

**YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMLERİNDE HÜZME
OLUŞTURMANIN BAŞARIM ANALİZİ**

**PERFORMANCE ANALYSIS OF BEAMFORMING FOR
HIGH ALTITUDE PLATFORM SYSTEMS**

SAMED SOĞANCI

Dr. Öğr. Üy. Barış YÜKSEKKAYA

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMLERİNDE HÜZME OLUŞTURMANIN BAŞARIM ANALİZİ

Samed SOĞANCI

Yüksek Lisans Tezi, ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üy. Barış YÜKSEKKAYA

Eylül 2024, 114 sayfa

Yüksek İrtifa Platform Sistemleri (High Altitude Platform Systems, HAPS), stratosferde, genellikle 20 km yükseklikte konumlandırılan insansız hava araçları, balonlar veya uçaklar gibi platformlardan oluşan iletişim sistemleridir. Bu platformlar, geniş bir coğrafi alanı kapsayacak şekilde iletişim, gözlem ve veri toplama hizmetleri sunar. HAP sistemleri genellikle belirli bir bölge üzerinde sabitlenmiş şekilde çalışmaktadır ve hedef bölgede yüksek kaliteli geniş bant iletişim hizmetleri sunmaktadırlar.

Bu tezde, HAP sistemlerinin stratejik ve özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde konumlandırılması hedeflenmiştir. Konumlandırma sürecinde, kapsama alanı gereksinimleri ve kullanıcı talepleri gibi faktörler dikkate alınmıştır. Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) kullanılarak, hedef bölgedeki kapsama alanı maksimize edecek ve yoğun nüfuslu bölgelerdeki kullanıcı taleplerini en iyi şekilde karşılayacak HAP sistemi konumları belirlenmiştir. Konumlandırılması yapılmış bir HAP sisteminde, kullanıcıların gruplara ayrılması hedeflenmiş ve uygun hüzme oluşturma ve yönlendirme tekniği kullanılarak kullanıcılara hizmet sağlanması amaçlanmıştır. Hizmet verilen kullanıcıların gruplandırılması için Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekansal Kümelmesi (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN) ve K-Means algoritmaları kullanılırken, kullanıcı talebinin karşılanması ve HAP sisteminin hizmet için harcadığı güç miktarının minimize edilmesi NSGA-II ve Çok Amaçlı Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) algoritmalarıyla sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: HAPS, NSGA-II, MOPSO, DBSCAN, K-Means, Kümeleme, Konumlandırma, Hüzme Oluşturma

ABSTRACT
**PERFORMANCE ANALYSIS OF BEAMFORMING FOR HIGH ALTITUDE
PLATFORM SYSTEMS**

Samed SOĞANCI

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Barış YÜKSEKKAYA

June 2024, 114 pages

High Altitude Platform Systems (HAPS) are communication systems composed of platforms such as unmanned aerial vehicles, balloons, or aircraft, typically positioned in the stratosphere at an altitude of around 20 km. These platforms provide communication, observation, and data collection services over a wide geographical area. HAP systems generally operate in a fixed position over a specific region, delivering high-quality broadband communication services to the target area.

In this thesis, the aim is to deploy HAPS in strategic and densely populated regions. During the deployment process, factors such as coverage requirements and user demands were considered. Using the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), the HAPS locations that maximize coverage in the target area and best meet the user demands in densely populated regions were determined. In a HAP system that has been positioned, it is aimed to divide users into groups and provide services to users using the appropriate beam generation and orientation technique. In order to cluster users, the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) and K-Means algorithms were employed, while the NSGA-II and Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithms were utilized to meet user demands and minimize the power consumption of the HAP system for service provision.

Keywords: HAPS, NSGA-II, MOPSO, DBSCAN, K-Means, Clustering, Deployment, Beamforming

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen, engin bilgi birikimi ve geniş vizyonu ile her zaman yol göstericim olan değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Barış YÜKSEKKAYA'ya,

Her zaman koşulsuz desteğini hissettiğim babam Salih SOĞANCI, annem Ümmügülsüm SOĞANCI, abim Bayram SOĞANCI ve kardeşim Sude Nur SOĞANCI'ya,

Teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Katkıları	2
1.2. Organizasyon	2
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Yüksek İrtifa Platform Sistemi Nedir?	3
2.1.1. HAP Sistemlerinin Bileşenleri	8
2.1.1.1. Karasal Olmayan Bölüm	8
2.1.1.2. Karasal Bölüm	9
2.1.2. HAP Sistemleri İçin Enerji Yönetimi	9
2.1.3. HAP Sistemleri İçin Önerilen Kanal Modelleri	10
2.1.4. HAP Sistemlerinin Konumlandırılması	11
2.1.5. HAP Sistemlerinde Anten Teknolojisi ve Girişim Yönetimi	12
2.2. Hüzme Nedir?	13
2.2.1. Hüzme Oluşturma Teknikleri	14
2.2.2. Anten Dizileri	16
2.3. Eniyileme (Optimizasyon) Nedir?	19
2.3.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları	20
2.3.1.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları Türleri	23
2.3.1.1.1. Evrimsel Algoritmalar	23

2.3.1.1.2.	Sürü Zekâsı Tabanlı Algoritmalar:	23
2.3.1.1.3.	Çoklu Popülasyon ve Çoğulluk Temelli Yöntemler:	23
2.3.1.1.4.	Pareto Temelli Metotlar:.....	24
2.3.1.2.	NSGA-II.....	24
2.3.1.3.	MOPSO.....	26
2.3.1.4.	NSGA-II ve MOPSO Karşılaştırması.....	28
2.4.	Kümeleme Algoritmaları	30
2.4.1.	K-Means Kümeleme Algoritması.....	31
2.4.2.	DBSCAN Algoritması	33
3.	LİTERATÜR TARAMASI	36
3.1.	HAP Sistemlerinin Konumlandırılması.....	36
3.2.	HAP Sistemlerinde Hüzme Oluşturma/Yönlendirme	39
3.3.	HAP Sistemlerinde Kullanıcı Gruplama.....	46
4.	HAP SİSTEMLERİNİN KONUMLANDIRILMASI VE KULLANICILARIN GRUPLANMASI	52
4.1.	Konumlandırma	52
4.1.1.	HAP Sistemlerinin Konumlandırılmasının Önemi	52
4.1.2.	Aşağı Yönlü Performans Hesaplama Modeli.....	53
4.1.2.1.	Tek HAP Sitemi İçin CNR	54
4.1.2.2.	Çoklu HAP Sistemi İçin CINR	55
4.1.2.2.1.	Girişim Sinyalinin Güç Seviyesi	55
4.1.2.2.2.	Kullanıcı Anteninın Işıma Kazancı Modeli.....	56
4.1.2.2.3.	Aşağı Yönlü Kullanıcı CINR Değeri.....	56
4.1.2.2.4.	Toplam Bant Genişliği Verimliliği	57
4.1.3.	Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli ve Algoritması	57
4.2.	Kullanıcıların Gruplandırılması	60
4.2.1.	Çalışmanın Önemi	60

4.2.2.	HAP Sisteminin Anten Örüntüsü	61
4.2.3.	Sistemin Kapsama Koşulları	62
4.2.4.	SNR ve SINR Hesaplanması	62
4.2.5.	Hüzme Parametreleri	63
4.2.6.	Hüzme Parametreleri Sınırları	64
4.2.7.	Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli ve Algoritması	65
5.	BENZETİMLER VE ANALİZLER	67
5.1.	Konumlandırma Benzetim ve Analiz Sonuçları.....	67
5.2.	Kullanıcı Gruplama Benzetim ve Analiz Sonuçları	74
6.	SONUÇ	94
7.	KAYNAKLAR	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2-1 HAP Sisteminin Genel Yapısı	3
Şekil 2-2 HAP Sistemlerinin Kapsama Alanı.....	7
Şekil 2-3 a) Eliptik şekilli tek tip ayak izi modeli (367 ışın); b) Dairesel şekilli çok bölgeli ayak izi modeli (397 ışın).....	13
Şekil 2-4 Bir Boynuz Anten İçin E ve H Düzlem Modeli [31]	13
Şekil 2-5 Dijital Hüzme Oluşturma [27]	15
Şekil 2-6 Analog Hüzme Oluşturma [27].....	15
Şekil 2-7 Hibrit Hüzme Oluşturma [27].....	16
Şekil 2-8 Doğrusal Dizi [28]	16
Şekil 2-9 Düzlemsel Dizi [28]	17
Şekil 2-10 Dairesel Dizi [28].....	17
Şekil 2-11 Küresel Dizi [28].....	18
Şekil 2-12 Konik Dizi [28].....	18
Şekil 2-13 Üç Boyutlu Dizi [28]	19
Şekil 2-14 Fazlı Anten Dizisi [32]	19
Şekil 2-15 Pareto Cephesi [37]	21
Şekil 2-16 NSGA-II Algoritmasının Genel Şeması [36]	24
Şekil 2-17 Kalabalık Uzaklığı Hesaplama (İçi dolu daireler baskılanamayan çözümleri ifade etmektedir.) [36].....	25
Şekil 2-18 Çaprazlama-Mutasyon [38].....	25
Şekil 2-19 K-Means Algoritmasının Adımları [43]	32
Şekil 2-20 K-Means ve DBSCAN Algoritmalarının Kümeleme Sonuçları [45].....	34
Şekil 4-1 HAP Sistemlerinde Tekli ve Çoklu Kapsama	53
Şekil 4-2 Bir anten deseni örneği (dikey ve yatay polarizasyon) [75]	62
Şekil 5-1 Türkiye Nüfus Yoğunluğu Haritası	69
Şekil 5-2 HAP Sistemlerinin Kapsaması	69
Şekil 5-3 Rastgele HAP Sistemi Konumları ve Toplam Bant Genişliği Verimliliği	70
Şekil 5-4 HAP Sistemlerinin İlk Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 10).....	71
Şekil 5-5 HAP Sistemlerinin Son Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 10)....	71
Şekil 5-6 HAP Sistemlerinin İlk Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 20).....	72
Şekil 5-7 HAP Sistemlerinin Son Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 20)....	72
Şekil 5-8 HAP Sistemlerinin İlk Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 40).....	73

Şekil 5-9 HAP Sistemlerinin Son Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 40)	73
Şekil 5-10 HAP sistemlerinin ilk konumları ve Pareto cephesi (HAP sayısı: 80)	73
Şekil 5-11 HAP sistemlerinin son konumları ve Pareto cephesi (HAP sayısı: 80)	74
Şekil 5-12 Nüfus Yoğunluğu ve DBSCAN Kümeleme Sonucu (Manisa)	78
Şekil 5-13 K-Means Kümeleme Sonucu (Manisa)	78
Şekil 5-14 NSGA-II Pareto Cephesi (Manisa)	79
Şekil 5-15 MOPSO Pareto Cephesi (Manisa)	80
Şekil 5-16 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Manisa)	81
Şekil 5-17 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Manisa)	81
Şekil 5-18 MOPSO Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Manisa)	82
Şekil 5-19 MOPSO Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Manisa)	82
Şekil 5-20 Hüzmelerin İlk Konumları ve Şekilleri (Manisa)	83
Şekil 5-21 Hüzmelerin Son Konumları ve Şekilleri (Manisa) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)	83
Şekil 5-22 Hüzme Güçleri (Manisa) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)	84
Şekil 5-23 Nüfus Yoğunluğu ve DBSCAN Kümeleme Sonucu (Samsun)	87
Şekil 5-24 K-Means Kümeleme Sonucu (Samsun)	88
Şekil 5-25 NSGA-II Pareto Cephesi (Samsun)	88
Şekil 5-26 MOPSO Pareto Cephesi (Samsun)	89
Şekil 5-27 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Samsun)	90
Şekil 5-28 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Samsun)	90
Şekil 5-29 MOPSO Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Samsun)	91
Şekil 5-30 MOPSO Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Samsun)	91
Şekil 5-31 Hüzmelerin İlk Konumları ve Şekilleri (Samsun)	92
Şekil 5-32 Hüzmelerin Son Konumları ve Şekilleri (Samsun) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)	92
Şekil 5-33 Hüzme Güçleri (Samsun) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2-1 Karasal-Uydu-HAP Sistemlerinin Karşılaştırılması	4
Çizelge 2-2 Örnek Amaç Fonksiyonu [37]	21
Çizelge 2-3 DBSCAN Algoritmasının Parametreleri	33
Çizelge 4-1 Konumlandırma Eniyileme Algoritması	59
Çizelge 4-2 Anten Hüzme Parametreleri	64
Çizelge 4-3 Kullanıcı Kümeleme ve Güç Tüketimi Optimizasyonu Algoritması	66
Çizelge 5-1 Konumlandırma Benzetim Parametreleri	67
Çizelge 5-2 Konumlandırma Problemi- NSGA-II Parametre Seti	71
Çizelge 5-3 DBSCAN Parametreleri	74
Çizelge 5-4 Kullanıcı Gruplama Problemi- NSGA-II Parametre Seti	75
Çizelge 5-5 Kullanıcı Gruplama Problemi- MOPSO Parametre Seti	76
Çizelge 5-6 Benzetim Parametreleri	77
Çizelge 5-7 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Manisa) (NSGA-II)	84
Çizelge 5-8 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Manisa) (MOPSO)	85
Çizelge 5-9 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Samsun) (NSGA-II)	86
Çizelge 5-10 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Samsun) (MOPSO) ..	86

KISALTMALAR

Kısaltmalar

HAP	High Altitude Platform
GEO	Geostationary Earth Orbit
dB	Decibell
ITU-R	International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector
WRC	World Radio Conference
FSS	Fixed Satellite Service
UL	Up-Link
DL	Down-Link
IMT	International Mobile Telecommunications
GS	Ground Station
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
IoT	Internet Of Things
LOS	Line Of Sight
MIMO	Multiple Input – Multiple Output
DAC	Digital To Analog Converter
ADC	Analog To Digital Converter
RF	Radio Frequency
CSI	Channel State Information
ERBD	Epigraph-Relax-Bisection-Decomposition
UE	User Equipment
QCQP	Quadratically Constraint Quadratic Programming
SDR	Semi-Definite Relaxation
CIR	Carrier to Interference Ratio
WCDMA	Wide-Band Code-Division Multiple-Access

W	Watt
CRA	Concentric Ring Array
GW	Gateway
LSTM	Long Short-Term Memory
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response
LS	Least Square
MSE	Mean Square Error
BER	Bit Error Rate
SE	Statiscal Eigenmode
OBF	Opportunistic Beamforming
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
PCC	Polar-Cap Codebook
NLOS	Non Line of Sight
CMD	Correlation Matrix Distance
BD	Block Diagonalization
ZF	Zero Forcing
RSAP	Restricted Spatial Adaptive Play
VMIMO	Virtual Multiple Input Multiple Output
GA	Genetic Algorithm
BLER	Block Error Rate
MCS	Modulation and Coding Scheme

1. GİRİŞ

Geniş bant mobil iletişim talebinin artması hem karasal hem de uydu tabanlı kablosuz ağların başarılı ve hızlı bir şekilde yaygınlaşmasına yol açmıştır. Bu modern kablosuz ağlar, yüksek veri hızları sunmanın yanı sıra, düşük maliyetli, yeniden yapılandırılabilir, zamana ve mekâna göre değişen kapsama alanı sağlayabilen özelliklere sahiptir. Bu iki yaygın kablosuz iletişim yöntemiyle birlikte, son yıllarda HAP sistemi büyük önem kazanmaya başlamıştır. Stratosferdeki bu sistemler, sabit bir konumda kalabilir veya belirli bir bölge üzerinde uzun süreli uçuşlar yapabilmektedir. Bu durum onları özellikle kırsal veya afet sonrası acil durum iletişim ihtiyaçları gibi özel durumlarda oldukça faydalı kılmaktadır.

HAP sistemlerinde hüzme oluşturma ve şekillendirme, iletişim performansını eniyilemek için kritik bir tekniktir. Bu sistemler, geniş bir coğrafi alanı kapsayacak şekilde yüksek irtifada konumlandıkları için, kullanıcılar arasında sinyal gücünü etkili bir şekilde dağıtmak amacıyla hüzme oluşturma tekniklerini kullanmaktadır. Hüzme oluşturma, HAP üzerindeki antenlerin belirli bir alana odaklanarak sinyalin yönlendirilmesi sürecidir. Bu teknik, sinyalin istenen bölgelere yoğunlaşmasını sağlar, böylece daha güçlü ve kararlı bir iletişim bağlantısı kurulabilmektedir. Aynı zamanda, hüzme şekillendirme ile sinyalin istenmeyen alanlara yayılması önlenir, bu da girişim ve sinyal kayıplarının minimize edilmesine yardımcı olur. HAP sistemlerinde dinamik hüzme şekillendirme, farklı kullanıcı gruplarına ve taleplerine göre esnek bir şekilde ayarlanabilmektedir. Böylece kapsama alanı ve veri iletim kapasitesi en üst düzeye çıkarılabilir.

Bu tezde, HAP sistemlerinin konumlandırılması ve HAP sistemlerinin hizmet verdiği kullanıcıların en uygun şekilde gruplanması üzerine çalışılmıştır. Konumlandırma yapılırken kapsama alanının maksimize edilmesi ve yoğun nüfusa sahip bölgelerden gelen kullanıcı taleplerinin karşılanması hedeflenmiştir. Bu iki amacı aynı anda sağlayan HAP sistemi konumlarının çok amaçlı eniyileme algoritması yardımıyla bulunması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, kapsama alanı ve kullanıcı talepleri doğrultusunda en uygun HAP sistemi konumlarının elde edilebildiği gösterilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca, konumlandırması yapılmış bir HAP sistemi baz alınarak kullanıcıların gruplanması sağlanmıştır. Yapılan gruplama sonrası, kullanıcılara iletişim hizmetinin sağlanması için HAP sisteminden hüzmeler yönlendirilmiştir. Bu hüzmelerin şekli ve güç miktarları değiştirilerek, girişim miktarının azaltılması, kullanıcı taleplerinin karşılanması ve sistemin harcadığı toplam güç miktarının azaltılması hedeflenmiştir. Çok amaçlı eniyileme

algoritmaları yardımıyla en uygun hüzme şekilleri ve güç miktarları elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, yönlendirilmiş hüzmelerin daha az güç tüketerek kullanıcı taleplerini karşıladığı görülmüştür.

1.1. Tezin Katkıları

Çalışmanın sağlamış olduğu katkılar şunlardır:

- HAP sistemlerinin eniyi konumlandırma probleminin çözümü sunulmuştur.
- Hüzme oluşturma/yönlendirme tekniğinin uygulanması ile, hem HAP sistemleri için kritik öneme sahip güç kaynaklarının verimli kullanılması hem de kullanıcılara sağlanan hizmetin kalitesinin artması sağlanmıştır.

1.2. Organizasyon

Tez çalışmasının organizasyonu aşağıda verildiği gibidir.

Bölüm 1, çalışmanın amacını kapsamını ve katkılarını içermektedir.

Bölüm 2, HAP sistemi, hüzme oluşturma, çok amaçlı eniyileme algoritmaları, kümeleme algoritmaları hakkında temel bilgiler vermektedir.

Bölüm 3, HAP sistemlerinin konumlandırılması, HAP sistemlerinde hüzme oluşturma/yönlendirme ve kullanıcı gruplama konularındaki literatür taramasını içermektedir.

Bölüm 4, konumlandırma ve kullanıcıların gruplanması ile ilgili teknik ve detaylı anlatımı içermektedir.

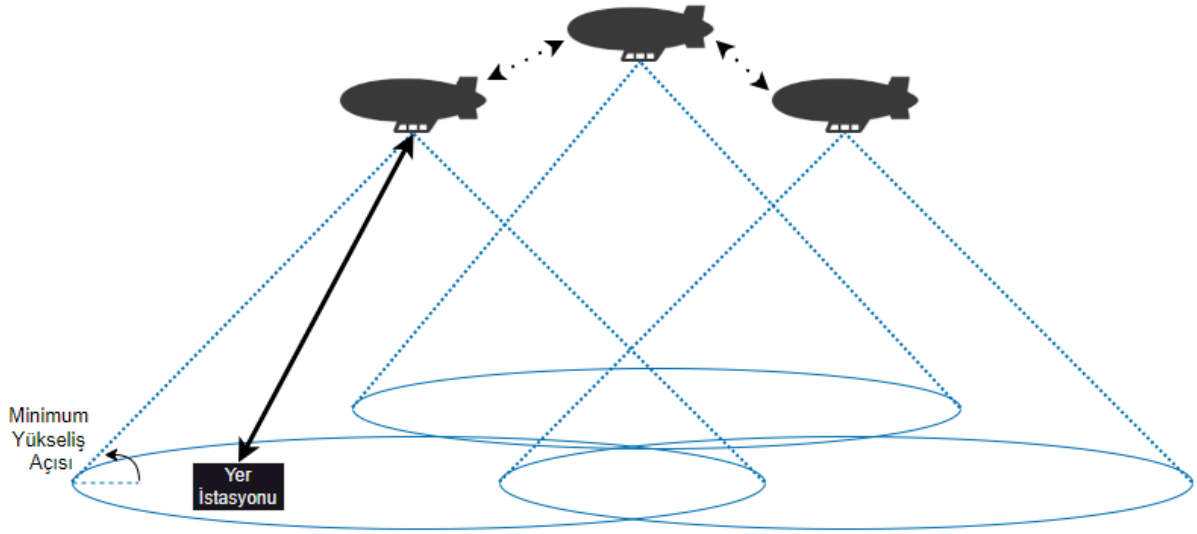
Bölüm 5, konumlandırma ve kullanıcıların gruplanması için sunulan yöntemlerin başarımlarını analizlerini içermektedir.

Bölüm 6, sonuçları ve genel değerlendirmeyi sunmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Yüksek İrtifa Platform Sistemi Nedir?

Yüksek İrtifa Platform Sistemi (High Altitude Platform System, HAPS), stratosferde yaklaşık 20 km yükseklikte çalışan ve iletişim hizmetlerinin sağlanmasına yardımcı olan bir ağ düğümüdür. Bu yüksekliğin seçilmesinin sebebi ise, hem sivil hava yollarının çok üstünde yer alması hem de stratosferdeki rüzgâr seviyesinin tahmin edilebilir düzeyde olmasıdır [1]. HAP sisteminin genel yapısı aşağıda verilmiştir.



Şekil 2-1 HAP Sisteminin Genel Yapısı

Otonom aviyonik, dizi antenler, güneş paneli verimlilik seviyeleri ve pil enerji yoğunlukları alanlarındaki teknolojik yeniliklerin hızlanması, HAP sistemlerini kablosuz ağların önemli bir bileşeni olarak ortaya çıkarmaktadır.

HAP sistemleri, drone'lar, LEO uyduları ve GEO uydularına göre çeşitli farklılıklar göstermektedir. Bu sistemler, GEO uydularına kıyasla daha düşük bir yükseklikte bulunur ve dolayısıyla daha düşük gecikme süreleri sunar, ancak kapsama alanı daha sınırlıdır. İlgili sistemler, LEO uydularına göre daha uzun süreli ve sabit bir kapsama sağlamaktadır, ancak LEO uydularının genişletilmiş ve küresel kapsama yeteneğine sahip değildir. Drone'lar ile karşılaştırıldığında, HAPS daha geniş bir kapsama alanı ve daha uzun operasyon süresi sunar, ancak drone'lar gibi yerel ve düşük irtifada esnek manevra kabiliyetine sahip değildir. HAP sistemleri, esneklik, maliyet ve kapsama alanı açısından bu sistemlerin arasında bir denge sağlar ve özellikle kırsal alanlarda veya afet durumlarında iletişim altyapısının hızlı bir şekilde kurulması için etkili bir çözüm sunmaktadır.

HAP sistemlerinin en önemli avantajları; kolay konuşlandırma, esneklik, düşük maliyetli çalışma, düşük yayılma gecikmesi, geniş kapsama alanı, çoklu yayın yeteneği, geniş bant yeteneği, acil durumlarda hareket edebilme yeteneği olarak sıralanabilir. İlgili sistemlerin karasal kablosuz ve uydu sistemleriyle olan benzerlikleri ve farklılıkları aşağıdaki tabloda [2] özetlenmiştir.

Çizelge 2-1 Karasal-Uydu-HAP Sistemlerinin Karşılaştırılması

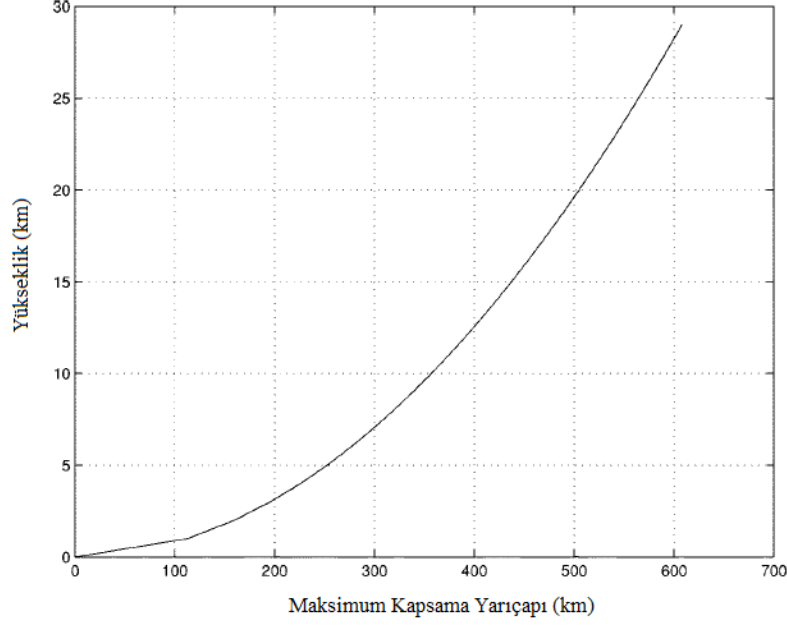
Değerlendirme Kriteri	Karasal Kablosuz Sistemler	Uydular	HAP Sistemleri
Mobil Terminallerin Kullanılabilirliği ve Maliyeti	Küçük, düşük maliyetli, düşük güçlü ünitelere yol açar.	Kısa pil ömrüne sahip, pahalı ve hacimli terminallere yol açar.	Karasal sistemlere uygulanabilir.
Yayılma gecikmesi	Düşük	Yüksek	Düşük
Mobil Terminallerle İlgili Sağlık Sorunları	Düşük güçlü mobil cihazlar, sağlık sorunlarını minimize ediyor.	Yol kaybı sebepli yüksek güçlü mobil terminallere ihtiyaç duyar.	Karasal sistemler ile benzerlik göstermektedir.
İletişim Teknolojilerindeki Riskler	Az	Yüksek	Orta
Kurulum Zamanı	Kısa	Uzun	Orta
İletişim Sisteminin Genişletilmesi	Kolay	Çok zor	Orta
Hareket Kaynaklı Sistem Karmaşıklığı	Sadece mobil kullanıcılar hareketli.	LEO ve GEO uydularının hareketi sistem karmaşıklığını büyük oranda artırır.	Orta
Operasyonel Karmaşıklık	Düşük	Yüksek	Orta

Kanal Kalitesi	Rayleigh, Yol kaybı 50 dB/decade	Ricean, Yol kaybı 20 dB/decade	Karasal sistemler ile karşılaştırabilir düzeydedir.
İç Mekân Kapsama Alanı	İyi	Uygulanabilir değil	Yüksek seviyede kapsama alanı mümkün.
Coğrafi Kapsamın Genişliği	Birkaç kilometre	GEO ve MEO: Küresel, GEO: dünya yüzeyinin %34'ünü kapsar.	<400 km
Hücre Yarıçapı	0.1-1 km	LEO: 50 km. GEO: >400 km	1-10 km
Gölgeleme	Kapsama alanında boşluklara neden olur; ek ekipman gereklidir.	Yalnızca düşük yükseklik açılarında sorundur.	Yalnızca düşük yükseklik açılarında sorundur.
İletişim ve Güç Altyapısı	Çok sayıda baz istasyonu ve baz istasyonları arası bağlantıları içerir.	Tek bir ağ geçidi geniş bir alanın trafiği için yeterlidir	Uydu sistemleri ile karşılaştırılabilir düzeydedir.
Uçan Nesnelere İle İlgili Güvenlik Sorunları	-	İlgili uyduların dünya yüzeyine düşme olasılığı bulunmaktadır.	İlgili sistemlerin dünya yüzeyine düşme olasılığı bulunmaktadır.
Maliyet	Değişmektedir.	GEO: >200 Milyon Dolar, LEO: Yaklaşık 1 Milyar Dolar	Çok sayıda baz istasyonu içeren karasal bir ağın konuşlandırılması için gereken maliyetten daha az.

Kablosuz haberleşme uygulamalarında HAP sistemlerine odaklanan bazı projeler aşağıdaki gibidir. Bu projelerden bazıları tamamlanmış, bazıları ise çeşitli nedenler ile durdurulmuştur.

- **Project Loon:** Resmi olarak Haziran 2013'te duyurulan Project Loon [3], 20 km yükseklikte stratosferik balonlar kullanarak uzak bölgelere internet sağlamayı hedefliyor. Platform ile yer istasyonu arasındaki iletişim lazerler aracılığıyla sağlanıyor. Platform, 5000 km²'lik bir kapsama alanına sahiptir. Sistemin enerji kaynağı ise güneş panelleridir. 100 günden fazla bir süre boyunca yaklaşık 10 kg'lık bir yük taşıma ağırlığını destekleyebilir.
- **Aquila:** Loon projesine benzer şekilde, uzak bölgelere yüksek hızlı kablosuz iletişim sağlamayı amaçlayan Facebook'un Aquila projesi [4] Mart 2014'te başlatıldı. Projede, 42 m kanat açıklığına sahip, güneş enerjili, toplam ağırlığı 400 kg olan Aquila insansız hava aracının kullanılması planlanmıştır.
- **CAPANINA:** Projenin ana hedefi, optik ana taşıyıcı kullanarak kullanıcılara (saatte 300 km'ye varan hızlarda seyahat eden kullanıcılar da dahil olmak üzere) kapsama alanı sağlayabilen düşük maliyetli HAP sistemleri geliştirmektir [5].
- **Helinet:** Projenin ana odak noktası, proje sırasında tasarlanan 70 metre kanat açıklığına sahip güneş enerjili Heliplat HAP sisteminden geniş bant hizmetleri sunmaktır [6].
- **Hapsmobile:** Proje kapsamında stratosferik iletişim sistemleri için özel olarak tasarlanmış Hawk30 isimli bir platform tasarlanmıştır [7]. Bu platform gücünü güneş enerjisinden alırken yaklaşık 30 m/s hıza sahip olabilmektedir.

HAP sistemleri yüksek kapsama yarıçaplarına sahip olabilmektedir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği-Radyokomünikasyon Sektörü (International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector, ITU-R), bir HAP sisteminin 400 km yarıçapa kadar bir alan üzerinde ayak izine sahip olabileceğini önermektedir. Teorik olarak hesaplanmış yükseklik-kapsama yarıçapı grafiği aşağıda verilmiştir [65].



Şekil 2-2 HAP Sistemlerinin Kapsama Alanı

HAP sistemlerinin iletişim ağlarına entegre edilebilmesi için ITU 1997'den bu yana çalışmaktadır. Bu kapsamda yayınlanan raporlara [8] göre belirlenen frekans bantları aşağıda verilmiştir.

- 47/48 GHz Bandı: 47,2–47,5 GHz ve 47,9–48,2 GHz olarak alt bölümlere ayrılmıştır ve hem Yukarı Yönlü Bağlantı (Up-link, UL) hem de Aşağı Yönlü Bağlantıda (Down-link, DL) 300 MHz'e kadar bant genişliğine izin verir.
- 31/28 GHz Bandı: 31–31,3 GHz UL ve 27,9–28,2 GHz DL olarak alt bölümlere ayrılmıştır; bu aynı zamanda bölge 1 ve 3'teki belirli ülkelerde 300 MHz'e kadar bant genişliğine izin verir.
- 2,1 GHz IMT-2000 Bandı: Bu bant 1,885– 1,980 GHz, 2,110–2,160 GHz ve 2,010–2,025 GHz bantlarına bölünmüş olup, ITU-R tarafından 1 ve 3. bölgelerde kullanılmak üzere tahsis edilmiştir. Bölge 2'de yalnızca ilk iki alt bant kullanıma uygundur. Bu bantlar Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (International Mobile Telecommunications, IMT)-2000 servislerinin kullanımı içindir [19].
- 6,5/6,6 GHz Bandı: Bu bant HAPS ağ geçidi bağlantıları için yalnızca Avustralya'da bölge 1'de ve bölge 3'teki 4 Afrika ülkesinde mevcuttur. DL için 6,440–6,520 GHz atanırken, UL 6,560–6,640 GHz kullanır [19].

- 38–39,5 GHz Bandı: Bu bant, HAP sistemlerinin küresel olarak kullanımı için Dünya Radyo Konferansı (World Radio Conference, WRC)-19'da tanımlanmıştır. HAP sistemleri bu spektrumu birincil sistemler olarak FSS ile paylaşmaktadır [18].
- 21,4–22 GHz Bandı: WRC-19'da Bölge 2'de HAP sistemlerinin kullanımı için tanımlanan bu bant, HAP sisteminden yere doğru olan yön ile sınırlıdır. HAP sistemi tarafından girişim yaratmayacak şekilde FSS ile paylaşılmaktadır [18].
- 24,25–25,25-GHz ve 25,25–27,5-GHz Bantları: Bölge 2'de HAP sistemlerinin kullanımı için tanımlanan bu bantlar FSS ile paylaşılmaktadır. 24,25–25,25 GHz bandı yalnızca HAP- yer aşağı yön ile sınırlıyken, 25,25–27,5 GHz bandı hem yer-HAP hem de HAP-yer yönleri için kullanılabilir [18].

Bölge 1: Avrupa, Afrika, Rusya, Orta Doğu ve Moğolistan

Bölge 2: Kuzey ve Güney Amerika

Bölge 3: Asya, Orta Doğu, Pasifik ülkeleri ve İran hariç

2.1.1. HAP Sistemlerinin Bileşenleri

Genel olarak bir HAPS iletişim sistemi iki bölümden oluşur [1]. Bunlardan ilki, karasal olmayan kısım ve ikincisi ise karasal olan kısımdır.

2.1.1.1. Karasal Olmayan Bölüm

Bu bölüm, uygun bir yerleşim ve etkili bir iletişim için gerekli olan tüm ana bileşenleri içermektedir. Temelde iki alt sistemden oluşur.

- **Yerleşik Alt Sistemler:** Yerleşik alt sistemler, uçuş kontrol alt sistemi, enerji yönetimi alt sistemi ve iletişim yükü alt sistemi olmak üzere 3 bölümden oluşur.
 - **Uçuş Kontrol Alt Sistemi:** Bu alt sisteminin amacı, hareket kabiliyetini kontrol etmek, oluşabilecek türbülans/rüzgâr vb. durumlara karşı platformun stabilizasyonunu sağlamaktır. Aynı zamanda, sistemin istenilen bölgeye hareketini de bu alt sistem sağlamaktadır. Bahsedilen görevleri yerine getirebilmek amacıyla, HAP sisteminin, yüksekliğini ve yönünü ölçecek sensörler, karar vermeye yönelik bir hesaplama birimi ve istenilen hareket ve yönelimi gerçekleştirecek aktüatörler gereklidir. Uçuş kontrol sisteminin bir diğer görevi ise platform ile yer kontrol istasyonu arasındaki arayüzü yönetmesidir. Bu yönetim önceden belirlenmiş bir dizi komut ve telemetri verileri ile gerçekleştirilmektedir.

- **Enerji Yönetimi Alt Sistemi:** Bu alt sistem, enerjinin üretilmesi, dağıtılması ve depolanması süreçlerini yönetmekten sorumludur. Ayrıca enerji ihtiyacı olan diğer alt birimlerin tüketimini de düzenler.
- **İletişim Yüğü Alt Sistemi:** Bu alt sistem, HAP sisteminin hangi amaç için kullanılacağına bağılı olarak farklı teknoloji ve alt birimler ile donatılır. Örneğın kablosuz iletişim için kullanılacak antenler ve anten arkası blokların tamamı bu alt sistem içerisinde yer almaktadır.
- **Karasal Olmayan Ağlar Alt Sistemi:** Bu alt sistem HAP sisteminin de bir parçası olduğı ve gökyüzünde bulunan tüm iletişim noktaları ile ilgili sistemin bir bütün halinde çalışmasında sorumlu bölümdür. Örneğın, HAP sistemi, içerisinde uydu ve yer istasyonlarının bulunduğı büyük bir genel sistemin parçası olabileceğı gibi aynı zamanda insansız hava araçlarının (Unmanned aerial vehicle, UAV) kontrolünü sağılayan bir ağ yöneticisi olabilir.

2.1.1.2. Karasal Bölüm

Bu kısım HAP haberleşme sisteminin yeryüzünde bulunan bileşenlerini ifade eder. Bu bileşenler üç bölümde incelenebilir.

- **Kontrol İstasyonu:** HAP sistemi ile farklı türdeki kullanıcılar (örneğin, İnsansız Hava Araçları) arasındaki iletişim işlemlerini yönetir. Ayrıca, kontrol istasyonu kalkış/iniş sürecini yönetir, HAP sisteminin konumunu uzaktan izler.
- **İletişim Ağ Geçidi:** HAP sistemini, kablolu bir altyapı yardımıyla çekirdek ağı bağılar. HAP sistemi parçası olduğı iletişim ağına bağılı olarak kullanıcılarla doğrudan iletişim kurabilir. Kullanıcı tarafından toplanan veriler iletişim ağ geçidi ile dünyanın herhangi bir noktasına iletilebilir. Kontrol istasyonu ve iletişim ağ geçidi aynı bina tesisleri içinde aynı yerde bulunabilir veya ayrı konumlara sahip olabilir. Temel olarak amplifikatörler, işlem birimleri ve antenlerden oluşurlar. Tipik olarak kullanılan antenler, yüksek yönlülük kazancını garanti etmek için parabolik çanak reflektörlere sahiptir.
- **Karasal Ağlar:** Bu bölüm, HAP iletişim sistemlerinde yer alan tüm karasal noktaları veya kullanıcıları içerir. Bunlara örnek olarak, karasal baz istasyonları, mobil kullanıcılar ve Nesnelerin İnterneti (Internet Of Things, IoT) sensörleri gibi farklı kullanıcı türlerini içerir.

2.1.2. HAP Sistemleri İçin Enerji Yönetimi

HAP sistemlerine sağılanan ve tüketilen enerjinin yönetilmesi önemli bir görevdir ve uçuş süresini, iletişim kalitesini vb. birçok faktörü etkiler. HAP sisteminin iletişim için kullanılması

genellikle uzun süreli bir işlemdir. Bu sebeple HAP sistemi tabanlı çözümleri uygulanabilir ve uygun maliyetli hale getirmek için dikkatli bir enerji yönetimi gereklidir. HAP sistemleri için ön görülen enerji kaynakları aşağıdaki gibidir.

- **Geleneksel Enerji Kaynakları:** Geleneksel enerji kaynaklarına yakıt depoları ve elektrik pilleri örnek olarak gösterilebilir. HAP sisteminin gücü bu kaynaklar ile sağlandığında sistemin uçuş süresi yaklaşık 48 saattir. Bu durum da yakıt ikmali için sık sık iniş yapılmasını gerektirmektedir.
- **Güneş Enerjisi:** Güneş enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve HAP sistemine güç sağlamak için güvenli bir seçenektir. Bu yöntem birçok HAP sistemi projesi tarafından dikkate alınan ana enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi ilgili sistem için iki temel nedenden dolayı uygundur. Birincisi, HAP sisteminin doğal güneş enerjisinin yüksek seviyede olduğu bulutların üzerinde çalışıyor olmasıdır. İkincisi ise, devasa büyüklüklere sahip olan HAP sistemleri, genellikle büyük miktarda enerji üretmek için büyük güneş panellerine sahip olabilir. Güneş enerjisiyle çalışan HAP sistemleri genellikle geceleri veya kış aylarında tanımlanan görevleri yerine getirmek için ikincil enerji kaynaklarına sahiptir. Bunlara örnek olarak elektrik pilleri veya hidrojen yakıt hücreleri gösterilebilir. Buna göre birincil ve ikincil enerji kaynakları arasındaki işlemleri yönetebilmek için daha önce de bahsedildiği üzere enerji alt sisteminde bir kontrol ünitesine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.3. HAP Sistemleri İçin Önerilen Kanal Modelleri

HAP sistemlerinin sunabileceği tüm potansiyeli anlamak için kanal modellerinin anlaşılması gerekmektedir. Temel olarak iki adet kanal modeli karşımıza çıkmaktadır [1]. Bunlardan ilki RF Kanal Modelleridir. Bu modeller aşağıda verilmiştir.

