

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN MİNİMUM GECİKME KOŞULU
ALTINDA OPTİMUM YOL ATAMA YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Oktay ÖĞÜTCÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ

AĞUSTOS 2022



TEZ BİLDİRİMİ

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

Oktay ÖĞÜTCÜ

İMZA



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN MİNİMUM GECİKME KOŞULU ALTINDA OPTİMUM YOL ATAMA YÖNTEMLERİ

Oktay ÖĞÜTCÜ

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

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ

Tarih: AĞUSTOS 2022

Günümüzde bilgiye erişim oldukça önemli bir ihtiyaçtır. Kablosuz haberleşme sistemlerinin çeşitli uygulamaları bu ihtiyacı karşılayabilmektedir. Son zamanlarda akademideki ve sanayideki çalışmalarda önemli yeri olan İnsansız Hava Araçları (İHA), insanların hayatlarını birçok alanda kolaylaştırdığı gibi kablosuz haberleşme alanında da çeşitli uygulamalar ile bilgiye erişimi kolaylaştırmaktadır. Bu tez kapsamında, bilgiye erişimin zaman açısından kritik uygulamalar için sensör ağlarında İHA destekli bir sistem ile yapılması incelenmiştir. İHA ile veri toplama, birçok pratik uygulamaya sahip yeni bir teknolojidir. İHA'nın topladığı verinin olabildiğince hızlı bir şekilde kullanılacağı veri merkezine getirilmesi gerekmektedir. Yapılan akademik çalışmalarda İHA'nın topladığı veriyi veri merkezine getirmesindeki gecikme, problemlere bilgi yaşı (Age of Information, AoI) parametresi ile amaç veya kısıt olarak girmektedir. Bu çalışmada bilgi yaşı, hem haberleşme süresinin hem de uçuş süresinin etki ettiği bir performans metriği olarak kullanılmaktadır. Literatürde çok fazla bulunan İHA'nın sensörleri teker teker gezip veri toplama işlemini gerçekleştirmesi fikri yerine, bu çalışmada sensörler gruplar halinde ele alınmıştır. Gruplandırma fikrinin performans etkisini görmek için bu çalışmada ikili sensör grupları üzerinde çalışılmıştır. Veri merkezinden yola çıkan İHA, gruplardaki

sensörler arasında oluşan doğru parçaları üzerinde bir noktada havada durarak çoklu erişim kanalı ile veri toplayıp ardından veri merkezine geri dönmeyi amaçlamaktadır. İkili sensör gruplarının oluşması ile İHA, her sensörü ayrı ayrı ziyaret etmeyeceğinden gideceği yörüngede daha kısa yol izleyebilecek ve çoklu erişim kanalı haberleşmesiyle daha kısa haberleşme sürelerine ulaşabilecektir. Sensörlerde biriken en yüksek bilgi yaşı parametresini en aza indirmek için iki yörünge tasarım algoritması önerilmiştir. Her iki algoritmada da İHA, çoklu erişim kanalı aracılığıyla her gruptaki sensörlerle iletişim kurar. İlk algoritmada İHA, doğru parçası üzerinde haberleşme süresi optimal noktada havada durur ve veri toplama işlemini gerçekleştirir. İkinci algoritmada, yol uzunluğu optimal noktalarda havada durarak veri toplamaktadır. Algoritmalar, zaman paylaşımli haberleşme senaryolarıyla ve tüm sensörlerin ayrı ayrı ziyaret edildiği durumla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sensörler birbirinden çok uzak olmadığında ve paket uzunlukları uzun olduğunda çoklu erişim haberleşmesine göre yörünge tasarımının optimal olduğunu, paket uzunlukları kısa olduğunda yol uzunluğu optimal yörüngesinin daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilgi yaşı, çoklu erişim kanalı, sensör ağı, insansız hava aracı

ABSTRACT

Master of Science

PATH OPTIMIZATION UNDER MINIMUM DELAY CONSTARINT FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Okday ÖĞÜTCÜ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ

Date: AUGUST 2022

Nowadays, access to information is a very important need. This need can also be met by the applications of wireless communication systems in various fields. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), which has an significant place in studies in academia and industry, not only makes people's lives easier in many areas, but also have various applications in the field of wireless communication. Within the scope of this thesis, accessing information with a UAV-assisted system in sensor networks for time-critical applications has been examined. Data collection with UAV is a new technology with many practical applications. The data collected by the UAV should be brought to the data center where it will be used as quickly as possible. In academic studies, the delay in bringing the data collected by the UAV to the data center is entered into problems with the Age of Information (AoI) parameter as a objective or constraint. In this study, AoI is used as a performance metric that affects both communication time and flight time. Instead of the idea that the UAV, which is very common in the literature, travels the sensors one by one and performs the data collection process, the sensors are discussed in groups in this study. In this study, dual sensor groups were studied to see the effect of grouping idea on performance. Starting from the data center, the UAV aims to hover at one point on the line segments formed between the sensors in

the groups, collect data via multiple access channels and then return to the data center. With the formation of dual sensor groups, the UAV will not be able to visit each sensor separately, so it will be able to follow a shorter path in its trajectory and reach shorter communication times with multiple access channel communication. Two trajectory design algorithms are proposed to minimize the maximum AoI in the sensors. In both algorithms, the UAV communicates with the sensors via multiple access channel. In the first algorithm, the UAV hovers on the line segment at the optimal point of communication time and performs data collection. In the second algorithm, the UAV hovers on the path length optimal locations and collects data by hovering. Algorithms are compared with time-sharing communication and single user scenarios. The results reveal that the trajectory design with multiple access communication optimal locations is better when the sensors are not too far apart and the packet lengths are long. On the other hand, path length optimal trajectory is better when the packet lengths are short.

Keywords: Age of information, multiple access channel, sensor network, unmanned aerial vehicle.

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sırasında, bütün çalışmalarımın yardım ve katkılarını eksik etmeyen ve beni her konuda doğruyu bulmaya yönlendiren kıymetli hocam Doç. Dr. Ayşe Melda Yüksel Turgut başta olmak üzere, kıymetli hocam Prof. Dr. Tolga Girici'ye ve TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm öğretim üyelerine çok teşekkür ederim. Hayatımın her noktasında yanımda olan, yaptığım bütün işlerde en büyük katkıya sahip olduğunu düşündüğüm, bugünlere gelmemi sağlayan ve beni her zaman maddi manevi destekleyen canım annem Saynur Öğütücü'ye ve canım babam Dilaver Öğütücü'ye, çocukluğumdan bu yana hep arkamda olduklarını hissettiğim ve her zaman beni destekleyen canım abilerim Burak Öğütücü ve Burkay Öğütücü'ye teşekkürü borç bilirim. Lisans hayatımın bana getirdiği her şeyin yanında en büyük yere sahip olan ve hayatımın devamında da yanımda olacağına inandığım hayat arkadaşım Beyza Zeynep Üçpınar'a ayrıca teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	x
İÇİNDEKİLER	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
KISALTMALAR	xviii
SEMBOL LİSTESİ	xx
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. TEORİ	13
3.1 Tek Kullanıcılı Haberleşme Kanalı	15
3.2 Çoklu Erişim Kanalı	15
4. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE VERİ TOPLAMA PROBLEMİ	19
4.1 Haberleşme Modeli	19
4.2 Bilgi Yaşı Parametresi	22
4.3 Eniyileme Problemi	26
5. YÖRÜNGE PLANLAMA ALGORİTMALARI	31
5.1 Çoklu Erişim Kanalına Göre Eniyi Yörünge Ataması	31
5.2 Yol Uzunluğuna Göre Eniyi Yörünge Ataması	35
5.3 Zaman Paylaşma İle Veri Toplama	36
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	39
6.1 Test Düzenegi	39
6.2 Sayısal Sonuçlar	40
6.2.1 Haberleşme süresi baskın senaryo	41
6.2.2 Yol kaybı baskın senaryo	42
6.2.3 Yol uzunluğu baskın senaryo	43
6.3 Çıkarımlar	44
6.4 Gelecek Çalışmalar	45
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	54



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: İHA destekli veri toplama sistemi ve sensör ağı gösterimi	3
Şekil 3.1: Yol Kaybı ve Gölgeleme etkisi gösterimi	13
Şekil 3.2: Tek kullanıcı kanalı modeli	15
Şekil 3.3: Çoklu erişim kanalı modeli	16
Şekil 3.4: Çoklu erişim kanalı kapasite bölgesi	17
Şekil 4.1: İkili kullanıcı haberleşme senaryosu için İHA yörüngesi gösterimi. İHA veri merkezinden yola çıkıyor ve veri merkezine dönüyor.	19
Şekil 4.2: İki kullanıcı çoklu erişim kanalı, kanal kapasite bölgesi	22
Şekil 4.3: AoI zaman çizelgesi.	25
Şekil 4.4: Tek bir İHA konumu $\mathbf{p}_{i,u}$ için haberleşme tamamlama süresi bölgeleri.	26
Şekil 4.5: İki kullanıcı çoklu erişim kanalı kanal kapasite bölgesi ve paket boy oranlarına göre gerçekleştirilecek durumların gösterimi.	27
Şekil 4.6: Bir sensör grubundaki, sensörler arasındaki doğru parçası gösterimi. .	28
Şekil 5.1: Haberleşme süresi fonksiyonu olan $t_i^{com}(\mathbf{p}_{i,u})$ (5.3) grafiği.	33
Şekil 5.2: Bir sensör grubundaki, sensörler arasındaki doğru parçası ve İHA gösterimi.	34
Şekil 5.3: Zaman paylaşımı haberleşmesinde, haberleşme sıralamaları.	37
Şekil 6.1: Simülasyonlar için üretilen test düzeneği gösterimi.	40
Şekil 6.2: Sensörlerdeki AoI değerleri ($R_2 = 50$ m, and $\tau = 750$) Kbits.	42
Şekil 6.3: Sensörlerdeki AoI değerleri ($R_2 = 300$ m, and $\tau = 750$ Kbits).	43
Şekil 6.4: Sensörlerdeki AoI değerleri ($R_2 = 300$ m, and $\tau = 2.5$ Kbits).	44



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 6.1: Test Düzenegi Sayısal Değerleri	40





KISALTMALAR

AWGN	: Additive White Gaussian Noise (Eklenebilir Beyaz Gaus Gürültüsü)
AoI	: Age of Information (Bilgi Yaşı)
IoT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LoS	: Line of Sight (Görüş Hattı)
MAC	: Multiple Access Channel (Çoklu Erişim Kanalı)
NOMA	: Non-Orthogonal Multiple Access (Ortogonal Olmayan Çoklu Erişim)
OMA	: Orthogonal Multiple Access (Ortogonal Çoklu Erişim)
RL	: Reinforcement Learning (Pekiştirmeli Öğrenme)
SNR	: Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
TSP	: Travelling Salesman Problem
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle (İnsansız Hava Aracı)



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
dB	Desibel
dBm	Miliwatt'a göreceli desibel
KHz	Kilohertz
m	Metre
sn	Saniye
W,watt	Gücün Birimi
τ	Paket Boyu
M	Sensör Sayısı
N	Sensör Grup Sayısı



1. GİRİŞ

Günümüzde, kablosuz haberleşme teknolojilerinin önemi gittikçe artan bir grafik çizmektedir. Hem endüstride hem de akademik alanda, yeni uygulamalar ile birçok çalışma bu alandaki teknolojinin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmalar ile akıllı şehirler gibi birçok farklı haberleşme sistemini içinde barındıran ekosistemlerdeki uygulamalar gerçeğe dönmektedir. Kablosuz haberleşme sistemleri sivil/askeri havacılıkta, tarımda, gözetleme sistemlerinde ve bunlar gibi çok sayıda uygulamaya öncülük etmektedir. Yürütülen akademik çalışmalar, bu sistemlerin gerçekleştirilmesiyle günümüze ışık tutmayı amaçlamaktadır. Kablosuz haberleşmenin doğasında bulunan bu yol kaybı ve gölgeleme gibi engellerin aşılmasında, konumlandırmalarındaki esneklik açısından İHA kullanılması işleri kolaylaştırmaktadır. Çağımızdaki en büyük araştırma konularından biri olan İHA destekli kablosuz haberleşme ile veri toplama bu tezde konu alınmıştır.

Hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı İHA'lar, çok fazla kullanım alanına sahiptirler. Askeri alanda cepheler arası haberleşme, insansız savaş uçakları, keşif ve gözlem gibi alanlarda kullanılırken, sivil alanda ise kargo taşıma, görüntülemeli sistemler, doğal afet durumları ve akıllı şehirler gibi alanlarda kullanıma sahiptirler. Bunların yanında tarım uygulamalarında, veri toplama ve sulama gibi işlerde de kullanılmaktadırlar.

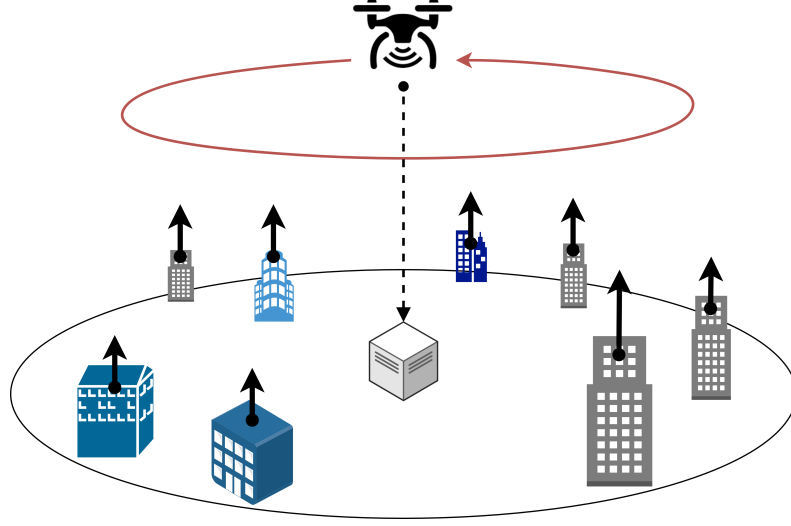
Bu çok geniş kullanım alanına sahip olan İHA'lar için haberleşme alanındaki uygulama senaryolarına örnek verilmesi gerekirse, bu bir doğal afet durumu olabilir. Doğal afet durumunda çöken bir baz istasyonu yerine olay yerine gönderilen ve hareketli bir baz istasyonu görevi üstlenen bir İHA çok sayıda insanın hayatının kurtarılmasına katkı sağlayabilir. Buna ek olarak bir şehir üzerinde trafik bilgisini toplayan hareketli bir İHA bu senaryolara örnek verilebilir. Diğer yandan ise askeri uygulamalarda cepheler arasındaki istihbarat haberleşmesi için bir İHA kullanımı söz konusu olabilir.

İHA'ların kısıtlı güç kaynakları vardır. Bu güç kaynaklarının miktarı uçuş süresi ile doğru orantılıdır, yani bu da görev yapabilme süresini etkiler. İHA'nın havada görev gerçekleştirilebilme süresinin iyileştirilmesi için güç tüketiminin göz önünde bulundurulması gerekir. Çok yol gitmesi veya çok hızlı hareketler yapması çok güç tüketimine sebep olmaktadır. Akademide ise İHA'lar için çok sayıda yörünge planlama çalışması söz konusudur.

İHA destekli iletişim, gelişmekte olan bir alandır ve hem endüstrinin hem de akademinin dikkatini çekmiştir. İHA'lar çeviklik, hızlı sevk edilme ve yer sensörleri ile görüş hattı bağlantısı (Line-of-Sight Link) kurma gibi yetenekleri bakımından benzersizdir. Haberleşme teknolojisi bakımında uygulamaları gelecekteki hücresel iletişim sistemlerinin bir parçası olma potansiyeline sahiptir, daha yüksek verim, gelişmiş güvenilirlik ve mevcut ağlar üzerinde daha geniş kapsama alanı sağlamanın yanı sıra önbelleğe alma ve bilgi işlem yetenekleri sağlar.

