

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYONLARININ 3 BOYUTLU YERSEÇİM VE
KAYNAK ATAMA PROBLEMLERİNİN OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ
Cihan Tuğrul ÇİÇEK

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN

KASIM 2019

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora öğrencisi **Cihan Tuğrul ÇİÇEK**'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYONLARININ 3 BOYUTLU YERSEÇİM VE KAYNAK ATAMA PROBLEMLERİNİN OPTİMİZASYONU”** başlıklı tezi **21.11.2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman: **Prof. Dr. Bülent TAVLI**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Sinan GÜREL (Başkan)**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Çağrı KOÇ
Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Ü. Eda Yücel
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

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

Cihan Tuğrul ÇİÇEK

ÖZET

Doktora Tezi

İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYONLARININ 3 BOYUTLU YERSEÇİM VE KAYNAK ATAMA PROBLEMLERİNİN OPTİMİZASYONU

Cihan Tuğrul ÇİÇEK

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN

Tarih: Kasım 2019

İnsansız hava araçları (İHA) son yıllarda çok farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Hem maliyet avantajları hem de kolay yönetilebilir olmaları kullanım alanlarının genişlemesine de olanak vermektedir. Bu tez kapsamında İHA'ların hareketli baz istasyonu olarak yeni nesil kablosuz haberleşme ağlarına entegrasyonu ve çeşitli senaryolar için İHA Baz İstasyonlarının (İHABİ) yerseçim ve kaynak atama problemleri ele alınmıştır. Klasik yerseçim problemlerinden farklı olarak hem dikey düzlemde hareket kabiliyeti olması hem de problemler genelinde kullanılan performans göstergelerinin konveks ve monoton olmaması problemin çözümünü oldukça zorlaştırmaktadır.

İHABİ yerseçim ve kaynak atama kararlarının eniyilenmesi amacıyla dört farklı problem ele alınmıştır. Bu problemlerden ilki statik kapasitesiz İHABİ'lerin geliştirilmiş yerseçimini, ikincisi statik kapasiteli tek İHABİ'nin yerseçim ve kaynak atama kararlarını, üçüncüsü statik kapasiteli birden çok İHABİ'nin yerseçim ve kaynak atama kararlarını, dördüncüsü ise dinamik kapasitesiz tek İHABİ'nin yerseçimini ele almaktadır. Problemler genellikle karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama teknikleri ile modellenmiş ve her bir model özelinde modelin karakteristikleri incelenmiştir.

Ele alınan problemler NP-Zor problemler sınıfına aittir. Dolayısıyla, belirli problem büyüklüklerinden sonra mevcut ticari yazılımlar aracılığıyla makul zamanlarda çözüm alınması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple problemlerin hızlı ve etkin çözümü için çeşitli sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar genellikle yerseçim ve kaynak atama kararlarının ardışık olarak verilmesine ve bu algoritmalar sonucu elde edilen çözümlerin yerel arama yöntemleri ile iyileştirilmesine dayanmaktadır. Klasik yerseçim problemlerinden farklı olarak bu ardışık algoritmaların tasarımında hem ağ kapasitesinin hem de kullanıcıların taleplerinin değerlendirilmesine önem verilmiştir.

İHABİ'lerle ilgili henüz standart çalışmaları tamamlanmadığı için literatürde kullanıma açık bir veri kümesi bulunmamaktadır. Bu nedenle, geliştirilen formülasyonların ve sezgisel algoritmaların performansı yapay olarak üretilen verilerle test edilmiştir. Her bir problem özelinde üretilen problem verilerinin literatürde bundan sonra yapılacak çalışmalara da esas oluşturması amaçlanmıştır. Bu veriler kullanılarak, hem ticari yazılımlarla çözdürülen formülasyonların hem de geliştirilen sezgisel algoritmaların çözüm süresi ve çözüm kalitesi açısından karşılaştırıldığı kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında İHABİ içeren kablosuz haberleşme ağlarının kapsama performansının artırılması için çeşitli politika önerilerinde bulunulmuştur. Sonuç olarak, geliştirilen algoritmaların makul sürelerde optimale yakın sonuçlar elde ettiği ve İHABİ'lerin kablosuz haberleşme ağlarının performansını önemli derecede artırdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kapsama yerseçim problemi, Kaynak atama problemi, İnsansız hava aracı baz istasyonu, Doğrusal olmayan eniyileme, Sezgisel algoritmalar

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

OPTIMIZATION OF 3-D LOCATION AND RESOURCE ALLOCATION PROBLEMS OF UNMANNED AERIAL BASE STATIONS

Cihan Tuğrul ÇİÇEK

TOBB University of Economics and Technology
Graduate School of Engineering and Science
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Hakan Gültekin

Date: November 2019

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have started to be used in many areas. Their cost advantages and the ease of manageability allow for a broader range of applications. In this thesis, the integration of UAVs into next generation wireless communication networks as mobile base stations is considered and several UAV Base Station (UAV-BS) location and resource allocation problems are solved under various scenarios. The vertical movement ability of UAV-BSs and non-convex and non-monotone structure of performance measures used in wireless communication networks differ from classical location problems and increase the complexity of problems.

Four different problems are considered to optimize UAVBS location and resource allocation decisions. The first problem considers a static uncapacitated generalized UAVBS covering location decisions, the second problem considers a static capacitated single UAVBS location and resource allocation decisions, the third problem considers a static capacitated multi-UAVBS location and resource allocation decisions, and the fourth problem considers a dynamic uncapacitated single UAVBS covering location decisions. These problems are typically modelled as mixed integer non-linear programming formulations, and the properties specific to each model are investigated.

All of the considered problems belong to NP-Hard problem class. Therefore, it is not possible to find exact solutions in reasonable solution times by commercial solvers for

large problem instances. For this reason heuristic algorithms are developed to obtain quick and efficient solutions. These algorithms mainly depend on determining the location and resource allocation decisions separately and iteratively and improving the final solution by different local search algorithms. Different than the classical location problems, we consider both the network capacity and different user demand behavior in the design of these heuristic algorithms.

Since it has not become a standard to use UAV-BSs in the existing communication networks yet, there does not exist any publicly available data set for this problem. Therefore, the performances of the developed formulations and proposed heuristic algorithms are tested on synthetically generated data sets. Each generated data set for each problem is also expected to become a benchmark for future research. Extensive computational tests are performed to compare both the solution quality and time of the formulations that are solved by commercial solvers and the developed heuristic algorithms. In the light of the attained results, several policies are proposed to improve the coverage performance of UAV-assisted wireless communication networks. In conclusion, it is shown that the developed heuristic algorithms find approximate optimal solutions within reasonable CPU time, and that UAV-BSs would substantially increase the performance of wireless communication networks.

Keywords: Covering location problem, Resource allocation problem, Unmanned aerial vehicle base station, Non-linear optimization, Heuristic algorithms

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım boyunca değerli fikirleri ile yol gösteren ve zamanlarını ayırıp bu tezin ortaya çıkmasına vesile olan danışmanlarım Hakan GÜLTEKİN ve Bülent TAVLI'ya, tezin gelişimi sırasında fikirleriyle bana destek veren komite üyelerim Eda YÜCEL ve Sinan GÜREL'e, tez savunmamda yer alarak tezin çok daha iyi hale gelmesine yardımcı olan Ayşegül ALTIN KAYHAN ve Çağrı KOÇ'a, çalışmalarımı University of California Berkeley'de devam ettirmek için gerekli maddi ve manevi desteği sağlayan Fulbright Türkiye Komisyonu'na ve bu zaman zarfında tezin gelişmesine ve araştırma sürecine desten veren Zuo-Jun Max Shen'e, doktora sürem boyunca burs desteği ile maddi problemleri düşünmememi sağlayan TÜBİTAK'a, araştırma bursu ile doktora derecemi almama olanak sağlayan TOBB ETÜ'ye ve eğitim hayatım boyunca ders aldığım tüm hocalarıma, tezin belirli bölümleri için fikirlerini esirgemeyen Halim YANIKÖMEROĞLU'na teşekkür ederim. Bugüne dek her zaman ve her koşulda desteklerini esirgemeyen annem Şemsi ÇİÇEK, babam Abdullah ÇİÇEK ve ağabeyim Gökhan ÇİÇEK'e ayrıca teşekkür ederim.

Tüm bunların dışında ayrı bir paragraf açılmasını hak eden, bu tez süresince her anımda bana destek olan ve bu desteği yalnızca tez süresiyle kısıtlamayıp tüm hayatıma yayan, özellikle ABD'deki çalışmalarım sırasında uzun süre tek başına birçok zorlukla baş ederek bu tezin ortaya çıkmasını sağlayan sevgili eşim Aliye Gökçe ÇİÇEK'e ve bu zor süreçlerde olgunluğuyla bize destek olan oğlumuz Demir ÇİÇEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL TANIMLAR VE NOTASYON	5
2.1 Notasyon	5
2.2 Haberleşme Modelleri ve Performans Göstergeleri	6
2.2.1 Sinyal kaybı	6
2.2.2 Sinyal gürültü oranı	8
2.2.3 Spektral verimlilik	9
2.2.4 Bağlantı hızı	9
2.2.5 Ana taşıyıcı bağlantı kapasitesi	9
2.2.6 Farklı notasyon kullanımı	10
3. LİTERATÜR TARAMASI	11
3.1 Maksimum Kapsama Yerleşim Problemleri	11
3.2 Küme Kapsama Yerleşim Problemleri	13
3.3 İHABİ Yerleşim Problemleri	14
4. STATİK İHABİ KAPSAMA YERSEÇİM PROBLEMLERİ	21
4.1 Genelleştirilmiş İHABİ Kapsama Problemi	21
4.1.1 Kesikli 3KYP	24
4.1.2 Sürekli 3KYP	27
4.1.2.1 Matematiksel model	27
4.1.2.2 Özel durumlar için optimal çözümler	31
Konik durum	31
Piramit durum	32
4.1.3 Değerlendirme	33
4.2 Statik Tek İHABİ Yerleşim ve Kaynak Atama Problemi	33
4.2.1 Sistem modeli	34
4.2.2 Matematiksel model	35
4.2.2.1 Getiri modeli	36
4.2.2.2 Formülasyon	36
4.2.3 Çözüm yöntemi	37
4.2.3.1 AOA algoritması	39

4.2.3.2 SA algoritması	41
4.2.4 Deneysel çalışma sonuçları	42
4.2.4.1 Veri hazırlama	42
4.2.4.2 Parametre kalibrasyonu	43
4.2.4.3 Sonuçlar	45
4.2.5 Değerlendirme	49
4.3 Statik Çoklu İHABİ Yerseçim ve Kaynak Atama Problemi	50
4.3.1 Sistem modeli	50
4.3.2 Matematiksel model	51
4.3.3 Çözüm yöntemi	53
4.3.4 Deneysel çalışma sonuçları	58
4.3.4.1 Veri hazırlama	59
4.3.4.2 Parametre kalibrasyonu	60
4.3.4.3 Sonuçlar	62
4.4 Değerlendirme	74
5. DİNAMİK YERSEÇİM PROBLEMLERİ	75
5.1 Sistem Modeli	75
5.1.1 İletişim modeli	76
5.1.2 Matematiksel model	79
5.2 Çözüm Yöntemi	80
5.2.1 Lagranj ayrıştırma algoritması	81
5.2.2 Sürekli yakınsama (SY) algoritması	84
5.2.2.1 Homojen durum	85
5.2.2.2 Heterojen durum	87
5.3 Deneysel Çalışma Sonuçları	90
5.3.1 Veri hazırlama	90
5.3.2 Parametre kalibrasyonu	91
5.3.3 Sonuçlar	92
5.4 Değerlendirme	97
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	102
EKLER	115
ÖZGEÇMİŞ	145

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1: Konveks ve monoton olmayan örnek bir performans göstergesi fonksiyonu için kapsama alanının temsili gösterimi. (a) Örnek performans göstergesi fonksiyonu ($r_i^- \leq r^* \leq r_i^+$). (b) Kapsama alanı.	23
Şekil 4.2: 3KYP-K örnek problemi için olurlu çözümlerin gösterimi. (a) $h = 2$. (b) $h = 4$	26
Şekil 4.3: Tek modlu bir fonksiyon için örnek kontur grafiği.	29
Şekil 4.4: Sabit İHABİ yüksekliğinde gerçekleştirilecek kapsama alanı izdüşümleri. (a) Örnek kontur grafiği. (b) $h = h_1$. (c) $h = h_2$	30
Şekil 4.5: Konik durum için (a) örnek kontur grafiği ve (b) kapsama alanı.	32
Şekil 4.6: Piramit durum için (a) örnek kontur grafiği ve (b) kapsama alanı.	33
Şekil 4.7: Farklı bağlantı hızları sunulan örnek bir KHA gösterimi.	35
Şekil 4.8: Çok İHABİ içeren KHA için temsili gösterim.	51
Şekil 4.9: 300 kullanıcıli iki farklı test probleminde farklı KBİ ve kullanıcı yerleşim planlarının gösterimi. (a) Cazibe merkezi sayısı = 3, Merkez etrafına yerleştirilen kullanıcı oranı = %14, $s = 4$. (b) Cazibe merkezi sayısı = 3, Merkez etrafına yerleştirilen kullanıcı oranı = %92, $s = 4$	60
Şekil 5.1: Dinamik tek İHABİ'li KHA için farklı periyotlardaki kullanıcı ve İHABİ yerleşiminin temsili gösterimi. (a) $t = t_1$. (b) $t = t_2$	77
Şekil 5.2: İki farklı tolerans değeri için kullanıcı getirisinin sinyal kaybı değerine göre değişimi.	78
Şekil 5.3: SY çözümünün iyileştirilmesi için geliştirilen arama algoritmasının bir adımının temsili gösterimi.	89
Şekil 5.4: Dinamik test problemlerin türetilmesinde kullanılan farklılaşma parametrelerinin hassasiyet analizi.	97

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: İHABİ yerseçim problemleri için literatür karşılaştırması..	17
Çizelge 4.1: 3KYP formülasyonlarında kullanılan semboller ve tanımları.	22
Çizelge 4.2: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA formülasyonu için semboller ve tanımları.	34
Çizelge 4.3: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA test problemlerinde kullanılan bağlantı hızı seçenekleri.	43
Çizelge 4.4: Test problemlerinde kullanılan haberleşme parametreleri.	44
Çizelge 4.5: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA algoritmasında kullanılan parametrelerin kalibrasyonu.	44
Çizelge 4.6: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA için deney sonuçları (Bağlantı hızı alternatifleri kümesi = {1 Mbps, 2 Mbps}).	46
Çizelge 4.7: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA için deney sonuçları (Bağlantı hızı alternatifleri kümesi = {1 Mbps, 2 Mbps, 4 Mbps}).	47
Çizelge 4.8: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA için deney sonuçları (Bağlantı hızı alternatifleri kümesi = {1 Mbps, 2 Mbps, 4 Mbps, 8 Mbps}).	48
Çizelge 4.9: Statik kapasiteli çok İHABİ'li KHA formülasyonunda kullanılan semboller ve tanımları.	50
Çizelge 4.10: Statik çok İHABİ'li KHA çözümü için geliştirilen saha arama algoritması parametrelerinin kalibrasyonu.	61
Çizelge 4.11: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen küçük ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 20 MHz)	63
Çizelge 4.12: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen küçük ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 30 MHz)	65
Çizelge 4.13: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen küçük ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 40 MHz)	67
Çizelge 4.14: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen orta ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 20 MHz)	69
Çizelge 4.15: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen orta ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 30 MHz)	70
Çizelge 4.16: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen orta ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 40 MHz)	71
Çizelge 4.17: Statik çok İHABİ'li KHA çözümünde kullanılan bant genişliği atama algoritmasının (Algoritma 4) performansı.	74
Çizelge 5.1: Dinamik tek İHABİ'li KHA formülasyonunda kullanılan semboller ve tanımları.	76
Çizelge 5.2: Lagranj gevşetmesi sonrası elde edilen birinci alt problemin, $\bar{P}_3^{L,1}$, optimal çözümü.	82

Çizelge 5.3: Dinamik tek İHABİ'li KHA için deney sonuçları.....	93
Çizelge 5.4: BARON çözücüsüne başlangıç çözümü verilmesi sonrasında amaç fonksiyon değerlerinde elde edilen iyileşme oranları.....	95
Çizelge 5.5: Dinamik tek İHABİ'li KHA için büyük test problemlerinde LAA performansı ve SY algoritmasının etkisi.	96
Çizelge Ek.1:Statik çok İHABİ'li KHA büyük ölçekli test problemlerinin çözüm süreleri.	131
Çizelge Ek.2:Statik çok İHABİ'li KHA büyük ölçekli test problemlerinin amaç fonksiyon değerleri.....	137



KISALTMALAR

3KYP	: 3 Boyutlu Kapsama Yerleşim Problemi
AOA	: Altın Oran Arama Algoritması
BÜKÜ	: Büyük Üçgen Küçük Üçgen
DYKA	: Değişimli Yerleşim-Kaynak Atama Algoritması
İHA	: İnsansız Hava Aracı
İHABİ	: İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu
KBİ	: Karasal Baz İstasyonu
KFF	: Konkav Fonksiyonların Farkı
KHA	: Kablosuz Haberleşme Ağı
KKYP	: Küme Kapsama Yerleşim Problemi
KMKYP	: Kademeli Maksimum Kapsama Yerleşim Problemi
KYP	: Kapsama Yerleşim Problemi
LAA	: Lagranj Ayrıştırma Algoritması
MKYP	: Maksimum Kapsama Yerleşim Problemi
NIPS	: Network Intersect Point Set
OU	: Optimallikten Uzaklık
PNS	: Poisson Nokta Süreci
SA	: Saha Arama
SGO	: Sinyal Gürültü Oranı
SV	: Spektral Verimlilik
SY	: Sürekli Yakınsama
TYP	: Tesis Yerleşim Problemi

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler Açıklama

η	: Sinyal kaybı formülasyonu için yardımcı parametre
α	: Sinyal kaybı formülasyonu için yardımcı parametre
β	: Sinyal kaybı formülasyonu için yardımcı parametre
μ_{LoS}	: Sinyal kaybı formülasyonu için yardımcı parametre
μ_{NLoS}	: Sinyal kaybı formülasyonu için yardımcı parametre
b	: Hz cinsinden kullanıcı bant genişliği
B	: Hz cinsinden KBİ bant genişliği
\mathbb{B}	: İkili değişken kümesi
c	: m/s cinsinden ışık hızı
d	: Kullanıcı talebi
f_c	: Hz cinsinden haberleşme kanalı frekans değeri
g	: KBİ anten gücü
G	: İHABİ anten gücü
h^-	: İHABİ hizmet alanının dikey eksenindeki minimum noktası
h^+	: İHABİ hizmet alanının dikey eksenindeki maksimum noktası
\mathcal{I}	: Kullanıcı kümesi
\mathcal{J}	: İHABİ kümesi
\mathcal{L}	: KBİ kümesi
K	: \mathbb{R}^3 'ten \mathbb{R}^2 'ye doğrusal dönüşüm
L	: \mathbb{R}^3 'ten \mathbb{R} 'ye Doğrusal dönüşüm
m	: İHABİ sayısı
n	: Kullanıcı sayısı
Q	: İHABİ hizmet alanı
\mathbb{R}	: Reel sayılar kümesi
\mathbb{R}_+	: Negatif olmayan reel sayılar kümesi
S	: Kullanıcı alanı
\mathcal{T}	: Periyot kümesi

- \mathcal{V} : Alternatif bağlantı hızları kümesi
 x^- : İHABİ hizmet alanının x eksenindeki minimum noktası
 x^+ : İHABİ hizmet alanının x eksenindeki maksimum noktası
 x^d : İHABİ konumu
 y^- : İHABİ hizmet alanının y eksenindeki minimum noktası
 y^+ : İHABİ hizmet alanının y eksenindeki maksimum noktası
 y^u : Kullanıcı konumu
 y^k : KBİ konumu
 \bar{w} : Kullanıcı getirisi



1. GİRİŞ

Tesis yerseçim problemleri (TYP) hem kamu hem de özel sektör uygulamalarında sıklıkla kullanılmasından dolayı uzun yıllardır hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar tarafından ele alınan problemlerdir. Özel sektör uygulamaları genellikle üretim ve dağıtım sistemlerinin uzun vadede bütünsel tasarımından ürün dağıtım ağlarında son kullanıcıya hizmet veren birimlerin konumlarının daha kısa vadelerde belirlenmesine kadar farklı alanlarda yoğunlaşırken, kamu sektörü uygulamaları toplum faydasına yönelik hizmetlerin daha fazla hizmet alıcısına etkin şekilde ulaştırılması için konumlandırılmasına odaklanmaktadır. İki yapının da farklı amaç ve hedefleri olması sebebiyle özel sektör uygulamaları daha çok maliyet enküçüklemesi odaklı iken kamu uygulamaları fayda enbüyüklemesi odaklıdır [1].

TYP genelinde iki farklı ana problem türü bulunmaktadır. Bu problemlerden, Maksimum Kapsama Yerseçim Problemleri (MKYP), kısıtlı kaynakların belirli hizmet seviyelerini sağlayacak şekilde en fazla kişi/kullanıcı/müşterinin (tezin bundan sonraki kısmında her türlü hizmet alıcısı “kullanıcı” terimi ile ifade edilecektir) kapsanmasını amaçlarken, Küme Kapsama Yerseçim Problemleri (KKYP), hizmet alanındaki tüm kullanıcıların kapsanması için gerekli en az kaynak miktarının belirlenmesini amaçlamaktadır [2]. Her iki problem de uzun yıllardır çalışılmakla birlikte gerek matematiksel yapıları gerekse de uygulama alanları açısından farklılık göstermektedir. Bölüm 3.1 ve 3.2’de, iki problem ile ilgili mevcut çalışmalar ve son yıllarda farklı uygulamalar için geliştirilen modeller incelenmiştir.

MKYP ve KKYP uzun süredir çalışılan problemler olsa da, uygulamalar genellikle bina ve diğer tesisler gibi 2 boyutlu düzlem üzerinde inşa edilebilecek yerleşkelerle sınırlandırılmıştır. Ancak, son yıllarda kullanımı gittikçe artan ve operasyonel esneklik ve maliyet avantajı ile süreçlerin daha verimli hale gelmesine yardımcı olan İnsansız Hava Araçları (İHA) düşünüldüğünde bugüne dek yapılan 2 boyutlu problem tanımları geçerliliğini yitirmektedir. İHA’ların hem yatay hem de dikey düzlemde hareket edebilir olmaları 3 boyutlu uzayı göz önüne alacak yeni problemlerin tanımlanması ve bu yeni problemleri temeline alan yeni çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesini gerektirmektedir.

İHA'ların tarımdan askeriye, meteorolojiden eğlence sektörüne kadar farklı uygulama alanları olmakla birlikte, kablosuz haberleşme ağlarında (KHA) mobil baz istasyonu olarak kullanılabilmesi de planlanmaktadır [3]. İHA Baz İstasyonları (İHABİ) ile mevcut karasal kablosuz ağların verimliliğinin artırılması, ani talep dalgalanmaları, afet sonrası acil telekomünikasyon altyapısı desteği ya da kalabalık spor müsabakaları gibi mevcut kapasitenin yetersiz kalacağı senaryolarda daha iyi sonuç alınması öngörülmektedir [4]. Günümüz 4G telekomünikasyon sistemlerinde kullanılmaya da 2020 ile birlikte hayatımıza girecek 5G ve sonrasında geliştirilecek yeni nesil KHA'larda İHABİ'lerin önemli rol oynayacağı düşünülmektedir [5].

Operasyonel anlamda getireceği yenilikler ve fayda üst düzeyde olsa da özellikle dikey düzlemdeki hareket kabiliyeti İHABİ'lerin yerleşim kararlarını zorlaştırmaktadır. Bu amaçla son yıllarda çok fazla çalışma İHABİ yerleşim problemine odaklanmış ve bu alanda yapılan yayın sayısı son 5 yılda yaklaşık 13 kat artış göstermiştir [6]. Akademik çalışmaların yanı sıra dünya genelinde söz sahibi AT&T, Google ve Huawei gibi teknoloji şirketleri, gelecek nesil İHABİ tasarımlarına ve test çalışmalarına hız vermiş, dünyanın farklı bölgelerinde İHABİ'lerin mevcut sistemlere entegrasyon çalışmalarını başlatmıştır.

Bu tez kapsamında, yukarıda bahsedildiği üzere yerleşim kararları KHA'larda önemli rol oynayan İHABİ'lerin farklı senaryolar altındaki kapsama yerleşim problemleri incelenmiştir. Problemin 3 boyutlu uzay içinde çözülmesi dışında, kablosuz haberleşme modellerinde kullanılan modellerin doğrusal ya da konveks olmayan ve karakteristikleri itibariyle manipüle edilmesi zorlu fonksiyonlar içermesi matematiksel modellerin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu zorlukların yanı sıra, sistemin yapısı gereği kullanıcıların hem konumlarının hem de taleplerinin oldukça dinamik olması, geliştirilen yöntemlerin çözüm sürelerinin hızlı olmasını gerektirmektedir. Tüm bu faktörler göz önüne alınarak İHABİ yerleşim problemleri statik ve dinamik olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Her bir başlık tekil ve çoklu İHABİ sistemleri özelinde ele alınmış ve her bir sistem için ayrı formülasyonlar geliştirilmiş ve bu formülasyonların karakteristikleri irdelenmiştir.

Geliştirilen formülasyonlara kısa zamanda iyi sonuç veren yeni çözüm yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemlerin performansını ölçmek için gerçek hayattaki kullanıcı davranışlarının yansıtılmaya çalışıldığı farklı test problemleri türetilmiştir. Bu problemler hazır optimizasyon yazılımları ve geliştirdiğimiz yöntemler ile ayrı ayrı çözülmüş, çözüm süreleri ve çözüm kalitesi açısından karşılaştırmalı analizler sunulmuştur. Bunlarla birlikte, hem yakın zamanda geliştirilecek İHABİ teknolojilerine katkı sunması, hem de tezin etkisinin akademik dünya ile sınırlı kalmadan uygulamaya

geçirilmesi amacıyla karar vericiler için İHABİ sistemlerinin verimini artırmak amacıyla çeşitli politika önerilerinde bulunulmuştur.

Tezin bundan sonraki bölümleri şu şekilde kurgulanmıştır:

- Bölüm 2’de tez genelinde ortak olarak kullanılan tanımlar ve notasyon ile kablosuz ağlarda kullanılan haberleşme modelleri ve tez içerisinde matematiksel modelleri oluştururken sıklıkla başvurulan bazı performans göstergeleri açıklanmıştır.
- Bölüm 3’te literatürde yapılan benzer çalışmalar MKYP, KKYP ve İHABİ yerleşim problemleri özelinde taranmış ve bu tezin mevcut çalışmalardan farkları açıklanmıştır.
- Bölüm 4 ve 5’te İHABİ’lerin sırasıyla statik ve dinamik ortamlarda kullanımına yönelik maksimum ve küme kapsama problemleri için geliştirilen matematiksel modeller, bu modellerin karakteristikleri ve çözüm yöntemleri ile önerilen yöntemlerin performansları incelenmiştir.
- Bölüm 6’da elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekte çalışılması muhtemel yeni araştırma konuları için önerilerde bulunulmuştur.

2. TEMEL TANIMLAR VE NOTASYON

Tezin farklı bölümlerinde çeşitli matematiksel modeller ve bu modellerin çözümü amacıyla algoritmalar geliştirilmiştir. Her bir problem özelinde bazı özgün terimler ve notasyon kullanılsa da, her problem için bazı temel tanımlar ortak kullanılmaktadır. Bu bölümde bahsi geçen ortak tanımlar ve bu tanımlara uygun notasyon açıklanmıştır. Her bölüm özelinde kullanılan notasyon ise ilgili bölümün başlangıcında verilmiştir.

2.1 Notasyon

Tüm çalışma boyunca, $Q \subseteq \mathbb{R}^3$, İHABİ'lerin konumlandırılabilceği 3 boyutlu alanı göstermektedir. İHABİ, yapısı gereği sınırsız haberleşme yeteneklerine sahip olmadığından bu uzayın sınırlı olduğu varsayılmaktadır, d.d. $Q = [(x^-, x^+) \times (y^-, y^+) \times (h^-, h^+)]$. Aksi belirtilmediği sürece, $S \subseteq \mathbb{R}^3$, kullanıcıların içinde bulunduğu sınırlı uzayı göstermektedir. İHABİ'ler karasal baz istasyonları gibi yüksek güç üretebilen antenler içermediğinden, genellikle bina içi kullanıcılara hizmet verememektedir. Binaların duvar kalınlığını yeterince aşabilecek güçte sinyal iletimi sağlayamaması, İHABİ'lerin daha çok binaların dışında kalan (örn: sokak, cadde vb.) kullanıcılara hizmet vermek için kullanılmasına yol açmıştır. Dış alanlar her ne kadar farklı yükseklik değerlerine de sahip olsa, bazı problemlerde kullanıcı uzayı yalnızca iki boyutlu alan ile sınırlandırılmıştır, d.d., $S \subseteq \mathbb{R}^2$.

Tüm problemlerde, İHABİ'lerin sınırlı sayıda kullanıcı içeren bir kullanıcı kümesine hizmet verdiği varsayılmaktadır. Halihazırda altyapısı güçlü karasal haberleşme ağları belirli kullanıcılara hizmet verirken, çeşitli sebeplerle (örn: yoğun veri trafiği, ani talep değişiklikleri) hizmet verilemeyen kullanıcılara İHABİ ile hizmet verilmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, $\mathcal{I} = \{i = 1, 2, \dots, n\}$ hizmet verilebilecek tüm kullanıcıların kümesini, $\mathcal{J} = \{j = 1, 2, \dots, m\}$ ise yerseçimi yapılacak İHABİ kümesini göstermektedir. Kullanıcı kümesindeki her bir i kullanıcısının konumu, $y_i^u \in S$, İHABİ kümesindeki her bir l İHABİ'nin konumu ise $x_l^d \in Q$ ile gösterilmektedir. Ayrıca, kullanıcıların farklı önem derecesi ya da getirisi olduğu varsayılmakta ve bu değer

her bir i kullanıcısı için, $\bar{w}_i \geq 0$, ile ifade edilmektedir. Bu değer bazı problemlerde kullanıcılardan elde edilen gelir ya da faydayı da ifade edebilmektedir.

Yerleşim problemlerinin en önemli değişkenlerinden bir tanesi tesisler ile kullanıcılar arasındaki mesafe ölçüsüdür. Klasik iki boyutlu düzlemde incelenen problemlere kıyasla üç boyutlu problemlerde yalnızca mesafe değil tesis ve kullanıcı arasındaki açı da hizmet seviyesinin belirlenmesinde önem arz etmektedir. Bu amaçla, K ve L , sırasıyla, \mathbb{R}^3 'te tanımlı herhangi bir vektörün \mathbb{R}^2 ($x - y$ düzlemi) ve \mathbb{R} (z düzlemi) üzerine izdüşümlerini veren doğrusal dönüşümleri, $\|\cdot\|$ l_2 normu göstermek üzere, $r(x,y) = \|K(x-y)\|$ ve $h(x,y) = \|L(x-y)\|$, x ve y konumundaki iki nokta arasındaki yatay ve dikey mesafeyi göstermektedir. Bu tanımlar kullanılarak, $e(x,y) = \sqrt{r(x,y)^2 + h(x,y)^2}$, iki nokta arasındaki toplam Öklid mesafesini, $\theta(x,y) = (180/\pi) \arctan(h(x,y)/r(x,y))$ ise iki nokta arasındaki açığı ifade etmektedir. Kullanım kolaylığı açısından tezin bazı bölümlerinde $r_{ij} = r(x_j^d, y_i^u)$ ve $\theta_{ij} = \theta(x_j^d, y_i^u)$ gösterimleri de kullanılmıştır.

Aksi belirtilmediği sürece koyu renkle yazılan değişken ve/veya parametreler aynı değişken ve/veya parametrelerin tamamını içeren vektör ya da matrisleri ifade etmektedir. Örneğin, w , elemanları w_i değerleri olan n elemanlı vektörü, \mathbf{X}^d , her bir satırında x_j^d lokasyonlarını gösteren $m \times 3$ yapısındaki matrisi göstermektedir.

2.2 Haberleşme Modelleri ve Performans Göstergeleri

KHA'lar her ne kadar elektrik ve elektronik mühendisliği uygulama alanında yaygın bir araştırma konusu olsa da yöneylem araştırması ve endüstri mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar için bazı konseptler ve performans göstergelerinin açıklanmasında fayda görülmektedir. Bu amaçla, bu bölümde tezin farklı bölümlerinde kullanılan bazı haberleşme modellerinin ve bu modeller kapsamında eniyilenmesi amaçlanan performans göstergelerinin tanımları ve matematiksel ifadeleri verilmiştir.

2.2.1 Sinyal kaybı

KHA'larda sunulan hizmetlerin temelinde bir verici ve bir alıcı cihaz arasında iletilen radyo sinyalleri yer almaktadır. Bu sinyaller, belirli haberleşme kanalları üzerinden iletilmekte, alıcılar vericilerden yaptıkları veri taleplerini iletmek, vericiler de alıcılardan gelen talebe yanıt vermek için bu kanalları kullanmaktadır. Bu haberleşme sırasında gerek hava şartları gerek verici ile alıcı arasındaki mesafe gerekse de yüksek binalar gibi sinyal iletimini engelleyebilecek unsurlardan dolayı sinyal kayıpları

yaşanmaktadır. Sağlıklı bir bağlantının kurulması için bu kaybın belirli bir seviyenin altında kalması arzu edilmektedir.