DeneySEL-İstatistiksel Modeller: HAP sistemleri kanallarına ilişkin ilk çalışmalar kara-mobil uydu kanallarından uyarlamalardır. Bu uyarlamalar, daha sonra önerilen kanal modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır [9].

Geometrik Olmayan Stokastik Modeller: HAPS kanallarında karasal saçıcıların varlığında çok yönlü (yani küçük ölçekli) sönümlenmenin etkisini dikkate alan çalışmalar yürütülmüştür [8]. Bu çalışmalardaki kanal modeli 2 Ghz bandı için tasarlanmıştır. İlgili bantta yağmurdan kaynaklanan zayıflama ihmal edilebilir düzeyde olduğundan analizlerde dikkate alınmamıştır.

Kara mobil uydu sistemleri için karma yayılma koşulları için istatistiksel bir model, süre, durum dağılımları ve geçiş olasılıklarıyla birlikte ITU-R P.681-11'de sunulmuştur [10].

Geometri Tabanlı Stokastik Modeller: Geometri tabanlı ilk çalışmada [11] 3 boyutlu bir saçılma modeli sunulmuştur. Spiral ve zamansal korelasyon fonksiyonları sağlanmış ve gerekli anten ayırma mesafesi türetilmiştir. Sonraki çalışmalarda kanal modelinin HAP sistemlerindeki iletişim kanallarında elde edilebilecek kapasite ifadeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir [11].

Durağan Olmayan Modeller: İlgili model geliştirilirken, çok kullanıcılı uzamsal korelasyon fonksiyonunun türetilmesi detaylandırılmış ve kullanım durumları çoklu-kullanıcılara genişletilmiştir [12].

Havadan Havaya Kanal Modeli: HAP sistemlerinin hem yatay hem de dikey olarak hareket edebildiği ve hızlarının zaman içinde değişebildiği bir 3D Markov hareketlilik modeli ortaya çıkarılmıştır [13]. Model tasarlanırken zaman-frekans korelasyon fonksiyonu ve Doppler güç spektrumunu türetilmiştir. İlgili model dikey yönlü hareketin iletişim sistemi açısından büyük önem arz ettiğini ortaya koymuştur [13].

İkinci kanal modeli ise Serbest Uzay Optik Kanal modelidir [1]. Bu modelde, bilgi taşıyan ışık sinyalleri, yerdeki veya uzay boşluğundaki LOS bağlantıları gibi serbest uzay ortamlarında iletilir. Uygun maliyetli, lisans gerektirmeyen ve yüksek bant genişliğine sahip yapıları nedeniyle, özellikle HAPS-HAPS arası bağlantı ve ana taşıyıcı iletim bağlantıları için çok uygun bir teknoloji çözümüdür.

2.1.4. HAP Sistemlerinin Konumlandırılması

HAP sistemlerinin temel zorluklarından birisi de kendi kendini organize eden ağların tasarımı ve yönetimidir. Bu durum, sabit bir hücresele ağıya kıyasla daha dinamik yapıya sahiptir. Çünkü kullanıcı gereksinimlerindeki değişiklikler, atmosferik koşullar, kapsama gereksinimleri, pil durumu veya ağıdaki ani trafik değişiklikler, seçilecek uygun bir konum ile optimize edilebilir.

HAP sistemlerinin belirli bir bölgeyi kapsama yeteneği, yükseklik, anten yönelimi, Hızme genişliği ve diğer teknik parametrelere bağlıdır. Kapsama alanının optimizasyonu, belirli bir bölgeyi en iyi şekilde kapsamak için HAP sistemlerinin nasıl konumlandırılacağını belirler.

Belirli bir bölgede yer alan kullanıcıların veya hedeflerin talebi HAP sistemleri tarafından karşılanmalıdır. İlgili taleplerin karşılanması esnasında sinyal gücü ve bağlantı kalitesi göz önüne alınmalıdır. Buradaki amaç mümkün olan en az sayıda HAP kullanarak maksimum sayıda hedefi kapsamayı amaçlamaktadır.

2.1.5. HAP Sistemlerinde Anten Teknolojisi ve Girişim Yönetimi

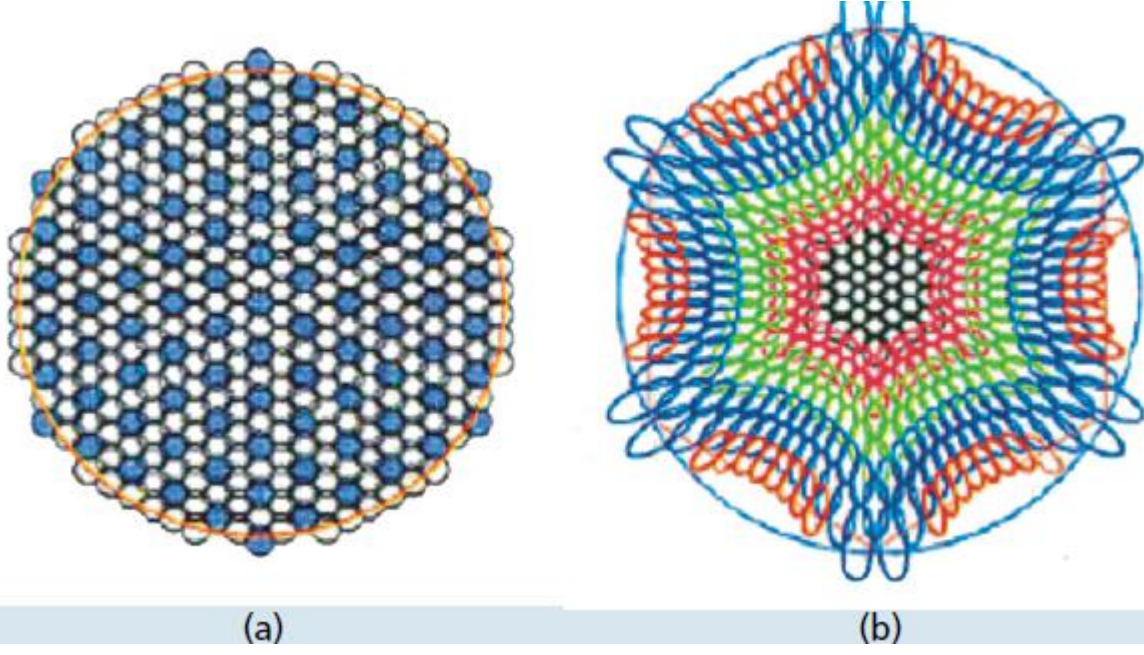
HAP sistemi ve kullanıcılar arasındaki iletişimin güvenilirliği için, boş alan yol kaybının neden olduğu yüksek zayıflamanın üstesinden gelmek gerekmektedir. Yüksek zayıflamayı azaltmanın bir yolu iletilen güç miktarını arttırmaktır. Bu durum girişime sebep olur ve bu bozucu etkinin zararlarını en aza indirmek için yüksek derecede yönlendirici antenler gerekmektedir.

Ek olarak, HAP sistemleri karasal hücreler ile aynı spektrumu paylaşmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, girişim seviyesini en aza indirmek için HAP üzerinde bulunan yerleşik antenlerin dinamik hüzmeye yönlendirme yeteneğiyle donatılması gerekmektedir. Bir HAP sisteminin boyutları düşünüldüğünde yeterli sayıda antenin kurulumu sağlanabilir. CAPANINA [5] ve HELINET [6] gibi ilk HAP projelerinde elektronik olarak yönlendirilebilen çok hüzmeli anten kullanılmıştır. Aynı frekanslardaki örtüşen anten ana lobları ve yan lobları, HAP kullanıcılarına hizmet veren ve bitişik Hüzmelerden kaynaklanan girişimi azaltmak için HAPS içi sistemde girişim yönetimini zorunlu hale getirmiştir.

HAP sistemlerinde kullanılacak antenlerin sahip olması gereken özellikler aşağıda verilmiştir.

- Yeterli bir bant genişliğini güvence altına almak için yüksek radyo frekansının kullanılması.
- Yüksek frekanslarda yol kaybı ve zayıflama ile başa çıkmak için yüksek kazançlı ve yönlü olmalıdır. Girişim miktarının en aza indirilmesi, yan lob seviyesinin düşürülmesi ile elde edilebilmektedir. İlgili seviyenin düşürülmesi ise hüzmeye oluşturma-yönlendirme teknikleri ile mümkün olmaktadır. Bu strateji için ise faz dizili antenler veya mekanik taramaya sahip parabolik antenler kullanılabilir.
- Hüzmeye kontrolü vasıtasıyla HAP sisteminin yükseklik/pozisyon değişimlerinin yerdeki ayak izi üzerindeki etkileri en aza indirilebilmelidir.
- Boyut ve tüketilen güç açısından optimize edilmelidir.
- Stratosferik ortamda güvenilir bir şekilde çalışabilmelidir.

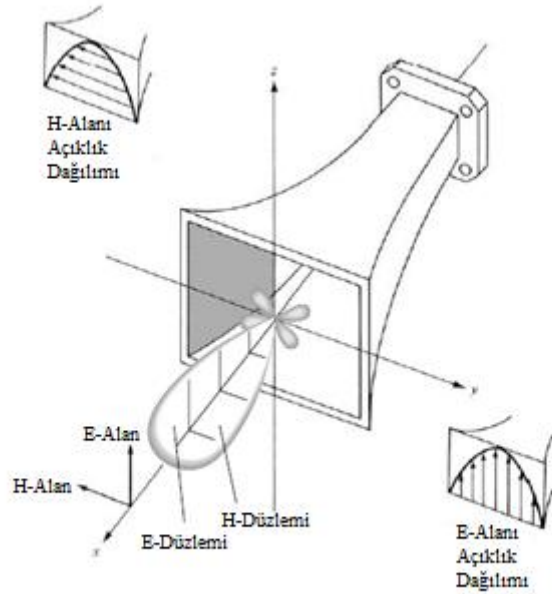
ITU-R'nin önerdiği hem gönderme hem de alma için kullanılacak her biri KA-bandında çalışan ve 300-400 hücreye sahip olan çok hüzmeli yapının paterni aşağıda verilmiştir [2].



Şekil 2-3 a) Eliptik şekilli tek tip ayak izi modeli (367 ışın); b) Dairesel şekilli çok bölgeli ayak izi modeli (397 ışın).

2.2. Hüzme Nedir?

Hüzme, bir elektromanyetik dalganın belirli bir doğrultuda yoğunlaşarak iletilmesi veya alınmasıdır [31]. Hüzme, bir sinyalin gücünü belirli bir yönde odaklayarak, o doğrultuda yüksek doğruluk ve yoğunluk sağlar. Bu yönlendirilmiş sinyaller, iletişim sistemlerinde, radar uygulamalarında ve uydu haberleşmelerinde kullanılır.



Şekil 2-4 Bir Boynuz Anten İçin E ve H Düzlem Modeli [31]

Elektromanyetik dalgalar, elektrik ve manyetik alanların periyodik olarak salındığı dalgalardır. Bir anten, bu dalgaları belirli bir yönde yoğunlaştırarak Hüzme oluşturur. Bu Hüzme, belirli bir açıda odaklanarak enerjinin etkili bir şekilde iletilmesini sağlar.

Bir hüzmenin temel özellikleri aşağıda verilmiştir.

- **Yönlülük:** Hüzmenin belirli bir yönde yoğunlaşma kapasitesidir. Yönlülük arttıkça Hüzmenin belirli bir doğrultuda odaklanması artar.
- **Kapsama Alanı:** Hüzmenin yayılma açısı ve kapsadığı alan, antenin tasarımına ve yönlendirme tekniklerine bağlıdır.
- **Kazanç:** Hüzmenin belirli bir yönde sinyal gücünü artırma yeteneğidir. Yüksek kazançlı antenler, sinyali daha uzun mesafelere ve daha dar bir Hüzmede yoğunlaştırabilir.

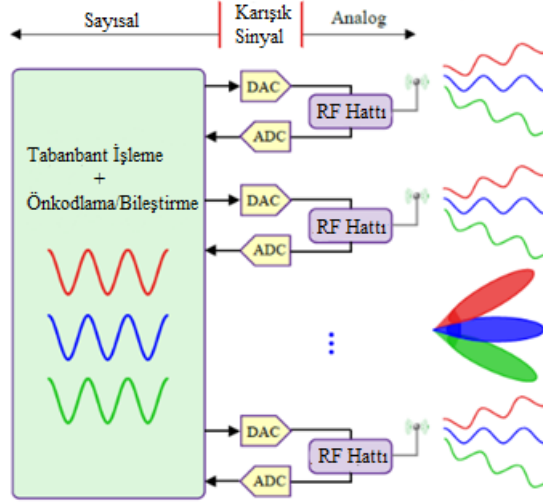
Literatürde kullanılan hüzme türleri aşağıda verildiği gibidir.

- **Sabit Hüzme:** Hüzme belirli bir doğrultuda sabitlenir. Özellikle statik hedeflerin izlenmesi ve sabit iletişim bağlantılarında kullanılır.
- **Yönlendirilebilir Hüzme:** Hüzme, elektronik veya mekanik olarak yönlendirilerek hareketli hedeflerin izlenmesini sağlar.
- **Çoklu Hüzme:** Aynı anda birden fazla Hüzme oluşturarak geniş bir alanı kapsayan sistemlerdir. Uydu ve hücreli iletişim sistemlerinde yaygındır.

2.2.1. Hüzme Oluşturma Teknikleri

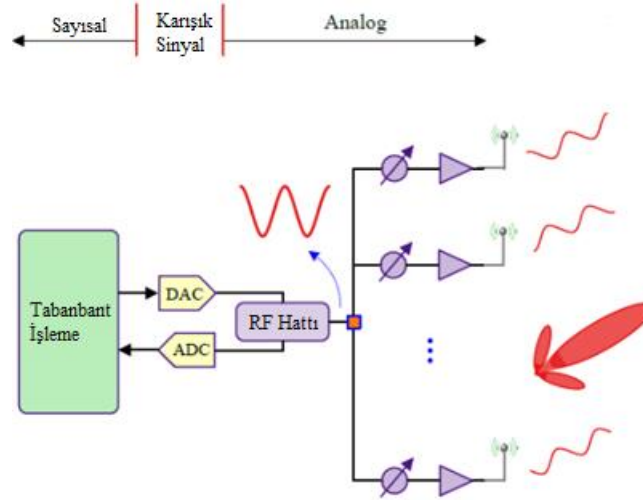
Bazı hüzme oluşturma teknikleri aşağıda verilmiştir.

- **Konvansiyonel (Klasik) Hüzme Oluşturma:** Klasik hüzme oluşturma, tüm anten elemanlarının sinyali aynı fazda ilettiği veya aldığı bir tekniktir [30]. Bu teknik, belirli bir yöne doğru güçlü bir hüzme oluşturur, ancak esneklik ve doğruluk açısından sınırlıdır. Bu teknik, genellikle sabit anten sistemlerinde kullanılır ve belirli bir yöne odaklanmış sabit bir sinyal sağlar.
- **Dijital Hüzme Oluşturma:** Dijital hüzme oluşturma, her bir anten elemanının sinyalini dijital olarak işleyerek faz ve genlik ayarlarını yapar [30]. Bu yöntem, çok daha hassas ve esnek bir hüzme kontrolü sağlar. İlgili yöntem, birden fazla hüzmeyi eşzamanlı olarak oluşturabilme ve dinamik olarak yönlendirebilme yeteneğine sahiptir. Bu teknik, özellikle 5G iletişim sistemlerinde ve faz dizili radar sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.



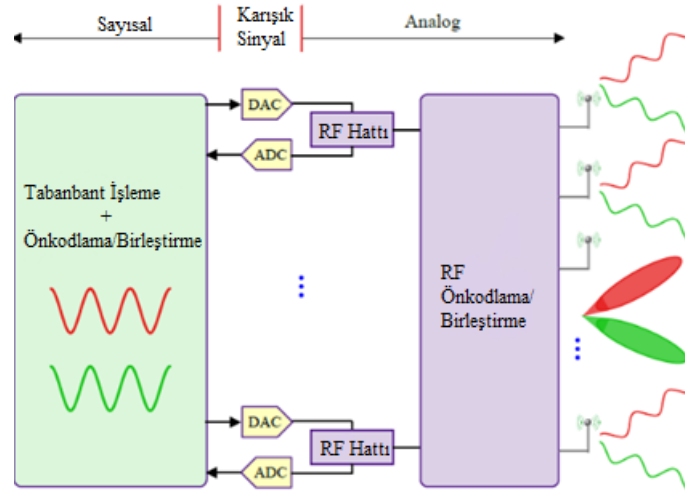
Şekil 2-5 Dijital Hüzme Oluşturma [27]

- **Analog Hüzme Oluşturma:** Analog yöntemde ise anten dizilimlerindeki her bir elemanın sinyali belirli faz kaydırıcılar aracılığıyla işlenir [30]. Bu yöntem, daha düşük maliyetlidir ve daha az karmaşık donanım gerektirir, ancak dijital hüzme yönlendirmeye göre daha sınırlı esneklik sunar. Analog hüzme oluşturma, genellikle tek bir hüzme oluşturmak ve belirli bir yöne sabitlemek için kullanılır.



Şekil 2-6 Analog Hüzme Oluşturma [27]

- **Hibrit Hüzme Oluşturma:** Dijital ve analog hüzme oluşturma tekniklerini birleştirilerek hüzme oluşturma yöntemi önerilmiştir [30]. Bu yöntem hem donanım verimliliği hem de yüksek esneklik sağlayarak geniş kapsama ve doğruluk sağlar. Hibrit teknikler, özellikle büyük ölçekli anten dizilimlerinde ve yüksek frekanslı (örneğin milimetre dalga) iletişimde kullanılır.

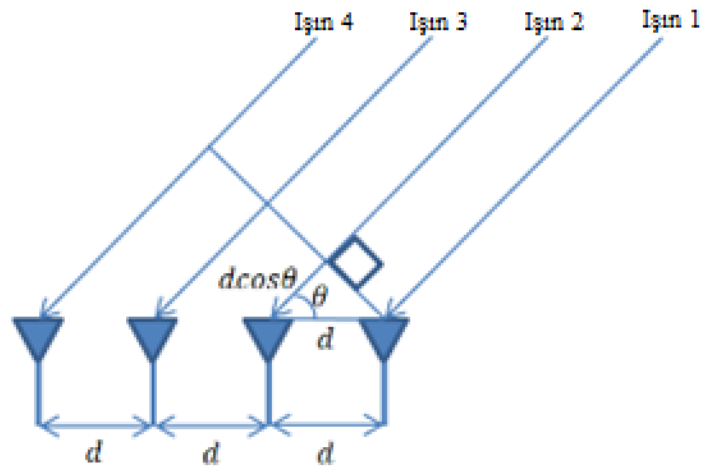


Şekil 2-7 Hibrit Hüzme Oluşturma [27]

2.2.2. Anten Dizileri

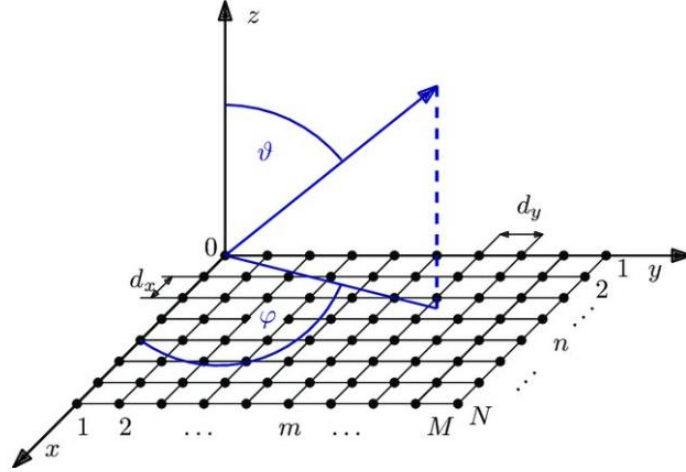
Hüzme oluşturmak için kullanılan anten dizilimleri farklı geometrik düzenlere ve işlevlere sahip olabilir. Hüzme oluşturma tekniklerinde kullanılan bu dizilimler, sinyallerin belirli yönlerde odaklanmasını ve yönlendirilmesini sağlar. Hüzme oluşturmak için kullanılan başlıca dizi tipleri aşağıda verilmiştir.

Doğrusal (Linear) Dizi: Anten elemanları tek bir doğrultuda, genellikle düz bir çizgi boyunca yerleştirilmiştir [29]. En basit ve en yaygın kullanılan dizi tipidir. Doğrusal dizilimler, belirli bir doğrultuda güçlü hüzmeler oluşturmak için kullanılır. Yaygın olarak radar sistemlerinde ve iletişim uygulamalarında tercih edilir. Faz kaydırma yöntemiyle sinyalin yönü kontrol edilebilir. Hüzme genişliği ve yönü, anten elemanları arasındaki mesafeye ve dizilim sayısına bağlıdır.



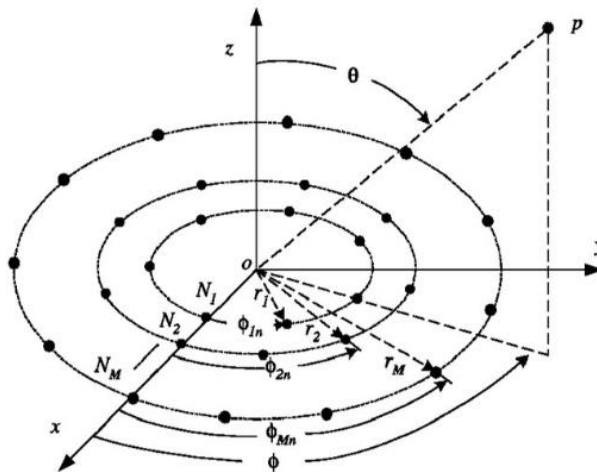
Şekil 2-8 Doğrusal Dizi [28]

Düzlemsel Dizi: Anten elemanları iki boyutlu bir düzlemde yerleştirilmiştir [29]. Genellikle kare veya dikdörtgen şeklinde düzenlenir. Düzlemsel diziler hem yatay hem de dikey doğrultuda hüzme kontrolü sağlar. Yüksek doğruluk gerektiren radar ve uydu sistemlerinde kullanılır. Hem azimut hem de elevasyon açılarında hüzme yönlendirme imkânı sunar. Bu da üç boyutlu kapsama alanı sağlar.



Şekil 2-9 Düzlemsel Dizi [28]

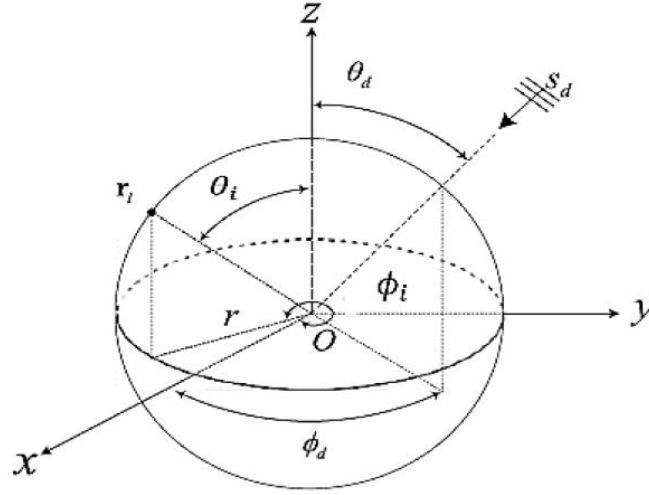
Dairesel Dizi: Anten elemanları, bir çember boyunca düzenlenmiştir [29]. Çevresel bir kapsama alanı sağlar. Dairesel dizilimler, 360 derece kapsama gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Özellikle sabit anten sistemlerinde kullanılır. Hüzme, çember üzerinde herhangi bir yöne kolayca yönlendirilebilir. Bu tür dizilimler, çoklu hedef takibi için uygundur.



Şekil 2-10 Dairesel Dizi [28]

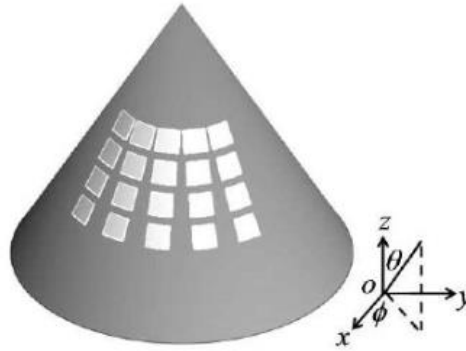
Küresel Dizi: Anten elemanları, üç boyutlu bir küre yüzeyi boyunca yerleştirilmiştir [29]. Her yöne eşit derecede kapsama sağlar. Küresel dizilimler, tam alan kapsamı gerektiren

uygulamalarda kullanılır. Örneğin, akustik sonar sistemlerinde ve bazı ileri düzey radar sistemlerinde uygulanır. Yüksek yönlülük ve esneklik sunar, ancak donanım karmaşıklığı ve maliyeti oldukça yüksektir.



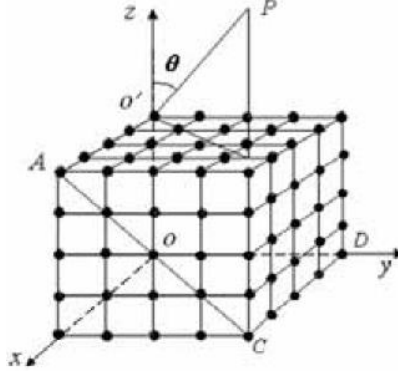
Şekil 2-11 Küresel Dizi [28]

Konik Dizi: Anten elemanları, bir nesnenin yüzeyine uygun şekilde yerleştirilmiştir [29]. Konik, silindirik veya düzensiz yüzeyler boyunca düzenlenebilir. Özellikle uçaklar, gemiler ve füzelerdeki radar sistemlerinde kullanılır. Platformun geometrisine uyum sağlayarak aerodinamik avantaj sunar. Düzgün olmayan yüzeylerde dahi hüzme yönlendirme imkânı sağlar. Bu, hareketli platformlarda çok yönlü kapsama ve esneklik sunar.



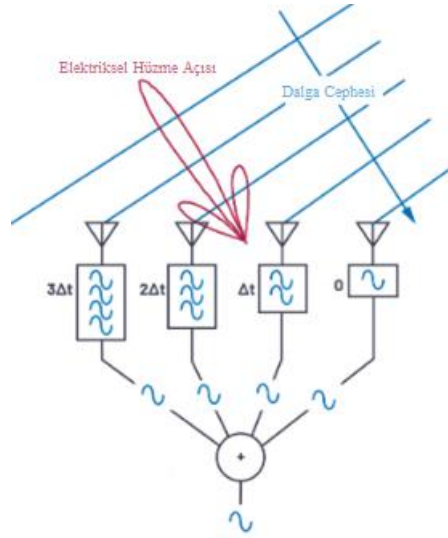
Şekil 2-12 Konik Dizi [28]

Üç Boyutlu Dizi: Anten elemanları, üç boyutlu bir hacim boyunca düzenlenmiştir [29]. Bu dizilim, en karmaşık ve esnek hüzme oluşturma imkanını sunar. Hedef izleme ve tam alan kapsamı gereken uygulamalarda kullanılır. İleri düzey askeri ve savunma sistemlerinde tercih edilir. Hem azimut hem de elevasyon açılarında bağımsız ve hassas hüzme kontrolü sağlar.



Şekil 2-13 Üç Boyutlu Dizi [28]

Fazlı Anten Dizisi: Faz dizi antenler, elemanlar arasındaki faz farklarını kontrol ederek hüzmelerin yönünü belirler [29]. Elemanlar, genellikle doğrusal veya düzlemsel bir düzende yerleştirilir. 5G, radar sistemleri, askeri iletişim ve uydu sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Faz kaydırma yoluyla hüzmeye yönlendirilir, böylece mikro saniyeler içinde yön değiştirebilir. Gelişmiş hüzmeye kontrolü ve hızlı yanıt süreleri sunar.



Şekil 2-14 Fazlı Anten Dizisi [32]

2.3. Eniyileme (Optimizasyon) Nedir?

Eniyileme (optimizasyon), belirli bir hedefe ulaşmak için bir sistemin, modelin veya sürecin performansını en iyi hale getirme sürecidir [33]. Bu, genellikle en iyi çözümü bulmak amacıyla karar değişkenlerinin sistematik olarak ayarlanmasını içerir. Eniyileme, matematiksel bir problem çerçevesinde formüle edilir ve hedef fonksiyonun (amaç fonksiyonu) minimum veya maksimum değerine ulaşmayı amaçlar. Optimizasyonun temel unsurları aşağıda verilmiştir [33].

- **Amaç Fonksiyonu:** Optimizasyon sürecinde optimize edilmek istenen fonksiyondur. Örneğin, maliyeti minimize etmek veya kârı maksimize etmek gibi amaçlar olabilir.
- **Karar Değişkenleri:** Amaç fonksiyonunu etkileyen ve üzerinde kontrol sağlanabilen değişkenlerdir. Örneğin, üretim miktarı, kaynak kullanımı gibi değişkenler karar değişkenleridir.
- **Kısıtlar:** Karar değişkenlerinin alabileceği değerler üzerinde belirli sınırlamalar getiren koşullardır. Örneğin, bir üretim sürecinde belirli bir kaynak miktarı gibi kısıtlar bulunabilir.
- **Optimum Çözüm:** Amaç fonksiyonunun minimum veya maksimum değerine ulaşıldığı çözüm noktasıdır. Optimum çözüm, tüm kısıtlar altında en iyi çözümü temsil eder.

Literatürde farklı alanlarda kullanılmak üzere birçok optimizasyon yöntemi önerilmiştir, bu tez çalışmasında çok amaçlı optimizasyon kullanılacaktır.

2.3.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları

Çok amaçlı optimizasyon algoritmaları, birden fazla çatışan hedef fonksiyonunu aynı anda optimize etmeyi amaçlayan yöntemlerdir [34]. Tek amaçlı optimizasyon problemlerinde yalnızca bir hedef fonksiyonu optimize edilirken, çok amaçlı optimizasyonda birden fazla hedef fonksiyonu aynı anda optimize edilmeye çalışılır. Bu durum, çoğu zaman birbirleriyle çatışan hedeflerin dengelenmesini gerektirir.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümlerinde, genellikle birden fazla "optimal" çözüm elde edilir. Bu çözümler, Pareto optimalite kavramı ile tanımlanır. Aşağıda ilgili algoritmalar ile ilgili temel kavramlar verilmiştir.

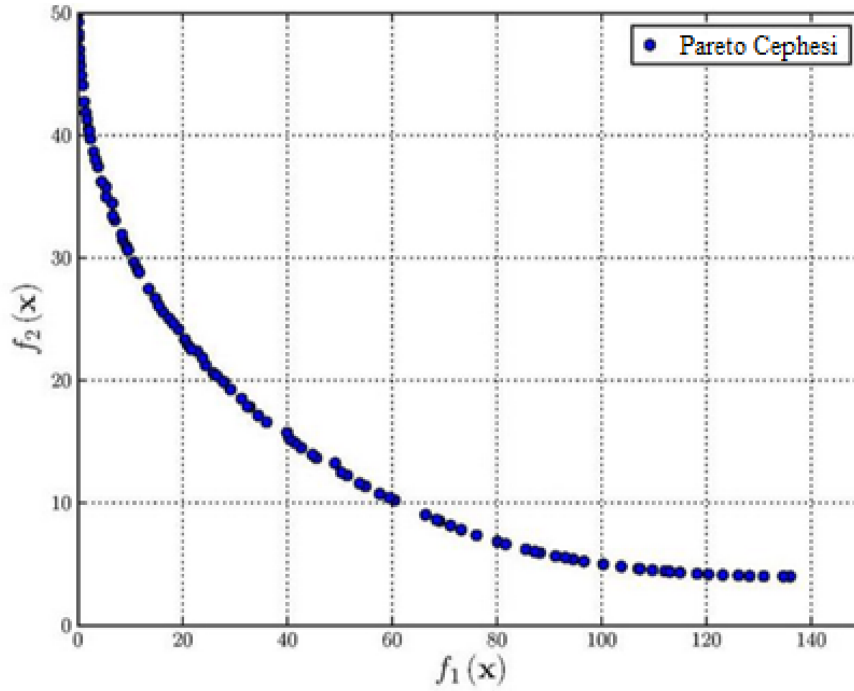
- **Pareto Optimalite:** Pareto optimal bir çözüm, başka bir çözümü seçerek bir hedefi iyileştirirken diğer hedefleri kötüleştirmeden iyileştirilemeyen çözümdür. Pareto optimal çözümler kümesi, tüm çözümlerin baskın olmayan bir alt kümesini oluşturur.
- **Pareto Cephesi:** Pareto cephesi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümlerinde elde edilen Pareto optimal çözümleri grafiksel olarak gösteren eğridir. Bu eğri, optimal çözümler arasında bir denge sağlar ve kullanıcıya farklı alternatifler sunar.
- **Çatışan Amaçlar:** Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, bir hedef fonksiyonunu iyileştirmek diğerini kötüleştirebilir. Bu tür durumlarda algoritma, bir denge bulmaya çalışır.

Aşağıda örnek amaç fonksiyonları ve ilgili problemin pareto cephesi yer almaktadır. Bu problemde hem f_1 hem de f_2 amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi hedeflenmiştir.

Çözümler belirtilen kısıtlar (g_1 ve g_2) altında ve x, y değişkenlerinin belirtilen sınırları dahilinde aranmıştır. Bahsedilen amaç fonksiyonları minimize edilirken, Pareto optimal çözümler kümesi elde edilmiştir. Amaç fonksiyonları birbirine ters düştüğünden, bir fonksiyonu iyileştirmek diğerini kötüleştirebilmektedir. Bu nedenle en uygun çözümler, bu iki amaç arasında makul bir denge kuran çözümler olacaktır. Tüm çözümlerin yer aldığı grafik ise Pareto cephesi olarak isimlendirilir.

Çizelge 2-2 Örnek Amaç Fonksiyonu [37]

Amaç Fonksiyonları	$f_1(x, y) = 4x^2 + 4y^2$ $f_2(x, y) = (x - 5)^2 + (y - 5)^2$
Kısıtlar	$g_1(x, y) = (x - 5)^2 + y^2 \leq 25$ $g_2(x, y) = (x - 8)^2 + (y + 3)^2 \geq 7.7$
Arama Alanı	$0 \leq x \leq 5$ $0 \leq y \leq 3$



Şekil 2-15 Pareto Cephesi [37]

Çok amaçlı optimizasyon algoritmalarında karşılaşılan zorluklar, problemlerin karmaşıklığından ve birden fazla hedef fonksiyonun aynı anda optimize edilme gereksiniminden kaynaklanır. Bu zorluklar, algoritmaların performansını doğrudan etkileyebilir ve uygun çözümlere ulaşmayı zorlaştırabilir. Aşağıda çok amaçlı optimizasyon algoritmalarında karşılaşılan zorlukların en önemlilerinden bahsedilmiştir.

- **Pareto Cephesinin Yakınsaması:** Birçok algoritmanın amacı, çözümlerin Pareto cephesine doğru yakınsamasını sağlamaktır. Ancak, özellikle karmaşık problemlerde bu yakınsama zor olabilir. Pareto cephesine ulaşmada yeterince hızlı olmayan algoritmalar, optimal olmayan çözümler üretebilir. Bu durum, çözümün kalitesini düşürür ve karar vericilerin optimal kararlar almasını zorlaştırır.
- **Pareto Çeşitliliğinin Korunması:** Pareto cephesinde çeşitlilik sağlamak ve çözümler arasındaki dengeyi korumak kritik bir zorluktur. Çeşitlilik, farklı çözüm seçeneklerinin korunması anlamına gelir ve karar vericilere farklı alternatifler sunar. Ancak, algoritmaların çeşitliliği koruyamaması durumunda Pareto cephesi daralabilir ve bu da çözüm kalitesini düşürür. Özellikle yakınsama sürecinde çeşitliliğin kaybedilmesi sık karşılaşılan bir sorundur.
- **Hedef Fonksiyonlarının Ağırlıklandırılması:** Hedef fonksiyonlarına verilen ağırlıkların doğru bir şekilde belirlenmesi zordur. Çoğu zaman hedefler arasında öncelik belirlemek karmaşıktır ve kullanıcının bu ağırlıkları belirlemesi subjektif olabilir. Yanlış belirlenen ağırlıklar, algoritmanın optimal olmayan çözümler üretmesine neden olabilir. Özellikle dinamik ortamlar veya belirsiz durumlarda bu ağırlıkların belirlenmesi daha da zorlaşır.
- **Performans Ölçütlerinin Belirlenmesi:** Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde çözümlerin kalitesini değerlendirmek için kullanılan performans ölçütlerinin belirlenmesi zor olabilir. Yakınsama, çeşitlilik ve doğruluk gibi ölçütler önemlidir; ancak, bu ölçütlerin birbiriyle dengelenmesi ve hangi ölçütün daha önemli olduğunun karar verilmesi karmaşık bir süreçtir. Ayrıca, bu ölçütlerin hesaplanması da ek bir hesaplama maliyeti doğurabilir.
- **Algoritma Parametrelerinin Ayarlanması:** Çok amaçlı optimizasyon algoritmalarında kullanılan parametrelerin (popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı vb.) doğru bir şekilde ayarlanması performansı doğrudan etkiler. Yanlış parametre ayarları, algoritmanın Pareto cephesine yakınsamada başarısız olmasına veya çözüm çeşitliliğini kaybetmesine neden olabilir. Parametrelerin problemden probleme uyarlanması gerektiği için her bir problem için yeniden ayarlama yapılması gerekebilir.
- **Hesaplama Maliyeti ve Zaman Karmaşıklığı:** Çok amaçlı optimizasyon problemleri genellikle yüksek hesaplama maliyeti gerektirir. Özellikle büyük ölçekli veya yüksek boyutlu problemler, uzun sürede çözümler üretir. Bu da pratik uygulamalarda zaman kısıtlamaları altında optimal çözüme ulaşmayı zorlaştırır. Evrimsel algoritmalar ve meta-sezgisel yöntemler, büyük popülasyonlar üzerinde çalıştığı için hesaplama süresi artabilir.

2.3.1.1. Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları Türleri

2.3.1.1.1. Evrimsel Algoritmalar

Evrimsel algoritmalar, doğadan ilham alan ve popülasyon temelli optimizasyon yöntemleridir. Genetik algoritmalar, evrim stratejileri ve diferansiyel evrim gibi algoritmalar, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılır [34]. Öne çıkan evrimsel çok amaçlı optimizasyon algoritmaları:

- **Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II):** En yaygın kullanılan çok amaçlı genetik algoritmalarından biridir [34]. Pareto sıralaması ve çözümler arasındaki çeşitliliği koruma yeteneği ile bilinir.
- **Güç Pareto Evrimsel Algoritması 2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, SPEA2):** Dominasyon güçleri ve Pareto cephesi üzerindeki çözümler arasındaki çeşitliliği artırmak için geliştirilmiş bir evrimsel algoritmadır [35].

2.3.1.1.2. Sürü Zekâsı Tabanlı Algoritmalar:

Sürü zekâsı algoritmaları, doğadaki kolektif davranışları taklit eder. Çok amaçlı sürü zekâsı algoritmalarında, popülasyon (örneğin parçacıklar) çözümleri keşfeder ve zaman içinde iyileştirir.

- **Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO):** Bu yöntem parçacık sürü optimizasyonunun (PSO) çok amaçlı optimizasyon versiyonudur. Parçacıkların en iyi yerel ve küresel çözümleri dikkate alarak Pareto cephesi oluşturmasıyla çalışır [35].
- **Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization, ACO):** ACO yöntemi karınca kolonisi algoritmasının çok amaçlı versiyonu, rotalama ve yol bulma gibi problemleri optimize etmek için kullanılır [35].

2.3.1.1.3. Çoklu Popülasyon ve Çoğulluk Temelli Yöntemler:

Çoğulluk temelli algoritmalar, Pareto cephesindeki çeşitliliği artırmak için popülasyonun farklı bölgelerinde çözümler arar. Bu algoritmalar, aynı anda birden fazla alt hedef fonksiyonun optimizasyonunu sağlar.

