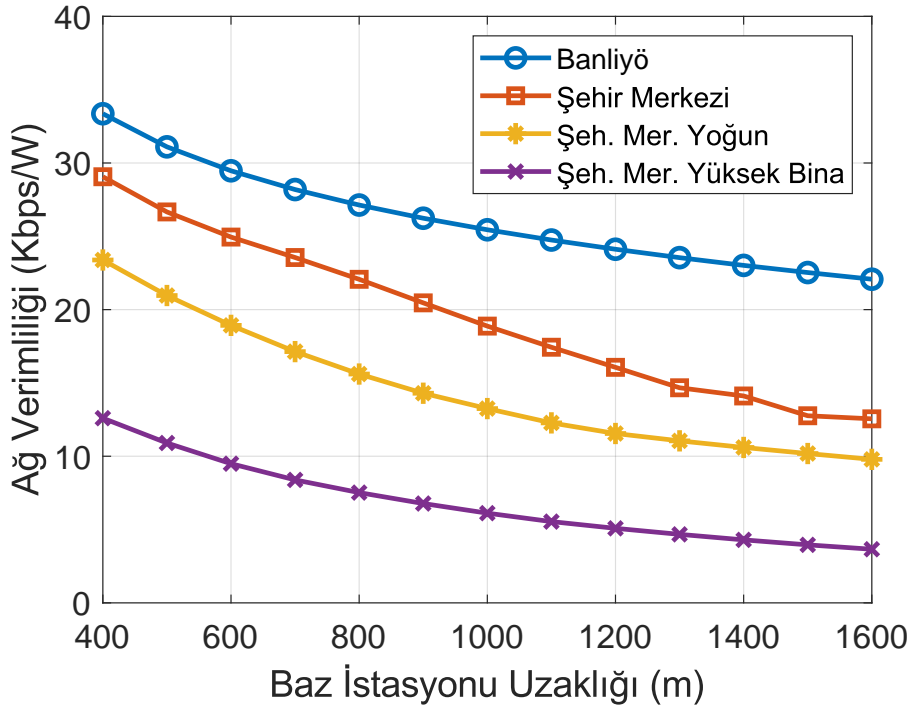
Şekil 7.4'te ortalama uçuş süreleri senaryo değişimlerine göre Algoritma 3 kullanılarak çizdirilmiştir. Uçuş süresi, UxNB üzerinde bulunan pillerin enerji yoğunluğunun UxNB'nin uçmak ve haberleşmek için harcadığı güçlerin toplamına bölünmesiyle elde edilmektedir. Buna göre, en uzun uçuş süresi, 34 dk 52 sn ile banliyö senaryosu için elde edilmektedir. Bu da UxNB'nin harcadığı toplam gücün uçmak için harcanan güç tarafından domine edildiği düşünüldüğünde banliyöde kurulan havasal erişim noktası en alçakta uçuyor anla-

mına gelir. UxNB'nin alçakta uçması ağ verimliliği maliyet fonksiyonunda paydada olan havada asılı kalmak için gereken gücü de azaltacağından Şekil 7.3'te görüldüğü gibi ağ verimliliği en yüksek olan senaryo banliyö senaryosu çıkmaktadır. Bununla birlikte daha önce bahsedildiği gibi banliyöde bina yükseklikleri diğer senaryolara göre daha alçak olacağından UxNB baz istasyonu ile yersel baz istasyonu arasında kurulacak artağ bağlantısı da diğer senaryolara göre daha yüksek olacaktır. Bu da ağ verimliliğini doğal olarak arttırmaktadır. Buna benzer şekilde, şehir merkezi ve yoğun şehir merkezi senaryolarında, UxNB, artağ bağlantı kalitesini arttırabilmek için daha yüksekte uçmaya çalışmaktadır. Bu da uçuş süresini etkileyen faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Sırasıyla, şehir ve yoğun şehir senaryolarında 34 dk 24 sn ve 34 dk 2 sn ortalama uçuş süreleri elde edilmektedir. Diğer şehir senaryolarından farklı olarak ise yüksek katlı şehir senaryosunda uçuş süresinin arttığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, UxNB'nin daha alçak bir konuma konuşlanmasıdır. Diğer şehir senaryolarında, artağ bağlantısındaki LoS olasılığını arttırmak için yükseğe konuşlanan UxNB, bu senaryoda bunu sağlayabilmesi için çok daha fazla yükseğe konuşlanması gerekmektedir. Ancak bu durum, yerle olan mesafeyi arttırdığından kullanıcılarla arasındaki sinyal kalitesini çok düşürmektedir. Artağ bağlantısı iyi olsa bile, kullanıcıların toplam veri hızı çok düşük olacağından, UxNB, diğer senaryolara göre daha alçak bir konumda ve çok daha fazla iletim gücü ile ağ verimliliğini arttırmaktadır. Böylece, elde edilen uçuş süresi, ortalamada 34 dk 48 sn olmaktadır.

Şekil 7.5'te, sistemde 50 kullanıcı olduğu durumda, artağ bağlantısı kurulan baz istasyonunun UxNB'nin hizmet verdiği alanın merkezine olan uzaklığının bir fonksiyonu olarak ağ verimliliği eğrileri verilmektedir. Bu uygulamada da Algoritma 3 kullanılmıştır. Görüldüğü gibi, yersel baz istasyonu ile UxNB baz istasyonu arasındaki mesafe arttıkça ağ verimliliği düşmektedir. Bunun birincil nedeni, mesafenin artması sonucu Eşitlik 7.14c'deki artağ şebeke kapasitesinin düşmesidir. Bu sebeple, kullanıcıların toplam veri hızı üstten sınırlanmış olur ve ağ verimliliği düşer. Bununla birlikte, ağ verimliliğinin yaklaşık olarak uzaklıkla üssel biçimde azaldığı görülmektedir. Sadece şehir merkezi ve yoğun şehir merkezi senaryoları için yersel baz istasyonunun uzaklığı 1300 m'ye geldiğinde ağ verimliliği eğrileri birbirine yakınsamaktadır. Bu iki senaryo için kanal parametrelerinin birbirlerine çok uzak olmamasından kaynaklı olarak, aradaki mesafe arttıkça kanal değerleri birbirine yakınsamaktadır. Bu da başarımların birbirine yaklaşmasına neden olur. Ayrıca, tüm eğrilerde yavaşlayarak azalma trendi görülmektedir. Bunun nedeni, her ne kadar yersel baz



Şekil 7.4. Farklı şehir senaryolarına göre ortalama UxNB uçuş süresi



Şekil 7.5. Sistemde 50 kullanıcı varken artağ bağlantısı kurulan baz istasyonunun UxNB'nin hizmet verdiği alanın merkezine olan uzaklığının bir fonksiyonu olarak farklı şehir senaryoları için ağ verimliliği eğrileri.

istasyonu ile hizmet verilen alan arasındaki artağ bağlantısı kötüye gitse de UxNB daha alçak noktaya konuşlanarak harcadığı gücü azaltırken, altkanallara daha fazla güç tahsis ederek kullanıcıların veri hızını enbüyütmesidir. Uzaklık arttıkça, artağ şebeke kapasitesinin yanına, ikinci bir kısıtlayıcı olarak da Eşitlik 7.14b'deki toplam haberleşme gücü kısıtı eklenmektedir. Bu durum, ağ verimliliğindeki düşüşü yavaşlatsa da UxNB'nin yersel baz istasyonundan daha uzakta bir alana hizmet vermesi durumunda artık bir ağ verimliliğinden bahsetmek mümkün olmayacaktır. LTE'de makro baz istasyonları arasındaki mesafe, şehir senaryosuna göre, 750 m ila 2 km arası değiştiğinden, ele alınan uzaklıklar makul seviyelerdedir.

7.5 Bölüm Özeti

Bu kısımda, 5G ve ötesi ağlarda kullanılması düşünülen havasal erişim noktalarının kapasite artırıcı enerji verimli konuşlandırılması artağ şebeke bağlantısı göz önüne alınarak yapılmıştır. Önerilen problemde, farklı şehir senaryoları için enerji verimli UxNB konuşlandırılması artağ ve toplam haberleşme gücü kısıtları altında çalışılmıştır. Bunun için harcanan Watt başına elde edilen enbüyük toplam veri hızı, ağ verimliliği olarak tanımlanmıştır. Önerilen problemi çözebilmek için MATLAB paket yazılımındaki `global search` algoritması kullanılmıştır. Ancak bu yöntem uzun sürelerde sonuç vermektedir ve pratik değildir. Bu sebeple, problemdeki maliyet fonksiyonunun tek modlu olduğu ispatlanmış ve bunun yardımı ile Algoritma 3 önerilmiştir. Bu algoritmaların sonuç verme süreleri birbiri ile karşılaştırılmış ve önerilen buluşsal algoritmanın eniyi çözümü veren MATLAB global arama algoritmasından 13 kat daha hızlı olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, şehir senaryosundan bağımsız biçimde sistemde bulunan kullanıcı sayısındaki değişimin ağ verimliliğine etkisinin olmadığı ve sisteme kullanıcı katıldıkça, kullanıcılar arasındaki adaletin kötü yönde ilerlediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, şehir senaryoları artağ şebeke kapasitesini değiştiren en önemli faktörlerden olduğundan, sistem başarımına etki etmektedir. Şehir senaryolarının uçuş süreleri üzerindeki etkisine bakıldığında, bina yüksekliğinin ve yoğunluğunun az olduğu banliyö senaryosunda uçuş süresinin yoğun binaların olduğu şehir senaryosundan 50 saniye fazla olduğu görülmektedir. Veri hızı talebi olan kullanıcılardan oluşan bu ağ yapısında, artağ şebeke kapasitesinin en önemli performans belirleyicisi olduğu ortaya konmuştur. Bunun için artağ bağlantısının yapıldığı baz istasyonu ile olan mesafenin etkisine bakılmış ve mesafe arttıkça ağ

verimliliğinin düştüğü gösterilmiştir.

8. TAM İZOLASYONLU AĞ DİLİMLEME İLE DİNAMİK RADYO KAYNAK TAHSİSİ VE ROTA PLANLAMASI

8.1 Problem Arka Planı ve Motivasyon

Gelecek nesil 5G ve sonrası ağlarda spektrum kullanımı oldukça yoğun olacaktır [3]. Spektrumun yoğun biçimde kullanılmasına neden olacak uygulamalardan bazıları çok düşük gecikmeli haberleşme, yapay gerçeklik, nesnelerin interneti gibi uygulamalar olacaktır. Bu çeşitlilikteki kablosuz uygulamaların aynı anda sistemde çalışması üstesinden gelinmesi gereken en önemli problemlerdendir. Bu sorunla başa çıkılması amacıyla kablosuz ağ sanallaştırması fikri ortaya atılmıştır [156]. Sanallaştırılmış bir kablosuz ağda, fiziksel kablosuz altyapı ile radyo kaynakları birbirinden ayrılmış ve belirli bir sayıda sanal ağ üzerinden izole edilmiştir. Bu da ağ altyapısının birden fazla servis sağlayıcısı ya da uygulama tarafından paylaşılmasına imkan vermektedir. Böylece, maliyetlerin düşeceği, verimliliğin artacağı ve özellikle acil durum servislerine istenen hizmet kalitesinin verilebileceği düşünülmektedir. Ağ kaynaklarının sanal ağlar arasında paylaşımı sonucunda ağ dilimleme kavramı ortaya atılmıştır. Bu anlamda, fiziksel ağda yaratılan bir ağ dilimi, diğer fiziksel ağlar tarafından farkedilemeyecek şekilde oluşturulur [157]. Yani her dilim sanki varolan bir fiziksel ağ gibi davranır. Bu duruma da tam izolasyon adı verilmektedir.

8.1.1 İlgili Çalışmalar

Kablosuz ağ sanallaştırma yönteminde, kaynak tahsisi problemi literatürde detaylı biçimde çalışılmıştır [49–51, 158–160]. Örneğin, [158] no.lu kaynakta sanal ağlarda enerji verimliliği ve gecikme arasındaki ödünleşim incelenmiştir. Bu çalışmada, ağ kararlılığı problemlerinde sıkça karşılaşılan Lyapunov eniyilemesi ve bir sezgisel algoritma kullanılmıştır. Ancak, bu çalışma ağ dilimlerinin birbirinden izole olması durumunu ele almamıştır. Dikgen frekans bölüştürmeli çoklu erişim (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) tabanlı bir sanallaştırılmış ağda, kaynak tedariki ve ağa katılma kontrolü [49] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Bu çalışmada, iki tip dilim ele alınmıştır. Bunlardan ilki, kullanıcıların veri hızı gereksinimlerini dikkate alan ve belirli bir hızın üstünde hizmet alacağını garanti eden dilimdir. Diğer dilim ise kaynakları, yani gücü ve altkanalları en az kullanma garantisi vermektedir. Ancak çeşitli ağ dilimlerine az sayıda altkanal tahsis etmek, dilim kullanıcıların performanslarının eniyi olacağını garantisini verme-

mektedir. Yine bu çalışmada da dilim izolasyonu çalışılmamıştır. Baz istasyonu ataması, altkanal ve güç tahsisi değişkenlerinin ortak eniyilemesi [159] no.lu çalışmada yapılmıştır. Bu çalışmadaki amaç, ağdaki toplam veri hızını enbüyütürken dilim başına belirli bir veri hızını karşılamaktır. Fakat bu çalışma da, herhangi bir dilimde aşırı yüklenme etkisi araştırılmamıştır. Aşırı yüklenme bir dilimdeki kullanıcı sayısındaki ani artış sonucunda ortaya çıkmaktadır. Buradaki dilimler izole olmadıkları için bir dilimde meydana gelen aşırı yüklenme kaynak tahsisi problemini olumsuz yapmaktadır.

Birden çok servis sağlayıcısına bir altyapı sağlayıcısı tarafından verilen kaynak bloklarının tahsisi için [160] no.lu kaynakta bir yöntem önerilmiştir. Her sanal ağa belirli sayıda kaynak bloğunun dinamik olarak tahsis edilmesi için dilimleme ve çizelgeleme yöntemleri [50] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Bu iki çalışmada da ağ dilimlemede izolasyon kavramı çalışmıştır. Ancak bunun uygulaması, ele alınan eniyileme probleminde her dilime en az sayıda kaynak bloğu tanımlanması için bir kısıt eklenerek yapılmıştır. Böyle bir yaklaşım genellikle uçtan uca hizmet gereksinimlerini sağlamadığı için verimsiz olacaktır. Örneğin, kullanıcıları çok kötü kanal durumuna sahip olan bir dilimin belirli miktarda kaynak bloğuna sahip olması, bu kaynak bloklarının verimsiz kullanıldığı anlamına gelmektedir. Sanal bir ağda dilimlerin birbirinden tamamıyla izole olduğu durumda eniyileme ve ağ kontrolü [51] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Bu çalışmada, zamanla değişen kullanıcı sayısı altında bir kablosuz ağın iki tip dilime sahip olduğu varsayılmıştır. Bunlar, hizmet sağlayıcıya tanımlanan ve kaynak kontrolü onun elinde olan kapasitesi sınırlı bir dilim ve güvenilir düşük gecikmeli haberleşmenin yapıldığı ikinci bir dilimdir. Bu probleme, Lyapunov sapma-artı-penaltı eniyileme yöntemi kullanılarak yeni bir kontrol çerçevesi geliştirilmiştir. Buna göre, dilimlerin izolasyonu garanti edilirken, dilim gereksinimlerini sağlanmaktadır. Böyle bir haberleşme senaryosunda, baz istasyonu iletim gücü en aza indirilmektedir.

Dinamik dilimleme ile garanti edilen çeşitli hizmetler arasında geçiş problemi [52] no.lu kaynakta ele alınmıştır. Bu çalışmada, radyo kaynaklarının maliyetleri de arz talep hesabına göre belirlenerek, aktif servislere özel tanımlı dilimlerin radyo kaynak tahsisi önerilmektedir. Ayrıca, ağ trafiği ve kanal koşullarındaki değişimler öğrenilerek dilim atamaları sürekli kontrol edilmekte ve böylelikle hizmetlerin sürekliliği sağlanmaktadır. Nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) ile birlikte ağ tipleri ve sayısındaki devasa

artış sonucunda oluşan veri trafiğini yönetmek için ağ dilimleme yöntemi [161] no.lu kaynakta önerilmiştir. Bu çalışmada, gezgin iletişim sistemleri, IoT cihazları, e-sağlık, V2V haberleşmesi gibi birçok farklı ağ yapısının gereksinimlerini yerine getirebilmek için ağ kaynakları doğru dilimlere tahsis edilmek istenmiştir. Önerilen senaryoda, bir bölge belirli sayıda alana ayrılmıştır ve bu alanlarda çok sayıda IoT cihazı bulunmaktadır. IoT cihazlarının servis isteklerinin yanı sıra ağda bulunan mobil genişbant kullanıcıları da yüksek veri hızı talebinde bulunmaktadır. İki farklı eniyileme probleminin önerildiği bu çalışmada, dinamik bir senaryoda her iki kullanıcı tipine de hizmet kalitesinde herhangi bir düşüklük olmadan ağ dilimleri paylaştırılmıştır.

UxNB'ler için eniyi rota planı, UxNB yardımcı haberleşme sistemleri için bir diğer önemli sorundur. Bir UxNB'nin rotası, kullanıcı gruplarının talepleri, uçuş süresi ve güç kısıtları gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Üzerinde çok anten bulunan bir havasal erişim noktasının rota eniyilemesi [162] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Yerdeki hareketli kullanıcıların takip edildiği bir senaryoda çoklu anten yapısı kullanılarak hüzmeye oluşturulmaktadır ve böylelikle kullanıcılar arasındaki girişim yok edilmektedir. UxNB'nin bir röle olarak kullanılarak sistem veri hacminin enbüyütülmesi [163] no.lu kaynakta ele alınmıştır. Zeng ve diğ., önerdikleri problem modelinde ortak kaynak/röle iletim gücünü ve UxNB rota eniyilemesini yapmaktadır. Bununla birlikte, [164] no.lu kaynaktaki araştırma, kullanıcıların arasındaki ortalama enküçük veri hızını, kullanıcı çizelgeleme ve UxNB rota planlaması ile enbüyütmeye çalışmaktadır. Bu çalışmaların dışında, hem kaynak tahsisi hem de rota planı yapan çalışmalar mevcuttur [112,113,165,166]. UxNB ile kurulmuş bir bulut ağında mobil sınır bilişim sistemi [112] no.lu kaynakta çalışılmıştır. Kullanıcıların servis kalitesi gereksinimleri bulut sınırında çalışan bir UxNB tarafından karşılanırken aynı zamanda sistemde harcanan enerjinin enküçültülmesi yapılmaya çalışılmaktadır. Bunun için ortak bit tahsisi ve rota planı problemi ele alınmıştır. Rice sönümlenmeli kanallarda veri hasatının çalışıldığı [113] no.lu kaynakta, kullanıcıların çizelgelemesinin ve UxNB'nin 3 boyutlu rota planının ortak eniyilemesi yapılmaktadır.

Bir başka sınır bilişim sistemi problemi ise [165] no.lu kaynakta ele alınmıştır. Önerilen sistem modelinde, veri iletişimi iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada, UxNB, kullanıcılara veri boşaltma işlemini gerçekleştirir, sonrasında kullanıcılar veri işleme kısmını yaparlar. Böyle bir sistemde, H_u ve diğ., kullanıcı çizelgeleme, veri boşaltma oranı ve

UxNB rotasının ortak eniyilemesini enerji kısıtları altında yapmaktadırlar. Stokastik görev işlemenin işlendiği [166] no.lu kaynakta ise akıllı mobil cihazların tükettiği enerjiyi enküçültmek için bir problem modeli önerilmiştir. Lyapunov eniyilemesinin kullanıldığı bu çalışma sonucunda hesaplama paylaşım yönteminin, kullanıcı radyo kaynak tahsisinin ve uçuş rotasının eniyilemeleri yapılmıştır. Son olarak, [167] no.lu kaynakta, UxNB yüksekliğinin belirlendiği stokastik bir sınır bilişim sistemi önerilmiştir. Önerilen problemde, Lyapunov eniyileme yöntemi kullanılarak uçmak için harcanan haricinde sistemde tüketilen enerjinin enküçültülmesi ele alınmıştır.

8.1.2 Katkılar

Bu bölümde, bir UxNB'nin baz istasyonu olarak aşağıda bulunan farklı talepleri olan kullanıcılara ağ dilimleme yardımı ile hizmet verdiği bir senaryo ele alınmaktadır. Kullanıcılardan gelen taleplere göre ilgili ağ dilimine yerleştirildikleri bir senaryoda, iki farklı tipte kullanıcı grubu ve buna uygun olarak ağ dilimi olduğu varsayılmaktadır. Bunlardan ilki, mobil geniş bant kullanıcılarının bulunduğu multimedya ağ dilimi ve diğeri, düşük gecikmeli güvenilir haberleşme yapan kullanıcıların bulunduğu RLL dilimidir. Bu bölümde, literatürün aksine, UxNB rota planlaması problemi, bir ağ dilimleme senaryosunda ele alınmaktadır. Buna göre, ağ dilimlerinin isterlerini dinamik radyo kaynak tahsisi ile karşılanması ve UxNB rota planlaması ortaklaşa eniyilenirken UxNB'nin harcadığı toplam gücün enküçültülmesi istenmektedir. Bununla birlikte, ağ dilimlerinin birbiri ile tam izolasyonu garanti edilmektedir.