İHA'ların temel uygulamalarından biri İHA destekli veri toplama bu tezde konu alınmıştır. Veri toplama sistemlerinde toplanan verinin, veri merkezine gelmesi, işlenmesi ve başka bir sisteme girdi olarak verilmesinde zaman çok önemli olabilmektedir. Bu bağlamda akademik çalışmalarda, İHA'nın veri toplayacağı sensör ağında en iyi yolda gitmesi ve en iyi haberleşme metodolojilerini kullanması ile bu gecikme sürelerinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu gecikme sürelerinin azaltılması için ise birçok akademik çalışmada uçuş süresi, veri hızı ve yol eniyileştirmeleri gibi farklı problemler incelenmiştir. Bunların yanında ise yine birçok akademik çalışmaya konu olan bilgi yaşı (Age of Information, AoI) metriği İHA'nın toplayacağı verinin tazeliğinin güncel kalması için oldukça önemli bir metriktir. Bilgi yaşı, temel olarak veri üretimi ile amaçlanan varış noktasına ulaştığı zaman arasındaki zaman gecikmesidir.

Bu tezde yer sensörlerinden veri toplayan bir İHA için yeni bir yörünge tasarımı ve bir iletişim şeması önerilmesi amaçlanmaktadır. Tez kapsamında Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, bir İHA veri merkezinden yola çıkmakta ve yoldaki tüm sensörlerin verisini toplamaktadır. Bu veri toplama işlemi bittikten sonra doğruca veri merkezinde



Şekil 1.1: İHA destekli veri toplama sistemi ve sensör ağı gösterimi

dönen İHA topladığı verinin aktarımını sağlamaktadır. Yörünge en iyi şekilde bulunabilmesi için İHA'nın topladığı her bir sensör verisi için bilgi yaşı parametresi kullanılmıştır. Her bir sensörden toplanan veri için bilgi yaşı parametresi, veri toplama işlemi yapılırken birikmeye başlamaktadır.

Bu tezde, iletişim süresini azaltmak için bu tamamlanma süresi bölgesini İHA yörünge tasarım problemine dahil ediyoruz. İlk olarak, sensörlerin ikili gruplar halinde bulunduğu varsayılmıştır. İkinci olarak, İHA'nın her gruptaki iki sensörü birleştiren doğru parçasının üzerinde bir noktada havada durduğu ve çoklu erişim kanalı aracılığıyla veriyi aldığı varsayılmıştır. Bu sayede hem uçuş süresi hem de iletişim süresi kazanmanın mümkün olduğunu göstermiş oluyoruz. Oluşturulan problemin çözümü için iki algoritma önerilmiştir. Bunlardan ilki İHA'nın yer sensörleri ile olan haberleşmesini çoklu erişim kanalına göre eniyileştiren havada durma noktalarını bulup ardından yörünge planlaması yaparken, ikincisi ise İHA'nın sensörler arasındaki doğru parçalarını keserek gideceği yolun eniyilemesini, yolda geçen uçuş sürelerini hesaba katarak yapar ve ardından çoklu erişim kanalı haberleşmesini uygulayarak bilgi yaşlarını hesaplamaktadır. Bölüm 6'daki sayısal sonuçlar, paket uzunluklarına ve sensörler arasındaki mesafeye bağlı olarak, bu algoritmalar ile kazanımların önemli olabileceğini göstermektedir.

Bu tez toplamda altı bölümden oluşmaktadır. İkinci kısımda İHA'lar, İHA destekli veri

toplama ve bilgi yaşı kullanımı ile ilgili bir literatür taraması yapılmaktadır. Bu literatür taramasında başta, İHA kullanımı ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. Ardından İHA'nın kullanıldığı İHA baz istasyonları gibi bazı haberleşme uygulamalarından bahsedilmiştir. Son olarak İHA destekli veri toplama ile ilgili çalışmalar, bilgi yaşını dikkate alan çalışmalar, çok sayıda İHA kullanımı ile veri toplama yapan çalışmalar, çoklu erişim kanalı kullanan İHA çalışmaları ve öğrenme tabanlı İHA destekli veri toplama çalışmalarından bahsedilmiştir. Tezin Üçüncü kısmında tez kapsamında olan haberleşme kanalları için teori anlatımı mevcuttur. Dördüncü kısımda ise problemin tanımı yapılırken beşinci kısım ise bu probleme karşın üretilen algoritmaları anlatmaktadır. Altıncı ve son kısım ise performans karşılaştırmalarını ve sonuçları içermektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Son zamanlarda, haberleşme alanında İHA kullanımı hem akademinin hem de endüstrinin ilgisini oldukça çekmektedir. Bunun sonucu olarak İHA ile ilgili çok sayıda akademik çalışmalar ve endüstriyel ürünler ortaya çıkmıştır. İHA'ların bu kadar dikkat çekmesi, kullanılması ve çok sayıda çalışma yapılmasının ardında haberleşme teknolojisinde karşımıza çıkan engelleri aşmaya yardımcı olması vardır. Bu tezde bir sensör ağında bulunan sensörlerden veri toplamak görevi ile veri merkezinden yola çıkan ve tüm sensörleri gezip veri toplama işlemini gerçekleştirdikten sonra veri merkezine geri dönen bir İHA'nın gideceği yolun ve haberleşme stratejisinin belirlenmesi çalışılmıştır. Bu bölümde ise tez konusu kapsamındaki literatür taraması çalışması anlatılmaktadır. [1] çalışmasında İHA gibi uçan platformların kullanımının hızla büyümekte olduğu bahsedilmektedir. Özellikle kablosuz sistemlerdeki uygulamalarda, hareketlilik, esneklik ve uyarlanabilir irtifa gibi nitelikleriyle İHA'ların önemli potansiyel gösterdiği anlatılmıştır. Çalışmada kablosuz haberleşme sistemlerinde İHA kullanımının kazançları ve uygulamaları ile ilgili geniş bir araştırma sunulmuştur.

İHA'lar birçok alanda kullanıldığı gibi haberleşme alanında da oldukça çeşitli alt alanlarda kullanıma sahiptirler. Günlük hayatta insanlarla iletişim kurmak ve interneti kullanmak için sıklıkla telefonlarımızı kullanıyoruz. Telefonlar ise bir baz istasyonu ile bağlantıda olup bize ulaşacak verileri kablosuz haberleşme yöntemi ile almaktadır. Bazı doğaüstü durumlarda, toplu etkinliklerde veya baz istasyonu çekim alanının dışında kalan bölgelerde, özetle baz istasyonunun yetersiz olduğu durumlarda İHA'lar bu görevi üstlenmek için kullanılabilir [2-7].

İHA'ların kullanılmasındaki en önemli sebeplerden birisi oldukça hızlı bir şekilde tekrardan konumlandırılabilmesidir.

Bu noktada ise kablosuz haberleşme görevlerinde İHA'ları kullanılırken tek bir konumda durması ve görev yapması yerine bir yörünge takip ederek veya tekrardan farklı bir noktaya konumlandırılarak görev yapabileceği uygulamalar da gündeme gelmiştir. Örneğin [8] çalışmasında, çok sayıda İHA'nın yerdeki kullanıcılar tarafından gönderilen veri isteklerini cevaplamak için konumlandırılması ve bu aşağı yönlü haberleşmenin en iyi şekilde yapılması üzerine bir eniyileme çalışması yapılmıştır. Çalışmada İHA konum planlaması, hüzmleme, kullanıcı kabul kararları ve İHA'lardaki limitli saklama alanlarındaki içeriklerin dağıtılması birlikte düşünülerek bir eniyileme problemi oluşturulmuştur. Bu eniyileme problemi karışık tamsayılı konveks olmayan bir problem olduğu için ve polinom zamanda optimal çözüme ulaşip ulaşmayacağı bilinmediğinden dolayı, bir çözüm sistemi oluşturulmuş ve döngüsel bir algoritma ile çözüme yaklaşmıştır. Diğer yandan [9] ile yazarlar uydu haberleşmesi yapan bir İHA'nın, kullanıcılara olan hizmetinin eniyilenmesi çalışmışlardır. Eniyileme probleminde, İHA'nın hizmet verdiği kullanıcılardan en düşük veri iletimi yapılan kullanıcının aldığı veri miktarının artırılması hedeflemiştir. Bunu, önbellek yerleşimi, İHA'nın kaynak kullanımı ve yörüngeyi, önbellek kapasitesi ve uçuş süresi kısıtları altında iyileştirerek yapmayı hedeflemiştir. Problemin direkt çözümü çok zor olduğu için, alt problemlere ayrılarak çözülmüştür.

Nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) uygulamalarında, sensör ağlarında birbirine kablosuz bağlantı ile bağlı bir yapı mevcuttur. Bu alandaki geleneksel uygulamalarda toplanacak veri, baz istasyonuna sensörden sensöre veri aktarımı yapılarak getirilmektedir. [10] çalışmasında ise bu problem İHA destekli veri toplama yöntemi ile ele alınmıştır. Çalışmada, zaman ve hareket kısıtları ile İHA'nın gideceği yolun kısaltılması hedeflenmiştir. Tasarlanan algorithmada İHA'nın gideceği yol, gezen satış elemanı problemindeki (Traveling Salesman Problem, TSP) gidilecek yolun eğrisel bir dönüşümüyle bulunmuştur. Kablosuz haberleşmenin gelişmesi ve akıllı sensörlerin gelişmesi ile akıllı şehirler için verimli uygulamalar yapılmaya başlanmıştır. [11] çalışması ile düşük güç tüketimine sahip IoT cihazlarında toplanması ve çok az gecikmeye sahip olması istenilen verinin İHA kullanımı ile toplanması hedeflenmiştir. Bu çalışma ile İHA'nın hizmet edip veri toplayacağı IoT cihaz sayısının

artırılması, İHA yörüngesi ve kaynak kullanımını eniyilemesi yapılarak bulunmuştur. Yüksek karmaşıklığa sahip olan eniyileme probleminin çözümünün zor olması yazarları, problemi eniyiye yakın alt problemlere bölüp çözmeye götürmüştür. [12] ile ortaya konan çalışmada ise kablosuz haberleşme özelliği olan sensörlerden veri toplama işleminde verinin işlenip, karar verme mekanizmalarının çalıştırılabilmesinde verimli bir sonuç alınması için uygun bir mekanizma önerilmiştir. Bu mekanizma için çalışmada, İHA yörüngesinin önemi ve farklı hareket patikaları hesaba katılarak incelenmiştir. Yüksek derecede hareketliliğe sahip olan İHA'lar kablosuz haberleşme alanında, özellikle veri toplama görevinde çok sayıda çalışmaya konu olmaktadır ve [13] çalışmasında yazarlar, İHA ile çok sayıda sensörden veri toplama işlemini üç boyutlu bir yörünge üzerinde çalışmışlar. Bu çalışmada amaç en küçük ortalama veri toplama hızının en yüksek olmasıdır. İHA ve sensörler arasındaki haberleşmenin, literatürde bulunan basitleştirilmiş görüş hattı (LoS) ile olan çalışmalara karşın açığa bağımlı Rician sönümlenmesi ile olmasını hesaba katılmıştır. Rician faktörleri ise İHA ve sensörleri arasındaki yükseliş açıları ile belirlenmiştir. [14] çalışmasında ise [13] çalışmasında olduğu gibi İHA için üç boyutlu rota planlaması yapan iki farklı algoritma önerilmiştir. Bu algoritmalar veri toplama işlemini gerçekleştiren İHA'nın gideceği yolun eniyilemesini yapmaktadır. [15] çalışması kablosuz sensör ağında İHA destekli veri toplama için, İHA'nın kapsama alanından yararlanan bir yapı önermiştir. Paket kayıplarını önlemek için İHA'nın kapsama alanında sensörler gruplara bölünmüş ve farklı iletim öncelikleri oluşturulmuştur. [16] ve [17] çalışmalarında aynı konu üzerinde enerji tüketimine odaklanılmıştır. [17] çalışmasında hem İHA için hem de yer sensörleri için enerji tüketiminin azaltılması hedef olarak belirlenmiştir. Bu hedefi gerçekleştirmek için, İHA sensörlere yaklaşık sabit bir uzaklıktan veriyi toplarken, kendi hareketlerinin de İHA enerjisine olan etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Yörünge olarak da düz ve dairesel olmak üzere iki yöntem gözetilmiştir. [16] sensörlerin uyanma sürelerini ve İHA yörüngesini hesaba katan güvenilir ve verimli enerji tüketimine sahip veri toplama sistemi için bir eniyileme problemi tanımlamıştır. Optimale yakın algoritma tasarımları ile bu problem çözülmüştür. [18] çalışmasında, İHA ile haberleşen öbekbaşlarının aralarında bir adalet strateji hesaba katılmıştır. İHA destekli veri toplamada enerji verimliliğini

artırmayı amaçlayan bir problem önerilmiştir. Sensör düğümleri üzerinde gezinmek iletişim süresini azaltırken, eşzamanlı uçuş ve iletişim toplam uçuş süresini azaltır. [19] çalışmasında yazarlar, düz bir yörünge üzerinde uçarken veri toplayan bir UAV için uçuş süresi azaltılmasını inceliyorlar. Bu yörünge, üst üste gelmeyen parçalara bölünmüştür. Yörüngedeki bu parçalar İHA'nın sensörlerdeki veriyi uçmaya devam edeceği bölgeleri ifade etmektedir. Çalışmada, bu parçaların konumları, İHA'nın hızı ve sensörlerin güç harcama stratejileri sırasıyla eniyelenmiştir. [20] çalışması, [19] çalışmasını iki boyutlu yörüngelere genelleştirir.

İHA destekli veri toplama işleminde toplanan verinin işleneceği, anlamlanacağı yere gelmesinde geçen süre oldukça önemlidir. Bazı çalışmalarda uçuş süresi veya veri iletim hızı gibi parametreler göz önünde bulundurularak eniyileme problemleri çalışılırken diğer çalışmalarda ise bilgi yaşı parametresi göz önünde bulundurulmuştur. Bilgi yaşı parametresi bilgi güncellemelerinin tazeliğini ölçmektedir. Literatürde bilgi yaşı, temel olarak verinin iletimi ve kaynaktan üretimi arasında geçen süre olarak tanımlanmaktadır. [21] çalışmasında bilgi yaşı, verinin üretiminden başlayarak sunucu tarafından işlenmesi ve hedefine iletilmesine kadar geçen sürede doğrusal olarak zamanla arttığı belirtilmiştir. [22] çalışması ise bilgi yaşını araçsal ağlarda tek kullanıcı bağlantıları ile incelemiştir. Bilgi yaşını, verideki kuyruğa alma işlemlerinde yapılacak güncellemeler ile azaltılabileceğini göstermişlerdir. [23] çalışmasında, yalnızca tamamlama süresi azaltmak veya yapılan işin zamana oranı gibi performans parametreleri değil, iletilen verinin tazeliğini (bilgi yaşı) de önceliklendirilmiştir. [24] ile yazarlar, rastgele durum güncellemeleri yapılan bir bulut ağında bilgi yaşı parametresini incelemişler. [25] çalışması, çok sınıflı kuyruklama sistemlerinde en yüksek bilgi yaşının azaltılması için bir problem ortaya koymuştur. Bilgi yaşı, kuyruklama gecikmesini ve paket üretimleri arasında geçen süreyi hesaba katarak yapılmıştır. [26] kaynak düğümdeki ortalama iletim sayısı üzerindeki bir kısıtlama altında hedefteki ortalama bilgi yaşını en aza indirmek için hataya açık bir iletişim kanalı üzerinden durum güncellemelerinin iletiminin programlanması incelenmiştir. [27] ile ortaya konan çalışmada, gerçek zamanlı bulut uygulamalarında hesaplama ve örgünlendirme aşamalarında planlama stratejileri önerilmiştir. Bilgi yaşı ve

tamamlama süresi karakterize edilmiştir. [28] çalışması, sensör gibi bir kaynaktan gelen durum güncellemelerinin tazeliğini görüntüleme noktasına iletimi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Göndericideki zamana göre değişen enerjinin paket iletim hızını limitediği bir durum altında bilgi yaşını dikkate alınmıştır. [29] çalışması, zaman açısından hassas olan verinin iletimi planlaması çok kullanıcı bir sistemde çalışılmıştır. Çalışmada ortalama bilgi yaşının azaltılması hedeflenmiş ve öğrenme tabanlı bir yaklaşım yürütülmüştür. Bilgi yaşı azaltılması için İHA yörünge tasarımına ilişkin ilk çalışma, bir İHA'nın yerdeki her bir sensör düğümünden veri topladıktan sonra bir veri merkezine başladığı ve geri döndüğü [30] içerisinde anlatılmıştır. Çalışmada, İHA'nın, iletişim tamamlanana kadar her bir sensör düğümünün üzerinde durduğu varsayılmaktadır. En yüksek bilgi yaşının veya ortalama bilgi yaşını en aza indiren yörünge, dinamik programlama yoluyla belirlenmektedir. Sonuçlarda ise ortalama ve en yüksek bilgi yaşı parametrelerini en aza indiren iki farklı yöntem ile performans karşılaştırmaları yapılmaktadır. [31] ise aynı fikirde bir çalışma yürütmüş fakat İHA'nın veri toplama işlemini sensörler üzerinde tek tek gezmek yerine sensörler için ortak veri toplama noktası belirler. Bu ortak veri toplama noktalarında sensörler sırayla üzerindeki veriyi İHA'ya aktarmaktadır.