- **Çok Amaçlı Genetik Algoritma (Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA):** Çeşitliliği artırmak ve Pareto cephesinin genişlemesini sağlamak için geliştirilmiş çok amaçlı genetik algoritmadır [35].

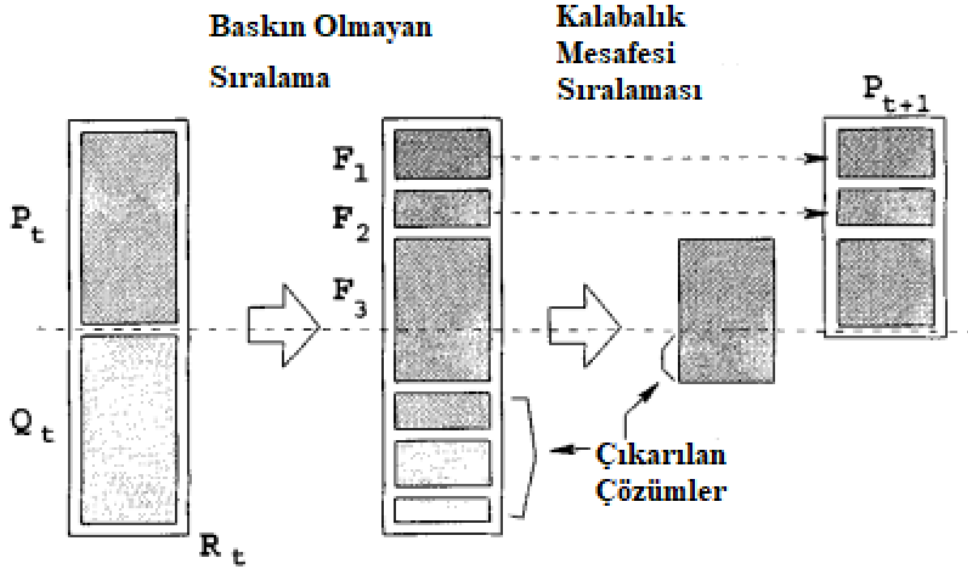
2.3.1.1.4. Pareto Temelli Metotlar:

Bu metotlar, çözümleri Pareto optimalite kavramına göre sıralar. Baskınlık ve çeşitlilik koruma gibi stratejiler kullanılarak optimal çözümler bulunur. Örneğin:

- **Vektör Değerlendirilmiş Genetik Algoritma (Vector Evaluated Genetic Algorithm, VEGA):** Farklı hedef fonksiyonları ayrı popülasyonlarda değerlendirerek Pareto cephesini genişletir [35].

2.3.1.2. NSGA-II

NSGA-II, evrimsel algoritmaların temel prensipleri olan seçim (selection), çaprazlama (crossover) ve mutasyon (mutation) adımlarını kullanarak çalışır [36]. Algoritmanın amacı, popülasyonda bulunan çözümleri Pareto cephesine yakınsamak ve aynı zamanda çözümler arasında çeşitliliği korumaktır. Algoritmanın genel şeması aşağıdaki gibidir.



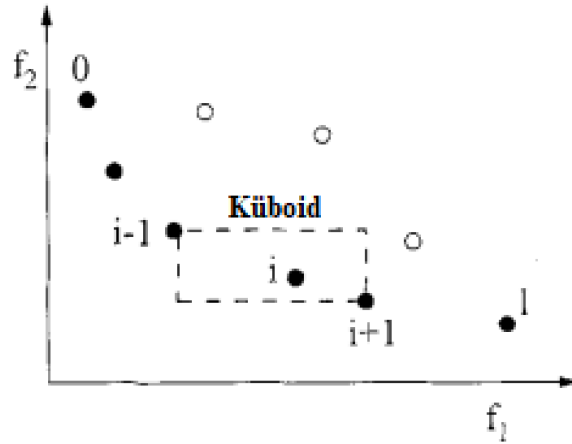
Şekil 2-16 NSGA-II Algoritmasının Genel Şeması [36]

Algoritmanın ana aşamaları ise aşağıda verilmiştir.

Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması: İlk adımda, problem için rastgele bir başlangıç popülasyonu (P_0) oluşturulur. Bu popülasyon, farklı çözümlerden oluşur ve her çözüm, optimizasyon problemine göre farklı hedef fonksiyonları optimize eder.

Hızlı Pareto Sıralaması: Popülasyon, Pareto üstünlüğüne göre sıralanır. Bu sıralama işlemi, çözümleri "baskın olmayan" seviyelere ayırır. Pareto sıralaması, çözümleri birinci, ikinci, üçüncü ve diğer seviyelere göre ayırarak yapılır. İlk seviye, Pareto cephesini temsil eder ve baskın olmayan en iyi çözümleri içerir.

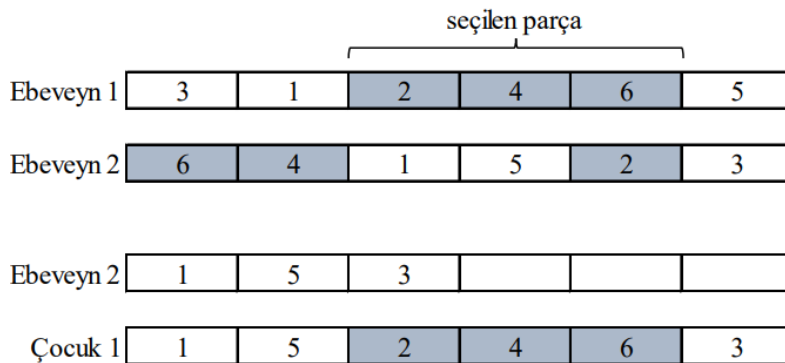
Kalabalık Uzaklığı Hesaplama: Çeşitliliği korumak amacıyla, her çözümün kalabalık uzaklığı hesaplanır. Kalabalık uzaklığı, çözümler arasındaki farklılıkları ölçen bir metriktir. Kalabalık uzaklığı ne kadar büyükse, çözüm uzayında o kadar geniş bir bölgeyi kapsar. Bu adım, popülasyondaki çözümler arasında çeşitliliği korur ve çözümlerin yoğunlaşmasını önler.



Şekil 2-17 Kalabalık Uzaklığı Hesaplama (İçi dolu daireler baskılanamayan çözümleri ifade etmektedir.) [36]

Turnuva Seçimi: Seçim sürecinde, çözümler karşılaştırılır ve daha iyi çözümler seçilir. NSGA-II, turnuva seçimi yöntemini kullanarak çözümleri seçer. Seçimde iki kriter dikkate alınır: birincisi, Pareto sıralamasıdır ve ikincisi ise kalabalık uzaklığıdır. Çözümler, öncelikle Pareto sıralamasına göre seçilir; eğer sıralamalar aynıysa, kalabalık uzaklığı yüksek olan çözümler tercih edilir.

Çaprazlama ve Mutasyon: Seçilen çözümler, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulur. Çaprazlama, iki çözümün genetik bilgilerini birleştirerek yeni çözümler üretir. Mutasyon ise çözümlerde rastgele küçük değişiklikler yaparak çeşitlilik ekler. Bu adımlar, yeni neslin (Q_0) oluşturulmasını sağlar.



Şekil 2-18 Çaprazlama-Mutasyon [38]

Birleştirme ve Yeni Popülasyon Oluşturma: İlk nesil (P_0) ve yeni nesil (Q_0) birleştirilerek daha büyük bir popülasyon (R_0) elde edilir. Bu birleşik popülasyon, hızlı Pareto sıralaması ve kalabalık uzaklığı hesaplanarak yeniden değerlendirilir. En iyi çözümler seçilerek yeni popülasyon (P_1) oluşturulur. Bu süreç, belirli bir iterasyon sayısına kadar tekrarlanır.

Sonuçların Elde Edilmesi: Algoritma sonlandığında, elde edilen çözümler Pareto cephesi üzerinde bulunur. Bu çözümler, optimal dengeyi temsil eden farklı alternatifler sunar. Karar vericiler, ihtiyaçlarına göre bu çözümler arasından seçim yapabilir.

NSGA Algoritmasının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- **Düşük Hesaplama Karmaşıklığı:** NSGA-II, hızlı Pareto sıralaması ve kalabalık uzaklığı hesaplama süreçleri sayesinde, önceki NSGA versiyonuna kıyasla daha düşük hesaplama maliyeti sunar. Hesaplama karmaşıklığı $O(MN^2)$ (M: hedef fonksiyon sayısı, N: popülasyon büyüklüğü) olarak belirlenmiştir.
- **Çeşitliliğin Korunması:** Kalabalık uzaklığı metriği, çözümler arasındaki çeşitliliği korur ve çözümlerin aynı bölgede toplanmasını önler. Bu, Pareto cephesinde geniş bir çözüm kümesi elde edilmesini sağlar.
- **Pareto Cephesine Hızlı Yakınsama:** NSGA-II, Pareto cephesine yakınsamak için etkin bir mekanizma sunar. Hızlı Pareto sıralaması ve turnuva seçimi, algoritmanın Pareto cephesine hızlı bir şekilde ulaşmasını sağlar.
- **Kullanıcı Tanımlı Parametreye Gerek Duyulmaması:** NSGA-II, dışsal parametrelerin minimum düzeyde olduğu bir algoritmadır. Çoğu çok amaçlı optimizasyon algoritmasının aksine, NSGA-II kullanıcıdan ek parametre ayarlamaları gerektirmez.

2.3.1.3. MOPSO

MOPSO, çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir algoritmadır. Bu algoritma, klasik Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) algoritmasının çok amaçlı problemlere uyarlanmış bir versiyonudur [39]. Algoritmanın hesaplama karmaşıklığı ise $O(N(M+A\log A))$ (M: hedef fonksiyon sayısı, N: popülasyon büyüklüğü, A: dış arşiv boyutu) olarak belirlenmiştir.

MOPSO algoritmasının temel kavramları aşağıda verildiği gibidir.

Parçacık: Optimizasyon problemindeki olası çözümleri temsil eder. Her parçacık, çok boyutlu bir uzayda bir konum ve hız vektörüne sahiptir.

Sürü: Parçacıkların topluluğudur. Her bir parçacık, çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümüne doğru hareket eder.

Algoritmanın çalışma prensibi ise aşağıdaki gibi verilir.

Başlatma: Parçacıkların konumları ve hızları rastgele başlatılır. Her parçacık için başlangıçta bir "en iyi konum" belirlenir. Çok amaçlı bir problemde, en iyi konum, Pareto optimal çözüme en yakın olan konumdur.

Dış Arşiv (Archive): Pareto optimal çözümleri saklamak için kullanılan bir dış arşiv oluşturulur. Arşiv, en iyi çözümleri tutar ve aşırı kalabalığı önlemek için bazı çeşitlendirme teknikleri uygulanır.

Hız ve Konum Güncelleme: Her parçacık, hızını ve konumunu klasik PSO'daki gibi günceller, ancak burada kullanılan "en iyi" pozisyonlar, çok amaçlı problem yapısına göre seçilir. Her parçacık, arşivden rastgele seçilen bir lider parçacığa göre hareket eder. Hız güncelleme denklemi ise aşağıda verildiği gibidir.

$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (leader - x_i(t))$$

$v_i(t)$: Parçacık i 'nin t zamanındaki hızı.

$x_i(t)$: Parçacık i 'nin t zamanındaki konumu.

$pbest_i$: Parçacık i 'nin en iyi konumu.

$leader$: Arşivden seçilen lider.

w : Atalet katsayısı.

c_1 ve c_2 : Öğrenme katsayıları.

r_1 ve r_2 : 0 ile 1 arasında rastgele sayılar.

Pareto Cephesi Güncelleme: Her iterasyon sonunda, tüm parçacıkların mevcut konumları değerlendirilir ve dış arşiv güncellenir. Arşivdeki çözümler, Pareto optimal çözümler olarak muhafaza edilir. Gerekliğinde arşivde aşırı kalabalığı önlemek için çeşitlendirme ve seçme mekanizmaları uygulanır.

Tekrar Etme: Adımlar, maksimum iterasyon sayısına veya diğer durdurma kriterlerine ulaşılan kadar tekrar edilir.

Algoritmanın avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- **Küresel ve Yerel Arama Dengeleme:** MOPSO, küresel ve yerel arama yeteneklerini dengeleyerek, çözüm uzayının geniş bir bölümünü keşfetme ve aynı zamanda yerel optimumlara yakınsama şansını artırır.
- **Dış Arşiv Kullanımı:** Pareto optimal çözümleri saklamak için bir dış arşiv kullanır. Bu, sadece çözümlerin kaydedilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda aşırı kalabalığın önlenmesine ve çeşitliliğin korunmasına da yardımcı olur.
- **Paralel Çalışma Yeteneği:** PSO tabanlı algoritmaların doğası gereği, MOPSO paralel olarak çalışabilir. Bu, özellikle büyük ölçekli ve karmaşık problemlerde hesaplama verimliliğini artırır.

2.3.1.4. NSGA-II ve MOPSO Karşılaştırması

İlgili iki algoritmanın karşılaştırması aşağıda incelenmiştir.

Temel Algoritma Yapısı

- **NSGA-II:**
 - Genetik algoritma (GA) tabanlıdır.
 - Bireylerin bir popülasyon içinde evrim geçirmesine dayanır. Çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi biyolojik süreçlerin taklit edilmesiyle çalışır.
 - Ana süreç, bireylerin çözümlerini bir dizi kuşak boyunca evrimleştirerek çözümlerin kalitesini iyileştirmeye çalışmaktır.
 - NSGA-II, özellikle pareto sıralaması ve kalabalık derecelendirme ile öne çıkar.
- **MOPSO:**
 - Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) tabanlıdır.
 - Parçacıklar, arama alanında "sürü" halinde hareket eder. Her bir parçacık hem kendi geçmiş deneyimlerine (kendi en iyi pozisyonu) hem de tüm sürünün en iyi deneyimlerine (global en iyi pozisyon) dayalı olarak pozisyonunu günceller.
 - MOPSO, PSO'nun çok amaçlı optimizasyona uygulanmış halidir. Çözümleri bir pareto arşivi ile depolar ve günceller.

Pareto Önceliği ve Sıralama

- **NSGA-II:**
 - NSGA-II'nin en önemli özelliklerinden biri, pareto baskınlığı kullanarak çözümleri sıralamasıdır.
 - Bireyler, pareto cephesi adı verilen seviyelerde sıralanır ve bu sayede pareto-optimal çözümler belirlenir.

- Ayrıca, çözümler arasındaki kalabalık mesafesi hesaplanarak çeşitlilik sağlanır. Kalabalık mesafesi, çözümlerin birbirine yakınlığına göre seçimi etkiler.
- **MOPSO:**
 - MOPSO, pareto arşivleri kullanır ve bu arşivde tutulan çözümler sürekli güncellenir. Bu çözümler pareto-baskınlık ilkesine göre depolanır.
 - Bu süreçte, parçacıkların hareketlerini yönlendiren en iyi pozisyonlar (liderler) genellikle pareto arşivinden seçilir.
 - MOPSO'da lider seçiminde rastgelelik ve çeşitlilik sağlamak için çeşitli stratejiler kullanılır.

Çeşitlilik Sağlama

- **NSGA-II:**
 - Kalabalık mesafesi adı verilen bir metrikle çözümler arasındaki çeşitliliği sağlar. Bu sayede popülasyon, arama uzayında daha geniş bir alana yayılabilir.
 - Kalabalık mesafesi, çözümler arasındaki yakınlığı belirleyerek benzer çözümlerin bir araya toplanmasını önler ve daha geniş bir çözüm yelpazesi sağlar.
- **MOPSO:**
 - Çeşitliliği sağlamak için pareto arşivinde ve parçacıkların hareketinde çeşitli stratejiler uygulanır. Parçacıkların hareketi sırasında mutasyon veya rastgelelik gibi yöntemlerle çözüm uzayında geniş bir arama yapılmaya çalışılır.
 - MOPSO'da ayrıca lider seçimi sırasında çeşitliliği artırmak için farklı liderler seçilebilir.

Avantajlar ve Dezavantajlar

- **NSGA-II Avantajlar:**
 - Pareto sıralaması ve kalabalık mesafesi sayesinde çözüm çeşitliliğini iyi korur.
 - Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kabul gören bir algoritmadır.
- **NSGA-II Dezavantajlar:**
 - Karmaşık problemlerde yüksek hesaplama maliyeti ve popülasyonun büyük olması gerekebilir.
 - Genetik algoritmaların doğası gereği bazı problemler için parametre ayarlamaları (mutasyon oranı, çaprazlama oranı) zorlu olabilir.
- **MOPSO Avantajlar:**

- Hızlı yakınsama sağlar.
- PSO'nun basit yapısı nedeniyle daha az parametre ayarı gerektirir.
- Küçük popülasyonlarla hızlı ve etkili çözümler elde edebilir.
- **MOPSO Dezavantajlar:**
 - Pareto arşivi çeşitliliği korumakta zorlanabilir.
 - Yerel en iyi çözümlere sıkışma riski daha yüksektir.
 - NSGA-II kadar iyi bir çeşitlilik sağlama kapasitesine sahip olmayabilir.

NSGA-II, genellikle daha karmaşık ve büyük ölçekli çok amaçlı optimizasyon problemleri için tercih edilir ve çözüm kalitesi açısından daha istikrarlı sonuçlar vermektedir. MOPSO, daha hızlı yakınsama sağlamak istenilen, özellikle daha küçük popülasyonlarda ve düşük maliyetli optimizasyon problemlerinde etkili olabilmektedir. Ancak, yerel optimumlara sıkışma riski daha yüksektir. Algoritmaların seçiminde, çözüm süresi, popülasyon büyüklüğü ve çeşitlilik koruma gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

2.4. Kümeleme Algoritmaları

Kümeleme algoritmaları, verileri benzer özelliklere göre gruplandıran makine öğrenimi teknikleridir [44]. Kümeleme, denetimsiz öğrenme kategorisine girer ve etiketlenmemiş veriler üzerinde çalışır. Algoritmanın amacı, veri noktalarını anlamlı kümelerle ayırarak, her küme içindeki veri noktalarının birbirine benzer ve farklı kümelerdeki veri noktalarından farklı olmasını sağlamaktır. Kümeleme algoritmaları, veri keşfi, segmentasyon, anomali tespiti ve birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılır.

Kümeleme algoritmaları aşağıda yazan kategorilerde incelenir.

- Bölümlendirme Tabanlı Algoritmalar
 - K-Means Algoritması
 - K-Medoids
- Hiyerarşik Kümeleme Algoritmaları
 - Agglomeratif Hiyerarşik Kümeleme (Bottom-Up)
 - Tek-bağlantılı (Single-linkage)
 - Tam-bağlantılı (Complete-linkage)
 - Ortalama-bağlantılı (Average-linkage)
 - Bölücü Hiyerarşik Kümeleme (Divisive Hierarchical Clustering) (Top-Down):
- Yoğunluk Tabanlı Kümeleme Algoritmaları

- Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekansal Kümelenmesi (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)
- Kümeleme Yapısını Belirlemek İçin Noktaları Sıralama (Ordering Points to Identify the Clustering Structure, OPTICS)
- Grid Tabanlı Kümeleme Algoritmaları
 - İstatistiksel Bilgi Tablosu (Statistical Information Grid, STING)
- Model Tabanlı Kümeleme Algoritmaları
 - Gauss Karışım Modelleri (Gaussian Mixture Models, GMM)
 - Beklenti-Maksimizasyonu (Expectation-Maximization, EM)

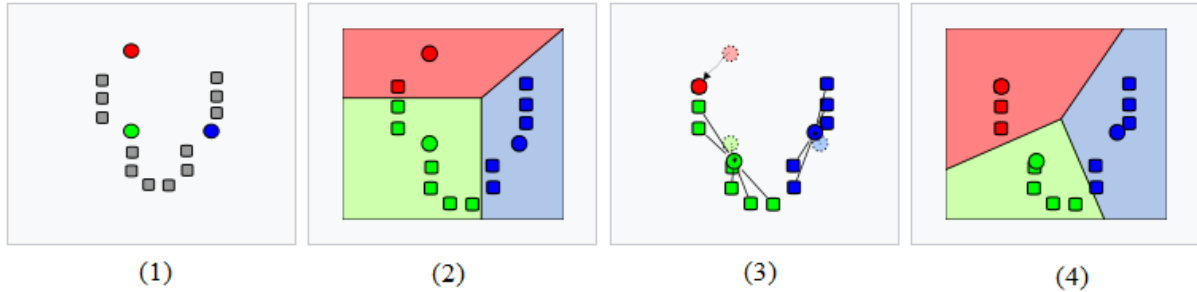
2.4.1. K-Means Kümeleme Algoritması

K-Means algoritması, en yaygın kullanılan kümeleme algoritmalarından biridir [44]. Algoritma, denetimsiz öğrenme yöntemlerinden biridir ve veri noktalarını önceden belirlenmiş K sayıda kümeye ayırmayı amaçlar. K-Means, her bir kümenin merkezine (centroid) dayalı olarak çalışır ve veri noktalarını en yakın merkeze atayarak kümeleme işlemini gerçekleştirir.

K-Means algoritması aşağıdaki adımlarla çalışır:

- **Küme Sayısının Belirlenmesi (K) (1):** Algoritmanın ilk adımı, kaç küme (K) oluşturulacağını belirlemesidir. Küme sayısı genellikle problem gereksinimlerine göre önceden belirlenir. Ancak doğru K sayısını belirlemek için bazı yöntemler (örneğin, Elbow yöntemi) kullanılabilir.
- **Başlangıç Merkezlerinin Seçilmesi (1):** Küme merkezleri, genellikle veri noktaları arasından rastgele seçilir. Bu merkezler, her kümenin ortalama konumunu temsil eder ve algoritmanın ilerleyen adımlarında güncellenir.
- **Her Veri Noktasının En Yakın Merkeze Atanması (2):** Her bir veri noktası, en yakın merkezle olan uzaklığına göre (genellikle öklidyen uzaklık kullanılır) bir kümeye atanır. Bu atama işleminden sonra veri noktaları K kümeye ayrılmış olur.
- **Merkezlerin Güncellenmesi (3):** Kümeleme işleminden sonra her bir küme için merkez yeniden hesaplanır. Her kümenin yeni merkezi, o kümedeki veri noktalarının ortalaması alınarak belirlenir.
- **Atama ve Güncelleme Adımlarının Tekrarlanması:** Her veri noktası tekrar en yakın merkeze atanır ve merkezler güncellenir. Bu işlem, merkezlerin sabitlenmesine veya belirli bir durma kriterine ulaşılan kadar tekrarlanır.

- **Sonuçların Elde Edilmesi (4):** Algoritma, merkezler sabitlenince veya veri noktalarının kümeler arasında çok az hareket etmesi durumunda sonlanır. Son durumda her bir veri noktası bir kümeye atanmış olur ve her kümenin bir merkezi vardır.



Şekil 2-19 K-Means Algoritmasının Adımları [43]

K-Means Algoritmasının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- **Kolay ve Hızlı Uygulama:** K-Means algoritması basit bir matematiksel model üzerine kuruludur ve büyük veri setlerinde bile hızlı çalışır. Zaman karmaşıklığı $O(n*k*t)$ şeklindedir (n: veri noktası sayısı, k: küme sayısı, t: iterasyon sayısı).
- **Ölçeklenebilirlik:** Algoritma büyük veri kümelerine uygulanabilir ve yüksek boyutlu veri setleriyle de uyumlu çalışır.
- **Kümeleme Çıktısının Kolay Yorumlanması:** Kümeleme sonucunda elde edilen merkezler ve kümeler kolayca yorumlanabilir. Her küme, belirli bir veri alt kümesini temsil eder.

K-Means Algoritmasının dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- **Küme Sayısının (K) Önceden Belirlenmesi Gerekliliği:** K-Means algoritmasında küme sayısı (K) kullanıcı tarafından önceden belirlenmelidir. Yanlış K değeri seçimi, kötü kümeleme sonuçlarına yol açabilir.
- **Başlangıç Merkezlerinin Seçimi:** Algoritmanın başarısı, başlangıçta seçilen merkezlere oldukça bağlıdır. Yanlış merkez seçimi, algoritmanın yerel minimumda sıkışmasına neden olabilir.
- **Küresel ve Eşit Büyüklükteki Kümeleri Varsayar:** K-Means, kümelerin küresel ve eşit büyüklükte olmasını varsayar. Ancak, gerçek veri setlerinde kümeler küresel olmayabilir veya boyutları farklı olabilir. Bu durumda K-Means, doğru sonuçlar vermeyebilir.

- **Uç Değerlere Karşı Hassasiyet:** K-Means, uç değerlere (outlier) karşı hassastır. Uç değerler, kümelerin merkezlerinin yanlış hesaplanmasına yol açarak hatalı kümeler oluşturabilir.

2.4.2. DBSCAN Algoritması

DBSCAN yoğunluk tabanlı bir kümeleme algoritmasıdır [47]. Diğer kümeleme algoritmalarından farklı olarak, DBSCAN, küme sayısını önceden belirlemek zorunda kalmadan, veri noktalarının yoğunluğuna göre kümeleri belirler ve aynı zamanda gürültü noktalarını tespit edebilir. Bu özelliği nedeniyle, özellikle düzensiz şekilli kümeleri ve uç değerleri olan veri kümelerinde oldukça başarılıdır.

İlgili algoritmanın temel parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2-3 DBSCAN Algoritmasının Parametreleri

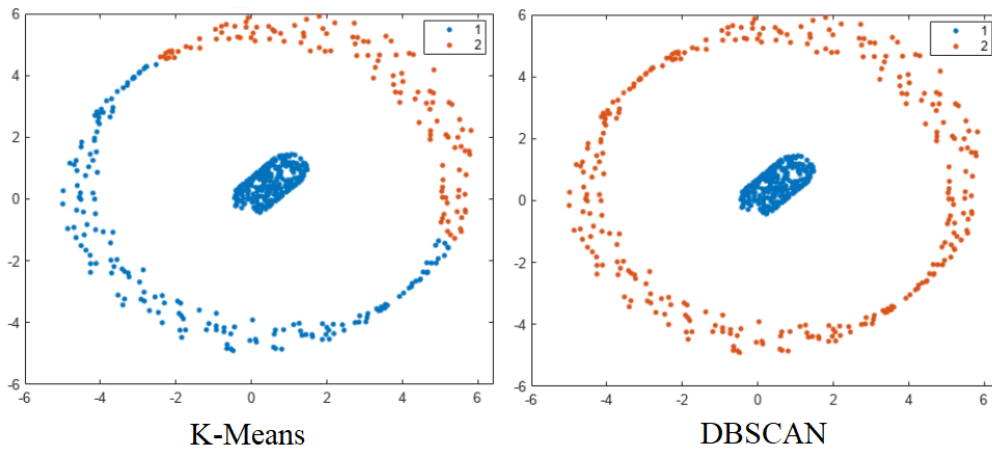
Epsilon (ϵ)	Bir veri noktasının komşu olarak kabul edileceği maksimum mesafe. Bu mesafe, "yarıçap" olarak da düşünülebilir. Bir veri noktasının ϵ yarıçapı içinde yer alan diğer noktalar o noktaya komşu olarak kabul edilir.
MinPts (Minimum Points)	Bir noktanın çekirdek nokta olarak kabul edilmesi için gerekli minimum komşu sayısıdır.
Çekirdek Nokta (Core Point):	Bir veri noktasının ϵ yarıçapı içinde en az MinPts kadar komşusu varsa, bu nokta çekirdek nokta olarak kabul edilir.
Kenar Nokta (Border Point):	Bir veri noktası, bir çekirdek noktanın komşusu olmasına rağmen, kendisi çekirdek nokta olacak yeterli sayıda komşuya sahip değilse, bu nokta kenar nokta olarak adlandırılır.
Gürültü Noktası (Noise Point):	Ne çekirdek nokta ne de kenar nokta olarak kabul edilen, kümelere dahil olmayan veri noktalarıdır. Bu noktalar genellikle uç değerlerdir.

DBSCAN algoritması aşağıdaki adımlarla çalışır:

- **Bir Nokta Seçimi ve Komşularının Belirlenmesi:** Algoritma, rastgele bir veri noktası seçer ve bu noktanın ϵ yarıçapı içindeki komşularını belirler.
- **Çekirdek Nokta ve Kümeleme Kontrolü:** Eğer bu noktanın komşu sayısı MinPts değerine eşit veya büyükse, bu nokta bir çekirdek nokta olarak kabul edilir ve yeni bir küme başlatılır. Bu küme, çekirdek noktanın komşuları ile genişletilir.
- **Kümenin Genişletilmesi:** Her yeni çekirdek noktanın komşuları, kümeye dahil edilir. Eğer bir komşu nokta da çekirdek nokta ise, onun da komşuları kümeye eklenir. Bu işlem, yeni komşular eklenemedikçe devam eder.
- **Gürültü ve Kenar Noktalarının Belirlenmesi:** Eğer bir noktanın komşu sayısı MinPts değerinden küçükse, bu nokta ya bir kenar noktasıdır (bir çekirdek noktanın komşusu olarak bir kümeye dahil olabilir) ya da bir gürültü noktasıdır (hiçbir kümeye dahil olmaz).
- **Tüm Noktaların İşlenmesi:** Tüm noktalar işlenene kadar süreç tekrarlanır. Kümelere atanamayan noktalar gürültü olarak işaretlenir.

DBSCAN Algoritmasının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- **Küme Sayısının Önceden Belirlenmesine Gerek Yoktur:** K-Means algoritmasından farklı olarak, DBSCAN’de küme sayısını önceden belirlemenize gerek yoktur. Küme sayısı, veri noktalarının yoğunluğuna göre otomatik olarak ortaya çıkar.



Şekil 2-20 K-Means ve DBSCAN Algoritmalarının Kümeleme Sonuçları [45]

- **Düzensiz Şekilli Kümeleri Tespit Edebilme:** DBSCAN, kümelerin küresel olmasını varsaymaz. Farklı şekillerdeki ve yoğunluklardaki kümeleri başarılı bir şekilde tespit edebilir.

- **Gürültüye Dayanıklılık:** Algoritma, gürültü noktalarını tespit edebilir ve kümelere dahil etmez. Bu özellik, veri setlerinde bulunan uç değerleri filtrelemek için önemlidir.
- **Ölçeklenebilirlik:** DBSCAN, büyük veri setlerinde de etkin bir şekilde çalışabilir. Özellikle, uygun veri yapıları (örneğin, KD-Tree veya R-Tree) kullanıldığında algoritmanın performansı önemli ölçüde artırılabilir.

DBSCAN Algoritmasının dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- **Epsilon ve MinPts Parametrelerinin Seçilmesi:** Algoritmanın performansı büyük ölçüde ϵ ve MinPts değerlerinin doğru seçilmesine bağlıdır. Yanlış parametre seçimi, kümelerin yanlış tespit edilmesine veya tüm veri noktalarının gürültü olarak kabul edilmesine yol açabilir.
- **Değişken Yoğunlukta Kümeler İçin Zorluk:** Farklı yoğunluklara sahip kümeleri tespit etmekte zorlanabilir. Eğer kümeler arasındaki yoğunluk farkı çok büyükse, algoritma düşük yoğunluklu kümeleri gürültü olarak değerlendirebilir.
- **Yüksek Boyutlu Verilerde Zorluk:** Özellikle yüksek boyutlu veri kümelerinde (örneğin, metin verileri gibi) performans kaybı yaşayabilir. Bu durumda ϵ mesafesini doğru belirlemek zorlaşır.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde HAP sistemlerinin konumlandırılması, HAP sistemlerinde hüzme oluşturma/yönlendirme, HAP sisteminin hizmet vereceği kullanıcıların gruplanması ve taleplerinin karşılanmasıyla alakalı literatür taraması verilecektir.

3.1. HAP Sistemlerinin Konumlandırılması

Çoklu HAP sistemleri geniş alanlara hizmet vermenin en önemli yöntemlerinden biridir. En iyi kalitede hizmet sunabilmek, kullanıcılar arası ve HAP sistemleri arası girişi minimum seviyede tutmak için, birçok sistemden oluşan yapı gökyüzünde en uygun şekilde konumlandırılmalıdır.

Üretim, iletişim, sensörler, elektronik ve kontrol teknolojilerindeki son gelişmeler, havadan iletişim ağlarında (Airborne Communication Networks, ACN) benzeri görülmemiş bir uygulama artışına sebep olmuştur. ACN'ler, iletişim erişim platformları oluşturmak için alıcı-vericiler ve sensörlerle donatılmış çeşitli hava araçlarını kullanmak üzere tasarlanmıştır. Bu hava araçları esas olarak uyduları, HAP sistemlerini ve düşük irtifa platformlarını (Low-Altitude Platforms, LAP) (örneğin, İHA) içerir [57]. Xuyu Wang ve diğerleri bu çalışmada [51] görev katmanı, HAP katmanı ve uydu katmanından oluşan heterojen bir ağ sistemini önermişlerdir. Bu ağ sisteminde, HAP sistemlerinin sınırlı enerji kapasitesi nedeniyle enerji verimli olacak bir konumlandırma stratejisinin yöntemi açıklanmıştır. HAP sisteminin enerji tüketimini minimize etmeye yönelik bir enerji tüketim fonksiyonu modellenmiştir. Bu fonksiyon, enerji tüketimini en aza indirmek amacıyla, klasik kümeleme yöntemlerinden olan K-Means'in yerel minimumlara sıkışma problemine alternatif olarak geliştirilen Deterministik Tavlama Algoritması (Deterministic Annealing Algorithm) kullanılarak optimize edilmiştir. [58]'daki çalışmada ise, yer kullanıcılarını desteklemeyi amaçlayan uydu, hava ve karasal ağları entegre eden yeni bir kablosuz şema önerilmiştir. Daha spesifik olarak, karasal baz istasyonları, HAP sistemleri ve uydu istasyonları yardımıyla kullanıcıların iletişim veriminin artırılmasını incelenmiştir. Amaç olarak, kullanıcıların verimini en üst düzeye çıkarmak için kaynak tahsislerini ve HAP sistemlerinin konumlarını optimize edilmesi seçilmiştir. Bu bağlamda optimizasyon problemi iki aşamada formüle edilip çözülmüştür. İlk aşamada, sistemler arası ilişkileri ve güç tahsislerini yönetmek için yaklaşık bir çözüm önerilmiştir. İkinci aşamada ise, ilişkileri ve güç tahsislerini çözmek için frekans bölümlenme tekniğine dayanan düşük karmaşıklığa sahip bir yaklaşım önerilmiştir. Öte yandan, uzun vadeli aşamada, yinelemeli küçültme ve yeniden hizalama sürecine dayalı etkili bir algoritma önererek, HAP sistemlerinin

konumları optimize edilmiştir. Ha Yoon Song [49] ise HAP sistemlerinin İnsansız Hava Araçları (İHA) için stratosferik altyapı olarak kullanılmasını ve K-Means kümeleme mekanizması ile coğrafi kümeleme ve ana baz istasyonlarının (Main Base Station, MBS) yerleştirilmesini ele almıştır. Çalışmada yerdeki kullanıcıların oluşturduğu düğümler, birden fazla kümeye ayrılmış ve her bir kümeye bir İHA atanarak, bu İHA'nın bir ana baz istasyonu olarak işlev görmesi sağlanmıştır. Kümeler içerisindeki düğümlerin arasında ağ bağlantıları kurmak için İHA'ların birbirleriyle iletişim kurması hedeflenmiştir.

İletişim ağlarının kapsama alanını genişletmek ve özellikle kırsal veya altyapısı yetersiz bölgelerde yüksek hızlı veri hizmetleri sunmak için HAP'ların baz istasyonu olarak hizmet vermesi etkili bir çözüm olarak karşımıza çıkar [8]. Geleneksel yer tabanlı baz istasyonlarına kıyasla daha düşük gecikme süresi ve yüksek veri iletim kapasitesi sağlaması HAP sistemlerine olan ilgiyi arttırmıştır. Feihong Dong ve arkadaşları [48] her HAP sisteminin bir mobil baz istasyonu olarak görüldüğü ve ilk kez, hizmet kalitesi (Quality of Service, QoS) ve kullanıcı taleplerinin kesin olarak karşılandığı bir mobil baz istasyonu yerleştirme metodolojisini önermiştir. İlgili yerleştirme probleminin çözülebilmesi için öncelikle, HAP geniş bant ağlarında hizmet kalitesi ölçümleri ve kullanıcı talep modeli oluşturulmuştur. Maliyet başına ağ kapasitesi (network capacity per cost, NCPC) metriği tanımlanarak hizmet kalitesini en üst düzeye çıkarmak için tasarım vektörü (design vector, DV) optimize edilmiştir. Tang, Shuzhu ve diğerleri [53] HAP sisteminin baz istasyonu olarak kullanılmasıyla uzay bilgi ağının optimal tasarımını amaçlamıştır. Çalışmada kullanıcı talep dağılımına uygun, ağ kapasitesi kaynağına dayalı HAP geniş bant iletişim ağı için çok amaçlı bir optimal dağıtım metodolojisi önerilmiştir. Öncelikle çoklu HAP sisteminden oluşan sanal çok girişli ve çok çıkışlı (Virtual Multiple Input Multiple Output, VMIMO) geniş bant iletişim ağı modeli oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonları olarak ise ergodik kapasite ve eşleştirme derecesi seçilmiştir. Eşleşme derecesi ise alınan talep dağılımı ve kapasite dağılımı arasındaki Hash parmak izi farkı olarak nitelendirilmiştir. Bu modeli çözmek için NSGA-II algoritması kullanılmıştır.

Yakın uzay (Near Space, NS) araçları kapsamına alınabilecek HAP sistemlerinde [52], kendiliğinden organize olan ağların yerleşim problemini çözmek için oyun teorisine dayalı bir dağıtık optimizasyon yöntemi önerilmektedir. Öncelikle, NS platformlarında kendiliğinden organize olan ağ yerleşimi, bir potansiyel oyun olarak modellenmiştir. Optimizasyon hedefi, ağın kapsama alanını ve hizmet kalitesini maksimize etmektir. Daha sonra, potansiyel oyun, kısıtlı uzamsal uyarlamalı oyun (Restricted Spatial Adaptive Play, RSAP) algoritması ile çözülmektedir. Bu algoritma, oyunu olasılık dahilinde Nash dengesi noktasına yönlendirir ve

bu denge, yerleşim optimizasyonunun hedef fonksiyonunun uç çözümlerini temsil eder. Oyun teorisine dayalı bu öğrenme yöntemi, NS platformlarının küresel bölge bilgisine ihtiyaç duymadan dağıtık bir şekilde yerleştirilmesini sağlamıştır. Zhu Zhiliang ve diğerleri ise [54], NS araçlarını içeren bir tür bölgesel Mobil Ad Hoc Ağı (Mobile Ad Hoc Network, MANET) için bir yerleştirme şeması önermiştir. Önerilen yerleştirme şeması, PSO algoritmasına dayanmaktadır. NS araçları için konumlandırma probleminde, ağın ortak kapsama alanının maksimize edilmesi hedeflemiştir.

HAP sistemlerinin konumlandırılması sırasında, ilgili sistemler arası mesafe büyük bir önem taşımaktadır. Bu mesafenin belirlenmesinde, kapsama alanlarının üst üste binmesini en aza indirmek ve iletişim ağında kesintisiz bağlantıyı sağlamak temel hedefler olarak sıralanmaktadır. Optimum mesafe ayarlanırken, sistemlerin birbirlerinin sinyaline girişim yaratmayacak kadar uzak ama veri iletimi için yeterince yakın olmaları sağlanmalıdır. Bu mesafe, genellikle HAP'lerin kapsama alanı, kullanım amaçları ve frekans bandı gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmektedir. D. Grace ve diğerleri bu çalışmada [50] milimetre dalga bantlarında çalışan HAP iletişim ağlarının kapasitesini önemli ölçüde artırmaya yönelik bir yöntem sunmuştur. Çoklu HAP sistemlerinin, kullanıcı anteninin yönlülüğünden yararlanarak ortak bir frekans tahsisini nasıl paylaşabileceği gösterilmiştir. Bu tür yerleşimin sistem kapasitesi, HAP sistemlerinin minimum açısal ayırımından ve kullanıcı anteninin yan lob seviyesinden kritik olarak etkilendiği gösterilmiştir. Yaklaşık 5 derecelik tipik anten hüzmeye genişliği için 4 km'lik HAP arası aralık, optimum performansın sağlanması için yeterli olacağı anlaşılmıştır. Toplam bant genişliği verimliliği hem Shannon denklemi kullanılarak hem de tekli veya çoklu hücre oluşturabilen çoklu HAP yapılandırmaları için pratik modülasyon ve kodlama şemaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Kullanılan kullanıcı anteni hüzmeye genişlikleri için platform sayısındaki artışla orantılı olarak 10 HAP sistemine kadar kapasite artışlarının olduğu gösterilmiştir. [56]'te ise kapsama oranının (HAP kapsama yarıçapı) HAP sistemleri arası mesafeye oranı açısından, dağıtım verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için bir optimizasyon algoritması önerilmiştir. Karasal ortamların istatistiksel ve geometri özelliklerini kapsamlı bir şekilde dikkate alan geometri tabanlı bir HAP kanal modeli çıkartılmıştır. Önerilen kanal modeline dayanarak, havadan yere iletişimin görüş hattı iletim olasılığı türetilmiştir. Ayrıca yol kaybı da analitik olarak karakterize edilmiştir.