İlgilenilen problem, sistemin anlık başarımı yerine uzun dönem ortalamasının başarısı üzerine kurgulanmaktadır ve dolayısı ile bir stokastik eniyileme problemidir. Önerilen problemin yapısı oldukça karmaşık olmasına karşın, Lyapunov sapma-artı-penaltı yöntemi kullanılarak uzun dönem zaman ortalaması yerine, her zaman diliminde çözülebilen bir forma getirilmektedir. Buna rağmen, her zaman dilimi içinde çözülecek olan problemin karmaşıklığı oldukça yüksek olduğundan, üç farklı alt probleme ayrıştırılmaktadır. Sonrasında, dinamik radyo kaynak tahsisini ve rota planmasını ortaklaşa yapan eniyiye yakın buluşsal bir algoritma olan Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü (Joint Communication and Flight Control, JCoFC) algoritması sunulmaktadır. Bu algoritma, bir integral kontrolcü olarak tasarlanan dinamik güç tahsisi algoritmasını ve iç nokta (interior-point)

algoritmalarını içermektedir. Bunun sonucunda, JCoFC algoritmasının karmaşıklık ve yakınsama analizleri yapılmaktadır.

Yapılan benzetim sonuçları ile önerilen algoritmanın sönümlemesiz kanallarda oldukça hızlı yakınsadığı görülmektedir. Bununla birlikte, ağ dilimi izolasyonunun tam olarak yapıldığı gözlemlenmektedir. Zamanla değişen Rice sönümlemeli kanallar altında incelenen bir haberleşme senaryosunda ise algoritmanın başarımının ortalamada değişmediği ancak anlık olarak zamanla değişen kanalların etkisinde olduğu görülmektedir. Bunun yanında, algoritmanın başarımı her ağ dilimindeki değişen kullanıcı sayıları altında da incelenmiştir ve elde edilen sonuçlara göre kısa süreli gecikmeler olsa da algoritmanın değişen koşullara hızlı adapte olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ele alınan zaman değişimli Rice sönümlemeli kanal senaryosu süresince UxNB'nin harcadığı güç, çizdiği rota ve kalan uçuş süresi gibi değerler elde edilmektedir.

Bu bölümün geri kalanının organizasyonu şu şekildedir. Kısım 8.2'de bahsi geçen sistem modeli detaylı biçimde sunulup zaman ortalamalı stokastik eniyileme problemi formüle edilmiştir. Kısım 8.3'te, literatürde stokastik ağ eniyileme problemlerinde kullanılan Lyapunov sapma-artı-penaltı yönteminin detayları aktarılıp Kısım 8.2'de sunulan problem anlık zaman dilimlerinde çözülecek duruma getirilmektedir. Önerilen bu yöntem sonucu ortaya çıkan probleme getirilen çözüm yaklaşımı ise Kısım 8.4'te ele alınmaktadır ve JCoFC algoritması incelenmektedir. Kısım 8.5'te JCoFC algoritması ile elde edilen sayısal bulgular sunulmakta ve son olarak, Kısım 8.6, bu bölümü özetlemektedir.

8.2 Sistem Modeli ve Eniyileme Problemi

Bu bölümde, belirli bir alanda bulunan UxNB ile farklı servis talepleri bulunan kullanıcılara aşağı yönlü hizmet verilen bir ağ yapısı ele alınmaktadır. Bu ağda farklı hizmet talepleri olan iki farklı tipte kullanıcı grubu belirlenmiştir. Bunlardan ilki, mobil genişbant veri hizmeti alan, diğeri de güvenilir ve düşük gecikmeli hizmet talep eden kullanıcı gruplarıdır. Buna göre, mobil genişbant veri hizmeti alan kullanıcılar belirli bir ağ diliminde hizmet almaktadır ve buradaki amaç, bu ağ dilimindeki kullanıcıların ortalama toplam veri hızlarının belli bir eşik değerinden yüksek olmasını sağlamaktır. Bununla birlikte, güvenilir ve düşük gecikmeli haberleşme talebi olan kullanıcılar da farklı ağ dilimleri üzerinden ağa bağlanmaktadır ve bu kullanıcılara buldukları ağ dilimi için daha önce

belirlenmiş ortalama bir güvenilirlik dahilinde hizmet verilmesi sağlanmaktadır. Servis sağlayıcısı, altyapı sağlayıcısı ile her ağ diliminin hizmet kalitesi üzerinden anlaşmaktadır. Buna göre, altyapı sağlayıcı, servis sağlayıcısına ağ dilimindeki kullanıcı sayısı belirli bir üst sınırı aşmadığı sürece o dilimdeki kullanıcı QoS'nin etkilenmeyeceğini garanti etmektedir. Bunun aksine, eğer bir dilimdeki kullanıcı sayısı bu sınırı aşarsa, o dilimdeki servis kalitesi düşmektedir. Bunun sonucu olarak dilimler arası izolasyon sağlanmaktadır.

Ele alınan problemde, ağ dilimleme kullanarak iki tip kullanıcı grubuna hizmet veren havasal baz istasyonunun harcadığı ortalama gücün enküçültülmesi hem dinamik kaynak tahsisi ile hem de rota planlaması yapılarak amaçlanmaktadır. Buna göre, zaman düzlemi T , M tane eşit uzunlukta zaman dilimine bölünerek kesikli hale getirilmiştir ve zaman dilimleri arasındaki süre $\Delta = T/M$, UxNB'nin bulunduğu konum sabit varsayılacak şekilde ayarlanmaktadır. Herhangi bir anda, ağda bulunan toplam kullanıcı sayısı $N[n]$ ile belirlenmektedir. Bununla birlikte, sistemin sahip olduğu altkanal sayısı K ile belirlenmiştir ve altkanalların Rice sönümlenmeye maruz kaldıkları varsayılmaktadır. Kullanıcılara her zaman diliminde, ortak altkanal ve güç tahsisi yapılmaktadır. Bunun yanında, başlangıç koordinatları, $\mathbf{q} = [x_D \ y_D]^T$ olmak üzere $\mathbf{J}[0] = [\mathbf{q}[0], h_D[0]]^T$ olarak belirlenen UxNB'nin havada çizdiği 3 boyutlu rotanın da hesaplanması yine en düşük güç tüketimine göre yapılmaktadır. Böyle bir senaryoda, ele alınan problem oldukça karmaşık bir stokastik eniyileme problemine dönüşmektedir. Ancak, eniyileme problemi 3 ayrı alt probleme ayrılarak ve Lyapunov eniyileme yöntemi kullanılarak takip edilebilir olurlu bir sonuç elde edebilmek mümkün olmaktadır.

8.2.1 Havadan Yere Kanal Modeli

Havada uçan bir UxNB ile yerde bulunan bir kullanıcı arasındaki kanalın yol kaybı

$$L(h_D, d_i) = \begin{cases} K_0 \mu_{\text{LoS}} l_i^2, & \text{LoS bağlantısı ise,} \\ K_0 \mu_{\text{NLoS}} l_i^2, & \text{NLoS bağlantısı ise,} \end{cases} \quad (8.1)$$

şeklinde belirlenmiştir. Burada, $K_0 = \left(\frac{4\pi f_c}{c}\right)^2$ şeklindedir ve f_c , taşıyıcı frekansı ve birimi Hz'dir, c , m/s olarak ışık hızıdır. Ayrıca, μ_{LoS} ve μ_{NLoS} sırasıyla LoS ve NLoS bağlantılarının kayıplarını tanımlamaktadır ve sonra olarak l_i , UxNB ile i 'inci kullanıcı

arasındaki uzaklığı belirtir ve $l_i = \sqrt{h_D^2[n] + d_i^2}$ ile verilmektedir. Buna göre, ortalama yol kaybı

$$\bar{L}(h_D[n], d_i) = K_0 (h_D^2[n] + d_i^2) (\mathbb{P}_{\text{LoS}}^i \mu_{\text{LoS}} + \mathbb{P}_{\text{NLoS}}^i \mu_{\text{NLoS}}) \quad (8.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada,

$$\mathbb{P}_{\text{LoS}}^i = \frac{1}{1 + \alpha \exp(-\beta(\psi_i - \alpha))} \quad (8.3)$$

şeklinde ve $\mathbb{P}_{\text{NLoS}}^i = 1 - \mathbb{P}_{\text{LoS}}^i$ ile hesaplanır. Ayrıca, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi α ve β , şehir senaryosu değişkenleridir ve ψ_i , UxNB ile i 'inci kullanıcı arasındaki bağlantının yükseliş açısıdır. UxNB üzerinde anten kazanç örüntüsü

$$G_D(\theta) = \begin{cases} G_0/\theta_B^2 & , -\theta_B/2 \leq \theta \leq \theta_B/2 \\ G_r & , \text{aksi takdirde,} \end{cases} \quad (8.4)$$

şeklinde olan ve yarımgüç hüzmeye genişliği θ_B olan bir yönlü anten bulunmaktadır. Ayrıca yarımgüç hüzmeye genişliğinin dışındaki açı değerlerinde G_r sabit kazancı ile ışıma yaptığı varsayılmaktadır. Buna göre i 'inci kullanıcının anlık veri hızı

$$r_i[n] = \sum_{j=1}^K \omega_{i,j}[n] B \log_2 \left(1 + \frac{h_{i,j}[n] P_{i,j}[n]}{BN_0} \right) \quad (8.5)$$

şeklinde yazılır. Burada, B her bir altkanalın bantgenişliğini ifade eder, $\omega_{i,j}[n]$, n anı için j 'inci altkanalın i 'inci kullanıcıya tahsis edildiğinde 1, edilmediğinde 0 değerini alan ikili bir değişkendir. Ayrıca, $h_{i,j}[n]$, n anında j 'inci altkanalda i 'inci kullanıcının deneyimlediği kanalın toplam kazanç katsayısıdır ve $\zeta_{i,j}[n]$, küçük ölçekli sönmüleme kanal kazanç katsayısı olmak üzere $h_{i,j}[n] = \zeta_{i,j}[n] G_D \bar{L}^{-1}$ olarak tanımlanır. Burada, $\zeta_{i,j} = |g_{i,j}[n]|^2$ olarak tanımlıdır ve Rice sönmülemeli kanalın karmaşık değer alan katsayısı

$$g_{i,j}[n] = \sqrt{\frac{\tilde{K}_{i,j}[n]}{\tilde{K}_{i,j}[n] + 1}} + \sqrt{\frac{1}{\tilde{K}_{i,j}[n] + 1}} \bar{g} \quad (8.6)$$

olarak tanımlanır [73]. Burada, A_1 ve A_2 ortam koşullarına göre değişkenlik gösteren parametreler olmak üzere, $\tilde{K}_{i,j}[n] = A_1 \exp(A_2 \psi_i[n])$ olarak tanımlanan Rice faktörünü ifade eder. Ayrıca, \bar{g} , ortalama değeri sıfır olan çembersel simetrik Gauss dağılımlı rasgele saçılım elemanıdır. Bununla birlikte, $P_{i,j}$, j 'inci altkanaldaki i 'inci kullanıcı için tahsis edilen gücü belirtmektedir.

8.2.2 Ağ Dilimleri

Bu kısmın başında da değinildiği gibi ağ modelinde iki farklı kullanıcı grubu, bu gruplardaki kullanıcıların isterlerine uygun biçimde farklı ağ dilimlerinde yerleştirilerek hizmet almaktadır. Bu noktada, iki farklı ağ diliminden ya da ağ fonksiyonundan bahsedilebilir. Bunlardan ilki, içinde bulundurduğu kullanıcıların veri hızlarının toplamının belirli bir değer altına düşmeyeceğinin garanti edildiği, mobil genişbant kullanıcıların bulunduğu S_M , *multimedya* dilimidir. Bu dilimde, kullanıcılar arasındaki anlık adaletten çok, ağ dilimindeki ortalama veri hızının zaman dilimleri boyunca belirli bir veri hızı seviyesinin üzerinde tutulmasının sağlanmaktadır. Böylelikle, ortalamada kullanıcılar arasındaki adaletin sağlanması hedeflenmektedir. Buna göre, bu ağ dilimine dahil olan kullanıcılar için hedeflenen başarımlar kriteri, matematiksel olarak

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T \sum_{i=1}^{N_m[n]} r_i[n] \geq C_M, \quad \forall i \in S_M, \forall n \quad (8.7)$$

şeklinde modellenir. Burada, sistemin toplam çalışma süresi, T , İHA'nın toplam uçabileceği süreden daha az ya da ona eşit kabul edilmektedir. Ayrıca, $N_m[n]$, S_M multimedya dilimindeki n anındaki kullanıcı sayısını ve C_M , bu ağ dilimine tahsis edilen ortalamadaki en küçük veri hızını belirtmektedir.

Diğer ağ dilimi ise, güvenilir düşük gecikmeli haberleşme talebi bulunan kullanıcılara hizmet veren, S_R , RLL (reliable low-latency) dilimidir. Burada, sistem bu kullanıcılara belirli bir gecikme süresinin altında belirli bir güven aralığında hizmet alacaklarını garanti etmektedir. Bu ağ dilimindeki i 'inci kullanıcının paket geliş süreci, zaman dilimleri boyunca birbirinden bağımsız ve özdeş dağılımlı (b.ö.d.) ve ortalama varış hızı λ_k olan Poisson dağılımlı olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, i 'inci kullanıcının paket boyutu N_k , aynı şekilde zaman dilimleri üzerinden b.ö.d.'dür ve ortalama paket boyutu N_{av} olan üssel

dağılımlıdır. Dolayısıyla, bu ağ dilimi kullanıcıları için M/M/1 kuyruk tipi varsayılmaktadır. Buna göre, kullanıcıların güvenilirlik kısıtı

$$\mathbb{P}\{D_i \geq D_{\max}\} < 1 - \Phi, \forall i = 1, \dots, N_r[n], N_r[n] < N_{\max}, \forall i \in S_R, \forall n \quad (8.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, Φ , servis sağlayıcılar tarafından kullanıcıların hangi güvenlik eşiği ile D_{\max} gecikme süresini sağlayacaklarını belirten değerdir. Benzer şekilde, $N_r[n]$, n anında RLL dilimindeki bulunan kullanıcı sayısını ve N_{\max} , bu dilimde yer alabilecek en fazla kullanıcı sayısını belirtmektedir.

8.2.3 UxNB Hareketliliği ve Güç Tüketimi

Önerilen sistem modelinde, UxNB hareketli bir senaryoda süregelen bir rota planına sahip olacağından İHA güç tüketim analizinin hem yatay hem düşey ekseninde yapılması zorunludur. Bu çalışmada, İHA'nın yatay düzlemde her yöne ve düşey düzlemde aşağı yukarı hareket ettiği varsayılmaktadır. Başka bir deyişle, güç tüketim denklemleri daha karmaşık hale geleceğinden İHA'nın diagonal hareketler yapmadığı farzedilmiştir. Buna göre, döner kanatlı N rotorlu bir İHA'nın düşey düzlemde hareket etmesi sonucu tüketilecek güç,

$$P_v[n] = \begin{cases} \frac{W_{\text{top}}}{2} V_v[n] + \frac{W_{\text{top}}}{2} \sqrt{V_v[n]^2 + \frac{2W_{\text{top}}}{\rho N A}} + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_p V_T^3, & V_v[n] \geq 0, \\ W_{\text{top}} (V_v[n] + v_i) + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_p V_T^3, & V_v[n] < 0, \end{cases} \quad (8.9)$$

ile verilmektedir. Burada, $V_v[n]$ alçalış ya da tırmanış hızıdır ve İHA'nın ardışık zaman dilimleri arasında bulunduğu h_D yüksekliği kullanılarak

$$V_v[n] = \frac{h_D[n+1] - h_D[n]}{n} \quad (8.10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Ayrıca, W_{top} , aracın şase, faydalı yük ve batarya dahil toplam ağırlığını, ρ , önceki kısımlarda da belirtildiği gibi deniz seviyesinden yükseklikle değişen hava yoğunluğunu ve A aracın rotorlarında bulunan pervaneleri taradığı alanı belirtmektedir. Son olarak, v_i alçalış esnasındaki pervane düzleminden akan havanın hızıdır

ve deneysel sonuçlar kullanılarak

$$v_i = v_h \left(1 - 1.125 \frac{V_v[n]}{v_h} - 1.372 \left(\frac{V_v[n]}{v_h} \right)^2 - 1.718 \left(\frac{V_v[n]}{v_h} \right)^3 - 0.655 \left(\frac{V_v[n]}{v_h} \right)^4 \right)$$

şeklinde hesaplanır [118]. Burada, v_h , araç havada asılı kaldığı sırada pervanelerde indüklenen havanın hızıdır. Bu noktada, $-2v_h \leq V_v \leq 0$ olduğu varsayılmaktadır. Böylelikle, aracın alçalışında karşılaşılabileceği rüzgarsal etkiler de (yel değirmeni etkisi vb. [116]) probleme dahil edilmiş olur.

Döner kanatlı N rotorlu bir İHA'nın yatay düzlemde yaptığı hareket sonucu tüketeceği güç

$$P_h [n] = v_i W_{\text{top}} + \frac{N}{8} C_{D0} \rho A_p V_T^3 \left[1 + 3 \left(\frac{V_h [n]}{V_T} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \rho C_d A_d V_h [n]^3 \quad (8.11)$$

ile tanımlanır. Burada, v_i , İHA'nın pervanelerinde dönme hareketinden kaynaklanan endüklenen rüzgar hızıdır ve

$$v_i^2 = -\frac{1}{2} V_h [n]^2 + \frac{1}{2} \sqrt{V_h [n]^4 + 4 \left(\frac{W_{\text{top}}}{2\rho N A} \right)^2} \quad (8.12)$$

ikinci dereceden denklemin çözümü ile bulunur. Bununla birlikte, C_{D0} , V_T ve A_p , sırasıyla, pervanelerin sürüklenme katsayısı, pervane kanat ucu hızı ve pervane kanatlarının yüzey alanı olarak tanımlanır. Ayrıca, C_d ve A_d , sırasıyla, aracın yüzey sürüklenme katsayısı ve yanal alanıdır. Son olarak, $V_h [n]$ yatay düzlemde hareket eden İHA'nın hızıdır ve

$$V_h [n] = \frac{\|\mathbf{q} [n + 1] - \mathbf{q} [n]\|}{n} \quad (8.13)$$

ile elde edilir. Bu noktada, dikkat edilmesi gereken kısım, hem yatayda hem de düşey düzlemde İHA'nın yapabileceği hız miktarının fiziksel kısıtlar dolayısıyla sınırlı olmasıdır. Bu nedenle, eniyileme probleminde

$$h_D [n + 1] - h_D [n] \leq n V_{v,\text{max}}, \forall n \quad (8.14)$$

$$\|\mathbf{q} [n + 1] - \mathbf{q} [n]\| \leq n V_{h,\text{max}}, \forall n \quad (8.15)$$

kısıtları da göz önünde bulundurulmalıdır. Burada, $V_{v,\max}$ ve $V_{h,\max}$ sırasıyla, İHA'nın dikey ve yatay düzlemde hareket edebileceği enbüyük hızları ifade etmektedir. Bununla birlikte, İHA'nın hareket edebileceği sınırlar belirlidir ve bu da matematiksel olarak

$$\mathbf{J}_{\min} \preceq \mathbf{J}[n] \preceq \mathbf{J}_{\max}, \forall n, \quad (8.16)$$

olarak yazılır. Burada, $\mathbf{J} = [\mathbf{q} \ h_D]^T$ olarak tanımlıdır.

Sistemde haberleşme için tüketilen güç, kullanıcılara altkanallarda tahsis edilen güçlerin toplamı olarak modellenir ve farklı tipteki kullanıcıların bulunduğu bir ağ modelinde sistemde tüketilen n anındaki güç

$$P_{\text{sis}}[n] = P_v[n] + P_h[n] + \sum_{i=1}^{N[n]} \sum_{j=1}^K P_{i,j}[n] \quad (8.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $N[n]$ sistemdeki toplam kullanıcı sayısını belirtmektedir.

Ele alınan problem dinamik kaynak tahsisi ve rota eniyilemesini ortaklaşa elde etmeyi amaçlayan bir eniyileme problemidir. Bununla birlikte, anlık tüketilen güç yerine ortalama tüketilen gücün enküçültülmesi ana hedeftir. Bu nedenle, eniyileme probleminin maliyet fonksiyonu

$$P_{\text{ort}}[n] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T P_{\text{sis}}[n] \quad (8.18)$$

şeklinindedir. Bu noktada, sistemin toplam çalışma süresi T 'nin İHA'nın uçuş süresinden daha düşük ya da buna eşit olduğu varsayılmaktadır.

8.2.4 Önerilen Eniyileme Problemi

Multimedya ve RLL dilimlerindeki kullanıcıların hizmet kalitelerini kontrol eden uçan baz istasyonu UxNB'nin çalıştığı süre boyunca ortalama tükettiği gücü enküçültten stokastik eniyileme problemi

P1:

$$\underset{\omega, \mathbf{P}, \mathbf{q}, h_D}{\text{enküçült}} \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T P_{\text{sis}}[n] \quad (8.19)$$

kısıtlar

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T \sum_{i=1}^{N_m[n]} r_i[n] \geq C_M, \forall i \in S_M, \forall n, \quad (8.19a)$$

$$\mathbb{P}\{D_i \geq D_{\max}\} \leq 1 - \Phi, \forall i = 1, \dots, N_r[n], N_r[n] \leq N_{\max}, \forall i \in S_R, \forall n, \quad (8.19b)$$

$$\|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\| \leq nV_{h,\max}, \forall n, \quad (8.19c)$$

$$h_D[n+1] - h_D[n] \leq nV_{v,\max}, \forall n \quad (8.19d)$$

$$\mathbf{J}_{\min} \preceq \mathbf{J}[n] \preceq \mathbf{J}_{\max}, \forall n, \quad (8.19e)$$

$$\sum_{i=1}^{N[n]} \omega_{i,j}[n] \leq 1, \forall j, n \quad (8.19f)$$

$$P_{i,j}[n] \geq 0, \omega_{i,j}[n] \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N[n], j = 1, \dots, K, \forall n \quad (8.19g)$$

ile ifade edilmektedir. Bu problem, içerisinde hem sürekli hem de ikili değişkenler barındırdığı için bir karışık tamsayı doğrusal olmayan (mixed-integer nonlinear, MINL) problemdir ve NP-zordur. Ancak bu problemdeki değişkenleri takip edilebilir kılmak için probleme Lyapunov yöntemi uygulandıktan sonra sapma-artı-penaltı yönteminden faydalanarak Problem **P1**, her zaman dilimi için çözümler hale getirilebilir. Daha sonra, ortaya çıkan problem, üç tane takip edilir probleme ayrıştırılıp çözüm sezgisel eniyiye yakın bir algoritma ile elde edilebilir. Bir sonraki kısımda, Lyapunov yöntemi detaylı biçimde anlatılacak ve problem **P1**, her zaman diliminde çözümler hale getirilecektir.