Karasal haberleşme ağlarında kullanılan baz istasyonları ve üzerlerindeki iletim araçları (örn: anten) geniş alanlara hitap edileceği düşünülerek uzun vadeli planlar doğrultusunda genellikle şehirlerin dışında ve yüksek noktalarında yüksek güç ünitelerine sahip olarak kurulmaktadır. Ancak, bu tarz bir yaklaşım, hem yüksek maliyet gerektirmesi hem de değişken talebe uyum sağlayamamasından dolayı yerini şehir içlerine daha sık aralıklarla kurulan daha küçük boyutlu baz istasyonlarına bırakmaktadır. Gelecek nesil KHA'larda ise İHABİ ya da alçak irtifa uçuş yapabilen diğer mobil baz istasyonları ile bu sıklığın daha artırılması ve bu sayede çok daha esnek ve gürbüz KHA'lar kurulması planlanmaktadır. Ancak, İHABİ'lerde güç ünitesi ve antenler gibi ekipmanların kurulması için çok fazla alan olmaması bu araçlardan hizmet alacak kullanıcıların seçiminin ve özellikle bu araçların yerleşimlerinin çok daha dikkatli yapılmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte, çok güçlü iletim araçları olmadığı için sinyal kaybı yönetimi yeni nesil KHA'larda çok daha fazla önem kazanacaktır.

Karasal haberleşme ağlarında sinyal kaybı genellikle verici ile aracı arasındaki mesafeyle ters orantılıyken, bu kayıp KHA'larda hem mesafeye hem de verici ve alıcı arasındaki açığa bağlı olarak değişmektedir. Mevcut şartlarda İHABİ kullanımı uluslararası standartlarda henüz yer almadığından, bu kaybın hesaplanma yöntemi de halen test aşamasındadır. Bu amaçla yapılan çalışmalar arasından, [7] tarafından önerilen model bugüne dek yapılan İHABİ yerleşim problemlerinde en fazla kullanılan model olmuştur. Bu tez kapsamında da aynı model kullanılmıştır. Bu model doğrultusunda, iki farklı kullanıcı grubu olabileceği ve ilk grubun İHABİ ile herhangi bir engel olmadan sinyal iletişimini alabildiği, ikinci grubun ise doğrudan sinyali alamasa da çevre yapılardan seken sinyalleri alarak bağlantı kurabileceği varsayılmıştır. Bu mantıkla, model kapsamında kullanıcıların doğrudan bağlantı kurabilme olasılığı, P_{LoS} , verici ve alıcı konumuna göre modellenmiş ve $x, y \in \mathbb{R}^3$ konumları arasında bu olasılık aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

$$P_{LoS}(x, y) = \frac{1}{1 + \alpha \exp\{-\beta(\theta(x, y) - \alpha)\}}. \quad (2.1)$$

Yukarıdaki modelde α ve β , haberleşmenin sağlandığı çevre şartlarına göre farklı değerler alan parametreler olup, bu çevreler taşra, şehir, şehir içi ve metropoliten olmak üzere dört farklı konsept ile tanımlanmıştır. İkinci grup da bulunan kullanıcıların, $P_{NLoS} = 1 - P_{LoS}$ olasılıkla sinyal alabildiği varsayılmıştır. Bu olasılık değerleri kullanılarak, $x, y \in \mathbb{R}^3$ konumları arasındaki toplam sinyal kaybı, $(\eta, \mu_{LoS}, \mu_{NLoS})$, bulunulan çevre şartlarına bağlı parametreler, f_c , Hz cinsinden frekans parametresi,

c , m/s cinsinden ışık hızı parametresi, $A = \mu_{\text{NLoS}} + \eta \log_{10}(4\pi f_c/c)$ hava şartlarına bağlı sabit kayıp parametresi ve $B = \mu_{\text{LoS}} - \mu_{\text{NLoS}}$ yardımcı parametre olmak üzere, $L : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu ile şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned} L(x,y) &= \log_{10}(4\pi f_c e(x,y)/c)^\eta + \mu_{\text{LoS}} P_{\text{LoS}}(x,y) + \mu_{\text{NLoS}} P_{\text{NLoS}}(x,y) \\ &= A + \eta \log_{10} e(x,y) + B P_{\text{LoS}}(x,y) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sinyal kaybı vericiden iletilen sinyalin değerini düşüreceğinden, bu kaybın enküçüklenmesi hedeflenmektedir. Genellikle kullanıcıların bu kayba karşı maksimum bir tahammül limiti olduğu varsayılmakta ve bu değer üstünde bir kayıp olması halinde ilgili kullanıcının kapsamadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

2.2.2 Sinyal gürültü oranı

Bir önceki bölümde açıklanan sinyal kayıp değerinin farklı bir performans göstergesinde değerlendirilmesi daha yapılmaktadır. Sinyal gürültü oranı (SGO) olarak adlandırılan bu gösterge, vericiden gönderilen sinyalin kayıplar sonrası alıcıdaki gücünün bu iletim sırasında ortamdaki gürültüye oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu oran sayesinde, farklı uygulamalar için gösterge niteliğinde kullanılan farklı ölçekteki sinyal kayıp değerleri daha anlamlı hale gelmektedir.

SGO, İHABİ yerleşim problemlerinde sıklıkla kullanılan bir gösterge olup hem hizmet sağlayan kuruluşlarca hizmet kalitesinin ölçülmesinde hem de kullanıcılarca sağlanan hizmetlerin memnuniyetinde etkili olmaktadır. İHABİ yerleşim problemlerinde de İHABİ performansının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu oran, İHABİ ile kullanıcı arasındaki sinyal kaybının yanı sıra tüm ağ genelinde kullanıcıya ayrılan bant genişliği ile orantılı olarak da azalmaktadır. İHABİ üzerindeki anten gücü dB cinsinden $G \geq 0$ ve kullanıcıya ayrılan bant genişliği Hz cinsinden $b \geq 0$ ve gürültü oranı yine dB cinsinden σ_N ile gösterilmek üzere, $x, y \in \mathbb{R}^3$ konumları arasındaki SGO, $M : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu ile şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$M(x,y,b,G) = \frac{G - L(x,y) - 10 \log_{10}(b)}{\sigma_N}. \quad (2.3)$$

Yukarıdaki formülde, paydada yer alan gürültü değeri, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nce hazırlanan haberleşme standartlarında her bir haberleşme kanalı ve protokolü özelinde farklı çevre şartları baz alınarak sabit bir değer olarak belirlendiğinden, çoğu çalışmada bu oranın pay kısmı gösterge olarak kullanılmıştır, d.d. $M(x,y,b,G) = G - L(x,y) - 10 \log_{10}(b)$. SGO'nun sinyal kaybından farklı olarak enküçüklenmesi amaçlanmaktadır. Bu durum, anten gücünü artırarak, sinyal kaybını

düşürecek yerseçimi yapılarak, daha fazla bant genişliği ayırarak ya da bu yaklaşımların farklı kombinasyonları ile sağlanabilir.

2.2.3 Spektral verimlilik

Sinyal kaybı dışında KHA'larda ve diğer birçok haberleşme ağında kullanılan önemli metriklerden bir tanesi spektral verimliliğdir (SV). SV, kullanılan bant genişliği başına kullanıcıya sağlanan bağlantı hızını ifade etmektedir ve $x, y \in \mathbb{R}^3$ konumları arasında $b \geq 0$ bant genişliği ayrılması halinde $N : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu ile şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$N(x, y, b) = \log_2 \left(1 + 10^{M(x,y,b)/10} \right). \quad (2.4)$$

Hem kullanıcılar hem de hizmet sağlayıcılar açısından verimliliğin yüksek olması arzu edildiğinden, problem tanımlarında SV'nin enbüyüklenmesi amaçlanmaktadır. Bu durum da SGO artırılarak gerçekleştirilebilmektedir.

2.2.4 Bağlantı hızı

Literatürde ele alınan İHABİ yerseçim problemlerinin birçoğu son kullanıcıya verilen hizmetin iyileştirilmesi amacı taşıdığından kullanıcılar açısından önem verilen performans göstergeleri üzerine daha fazla odaklanılmaktadır. Günümüz internet ve ses teknolojileri kullanımı göz önüne alındığında, kullanıcılar kablosuz bağlantılarının sürekli ve hızlı olmasını istemektedir. Bu doğrultuda, bağlantı hızı İHABİ yerseçim problemlerinde sıklıkla kullanılan bir performans göstergesidir. Bağlantı hızı, $x, y \in \mathbb{R}^3$ konumları arasında $b \geq 0$ bant genişliği ayrılması halinde $R : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu ile şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$R(x, y, b) = b \times N(x, y, b). \quad (2.5)$$

2.2.5 Ana taşıyıcı bağlantı kapasitesi

İHABİ'lerin kullanıcılardan gelen veri taleplerini karşılayabilmeleri için halihazırda kablolu bağlantıya sahip en az bir Karasal Baz İstasyonu (KBİ) ile ana taşıyıcı bağlantı kurması gerekmektedir. Literatürde birçok problem bu bağlantının kapasitesinin sınırsız olduğunu varsayarken az sayıda çalışma bu kapasite değerini modellerine katmaktadır (bkz. Çizelge 3.1). Bu kapasite, $g \geq 0$, KBİ'nin toplam anten gücü olmak üzere, $x, y \in \mathbb{R}^3$, konumları arasında bant genişliği $B \geq 0$ 'ye bağlı olarak $K : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

fonksiyonu ile şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$K(x,y,B) = B \log_2 \left(1 + \frac{\bar{g}}{B \times e^2(x,y)} \right) \quad (2.6)$$

Yukarıdaki formülde $\bar{g} = (g - A + 174)/10$ sabit bir değeri ifade etmektedir. Genellikle bu kapasitenin enbüyüklenmesi amaçlanmaktadır. Bu durum ya KBI'den İHABİ'ye ayrılan bant genişliğini artırarak ya da iki baz istasyonu arasındaki mesafeyi azaltarak elde edilebilecektir.

2.2.6 Farklı notasyon kullanımı

Yukarıda açıklanan performans göstergeleri İHABİ konumu, $x \in Q$, kullanıcı konumu, $y \in S$, ve kullanıcıya ayrılan kaynak miktarı, $b \in \mathbb{R}$, değişkenleri kullanılarak tanımlanmıştır. Ancak, literatürde farklı çalışmalarda özellikle çözüm algoritmalarında kolaylık sağlamasından dolayı, aynı göstergeler İHABİ ile kullanıcı arasındaki yatay ($r(x,y)$) ve dikey mesafelere ($h(x,y)$) göre de formüle edilmiştir. Hem d hem de θ fonksiyonları aslında bu iki mesafeyi değişken olarak aldığından, aynı göstergeler farklı tanımlarla ifade edilebilir. Dolayısıyla tezin farklı bölümlerinde bu doğrultuda aynı performans göstergesi için farklı gösterimler kullanılmıştır. Örneğin $L(x,y)$ ve $L(r(x,y),h(x,y))$ gösterimleri aslında aynı değeri ifade etmektedir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Tezin bu bölümünde klasik yerseçim problemleri kapsamında son yıllarda yapılan çalışmalar kapsama kararına göre (maksimum veya küme kapsama) incelenmiş ve ilk iki alt bölümde üç boyutlu yerseçim problemlerinin bu klasik problemlerden farkları açıklanmıştır. Bununla birlikte, üçüncü alt bölümde, üç boyutlu İHABİ yerseçim problemlerinin gelişimi ve bu tez kapsamında incelenen problemlerin mevcut çalışmalardan farkları ele alınmıştır.

3.1 Maksimum Kapsama Yerseçim Problemleri

MKYP, m adet tesisin, n adet kullanıcı arasından en fazla sayıda kullanıcının kapsanması için tesislerin yerseçimlerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Klasik iki boyutlu problemlerde genellikle tesis ve kullanıcıların konumları aynı düzlem içinde varsayılmaktadır, d.d., $S \subseteq Q \subseteq \mathbb{R}^2$. Herhangi bir kullanıcının kapsanıp kapsanmadığı kendisine en yakın tesise olan uzaklığın bir parametreden az olup olmadığına göre belirlenmektedir. \bar{r} bu parametre değerini göstermek üzere, herhangi bir tesis yerleşim kararına göre kapsanan kullanıcıların kümesi, $C(\mathbf{X}^d) = \{i : \text{enk}_{j \in \mathcal{J}} \{r(x_i^u, x_j^d)\} \leq \bar{r}, i \in \mathcal{I}\}$, ile tanımlanabilir. Bu küme kullanılarak aşağıdaki genel MKYP formülasyonu kurulabilir:

$$\text{MKYP} : \text{enb}_{\mathbf{X}^d \in Q^m} \sum_{i \in C(\mathbf{X}^d)} \bar{w}_i.$$

MKYP, ilk olarak [8] tarafından kamu tesislerinin ulaşabileceği vatandaş sayısının optimizasyonu amacıyla kullanılmış, sonrasında hastane ve sağlık ocağı gibi sağlık hizmetleri sunan sabit tesisler, ambulans gibi mobil acil durum araçları, perakende sektöründe hizmet veren alışveriş merkezleri, afet acil durum merkezleri, elektrikli araç şarj üniteleri, banka şubeleri, karasal baz istasyonları, itfaiye araçları ve yerseçim problemine kadar çok geniş bir spektrumda incelenmiştir [9–19]. MKYP özelinde yapılan çalışmaların geniş bir değerlendirmesi için [2] ve [20] incelenebilir.

MKYP'nin en önemli varsayımlarından bir tanesi, kullanıcıların en yakın tesise

olan mesafesi belirli bir mesafeden düşükse tam kapsandıdır. Ancak, gerçek hayat problemlerinde bu varsayım gerçekçilikten uzak kalabilmektedir. Örneğin, maksimum kapsama mesafesi 1 km. olan bir durumda, en yakın tesise 999 m. uzaklıkta olan bir kullanıcı tam kapsanırken, 1001 m. uzaklıkta olan bir kullanıcının hiç kapsanamadığı varsayılmaktadır. Bu durumu daha gerçekçi hale getirmek amacıyla, [21] tarafından Kademeli MKYP (KMKYP) geliştirilmiştir. KMKYP’de, MKYP’den farklı olarak her bir kullanıcının minimum ve maksimum olmak üzere iki farklı eşik mesafe değeri olduğu varsayılmaktadır. Herhangi bir kullanıcıya en yakın tesis kullanıcıya, kullanıcının minimum mesafesinden daha yakınsa, kullanıcının tam kapsandı, kullanıcının maksimum mesafesinden daha uzaktaysa kullanıcının hiç kapsanamadığı, bu iki mesafe arasında kapsama derecesinin kademeli azalan bir fonksiyonla ifade edilebildiği bir model oluşturulmuştur.

KMKYP, kapsama seviyesinin azalış trendi ve problemin kesikli ya da sürekliliğine göre farklı çalışmalarda incelenmiştir. [22], [21] tarafından bir ağ üzerinde incelenen problemi sürekli düzlemde incelemiş ve optimal çözüm için “Büyük Üçgen Küçük Üçgen (BÜKÜ)” tekniğini [23] kullanarak bir dal-sınır algoritması geliştirmiştir. [24] bu kez kullanıcıların minimum ve maksimum mesafelerinin rassal olduğu KMKYP’yi ele almış ve yine BÜKÜ tekniğini kullanarak bir çözüm algoritması geliştirmiştir. [25], benzer bir problemi en büyük kapsayamama oranını enküçükleme amacıyla yeniden formüle etmiş ve kapsama seviyesindeki azalışın doğrusal bir formül ile ifade edildiği durumlar için polinom zamanlı bir algoritma geliştirmiştir. KMKYP’nin farklı uygulama alanları ve son yıllarda yapılan diğer çalışmalar için [26] ve [27] incelenebilir.

Kapsama seviyesinin değerlendirmesinden bağımsız olarak yukarıda bahsi geçen MKYP tipi problemlerin birçoğu kullanıcıların en yakın tesisten hizmet alacağını ve bu hizmetin konveks yapıdaki bir uzaklık metriği tanımı ile değerlendirilmesini varsaymaktadır. Bununla birlikte, tüm bu çalışmalar yerseçimi yapılacak tesislerin kullanıcılarla birlikte iki boyutlu yatay düzlemde olacağını merkezine almakta, bu doğrultuda kesikli (alternatif konumların önceden bilindiği) ya da sürekli (tesislerin yatay düzlemde herhangi bir noktaya yerleştirilebildiği) formülasyonlarla çözüm aramaktadır. Ancak, 1. Bölümde de bahsedildiği üzere yeni gelişen teknolojiler üç boyutlu uzayda yerseçim problemlerinin incelenmesini gerektirmektedir. Bu yeni problemlerde klasik problemlerden farklı olarak en yakın tesisten hizmet alma zorunluluğu olmayan durumlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, kapsama seviyelerini belirleyen faktörlere mesafenin yanı sıra farklı unsurlar da eklenmiş ve bu eklemeler daha kompleks problem tanımlarına sebep vermiştir. Bu tez kapsamında, literatürdeki MKYP çalışmalarından farklı yaklaşımlarla bu yeni problemlere etkin ve hızlı çözüm yaklaşımları geliştirilmektedir.

3.2 Küme Kapsama Yerleşim Problemleri

KKYP, MKYP'den farklı olarak, sınırlı imkanlarla kapsama performansının artırılması yerine, önceden tanımlı bir kapsama seviyesinin sağlandığı ve bu kapsama durumunun maliyetinin enküçüklendiği problemlerdir. İlk olarak [28] tarafından sınırlı bir alanın tamamına acil durum sağlık hizmeti verilmesi amacıyla ambulansların yerleşiminin yapıldığı bir problem ile literatüre girmiştir.

KKYP'de de kullanıcıların belirli bir mesafe kriteri altında kapsandığı varsayımı devam etmektedir. Hizmet verilecek alandaki toplam getiri/fayda W ile gösterilmek üzere, KKYP şu şekilde formüle edilebilir:

$$\begin{aligned} \text{KKYP} : \text{enk } f(\mathbf{X}^d) \\ \mathbf{X}^d \in Q^m \\ \text{öyle ki} \\ \sum_{i \in C(\mathbf{X}^d)} \bar{w}_i \geq \varpi W. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki formülasyonda, amaç fonksiyonu tesis yerleşim planına göre genellikle konveks bir $f : Q^m \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Bu fonksiyon genellikle tesislerin kurulum ve işletme maliyetlerini içermektedir. Diğer taraftan kısıt kümesinde belirtilen $\varpi \in [0, 1]$ ise karar verici tarafından belirlenecek minimum kapsama seviyesini gösteren bir parametredir. $\varpi = 1$ durumu tam kapsamayı ifade ederken, 1'den küçük değerler MKYP'dekine benzer şekilde bazı kullanıcılara hizmet verilemeyebileceğini göstermektedir.

KKYP, doğal afet ya da acil durum sonrası tesis planlaması [10], perakende satış mağazalarının konumlandırması [29] ve acil müdahale araçlarının konumlandırması [28] gibi çok farklı uygulama alanına sahiptir. Bununla birlikte küme ayrıştırma ve gezgin satıcı problemleri gibi yöneylem alanında sıklıkla başvurulan problem tiplerinin çözümünde de kullanılmaktadır [30]. KKYP hakkında daha detaylı değerlendirmeler için [31] ve [20] çalışmaları incelenebilir.

KKYP'de de MKYP'de olduğu gibi en temel varsayımlardan bir tanesi kullanıcıların en yakın tesisten hizmet almasıdır. Bununla birlikte bazı çalışmalarda her kullanıcının en az iki tesis tarafından kapsanması da baz alınarak olası aksamalarda hizmetin devamlılığı amaçlanmıştır [32]. Bu çalışmalar da benzer şekilde tesislerin yakınlık sıralamasına göre kullanıcılara hizmet vereceğini varsaymaktadır. Ancak, bu tez kapsamında incelenecek problemlerde bu tarz bir varsayım geçerli olmayacağından yeni matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bununla birlikte, tesislerin üç boyutlu uzayda konumlandırılmasından ve yükseklik boyutunun yatay düzlemdeki kapsama alanlarını

etkilemesinden dolayı halihazırda kullanılan birçok çözüm algoritması da yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla yeni çözüm yaklaşımları da geliştirilmiştir.

3.3 İHABİ Yerleşim Problemleri

Son yıllarda kargo dağıtım, tarım ve askeriye gibi çok farklı sektörlerde kullanılan insansız hava araçlarının, 2020 yılında kullanılmaya başlanması planlanan 5. nesil haberleşme ağlarında da önemli bir konuma sahip olması beklenmektedir [3]. İHABİ'ler ile mevcut 4. nesil kablosuz ağlarda gerçekleştirilemeyen birçok uygulama hayata geçirilebilecektir. Atıl kapasitenin değişken talebe göre kullanılması, geniş bant veri akışının taşra bölgelere ulaştırılması ya da arızalanan ya da afet vb. gibi durumlar sebebiyle yıkılan karasal telekomünikasyon ağlarının geçici olarak ikame edilmesi gibi farklı kullanımı İHABİ'lerin gelecek nesil kablosuz ağlardaki önemini artırmaktadır [33]. Ancak, özellikle sınırlı hacimleri ve bataryaları sebebiyle kullanım süreleri ve hizmet alanları sınırlı kalmaktadır [5]. Bu sebeple, kullanım esasları, özellikle de konumlandırılması detaylı şekilde incelenmeli ve etkin kullanım süresi artırılmalıdır.

İHABİ yerleşim problemleri 2014-2015 yıllarında literatüre girmeye başlamış, ancak İHABİ'lerin kullanım kolaylığı ve getirdiği avantajların maliyetine oranla yüksek olması sebebiyle, yapılan yayın sayısı son 5 yılda 13 katına çıkmıştır [6]. Her ne kadar Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği disiplinlerinde çalışan araştırmacılar yerleşim problemlerini oldukça geniş perspektiften incelese de İHABİ yerleşim problemlerinde kullanılan özellikle performans göstergeleri ve haberleşme özelindeki formülasyonlar mevcut çalışmaların yeniden ele alınmasını gerektirmektedir. Matematiksel farklılıklar 2.2. Bölümde daha detaylı verilmekle birlikte, bu bölümde, mevcut çalışmaların bir özeti sunulmuştur.

[7], İHABİ yerleşim problemlerini inceleyen ilk çalışmalardan biri olup, sabit ve bilinen bir talebin karşılanması için tek bir İHABİ'nin yükseklik ve kapsama alanını optimize etmiştir. Mevcut çalışmaların birçoğu bu çalışmada kullanılan haberleşme modelini baz almaktadır. Model ile ilgili detaylı bilgi 2.2. Bölümde verilmektedir. Bu çalışma sonrasında statik problem sabit talep altında kapsanan kullanıcı sayısının tek İHABİ ile enbüyüklenmesi [33], coğrafi olarak farklı yoğunlukta bulunan kullanıcıların tam kapsanması için gerekli İHABİ sayısının belirlenmesi [34], farklı talep değerlerinin olduğu sınırlı bir alanda maksimum kapsama için tek İHABİ'nin yerleşiminin belirlenmesi [35] ve tam kapsama sağlamak için gerekli İHABİ kapasitesinin belirlenmesi [36] gibi özünde kapsama alanının optimize edilmesi amaçlı ancak parametrelerin değişkenlik gösterdiği farklı çalışmalarda yeniden ele alınmıştır.

Benzer problemler, kapsama alanının genişletilmesi amacı dışında, kullanıcılara sağlanan hizmette yaşanan gecikme sürelerinin [37] ya da hizmet veren İHABİ'ler üzerinde bulunan anten için gerekli toplam enerjinin enküçüklenmesi [38], kullanıcı başına sağlanan veri hızının enbüyüklenmesi [39] amaçlarıyla da ele alınmıştır. Ayrıca, mevcut kablosuz ağ altyapılarında oluşabilecek arızaların giderilmesine veya afet sonrası hasar gören kablosuz ağ sistemlerinin yeniden faaliyete geçirilmesine kadar İHABİ'lerin kullanılmasının öngörüldüğü çalışmalar da mevcuttur [40–42]. Bu çalışmaların temel amacı, özellikle arama kurtarma ekipleri gibi acil veri akışına ihtiyaç duyacak ya da sınırlı kapasite altında daha düşük kapasite kullanımı gerektiren hizmetlerden faydalanmak isteyen kullanıcılara hizmet sağlamaktır. Bu amaçla farklı afet senaryoları test edilmiş ve sezgisel yöntemler ile arızalanan ya da yıkılan altyapılardan etkilenen bölgelerin enküçüklenmesi için çözüm üretilmiştir.

Bahsi geçen çalışmaların en önemli eksikliği İHABİ'lerin karasal baz istasyonları ile kurması zorunlu olan ana taşıyıcı bağlantı kapasitesinin göz ardı edilmesidir. İHABİ'lerin tek başına çalışması mümkün olmadığından, veri akışının sağlanması için mutlaka karasal kablolu ağ ile haberleşme halinde olması gerekmektedir [5]. [43], tek İHABİ'nin bilinen sınırlı kapasiteye sahip olduğu yerseçim problemini ele almış ve toplam veri hızının enbüyüklenmesi için bir sezgisel algoritma geliştirmiştir. Benzer bir problem ortalama gecikme süresinin enküçüklenmesi [34] ve tam kapsama sağlamak için gerekli İHABİ sayısının enküçüklenmesi [44] için de ele alınmış ve sezgisel yaklaşımlarla çözümler bulunmuştur.

İHABİ'lerin en kritik kapasite kısıtı ana taşıyıcı link ile olan bağlantı kapasitesi olsa da taşıdıkları anten gücü [45] ya da hizmet verebilecekleri kullanıcı sayısı [46] gibi farklı kapasite kısıtları için de yerseçim problemleri incelenmiştir. Gerek İHABİ kapasitesinin çok farklı unsurlarla belirlenmesi gerekse de bağlantı kurduğu karasal baz istasyonları ile olan haberleşmenin modellenmesindeki zorluklar kapasiteli İHABİ yerseçim problemlerinin sınırlı sayıda kalmasına sebep olmuştur. Önümüzdeki yıllarda, özellikle kullanımı günlük hayatta arttıkça çok daha fazla kapasiteli problemin ele alınması öngörülmektedir [5, 47].

Yukarıda bahsedilen tüm problemler hem kullanıcıların hem de İHABİ'lerin sabit bir anının ele alındığı statik problemlerdir. Dinamik İHABİ yerseçim problemleri, statik problemlere nazaran literatürde daha az sıklıkta görülen çalışmalardır. Gerek sistem tasarımı gerekse de matematiksel formülasyonların çözümü statik problemlere göre daha zor olmaktadır. Ancak, gerçek hayatta statik problemlerin çok daha nadir uygulama alanı olması son yıllarda dinamik problemlere olan ilgiyi artırmaktadır [6].

[48] ile İHABİ yüksekliğinin ve hızının sabit olması varsayımları altında toplam

spektral verimliliğinin optimize edildiği bir KHA incelenmiştir. Sınırlı bir süre için tasarlanan sisteme üç farklı sezgisel algoritma ile çözüm üretilmiştir. [36] ile benzer bir KHA'ya enerji tüketimi açısından yaklaşılmış, yine sabit İHABİ yüksekliği varsayımı altında birden çok İHABİ'nin nesnelere interneti uygulamalarında kullanımını incelemiştir. Çalışma, İHABİ'ler üzerindeki toplam anten gücünün enküçülenmesi amacıyla İHABİ yerleşimlerinin farklı periyotlarda belirlenmesi kararlarını vermektedir. Üç farklı sezgisel algoritma geliştirilmiş ve algoritma performansları üretilen test problemleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Birçok alanda olduğu gibi KHA tasarımlarında da makine öğrenmesi tekniklerinin kullanımı gittikçe artmaktadır. Dinamik İHABİ yerleşimi kapsamında, [49] derin güçlendirme algoritması kullanarak tek bir İHABİ'nin toplam anten gücünün enküçüldüğü bir KHA tasarlamıştır. Geliştirilen yöntemin, mevcut çalışmalardan çok daha hızlı ve güvenilir sonuçlar ürettiği gösterilmiştir. [50], yine tek bir İHABİ'nin sabit bir yükseklikte kullanıcı yoğunluğuna göre konumunu adapte edebildiği bir KHA tasarlamış ve kullanıcıların iki ana gruba ayrılabilirdiği sistemler için kapsama olasılıklarını hesaplamıştır. Sonrasında, bu olasılıklara dayanarak toplam kapsama seviyelerinin enbüyüdüğü bir adaptif öğrenme algoritması geliştirmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar dışında, İHABİ'lerin veri dağıtımı [51] veya veri toplama [52, 53] alanlarında da dinamik kullanımı incelenmiştir. Ancak, bu problemler kapsama mantığındansa rotalama mantığı ile incelendiğinden bu tez kapsamında incelenmemektedir. İHABİ'lerin bu gibi farklı KHA tasarımlarında kullanımı için [54] ve [5] çalışmaları ve bu çalışmaların atıf yaptığı çalışmalar incelenebilir.

Bugüne dek incelenen dinamik problemlerde İHABİ'lerin yükseklikleri genellikle sabit varsayılmıştır. Bununla birlikte, dinamiklik yalnızca kullanıcı konumları için sisteme dahil edilmiştir. Ancak, bu yaklaşımla İHABİ'nin dikey eksenindeki hareketliliğinden kaynaklı kapsama alanı genişletme ve verimli bant genişliği kullanımı gibi avantajlarından faydalanılamamaktadır. Diğer taraftan, kullanıcı konumları kadar kullanıcıların veri talepleri de zaman içinde sıklıkla değişmektedir. Hem konum hem de talep bağlantı hızı ya da spektral verimlilik gibi hizmet kalitesini etkilediğinden bu iki değişkenin ayrı ayrı düşünülmesi sistem performansını düşürmektedir.

İHABİ yerleşim alanında yapılan çalışmaların bir özeti, kullanılan İHABİ sayısı, amaç fonksiyonu (getiri enbüyükleme ya da maliyet enküçükleme) ve performans göstergesi, İHABİ kapasitesinin probleme dahil edilip edilmediği ve çözüm yöntemi ile birlikte İHABİ ve kullanıcıların statik ya da dinamik olmasına göre Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelgede kullanılan kısaltmaların açıklamaları şu şekildedir:

Çizelge 3.1: İHABİ yerleşim problemleri için literatür karşılaştırması.

Yayın	Tip	Getiri	Maliyet	PG	Kapasite	Çözüm
Statik						
[33]	T	KS	-	SGO	+	Kesin
[34]	T	KS	-	SGO	+	Kesin
[43]	Ç	BH	-	-	+	Sezgisel
[55]	İ	Kar	-	SK	-	Kesin
[4]	T	KS	-	SGO	-	Kesin
[38]	T	KS	-	SGO	-	Kesin
[56]	Ç	Kapsama	TG	SGO	-	Kesin
[57]	Ç	Kapsama	-	SGO	-	Sezgisel
[41]	Ç	SV	-	SV	-	Kesin
[58]	Ç	-	İHABİ	-	-	Sezgisel
[42]	Ç	SV	-	-	-	Kesin*
[59]	İ	BH	TG	BH	-	Kesin
[37]	Ç	-	Gecikme	-	-	Öğrenme
[60]	İ	-	TG	BH	-	Sezgisel
[61]	T	-	TG	BH	-	Sezgisel
[62]	Ç	SGO	-	Parazit	-	Sezgisel
[44]	Ç	-	İHABİ	SGO	-	Kesin
[35]	İ	KS	-	SGO	-	Kesin
[63]	T	SV	-	-	-	Sezgisel
[64]	Ç	-	-	-	-	Sezgisel
[65]	Ç	Kar	BG+KİS	BH	+	Sezgisel
Yarı Dinamik						
[66]	T	BH	TG	-	-	Sezgisel*
[67]	Ç	-	TG	BH	-	Sezgisel
[68]	Ç	-	TG	SGO	-	Sezgisel
[36]	Ç	-	TG	SGO	-	Sezgisel
[69]	Ç	BH	-	-	-	Sezgisel
[70]	İ	Gizlilik	-	BH	-	Sezgisel
[71]	T	BH	-	TG	+	Sezgisel
[72]	Ç	-	ST	SGO	-	Sezgisel
[73]	Ç	BH	-	Kesinti	-	Sezgisel
[74]	İ	BH	-	BH	-	Sezgisel*
[75]	Ç	-	HE	-	+	Kesin
[76]	İ	-	HE	BH	-	Sezgisel
[77]	T	-	Gecikme	-	+	Sezgisel
[78]	T	BH	-	-	-	Sezgisel
[79]	T	BH	HE	BH	-	Kesin*
[80]	T	BH	-	-	-	Sezgisel*
[81]	Ç	-	BH	-	-	Sezgisel
[82]	Ç	-	BH	-	-	DP*
Tam Dinamik						
[83]	Ç	-	TG	Gecikme	-	Öğrenme
[84]	Ç	Kapsama	-	SGO	+	Sezgisel*
[48]	İ	SV	-	-	-	Sezgisel*
[48]	Ç	-	TG	BH	-	Kesin
[85]	T	BH	-	-	-	Öğrenme

T: Tek İHABİ, Ç: Çoklu İHABİ

* İHABİ yüksekliği sabit kabul edilmiştir.