[20] ve [19] ile aynı fikirden yararlanan fakat performans metriği olarak bilgi yaşı parametresini kullanan [32], İHA'nın uçuş, havada asılı kalma ve hibrit olmak üzere üç farklı modda veri toplamasına izin verir ve bu şekilde [30] ve [19] çalışmalarındaki görev tamamlama süresi azaltılması problemlerini genelleştirir.

[33] çalışmasında İHA, ortalama bilgi yaşı parametresinin en aza indirileceği yolu takip ederken kendi enerjisini de göz önünde bulundurmaktadır. Veri toplama işlemi sürerken, bataryasını şarj etmek için baz istasyonuna döner ve o noktada kalan kullanıcıları da göz önünde bulundurarak tamamen şarj olup olmamasına da karar vermektedir. Öte yandan, [34], sensör düğümlerinin doğrudan İHA'dan enerji topladığını ve enerji toplama ve veri toplama zaman aralıklarıyla birlikte İHA yörüngesini optimize ettiğini varsayar.

[35] çalışması, çok sayıda sensör için yörünge tasarımı araştırılmaktadır. Her bir

sensörü tek tek ziyaret etmek mümkün olmadığı için önerilen çözümde sensörler kümeler halinde gruplandırılmış ve İHA öbekbaşlarından veri toplamıştır. Yukarıdaki tüm makalelerden farklı olarak, [36] ve [37], birden fazla İHA için yörüngeleri dikkate alır.

İHA yörüngesine ek olarak, iletişim şeması, İHA destekli veri toplamada bilgi yaşı veya gecikme sürelerini belirleyen başka bir faktördür. Yukarıdaki tüm makalelerde, sensörden İHA'ya iletişim noktadan noktadır. [38] çalışması, düz bir yörünge izleyen bir UAV için yukarı bağlantı veri toplamaya dik olmayan çoklu erişim (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) içerir. [39] çalışmasında, haberleşmenin kullanıcı ve İHA arasındaki tekil kullanıcı haberleşmesi yerine çoklu erişim kanalının kullanılarak yapılmasını ve bu noktada dik çoklu erişim (Orthogonal Multiple Access, OMA) ve dik olmayan çoklu erişim kanallarını önermiştir. Çalışmadaki amaç, sensörler ve İHA arasındaki en küçük ortalama veri hızının en yükseğe çıkarılmasını sağlayan yörünge bulunmasıdır. [40] çalışması da benzer problemi ele alırken enerji kısıtlamaları üzerine odaklanmıştır. [38] çalışmasında ortak kod çözme bir seçenek değildir ve en zayıf kanal kazancına sahip kullanıcıdan başlayarak ardışık iptalli kod çözme yapılır. Ancak, ortak kod çözme ve/veya kod çözme sırası eniyilemesi mümkünse, çoklu erişim kanalı [41] için optimum tamamlanma süresi bölgesine yol açan iletişim daha kısa sürebilir.

Bilgi yaşı, tamamlama süresi, uçuş süresi ve veri hızı gibi parametreleri temel alan farklı farklı eniyileme yöntemlerini kullanan bu çalışmalara karşın literatürde öğrenme tabanlı yöntemler ile bu probleme yaklaşımda bulunan çalışmalar da mevcuttur. [42] ile yapılan çalışmada, konuşlandırılmalarındaki esneklik ile İHA'ların kablosuz sensör ağlarındaki veri toplama işlemi için gelecekte büyük rol alacağından bahsedilmiştir. Zaman ve enerji gibi kısıtlar altında İHA için yörünge planlamasını bilgi yaşı parametresinin ağırlıklı toplamı gözeterek yapmışlardır. Bu yörünge planlaması için üretilen problemin çözüm uzayının çok geniş olması sebebiyle, Derin Pekiştirmeli Öğrenme (Deep Reinforcement Learning, RL) algoritması önererek en iyi yörüngeyi bulmayı amaçlamışlardır. Sonuçlar kısmında bu algoritmanın bilgi yaşındaki ağırlıklı toplam üzerinde iyileştirmeler yaptığını göstermişlerdir. [43] çalışması ise yine benzer

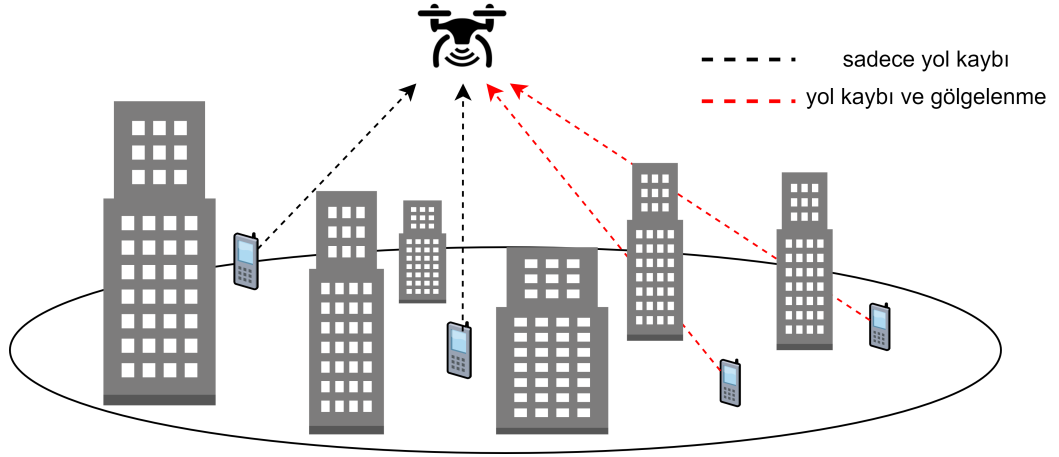
şekilde bilgi yaşının ağırlıklı toplamı için RL algoritması önererek bir yörünge planlaması yapmıştır. Yine öğrenme tabanlı yaklaşım yapan bir diğer çalışma olan [44] çalışmasında, yazarlar yörünge planlaması için eniyileme problemini enerji verimliliği ve bilgi yaşı üstüne kurmuşlardır. Yapılan çalışmalarda, çok fazla parametrenin problem uzayını genişletmesi ile problem uzayının çok geniş olmasından dolayı RL tabanlı bir algoritma ile çözüm bulmuşlardır. Gelineen sonuçlarda ise enerji tüketimindeki iyileşmeler gösterilmiştir.

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, daha kısa haberleşme sürelerine ulaşabilmek için tamamlama süresi bölgesi [41] İHA yörünge tasarımı problemine uyarlanmıştır. İkişerli gruplar oluşturan sensörler arasındaki doğru parçasında havada duracak olan İHA, çoklu erişim kanalını kullanarak veri toplamaktadır. Bu yaklaşım ile hem haberleşme hem de uçuş süresinde iyileştirmeler yapmanın mümkün olduğu gösterilmiştir.



3. TEORİ

Kablosuz haberleşme kanalında vericiden çıkan sinyaller, gürültüye, girişime ve zamana bağlı olarak değişen diğer kanal engellerine duyarlıdır. Yol kaybı (path-loss) ve gölgeleme (shadowing) (Şekil 3.1) gibi farklı etkiler ile vericiden çıkan sinyali bozmaktadır. Yol kaybı, vericiden çıkan elektromanyetik sinyalin alıcıya giden yolu boyunca atmosferdeki dağılımı ile kayıplara veya zayıflamalara uğramasına karşılık gelmektedir. Gölgeleme, verici ve alıcı antenleri arasında engellerin sinyal gücünün üzerindeki sönümlenme, yansıma, saçılma ve kırınım gibi etkiler ile zayıflamasıdır. Bu çalışmadaki haberleşme modeli kapsamında İHA-sensör arası bir haberleşme



Şekil 3.1: Yol Kaybı ve Gölgeleme etkisi gösterimi

mevcut olduğundan, İHA konumlandırması ile verici ve alıcı antenler arasında bir engel olmadığı varsayılmıştır. Böylece, kullanılan kanal modelinde gölgeleme etkisi olmadığı ve sadece serbest uzay yol kaybı (free-space path loss) etkisi altında bir haberleşme olduğu varsayılmıştır. Serbest uzay yol kaybında, verici ve alıcı arasındaki uzaklık d birimdir. Vericiden çıkan sinyalin gideceği yolda herhangi bir başka sönümlenmelere etki etmeyecek engelsiz, düz çizgi şeklinde bir görüş hattı (line-of-sight LOS) kanalı vardır. Vericide iletilen $s(t)$ sinyalinin gücünün P_t olduğu düşünüldüğünde serbest uzay için iletilecek sinyalin yolda uğradığı bozulma ile alıcıdaki görülen güç Denklem (3.1) denklemindeki gibi olur.

Burada P_r alıcı antenin elde ettiği gücü, G_t ve G_r sırasıyla verici ve alıcı antenlerin kazançları ve λ ise dalga uzunluğunu ifade etmektedir.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.1)$$

Burada, anten kazançlarının ve dalga boyunun sabit olduğu göz önünde bulundurulursa, görülmektedir ki iletilen sinyali serbest uzayda verici ve alıcı arasındaki uzaklığı karesi ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Denklem (3.2) ile gösterildiği gibi bütün bu ifadeye β , yani kanal kazancı gücü denebilir.

$$\beta = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (3.2)$$

Kanaldaki verici sinyal gücündeki yol kaybı etkisine ek olarak bir de iletilen sinyale gürültü eklenmektedir. Gürültüsüz bir haberleşme kanalı elde etmek mümkün değildir. Bir kullanıcının verici anteninden çıkan sinyaller, alıcı antende gürültü eklenmiş olarak elde edilir. Böylece alıcı hem gürültüyü hem de alınması istenen sinyali almış olur. Alıcı tarafında alınan sinyalde vericiden gelen anlamlı bilginin elde edilebilmesi için ise vericiden çıkan sinyal seviyelerinin gürültü katmanından büyük olması önemlidir.

Gürültünün $n(t)$ ve gürültünün gücünün N olduğu durumda, bu etkinin de eklendiği alınan sinyal $r(t)$, Denklem (3.3) ile gösterilmiştir.

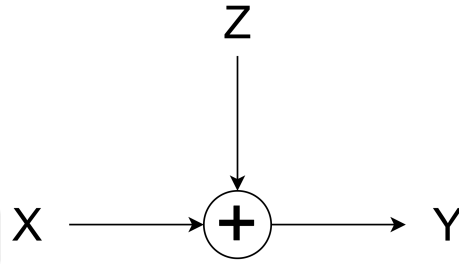
$$r(t) = \frac{\sqrt{\beta}}{d} s(t) + n(t) \quad (3.3)$$

Alınan sinyaldeki, sinyal-gürültü oranı (SNR) ise Denklem (3.4) ile gösterilmiştir.

$$SNR = \frac{\beta P}{d^2 N} \quad (3.4)$$

3.1 Tek Kullanıcılı Haberleşme Kanalı

Bilgi kuramında, kanal kapasitesinin matematiksel teorisi Claude Shannon öncülüğünde 1940'lı yıllarda öne sürülmüştür. Shannon kanal kapasitesi için bir üst sınır tanımlamış. Buna ek olarak Shannon kodlama kuramı, göz ardı edilebilir hata olasılıkları ile kapasiteye yakın bir veri hızını elde edebilecek bir kodlama yöntemi olduğunu ve hata olasılığı ile bu kapasiteyi aşacak veri hızına herhangi bir kodlama yöntemi ile ulaşamayacağını kanıtlamıştır.



Şekil 3.2: Tek kullanıcılı kanal modeli

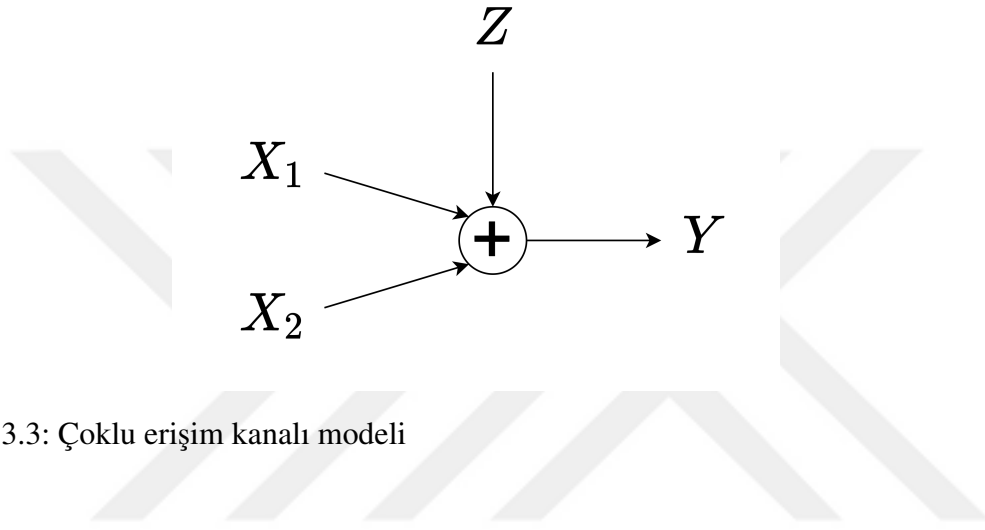
Eklenebilir beyaz gauss gürültüsü (AWGN) kanalında ayırık zamanlı giriş ve çıkışların ilişkisi $Y = X + Z$ şeklindedir. Şekil 3.2 ile gösterilen bu kanalda, X kanal girdisi, Y kanal çıkışı ve Z beyaz gauss gürültüsüdür. Şekil 3.2 ile de gösterilen bir kanal modeli için kapasite C denklemi ise Denklem (3.5) ile gösterilmiştir ve birimi de bps'dir. Burada, R kanal kapasitesini, B bant genişliğini ve $\frac{P}{N}$ ise sinyal gürültü oranını ifade etmektedir.

$$R\left(\frac{P}{N}\right) = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N}\right) \quad (3.5)$$

3.2 Çoklu Erişim Kanalı

Çoklu erişim kanalında veri iletimi yapan kullanıcılar Şekil 3.3 ile gösterimi yapıldığı gibi ortak bir alıcıya bilgi gönderirler. Bu haberleşme yöntemi, farklı yer istasyonlarından bilgi alan uydu alıcılarında veya günlük hayatta sıklıkla kullandığımız telefonlarımız ile baz istasyonları arasında kullanılmaktadır. Bu

çalışmada ise bir sensör ağında veri toplamak için yer sensörlerini ziyaret eden İHA için kullanılmaktadır. Aynı anda birden fazla kullanıcının ortak bir alıcıyla haberleşmesinde, alıcı bilgiyi anlamlandırırken aslında sadece kanalda binen gürültü ile zorlanmamaktadır. Alıcıdaki sinyalde hem farklı kullanıcılardan gelen sinyaller hem de gürültü bulunmaktadır. Dolayısıyla farklı kullanıcıların mesajları diğer alıcıdaki sinyalde girişime sebep olmaktadır.