8.3 Lyapunov Eniyileme Yöntemi

Bu kısımda, öncelikle Lyapunov eniyileme yaklaşımı kullanılarak Problem **P1**, matematiksel olarak takip edilebilir bir forma sokulacaktır. Daha sonra elde edilen problem 3 ayrı alt probleme dönüştürülüp yeni bir yöntem olarak Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü (Joint Communication and Flight Control, JCoFC) algoritması önerilecektir.

Bir haberleşme ağı, kuyruk birikimlerinin bileşimi ile tanımlanır. Bu, vektörel bir biçimde

$Q(t) = [Q_1(t), \dots, Q_K(t)]$ şeklinde, K sıfırdan büyük bir tamsayı olmak üzere ifade edilir. Her t zaman diliminde, ağda bir kontrol aksiyonu alınır ve bu alınan karar, kuyruğa varış ve kuyruktan ayrılışları etkiler. Bu da, sistem başarımının ölçütleri olan $y(t)$, $e(t)$ değerlerini etkilemiş olur. Bunlar, sistemin gerçek değerli girdi veya çıktı parametreleridir. Bu değerler, t anında gözlemlenen rasgele olay $\omega(t)$ ve yine t anında alınan kontrol kararı $\alpha(t)$ 'nin bir fonksiyonudur. Bu noktada, haberleşme alanı için daha açıklayıcı olması açısından $\omega(t)$ için kanal durumu ve $\alpha(t)$ için de kanal durumuna bağlı yapılan kaynak tahsisi analogisi kurulabilir. Dolayısıyla, $\alpha(t)$, $\omega(t)$ 'ye bağlı değişen $\mathbb{D}_{\omega(t)}$ kontrol karar kümesinden seçilmektedir. Buna göre, standart kısıtları bulunan zaman ortalamalı stokastik problem

$$\text{enküçült} \quad \bar{y}_0(t) \tag{8.20}$$

kısıtlar

$$\bar{y}_m \leq 0, \forall m \in \{1, \dots, L\}, \tag{8.20a}$$

$$\bar{e}_j = 0, \forall j \in \{1, \dots, J\}, \tag{8.20b}$$

$$\alpha(t) \in \mathbb{D}_{\omega(t)}, \forall t, \tag{8.20c}$$

$$\text{Ağdaki tüm kuyruklarda ortalama kararlılık}, \tag{8.20d}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, \bar{y}_m ve \bar{e}_j , ilgili ağ parametrelerinin zamansal ortalamalarını belirtmektedir. Bir kuyruğun ortalama kararlı olabilmesi için

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}\{|Q(t)|\}}{t} = 0 \tag{8.21}$$

şartını sağlaması gerekmektedir.

Literatürde, sapma-artı-penaltı yöntemi kullanılan stokastik problemlerin çözümünde, her zaman diliminde bir eniyileme problemi çözülecek şekilde sistemin kararlı hale getirilmesi amaçlanmaktadır [168]. Bunun için ortalama enküçültülmek istenen maliyet fonksiyonu, Lyapunov sapmasına bir penaltı olarak eklenir ve iki terimin toplamından oluşan bu terimin enküçültülmesi yapılır. Lyapunov sapması, Lyapunov fonksiyonu kullanılarak

bulunur ve bu fonksiyon

$$L(\Theta(t)) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^Q \Theta_k^2(t) \quad (8.22)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $\Theta(t) = [Q(t), H(t), G(t)]$ şeklinde tanımlı ağdaki tüm kuyrukların oluşturduğu bir birikim vektörüdür ve bu vektörün her bir elemanı $\Theta_k(t)$ 'ye karşılık gelmektedir. Bu vektördeki, $Q(t)$ üstte de bahsedildiği gibi gerçek kuyrukların birikim vektörünü göstermektedir. Bunun dışında $H(t)$ ve $G(t)$, sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarından kaynaklanan sanal kuyruk birikim vektörlerini belirtmektedir. Buna göre, Lyapunov sapması

$$\Delta\Theta(t) = \mathbb{E}\{L(\Theta(t+1)) - L(\Theta(t)) | \Theta(t)\} \quad (8.23)$$

şeklinde tanımlanır. Sapma değeri $\Delta\Theta(t)$, kuyrukların ilk değerleri sınırlı ya da sonsuzdan küçük olduğu sürece her zaman belirli bir sınırla limitlenmektedir [168]. Buna göre, sapma-artı-penaltı algoritması, her t zaman diliminde

$$\Delta\Theta(t) + V\mathbb{E}\{y_0(t) | \Theta(t)\} \quad (8.24)$$

terimini enküçültmeyi hedefler. Burada V , penaltı teriminin ne kadar enküçültülmek istendiğine bağlı bir terimdir. Örneğin, $V = 0$ seçilmesi, sadece Lyapunov sapmasının enküçültülmesi anlamına gelirken, $V > 0$ seçilmesi penaltı terimini ağırlıklandırarak eniyileme problemine dahil eder.

Problem **P1**'de, Eşitlik 8.19a ve Eşitlik 8.19b olmak üzere iki tane eşitsizlik kısıtı bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu problemde gerçek kuyruk içeren bir durum yoktur. Ancak iki eşitsizlik kısıtı için sanal kuyrukların tanımlanması gerekmektedir. Lyapunov eniyileme yönteminde eşitsizlik kısıtları, sanal kuyruk olarak

$$H_i(t+1) = \max\{H_i(t) + y_i(t), 0\}, \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (8.25)$$

şeklinde tanımlanır. Buna göre, Problem **P1**'deki Eşitlik 8.19a için sanal kuyruk birikimi

güncelleme denklemi

$$H[n+1] = \max \left\{ H[n] + C_M - \sum_{i=1}^{N_m[n]} r_i[n], 0 \right\}, \forall i \in S_M \quad (8.26)$$

şeklinde yazılabilir. Buna benzer şekilde, Eşitlik 8.19b'deki olasılıksal olarak yazılmış olan gecikme kısıtı, M/M/1 kuyruğu varsayıldığında

$$y_i[n] = \left(\lambda[n] - \frac{r_i[n]}{N_{av}} \right) D_{\max} - \ln(1 - \Phi) \leq 0, \forall i \in S_R \quad (8.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $\lambda[n]$, n zaman dilimindeki ortalama paket geliş süresini belirtmektedir. Buna göre, bu eşitsizlik kısıtı için sanal kuyruk birikimi güncelleme denklemi

$$G_i[n+1] = \max\{G_i[n] + y_i[n], 0\}, \forall i \in S_R \quad (8.28)$$

şeklindedir. Buna göre, Lyapunov fonksiyonu

$$L[n] = \frac{1}{2}H[n]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i \in S_R}^{N_r[n]} G_i[n]^2 \quad (8.29)$$

şeklindedir ve Lyapunov sapması

$$\Delta L[n] = L[n+1] - L[n] \quad (8.30)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \max \left\{ H[n] + C_M - \sum_{i \in S_M}^{N_m[n]} r_i[n], 0 \right\}^2 - \frac{1}{2} H[n]^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i \in S_R}^{N_r[n]} \max \{ G_i[n] + y_i[n], 0 \}^2 - G_i[n]^2 \end{aligned} \quad (8.31)$$

biçiminde elde edilir. Bu değer

$$\begin{aligned} \Delta L [n] \leq & \frac{1}{2} \left(C_M - \sum_{i \in S_M}^{N_m[n]} r_i [n] \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i \in S_R}^{N_r[n]} y_i [n]^2 \\ & + \left(C_M - \sum_{i \in S_M}^{N_m[n]} r_i [n] \right) H [n] + \sum_{i \in S_R}^{N_r[n]} y_i [n] G_i [n] \end{aligned} \quad (8.32)$$

ile üstten sınırlıdır. Eşitlik 8.32'deki birinci terim ve ikinci terimlerin toplamı, $r_i [n] = 0, \forall i, n$ koşulu sağlanmadığı sürece mutlaka üstten B değeri ile sınırlıdır. Bu durumda sapma terimi

$$\Delta L [n] \leq B + \left(C_M - \sum_{i \in S_M}^{N_m[n]} r_i [n] \right) H [n] + \sum_{i \in S_R}^{N_r[n]} y_i [n] G_i [n] \quad (8.33)$$

ile üstten sınırlandırılmış olur. Lyapunov eniyileme yönteminde sapmanın enküçültülmesi yapılacağından üst sınırın enküçültülmesini yapmak problemin genelini de enküçültecektir. Buna göre, sapma-artı-penalı yöntemindeki maliyet fonksiyonu

$$\begin{aligned} \Delta L [n] + V P_{\text{sis}} [n] = & \left(C_M - \sum_{i \in S_M}^{N_m[n]} r_i [n] \right) H [n] \\ & + \sum_{i \in S_R}^{N_r[n]} y_i [n] G_i [n] + V P_{\text{sis}} [n] \end{aligned} \quad (8.34)$$

şeklinde yazılır. Böylece, Problem **P1**, Lyapunov eniyileme yöntemi sonucu

P2:

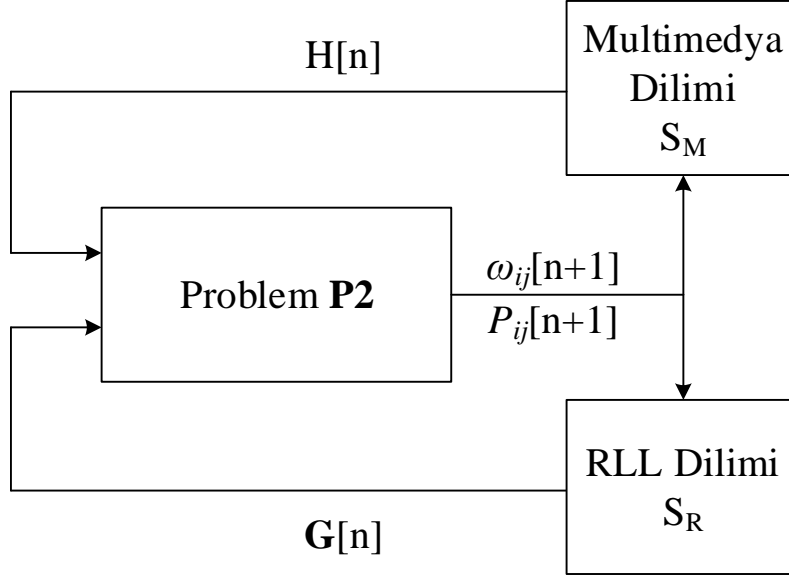
$$\text{enküçült} \quad P_{\text{sis}} [n] + \left(C_M - \sum_{i \in S_M}^{N_m[n]} r_i [n] \right) H [n] + \sum_{i \in S_R}^{N_r[n]} y_i [n] G_i [n] \quad (8.35)$$

ω, P, q, h_D

kısıtlar

Eşitlikler 8.19c, 8.19d, 8.19e, 8.19f ve 8.19g

şeklinde tekrar formüle edilebilir. Burada, $V = 1$ olarak değer almaktadır. Problem 8.35,



Şekil 8.1. Problem **P1**'in çözümü için önerilen kapalı döngülü yinelemeli sistem.

Problem 8.19'un aksine, tüm zaman dilimlerinde değil, tek bir zaman diliminde tanımlıdır. Dolayısıyla, her zaman diliminde Problem 8.35, Şekil 8.1'deki gibi kapalı bir döngüde çözülerek kararlı bir ağ yapısı elde etmek mümkündür. Ancak, Problem 8.35'teki maliyet fonksiyonu, hem ikili değerler hem de süreğen değerler içerdiği gibi sistemdeki kullanıcıların veri hızını belirten r_i değişkeni hem UxNB'nin konumuna hem de haberleşme için harcadığı güç ile ilişkili bir değer olmasından dolayı oldukça karmaşık bir yapıdadır. Bu nedenle, işlem yükü oldukça artmaktadır ve matematiksel anlamda takip edilebilir bir sonucu elde etmek zordur. Dolayısıyla, Problem **P2**, üç farklı alt probleme indirgenip eniyiye yakın çözüm elde edilecektir.

8.4 Problem **P2** için Önerilen Çözüm Yaklaşımı

Problem **P2**, üstte bahsedildiği gibi karışık tamsayı doğrusal olmayan programlama (mixed integer nonlinear programming, MINLP) problemidir. Değişkenlerin birbirine bağımlılığı ile daha da karmaşık hale gelmektedir. Bununla birlikte, $H[n]$ ve $G[n]$ sanal kuyrukları her döngüde güncellenmektedir ve probleme direkt olarak etki etmektedir. Buna göre, matematiksel anlamda takip edilebilir bir çözüm elde edebilmek için problem üç alt probleme ayrıştırılacaktır ve JCoFC algoritması sunulacaktır.

8.4.1 Dinamik Altkanal ve Güç Tahsisi

UxNB'nin hareket etmeden havada belirli bir yükseklikte asılı kaldığı, yani $\mathbf{J}[n] = [\mathbf{q}_0 \ h_{D0}]^T \in \{\mathcal{X} : \mathbf{q}_{\min} \preceq \mathbf{q}[n] \preceq \mathbf{q}_{\max}, h_{\min} \leq h_D[n] \leq h_{\max}\}$, varsayımı altında, İHA'nın uçmak için tükettiği güç sadece havada asılı kalmak için tükettiği güç olan

$$P_{\text{asılı}}[n] = P_0 (1 + \mu) \exp \left\{ \frac{u_0 (h_C + h_D[n])}{2} \right\} \quad (8.36)$$

denkleme eşit olacaktır. Burada, P_0 ve μ daha önceki kısımlarda belirtildiği gibidir ve h_C , İHA'nın uçtuğu şehrin rakımını belirtmektedir. Burada hesaplanan güç herhangi bir n anı için sabit olacağından problemin maliyet fonksiyonuna bir etkisi bulunmamaktadır. Buna göre, sabit UxNB pozisyonu için Problem **P2**, dinamik kaynak tahsisi problemi olarak

$$\underset{\omega, P}{\text{enküçült}} \quad \sum_{i=1}^{N[n]} \sum_{j=1}^K P_{i,j}[n] + \left(C_M - \sum_{i \in S_M} r_i[n] \right) H[n] + \sum_{i \in S_R} y_i[n] G_i[n] \quad (8.37)$$

kısıtlar

Eşitlikler 8.19f ve 8.19g

biçiminde elde edilir. Her ne kadar Problem 8.37, Problem **P2**'deki -ikili ve süreğen değerlerin birlikteliği ve kuyrukların karmaşık yapısı gibi- benzer sorunları barındırsa da problem yinelemeli biçimde çözülebilir. Böylelikle, her yinelemede kuyrukların belirli bir değere sahip olduğu ve bunun bir önceki yinelemedeki eniyileme parametrelerin sonucunda ortaya çıktığı varsayılabilir. Bu da problemin kapalı döngü bir kontrol sistemi olarak tasarlanmasına izin verir.

Öncelikle, [51] no.lu kaynaktaki yöntem izlenerek Problem 8.37'deki, $y_i[n]$ 'nin birinci dereceden Taylor yaklaşımı,

$$y_i[n] = y_i[n-1] + \frac{dy_i}{dr_i} (r_i[n] - r_i[n-1]) \quad (8.38)$$

ile ifade edilir. Burada

$$\frac{dy_i}{dr_i} = -\frac{D_{\max}}{N_{\text{av}}} = \delta_i[n] \quad (8.39)$$

ile elde edilir. Eşitlik 8.38'deki önceki zaman dilimlerine ait terimler eniyileme probleminin ilgi alanına girmemektedir. Bu sebeple, eniyilemeye etki edecek maliyet fonksiyonundaki terim, $\delta_i[n]r_i[n]$ olmaktadır. Ayrıca, Problem 8.37'deki maliyet fonksiyonundaki multimedya diliminden gelen terimdeki $H[n]$ değişkeni dağıtılsa, $C_M H[n]$ teriminde herhangi bir eniyileme parametresi bulunmadığından bu terim yok sayılabilir. Buna göre, Problem 8.37,

$$\text{enküçült}_{\omega, P} \quad \sum_{i=1}^{N[n]} \sum_{j=1}^K P_{i,j}[n] - \sum_{i=1}^{N[n]} \lambda_i r_i[n] \quad (8.40)$$

kısıtlar

$$\sum_{i=1}^{N[n]} \omega_{i,j} \leq 1, \forall j, n \quad (8.40a)$$

$$P_{i,j}[n] \geq 0, \omega_{i,j}[n] \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N[n], j = 1, \dots, K, \forall n \quad (8.40b)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. Burada,

$$\lambda_i = \begin{cases} H[n] & , i \in S_M \\ -\delta_i[n]G_i[n] & , i \in S_R \end{cases} \quad (8.41)$$

biçiminde tanımlıdır. Problem 8.40'ın çözümü, [169] no.lu kaynaktaki yöntem kullanılarak yapılabilir. Buna göre, notasyonu kolaylaştırmak adına zaman indisi atılıp, $\omega_{i,j} \geq 0$ gevşetmesi yapılarak Lagrange denklemi

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\omega_{i,j}, P_{i,j}) = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K P_{i,j} - \sum_{i=1}^N \lambda_i B \sum_{j=1}^K \omega_{i,j} \log_2 \left(1 + \frac{h_{i,j} P_{i,j}}{BN_0} \right) \\ & + \sum_{j=1}^K \beta_j \left(\sum_{i=1}^N \omega_{i,j} - 1 \right) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \alpha_{i,j} \omega_{i,j} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \mu_{i,j} P_{i,j} \end{aligned} \quad (8.42)$$

şeklinde elde edilir. Lagrange fonksiyonunun $\omega_{i,j}$ ve $P_{i,j}$ değişkenlerine göre türevi alın-

dışında, KKT durum denklemleri

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\omega_{i,j}, P_{i,j})}{\partial \omega_{i,j}} = -\lambda_i B \log_2 \left(1 + \frac{h_{i,j} P_{i,j}}{N_0} \right) + \beta_j - \alpha_{i,j} = 0 \quad (8.43)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\omega_{i,j}, P_{i,j})}{\partial P_{i,j}} = 1 - \lambda_i B \frac{\omega_{i,j} h_{i,j}}{\log 2 (N_0 + h_{i,j} P_{i,j})} - \mu_{i,j} = 0 \quad (8.44)$$

$$\sum_{j=1}^K \beta_j \left(\sum_{i=1}^N \omega_{i,j} - 1 \right) = 0 \quad (8.45)$$

$$\alpha_{i,j} \omega_{i,j} = 0 \quad (8.46)$$

$$\mu_{i,j} P_{i,j} = 0 \quad (8.47)$$

ile elde edilir. Problemin yapısı gereği, tahsis edilen bir altkanala aynı zamanda da güç tahsisinin yapılması gerekmektedir yani $\omega_{i,j} > 0$ ise $P_{i,j} > 0$ olmalıdır. Başka bir deyişle, eğer bir altkanal herhangi bir kullanıcıya tahsis edilmemişse, yani $\omega_{i,j} = 0$, ilgili güç tahsis elemanı da sıfır, yani $P_{i,j} = 0$ olmalıdır. Buna göre, Eşitlik 8.43 ve Eşitlik 8.46 kullanılarak, eğer altkanal j , i 'inci kullanıcıya tahsis edilmemişse, yani $\omega_{i,j} = 0$ için, $-\lambda_i B \log_2 \left(1 + \frac{h_{i,j} P_{i,j}}{N_0} \right) + \beta_j \geq 0$ elde edilir. Diğer taraftan, j 'inci altkanal i 'inci kullanıcıya tahsis edilmişse, yani $\omega_{i,j} > 0$ durumu için, $-\lambda_i B \log_2 \left(1 + \frac{h_{i,j} P_{i,j}}{N_0} \right) + \beta_j = 0$ elde edilir. Bu da, j 'inci altkanalın

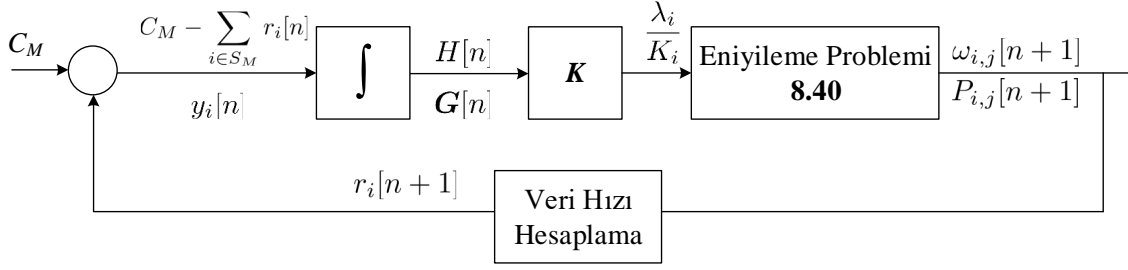
$$i = \arg_x \max \left\{ \lambda_x B \log_2 \left(1 + \frac{h_{x,j} P_{x,j}}{N_0} \right) \right\} \quad (8.48)$$

koşulunu sağlayan i 'inci kullanıcıya tahsis edilmesi gerektiği anlamına gelir.