- **BG:** Bant genişliği
- **BH:** Bağlantı hızı
- **KİS:** Kullanılan İHABİ sayısı
- **KS:** Kullanıcı sayısı
- **PG:** Performans göstergesi
- **SGO:** Sinyal gürültü oranı
- **SV:** Spektral verimlilik
- **SK:** Sinyal kaybı
- **TG:** Toplam güç

“Statik” başlığı altındaki yayınlar hem İHABİ hem de kullanıcı konumlarının sabit olduğu, “Yarı Dinamik” başlığı altındaki yayınlar kullanıcıların sabit İHABİ’lerin dinamik olduğu, “Tam Dinamik” başlığı altındaki yayınlar ise hem İHABİ hem de kullanıcıların hareketli olduğu yayınları içermektedir. Bununla birlikte çözüm yöntemi kesin olarak belirtilen çalışmalar genellikle tüm çözüm alternatiflerinin değerlendirildiği ve uzun süreler gerektiren numaralandırma (enumeration) tekniğini kullanmıştır. Bu tekniğin yanı sıra MOSEK ve CPLEX gibi iç nokta algoritmalarını kullanan yazılımların da kullanıldığı yayınlar bulunmaktadır.

Yukarıda detayları verilen çalışmalar ile Çizelge 3.1’den görüleceği üzere, İHABİ yerseçim çalışmalarında genel eğilimin kapasitesiz sistemlerin ele alınması yönünde olduğu, kapasiteyi göz önüne alan problemlerin birçoğunda kullanıcı taleplerinin sabit ve tek bir değer varsayıldığı, dinamik problemler özelinde ise İHABİ’nin sabit bir yükseklikte hareket edebildiğinin varsayıldığı görülmektedir. Ancak, özellikleri ve talepleri farklı birçok kullanıcının olduğu gerçek hayatta bu varsayımların geçerli olmayacağı aşikardır. Her ne kadar bazı sektörlerde kullanıcıların benzer özellik taşıdığı varsayılabilir de telekomünikasyon sektörü gibi kişiselleştirilmiş kullanıcı deneyiminin önemli olduğu sektörlerde kullanıcı devamlılığı ancak kullanıcı memnuniyeti ile sağlanabildiğinden her kullanıcının tercihine ayrı karşılığın verilmesi gerekmektedir [86]. Bununla birlikte gerek kapasiteli gerekse kapasitesiz çalışmalarda İHABİ’lerin dikey hareket kabiliyetleri sabit bir yükseklikte hizmet verme ya da yatay düzlemdeki izdüşümü sabit bir noktada olma varsayımıyla ele alınmış ve geliştirilen matematiksel formülasyonların çok daha karmaşık olmasından kaçınılmıştır. Ancak, hem yatay hem dikey hareket kabiliyetinin bir arada incelendiği çalışmalar, bu kararların birlikte

verildiği durumların özellikle kapsama alanı açısından daha verimli olduğunu ortaya koymaktadır [45, 65].

Bu tez kapsamında incelenen problemlerde mevcut İHABİ yerseçim çalışmalarından farklı olarak özellikle İHABİ'lerin dikey hareket kabiliyetlerinin sınırlandırılmaması ve gerçek hayata uyarlanabilmesi amacıyla tasarlanan KHA'ların kapasitelerinin modellere dahil edilmesi esas alınmıştır. Ayrıca, farklı kullanıcı tercihleri de kurulan modellere entegre edilerek kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi de amaçlanmıştır. Bu sayede kullanıcılara sunulan hizmetin daha gürbüz olması ve bu hizmetlerin farklı koşullara karşı sürekliliğinin artırılması sağlanacaktır. Bunların dışında yalnızca İHABİ yerseçim problemlerine uygulanmaktansa daha geniş uygulama alanlarına hitap edebilmek adına, İHABİ yerseçim problemlerinden esinlenerek 3 boyutlu yerseçim problemlerinin genelleştirilmiş hali de çalışılmıştır.



4. STATİK İHABİ KAPSAMA YERSEÇİM PROBLEMLERİ

Tezin bu bölümünde hem İHABİ hem de İHABİ'lerin hizmet verdiği kullanıcıların zamanın tek bir anındaki durumlarına göre ele alındığı statik problemler incelenmiştir. Bu problemlerde, kullanıcı konumlarının sabit olduğu ve İHABİ'nin de bu kullanıcılara sabit bir konumdan hizmet verdiği varsayılmaktadır. Bu doğrultuda öncelikle 2.2. Bölüm'de bahsedilen performans göstergeleri gibi kapsama fonksiyonlarının olduğu 3 boyutlu yerseçimi için genel bir problem tanımı yapılmış, sonrasında tek bir İHABİ'nin en fazla sayıda kapsamayı sağladığı maksimum kapsama problemi ve birden çok İHABİ'nin tüm kullanıcılara hizmet verdiği küme kapsama problemi ele alınmıştır.

4.1 Genelleştirilmiş İHABİ Kapsama Problemi

Klasik 2 boyutlu KYP'lerde kullanıcılara sağlanan faydanın enbüyüklenmesi genellikle mesafeye göre monoton azalan fonksiyonlarla modellendiğinden, fayda enbüyükleme, mesafe enküçükleme olarak problemlere entegre edilmektedir [87]. Ancak bu durum monoton olmayan fonksiyonlar için geçerliliğini kaybetmektedir. Örneğin, 2.2. Bölüm'de tanımları verilen performans göstergelerinden sinyal kaybı fonksiyonu, L , monoton olmayan bir fonksiyondur [7] ve bahsi geçen varsayım bu fonksiyonun kullanıldığı problemlerde geçerliliğini yitirmektedir. Özellikle telekomünikasyon sektöründeki uygulamalarda bu tarz fonksiyonlarla sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu bölümde, monoton olmayan ancak tek bir ekstrem noktasının bulunduğu bilindiği (tek modlu) kapsama fonksiyonlarını içeren 3 boyutlu KYP (3KYP) ele alınmıştır. 3KYP özelinde kullanılan notasyon Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Klasik yerseçim problemlerine benzer şekilde, 3KYP'de de kullanıcı kümesi, $\mathcal{I} = \{1, \dots, n\}$, içindeki tüm kullanıcıların konumlarının, \mathbf{Y} , ve taleplerinin, \mathbf{D} , bilindiği ve bu değerlerin İHABİ'lerin yerseçimlerinin yapıldığı süre boyunca sabit kaldığı varsayılmaktadır. Bununla birlikte, $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, birbirine $r \in \mathbb{R}$ yatay ve $h \in \mathbb{R}$ dikey mesafede olan iki nokta arasında gerçekleşen hizmet seviyesini veren fonksiyon olmak üzere, bu fonksiyonun sürekli, konveks ya da konkav olmayan ancak tek bir minimum

Çizelge 4.1: 3KYP formülasyonlarında kullanılan semboller ve tanımları.

Sembol	Açıklama
$\mathcal{I} = \{1, \dots, n\}$	Kullanıcı kümesi
$\mathcal{J} = \{1, \dots, p\}$	İHABİ kümesi
\mathcal{Q}	İHABİ'lerin yerleştirilebileceği alternatif nokta sayısı
$\mathcal{Q}' \subseteq \mathcal{Q}$	İHABİ'lerin yerleştirilebileceği alternatif noktalar kümesi
$d \in \mathbb{R}$	Kullanıcı talebi
$h^* \in \mathbb{R}_+$	Sabit bir yatay mesafede hizmet seviyesinin minimum/maksimum olduğu dikey mesafe değeri
$r^- \in \mathbb{R}_+$	Sabit bir yükseklikte kullanıcının kapsanabileceği minimum yatay mesafe
$r^+ \in \mathbb{R}_+$	Sabit bir yükseklikte kullanıcının kapsanabileceği maksimum yatay mesafe
$r^* \in \mathbb{R}_+$	Sabit bir yükseklikte hizmet seviyesinin minimum/maksimum olduğu yatay mesafe değeri
$S \subseteq \mathcal{Q}$	Kullanıcı alanı
$S_i \subseteq \mathcal{Q}'$	Kullanıcı i 'yi kapsayabilecek alternatif İHABİ noktaları kümesi
$\bar{w} \in [0, 1]$	Kullanıcıya özgü getiri değeri
$t_j \in \mathbb{B}$	j noktasına İHABİ yerleştirilip yerleştirilmediğini gösteren ikili değişken
$z_{ij} \in \mathbb{B}$	i kullanıcısının j noktasındaki İHABİ tarafından kapsanıp kapsanmadığını gösteren ikili değişken
Ω	3KYP-K'nin optimal çözüm kümesi
Φ	3KYP-S'nin optimal çözüm kümesi

ya da maksimum noktası bulunan tek modlu bir fonksiyon olduğu varsayılmaktadır. Geri kalan bölümde bu fonksiyonun tek bir minimum noktası olduğu varsayılmıştır. Benzer değerlendirmeler tek bir maksimum noktası olan fonksiyonlar için de geçerli olacaktır.

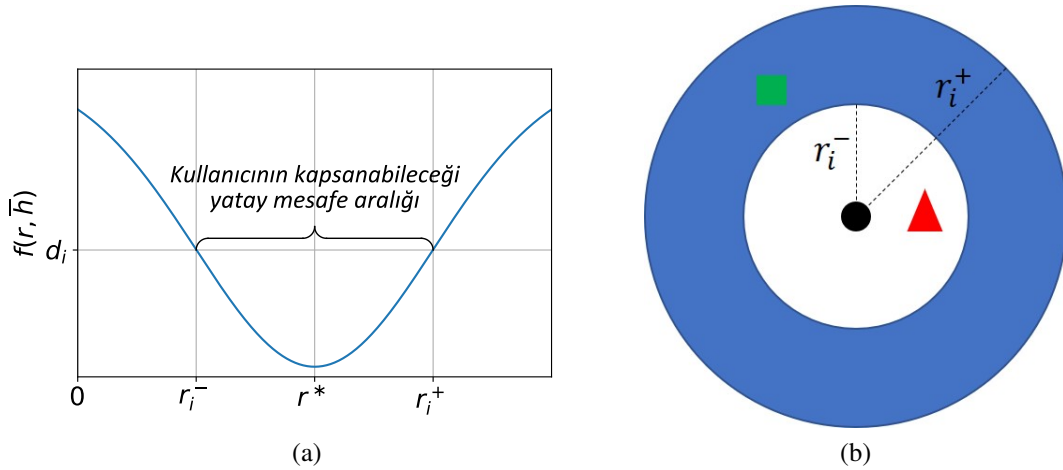
f fonksiyonunun tek modlu olduğu varsayıldığından, sabit bir $h = \bar{h}$ değeri için $f(r, \bar{h})$ 'yi enküçükleyen yalnızca bir $r^* \in \mathbb{R}$ değeri olmalıdır, d.d. $r^* = \arg \min_{r \in \mathbb{R}} f(r, \bar{h})$. Aynı durum sabit bir r değeri, \bar{r} , için h değişkeninde de geçerlidir, d.d. $h^* = \arg \min_{h \in \mathbb{R}} f(\bar{r}, h)$. Dolayısıyla, İHABİ yüksekliği sabitken, İHABİ'nin herhangi bir kullanıcıya olan mesafesi 0'dan başlayarak artırıldığında r^* mesafesine gelene kadar f fonksiyonunun değeri monoton azalacak, bu noktadan sonra monoton artacaktır. Benzer bir trend sabit bir yatay mesafe değerinde de gerçekleşecek, İHABİ yüksekliği belirli bir noktaya gelene kadar f fonksiyonunun değeri azalacak sonrasında artacaktır.

Problemin varsayımları gereği her bir kullanıcının talebi bilinmekte ve sabittir. Bu doğrultuda, talebi $d_i \in \mathbb{R}$ olan kullanıcı $i \in \mathcal{I}$ için, sabit bir İHABİ yüksekliğinde, d.d. $h = \bar{h}$, bu talebin karşılanabileceği bir yatay mesafe aralığı bulunabilir. Bu sınırlı alan kapsama alanı olarak adlandırılmaktadır. Kapsanma alanını belirleyen yatay mesafe

değerleri devam eden bölümlerde $r_i^- \in \mathbb{R}$ ve $r_i^+ \in \mathbb{R}$ olarak gösterilmiştir. Daha kolay anlaşılabilmesi adına bir kullanıcı için geçerli kapsama alanının İHABİ'nin yatay düzlemdeki izdüşümüne göre gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu şekilde, nokta ile gösterilen kullanıcının kapsama alanı halka şeklinde boyanmış alan ile gösterilebilir. Bu alan içinde kalan herhangi bir tesis (kare) kullanıcı talebini karşılarken, halkanın dışındaki bir konumdaki tesis (üçgen) talebi karşılayamayacaktır.

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, klasik KYP'lerde kullanıcıların kapsama bölgeleri genellikle kullanıcının kendi konumundan başlayarak etrafında belirli bir dairesel alana kadar belirlenirken, 3KYP'de bu alan kullanıcı konumundan daha uzakta bir halka ile ifade edilmektedir. Dolayısıyla, klasik KYP'lerde genellikle konveks alanlar içinde çalışılırken, 3KYP'de konveks olmayan alanlarda çalışılmakta ve bu da problemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak, İHABİ'nin dikey ekseninde hareketi halkanın boyutunu da değiştirdiğinden problem çok daha karmaşık hale gelmektedir.

Literatürde bugüne dek incelenen KYP'lerde yukarıda bahsedilenlere benzer bir problem ele alınmamıştır. Her ne kadar 3 boyutlu yerseçim problemleri birkaç farklı uygulama için incelense de [88, 89], bu çalışmalar da konveks kapsama alanlarını irdelemektedir. Dolayısıyla konveks olmayan kapsama alanlarının ortaya çıkabileceği İHABİ yerseçim problemleri için yeni yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda sonraki iki bölümde kesikli ve sürekli yapıda iki farklı formülasyon geliştirilmiş ve bu formülasyonlar ışığında optimal çözümler için öneriler sunulmuştur.



Şekil 4.1: Konveks ve monoton olmayan örnek bir performans göstergesi fonksiyonu için kapsama alanının temsili gösterimi. (a) Örnek performans göstergesi fonksiyonu ($r_i^- \leq r^* \leq r_i^+$). (b) Kapsama alanı.

4.1.1 Kesikli 3KYP

İlk olarak İHABİ'lerin yerleştirilebileceği alternatif konumların bilindiği Kesikli 3KYP (3KYP-K) ele alınmıştır. Klasik KYP'lere benzer şekilde bu problem için de Q içerisinde sabit bazı noktaların İHABİ yerseçimine uygun olduğu ve bu noktaların problem çözümünden önce bilindiği varsayılmaktadır. Bu alternatif noktalar $Q' = \{q_j \subseteq Q, j = 1, \dots, Q\}$ kümesi ile gösterilmektedir. Bu küme içerisindeki her noktanın koordinatı bilindiğinden problem çözülmeden herhangi bir kullanıcıyı kapsama ihtimali olan alternatif noktaların kümesi oluşturulabilir. Bu sayede problemin karar değişkenlerinin sayısının azaltılması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, her kullanıcı $i \in \mathcal{I}$ için bu kullanıcıyı kapsayabilecek İHABİ konumlarının kümesi $S_i = \{j : f(r_{ij}, h_{ij}) \leq d_i\}$ ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, aşağıdaki ikili karar değişkenleri tanımlanmıştır:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ kullanıcısı } j \text{ noktasındaki bir İHABİ tarafından kapsandıysa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$
$$t_j = \begin{cases} 1 & j \text{ noktasına bir İHABİ yerleştirildiyse} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Kullanıcılardan elde edilecek getirinin, kullanıcıya sunulan hizmet seviyesine bağlı olarak, daha iyi hizmet verilmesi halinde daha iyi kapsama seviyesi elde edilecek şekilde belirleneceği varsayılmıştır. Bu tarz kapsama seviyeleri, KMKYP'de tanımlanmış ve klasik yerseçim problemlerindeki yalnızca kapsanır ya da kapsanmaz kararlarındansa hizmet seviyesine göre değişen kapsama seviyelerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu doğrultuda, $g : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ fonksiyonu hizmet seviyesi \bar{f} olduğunda elde edilecek kapsama seviyesini, $f_{ij} = f(r_{ij}, h_{ij})$, i kullanıcısının j noktasındaki İHABİ'den aldığı hizmet seviyesini, \bar{w}_i , i kullanıcısının getiri değerini göstermek üzere, i kullanıcısından elde edilen getiri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$w_i = \begin{cases} \bar{w}_i g(f_{ij}) & \text{eğer } f_{ij} \leq d_i \text{ ise,} \\ 0 & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

Getiri fonksiyonunda kullanılan g fonksiyonunun klasik yerseçim problemlerinde doğrusal [21] ya da doğrusal olmayan [25] fonksiyonlarla ifade edildiği çalışmalar mevcuttur. Bu fonksiyonla ilgili önemli husus, bu fonksiyonun değerinin hizmet seviyesindeki azalmaya bağlı olarak monoton azalması ve en iyi hizmet seviyesinde 1, en kötü hizmet seviyesinde 0 değerini almasıdır.

Sonuç olarak, yerleştirilecek İHABİ sayısı, p , bilindiğinde 3KYP-K aşağıdaki şekilde

ifade edilebilir:

$$\mathbf{3KYP-K:} \quad \underset{\substack{\mathbf{z} \in \mathbb{B}^{n \times Q} \\ \mathbf{t} \in \mathbb{B}^Q}}{\text{enb}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{S}_i} z_{ij} w_i$$

öyle ki

$$z_{ij} \leq t_j, \quad i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{S}_i, \quad (4.1)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij} \leq 1, \quad i \in \mathcal{I}, \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J} t_j = p. \quad (4.3)$$

3KYP-K'da, amaç fonksiyonu toplam kapsama getirisini enbüyüklerken, (4.1) nolu kısıt kullanıcıların ancak kendilerini kapsayabilecek bir noktaya İHABİ yerleştirilmesi durumunda kapsanabileceğini, (4.2) nolu kısıt her bir kullanıcının en fazla bir İHABİ tarafından kapsanabileceğini, (4.3) nolu kısıt ise tam olarak p tane İHABİ'nin yerleştirilmesini sağlamaktadır. 3KYP-K'da toplam $Q(n+1)$ ikili değişken ve $n(Q+1)+1$ kısıt bulunmaktadır.

[90], 2 boyutlu KYP için optimal çözümün, her bir kullanıcının kendisi ile kullanıcıyı kapsayabilecek alternatif tesis noktalarını içeren ve *NIPS* adını verdiği kesişim kümesinde olacağını göstermiştir. Diğer bir deyişle, herhangi bir optimal çözümde *NIPS* içerisinde yer almayan bir noktaya tesis yerleştirilmesi durumunda, mutlaka *NIPS* içinden alternatif bir nokta bu nokta ile değiştirilerek en az bu çözümün amaç fonksiyon değeri elde edilebilmektedir. Ancak, 3KYP-K için yükseklik boyutunun da çözüme dahil edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla *NIPS*'e benzer bir yaklaşımla İHABİ yerleşim problemi için bir küme oluşturulabilir.

Q' 'ın sınırlı bir küme olmasından hareketle, her biri ayrık bir yükseklik değerini içerecek şekilde l tane alt küme oluşturulabilir, d.d. $Q'_k = \{q_j \in J : h_j = h_k\}$, $\cup_{k=\{1, \dots, l\}} Q'_k = Q'$. Dolayısıyla her bir kullanıcı için her bir yükseklik seviyesi l 'de kapsamayı sağlayan noktalardan oluşan kümeler yalnızca yatay mesafeler baz alınarak oluşturulabilir. $r_{ik}^- = \arg \min_{r \in \mathbb{R}} f(r, h | h = h_k)$ ve $r_{ik}^+ = \arg \max_{r \in \mathbb{R}} f(r, h | h = h_k)$ kullanıcı i 'yi h_k yüksekliğinde kapsayabilecek en küçük ve en büyük yatay mesafeler olmak üzere, bu küme her bir kullanıcı için $S_i^k = \{j \in Q'_k : r_{ik}^- \leq r_{ij} \leq r_{ik}^+\}$ ile ifade edilebilir. Bu kümelerin tüm kullanıcı ve yükseklik değerleri üzerinden birleşimini $\Omega = \cup_{i \in \mathcal{I}, k=1, \dots, l} S_i^k$ ile ifade edebiliriz.

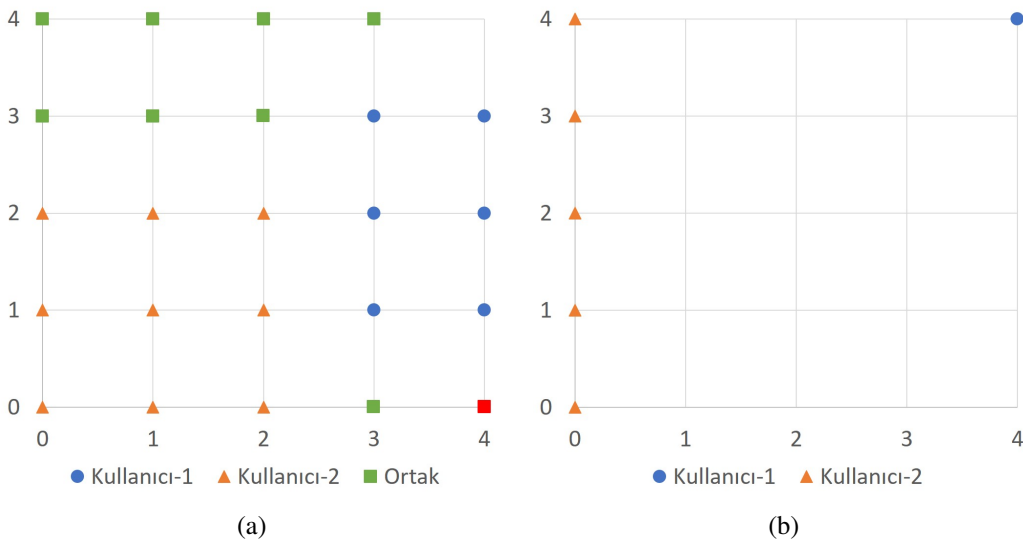
Teorem 4.1. *3KYP-K'nun optimal çözümlerinden en az biri Ω içinden bulunabilir.*

İspat. Herhangi bir optimal çözümde Ω içinde olmayan bir noktanın, $\gamma \in Q'$, yer aldığını ve bu çözümün amaç fonksiyonu değerinin W^* olduğunu varsayalım. γ ,

Ω kümesinde olmadığından hiçbir S_i^k kümesinde de yer almamaktadır ve bu γ tarafından hiçbir kullanıcının kapsanamayacağını gösterir. Dolayısıyla, bu noktanın amaç fonksiyonuna katkısı sıfırdır ve γ 'nın Ω içerisinde yer alan bir nokta ile değiştirilmesi amaç fonksiyonu değerini düşürmeyecektir. Bu doğrultuda, Ω kümesinde yer almayan bütün noktalar, tüm noktalar Ω kümesinde yer alana kadar bu küme içerisinde bir nokta ile değiştirilebilir ve aynı ya da daha iyi amaç fonksiyonu değeri elde edilmiş olur. \square

Şekil 4.2, $\mathcal{I} = \{(1,1), (4,2)\}$, $\bar{w}_1 = \bar{w}_2 = 1$, $d_1 = d_2 = 45$, $\mathcal{Q}' = \{(x,y,h) : x = \{0, \dots, 4\}, y = \{0, \dots, 4\}, h = \{2,4\}\}$ ve $f(r,h) = |45 - \frac{360}{\pi} \arctan(\frac{h}{r})| - 90$ verileriyle tanımlanan örnek bir problem için oluşturulan Ω kümesini göstermektedir. f fonksiyonuna göre kullanıcıların kapsanması için İHABİ ile olan açının en fazla 45° olması gerekmektedir. f , kullanıcı ile alternatif nokta arasındaki açı $22,5^\circ$ olduğunda en düşük değerini almakta diğer tüm açılar için monoton artmaktadır. Teorem 4.1'e göre Ω kümesinde yer alan noktalar iki farklı yükseklik değeri için gösterilmiştir. Daireler sadece 1. kullanıcıyı, üçgenler sadece 2. kullanıcıyı, kareler ise her iki kullanıcıyı da kapsayan noktaları göstermektedir. Bu noktalarındaki amaç fonksiyon değerleri incelendiğinde (4,0,2) noktası (kırmızı kare) 157,19 amaç fonksiyon değeri ile optimal sonucu vermektedir.

Teorem 4.1, tüm alternatif noktaların kombinasyonlarından oluşan olası bir çözüm kümesinden daha az sayıda olurlu çözümün olduğu bir küme oluşturularak optimal çözümün daha hızlı bulunmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 4.2'deki örnek için tüm noktaların değerlendirilmesi 50 farklı noktayı içerirken Ω kümesinde 30 nokta



Şekil 4.2: 3KYP-K örnek problemi için olurlu çözümlerin gösterimi. (a) $h = 2$. (b) $h = 4$.

bulunmaktadır. En kötü durumda tüm noktalar için karşılaştırma yapılırsa, $t = \frac{Q!}{(Q-p)!p!}$ bu noktaların sayısını göstermek üzere, ilk olarak her bir noktanın amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi sonrasında da bu değerler arasından en büyüğünün bulunması için $O(t \log(t))$ sürede optimal çözüm bulunabilir. [90] 2 boyutlu KYP için *NIPS* kümesinin tüm noktalara göre çok daha az sayıda nokta içerdiğini empirik testlerle göstermiş olsa da, alternatif nokta sayısının yüksek olduğu durumlarda bu tarz bir çözüm yönteminin uzun sürebileceği unutulmamalıdır.

4.1.2 Sürekli 3KYP

İHABİ'lerin yerleştirilebileceği noktaların sınırlı olmadığı ve Q içinde herhangi bir noktaya yerleştirilmesine izin verildiği durumlar Sürekli 3KYP (3KYP-S) modeli ile bu bölümde incelenmiştir.

4.1.2.1 Matematiksel model

3KYP-S için 3KYP-K'ye benzer şekilde kapsama kararları f fonksiyonu yardımı ile verilmektedir. Bu doğrultuda, klasik KYP'lerde iki boyutlu düzlem için tanımlanan kapsanan kullanıcılar kümesi, $C(\mathbf{X}^d)$, üç boyutlu uzaya uygun şekilde $C(\mathbf{X}^d) = \{i \in \mathcal{I} : \exists j \mid f(r_{ij}, h_{ij}) \leq d_i, j \in \mathcal{J}\}$ gösterilebilir. İHABİ sayısı, p , bilindiğinde, 3KYP-S şu şekilde formüle edilebilir:

$$\mathbf{3KYP-S:} \quad \text{enb}_{\mathbf{X}^d \in \mathcal{Q}^p} \sum_{i \in C(\mathbf{X}^d)} w_i(\mathbf{X}^d)$$

Bu formülasyonda, $f_i = \min_{j=1, \dots, p} f(r_{ij}, h_{ij})$, i kullanıcılarına İHABİ'ler tarafından sunulan en iyi hizmet seviyesini göstermek üzere, amaç fonksiyonunda her bir kullanıcıya ait getiri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$w_i(\mathbf{X}^d) = \begin{cases} \bar{w}_i g(f_i) & , f_i \leq d_i \\ 0 & , \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Drezner [91], iki boyutlu düzlemdeki klasik sürekli KYP için optimal çözümün, klasik kesikli KYP için geliştirilen *NIPS* kümesine benzer bir kesişim kümesinde bulunabileceğini göstermiştir. *NIPS*'ten farklı olarak, kesişim kümesi, her bir kullanıcının kapsanabileceği en uzun mesafeyi yarıçap kabul eden dairelerin kesişim noktalarından oluşmaktadır. Herhangi bir kullanıcı etrafına çizilen daire başka bir daire ile kesişmiyorsa noktanın kendisi kesişim kümesine eklenmektedir. Ancak, bu teorem

f 'nin mesafeye göre monoton azalan olduğu modeller için geçerli olmakta, dolayısıyla 3KYP-S için uygulanamamaktadır. Örneğin, bir kullanıcı için bir İHABİ'nin yerseçim problemi düşünüldüğünde, bu teoreme göre, kullanıcının bulunduğu noktaya tesisin yerleştirildiği çözüm optimal çözüm olacaktır. Ancak, 3KYP-S'de İHABİ yüksekliği sabitlense dahi İHABİ ile kullanıcı arasındaki yatay mesafenin $r^* > 0$ olduğu nokta optimal çözümü vermektedir. Bu nedenle, 3KYP-S'nin optimal çözümü için yeni bir yaklaşım gerekmektedir.

Her kullanıcı için kendisini kapsayabilecek tüm noktalar, $\Phi_i = \{(r, h \in \mathbb{R}_+) : f(r, h) \leq d_i\}$ kümesi ile gösterilebilir. Bu küme vasıtasıyla aşağıdaki sonuç optimal çözümün bulunması için kullanılacaktır.

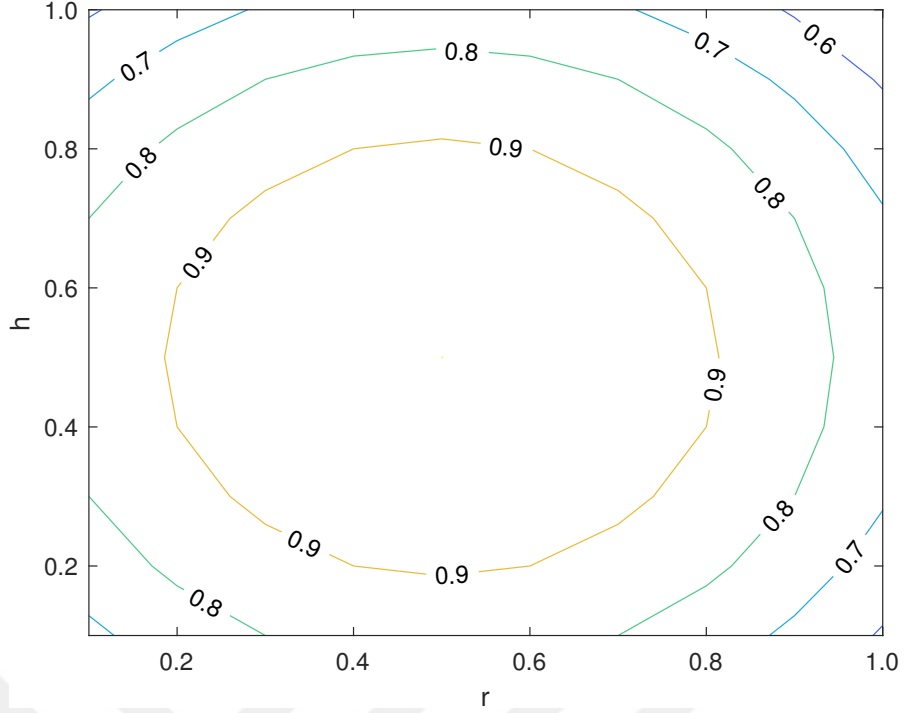
Önerme 4.2. d_i 'nin bilindiği ve $f(r, h)$ 'nin tek modlu olduğu varsayımı altında, Φ_i kapalı ve sınırlı kümelerin kombinasyonu ile ifade edilebilir.

İspat. İspat için geometrik gösterimlerden yola çıkılabilir. $f(r, h)$ 'nin tek bir ekstrem noktası olduğu bilindiğinden, kontur grafiğinde hiçbir konturun birbiri ile kesişmemesi gerekmektedir. Aksi halde ikinci bir ekstrem nokta olması gerekir ki bu da tek modlu varsayımına aykırılık oluşturmaktadır. Bununla birlikte fonksiyonun en küçük değerini aldığı noktadan uzaklaştıkça kontur değerleri de monoton artacaktır. Aksi halde başka bir noktada daha tepe noktası olması gerekir ki bu da yine tek mod varsayımına karşı olacaktır. Bir kontur üzerindeki tüm noktalar sürekli bir eğri ile ifade edildiğinden belirli bir d_i için $f(r, h) = d_i$ olan yalnızca bir kontur eğrisi bulunacaktır. Φ_i , tanımı gereği $f(r, h) \leq d_i$ şartını sağlayan tüm bu konturları içereceğinden, kapalı kümelerin birleşimi de kapalı bir küme olacaktır. \square

Şekil 4.3, $f(r, h) = 1 - (r - 0,5)^2 + (h - 0,5)^2$ fonksiyonunun $(r, h) \in [0, 1]$ için kontur grafiğini göstermektedir. Bu fonksiyon, $(r, h) = (0,5, 0,5)$ için maksimum değeri 1'e ulaşmakta diğer tüm değerler için monoton azalmaktadır. Örneğin $d_i = 0,9$ olan bir kullanıcı için değeri 0,9 olan kontur dahil konturun içinde kalan herhangi bir r ve h değerine sahip noktaya yerleştirilen İHABİ bu kullanıcıyı kapsayabilir. Dolayısıyla, bu kullanıcının kapsama kümesi bu kontur da dahil olmak üzere bu konturun çevrelediği alan ile tanımlanabilir. Bu alan da kapalı bir kümedir.

Önerme 4.3. h bilindiğinde, Φ_i 'nin iz düşümü bir çember ya da bir halka ile gösterilebilir.