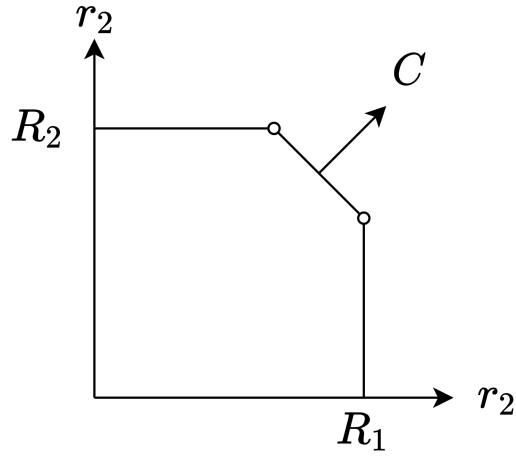


Şekil 3.3: Çoklu erişim kanalı modeli

Bu çalışmada iki kullanıcılu çoklu girişim kanalı kullanılmıştır. Yani kanalda iki tane iletim yapan kullanıcı, bir tane de alıcı bulunmaktadır. Aynı anda iletimin sağlanabilmesi için kanalda bazı kısıtlar bulunmaktadır. Çoklu erişim kanalının kullanıcıların erişebileceği veri hızları (r_1, r_2) eş halinde bulunmaktadır. Çoklu erişim kanalının kapasite erişilebilir veri hızları (r_1, r_2) eşlerinden oluştuğu için bir bölge ile ifade edilmektedir [45]. Bu kapasite bölgesi Şekil 3.4 için (r_1, r_2) veri hızı eşleri kısıt (3.7) ve kısıt (3.8) ile ifade edilen kısıtları sağlamalıdır. Kısıt (3.7) ile ifade edilen kısıt her kullanıcının kendi kanal kapasitesi ile ilintilidir.

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{\beta_1 P_1}{N} + \frac{\beta_2 P_2}{N} \right) \quad (3.6)$$

$$r_k \leq B \log_2 \left(1 + \frac{\beta_k P_k}{N} \right), k = 1, 2 \quad (3.7)$$



Şekil 3.4: Çoklu erişim kanalı kapasite bölgesi

$$r_1 + r_2 \leq B \log_2 \left(1 + \frac{\beta_1 P_1}{N} + \frac{\beta_2 P_2}{N} \right) \quad (3.8)$$

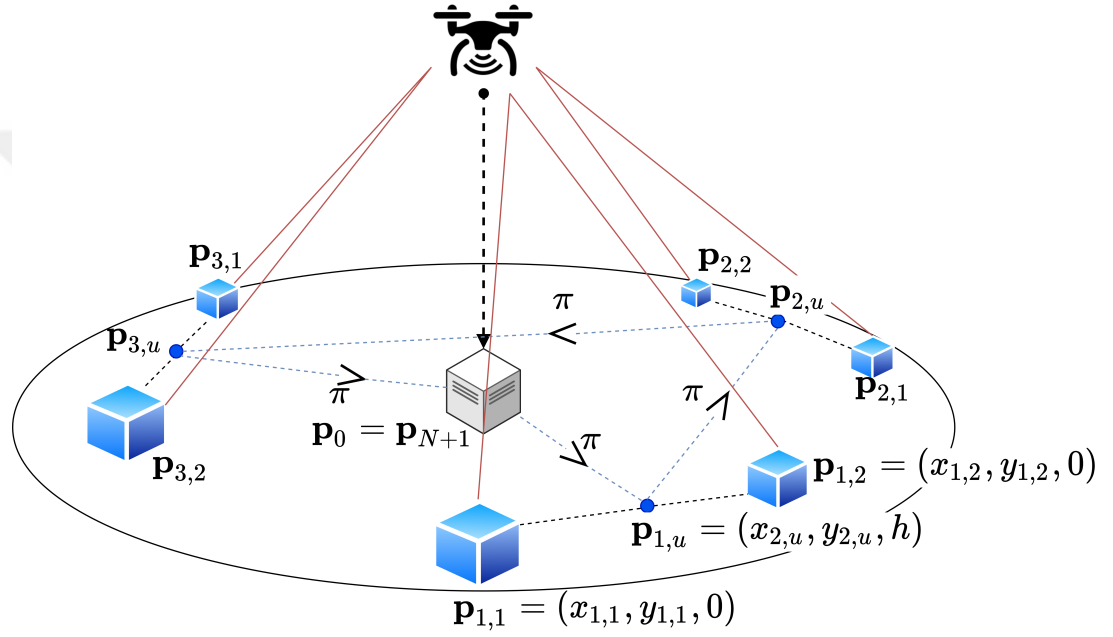
Alıcı kullanıcının edindiği güç iletim yapan kullanıcıların ilettiği güçlerin toplamına eşittir. İkinci kısıt ise tüm kullanıcıları veri hızlarının toplamının, alıcıdaki kullanıcının kapasitesini (Denklem (3.6)) geçmemesi gerektiğini gösterir.



4. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE VERİ TOPLAMA PROBLEMİ

4.1 Haberleşme Modeli

Bu çalışmada Şekil 4.1 ile gösterildiği gibi, yer-hava arası haberleşmesini barındıran bir İHA ile sensör ağında veri toplama problemi incelenmiştir.



Şekil 4.1: İkili kullanıcıli haberleşme senaryosu için İHA yörüngesi gösterimi. İHA veri merkezinden yola çıkıyor ve veri merkezine dönüyor.

Bu sistemde M adet yer sensörü ve bir adet veri merkezi bulunmaktadır. İnsansız hava aracı, veri merkezinden yola başlayarak bütün sensörlerdeki veriyi toplamakta ve veri merkezine geri dönmektedir. Sensör ağında, sensörlerin ikili gruplar oluşturduğu varsayılmıştır. İHA bu ikili grupların arasındaki doğru parçalarının üzerinde havada durmakta ve veri toplama işlemini gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım ile uçuş süresinin, İHA'nın her bir sensörün üzerinde tek tek havada durarak veri toplamasına göre azaltılması amaçlanmıştır. Buna ek olarak İHA, her bir durma noktasında gruptaki sensörler ile aynı anda çoklu erişim kanalını kullanarak haberleşmektedir. Bunun da haberleşme süresini azaltması hedeflenmiştir.

Özetle, İHA'nın sensörleri ikili olarak ziyaret edip veri toplaması ile gezilecek patikanın kısaltılması ve çoklu erişim kanalı kullanarak haberleşmesi ile haberleşme için gerekli olan süresinin azaltılması potansiyeli göz önünde bulundurulmuştur. Sistemde, sensörler ikili gruplar halinde rastgele olarak yerde konumlanmaktadır. Sistemde bu çalışma özelinde çift sayıda sensör bulunduğu varsayılmıştır, böylece N adet sensör grubu vardır. Gerekli olması durumunda problemin çözümü için Bölüm 5'te önerilecek olan algoritmalar kolayca tek sayıda sensörün bulunduğu sistemdeki problemi çözmek için güncellenebilir. Bu çalışmada, sensörleri ifade etmek için $s_{i,j}$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, 2$ ifadesi kullanılmaktadır. Bu ifadede i , sensör grubunu ifade ederken j ise bu grup içindeki sensörü ifade etmektedir. İHA'nın veri toplama işlemi için yola çıkacağı ve işlemi bitirdiğinde döneceği veri merkezi ise s_0 ve s_{N+1} ile ifade edilmektedir. Sensörlerin problemin tanımında ve çözümünde konumlarının kullanılması için tanımlanması gerekmektedir. Böylece, i . sensör grubundaki j . sensörün fiziksel konum vektörü ise $\mathbf{p}_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, 0)$ ile ifade edilmektedir. İHA i . sensör grubundan veri toplamak için harekete geçtiğinde, i . grubu oluşturan 1. ve 2. sensörlerin arasında oluşan doğru parçası $[\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}]$ üzerinde bulunan herhangi bir noktada havada durabilir. İHA'nın veri toplamak için havada durduğu bu nokta ise $\mathbf{p}_{i,u} = (x_{i,u}, y_{i,u}, h)$ ile ifade edilmektedir. İHA'nın sabit bir h yüksekliğinde durduğu varsayılmıştır. Bütün bu fiziksel konum vektörlerin tanımlarına ek olarak, İHA'nın veri toplamak için gideceği yol ise $\boldsymbol{\pi} = [\mathbf{p}_{(1),u}, \dots, \mathbf{p}_{(N),u}]$ ile tanımlanmaktadır. Yolu tanımlayan $\boldsymbol{\pi}$, $\mathbf{p}_{i,u}$, $i = 1, \dots, N$ ile ifade edilen her bir olası havada durma noktalarının permütasyonlarından elde edilmektedir. Burada $\mathbf{p}_{(i),u}$, İHA'nın gezeceği yoldaki i . noktayı ifade etmektedir. Notasyondaki küçük bir manipülasyon ile ifade edilebilir ki $\mathbf{p}_{0,u} = \mathbf{p}_{N+1,u} = (x_{0,u}, y_{0,u}, 0)$ noktası veri merkezinin konumunu belirtmektedir.

Sensörlerin aktaracağı veri uzunlukları, her bir sensör $s_{i,j}$ için $\tau_{i,j}$ ile ifade edilmektedir. Çalışmada, $\tau_{i,j}$ paket uzunluklarının yeterince büyük olduğu varsayılmıştır, böylece [41] çalışmasındaki bilgi kuramı kapsamındaki teorik veri hızları ve tamamlama süreleri geçerlidir.

İHA gezeceği yolda seyrederken her bir durma noktasında ikili sensör gruplarından veri toplarken sensör grupları ile çoklu erişim kanalı ile aynı anda haberleşerek

bu işlemi gerçekleştirmektedir. Her bir veri toplama işleminde haberleşme, çoklu erişim kanalı veri hızları ile gerçekleştirilmektedir. Bu veri hızları $(r_{i,1}, r_{i,2})$ ile ifade edilmektedir. Erişilebilir veri hızları olan $(r_{i,1}$ ve $r_{i,2})$ (saniyedeki bit sayısı) sırasıyla i ., $i = 1, \dots, N$ sensör grubundaki birinci ve ikinci sensöre aittir ve bu veri hızları aşağıdaki koşulları sağlamaktadır.[46].

$$r_{i,1} \leq R_{i,1}(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,u}) \quad (4.1)$$

$$r_{i,2} \leq R_{i,2}(\mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u}) \quad (4.2)$$

$$r_{i,1} + r_{i,2} \leq C_i(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u}) \quad (4.3)$$

Burada $R_{i,j}(\mathbf{p}_{i,j}, \mathbf{p}_{i,u})$, İHA ve yer sensörü $s_{i,j}$ arasındaki tekli kullanıcı görüş hattı (Line-of-Sight, LOS) haberleşme bağlantısının veri hızını ifade etmektedir.

$$R_{i,j}(\mathbf{p}_{i,j}, \mathbf{p}_{i,u}) = B \log_2 \left(1 + \frac{\beta P_{i,j}}{N_0 d^2(\mathbf{p}_{i,j}, \mathbf{p}_{i,u})} \right) \quad (4.4)$$

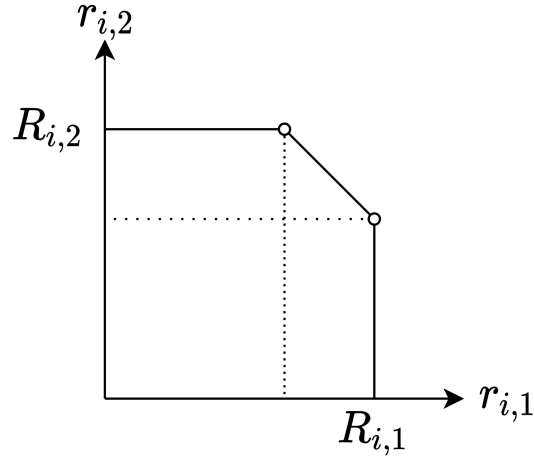
Diğer yandan $C_i(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u})$ ise i . sensör grubu ve İHA arasındaki erişilebilir veri hızlarının toplanmasından oluşan toplam veri hızını (sum-rate) ifade etmektedir.

$$C_i(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u}) = B \log_2 \left(1 + \sum_{k=1}^2 \frac{\beta P_{i,k}}{N_0 d^2(\mathbf{p}_{i,k}, \mathbf{p}_{i,u})} \right) \quad (4.5)$$

(4.4) ve (4.5) numaralı denklemlerde bulunan, B kanal bant genişliğini, β referans uzaklıktaki kanal kazancını, N_0 gürültünün gücünü ve $P_{i,j}$ ise i . gruptaki j . sensörün iletim gücünü ifade etmektedir. Bunlara ek olarak iki nokta $\mathbf{a} = (x_a, y_a, h_a)$ ve $\mathbf{b} = (x_b, y_b, h_b)$ arasındaki öklid uzaklığı ise $d(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|$ ile ifade edilmektedir.

(4.1), (4.2) ve (4.3) koşulları altında oluşan ve çoklu erişim kanalındaki erişilebilir veri

hızlarını barındıran kapasite bölgesi Şekil 4.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2: İki kullanıcılı çoklu erişim kanalı, kanal kapasite bölgesi

4.2 Bilgi Yaşı Parametresi

Bilginin birçok alanda farklı sistemlere girdi olarak verilmesi ile insan hayatı kolaylaşmakta, teknolojik sistemler ayağa kalkmakta ve yeni teknolojiler üretilmektedir. Oldukça önemli olan bilginin edinimi ise birçok farklı haberleşme sistemleri ile yapılmaktadır. Bu bilginin toplanması ve anlamlı bir veri haline getirilmesinde ise bilginin tazeliği oldukça önemlidir. Bu noktada veri toplamak için kullanılan haberleşme sistemleri bu bilginin tazeliği için optimize edilmektedir. Bilginin tazeliği için ise birçok bilimsel araştırmada bilgi yaşı kullanılmaktadır. Bilgi yaşı ise, o bilginin üretilmeye başladığı noktadan başlayarak anlamlandırılacağı yere gelip insanların anlayacağı şekle dönüştürülüp kullanıldığı noktaya kadar geçen süredir. Örneğin bir kablosuz haberleşme sensör ağında veri toplayan bir İHA'nın her sensördeki bilgileri topladığını düşünülün. İHA veri merkezinden yola çıkar, her sensördeki veriye belirli bir patika gezerek erişir ve veri merkezinde topladığı verileri getirmektedir. Bu sensör ağındaki her bir sensörün ileteceği veriyi ürettiği an bilgi yaşlanmaya başlar. İHA ise bu üretilen veriyi ve diğer bütün sensörlerin verilerini alır, veri merkezine getirir. Veri merkezinde bu bilgi işlenir ve insanların hayatlarını kolaylaştırmak için birçok farklı alanda kullanılır. Bilgi, insanların anlayacağı ve sistemlerine girdi olarak vereceği bir

formata çevrilir. İşte bilginin üretimi ve insanların anlayacağı formata çevrimi arasında geçen süre o bilginin yaşıdır.

Bu çalışmada, veri toplama görevi ile veri merkezinden yola çıkan ve bütün sensörleri ziyaret edecek olan bir İHA'nın gideceği yolun bulunmasında en yüksek bilgi yaşı parametresinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşmak için, bu çalışmada her bir sensörün ikili gruplar halinde ziyaret edilmesi ve bu ziyaretler sırasında toplanacak verinin çoklu erişim kanalı haberleşmesi ile yapılması önerilmektedir. Sensörlerde üretilen verinin, İHA tarafından toplanıp veri merkezine getirilene kadar bilgi yaşı artmaktadır. Bu çalışma özelinde sensörlerin ileteceği veriyi, İHA o sensörden veri toplamak için geldiğinde oluşturduğu varsayılmıştır. Özetle bilgi yaşı parametresi, verinin insansız hava aracına aktarıldıktan sonra veri merkezine gelene kadar geçen süredir. Her sensördeki veride biriken bilgi yaşı, hem veri toplamada geçen süresi hem de İHA'nın uçuş süresini barındırmaktadır.