Altkanal tahsisi, kullanıcılara eşit güç tahsisi koşulu altında yapıldıktan sonra, Problem 8.40 dışbükey probleme dönüşür ve $P_{i,j}$, Eşitlik 8.44 kullanılarak

$$P_{i,j} = B \left(\frac{\lambda_i}{\log 2} - \frac{N_0}{h_{i,j}} \right)^+ \quad (8.49)$$

denklemleri ile bulunabilir. Nümerik olarak bakıldığında, Eşitlik 8.49'da bantgenişliği B , MHz mertebesinde büyük bir değer almaktadır. Bunun yanında, tipik olarak N_0 'nun -174 dBm olduğu düşünüldüğünde i 'inci kullanıcıya tahsis edilen güç çok fazla olmaktadır. Bu da ağ dilimleme probleminde kararsızlığa neden olmaktadır. Bu nedenle, Problem



Şekil 8.2. Problem 8.37'nin çözümü için dönüştürülen Problem 8.40'ın yer aldığı integral kontrolcüye sahip kapalı döngü kontrol sistemi

8.37'deki maliyet işlevinde bir kontrol değişkenine daha ihtiyaç olmaktadır. Bu da her dilime özgü bir ölçekleme parametresidir. Böylelikle, maliyet işlevi

$$\sum_{i=1}^{N[n]} \sum_{j=1}^K P_{i,j}[n] - \sum_{i=1}^{N[n]} \frac{\lambda_i}{K_i} r_i[n] \quad (8.50)$$

olarak revize edilmelidir. Bu şekilde bakıldığında, Problem 8.37'nin çözümü için, bir integral kontrolcü analogisi yapılabilir [51]. Bu kontrol sistemi Şekil 8.2'de gösterilmektedir. Referans değer olarak verilen C_M değeri ile döngüden gelen $P_{i,j}[n+1]$ ve $\omega_{i,j}[n+1]$ sinyalleri yardımı ile hem $\delta_i G[n]$ hem de $H[n]$ sinyalleri hesaplanabilir. Bu kuyruklar, gelen sinyallerin toplanmasını sağladıklarından bir integral operatörü gibi davranmaktadır. Bununla birlikte, daha sonra eklenen K ölçek çarpanı ile integral kontrolcü tamamlanır ve bu sinyaller Problem 8.40'a bir girdi sinyali olarak verilir. Sonuçta hem güç hem de altkanal tahsis vektörleri elde edilmiş olur.

8.4.2 Yatay ve Düşey Düzlemde Rota Planı

Problem **P2**, hem radyo kaynak tahsisini dinamik olarak gerçekleştirilmeyi hem de İHA'nın uçuş rotasını kullanıcıların pozisyonuna ve ağ başarımlarına göre eniyi yapmayı hedefler. Kullanıcılara tahsis edilecek haberleşme güçleri ve altkanallar belirlendikten sonra Problem **P2**, UxNB'nin yatay ve düşey koordinatlarının bulunabilmesi için iki farklı alt probleme daha bölünebilir. Bunlardan ilki, bilinen güç ve kanal tahsisi altında ve yükseklik sabit olduğunda, yatay düzlemde UxNB'nin koordinatlarının aranmasıdır [113]. Güç ve altkanal tahsisinin bilinmesi, veri hızları ve kuyrukların durumunun bilgisini de otomatik sağlamaktadır. Ancak, UxNB'nin pozisyonunun değişmesi direkt olarak iki ağ dilimindeki kullanıcıların veri hızlarını etkileyecektir. Bu noktada, Problem 8.40'ta gö-

rüleceği gibi Lyapunov eniyileme yöntemindeki sapma terimi için, standart bir eniyileme problemindeki penaltı terimi analojisi yapılabilir [51]. Burada penaltı teriminin Lagrange çarpanları, Eşitlik 8.41 ile özelleştirilmiştir. Buna göre, sabit bir yükseklikte, bilinen güç ve altkanal tahsisi altında yatay düzlemde harcanan gücü enküçülten rota eniyileme problemi

$$\text{enküçült}_{\mathbf{q}} \quad P_h[n] - \sum_{i=1}^{N[n]} \lambda_i r_i[n] \quad (8.51)$$

kısıtlar

Eşitlikler 8.19c ve 8.19e

şeklinde formüle edilebilir. Elde edilen bu problem, ne dışbükey ne de içbükey bir problemdir. Bu sebeple eniyiye yakın bir çözüm, dışbükey olmayan problemler için standart bir iç nokta algoritması ile bulunabilir [169].

Yatay düzlemdeki koordinatların bulunmasının ardından düşey düzlemde UxNB'nin anlık harcadığı güç enküçütülebilir. Buna göre, bilinen altkanal ve güç tahsisi çifti $(\omega_{i,j}, P_{i,j})$ ve Problem 8.51'in sonucunda elde edilen yatay düzlemdeki koordinatlar \mathbf{q} ile Problem **P2**,

$$\text{enküçült}_{h_D} \quad P_v[n] - \sum_{i=1}^{N[n]} \lambda_i r_i[n] \quad (8.52)$$

kısıtlar

Eşitlikler 8.19d ve 8.19e

şekline dönüştürülür. Bu problem de, Problem 8.51 gibi ne dışbükey ne de içbükey programlama problemdir. Ancak tüm fonksiyonlar türevlenebilir olduğu için standart bir çözücünün iç-nokta (interior-point) algoritması ile eniyiye yakın bir çözüme hızlı biçimde ulaşılabilir. Bu problemlerde, RLL dilimi için veri hızı hesabı

$$R_{\min} = \left(\lambda - \frac{\ln(1 - \Phi)}{D_{\max}} \right) N_{\text{av}} \quad (8.53)$$

eşitliği ile yapılabilir.

Algoritma 5 Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü (JCoFC) Algoritması

Girdi: Kullanıcıların koordinatları $(x_i, y_i), \forall i$, UxNB başlangıç koordinatları $\mathbf{J}[0] = [\mathbf{q}[0] \ h_D[0]]^T$, $C_M, \Phi, V_{h,\max}, V_{v,\max}, \mathbf{J}_{\min}, \mathbf{J}_{\max}$.

Çıktı: UxNB'nin koordinatları, $\mathbf{J}[n]$, güç tahsisi vektörü, $\mathbf{P}[n]$ ve altkanal tahsisi $\omega[n]$.

1: **Başlat:** $n \leftarrow 0$.

2: **repeat**

3: Verilen UxNB koordinatları $\mathbf{J}[n]$ 'ye göre veri hızlarını hesapla: $r_i[n], i \in S_M, S_R$.

4: Hata sinyali elde et: $\mathbf{e}[n] = [C_M - \sum r_i[n], \mathbf{y}[n]]^T$,

5: Kuyruk değerlerini güncelle: $H[n], \mathbf{G}[n]$,

6: Kuyrukları ölçeklendir ve Problem 8.40'ı çöz. $\{\mathbf{P}^*, \omega^*\}$ 'i elde et.

7: Sabit $h_D[n]$ için, verilen $\{\mathbf{P}^*, \omega^*\}$ ile Problem 8.51'yi çöz. \mathbf{q}^* 'i elde et.

8: Verilen $\{\mathbf{P}^*, \omega^*, \mathbf{q}^*\}$ için, Problem 8.52'yi çöz. h_D^* 'i elde et.

9: Zaman dilimini güncelle: $n \leftarrow n + 1$,

10: **until** Görev süresi bitinceye kadar, $n = T$

8.4.3 JCoFC Algoritması, Karmaşıklık ve Yakınsama

Problem **P2**'nin matematiksel olarak takip edilebilir bir çözümünün yapılabilmesi için bu problem, dinamik radyo kaynak tahsisi, yatay ve dikey düzlemlerde rota planlama problemleri olmak üzere üç adet alt probleme ayrıştırılmıştır. Bu problemlerin ortak çözümünü gerçekleştiren algoritma ise Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü (Joint Communication and Flight Control, JCoFC) algoritmasıdır ve bu algoritmanın detayları Algoritma 5'te verilmektedir.

Algoritmanın işleyişine bakıldığında, her adımda üç alt problem çözülmektedir. Bunlardan Problem 8.40'ta sadece enbüyük fonksiyonu kullanılarak altkanal tahsisi yapıldığından buradaki karmaşıklık $\mathcal{O}(ML)$ olarak bulunur. Bununla birlikte, Problem 8.51 ve Problem 8.52'de kullanılan iç-nokta algoritmalarının karmaşıklığı en kötü durumda, $\mathcal{O}\left((NM + M)^{3/2} \log(1/\epsilon)\right)$ şeklindedir [113]. Burada, ϵ , iç-nokta algoritmasının eniyi çözüme olan tolerans değeridir. Buna göre, JCoFC algoritmasının toplam karmaşıklığı iç-nokta algoritması belirler. Dolayısıyla, algoritmanın genel karmaşıklığı

$$\mathcal{O}\left((NM + M)^{3/2} \log(1/\epsilon)\right) \quad (8.54)$$

ile elde edilir.

Ayrıca, algoritmanın yakınsamasına bakıldığında, üç problemi art arda çözmek ilgili zaman dilimi içinde eniyeye yakın enküçük noktanın bulunmasını sağlamaktadır. Öncelikle,

Problem **P2**'deki maliyet fonksiyonu, n anında herhangi bir $\{\mathbf{P}, \boldsymbol{\omega}, \mathbf{q}, h_D\}$ değeri için $U(\mathbf{P}, \boldsymbol{\omega}, \mathbf{q}, h_D)$ değerini alsın. Problem 8.37'nin çözülmesi ile elde edilen $\{\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\omega}^*\}$ güç ve altkanal tahsis matrisleri sonucu elde edilen maliyet işlevi, $U(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\omega}^*, \mathbf{q}, h_D)$ değerini alır ve bu çözümün sonucu olarak

$$U(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\omega}^*, \mathbf{q}, h_D) \leq U(\mathbf{P}, \boldsymbol{\omega}, \mathbf{q}, h_D) \quad (8.55)$$

ifadesi yazılabilir. Daha sonra Problem 8.51'in çözümü \mathbf{q}^* , Problem 8.40 için olurlu olacağından

$$U(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\omega}^*, \mathbf{q}^*, h_D) \leq U(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\omega}^*, \mathbf{q}, h_D) \quad (8.56)$$

yazılabilir. Benzer yorum, Problem 8.52 için de yapılabilir. Buna göre, son olarak

$$U(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\omega}^*, \mathbf{q}^*, h_D^*) \leq U(\mathbf{P}^*, \boldsymbol{\omega}^*, \mathbf{q}^*, h_D) \quad (8.57)$$

ile algoritmanın bir zaman dilimi içinde verilen herhangi bir noktaya göre lokal enküçük değere yakınsadığı gösterilmiş olur.

8.5 Sayısal Bulgular

Bu kısımda, Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü (JCoFC) algoritması sonucu elde edilen bulgular paylaşılacaktır. Benzetimlerde kullanılan, döner kanatlı İHA'nın fiziksel özellikleri Çizelge 8.1'de görülebilir. Bununla birlikte, haberleşme problemini ilgilendiren benzetim parametreleri Çizelge 8.2'de sunulmuştur. Benzetimlerde iki farklı senaryo incelenmiştir. Bunlardan ilki, kanal sönümlenmesinin bulunmadığı bir senaryodur. Bu senaryoda, multimedya diliminde bulunan kullanıcı sayısının artışının diğer dilimlere etkisinin ya da bir başka deyişle, dilimler arası izolasyonun incelenmesi amaçlanmıştır. Diğer senaryoda ise, kullanıcı sayılarının farklı zaman dilimlerinde her iki ağ dilimi için de değiştiği durum ele alınmıştır. Senaryoların detayları ve ağ dilimlerinin istekleri Çizelge 8.3'te özetlenmiştir. Her iki senaryoda da kullanıcılar ilgilenilen alana birbiciimli dağılım ile dağıtılmıştır ve UxNB'nin kullanıcı konumlarını mükemmel biçimde bildiği varsayılmaktadır.

Çizelge 8.1. Tipik bir İHA'nın teknik ve fiziksel özellikleri

Teknik ve Fiziksel Özellik	Değer
Pervane Çapı, $2R$	558.8×10^{-3} m
Pervane Genişliği, c_b	167.6×10^{-3} m
Pala, Rotor ve Batarya Sayısı	2, 4, 8
Sürüklenme Katsayısı, C_{D0}	1.57×10^{-3}
$C_d \times A_d$, [94]	0.67 m ²
Araç Ağırlığı, W_V	10 kg
Batarya Ağırlığı, W_B	2 kg
Faydalı Yük Ağırlığı, W_P	8 kg

Çizelge 8.2. Benzetim değerleri

Parametre	Değer
Taşıyıcı Frekansı, f_c	2.5 GHz
Bantgenişliği, B	10 MHz
Hüzme Genişliği, θ_B	120°
UxNB Yan Lob Kazancı, G_r	-16.8 dBi
$(\alpha, \beta, \mu_{LoS}, \mu_{NLoS})$	(12.08, 0.11, 1.6, 23)
Sönümlenmeli Kanal Parametreleri, A_1, A_2	1, 10.26
Hizmet Bölgesinin Kenar Uzunluğu	400 m
Gürültü PSD	-174 dBm
Paket Varış Oranı, λ	100 paket/sn
Ortalama Paket Boyutu, N_{av}	10 kbit
Altkanal Sayısı, L	288
Şehir Rakımı, h_c	124 m
Enküçük Yükseklik, h_{min}	30 m
Enbüyük Yükseklik, h_{max}	881 m
Başlangıç koordinatları, $\mathbf{J}[0]$	$[-200, 200, 80]$ m
Yatay düzlemdeki enbüyük hız, $V_{h,max}$	10 m/s
Düşey düzlemdeki enbüyük hız, $V_{v,max}$	10 m/s

Çizelge 8.3. Ağ Dilimi Senaryoları ve İsterleri

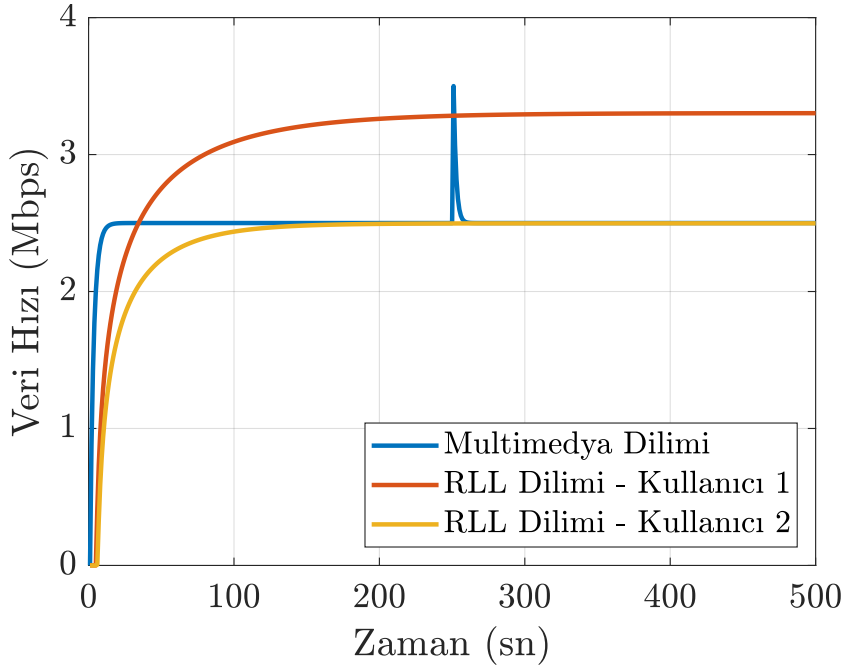
	Dilim Adı	Kullanıcı Sayısı	Kanal Durumu	İster
Senaryo 1	Multimedya	10, $n \leq 250$ sn, 14, $n > 250$ sn	Sönümlemesiz	$C_M = 2.5$ Mbps
	RLL	2		$P(D_1 > 20 \text{ ms}) < 0.01$ $P(D_2 > 20 \text{ ms}) < 0.05$
Senaryo 2	Multimedya	10, $n < 125$ sn, 8, $125 \leq n < 250$ sn 12, $n \geq 250$	Rice Sönümlemeli	$C_M = 2.5$ Mbps
	RLL	2, $n \leq 300$ sn, 5, $n > 300$ sn		$P(D_i > 20 \text{ ms}) < 0.01, i = 1, 3$ $P(D_j > 20 \text{ ms}) < 0.05, j = 2, 5$ $P(D_4 > 20 \text{ ms}) < 0.03$

Çizelge 8.4. RLL Dilimindeki Uçtan Uca Gecikme Kısıtının Sağlanması için Gereken Veri Hızı

$D_{\max} = 20 \text{ ms}$	$R_{\min} \text{ (Mbps)}$
$\Phi = 0.99$	3.3026
$\Phi = 0.97$	2.7533
$\Phi = 0.95$	2.4979

Benzetimlerde, Problem **P2**'nin çözümü, JCoFC algoritması ile çok daha hızlı yapılabiliyor olmasına rağmen zaman dilimlerinin uzunluğu 1 sn olarak kabul edilmiştir. Bu şekilde, grafiklerin okunurluğunun artırılacağı düşünülmektedir. Toplam benzetim süresi 500 zaman dilimi ya da 500 sn olarak belirlenmiştir. Çizelge 8.3'teki senaryolarda RLL diliminin isterlerine bakıldığında, Φ dilim güvenilirlik değeri 0.99, 0.97, 0.95 değerlerini almaktadır. Eşitlik 8.53 yardımı ile, RLL dilimindeki uçtan uca gecikmenin sağlanması için gereken en küçük veri hızı hesaplanabilir. Buna göre, Çizelge 8.4 kolaylıkla oluşturulabilir.

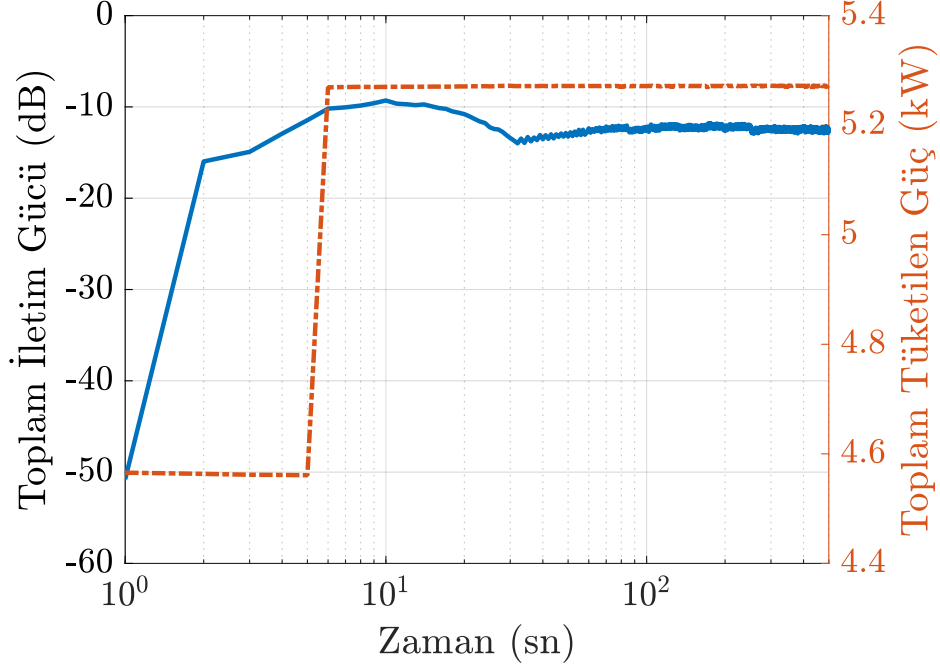
Şekil 8.3'te Senaryo 1 için sönümleme olmayan kanallarda Multimedya ve RLL dilimindeki veri hızları zamanın bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Önceki kısımlarda bahsi geçtiği gibi ele alınan sistem bir kapalı döngü kontrol sistemi olarak düşünülebilir. Bu noktada hem Multimedya hem de RLL dilimindeki veri hızlarının artarak belirli değerlere yakınsadıkları görülmektedir. Bu değerler, Senaryo 1'in isterlerindeki gibi olmalıdır. Bu noktada, Çizelge 8.4'ün yardımı ile, RLL dilimindeki kullanıcıların veri hızlarının en az sırasıyla, 3.30 ve 2.49 Mbps olması gerektiği görülmektedir. Şekil 8.3'te RLL kullanıcılarının veri hızlarının bu değerlere yakınsadığı ve RLL diliminin isterini yerine getirdiği



Şekil 8.3. Sönümlenmesiz kanallarda zamanın bir fonksiyonu olarak ağ dilimlerindeki veri hızı eğrileri.