İspat. Lemma 4.2 kullanılarak Φ_i 'nin alanının tek bir kontur ($f(r, h) = d_i$) ile maksimum yapılacağı görülebilir. Performans göstergesinin d 'ye eşit olduğu kontur, $C_d = \{(r, h) : f(r, h) = d\}$ ile, her kullanıcı için kendisini kapsayabilecek tüm konturları

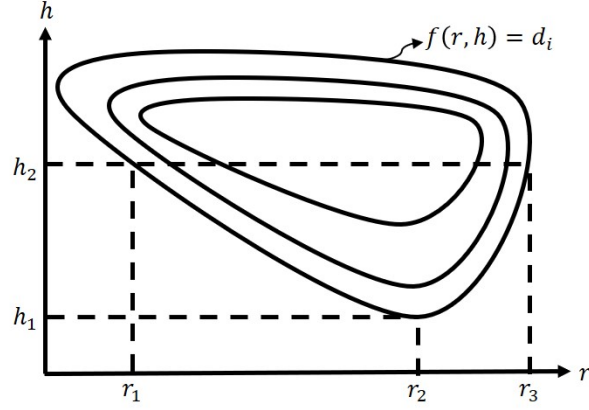


Şekil 4.3: Tek modlu bir fonksiyon için örnek kontur grafiği.

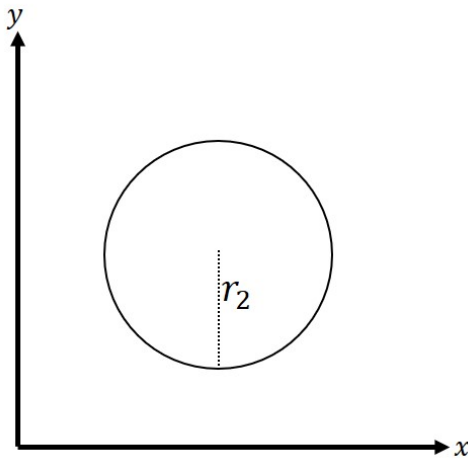
içeren küme, $C_i = \{C_d : i \in \mathcal{I}, d \leq d_i\}$ ile gösterilebilir. h bilindiğinde, Φ_i 'nin izdüşümü $R_i(h) = \{\bar{r} \in \mathbb{R} : \bar{r} = (C_i)^{-1}|_h\}$ değerleri kullanılarak ifade edilebilir. \bar{r} değerleri aslında, h değerine bağlı olarak kontur grafiğinde r eksenine paralel çizilen çizginin ilgili konturla kesiştiği noktalardaki değerleri ifade etmektedir. Bu durumda üç farklı durum ortaya çıkabilir:

1. **Kesişmeme:** Bu durumda kullanıcı, İHABİ'nin bu yüksekliğinde kapsanamaz, d.d. $R_i(h) = \emptyset$.
2. **Tek noktada kesişme:** Bu durumda tek bir \bar{r} değeri mevcuttur ve bu yükseklikte yarıçapı \bar{r} olan çember üzerindeki herhangi bir noktaya yerleştirilen İHABİ kullanıcıyı kapsayabilir.
3. **İki noktada kesişim:** Bir çizgi ile bir elips en fazla iki noktada kesişebileceğinden $R_i(h)$ en fazla iki farklı yatay mesafe değeri içerebilir. δ_1 ve δ_2 , ($\delta_1 < \delta_2$), bu iki mesafe değerini göstermek üzere, bu yükseklikte iç yarıçapı δ_1 , dış yarıçapı δ_2 olan halka içine yerleştirilen İHABİ kullanıcıyı kapsayabilir. \square

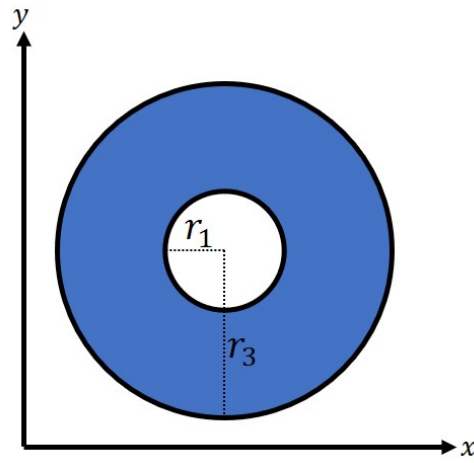
Şekil 4.4, Lemma 4.3'te belirtilen farklı durumları temsili olarak göstermektedir. Örnek kontur grafiğinde iki farklı yükseklik için kesişim olan farklı yatay mesafe değerleri gösterilmiştir. h_1 yüksekliğinde Lemma 4.3'te belirtilen ikinci durum, h_2 yüksekliğinde



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.4: Sabit İHABİ yüksekliğinde gerçekleştirilecek kapsama alanı izdüşümleri. (a) Örnek kontur grafiği. (b) $h = h_1$. (c) $h = h_2$.

ise üçüncü durum gerçekleşmektedir. Tüm bu çıkarımlar ışığında 3KYP-S'nin optimal çözümü için aşağıdaki teorem verilmiştir.

Teorem 4.4. $\Gamma_{ij} = \Phi_i \cap \Phi_j, \forall i, j \in \mathcal{I}$ noktaları için kapsama alanlarının kesişim kümesi ve $P = \{\Phi_i : \Gamma_{ij} = \emptyset, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{I} - \{i\}\}$, kapsama alanı başka hiçbir noktanın kapsama alanı ile kesişmeyen noktaların kümesini göstermek üzere, 3KYP-S'nin en az bir optimal çözümü $\Phi = P \cup [\cup_{i,j \in \mathcal{I}} \Gamma_{ij}]$ kümesi içindedir.

İspat. Teorem 4.1 ile benzer şekilde ispat yapılabilir. Herhangi bir optimal çözümde Φ kümesinde olmayan bir İHABİ hiçbir kullanıcıyı kapsamamaktadır. Dolayısıyla, bu tesisi Φ kümesinden bir nokta ile değiştirmek amaç fonksiyonu değerini düşürmeyecektir. Sonuç olarak, tüm tesisler Φ kümesi içinde olana dek bu değişimler yapılarak tüm tesislerin Φ kümesi içinde olduğu bir optimal çözüm bulunabilir. \square

Her ne kadar Teorem 4.4 3KYP-S'nin optimal çözümünü garanti etse de özellikle Γ_{ij} kümelerini tanımlamak konveks ve monoton olmayan f fonksiyonları için oldukça zor olabilecektir. Sonraki bölümde f 'nin bazı özel durumlarına göre bu kümelerin nasıl oluşturulabileceği gösterilmiştir.

4.1.2.2 Özel durumlar için optimal çözümler

Teorem 4.4'te kullanılan kesişim kümelerinin belirlenmesi orijinal problemin çözümü kadar zorlayıcı bir yöntem gerektirebilir. Ancak, bazı özel yapıdaki fonksiyonlar için bu kümenin belirlenmesi nispeten daha kolay olacaktır. Bu bölümde iki farklı fonksiyon için bu kesişim kümelerinin nasıl oluşturulacağı ve bu kümeler kullanılarak optimal çözümün nasıl bulunabileceği açıklanmıştır. Örneklerde kullanılan fonksiyonların tek bir maksimum noktası olduğu varsayılmıştır.

Konik durum

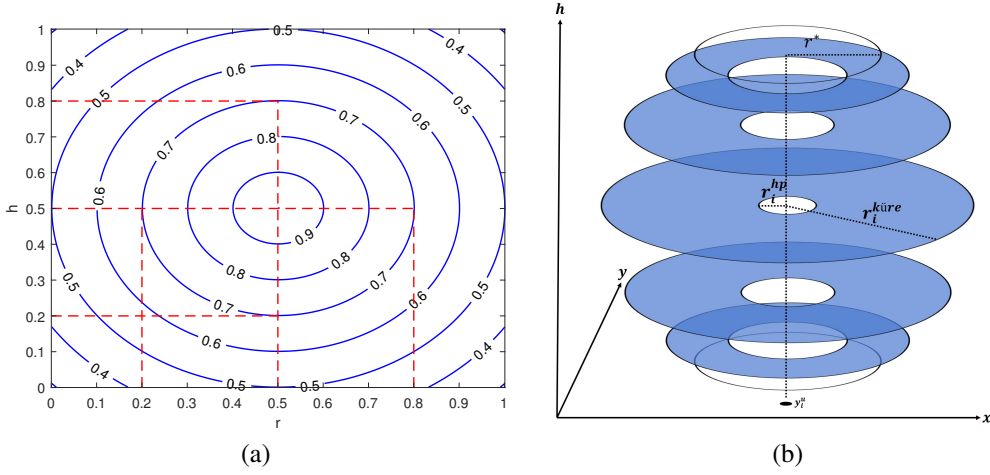
Kapsama fonksiyonu f , konik bir fonksiyonsa, bu fonksiyonun kontur grafiği çemberlerle ifade edilebilmektedir. Örneğin, $f(r, h) = \beta_1 - \sqrt{(r - \beta_2)^2 + (h - \beta_3)^2}$ fonksiyonunun $\beta_1 = 1$ ve $\beta_2 = \beta_3 = 0,5$ değerleriyle örnek bir kontur grafiği ve bu grafik ışığında $d_i = 0,7$ için oluşturulan kapsama alanının belirli katmanları Şekil 4.5'te verilmiştir. Konik durum için kapsama alanı bir küre içerisinde bir hiperbolanın çıkarılmasıyla elde edilebilmektedir. Küre ve hiperbolanın yarıçapları fonksiyonun maksimumuna ulaştığı yükseklikte, $f(r, h) = d_i$ şartının sağlandığı maksimum ve minimum yarıçap değerleriyle ifade edilebilir. Diğer bir deyişle, kontur grafiği ile ilgili yükseklikten çizilen paralel çizginin kesiştiği yarıçap değerleridir. Şekildeki örnek fonksiyon için bu değerler küre için 0,8, hiperbola için 0,2 olarak bulunabilir. Bununla birlikte küre ve hiperbolanın merkez noktaları da, h_i^* , fonksiyonun i kullanıcısının konumuna göre maksimum olduğu yükseklik, (a_i, b_i, h_i) , kullanıcının koordinatları olmak üzere, her bir kullanıcı için (a_i, b_i, h_i^*) noktasında olacaktır.

$(r_i^*, h_i^*) = \arg \max_{r, h \in \mathbb{R}_+} f(r, h)$, i kullanıcısının konumuna göre f 'yi enbüyükleyen yatay ve dikey mesafe değerleri olmak üzere, küre ve hiperbolanın yarıçapları, $r_i^{\text{küre}}$ ve r_i^{hp} , sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir:

$$r_i^{\text{küre}} = \max \{r \in \mathbb{R} : f(r, h_i^*) = d_i\}, \quad (4.4)$$

$$r_i^{\text{hp}} = \min \{r \in \mathbb{R} : f(r, h_i^*) = d_i\}. \quad (4.5)$$

Bu notasyon kullanılarak herhangi iki kullanıcı için kesişim kümesi, Γ_{ij} , (4.6)-(4.9)



Şekil 4.5: Konik durum için (a) örnek kontur grafiği ve (b) kapsama alanı.

sistemi çözülerek elde edilebilir.

$$\Gamma_{ij} = \{(x, y, h) \in Q :$$

$$(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (h - h_i^*)^2 \leq (r_i^{\text{küre}})^2, \quad (4.6)$$

$$(r_i^*(x - a_i))^2 + (r_i^*(y - b_i))^2 - (r_i^{\text{hp}} h)^2 \geq (r_i^{\text{hp}} r_i^*)^2, \quad (4.7)$$

$$(x - a_j)^2 + (y - b_j)^2 + (h - h_j^*)^2 \leq (r_j^{\text{küre}})^2, \quad (4.8)$$

$$(r_j^*(x - a_i))^2 + (r_j^*(y - b_i))^2 - (r_j^{\text{hp}} h)^2 \geq (r_j^{\text{hp}} r_j^*)^2\}. \quad (4.9)$$

Piramit durum

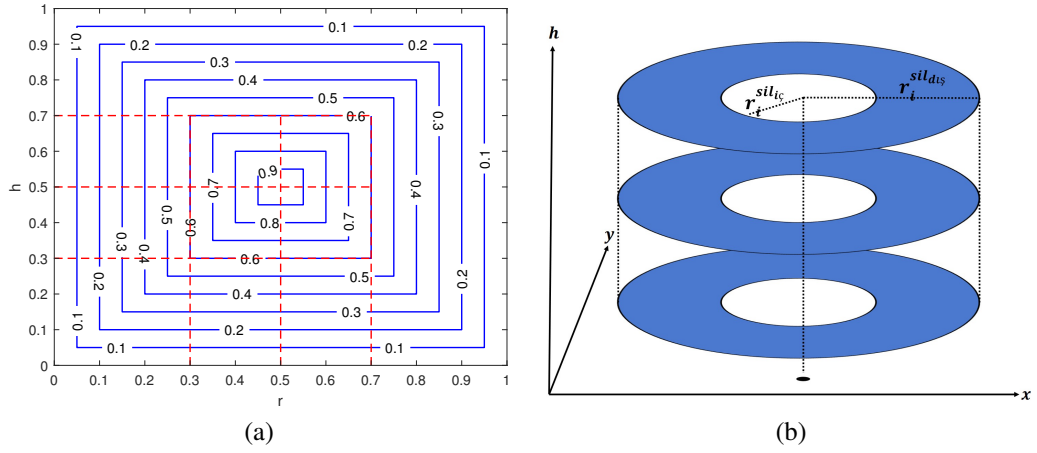
f 'nin kontur grafiğinin çemberler yerine dörtgenlerle ifade edilebildiği durumlar da bir özel durum olarak değerlendirilebilir. Bu durumda, konik durumdan farklı olarak kapsama alanının her bir katmanı aynı özellikte olacaktır. Dolayısıyla, her bir kullanıcının kapsama alanı bir silindir içinden çıkarılan diğer bir silindir vasıtasıyla ifade edilebilir. Bu duruma uygun örnek bir gösterim Şekil 4.6'da verilmiştir. Dış ve iç silindirlerin yarıçapları (4.10)-(4.11) ile, yükseklikleri (4.12) ile belirlenebilir.

$$r_i^{\text{sil}_{iç}} = \min \{r \in \mathbb{R} : f(r, h_i^*) = d_i\} \quad (4.10)$$

$$r_i^{\text{sil}_{dış}} = \max \{r \in \mathbb{R} : f(r, h_i^*) = d_i\} \quad (4.11)$$

$$h_i^{\text{sil}_{iç}} = h_i^{\text{sil}_{dış}} = \max \{h \in [h^-, h^+] : f(r_i^*, h) = d_i\} \\ - \min \{h \in [h^-, h^+] : f(r_i^*, h) = d_i\}. \quad (4.12)$$

Sonuç olarak, bu özel durum için herhangi iki kullanıcının kesişim kümesi, Γ_{ij} , (4.13)-



Şekil 4.6: Piramit durum için (a) örnek kontur grafiği ve (b) kapsama alanı.

(4.16) sistemi çözümlenerek elde edilebilir.

$$\Gamma_{ij} = \{(x, y, h) \in Q: \quad (r_i^{sil_{ic}})^2 \leq (x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (h - h_i)^2 \leq (r_i^{sil_{dis}})^2, \quad (4.13)$$

$$(r_j^{sil_{ic}})^2 \leq (x - a_j)^2 + (y - b_j)^2 + (h - h_j)^2 \leq (r_j^{sil_{dis}})^2, \quad (4.14)$$

$$h_i^{sil_{ic}} \leq h \leq h_i^{sil_{dis}}, \quad (4.15)$$

$$h_j^{sil_{ic}} \leq h \leq h_j^{sil_{dis}} \}. \quad (4.16)$$

4.1.3 Değerlendirme

Tezin bu bölümünde 3 boyutlu İHABİ yerleşim problemleri için geliştirilmiş formülasyonlar ve bu formülasyonların optimal çözümlerinin bulunması için yöntemler geliştirilmiştir. Bu problemler içerisinde kullanılan performans göstergesi fonksiyonları oldukça karmaşık, konveks ya da monoton olmayan fonksiyonlar olduğu için problemlerin çözümü oldukça zor olmaktadır. Hem kesikli hem de sürekli formülasyon için optimal çözümün bulunmasını kolaylaştıracak yöntemler sunulmuştur. Tezin sonraki bölümlerinde bu bölümde geliştirilmiş problem için sunulan öneriler bir dayanak olarak kullanılmış ve daha karmaşık problemlerin çözümüne yardımcı olmuştur.

4.2 Statik Tek İHABİ Yerleşim ve Kaynak Atama Problemi

Statik problemlerden ilk olarak tek bir İHABİ'nin toplam getiri özelinde kapsama performansının enbüyüklenmesinin amaçlandığı KHA incelenmiştir. Bu doğrultuda öncelikle ağ yapısı ile sistem modeli ve bu modele uygun şekilde geliştirilen

matematiksel model açıklanmış, sonrasında bu modelin çözümü için önerilen algoritma detayları ve bu algoritmanın performansı sunulmuştur. Bu problem özelinde kullanılan notasyon, Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

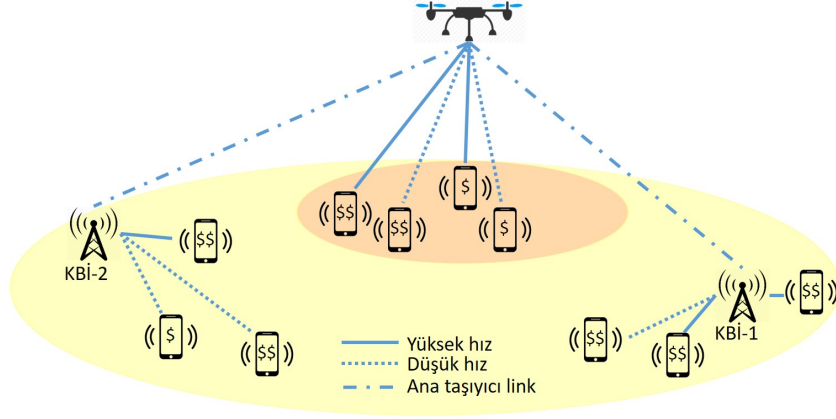
4.2.1 Sistem modeli

İncelenen KHA, belirli sayıda KBİ ve KBİ’ler tarafından halihazırda hizmet sunulan sınırlı sayıda kullanıcıdan oluşmaktadır. KHA’nın çeşitli sebeplerle (anlık yoğun trafik vb.) belirli kullanıcılara hizmet veremediği ve hizmet verilemeyen kullanıcılara tek bir İHABİ yardımıyla hizmet verilebildiği öngörülmektedir. Verilen hizmet farklı bağlantı hızlarını içermekte ve kullanıcılar kendilerine sunulan bu farklı hızlardan bir tanesini seçebilmektedir. Sistemin temsili bir gösterimi iki KBİ’nin olduğu bir KHA için Şekil 4.7’de verilmiştir.

İHABİ’lerin kapasitesi KBİ’lerle kurdukları ana taşıyıcı linkler ile sağlanmaktadır. Bu bağlantılar genellikle kullanıcılarla İHABİ arasındaki linklere göre daha güvenilir ve

Çizelge 4.2: Statik kapasiteli tek İHABİ’li KHA formülasyonu için semboller ve tanımları.

Sembol	Açıklama
$\mathcal{I} = \{1, \dots, n\}$	Kullanıcı kümesi
$\mathcal{L} = \{1, \dots, s\}$	KBİ kümesi
$\mathcal{V} = \{1, \dots, v\}$	Alternatif bağlantı hızları kümesi
$Q \subseteq \mathbb{R}^3$	İHABİ hizmet alanı
$S \subseteq Q$	Kullanıcı alanı
$y_i^u \subseteq S$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının konumu
$d_i \in \mathbb{R}$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının talebi
$y_l^k \subseteq S$	$l \in \mathcal{L}$ KBİ’sinin konumu
$B_l \in \mathbb{R}_+$	$l \in \mathcal{L}$ KBİ’sinin toplam bant genişliği
$\bar{K}_l \in \mathbb{R}_+$	İHABİ konumu bilindiğinde $l \in \mathcal{L}$ KBİ’si ile kurulan ana taşıyıcı bağlantının kapasitesi
$\delta_k \in \mathbb{R}$	$k \in \mathcal{V}$ alternatif bağlantı hızının değeri
$\phi_{ik} \in \mathbb{R}$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcıya $k \in \mathcal{V}$ bağlantı hızı verildiğinde elde edilecek getiri
$x^d \subseteq Q$	İHABİ konumu
$b_i \in \mathbb{R}_+$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcıya ayrılan bant genişliği
$\bar{b}_{ik} \in \mathbb{R}_+$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcıya $k \in \mathcal{V}$ bağlantı hızının sağlanması için gerekli bant genişliği
$t_{ik} \in \mathbb{B}$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcıya $k \in \mathcal{V}$ bağlantı hızının verilir verilmeyi gösteren ikili değişken
$z_l \in \mathbb{B}$	İHABİ’nin $l \in \mathcal{L}$ KBİ’si ile ana taşıyıcı bağlantı kurup kurmadığını gösteren ikili değişken



Şekil 4.7: Farklı bağlantı hızları sunulan örnek bir KHA gösterimi.

hızlı bağlantı sağlayabilen özelliktedir. Diğer taraftan kullanıcıların bazıları KBİ ile olan mesafeleri, taleplerin KBİ kapasitesinden fazla olması ya da yeterli bant genişliği olmaması gibi sebeplerle hizmet alamamaktadır (Şekil 4.7’deki koyu renkli bölge).

Şekilde iki farklı bağlantı hızının sunulduğu bir sistem gösterilmektedir. Halihazırda kullanılan 4. nesil KHA’larda her ne kadar fiyatlandırma aylık kotalar üzerinden belirlense de kullanıcıya özel farklı fiyat politikalarının yeni nesil KHA’larda sıklıkla kullanılması öngörülmektedir [45]. Bu doğrultuda, bu problemde daha hızlı bağlantı sağlanan kullanıcıdan daha fazla hizmet bedeli alındığı varsayılmıştır. Şekilde herbir kullanıcıdan elde edilen getiri “\$” sembolleri belirtilmiş olup daha fazla “\$” sembolü daha yüksek getiri anlamına gelmektedir.

İHABİ’ler ana taşıyıcı linkler için farklı KBİ’lerle bağlantı kurabilmektedir. Ancak, bu durum sinyal iletimi ve bant genişliğinin verimli kullanımını düşüren parazit oluşumuna sebep vermektedir. Bu sebeple, İHABİ’nin tek bir KBİ ile ana taşıyıcı bağlantıyı kurabileceği bir KHA tasarımı ele alınmaktadır.

4.2.2 Matematiksel model

Matematiksel modelde KBİ’ler $\mathcal{L} = \{1, \dots, s\}$ kümesi ile gösterilmekte ve her bir KBİ $l \in \mathcal{L}$ konumu, $y_l^k \in S$, ve İHABİ’ye ayrılacak toplam bant genişliği, $B_l \in \mathbb{R}$, bilinmektedir. Bunun yanı sıra kullanıcılara sunulacak bağlantı hızları da $\mathcal{V} = \{1, \dots, v\}$ kümesi ile gösterilmekte ve bu değerlerin de bilindiği varsayılmaktadır.

4.2.2.1 Getiri modeli

Kullanıcılara sağlanan bağlantı hızına göre elde edilen getiri kullanıcılar açısından anlaşılmasının kolay olması adına literatürdeki örnek çalışmaların da ışığında [45] bağlantı hızının doğrusal bir denklemi olarak hesaplanmaktadır. Bu denkleme göre, herhangi bir $i \in \mathcal{I}$ kullanıcılarından elde edilen getiri, $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu ile gösterilmekte ve bu fonksiyonun değeri, $\phi_{ik} \in \{0, 1\}$, i kullanıcılarına $k \in \mathcal{V}$ bağlantı hızı sağlanması halinde kullanıcının ödemeye gönüllü olduğu tutarı göstermek üzere, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$u_i(R) = \begin{cases} 0, & R < \delta_1 \\ \phi_{ik}, & \delta_k \leq R < \delta_{k+1}, \forall i \in I, \forall k = 1, \dots, v-1, \\ \phi_{iv}, & \delta_v \leq R \end{cases}$$

Bu modele göre, her kullanıcının sunulan bağlantı hızı eşik değerlerine göre ödemeye gönüllü olduğu bir tutar olduğu ve bu tutarın bağlantı hızı, R , arttıkça arttığı varsayılmaktadır, d.d. $0 < \phi_{i1} < \phi_{i2} < \dots < \phi_{iv} < \infty$.

4.2.2.2 Formülasyon

İHABİ'nin l KBİ'si ile ana taşıyıcı bağlantıyı kurup kurmadığını $z_l \in \{0, 1\}$ ikili değişkeni göstermek üzere, tek İHABİ maksimum kapsama ve kaynak atama problemi aşağıdaki karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu ile verilmiştir:

$$P_1 : \quad \text{enb} \quad P(x^d, \mathbf{b}) = \sum_{i \in \mathcal{I}} u_i(R_i)$$

$x^d \in Q, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{z} \in \mathbb{B}^s$

öyle ki

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} R_i \leq \sum_{l \in \mathcal{L}} K_l z_l, \quad (4.17)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} b_i \leq \sum_{l \in \mathcal{L}} B_l z_l, \quad (4.18)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} z_l = 1. \quad (4.19)$$

Yukarıdaki formülasyonda, kullanım kolaylığı olması açısından $R_i := R(x^d, y_i^d, b_i)$ (bkz. Denklem (2.5)) ve $K_l := K(x^d, y_l^k, B_l)$ (bkz. Denklem (2.6)) sırasıyla i kullanıcısının bağlantı hızını ve İHABİ'nin l KBİ'sinden aldığı ana taşıyıcı bağlantısının kapasitesini ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu, hizmet verilen kullanıcılardan elde edilen getiriye enbüyüklemektedir. (4.17) nolu kısıtlar İHABİ'nin kullanıcılara sağladığı toplam

bağlantı hızının İHABİ ile KBİ arasındaki ana taşıyıcı bağlantı kapasitesini aşmamasını, (4.18) nolu kısıt İHABİ tarafından kullanıcılara ayrılan bant genişliğinin KBİ'lerden sağlanan toplam bant genişliğini aşmamasını, (4.19) nolu kısıtlar ise İHABİ'nin yalnızca bir KBİ ile ana taşıyıcı link kurmasını sağlamaktadır.

P_1 , konveks olmayan amaç fonksiyonu ve kısıtlar ile ikili değişkenler içeren çözümü zor bir problemdir. Özellikle hem kapsama kararlarının hem de kapasitenin İHABİ konumuna göre değişken olması hem de bağlantı hızı fonksiyonunun klasik KYP'lerdeki mesafeye göre azalan fonksiyonlardan farklı olması yeni çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu amaçla bir sonraki bölümde yerseçim ve bant genişliği atama kararlarının ayrıştırılmasına dayalı sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

4.2.3 Çözüm yöntemi

P_1 , sınırsız kapasite ve kullanıcılara ayrılan bant genişliklerinin sabit varsayıldığı durumda klasik MKYP'ye indirgenebildiğinden ve MKYP NP-Zor problem olduğundan [26], NP-Tam problem olarak tanımlanabilir. Literatürde yerseçim ve kaynak atama kararlarının birlikte verildiği klasik iki boyutlu problemlerde bu iki kararın ayrıştırılarak verildiği ve kısa sürede etkin çözümlerin alındığı algoritmalar bulunmaktadır. Bunların başında [92] tarafından geliştirilen “Değişimli Yerseçim-Kaynak Atama Algoritması” (DYKA) algoritması¹ gelmektedir. Bu ve aslında bu algoritmaya benzer şekilde geliştirilen diğer algoritmalarda da yerseçim ve kaynak atama kararlarının her biri diğer kararın sabit bir değeri için verilmektedir. Örneğin, ilk olarak rasgele bir tesis yerseçim planı belirlendikten sonra bu plan doğrultusunda kaynak atama kararları optimize edilmekte, sonrasında optimal kaynak atama kararına göre tekrar tesis yerseçim planı optimize edilmektedir. Bu algoritmaların teoride optimal çözümü garanti etmese de pratik uygulamalarda oldukça başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir [93–95].

Literatürdeki geçmiş çalışmaların birçoğu tesis kapasitelerini sabit bir değer üzerinden değerlendirmektedir. Ancak, İHABİ yerseçim probleminde bu varsayım kapasitenin İHABİ konumuna göre değişmesinden dolayı geçerliliğini yitirmektedir. Dolayısıyla, bazı modifikasyonlar yapılması gerekmektedir.

Problem varsayımları gereği KBİ'lerden İHABİ'ye ayrılacak bant genişliği miktarları bilindiğinden, İHABİ konumu bilindiğinde (4.17) nolu kısıtın sağ tarafı sabit bir değer olacaktır (bkz. Denklem (2.6)). Ayrıca problem her bir KBİ özelinde çözülebilir hale

¹İngilizce literatürde bu algoritma “Alternate Location-Allocation” (ALA) olarak bilinmektedir.

gelmektedir. Bu yaklaşım vasıtasıyla bilinen bir İHABİ konumu için yalnızca bant genişliği atama kararlarının verilmesi gerekecektir. Bu durumda P_1 , literatürde sıklıkla çalışılan ‘‘Sırt Çantası’’ problemine dönüşmektedir.

Sırt çantası problemlerinde kapasitesi belirli bir sırt çantasına en fazla faydayı sağlayacak ürünlerin doldurulması amacıyla hangi ürünlerin çantaya konulacağına karar verilmektedir. Bu problemler ürün miktarlarının kesikli ya da tam sayılı olabilmesine göre sürekli ve kesikli formülasyonlarla ifade edilmektedir. Sürekli problemlerde her bir ürün getiri/maliyet oranı doğrultusunda en yüksek orandan başlayarak çanta kapasitesi dolana kadar sırasıyla çantaya konulduğunda, optimal sonuç elde edilirken, tamsayılı sırt çantası problemleri sürekli problemlere göre daha zor olduğundan genellikle dalsınır gibi algoritmalarla çözülmektedir [96].

Gevşetilmiş P_1 'in çözümü için sürekli sırt çantası problemlerine benzer bir yaklaşımla ilk olarak her bir kullanıcının her bir bağlantı hızı alternatifi için getiri/bant genişliği oranı hesaplanmakta, sonrasında her bir kullanıcı için yalnızca bir bağlantı hızı seçilmesi şartıyla bu oranın en yüksek olduğu kullanıcı-bağlantı hızı ikililerine hizmet verilmekte, bağlantı hızı ya da bant genişliği kapasitelerinden ilk olarak hangisi aşılsa, aşılmadan hemen önceki çözüm son karar olarak alınmaktadır.

Gevşetilmiş P_1 'in KBİ l özelindeki formülasyonu aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\bar{P}_1^l(x^d) : \text{enb}_{\mathbf{T} \in \mathbb{B}^{n \times v}} \bar{P}(\mathbf{T} | x^d) = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{V}} \phi_{ik} t_{ik}$$

öyle ki

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{V}} \delta_k t_{ik} \leq \bar{K}_l, \quad (4.20)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{k \in \mathcal{V}} \bar{b}_{ik} t_{ik} \leq B_l, \quad (4.21)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{V}} t_{ik} \leq 1. \quad i \in \mathcal{I}, \quad (4.22)$$

Yukarıdaki formülasyonda, \bar{b}_{ik} , i kullanıcıasına k bağlantı hızı sağlanması için gerekli bant genişliği miktarını, \bar{K}_l , İHABİ'nin konumuna göre KBİ l ile olan ana taşıyıcı bağlantı kapasitesini göstermektedir. \bar{P}_1^l , P_1 gibi tüm kullanıcılardan elde edilen getiriye enbüyüklerken, P_1 'den farklı olarak doğrudan bant genişliği miktarına karar vermektense, hangi kullanıcı için hangi bağlantı hızı alternatifinin seçileceğine karar vermektedir. Bu amaçla, $t_{ik} \in \{0, 1\}$ ikili değişkeni $i \in \mathcal{I}$ kullanıcıasına $k \in \mathcal{V}$ bağlantı hızı verilip verilmediğini kontrol etmektedir. (4.20) ve (4.21) nolu kısıtlar sırasıyla, ana taşıyıcı bağlantı ve bant genişliği kapasitelerinin aşılmamasını, (4.22) nolu kısıtlar ise her bir kullanıcıya yalnızca bir bağlantı hızı alternatifinden hizmet verilmesini sağlamaktadır.

Bağlantı hızı fonksiyonu, R , bant genişliği b 'ye göre konkav bir fonksiyondur (ispat için bkz. Ek-1). Her ne kadar İHABİ ve kullanıcı konumu bilindiğinde sabit bir bağlantı hızı değeri için b 'yi verecek kapalı formda bir ifade olmasa da, fonksiyonun konkavlığından istifade ederek, "Çizgi Arama" ya da "Altın Oran Arama" (AOA) gibi tek boyutlu arama algoritmaları vasıtasıyla bu değer ε_A yakınlıkta bulunabilir. Bu doğrultuda, gevşetilmiş problemde İHABİ konumu bilindiğinden her bir $k \in \mathcal{V}$ bağlantı hızı için hangi kullanıcıya ne kadar bant genişliği ayrılacağı, problem çözülmeye önce hesaplanabilir (bkz. Denklem (2.5)). Dolayısıyla, doğrudan bant genişliği miktarına karar vermektense ilgili bağlantı hızını sağlayan bant genişliklerinden hangisinin seçileceğine karar verilebilmektedir. Bu sayede formülasyondaki doğrusal olmayan fonksiyonlardan kurtulmuş olunacak ve problem tam sayılı doğrusal programlama yöntemleri kullanılarak çözülebilecektir.