Bilgi yaşı parametresinin her bir sensörde hesaplanması için, i . sensör grubundan veri toplandığı zaman adımı T_i ile ifade edilmektedir. Bilginin yaşının matematiksel olarak ifade edilebilmesi için i . sensör grubundaki bilgi yaşı $A_i(t)$ fonksiyonu ile zaman ise t ile gösterilmektedir. İHA i . sensör grubundaki veriyi toplayana kadar, yani $t < T_i$ zamanına kadar, o sensör grubundaki bilgi yaşı sıfırdır. Veri toplama işlemi gerçekleştiikten sonra ise bilgi yaşı $A_i(t) = t - T_i$ olarak ifade edilebilir. Böylece,

$$A_i(t) = \begin{cases} A_i(t) = 0, & \text{if } t < T_i \\ A_i(t) = t - T_i, & \text{otherwise} \end{cases} . \quad (4.6)$$

$t = T_{i+1}$ zaman adımına gelindiğinde, gezilecek yolda bulunan i . sıradaki grupta biriken bilgi yaşı,

$$A_i(T_{i+1}) = t_{(i)}^{com} + t_{(i)(i+1)}^{flight} . \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

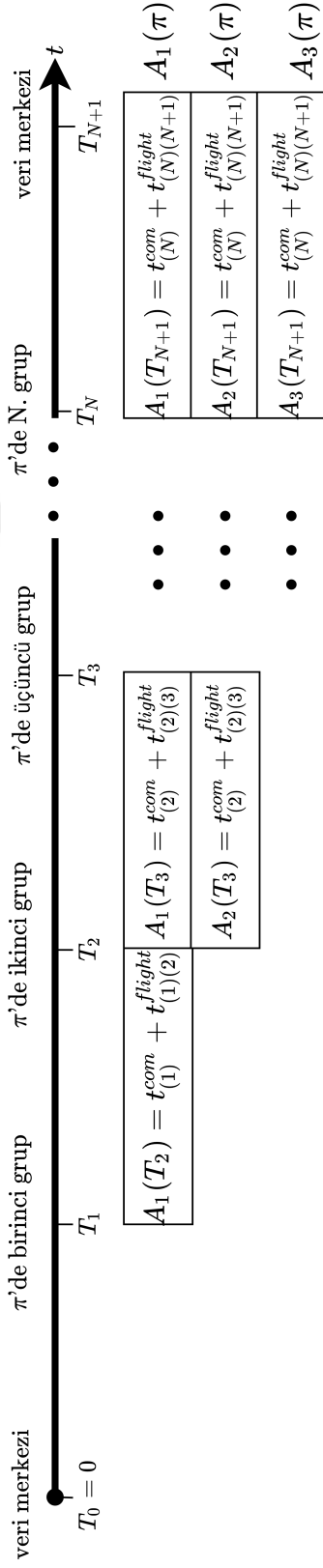
Burada, $t_{(i)}^{com}$ (i). grup içinde bulunan her iki sensör için toplam veri iletimi için geçen süreyi ifade etmektedir. İHA'nın gezeceği yol üzerinde uğrayacağı her iki sensör grubunun (i). grup ve $(i + 1)$. grup) arasındaki uçuş süresi ise $t_{(i)(i+1)}^{flight}$ ile

gösterilmektedir. Bu uçuş süresi ise her iki veri toplama noktası arasındaki uzaklık $d(\mathbf{p}_{(i),u}, \mathbf{p}_{(i+1),u})$ ve insansız hava aracının hızı olan V ile hesaplanabilir.

$$t_{(i)(i+1)}^{flight} = d(\mathbf{p}_{(i),u}, \mathbf{p}_{(i+1),u})/V \quad (4.8)$$

İHA gezeceği yoldaki bütün sensörleri ziyaret etmesinden sonra, $T_{(N+1)}$ zaman adımında topladığı veriyi iletmek için veri merkezine gelmektedir. Sensör grubunda bulunan iki sensör de veri iletimine çoklu erişim kanalı kullanarak aynı anda başlamaktadır, böylece bir sensör grubunda bulunan sensörlerde biriken bilgi yaşı aynıdır.





Şekil 4.3: AoI zaman çizelgesi.

Sonuç olarak İHA veri merkezinde döndüğünde, i . sensör grubunun sahip olduğu bilgi yaşı Denklem (4.9)' ile ifade edilebilir.

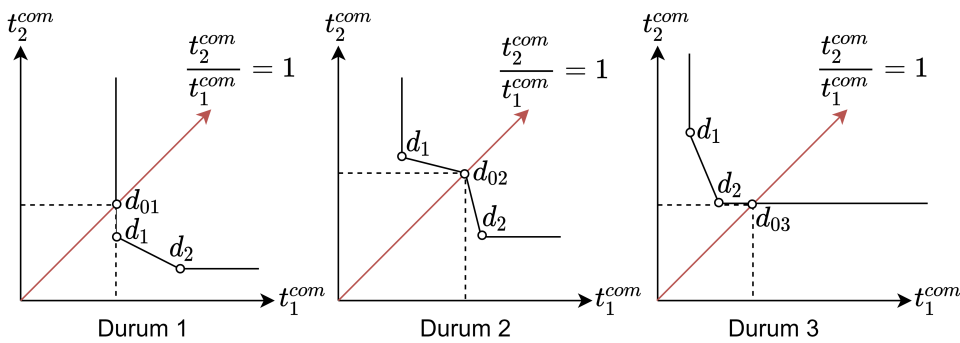
$$A_i(T_{N+1}) = \sum_{k=i}^N \left[t_{(k)}^{com} + t_{(k)(k+1)}^{flight} \right]. \quad (4.9)$$

Aslında bu bilgi yaşı İHA'nın gideceği yol olan $\boldsymbol{\pi}$ 'ye bağlı olduğu için, fonksiyon $A_i(T_{N+1}) = A_i(\boldsymbol{\pi})$ şeklinde de yazılabilir. Matematiksel olarak anlatılan bu ifadeler, görsel olarak Şekil ?? üzerinde bulunan zaman çizelgesi ile anlaşılması mümkündür.

4.3 Eniyileme Problemi

Bölüm 4.1 içerisinde problemi tanımlamak için gerekli olan notasyonları, haberleşme modelini ve veri hızı denklemleri tanımlandı. Bölüm 4.2 içerisinde ise bu haberleşme modeli kapsamında en aza indirmeyi hedeflediğimiz bilgi yaşı parametresinin nasıl hesaplandığını ifade edildi. Bu bölümde eniyileme problemi tanımlanacaktır.

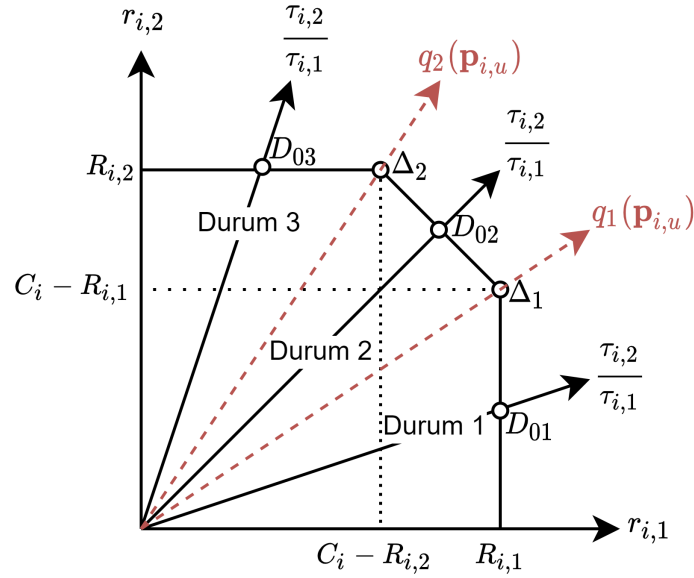
İHA, ikili gruplar halinde bulunan sensörlerin arasında bulunan, bu iki sensörden oluşan doğru parçasının üzerinde herhangi bir noktada duracak ve iki sensör ile çoklu erişim kanalı ile haberleşecektir. Bu veri toplama işleminde, çoklu erişim kanalının tamamlama süresi bölgeleri [41] makalesinde tanımlanmış ve Şekil 4.4 ile gösterilmiştir. Şekil 4.4 içerisinde bulunan 3 tamamlama süresi bölgesi,



Şekil 4.4: Tek bir İHA konumu $\mathbf{p}_{i,u}$ için haberleşme tamamlama süresi bölgeleri.

Şekil 4.5 kapasite bölgesine ve kullanıcıların paket uzunluğu oranına bağlı olarak gerçekleşmektedir. En iyi haberleşme tamamlama süresi bölgelerini elde etmek

için, kullanıcılar parçalı bir haberleşme modelini gözetmelidir. İlkinde iki kullanıcı da aynı anda çoklu erişim kanalı ile Denklem (4.1)-Denklem (4.3) denklemlerinde bulunan $(r_{i,1}, r_{i,2})$ veri hızları ile kullanıcılardan biri paketlerini bitirene kadar iletim yapmaktadır. Devamında ise, paketlerini bitirmeyen kullanıcı kalan bitlerini tek başına olabilecek en hızlı veri iletim hızında Denklem (4.4) ile iletir.

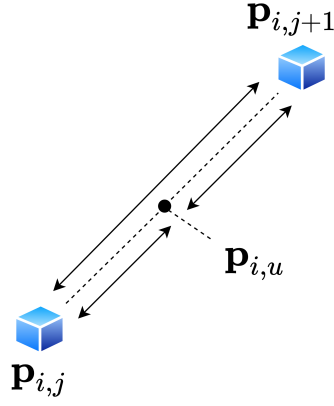


Şekil 4.5: İki kullanıcılı çoklu erişim kanala kanal kapasite bölgesi ve paket boy oranlarına göre gerçekleştirilecek durumların gösterimi.

Böylece, i . sensör grubu için haberleşmenin tamamlanma süresi Denklem (4.10) ile gösterilmiştir.

$$t_i^{com} = \max \left\{ t_{i,(1)}^{com}, t_{i,(2)}^{com} \right\}. \quad (4.10)$$

Eniyileme probleminde İHA'nın gideceği yol için doğru parçası kısıtları tanımlanmıştır. Bu kısıtlar İHA'nın gittiği yolda veri toplama durak noktalarının sensör grupları arasında olan ve grup elemanlarından oluşan doğru parçasının tanımı ile oluşmaktadır. İHA'nın durak noktasının örnek bir sensör grubu olan Şekil 4.6 ile gösterilen doğru parçasının üzerinde olduğundan koşulunu sağlanması gereklidir. P_1 probleminde, iki adet kısıt bulunmaktadır. Kısıt (4.11), İHA konumunun bu doğru parçasının eğimi ile aynı olması iken, Kısıt (4.12) ise İHA'nın sensörlere ayrı ayrı uzaklıklarının toplamının sensörlerin birbirine olan uzaklığına eşit olmasıdır.



Şekil 4.6: Bir sensör grubundaki, sensörler arasındaki doğru parçası gösterimi.

$$\frac{y_{i,u} - y_{i,1}}{x_{i,u} - x_{i,1}} = \frac{y_{i,2} - y_{i,1}}{x_{i,2} - x_{i,1}}, \quad \forall i \quad (4.11)$$

$$d(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}) = d(\mathbf{p}_{i,u}, \mathbf{p}_{i,1}) + d(\mathbf{p}_{i,u}, \mathbf{p}_{i,2}), \quad \forall i \quad (4.12)$$

Böylece, maksimum bilgi yaşının minimumunu bulmayı amaçlayan eniyileme problemi P_1 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} P_1 : \quad & \min_{\boldsymbol{\pi}, \mathbf{p}_{1,u}, \dots, \mathbf{p}_{N,u}} \max_{i \in 1 \dots N} A_i(\boldsymbol{\pi}) \\ \text{s.t.} \quad & (4.11) \text{ and } (4.12). \end{aligned} \quad (4.13)$$

Bu eniyileme problemi konveks olmayan bir problemdir. Dahası, bütün değişkenler birbirine yüksek derece bağlıdır. İHA'nın havada durma noktasının $\mathbf{p}_{i,u}$ değişimi ile, Denklem (4.1)-Denklem (4.3) ile tanımlanan erişilebilir veri hızları ve operasyonel iletim hızları değişmektedir. Böylece, $\mathbf{p}_{i,u}$, $i = 1, \dots, N$ konumuna bağlı olarak, optimal yörünge de değişmektedir. Yörünge değişimi ile de sensörlerden toplanan verilerdeki bilgi yaşı da değişmektedir. Bütün bu bağılıklardan kurtulmak için, bu çalışma kapsamında iki adet basit İHA yörünge planlama algoritması önerilmektedir.

Algoritmalarından ilki haberleşme süresini çoklu erişim kanalı kullanarak iyileştiren

ve ardından yörüngenin bulunmasını hedefleyen bir yol izlerken, diğ er algoritma ise İHA'nın gideceği yolun iyileştirilmesini hedef alır ve yola göre en iyi veri toplama noktalarında çoklu erişim kanalını kullanmaktadır.





5. YÖRÜNGE PLANLAMA ALGORİTMALARI

Bu bölümde, iki adet optimale yakın yörünge tasarım algoritması önerilmektedir. Bu algoritmalar, optimal çözüm ile karşılaştırılabilir seviyede performansa sahiptir. Algoritmalarda, Problem (4.13) ile tanımlanan eniyileme probleminin karmaşıklığından kurtulmak için, haberleşme süresi ve uçuş süresi göz önünde bulundurularak iki farklı yaklaşım yapıldı. Tasarlanan algoritmalarından birincisi, sensör gruplarındaki sensörler ile İHA arasında olan haberleşme süresinin eniyilenmesini sağlayan İHA havada durma noktasını bulmayı temel almaktadır. İkincisi ise İHA'nın gideceği yörüngeyi ve sensör grupları arasındaki doğru parçalarındaki durma noktalarını yol açısından eniyilenmesini temel almaktadır.

5.1 Çoklu Erişim Kanalına Göre Eniyi Yörünge Ataması

Bu algoritmada, en yüksek haberleşme tamamlama süresinin en küçük değere sahip olduğu $\mathbf{p}_{i,u}$, $i = 1, \dots, N$ havada durma noktalarının her sensör grubu için bulunması hedeflenmiştir. Sonrasında, bu noktaların gezileceği optimal sıralama [30] çalışmasındaki dinamik programlama kullanılarak bulunmuş ve İHA yörüngesi π oluşturulmuştur.

Her sensör grubu için optimal İHA durma noktalarının $\mathbf{p}_{i,u}$ bulunması gelişmiş güzel yapılmamaktadır. $\mathbf{p}_{i,u}$ İHA konumu, i . gruptaki sensörler arasında olan doğru parçası $[\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}]$ üzerinde yer değiştirdikçe, çoklu erişim kanalının Şekil 4.5 görselinde bulunan kapasite bölgesi de değişmektedir. Sonuç olarak doğru parçası üzerindeki her $\mathbf{p}_{i,u}$ noktasında, gruptaki her iki sensör için iletim hızları ve süreleri de değişmektedir.