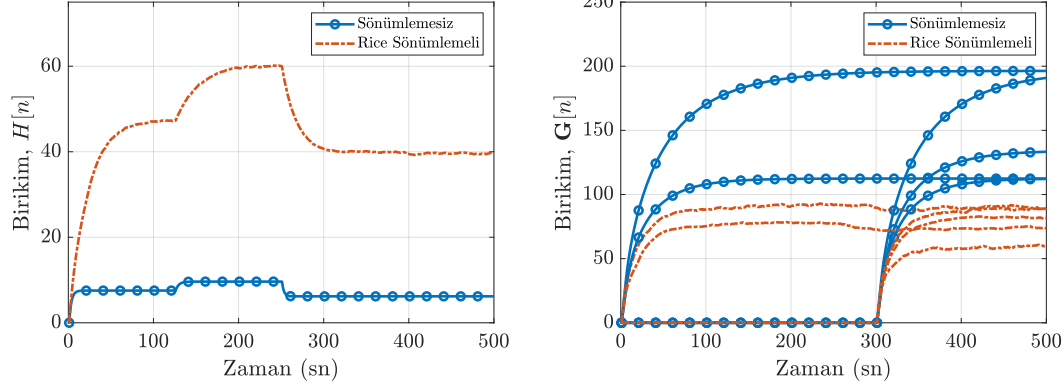
görülmektedir. Kullanıcı 1 yaklaşık 150 sn'de, Kullanıcı 2 ise 100 sn'de ulaşmaları gereken veri hızına ulaşmaktadır. Multimedya diliminde ise kullanıcıların toplam veri hızının en az 2.5 Mbps olması istenmektedir. Haberleşme gücünü enküçültmek istendiğinden bu dilimindeki kullanıcıların toplam veri hızının 2.5 Mbps'a eşit olması beklenir. Şekil 8.3'te de bu durum net biçimde gözlemlenmektedir. Multimedya diliminde 250. saniyeden sonra artan kullanıcı sayısı bu dilimdeki toplam veri hızını kısa bir anlığına arttırsa da daha sonra bu değer tekrar ağ dilimi isteri seviyesine inmektedir. Bu şekildeki eğrilerin doyum noktalarına ulaşma süreleri Şekil 8.2'deki kontrolcüde bulunan ölçek çarpanının değiştirilmesi ile hızlandırılabilir. Ancak kontrol teorisinden de bilindiği gibi integral kontrolcüdeki K_i çarpanı çok küçülürse elde edilen veri hızı grafiklerinde bir salınım görülecektir. Burada önemli olan diğer bir nokta ise, Multimedya dilimindeki kullanıcı sayısındaki artışın diğer dilimdeki kullanıcıların performansını etkilememesidir. Bu durum, bu iki dilimin birbirinden izole olduğunu göstermektedir.

Şekil 8.4'te Senaryo 1 için UxNB'nin yalnızca haberleşme için tükettiği güç sol dikey eksende, tükettiği toplam güç ise sağ dikey eksende olmak üzere zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Zaman eksenini, logaritmik ölçeğe getirilerek sistemin başlangıç noktasından durağan duruma gelinceye kadar geçen süredeki tükettiği güç miktarının



Şekil 8.4. Zamanın bir fonksiyonu olarak sönümlenmez kanallarda (solda) toplam iletim gücü ve (sağda) toplam tüketilen güç eğrileri.

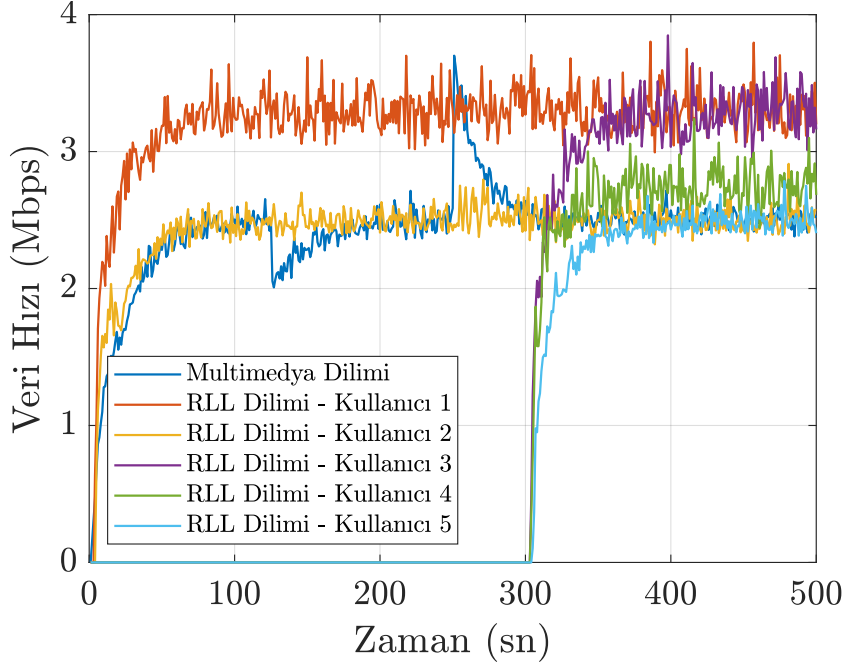
daha rahat gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Buna göre, haberleşme için harcanan güç, 100 sn'den sonra yaklaşık -12 dB civarında durağan duruma geçmektedir. Bu süre sistemin her iki diliminin de durağan duruma geçtiği süre ile aynıdır. Haberleşme için harcanan gücün değişimi bu süreden sonra UxNB'nin hareketleri sonucu kanal katsayısının başka bir deyişle yol kaybının değişmesinden kaynaklıdır. Tüketilen toplam güce bakıldığında ise, sistemin başlangıcında 80 m yüksekte bulunan UxNB, yüksekliğini 5. saniyeye kadar düşürmektedir ve yerden yüksekliği olabilecek en küçük yükseklik olan 30 m olmaktadır. Alçalış sırasında harcanan güç, diğer tüm durumlara göre daha az olduğundan alçalış eylemi sonlanıncaya kadar UxNB'nin tükettiği toplam güç 4.56 kW civarındadır. Ancak burada dikkat edilecek diğer nokta, UxNB'nin ilk zaman diliminde harcadığı güç 4566 W iken 5. saniyede harcadığı güç, deniz seviyesinden daha alçağa konuşlandığı için 4561 W ile 5 W daha düşük olmaktadır. Alçalış sürecinin tamamlanmasının ardından, Bölüm 6'da- kine benzer nedenlerden dolayı eniyileme yatay düzlemde gerçekleşmektedir ve yükseklik sabit kalmaktadır. Yatay düzlemde ise belirli bir yatay hızda hareket etmek uçuş gücü eniyilemesi için eniyi sonuç olduğundan, UxNB devamlı yatayda belirli bir hızda hareket etmektedir. Bu noktadan sonra, Senaryo 2, Senaryo 1'e göre daha kapsamlı olduğundan yapılan incelemelerin tümü Senaryo 2 için geçerlidir.



Şekil 8.5. Senaryo 2 için her iki dilimdeki sanal kuyruk birikimlerinin zamana göre değişimi. (Solda) Multimedia diliminin sahip olduğu tek sanal kuyruk ve (sağda) RLL diliminin sahip olduğu sanal kuyruk birikimleri. Karşılaştırma için Senaryo 2 koşulu altında sönümlenmez kanal durumu da verilmiştir.

Problem 8.20'deki kısıtlardan biri de ağdaki tüm kuyrukların -sanal olanlar da dahil- ortalamada kararlı olması gerektiğidir. Bir kuyruğun ortalamada kararlı olması, Eşitlik 8.21'de gösterildiği gibi kuyruk birikiminin ortalama değerinin sonlu bir değere yakınsaması anlamını taşır. Problem **P2** uyarınca tanımlanan sanal kuyruklar ise zaman ortalaması alınan Eşitlikler 8.19a ve 8.19b'den kaynaklanan H ve G sanal kuyruk birikimleridir. Şekil 8.5'te sanal kuyrukların Senaryo 2'deki kullanıcı değişimlerine göre aldığı durumlar gösterilmektedir. Soldaki şekilde, Multimedia diliminin kuyruk birikimi H gösterilmektedir. Karşılaştırılma yapılabilmesi için sönümlenmez kanal olduğu durum da verilmiştir. Kullanıcı sayısındaki değişimlerin olduğu 125. ve 250. saniyelerde kuyruk birikiminde de değişim görülmektedir. Rice sönümlemesine sahip kanal durumu için kuyruk birikimi daha çok olmaktadır ve kuyruğun durağan duruma ulaşması sönümlenmez duruma göre daha uzun sürede olmaktadır. RLL dilimi için ortaya konan sanal dilim G 'ye bakıldığında burada da tüm kuyrukların durağan durumlarında belirli bir değere yakınsadığı ve Eşitlik 8.21'deki koşula uyduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Rice sönümlenmeli kanal durumunda, bu kuyruk birikimi her kullanıcı için daha düşük seviyede kalmaktadır ve bu nedenle, durağan duruma ulaşmasını sönümlenmez kanal durumuna göre daha hızlı olmaktadır.

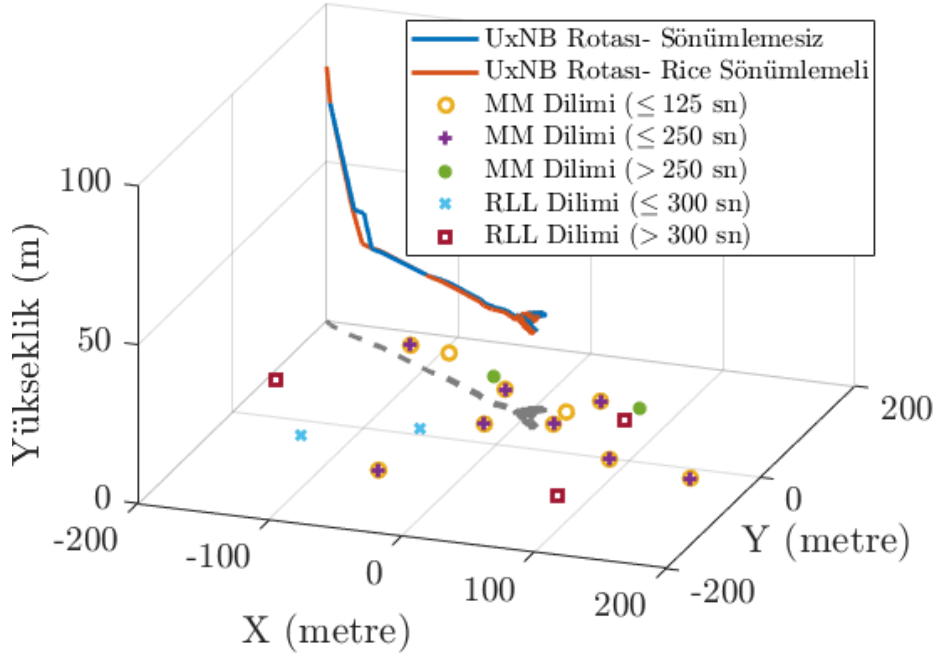
Şekil 8.6'da Senaryo 2 için ağ dilimlerindeki veri hızı eğrileri zamanın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Görüldüğü gibi sadece kullanıcı konumlarının bilindiği ve kanal durumlarının bilinmedi durumda veri hızları Senaryo 1'deki gibi yumuşak eğriler şeklinde çıkmamaktadır. Bunun yerine belirli bir ortalama ofsetin üzerine gürültü benzeri bir



Şekil 8.6. Senaryo 2 için her iki dilime ait zamana karşı veri hızı eğrileri.

salınım eklenmektedir. Ayrıca RLL dilimine sonradan eklenen 3 kullanıcının da veri hızlarının Senaryo 2 isterlerine uygun biçimde istenen veri hızına yakınsadığı görülmektedir. Multimedya dilimi için 2.5 Mbps olan dilim isterine hem kullanıcı sayısındaki azalma hem de artma durumunda dilimin toplam veri hızı yakınsamaktadır. RLL diliminde ise 300. saniyeden sonra sisteme katılan üç kullanıcı sonrasında bu kullanıcıların veri hızları, uçtan uca gecikme kısıtını aşmamak için sahip olunması gereken veri hızları, 3.30, 2.75 ve 2.49 Mbps değerlerine yakınsamaktadır. Kanal durumunun rasgele değiştiği bu senaryoda, veri hızı eğrileri her ne kadar Şekil 8.3'teki gibi düzgün çıkmasa da Multimedya dilimindeki kullanıcı sayısındaki değişikliğin RLL dilimine etki etmediği gözlenebilir. Aynı durum, RLL dilimi için de geçerlidir. Bu da hizmet verilecek toplam kullanıcı sayısı N_{max} aşılmadığı sürece bu dilimlerin birbirinden izole olduğu anlamına gelir. Ayrıca dinamik radyo kaynak tahsisi yapılması sayesinde, dilimlerin isterlerine en uygun altkanallar seçilip ilgili dilimin performansının stabil kalması da sağlanmaktadır.

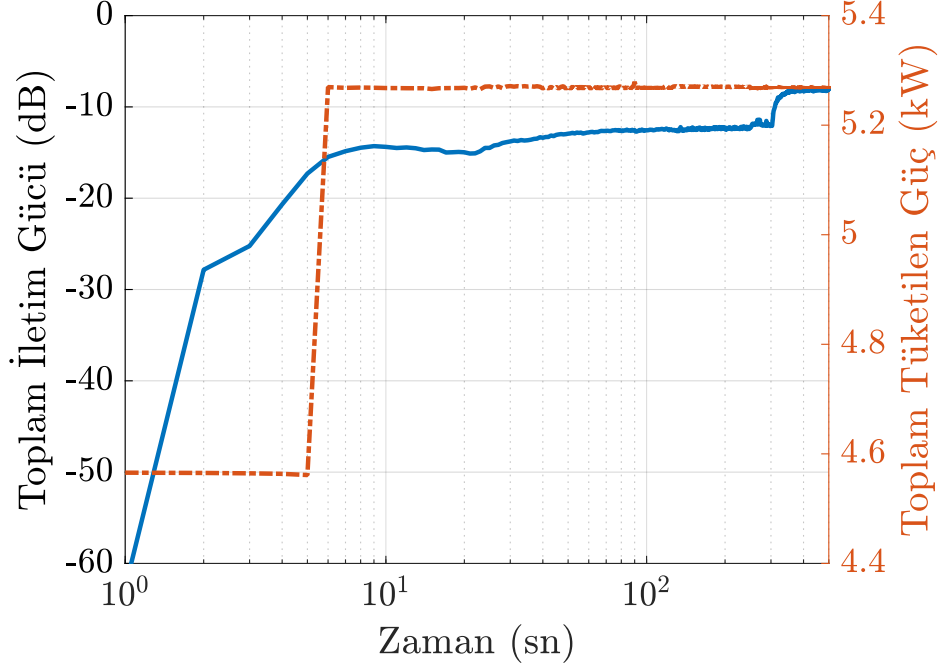
Şekil 8.7'de, Senaryo 2 dahilinde UxNB'nin çizdiği rota üç boyutlu olarak sunulmuştur. Yerde bulunan kullanıcılar buldukları zaman dilimlerine göre farklı şekillerde gösterilmişlerdir. Üç boyutlu rotanın daha kolay anlaşılması için rotanın yer üzerindeki izdüşümü de şekile eklenmiştir. UxNB'nin harcadığı toplam gücün enküçültülmesi yapıldığından ve hareket için harcanan güç haberleşme için harcanan gücün çok üzerinde olduğundan,



Şekil 8.7. Senaryo 2 için $400 \times 400 \text{ m}^2$ 'lik bir alanda, farklı zaman dilimlerinde değişen kullanıcı sayıları için 3 boyutlu UxNB rota planı, UxNB rota başlangıç noktası $\mathcal{J}[0] = [-200, 200, 80]^T$.

UxNB'nin yaptığı ilk hareket yüksekliğini düşürmek olmaktadır. Bulunduğu yüksekliği inebileceği en düşük yükseklik olan 30 m'ye getirdikten sonra yalnızca yatayda hareket etmektedir. Bu noktada, yatayda belirli bir hızda yapılan hareket, asılı kalmaktan daha düşük güç tüketimine neden olduğu için insansız hava aracı sürekli yatayda belirli bir nokta etrafında hareket etmektedir. Sistem süresi ilerledikçe sisteme eklenen kullanıcıların daha çok $0 \leq y \leq 200$ bölgesinde olmasından dolayı, bu bölgedeki hizmet kalitesinin de artması gerektiğinden UxNB'nin bu bölgeye doğru bir rota çizdiği görülmektedir. UxNB'nin yörüngesi, sönümlemeli ya da sönümlemesiz kanal varsayımları altında fazla değişmemektedir. Beklenildiği gibi UxNB, hizmet verilen alanın ortasına doğru bir yörünge çizmektedir ve inebileceği en alçak yükseklikte hizmet vermektedir.

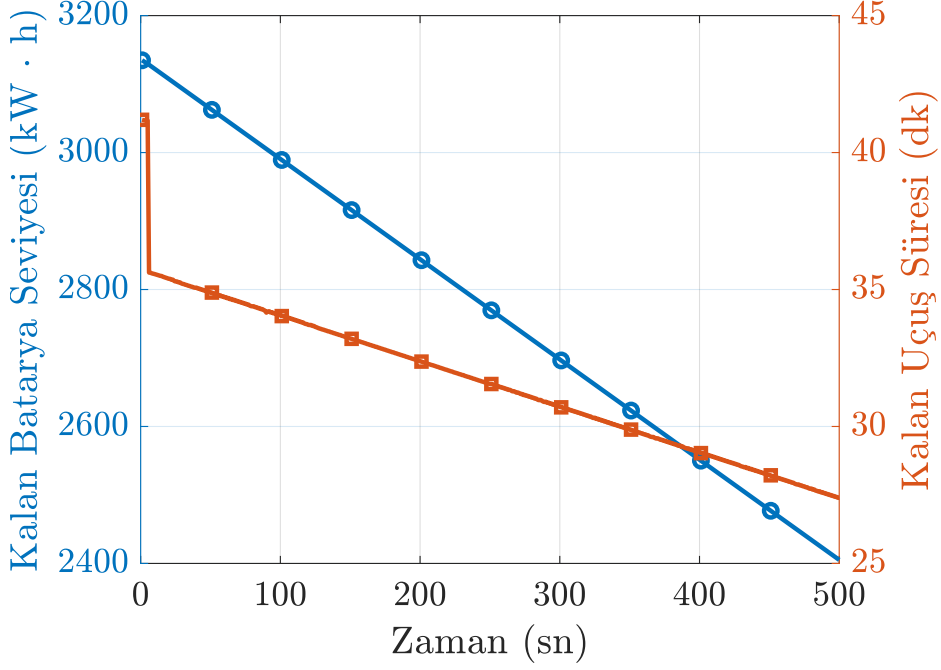
Şekil 8.8'de UxNB'nin Senaryo 2 boyunca haberleşme için harcadığı güç, sol dikey ekseninde, toplam tükettiği güç, sağ dikey ekseninde olmak üzere gösterilmektedir. Yerdeki kullanıcılara hizmet ederken haberleşme için harcanan güç zaman ilerledikçe artmaktadır. Ancak bu noktada en dikkat çekici değişim 300. saniyeden sonra olmaktadır. Sisteme katılan 3 yeni RLL dilimi kullanıcısı sistemde harcanan gücü kısa sürede -12 dB 'den -8 dB 'ye yükseltmiştir. Bunun nedeni, bu kullanıcıların isterlerini gerçekleştirmek için gereken yüksek veri hızı için iletim gücünün yüksek olması gerektiğidir. Bu sebeple yeni



Şekil 8.8. Senaryo 2 için elde edilen, zamanın bir fonksiyonu olarak Rice sönümlmeli kanallarda (solda) toplam iletim gücü ve (sağda) toplam tüketilen güç eğrileri.

kullanıcılar sisteme eklendikçe haberleşme için harcanan güç artacaktır. Bunun önüne geçmenin yöntemi olarak, dilimler ya da kullanıcılar arasında çizelgeleme yapılması düşünülebilir. UxNB'nin harcadığı toplam güç, uçmak için harcadığı güç ile domine edildiğinden, haberleşme için harcanan güçteki bu değişim toplam güç tüketimine neredeyse etki etmemektedir. Bununla birlikte, Senaryo 1'deki davranışa benzer bir güç tüketimi eğrisi görülmektedir. İnsansız hava aracı, alçalışın daha az güç tüketmesi dolayısıyla alçabileceği en düşük yüksekliğe inmektedir. Sonrasında Şekil 8.7'de de görüldüğü gibi yatay düzlemde hareket etmektedir ve sonuç olarak tükettiği güç sabitlenmektedir.

Son olarak, Şekil 8.9'da Senaryo 2 boyunca kalan batarya seviyesi sol dikey eksen ve İHA'nın kalan uçuş süresi sağ dikey eksende gösterilmektedir. Görüldüğü gibi benzetim yapılan sürenin neredeyse tamamında, batarya seviyesi doğrusal olarak azalmaktadır. Bunun nedeni, Şekil 8.8'de de görüleceği üzere 6. saniyeden sonra toplam tüketilen gücün sabit kalmasıdır. Dolayısıyla, UxNB'nin batarya kapasitesi 3128 kWh'ten 2407 kWh'te doğrusal biçimde düşmektedir. Dolayısıyla, her zaman diliminde batarya kapasitesi yaklaşık 1.46 kWh düşmektedir. Bunun yanında, 6. saniyeye kadar olan güç tüketimi daha az olduğundan kapasitedeki düşüş daha yavaştır. Bu ana kadar olan anlık kapasite düşüşü 1.30 kWh olarak hesaplanmaktadır. Bataryanın kapasitesi ve anlık olarak tüketilen güç



Şekil 8.9: Senaryo 2 için zamanın bir fonksiyonu olarak (solda) kalan batarya seviyesi ve (sağda) kalan uçuş süresi eğrileri.

bilindiğinden UxNB'nin ne kadar süre daha uçabileceği hesaplanabilir. Benzetim başladığında, UxNB alçalış hareketi yapacağından bu süre zarfında harcadığı toplam güç 4.55 kW seviyesindedir. Bu değer, yatay hareketine başladığı zaman yaklaşık 0.72 kW daha fazla olmaktadır. Bu nedenle alçalış süresince kalan uçuş süresi hesabı güvenilir olmamaktadır. Yatay hareketine başladıktan sonra kalan uçuş süresi 35 dakika 37 saniye olmaktadır. Benzetim süresi bu noktadan sonra tam olarak 8 dakika 14 saniye sürmektedir. Buna göre, kalan uçuş süresine bakıldığında benzetimin sonunda 27 dakika 23 saniye kaldığı görülmektedir. Yatay hareketin yapıldığı süre boyunca geçen süre ile kalan uçuş süreleri arasındaki farkın aynı olduğu görülmektedir. Burada kalan batarya ömrü ile ilgili yapılan tartışmada, önceki bölümlerde İHA'nın uçuş süresi ile ilgili verilen grafikler ve analizlerle örtüşmektedir.