Gevşetilmiş problemin orijinal probleme göre daha hızlı çözülebilmesi avantajını kullanarak her bir aşamasında sırasıyla İHABİ konumu ve bant genişliği atama kararlarının verildiği bir algoritma geliştirilmiştir. Bu iki aşamalı algoritmanın her bir adımında, bağlantı hızı fonksiyonunun İHABİ yüksekliğine göre tek modlu bir fonksiyon olmasından esinlenilerek (ispat için bkz. Ek-2), ilk olarak İHABİ'nin yüksekliği özelinde AOA kullanılarak İHABİ yüksekliği sabitlenmekte (bkz. Bölüm 4.2.3.1), sonrasında bu sabit yükseklikte "Saha Arama" (SA) sezgisel algoritması kullanılarak (bkz. Bölüm 4.2.3.2), bu yükseklikte farklı İHABİ konumlarına göre gevşetilmiş problemler çözülmektedir. Bu adımlar ardışık iki adım arasındaki İHABİ yüksekliği arasındaki fark belirli bir ε değerinden az olana dek tekrarlanmakta ve algoritma süresince elde edilen amaç fonksiyon değerlerinden en iyisi algoritma sonucu olarak değerlendirilmektedir. Geliştirilen algoritma, Algoritma 1'de özetlenmiş, AOA ve SA aşamaları sonraki iki bölümde açıklanmıştır.

4.2.3.1 AOA algoritması

AOA tekniği, doğrusal olmayan ve tek modlu fonksiyonların minimum ya da maksimum noktalarını bulmak için sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Bizim problemimizde bağlantı hızı fonksiyonunun İHABİ yüksekliğine göre tek modlu olmasından ilham alarak bu teknik yardımı ile bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

AOA, herhangi tek modlu bir fonksiyonun tanımlı olduğu aralık içerisinde, her bir adımında fonksiyonun iki farklı noktasını değerlendirerek global minimum ya da maksimumunu bulmayı amaçlayan bir arama algoritmasıdır. Örneğin, $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonunun $[a, b]$ aralığında tek bir maksimum noktası olduğu varsayalım. AOA,

Algoritma 1 İHABİ konumunu ve kullanıcılara ayrılacak bant genişliğini bulur

Girdi: $Q, Y, X^k, \{\delta_k\}_{k \in \mathcal{V}}, \phi, \varepsilon, T, \lambda$.

- 1: $\Omega^* \leftarrow 0, h_{lo} \leftarrow h^-, h_{up} \leftarrow h^+$
 - 2: **Geçerliiyken** $h_{up} - h_{lo} \geq \varepsilon$ **yap**
 - 3: $h_1 \leftarrow h_{lo} + \frac{\sqrt{5}+1}{2}(h_{up} - h_{lo}), \Omega^1 \leftarrow SA(h_1, T, \lambda, Q, Y, \{\delta_k\}, \phi)$.
 - 4: $h_2 \leftarrow h_{up} - \frac{\sqrt{5}+1}{2}(h_{up} - h_{lo}), \Omega^2 \leftarrow SA(h_2, T, \lambda, Q, Y, \{\delta_k\}, \phi)$.
 - 5: **Eğer** $\Omega^1 \geq \Omega^2$ **ise**
 - 6: **Eğer** $\Omega^1 > \Omega^*$ **ise**
 - 7: En iyi amaç fonksiyonu, Ω^* , en iyi İHABİ konumu, x^* , ve en iyi bant genişliği atama kararlarını, \mathbf{b}^*, Ω_1 'e göre güncelle.
 - 8: **Bitir Eğer**
 - 9: $h_{lo} \leftarrow h_2$
 - 10: **Değilse**
 - 11: **Eğer** $\Omega^2 > \Omega^*$ **ise**
 - 12: En iyi amaç fonksiyonu, Ω^* , en iyi İHABİ konumu, x^* , ve en iyi bant genişliği atama kararlarını, \mathbf{b}^*, Ω_2 'ye göre güncelle.
 - 13: **Bitir Eğer**
 - 14: $h_{up} \leftarrow h_1$
 - 15: **Bitir Eğer**
 - 16: **Bitir Geçerliiyken**
 - 17: **Çıktı:** $\Omega^*, x^*, \mathbf{b}^*$.
-

Algoritma 2 SA: Verilen bir yükseklikte en yüksek getiriyi veren yatay İHABİ konumu ve ilgili bant genişliği atama kararlarını verir.

Girdi: $h, T, \lambda, Q, Y, \{\delta_k\}_{k \in \mathcal{V}}, \phi$.

- 1: $t \leftarrow 0, x_t^d \leftarrow \bar{X}, x^* \leftarrow x_t^d, \Omega^* \leftarrow 0, \mathbf{b}^* \leftarrow \mathbf{0}^n$.
 - 2: **Geçerliiyken** $t \leq T$ **yap**
 - 3: $\Delta_i \leftarrow \frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_{l \in \mathcal{V}} \frac{\phi_{ik}}{b_{ik}}$ {Her kullanıcı için ortalama getiri/bant genişliği oranını bul}
 - 4: $\vec{D}_i \leftarrow \frac{\Delta_i(y_i^d - x_t^d)}{\|y_i^d - x_t^d\|}$ {Mevcut İHABİ konumuna göre her bir kullanıcının çekme yönünü bul}
 - 5: $x_t^d \leftarrow x_t^d + \lambda \vec{D}$ {İHABİ'yi kullanıcıların toplam çekme yönünde λ kadar ilerlet}
 - 6: $l^* = \arg \max \{l : K_l \geq K_{l'}, \forall l, l' \in \mathcal{L}\}$ {Yeni İHABİ konumundaki en yüksek ana taşıyıcı bağlantı kapasitesini veren KBI'yi bul}
 - 7: $\Omega' \leftarrow \bar{P}_1^*(x_t^d)$ {Yeni İHABİ konumuna göre gevşetilmiş problemi çöz}
 - 8: **Eğer** $\Omega' > \Omega^*$ **ise**
 - 9: $\Omega^* \leftarrow \Omega', x^* \leftarrow x_t^d, \mathbf{b}^* \leftarrow \mathbf{b}'$ {En iyi amaç fonksiyon değerini, İHABİ konumunu ve bant genişliği atama kararlarını güncelle}
 - 10: **Bitir Eğer**
 - 11: $t \leftarrow t + 1$
 - 12: **Bitir Geçerliiyken**
 - 13: **Çıktı:** $x^*, \Omega^*, \mathbf{b}^*$
-

literatürde altın oran olarak bilinen, $g = \frac{\sqrt{5}+1}{2}$, değerini kullanarak fonksiyonun tanımlı olduğu aralıktan iki noktayı seçer. Birinci nokta, $x_1, a + g(b - a)$ değerine, ikinci nokta, $x_2, ise $b - g(b - a)$ değerine eşitlenir. Eğer $f(x_1) \geq f(x_2)$ ise fonksiyonun maksimum$

noktası x_2 , ile b arasındadır ve a , x_2 'ye eşitlenerek bir sonraki adıma geçilir. Aksi halde fonksiyonun maksimum noktası a ile x_1 arasındadır ve b , x_1 'e eşitlenir ve bir sonraki adıma geçilir. Sonuç olarak, ε bir parametre olmak üzere, $b - a \leq \varepsilon$ şartı sağlanana kadar benzer adımlarla algoritma ilerletilir. Fonksiyonun maksimum noktası ε hata payı ile $\frac{b-a}{2}$ noktasındadır.

Benzer bir yaklaşımla, İHABİ yüksekliği üzerinden bir AOA uygulaması kullanılmıştır. Algoritma 1'de, Ω^* , global en iyi amaç fonksiyon değerini, x^* ve \mathbf{b}^* , sırasıyla bu değerlerin bulunduğu çözüme göre global İHABİ konumunu ve global bant genişliği atama kararlarını, h_{lo} ve h_{up} altın orana göre sürekli daraltılan yükseklik değerleri aralığını, Ω^1 ve Ω^2 ise, h_1 ve h_2 yüksekliklerinde SA algoritmaları uygulandıktan sonra elde edilen en iyi amaç fonksiyon değerlerini ifade etmektedir.

Algoritmanın her bir adımında, h_1 ve h_2 yükseklikleri o andaki yükseklik aralığına göre altın oran değeri kullanılarak belirlenmiş ve her bir yükseklikte SA algoritması uygulanmıştır. SA algoritmasından alınan çözümlerin amaç fonksiyon değerlerine göre arama aralığı daraltılmış ve yükseklik farkı ε 'un altına düşene kadar bu adımlar tekrarlanmıştır. Her ne kadar yükseklik özelinde bir tek modluluk durumu olsa da problemin konveks olmayan yapısı nedeniyle, herhangi bir adımda global amaç fonksiyon değeri iyileştirilmişse global amaç fonksiyonu değeri, global İHABİ konumu ve global bant genişliği atama kararları güncellenmiştir.

DYKA tabanlı algoritmalar yerseçim ve kaynak atama kararlarını ayrı ayrı değerlendirdiği için alt optimal sonuçların bulunması muhtemeldir [97]. Bu nedenle algoritma aynı şartlarla 50 farklı rasgele yerseçiminden başlayarak tekrar çözdürülmüş ve elde edilen en iyi sonuç, problemin çözümü olarak değerlendirilmiştir.

4.2.3.2 SA algoritması

SA algoritması ile İHABİ'nin sabit yüksekliğinde yatay düzlemin belirli bir sistem üzerinden taranması yoluyla amaç fonksiyonu değerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Algoritma 2'de, AOA algoritmasına benzer şekilde Ω^* , x^* ve \mathbf{b}^* sırasıyla o ana kadar bulunan global amaç fonksiyon değerini, bu değere uygun global İHABİ konumunu ve kullanıcıların global bant genişliği atama kararlarını, x_t^d ise t . adımda İHABİ'nin konumunu ifade etmektedir. SA algoritması ile, verilen yükseklik değeri esas alınarak ilgili yatay düzlemde kullanıcıların ortalama getiri/bant genişliği değerleri kullanılarak bulunan ağırlıklı ortalama noktası, \bar{X} 'ten başlanarak her bir adımda yeni bir İHABİ konumunda gevşetilmiş problemin çözülmesi ile daha iyi bir amaç fonksiyon değeri bulunması amaçlanmıştır. Her adımda yeni İHABİ konumunun belirlenmesi için

öncelikle her bir kullanıcının ortalama getiri/bant genişliği oranı, Δ_i , ve bu orana göre İHABİ'nin mevcut konumuna göre çekim gücü, \bar{D}_i , hesaplanmıştır. Bu çekim gücü, getiri/bant genişliği oranı yüksek kullanıcılarda diğer kullanıcılara göre nispeten daha yüksek olması amacıyla normalize edilmektedir. Tüm kullanıcılar için çekim gücü hesaplandıktan sonra, yeni İHABİ konumu, İHABİ'nin çekim güçlerinin toplamı yönünde λ kadar hareket ettirilmesiyle bulunmaktadır. Bulunan bu yeni konumda gevşetilmiş problem çözülerek tüm bu adımlar belirli sayıda (T) tekrarlanarak amaç fonksiyon değeri en yüksek olan nokta ile AOA algoritması beslenmektedir. Dikkat edilirse, gevşetilmiş problem yalnızca İHABİ'nin ilgili konumunda en yüksek ana taşıyıcı bağlantı kapasitesini sağlayan KBİ, l^* , özelinde çözülmektedir. Problemin olurlu bölgesi bu kapasitenin en yüksek olduğu durumda enbüyüklendiğinden her bir KBİ için çözüme gerek kalmamaktadır.

4.2.4 Deneysel çalışma sonuçları

Bu bölümde, statik tek İHABİ'li KHA'lar için geliştirilen algoritmanın farklı veri setleri üzerindeki performansı incelenmiştir. Bu amaçla, farklı kullanıcı ve KBİ sayıları içeren çeşitli test problemleri türetilmiş ve bu problemler konveks olmayan fonksiyonlar içeren karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu çözücülerinden BARON çözücüsü ile ve geliştirilen algoritma ile ayrı ayrı çözdürülerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Algoritmalar Python v3.6 programlama dili kullanılarak kodlanmış ve tüm deneyler Intel i7-6700 CPU @3.40 GHz, 64-bit, 8GB RAM Windows 10 işletim sistemli bir bilgisayar ile yapılmıştır. Optimal çözümler, NEOS platformunda [98] bulunan BARON çözücüsü ile 4 saatlik zaman sınırı altında elde edilmiştir.

4.2.4.1 Veri hazırlama

Performans testleri için $n = 50, 100, 200, 500$ olacak şekilde ve her bir alternatif için KBİ sayısı $s = 2, 4$ olacak şekilde farklı senaryolar ile toplamda 8 farklı test problemi türetilmiştir. Her bir problemdeki KBİ bant genişliği 20 MHz olarak belirlenmiştir.

Kullanıcı ve KBİ'lerin lokasyonları birbirlerinden bağımsız şekilde belirlenmiştir. İlk olarak KBİ lokasyonları, KBİ sayısına göre S 'nin geometrik olarak eşit alanlara bölünmesi ve her bir alanın rasgele bir noktasına bir KBİ yerleştirilmesi ile bulunmuştur. Örneğin, 2 KBİ'li bir problemde, S köşegen kullanılarak ikiye bölünmüş ve her bir bölünmüş alandan rasgele birer nokta belirlenmiştir.

Kullanıcı lokasyonları için literatürde sıklıkla kullanılan "Poisson Nokta Süreci"

(PNS) kullanılmıştır. PNS ile ilk olarak etrafında kullanıcı yoğunluğunun daha fazla olacağı cazibe merkezleri belirlenmiş, belirli oranda kullanıcının lokasyonu bu merkez noktalarının etrafında olacak şekilde, kalan kullanıcıların lokasyonları ise S içinde rasgele seçilen noktalar olarak belirlenmiştir. Tüm kullanıcıların yükseklik koordinatı 0 varsayılmıştır. Cazibe merkezi sayısı her bir senaryo için 1 ile 10 arasından, cazibe merkezi etrafına yerleştirilecek kullanıcı oranı ise %0 ile %100 arasından rasgele bir sayı ile belirlenmiştir. Ayrıca, kullanıcı lokasyonlarının dikey koordinatı 25 metre ile sınırlı tutulmuştur. Örneğin, 100 kullanıcı bir senaryonun cazibe merkezi sayısı 3, merkez etrafına yerleştirilecek kullanıcı oranı %80 ise, 80 kullanıcı 3 farklı merkez etrafına rasgele yerleştirilirken, 20 kullanıcı tüm alana rasgele yerleştirilecektir.

Kullanıcılara sunulan bağlantı hızı alternatifleri için literatürde genel olarak kabul görmüş bazı hızlar dikkate alınmıştır. Bu amaçla, genellikle görüntü ve video vb. yüklemeyen bilgi amaçlı internet kullanımı için 1 Mbps, orta düzeyde video gösterimi ve telefon görüşmesi amacıyla 2 Mbps, yüksek düzeyde video gösterimi amacıyla 4 Mbps ve hem yüksek video gösterimi hem de yüksek telefon ve mesajlaşma seçeneklerinin kullanımı amacıyla 8 Mbps bağlantı hızları sunulmaktadır. Bu amaçla Çizelge 4.3'te gösterildiği şekilde farklı paketler için her bir kullanıcı ve KBİ sayısına özgü yeni problemler türetilmiştir. Sonuç olarak 24 test problemi için sonuçlar değerlendirilmiştir. Tüm test problemlerinde kullanılan haberleşme parametreleri için taşra ortamı parametreleri [4] kullanılmış ve bu değerler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

4.2.4.2 Parametre kalibrasyonu

Algoritmada kullanılan bazı parametreler algoritmanın hem çözüm süresi hem de çözüm kalitesi açısından performansını etkilemektedir. Bu amaçla, bu parametrelerin değerlerinin belirlenmesi amacıyla bazı öncül analizler yapılmıştır.

Bu analizler için 50 ve 100 kullanıcı, 2 ve 4 KBİ içeren 4 farklı problem türetilmiştir. Her bir problem, parametre değerleri $\epsilon, \lambda \in \{1, 5, 10, 20\}$ ve $T \in \{50, 100, 150\}$ arasından seçilmek suretiyle her seferinde bir parametre değeri değiştirilerek tekraren

Çizelge 4.3: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA test problemlerinde kullanılan bağlantı hızı seçenekleri.

Paket	Bağlantı Hızları
1	1 Mbps, 2 Mbps
2	1 Mbps, 2 Mbps, 4 Mbps
3	1 Mbps, 2 Mbps, 4 Mbps, 8 Mbps

Çizelge 4.4: Test problemlerinde kullanılan haberleşme parametreleri.

Parametre	Değer
f_c	$2e9$ Hz
c	299.792.458 m/s
η	2,5
α	4,88
β	0,43
μ_{LoS}	0,1 dB
μ_{NLoS}	21 dB
G	36 dBm
g	46 dBm
σ_N	25 dB

çözdürülmüştür. Sonuç olarak toplam 192 çözüm üzerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'te verilmiştir. Tabloda, "CPU" sütunundaki değerler, ilgili parametre değerlerinin kullanıldığı algoritmanın çözüm süresini, "OU" sütunundaki değerler ilgili çözümün optimallikten uzaklık (OU) değerlerini göstermektedir. Bu sütundaki "-" gösterimi algoritmanın da optimal sonucu bulduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 4.5: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA algoritmasında kullanılan parametrelerin kalibrasyonu.

ϵ	λ	T					
		50		100		150	
		CPU(s)	OU(%)	CPU(s)	OU(%)	CPU(s)	OU(%)
1	1	1,49	-	5,72	-	8,72	-
	5	1,46	-	5,80	-	8,70	-
	10	1,48	1,15	5,92	1,12	8,60	1,11
	20	1,48	1,17	5,84	1,17	8,59	1,17
5	1	1,19	-	2,88	-	4,25	-
	5	1,27	-	2,98	-	4,21	-
	10	1,40	1,28	3,23	1,08	4,38	1,08
	20	0,99	1,44	3,06	1,21	4,29	1,20
10	1	*	-	1,95	-	2,87	-
	5	*	-	2,30	-	2,80	-
	10	*	0,92	1,83	0,92	2,74	0,92
	20	*	0,99	1,66	0,94	2,96	0,94
20	1	*	0,94	0,64	0,94	1,01	0,94
	5	*	0,95	0,64	0,95	1,12	0,95
	10	*	1,21	0,63	1,20	0,87	1,18
	20	*	1,25	0,51	1,23	1,05	1,22

*: Çözüm süresi 0,01 saniyeden az.

Bu tabloya göre, algoritmanın çözüm kalitesi özellikle SA algoritmasında kullanılan λ parametresinden etkilenmektedir. Bu parametre her bir adımda İHABİ konumunun ne kadar taşınacağını kontrol ettiğinden, yüksek değerler daha az hassas çözümlere sebep verirken, 1 metre seçeneği de çok küçük hareketlere neden olduğundan yeterli hassasiyet avantajının yakalanamamasına sebep olmuştur. Diğer taraftan, hem AOA algoritmasında kullanılan ε hem de SA algoritmasında kullanılan T parametresi çözüm süresini önemli ölçüde etkilemektedir. Ancak, ε parametresinin 10 metrenin altındaki değerlerinde çözüm süresindeki yüksek artışa karşın OU değerlerinde önemli bir azalış görünmemektedir. T parametresi de ε parametresine benzer şekilde artan değerleriyle çözüm süresini uzatsa da OU değerleri açısından önemli bir fark yaratmamaktadır. Bu doğrultuda, hem çözüm süresinin makul seviyelerde kalması hem de çözüm kalitesinden ödün vermemek adına $\varepsilon = 10$ metre, $\lambda = 5$ metre ve $T = 50$ değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bununla birlikte, ε parametresinin küçük değerlerinde elde edilen OU avantajını kaybetmemek amacıyla, tüm Q genelinde olmasa da elde edilen en iyi çözümün +/- 5 metre çevresinde $\varepsilon = 1$ metre olacak şekilde ikincil bir arama daha yapılarak algoritma sonuçlandırılmıştır.

4.2.4.3 Sonuçlar

Tüm problemlerin hem geliştirilen algoritma hem de BARON çözücüsü ile çözdürülmesi sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6–4.8’de verilmiştir. Çizelgelerde CPU₁ ve CPU₂ sütunları sırasıyla algoritmanın ve BARON’un çözüm süresini, OU_{alt} ve OU_{üst} sütunları ise algoritma ile elde edilen amaç fonksiyon değerinin BARON’dan elde edilen en iyi olurlu çözümün amaç fonksiyonu ve üst sınır değerleriyle arasındaki yüzdelik farkı göstermektedir. Bu değerler, Obj_B^{alt}, Obj_B^{üst} ve Obj_A, sırasıyla BARON’un en iyi olurlu çözümünün amaç fonksiyon değerini, BARON’un üst sınır değerini ve algoritma ile elde edilen amaç fonksiyon değerini göstermek üzere aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$OU_{alt} = \frac{Obj_B^{alt} - Obj_A}{Obj_B^{alt}} \times 100,$$

$$OU_{üst} = \frac{Obj_B^{üst} - Obj_A}{Obj_B^{üst}} \times 100$$

BARON’un optimal sonucu bulduğu problemler için yalnızca OU_{alt} değeri hesaplanmıştır. Diğer taraftan, optimal çözüm bulunamayan problemlerde OU_{üst} değeri ile birlikte Δ sütununda BARON’un kendi özelinde amaç fonksiyon değeri için raporladığı alt ve üst sınır değerleri arasındaki yüzde fark da verilmiştir, d.d. $\Delta = [(Obj_B^{üst} - Obj_B^{alt}) / Obj_B^{üst} \times 100]$. Δ sütununda 0 değerinin bulunması ilgili problemin

Çizelge 4.6: Statik kapasiteli tek İHABI'lı KHA için deney sonuçları (Bağlantı hızı alternatifleri kümesi = {1 Mbps, 2 Mbps}).

n	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
				Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
50	2	0,01	11560,75	*	*	*	#	#	#	0
4	4	0,01	13815,99	*	*	*	#	#	#	0
100	2	1,14	302,65	*	*	*	#	#	#	0
4	4	1,21	ZS	-2,70	-2,51	-2,14	0,87	1,06	1,42	3,61
200	2	4,86	ZS	-3,32	-2,77	-2,24	0,42	0,95	1,46	3,76
4	4	5,12	ZS	-0,29	-0,28	-0,26	1,81	1,82	1,84	2,14
500	2	8,26	ZS	-3,56	-3,45	-2,82	4,88	4,98	5,56	8,87
4	4	8,55	ZS	-4,65	-4,12	-3,72	3,21	3,70	4,07	8,12

*: $|OU|$ değeri %0,01'den küçük ZS: Zaman Sınırı #:Optimal

Çizelge 4.7: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA için deney sonuçları (Bağlantı hızı alternatifleri kümesi = {1 Mbps, 2 Mbps, 4 Mbps}).

n	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ (%)
				Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
50	2	0,04	ZS	-1,24	-1,15	-1,07	2,22	2,31	2,38	3,54
4	0,05	ZS	-0,98	-0,85	-0,75	1,15	1,27	1,37	2,15	
100	2	6,87	ZS	-1,00	-0,94	-0,76	6,94	7,00	7,17	8,54
4	4,26	ZS	-0,24	-0,21	-0,19	6,03	6,06	6,08	6,67	
200	2	9,18	ZS	-3,68	-3,37	-2,82	10,77	11,04	11,51	16,20
4	8,77	ZS	-3,97	-3,86	-3,54	10,78	10,88	11,15	16,54	
500	2	16,54	ZS	-18,30	-16,25	-15,09	11,82	13,34	14,21	34,15
4	18,23	ZS	-10,87	-9,24	-8,11	13,01	14,29	15,17	27,45	

ZS: Zaman Sınırı

Çizelge 4.8: Statik kapasiteli tek İHABİ'li KHA için deney sonuçları (Bağlantı hızı alternatifleri kümesi = { 1 Mbps, 2 Mbps, 4 Mbps, 8 Mbps }).

n	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ (%)
				Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
50	2	0,29	ZS	-0,38	-0,37	-0,32	3,14	3,16	3,20	3,64
4	4	0,16	ZS	-0,58	-0,51	-0,45	7,34	7,40	7,45	8,54
100	2	10,54	ZS	-0,23	-0,21	-0,17	5,93	5,95	5,98	6,55
4	4	11,66	ZS	-0,65	-0,64	-0,54	9,76	9,77	9,86	11,54
200	2	19,54	ZS	-13,54	-11,69	-9,14	9,67	11,14	13,17	25,69
4	4	22,36	ZS	-1,81	-1,54	-1,49	15,29	15,52	15,56	20,19
500	2	49,88	ZS	-29,16	-24,57	-20,83	10,66	13,84	16,43	44,58
4	4	56,41	ZS	-89,59	-88,24	-79,60	4,12	4,80	9,17	97,73

ZS: Zaman Sınırı

BARON tarafından optimal çözüldüğünü göstermektedir. Tüm tablolarda, algoritma performansı ile ilgili sonuçlar, ilgili problem özelindeki 10 tekrar arasından elde edilen en iyi, en kötü ve ortalama amaç fonksiyonu değerine göre sunulmuştur.

Çizelgeler incelendiğinde, algoritmanın çözüm süresi BARON'un çözüm süresine kıyasla oldukça düşüktür. BARON, türetilen problemlerin yalnızca 3 tanesini 4 saatlik zaman sınırı içinde optimal olarak çözerken, bu problemlerin ortalama çözüm süresi 8560 saniye (2,37 saat) olmuştur. Aynı problemler algoritma ile de optimal çözülmüş ve bu çözümler 1 saniyenin altında elde edilmiştir. Algoritmanın tüm problemler için ortalama çözüm süresi ise 11 saniye olmuştur.

BARON performansı, alternatif bağlantı hızı sayısı ve kullanıcı sayısı arttıkça kötüleşmektedir. Özellikle 500 kullanıcılı problemler için BARON'un amaç fonksiyonu için raporladığı alt ve üst sınırların yüzde farkı ortalama %36,81 olarak gerçekleşmiş, bu değerler 4 farklı bağlantı hızı sunulan problemlerde %97,73'e kadar çıkmıştır. BARON'un kendi OU değeri %10'un altında olan 12 problemde algoritmanın bulunduğu sonuç BARON'un bulunduğu en iyi olurlu çözüme oranla ortalama %1,45 daha yüksek amaç fonksiyon değerine sahiptir. Aynı değer 20 tekrarın en iyileri düşünüldüğünde %1,60, en kötülerini düşünüldüğünde ise %1,24 olarak gerçekleşmiştir. Bu problemlerde algoritmanın BARON'un üst sınır değeri ile olan yüzde farkı en iyi sonuçlar için %3,66, ortalamada %3,80, en kötüler için ise %4,01 olmuştur.

4.2.5 Değerlendirme

Tezin bu bölümünde tek bir İHABİ'nin bulunduğu bir KHA tasarımı ele alınmış ve bu sistem için İHABİ'nin yerseçim kararı ile birlikte hem kullanıcılara ayrılacak bant genişliği kararları hem de bu kullanıcılara verilecek hizmet için gerekli ana taşıyıcı bağlantısının kurulacağı KBİ'nin seçim kararları verilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak yeni bir karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu geliştirilmiş, sonrasında bu formülasyon özelinde yerseçim kararları ile kaynak atama kararlarının ardışık olarak verildiği sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma performansının test edilmesi amacıyla yapay problemler türetilmiş ve bu problemler hem BARON çözücüsü hem de algoritma ile çözdürülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçları incelendiğinde, geliştirilen algoritmanın çözüm süreleri açısından BARON'dan oldukça iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, çözüm kalitesi açısından da BARON'dan elde edilen amaç fonksiyonunun alt sınır değerlerinden ortalama %7,37 daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Üst sınır değerlerine bakıldığında BARON'un kendi OU değeri %15,01 iken algoritmanın üst sınır

değerlerine uzaklığı ortalama %6,26 olmuştur. Bu sonuçlar, geliştirilen algoritmanın makul sürelerde iyi sonuçlar almak için kullanılabileceğini göstermektedir.

4.3 Statik Çoklu İHABİ Yerleşim ve Kaynak Atama Problemi

Tezin bu bölümünde bir önceki bölümde tanımlanan sistem modeli daha genel hale getirilerek yine statik varsayımıyla bu kez birden fazla İHABİ'nin hizmet verebildiği KHA'lar için yerleşim ve kaynak atama problemi ele alınmıştır. Önceki bölüme benzer şekilde ilk olarak sistem modeli ve matematiksel model, sonrasında oluşturulan model için geliştirilen çözüm algoritması açıklanmıştır. Bu sistem için de farklı senaryolar için test problemleri üretilmiş ve geliştirilen algoritmanın performansı irdelenmiştir. Bu problem özelinde kullanılan notasyon, Çizelge 4.9'da özetlenmiştir.

4.3.1 Sistem modeli

Çok İHABİ'nin kullanıcılara hizmet verebildiği KHA'lar, tek İHABİ'li ağlara nazaran çok daha karmaşık yapılar içermektedir. Her bir İHABİ genellikle aynı KBI'lerden beslendikleri için sinyal iletimi ve işlenmesi sırasında parazit oluşması ve sinyal

Çizelge 4.9: Statik kapasiteli çok İHABİ'li KHA formülasyonunda kullanılan semboller ve tanımları.

Sembol	Açıklama
$\mathcal{I} = \{1, \dots, n\}$	Kullanıcı kümesi
$\mathcal{L} = \{1, \dots, s\}$	KBI kümesi
$\mathcal{J} = \{1, \dots, m\}$	İHABİ kümesi
$Q \subseteq \mathbb{R}^3$	İHABİ hizmet alanı
$S \subseteq Q$	Kullanıcı alanı
$y_i'' \subseteq S$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının konumu
$v_j \in \mathbb{R}$	$j \in \mathcal{J}$ İHABİ'sinin aktivasyon maliyeti
$c_R \in \mathbb{R}$	Birim getiri katsayısı
$\rho^- \in \mathbb{R}_+$	Kullanıcılara verilmesi gereken minimum bağlantı hızı
$\rho^+ \in \mathbb{R}_+$	Kullanıcılara verilmesi gereken maksimum bağlantı hızı
$\psi_l \in \mathbb{R}$	$l \in \mathcal{L}$ KBI'sinin toplam bant genişliği
$z_l \in \mathbb{R}$	$l \in \mathcal{L}$ KBI'sinin birim bant genişliği maliyeti
$\Phi_{jl} \in \mathbb{R}$	$l \in \mathcal{L}$ KBI'sinden $j \in \mathcal{J}$ İHABİ'sine ayrılan bant genişliği
$b_{ij} \in \mathbb{R}$	$j \in \mathcal{J}$ İHABİ'sinden $i \in \mathcal{I}$ kullanıcısına ayrılan bant genişliği
$T_{ij} \in \mathbb{B}$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının $j \in \mathcal{J}$ İHABİ'sine atanıp atanmadığını gösteren ikili değişken
$W_j \in \mathbb{B}$	$j \in \mathcal{J}$ İHABİ'sinin aktive edilip edilmediğini gösteren ikili değişken

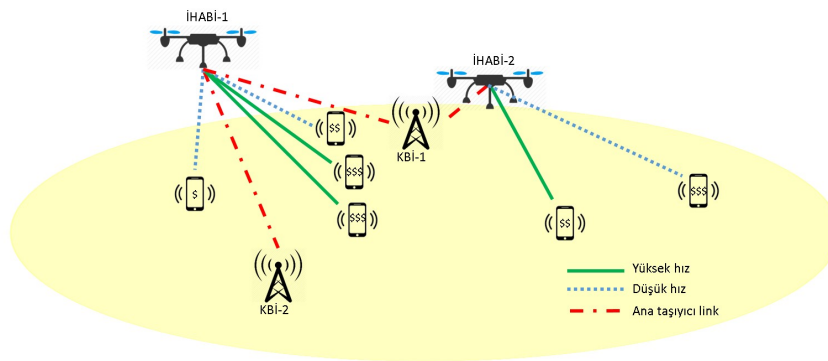
kalitesinin azalması muhtemeldir. Ancak, bu husus hem sistem modelini hem de matematiksel modeli oldukça karmaşık hale getirmektedir. Literatürde, birden fazla İHABİ'nin kullanıldığı KHA'larda, kapsama alanının enbüyüklenmesi [39] ve gecikme sürelerinin enküçüklenmesi [37] için çalışmalar olsa da problemin çözümünün ve uygulanabilirliğinin zor olması sebebiyle genellikle parazit olmadığı durumlar ele alınmış ve bu problemlerden bir temel oluşturularak parazit olan durumlara çeşitli yaklaşımlar getirilmeye çalışılmıştır. Bu bölümde tasarlanan KHA'da da parazit olmadığı varsayılmış, parazit olan durum gelecek çalışma alanı olarak bırakılmıştır.

Şekil 4.8'de 2 İHABİ, 2 KBİ ve 2 farklı bağlantı hızı alternatifi olan bir KHA örneği gösterilmiştir. Yerseçimi yapılacak İHABİ sayısı m 'nin bilindiği varsayılmakta olup, $\mathcal{J} = \{1, 2, \dots, m\}$ kümesi tüm İHABİ'lerin kümesini ifade etmektedir. Her bir İHABİ j 'nin aktif kullanılması, diğer bir deyişle en az bir kullanıcıya hizmet vermesi, durumunda $v_j \geq 0$ aktivasyon maliyeti oluşmaktadır. Bu maliyetin İHABİ'lerin satın alma ve işletme maliyetlerinin tamamını içerdiği varsayılmıştır.