Bu noktanın bulunması için öncelikle $q_1(\mathbf{p}_{i,u})$ ve $q_2(\mathbf{p}_{i,u})$ isimlendirmesi ile iki adet değer tanımlanmıştır.

$$q_1(\mathbf{p}_{i,u}) = \frac{C_i(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u}) - R_{i,1}(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,u})}{R_{i,1}(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,u})}, \quad (5.1)$$

$$q_2(\mathbf{p}_{i,u}) = \frac{R_{i,2}(\mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u})}{C_i(\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u}) - R_{i,2}(\mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,u})}. \quad (5.2)$$

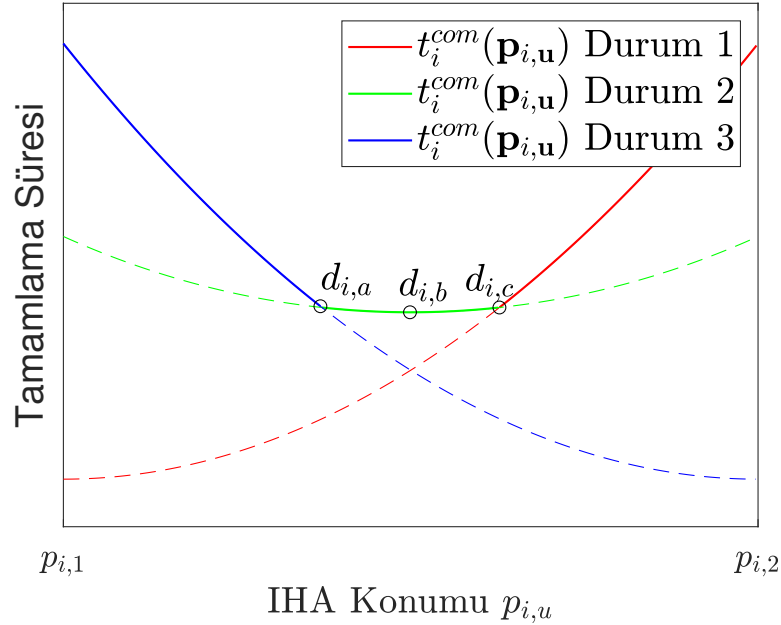
Bu iki değer, sırasıyla orjinden ve Şekil 4.5 çoklu erişim kanalı kapasite bölgesindeki köşe noktalarından geçen iki adet doğrunun eğim değerleridir. Böylece, Şekil 4.5 ile gösterilen çoklu erişim kanalı kapasite bölgesinde bu eğim değerlerine ve paket uzunluklarının oranına $\tau_{i,2}/\tau_{i,1}$ bağlı olarak üç adet durum gerçekleşebilir.

Durum 1,2 ve 3 sırasıyla $\tau_{i,2}/\tau_{i,1} \leq q_1(\mathbf{p}_{i,u})$, $q_1(\mathbf{p}_{i,u}) \leq \tau_{i,2}/\tau_{i,1} \leq q_2(\mathbf{p}_{i,u})$ ve $\tau_{i,2}/\tau_{i,1} \geq q_2(\mathbf{p}_{i,u})$ ile gerçekleşmektedir. her bir durumda verilen bir $\mathbf{p}_{i,u}$ noktası için haberleşme tamamlama süresi bölgeleri Şekil 4.4 [41] ile gösterilmiştir.

Çoklu erişim kanalı eniyi yol atama algoritmasında, her sensör gruplarındaki haberleşme süresinin en yüksekini azaltılmasını hedefleyen bir algoritma önerilmektedir. Şekil 4.4 üzerinde gösterilen noktalardan Durum 1 için d_1 , Durum 2 için d_{02} ve Durum 3 için d_2 verilen bir İHA konumunda $\mathbf{p}_{i,u}$ grupları arasındaki en yüksek haberleşme süresini en küçük yapan optimal noktalardır. Şekil 4.4 üzerindeki Durum 1, 2 ve 3 için bulunan d_1 , d_{02} ve d_2 noktalarını elde etmek, Şekil 4.5 üzerinde bulunan Δ_1 , D_{02} and Δ_2 noktalarıyla çalışmak ile birbirine denk durumlardır. Fakat bu çalışmada güç eniyilemesi yapılmadığından, optimal çözüm tekil değildir. Şekil 4.5 üzerinde bulunan D_{01} (D_{03}) noktalarında çalışmak Şekil 4.4 üzerindeki d_{01} (d_{03}) noktalarındaki gecikme sürelerine denktir ve haberleşme süresi iki sensör için de eşit olmaktadır. Böylece Denklem (4.10) ile ifade edilen en yüksek haberleşme süresi, $\mathbf{p}_{i,u}$ 'nun bir fonksiyonu olarak Denklem (5.3) ile ifade edilebilir.

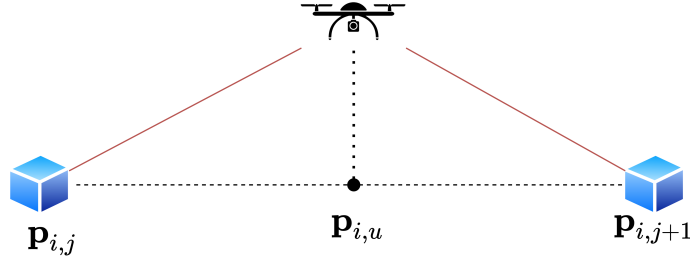
$$t_i^{com}(\mathbf{p}_{i,u}) = \begin{cases} \frac{\tau_{i,1}}{R_{i,1}(\mathbf{p}_{i,u})}, & \text{if } \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} \leq q_1(\mathbf{p}_{i,u}) \\ \frac{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}{C_i(\mathbf{p}_{i,u})}, & \text{if } q_1(\mathbf{p}_{i,u}) < \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} < q_2(\mathbf{p}_{i,u}) \\ \frac{\tau_{i,2}}{R_{i,2}(\mathbf{p}_{i,u})}, & \text{if } \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} \geq q_2(\mathbf{p}_{i,u}) \end{cases} \quad (5.3)$$

Şekil 5.1 üzerinde bulunan kırmızı, yeşil ve mavi eğriler (hem kesiksiz hem kesikli) sırasıyla Denklem (5.3) içindeki birinci, ikinci ve üçüncü fonksiyonlara karşılık gelmektedir. Bu örnek grafik için $\tau_{i,1} = \tau_{i,2} = 10000$ bits, $h = 100$ m, $\|\mathbf{p}_{i,1} - \mathbf{p}_{i,2}\| = 60$ m değerleri kullanılmıştır. $t_i^{com}(\mathbf{p}_{i,u})$ değerinin tamamı ise Şekil 5.1 üzerindeki kesiksiz olan eğrilerin birleşimi ile ifade edilmektedir. Burada öncelikle kapasite bölgesindeki



Şekil 5.1: Haberleşme süresi fonksiyonu olan $t_i^{com}(\mathbf{p}_{i,u})$ (5.3) grafiği.

geçerli durumun seçilmesine odaklanılmıştır. Bir sensör üzerinden başlayarak diğerine doğru hareket ederken, Şekil 5.2 ile de anlaşılacağı gibi aday veri toplama noktası $\mathbf{p}_{i,u}$ ve sensör konumları arası uzaklık değişmekte ve bu da kapasite bölgesindeki durumları değiştirmektedir. Bu şekilde, İHA $\mathbf{p}_{i,1}$ noktasından $\mathbf{p}_{i,2}$ noktasına uçtuğunda, bütün olası durumları $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ sırasıyla gözlemlemektedir. Bununla birlikte, İHA'nın yüksekliğine, $\mathbf{p}_{i,1}$ ve $\mathbf{p}_{i,2}$ arası uzaklığa ve $\tau_{i,1}$ ve $\tau_{i,2}$ paket uzunluklarına bağlı olarak, sadece $3 \rightarrow 2$ veya $2 \rightarrow 1$ durum değişimlerinin olması da muhtemeldir. Diğer bir



Şekil 5.2: Bir sensör grubundaki, sensörler arasındaki doğru parçası ve İHA gösterimi.

deyişle, İHA $\mathbf{p}_{i,1}$ noktasındayken, $\tau_{i,2}/\tau_{i,1}$ oranı $q_1(\mathbf{p}_{i,u})$ ve $q_2(\mathbf{p}_{i,u})$ fonksiyonlarına göre Denklem (5.3)'teki Durum 3'e denk gelebilir ve İHA $\mathbf{p}_{i,2}$ noktasına hareket ettiğinde bu noktadaki $q_1(\mathbf{p}_{i,u})$ ve $q_2(\mathbf{p}_{i,u})$ değerlerine göre paket uzunluğu oranı Durum 2'ye denk gelebilir. Benzer açıklama $2 \rightarrow 1$ geçişi için de geçerlidir.

Denklem (5.3) üzerindeki Durum 1 ve Durum 3 fonksiyonları sırasıyla monoton artan ve monoton azalan fonksiyonlardır ve Durum 2 fonksiyonu ise konveks bir fonksiyondur. Optimal $t_i^{com}(\mathbf{p}_{i,u})$ için Şekil 5.1 üzerindeki $d_{i,a}$, $d_{i,b}$ veya $d_{i,c}$ olmak üzere sadece üç adet aday nokta mevcuttur. $d_{i,a}$ and $d_{i,c}$ noktaları sırasıyla $3 \rightarrow 2$ veya $2 \rightarrow 1$ durum değişimlerinin olduğu noktalar iken $d_{i,b}$ ise Durum 2'deki fonksiyonunun türevinin sıfıra eşit olduğu noktadır. $d_{i,c}$, $d_{i,b}$ and $d_{i,a}$ noktaları Denklem (5.4) çözümlerinden bulunabilir.

$$q_1(\mathbf{p}_{i,u}) = \tau_{i,2}/\tau_{i,1}, \quad (5.4)$$

$$d \left[\frac{\tau_{i,1} + \tau_{i,2}}{C_i(\mathbf{p}_{i,u})} \right] / d\mathbf{p}_{i,u} = 0, \quad (5.5)$$

$$q_2(\mathbf{p}_{i,u}) = \tau_{i,2}/\tau_{i,1}. \quad (5.6)$$

(5.4), (5.5) ve (5.6) denklemlerindeki durumlarını (sırasıyla 1,2 ve 3) tanımlayan İHA konumları sırasıyla \mathbf{p}_{i,c_1} , \mathbf{p}_{i,c_2} ve \mathbf{p}_{i,c_3} şeklinde isimlendirilmiştir.

Algoritma.1 içinde, $d_{i,a}$ ve $d_{i,c}$ noktaları Newton-Rhapson methodu yardımıyla bulunmuştur. i . grup için aday noktalar tanımlandıktan sonra, en düşük t_i^{com} değerine sahip olan seçilmekte ve o noktanın konumu \mathbf{p}_{i,c^*} ile isimlendirilmektedir. Sonrasında,

Algorithm 1 Çoklu Erişim Kanalına Göre Eniyi Yörünge Atama Algoritması

Girdi: $\mathbf{p}_{i,j}$ and $P_{i,j}, \forall i = 1, \dots, N+1, j = 1, 2, h, B, \beta, N_0$

- 1: **for** Bütün $i = 1, \dots, N$ gruplarında **do**
 - 2: Durumu $\mathbf{p}_{i,1}$ ve $\mathbf{p}_{i,2}, C_1$ ve C_2 olarak bul
 - 3: **if** $C_1 == 3$ ve $C_2 == 1$ **then**
 - 4: Bul $\mathbf{p}_{i,c_1}, \mathbf{p}_{i,c_2}, \mathbf{p}_{i,c_3}, (5.4), (5.5), (5.6)$
 - 5: **else if** $C_1 == 2$ ve $C_2 == 1$ **then**
 - 6: Bul \mathbf{p}_{i,c_1} and $\mathbf{p}_{i,c_2}, (5.4), (5.5)$
 - 7: **else if** $C_1 == 3$ ve $C_2 == 2$ **then**
 - 8: Bul \mathbf{p}_{i,c_2} ve $\mathbf{p}_{i,c_3}, (5.5), (5.6)$
 - 9: **else if** $C_1 == C_2$ **then**
 - 10: Bul \mathbf{p}_{i,c_1} veya \mathbf{p}_{i,c_2} veya $\mathbf{p}_{i,c_3}, (5.4), (5.5), (5.6)$
 - 11: **end if**
 - 12: Hesapla \mathbf{p}_{i,c^*}
 - 13: **end for**
 - 14: Bilgi yaşını ve yörüngeyi $A_i(\boldsymbol{\pi}_c^*)$ bul, [30, Algoritma 1]
-

$\mathbf{p}_{i,c^*}, i = 1, \dots, N$ arasındaki optimal yörünge $\boldsymbol{\pi}_c^*$ dinamik programlamanın katkısıyla bulunmaktadır [30, Algorithm 1].

5.2 Yol Uzunluğuna Göre Eniyi Yörünge Ataması

Önceki alt bölümde, ilk olarak haberleşme süresi eniyilendi ardından da yörünge eniyilemesi yapıldı. Bu alt bölümde ise, haberleşme süresinin azaltılması yapılmamaktadır, fakat İHA bütün sensörler arasındaki doğru parçalarını tek bir noktadan geçerek ziyaret ederken en kısa yolu gitmeyi hedeflemektedir. Bulunan yoldaki doğru parçaları üzerlerinde olan noktalarda İHA havada durmakta ve çoklu erişim kanalı kullanarak iki sensörler aynı anda haberleşmektedir. İHA'nın gideceği en kısa yolun hesaplanması için P_2 eniyileme problemi ifade edilebilir. Bu problemde amaç fonksiyonunu sıralı doğru parçaları üzerindeki seçilen noktaların arasındaki uzaklıkların toplamıdır. Eniyileme problemi bu toplamın en küçük olmasını hedefliyor.

$$P_2 : \quad \min_{\boldsymbol{\pi}, \mathbf{p}_{1,u}, \dots, \mathbf{p}_{N+1,u}} \sum_{i=0}^{N+1} d(\mathbf{p}_{i,u}, \mathbf{p}_{i+1,u}) \quad (5.7)$$

s.t. (4.11) and (4.12).

Algorithm 2 Yol Uzunluğuna Göre Eniyi Yörünge Atama Algoritması

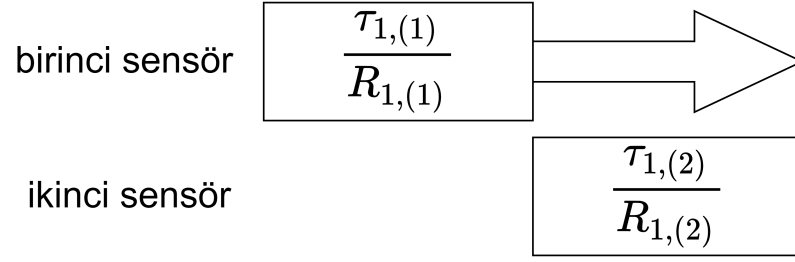
Girdi: $\mathbf{p}_{i,j}$ and $P_{i,j}, \forall i = 1, \dots, N+1, j = 1, 2, h, B, \beta, N_0$

- 1: **for** Btn grup sıralamaları $\boldsymbol{\pi}_k, k = 1, \dots, N!$ **do**
 - 2: $\mathbf{p}_{i,u}, i = 1 \dots N$ noktalarını bul (Problem (5.7))
 - 3: Gecikmeleri hesapla $t_{(i)(i+1)}^{flight}$ ve $t_i^{com}(\mathbf{p}_{i,u})$ (5.3), $\forall i = 1, \dots, N$
 - 4: AoI $A_i(t)$ elde et (4.9) $\forall i = 1, \dots, N$
 - 5: **end for**
 - 6: En iyisini seç $\boldsymbol{\pi}_p^* \in \{\boldsymbol{\pi}_1, \dots, \boldsymbol{\pi}_{N!}\}$ ve bilgi yaşıını $A_i(\boldsymbol{\pi}_p^*)$ bul
-

Verilen bir $\boldsymbol{\pi}_k, k = 1, \dots, N!$ gezme sırası için, bu eniyileme problemi MATLAB'daki fmincon ile veya denk bir doğrusal olmaya çözücüyle çözülebilir. Bütün olası $\boldsymbol{\pi}_k$ sıralamalarından en iyisini seçerek, yol uzunluğuna göre eniyi yörünge $\boldsymbol{\pi}_p^*$ bulunmaktadır. Yol uzunluğuna göre eniyi yörünge ataması tasarımı Algoritma 2 ile gösterilmiştir.