8.6 Bölüm Özeti

Bu bölümde, gelecek nesil haberleşme ağlarında karşılaşılabilecek muhtemelen bir senaryo ele alınmaktadır. Özellikle 5G ağları ile birlikte, yalnızca veri hızları artmayacak bunun yanında kullanıcı talepleri ve hizmetler de çeşitlenecektir. Bir haberleşme ağında çeşitlenen hizmetleri aynı anda karşılayabilmek için ağ dilimleme teknolojisi öne sürülmektedir.

Böylelikle, kaynaklar farklı dilimlere bölünerek kullanıcılar arasında paylaşılacaktır. Çeşitli hizmet talebi olan kullanıcıların olduğu bir bölgeye konuşlandırılmak istenen bir UxNB de ağ dilimleme tekniğini kullanarak hem kullanıcıların gecikmelerini hem de veri hızlarını kontrol edebilir. Böyle bir durumda, kullanıcıların sisteme giriş çıkışları sonucunda değişen sistem koşullarına göre UxNB'nin rota planı ağ dilimlerindeki isterleri karşılamak adına önem kazanmaktadır.

Bu bölümde ele alınan problem, bir UxNB'nin hem rota planını ve hem de dinamik radyo kaynak tahsisini ortaklaşa yapılmasını sağlamaktadır. Ele alınan sistem modelinde, 2 farklı ağ dilimi bulunmaktadır. Bu dilimlerin ilki, yüksek veri hızı talebi olan kullanıcıların bulunduğu *Multimedya* dilimidir. Diğer dilimde ise, ultra güvenli ve düşük gecikme ile haberleşme yapan kullanıcılar bulunmaktadır. Bu dilime *RLL* dilimi adı verilmektedir. Her iki dilimde de kullanıcı sayısı zamanla değişmektedir ve amaç her dilimin kendi isterini yerine getirirken ortalama en az gücü harcamaktır. Sonuç olarak, önerilen problem, Rice sönmülemeli kanallar altında zaman ortalamalı stokastik bir karışık tamsayı programlama olarak modellenmiştir.

Önerilen problem, zaman ortalamalı bir problem olduğu için matematiksel olarak takip edilebilir değildir. Bu durumdan kurtulabilmek için Lyapunov eniyileme yöntemi kullanılmış ve zaman ortalamalı stokastik problem, her zaman diliminde çözülebilir forma getirilmiştir. Elde edilen anlık eniyileme problemi (Problem **P2**), oldukça karmaşık bir problemdir. Bu sebeple, dinamik kaynak tahsisi, yatay ve düşey düzlemde rota planlamasının yapılması sağlanan, üç eniyileme problemine ayrıştırılmıştır. Bu noktada, karmaşıklık seviyesi düşük ve yakınsama garantili Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü (Joint Communication and Flight Control, JCoFC) algoritması önerilerek zaman ortalamalı stokastik probleme yerel eniyi bir çözüm getirilmiştir.

Üç alt probleminin ilki bilinen UxNB koordinatları altında dinamik radyo kaynak tahsisinin bulunmasını içermektedir. Bu problem bir integral kontrolcü analogisi yapılarak kuyrukların yakınsamasını ve böylece, radyo kaynak tahsisinin kararlı bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır. İntegral kontrolcünün ölçek çarpanının değeri değiştirilerek yakınsama hızı ayarlanabilir. Bununla birlikte, JCoFC algoritmasının ikinci aşamasında, bilinen radyo kaynak tahsisi altında UxNB'nin bulunması gereken yatay koordinatlar bulunmak-

tadır. Sonrasında ise, bu koordinatlar ve kaynak tahisi kullanılarak UxNB yüksekliği elde edilmektedir. Böylelik, ortalamada en az gücü tüketerek ve aynı zamanda kullanıcıların ağ dilimi isterlerini sağlayarak UxNB rota planı ve radyo kaynak tahisi vektörü her zaman dilimi için oluşturulmaktadır. Sonrasında nerilen JCoFC algoritmasının karmaşıklığı ve yakınsaması hakkında bilgiler verilmektedir.

Benzetim sonuçlarında kullanıcı sayısının ve taleplerinin farklı olduğu iki senaryo ele alınmaktadır. Bu senaryoların birbirinden temel farkı kullanılan kanal modelidir. Benzetimlerde kullanıcıların konumları mkemmел biçimde bilindiği varsayılmaktadır. Buna göre, sönümlemesiz kanal senaryolarında kanal katsayıları tam olarak bilinmektedir. Ancak Rice sönümlemeli kanallar altında yapılan benzetimlerde küçük ölçekli sönümleme katsayıları bilinmemektedir. Elde edilen bulgularda, önerilen sistem modelinde, ağ dilimleri arasında tam izolasyon olduğu görülmektedir. Bir ağ dilimindeki değişen kullanıcı sayısı diğer ağ dilimini etkilememektedir.

Bunun yanında, JCoFC algoritmasının hızlı bir şekilde istenen ağ dilimi değerlerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca sayısal bulgular kısmında isterlere olan yakınsamanın hızını integral kontrolcüdeki ölçek çarpanı ile ayarlanabildiği belirtilmiştir. Lyapunov yönteminin temel amaçlarından biri de ağdaki kuyrukların kararlı olmasını sağlamaktadır. Sayısal bulgularda, ağdaki sanal kuyrukların kararlılığı tartışılmaktadır ve ağ dilimlerindeki kullanıcı sayısının değişmesinin kuyruk kararlılığını değiştirmedeği vurgulanmaktadır.

Bununla birlikte, eniyiye yakın UxNB rota planı JCoFC algoritması ile elde edilmektedir. Rota planındaki en önemli nokta, UxNB'nin yere olabildiğince yakın uçarak tükettiği gücü en küçük yapmaya çalışmasıdır. Böylelikle, uçmak için tükettiği güç azalmaktadır ve iletim gücünü arttırarak kullanıcılara istenen seviyede hizmet vermektedir. Sayısal bulgularda, yaklaşık 9 dakikalık bir senaryo sonucunda kalan batarya süresi hesaplanarak bataryanın doğrusal biçimde boşalması sağlanmaktadır. Eniyi durumda, UxNB'nin batarya seviyesinin yaklaşık 35 dakika olduğu ve enerji verimli bir rota planına sahip olunduğunda ancak bu srelere erişilebileceği gösterilmektedir. Batarya yaşam ömrü ile ilgili elde edilen bulguların Bölüm 2'de elde edilenler ile örtüştüğü görülmektedir.

9. SONUÇ VE ARAŞTIRMAYA AÇIK KONULAR

İnsansız hava araçları, önümüzdeki yıllarda önemini giderek arttırarak kablosuz haberleşme ağlarında kendilerine daha fazla yer bulacaklardır. Bunun yanında, şu anda dahi, 5G yeni radyo standartlarına havasal erişim noktası olarak UxNB adı ile girmişlerdir. Literatüre bakıldığında, İHA'ların uçan baz istasyonu olarak kullanılması konusu dikkatleri üzerine çekmiş ve akademik yayın sayısı kısa sürede yüzlerle ifade edilecek sayıya ulaşmıştır. Yersel haberleşme ağlarına kıyasla İHA haberleşmesinin avantajları olduğu gibi sorunları da mevcuttur. Bu tez boyunca, İHA haberleşmesindeki sorunlardan olan enerji verimliliği, eniyi konuşlandırma, radyo kaynaklarının yönetimi gibi konulara çeşitli senaryolar altında çözümler getirilmektedir. Bunun yanında, uRLL, eMBB haberleşme ve ağ dilimleme gibi 5G mimarisinin vaadettiği teknolojiler, uçan baz istasyonu olarak kullanılacak olan İHA'ların dahil edildiği senaryolarda incelenmektedir.

Tez çalışması boyunca, döner kanatlı İHA'ların uçmak için tükettikleri güce vurgu yapılmakta ve bunun haberleşme için harcanan gücün yüzlerce kat üzerinde olduğu gösterilmektedir. Literatür incelendiğinde, genellikle uçmak için harcanan gücün göz ardı edildiği ve haberleşme senaryolarının sanki İHA'lar sonsuz enerji kaynağına sahipmiş gibi ele alındığı görülmektedir. Bu noktada, bu tez çalışmasının yapılmasındaki ana motivasyon ortaya çıkmaktadır. Tezin genelinde döner kanatlı bataryalı İHA'lar ele alınsa da, bunun yanında, balon tipi ya da kablo ile bağlı dronların da yersel olmayan haberleşme ağlarında kullanılabileceği ve daha uzun dönemli ve enerji verimli çözümler oluşturacakları vurgulanmaktadır.

Literatür incelendiğinde, İHA'ların baz istasyonu olarak kullanıldığı senaryolar arasında en çok göze çarpanın kapasite ya da kapsama arttırıcı olarak kullanıldığı durumlar görülmektedir. Tez çalışmasında, 5G teknolojisinin içinde yer alacak olan uRLL ve eMBB haberleşmelerine uygun biçimde, yeni kullanım alanları önerilmektedir. Bunlardan biri V2X ağları diğeri de ağ dilimleme teknolojisidir. Kullanıcı gecikmelerinin ve veri hızlarının önemli olduğu bu senaryolarda, döner kanatlı İHA'lar yardımıyla kurulan havasal haberleşme ağlarında enerji verimliliği, konuşlandırma, rota planlama gibi konular incelenmektedir.

Bunlara ek olarak, tezin içeriğinde, momentum teorisi, eniyileme teorisi, kontrol teorisi

gibi farklı disiplinler kullanılarak analitik ve nümerik çözümler yapılmaktadır. Bölüm 2’de momentum ve pala eleman teorileri kullanılarak döner kanatlı bir İHA’nın uçarken harcadığı güç belirlenmektedir. Diğer tüm bölümlerde eniyileme teorisinden faydalanılmaktadır. Bölüm 3’te tamsayı programları çözümede kullanılan MOSEK yazılımı, Bölüm 4’te daire paketleme teorisi, Bölüm 5’te K-means kümeleme ve DC programlama, Bölüm 6’da çok başlangıç noktalı sıralı ikilenik programlama kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, Bölüm 7 ve 8’de iç-nokta algoritması ile birlikte analitik ve matematiksel çözümler de yapıp hızlı sonuç veren buluşsal algoritmalar önerilmektedir. Bölüm 8’de genellikle kontrol teorisinde kullanılan Lyapunov eniyileme yönteminin haberleşme ağlarına uygulanması gerçekleştirilmektedir.

Yapılan çalışmaların, gelecekte daha fazla ön plana çıkması beklenen İHA haberleşmesi kavramına yeni bir bakış açısı getireceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, tez çalışmasındaki çalışmaların özetleri ve sonrasında araştırmaya açık olan noktalar gelecek kısımlarda detaylandırılmaktadır.

9.1 Özet

9.1.1 İHA Haberleşmesine Genel Bir Bakış: Avantajlar, Sorunlar ve Araştırmalar

Bölüm 1’de İHA haberleşmesi hakkında geniş çapta bilgiler verilmektedir. Öncelikle, insansız hava araçlarının haberleşme sektöründe kullanıldığında getireceği avantajlar ve olası kullanım alanları detaylı biçimde aktarılmaktadır. Sonrasında, kanal modeli, eniyi konuşlandırma, düşük uçuş süreleri, rota planlama ve artağ bağlantısı başlıkları altında sorunlar ve bunlara çözüm olarak literatürde yapılan çalışmalar ele alınmaktadır. Literatürde bulunan eksik noktalar maddeler halinde verilip bu tez çalışmasındaki ana motivasyon noktaları da belirtilmektedir. Son olarak, tez çalışması boyunca literatüre yapılan katkılar açıklanıp üretilen yayınların listesi ile bu bölüm sonlanmaktadır.

9.1.2 Döner Kanatlı Bir İHA İçin Güç Tüketim Analizi

Bölüm 2’de, 5G ve ötesi ağlarda uçan baz istasyonu olarak kullanılması planlanan döner kanatlı İHA’lar için güç tüketim analizi yapılmıştır. Bir İHA tarafından havada asılı kalmak için tüketilen güç, ağırlık ve yüksekliğin bir fonksiyonu olarak momentum ve pala

eleman kuramı kullanılarak modellenmiştir. Bununla birlikte, hem yatay hem de düşey düzlemde hareket etmek için harcanan güç detaylı denklemler verilerek elde edilmiştir. Benzetim sonuçlarında, havada asılı kalma durumunda, belirli bir batarya tipi ve İHA için tüketilen güç miktarı ve uçuş/çalışma süreleri İstanbul (40 m), Ankara (938 m), Sivas (1285 m) ve Ardahan (2020 m) şehirlerinde farklı yük ağırlıkları, batarya sayısı ve batarya özgül enerjisi için hesaplanmış ve grafiksel olarak verilmektedir. Bununla birlikte, rüzgar gücü etkisinin de incelendiği İHA'nın yukarı ve aşağı yönlü hareketinde ve yatay düzlemde tükettiği güç, bu düzlemlerdeki araç hızının bir fonksiyonu olarak elde edilmektedir. Burada yapılan çalışma, tez için temel bir çalışma olma özelliği göstermektedir. Ayrıca, yapılan analizler daha sonraki bölümlerde kurulan haberleşme problemlerine zemin oluşturmaktadır.

9.1.3 Döner Kanatlı Bir UxNB'nin Enerji Verimli Konuşlandırılması

Bölüm 3'te, hizmet verilen kullanıcıların QoS'leri ve döner kanatlı bir İHA'nın uçuş dinamiği göz önünde bulundurularak enerji verimli UxNB konuşlandırma problemi incelenmiştir. Önerilen problemde, döner kanatlı bir UxNB'nin havada asılı kaldığı ve yerde bulunan kullanıcılara hizmet götürdüğü varsayılmaktadır. Bu nedenle, ilk olarak uçmak için harcadığı güç momentum ve pala eleman kuramı vasıtası ile elde edilmiştir. Daha sonra, İHA, uçan baz istasyonu olarak kullanılırken rastgele bir coğrafi alandaki hizmet alan kullanıcı sayısını enbüyüten bir haberleşme problemi önerilmiştir. Bu probleme, uçuş dinamikleri ve kullanıcıların hizmet kalitesi kısıtları da eklenmiştir. Bu senaryoda, ağa katılan kullanıcıların ortalama enküçük SNR'lerinin belirli bir seviyede tutulacağı garanti edilmektedir. Bununla birlikte, İHA'nın bu koşulu sağlarken havada asılı kalmak için belirli bir güç değerinin üzerinde güç tüketmemesi de sağlanmaktadır. Sayısal bulgularda, elektrik devreleri ve kontrol birimlerinin yaklaşık on Watt civarı güç tükettiği ancak havada asılı kalmak için İHA'nın binlerce Watt tükettiği ortaya konmaktadır. UxNB'nin hizmet verdiği kullanıcı sayısının kullanıcıların QoS'lerinin yanı sıra tüketebileceği güç miktarı ile ilişkili olduğu ortaya konmaktadır. Ayrıca, UxNB'nin üzerinde taşıdığı antenin hüzmeye genişliği ile hizmet verilen kullanıcı sayısı ve İHA yüksekliği ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

9.1.4 Bir Doğal Afette Kapsama Yoğunluğu ve Ağ Sürekliliği Sorunları

Bölüm 4'te, bir doğal afette, afet verilen bölgesinde kurulan birden çok UxNB'den oluşan bir haberleşme ağı ele alınmaktadır. Bir afet senaryosunda, kurulacak olan İHA haberleşmesinin en önemli özelliği hizmet süresi ve kapsadığı alanın büyüklüğüdür. Bu sebeple, bu bölümde, verilen bir coğrafi bölgede, gerçekçi uçuş dinamikleri altında ağ kapsama yoğunluğu ve sürekliliğini enbüyüten enerji duyarlı 3B konuşlandırma stratejisi araştırılmıştır. Öncelikle, haberleşmeyi sağlayan uçan baz istasyonlarının havada asılı kaldıkları varsayılarak uçuş süresini enbüyütecek konuşlanmanın nasıl olması gerektiği tartışılmıştır. Daha sonra, hücrelerarası girişimin yok edilmesini sağlayacak şekilde İHA baz istasyonlarının kapsama alanlarının birbiri ile örtüşmemesini garanti eden bir haberleşme problemi formüle edilmiştir. Bu problemde, UxNB'lerin kapsama alanının yarıçapı, uçuş dinamikleri üzerindeki kısıttan ötürü belirli bir değerde kısıtlanmıştır. Sayısal bulgularda, ağ tasarımında şehir rakımının uzun hizmet süresini etkileyen ana faktörlerden birisi olduğu gösterilmiştir. Bunun yanında, sonuçlar, ağ sürekliliği belirli bir seviyenin üzerinde tutmak istenirse kapsama performansından ödün vermek gerektiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, sayısal bulgular, bu performans metrikleri arasında bir ödünleşim olduğunu da göstermektedir. UxNB sayısının ve kapsanmak istenen alanın boyutlarının bu metriklere etkisi de incelenmiştir.

9.1.5 Farklı Tipte İHA'dan Oluşan UxNB Ağlarının Başarım Analizi

Bölüm 5'te, bilinen literatürün aksine, İHA tiplerine özgü, gerçekçi kısıtlar altında verilen bir hedef bölgede haberleşme ağına hizmet verilen kullanıcıların sayısını enbüyüten üç boyutlu konuşlandırma stratejileri incelenmiştir. İncelenen İHA tipleri, batarya ile çalışan ve kablo ile bağlı döner kanatlı dronlar ve balon İHA'lardır. İlk olarak, UxNB'lerin oluşturduğu bir ağ modeli sunulmuştur ve döner kanatlı İHA'ların uçmak için harcadıkları gücün rüzgarlı bir havada nasıl değiştiği gösterilmiştir. Sonrasında, her İHA tipi için, hücrelerarası girişimin bulunduğu durumda, enküçük QoS gereksinimlerinin sağlandığı bir haberleşme problemi, ilgili İHA'nın fiziksel kısıtlarına uygun biçimde formüle edilmiştir. Önerilen problemleri çözmek için, K-means kümeleme ve DC programlama ortaklaşa kullanılarak eniyiye yakın sonuç veren bir algoritma önerilmiştir. Sayısal bulgularda, batarya ile çalışan UxNB durumu için, daha uzun süre hizmet verilebilmesi için haberleşme

ağının kurulduğu şehrin rakımının önemli bir parametre olduğu ortaya konmuştur. Bunun dışında, ağ sürekliliğini belli bir sürenin üzerinde tutmak istendiğinde, hizmet verilen kullanıcı sayısında düşme olacağı kabul edilmesi gerekir. Bağlı dron senaryosunda ise, güç kablosunun uzunluğunun ağ başarımını etkileyen ana faktör olduğu ortaya çıkmaktadır. Balon senaryosunda ise, rüzgarın ağ başarımı üzerine etkisi incelenmiştir. Bölümün sonunda, her üç İHA tipi ile kurulan ağların birbiri ile karşılaştırılması, hizmet verilen alanın boyutlarına ve hizmet veren UxNB sayısına göre analiz edilmiştir.

9.1.6 V2X Ağları İçin Uçan Yol Kenarı Birimi Mimarisi

Bu bölümde, döner kanatlı bir UxNB'nin uçan yol kenarı birimi (flying roadside unit, FRSU) olarak enerji verimli konuşlandırılması incelenmiştir. Bu problemde, araç kullanıcılarının (vehicular users, VUs) uçtan uca gecikme süreleri ve UxNB ile yer baz istasyonu arasında kurulan artağ bağlantısının kapasitesi birer kısıt olarak ele alınarak, aynı zamanda VU'ların iniş yolu güç kontrolleri de yapılmaktadır. Bölüm 6'nın içeriğinde, bir kavşakta bulunan araç kullanıcılarına havada uçan UxNB ile V2I bağlantısının sağlandığı bir senaryo ele alınmıştır. Bu durumda, UxNB, çekirdek şebekeye kablosuz bir artağ bağlantısı ile bağlıdır. Sonrasında, belirli sayıda VU'nun olduğu durumda, hem havada asılı kalmak için hem de haberleşme için tüketilen güçlerin toplamını ortaklaşa enküçülten bir haberleşme problemi önerilmektedir. Böyle bir ağ mimarisinde, araç kullanıcılarının uçtan uca gecikme süresinin belirli bir değerin üzerinde olma ihtimalinin bir eşik değerin altında tutulmaktadır. Sayısal bulgular, haberleşme paket boyutunun, gecikme kısıtını etkilediğinden, ağ kurulumuna etki eden en önemli faktör olduğunu göstermektedir. Ayrıca, gecikme kısıtının sıkılaşması ve ortalama paket boyunun artması sonucunda, VU'ların veri hızlarının toplamının artağ şebeke kapasitesine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

9.1.7 Yüksek Veri Hızı Talebi Olan Bölgelerde Enerji Verimliliği ve Artağ Sorunu

Bölüm 7'de, yüksek veri hızı talebi olan kullanıcıların bulunduğu bir bölgede İHA haberleşmesi senaryosu ele alınmıştır. Kullanıcıların toplam veri hızlarının UxNB'nin harcadığı güce oranı ile elde edilen *ağ verimliliği* metriğinin enbüyütülmesi yapılmaktadır. Bu senaryoda, artağ bağlantısının UxNB ile yer baz istasyonu arasında kurulduğu varsayılmaktadır. Dolayısıyla, ağdaki veri yükünü bu kurulan artağ bağlantısı beslemektedir. Buna göre, farklı şehir senaryoları altında değişen bir eniyileme problemi önerilmiştir.