Tek İHABİ'li KHA'dan farklı olarak bu bölümde tasarlanan KHA ile, KBİ'lerce hizmet verilemeyen tüm kullanıcıların minimum bir bağlantı hızı ile kapsanması hedeflenmektedir. Bu durum özellikle bant genişliği miktarı açısından, tek İHABİ olan sisteme göre çok daha fazla kaynak kullanımı gerektirdiğinden, İHABİ'lerin tüm KBİ'ler ile ana taşıyıcı link kurması mümkün kılınmıştır. Bununla birlikte, kullanıcıların getiri modeli de tek İHABİ'li KHA'dan farklı olarak hizmet verilen bağlantı hızının doğrusal bir fonksiyonu ile modele dahil edilmiştir, d.d. $u(R) = c_R \times R$.

4.3.2 Matematiksel model

Matematiksel modelde KBİ'ler ve kullanıcılar sırasıyla $\mathcal{L} = \{1, \dots, s\}$ ve $\mathcal{I} = \{1, \dots, n\}$ kümeleriyle gösterilmektedir. Her KBİ l 'nin, ψ_l bant genişliği bulunduğu ve



Şekil 4.8: Çok İHABİ içeren KHA için temsili gösterim.

bu değerlerin bilindiği varsayılmaktadır. Bağlantı hızı fonksiyonu Bölüm 2.2’de açıklandığı şekliyle R fonksiyonu ile gösterilmektedir.

Tek İHABİ’li sistemde kabul edilen KBİ’lerin mevcut tüm bant genişliğini doğrudan İHABİ’ye sağlayabildiği varsayımı, bu KHA için de geçerli olup, KBİ l ’den İHABİ j ’ye ayrılan bant genişliği, $\Phi_{jl} \in [0, B_l]$, İHABİ j ’den kullanıcı i ’ye ayrılan bant genişliği ise b_{ij} sürekli karar değişkenleri ile gösterilecektir. KBİ l ’den ayrılan birim bant genişliği maliyetinin $z_l \geq 0$ olduğu varsayılmaktadır. Kullanıcı i ’nin İHABİ j ’den hizmet alıp almadığı $T_{ij} \in \{0, 1\}$ ikili değişkeni ile, İHABİ j ’nin aktif olarak kullanılıp kullanılmadığı $W_j \in \{0, 1\}$ ikili değişkeni ile kontrol edilecektir. Bu yeni karar değişkenleriyle birlikte oluşturulan karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama fonksiyonu aşağıdaki şekilde kurulmuştur:

$$P_2 : \begin{array}{l} \text{enb} \\ \mathbf{X}^d \in Q^m, \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m} \\ \mathbf{T} \in \mathbb{B}^{n \times m}, \mathbf{W} \in \mathbb{B}^m \\ \Phi \in \mathbb{R}^{m \times s} \end{array} P_2(\mathbf{X}^d, \mathbf{B}, \mathbf{T}, \mathbf{W}, \Phi) = \sum_{i \in \mathcal{I}} u_i \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} R_{ij} T_{ij} \right) - \sum_{j \in \mathcal{J}} v_j W_j - \sum_{l \in \mathcal{L}} z_l \sum_{j \in \mathcal{J}} \Phi_{jl}$$

öyle ki:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} R_{ij} T_{ij} \leq W_j \sum_{l \in \mathcal{L}} K_{jl}, j \in \mathcal{J} \quad (4.23)$$

$$\rho^- \leq \sum_{j \in \mathcal{J}} R_{ij} T_{ij} \leq \rho^+, i \in \mathcal{I} \quad (4.24)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} T_{ij} = 1, i \in \mathcal{I} \quad (4.25)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \Phi_{jl} \leq \psi_l, l \in \mathcal{L} \quad (4.26)$$

Yukarıdaki formülasyonda kullanım kolaylığı açısından $R_{ij} = R(x_j^d, y_i^u, b_{ij})$ ve $K_{jl} = K(x_j^d, y_l^k, \phi_{jl})$, sırasıyla, kullanıcılara sağlanan bağlantı hızlarını ve İHABİ’lerin ana taşıyıcı kapasitelerini göstermektedir. Amaç fonksiyonu, KHA ile elde edilecek karı enbüyükmeye çalışmaktadır. Fonksiyonun ilk terimi tüm kullanıcılardan elde edilen getiriye, ikinci terimi İHABİ’lerin aktivasyonundan kaynaklanan maliyetleri, üçüncü terim ise KBİ’lerden kullanılan bant genişliğinin maliyetini ifade etmektedir. (4.23) ile hiçbir İHABİ’nin ana taşıyıcı kapasitesinin üzerinde bağlantı hızı sağlayamaması, (4.24) ile her bir kullanıcının en az ρ^- , en fazla ρ^+ bağlantı hızı ile hizmet alması, (4.25) ile her bir kullanıcının yalnızca bir İHABİ’den hizmet alması ve (4.26) ile İHABİ’lere sağlanan ana taşıyıcı bant genişliğinin KBİ’lerin sahip olduğu bant genişliğini aşmaması sağlanmaktadır. (4.24) içinde bağlantı hızlarına bir üst sınır tanımlanarak kullanıcılara adil bir hizmet dağılımı olması hedeflenmiştir.

Bağlantı hızı fonksiyonu konveks ya da konkav olmayan bir fonksiyon olduğundan bu formülasyon karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama ailesine ait

bir formülasyondur. Bununla birlikte, bu formülasyon, KBİ'ler ile İHABİ'ler arasındaki ana taşıyıcı bağlantı kapasiteleri ile kullanıcıların getirileri uygun bir değere sabitlendiğinde, NP-Zor olduğu bilinen tek kaynaklı kapasiteli çoklu Weber problemine [99] indirgenebilmektedir. Dolayısıyla, P_2 kapasiteli Weber probleminin bir genelleştirmesi olarak da ele alınabilir.

Literatürdeki kapasiteli Weber problemleri genellikle kapsama fonksiyonunun sadece mesafeye bağlı olduğu problemleri ele almaktadır. Bununla birlikte tesis kapasitelerinin de bilindiği ve buldukları konumdan ve mesafeden bağımsız olduğunu varsaymaktadır. Dolayısıyla, kurulan bu yeni formülasyon mevcut yaklaşımlarla çözülememektedir. Bu amaçla, bir sonraki bölümde bu probleme uygun yeni bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

4.3.3 Çözüm yöntemi

Çoklu İHABİ içeren KHA için de bir önceki bölümde kullanılan çözüm yöntemi DYKA ile benzer bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Ancak, tek İHABİ'li sistemde, İHABİ konumu sabitlendiğinde orijinal problemi kolaylaştıran bazı yaklaşımlar çoklu İHABİ sisteminde geçerliliğini kaybetmektedir. Örneğin, tek İHABİ'li KHA'da, İHABİ konumu sabitken İHABİ'nin hangi KBİ ile bağlantı kurması gerektiği KBİ'lerden İHABİ için ayrılan bant genişliği miktarı sabit olduğundan tüm KBİ'ler özelindeki bir karşılaştırma ile bulunabilirken ($O(s \log s)$), çok İHABİ'li KHA'da her bir İHABİ'nin farklı KBİ'lerden farklı miktarlarda bant genişliği alabilmesinden dolayı bu denli kolay bir karşılaştırma ile çözüm bulmak mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, bu zorlukları da göz önüne alan yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Bu bölümde de DYKA baz alınarak bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Dolayısıyla, her bir adımında sabit bir İHABİ konumlandırma stratejisine göre kullanıcıların ve ana taşıyıcı linklerin bant genişliği atamalarına karar verilmiş, sonrasında bu atama kararları kullanılarak İHABİ konumları güncelleştirilmiştir. Bant genişliği kararları için tek İHABİ'li sistemde çözümü nispeten kolay olan bir sırt çantası problemi optimal olarak çözülürken, çoklu İHABİ sistemlerinde bu kararların verilmesi için ilk olarak açgözlü bir algoritma kullanılmış sonrasında komşu arama algoritması ile çözüm iyileştirilmeye çalışılmıştır. İHABİ konumlarının güncellenmesi için ise tekli İHABİ sistemlerine benzer şekilde her bir İHABİ özelinde bir saha arama algoritması geliştirilmiştir. Art arda gelen adımlarda İHABİ konumları değişmeyinceye ya da önceden belirlenen sabit bir adım sayısına erişinceye kadar aynı adımlar tekrarlanmaktadır. Geliştirilen ana algoritma ve bu algoritma içinde kullanılan alt algoritmalar Algoritma 3, 4, 5, 6 ve 7 ile gösterilmiştir.

Algoritma 3 Çoklu İHABİ sistemi için ana çözüm algoritması.

Girdi: $\mathbf{Y}^u, \mathbf{Y}^k, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \psi, \rho^-, \rho^+, mak_iter, mak_arama, \varepsilon_d, \varepsilon_b, \chi_{xy}, \chi_h$

- 1: $obj^* \leftarrow 0, t \leftarrow 0, degisim = \mathbf{Doğru}$.
 - 2: Rasgele bir İHABİ konumlandırması bul $(\bar{\mathbf{X}}_t^d)$.
 - 3: **Geçerli** $degisim = \mathbf{Doğru}$ ve $t \leq mak_iter$ yap
 - 4: $\bar{\mathbf{B}}_t, \bar{\mathbf{T}}_t, \bar{\mathbf{W}}_t, \bar{\phi}_t \leftarrow$ Algoritma 4 $(\bar{\mathbf{X}}_t^d, \mathbf{Y}^u, \mathbf{Y}^k, \rho^-, \rho^+, \psi, \varepsilon_d, \varepsilon_b)$
 - 5: **Eğer** $P_2(\bar{\mathbf{X}}_t^d, \bar{\mathbf{B}}_t, \bar{\mathbf{T}}_t, \bar{\mathbf{W}}_t, \bar{\phi}_t) > obj^*$ ise
 - 6: $obj^* \leftarrow P_2(\bar{\mathbf{X}}_t^d, \bar{\mathbf{B}}_t, \bar{\mathbf{T}}_t, \bar{\mathbf{W}}_t, \bar{\phi}_t), \mathbf{X}^{d,*} \leftarrow \bar{\mathbf{X}}_t^d, \mathbf{B}^* \leftarrow \bar{\mathbf{B}}_t, \mathbf{T}^* \leftarrow \bar{\mathbf{T}}_t, \mathbf{W}^* \leftarrow \bar{\mathbf{W}}_t,$
 $\phi^* \leftarrow \bar{\phi}_t$
 - 7: **Bitir Eğer**
 - 8: $degisim \leftarrow \mathbf{Yanlış}$
 - 9: **Her bir** $j = 1, \dots, m$ yap
 - 10: $x_{t,j}^d \leftarrow$ Algoritma 7 $(Q, \mathbf{Y}^u, \mathbf{Y}^k, \bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\phi}, \chi_{xy}, \chi_h)$
 - 11: **Eğer** İHABİ konumu değişti ise
 - 12: $\bar{\mathbf{X}}_t^d$ de j . satırı güncelle. $degisim \leftarrow \mathbf{Doğru}$
 - 13: **Bitir Eğer**
 - 14: **Bitir Her bir**
 - 15: **Eğer** $P_2(\bar{\mathbf{X}}_t^d, \bar{\mathbf{B}}_t, \bar{\mathbf{T}}_t, \bar{\mathbf{W}}_t, \bar{\phi}_t) > obj^*$ ise
 - 16: $obj^* \leftarrow P_2(\bar{\mathbf{X}}_t^d, \bar{\mathbf{B}}_t, \bar{\mathbf{T}}_t, \bar{\mathbf{W}}_t, \bar{\phi}_t), \mathbf{X}^{d,*} \leftarrow \bar{\mathbf{X}}_t^d, \mathbf{B}^* \leftarrow \bar{\mathbf{B}}_t, \mathbf{T}^* \leftarrow \bar{\mathbf{T}}_t, \mathbf{W}^* \leftarrow \bar{\mathbf{W}}_t,$
 $\phi^* \leftarrow \bar{\phi}_t$
 - 17: **Bitir Eğer**
 - 18: $t \leftarrow t + 1$
 - 19: **Bitir Geçerli**
 - 20: $\mathbf{B}^*, \mathbf{T}^* \leftarrow$ Algoritma 6 $(\mathbf{X}^{d,*}, \mathbf{B}^*, \mathbf{T}^*, \mathbf{W}^*, \phi^*, \mathbf{Y}^u, obj^*, \varepsilon_b, mak_arama)$
 - 21: **Çıktı:** $obj^*, \mathbf{X}^{d,*}, \mathbf{B}^*, \mathbf{T}^*, \mathbf{W}^*, \phi^*$
-

Algoritma 3 ile çoklu İHABİ KHA'ları için tasarlanan ana algoritma özetlenmektedir. Bu algoritmada, mak_iter , ana algoritmanın maksimum adım sayısını, obj^* , algoritma sürecinde elde edilen en iyi amaç fonksiyon değerini, $degisim$, art arda gelen algoritma adımlarında İHABİ konumlarının değişip değişmediğini gösteren doğru/yanlış göstergesini, üzerinde “-” ve “*” simgesi olan vektör ve matrisler, ilgili değişkenin hesaplanmış değerlerini ve o ana kadar elde edilen en iyi sonuçlarını içeren vektör ve matrisleri, t , algoritma adımını, değişken vektör ve matrislerindeki t indeksi ilgili değişkenlerin t adımıdaki değerlerini göstermektedir. mak_arama , ε_d , χ_{xy} ve χ_h , ana algoritma içinde kullanılan diğer alt algoritmalarda kullanılan parametreleri, ε_b ise tüm algoritmalar içinde sabit İHABİ konumuna göre çizgi arama algoritması kullanılarak bulunacak bant genişliğinin istenen değere ne oranda yakın olması gerektiğini belirten toleransı göstermektedir.

Ana algoritma, rasgele bir İHABİ konumlandırması ile başlamaktadır. Her bir adımda

Algoritma 4 Bant genişliği atama kararları belirleme algoritması.

Girdi: $\mathbf{X}^d, \mathbf{Y}^u, \mathbf{Y}^k, \rho^-, \rho^+, \psi, \varepsilon_d, \varepsilon_b$

- 1: $olurlu = \mathbf{Yanlış}, sinyal = 1, \bar{R}_i \leftarrow \rho^+, i \in \mathcal{I}$
- 2: **Geçerliiyken** $olurlu = \mathbf{Yanlış yap}$
- 3: $\bar{\mathbf{B}} \leftarrow \text{çizgi_arama}(\mathbf{X}^d, \mathbf{Y}^u, \mathbf{R})$ {Her bir kullanıcı-İHABİ ikilisi için gerekli bant genişliği miktarını çizgi arama algoritması ile bul}
- 4: $j'_i = \arg \min_{j \in \mathcal{J}} \{b_{ij}\}, i \in \mathcal{I}. \bar{T}_{ij'_i} \leftarrow 1, i \in \mathcal{I}, \bar{T}_{ij} \leftarrow 0, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} - \{k'_i\}$
- 5: $\bar{\Phi}_j \leftarrow \sum_{i \in \mathcal{I}} b_{ij} \bar{T}_{ij}, j \in \mathcal{J}. \mathbf{Eğer} \bar{\Phi}_j > 0 \mathbf{ise} \bar{W}_j \leftarrow 1$
- 6: **Eğer** $\sum_{j \in \mathcal{J}} \bar{\Phi}'_j \leq \sum_{l \in \mathcal{L}} \psi_l \mathbf{ise}$
- 7: **Her bir** $j = 1, \dots, m \mathbf{ yap}$
- 8: \mathcal{L}_j , KBI'lerin j İHABİ'sine olan uzaklıklarına göre sıralandığı küme, l_a , bu kümenin a . elemanı olsun
- 9: **Her bir** $a = 1, \dots, s \mathbf{ yap}$
- 10: $\bar{\Phi}_{j l_a} \leftarrow \min \{\bar{\Phi}'_j, \psi_{l_a}\}, \bar{\Phi}'_j \leftarrow \bar{\Phi}'_j - \bar{\Phi}_{j l_a}, \psi_{l_a} \leftarrow \psi_{l_a} - \bar{\Phi}_{j l_a}$
- 11: **Eğer** $\bar{\Phi}'_j = 0 \mathbf{ise} \mathbf{BİTİR}$
- 12: **Bitir Her bir**
- 13: **Bitir Her bir**
- 14: **Değilse**
- 15: $\mathcal{I}^+ \subseteq \mathcal{I} := \{i : \bar{R}_i > \rho^-\}$
- 16: **Eğer** $\mathcal{I}^+ = \emptyset \mathbf{ise}$
- 17: $sinyal = 0, \mathbf{break}$
- 18: **Değilse**
- 19: Algoritma 5 ile bir kullanıcının bağlantı hızını düşür ve **Git** Adım 6
- 20: **Bitir Eğer**
- 21: **Bitir Eğer**
- 22: $\bar{\mathbf{K}} \leftarrow K(\mathbf{X}^d, \mathbf{Y}^u, \bar{\Phi})$
- 23: **Eğer** $\bar{K}_j \geq \sum_{i \in \mathcal{I}} \bar{R}_i \bar{T}_{ij}, \forall j \in \mathcal{J} \mathbf{ise}$
- 24: $olurlu \leftarrow \mathbf{Doğru}$
- 25: **Değilse**
- 26: Algoritma 5 ile kullanıcıların bağlantı hızlarını birer birer düşür ve **Git** Adım 6.
- 27: **Eğer** Kullanıcı kalmadı **ise** $sinyal = 0, \mathbf{BİTİR}$
- 28: **Bitir Eğer**
- 29: **Bitir Geçerliiyken**
- 30: **Eğer** $sinyal = 0 \mathbf{ise}$
- 31: **Çıktı:** $olurlu$
- 32: **Değilse**
- 33: **Çıktı:** $\bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\Phi}$
- 34: **Bitir Eğer**

ilk olarak sabit İHABİ konum stratejisine göre kullanıcıların ve KBI'lerin bant genişliği atama kararlarının verilmesi için Algoritma 4 uygulanmaktadır (Satır 4). Bulunan atama kararları ile mevcut konumlardan elde edilen amaç fonksiyon değeri mevcut en iyi amaç fonksiyon değerinden iyi ise hem en iyi amaç fonksiyon değeri hem de ilgili tüm değişkenlerin en iyi değerleri güncellenmektedir (Satır 5-7). Bu adımlarda bulunan bant genişliği atama kararları ile her bir İHABİ özelinde hangi kullanıcılara ne kadarlık

Algoritma 5 Bağlantı hızı düşürme algoritması.

Girdi: $\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{Y}^u, \mathbf{X}^d, \varepsilon_d$

- 1: $\bar{\mathbf{B}}^+ = \min \left\{ b : R(x_j^d, y_i^u, b) \geq \bar{R}_i, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \right\}$
 - 2: $\bar{\mathbf{B}}^- = \min \left\{ b : R(x_j^d, y_i^u, b) \geq \bar{R}_i - \varepsilon_d, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \right\}$
 - 3: $j_i^+ = \arg \min_{j \in \mathcal{J}} \left\{ \bar{b}_{ij}^+ \right\}, i \in \mathcal{I}, j_i^- = \arg \min_{j \in \mathcal{J}} \left\{ \bar{b}_{ij}^- \right\}, i \in \mathcal{I}$
 - 4: $\Delta_i \leftarrow [u(\bar{R}_i) - u(\bar{R}_i - \varepsilon_d)] / [\bar{b}_{ij_i^+}^+ - \bar{b}_{ij_i^-}^-], i \in \mathcal{I}$.
 - 5: $i' = \arg \min_{i \in \mathcal{I}} \{ \Delta_i \}. \bar{R}_{i'} \leftarrow \max \{ \rho^-, \bar{R}_{i'} - \varepsilon_d \}. \bar{T}_{i'j_i^+} \leftarrow 0, \bar{T}_{i'j_i^-} \leftarrow 1$
 - 6: **Çıktı:** $\bar{\mathbf{R}}, \bar{\mathbf{T}}$
-

Algoritma 6 Komşu arama algoritması.

Girdi: $\bar{\mathbf{X}}^d, \bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\Phi}, \mathbf{Y}^u, obj^*, \varepsilon_b, mak_arama$

- 1: $iter_arama = 0, \tilde{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{T}} = \bar{\mathbf{T}}$
 - 2: **Geçerliyen** $iter_arama \leq mak_arama$ **yap**
 - 3: $\tilde{\mathbf{T}}$ matrisinden değeri 1 olan rasgele iki kullanıcı-İHABİ ataması seç, $\tilde{T}_{ij_i} > 0, \tilde{T}_{i'j_{i'}} > 0$.
 - 4: $\tilde{b}_{ij_i} \leftarrow 0, \tilde{b}_{i'j_{i'}} \leftarrow 0, \tilde{b}_{ij_i} \leftarrow \bar{b}_{ij_i}, \tilde{b}_{i'j_{i'}} \leftarrow \bar{b}_{i'j_{i'}}, \tilde{T}_{ij_i} \leftarrow 0, \tilde{T}_{i'j_{i'}} \leftarrow 0, \tilde{T}_{ij_i} \leftarrow 1, \tilde{T}_{i'j_{i'}} \leftarrow 1$
 - 5: **Eğer** Değişim olurlu ise **ise**
 - 6: **Eğer** $P_2(\bar{\mathbf{X}}^d, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\Phi}) > obj^*$ **ise**
 - 7: $obj^* \leftarrow P_2(\bar{\mathbf{X}}^d, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\Phi}), \bar{b}_{ij_i} \leftarrow 0, \bar{b}_{i'j_{i'}} \leftarrow 0, \bar{b}_{ij_i} \leftarrow \tilde{b}_{ij_i}, \bar{b}_{i'j_{i'}} \leftarrow \tilde{b}_{i'j_{i'}}, \bar{T}_{ij_i} \leftarrow 0, \bar{T}_{i'j_{i'}} \leftarrow 0, \bar{T}_{ij_i} \leftarrow 1, \bar{T}_{i'j_{i'}} \leftarrow 1$
 - 8: **Bitir Eğer**
 - 9: **Değilse**
 - 10: $iter_arama \leftarrow iter_arama + 1$
 - 11: **Bitir Eğer**
 - 12: **Bitir Geçerliyen**
 - 13: **Çıktı:** $\bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{B}}$
-

Algoritma 7 Tek İHABİ için saha arama algoritması.

Girdi: $Q, \mathbf{Y}^u, \mathbf{Y}^k, \bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\Phi}, \chi_{xy}, \chi_h$

- 1: $\bar{S} = SAHA(Q, \chi_{xy}, \chi_h), \tilde{x}^d = (x^-, y^-, h^-)$ {Alternatif lokasyonlar kümesi \bar{S} 'yi oluştur}
 - 2: **Her bir** $s \in \bar{S}$ **yap**
 - 3: **Eğer** $P_2(s, \bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\Phi}) > P_2(\tilde{x}^d, \bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{T}}, \bar{\mathbf{W}}, \bar{\Phi})$ **ise**
 - 4: $\tilde{x}^d = s$
 - 5: **Bitir Eğer**
 - 6: **Bitir Her bir**
 - 7: **Çıktı:** \tilde{x}^d
-

bant genişliği ile hizmet verileceği, aynı zamanda hangi İHABİ'nin hangi KBİ'ler ile ne kadarlık ana taşıyıcı link kuracağı da belirlenmiş olur. Dolayısıyla, her bir İHABİ kendi başına değerlendirilerek yeni bir konum belirlenebilir. Algoritmanın 9 ve 14

satırları arasında, en az bir kullanıcı atanmış İHABİ'ler için atama kararlarına göre saha arama algoritması uygulanmakta ve İHABİ konumunun değişip değişmediği kontrol edilmektedir. Herhangi bir İHABİ konumu değişmesi *degisim* göstergesini yanlış değeri vereceğinden, algoritmanın sonlanması için tüm İHABİ konumlarının sabit kalması gerekmektedir. Aksi halde bu adımlar *mak_iter* adım olana dek devam ettirilmektedir. İHABİ konumlarının belirlenmesinin ardından, yeni İHABİ konumlarına göre elde edilen amaç fonksiyon değeri mevcut en iyi amaç fonksiyon değerinden iyi ise en iyi amaç fonksiyon değeri ve ilgili tüm değişken değerleri güncellenmektedir (Satır 15-17). Bu sıralama ile her bir adımda sabit İHABİ konumları için bant genişliği atama kararları, sabit atama kararları için de İHABİ konumları güncellenerek döngü tamamlanmaktadır. Tüm bu döngü tamamlandıktan sonra, elde edilen çözümün iyileştirilmesi amacıyla Algoritma 6 ile komşu arama tekniği uygulanmakta ve algoritma sonlandırılmaktadır.

Algoritma 4, sabit bir İHABİ konum stratejisine göre İHABİ'ler için KBI'lerden ve kullanıcılar için İHABİ'lerden ayrılacak bant genişliği atama kararlarının verilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla, ilk olarak kullanıcılara ayrılacak bant genişliği kararları, sonrasında da her bir İHABİ özelinde ana taşıyıcı bant genişliği atama kararları verilmektedir. Algoritma, tüm kullanıcılara verilebilecek en yüksek bağlantı hızı, ρ^+ , verildiği varsayımı ile başlamakta ve bu varsayımla çözümün olumsuz olması halinde sistematik şekilde kullanıcı bağlantı hızları belirli bir değer kadar (ϵ_d) düşürülerek olurlu çözüm bulunmaya çalışılmaktadır. *olurlu* göstergesi, girdi olarak verilen İHABİ konum stratejisine uygun olurlu bir çözüm üretilip üretilmediğini belirten doğru/yanlış göstergesini, $\bar{\mathbf{R}}$, kullanıcıların bağlantı hızı vektörünü, $\bar{\mathbf{K}}$ ise İHABİ'lerin bağlantı hızı kapasiteleri vektörünü göstermektedir.

İlk olarak her bir kullanıcı ve İHABİ ikilisinin varsayılan bağlantı hızı için gerekli bant genişliği bulunmakta, sonrasında her bir kullanıcı kendisine en az bant genişliği ile bu hızı sağlayan İHABİ'ye atanmakta, bu sayede her bir İHABİ için gerekli bant genişliği miktarı hesaplanmaktadır (Satır 3-5). Bant genişliği kararları KHA'da bulunan toplam bant genişliğinden fazla ise Algoritma 5 yardımıyla her bir adımda bir kullanıcı olmak kaydıyla kullanıcıların varsayılan bağlantı hızları ϵ_d kadar düşürülmektedir. Tüm kullanıcıların bağlantı hızı, verilmesi gereken en düşük bağlantı hızı, ρ^- 'ye indiğinde dahi bant genişliği yeterli olmuyorsa, algoritma mevcut İHABİ konum stratejisinin olumsuz olduğunu raporlamaktadır. Aksi halde, her bir İHABİ için kendisine en yakın KBI'den başlanıp, KBI'den alınabilecek bant genişliği de dikkate alınarak ana taşıyıcı bant genişliği ataması yapılmaktadır (Satır 7-13). Ana taşıyıcı bant genişliklerinin belirlenmesinin ardından, önceki adımlarda yapılan bant genişliği kriterinin sağlanıp sağlanmadığı kontrolü bu kez bağlantı hızı kapasitesi için kontrol edilmekte ve benzer şekilde bu kısıt sağlanana dek kullanıcı bağlantı hızları düşürülmektedir (Satır 22-27).

Bu şart için de yine tüm kullanıcılar en düşük bağlantı hızına düşürüldüğünde dahi kapasite yeterli gelmiyorsa, algoritma olursuz çözüm raporlamaktadır.

Algoritma 4 içinde kullanılan ve bağlantı hızı düşürülecek kullanıcıyı belirleyen yöntem Algoritma 5'te verilmiştir. İlk olarak, her bir kullanıcının mevcut bağlantı hızı ve hızın ϵ_d kadar düşürülmesi halinde gerekli bant genişlikleri, $\bar{\mathbf{B}}^+$ ve $\bar{\mathbf{B}}^-$, bulunmakta (Satır 1-2), sonrasında her iki hız özelinde ilgili bağlantı hızını en düşük bant genişliği ile sağlayabilecek İHABİ'ler, \mathbf{j}^+ ve \mathbf{j}^- , belirlenmektedir (Satır 3). Tüm kullanıcılar arasından, bağlantı hızı düşürüldüğündeki olası birim getiri kaybı en düşük olan kullanıcının bağlantı hızı ve ilgili İHABİ atama kararı güncellenerek algoritma sonlandırılmaktadır (Satır 4-5).

Ana algoritmanın son adımında, önceki algoritmalar kullanılarak bulunan İHABİ konumları ve bant genişliği atama kararları, Algoritma 7 ile iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu amaçla, (*mak_arama*) adıma kadar her bir adımda rasgele iki kullanıcı-İHABİ ataması belirlenmekte (Satır-1) ve belirlenen kullanıcıların İHABİ ve bant genişliği atama kararları birbirleriyle değiştirilerek yeni bir komşu çözüm elde edilmektedir (Satır-2). Bu yeni çözüm, ana taşıyıcı bant genişliği ve bağlantı hızı kapasitelerini aşmıyor ve amaç fonksiyon değerinde iyileşme sağlanıyorsa, seçilen kullanıcıların atama kararları bu değişime göre revize edilmektedir (Satır-6-8).

Çözüm yönteminin karmaşıklığı düşünüldüğünde, ana algoritmanın her bir adımında Algoritma 4 bir kez, Algoritma 7 m kez kullanılmaktadır. Ayrıca, bu adımların ardından bir kez Algoritma 6 kullanılmaktadır. Algoritma 4 içerisinde, Algoritma 6, her bir kullanıcı için bağlantı hızı ρ^+ 'dan ρ^- 'ye düşene dek kullanılacağından, $\lceil x \rceil$, x 'ten büyük en küçük tam sayıyı göstermek üzere, en fazla $n \times \lceil (\rho^+ * \rho^-) / \epsilon_d \rceil$ kez çağrılacaktır. Bunun yanı sıra, İHABİ, KBİ ana taşıyıcı atamaları da en fazla $m \times s$ kez değerlendirilmektedir. Algoritma 6, her çağrıldığında tüm kullanıcılar için birim getiri kaybı bulma ve bu değerler arasından en küçüğünü seçme operasyonları için $n \log n$ süre ile çalışacaktır. Sonuç olarak ana algoritmanın her bir adımı en kötü durumda $O(n \lceil (\rho^+ * \rho^-) / \epsilon_d \rceil n \log n + ms) \approx O(n^2 \log n + ms)$ karmaşıklıkta çalışacaktır. İHABİ konumlarının sabitlenmemesi durumunda en fazla *mak_arama* adım için bu karmaşıklık gerçekleşecektir.

4.3.4 Deneysel çalışma sonuçları

Bu bölümde, çoklu İHABİ içeren KHA'lar için farklı veri setleri üzerinde bir önceki bölümde açıklanan DYKA tabanlı çözüm algoritmasının performansı ölçülmüştür. Bu problem için literatürde tanımlı bir veri seti bulunmadığından farklı parametreler içeren

birçok problem üretilmiş ve algoritma performansı bu problemlerin optimal çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Algoritmalar Java SDK v1.8 programlama dili kullanılarak kodlanmış ve tüm deneyler Intel i7-6700 CPU @3.40 GHz, 64-bit, 8GB RAM Windows 10 işletim sistemli bir bilgisayar ile yapılmıştır.

Optimal çözümler, NEOS platformunda [98] bulunan BARON çözücüsü ile 4 saatlik zaman limiti altında elde edilmiştir. Ancak, BARON, özellikle kullanıcı sayısı arttıkça olurlu bir çözüm üretememektedir. Bu sebeple, orijinal problemin bazı fonksiyonları gevşetilerek çözümü daha kolay olan bir formülasyon geliştirilmiş (bkz. Ek-4) ve yüksek kullanıcı sayılı problemlerdeki karşılaştırmalar için bu gevşetilmiş formülasyonun çözümlerinden de faydalanılmıştır.

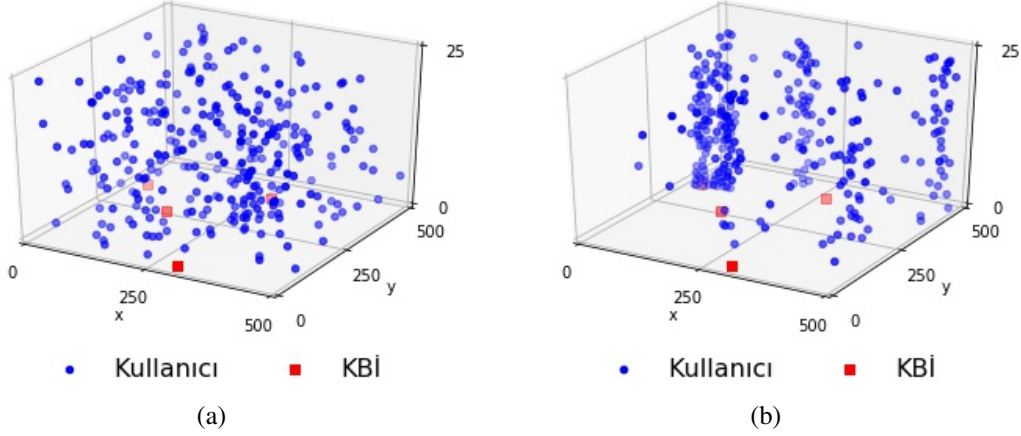
4.3.4.1 Veri hazırlama

Problemler küçük, orta ve büyük ölçekli olmak üzere 3 grupta hazırlanmıştır. Kullanıcı sayıları, küçük ölçekli problemlerde $n = 10, 20, 30, 100$, orta ölçekli problemlerde $n = 200, 300$ ve büyük ölçekli problemlerde $n = 500, 1000, 2000, 5000$ olarak belirlenmiştir. Her bir kullanıcı sayısı için tüm problemlerde KBİ sayısı $s = 1, 2, 3, 4$, İHABİ sayısı $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ve KBİ'lerdeki toplam bant genişliği 20, 30 ve 40 MHz alternatiflerinden biri olacak şekilde 72 farklı senaryo oluşturulmuştur. Yalnızca 5000 kullanıcı problemlerde, olursuz çözümleri engellemek adına, bant genişliği 50, 60 ve 70 MHz alternatiflerinden seçilmiştir. Sonuçta 720 farklı problem türetilmiştir.