S. Tang ve diğerleri [55], HAP geniş bant iletişim ağlarının optimizasyonuna odaklanmıştır. Çalışmada, kullanıcıların taleplerini karşılayabilecek ve hedef bölgenin temel hizmetini garanti edebilecek çok amaçlı bir optimizasyon dağıtım yöntemi önerilmiştir. HAP tekli ve çoklu

kapsama alanı için iletişim uydu-yer hattı performansı tartışılmış ve kapasitenin üst sınırına eşdeğer olan toplam geniş bant verimlilik modeli sunulmuştur. Kapasite-talep eşleştirme derecesi (Capacity Demand Matching Degree, CDMD) ve ağ kapsamı amaç fonksiyonları olarak seçilmiştir. Bahsedilen kısıtlı ve çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek için NSGA-II kullanılmıştır. Chen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [67], HAP iletişim sistemlerinde anten yönlülüğü ve HAP konumlandırmasının sistem kapasitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada kullanıcı ve HAP için anten modelleri tartışılmış ve HAP sistemlerinin kapsama alanı dışında konumlandırıldığı durumlarda, düz yan loblu bir anten deseninin, birden fazla HAP takımını modellemek için uygun olduğu gösterilmiştir. Tek bir HAP senaryosu kullanılarak, HAP anten hüzmeye genişliğinin daraltılmasının, kapsama alanının büyük kısmında daha iyi bir DL CNR sağlayabileceği gösterilmiştir. Çalışmada, HAP anten hüzmeye genişliği, HAP anten yönlendirmesi ve HAP sistemlerinin yerleştirme yarıçapının rolleri araştırılmıştır. Bu üç parametrenin birleşimiyle maksimum CNR'nin konumunu belirlemek için bir denklem türetilmiştir. Aynı kanalda çalışan ve birbirlerine girişim yapan birden fazla HAP sisteminin bulunduğu daha karmaşık bir senaryo, CINR ve spektral verimlilik açısından değerlendirilmiştir. HAP sistemlerinin, kapsama alanı dışında belirli bir yerleştirme yarıçapında konumlandırılmasının performansı iyileştirebileceği gösterilmiştir. Bu teknikler kullanılarak, HAP sayısının 16'ya kadar artırılması durumunda toplam bant genişliği verimliliğinin neredeyse orantılı olarak arttığı gösterilmiştir.

3.2. HAP Sistemlerinde Hüzmeye Oluşturma/Yönlendirme

HAP sistemlerinde hüzmeye oluşturma ve yönlendirme konsepti ilk olarak 1990'ların sonlarında ve 2000'lerin başlarında önerilmiştir [8]. Bu dönemde, HAP'lerin yüksek irtifada uzun süre kalabilen platformlar olarak kullanılması fikri üzerinde yoğun araştırmalar yapılmıştır. Özellikle, bu platformların geniş alanları kapsama yetenekleri ve iletişim verimliliğini artırmak için hüzmeye oluşturma tekniklerinin uygulanabileceği fark edilmiştir. B. El-Jabu ve arkadaşı 2001 yılında [65] HAP sistemlerini kullanarak hücreli iletişimin incelenmesine odaklanmıştır. Çalışmada, HAP yüksekliği, HAP üzerindeki adaptif çoklu hüzmeye antenin çalışma prensibi ve bitişik karasal hücrelerin şekillerinin formülasyonu gibi faktörlerin, yerdeki kapsama alanını nasıl etkilediğini açıklayan temel denklemler türetilmiştir. Özellikle, geniş bant kod bölme çoklu erişim (wide-band code-division multiple-access, WCDMA) modunda çalışan evrensel mobil telekomünikasyon sistemi kullanılarak karasal mobil radyo iletişimi sağlamak için bir HAP sisteminin nasıl konuşlandırılacağı ele alınmıştır. Farklı hizmet hızları için kullanıcı sayısı

ile bit başına enerjinin gürültü gücüne oranı (energy per bit to noise power spectral density ratio, E_b/N_0) arasındaki ilişki hesaplanmıştır. Farklı boyutlarda hücrelere sahip çok katmanlı hücresel yapılar incelenmiştir ve bu hücrelerin trafik yüküne göre yönlendirilebilir olduğu gösterilmiştir. Bunu başarmak için gereken anten dizi yapısı belirlenmiştir. Yapılan analizlerde, 21 km yükseklikte bulunan bir HAP sisteminin 517 km yarıçapında bir alanı kapsadığı gösterilmiştir. 3.2 GHz bandında, hücre başına 8 kb/s hizmet hızıyla 21 adet kullanıcının desteklenebildiği tanımlanmıştır. Bu hizmetler, 1 W'tan daha az iletim gücüyle 70 km yarıçapında bir alanda sağlanabilmektedir. Kare düzlemsel dizi antenler kullanılarak, 12m x 12m boyutlarında hücrelerin inşa edilebileceği, yarıçapı 100 metreye kadar küçülebilen hücrelerle yüksek sistem kapasitesinin sağlanabileceği gösterilmiştir. Günümüze geldiğimizde, Y. Shibata ve arkadaşları 2020 yılında yaptıkları çalışmada [75], HAP sistemleri aracılığıyla gigabit hızlarında mobil iletişim sağlamak için bir sistem tasarımını incelemiştir. HAP sistemi tabanlı bir ağda hücre yapılandırmasını optimize etmek için genetik algoritma (Genetic Algorithm, GA) kullanılmıştır. Çeşitli hücre konfigürasyonları değerlendirilerek optimum spektral verimliliğe ulaşılması hedeflenmiştir. Çok sayıda hücrenin kullanımı kapasiteyi artırsa da bu hücrelerin güç tüketimi HAP sistemlerinin taşıma kapasitesini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, toplam iletim gücünün azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Farklı hücre katmanları ile yapılan konfigürasyonlarda, her hücre için dikey ve yatay hüzme genişliği, anten eğim açısı ve katman dönüş açısı gibi parametreler optimize edilmiştir. GA ile hücre konfigürasyonlarının karmaşıklığına rağmen optimum sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, çok hücreli yapılandırmaların gigabit hızlarında iletişim sağlamak için gerekli olduğu ve bu yapılandırmaların enerji verimliliğini artırdığı görülmüştür.

HAP sistemlerinde hüzme oluşturma ve yönlendirme, iletişim verimliliği ve kapsama alanı kontrolü açısından kritik bir rol oynar. İlgili sistemler, geniş alanları kapsayacak şekilde hassas hüzme şekillendirme ile sinyalleri yönlendirir, böylece belirli bölgelerde daha yoğun ve hedeflenmiş veri iletişimi sağlanır. Hüzme yönlendirme, kullanıcı yoğunluğunun yüksek olduğu alanlara kapasiteyi dinamik olarak yönlendirmeye olanak tanır, girişimi azaltır ve ağ performansını artırır. Bu yetenekler, HAP sistemlerinin esnek ve ölçeklenebilir iletişim çözümleri sunmasını sağlamaktadır. J. Thornton ve arkadaşları bu çalışmada [63], HAP sistemi tarafından hizmet verilen bir kablosuz iletişim ağında, aynı kanaldaki girişimin anten hüzme genişliği, açısal ayırım ve yan lob seviyesine bağlı olduğunu göstermiştir. Çalışma, HAP sistemleri için önerilen milimetre dalga frekanslarında, platform üzerinde yer alan açıklık tipi anten dizileri, hücrelere hizmet vermek için uygulanabilir bir çözüm olarak öne çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, hücre kenarlarını optimum güçle aydınlatan eliptik hüzmelerin ışırma desenlerine dayalı eğri uydurma (curve-fit) yaklaşımlarına dayanarak aynı kanaldaki girişimi tahmin etmek için bir yöntem sunulmaktadır. Ayrıca, düzenli altıgen bir yerleşim için her hücreye optimum hüzmeye genişliklerinin tahmin edilmesi yöntemi de ele alınmıştır. Yöntem, 121 hücreli bir mimariye uygulanmıştır. Yan loblar, tepe yönlülüğün 40 dB altında düz bir taban olarak modellendiğinde, dört hücreli bir küme boyutu, hücre kenarlarında 15 dB'den hücre merkezlerinde 27 dB'ye kadar değişen taşıyıcı-girişim oranları (Carrier to interference ratio, CIR) sağlanmıştır. Yedi hücreli bir küme boyutu benimsendiğinde ise bu değerler sırasıyla 19 dB ve 30 dB'ye yükselmiştir. Yan lob seviyesinin azaltılması durumunda CIR'deki iyileşme nicel olarak belirlenebilmiştir. [59]'de yer alan çalışmada ise, uydu ve HAP sistemleri için bilişsel sistemler bağlamında hüzmeye oluşturma ve bant tahsisi yöntemleri ele alınmıştır. Bilişsel radyo ağı, uydu yayın hizmeti (Broadcast Satellite Service, BSS), yüksek yoğunluklu sabit uydu hizmeti (High-Density Fixed-Satellite Service, HDFSS) ve HAP sistemlerinden oluşmaktadır. Bu sistemler, belirlenen sıcak nokta bölgelerinde ek HAP'ler konuşlandırarak uydu kapsama alanı içinde spektrum kullanımını artırmayı amaçlamaktadır. BSS ve HDFSS frekans bantlarını paylaştığından, aynı frekans bandını eşzamanlı olarak kullanan çoklu ağ düğümleri arasında girişimi verimli bir şekilde azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle, makale, çok antenli HAP'ler için ağ veri hızını en üst düzeye çıkarmak amacıyla iteratif bir ön kodlama ve bant tahsisi algoritması önermiştir. Ayrıca çalışma, diğer düşük karmaşıklık tekniklerini sunmakta ve bunları simülasyon sonuçları aracılığıyla karşılaştırmaktadır.

İdeal olarak, bir anten hüzmesi, hücre içindeki noktalarda eşit güç sağlarken, hücrenin dışındaki noktalara ise bir güç yayılımı yapmaz. Ancak, pratik antenler, özellikle hüzmeye sentezleme tekniklerinin zor olduğu milimetre dalga frekanslarında, bu ideal desene sahip değildir. Bu durum, HAP sistemlerinin hizmet ettiği alandaki hücre şekillerini önemli ölçüde etkilemektedir. [70]'deki çalışmada HAP sistemi üzerinde yer alan mm-dalga açıklıklı anten dizilerinin yönlendirme çözümlerini incelenmektedir. Hücresel frekans kullanımına dayalı geniş bant hizmetleri için iki farklı anten yönlendirme yöntemi karşılaştırılmıştır. İlk yöntemde, her bir anten bireysel olarak hücre merkezine yönlendirilmekte, ikinci yöntemde ise platformun yatay ve dikey sapmalarını düzeltmek için dört aktüatör ve bir gimbal mekanizması kullanılmaktadır. Çalışmada, anten modelleri ve HAP üzerindeki antenlerin yönlendirme mekanizmaları ve bu mekanizmaların sinyal gücü ve taşıyıcı-girişim oranı (CIR) üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, 30 km yarıçapında bir kapsama alanı için optimize edilen sistemde, platformun 4 km'lik yatay ve 2 km'lik dikey sapmalarını, telafi etmenin mümkün

olduğu anlaşılmıştır. Yasser Albagory ve arkadaşının yaptığı çalışmada [66] ise, HAP sisteminin hücresel sistemindeki düzensiz şekilli hücreler için yeni bir tasarım tekniği önerilmektedir. Bu teknik, kapsama alanının küçük piksel noktalarından oluşan bir ızgaraya bölünmesine dayanır ve istenen hücre şeklinin verilmesi için bazı piksel noktalarının grublandırılmasıyla istenen hücre elde edilebilmektedir. Bu noktalar, tasarımın çözünürlüğünü önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca, ortak kanal girişiminin azaltılması için eş-merkezli halka dizisi (concentric ring array, CRA) kullanarak dar ve düşük yan lob seviyeli hüzmeler oluşturulmuştur. Önerilen hücre tasarım tekniğinin, kapalı alandaki kullanıcı dağılımına ve davranışına göre hücre şeklini optimize ederek hareket halindeki kullanıcılardan gelen konum güncellemesinin sık sık el değiştirmesini ve sinyalleşme trafiğini azaltması beklenmektedir. Simülasyon sonuçları, Gaussian CRA kullanılarak 40 dB kadar düşük yan lob seviyesinde herhangi bir düzensiz şekle sahip bir hücrenin oluşturulabileceğini göstermektedir. S. C. Arum ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [64], geniş bir hizmet alanı içinde kesintisiz kapsama sağlamak amacıyla HAP sisteminden yapılan hüzmeye yönlendirme için bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntem, hücreleri aydınlatırken, HAP tabanlı anten dizisinden yere doğru genişleyen hüzmeleri dikkate almaktadır. Hücreler arasındaki girişimi en aza indirmek amacıyla komşu hücreler arasında belirli bir örtüşme (overlap) derecesi oluşturulmuştur. Yöntemin performansını değerlendirmek için, kullanıcılar, yarıçapı R olan bir hizmet alanına rastgele bir yoğunlukta dağıtılmıştır. Hücre örtüşmesi miktarı, kullanıcıların taşıyıcı-gürültü oranına (Carrier to noise ratio, CNR) ve taşıyıcı-girişim-artı-gürültü oranına (carrier-to-interference-plus-noise ratio, CINR) bakılarak diğer hüzmeye yönlendirme yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem, kullanıcı CNR ve CINR değerlerinde önemli bir iyileşme sağlayarak, diğer yöntemlere kıyasla 5-15 dB'lik bir CINR artışı elde etmiştir.

Karasal kablosuz sistemlerde olduğu gibi, büyük birden fazla giriş-çıkış (Massive Multiple-Input Multiple-Output, MIMO), bir dizideki çok sayıda (yüzlerce) anten elemanından yararlanmaktadır. MIMO sistemleri, her bir sinyalin yollarının bağımsızlığından yararlanılarak kesinti olasılığının (outage probability) en aza indirilmesi veya alıcı sinyal gücünün her zaman kabul edilebilir bir seviyenin üzerinde olmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak, bir hüzmeyi ana lobunun yönünü, genişliğini ve uzamsal sıfır noktalarını kontrol ederek girişim seviyesi sınırlı bir sistemde SINR değerini iyileştirmektedir. Ayrıca, her bir anten elemanına farklı bir veri akışı sağlayarak sistemin verimini artırmak için uzamsal çoklama yapabilmektedir. P. G. Sudheesh ve arkadaşları bu çalışmada [60], HAP sistemlerinin kırsal alanlardaki kullanıcılara geniş bant kablosuz bağlantı sağlama yeteneğini ele almıştır. HAP sistemleri, yer kullanıcılarına

doğrudan görüş hattı bağlantıları kurarak ve etkili hüzme şekillendirme tekniklerini kullanarak iletişim sağlamaktadır. Ancak, HAP sistemlerinin yüksek irtifada çalışması, hüzme şekillendirme için gerekli olan kanal durumu bilgisinin (Channel state information, CSI) edinilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, çalışmada, CSI bilgisine ihtiyaç duymadan en yüksek toplam veri hızını elde etmek için bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde, girişim hizalama (interference alignment, IA) tekniği kullanılarak CSI olmadan HAP tabanlı iletişimde maksimum veri hızı sağlanmıştır. Girişim hizalamanın gerçekleştirilmesi için, birden fazla HAP sistemi ile yer istasyonları arasında bir röle görevi göreceğ çok antenli bir balon kullanılmıştır. Burada, MIMO ağı sistemi incelenmiştir. Balon rölesi bulunan ağın kapasitesi, kapalı formda (matematiksel olarak) türetilmiştir. Y. Xu ve arkadaşları [61], HAP sisteminden yere doğru yapılan iletimde 3 boyutlu büyük ölçekli MIMO sistemlerini incelemiştir. Çalışmada, HAP 2 boyutlu dikdörtgen bir anten dizisine sahip olacak şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca yerdeki birden fazla kullanıcı ekipmanı (User equipment, UE) ile iletişim kurmaktadır. Yavaş değişen kanal korelasyonu ve kullanıcıların ayrılma açıları (Angle of Departure, AoD) gibi parametreler kullanılarak, öncelikle DL için konum destekli iki katmanlı bir ön kodlama şeması önerilmiştir. İlk katmandaki ön kodlama, orijinal büyük ölçekli MIMO sistemini, her biri ortogonal alt uzayda çalışan düşük boyutlu MIMO sistemlerine ayırmayı amaçlamıştır. Uygun bir UE kümelenmesiyle, ilk katmandaki ön kodlama matrisinin sabit zarf matrisine yakınsadığı gösterilmiştir. Bu da HAP sisteminin donanım karmaşıklığında önemli bir azalma sağlamıştır. İkinci katmandaki ön kodlama ise her düşük boyutlu MIMO sistemi için ise birden fazla kullanıcı arasındaki girişimin ortadan kaldırılmasını hedeflemiştir. HAP sisteminde AoD bilgisinin genellikle mükemmel bir şekilde bilinmediği durumları ele almak için, AoD belirsizliğinin önerilen ön kodlama şemasının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle, AoD hatasından kaynaklanan güç kaybını hızlı bir şekilde tahmin etmek için yeni bir analitik yöntem önerilmiştir. Çeşitli sistem parametreleri (örneğin, Rician faktörü, HAP irtifası ve AoD belirsizliği) altında konum destekli ön kodlamanın performansı sayısal simülasyonlarla değerlendirilmiştir. Bu makalede [62] ise, HAP sistemlerine dayalı, büyük ölçekli anten dizisiyle donatılmış “Çok Kullanıcı Çoklu Giriş Çoklu Çıkış” (Multi-User Multiple Input Multiple Output, MU-MIMO) iletişim senaryosu ele alınmıştır. Geleneksel dijital hüzme şekillendiricilerde, yüksek sayıda RF zinciri gerektirdiğinden dolayı büyük güç tüketimi kaçınılmaz hale gelmektedir. Ayrıca, dijital hüzme şekillendirmenin temel banttaki karmaşık genlik-faz tasarımı yüksek hesaplama karmaşıklığına yol açmaktadır. Bu nedenle çalışmada, HAP tabanlı MU-MIMO iletişim sistemleri için, dijital çözümlere kıyasla daha az güç tüketen, Epigraf Gevşetme İkiye Bölme-Ayrıştırma (Epigraph-Relax-Bisection-Decomposition, ERBD)

adı verilen bir en fazla-en az (maximum-minimum, max-min) analog hüzme şekillendirme algoritması önerilmektedir. Max-min analog hüzme şekillendirme, özellikle çok kullanıcıli iletişim sistemlerinde kullanılan bir eniyileme stratejisidir. Amaç, tüm kullanıcılar arasında adil bir şekilde veri iletimini sağlamak ve en kötü durumdaki (yani sinyali en zayıf olan) kullanıcının performansını maksimize etmektir. Yani bu yöntem, sistemin toplam performansını değil, en dezavantajlı kullanıcının aldığı hizmeti iyileştirmeye çalışmaktadır. Çalışma, dörtlü kısıtlı dörtlü programlama (quadratically constraint quadratic programming, QCQP) hüzme şekillendirme problemini çözebilmek için yarı kesin gevşetme (semi-definite relaxation, SDR) yaklaşımını kullanmaktadır. Alınan sonuçlarda, önerilen ERBD algoritmasının geleneksel analog hüzme şekillendirme algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. ERBD algoritmasının, güç tüketimi sınırlı HAP tabanlı iletişim sistemleri için uygun olduğu anlaşılmıştır.

HAP sistemlerinde, yüksek iletişim trafiğini karşılamak için birden fazla hücre kullanılması gerekmektedir. Ancak, HAP sisteminin uçuş sırasında yön değiştirmesi veya stratosferik rüzgâr değişiklikleri nedeniyle hareket etmesi, yerdeki hücrelerin yer değiştirmesine yol açmaktadır. Bu hareket, çok hücreli yapıda sık sık el değiştirme ve bağlantı kopmalarına neden olabilmektedir. K. Hoshino ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [68], bu sorunun düzlemsel veya düz şekilli anten dizisine dayalı anten hüzme şekillendirme teknikleriyle çözülebileceğini göstermiştir. Kapsama alanı çaplarının sadece 60 ila 80 km olduğu durumlarda, bu antenler tüm kapsama alanını kolayca kapsayabilmektedir. Ayrıca, hücrelerin yer değiştirmesini kolayca telafi edebilmektedir. Ancak, 80 km'den daha geniş bir kapsama alanı sağlamak için anten tasarımında köklü değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, makalede güneş enerjisiyle çalışan ve 200 km çapında kapsama alanına sahip bir HAP sisteminin olduğu varsayılarak yeni bir anten yapısı (silindirik yama dizi anten) ve hüzme şekillendirme yöntemleri önerilmektedir. Hui Li ve arkadaşları ise [69], HAP sistemlerinin karmaşık stratosfer koşulları nedeniyle yerle göre göreceli hareketler sergileyebileceği ve bu hareketlerin kapsama alanındaki hizmet kalitesini etkileyebileceği gerçeğini ele almaktadır. Çalışmada, HAP sistemlerinin yatay ve dikey kayma, dönme, yuvarlanma ve eğim hareketlerinin coğrafi kapsama alanı üzerindeki etkilerini tahmin etmek için modeller sunulmuş ve bu hareketlere karşı yönlendirilebilir antenler kullanarak telafi mekanizmaları incelenmiştir. Özellikle, 127 hücreli bir mimari üzerinde yapılan simülasyon sonuçları analiz edilmiştir. Yönlendirilebilir anten düzeltme mekanizması kullanılarak, HAP hareketinin belirli bir ölçüde telafi edilebildiği ve hizmet alanının etkin kapsamasının garanti altına alınabileceği gösterilmiştir.

HAP sistemlerinin, çeşitli IoT uygulamalarını desteklemede önemli bir rol oynaması beklenmektedir [72]. IoT teknolojilerinin sürekli artarak yaygınlaşması, çok sayıda cihazın bağlantı, güvenilirlik ve gecikme gereksinimlerini karşılama açısından önemli zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, mevcut altyapılar ve kablosuz erişim mimarisi tasarlama yöntemleri oldukça sınırlıdır. HAP sistemlerinin geniş ayak izi, her biri düşük oranlı bağlantılara sahip çok sayıda IoT cihazına daha fazla kapsama alanı sağlamak için idealdir. K. Xiao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [71], HAP ile IoT 5G ağlarında Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) tabanlı çoklu hüzme şekillendirme yöntemini incelemiştir. Çalışmada, 5G ve IoT ağlarında, HAP sisteminin yer tabanlı ağ geçidi (Gateway, GW) ve kullanıcı ekipmanları ile olan iletişimini optimize etmek amacıyla güvenilir bağlantılar kurabilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır. Ancak, HAP sisteminin gökyüzünde karşılaştığı çeşitli hareketler, sistem kapasitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sorunu çözmek için makalede, LSTM modeli kullanılarak yön tayini (direction of arrival, DoA) tahminine dayalı bir yöntem önerilmektedir. LSTM, zaman serisi verilerini işleyebilen bir yapay sinir ağı modelidir ve HAP sisteminin bir sonraki konumunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu sayede, hüzme doğru şekilde oluşturularak iletişim kapasitesi artırılmıştır.

HAP sistemleri, yüksek hızlı trenlerde kesintisiz ve güvenilir iletişim sağlamak için ideal bir çözüm sunabilir. I. Zakia ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [73], HAP sistemi ile yüksek hızlı tren arasında gerçekleşen DL kanalında, adaptif Minimum Varyanslı Bozulmasız Yanıt (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR) ve En Küçük Kareler (Least Square, LS) hüzme şekillendirme tekniklerinin performansları karşılaştırmıştır. Kanal, CAPANINA projesinde modellenen şekliyle zamanla değişen Rician ve düz sönümlenme süreci olarak ele alınmaktadır. Zamanla değişen Rician sönümlenme modeli, HAP ve tren arasındaki kanalın önemli bir özelliğini ifade etmektedir. Rician faktörü orta ile yüksek arasında olduğunda, bu durum adaptif MVDR hüzme şekillendirme tekniğini uygun hale getirir çünkü MVDR, Rician sönümlenme kanalında sinyal bozulmasını telafi edebilmektedir. MVDR tekniği, maliyet fonksiyonundaki kısıtlama nedeniyle özellikle düşük Rician faktörlerinde alınan sinyalin bir kısmını göz ardı edebilmektedir. Bu durumda, kanalın sönümlenme özellikleriyle tam olarak eşleşme sağlanamayacaktır. Çalışmada, LS hüzme şekillendirme tekniğinin, Rayleigh sönümlenme kanallarına daha iyi uyum sağlayabileceği açıklanmıştır. Bu teknik, alıcının kanalın daha değişken ve rastgele olduğu durumlara daha iyi uyum göstermesini sağlamaktadır. Çalışmada, incelenen hüzme şekillendirme algoritmalarının performansları, Ortalama Kare Hata (Mean Square Error, MSE) ve Bit Hata Oranı (Bit Error Rate, BER) üzerinden

karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, MVDR, yüksek Rician faktörlü kanallarda etkili olurken LS hüzme şekillendirme, daha değişken (Rayleigh sönmlemeye yakın) kanallarda daha iyi performans göstermiştir.

HAP sistemleri, yer tabanlı baz istasyonlarına veya diğer iletişim ağlarına bağlantı sağlayarak, veri trafiğini ana şebekelere yönlendirebilmektedir. Bu sayede geniş bir coğrafi alanın kapsama alanı genişletilmiş olur. Geri taşıma (Backhaul) sistemlerinde HAP'lerin kullanımı, geleneksel fiber optik veya mikrodalga bağlantılarına alternatif olarak, daha hızlı kurulum ve düşük maliyet avantajı sunmaktadır. M. Ouchi ve arkadaşları [74], milimetre dalga bandında çalışan HAP sisteminin, geri taşıma mekanizmasını ele almıştır. Hedeflenen bu sistemde, 38 GHz bandında serbest uzay kaybını telafi etmek için hüzme şekillendirme amacıyla çok sayıda anten dizi elemanının gerekliliği öngörülmüştür. Aynı anda birden fazla yer istasyonunu bağlamak için tam dijital hüzme şekillendirme tercih edilmiştir. Ancak, dijital hüzme şekillendirme her bir anten dizi elemanı için analog devre gerektirdiğinden, yüksek güç tüketimine yol açmaktadır. Ayrıca sistemde, iyi bir hüzme şekillendirme performansı elde edebilmek için her bir anten dizi elemanı için faz tutarlılığı kalibrasyonu gereklidir. Stratosferdeki çok düşük sıcaklık ve çok düşük atmosfer basıncı koşullarında 38 GHz bandında bant içi özelliklerin doğrudan ölçülmesiyle gerçek zamanlı kalibrasyon ihtiyacı doğmaktadır. Ancak, büyük sayıda anten dizi elemanı nedeniyle bu, aşılması gereken büyük bir zorluk olarak öne çıkmaktadır. Bu teknik sorunlara çözüm olarak çalışmada, hüzme şekillendirme kazancı kullanılarak düşük çözünürlüklü ADC/DAC ile güç azaltımı ve ana sinyalin iletimini kesmeden düşük güçlü, sinyalin üst üste bindirilmesiyle bant içi özelliklerin doğrudan ölçülmesine dayalı gerçek zamanlı faz tutarlılığı kalibrasyonu önerilmektedir. Özetle, bu çalışmada, HAP tabanlı sistemlerde milimetre dalga bandındaki zorlu çevresel koşullar altında yüksek verimli hüzme şekillendirme sağlamak için önerilen düşük güç tüketimi ve gerçek zamanlı kalibrasyon tekniklerini ele alınmaktadır.

3.3. HAP Sistemlerinde Kullanıcı Gruplama

HAP sistemlerinde hüzme yönlendirme sırasında, hizmet verilen kullanıcıların gruplanması, sistem performansını artırmak, kaynakları verimli kullanmak ve girişim etkilerini en aza indirmek açısından kritik bir stratejidir. Kullanıcıların gruplanması, belirli kullanıcı kümelerine yönelik hedeflenmiş hüzme şekillendirme sağlayarak hem kapsama alanını iyileştirir hem de kanal kapasitesini optimize eder.

Kullanıcı yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde, daha küçük ve hedeflenmiş hüzmeler kullanılarak, yoğun veri trafiğinin olduğu bölgeler etkin bir şekilde kapsanır. Daha seyrek kullanıcı yoğunluğuna sahip bölgelerde ise geniş hüzmeler tercih edilebilir.

Kullanıcılar, hareketlerine veya zamanla değişen kanal koşullarına göre dinamik olarak gruplandırılabilir. Bu durumda, hüzmeye yönlendirme sürekli olarak güncellenir ve kullanıcıların güncel konumlarına veya taleplerine göre optimize edilir.

Sonuç olarak, HAP sistemlerinde kullanıcıların gruplandırılması, hüzmeye yönlendirme stratejilerinin etkinliğini artırmak ve sistem kapasitesini en üst düzeye çıkarmak için kullanılan temel bir yaklaşımdır. Bu süreç, HAP sistemlerinin geniş alanları kapsama ve yüksek kullanıcı sayısını destekleme potansiyelini en üst düzeye çıkarmaktadır.

K-means algoritması, sadeliği ve hızlı çalışması nedeniyle veri kümeleme problemlerinde sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Hesaplama açısından verimli olan bu algoritma, büyük veri kümeleri üzerinde bile hızlı sonuçlar üretebilmektedir. Ayrıca, kolay uygulanabilirliği sayesinde, farklı veri türleri ve uygulama alanlarına uyarlanabilir. G. Zhang ve arkadaşları [76] HAP sistemi üzerindeki büyük MIMO sistemleri için yeni bir kullanıcı gruplama yöntemi önermiştir. Önerilen yöntem, istatistiksel öz mod (Statistical Eigenmode, SE) tabanlı olup, kullanıcılar arasında grup içi girişimi azaltmayı ve sistem performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel K-means algoritmasının ilk nokta seçiminde yaşanan sorunları çözmek için, bu çalışmada Fubini-Study mesafesine dayalı bir modifiye edilmiş K-means (Fubini Study-Modified K-Means, FS-MKM) kullanıcı gruplama yöntemi sunulmaktadır. Geleneksel yöntemler, kullanıcılar arasındaki benzerlikleri değerlendirmek için akor (kanal kovaryans matrislerinin benzerliği, chordal) mesafe gibi ölçütler kullanmaktadır. Ancak, bu yöntemler genellikle kapasite kaybına neden olabilmektedir. Bu çalışmada, chordal mesafe yerine Fubini-Study mesafesi kullanılmıştır. Fubini-Study mesafesi, özellikle Rician kanal ortamlarında daha iyi performans sağlamaktadır. Bu mesafe ölçütü, kullanıcılar arasındaki kanal benzerliklerini değerlendirerek, kullanıcıları daha doğru gruplar halinde toplamıştır. Geleneksel K-means algoritmasında ise başlangıç noktalarının rastgele seçimi, gruplamanın kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Önerilen modifiye edilmiş algoritma, başlangıç noktalarının daha uzak mesafelerden seçilmesini sağlayarak, grupların daha tutarlı ve doğru bir şekilde oluşturulmasını sağlamıştır. Kullanıcılar gruplandıktan sonra, iki aşamalı hüzmeye şekillendirme uygulanmıştır. İlk aşama, farklı gruplar arasındaki girişimi azaltmaya odaklanırken, ikinci aşama her bir grup içindeki girişimi minimize etmeyi amaçlamaktadır. [77]'teki çalışmada ise, HAP sistemlerinde fırsatçı hüzmeye şekillendirme (Opportunistic

Beamforming, OBF) ve kullanıcı gruplama yöntemi ele alınmaktadır. Bu çalışmada, kullanıcıların kümelendiği ve hüzme şekillendirmenin bu kümelere odaklandığı bir yaklaşım önerilmektedir. Kullanıcıların kanalları arasındaki korelasyon, kullanıcıların kümelere ayrılmasını sağlamaktadır. Kümeleme işlemi, kullanıcı kanallarının benzerliğine dayanır ve K-means algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede aynı kümeye dahil olan kullanıcılar arasında daha yüksek benzerlik sağlanırken, farklı kümelerdeki kullanıcılar arasında daha düşük korelasyon hedeflenmiştir. Önerilen yöntemde hüzme şekillendirme, baskın hüzme ile rastgele bir bileşen içermektedir. Baskın hüzme, kullanıcı kümesine yönlendiğinde, rastgele bileşen, çok kullanıcılı çeşitlilik kazancı sağlamaktadır. Bu sayede, kullanıcılara eşit şekilde davranılması sağlanmıştır. Geleneksel hüzme şekillendirme yöntemleri, stratosferik iletişimde kanal korelasyonu nedeniyle düşük performans gösterebilmektedir. Bu çalışmada, kanal korelasyonunu göz önünde bulunduran bir hüzme şekillendirme stratejisi önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin, toplam veri hızında ve kullanıcı seçimi sayısında iyileşme sağladığını göstermektedir. Önerilen algoritmanın geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek performans sunduğu, özellikle büyük anten dizilerine sahip sistemlerde zaman açısından daha verimli olduğu gösterilmiştir. M. D. Zakaria ve arkadaşları ise [79], 2.6 GHz bandında çalışan karasal altyapıları kullanan kullanıcılara olan girişimi minimum seviyede tutacak, hücre yerleşim stratejilerini incelemiştir. Çalışmada, HAP üzerinde kullanılan bir düzlemsel dizi antenle, dinamik olarak uyum sağlayan bir K-means kümeleme tekniğine dayalı akıllı hüzme şekillendirme stratejileri önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, rastgele ve düzenli hüzme yönlendirme teknikleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, K-means kümeleme tekniğinin rastgele ve düzenli hüzme yönlendirme yöntemlerine kıyasla üstün kapsama ve kapasite sağladığını ve karasal sistemlere minimum girişim oluşturduğunu göstermiştir. K-means yaklaşımı, kullanıcıları kümelere ayırarak ve hüzme yönlerini dinamik olarak ayarlayarak hüzme yerleşimini optimize etmiş, hedefli ve verimli bir HAP tabanlı iletişim çözümü sunmuştur. Bu çalışmada [83] W. Dai ve arkadaşları, HAP sistemleri için K-means kümeleme destekli dinamik çok hücreli optimizasyon algoritması önermiştir. Ancak HAP sisteminin konumu ve UE dağılımı zamanla değişiklik gösterdiği için, kullanıcılar ile HAP sistemi arasındaki göreceli pozisyon değişebilmektedir. Bu değişiklikler, bazı kullanıcılar için verim düşüşlerine ve hatta ağ kesintilerine yol açabilmektedir. Daha önceki yöntemler, verimi en üst düzeye çıkarmaya çalışırken, yüksek hesaplama karmaşıklığı nedeniyle gerçek zamanlı kontrol için yetersiz kalmaktadır. Genel hatları ile makalede önerilen yöntemin temel unsurları şöyle sıralanabilir. Kullanıcılar, konumlarına göre K-means algoritması kullanılarak kümelere ayrılmıştır. Bu kümeleme işlemi, PSO'nun her parametre için

arama alanını daraltmasına yardımcı olmaktadır. K-means kümeleme sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak, her hücre için anten hüzmesi parametreleri optimize edilebilir hale gelmiştir. Arama alanının daraltılmasıyla, PSO'nun daha hızlı ve etkili sonuçlar üretmesi sağlanmıştır.

Kablosuz iletişimde, çoklu erişim formatları bu teknolojinin temelini oluşturan önemli bileşenler olup, uzun ve köklü bir evrim geçirmiştir. Örneğin, 3G teknolojisinin temel taşı Geniş Bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA) iken, 4G'de Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) ve Tek Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Single Carrier Frequency-Division Multiple Access, SC-FDMA) ana yaklaşımlar olarak öne çıkmıştır. 5G Yeni Radyo (New Radio, NR) teknolojisinde ise OFDMA, temel dalga formu teknolojisi olarak yerini almış ve farklı gecikme gereksinimlerine sahip uygulamaları desteklemek için 15 kHz'nin katları şeklinde dinamik alt taşıyıcı aralıkları sunmaktadır. OFDMA, bu yeni nesil teknolojide de ana çoklu erişim şeması olarak varlığını sürdürürken, isteğe bağlı olarak Ortogonal Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) teknolojisi de kullanılabilir. Bu gelişmeler, kablosuz iletişim sistemlerinin esnekliğini ve verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır [8]. İ. Cumalı ve arkadaşları [78] HAP sistemleri kullanılarak yapılan NOMA tabanlı iletişimde kullanıcı seçimi ve kod kitabı tasarımına odaklanmaktadır. NOMA, HAP sistemlerinde spektral verimliliği artırmak amacıyla kullanılır ve çoklu kullanıcıları aynı frekans ve zaman diliminde ayırarak kaynakları paylaşmalarını sağlamaktadır. HAP tabanlı NOMA sistemlerinde, yüksek veri hızlarına ihtiyaç duyan kullanıcıların seçimi ve eşleştirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Önerilen algoritmada, kanal korelasyonuna dayalı bir kullanıcı eşleştirme yöntemi sunulmaktadır. Bu yöntem, benzer kanal özelliklerine sahip kullanıcıları eşleştirip hüzme kazancını maksimize ederek spektral verimliliği artırmıştır. HAP sistemlerinde kod kitabı tasarımı, sınırlı geri besleme kanalları için önemlidir. Bu çalışmada, polar-cap kod kitabı (polar-cap codebook, PCC) tasarımı önerilmektedir. Bu kod kitabı, HAP sistemi kanalı için Rician sönümlenme modeli göz önünde bulundurularak uyarlanmıştır. PCC, kanaldaki LOS bileşeninin gücüne bağlı olarak optimize edilir, böylece kanal yönlendirme bilgisiyle uyumlu hale getirilir. Simülasyonlar, önerilen kullanıcı seçimi algoritmasının ve PCC tasarımının, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek spektral verimlilik sağladığını göstermektedir. [80]'deki çalışmada ise, Rician sönümlenme kanalları üzerinde çalışan HAP sistemleri için enerji verimli bir algoritma önerilmektedir. Bu sistem, NOMA teknolojisi ile birleştirilmiştir. Çalışma, HAP-NOMA sistemlerinde hüzme uzaylı kanal modellemesini ve enerji verimliliğini artırmayı

hedeflemiştir. İlk olarak, büyük ölçekli anten dizileri için HAP kanalının doğrudan görüş hattı olmayan (Non-Line-of-Sight, NLOS) teoremi türetilmiştir. Bu teorem, Toeplitz matrisinin asimptotik özelliklerine dayanmaktadır. Bu teorem, büyük anten dizilerinde NLOS bileşenlerinin nasıl ele alınacağını belirlemiştir. Elde edilen NLOS teoremine dayalı olarak, iki aşamalı bir HAP-NOMA şeması önerilmektedir. Çalışmada kullanıcılar, kanal istatistiklerine göre gruplandırılmıştır. Çalışma, her kullanıcı grubuna uygun güç seviyeleri atanır ve durum spektral verimliliği artırmayı ve enerji tüketimini optimize etmeyi amaçlamıştır. Önerilen algoritma, yalnızca istatistiksel kanal durumu bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Bu da anlık CSI gerektirmediğinden, sistemin karmaşıklığını ve hesaplama maliyetini düşürmüştür. Sayısal sonuçlar, önerilen HAP-NOMA algoritmasının performans artışı sağladığını göstermektedir. Önerilen dijital ön kodlayıcı (precoder), eşdeğer kanal üzerinde sıfır-zorlama (Zero Forcing, ZF) tekniği ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen yöntemin, özellikle büyük ölçekli anten dizilerinde kanal modellemesi, kullanıcı gruplama ve güç optimizasyonu gibi alanlarda önemli performans iyileştirmeleri sağladığı görülmüştür. Ayrıca, anlık kanal bilgisi gerektirmemesi, sistemin pratikte uygulanabilirliğini arttırmıştır.