Eniyi UxNB konumunun ve radyo kaynak tahsisinin arandığı problemde, maliyet işlevinin UxNB yüksekliğine göre tek modlu olduğu analitik olarak gösterilmiştir. Bununla birlikte, artağ bağlantı kapasitesini enbüyük yapacak olan UxNB yatay koordinatları belirlenmiş ve bir altın kesit arama algoritması ile hızlı ve eniyeye yakın sonuç veren bir buluşsal algoritma önerilmiştir. Sayısal bulgularda, sistemdeki Jain endeksi, şehir senaryosunun etkisi ve artağ bağlantısının kalitesi incelenmiştir. Artağ bağlantı hızının yüksek ya da düşük olmasının ağ verimliliğini etkileyen ana faktör olduğu ortaya konmuştur. Bunun dışında, şehir senaryosuna göre uçuş sürelerinin karşılaştırılması yapılmış ve seyrek yerleşimin bulunduğu şehirlerde artağ bağlantısının daha kaliteli olmasından dolayı uçuş süresinin de daha yüksek olacağı benzetimlerde gösterilmiştir.

9.1.8 Tam İzolasyonlu Ağ Dilimleme ile Dinamik Radyo Kaynak Tahsisi ve Rota Planlaması

Bölüm 8’de, farklı servis talepleri olan kullanıcı gruplarının farklı ağ dilimlerinde hizmet alması konu edilmektedir. Ağ dilimleri arasında tam izolasyon varken, aynı zamanda hem radyo kaynak tahsisi hem de rota planlaması yapılmaktadır. Önerilen problem zaman ortalamalı stokastik bir problem olduğundan, Lyapunov yöntemi kullanılarak her zaman diliminde çözülebilecek hale getirilmektedir. Ancak, bu haliyle bile çözülmesi karmaşık bir problem olduğundan, üç alt probleme ayrıştırılmaktadır. Böylelikle, önerilen problem, matematiksel olarak takip edilebilir bir forma sokulmaktadır. Ayrıştırılan problemlerden ilki, dinamik radyo kaynak tahsisi sorununa çözüm bulurken, diğerleri UxNB’nin yatay ve düşey düzlemlerdeki hareketini eniyilemektedir. Böylelikle, hesaplama karmaşıklığı düşük, hızlı sonuç veren buluşsal bir algoritma olan Ortak Haberleşme ve Uçuş Kontrolü (JCoFC) algoritması önerilmektedir. Bununla birlikte, JCoFC algoritmasının yakınsaması ve hesaplama karmaşıklığı sunulmaktadır. Sayısal bulgularda, dilimler arası izolasyon ve algoritmanın yakınsama hızı tartışılmaktadır. Ayrıca, sistem başarımlı analizi, zamanla değişen Rice sönümlemeli kanallar altında, dilimlerdeki kullanıcı sayılarının zamanla değişimi ile birlikte incelenmektedir. Bunun yanında, UxNB’nin sönümlemeli ve sönümlemesiz kanal senaryolarında izlediği rota, harcadığı güç ve batarya ömrü hakkında da detaylı grafikler sunulmaktadır.

9.2 Araştırmaya Açık Konular

9.2.1 Kanal Modeli

Tez kapsamında, literatürde sıkça kullanılan LoS ve NLoS bağlantılarının görülme olasılıklarının ortalaması ile elde edilen havadan yere kanal yol kaybı modeli kullanılmaktadır. Yalnızca Bölüm 8’de buna ek olarak, Rice kanal modeline yer verilmektedir. Kanal modeli, İHA haberleşmesi için en önemli sorunlardan biridir. Kullanılan kanal modelinin en önemli sorunu, kullanıcı konumlarının bilinmesi ile oluşturulmasıdır. Dolayısıyla, kullanıcı konumlarının kesin olarak bilinmediği senaryolarda yeni bir kanal modeline ihtiyaç olacaktır. Bunun yanında, UxNB’lerin birbiri ile haberleşmesi için kullanılan havadan havaya kanalın (air-to-air, A2A) da UxNB ile kurulan havasal ağlara dahil edilmesi gerekmektedir. Özellikle, artağ bağlantı sorunları ile ilgili araştırmalarda havadan havaya kanal modeli mutlaka incelenmelidir.

9.2.2 Ölçüme Dayalı Güç Tüketim Modeli

Tez çalışmasında, önerilen güç tüketim modeli tamamıyla matematiksel olarak modellenmiş ve herhangi bir ölçüme dayanmayan bir modeldir. Ancak, farklı kanat, rotor sayısına göre İHA’nın güç tüketimi değişebileceği gibi, aerodinamik yapısı farklı olan İHA’ların farklı güç tüketimleri olacaktır. Dolayısıyla, ölçümlere dayalı, İHA modeline özgü bir güç tüketim şablonunun oluşturulması ele alınacak problemlere daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Bunun yanında, güç tüketimi yalnızca İHA’nın modeline veya şekline göre değil, çevresel koşullara göre de değişebilir. Özellikle rota planlama problemlerinde, İHA’nın uçuş alanının bina, ağaç vb. engellerle sınırlı olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte, yağmur, kar, şiddetli rüzgar, çok sıcak ve çok soğuk hava durumları da ayrıca çevresel faktörler anlamında ele alınmalıdır.

9.2.3 Anten Tasarımı

Literatürün geneline bakıldığında, baz istasyonu olarak kullanılan İHA’ların üzerinde aşağı yönde bakan ve yönlü antenler bulunmaktadır. Bu tezde de kullanılan UxNB üzerindeki antenlerin örüntüsü oldukça basite indirgenmiştir. Bu model, temel başarımlar için kullanılabilir ancak daha gerçekçi senaryolar ya da uygulama anındaki başarımların

kestirimi için gerçekçi anten örüntülerine ve bunların eniyilemesine ihtiyaç vardır. Literatürde bununla ilgili çalışmalar olsa da hala bu konu araştırmaya açıktır [82, 170, 171]. Bunun yanında, yukarıda bahsi geçen A2A bağlantısının kurulabilmesi için UxNB'lerin farklı bir anten yapısına sahip olmaları gerekir. Burada, tasarım olarak birden fazla ana lobu olan anten dizileri kullanılabilceği gibi, İHA'ların üzerine yerleştirilecek bir monopul anten ile de bu bağlantı kurulabilir. Dolayısıyla, UxNB'nin fiziksel tasarımı da önemli hale gelmektedir.

9.2.4 Aynı NTN İçerisinde Farklı İHA Tipleri

Tezin başında da bahsedildiği gibi yapılmak istenen uygulamaya göre uygun bir İHA seçimi önemlidir. Bölüm 5'te, batarya ile çalışan ve kablo ile bağlı döner kanatlı ve balon/zeplin İHA'ların oluşturduğu kablosuz haberleşme ağları ele alınmıştır. Ancak bu İHA tiplerinin hepsinin ya da birkaçının aynı anda bulunduğu bir ağ yapısı incelenmemiştir. Literatürde balon tipi İHA'ların genellikle yüksek irtifa platformu olarak ele alınmalarından dolayı, balonların yönetici olduğu, dronların ise yöneticiye bağlı olduğu ağ planlamaları yapılabilir. Ayrıca, İHA-uydu bağlantısı ile birlikte, hem uydu haberleşmesi hem de İHA haberleşmesinin birlikte yürütüldüğü yeni nesil yersel olmayan ağlar (non-terrestrial networks, NTN) da araştırılmaya değer konular arasındadır.

9.2.5 UxNB'ler Arasında Haberleşme

UxNB'ler arasındaki iletişim yukarıda belirtildiği gibi gerçek hayattaki senaryolarda oldukça önemli bir konudur. Özellikle, ultra güvenli düşük gecikmeli haberleşme isteyen sürü yönetimi gibi konularda bilgi paylaşımı oldukça önemli hale gelmektedir. UxNB sürülerinin kontrolünde, rota planında ve bilgi alışverişinde A2A kanalı kullanılarak haberleşme yapılmaktadır. Bu noktada, UxNB'ler arası paket transferi, çok atlamalı sistemler, kanal modeli, kullanılan çalışma frekansı gibi sorunlar araştırmaya değerdir.

9.2.6 Farklı Radyo Erişim Teknolojileri

Radyo erişim teknolojisi (radio access technology, RAT), haberleşme ağına temel fiziksel bağlanma yöntemidir. Bunlardan bazıları, Wi-Fi, GSM, Bluetooth, mmDalga, LTE ve 5G şeklindedir. Bu tezde ele alınan problemlerde genelde 5G ortabandı olan 2-2.5 GHz

arasında iletişimin yapıldığı varsayılmaktadır. Ancak gelecek nesil haberleşme sistemlerinde, bu radyo erişim teknolojilerinin ortaklaşa kullanıldığı bir çok senaryo olacaktır. Bunun dışında, bir UxNB üzerinde bile birden fazla RAT sağlayıcısı olabilir. Örneğin, artağ bağlantısının mmDalga ile yapıldığı, kullanıcılara hizmetin ortabanttan yapıldığı bir yöntem uygulanabilir. Bunun dışında, üstte bahsi geçen UxNB'ler arasındaki haberleşme serbest uzay optiği (FSO) ile yapılırken kullanıcılara farklı bantlardan hizmet götürülebilir. Bu sebeple, İHA haberleşmesinde farklı RAT'ların bulunduğu senaryoların ele alınması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] A. A. Hurdeman, *The worldwide history of telecommunications*. John Wiley & Sons, **2003**.
- [2] T. Mshvidobadze, “Evolution mobile wireless communication and LTE networks,” in *2012 6th international conference on Application of information and communication technologies (AICT)*. IEEE, **2012**, sf. 1–7.
- [3] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, ve G. Wunder, “5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice,” *IEEE journal on selected areas in communications*, cilt 35, no. 6, sf. 1201–1221, **2017**.
- [4] X. Cao, P. Yang, M. Alzenad, X. Xi, D. Wu, ve H. Yanikomeroglu, “Airborne communication networks: A survey,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, cilt 36, no. 9, sf. 1907–1926, **2018**.
- [5] Y. Zeng, R. Zhang, ve T. J. Lim, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges,” *arXiv preprint arXiv:1602.03602*, **2016**.
- [6] “Unmanned aerial system (UAS) support in 3GPP, Rel-17,” 3GPP, Teknik Rapor, **2020**.
- [7] SIOR Pulse Blog, “Cell Tower Leases Add Big Value with Little Maintenance,” Erişim: **8 Şubat 2021**. <https://blog.sior.com/cell-tower-leases-add-big-value-with-little-maintenance>
- [8] East Texas Towers, “Cell on Wheels Mobile Tower Rentals,” Erişim: **8 Şubat 2021**. <https://easttexastowers.com/cell-on-wheels-mobile-tower-rentals/>
- [9] A. W. Sudbury ve E. B. Hutchinson, “A cost analysis of Amazon Prime Air (Drone delivery),” *Journal for Economic Educators*, cilt 16, no. 1, sf. 1–12, **2016**.
- [10] Meico Systems, “Cell on Wheels up to 20 meters,” Erişim: **8 Şubat 2021**. <https://www.meicosystems.cz/en/portfolio/cow/cow-up-to-20-meters>
- [11] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, ve M. Debbah, “A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **2019**.
- [12] L. Reynaud ve T. Rasheed, “Deployable aerial communication networks: Challenges for futuristic applications,” in *Proceedings of the 9th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*. ACM, **2012**, sf. 9–16.
- [13] H. Hariyanto, H. Santoso, ve A. K. Widiawan, “Emergency broadband access network using low altitude platform,” in *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Biomedical Engineering 2009*. IEEE, **2009**, sf. 1–6.

- [14] Y. Shibata, Y. Sato, N. Ogasawara, G. Chiba, ve K. Takahata, “A new ballooned wireless mesh network system for disaster use,” in *2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. IEEE, **2009**, sf. 816–821.
- [15] I. Bucaille, S. Héthuin, A. Munari, R. Hermenier, T. Rasheed, ve S. Allsopp, “Rapidly deployable network for tactical applications: Aerial base station with opportunistic links for unattended and temporary events absolute example,” in *MILCOM 2013-2013 IEEE military communications conference*. IEEE, **2013**, sf. 1116–1120.
- [16] I. Bor-Yaliniz ve H. Yanikomeroglu, “The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 54, no. 11, sf. 48–55, **2016**.
- [17] S. Rohde ve C. Wietfeld, “Interference aware positioning of aerial relays for cell overload and outage compensation,” in *2012 IEEE vehicular technology conference (VTC Fall)*. IEEE, **2012**, sf. 1–5.
- [18] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, ve A. Jamalipour, “Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments,” in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*. IEEE, **2014**, sf. 2898–2904.
- [19] D. Gettinger ve A. H. Michel, “Drone sightings and close encounters: An analysis,” *Center for the Study of the Drone, Bard College*, **2015**.
- [20] S. H. Alsamhi ve N. Rajput, “An intelligent HAP for broadband wireless communications: Developments, QoS and applications,” *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, cilt 3, no. 2, sf. 134–143, **2015**.
- [21] M. M. Azari, F. Rosas, K.-C. Chen, ve S. Pollin, “Optimal UAV positioning for terrestrial-aerial communication in presence of fading,” in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016 IEEE*. IEEE, **2016**, sf. 1–7.
- [22] M. Bacco, F. Davoli, G. Giambene, A. Gotta, M. Luglio, M. Marchese, F. Patrone, ve C. Roseti, “Networking challenges for non-terrestrial networks exploitation in 5G,” in *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*. IEEE, **2019**, sf. 623–628.
- [23] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, ve H. Yanikomeroglu, “Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks,” in *Communications (ICC), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, **2016**, sf. 1–5.
- [24] C. T. Cicek, H. Gultekin, B. Tavli, ve H. Yanikomeroglu, “UAV base station location optimization for next generation wireless networks: Overview and future research directions,” in *2019 1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman (UVS)*. IEEE, **2019**, sf. 1–6.
- [25] S. Kandeepan, K. Gomez, L. Reynaud, ve T. Rasheed, “Aerial-terrestrial communications: Terrestrial cooperation and energy-efficient transmissions to aerial base stations,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, cilt 50, no. 4, sf. 2715–2735, **2014**.
- [26] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, ve S. Lardner, “Optimal LAP altitude for maximum coverage,” *IEEE Wireless Communications Letters*, cilt 3, no. 6, sf. 569–572, **2014**.

- [27] T. Aziz *et al.*, “Disaster mitigation techniques based on LTE release 8 network employed using HAPs,” in *2014 8th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA)*. IEEE, **2014**, sf. 1–6.
- [28] M. Erdelj ve E. Natalizio, “UAV-assisted disaster management: Applications and open issues,” in *2016 international conference on computing, networking and communications (ICNC)*. IEEE, **2016**, sf. 1–5.
- [29] M. Helmy, T. Baykaş, ve H. Arslan, “Optimization of aerial base station location in LAP for disaster situations,” in *Standards for Communications and Networking (CSCN), 2015 IEEE Conference on*. IEEE, **2015**, sf. 240–244.
- [30] M. Y. Selim ve A. E. Kamal, “Post-Disaster 4G/5G Network Rehabilitation using Drones: Solving Battery and Backhaul Issues,” in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, **2018**, sf. 1–6.
- [31] U. Demir, C. Toker, ve Ö. Ekici, “Energy-efficient deployment of UAV in V2X network considering latency and backhaul issues,” in *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, BlackSeaCom 2020*, **2020**.
- [32] H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, A. S. Uluagac, A. Kadri, ve A. Tuncer, “UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 55, no. 3, sf. 22–28, **2017**.
- [33] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, ve M. Debbah, “Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage,” *IEEE Communications Letters*, cilt 20, no. 8, sf. 1647–1650, **2016**.
- [34] S. Kaur ve S. Randhawa, “Google Loon: Balloon-powered Internet for everyone,” in *AIP Conference Proceedings*, cilt 2034, no. 1. AIP Publishing LLC, **2018**, sf. 020006.
- [35] D. Liu, Y. Xu, J. Wang, J. Chen, K. Yao, Q. Wu, ve A. Anpalagan, “Opportunistic UAV utilization in wireless networks: Motivations, applications, and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 58, no. 5, sf. 62–68, **2020**.
- [36] “AT&T detail network testing of drones in football stadiums,” Erişim: **29 Kasım 2020**. <https://www.androidheadlines.com/2016/09/att-detail-network-testing-of-drones-in-football-stadiums.html>
- [37] “Four 5G drone demonstrations and trials,” Erişim: **29 Kasım 2020**. <https://www.rcrwireless.com/20200922/carriers/four-5g-drone-demonstrations-and-trials>
- [38] Turkcell, “Uçan Baz İstasyonu Dronecell,” Erişim : **12 Nisan 2019**. https://youtu.be/8Q15_9pK4Fw
- [39] J. Koşmerl ve A. Vilhar, “Base stations placement optimization in wireless networks for emergency communications,” in *2014 IEEE international conference on communications workshops (ICC)*. IEEE, **2014**, sf. 200–205.
- [40] U. Demir, M. Ç. İpek, C. Toker, ve Ö. Ekici, “Energy-Efficient Rotary-Wing UAV Deployment Under Flight Dynamics and QoS Constraints,” in *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*. IEEE, **2019**, sf. 1–5.

- [41] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, ve M. Debbah, “Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles,” in *Communications (ICC), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, **2016**, sf. 1–6.
- [42] “Endonezya depremi ve tsunami,” Erişim: **2020**, Kasım. https://tr.wikipedia.org/wiki/2004_Hint_Okyanusu_depremi_ve_tsunamisi
- [43] K. Zheng, Q. Zheng, P. Chatzimisios, W. Xiang, ve Y. Zhou, “Heterogeneous vehicular networking: A survey on architecture, challenges, and solutions,” *IEEE communications surveys & tutorials*, cilt 17, no. 4, sf. 2377–2396, **2015**.
- [44] K. Abboud, H. A. Omar, ve W. Zhuang, “Interworking of DSRC and cellular network technologies for V2X communications: A survey,” *IEEE transactions on vehicular technology*, cilt 65, no. 12, sf. 9457–9470, **2016**.
- [45] K. Zheng, Q. Zheng, H. Yang, L. Zhao, L. Hou, ve P. Chatzimisios, “Reliable and efficient autonomous driving: The need for heterogeneous vehicular networks,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 53, no. 12, sf. 72–79, **2015**.
- [46] T. Fournier, “Will my next car be a libertarian or a utilitarian?: Who will decide?” *IEEE Technology and Society Magazine*, cilt 35, no. 2, sf. 40–45, **2016**.
- [47] O. Bekkouche, K. Samdanis, M. Bagaa, ve T. Taleb, “A Service-based architecture for enabling UAV enhanced network services,” *IEEE Network*, **2020**.
- [48] Y. Liu, W. Wang, H.-H. Chen, L. Wang, N. Cheng, W. Meng, ve X. Shen, “Secrecy rate maximization via radio resource allocation in cellular underlaying V2V communications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 69, no. 7, sf. 7281–7294, **2020**.
- [49] S. Parsaeefard, V. Jumba, M. Derakhshani, ve T. Le-Ngoc, “Joint resource provisioning and admission control in wireless virtualized networks,” in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015 IEEE*. IEEE, **2015**, sf. 2020–2025.
- [50] M. Hu, Y. Chang, Y. Sun, ve H. Li, “Dynamic slicing and scheduling for wireless network virtualization in downlink LTE system,” in *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2016 19th International Symposium on*. IEEE, **2016**, sf. 153–158.
- [51] A. T. Z. Kasgari ve W. Saad, “Stochastic optimization and control framework for 5G network slicing with effective isolation,” in *Information Sciences and Systems (CISS), 2018 52nd Annual Conference on*. IEEE, **2018**, sf. 1–6.
- [52] O. U. Akguel, I. Malanchini, V. Suryaprakash, ve A. Capone, “Service-aware network slice trading in a shared multi-tenant infrastructure,” in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, **2017**, sf. 1–7.
- [53] P. Caballero, A. Banchs, G. de Veciana, X. Costa-Pérez, ve A. Azcorra, “Network slicing for guaranteed rate services: Admission control and resource allocation games,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 17, no. 10, sf. 6419–6432, **2018**.

- [54] C. Marquez, M. Gramaglia, M. Fiore, A. Banchs, ve X. Costa-Pérez, “Resource sharing efficiency in network slicing,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, cilt 16, no. 3, sf. 909–923, **2019**.
- [55] X. Li, M. Samaka, H. A. Chan, D. Bhamare, L. Gupta, C. Guo, ve R. Jain, “Network slicing for 5G: Challenges and opportunities,” *IEEE Internet Computing*, cilt 21, no. 5, sf. 20–27, **2017**.
- [56] G. K. Xilouris, M. C. Batistatos, G. E. Athanasiadou, G. Tsoulos, H. B. Pervaiz, ve C. C. Zarakovitis, “UAV-assisted 5G network architecture with slicing and virtualization,” in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, **2018**, sf. 1–7.
- [57] Z. Yuan ve G.-M. Muntean, “Airslice: A network slicing framework for UAV communications,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 58, no. 11, sf. 62–68, **2020**.
- [58] P. Yang, X. Xi, J. Chen, T. Q. Quek, X. Cao, ve D. O. Wu, “RAN slicing in a UAV network for eMBB service provision,” *arXiv preprint arXiv:1912.03600*, **2019**.
- [59] G. Faraci, C. Grasso, ve G. Schembra, “Design of a 5G network slice extension with MEC UAVs managed with reinforcement learning,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, cilt 38, no. 10, sf. 2356–2371, **2020**.
- [60] U. Siddique, H. Tabassum, E. Hossain, ve D. I. Kim, “Wireless backhauling of 5G small cells: Challenges and solution approaches,” *IEEE Wireless Communications*, cilt 22, no. 5, sf. 22–31, **2015**.
- [61] M. Cui, G. Zhang, Q. Wu, ve D. W. K. Ng, “Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 67, no. 9, sf. 9042–9046, **2018**.
- [62] P. K. Sharma ve D. I. Kim, “Coverage probability of 3-D mobile UAV networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, cilt 8, no. 1, sf. 97–100, **2018**.
- [63] E. Turgut ve M. C. Gursoy, “Downlink analysis in unmanned aerial vehicle (UAV) assisted cellular networks with clustered users,” *IEEE Access*, cilt 6, sf. 36 313–36 324, **2018**.
- [64] M. Simunek, F. P. Fontán, ve P. Pechac, “The UAV low elevation propagation channel in urban areas: Statistical analysis and time-series generator,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 61, no. 7, sf. 3850–3858, **2013**.
- [65] T. Tavares, P. Sebastião, N. Souto, F. J. Velez, F. Cercas, M. Ribeiro, ve A. Correia, “Generalized LUI propagation model for UAVs communications using terrestrial cellular networks,” in *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*. IEEE, **2015**, sf. 1–6.
- [66] X. Ye, X. Cai, X. Yin, J. Rodríguez-Piñeiro, L. Tian, ve J. Dou, “Air-to-ground big-data-assisted channel modeling based on passive sounding in LTE networks,” in *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, **2017**, sf. 1–6.