5.3 Zaman Paylaşma İle Veri Toplama

Sonuçlar kısmında sayısal sonuçlar gösterilirken, Algoritma.1 ve Algoritma.2 performansları zaman paylaşmalı veri toplama ile karşılaştırılacaktır. Bu performans karşılaştırma çalışmasında, İHA'nın zaman paylaşma ile haberleştiği kabul edilirken iki durum çalışılmıştır. Birincisinde İHA Algoritma.1 ile bulunan yörüngeyi ve doğru parçaları üzerindeki havada durma noktalarını aynı şekilde takip ederken, sensör haberleşmesini zaman paylaşımı ile yapacaktır. İkincesinde ise İHA Algoritma.2 ile bulunan yörüngeyi takip ederken, haberleşme noktalarında zaman paylaşımını kullanacaktır. Zaman paylaşımında, haberleşme süreleri grup içindeki iki sensör için de farklı olmaktadır. İHA doğru parçalarındaki veri toplama noktalarına geldiğinde, şekil 5.3 ile gösterildiği gibi veri iletimi yapacak olan ilk sensör bütün paketlerini iletirken diğer kullanıcı beklemektedir. İlk sensör iletimini bitirdikten sonra ise ikinci sensör paketlerini iletir ve ardından İHA gideceği diğer veri toplama noktasına Algoritma.1 ve Algoritma.2 yörüngelerindeki gibi gider. $t_{i,(1)}^{com}(\mathbf{p}_{i,u})$ ve $t_{i,(1)}^{com}(\mathbf{p}_{i,u})$ değerleri zaman paylaşımında ayrı ayrı Denlem.5.8 ile gösterildiği gibi olur.



Şekil 5.3: Zaman paylaşımı haberleşmesinde, haberleşme sıralamaları.

$$t_{i,(1),TS}^{com} = \frac{\tau_{i,(1)}}{R_{i,(1)}(\mathbf{p}_{i,(1)}, \mathbf{p}_{i,u})} + \frac{\tau_{i,(2)}}{R_{i,(2)}(\mathbf{p}_{i,(2)}, \mathbf{p}_{i,u})}, \quad (5.8)$$

$$t_{i,(2),TS}^{com} = \frac{\tau_{i,(2)}}{R_{i,(2)}(\mathbf{p}_{i,(2)}, \mathbf{p}_{i,u})}. \quad (5.9)$$

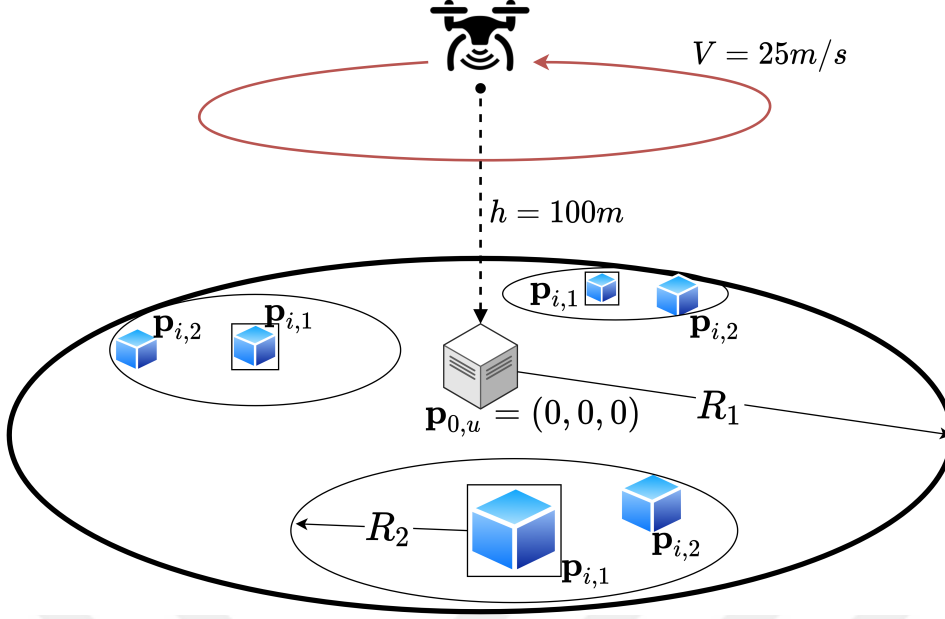


6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, bir sensör ağında veri toplama görevi ile veri merkezinden harekete geçecek olan ve bütün sensörleri gezdikten sonra veri merkezine geri dönen bir İHA'nın gideceği yolu farklı yaklaşımlar ile optimale yakın bulan Algoritma.1 ve Algoritma.2 için performans analizleri yapılmaktadır. Algoritma.1 ve Algoritma.2 çoklu erişim kanalı kullanarak, sırasıyla haberleşme süresini azaltan ve İHA'nın gideceği yolu azaltan iki farklı yaklaşım ile tasarlanmıştır. Bu algoritmalar, toplamda dört farklı sonuç ile karşılaştırılacaktır. Bunlardan ikisi Bölüm.5.3 kapsamındaki zaman paylaşımı ile haberleşen, Algoritma.1 ve Algoritma.2 yörüngelerini kullanan farklı haberleşme modeli yaklaşımıdır. Üçüncüsü ise Bölüm.4.1 ile anlatılan ikili sensör grubu yaklaşımı yerine, İHA'nın veri toplama işlemini sensörleri tek tek gezerek yaptığı ve tek kullanıcıli haberleşme modeli kullanılan algoritmadır [30, Algorithm 1]. Problem 4.13 ile tanımlanan eniyileme probleminin çözümü bir alt sınır tanımlamaktadır ve "brute-force" şekilde çözülmüştür. Son olarak ise bütün bu algoritmaların performansları bu alt sınır ile karşılaştırılmıştır.

6.1 Test Düzenegi

Simülasyonlarda, İHA (0,0,0) konumunda olan veri merkezinden yola çıkmakta ve sensörleri ziyaret ettikten sonra veri merkezine geri dönmektedir. Yapılan testlerde kullanılan sayısal değerler Tablo 6.1 ile verilmiştir. Bütün sensörler için paket uzunlukları aynı seçilmiştir $\tau_{i,j} = \tau$ ve yapılan simülasyonlarda farklı değerler verilerek sayısal sonuçlar kısmında gösterilmiştir. Sensör ağındaki bütün sensörler $s_{i,1}, i = 1, \dots, N$, veri merkezinin etrafında $R_1 = 1000$ m yarıçapı ile dairesel düzgün dağılım ile konumlandırılmıştır. i . sensör grubu için gruptaki diğer sensör olan $s_{i,2}$ R_2 yarıçapa sahip olan, merkezi ilk sensörün konumu olan $\mathbf{p}_{i,1}$ ikinci bir daire içinde dairesel düzgün dağılım ile konumlandırılmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1: Simülasyonlar için üretilen test düzeneği gösterimi.

Bu yaklaşım ile R_2 değerinde yapılan değişiklikler gruptaki sensörler arası uzaklık değeri değişken olmasına imkan sağlamış ve sayısal sonuçlar kısmında farklı yaklaşıma sahip sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan simülasyonlar rastgele üretilmiş 50 farklı grafiğin ortalaması alınarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.1: Test Düzeneği Sayısal Değerleri

h	100m
V	25 m/sn
B	200 KHz
β	-60 dB
$P_{i,j}$	0.1 watt
N_0	-90 dBm
R_1	1000 m

6.2 Sayısal Sonuçlar

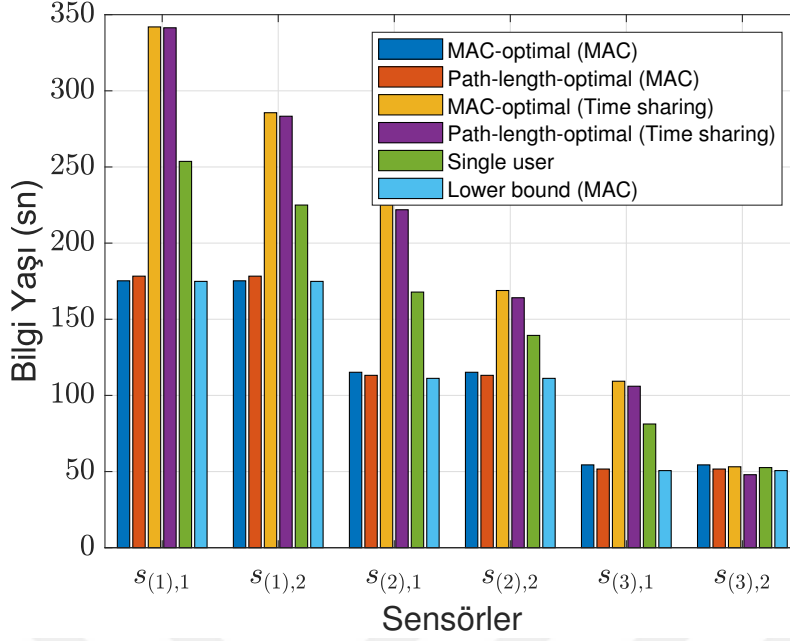
Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 bar grafikleri ile yaptığımız testlerin sayısal sonuçları gösterilmiştir. Şekillerde bulunan "MAC-optimal (MAC)" ve "Path-length-optimal (MAC)" isimli sonuçlar sırasıyla Bölüm 5 içinde anlatılan Algoritma 1 ve Algoritma 2 algoritmalarının sonuçlarını ifade etmektedir. Benzer şekilde, "MAC-

optimal (time sharing)" ve "Path-length-optimal (time sharing)", İHA'nın sırasıyla Algoritma.1 ve Algoritma.2 yörüngelerini kullanan ve Bölüm 5.3 kapsamında anlatılan zaman paylaşımı ile haberleşme yapan bilgi yaşı sonuçlarıdır. Diğer bir sonuç olarak şekillerde görülen "Single user", tasarlanan algoritmaların karşılaştırılması için kullanılan ve İHA'nın her sensörleri tek tek gezdiği durumun [30, Algorithm 1] sonucudur. Son olarak ise algoritmalar için alt sınırı tanımlayan "Lower bound" sonucu, Problem 4.13 ile tanımlanan eniyileme probleminin "brute-force" çözümüdür.

Sayısal sonuçlar temelde üç farklı kısma ayrılmıştır. Bu kısımlarda farklı senaryolar test edilmiş ve farklı durumların baskınlıklarına karşı algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır. Bunlar, haberleşme süresinin, yol uzunluğunun ve haberleşmedeki yol kaybının baskın olduğu senaryolardır. Bu senaryolar arasındaki baskınlıklar ise R_2 yarıçapını ve τ paket uzunluğunu değiştirilerek elde edilmiştir.

6.2.1 Haberleşme süresi baskın senaryo

Şekil 6.2 sonucunda, $R_2 = 50$ m and $\tau = 750$ Kbits olarak seçilmiştir. En yüksek bilgi yaşı parametresinin azaltıldığı en iyi sonucun Algoritma. 1 tarafından gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Burada Algoritma. 1 neredeyse alt sınıra erişmektedir. Bu iki algoritma zaman paylaşımı senaryoları ve tekli kullanıcı durumu ile karşılaştırıldığında, Algoritma. 1 ve Algoritma. 2 hem haberleşme süresi için hem de yol uzunluğu adına büyük kazançlar sağladığını göstermişlerdir. Şekil 6.2 içerisinde en kötü performans zaman paylaşımli şemalar için elde edilmiştir, yani iletişim süresi oldukça önemlidir ve üstün performans elde etmek için çoklu erişim iletişimleri kesinlikle gereklidir. Tek kullanıcı durumu, çoklu erişim iletişimleri ve zaman paylaşım şemaları arasındadır. Bu senaryo bir yandan yol uzunluğunu arttırırken diğer yandan haberleşme süresini kısaltır. İHA her bir sensör üzerinde ayrı ayrı gezindiği için uçuş süresi uzar. Ancak İHA, sensörlerin hemen üzerinde olduğundan, yol kaybı minimum olmasıyla mümkün olan en yüksek tek kullanıcı aktarım hızlarıyla haberleşir.



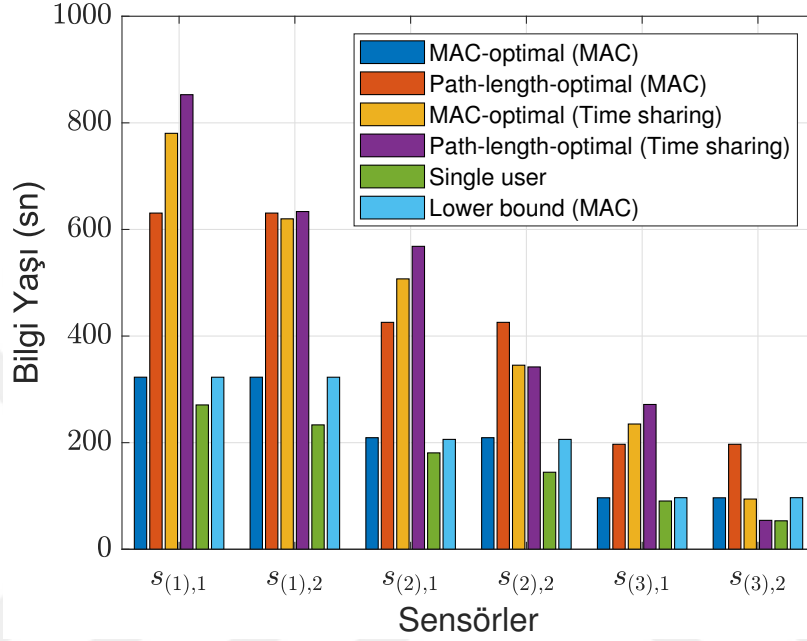
Şekil 6.2: Sensörlerdeki AoI değerleri ($R_2 = 50$ m, and $\tau = 750$) Kbits.

6.2.2 Yol kaybı baskın senaryo

Bu kısımda yol kaybının baskın olduğu senaryonun yaratılması için Bölüm 6.2.1 ile anlatılan haberleşme süresinin baskın olduğu senaryodan farklı olarak ikinci dairenin yarıçapı olan $R_2 = 300$ olarak değiştirilmiş ve diğer değerler aynı tutulmuştur. R_2 yarıçapının değişimi ile sensörlerin dağıtıldığı R_1 yarıçaplı dairesel alan sabit kalırken, sensör gruplarındaki grup elemanları arasındaki mesafelerin artırılması hedeflenmiş ve İHA'nın veri toplamak için gelip havada duracağı doğru parçasının uzunluğu artmış oldu. Sonuç olarak, İHA ve sensörler arasındaki haberleşme mesafeleri de arttığından, haberleşmedeki yol kaybı etkisi artmış oldu.

Şekil 6.3 ile gösterilen sonuç ise bu yol kaybının baskın olduğu senaryonun performans analizine aittir. Sensörlerin arasındaki mesafenin artmasıyla, haberleşme süresi Şekil 6.2 ile gösterilen sonuca göre oldukça artmıştır. Bunun sonucu olarak ise doğal olarak sistem olabilecek en yüksek haberleşme süresinin olduğu durumları öne çıkarmıştır. Böylece, tekli kullanıcı haberleşme, sensör-İHA arasındaki uzaklık en küçük olduğu için en iyi performansa sahiptir. Zaman paylaşımı kullanan sonuçlar ise en kötü performansa sahiptir, çünkü hem zaman paylaşımı hem de haberleşmedeki

yol kaybı kötü etki yaratmıştır. Algoritma 2, yol açısından yaptığı eniyileme ile bazı kayıpları kurtartmaktadır ama kazanç yeterli değildir. Bunun yanında Algoritma 1 tekli kullanıcıya göre daha kısa yol gitmesi ve yola göre yapılan eniyilemeye göre daha iyi haberleşmesi ile biraz daha fazla kaybı kurtarmıştır. Aynı zamanda Algoritma 1 çoklu erişim kanalı için alt sınır tanımlayan "Lower bound (MAC)" sonucuna yaklaşmıştır.