HAP sistemlerine MIMO yönteminin uygulanabilirliği diğer bölümlerde tartışılmıştır. HAP-MIMO sistemlerinin kullanıcı gruplanması üzerine etkileri için literatürde bazı çalışmalar yer almaktadır. P. Ji ve arkadaşları [81], HAP sistemleri için büyük MIMO sistemlerinde, iki aşamalı hüzmeye şekillendirme stratejisiyle grafik teorisine dayalı bir kullanıcı gruplama algoritması önermektedir. Kullanıcı gruplama ve grafik teorisi; kullanıcıları gruplara ayırarak büyük ölçekli antenlerin boyutlarını azaltmak ve kanal geri bildiri sürecini basitleştirmek üzere tasarlanmıştır. Önerilen algoritmada, kullanıcılar arasındaki korelasyon matrisinin mesafesi (correlation matrix distance, CMD) kullanılarak bir çatışma grafiği oluşturulmuştur. Her bir kullanıcı grafikte bir düğüm olarak temsil edilir ve iki düğüm arasındaki kenar, kullanıcılar arasındaki korelasyon benzerliği ile belirlenir. İlgili algoritma, grafikteki tüm maksimal klikleri (bir grafikte tüm düğümlerin birbirine bağlı olduğu bir alt grup) bulmak için Bron-Kerbosch algoritmasını kullanmaktadır. Bu klikler, kullanıcı gruplarını belirlemek için temel oluşturmaktadır. Maksimal klikler, herhangi bir ek düğüm eklenemeyecek kadar büyük olan grupları ifade etmektedir. Kullanıcıların gruplara ayrılmasıyla aynı grup içinde girişim seviyesi en aza indirilmiş olacaktır. Çalışmada, kullanıcı grupları belirlendikten sonra, iki aşamalı hüzmeye şekillendirme uygulanmıştır. Bunlardan ilki dış ön kodlayıcı olarak isimlendirilmiştir. Bu yöntem yaklaşık blok diyagonalizasyon (block diagonalization, BD) ile gruplar arası girişimi azaltmak için kullanılmaktadır. İkincisi ise iç ön kodlayıcı olarak adlandırılmıştır. Bu

teknik ise düzenlenmiş sıfır zorlama algoritması ile grup içi girişimi azaltmak üzere tasarlanmıştır. Sonuç olarak, önerilen kullanıcı gruplama algoritmasının, k-means ve hiyerarşik kümeleme gibi geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek performans sağladığı gösterilmiştir. Özellikle, sistem kapasitesi ve kullanıcı sayısı arttıkça, önerilen yöntemin daha düşük hesaplama karmaşıklığı sunduğu ve daha iyi sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. [82]'de ise, HAP sistemi tabanlı büyük MIMO sistemlerinde kullanıcı gruplama ve hüzme şekillendirme stratejilerine odaklanılmıştır. Bu çalışma, özellikle kullanıcıların gruplandırılması ve iki aşamalı hüzme şekillendirme teknikleriyle, spektral verimliliği artırmayı ve sistemin genel performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, kullanıcıların kanal korelasyon matrislerine dayanarak gruplandırılması yerine, istatistiksel öz mod bilgilerine göre gruplandırılmasını önermektedir. SE, bir kanalın güçlü ve zayıf yönlerini belirleyen bir özelliktir ve kullanıcıları SE benzerliğine göre gruplandırmak, hüzme şekillendirmede daha etkili sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Geleneksel yöntemlerde kullanıcılar arasındaki chordal mesafe kullanılarak gruplama yapılırken, bu çalışmada SE'lerin benzerliğine odaklanılmıştır. Bu yaklaşım, hem gruplama sürecinde işlem karmaşıklığını azaltmış hem de daha iyi kanal eşleştirmesi sağlamıştır. SE bilgileri kullanılarak, kullanıcı grupları arasındaki girişimi azaltmak amacıyla BD yöntemi uygulanmıştır. Her grup içinde, kullanıcılar arasındaki girişimi azaltmak için sıfır zorlama (Zero Forcing, ZF) algoritması kullanılmıştır. Geleneksel büyük MIMO sistemlerinde, her kullanıcıdan sürekli geri besleme almak sistemin verimliliğini düşürebilmektedir. Bu çalışma, yalnızca istatistiksel kanal bilgilerine dayanarak hüzme şekillendirme yaparak, kullanıcı geri bildirimini minimuma indirmiştir. Bu da sistemin işlem yükünü önemli ölçüde azaltmıştır. Önerilen SE tabanlı kullanıcı gruplama ve hüzme şekillendirme stratejisinin, toplam veri hızı ve spektral verimlilik açısından geleneksel yöntemlere kıyasla üstün performans sergilediği gösterilmiştir.

4. HAP SİSTEMLERİNİN KONUMLANDIRILMASI VE KULLANICILARIN GRUPLANMASI

Bu bölümde, HAP sistemlerinin konumlandırılması ve tek bir HAP sisteminin hizmet verdiği kullanıcıların gruplanması üzerine yapılan çalışmalar anlatılmıştır. İlgili konumlandırma yapılırken kullanıcı talepleri ile verilen hizmetin uyumu ve kapsama alanı göz önüne alınmıştır. Kullanıcıların gruplanması üzerine yapılan çalışmada ise yine kullanıcı talepleri ve HAP sisteminin sahip olduğu toplam güç miktarı göz önüne alınmıştır.

4.1. Konumlandırma

HAP sistemlerinin konumlandırılması yapılırken [55]'teki çalışma temel alınarak Türkiye haritası üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda

- HAP sistemlerinin konumlandırılmasının önemi,
- Aşağı yönlü bağlantı göz önüne alındığında,
 - Tek HAP sisteminin bulunduğu durumda CNR hesabı,
 - Çoklu HAP sisteminin bulunduğu durumda CINR hesabı,
 - Toplam bant genişliği verimliliği hesaplaması,
- Çok amaçlı optimizasyon modeli ve çözüm algoritması,

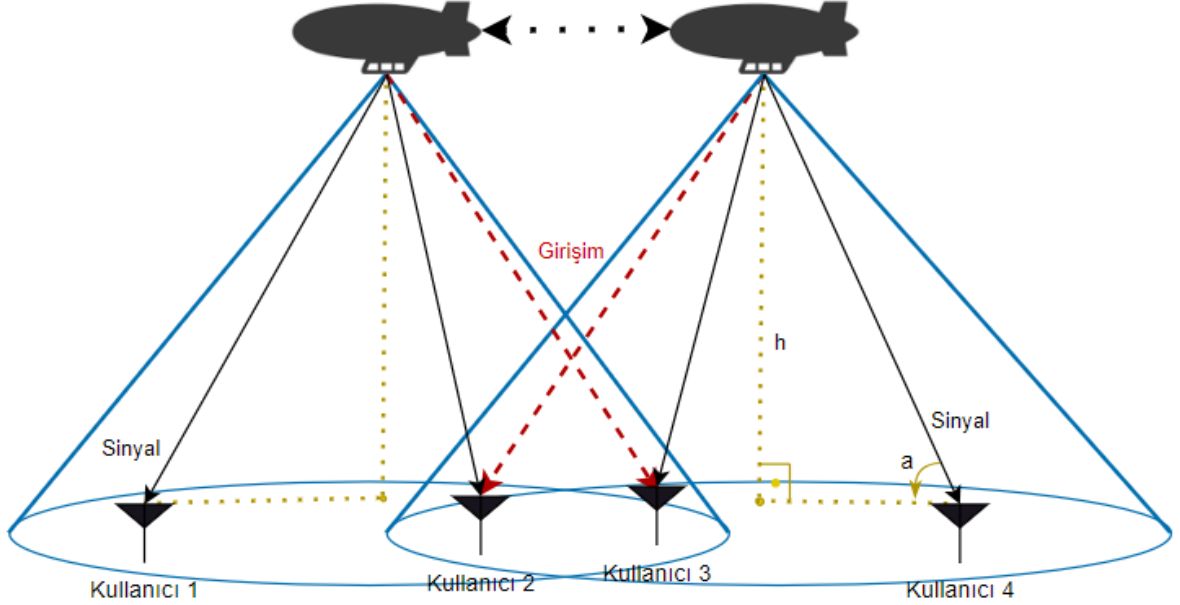
konuları açıklanacaktır.

4.1.1. HAP Sistemlerinin Konumlandırılmasının Önemi

HAP ağ optimizasyonu ile ilgili mevcut literatür, esas olarak kapsama performansı, enerji tüketimi, iletişim kalitesi ve kullanıcı talebinin optimizasyon modeli ile optimizasyon yöntemine odaklanmıştır [55]. Genellikle, optimizasyon amacıyla yalnızca tek bir amaç fonksiyonu seçilmiş ve sıcak bölgelerdeki bölgesel iletişim talepleri yeterince incelenmemiştir (Sıcak bölge kullanıcı taleplerinin yoğunlaştığı dar alan anlamında kullanılmıştır). Bu durum, temel iletişim hizmetlerinin kesintiye uğramaması garanti altına alınmamasına sebep olmuştur. Bu tez çalışmasında [55]'teki gibi, sıcak bölgedeki kapasitenin artırılması ve kapsama alanındaki temel hizmetlerin sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca, HAP geniş bant iletişim ağları için çok amaçlı bir dağıtım optimizasyon yöntemi önerilmektedir.

4.1.2. Aşağı Yönlü Performans Hesaplama Modeli

Geniş bant kablosuz ağ hizmetinin gerektirdiği aşağı yönlü bağlantı iletim hızı, yukarı bağlantıdan çok daha yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada, aşağı yönlü bağlantı eniyilemesi üzerine çalışılmıştır. Şekil 4-1’de HAP ağları altındaki iletişim modeli gösterilmiştir.



Şekil 4-1 HAP Sistemlerinde Tekli ve Çoklu Kapsama

İlgili şekilde yer alan değerler, h : H_{HAP} (HAP sisteminin yüksekliği), a : α (kullanıcı ve HAP sistemi arasındaki yükseliş açısı) ile ifade edilir.

Modelin analizi için iki terimin tanımlanması gereklidir. Bu terimler kullanıcı talep haritası ve kullanıcı görsel kümesi kavramlarıdır ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- **Talep haritası:** Hedef alan ızgara şeklinde, belirli bir çözünürlükle enlem ve boylamlara bölünür. Her bir küçük ızgara içerdiği kullanıcıların talebini vermektedir. Bu ızgara ağı, kullanıcı talebi haritası (demand map, DM) olarak adlandırılır. Her bir ızgaranın talebi ise $D(grid)$ ifadesi ile tanımlanmaktadır.
- **Kullanıcı Görsel Seti:** Her bir kullanıcının ilgili yükseliş açısı kısıtına (α_{min}) uyacak şekilde iletişim kurabileceği HAP sistemlerinin sayısıdır. Bu, kullanıcının görüş alanındaki platform sayısı (platforms in user's sight, PIS_{US}) olarak verilmiştir. Aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$PIS_{US}(grid) = \{HAP_i \mid \alpha_{i,grid} \geq \alpha_{min}, 1 \leq i \leq N_{HAP}\} \quad (1)$$

HAP_i : Kullanıcının görüş alanındaki HAP.

$\alpha_{i,grid}$: HAP_i ile ızgara (grid) arasındaki yükseliş açısı.

α_{min} : Sistemin desteklediği minimum yükseliş açısı.

N_{HAP} : Toplam HAP sistemi sayısı.

4.1.2.1. Tek HAP Sistemi İçin CNR

Izgarada yer alan kullanıcılara eğer tek bir HAP sistemi hizmet sağlıyorsa yani, $PIS_{US}(grid) = 1$ ise, ızgaradaki kullanıcılar tarafından alınan güce herhangi bir girişim olmayacaktır. Bu durumda aşağı yönlü CNR hesabı aşağıdaki gibi yapılabilir (“[]_{dB}” ifadesi içinde yer alan değerler dB skalasında olduğunu göstermektedir).

$$[CNR] = [EIRP] + [Y] + [G_{US} / T] - [L_{free}] - [L_{atmos}] - [BO_o] - [k] - [B_n] \quad (2)$$

Burada $EIRP$ terimi, eşdeğer izotropik yayılan gücü ifade eder ve $EIRP = P_{HAP} \times G_{HAP}$ olarak hesaplanır. P_{HAP} , HAP sisteminin iletim gücünü ifade ederken, G_{HAP} , HAP sistemi üzerinde yer alan antenin kazancıdır. Eş. (2)’deki diğer terimler aşağıda tanımlanmıştır.

Y : Güç dağıtım faktörü.

G_{US} : Kullanıcı anten kazancı.

T : Sistem gürültü sıcaklığı.

L_{free} : Boş uzay yol kaybı. Bu terim $L_{free} = \left(\frac{4\pi f_c d_{HAP,grid}}{c} \right)^2$ olarak hesaplanır. Burada f_c : taşıyıcı frekansını, $d_{HAP,grid}$: ızgara ile HAP arasındaki mesafeyi, c : ışık hızını ifade etmektedir.

L_{atmos} : Atmosferik yayılma kaybı (Atmospheric Propagation Loss, APL).

$[BO_o]$: Çıkış gücü geri çekmesi (Output power back off), sistemin çıkış gücünün maksimum kapasitenin biraz altında çalıştırılması anlamına gelmektedir.

k : Boltzmann sabiti.

B_n : Kullanıcı alıcısının gürültü bant genişliği.

Uzay ve yer bağlantı yollarının kaybı nedeniyle oluşabilecek iletişim kesintisini önlemek için belirli bir bağlantı yedekliliği sağlanmalıdır. Bağlantı yedekliliği, bir sistemde iletişimin sürekliliğini sağlamak için farklı alternatif yollar veya bağlantılar bulundurulması anlamına

gelir. Bu yedekliliği sağlamak için alıcının aldığı SNR'nin, belirli bir minimum eşik değerden (SNR_{min}) büyük olması gerekir. Bu kısıt CNR değeri kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$CNR = \frac{C}{kB_nT} = \frac{E_b R_b}{n_0 B_n} = SNR \frac{R_b}{B_n} \geq SNR_{min} \frac{R_b}{B_n} = CNR_{min} \quad (3)$$

C : Alıcının aldığı güç.

R_b : İletim bağlantısının veri hızı.

n_0 : Tek yan bant gürültü güç spektral yoğunluğu (single sideband (SSB) noise power spectral density).

4.1.2.2. Çoklu HAP Sistemi İçin CINR

Izgarada yer alan kullanıcılara eğer birden fazla HAP sistemi hizmet sağlayabiliyorsa yani, $PIS_{US}(\text{grid}) \geq 2$ ise, bu durumda kullanıcılar birden fazla HAP sisteminden sinyal alacaktır ve girişime maruz kalacaktır. Bu çalışma, kullanıcı anteninin yönlü olduğunu ve görünür aralıktaki tüm HAP sistemlerinden iletişim için yeterli kaynaklara sahip HAP sistemini temel istasyonu olarak akıllıca seçebileceğini varsaymaktadır. Bu durumda yapılan CINR analizi aşağıda verilmiştir.

4.1.2.2.1. Girişim Sinyalinin Güç Seviyesi

Kullanıcı anteni yönlü olduğundan, antenin ana hüzmesi seçilen ana istasyona yönlenecektir. Böylece diğer HAP sistemlerinden gelen girişim sinyali zayıflatılır ve bu zayıflama miktarı girişim yaratan HAP sistemleri ile ızgara arasındaki sapma açısıyla ilişkilendirilir [63]. Kullanıcı tarafından alınan girişim sinyali güç modeli aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} I_{m,US} &= \sum_{HAP_j \in PIS_{US}/HAP_m} \frac{EIRP_j Y_{j,US} G_{US}(\theta_{m,j})}{L_{free} L_{atmos} L_{ssf} B O_o} \\ &= \sum_{HAP_j \in PIS_{US}/HAP_m} \frac{G_{US}(\theta_{m,j})}{G_{US_max}} C_{j,US} \end{aligned} \quad (4)$$

HAP_m : Kullanıcının seçtiği ana HAP sistemi.

$G_{US}(\theta_{m,j})$: Ana HAP sistemi ile kullanıcı arasındaki açı $\theta_{m,j}$ derecesinde kullanıcı anteninin kazancı.

$C_{j,US}$: Kullanıcı anteninin HAP_j sistemine yönlendiği durumda kullanıcının aldığı güç miktarı.

G_{US_max} : Ana lob yönünde kullanıcı anteninin maksimum kazancı.

4.1.2.2.2. Kullanıcı Anteninin Işıma Kazancı Modeli

Anten ışımaya kazancı, yan lob seviyesi ve anten hüzmesinin sapma açısı tarafından belirlenir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$G_{US}(\theta_{m,j}) = G_{US_max} \max(\cos(\theta_{m,j})^n, s_f) \quad (5)$$

s_f : Tahmini eşit yan lob hüzme seviyesi.

$\cos(\theta_{m,j})^n$: Ana lobun düşüş seviyesi, bu değer genellikle antenin 3dB hüzme genişliği (ω_{3dB}) ile belirlenir. $n = -0.3(\log_{10}(\cos(\frac{\omega_{3dB}}{2})))^{-1}$.

Basit bir değerlendirme için s_f ihmal edilir. Bu durumda anten kazancı $\xi_{US}(\theta_{m,j}) = \cos(\theta_{m,j})^n$, $G_{US}(\theta_{m,j}) = G_{US_max} \xi_{US}(\theta_{m,j})$ eşitliği ile hesaplanır.

Son durumda kullanıcı tarafından alınan girişim sinyalinin seviyesi aşağıda verildiği gibidir:

$$I_{m,US} = \sum_{HAP_j \in \text{PIS}_{US}/HAP_m} C_{j,US} \xi_{US}(\theta_{m,j}) \quad (6)$$

4.1.2.2.3. Aşağı Yönlü Kullanıcı CINR Değeri

Birden fazla HAP kapsamı altındaki iletişim sisteminin kapasitesi CINR ile sınırlıdır. Yukarıda verilen analiz göz önüne alındığında, geniş bantlı bir sayısal iletişim sisteminin, kullanıcı tarafından alınan sinyal CINR değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} CINR_{m,US} &= \frac{C_{m,US}}{N_F + I_{US}} = \frac{C_{m,US}}{N_F + \sum_{HAP_j \in \text{PIS}_{US}/HAP_m} C_{j,US} \xi_{US}(\theta_{m,j})} \\ &= \frac{CNR_{m,US}}{1 + \sum_{HAP_j \in \text{PIS}_{US}/HAP_m} CNR_{j,US} \xi_{US}(\theta_{m,j})} \end{aligned} \quad (7)$$

N_F : Alıcının termal gürültü gücü, $N_F = kB_n T$ ile hesaplanır.

Son durumda CINR değeri CNR ve zayıflama faktörü ile hesaplanabilmektedir.

4.1.2.2.4. Toplam Bant Genişliği Verimliliği

Belirli bir bölgede, HAP geniş bant ağ sisteminin frekans bandı sabit olduğunda, sistemin ulaşabileceği iletişim kapasitesinin üst sınırı bant genişliği verimliliği tarafından yansıtılabilir. Shannon teoremi [55], çoklu HAP kapsamı altındaki iletişim bağlantılarının bant genişliği verimliliğini hesaplamak için kullanılabilir.

$$\eta \approx \log_2 (1 + CINR) \quad (8)$$

Bu çalışma, hizmet bölgesinde bulunan her HAP'ın sistem için bir miktar bant genişliği verimliliği sağlayabileceğini varsaymaktadır. Bu durumda, tek HAP sisteminin iletişim kapasitesi çoklu HAP sistemlerinden daha az olacaktır. Sonuç olarak her bir ızgaranın toplam bant genişliği verimliliği aşağıdaki gibi verilebilir. Eğer $PIS_{US}(grid) = 1$ ise CINR yerine doğrudan CNR değeri kullanılabilir. İlgili eşitlikte, herhangi bir ızgara için, $CNR(grid) \geq CNR_{min}$ kısıtı sağlanmıyorsa $CNR = 0$ dB olarak kabul edilir.

$$\eta_a(grid) = \begin{cases} \sum_{HAP_i \in PIS_{US}(grid)} \log(1 + CINR_{i,US}(grid)), & PIS_{US}(grid) \geq 1 \\ 0, & PIS_{US}(grid) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

4.1.3. Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli ve Algoritması

Eniyilemeye çalışılan konumlandırmanın ana amacı, hedef bölgenin çoğu alanında temel iletişim hizmetlerini garantilemek ve sıcak bölgelerdeki yüksek kapasite taleplerini karşılamaktır. Konumlandırılan HAP sistemlerinin en geniş kapsama alanına sahip olması, yüksek kapasite sağlayabilen çoklu kapsama alanının ise yüksek kullanıcı talebinin olduğu bölgeyle mümkün olduğunca eşleşmesidir. Bunlar iki farklı optimizasyon yönüdür ve bu nedenle iki optimizasyon amaç fonksiyonu belirlenmesi gereklidir. Bahsedilen amaç fonksiyonlarının optimizasyonu için NSGA-II algoritması seçilmiştir. NSGA-II algoritması, hızlı sıralama, çeşitliliği koruma, elitizm, sade yapı ve geniş kullanım alanı gibi özellikleriyle diğer algoritmalara karşı baskınlık kurmaktadır.

Hız ve Hesaplama Verimliliği: NSGA-II, hızlı bir baskınlık sıralaması (non-dominated sorting) algoritması kullanır. Baskınlık sıralaması işlemi $O(MN^2)$ karmaşıklığına sahiptir. Bu verimlilik, büyük popülasyon boyutlarında ve karmaşık problemlerde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Çeşitliliği Koruma ve Dağılım Dengesi: NSGA-II'nin kalabalık mesafesi (crowding distance) mekanizması, Pareto cephesindeki çözümlerin dengeli bir şekilde dağılmasını sağlar. Çeşitli bölgelerdeki çözümleri koruyarak, yalnızca belirli bir bölgeye odaklanmaktan kaçınmaktadır. Diğer algoritmalarda (örneğin SPEA2) çeşitliliğin korunması daha karmaşık yöntemlerle yapılırken, NSGA-II'de bu süreç daha basit ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

Elitizm Stratejisi: NSGA-II, elitist bir strateji izlemektedir. Elitizm, en iyi çözümlerin kaybolmadan gelecek nesillere aktarılmasını sağlar. Bu durum, algoritmanın stabilite ve performans açısından diğer algoritmalara göre baskın olmasına neden olmaktadır.

Pareto Sıralama ve Çözüm Kalitesi: NSGA-II, Pareto sıralamasına dayalı olarak çözümler arasındaki baskınlık ilişkilerini daha etkili bir şekilde değerlendirir. NSGA-II'de hem baskınlık sıralaması hem de çeşitlilik koruma dengesi, çözüm kalitesini önemli ölçüde arttırmaktadır.

NSGA-II'nin özellikle geniş ölçekli ve çok boyutlu eniyileme problemlerinde etkili performans sunması, onu diğer çok amaçlı optimizasyon algoritmalarına göre öne çıkaran en önemli faktörlerdendir.

Bu çalışmadaki eniyileme modelinin amaç fonksiyonları ve kısıtları aşağıda verildiği gibidir.

- Amaç Fonksiyonu 1- Kapasite-Talep Eşleştirme Derecesi (Capacity Demand Matching Degree, CDMD)
- Amaç Fonksiyonu 2- Ağ Kapsamı
- Kısıt 1- HAP Sistemi Konumu
- Kısıt 2- HAP Sistemleri Arası Mesafe

Kapasite-Talep Eşleştirme Derecesi: Sistem kapasitesi ile kullanıcı talebi arasındaki uyum derecesini ölçmek için CDMD kavramı tanımlanır. Her bir ızgaranın iletişim talebi ile ilgili ızgaraya sağlanabilen hizmet ağırlıklandırılır. Bu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$CDMD = \sum D(grid) \eta_a(grid) \quad (10)$$

Ağ Kapsamı: Temel geniş bant iletişim hizmeti sağlanan alanının hedef bölgeye oranı ile ağ kapsamı bulunabilir. Bir ızgaranın HAP tarafından kapsanıp kapsanmadığı, PIS_{US} değeri ile belirlenebilir. Bu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\rho = \frac{\sum \sigma(grid)}{N_{grid}}, \sigma(grid) = \begin{cases} 1, & PIS_{US}(grid) \geq 1 \\ 0, & PIS_{US}(grid) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

N_{grid} : Toplam ızgara sayısı

HAP Sistemi Konumu ve HAP Sistemleri Arası Mesafe: HAP sistemi, hedef bölge koordinatları (enlem, boylam) içerisinde yer almalıdır. Ayrıca, HAP sistemlerinin birbirleri ile çarpışmamları için bir kısıt daha tanımlanmalıdır. Bu kısıtlar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{cases} (Long_{HAP}, Lat_{HAP}) \in Area_{Target}; \\ \left| Long_{HAP_i} - Long_{HAP_j} \right| + \left| Lat_{HAP_i} - Lat_{HAP_j} \right| \\ - \Delta Long_{min} - \Delta Lat_{min} \geq 0, i \neq j; \end{cases} \quad (12)$$

Sonuç olarak, optimizasyon problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} & maximize \ CDMD, maximize \ \rho \\ & st. \ kısıt \ (12) \end{aligned} \quad (13)$$

Optimizasyon algoritmasının işleyişi aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4-1 Konumlandırma Eniyileme Algoritması

Algoritma Konumlandırma Eniyileme Algoritması	
Girdi: D : Tüm ızgaraların talepleri, N_{HAP} : HAP sistemlerinin sayısı, N_I : Döngü sayısı	
Çıktı: $\Gamma(Long_{HAP}, Lat_{HAP})$: HAP sistemlerinin konumları	
1.	N_{HAP} Sayıda HAP sistemini harita üzerinde kısıtlara uyacak şekilde konumlandır.
2.	Popülasyon sayısı, çaprazlama yüzdesi, mutasyon yüzdesi parametreleri ile NSGA-II algoritmasını başlat.
3.	döngü $t = 1$ 'den N_I 'ya
4.	Tüm ızgaralar için PIS_{US} hesapla (1).
5.	Tüm ızgaralar için η_a hesapla (9).
6.	CDMD hesapla (10).
7.	Ağ Kapsamını hesapla (11).
8.	CDMD ve Ağ Kapsamını (13)'ü kullanarak optimize et.
9.	döngü sonlandır
10.	geri döndür $\Gamma(Long_{HAP}, Lat_{HAP})$

4.2. Kullanıcıların Gruplandırılması

HAP sistemlerinin hizmet verdiği kullanıcıların gruplandırması yapılırken [83]'teki çalışma göz önüne alınmıştır. Bu bölümde kullanıcıların gruplanması ve toplam HAP sistemi güç miktarının optimizasyonuna yönelik yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Sırasıyla;

- Kullanıcı gruplandırmasının önemi,
- HAP sisteminin anten paterni,
- Aşağı yönlü bağlantı göz önüne alındığında,
 - Sistemin kapsama koşulları,
 - SNR ve SINR hesaplanması,
- Hüzme parametrelerinin belirlenmesi,
- Hüzme sınırlarının çıkarılması,
- Çok amaçlı optimizasyon modeli ve çözüm algoritması,

konuları açıklanacaktır.

4.2.1. Çalışmanın Önemi

HAP sistemlerinde enerji verimliliği ile kullanıcı deneyimi arasında bir denge kurmak önemlidir. Bu dengeyi sağlamak için kullanıcı taleplerinin en iyi şekilde karşılayacak hüzme sayısının bulunması ve güç uyarlamasının yapılması gereklidir.

- **Optimum Hüzme Sayısı:** HAP sisteminde oluşturulan hüzme sayısı, enerji tüketimini doğrudan etkiler. Çok fazla hüzme, enerji tüketimini artırabilir, ancak az sayıda hüzme kullanıcılar arasında sinyal kalitesini düşürebilir. Optimum hüzme sayısı, enerji verimliliğini ve kullanıcı deneyimini maksimize eder.
- **Güç Uyarlama:** Kullanıcıların yoğunluğuna göre iletim gücü dinamik olarak ayarlanabilir. Bu hem enerji tasarrufu sağlar hem de sinyal gücünün istenilen bölgelere odaklanmasını mümkün kılar.

Bu çalışmada [83]'deki çalışmadan farklı olarak:

- Hüzme sayısı hedef bölgedeki kullanıcı yoğunluğuna göre belirlenir.
- Her hüzme için ayrılan güç miktarı, dinamik olarak her adımda ayarlanır.

Bu sayede hem enerji verimliliği sağlanmış olur hem de kullanıcı talepleri göz önüne alınarak bir eniyileme çözümü elde edilir. Bahsedilen amaç fonksiyonlarının eniyi çözümünü bulmak için ise, detayları 2.3.1.2 ve 2.3.1.3'te verilmiş olan NSGA-II ve MOPSO algoritmaları

kullanılmıştır. Her adımda yönlendirilen hüzmelerin şekilleri ve güç miktarları değiştirilerek hedef bölgedeki kullanıcıların hizmet alması sağlanmıştır.

4.2.2. HAP Sisteminin Anten Örüntüsü

Anten örüntüsü, ITU-R önerilerinden [84] uyarlanmıştır [75]. Anten kazancı yatay ve dikey düzlemler için ayrı ayrı hesaplanacaktır. Verilen bir Ψ açısı için anten kazançları şu şekilde yazılabilir.

$$G(\Psi) = \begin{cases} -3(\Psi/\Psi_b)^2; & 0 \leq \Psi \leq \Psi_1 \\ L_N; & \Psi_1 < \Psi \leq \Psi_2 \\ X - A \log_{10}(\Psi); & \Psi_2 < \Psi \leq \Psi_3 \\ L_F; & \Psi_3 < \Psi \end{cases} \quad (14)$$

Ψ_b : Yarım güç hüzmeye genişliği / 2.

$$\Psi_1 = \Psi_b \sqrt{-L_N/3}.$$

$$\Psi_2 = 3.745\Psi_b.$$

$$X = L_N + A \log_{10}(\Psi_2).$$

$$\Psi_3 = 10^{(X-L_F)/10}.$$

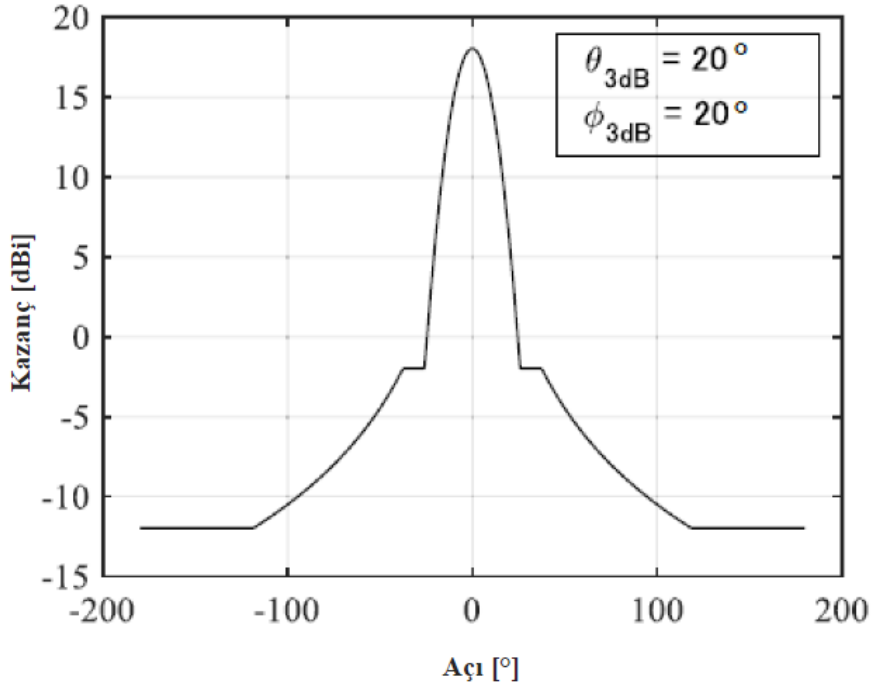
$L_N = -20\text{dB}$, $L_F = -30\text{dB}$, $A = 20$: Sırasıyla, yakın yan lob seviyesi, uzak yan lob seviyesi sabit değer.

Sonuç olarak anten kazancı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G = \max(G_v + G_h, L_F) + G_p \quad (15)$$

G_v , G_h : Formül (14) ile hesaplanan dikey ve yatay anten kazançlarıdır.

$G_p = 10 \log_{10} \left(\frac{80^2}{\theta_{3\text{dB}} \phi_{3\text{dB}}} \right) + 6$: Maksimum anten kazancı G_p , yatay ve dikey düzlemler için 80° hüzmeye genişliğine sahip ve kazancı 6dBi olan anteni temel almıştır ($\theta_{3\text{dB}}$ and $\phi_{3\text{dB}}$: Dikey ve yatay yarım güç hüzmeye genişliği). Aşağıda ilgili antenin örüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4-2 Bir anten deseni örneği (dikey ve yatay polarizasyon) [75]

4.2.3. Sistemin Kapsama Koşulları

Sistemin kapsama koşulları aşağı yönlü bağlantı durumunda SNR ve SINR değerleridir. Kullanıcıların $SNR > SNR_{min}, SINR > SINR_{min}, SNR_{min} = 8 \text{ dB}, SINR_{min} = -7 \text{ dB}$ kısıtlarını sağlaması gerekmektedir [75].

Sistem belirlenen minimum performans düzeyini sağlayabilmesi için -7 dB 'lik bir SNR'ye ihtiyaç duymaktadır. Ancak iç mekân penetrasyon kaybı gibi kayıp faktörlerini dikkate alındığında 15 dB 'lik bir güvenlik marjı eklenmesi gerekmektedir. Bu SNR değeri, sistemin minimum modülasyon ve kodlama şemasıyla (Modulation and Coding Scheme, MCS), yüzde 10'dan düşük bir blok hat oranı (Block Error Rate, BLER) sağlayarak, kabul edilebilir bir veri iletim performansı sunmasını sağlar.

4.2.4. SNR ve SINR Hesaplanması

SNR ve SINR hesaplamaları için öncelikler bir kullanıcının aldığı güç miktarı belirlenmelidir. Bunun için, h HAP sistemine bağlı, c hücrelerinde yer alan, u numaralı kullanıcı tanımlanır. Tanımlanan kullanıcının aldığı sinyal gücü aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$R_{u,c,h} = P_t + G_{u,c,h} - L_{u,h} + G_{UE} \quad (16)$$

P_t : C hücresine yönlendirilen hüzmelerin gücü.

$G_{u,c,h}$: HAP sisteminin formül (15) ile verilen anten kazancı.

$L_{u,h} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi r_{u,h}}{\lambda}\right)$: Boş alan yol kaybı, $r_{u,h}$: kullanıcı ile HAP sistemi arasındaki mesafe.
 λ : dalga boyu.

Bağlı olduğu HAP numarası h_u , bulunduğu hücresi c_u olan kullanıcının toplam aldığı girişimin dB karşılığı aşağıda verilmiştir.

$$I_u = 10\log_{10}\left(\beta\left\{\sum_{j=1, j \neq c_u}^N 10^{\left(\frac{R_{u,j,h_u}}{10}\right)} + \sum_{i=1, i \neq h_u}^{N_{HAPS}} \sum_{j=1}^N 10^{\left(\frac{R_{u,j,i}}{10}\right)}\right\}\right) \quad (17)$$

$\beta \in [0,1]$: Aktivasyon faktörü.

N : Hücre sayısı.

N_{HAPS} : HAP sistemi sayısı.

Son durumda SNR ve SINR değerlerinin dB karşılığı aşağıda verilmiştir.

$$\gamma_{SNR,u} = 10\log_{10}\left(\frac{10^{\frac{R_{u,c_u,h_u}}{10}}}{\sigma^2}\right) \quad (18)$$

$$\gamma_{SINR,u} = 10\log_{10}\left(\frac{10^{\frac{R_{u,c_u,h_u}}{10}}}{\sigma^2 + 10^{\frac{I_u}{10}}}\right) \quad (19)$$

$\sigma_{dBm}^2 = -174 + 10\log(BW) + NF$: gürültü gücü, BW : bant genişliği, NF : gürültü figürü.

4.2.5. Hüzme Parametreleri

Hüzmeyi şekillendirebilmek için anten elemanları bir ağırlık matrisine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada, [68]'da önerilen silindirik faz dizili anten ele alınmaktadır. [68]'ya göre, bir HAP sisteminin anten elemanları ağırlık matrisi, her bir hüzme için dört anten desen parametresine indirgenebilir. Bu parametreler sırasıyla dikey yön açısı θ_{dir} , yatay yön açısı ϕ_{dir} , dikey yarı güç hüzme genişliği θ_{3dB} ve yatay yarı güç hüzme genişliği ϕ_{3dB} 'dir. Bu çalışmada, bir HAP sisteminin tüm kapsama alanı içerisine hüzmeleri yönlendirebileceği varsayılmaktadır. Bu parametrelerin aralıkları aşağıda verilmiştir. Tabloda verilen “ h ” HAP sisteminin yüksekliği, “ R ” ise kapsama alanının yarıçapıdır.

Çizelge 4-2 Anten Hüzme Parametreleri

Dikey Yön Açısı	$0^\circ < \theta_{dir} < \arctan(R/h)$
Yatay Yön Açısı	$0^\circ < \phi_{dir} < 360^\circ$
Dikey Yarı Güç Hüzme Genişliği	$0^\circ < \theta_{3dB} < 2\arctan(R/h)$
Dikey Yarı Güç Hüzme Genişliği	$0^\circ < \phi_{3dB} < 2\arctan(R/h)$

4.2.6. Hüzme Parametreleri Sınırları

Kullanıcıların gruplanması probleminde, kullanıcılardan sadece konum bilgileri alınır. HAP sisteminin konumunu orijin olarak alarak bir Kartezyen koordinat sistemi oluşturulur. Koordinat sisteminde tüm kullanıcıların konumu HAP sisteminin konumuna göre belirlenir. Kullanıcı konum bilgileri, \mathbf{u} 2 boyutlu kullanıcı konum vektörü olmak üzere, $\mathbf{U} = \{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \dots, \mathbf{u}_N\}$ matrisi ile ifade edilebilir. Burada verilen N değeri toplam kullanıcı sayısını ifade eder.

Çok amaçlı optimizasyon algoritmasının arama uzayını daraltmak amacıyla her hüzmelerin gönderileceği bölge ve ilgili hüzme parametreleri için aşağıdaki işlemler uygulanır.

- DBSCAN yoğunluk tabanlı bir algoritmadır. Bu sebeple konumları bilinen kullanıcıların yoğunluğuna göre gruplama yapar. Buradan elde edilen grup sayısı sistemin kullanacağı hüzme sayısını belirlemektedir.
- K-means algoritması 2 boyutlu verilerin kümelenmesi için çok ucuz ve hızlı bir çözüm sunmaktadır. DBSCAN algoritmasının sunduğu hüzme sayısını “küme sayısı, K ” olarak değerlendirip tüm kullanıcıları K gruba ayırır. Bu sayede her hüzmelerin merkezi ve kullanıcıların ait olduğu küme numaraları belirlenmiş olur.

Yukarıda anlatılan ifadeler aşağıda matematiksel ifadelere dönüştürülecektir.

Bir küme merkezi $\mathbf{c} = [c_x, c_y]$ ile ifade edilsin. Bu durumda K-means algoritmasının sunduğu küme merkezleri $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1^T, \mathbf{c}_2^T, \mathbf{c}_3^T, \dots, \mathbf{c}_K^T]$ matrisi ile ifade edilebilir. Buradaki “ K ” indisi hüzme sayısına eşittir. Buna ek olarak, küme içerisinde bulunan kullanıcılardan ilgili küme merkezine en uzak mesafeye sahip olanların oluşturduğu $\mathbf{d} = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_K]$ vektörü tanımlanır. HAP sisteminin yüksekliği h olarak kabul edildiğinde, \mathbf{C} matrisi ve \mathbf{d} vektörü kullanılarak hüzme parametrelerinin sınırları aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
\tan^{-1} \left(\frac{\| \mathbf{c}_k \|}{h} \right) - \frac{\theta_{3dB,k}}{4} &< \theta_{dir,k} < \tan^{-1} \left(\frac{\| \mathbf{c}_k \|}{h} \right) + \frac{\theta_{3dB,k}}{4} \\
\tan^{-1} \left(\frac{c_{k,y}}{c_{k,x}} \right) - \frac{\phi_{3dB,k}}{4} &< \phi_{dir,k} < \tan^{-1} \left(\frac{c_{k,y}}{c_{k,x}} \right) + \frac{\phi_{3dB,k}}{4} \\
0^\circ < \theta_{3dB,k} &< \tan^{-1} \left(\frac{\| \mathbf{c}_k \| + d_k}{h} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\| \mathbf{c}_k \| - d_k}{h} \right) \\
0^\circ < \phi_{3dB,k} &< 2 \tan^{-1} \left(\frac{d_k}{\sqrt{\| \mathbf{c}_k \|^2 + h^2}} \right)
\end{aligned} \tag{20}$$

4.2.7. Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli ve Algoritması

Kullanıcı gruplandırılması işlemini çok amaçlı bir optimizasyon problemi haline getirebilmek için aşağıdaki amaç fonksiyonları ve kısıtlar tanımlanmıştır.