- [67] E. Yanmaz, R. Kuschnig, ve C. Bettstetter, “Channel measurements over 802.11a-based UAV-to-ground links,” in *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, **2011**, sf. 1280–1284.
- [68] L. Afonso, N. Souto, P. Sebastiao, M. Ribeiro, T. Tavares, ve R. Marinheiro, “Cellular for the skies: Exploiting mobile network infrastructure for low altitude air-to-ground communications,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, cilt 31, no. 8, sf. 4–11, **2016**.
- [69] X. Cai, A. Gonzalez-Plaza, D. Alonso, L. Zhang, C. B. Rodríguez, A. P. Yuste, ve X. Yin, “Low altitude UAV propagation channel modelling,” in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. IEEE, **2017**, sf. 1443–1447.
- [70] W. Khawaja, I. Guvenc, ve D. Matolak, “UWB channel sounding and modeling for UAV air-to-ground propagation channels,” in *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, **2016**, sf. 1–7.
- [71] E. Teng, J. D. Falcão, ve B. Iannucci, “Holes-in-the-sky: A field study on cellular-connected UAS,” in *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, **2017**, sf. 1165–1174.
- [72] A. Al-Hourani ve K. Gomez, “Modeling Cellular-to-UAV Path-loss for Suburban Environments,” *IEEE Wireless Communications Letters*, cilt 7, no. 1, sf. 82–85, **2017**.
- [73] S. Shimamoto *et al.*, “Channel characterization and performance evaluation of mobile communication employing stratospheric platforms,” *IEICE transactions on communications*, cilt 89, no. 3, sf. 937–944, **2006**.
- [74] D. W. Matolak ve R. Sun, “Air-to-ground channel characterization for unmanned aircraft systems - Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 66, no. 1, sf. 26–44, **2016**.
- [75] R. Sun ve D. W. Matolak, “Air-to-ground channel characterization for unmanned aircraft systems Part II: Hilly and mountainous settings,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 66, no. 3, sf. 1913–1925, **2016**.
- [76] D. W. Matolak ve R. Sun, “Air-to-ground channel characterization for unmanned aircraft systems - Part III: The suburban and near-urban environments,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 66, no. 8, sf. 6607–6618, **2017**.
- [77] E. Yanmaz, R. Kuschnig, ve C. Bettstetter, “Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility,” in *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. IEEE, **2013**, sf. 120–124.
- [78] M. A. Zaman, S. A. Mamun, M. Gaffar, M. M. Alam, ve M. I. Momtaz, “Modeling VHF air-to-ground multipath propagation channel and analyzing channel characteristics and BER performance,” in *2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON)*. IEEE, **2010**, sf. 335–338.

- [79] Q. Feng, J. McGeehan, E. K. Tameh, ve A. R. Nix, "Path loss models for air-to-ground radio channels in urban environments," in *2006 IEEE 63rd vehicular technology conference*, cilt 6. IEEE, **2006**, sf. 2901–2905.
- [80] E. Kalantari, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, ve A. Yongacoglu, "Backhaul-Aware Robust 3D Drone Placement in 5G+ Wireless Networks," in *2017 IEEE international conference on communications workshops (ICC workshops)*. IEEE, **2017**, sf. 109–114.
- [81] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, ve M. Debbah, "Wireless communication using unmanned aerial vehicles (UAVs): Optimal transport theory for hover time optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 16, no. 12, sf. 8052–8066, **2017**.
- [82] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, ve M. Debbah, "Communications and control for wireless drone-based antenna array," *IEEE Transactions on Communications*, cilt 67, no. 1, sf. 820–834, **2019**.
- [83] J. Lyu, Y. Zeng, R. Zhang, ve T. J. Lim, "Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations," *IEEE Communications Letters*, cilt 21, no. 3, sf. 604–607, **2017**.
- [84] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, ve M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient internet of things communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 16, no. 11, sf. 7574–7589, **2017**.
- [85] E. Kalantari, I. Bor-Yaliniz, A. Yongacoglu, ve H. Yanikomeroglu, "User association and bandwidth allocation for terrestrial and aerial base stations with backhaul considerations," in *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on*. IEEE, **2017**, sf. 1–6.
- [86] M. F. Sohail, C. Y. Leow, ve S. Won, "Non-orthogonal multiple access for unmanned aerial vehicle assisted communication," *IEEE Access*, cilt 6, sf. 22 716–22 727, **2018**.
- [87] H. G. Vidales, "Design, construction and test of the propulsion system of a solar UAV," *MSc, Aerospace Engineering, Technical University of Lisbon*, **2013**.
- [88] M. Hepperle, "Electric flight-potential and limitations," *German Aerospace Centre, Institute of Aerodynamics and Flow Technology, Germany*, **2012**.
- [89] C. Beaverstock, R. Ajaj, M. Friswell, R. De Breuker, ve N. Werter, "Optimising mission performance for a morphing MAV," in *Proceedings of the Ankara International Aerospace Conference, Ankara, Turkey*, cilt 1113, **2013**.
- [90] D. Zorbas, T. Razafindralambo, F. Guerriero, *et al.*, "Energy efficient mobile target tracking using flying drones," *Procedia Computer Science*, cilt 19, sf. 80–87, **2013**.
- [91] M. Elloumi, B. Escrig, R. Dhaou, H. Idoudi, ve L. A. Saidane, "Designing an energy efficient UAV tracking algorithm," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017 13th International*. IEEE, **2017**, sf. 127–132.

- [92] C. Di Franco ve G. C. Buttazzo, “Energy-aware coverage path planning of UAVs.” in *ICARSC*, **2015**, sf. 111–117.
- [93] Z. Liu, R. Sengupta, ve A. Kurzhanskiy, “A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems,” in *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2017 International Conference on*. IEEE, **2017**, sf. 310–315.
- [94] M.-h. Hwang, H.-R. Cha, ve S. Jung, “Practical endurance estimation for minimizing energy consumption of multirotor unmanned aerial vehicles,” *Energies*, cilt 11, no. 9, sf. 2221, **2018**.
- [95] K. Dogancay, “UAV path planning for passive emitter localization,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, cilt 48, no. 2, sf. 1150–1166, **2012**.
- [96] E. I. Grøtli ve T. A. Johansen, “Path planning for UAVs under communication constraints using SPLAT! and MILP,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, cilt 65, no. 1-4, sf. 265–282, **2012**.
- [97] H. Sallouha, M. M. Azari, ve S. Pollin, “Energy-constrained UAV trajectory design for ground node localization,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, **2018**, sf. 1–7.
- [98] Y. Zeng, J. Xu, ve R. Zhang, “Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 18, no. 4, sf. 2329–2345, **2019**.
- [99] J. Xu, Y. Zeng, ve R. Zhang, “UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 17, no. 8, sf. 5092–5106, **2018**.
- [100] G. Zhang, Q. Wu, M. Cui, ve R. Zhang, “Securing UAV communications via trajectory optimization,” in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, **2017**, sf. 1–6.
- [101] G. Zhang, Q. Wu, M. Cui, ve R. Zhang, “Securing UAV communications via joint trajectory and power control,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 18, no. 2, sf. 1376–1389, **2019**.
- [102] P. Chandler, S. Rasmussen, ve M. Pachter, “UAV cooperative path planning,” in *AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit*, **2000**, sf. 4370.
- [103] J. Tisdale, Z. Kim, ve J. K. Hedrick, “Autonomous UAV path planning and estimation,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, cilt 16, no. 2, sf. 35–42, **2009**.
- [104] J. How, Y. Kuwata, ve E. King, “Flight demonstrations of cooperative control for UAV teams,” in *AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit*, **2004**, sf. 6490.
- [105] A. Rucco, A. P. Aguiar, ve J. Hauser, “Trajectory optimization for constrained UAVs: A virtual target vehicle approach,” in *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, **2015**, sf. 236–245.

- [106] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. T. Sukhavasi, C. Patel, ve S. Geirhofer, “Network densification: The dominant theme for wireless evolution into 5G,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 52, no. 2, sf. 82–89, **2014**.
- [107] Z. Gao, L. Dai, D. Mi, Z. Wang, M. A. Imran, ve M. Z. Shakir, “MmWave massive-MIMO-based wireless backhaul for the 5G ultra-dense network,” *IEEE wireless communications*, cilt 22, no. 5, sf. 13–21, **2015**.
- [108] M. A. Kishk, A. Bader, ve M.-S. Alouini, “Capacity and Coverage Enhancement using Long-Endurance Tethered Airborne Base Stations,” *arXiv preprint arXiv:1906.11559*, **2019**.
- [109] U. Challita ve W. Saad, “Network formation in the sky: Unmanned aerial vehicles for multi-hop wireless backhauling,” in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, **2017**, sf. 1–6.
- [110] M. Gapeyenko, V. Petrov, D. Moltchanov, S. Andreev, N. Himayat, ve Y. Koucheryavy, “Flexible and reliable UAV-assisted backhaul operation in 5G mmWave cellular networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, cilt 36, no. 11, sf. 2486–2496, **2018**.
- [111] C. T. Cicek, H. Gultekin, B. Tavli, ve H. Yanikomeroglu, “Backhaul-aware optimization of UAV base station location and bandwidth allocation for profit maximization,” *IEEE Access*, cilt 8, sf. 154 573–154 588, **2020**.
- [112] S. Jeong, O. Simeone, ve J. Kang, “Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 67, no. 3, sf. 2049–2063, **2017**.
- [113] C. You ve R. Zhang, “3D trajectory optimization in Rician fading for UAV-enabled data harvesting,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 18, no. 6, sf. 3192–3207, **2019**.
- [114] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, ve G. Y. Li, “Fundamental trade-offs on green wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 49, no. 6, sf. 30–37, **2011**.
- [115] N. H. Motlagh, T. Taleb, ve O. Arouk, “Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives,” *IEEE Internet of Things Journal*, cilt 3, no. 6, sf. 899–922, **2016**.
- [116] J. M. Seddon ve S. Newman, *Basic helicopter aerodynamics*. John Wiley & Sons, **2011**, cilt 40.
- [117] R. A. Minzner, K. Champion, ve H. Pond, “The ARDC model atmosphere, 1959,” Air Force Cambridge Research Labs HANSCOM AFB MA, Teknik Rapor, **1959**.
- [118] G. J. Leishman, *Principles of helicopter aerodynamics with CD extra*. Cambridge university press, **2006**.
- [119] Y. Shimazu, S. Suwa, M. Moteji, ve T. Watanabe, “RRE shared between W-CDMA and LTE systems,” *NTT DOCOMO Technical Journal*, cilt 12, no. 1, sf. 29–33, **2010**.

- [120] “5G Power Whitepaper,” Huawei Technologies, Teknik Rapor, **2019**.
- [121] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, ve M. Debbah, “A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems,” *arXiv preprint arXiv:1803.00680*, **2018**.
- [122] P. Zhan, K. Yu, ve A. L. Swindlehurst, “Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: Performance and optimization,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, cilt 47, no. 3, sf. 2068–2085, **2011**.
- [123] S. Rohde, M. Putzke, ve C. Wietfeld, “Ad hoc self-healing of OFDMA networks using UAV-based relays,” *Ad Hoc Networks*, cilt 11, no. 7, sf. 1893–1906, **2013**.
- [124] Onedio, “Deprem Sonrası Hatları Çöken GSM Şirketleri,” Erişim: **5 Kasım 2020**. <https://tek.link/O6h0>
- [125] D. Zorbas, L. D. P. Pugliese, T. Razafindralambo, ve F. Guerriero, “Optimal Drone Placement and Cost-efficient Target Coverage,” *Journal of Network and Computer Applications*, cilt 75, sf. 16–31, **2016**.
- [126] H. He, S. Zhang, Y. Zeng, ve R. Zhang, “Joint Altitude and Beamwidth Optimization for UAV-enabled Multiuser Communications,” *IEEE Communications Letters*, cilt 22, no. 2, sf. 344–347, **2018**.
- [127] S. Boyd ve L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, **2004**.
- [128] R. L. Graham, B. D. Lubachevsky, K. J. Nurmela, ve P. R. Östergård, “Dense Packings of Congruent Circles in a Circle,” *Discrete Mathematics*, cilt 181, no. 1-3, sf. 139–154, **1998**.
- [129] H. Wang, W. Huang, Q. Zhang, ve D. Xu, “An Improved Algorithm for the Packing of Unequal Circles within a Larger Containing Circle,” *European Journal of Operational Research*, cilt 141, no. 2, sf. 440–453, **2002**.
- [130] “Service requirements for the 5G system, Rel-17,” 3GPP, Teknik Rapor, **2020**.
- [131] M. A. Kishk, A. Bader, ve M.-S. Alouini, “On the 3-D placement of airborne base stations using tethered UAVs,” *arXiv preprint arXiv:1907.04299*, **2019**.
- [132] S. Chandrasekharan, K. Gomez, A. Al-Hourani, S. Kandeepan, T. Rasheed, L. Goratti, L. Reynaud, D. Grace, I. Bucaille, T. Wirth, *et al.*, “Designing and implementing future aerial communication networks,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 54, no. 5, sf. 26–34, **2016**.
- [133] Q. Wu, J. Xu, ve R. Zhang, “Capacity characterization of UAV-enabled two-user broadcast channel,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, cilt 36, no. 9, sf. 1955–1971, **2018**.
- [134] S. Alsamhi, S. K. Gupta, N. Rajput, ve R. Saket, “Network architectures exploiting multiple tethered balloon constellations for coverage extension,” in *6th international conference on advances in engineering sciences and applied mathematics Kuala Lumpur (Malaysia)*, **2016**.

- [135] Y.-S. Niu ve T. P. Dinh, “A DC programming approach for mixed-integer linear programs,” in *International Conference on Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences*. Springer, **2008**, sf. 244–253.
- [136] H. H. Kha, H. D. Tuan, ve H. H. Nguyen, “Fast global optimal power allocation in wireless networks by local DC programming,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 11, no. 2, sf. 510–515, **2011**.
- [137] H. A. Le Thi, T. P. Dinh, *et al.*, “DC programming and DCA for general DC programs,” in *Advanced Computational Methods for Knowledge Engineering*. Springer, **2014**, sf. 15–35.
- [138] T. Wang ve L. Vandendorpe, “Successive convex approximation based methods for dynamic spectrum management,” in *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, **2012**, sf. 4061–4065.
- [139] B. R. Marks ve G. P. Wright, “A general inner approximation algorithm for non-convex mathematical programs,” *Operations research*, cilt 26, no. 4, sf. 681–683, **1978**.
- [140] S. Cullen, “Trees and wind: Wind scales and speeds,” *Journal of Arboriculture*, cilt 28, no. 5, sf. 237–242, **2002**.
- [141] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, “Beaufort rüzgar skalası” Erişim: **2020**, Kasım. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/makale/beaufort.pdf>
- [142] Y. S. Niu, “DC programming and DCA combinatorial optimization and polynomial optimization via SDP techniques,” Doktora Tezi, INSA de Rouen, France, **2010**.
- [143] U. Demir, C. Toker, ve H. Inaltekin, “Optimal power control in two-tier networks with DC programming,” in *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE, **2014**, sf. 999–1002.
- [144] L. Liang, H. Peng, G. Y. Li, ve X. Shen, “Vehicular Communications: A Physical Layer Perspective,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 66, no. 12, sf. 10 647–10 659, **2017**.
- [145] L. Hobert, A. Festag, I. Llatser, L. Altomare, F. Visintainer, ve A. Kovacs, “Enhancements of V2X Communication in Support of Cooperative Autonomous Driving,” *IEEE communications magazine*, cilt 53, no. 12, sf. 64–70, **2015**.
- [146] S. Kumar, S. Suman, ve S. De, “Backhaul and Delay-Aware Placement of UAV-Enabled Base Station,” in *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. IEEE, **2018**, sf. 634–639.
- [147] Y. Jiang, “Network Calculus and Queueing Theory: Two Sides of One Coin,” in *VALUETOOLS*. Citeseer, **2009**, sf. 37.
- [148] “LTE; service requirements for V2X services, Rel-14,” 3GPP, Teknik Rapor, **2017**.
- [149] J. Mei, K. Zheng, L. Zhao, Y. Teng, ve X. Wang, “A Latency and Reliability Guaranteed Resource Allocation Scheme for LTE V2V Communication Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, cilt 17, no. 6, sf. 3850–3860, **2018**.

- [150] Z. Ugray, L. Lasdon, J. Plummer, F. Glover, J. Kelly, ve R. Martí, “Scatter Search and Local NLP Solvers: A Multistart Framework for Global Optimization,” *INFORMS Journal on Computing*, cilt 19, no. 3, sf. 328–340, **2007**.
- [151] M. Agiwal, A. Roy, ve N. Saxena, “Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, cilt 18, no. 3, sf. 1617–1655, **2016**.
- [152] S. Bassoq, H. Farooq, M. A. Imran, ve A. Imran, “Coordinated multi-point clustering schemes: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, cilt 19, no. 2, sf. 743–764, **2017**.
- [153] E. Arribas, V. Mancuso, ve V. Cholvi, “Coverage optimization with a dynamic network of drone relays,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **2019**.
- [154] A. Ahmed, M. Awais, T. Akram, S. Kulac, M. Alhussein, ve K. Aurangzeb, “Joint placement and device association of UAV base stations in IoT networks,” *Sensors*, cilt 19, no. 9, sf. 2157, **2019**.
- [155] S. Enayati, H. Saeedi, H. Pishro-Nik, ve H. Yanikomeroglu, “Optimal altitude selection of aerial base stations to maximize coverage and energy harvesting probabilities: A stochastic geometry analysis,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 69, no. 1, sf. 1096–1100, **2020**.
- [156] J. van de Belt, H. Ahmadi, ve L. E. Doyle, “Defining and surveying wireless link virtualization and wireless network virtualization,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, cilt 19, no. 3, sf. 1603–1627, **2017**.
- [157] S. Vassilaras, L. Gkatzikis, N. Liakopoulos, I. N. Stiakogiannakis, M. Qi, L. Shi, L. Liu, M. Debbah, ve G. S. Paschos, “The algorithmic aspects of network slicing,” *IEEE Communications Magazine*, cilt 55, no. 8, sf. 112–119, **2017**.
- [158] Q. Shi, L. Zhao, Y. Zhang, G. Zheng, F. R. Yu, ve H.-H. Chen, “Energy-efficiency versus delay tradeoff in wireless networks virtualization,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt 67, no. 1, sf. 837–841, **2018**.
- [159] S. Parsaeefard, R. Dawadi, M. Derakhshani, ve T. Le-Ngoc, “Joint user-association and resource-allocation in virtualized wireless networks,” *IEEE Access*, cilt 4, sf. 2738–2750, **2016**.
- [160] M. I. Kamel, L. B. Le, ve A. Girard, “LTE wireless network virtualization: Dynamic slicing via flexible scheduling,” in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th*. IEEE, **2014**, sf. 1–5.
- [161] V. Sciancalepore, F. Cirillo, ve X. Costa-Perez, “Slice as a service (SlaaS) optimal IoT slice resources orchestration,” in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, **2017**, sf. 1–7.
- [162] F. Jiang ve A. L. Swindlehurst, “Optimization of UAV heading for the ground-to-air uplink,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, cilt 30, no. 5, sf. 993–1005, **2012**.

- [163] Y. Zeng, R. Zhang, ve T. J. Lim, “Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems,” *IEEE Transactions on Communications*, cilt 64, no. 12, sf. 4983–4996, **2016**.
- [164] Q. Wu, Y. Zeng, ve R. Zhang, “Joint trajectory and communication design for UAV-enabled multiple access,” in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, **2017**, sf. 1–6.
- [165] Q. Hu, Y. Cai, G. Yu, Z. Qin, M. Zhao, ve G. Y. Li, “Joint offloading and trajectory design for UAV-enabled mobile edge computing systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, cilt 6, no. 2, sf. 1879–1892, **2018**.
- [166] J. Zhang, L. Zhou, Q. Tang, E. C.-H. Ngai, X. Hu, H. Zhao, ve J. Wei, “Stochastic computation offloading and trajectory scheduling for UAV-assisted mobile edge computing,” *IEEE Internet of Things Journal*, cilt 6, no. 2, sf. 3688–3699, **2018**.
- [167] F. Costanzo, P. Di Lorenzo, ve S. Barbarossa, “Dynamic resource optimization and altitude selection in UAV-based multi-access edge computing,” in *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, **2020**, sf. 4985–4989.
- [168] M. J. Neely, “Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems,” *Synthesis Lectures on Communication Networks*, cilt 3, no. 1, sf. 1–211, **2010**.
- [169] K. Kim, Y. Han, ve S.-L. Kim, “Joint subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems,” *IEEE Communications Letters*, cilt 9, no. 6, sf. 526–528, **2005**.
- [170] Y. Zeng, Q. Wu, ve R. Zhang, “Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond,” *Proceedings of the IEEE*, cilt 107, no. 12, sf. 2327–2375, **2019**.
- [171] R. Amer, W. Saad, B. Galkin, ve N. Marchetti, “Performance analysis of mobile cellular-connected drones under practical antenna configurations,” *arXiv preprint arXiv:2002.00294*, **2020**.