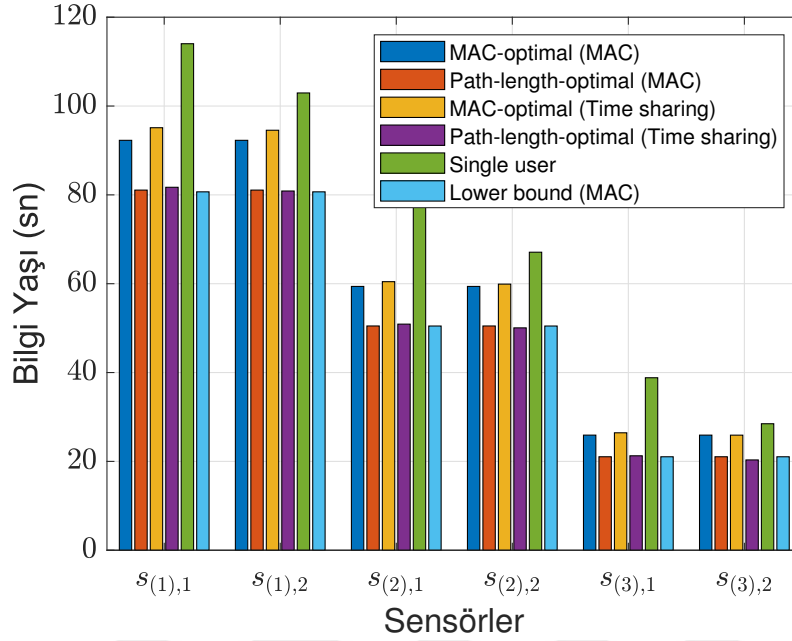
Şekil 6.3: Sensörlerdeki AoI değerleri ($R_2 = 300$ m, and $\tau = 750$ Kbits).

6.2.3 Yol uzunluğu baskın senaryo

Bu kısımda yol uzunluğuna harcanacak olan sürenin baskın olmasını sağlayacak bir senaryo kurulması amaçlanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için Bölüm 6.2.2 için seçilen değerlerden sadece paket uzunlukları $\tau = 2.5$ Kbits olarak değiştirilmiştir. Böylece, önceki senaryodaki durumdan farklı olarak daha kısa haberleşme süreleri ile gidilecek yol daha baskın bir kriter olacaktır.

Şekil 6.4 ile gösterilen sonuçlar yol uzunluğunun baskın olduğu senaryo için yapılan performans analizini yansıtmaktadır. Burada Şekil 6.3 ile karşılaştırıldığında paket uzunlukları çok yüksek derecede azaltılmıştır ve toplam yol uzunluğu artık haberleşme süresinden daha önemli hale gelmiştir. Böylece, Algoritma 2 diğer sonuçlara göre

daha iyi performans göstermiş ve neredeyse alt sınıra erişmiştir. Paket uzunlukları



Şekil 6.4: Sensörlerdeki AoI değerleri ($R_2 = 300$ m, and $\tau = 2.5$ Kbits).

daha kısa olduğu için, yolu eniyileyen algoritmalar hem çoklu erişim kanalı ile yapılan haberleşmede hem de zaman paylaşımı ile yapılan haberleşmede, çoklu erişim kanalına göre eniyileme yapan algoritmaları hem çoklu erişim kanalı ile yapılan haberleşmede hem de zaman paylaşımı ile yapılan haberleşmede geçmiştir. Sensörler yeterince birbirine yakın olduğundan, Algoritma 2 çoklu erişim kanalından da kazanç sağlamaktadır ki aynı yolu takip eden zaman paylaşımı sürelerini geçmiştir. Yol uzunluğu baskın olduğu için tek kullanıcı haberleşme en kötü performansa sahiptir.

6.3 Çıkarımlar

Bu çalışmada, bir sensör ağında İHA destekli veri toplama için maksimum bilgi yaşı parametresi incelenmiştir. Sensörlerin ikili gruplar oluşturduğu varsayılmaktadır ve İHA her grupta çoklu erişim kanalı aracılığıyla iletişim kurmaktadır. Veri toplamak için İHA, her gruptaki iki sensörü birleştiren doğru parçası üzerindeki bir noktanın üzerinde havada durmaktadır. İlk algoritmada bu nokta haberleşme zamanını eniyileyen nokta olarak seçilirken, ikinci algoritmada yol uzunluğunu en

aza indiren nokta seçilmektedir. Algoritmalar, zaman paylaşımli karşılıklarıyla ve ayrıca tek kullanıcı durumuyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, paket uzunlukları büyük olduğunda ve haberleşmedeki yol kaybı çok yüksek olmadığında, haberleşme süresinin baskın olduğunu ve çoklu erişim kanalına göre eniyileme yapan algoritmanın en iyi performansı elde ettiğini göstermektedir. Paket uzunlukları kısa olduğunda, sensör grupları arasında en kısa yolu takip etmek en iyi performansa sahiptir.

6.4 Gelecek Çalışmalar

Önerilen algoritmalar bu çalışmada kapsama alınmayan ve ileriki çalışmalarda uygulanmasına bir engel görülmeven, sensörler için güç kontrolünü içerebilir. Bu çalışmada gruplanan sensörlerdeki grup elemanı sayısı iki olarak sabit seçilmişti, bunun karşın değişken grup boyutları ve yeni kümeleme algoritmaları da umut verici araştırma yönleridir. İHA yörünge tasarımı, İHA yüksekliği ve uçuş hızı da dahil olmak üzere birçok değişkeni olan karmaşık bir problemdir. Genel olarak, üstün performans için üç boyutlu bir yörünge düşünülerek bir tasarım yapılması bu konudaki yeni çalışmalarda dikkate alınmalıdır.



KAYNAKLAR

- [1] **Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Young-Han Nam, and Mérouane Debbah.** "A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems", *IEEE communications surveys & tutorials*, 21(3):2334–2360, 2019.
- [2] **Mustafa Kishk, Ahmed Bader, and Mohamed-Slim Alouini.** "Aerial Base Station Deployment in 6G Cellular Networks using Tethered drones: The Mobility and Endurance Tradeoff", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(4):103–111, 2020.
- [3] **Jiangbin Lyu, Yong Zeng, and Rui Zhang.** "Cyclical Multiple Access in UAV-Aided Communications: A Throughput-Delay Tradeoff", *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(6):600–603, 2016.
- [4] **Dong Wang and Yanping Yang.** "Joint Obstacle Avoidance and 3D Deployment for Securing UAV-Enabled Cellular Communications", *IEEE Access*, 8:67813–67821, 2020.
- [5] **Momena Monwar, Omid Semiari, and Walid Saad.** "Optimized Path Planning for Inspection by Unmanned Aerial Vehicles Swarm with Energy Constraints", In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [6] **Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, and Mérouane Debbah.** "Optimal Transport Theory for Cell Association in UAV-Enabled Cellular Networks", *IEEE Communications Letters*, 21(9):2053–2056, 2017.

- [7] **Vishal Sharma, Mehdi Bennis, and Rajesh Kumar.** "UAV-assisted Heterogeneous Networks for Capacity Enhancement", *IEEE Communications Letters*, 20(6):1207–1210, 2016.
- [8] **Phuc Dinh, Tri Minh Nguyen, Sanaa Sharafeddine, and Chadi Assi.** "Joint Location and Beamforming Design for Cooperative UAVs With Limited Storage Capacity", *IEEE Transactions on Communications*, 67(11):8112–8123, 2019.
- [9] **Dinh-Hieu Tran, Symeon Chatzinotas, and Björn Ottersten.** "Satellite-and Cache-assisted UAV: A Joint Cache Placement, Resource Allocation, and Trajectory Optimization for 6G Aerial Networks", *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 3:40–54, 2022.
- [10] **Shidrokh Goudarzi, Nazri Kama, Mohammad Hossein Anisi, Sherali Zeadally, and Shahid Mumtaz.** "Data collection using unmanned aerial vehicles for Internet of Things platforms", *Computers & Electrical Engineering*, 75:1–15, 2019.
- [11] **Moataz Samir, Sanaa Sharafeddine, Chadi M Assi, Tri Minh Nguyen, and Ali Ghrayeb.** "UAV Trajectory Planning for Data Collection from Time-Constrained IoT Devices", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(1):34–46, 2019.
- [12] **Valentin-Alexandru Vladuta, Ana-Maria Ghimes, Constantin Grumazescu, and Victor-Valeriu Patriciu.** "Trajectory influence on data collection in Wireless Sensor Networks using an Unmanned Aerial Vehicle", In *2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [13] **Changsheng You and Rui Zhang.** "3D Trajectory Optimization in Rician Fading for UAV-Enabled Data Harvesting", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(6):3192–3207, 2019.
- [14] **Hassan Daryanavard and Abbas Harifi.** "UAV Path Planning for Data Gathering of IoT Nodes: Ant Colony or Simulated Annealing Optimization. In 2019

3rd, *International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, pages1–4. IEEE, 2019.

- [15] **Sotheara Say, Hikari Inata, Jiang Liu, and Shigeru Shimamoto.** "Priority-Based Data Gathering Framework in UAV-Assisted Wireless Sensor Networks", *IEEE Sensors Journal*, 16(14):5785–5794, 2016.
- [16] **Cheng Zhan, Yong Zeng, and Rui Zhang.** "Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network", *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(3):328–331, 2017.
- [17] **Dingcheng Yang, Qingqing Wu, Yong Zeng, and Rui Zhang.** "Energy Tradeoff in Ground-to-UAV Communication via Trajectory Design", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(7):6721–6726, 2018.
- [18] **Ahmed EAA Abdulla, Zubair Md Fadlullah, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Fumie Ono, and Ryu Miura.** "An optimal data collection technique for improved utility in UAS-aided networks", In *IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications*, pages 736–744. IEEE, 2014.
- [19] **Jie Gong, Tsung-Hui Chang, Chao Shen, and Xiang Chen.** "Aviation time minimization of UAV for data collection from energy constrained sensor networks", In *IEEE WCNC*, pages 1–6, 2018.
- [20] **Jiaying Zong, Chao Shen, Jing Cheng, Jie Gong, Tsung-Hui Chang, Lei Chen, and Bo Ai.** "Flight time minimization via UAV's trajectory design for ground sensor data collection", In *16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pages 255–259, 2019.
- [21] **Sanjit Kaul, Roy Yates, and Marco Gruteser.** "Real-time status: How often should one update?", In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 2731–2735. IEEE, 2012.
- [22] **Sanjit Kaul, Marco Gruteser, Vinuth Rai, and John Kenney.** "Minimizing age of information in vehicular networks", In *2011 8th Annual IEEE communications*

- society conference on sensor, mesh and ad hoc communications and networks*, pages 350–358. IEEE, 2011.
- [23] **Yin Sun, Elif Uysal-Biyikoglu, Roy D Yates, C Emre Koksal, and Ness B Shroff.** "Update or Wait: How to Keep Your Data Fresh", *IEEE Transactions on Information Theory*, 63(11):7492–7508, 2017.
- [24] **Clement Kam, Sastry Kompella, and Anthony Ephremides.** "Age of information under random updates", In *2013 IEEE International Symposium on Information Theory*, pages 66–70. IEEE, 2013.
- [25] **Longbo Huang and Eytan Modiano.** "Optimizing Age-of-Information in a Multi-class Queueing System", In *2015 IEEE international symposium on information theory (ISIT)*, pages 1681–1685. IEEE, 2015.
- [26] **Elif Tuğçe Ceran, Deniz Gündüz, and András György.** "Çverage Çge Çf Information Çith Çybrid ÇRQ Çnder a Çesource Çconstraint", *IEEE Transactions on Wireless Aommunications*, Ç8(3):1900–1913, Ç019.
- [27] **Abubakr Alabbasi and Vaneet Aggarwal.** "Joint Information Freshness and Completion Time Optimization for Vehicular Networks", *IEEE Transactions on Services Computing*, 2020.
- [28] **Baran Tan Bacinoglu, Elif Tugce Ceran, and Elif Uysal-Biyikoglu.** "Age of information under energy replenishment constraints", In *2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, pages 25–31. IEEE, 2015.
- [29] **Elif Tuğçe Ceran, Deniz Gündüz, and András György.** "Ç Çeinforcement Learning Çpproach Ço Çge Çf Çnformation Çn Multi-User Networks", Çn *A018 IEEE A9th Annual Anternational Aymposium An Aersonal, Andoor And Aobile Radio Aommunications APIMRC*), Çages Ç967–1971. ÇEEE, Ç018.
- [30] **Juan Liu, Xijun Wang, Bo Bai, and Huaiyu Dai.** "Age-optimal trajectory planning for UAV-assisted data collection", In *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 553–558, 2018.

- [31] **Peng Tong, Juan Liu, Xijun Wang, Bo Bai, and Huaiyu Dai.** "UAV-Enabled Age-Optimal Data Collection in Wireless Sensor Networks", In *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [32] **Zekun Jia, Xiaoqi Qin, Zijing Wang, and Baoling Liu.** "Age-based Path Planning and Data Acquisition in UAV-Assisted IoT Networks", In *IEEE ICC Workshops*, pages 1–6, 2019.
- [33] **Ghafour Ahani, Di Yuan, and Yixin Zhao.** "Age-Optimal UAV Scheduling for Data Collection with Battery Recharging", *arXiv preprint arXiv:2005.00252*, 2020.
- [34] **Huimin Hu, Ke Xiong, Gang Qu, Qiang Ni, Pingyi Fan, and Khaled Ben Letaief.** "AoI-Minimal Trajectory Planning and Data Collection in UAV-Assisted Wireless Powered IoT Networks", *IEEE Internet of Things Journal*, 8(2):1211–1223, 2020.
- [35] **Tien-Dung Nguyen, Duc-Tai Le, Nguyen Pham-Van, Hyunseung Choo, and Tien Pham Van.** "UAV-aided Sensory Data Aggregation: Incremental Clustering and Scheduling Approach", In *ACM IMCOM*, pages 1–5, 2021.
- [36] **Yue Wang, Zhiqun Hu, Xiangming Wen, Zhaoming Lu, and Jiansong Miao.** "Minimizing Data Collection Time with Collaborative UAVs in Wireless Sensor Networks", *IEEE Access*, 8:98659–98669, 2020.
- [37] **Guangyu Zhu, Li Guo, Chao Dong, and Xidong Mu.** "Mission Time Minimization for Multi-UAV-Enabled Data Collection with Interference", In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, 2021.
- [38] **Wei Wang, Nan Zhao, Li Chen, Xin Liu, Yunfei Chen, and Dusit Niyato.** "Time-Efficient Uplink Data Collection for UAV-assisted NOMA networks", In *IEEE WCNC*, pages 1–6, 2021.
- [39] **Fangyu Cui, Yunlong Cai, Zhijin Qin, Minjian Zhao, and Geoffrey Ye Li.** "Multiple Access for Mobile-UAV Enabled Networks: Joint Trajectory Design

- and Resource Allocation", *IEEE Transactions on Communications*, 67(7):4980–4994, 2019.
- [40] **Xidong Mu, Yuanwei Liu, Li Guo, Jiaru Lin, and Zhiguo Ding.** "Energy-Constrained UAV Data Collection Systems: NOMA and OMA", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(7):6898–6912, 2021.
- [41] **Yuanpeng Liu and Elza Erkip.** "Completion Time in Two-User Channels: An Information-Theoretic Perspective", *IEEE Transactions on Information Theory*, 63(5):3209–3223, 2017.
- [42] **Mohamed A Abd-Elmagid, Aidin Ferdowsi, Harpreet S Dhillon, and Walid Saad.** "Deep Reinforcement Learning for Minimizing Age-of-Information in UAV-assisted Networks", In *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [43] **Mengjie Yi, Xijun Wang, Juan Liu, Yan Zhang, and Bo Bai.** "Deep Reinforcement Learning for Fresh Data Collection in UAV-assisted IoT Networks", In *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 716–721. IEEE, 2020.
- [44] **Sarder Fakhru l Abedin, Md. Shirajum Munir, Nguyen H. Tran, Zhu Han, and Choong Seon Hong.** "Data Freshness and Energy-Efficient UAV Navigation Optimization: A Deep Reinforcement Learning Approach", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(9):5994–6006, 2021.
- [45] **Andrea Goldsmith.** "*Wireless Communications*", Cambridge University Press, 2005.
- [46] **Thomas M. Cover and Joy A. Thomas.** "*Elements of Information Theory*", Wiley-Interscience, 2006.