- Amaç Fonksiyonu 1- İletişime Sahip Toplam Kullanıcı Sayısı
- Amaç Fonksiyonu 2- Toplam Güç Tüketimi
- Kısıt 1- Hüzme Parametreleri Sınırları
- Kısıt 2- Hüzmelerin Güç Sınırları
- Çözüm Seti

İletişime Sahip Toplam Kullanıcı Sayısı: Bir kullanıcının iletişime sahip olması bölüm 4.2.3'te verilen SNR_{min} ve $SINR_{min}$ kısıtlarının sağlanmasıyla mümkün olmaktadır. Bu durumda ilk amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\rho = \sum_{i=1}^{N_u} \sigma_i \tag{21}$$

N_u : toplam kullanıcı sayısı.

$\sigma_u = \begin{cases} 1 & SNR_u > SNR_{min}, SINR_u > SINR_{min}: \text{kullanıcının iletişime sahip olup olmadığının} \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases}$ bilgisi.

Toplam Güç Tüketimi: Oluşturulmak istenen her bir hüzmelerin gücü $P_{B,i}$ ile ifade edildiği durumda, ikinci amaç fonksiyonu olan, sistemin harcadığı toplam güç miktarı aşağıdaki gibi verilir.

$$P_{B,T} = \sum_{i=1}^{N_B} P_{B,i} \quad (22)$$

N_B : Toplam hüzmeye sayısı.

Hüzmeye Parametreleri Sınırları: Oluşturulan her hüzmeye, kendisi için tanımlanmış olan ve bölüm 4.2.6'da verilen sınırlara uymalıdır. Bu, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} \theta_{\text{dir},\text{min}} &< \theta_{\text{dir}} < \theta_{\text{dir},\text{max}} \\ \phi_{\text{dir},\text{min}} &< \phi_{\text{dir}} < \phi_{\text{dir},\text{max}} \\ \theta_{3\text{dB},\text{min}} &< \theta_{3\text{dB}} < \theta_{3\text{dB},\text{max}} \\ \phi_{3\text{dB},\text{min}} &< \phi_{3\text{dB}} < \phi_{3\text{dB},\text{max}} \end{aligned} \quad (23)$$

Hüzmelerin Güç Sınırları: Bir HAP sisteminin sahip olduğu toplam güç miktarı $P_{H,T}$ ile ifade edilsin. Bu durumda oluşturulacak hüzmelerin güç sınırları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} P_{B,\text{min},i} &< P_{B,i} < P_{B,\text{max},i}, i = 1 \dots N_B \\ P_{B,T} &< P_{H,T} \end{aligned} \quad (24)$$

Sonuç olarak, optimizasyon problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} &\text{maximize } \rho, \text{ minimize } P_{B,T} \\ &\text{st. kısıt (23)} \\ &\text{kısıt (24)} \end{aligned} \quad (25)$$

Çözüm Seti: Algoritma her döngüde $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_{N_B}\}$ ile ifade edilen bir çözüm seti oluşturur. Bu setin içerisindeki her bir eleman $\mathbf{a} = [\theta_{\text{dir}}, \phi_{\text{dir}}, \theta_{3\text{dB}}, \phi_{3\text{dB}}, P_B]$ ile ifade edilebilir.

Algoritmanın genel işleyişi ise aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4-3 Kullanıcı Kümeleme ve Güç Tüketimi Optimizasyonu Algoritması

Algoritma Kullanıcı Kümeleme ve Güç Tüketimi Optimizasyonu	
Girdi: U : Kullanıcı konum matrisi, T : Toplam döngü sayısı	
Çıktı: $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_{N_B}\}$	
1.	tekrarla
2.	DBSCAN ile kullanıcıları yoğunluğuna göre grupla.

3.	geri döndür N_B
4.	tekrarla
5.	Kullanıcıları N_B adet kümeye ayır.
6.	geri döndür hızme merkezleri \mathbf{C} ve en uzak mesafe vektörü \mathbf{d}
7.	Hızme parametrelerinin sınırlarını \mathbf{C} , \mathbf{d} ve (20)'yi kullanarak belirle.
8.	Popülasyon sayısı, çaprazlama yüzdesi, mutasyon yüzdesi parametreleri ile NSGA-II algoritmasını başlat.
9.	döngü $t = 1$ 'den T 'ye
10.	Hızme parametrelerini ve güçlerini optimize et (25).
11.	döngü sonlandır
12.	geri döndür $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_{N_B}$

5. BENZETİMLER VE ANALİZLER

Bu bölümde, Bölüm 4'te detayları verilen anlatımların benzetim ve analiz sonuçları sunulacaktır.

5.1. Konumlandırma Benzetim ve Analiz Sonuçları

HAP sistemlerinin konumlandırılması problemi için, gerçekçi sonuçlar elde etmek adına hedef bölge olarak “Türkiye” seçilmiştir. Türkiye haritası üzerinde bir “Talep Haritası” oluşturabilmek için [85]'de yer alan enlem ve boylamlara göre nüfus sayısı verisi kullanılmıştır.

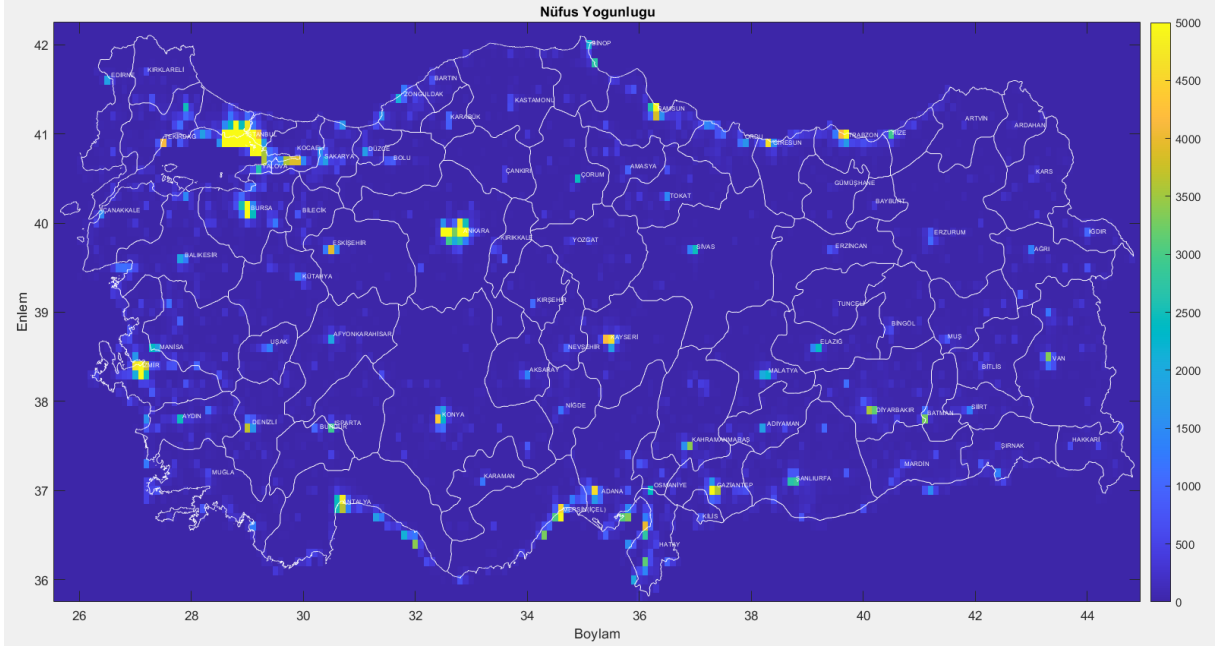
Benzetim ve analizleri, gerçeğe olabildiğince yakın ve karşılaştırılabilir hale getirmek için, aşağıdaki parametre seti kullanılmıştır. Bu parametreler, benzetim ve analizler sırasında değişmeyecektir. Tüm analizler için MATLAB yazılımı kullanılmıştır.

Çizelge 5-1 Konumlandırma Benzetim Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
HAP sistemlerinin yüksekliği	H_{HAP}	22 km

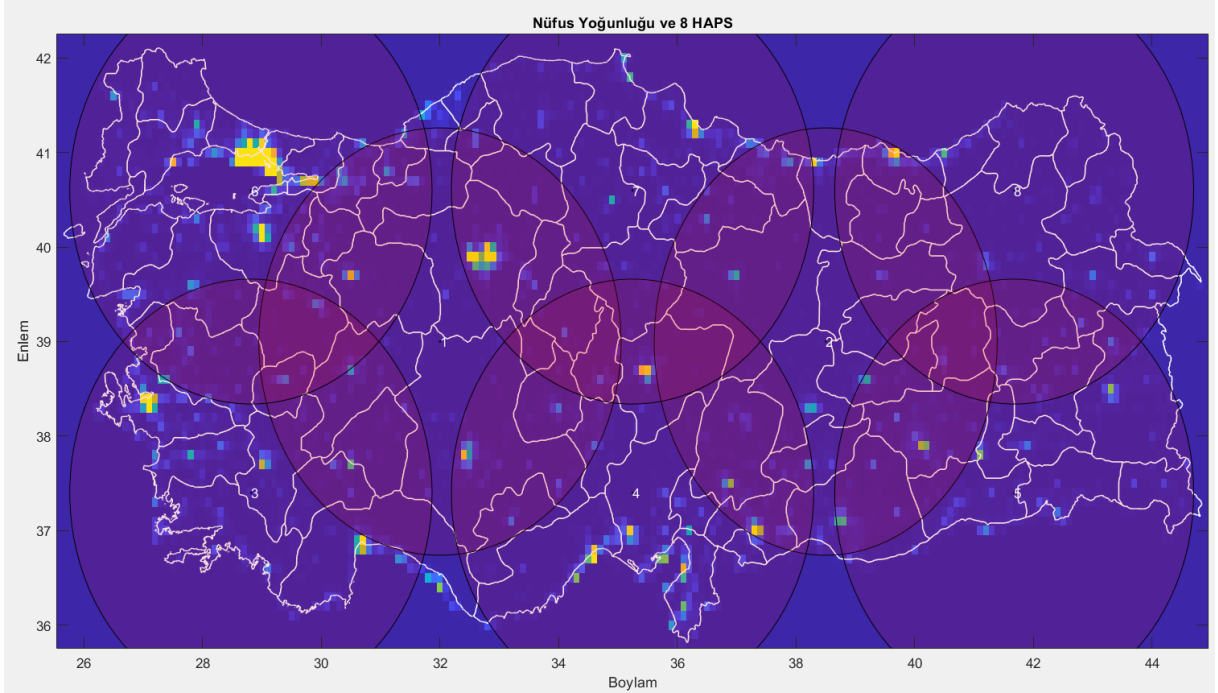
Minimum yükseliş açısı	α_{min}	5°
Taşıyıcı frekansı	f_c	48 GHz
Kullanıcı sisteminin gürültü sıcaklığı	T	135K
Kullanıcı anteninin kazancı	G_{US}	41 dB
Kullanıcı gürültü bant genişliği	B_n	1.544 Mbps
Çıkış gücü geri çekmesi	$[BO_o]$	3 dB
Atmosferik yayılma kaybı	$[L_{atmos}]$	16 dB
3 dB hüzme genişliği	ω_{3dB}	60°
Minimum boylam mesafesi	$\Delta Long_{min}$	0.01°
Minimum enlem mesafesi	ΔLat_{min}	0.01°
Minimum CNR	CNR_{min}	6.4 dB
Sinyal iletim gücü	P_{HAP}	200 W
Anten kazancı	G_{HAP}	10 dB
Güç dağıtım faktörü	Y	70%

[85]'de yer alan veri, çözünürlük 0.1° boylam x 0.1° enlem olacak şekilde ızgaralara bölünmüştür. Her bir ızgaranın içerisine yoğunluğun atandığı şekil aşağıda verilmiştir.



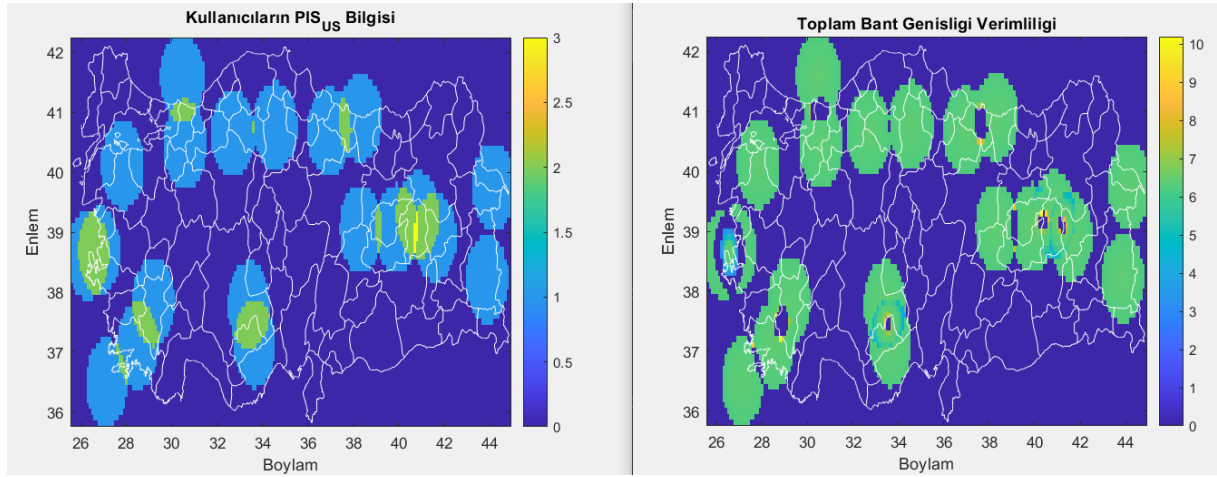
Şekil 5-1 Türkiye Nüfus Yoğunluğu Haritası

Her bir HAP sistemi için yükseliş açısı 5° 'ye ayarlandığında toplamda 8 adet sistemin tüm hedef bölgeyi önemli ölçüde (97.8%) kapsayabildiği Şekil 5-2'de görülmektedir. Konumlandırma problemini daha iyi analiz edebilmek adına tüm sonuçlar 30° yükseliş açısıyla (Kapsama yarıçapı = 38.11 km) yapılmıştır. Bu sayede, önerilen algoritmanın çalışabilirliği daha iyi test edilebilmiştir.



Şekil 5-2 HAP Sistemlerinin Kapsaması

Rastgele olarak konumlandırılmış ve yükseliş açısı 15° 'ye ayarlanmış 20 adet HAP sistemi aşağıda verilmiştir. İlgili yükseliş açısının, kullanıcıların gördüğü platform sayısına etkisi solda verilmiştir. Bu konumlandırmanın Eş. (9) ile ifade edilen toplam bant genişliği verimliliği üzerindeki etkisi ise sağda gösterilmiştir.



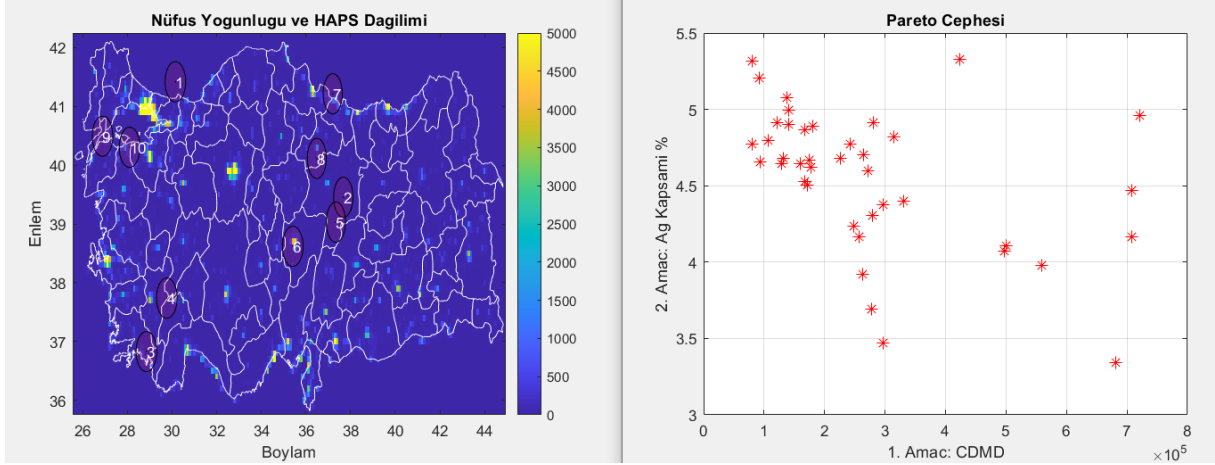
Şekil 5-3 Rastgele HAP Sistemi Konumları ve Toplam Bant Genişliği Verimliliği

Daha önce de bahsedildiği üzere konumlandırma problemi için NSGA-II algoritması kullanılmıştır. Popülasyon boyutunun seçimi, problem türüne, çözüm uzayının büyüklüğüne ve hesaplama kaynaklarına bağlı olarak değişmektedir. Popülasyon boyutunun artması, algoritmanın her nesil için hesaplama süresini artırırken, azaltılması ise istenilen eniyi çözüme ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Literatürde genellikle, popülasyon boyutu olarak 100 ile 200 arasında bir değer iyi bir başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir [34]. Çaprazlama, mevcut popülasyondaki bireylerden yeni bireyler türeterek çözüm uzayını keşfetmeye yardımcı olmaktadır. Yüksek çaprazlama oranı, çözümlerin daha geniş bir yelpazede yayılmasına ve yeni kombinasyonların keşfedilmesine olanak tanır. Çaprazlama oranı genellikle 70% ile 90% arasında seçilir [34]. Yani, yeni bir nesil oluşturulurken, bireylerin çoğu çaprazlama işlemiyle oluşturulur. Mutasyon, çözüm uzayında yeni noktalar keşfetmeye olanak tanır ve popülasyonun yerel optimumlara sıkışmasını önlemektedir. Mutasyon oranı genellikle 1% ile 5% arasında tutulur [34]. Döngü sayısı, Pareto cephesindeki değişimler göz önüne alınarak, algoritmanın ilerleyişi esnasında dinamik olarak belirlenmektedir. Genellikle 100 ila 500 arasında bir başlangıç önerilmektedir [34]. Algoritmanın performansını göz önüne alınarak, farklı popülasyon ve döngü sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranları ile deneyler yapılmış, benzetimler için aşağıda verilen parametre seti belirlenmiştir.

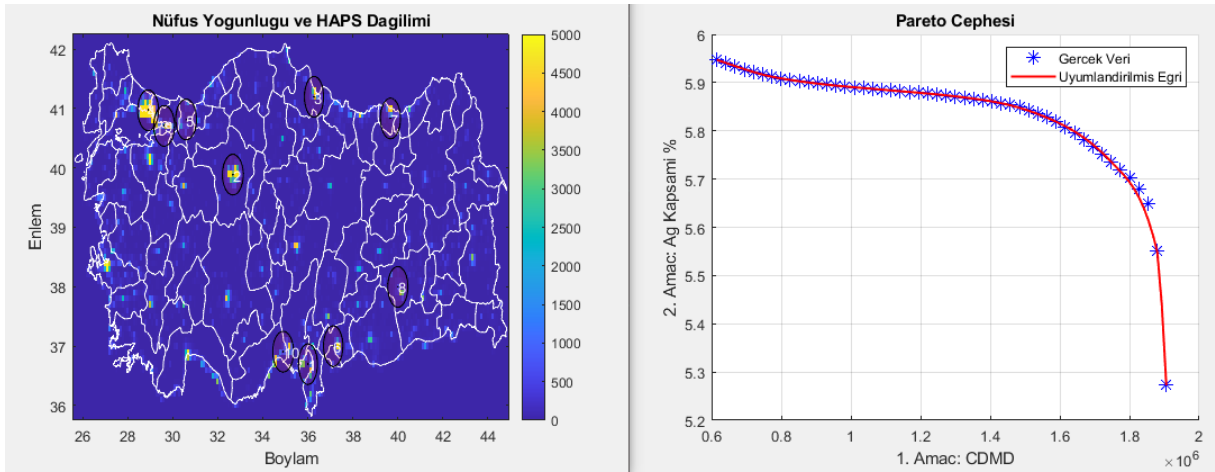
Çizelge 5-2 Konumlandırma Problemi- NSGA-II Parametre Seti

Popülasyon sayısı	100
Döngü sayısı, N_I	500
Çaprazlama oranı	70%
Mutasyon oranı	20%

HAP sistemi sayısının ve ilgili algoritmanın ağ performansı üzerindeki etkisini inceleyebilmek adına farklı sayılarda HAP sistemi hedef bölge üzerinde konumlandırılmıştır. Alınan sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır (Önerilen algoritma popülasyon sayısı kadar çözüm üretmektedir. İlgili çözümlerden sadece bir tanesi gösterim için seçilmiştir).

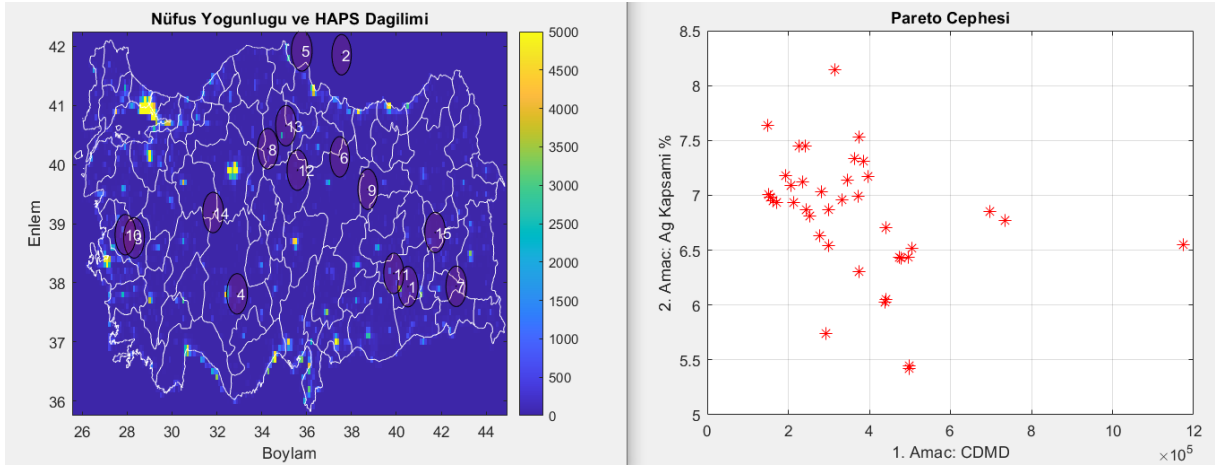


Şekil 5-4 HAP Sistemlerinin İlk Konumları ve Pareto Cehesi (HAP sayısı: 10)

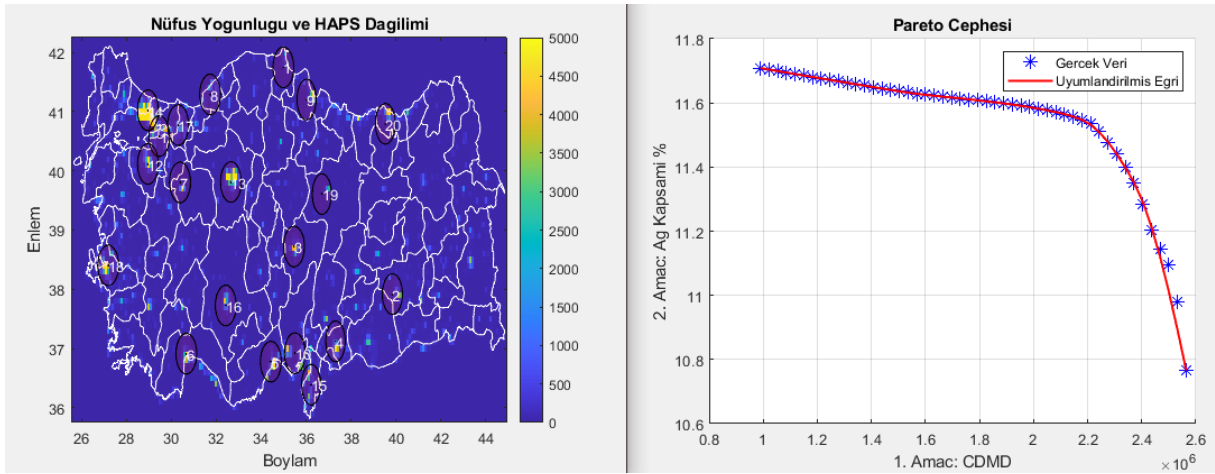


Şekil 5-5 HAP Sistemlerinin Son Konumları ve Pareto Cehesi (HAP sayısı: 10)

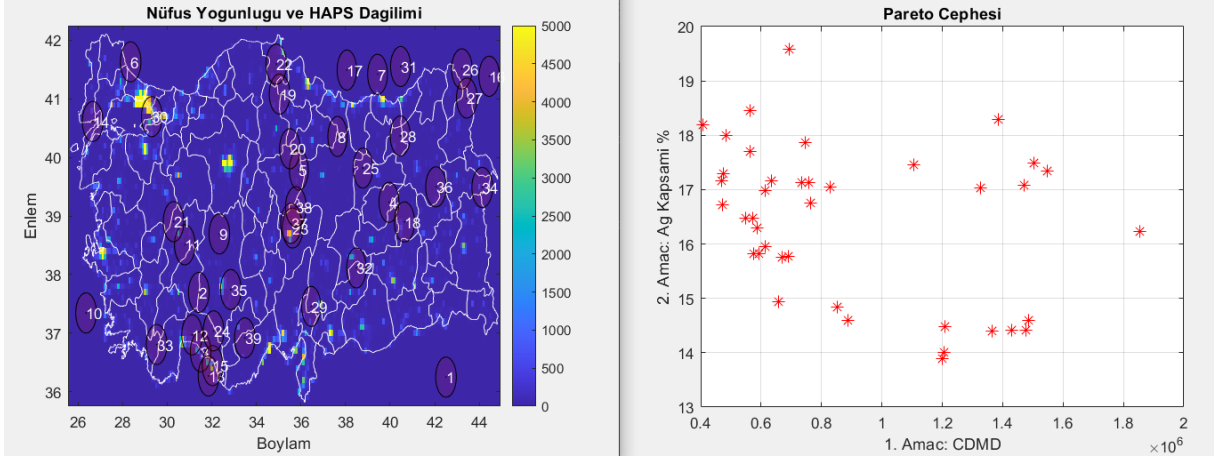
Şekil 5-5'te yer alan Pareto cephesi grafiğinde x-ekseninde ilerledikçe elde edilen çözümler, CDMD amaç fonksiyonununun daha önemli olduğu senaryolarda tercih edilebilirken, y-ekseninde ilerledikçe elde edilen çözümler ise daha fazla kapsama alanı gerektiren senaryolarda tercih edilebilir. Her iki amaç fonksiyonuna da eşit önem verilen durumlarda, $x = y$ doğrusu boyunca elde edilen çözümler kullanılabilir. Bu durum, değişen hedefler veya koşullar altında, Pareto cephesinde yer alan farklı çözümlerin adaptif olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır.



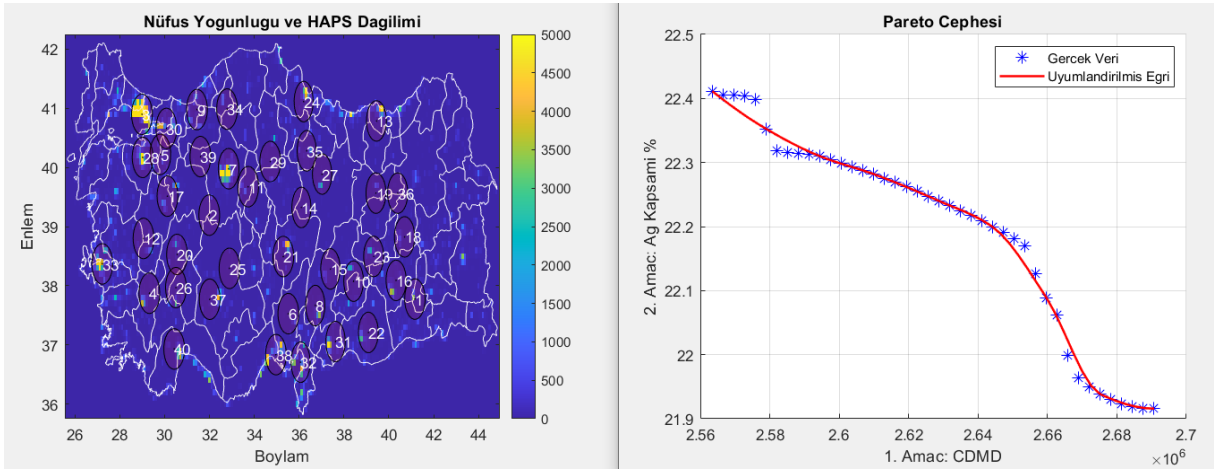
Şekil 5-6 HAP Sistemlerinin İlk Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 20)



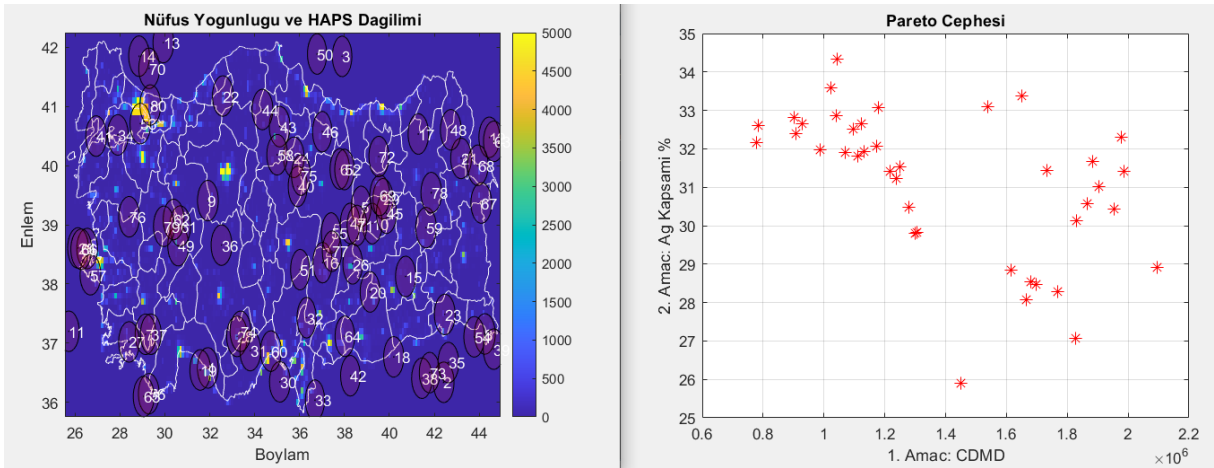
Şekil 5-7 HAP Sistemlerinin Son Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 20)



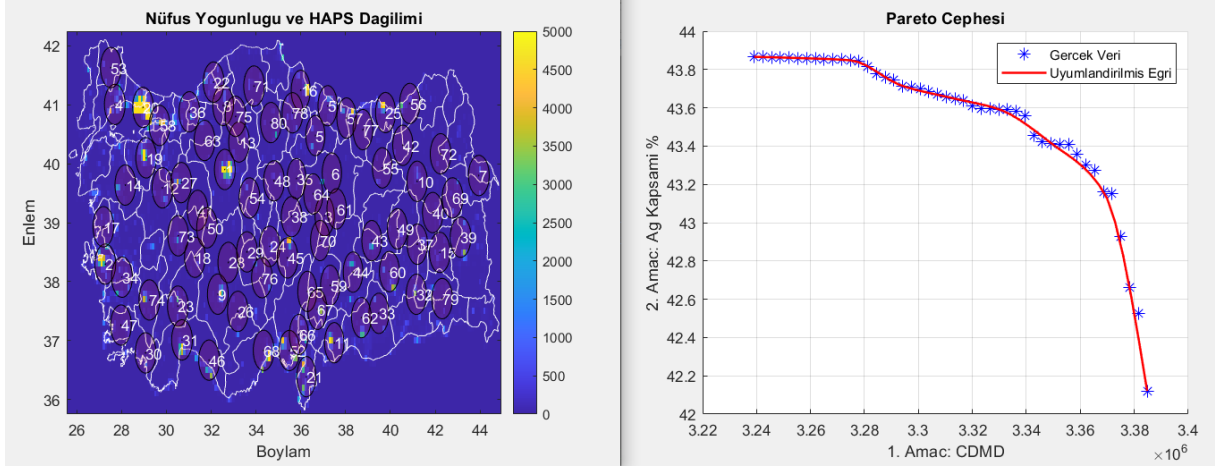
Şekil 5-8 HAP Sistemlerinin İlk Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 40)



Şekil 5-9 HAP Sistemlerinin Son Konumları ve Pareto Cephesi (HAP sayısı: 40)



Şekil 5-10 HAP sistemlerinin ilk konumları ve Pareto cephesi (HAP sayısı: 80)



Şekil 5-11 HAP sistemlerinin son konumları ve Pareto cephesi (HAP sayısı: 80)

Yukarıda yer alan şekillerden;

- HAP sistemi sayısının artırılmasıyla kapsama alanının doğru orantılı şekilde arttığı,
- Algoritmanın, kullanıcı taleplerinin yoğun olduğu bölgelere HAP sistemlerini konumlandığı,

anlaşılmıştır.

5.2. Kullanıcı Gruplama Benzetim ve Analiz Sonuçları

HAP sisteminin hizmet ettiği kullanıcıları gruplama problemi için, gerçekçi sonuçlar elde etmek adına hedef bölge olarak Türkiye’de bulunan bazı şehirler seçilmiştir. İlgili şehirlerin kullanıcı konumları için [85]’de yer alan veri kullanılmıştır. İlgili veri, çözünürlük 0.01° boylam x 0.01° enlem olacak şekilde ızgaralara bölünmüştür.

Benzetim ve analizleri, gerçeğe olabildiğince yakın ve karşılaştırılabilir hale getirmek için, aşağıdaki parametre setleri kullanılmıştır. Bu parametreler, benzetim ve analizler sırasında değişmeyecektir. Tüm analizler için MATLAB yazılımı kullanılmıştır.

Çizelge 5-3 DBSCAN Parametreleri

Epsilon	0.01*1.5
MinPts	4

Çizelge 5-4 Kullanıcı Gruplama Problemi- NSGA-II Parametre Seti

Popülasyon sayısı	100
Döngü sayısı	450
Çaprazlama oranı	20%
Mutasyon oranı	20%

MOPSO algoritmasında kullanılan parametreler, algoritmanın performansını ve arama mekanizmasını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Kullanıcı gruplama için ayarlanan parametrelerin detaylı açıklaması aşağıda verilmiştir.

Popülasyon Sayısı: Popülasyon, MOPSO algoritmasında her bir parçacığı (çözüm) temsil eden bireylerin sayısını ifade eder. Bu değer, arama uzayındaki farklı çözümleri keşfetme kapasitesini belirler. Büyük bir popülasyon daha fazla çeşitlilik sunarken, küçük popülasyon daha hızlı bir hesaplama sağlayabilir. Genellikle, popülasyon boyutu problem karmaşıklığına bağlı olarak belirlenir. Çoklu hedef fonksiyonları optimize ederken popülasyon boyutu, daha fazla çözüm önerisinin değerlendirilmesini sağlar.

Depo Boyutu: MOPSO algoritmasında, çözümlerin depo veya arşiv adı verilen bir bölümde saklanması gerekebilir. Arşiv, her bir parçacığın geçerli çözümünü ve elit çözümleri içerir. Arşiv boyutu, saklanacak en iyi çözümlerin sayısını belirler. Büyük bir arşiv boyutu, daha fazla iyi çözümü saklayabilir, ancak aynı zamanda daha fazla bellek ve hesaplama maliyeti gerektirebilir.

Döngü (Nesil) Sayısı: Algoritmanın çalışacağı toplam döngü sayısını ifade eder. Nesil terimi, tüm popülasyonun güncellendiği bir çevrimi ifade eder. Algoritma, verilen maksimum nesil sayısına ulaştığında durur. Bu parametre, algoritmanın ne kadar süre boyunca çalışacağını belirler ve genellikle yeterli yakınsama elde edilene kadar arttırılır.

Atalet Katsayısı: Atalet katsayısı, parçacıkların hızını kontrol eder ve önceki hızın yeni hız üzerindeki etkisini belirler. Genellikle 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir ve parçacıkların arama sürecinde hangi hızla hareket edeceğini belirler. Düşük bir atalet ağırlığı, parçacıkların daha az hızlanmasını ve daha detaylı bir arama yapmasını sağlarken, yüksek bir ağırlık daha geniş alanlarda arama yapılmasını sağlar.

Bireysel Güven Faktörü: Bu parametre, her bir parçacığın kendi en iyi pozisyonuna olan güvenini temsil eder. Bireysel güven faktörü, parçacığın önceki en iyi çözümüne doğru olan eğilimidir. Eğer bu faktör yüksekse, parçacık kendi deneyimlerine daha fazla güvenerek, önceki en iyi pozisyonuna daha hızlı hareket eder. Genellikle bu faktör, parçacığın kişisel keşif yeteneği ile ilgilidir.

Sürü Güven Faktörü: Sürü güven faktörü, parçacığın topluluğun en iyi pozisyonuna olan güvenini ifade eder. Parçacık, sürüdeki diğer parçacıkların en iyi çözümlerine göre hareket eder. Bu faktör, kolektif davranışı simüle eder ve parçacığın toplu bilgiyi kullanarak daha iyi çözümlere ulaşmasını sağlar. Yüksek bir sürü güven faktörü, parçacığın topluluktan öğrenmeye daha yatkın olduğunu gösterir.

Her Boyuttaki Izgara Sayısı: MOPSO'da çözüm uzayı genellikle ızgaralara bölünür. Her boyutta ızgara sayısı, çözüm uzayının hassasiyetini belirler. Daha fazla ızgara, daha detaylı ve ince bir arama yapılmasını sağlar. Ancak, fazla ızgara sayısı, hesaplama maliyetini artırabilir. Izgaralar, çözümlerin hangi bölgelerde yoğunlaştığını anlamak için kullanılır.

Maksimum Hız Yüzdesi: Parçacıkların hızlarını sınırlandırmak için kullanılır. Parçacıkların çok hızlı hareket etmesi çözüm uzayının bazı kısımlarının gözden kaçırılmasına neden olabilir, bu yüzden hız bir üst sınırla kısıtlandırılır. Maksimum hız genellikle arama alanının bir yüzdesi olarak belirlenir. Böylece parçacıkların aşırı hızlanmasının önüne geçilir ve çözümün stabilize edilmesi sağlanır.

Düzenli Mutasyon Yüzdesi: MOPSO'da bazen çözümler rastgele mutasyona uğrattılır. Bu, arama uzayında daha fazla çeşitlilik sağlamak ve yerel minimumlara takılmayı engellemek için yapılır. Düzenli mutasyon yüzdesi, parçacıkların ne kadarının mutasyona uğrayacağını belirler. Yüksek bir mutasyon oranı, daha fazla çeşitlilik sağlayarak yeni çözümler bulunmasına yardımcı olabilir, ancak çok yüksek bir oran istikrarsız sonuçlara neden olabilir.

Bu parametreler, MOPSO algoritmasının çeşitli özelliklerini kontrol eder ve algoritmanın doğru şekilde çalışması için dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekir. Aşağıda verilen parametreler kullanıcı gruplama probleminde minimum toplam güç ve maksimum kullanıcı sayısı hedeflerine ulaşmak amacıyla deneysel olarak hesaplanıp optimize edilmiştir.

Çizelge 5-5 Kullanıcı Gruplama Problemi- MOPSO Parametre Seti

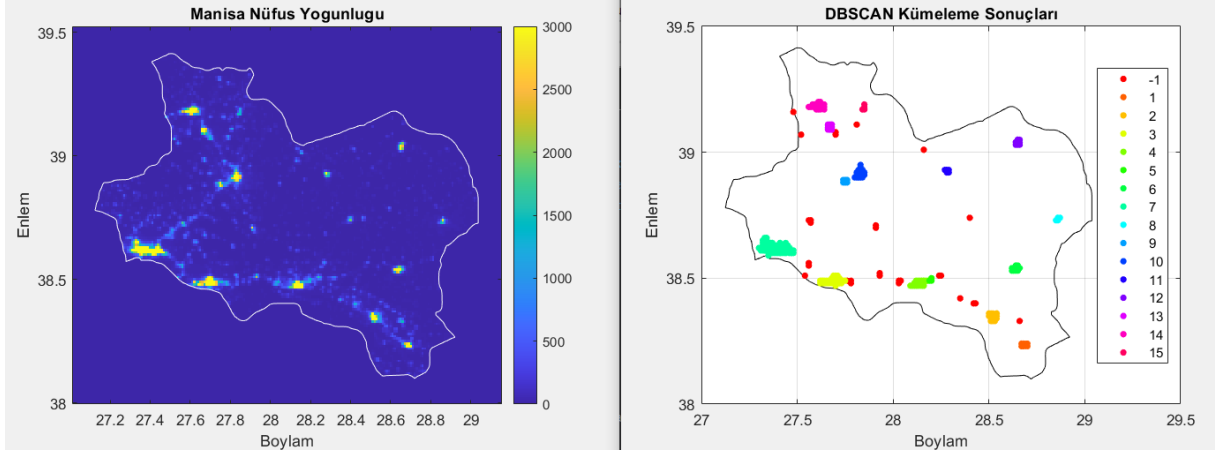
Popülasyon Sayısı	75
Depo Boyutu	200

Döngü (Nesil) Sayısı	350
Atalet Katsayısı	0.4
Bireysel Güven Faktörü	2
Sürü Güven Faktörü	2
Her Boyuttaki Izgara Sayısı	20
Maksimum Hız Yüzdesi	5%
Düzenli Mutasyon Yüzdesi	0.5%

Çizelge 5-6 Benzetim Parametreleri

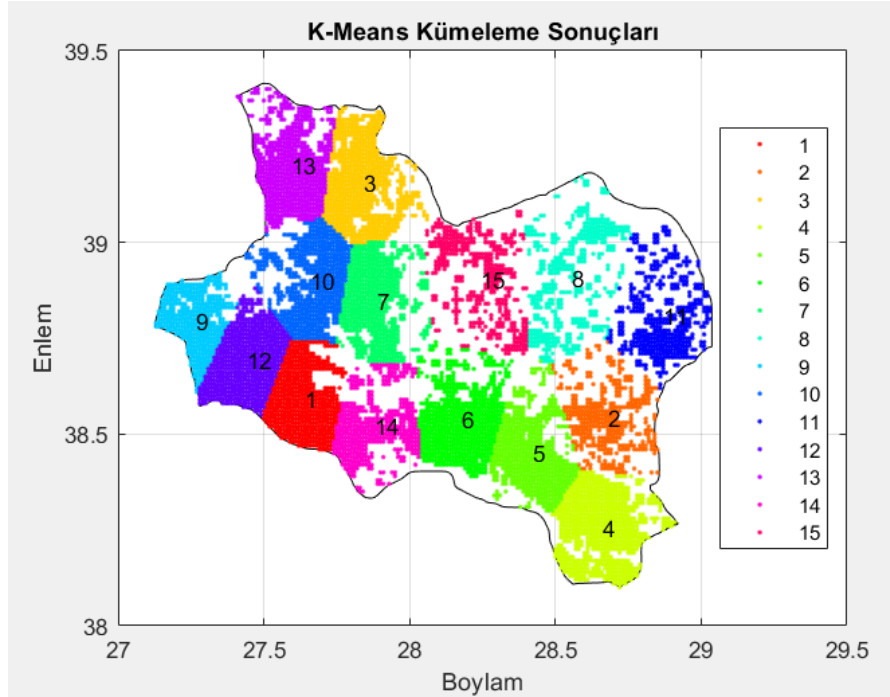
Parametre	Sembol	Değer
HAP sisteminin yüksekliği	h	22 km
HAP sisteminin kapsama yarıçapı	R	80 km
Gürültü Figürü	NF	5 dB
Bant genişliği	BW	18 Mhz
Taşıyıcı frekansı	f_c	2 Ghz
Toplam HAP sistemi gücü	$P_{H,T}$	300 W
Minimum ve maksimum hüzmecü	$P_{B,min}, P_{B,max}$	34-47 dBm
Kullanıcı anten kazancı	G_{UE}	-3 dBi

Kullanıcı gruplanması için seçilen ilk şehir Manisa'nın nüfus yoğunluğu ve DBSCAN kümeleme sonucu aşağıda verilmiştir. Solda verilen şekildeki sarı renkli bölgeler yoğun nüfuslu olan bölgeleri temsil etmektedir. Bu bölgeler ile, DBSCAN algoritmasının küme olarak nitelendirdiği veri noktaları eşleşmektedir. Sağdaki şekilde ise ilgili şehir için 15 adet hüzmecü kullanılmasının uygun olacağı görülmektedir. "-1" ile etiketlenen veri noktaları ise herhangi bir kümeyle dahil olamayan gürültü noktalarıdır.



Şekil 5-12 Nüfus Yoğunluğu ve DBSCAN Kümeleme Sonucu (Manisa)

DBSCAN algoritmasının sonucu olarak elde edilen hüzmeye sayısı K-means algoritmasının küme sayısını belirlemektedir. Tüm nüfusun ilgili sayıda küme sayısına göre gruplanmış hali aşağıda yer almaktadır. K-means algoritmasının sonucu olarak, ilk hüzmeye merkezleri ve hangi kullanıcıya hangi hüzmeye hizmet edeceğinin bilgisi de elde edilmiştir.



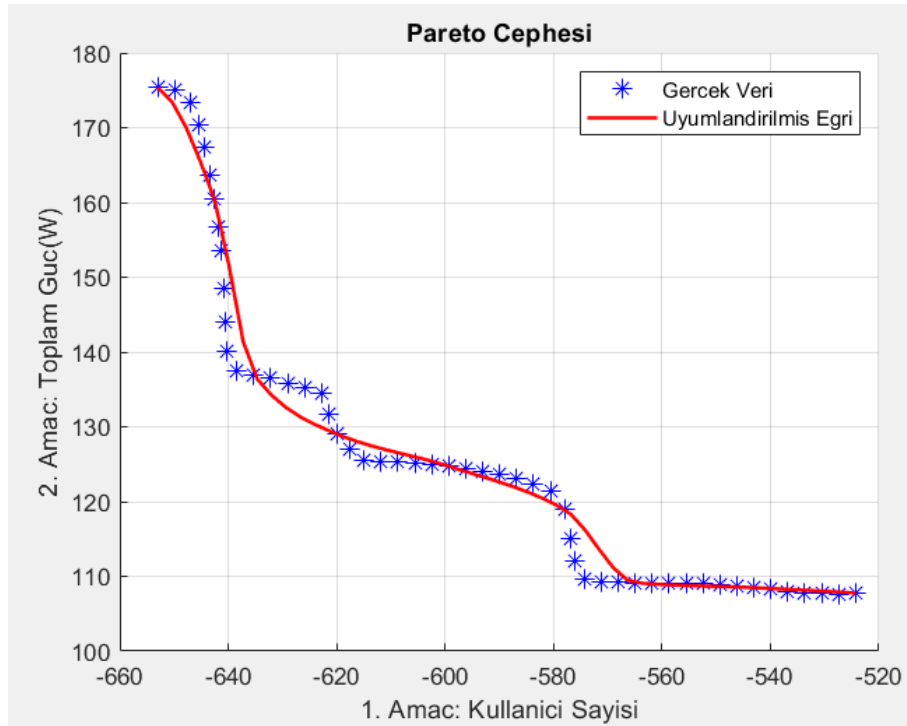
Şekil 5-13 K-Means Kümeleme Sonucu (Manisa)

Manisa şehri için tüm kullanıcıları değerlendirmek yerine genel dağılımı ifade edecek bir alt kullanıcı kümesi örneklenmiştir. İlgili alt kümede toplamda 654 kullanıcı yer almaktadır.

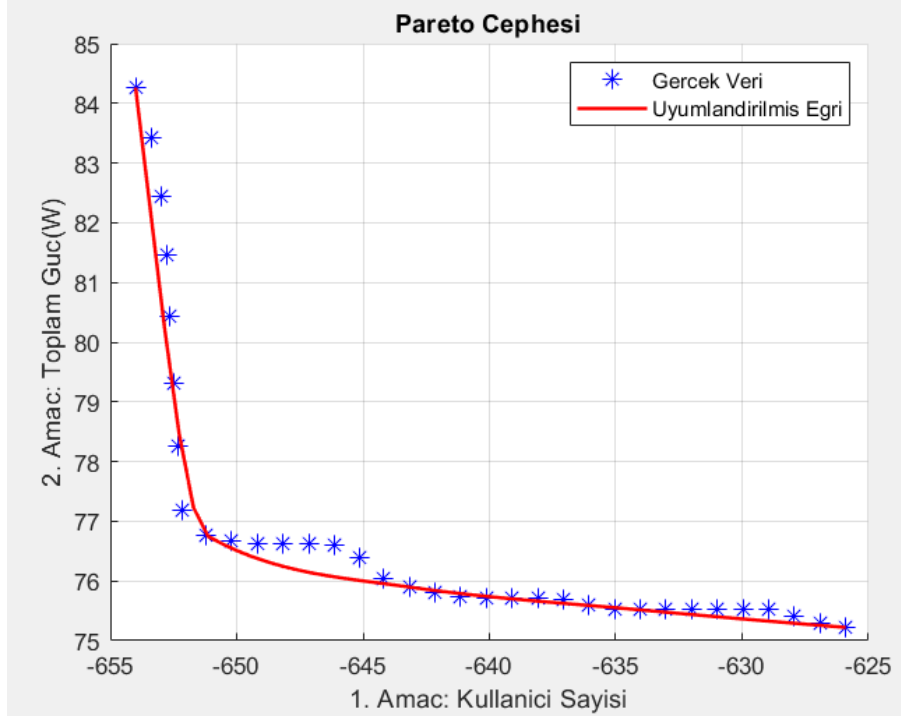
Çizelge 5-4'te ve Çizelge 5-5'te verilen sabit değerler kullanılarak NSGA-II ve MOPSO algoritmaları çalıştırılmıştır. Sonuç olarak Şekil 5-14 ve Şekil 5-15'te gösterilen Pareto cephesi grafikleri elde edilmiştir. (Birinci amaç fonksiyonunun eksi işaretli olmasının sebebi NSGA-II

ve MOPSO algoritmalarının amaç fonksiyonlarını minimize etmesinden kaynaklanmaktadır. Yani, enbüyülmeye çalışılan birinci amaç fonksiyonu eksi ile çarpılmıştır.)

Pareto cephesi grafiklerinde, popülasyon sayısına eşit ya da daha az olacak kadar çözüm sunulmaktadır. Bu çözümler incelendiğinde, NSGA-II algoritması kullanılarak 653 adet kullanıcıya yaklaşık 175W toplam HAP sistemi gücü ile hizmet verilebileceği görülmektedir. MOPSO algoritması ise yaklaşık 84W güç ile örneklenen tüm kullanıcılara (654) hizmet sağlayabilmektedir. İhtiyaç duyulan senaryoya göre (daha fazla kullanıcıya hizmet veya daha düşük güç harcama limitleri) sistem tasarımı gerçekleştirilerek elde edilen Pareto cephesinden istenilen çözüm seti seçilebilecektir. Bu durum sistem tasarımı aşamasında, geniş bir çözüm yelpazesi sunar. Bu esneklik, uygulama bağlamına ve mevcut kaynaklara göre en uygun çözümün seçilmesine olanak tanımaktadır.

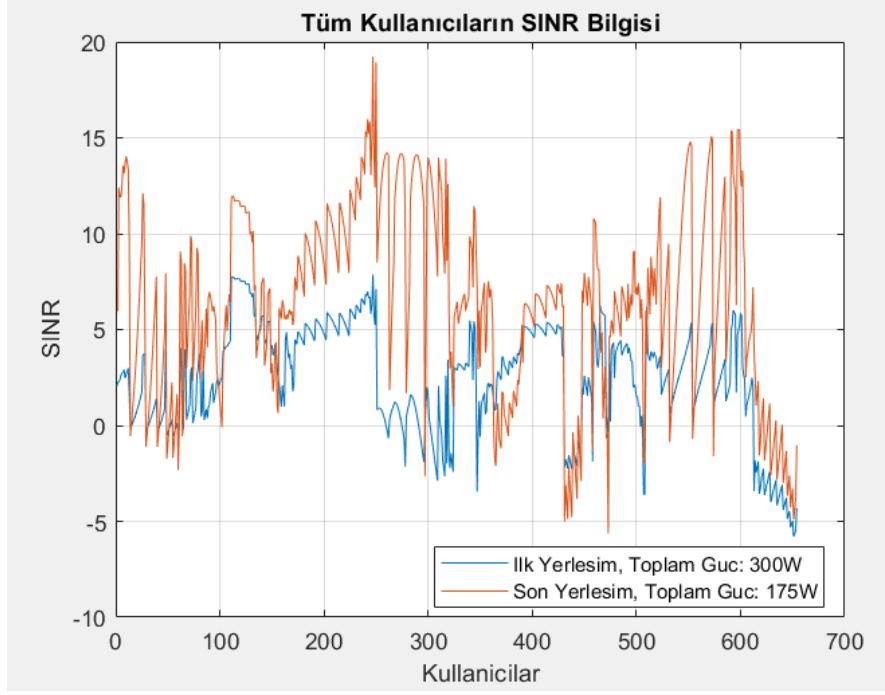


Şekil 5-14 NSGA-II Pareto Cephesi (Manisa)

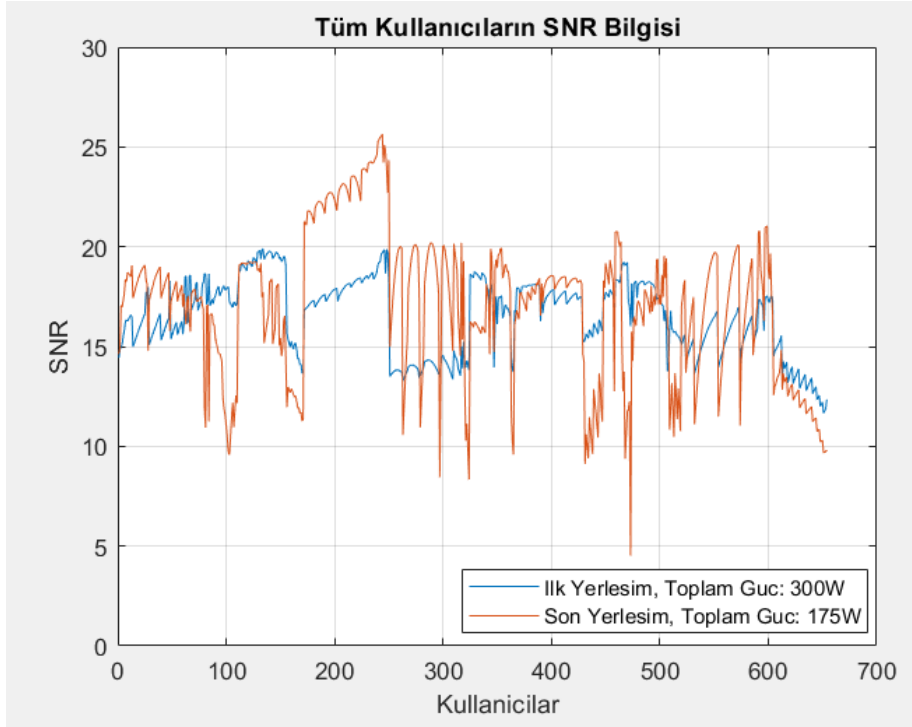


Şekil 5-15 MOPSO Pareto Cephesi (Manisa)

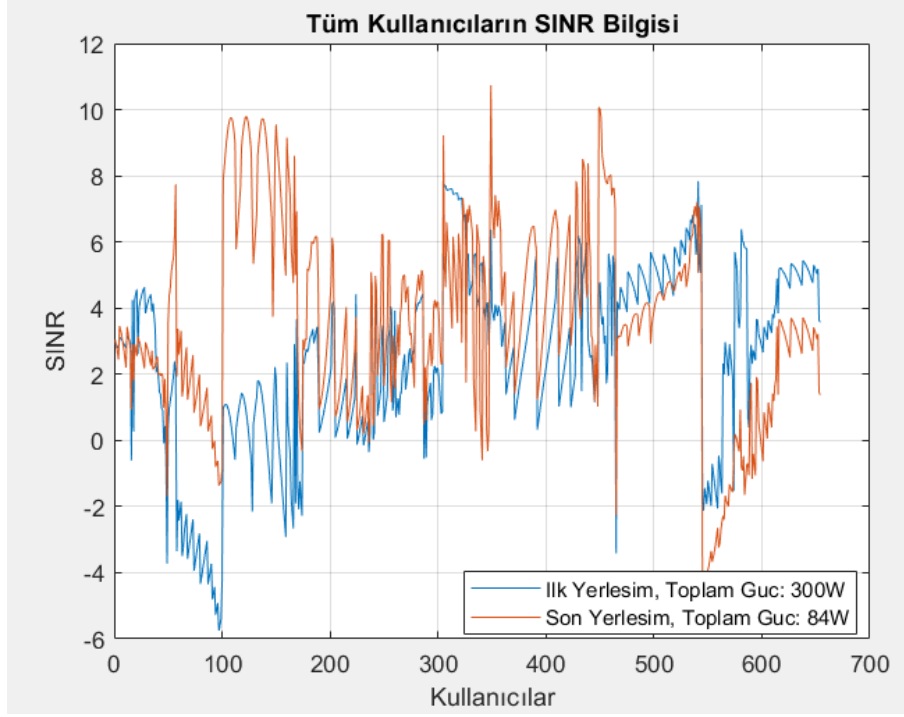
Şekil 5-16'dan Şekil 5-19'a kadar verilen grafiklerde NSGA-II ve MOPSO algoritmaları kullanıldığı durumda tüm kullanıcılara sağlanan SINR ve SNR seviyeleri verilmiştir. Grafiklerde verilen mavi çizgi, Şekil 5-20'de verilen hüzme konumları/şekilleri kullanıldığında ve tüm hüzmelere eşit güç sağlandığı durumda elde edilen SNR ve SINR değerleridir. Manisa şehri için toplamda 15 hüzme kullanıldığından, bir hüzme için 300/15 W güç harcanmıştır. Grafiklerde verilen kırmızı çizgi ise, Şekil 5-21'de verilen hüzme konumları/şekilleri kullanıldığında ve tüm hüzmelere eniyileme algoritmasının atadığı güçler kullanıldığında elde edilen SNR ve SINR değerleridir.



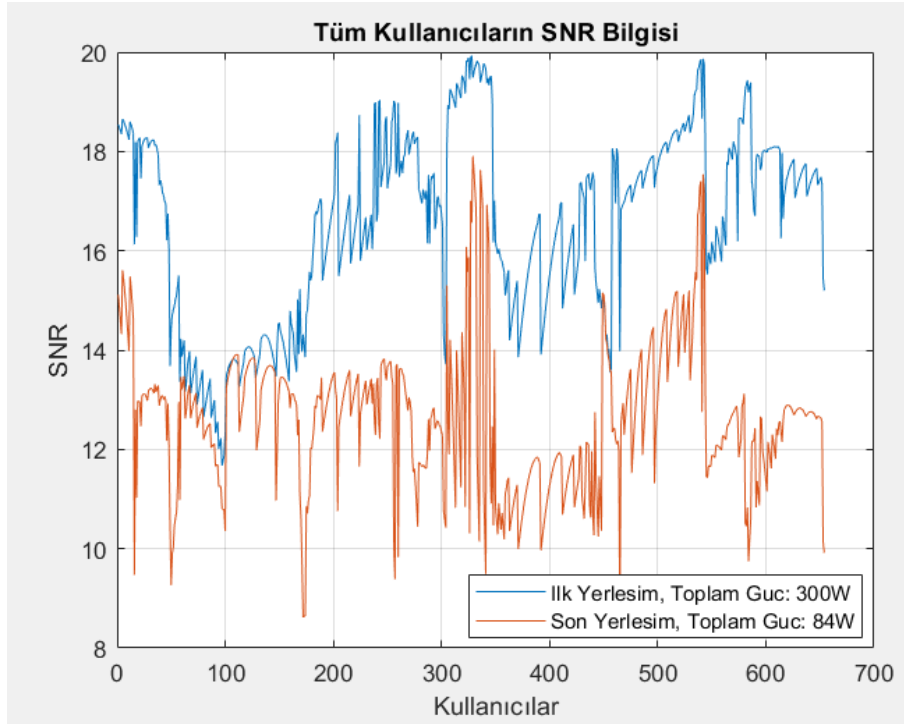
Şekil 5-16 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Manisa)



Şekil 5-17 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Manisa)



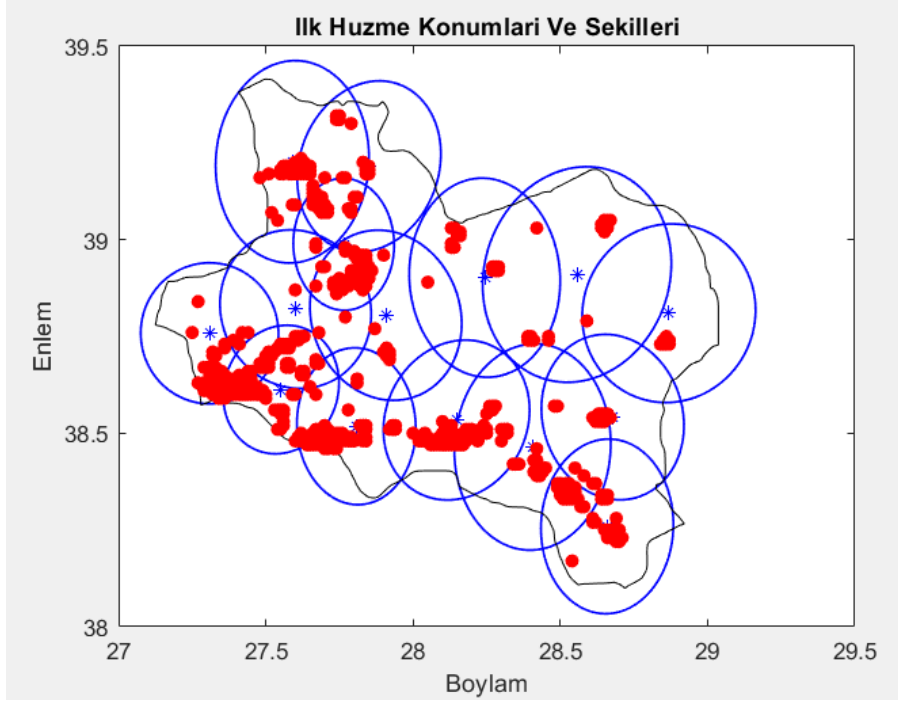
Şekil 5-18 MOPSO Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Manisa)



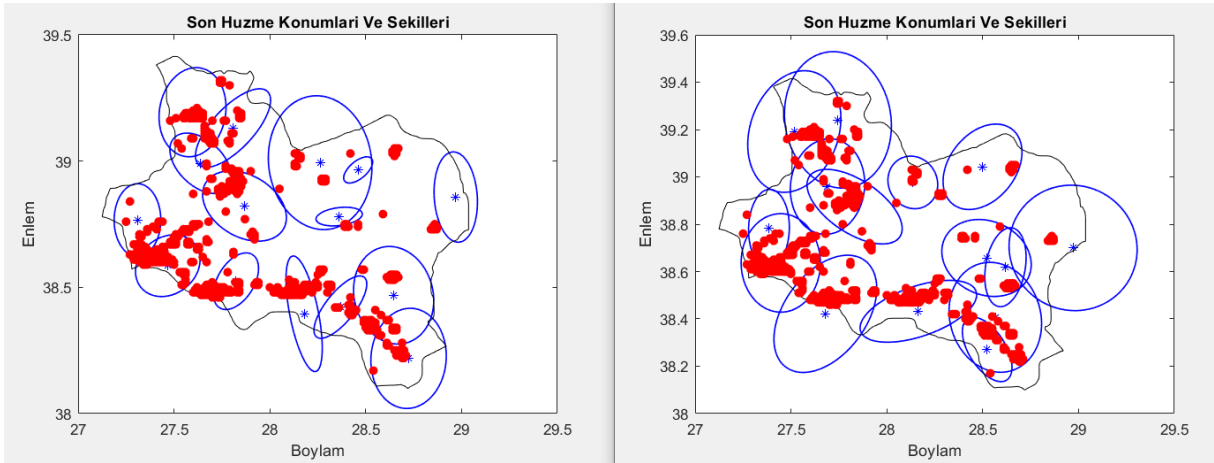
Şekil 5-19 MOPSO Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Manisa)

Şekil 5-20’de algoritmanın başındaki hüzme konumları ve şekilleri verilmiştir. Şekil 5-21’de ise NSGA-II ve MOPSO algoritmalarının çalıştırılması sonucu elde edilen hüzme konumları şekillerini göstermektedir. Verilen şekillerde görülen eliptik çizgiler her bir hüzmenin yatay ve

dikey 3 dB hüzme genişliğini vermektedir. İçi dolu kırmızı daireler ise örneklenen kullanıcıları göstermektedir.

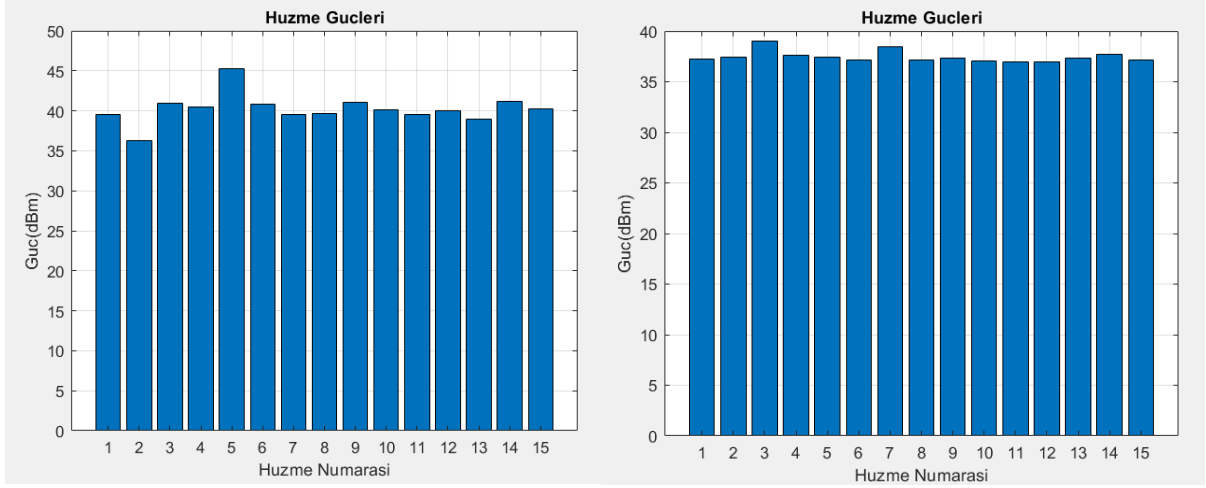


Şekil 5-20 Hüzmelerin İlk Konumları ve Şekilleri (Manisa)



Şekil 5-21 Hüzmelerin Son Konumları ve Şekilleri (Manisa) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)

Eniyileme algoritmalarının her bir hüzmeye için atadığı güçler Şekil 5-22'de gösterilmiştir.



Şekil 5-22 Hüzme Güçleri (Manisa) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)

NSGA-II algoritmasının genel analizi Çizelge 5-7’de verilmiştir. Algoritma sonucu ortaya çıkan hüzme konumları ve şekilleri kullanıldığında, SNR ve SINR değerlerinde önemli ölçüde artış sağlanırken yüzde 42 oranında güç tasarrufu sağlanmıştır.

Çizelge 5-7 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Manisa) (NSGA-II)

	İlk hüzme konumları ve şekilleri	Son hüzme konumları ve şekilleri
Toplam kullanıcı sayısı	654	654
Kapsanan kullanıcı sayısı ve oranı	654, 100%	653, 99.8%
Harcanan güç miktarı (W)	300	175.39
Harcanan gücün toplam güce oranı	100%	58.3%
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SINR değeri	2.281	6.4879
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SNR değeri	16.8997	17.0642

MOPSO algoritmasının genel analizi Çizelge 5-8’de verilmiştir. Algoritma sonucunda NSGA-II algoritmasına kıyasla daha az güç harcanarak tüm kullanıcılara hizmet sağlanabilmektedir. Fakat

buna karşılık olarak, SNR seviyesi oldukça gerilemiş ve SINR seviyesi NSGA-II algoritmasına kıyasla daha düşük kalmıştır.

Daha önce de bahsedildiği üzere MOPSO algoritması çok amaçlı eniyileme problemlerinde hız ve basitlik gibi avantajlara sahiptir. Bunun yanında NSGA-II algoritması, çeşitliliği daha iyi koruma, çözümleri üstün olmayan sıralamayla yönetme, büyük popülasyon ve karmaşık Pareto cephelerine sahip problemlere uygunluk gibi avantajlara sahiptir.

Kullanıcı gruplama probleminde MOPSO algoritması sunulan çözümlerin çeşitliliği ve iki amaç fonksiyonun aynı anda eniyilenmesi noktasında NSGA-II algoritmasının gerisinde kalmıştır. MOPSO algoritması yerel minimum noktalarında sıkışarak, genel çözümünün bulunmasında yetersiz kalmıştır. Fakat, yerel minimum noktalarında elde edilen çözümler toplam sistem gücünün eniyilenmesini kolaylaştırmıştır. Bu durumda tasarlanacak HAP iletişim sistemi göz önüne alındığında, öncelik, tüketilen toplam güç miktarının azaltılması ise MOPSO algoritması uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Hizmet kalitesinin artırılması ve güç tüketimi arasında bir denge kurulması istenirse NSGA-II algoritması en uygun çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 5-8 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Manisa) (MOPSO)

	İlk hüzmeye konumları ve şekilleri	Son hüzmeye konumları ve şekilleri
Toplam kullanıcı sayısı	654	654
Kapsanan kullanıcı sayısı ve oranı	654, 100%	654, 100%
Harcanan güç miktarı (W)	300	84.2
Harcanan gücün toplam güce oranı	100%	28%
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SINR değeri	2.281	3.6181
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SNR değeri	16.8997	12.6449

Aynı algoritmalar, nüfusun belli bir bölgeye yoğunlaştığı bir şehir olan Samsun için tekrarlanmıştır. Genel sonuçlar ve şekiller aşağıda yer almaktadır.

Manisa şehrinde alınan sonuçlara benzer şekilde, güç tüketimi göz önüne alındığında MOPSO algoritması üstünlük sağlarken, hizmet kalitesi-güç tüketimi dengesi NSGA-II algoritması tarafından oldukça iyi şekilde sağlanmıştır.

Çizelge 5-9 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Samsun) (NSGA-II)

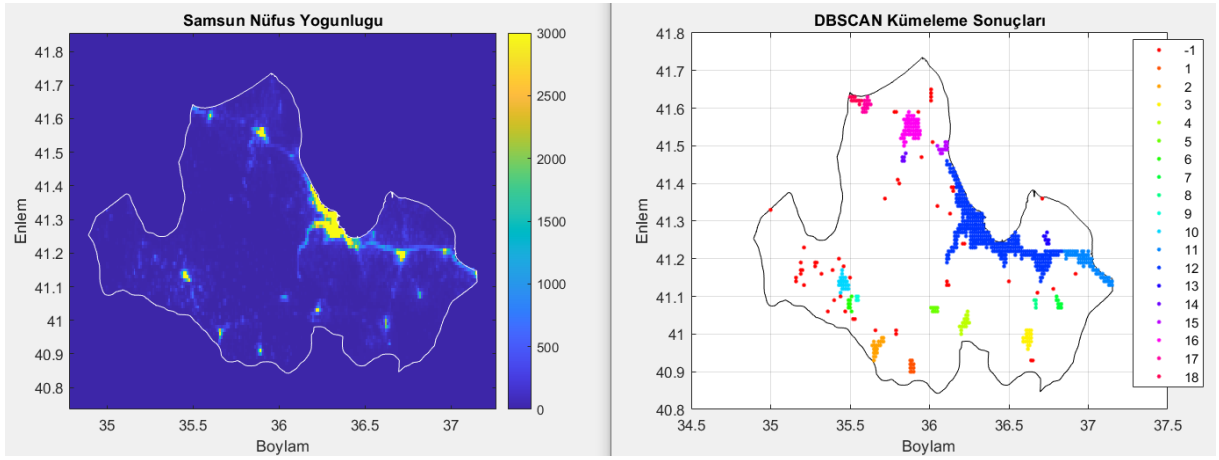
	İlk hüzme konumları ve şekilleri	Son hüzme konumları ve şekilleri
Toplam kullanıcı sayısı	605	605
Kapsanan kullanıcı sayısı ve oranı	605, 100%	596, 98.5%
Harcanan güç miktarı (W)	300	154.67
Harcanan gücün toplam güce oranı	100%	51.5%
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SINR değeri	1.8267	6.7113
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SNR değeri	17.7340	18.2701

Çizelge 5-10 Kullanıcı Gruplama Algoritması Genel Sonucu (Samsun) (MOPSO)

	İlk hüzme konumları ve şekilleri	Son hüzme konumları ve şekilleri
Toplam kullanıcı sayısı	605	605
Kapsanan kullanıcı sayısı ve oranı	605, 100%	602, 99%
Harcanan güç miktarı (W)	300	115.91
Harcanan gücün toplam güce oranı	100%	38.6%

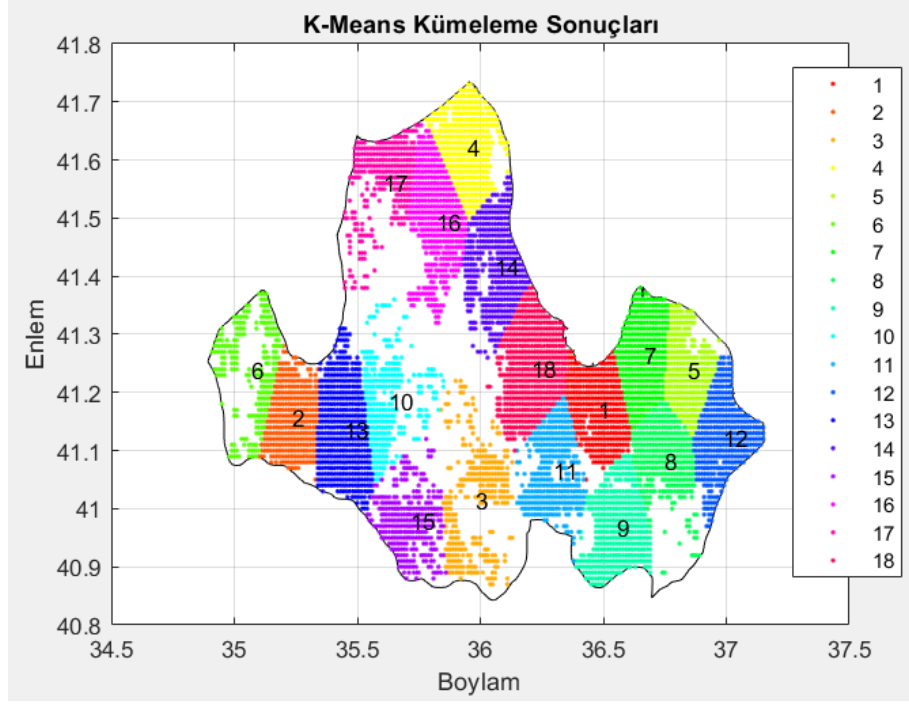
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SINR değeri	1.8267	3.5238
Kullanıcıların elde ettiği ortalama SNR değeri	17.7340	14.9482

Şekil 5-23’de nüfusun belli bir bölgede yoğunlaştığı görülebilmektedir. DBSCAN algoritması solda verilen yoğunluk haritasına oldukça yakın olacak şekilde, kullanıcıları gruplara ayırmıştır.



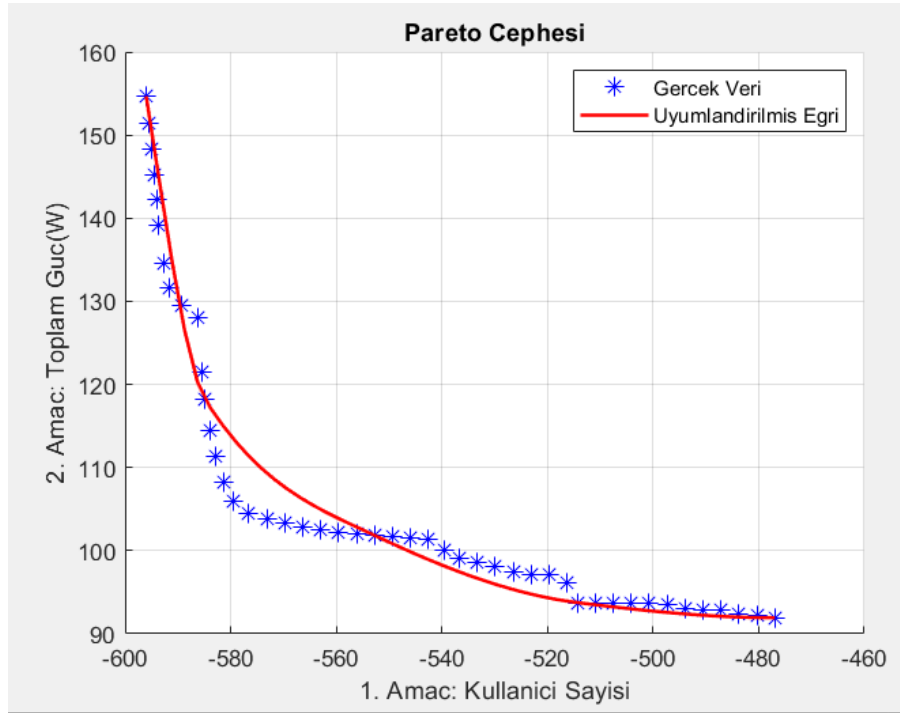
Şekil 5-23 Nüfus Yoğunluğu ve DBSCAN Kümeleme Sonucu (Samsun)

DBSCAN algoritmasının sonucu olarak edilen küme sayısını kullanan K-Means algoritması kullanıcıları aşağıdaki gibi gruplara ayırmıştır.

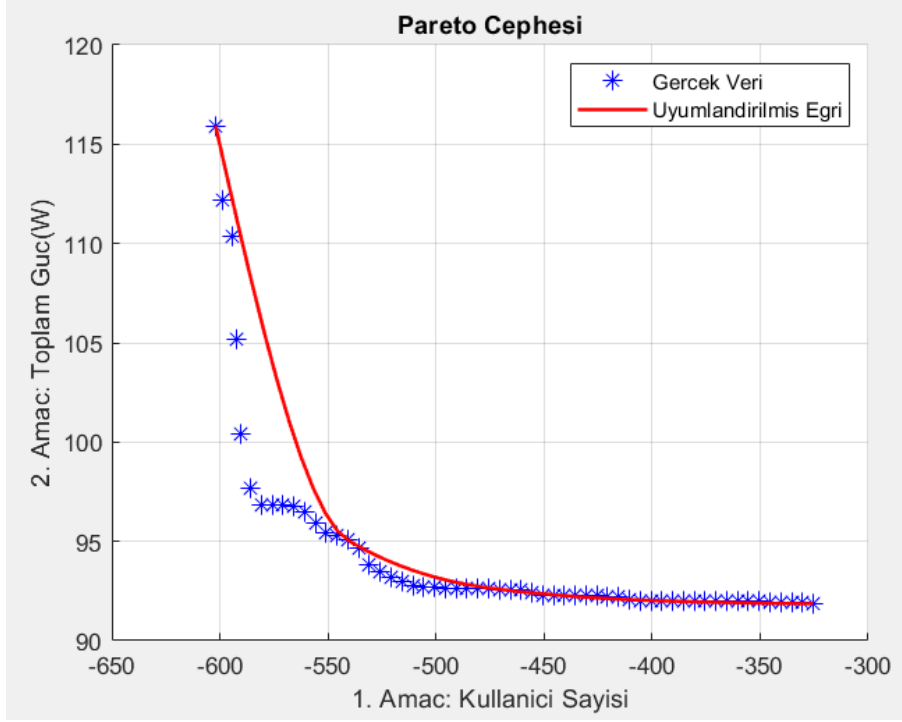


Şekil 5-24 K-Means Kümeleme Sonucu (Samsun)

Elde edilen Pareto cepheleri Şekil 5-25 ve Şekil 5-26’da gösterilmiştir. Manisa şehrine benzer şekilde, burada da ihtiyaç duyulan sistem senaryosuna göre Pareto cephesinde verilen çözüm setlerinden bir tanesi kullanılabilir.

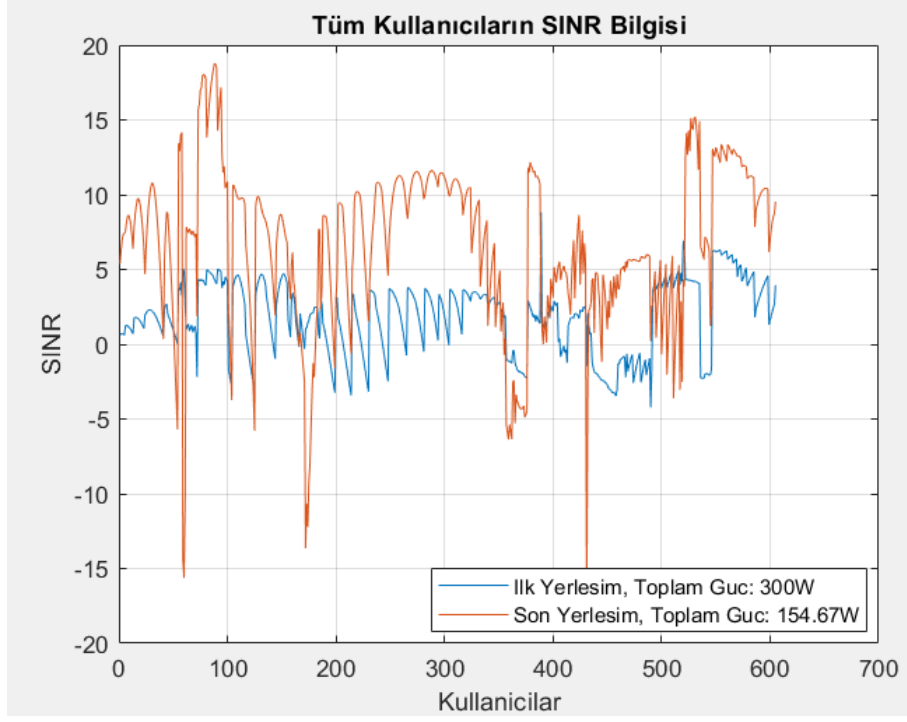


Şekil 5-25 NSGA-II Pareto Cephesi (Samsun)

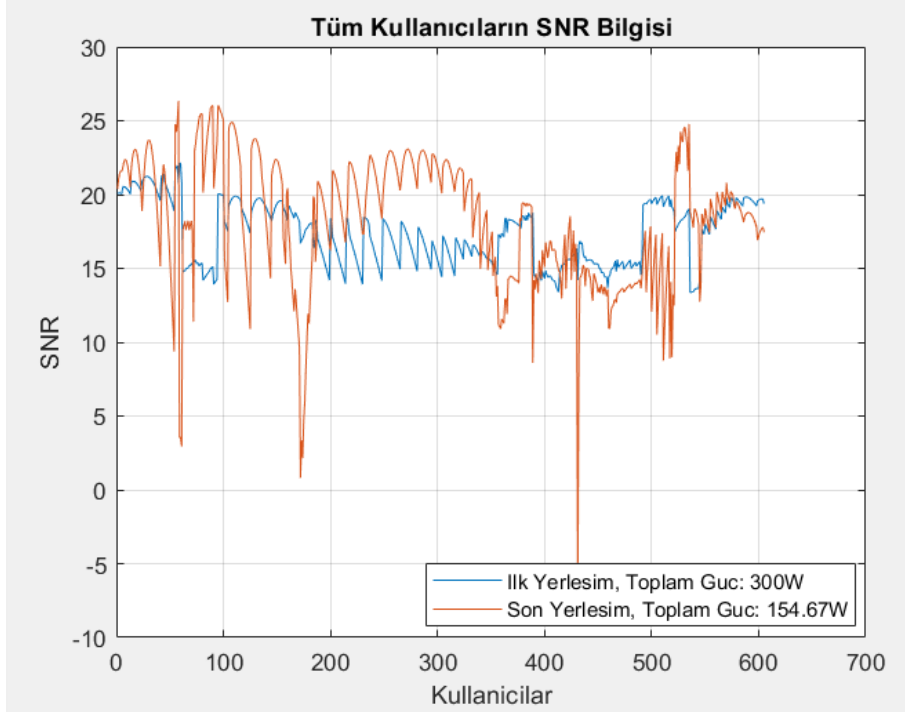


Şekil 5-26 MOPSO Pareto Cephesi (Samsun)

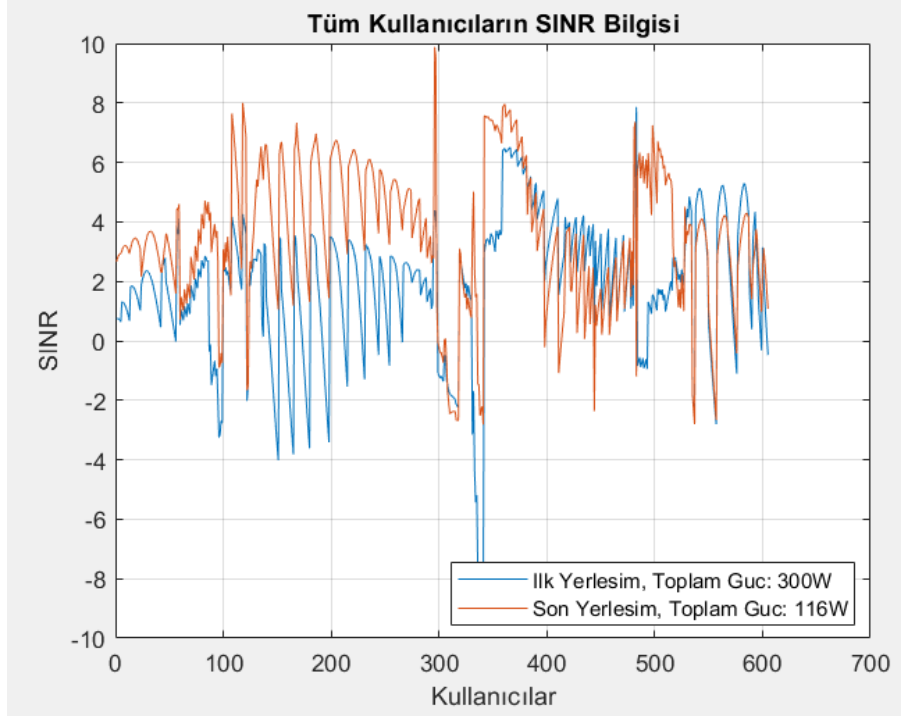
Sistemin tüm kullanıcılara sağlamış olduğu SNR ve SINR değerleri NSGA-II ve MOPSO algoritmaları için ayrı ayrı olacak şekilde, Şekil 5-27 ile Şekil 5-30 arasında verilmiştir. Samsun şehri için belirlenen hüzmeye sayısı 18'dir. Şekil 5-31'de verilen hüzmeye konumları/şekilleri kullanıldığında ve tüm hüzmelere 300/18 W güç harcandığı durumda mavi ile verilen SNR SINR değerleri elde edilmektedir. Hüzmeler için eniyileme algoritmasının atadığı güçler, konumlar ve şekiller kullanıldığında elde edilen SNR ve SINR değerleri grafikte kırmızı ile verilmiştir.



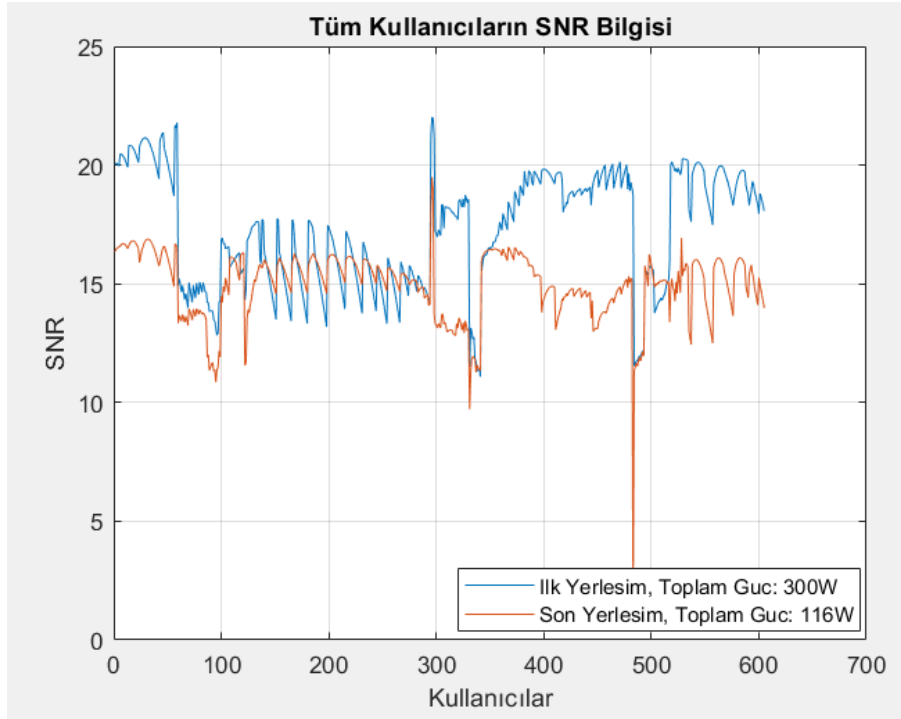
Şekil 5-27 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Samsun)



Şekil 5-28 NSGA-II Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Samsun)

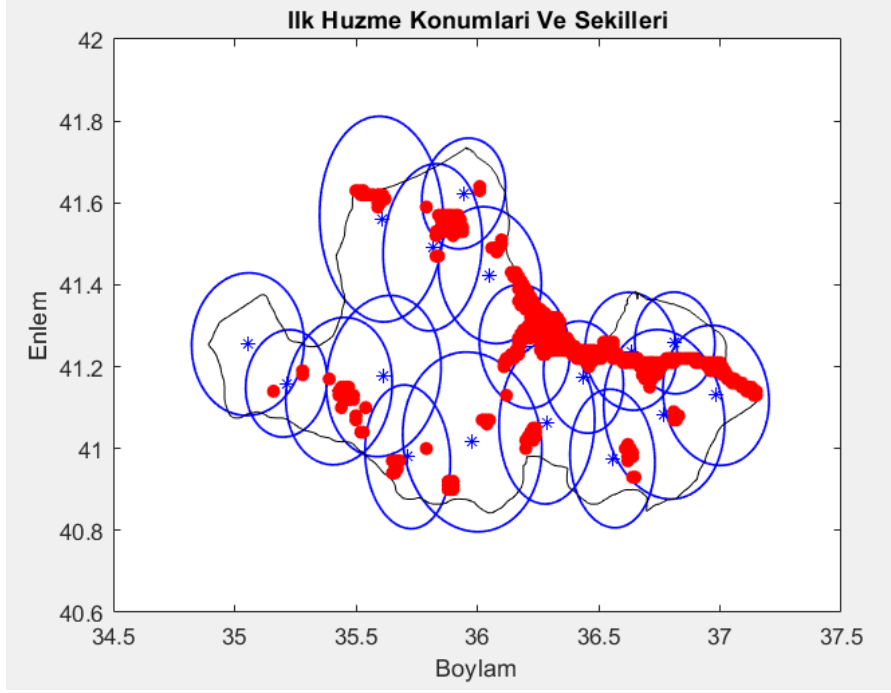


Şekil 5-29 MOPSO Tüm Kullanıcıların SINR Değerleri (Samsun)

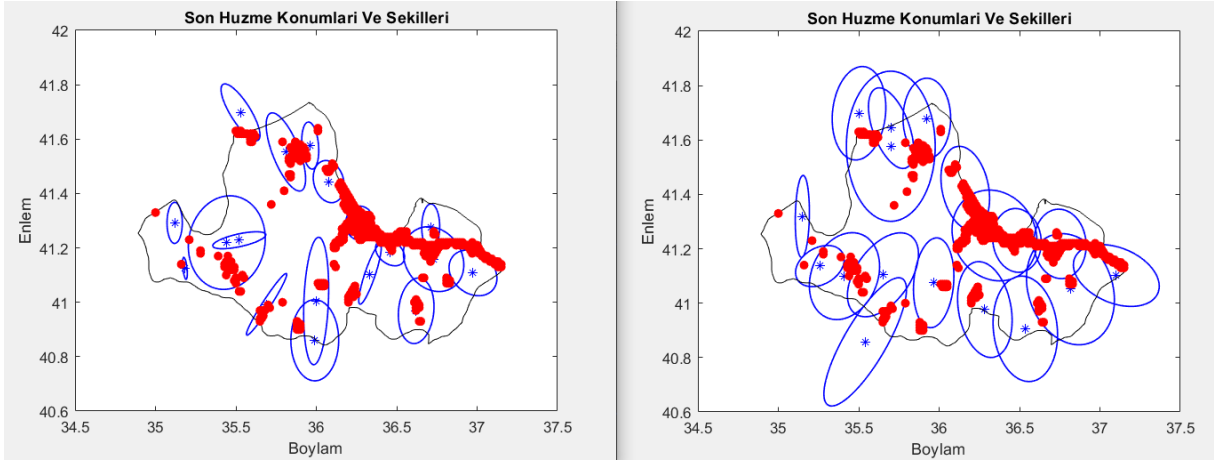


Şekil 5-30 MOPSO Tüm Kullanıcıların SNR Değerleri (Samsun)

Hüzmelerin son şekilleri ve konumları Şekil 5-32’de verilmiştir. Manisa şehrinde olduğu gibi burada da kullanıcı taleplerini karşılayacak, toplam güç miktarını minimize edecek hüzmeye şekil ve konumları eniyileme algoritması tarafından belirlenmiştir.

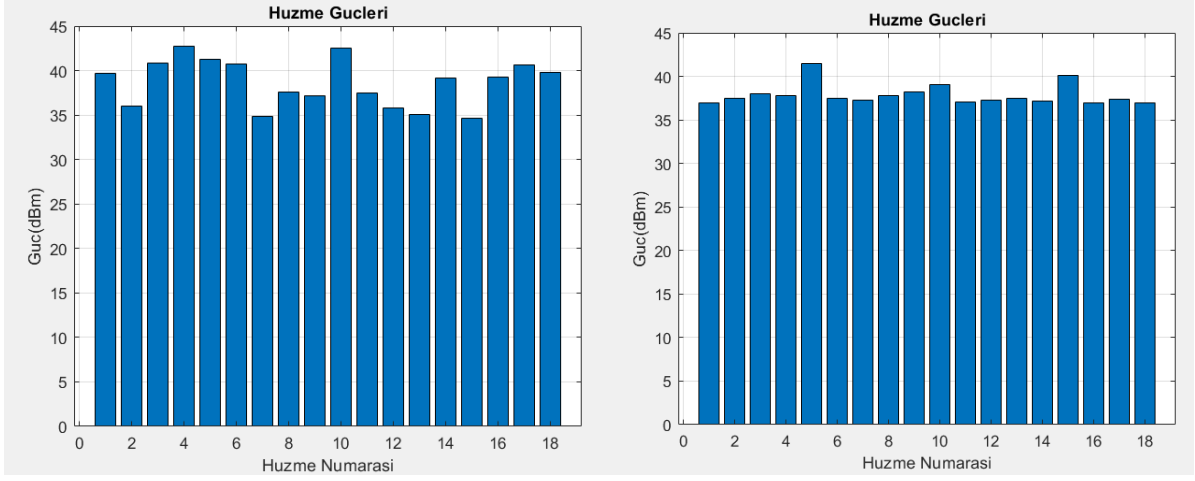


Şekil 5-31 Hüzmelemin İlk Konumları ve Şekilleri (Samsun)



Şekil 5-32 Hüzmelemin Son Konumları ve Şekilleri (Samsun) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)

Samsun şehri için eniyileme algoritmasının her bir huzme için atadığı güç miktarları Şekil 5-33'de verilmiştir. Bu güçler, NSGA-II algoritması için Pareto cephesinden seçilen 596 kullanıcı, 155W güç çözümü için verilmiştir. MOPSO algoritması için ise 602 kullanıcı 116W güç çözümü için verilmiştir.



Şekil 5-33 Hüzme Güçleri (Samsun) (Sol: NSGA-II, Sağ: MOPSO)

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, HAP sistemlerinin konumlandırılması ve hizmet edilecek kullanıcıların kümelenmesi üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. HAP sistemleri, geniş bir kapsama alanına sahip olmaları ve esnek konumlandırma yetenekleri sayesinde modern telekomünikasyon ve veri iletim sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, HAP sistemlerinin optimal konumlarını belirlemek ve kullanıcılara en iyi hizmeti sunmak amacıyla kullanıcı gruplarını belirlemektir. Bu bağlamda, NSGA-II ve MOPSO çok amaçlı eniyileme algoritmaları, iki farklı kümeleme algoritması olan DBSCAN ve K-means yöntemleri ve kullanıcı taleplerinin karşılanması için hüzmeye oluşturma/yönlendirme yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, HAP sistemlerinin konumlarının belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Bu problemde, kullanıcı taleplerinin karşılanması ve kapsama alanının maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, hedef bölgedeki tüm kullanıcıların talebini ifade edecek bir talep haritası oluşturulmuştur. HAP sisteminin hizmet edeceği ağı, tek bir HAP tarafından kapsandığı durumdaki DL CNR analizi ve çoklu HAP sistemi kapsamı durumundaki DL CINR analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda CINR değerinin CNR ile elde edilebileceği anlaşılmıştır. Oluşturulan talep haritasındaki her kullanıcının talebi ile kullanıcılara sağlanan hizmet ağırlıklandırılmıştır. Bu eniyileme algoritmasının birinci amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. İkinci amaç fonksiyonu ise HAP sistemlerinin hedef bölge üzerinde sağlayabildiği kapsama alanı olarak belirlenmiştir. İki amaç fonksiyonunun eniyi çözümünü sağlayacak HAP konumlarının bulunması hedeflenmiştir. Bu amaçla, genetik algoritmalara dayalı bir çözüm sunan NSGA-II algoritması kullanılmıştır. Algoritma en iyi konumların bulunması için, HAP sistemleri arası girişim seviyesini minimum seviyeye düşürürken aynı zamanda belirlenmiş kısıtlar çerçevesinde hareket etmektedir. NSGA-II algoritması, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili bir yöntem olarak bilinmektedir. Algoritma, Pareto optimal çözümler üreterek hem kullanıcı taleplerini karşılama hem de kapsama alanını genişletme hedeflerini aynı anda eniyilemiştir. Bu sayede, HAP sistemlerinin konumları, sistemin toplam etkinliğini maksimize edecek şekilde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda HAP sistemlerinin maksimum kapsama alanını sağlarken aynı zamanda kullanıcıların yoğunlukta olduğu bölgelere konumlandırıldığı görülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında, hizmet edilecek kullanıcıların gruplandırılması problemi ele alınmıştır. Kullanıcıların coğrafi dağılımı ve talepleri, HAP sistemlerinin performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, kullanıcıların uygun bir şekilde gruplandırılması, HAP

sistemlerinin etkinliğini artırmak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu aşamada, iki farklı kümeleme algoritması olan DBSCAN ve K-means kullanılmıştır. DBSCAN algoritması, kullanıcı yoğunluklarına dayalı olarak gruplar oluşturmuş ve her bir grubun sınırlarını belirlemiştir. Bu yöntemin en büyük avantajı, gürültü verilerini dikkate alarak, heterojen dağılıma sahip kullanıcıları doğru bir şekilde gruplandırabilmesidir. DBSCAN algoritması tarafından belirlenen grup sayısı, HAP sisteminin oluşturacağı hüzmeye sayısını vermiştir. Her gruba ayrı ayrı gönderilmesi hedeflenen hüzmeler ile, kullanıcılara en iyi hizmetin sağlanabilmesi amaçlanmıştır. K-means algoritması ise, kullanıcıları önceden belirlenmiş sayıda gruplara ayırmıştır. K-means, verilerin merkez etrafında toplanmasını sağlayarak homojen gruplar oluşturmuştur. Ayrıca, her bir kullanıcıya hizmet verecek hüzmeye ve her hüzmeye merkezi K-means algoritması ile bulunmuştur. HAP sisteminin göndereceği her bir hüzmeye için, kısıtlar belirlenmiştir. Bu kısıtlar, hüzmeye konumu ve şeklinin hareket alanını belirlemektedir. Konumlandırma problemine benzer şekilde burada da HAP ağı modelini oluşturmak üzere SNR ve SINR metrikleri tanımlanmıştır. Aynı zamanda, HAP sistemi üzerinde yer alan antenin kazanç modeli ve örüntüsü tanımlanmıştır. Ayrıca her bir hüzmeye için sisteminin kısıtlarının dışına çıkmayacak şekilde güç değerleri atanmıştır. En iyileme algoritmasının birinci amaç fonksiyonunu kullanıcı talepleri oluştururken, ikinci amaç fonksiyonunu ise iletişim hizmeti için kullanılan toplam sistem gücü oluşturmaktadır. Bu hedefler doğrultusunda, NSGA-II ve MOPSO algoritmaları kullanılmıştır. Algoritmalar, her bir kullanıcı grubuna hizmet eden hüzmelerin güç dağılımını, konumlarını ve şekillerini eniyilemiştir. Bu sayede, sistemin genel enerji verimliliği artırılmış ve kullanıcılar için en iyi hizmet kalitesi sağlanmıştır. NSGA-II güç tüketimi-hizmet kalitesi dengesini başarılı bir şekilde sağlarken, MOPSO algoritması ise güç tüketimini önemli ölçüde azaltacak çözümleri sunmuştur. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, kullanıcıların çok büyük bir çoğunluğuna minimum düzeyde güç miktarı ile hizmet sağlanabileceği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, HAP sistemlerinin optimal konumlandırılması ve kullanıcı gruplarının belirlenerek, hüzmeye oluşturma/yönlendirme yöntemi ile kullanıcılara hizmet sağlanması üzerine kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. NSGA-II ve MOPSO algoritmaları, tanımlanan çok amaçlı eniyileme problemlerinde başarılı bir performans sergileyerek hem kapsama alanı hem de güç kullanımını en uygun hale getirmiştir. DBSCAN ve K-means algoritmaları ise, farklı kullanıcı dağılım senaryolarında etkili sonuçlar vermiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu çalışmada ele alınmayan dinamik olarak hızlı şekilde değişen kullanıcı talepleri ve çevresel koşullar göz önünde bulundurulabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] T. Tozer, “High Altitude Platforms for Communications Services,” *IEEE-VTS News*, vol. 50, no. 4, Dec. **2003**, pp. 4–9.
- [2] S. Karapantazis and F. Pavlidou, “Broadband communications via highaltitude platforms: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 7, no. 1, pp. 2–31, 1st Quart., **2005**.
- [3] L. Loon, Connect people everywhere, 2018, Available at <https://loon.co/>. (Accessed on 21 March **2018**).
- [4] J. Gonzalo, D. López, D. Domínguez, A. García, A. Escapa, On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites, *Prog. Aerosp. Sci.* 98 (**2018**) 37–56.
- [5] D. Grace, M. Mohorcic, M. Oodo, M. Capstick, M.B. Pallavicini, M. Lalovic, CAPANINA—communications from aerial platform networks delivering broadband information for all, in: *Proceedings of the 14th IST mobile and wireless and communications summit*, **2005**.
- [6] J. Thornton, D. Grace, C. Spillard, T. Konefal, T. Tozer, Broadband communications from a high-altitude platform: the european helinet programme, *Electron. Commun. Eng. J.* 13 (3) (**2001**) 138–144.
- [7] S. Corp., H. Inc, Softbank corp. develops aircraft that delivers telecommunications connectivity from the stratosphere, 2019, Available at <https://www.bloomberg.com/press-releases/2019-04-25/softbank-corpdevelops-aircraft-that-delivers-telecommunications-connectivity-from-thestratosphere>. (Accessed on 13 June **2019**).
- [8] G. Karabulut Kurt et al., "A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 729-779, Secondquarter **2021**, doi: 10.1109/COMST.2021.3066905.
- [9] M. Vázquez-Castro, F. Pérez-Fontán, and B. Arbesser-Rastburg, “Channel modeling for satellite and HAPS system design,” *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2, no. 3, pp. 285–300, May **2002**.
- [10] F. Dovis, R. Fantini, M. Mondin, and P. Savi, “Small-scale fading for high-altitude platform (HAP) propagation channels,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 641–647, Apr. **2002**.
- [11] E. T. Michailidis, G. Efthymoglou, and A. G. Kanatas, “Spatially correlated 3-D HAP-MIMO fading channels,” in *Proc. IEEE Globecom Workshops*, **2008**, pp. 1–7.
- [12] Z. Lian, L. Jiang, C. He, and D. He, “A non-stationary 3-D wideband GBSM for HAP-MIMO communication systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1128–1139, Feb. **2019**.
- [13] Z. Ma, B. Ai, R. He, G. Wang, Y. Niu, and Z. Zhong, “A wideband nonstationary air-to-air channel model for UAV communications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 1214–1226, Feb. **2019**.

- [14] T. C. Tozer and D. Grace, "High-Altitude Platforms for Wireless Communications," *IEEE Electronics & Commun. Eng. J.*, vol. 13, no. 3, June **2001**, pp. 127–37.
- [15] G. M. Djuknic, J. Freidenfelds, and Y. Okunev, "Establishing Wireless Communications Services via High Altitude Platforms: A Concept Whose Time Has Come?" *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 9, Sept. **1997**, pp. 128–35.
- [16] Steve Chukwuebuka Arum, David Grace, Paul Daniel Mitchell, A review of wireless communication using high-altitude platforms for extended coverage and capacity, *Computer Communications*, Volume 157, **2020**, Pages 232-256, ISSN 0140-3664.
- [17] ITU-R, R. S. "Methodology for determining the power level for high altitude platform stations ground terminals to facilitate sharing with space station receivers in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz." *ITU-R, Tech. Rep., Oct (2007)*.
- [18] Itu, J. "Provisional final acts." *World Radiocommunication Conference 2019*. ITU Publications, **2019**.
- [19] Yuniarti, "Regulatory challenges of broadband communication services from High Altitude Platforms (HAPs)," *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, Yogyakarta, Indonesia, **2018**, pp. 919-922, doi: 10.1109/ICOIACT.2018.8350752.
- [20] A. Aragon-Zavala, J. L. Cuevas-Ruíz, and J. A. Delgado-Penín, *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, **2008**.
- [21] X.-Z. Gao, Z.-X. Hou, Z. Guo, J.-X. Liu, and X.-Q. Chen, "Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft," *Energy Convers. Manag.*, vol. 70, pp. 20–30, Jun. **2013**.
- [22] P.-D. Arapoglou, E. T. Michailidis, A. D. Panagopoulos, A. G. Kanatas, and R. Prieto-Cerdeira, "The land mobile earth-space channel," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 44–53, Jun. **2011**.
- [23] E. T. Michailidis and A. G. Kanatas, "Three-dimensional HAP-MIMO channels: Modeling and analysis of space-time correlation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2232–2242, Jun. **2010**.
- [24] H. Ahmadi, K. Katzis, and M. Z. Shakir, "A novel airborne selforganising architecture for 5G+ networks," in *Proc. IEEE 86th Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, **2017**, pp. 1–5.
- [25] R. Miura and M. Suzuki, "Preliminary Flight Test Program on Telecom and Broadcasting Using High Altitude Platform Stations," *Wireless Pers. Commun., An Int'l. J.*, Kluwer Academic Publishers, vol. 24, no. 2, Jan. **2003**, pp. 341–61.
- [26] R. Miura and M. Oodo, "Wireless Communications System Using Stratospheric Platforms — R&D Program on Telecom and Broadcasting System Using High Altitude Platform Stations," *J. Commun. Research Laboratory, Communications Research Laboratory, Tokyo, Japan*, vol. 48, no. 4, **2001**, pp. 33–48.

- [27] <https://wirelesspi.com/what-is-the-difference-between-analog-digital-and-hybrid-beamforming/>
- [28] <https://www.researchgate.net/>
- [29] Rohde, U. L., & Whitaker, J. (2010). Communications Receivers: DSP, Software Radios, and Design. McGraw-Hill Professional.
- [30] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). Antenna Theory and Design. John Wiley & Sons.
- [31] Balanis, C. A. (2016). Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley-Interscience
- [32] <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/phased-array-antenna-patterns-part1.html>
- [33] Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press.
- [34] Deb, Kalyan. (2001). Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Wiley, New York.
- [35] Coello, C. A. C., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer.
- [36] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T. Meyarivan. A Fast Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2):182 {197, April 2002}.
- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Test_functions_for_optimization
- [38] Esra Duygu Durmaz, Ramazan Şahin, (2017). Çok Amaçlı Tek Sıra Tesis Düzenleme Probleminin Çözümü İçin Nsga-II ve Hedef Programlama Yaklaşımı, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 32, Sayı 3, 2017, 0- 0, 10.17341/gazimmfd.337647
- [39] C. A. C. Coello, G. T. Pulido and M. S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 256-279, June 2004
- [40] Sierra, Margarita & Coello, Carlos. (2005). Improving PSO-Based Multi-objective Optimization Using Crowding, Mutation and ϵ -Dominance. *Lecture Notes in Computer Science*. 3410. 10.1007/978-3-540-31880-4_35.
- [41] Hans-Georg Beyer and Kalyanmoy Deb. On Self-Adaptive Features in Real-Parameter Evolutionary Algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5(3):250 {270, June 2001}.

- [42] Kalyanmoy Deb and R. B. Agarwal. Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space. *Complex Systems*, 9:115 {148, April **1995**}.
- [43] https://en.wikipedia.org/wiki/K-means_clustering
- [44] Bishop, C. M. (**2006**). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- [45] <https://www.mathworks.com/help/stats/dbscan.html>
- [46] <https://www.geeksforgeeks.org/dbscan-clustering-in-ml-density-based-clustering/>
- [47] Ester, M., H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xiaowei. "A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise." In *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery in Databases and Data Mining*, 226-231. Portland, OR: AAAI Press, **1996**.
- [48] F. Dong, H. Han, X. Gong, J. Wang and H. Li, "A Constellation Design Methodology Based on QoS and User Demand in High-Altitude Platform Broadband Networks," in *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 18, no. 12, pp. 2384-2397, Dec. **2016**, doi: 10.1109/TMM.2016.2595260.
- [49] Ha Yoon Song, "A method of mobile base station placement for High Altitude Platform based network with geographical clustering of mobile ground nodes," 2008 International Multiconference on Computer Science and Information Technology, Wisla, Poland, **2008**, pp. 869-876, doi: 10.1109/IMCSIT.2008.4747344.
- [50] D. Grace, J. Thornton, G. H. Chen, and W. P. George, and T. C. Tozer, "Improving the system capacity of broadband services using multiple high-altitude platforms," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 2, pp. 700-709, **2005**.
- [51] Xuyu Wang, X.G.R.Z., "Energy-Efficient Deployment of Airships for High Altitude Platforms: A Deterministic Annealing Approach." IEEE Communications Society subject matter experts for publication in the IEEE Globecom 2011 proceedings, **2011**(978-1-4244-9268- 8/11).
- [52] ZONG Ru, GAO Xinbo, PENG Jianhua, "Deployment optimization of the self-organized network on near space platforms based on the game theoretical learning algorithm." *Journal of Xiaian University*. Oct.**2013**.vol.40 No.5.pp. 915–921.
- [53] Tang, Shuzhu et al. "An Optimization Deployment Methodology of HAP-VMIMO Broadband Communication Network with Matching the Demand Distribution." *Space Information Networks Conference* (**2017**).
- [54] Zhu Zhiliang, Ye Ning, Liu Ju, Gao Chang. "Deployment Optimization Algorithm for Regional MANET Containing Near Space Vehicles as a Part", *Journal of Electronics & Information Technology*, Apr.**2011**, Vbl.33 no.4, pp. 915–921.
- [55] S. Tang, D. Yan, P. You, S. Yong and S. Xu, "MultiObjective optimization deployment of HAP broadband communication networks," 2017 IEEE 9th International Conference on

- Communication Software and Networks (ICCSN), Guangzhou, China, **2017**, pp. 436-442, doi: 10.1109/ICCSN.2017.8230151.
- [56] D. Xu, X. Yi, Z. Chen, C. Li, C. Zhang and B. Xia, "Coverage ratio optimization for HAP communications," *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292182.
- [57] X. Cao, P. Yang, M. Alzenad, X. Xi, D. Wu and H. Yanikomeroglu, "Airborne Communication Networks: A Survey," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 9, pp. 1907-1926, Sept. **2018**, doi: 10.1109/JSAC.2018.2864423.
- [58] A. Alsharoa and M. S. Alouini, "Improvement of the global connectivity using integrated satellite-airborne-terrestrial networks with resource optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 8, pp. 5088–5100, Aug. **2020**.
- [59] D.-H. Na, K.-H. Park, Y.-C. Ko and M.-S. Alouini, "Beamforming and Band Allocation for Satellite and High-Altitude Platforms Cognitive Systems," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 11, pp. 2330-2334, Nov. **2022**, doi: 10.1109/LWC.2022.3202641.
- [60] P. G. Sudheesh, M. Mozaffari, M. Magarini, W. Saad and P. Muthuchidambaranathan, "Sum-Rate Analysis for High Altitude Platform (HAP) Drones With Tethered Balloon Relay," in *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 1240-1243, June **2018**, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2785847.
- [61] Y. Xu, X. Xia, K. Xu and Y. Wang, "Three-Dimension Massive MIMO for Air-to-Ground Transmission: Location-Assisted Precoding and Impact of AoD Uncertainty," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 15582-15596, **2017**, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2726528.
- [62] J. Tong, Y. Lu, D. Zhang, G. Cui and W. Wang, "Max-min Analog Beamforming for High Altitude Platforms Communication Systems," *2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Beijing, China, **2018**, pp. 872-876, doi: 10.1109/ICCCChina.2018.8641188.
- [63] J. Thornton, D. Grace, M. H. Capstick and T. C. Tozer, "Optimizing an array of antennas for cellular coverage from a high altitude platform," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 3, pp. 484-492, May **2003**, doi: 10.1109/TWC.2003.811052.
- [64] S. C. Arum, D. Grace, P. D. Mitchell and M. D. Zakaria, "Beam-Pointing Algorithm for Contiguous High-Altitude Platform Cell Formation for Extended Coverage," *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, Honolulu, HI, USA, **2019**, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2019.8891528.
- [65] B. El-Jabu and R. Steele, "Cellular communications using aerial platforms," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 3, pp. 686-700, May **2001**, doi: 10.1109/25.933305.

- [66] Yasser Albagory, Alaa Eldeen Abbas, "Smart cell design for high altitude platforms communication", *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, Volume 67, Issue 9, **2013**, Pages 780-786, ISSN 1434-8411.
- [67] Chen, G., Grace, D. & Tozer, T.C. "Performance of Multiple High Altitude Platforms using Directive HAP and User Antennas". *Wireless Pers Commun* 32, 275–299 (**2005**).
- [68] K. Hoshino, S. Sudo and Y. Ohta, "A Study on Antenna Beamforming Method Considering Movement of Solar Plane in HAPS System," *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, Honolulu, HI, USA, **2019**, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2019.8891546.
- [69] Hui Li, Xin Xu, Mingchuan Yang and Qing Guo, "Compensative mechanism based on steerable antennas for High Altitude Platform movement," *2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, Harbin, **2011**, pp. 870-874, doi: 10.1109/ChinaCom.2011.6158277.
- [70] Capstick, M.H., Grace, D. "High Altitude Platform mm-Wave Aperture Antenna Steering Solutions." *Wireless Pers Commun* 32, 215–236 (**2005**).
- [71] K. Xiao, C. Li and J. Zhao, "LSTM Based Multiple Beamforming for 5G HAPS IoT Networks," *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Tangier, Morocco, **2019**, pp. 1895-1900, doi: 10.1109/IWCMC.2019.8766663.
- [72] S. Sibiya and O. O. Olugbara, "Reliable Internet of Things network architecture based on high altitude platforms," in *Proc. IEEE Conf. Inf. Commun. Technol. Soc. (ICTAS)*, **2019**, pp. 1–4.
- [73] I. Zakia, S. Tjondronegoro, Iskandar and A. Kurniawan, "Performance comparisons of adaptive MVDR and received LS beamforming on the downlink time varying channel of HAP system," *2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Denpasar, Indonesia, **2013**, pp. 709-713, doi: 10.1109/APCC.2013.6766041.
- [74] M. Ouchi, T. Kimura and Y. Chinda, " Study on Full Digital Beamforming for HAPS Backhaul System with Base Station On-board Using 38 GHz Band Frequency," *2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Okayama, Japan, **2021**, pp. 1-6, doi: 10.1109/WPMC52694.2021.9700444.
- [75] Y. Shibata, N. Kanazawa, M. Konishi, K. Hoshino, Y. Ohta and A. Nagate, "System Design of Gigabit HAPS Mobile Communications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 157995-158007, **2020**.
- [76] G. Zhang, L. Jiang, P. Ji, S. Zou, C. He and D. He, "A Modified K-means User Grouping Design for HAP Massive MIMO Systems," *2021 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*, Lijiang City, China, **2021**, pp. 288-292, doi: 10.1109/NaNA53684.2021.00057.

- [77] Q. Zhang, Q. Xi, C. He and L. Jiang, "User Clustered Opportunistic Beamforming for Stratospheric Communications," in *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 9, pp. 1832-1835, Sept. **2016**, doi: 10.1109/LCOMM.2016.2584038.
- [78] İ. Cumalı, B. Özbek, G. K. Kurt and H. Yanikomeroğlu, "User Selection and Codebook Design for NOMA-Based High Altitude Platform Station (HAPS) Communications," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 3, pp. 3636-3646, March **2023**, doi: 10.1109/TVT.2022.3220647.
- [79] M. D. Zakaria, D. Grace and P. D. Mitchell, "Antenna array beamforming strategies for high altitude platform and terrestrial coexistence using K-means clustering," *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, Johor Bahru, Malaysia, **2017**, pp. 259-264, doi: 10.1109/MICC.2017.8311769.
- [80] P. Ji, L. Jiang, C. He, Z. Lian and D. He, "Energy-Efficient Beamforming for Beamspace HAP-NOMA Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 5, pp. 1678-1681, May **2021**, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3031635.
- [81] P. Ji, L. Jiang, C. He and D. He, "Graph Based User Clustering for HAP Massive MIMO Systems With Two-stage Beamforming," *2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Lisbon, Portugal, **2019**, pp. 1-6, doi: 10.1109/WPMC48795.2019.9096130.
- [82] Z. Lian, L. Jiang, C. He and D. He, "User Grouping and Beamforming for HAP Massive MIMO Systems Based on Statistical-Eigenmode," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 961-964, June 2019, doi: 10.1109/LWC.2019.2902140.
- [83] W. Dai, S. Yang, M. Bouazizi and T. Ohtsuki, "K-Means Clustering-Aided Dynamic Multi-Cell Optimization Algorithm for HAPS," *GLOBECOM 2023- 2023 IEEE Global Communications Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, **2023**, pp. 5635-5640, doi: 10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437302.
- [84] Minimum Performance Characteristics and Operational Conditions For High Altitude Platform Stations Providing IMT-2000 in the Bands 1885- 1980 MHz, 2010-2 025MHz and 2110-2170 MHz in Regions 1 and 3 and 1885- 1980 MHz and 2110-2160 MHz in Region 2, document ITU- R M.1456, **2000**.
- [85] <https://data.humdata.org/dataset/turkey-high-resolution-population-density-maps-demographic-estimates>