Problemlerde kullanıcı ve KBİ'lerin lokasyonları birbirlerinden bağımsız olarak, Bölüm 4.2.4.1'de açıklanan PNS'ye benzer şekilde belirlenmiştir. KBİ lokasyonları bir önceki bölümle aynı olmak üzere, bir önceki bölümden farklı olarak, bu problemde kullanıcı konumlarının yükseklik boyutu 0 varsayılmamış ve 25 metreye kadar rasgele belirlenmiştir. Bu amaçla, cazibe merkezleri de yine 25 metre yüksekliğe kadar rasgele bir yükseklikte belirlenmiştir.

Cazibe merkezi sayısı her bir senaryo için 1 ile 10 arasından, cazibe merkezi etrafına yerleştirilecek kullanıcı oranı ise %0 ile %100 arasından rasgele bir sayı ile belirlenmiştir. 300 kullanıcı iki farklı senaryonun $500 \times 500m$ 'lik yatay zeminde örnek gösterimi Şekil 4.9'da sunulmuştur. Türetilen tüm problemlere <http://dx.doi.org/10.17632/fyb6pf9f6n.2> bağlantısından ulaşılabilir.

KHA özelindeki haberleşme kanalı parametreleri için tek İHABİ'li sistemdeki aynı parametreler kullanılmıştır (bkz. Çizelge 4.4). Küçük ve orta ölçekli problemlerde, kullanıcılara sağlanması gereken en düşük bağlantı hızı en azından ses ve mesajlaşmaya



Şekil 4.9: 300 kullanıcıli iki farklı test probleminde farklı KBİ ve kullanıcı yerleşim planlarının gösterimi. (a) Cazibe merkezi sayısı = 3, Merkez etrafına yerleştirilen kullanıcı oranı = %14, $s = 4$. (b) Cazibe merkezi sayısı = 3, Merkez etrafına yerleştirilen kullanıcı oranı = %92, $s = 4$.

olanak sağlaması adına 1 Mbps, en yüksek bağlantı hızı ise video görüntülemeye de olanak sağlamak adına 8 Mbps olarak belirlenmiştir. Olursuz çözümleri engellemek adına büyük ölçekli problemlerde bu değerler en küçük bağlantı hızı için mesajlaşmaya olanak sağlayan 0,1 Mbps'e, en yüksek bağlantı hızı için ses hizmetlerine olanak sağlayan 1 Mbps'e düşürülmüştür.

Algoritmanın farklı yerlerinde bant genişliği hesaplaması için kullanılan çizgi arama algoritmasında istenen bağlantı hızından 10^{-3} Mbps uzaklık yeterli görülmüştür, d.d. $\epsilon_b = 10^{-3}$. Diğer taraftan, bant genişliği atama algoritmasında kullanıcıların bağlantı hızlarının adım adım düşürülmesi için baz değer 1 Mbps olarak belirlenmiştir, d.d. $\epsilon_d = 1$. Bu değer, büyük ölçekli problemlerde 0,1 Mbps olarak güncellenmiştir. Kullanıcı getiri fonksiyonunda kullanılan bağlantı hızı çarpanı, c_R , 50 ile 100 arasından rasgele belirlenmiştir. Son olarak, İHABİ aktivasyon maliyetleri, \mathbf{v} , her bir senaryoda 500 ile 1000 arasında, bant genişliği kullanma maliyeti 10^{-3} ile 10^{-4} arasında rasgele bir sayı ile belirlenmiştir.

4.3.4.2 Parametre kalibrasyonu

Ana algoritma içerisinde kullanılan saha arama algoritmasının performansı, ana algoritmanın performansını etkilemektedir. Bu algorithmada da yatay ve dikey düzlemin hangi aralıklarda taranacağı çözüm süresi ve çözüm kalitesini etkileyen unsurlardır. Bu aralıklar algorithmaya girdi olarak verilen χ parametreleri ile belirlenmektedir. Bu aralıkların çok sık olması çözüm hassasiyetini artırırken çözüm süresini azaltmakta,

tersi bir yaklaşım da kısa sürede optimalin uzağında çözümler alınmasına sebep olmaktadır. Bu parametrelerin optimizasyonu için 100 kullanıcı, 2 KBİ, 1 İHABİ ve toplam bant genişliğinin 20 MHz olduğu 20 farklı öncül problem üretilmiş ve χ parametrelerinin 10 ile 50 arasında farklı değerleri test edilmiştir. Her bir problem 20 tekrar ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelgenin ilk iki sütunu sırasıyla yatay ve dikey düzlemin kaç metre aralıklarla bölüneceğini, üçüncü sütunu bu değerlere göre algoritmanın ortalama çalışma süresini, son iki sütunu ise 20 tekrarın ortalama ve en büyük optimallikten uzaklığını (OU) göstermektedir. OU değerleri, Obj_B ve Obj_A sırasıyla BARON ve algoritmadan elde edilen amaç fonksiyon değerlerini göstermek üzere, $100 \times (Obj_B - Obj_A) / Obj_B$ formülü ile bulunmuştur. Sonuç olarak, (10,10) seçeneği en iyi OU değerini verse de çözüm

Çizelge 4.10: Statik çok İHABİ'li KHA çözümü için geliştirilen saha arama algoritması parametrelerinin kalibrasyonu.

χ_{xy} (m)	χ_h (m)	CPU (s)	OU _{ort} (%)	OU _{mak} (%)
10	10	12,81	2,36	3,85
	20	6,62	2,45	3,94
	30	4,70	2,44	3,91
	40	3,63	2,46	3,94
	50	3,00	2,41	3,98
20	10	3,39	2,39	3,89
	20	1,85	2,48	3,98
	30	1,35	2,52	3,92
	40	1,08	2,46	3,98
	50	0,90	2,44	3,94
30	10	1,58	2,57	3,94
	20	0,90	2,66	3,98
	30	0,68	2,42	3,97
	40	0,55	2,57	3,98
	50	0,51	2,61	4,01
40	10	0,98	2,44	3,91
	20	0,58	2,57	3,92
	30	0,48	2,50	3,98
	40	0,40	2,61	3,98
	50	0,38	2,48	3,97
50	10	0,74	2,44	3,92
	20	0,48	2,58	3,92
	30	0,39	2,52	3,99
	40	0,35	2,61	3,98
	50	0,33	2,61	3,97

süresinin uzunluğu nedeniyle ona en yakın değeri çok daha kısa sürede veren (20,10) seçeneğinin kullanılmasına karar verilmiştir.

4.3.4.3 Sonuçlar

Türetilen tüm test problemlerin hem geliştirilen algoritma hem de BARON çözücüsü ile çözdürülmesi sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11-4.16'da verilmiştir. Çizelgelerde CPU₁ ve CPU₂ sütunları sırasıyla BARON'un ve algoritmanın çözüm sürelerini göstermektedir. OU değerleri, tek İHABİ'li KHA'da sunulan deney sonuçlarına benzer şekilde hesaplanmıştır. Buna göre, Obj_B^{alt}, Obj_B^{üst} ve Obj_A, sırasıyla BARON'un en iyi olurlu çözümünün amaç fonksiyon değerini, BARON'un üst sınır değerini ve algoritma ile elde edilen amaç fonksiyon değerini göstermek üzere aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

$$OU_{alt} = \frac{Obj_B^{alt} - Obj_A}{Obj_B^{alt}} \times 100,$$
$$OU_{üst} = \frac{Obj_B^{üst} - Obj_A}{Obj_B^{üst}} \times 100$$

BARON'un optimal bulduğu problemlerde yalnızca OU_{alt} değeri hesaplanırken, optimal bulunamayan problemlerde OU_{üst} değeri ile birlikte Δ sütununda BARON'un kendi özelinde raporladığı en iyi olurlu çözüm ve üst sınır değerleri arasındaki yüzde fark da verilmiştir, d.d. $\Delta = [(Obj_B^{üst} - Obj_B^{alt}) / Obj_B^{üst} \times 100]$. Dolayısıyla, Δ sütununda 0 olan satırlar, problemin optimal çözüldüğünü göstermektedir.

Tek İHABİ'li deney sonuçlarından farklı olarak, optimal çözülemeyen problemlerin üst sınır değerleri için BARON'un orijinal ve gevşetilmiş formülasyon için raporladığı üst sınır değerlerinden daha küçük olan esas alınmıştır. Optimal çözülen problemler için alt ve üst sınır değeri aynı olduğundan, OU_{üst} sütununda “#” sembolü kullanılmış ve yalnızca OU_{alt} değeri gösterilmiştir. OU_{alt} sütununda değer olmayan satırlar ise ilgili problem için BARON tarafından olurlu bir çözüm üretilmediğini belirtmektedir.

Çizelgelerde CPU değerleri, algoritmanın 20 tekrarının ortalama çözüm süresini gösterirken, OU değerleri ise bu tekrarlar sonucu elde edilen en iyi, en kötü ve ortalama amaç fonksiyon değerlerine göre ayrı ayrı sunulmuştur. BARON, büyük ölçekli problemlerin orijinal ve gevşetilmiş formülasyonlarına 4 saat içerisinde olurlu bir çözüm ya da bir üst sınır değeri üretilmediğinden, performans karşılaştırması yerine bu problemler için algoritma sonucunda elde edilen amaç fonksiyon değerleri ve çözüm süreleri Ek-5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.11: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen küçük ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 20 MHz)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)	
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak		
10	1	1	4,16	0,72	*	*	0,01	#	#	#	0	
		2	4,47	0,84	*	0,01	0,02	#	#	#	0	
		3	7,23	0,81	*	*	*	#	#	#	0	
		4	4,20	0,71	*	*	0,01	#	#	#	0	
	2	1	ZS	0,83	0,83	*	0,02	0,03	0,06	0,07	0,08	0,05
		2	ZS	0,23	0,23	*	0,02	0,04	0,11	0,12	0,14	0,10
		3	ZS	0,83	0,83	*	0,01	0,02	0,07	0,07	0,08	0,06
		4	ZS	0,29	0,29	*	*	*	*	*	0,01	*
	3	1	ZS	0,95	0,95	*	0,02	0,03	0,53	0,53	0,54	0,52
		2	ZS	0,92	0,92	*	*	0,01	0,04	0,05	0,05	0,04
		3	ZS	0,89	0,89	*	*	*	0,03	0,03	0,03	0,03
		4	ZS	0,27	0,27	*	*	*	0,08	0,08	0,08	0,08
	4	1	ZS	0,28	0,28	*	*	*	0,15	0,15	0,15	0,15
		2	ZS	0,28	0,28	*	*	*	*	*	*	*
		3	24,30	0,73	*	*	0,02	#	#	#	0	
		4	ZS	0,92	0,92	*	0,03	0,06	0,13	0,15	0,18	0,12
5	1	ZS	0,99	0,99	0,02	0,06	0,10	0,58	0,62	0,66	0,56	
	2	ZS	0,28	0,28	*	0,01	0,02	0,05	0,06	0,07	0,05	
	3	ZS	1,00	1,00	*	*	0,01	0,05	0,06	0,06	0,05	
	4	ZS	0,25	0,25	*	*	*	0,17	0,17	0,17	0,17	
6	1	ZS	0,30	0,30	0,04	0,12	0,21	0,69	0,77	0,85	0,65	
	2	ZS	0,98	0,98	0,02	0,06	0,10	0,43	0,46	0,50	0,40	
	3	ZS	0,94	0,94	-36,56	-36,55	-36,53	0,30	0,31	0,33	26,99	
	4	145,59	0,30	*	*	0,01	#	#	#	0		
Ortalama					-1,52	-1,51	-1,49	0,14	0,16	0,17	0,65	
20	1	1	10,54	1,86	*	*	*	#	#	#	0	
		2	9,94	1,89	*	0,02	0,05	#	#	#	0	
		3	8,82	2,09	*	*	0,01	#	#	#	0	
		4	14,70	2,42	*	*	*	#	#	#	0	
	2	1	ZS	2,04	2,04	*	0,02	0,03	0,16	0,17	0,18	0,15
		2	ZS	2,05	2,05	*	*	0,01	0,06	0,06	0,07	0,05
		3	ZS	2,33	2,33	*	0,03	0,07	0,20	0,22	0,26	0,20
		4	45,16	0,53	*	0,01	0,02	#	#	#	0	
	3	1	ZS	2,29	2,29	*	*	*	0,03	0,03	0,03	0,03
		2	ZS	0,46	0,46	*	*	*	0,20	0,20	0,20	0,20
		3	173,83	0,47	*	0,01	0,03	#	#	#	0	
		4	ZS	2,48	2,48	0,01	0,03	0,06	0,69	0,71	0,73	0,68
	4	1	ZS	0,42	0,42	0,02	0,03	0,05	0,77	0,78	0,80	0,75
		2	ZS	1,70	1,70	0,03	0,08	0,14	0,29	0,34	0,39	0,26
		3	259,82	0,48	*	*	0,02	#	#	#	0	
		4	53,09	2,63	*	*	0,01	#	#	#	0	
	5	1	ZS	2,48	2,48	*	*	0,02	0,15	0,16	0,17	0,15
		2	ZS	2,18	2,18	*	*	*	0,01	0,01	0,01	0,01
		3	ZS	0,57	0,57	*	*	*	0,04	0,04	0,05	0,04
		4	ZS	0,56	0,56	*	*	*	0,20	0,20	0,20	0,20
6	1	ZS	2,47	2,47	0,04	0,07	0,13	0,30	0,34	0,39	0,26	
	2	256,42	0,53	*	0,01	0,03	#	#	#	0		
	3	ZS	0,39	0,39	*	0,01	0,02	0,11	0,11	0,12	0,10	
	4	ZS	0,61	0,61	*	*	*	0,31	0,31	0,31	0,31	
Ortalama					0,01	0,02	0,03	0,15	0,16	0,17	1,50	

*: |OU| değeri %0,01'den küçük ZS: Zaman Sınırı #: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır

Çizelge 4.11: (devam)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
30	1	1	16,60	0,48	*	*	*	#	#	#	0
		2	11,57	0,49	0,01	0,07	0,13	#	#	#	0
		3	87,26	0,49	*	*	0,02	#	#	#	0
		4	17,77	0,62	*	*	0,01	#	#	#	0
	2	1	ZS	3,14	*	*	*	0,11	0,12	0,12	0,11
		2	ZS	0,64	0,02	0,04	0,09	0,11	0,13	0,18	0,09
		3	ZS	3,15	*	*	*	0,15	0,16	0,16	0,15
		4	ZS	3,64	*	0,03	0,05	0,26	0,28	0,30	0,25
	3	1	ZS	0,69	0,01	0,03	0,05	0,22	0,23	0,26	0,21
		2	ZS	0,80	0,02	0,03	0,05	0,18	0,19	0,21	0,16
		3	96,38	3,62	*	*	*	#	#	#	0
		4	ZS	0,74	*	*	*	0,14	0,15	0,15	0,15
	4	1	ZS	3,19	-0,34	-0,31	-0,27	0,75	0,78	0,83	1,09
		2	ZS	0,79	0,01	0,03	0,05	0,24	0,26	0,28	0,23
		3	ZS	3,85	-8,28	-8,28	-8,27	0,24	0,25	0,26	7,87
		4	ZS	0,78	-42,02	-42,02	-42,01	0,06	0,07	0,07	29,63
	5	1	142,68	3,28	*	*	*	#	#	#	0
		2	ZS	0,78	*	0,03	0,07	0,45	0,47	0,51	0,44
		3	ZS	0,83	-306,85	-306,84	-306,83	0,06	0,06	0,07	75,44
		4	ZS	0,78	-0,04	-0,02	*	0,18	0,20	0,22	0,22
6	1	ZS	0,67	-693,78	-693,76	-693,74	0,03	0,03	0,03	87,41	
	2	292,94	3,63	*	*	*	#	#	#	0	
	3	ZS	3,63	-166,96	-166,92	-166,88	0,22	0,23	0,25	62,62	
	4	126,75	3,91	*	0,03	0,05	#	#	#	0	
Ortalama					-50,76	-50,74	-50,72	0,14	0,15	0,17	1,86
100	1	1	32,97	4,48	2,56	3,93	5,01	#	#	#	0
		2	45,20	5,13	2,17	3,06	4,12	#	#	#	0
		3	33,28	5,95	2,49	3,68	4,57	#	#	#	0
		4	43,88	11,09	1,06	2,34	4,19	#	#	#	0
	2	1	ZS	5,09	1,47	3,12	4,49	5,46	7,05	8,36	4,06
		2	ZS	9,72	-499,38	-484,28	-471,25	21,92	23,88	25,58	86,97
		3	ZS	5,74	1,30	3,60	5,72	4,47	6,69	8,74	3,21
		4	ZS	6,55	-29,20	-26,74	-24,31	4,83	6,64	8,43	26,34
	3	1	ZS	10,31	-221,49	-218,62	-215,70	6,10	6,93	7,79	70,79
		2	ZS	6,29	-121,81	-115,98	-110,78	4,42	6,93	9,17	56,91
		3	ZS	10,34	0,15	2,69	4,67	2,07	4,56	6,51	1,93
		4	ZS	11,22	-403,18	-393,78	-386,07	4,24	6,03	7,50	80,97
	4	1	ZS	10,94	-	-	-	21,48	23,28	25,03	-
		2	ZS	12,04	-	-	-	25,72	27,48	29,36	-
		3	ZS	11,94	-	-	-	24,68	26,25	27,58	-
		4	884,65	6,67	1,49	3,12	4,63	#	#	#	0
	5	1	ZS	6,81	4,39	5,12	5,73	11,31	11,99	12,56	7,24
		2	ZS	5,61	0,78	1,97	3,10	2,78	3,94	5,05	2,01
		3	1328,53	10,82	0,60	2,89	4,84	#	#	#	0
		4	ZS	12,21	-	-	-	21,92	24,14	25,78	-
	6	1	ZS	11,69	4,11	5,08	5,84	9,93	10,85	11,56	6,07
		2	ZS	11,85	-129,79	-125,44	-121,68	6,36	8,13	9,66	59,25
		3	ZS	11,61	-	-	-	21,96	23,87	25,53	-
		4	ZS	12,63	-	-	-	19,63	21,72	23,43	-
Ortalama					-76,79	-73,57	-70,71	9,57	11,22	12,71	22,54

*: |OU| değeri %0,01'den küçük ZS: Zaman Sınırı #: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır

Çizelge 4.12: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen küçük ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 30 MHz)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
10	1	1	4,56	0,78	*	*	*	#	#	#	0
		2	3,42	0,81	*	*	0,02	#	#	#	0
		3	6,12	0,79	*	*	0,02	#	#	#	0
		4	6,55	0,22	*	*	*	#	#	#	0
	2	1	ZS	0,88	0,02	0,05	0,10	0,24	0,27	0,32	0,22
		2	10,81	0,21	*	*	*	#	#	#	0
		3	15,73	0,25	*	*	*	#	#	#	0
		4	ZS	0,23	*	0,01	0,02	0,18	0,19	0,19	0,17
	3	1	ZS	0,96	0,02	0,06	0,10	0,33	0,37	0,41	0,31
		2	ZS	0,31	0,01	0,04	0,09	0,31	0,34	0,39	0,30
		3	21,94	0,93	*	0,01	0,03	#	#	#	0
		4	ZS	0,26	*	*	*	0,06	0,06	0,07	0,06
	4	1	23,80	0,95	*	0,02	0,04	#	#	#	0
		2	ZS	0,31	*	*	0,01	0,03	0,03	0,04	0,03
		3	ZS	0,25	*	*	0,02	0,07	0,07	0,08	0,06
		4	ZS	1,48	*	*	*	0,01	0,01	0,01	0,01
5	1	ZS	0,96	*	*	*	0,06	0,06	0,07	0,07	
	2	ZS	0,26	-0,16	-0,16	-0,15	0,43	0,43	0,44	0,59	
	3	85,21	0,26	*	*	0,02	#	#	#	0	
	4	ZS	0,26	*	*	*	0,01	0,02	0,02	0,01	
6	1	ZS	0,96	*	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,04	
	2	ZS	0,26	*	0,01	0,03	0,36	0,37	0,38	0,36	
	3	ZS	0,29	*	*	*	1,73	1,73	1,73	1,73	
	4	ZS	1,42	*	*	*	0,37	0,37	0,37	0,36	
Ortalama					0,00	0,01	0,02	0,18	0,19	0,20	0,59
20	1	1	22,18	1,94	*	0,03	0,09	#	#	#	0
		2	11,01	0,32	*	0,05	0,09	#	#	#	0
		3	11,74	1,91	*	0,03	0,06	#	#	#	0
		4	9,99	2,12	*	0,01	0,03	#	#	#	0
	2	1	ZS	1,89	*	0,02	0,04	0,36	0,37	0,39	0,36
		2	511,26	0,45	*	0,02	0,05	#	#	#	0
		3	ZS	0,41	0,02	0,05	0,10	0,19	0,22	0,27	0,17
		4	ZS	2,27	0,02	0,07	0,11	0,33	0,38	0,42	0,31
	3	1	ZS	0,47	*	*	0,01	0,48	0,49	0,49	0,48
		2	ZS	2,13	*	0,01	0,02	5,12	5,13	5,14	5,12
		3	ZS	2,20	*	*	*	0,09	0,09	0,09	0,09
		4	28,06	0,36	*	0,03	0,06	#	#	#	0
	4	1	ZS	0,52	-5,37	-5,37	-5,37	0,08	0,08	0,09	5,18
		2	ZS	2,23	-0,04	-0,03	-0,03	0,10	0,10	0,11	0,14
		3	ZS	2,35	*	*	*	0,06	0,06	0,06	0,06
		4	76,99	0,49	*	*	0,01	#	#	#	0
5	1	ZS	0,59	*	*	*	0,02	0,02	0,02	0,03	
	2	ZS	2,24	*	*	0,01	0,45	0,46	0,46	0,45	
	3	ZS	0,46	-23,45	-23,45	-23,45	0,19	0,19	0,19	19,15	
	4	ZS	0,53	-0,38	-0,36	-0,35	0,18	0,19	0,21	0,55	
6	1	ZS	2,66	-0,05	-0,05	-0,05	0,11	0,11	0,11	0,16	
	2	384,04	0,54	*	*	*	#	#	#	0	
	3	304,88	2,40	*	*	0,01	#	#	#	0	
	4	135,93	0,31	*	*	0,01	#	#	#	0	
Ortalama					-1,22	-1,20	-1,19	0,32	0,34	0,35	1,33

*: |OU| değeri %0,01'den küçük ZS: Zaman Sınırı #: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır

Çizelge 4.12: (devam)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
30	1	1	12,22	0,46	*	*	*	#	#	#	0
		2	12,36	2,50	*	0,02	0,05	#	#	#	0
		3	16,16	0,53	*	0,03	0,07	#	#	#	0
		4	13,94	0,36	*	0,01	0,02	#	#	#	0
	2	1	ZS	2,95	-9,48	-9,47	-9,45	0,33	0,34	0,36	8,96
		2	ZS	3,07	-1,74	-1,74	-1,74	0,01	0,01	0,01	1,72
		3	98,18	3,27	*	*	0,02	#	#	#	0
		4	ZS	3,40	*	0,01	0,03	0,20	0,21	0,22	0,20
	3	1	ZS	3,03	0,01	0,03	0,07	0,14	0,16	0,19	0,13
		2	97,98	3,06	*	0,02	0,06	#	#	#	0
		3	ZS	3,61	*	0,03	0,05	0,11	0,13	0,16	0,11
		4	ZS	0,71	-0,04	-0,03	-0,02	0,17	0,17	0,18	0,20
	4	1	ZS	3,29	*	*	*	0,06	0,06	0,06	0,06
		2	173,25	3,23	*	0,01	0,02	#	#	#	0
		3	ZS	0,85	-	-	-	2,90	3,05	3,22	-
		4	453,38	0,75	*	0,03	0,07	#	#	#	0
	5	1	ZS	3,52	-397,02	-397,00	-396,98	0,06	0,06	0,07	79,89
		2	ZS	0,77	*	0,02	0,04	0,16	0,17	0,19	0,15
		3	ZS	0,54	0,04	0,08	0,14	2,13	2,17	2,23	2,09
		4	83,42	3,43	*	*	*	#	#	#	0
6	1	ZS	0,69	*	*	*	0,02	0,02	0,02	0,02	
	2	ZS	0,69	*	*	0,01	0,07	0,07	0,08	0,07	
	3	528,93	3,74	*	*	*	#	#	#	0	
	4	ZS	0,88	-	-	-	1,38	1,53	1,69	-	
Ortalama					-18,55	-18,54	-18,52	0,32	0,35	0,38	4,25
100	1	1	21,96	2,75	1,26	2,91	4,71	#	#	#	0
		2	42,18	9,30	0,22	1,36	2,61	#	#	#	0
		3	40,12	4,88	0,90	2,00	3,49	#	#	#	0
		4	48,13	6,52	0,46	1,32	2,49	#	#	#	0
	2	1	ZS	10,67	2,41	4,33	5,66	5,39	7,26	8,55	3,06
		2	ZS	10,19	0,11	1,84	3,52	1,63	3,34	5,00	1,53
		3	ZS	5,28	0,14	1,70	3,38	1,44	2,98	4,64	1,30
		4	ZS	5,46	-23,09	-20,60	-18,41	2,79	4,75	6,48	21,02
	3	1	ZS	5,24	-23,00	-20,58	-17,95	2,45	4,37	6,45	20,69
		2	ZS	11,39	-0,22	2,09	4,61	1,90	4,17	6,64	2,12
		3	ZS	5,75	-	-	-	6,01	7,48	8,79	-
		4	ZS	11,40	-	-	-	4,54	6,18	7,46	-
	4	1	ZS	10,06	-75,73	-71,99	-67,67	1,90	3,98	6,39	44,17
		2	ZS	10,99	1,30	3,69	5,87	1,98	4,35	6,52	0,69
		3	ZS	6,56	-11,30	-9,75	-8,37	2,24	3,60	4,82	12,17
		4	1018,08	11,52	1,21	2,44	3,77	#	#	#	0
	5	1	ZS	10,46	1,21	2,42	3,47	2,95	4,14	5,17	1,76
		2	ZS	5,56	-	-	-	6,70	8,18	9,37	-
		3	ZS	10,53	3,78	4,77	5,83	8,74	9,69	10,69	5,16
		4	ZS	10,97	-	-	-	3,27	4,82	6,49	-
	6	1	ZS	11,31	-680,53	-667,71	-655,82	2,46	4,06	5,54	87,50
		2	ZS	10,50	1,01	2,90	4,56	2,98	4,84	6,46	1,99
		3	ZS	6,82	-0,77	2,01	4,21	1,56	4,27	6,42	2,31
		4	ZS	11,58	-291,98	-286,56	-281,90	6,52	7,81	8,92	76,15
Ortalama					-54,63	-52,07	-49,60	2,98	4,60	6,16	14,08

*: |OU| değeri %0,01'den küçük ZS: Zaman Sınırı #: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır

Çizelge 4.13: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen küçük ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 40 MHz)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
10	1	1	1,89	0,21	*	*	*	#	#	#	0
		2	2,29	0,21	*	0,01	0,03	#	#	#	0
		3	4,58	0,21	0,01	0,06	0,12	#	#	#	0
		4	3,63	0,73	*	*	0,02	#	#	#	0
	2	1	ZS	0,24	0,03	0,06	0,11	6,19	6,22	6,26	6,16
		2	ZS	0,25	*	0,02	0,03	0,22	0,23	0,24	0,21
		3	ZS	0,88	*	0,02	0,03	0,20	0,22	0,23	0,20
		4	ZS	0,27	*	0,01	0,02	0,11	0,12	0,13	0,11
	3	1	ZS	0,29	*	*	0,02	0,24	0,25	0,26	0,24
		2	ZS	0,24	*	*	*	0,03	0,03	0,04	0,03
		3	ZS	0,86	0,02	0,04	0,08	0,48	0,50	0,53	0,45
		4	ZS	0,25	*	*	*	0,15	0,16	0,16	0,15
	4	1	ZS	0,86	0,02	0,07	0,13	0,52	0,57	0,62	0,50
		2	ZS	0,94	0,04	0,07	0,13	0,40	0,43	0,49	0,36
		3	ZS	0,88	*	*	0,02	0,37	0,37	0,39	0,37
		4	ZS	1,39	*	*	*	0,01	0,01	0,01	0,01
5	1	ZS	0,25	0,02	0,04	0,07	0,22	0,24	0,27	0,20	
	2	ZS	1,00	*	*	0,02	0,36	0,36	0,38	0,35	
	3	ZS	0,27	*	0,03	0,06	0,48	0,50	0,53	0,47	
	4	47,16	0,31	*	*	*	#	#	#	0	
6	1	ZS	0,26	0,04	0,07	0,13	1,28	1,31	1,37	1,24	
	2	47,98	0,98	*	*	0,01	#	#	#	0	
	3	ZS	0,26	0,03	0,06	0,11	0,38	0,42	0,46	0,36	
	4	191,83	0,29	*	*	*	#	#	#	0	
Ortalama					0,01	0,03	0,05	0,49	0,50	0,52	0,51
20	1	1	8,98	0,35	*	0,02	0,04	#	#	#	0
		2	4,05	2,24	*	*	*	#	#	#	0
		3	16,19	1,88	*	*	*	#	#	#	0
		4	11,66	0,35	*	*	*	#	#	#	0
	2	1	ZS	0,46	0,02	0,05	0,10	0,74	0,78	0,83	0,73
		2	63,38	1,95	*	0,02	0,04	#	#	#	0
		3	ZS	2,24	*	*	*	0,05	0,05	0,05	0,05
		4	ZS	0,43	*	0,01	0,03	0,45	0,46	0,47	0,44
	3	1	ZS	2,18	*	*	0,02	0,17	0,18	0,19	0,17
		2	ZS	2,34	-	-	-	3,60	3,80	4,03	-
		3	83,96	1,69	*	*	*	#	#	#	0
		4	589,96	0,46	*	*	*	#	#	#	0
	4	1	ZS	0,50	*	*	*	0,07	0,07	0,08	0,07
		2	56,07	0,43	*	0,02	0,04	#	#	#	0
		3	ZS	2,39	-0,07	-0,06	-0,03	0,50	0,52	0,54	0,58
		4	329,18	0,57	*	*	*	#	#	#	0
5	1	ZS	0,46	0,02	0,03	0,05	0,24	0,25	0,27	0,22	
	2	37,91	0,39	*	*	0,01	#	#	#	0	
	3	ZS	2,45	*	0,02	0,04	0,86	0,88	0,90	0,86	
	4	ZS	0,35	*	*	*	1,26	1,26	1,26	1,26	
6	1	2968,68	2,35	*	*	0,01	#	#	#	0	
	2	ZS	0,50	-	-	-	2,39	2,51	2,63	-	
	3	ZS	0,48	*	0,01	0,02	0,13	0,13	0,15	0,12	
	4	933,84	0,64	*	*	0,01	#	#	#	0	
Ortalama					0,00	0,01	0,02	0,44	0,46	0,48	0,20

*: |OU| değeri %0,01'den küçük ZS: Zaman Sınırı #: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır

Çizelge 4.13: (devam)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
30	1	1	12,72	0,49	*	*	*	#	#	#	0
		2	10,45	0,51	*	*	*	#	#	#	0
		3	9,68	0,55	*	*	*	#	#	#	0
		4	9,29	0,36	*	*	*	#	#	#	0
	2	1	ZS	0,64	*	0,02	0,04	2,31	2,33	2,34	2,31
		2	ZS	2,90	*	*	*	0,24	0,24	0,24	0,24
		3	ZS	2,83	*	*	0,01	0,23	0,23	0,24	0,23
		4	ZS	3,32	0,04	0,08	0,15	0,46	0,50	0,58	0,42
	3	1	ZS	0,74	-8,36	-8,33	-8,28	1,73	1,76	1,80	9,31
		2	93,76	2,95	*	*	0,01	#	#	#	0
		3	88,99	0,68	*	*	0,01	#	#	#	0
		4	85,30	3,67	*	*	0,01	#	#	#	0
	4	1	93,02	3,21	*	0,01	0,03	#	#	#	0
		2	ZS	3,30	*	0,02	0,04	0,46	0,48	0,50	0,46
		3	ZS	0,75	-	-	-	4,21	4,52	4,90	-
		4	ZS	3,70	-10,21	-10,20	-10,20	0,09	0,09	0,10	9,35
	5	1	ZS	0,68	-693,16	-692,97	-692,77	1,25	1,27	1,29	87,55
		2	ZS	3,23	-699,37	-699,34	-699,31	0,10	0,11	0,11	87,50
		3	ZS	0,52	-26,66	-26,66	-26,65	0,54	0,54	0,54	21,47
		4	390,56	3,51	*	0,01	0,03	#	#	#	0
6	1	ZS	0,64	-53,60	-53,60	-53,60	0,17	0,17	0,17	35,00	
	2	ZS	0,67	*	*	*	0,02	0,02	0,02	0,02	
	3	525,45	0,66	*	0,01	0,03	#	#	#	0	
	4	ZS	0,82	-	-	-	3,39	3,54	3,80	-	
Ortalama					-67,79	-67,77	-67,75	0,63	0,66	0,70	11,53
100	1	1	34,16	9,21	*	0,22	0,43	#	#	#	0
		2	48,98	2,73	0,25	0,57	0,96	#	#	#	0
		3	48,20	6,78	0,32	0,85	1,44	#	#	#	0
		4	47,83	2,24	0,04	0,45	0,90	#	#	#	0
	2	1	ZS	7,36	-1,41	-1,29	-1,17	0,29	0,41	0,53	1,68
		2	ZS	7,79	-1,28	-0,65	-0,20	0,75	1,36	1,80	2,00
		3	ZS	2,19	0,04	0,36	0,68	1,68	2,00	2,31	1,65
		4	ZS	2,77	-95,44	-94,68	-93,93	2,38	2,76	3,13	50,05
	3	1	ZS	8,27	0,02	0,23	0,53	0,14	0,35	0,64	0,12
		2	ZS	2,77	0,32	0,70	1,08	0,88	1,25	1,63	0,56
		3	ZS	7,75	-	-	-	2,54	2,82	3,05	-
		4	ZS	8,01	0,32	0,77	1,20	0,77	1,22	1,65	0,45
	4	1	ZS	6,96	-224,55	-223,91	-223,35	0,41	0,61	0,78	69,32
		2	ZS	3,15	-	-	-	4,56	5,12	5,86	-
		3	ZS	7,31	0,42	0,86	1,28	1,04	1,47	1,88	0,62
		4	ZS	2,18	0,34	0,76	1,16	1,82	2,23	2,62	1,48
	5	1	ZS	2,75	*	0,02	0,05	*	0,02	0,05	*
		2	ZS	2,43	-	-	-	4,12	4,40	4,64	-
		3	ZS	2,21	0,26	0,70	1,14	0,74	1,18	1,62	0,48
		4	1456,69	7,96	0,68	1,06	1,42	#	#	#	0
	6	1	ZS	3,11	-	-	-	5,49	5,82	6,28	-
		2	ZS	8,21	0,26	0,69	1,07	3,96	4,38	4,74	3,71
		3	ZS	2,25	-	-	-	3,70	4,22	4,67	-
		4	ZS	8,29	-2,99	-2,45	-1,90	1,24	1,76	2,29	4,11
Ortalama					-16,97	-16,57	-16,17	1,57	1,94	2,31	7,17

*: |OU| değeri %0,01'den küçük ZS: Zaman Sınırı #: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır

Çizelge 4.14: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen orta ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 20 MHz)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
200	1	1	125,48	8,86	1,64	1,64	1,64	#	#	#	0
		2	50,52	5,48	1,37	2,33	3,39	#	#	#	0
		3	127,55	11,59	1,17	1,44	1,68	#	#	#	0
		4	114,77	19,55	0,96	2,19	3,46	#	#	#	0
	2	1	ZS	9,12	1,73	3,22	4,55	61,32	61,91	62,43	60,64
		2	ZS	21,19	-21,35	-19,12	-16,93	13,45	15,04	16,60	28,68
		3	ZS	12,95	3,89	4,80	5,64	15,40	16,20	16,94	11,97
		4	ZS	15,52	-	-	-	58,74	59,82	60,75	-
	3	1	ZS	23,50	-238,88	-229,66	-222,28	14,72	17,04	18,90	74,84
		2	ZS	12,92	-	-	-	58,29	58,91	59,53	-
		3	ZS	11,35	3,19	4,67	5,90	7,54	8,96	10,13	4,50
		4	ZS	14,68	-	-	-	55,32	56,42	57,37	-
	4	1	ZS	21,06	-	-	-	61,32	62,40	63,25	-
		2	ZS	24,29	-	-	-	89,83	89,97	90,10	-
		3	ZS	16,08	-	-	-	57,36	58,50	59,37	-
		4	ZS	16,25	2,62	3,93	5,43	9,74	10,95	12,34	7,31
	5	1	ZS	13,82	-	-	-	62,70	63,70	64,54	-
		2	ZS	17,95	-68,51	-64,79	-61,60	18,58	20,38	21,92	51,68
		3	ZS	13,99	-16,07	-14,18	-12,52	11,55	13,00	14,26	23,80
		4	ZS	16,69	-	-	-	91,85	92,03	92,18	-
6	1	ZS	13,00	-	-	-	50,57	51,87	52,80	-	
	2	ZS	21,20	1,91	3,96	5,81	10,97	12,83	14,52	9,24	
	3	ZS	24,31	-	-	-	92,61	92,75	92,90	-	
	4	ZS	21,49	-	-	-	56,81	57,86	58,51	-	
Ortalama					-25,10	-23,04	-21,22	37,66	38,67	39,56	20,20
300	1	1	326,09	21,09	0,40	1,60	2,98	#	#	#	0
		2	408,10	15,48	3,56	3,71	3,88	#	#	#	0
		3	119,51	17,15	2,45	4,11	5,72	#	#	#	0
		4	272,46	17,22	2,11	3,58	5,55	#	#	#	0
	2	1	ZS	41,57	2,90	5,14	7,40	72,84	73,46	74,10	72,03
		2	ZS	37,07	-	-	-	74,59	74,91	75,18	-
		3	ZS	31,10	-	-	-	74,32	74,94	75,46	-
		4	ZS	29,91	-	-	-	74,00	74,57	75,04	-
	3	1	ZS	48,33	-	-	-	73,76	74,32	74,89	-
		2	ZS	33,31	-2,50	-1,20	0,20	20,02	21,04	22,13	21,98
		3	ZS	33,80	-	-	-	75,19	75,70	76,16	-
		4	ZS	20,40	-	-	-	74,34	74,34	74,34	-
	4	1	ZS	22,90	-	-	-	75,65	76,34	76,85	-
		2	ZS	20,40	-	-	-	74,49	74,85	75,16	-
		3	ZS	32,58	-	-	-	74,29	74,86	75,39	-
		4	ZS	26,41	-	-	-	75,54	75,96	76,39	-
	5	1	ZS	41,01	-	-	-	74,27	74,76	75,23	-
		2	ZS	21,83	-	-	-	74,64	75,29	75,88	-
		3	ZS	23,91	-	-	-	74,90	75,28	75,65	-
		4	ZS	32,20	-	-	-	94,89	95,02	95,14	-
6	1	ZS	26,52	-	-	-	95,86	95,97	96,06	-	
	2	ZS	32,90	-	-	-	95,88	95,97	96,07	-	
	3	ZS	26,76	-	-	-	95,68	95,79	95,88	-	
	4	ZS	27,16	-	-	-	95,51	95,62	95,72	-	
Ortalama					1,49	2,82	4,29	64,55	65,08	65,62	15,67
ZS: Zaman Sınırı		#: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır									

Çizelge 4.15: Statik çok İHABİ'li KHA testlerinde türetilen orta ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 30 MHz)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
200	1	1	120,72	12,25	0,86	1,71	2,41	#	#	#	0
		2	108,08	18,09	2,82	4,34	5,95	#	#	#	0
		3	117,65	18,88	0,77	2,05	3,89	#	#	#	0
		4	82,40	18,15	1,30	2,94	4,65	#	#	#	0
	2	1	ZS	8,59	-	-	-	40,80	42,23	43,66	-
		2	ZS	12,30	-5,24	-3,22	-1,06	12,43	14,11	15,91	16,79
		3	ZS	13,31	0,27	2,24	4,16	11,61	13,36	15,06	11,37
		4	ZS	12,54	-	-	-	38,09	39,64	40,99	-
	3	1	ZS	21,67	3,14	4,40	5,79	21,63	22,65	23,78	19,09
		2	ZS	11,37	-	-	-	38,51	39,92	41,32	-
		3	ZS	23,13	2,92	4,11	5,10	13,28	14,34	15,22	10,67
		4	ZS	13,53	-	-	-	38,90	40,26	41,32	-
	4	1	ZS	15,15	-227,47	-221,27	-216,85	13,66	15,29	16,46	73,63
		2	ZS	19,56	-8,65	-6,75	-4,42	11,49	13,03	14,93	18,53
		3	ZS	12,01	-	-	-	36,62	37,86	39,11	-
		4	ZS	17,88	-	-	-	36,05	37,74	39,23	-
	5	1	ZS	21,58	-415,38	-401,49	-389,78	8,39	10,86	12,94	82,23
		2	ZS	22,06	-	-	-	39,79	41,38	42,79	-
		3	ZS	22,95	-370,59	-360,33	-351,77	12,16	14,08	15,68	81,33
		4	ZS	17,23	-	-	-	88,15	88,44	88,71	-
6	1	ZS	21,34	3,69	4,45	5,31	11,89	12,59	13,37	8,52	
	2	ZS	24,77	-	-	-	42,61	44,25	45,35	-	
	3	ZS	21,56	-	-	-	37,84	39,11	40,24	-	
	4	ZS	19,25	-	-	-	39,09	40,63	42,01	-	
Ortalama					-77,81	-74,37	-71,28	24,95	26,37	27,71	24,78
300	1	1	169,25	15,36	3,76	4,97	6,45	#	#	#	0
		2	338,24	16,80	4,41	5,81	7,36	#	#	#	0
		3	445,45	16,81	1,75	3,76	5,84	#	#	#	0
		4	113,98	13,31	0,38	2,37	4,27	#	#	#	0
	2	1	ZS	51,41	-	-	-	58,59	59,09	59,63	-
		2	ZS	29,73	-	-	-	62,26	63,25	64,06	-
		3	ZS	34,23	-	-	-	60,20	60,93	61,62	-
		4	ZS	29,52	-	-	-	57,26	58,14	58,91	-
	3	1	ZS	45,00	-	-	-	61,65	62,62	63,41	-
		2	ZS	38,86	-	-	-	58,72	59,56	60,44	-
		3	ZS	24,41	-	-	-	59,41	60,30	61,03	-
		4	ZS	30,72	-	-	-	57,48	58,19	58,99	-
	4	1	ZS	44,62	-	-	-	61,87	62,90	63,68	-
		2	ZS	23,69	-	-	-	60,12	60,85	61,59	-
		3	ZS	28,85	-	-	-	57,85	58,87	59,89	-
		4	ZS	23,26	-	-	-	57,20	58,43	59,25	-
	5	1	ZS	18,73	-	-	-	63,84	64,70	65,50	-
		2	ZS	30,96	-	-	-	58,79	59,74	60,68	-
		3	ZS	20,25	-	-	-	59,29	60,04	60,70	-
		4	ZS	30,30	-	-	-	58,33	59,22	60,11	-
6	1	ZS	35,66	-	-	-	93,51	93,67	93,83	-	
	2	ZS	37,25	-	-	-	93,07	93,21	93,34	-	
	3	ZS	36,27	-	-	-	57,71	58,62	59,38	-	
	4	ZS	61,01	-	-	-	92,60	92,74	92,88	-	
Ortalama					2,58	4,23	5,98	54,17	55,08	55,95	0

ZS: Zaman Sınırı #: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır

Çizelge 4.16: Statik çok İHABİ’li KHA testlerinde türetilen orta ölçekli problemler için deney sonuçları (Toplam bant genişliği 40 MHz)

n	m	s	CPU ₁	CPU ₂	OU _{alt} (%)			OU _{üst} (%)			Δ(%)
					Min	Ort	Mak	Min	Ort	Mak	
200	1	1	119,04	6,64	2,26	3,47	4,55	#	#	#	0
		2	77,19	9,44	2,64	3,85	5,36	#	#	#	0
		3	78,08	9,37	2,07	3,83	6,08	#	#	#	0
		4	115,91	19,96	1,25	2,92	5,28	#	#	#	0
	2	1	ZS	11,04	-	-	-	31,67	33,50	35,09	-
		2	ZS	18,20	2,27	4,63	6,71	9,29	11,49	13,42	7,19
		3	ZS	17,67	1,61	4,16	6,38	10,58	12,90	14,92	9,12
		4	ZS	13,36	-	-	-	26,44	27,93	29,38	-
	3	1	ZS	20,44	-	-	-	27,22	29,13	30,66	-
		2	ZS	11,98	-2,43	-1,48	-0,53	10,17	11,01	11,84	12,31
		3	ZS	20,48	-	-	-	24,75	26,77	28,51	-
		4	ZS	15,07	-0,64	1,40	3,29	12,45	14,22	15,87	13,01
	4	1	ZS	24,23	-	-	-	30,20	32,13	33,53	-
		2	ZS	21,76	-	-	-	26,50	27,94	29,21	-
		3	ZS	12,91	-91,52	-87,67	-84,34	8,72	10,55	12,14	52,34
		4	ZS	15,14	-	-	-	24,77	26,44	27,70	-
	5	1	ZS	15,39	-77,19	-73,50	-70,61	14,20	15,98	17,38	51,57
		2	ZS	22,78	-	-	-	24,30	25,98	27,81	-
		3	ZS	14,28	-86,38	-82,96	-79,80	7,86	9,55	11,11	50,56
		4	ZS	15,13	-	-	-	25,38	26,94	28,24	-
6	1	ZS	22,87	-	-	-	28,26	29,75	31,10	-	
	2	ZS	20,72	-	-	-	20,17	21,73	23,22	-	
	3	ZS	21,43	-37,49	-35,22	-33,33	22,07	23,35	24,42	43,32	
	4	ZS	15,04	-	-	-	26,07	27,94	29,61	-	
Ortalama					-23,63	-21,38	-19,25	17,47	19,14	20,68	19,95
300	1	1	243,54	20,80	3,26	4,08	4,77	#	#	#	0
		2	359,35	16,30	1,10	3,52	5,15	#	#	#	0
		3	114,77	20,16	0,11	2,10	3,94	#	#	#	0
		4	375,52	21,72	1,98	3,13	4,66	#	#	#	0
	2	1	ZS	21,38	-	-	-	49,50	50,55	51,33	-
		2	ZS	16,96	-	-	-	49,60	50,60	51,68	-
		3	ZS	35,75	3,69	5,28	6,53	19,71	21,03	22,07	16,63
		4	ZS	18,13	-	-	-	45,89	47,14	48,35	-
	3	1	ZS	17,61	-	-	-	52,96	54,14	55,31	-
		2	ZS	18,34	-	-	-	45,27	46,70	47,89	-
		3	ZS	32,01	-	-	-	45,01	45,94	46,68	-
		4	ZS	19,56	-	-	-	43,82	45,26	46,57	-
	4	1	ZS	20,53	-344,48	-335,46	-326,85	46,65	47,74	48,77	88,00
		2	ZS	33,29	-	-	-	46,39	47,66	48,89	-
		3	ZS	22,09	-	-	-	48,60	49,94	51,07	-
		4	ZS	35,31	-	-	-	46,59	48,03	49,15	-
	5	1	ZS	33,33	-	-	-	47,76	49,12	50,37	-
		2	ZS	19,32	-	-	-	89,77	89,99	90,17	-
		3	ZS	28,55	-	-	-	45,09	46,20	47,18	-
		4	ZS	30,51	-	-	-	45,85	47,09	48,37	-
6	1	ZS	22,19	-	-	-	90,93	91,17	91,36	-	
	2	ZS	22,53	-	-	-	90,67	90,86	91,06	-	
	3	ZS	36,61	-	-	-	91,05	91,28	91,46	-	
	4	ZS	25,73	-	-	-	91,16	91,33	91,46	-	
Ortalama					-55,72	-52,89	-50,30	47,45	48,52	49,49	17,44
ZS: Zaman Sınırı		#: BARON çözücüsü optimal sonuçlanmıştır									

Toplamda, büyük ölçekli problemler haricindeki 432 problemin 121'inin orijinal formülasyonu, kalan 311 problemde ise 176'sının gevşetilmiş formülasyonu BARON ile optimal çözülebilmektedir. Bununla birlikte, bu 176 problem dışında 11 problem için de gevşetilmiş problemin amaç fonksiyonu için raporladığı üst sınır değeri, orijinal formülasyonun üst sınır değerinden daha düşük olmuş ve karşılaştırmalarda bu değerler kullanılmıştır. Sonuç olarak toplamda 187 problemin üst sınır değeri gevşetilmiş formülasyondan elde edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, algoritmanın hem çözüm süresi hem de çözüm kalitesi açısından başarılı olduğu gözlenmiştir. BARON'un optimal çözdüğü problemlerin çözüm süresi ortalama 230,29 sn. olurken, algoritmanın aynı problemler için çözüm süresi 3,98 sn.'dir. Ayrıca, algoritmanın tüm küçük ve orta ölçekli problemleri çözüm süresi ortalama 9,38 sn. olmuştur. Bu sonuç, çözüm süresi açısından algoritmanın BARON'a nazaran oldukça iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Toplam bant genişliği 20 MHz olan küçük ölçekli 96 problemde BARON'un orijinal formülasyona olurlu çözüm üretebildiği 90 problemde, algoritma BARON'a nazaran %28,64 daha yüksek amaç fonksiyonu değeri bulurken, optimal çözülen problemlerde algoritma sonucu ile optimal sonuç arasındaki ortalama OU değeri %0,66 olmuştur. Küçük ölçekli tüm problemler düşünüldüğünde, algoritma sonucunun ortalama minimum ve maksimum $OU_{üst}$ değerleri sırasıyla %2,50 ve %3,31 olmuştur. Aynı problemlerde BARON'un kendi OU değeri %8,58 olmuştur.

Algoritma performansının önemli göstergelerinden bir tanesi BARON'un kendi OU değerinin %10'dan az olduğu problemlerde gerçekleşmiştir. Toplam 79 problemde algoritmanın minimum ve maksimum OU_{alt} değerleri sırasıyla %0,18 ve %0,64 olurken, minimum ve maksimum $OU_{üst}$ değerleri sırasıyla %0,71 ve %1,16 olmuştur. Bu 79 problem dışındaki problemlerde BARON'un kendi OU değeri ortalaması %60,30 olmuştur. BARON'un kendi OU değerlerinin yüksek olması algoritma performansını net şekilde göstermeyeceğinden, bu problemler özelinde değerlendirildiğinde çözüm süresinin yanında çözüm kalitesinin de oldukça iyi olduğu görülmektedir.

Algoritma performansı, problemlerin bant genişliği arttıkça artmaktadır. Küçük ölçekli problemlerden bant genişliğinin 30 MHz olanlarda BARON'un OU değerlerinin %10'dan küçük olduğu 88 problemdeki minimum ve maksimum OU_{alt} değerleri sırasıyla %0,05 ve %0,52 olurken, minimum ve maksimum $OU_{üst}$ değerleri sırasıyla %0,83 ve %1,49 olmuştur. Bu gruptaki tüm problemler düşünüldüğünde algoritma performansı BARON'a nazaran %16,42 daha iyidir.

Küçük ölçekli problemlerden bant genişliği 40 MHz olanlarda algoritma performansı

BARON'a göre daha da iyileşmektedir. BARON'un OU değerlerinin %10'dan küçük olduğu 90 problemdeki minimum ve maksimum OU_{alt} değerleri sırasıyla %-0,26 ve %-0,08'e düşerken, minimum ve maksimum $OU_{üst}$ değerleri de sırasıyla %0,78 ve %1,00 olmuştur. Bu gruptaki tüm problemler düşünüldüğünde algoritma BARON'un bulduğu alt sınır değerlerinden %20,75 daha iyi iken üst sınır değerlerinden yalnızca %0,89 uzaktadır.

Kullanıcı sayısı arttıkça BARON'un çözüm süreleri ve olurlu çözüm bulma sayısı düşmektedir. Orta ölçekli problemlerden toplam bant genişliği 20 MHz olanlarda BARON'un ortalama OU değeri %52,59 iken, bu problemlerden 19'una olurlu bir çözüm üretebilmiştir. Bu 19 problem baz alındığında algoritma BARON'a nazaran %14,88 daha iyi performans göstermiştir. BARON'un OU değeri %10'un altında olan 11 problem özelinde ise algoritmanın minimum ve maksimum OU_{alt} değeri sırasıyla %1,94 ve %3,01 olurken, minimum ve maksimum $OU_{üst}$ değeri sırasıyla %3,81 ve %5,94 olmuştur.

Benzer değerler toplam bant genişliği 30 ve 40 MHz olduğunda da görülmektedir. BARON, 30 MHz'li problemlerin 9'una olurlu çözüm üretirken, bu problemler için algoritmanın minimum ve maksimum OU_{alt} değerleri sırasıyla %2,19 ve %5,12, minimum ve maksimum $OU_{üst}$ değerleri ise sırasıyla %3,11 ve %6,02 olmuştur. 40 MHz'li problemlerde BARON'un olurlu çözüm bulduğu problem sayısı 10 olurken, bu problemler için algoritmanın minimum ve maksimum OU_{alt} değerleri sırasıyla %1,85 ve %5,28, minimum ile maksimum $OU_{üst}$ değerleri sırasıyla %3,46 ve %6,81 olmuştur.

Ana algoritmada önemli bir yere sahip ve bant genişliği atama kararlarının verildiği Algoritma 4'ün performansı için de bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla, 100 veya 200 kullanıcı, 1 veya 2 KBI'li, 1 veya 2 İHABI'li ve toplam bant genişliği 30 ve 40 MHz olan toplam 16 problemde algoritma adımları arasından rasgele bir tekrar ve bu tekrarlardan rasgele bir adım seçilmiş, bu adımda ortaya çıkan gevşetilmiş problemin BARON tarafından optimal çözümü elde edilmiştir. Aynı problemlerin, algoritma ile çözüldüğünde elde edilen amaç fonksiyon değerleri ve çözüm süreleri karşılaştırılarak Çizelge 4.17'de sunulmuştur. CPU_1 ve CPU_2 sütunları sırasıyla BARON ve algoritma çözüm sürelerini, OU sütunu ise algoritmadan elde edilen amaç fonksiyon değeri ile optimal amaç fonksiyon değeri arasındaki yüzde farkı göstermektedir.

BARON, bir problem hariç tüm problemleri optimal çözerken, optimal çözemediği problemdeki OU değeri %0,01'in altındadır. Bant genişliği atama algoritmasının ortalama OU değeri %0,39 olurken, çözüm süresi sadece 0,25 sn. olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar ışığında, bant genişliği atama algoritmasının kendi başına da oldukça başarılı bir performans gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.17: Statik çok İHABİ’li KHA çözümünde kullanılan bant genişliği atama algoritmasının (Algoritma 4) performansı.

n	s	m	ψ	CPU ₁ (s)	CPU ₂ (s)	OU(%)	
100	1	1	30	4,82	0,09	0,05	
			40	107,56	-	0,01	
	2	30	40	2367,48	0,07	0,43	
			40	TL	-	0,46	
		1	30	0,82	0,05	0,04	
	2	40	30	4457,81	0,03	0,44	
			40	26,91	0,06	1,36	
		2	30	1453,38	-	0,43	
	200	1	1	30	24,34	0,54	0,46
40				21,97	0,47	0,44	
2		30	40	140,58	0,50	0,42	
			40	60,16	0,42	*	
2		1	30	26,84	0,50	0,45	
			40	2,08	0,40	0,21	
2		30	40	1907,24	0,47	0,73	
			40	21,30	0,41	0,33	
Average				1470,72	0,25	0,39	
“-”, çözüm süresininin 0,01 sn.’den az olduğunu göstermektedir,							
“*”, OU değerininin %0,01’den az olduğunu göstermektedir.							

4.4 Değerlendirme

Bu bölümde çok İHABİ’li KHA tasarımı incelenmiş, bu yeni tasarım için İHABİ yerseçimleri ile İHABİ’lerden kullanıcılara ve KBİ’lerden İHABİ’lere ayrılacak bant genişliği kararlarının verildiği yeni bir karma tamsayı doğrusal olmayan programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Geliştirilen formülasyonun hazır optimizasyon yazılımları ile çözümü uzun süreler aldığından, çözüm için yerseçim ve bant genişliği atama kararlarını ayıran yeni bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Hem bu sezgisel algoritmanın performansını ölçmek, hem de orijinal formülasyona alternatif sıkı üst sınır değerleri elde etmek amacıyla gevşetilmiş bir doğrusal olmayan programlama formülasyonu geliştirilmiştir.

Geliştirilen algoritmanın performans değerlendirmesi için 572 yeni test problemi türetilmiş ve bu problemler vasıtasıyla çözücülerin performans karşılaştırması yapılmıştır. Deney sonuçları, sezgisel algoritmanın hem çözüm süresi hem de çözüm kalitesi açısından halihazırdaki optimizasyon yazılımlarına göre oldukça iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

5. DİNAMİK YERSEÇİM PROBLEMLERİ

İHABİ'lerin mevcut karasal KHA'lara entegrasyonu statik ortamlarda henüz yeni bir uygulama olmasına karşın, sistem performansının hem kullanıcılar hem de servis sağlayıcılar açısından halihazırdaki sistemlere nispeten çok daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, KHA'larda hem kullanıcı konumlarının hem de kullanıcıların veri taleplerinin sürekli değişkenlik göstermesi statik sistemlerdense dinamik sistemlerin de irdelenmesini gerektirmektedir. Tezin bu bölümünde, önceki bölümlerde oluşturulan temel üzerinde, dinamik KHA yapısı incelenmektedir.

Dinamik problemler, statik problemlere göre hem sistem tasarımı hem de matematiksel formülasyon açısından bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Statik problemlerde, kullanıcı konumlarının sabit varsayılmasından dolayı, İHABİ konumlarının da KHA tasarımının yapıldığı süre boyunca sabit kalması gerekirken, dinamik problemlerdeki kullanıcı hareketliliği İHABİ'lerin de bu hareketliliğe uygun şekilde lokasyonlarını adapte etmesini gerektirmektedir. Bununla birlikte, kullanıcıların taleplerinin de zamanla değişmesi, hem kaynak atama kararlarının hem de yerseçim kararlarının dinamik olmasını gerektirmektedir. Bu tez kapsamında, dinamik problemler için kaynak atama kararları formülasyona dahil edilmemiş olup, gelecek çalışmalarda ele alınması düşünülmektedir.

Devam eden bölümlerde ilk olarak sistem tasarımı ve matematiksel formülasyon detayları verilmiş, sonrasında bu sistemin eniyilenmesi amacıyla geliştirilen çözüm yaklaşımları ve bu yaklaşımların optimal çözümlerle karşılaştırması sunulmuştur. Bu problem özelinde kullanılan notasyon Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

5.1 Sistem Modeli

Dinamik problem kapsamında, tek İHABİ'nin yerseçimine karar verilecek bir KHA ele alınmaktadır. Hizmet verilen kullanıcılar sınırlı bir zaman içinde farklı anlarda hem konumlarını hem de taleplerini değiştirebilmektedir. İHABİ'nin, gelen taleplerin tamamını karşılayabildiği kapasitesiz durum irdelenmekte, kapasiteli durumun gelecek

Çizelge 5.1: Dinamik tek İHABİ'li KHA formülasyonunda kullanılan semboller ve tanımları.

Sembol	Açıklama
$\mathcal{I} = \{1, \dots, n\}$	Kullanıcı kümesi
$\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$	Periyot kümesi
$Q \subseteq \mathbb{R}^3$	İHABİ hizmet alanı
$S \subseteq Q$	Kullanıcı alanı
$y_{it}^u \in S$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının $t \in \mathcal{T}$ periyodundaki konumu
$d_{it}^u \in \mathbb{R}$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının $t \in \mathcal{T}$ periyodundaki maksimum sinyal kaybı tolerans değeri (talebi)
$w_i \in [0, 1]$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının getirisi
$v \in [0, 1]$	İHABİ hareketliliğinin maliyeti ile kullanıcı getirisinin amaç fonksiyonundaki ağırlığını ayarlayan parametre
$v_{it}, \kappa_{it} \in \mathbb{R}$	Kesikli orijinal problemin yeniden düzenlenmesinde kullanılan yardımcı parametreler
$\bar{M} \in \mathbb{R}$	Kesikli orijinal problemde kullanılan yeterince büyük bir değer
$\Delta_w \in \mathbb{R}$	Test problemlerinin türetilmesinde kullanıcı getirisinin coğrafi konuma göre değişimini kontrol eden parametre
$\Delta_d \in \mathbb{R}$	Test problemlerinin türetilmesinde kullanıcı talebinin coğrafi konuma göre değişimini kontrol eden parametre
$\Delta_t \in \mathbb{R}$	Test problemlerinin türetilmesinde parametrelerin zaman içindeki değişimini kontrol eden parametre
$\Delta_v \in \mathbb{R}$	Test problemlerinin türetilmesinde İHABİ hareketliliğinin maliyetinin değişimini kontrol eden parametre
$z_{it} \in \mathbb{B}$	$i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının $t \in \mathcal{T}$ periyodunda kapsanıp kapsanamadığını gösteren ikili değişken
$s_{it} \in \mathbb{R}$	Kesikli orijinal problemin yeniden düzenlenmesinde $i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının $t \in \mathcal{T}$ periyodundaki sinyal kaybı değerinin bulunması için kullanılan yardımcı değişken
$x_t^d \in Q$	İHABİ'nin $t \in \mathcal{T}$ periyodundaki konumu
$\rho, \vartheta, \varphi \in \mathbb{R}_+$	Kesikli orijinal problemin Lagranj gevşetmesinde kullanılan Lagranj değişkenleri
$\omega_{,it} \in \mathbb{R}_+$	Kesikli orijinal problemin Lagranj gevşetmesinde kullanılan yardımcı değişkenler

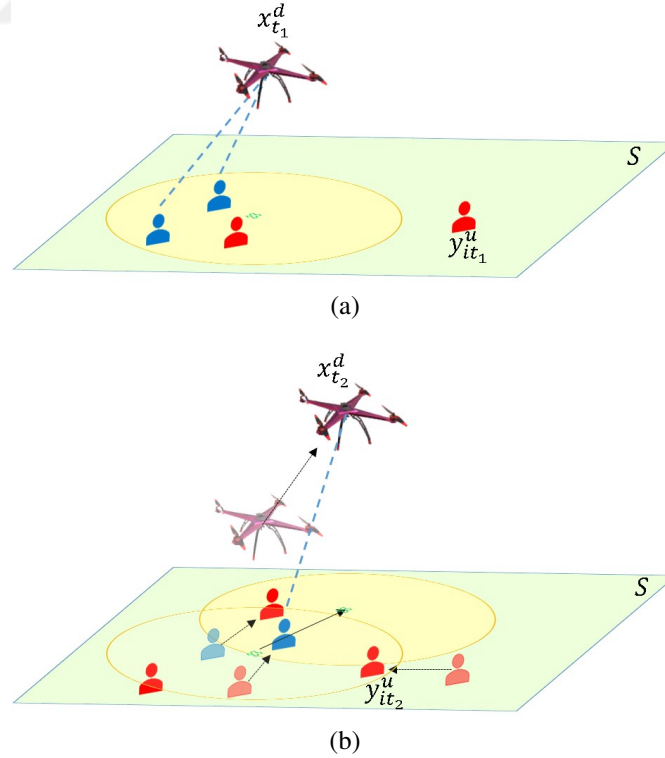
çalışmalarda ele alınması planlanmaktadır. Kapasite kısıtının gevşetilmesi her ne kadar gerçekçiliği azaltsa da bu sistemin karakteristiklerinin incelenmesi kapasiteli sistemlere de ışık tutması açısından önem arz etmektedir.

5.1.1 İletişim modeli

$\mathcal{I} = \{1, \dots, n\}$ ve $\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$ sırasıyla kullanıcı ve kullanıcıların hem konum hem de taleplerini güncelleyebildiği zaman aralıklarını gösteren kümeler olmak üzere,

t periyodundaki İHABİ konumu $x_t^d \in Q$ ile gösterilmektedir. \mathbf{X}^d , KHA tasarımının yapıldığı toplam süre boyunca İHABİ'nin her bir t periyodundaki konumunu gösteren $t \times 3$ boyutlu matrisi ifade etmektedir. Kullanıcı i 'nin $t \in \mathcal{T}$ periyodundaki konumu $y_{it}^u \in S$, talebi ise $d_{it} \in \mathbb{R}$ ile gösterilmiştir. Kullanıcı talepleri, her bir kullanıcının tahammül edebileceği maksimum sinyal kaybı olarak modele dahil edilmiştir. Her kullanıcının kendine özgü bir tolerans değeri olduğu, bu değer üzerindeki sinyal kaybını kabul etmeyeceği ve bu değer her periyotta değişebileceği varsayılmıştır. Dolayısıyla, İHABİ ile kullanıcı arasındaki sinyal kaybı değeri bu toleranstan düşük olduğu sürece kullanıcının kapsanabildiği, aksi halde kapsanamadığı düşünülmektedir. Tasarlanan KHA'nın temsili bir gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir.

Şekle göre kullanıcıların t_1 anındaki yerleşim planı doğrultusunda kırmızı ile gösterilen kullanıcılar kapsanamazken, mavi ile gösterilen kullanıcılar kapsanmaktadır. Bir sonraki periyotta kullanıcıların bazılarının konumları değişmiş ve t_1 periyodunda kapsanabilen bazı kullanıcılar t_2 periyodunda kapsanamamış, t_1 periyodunda kapsanamayan bazı kullanıcılar ise t_2 periyodunda kapsanmaya başlamıştır. Bu değişimler, kullanıcıların ve İHABİ'nin konum değişikliğinden kaynaklı sinyal kaybı değerindeki değişimlerden kaynaklanabilirken, kullanıcı tolerans değerlerinin değişiminden de kaynaklanabilmektedir. Bu model kapsamında, kullanıcı konumlarının



Şekil 5.1: Dinamik tek İHABİ'li KHA için farklı periyotlardaki kullanıcı ve İHABİ yerleşiminin temsili gösterimi. (a) $t = t_1$. (b) $t = t_2$.

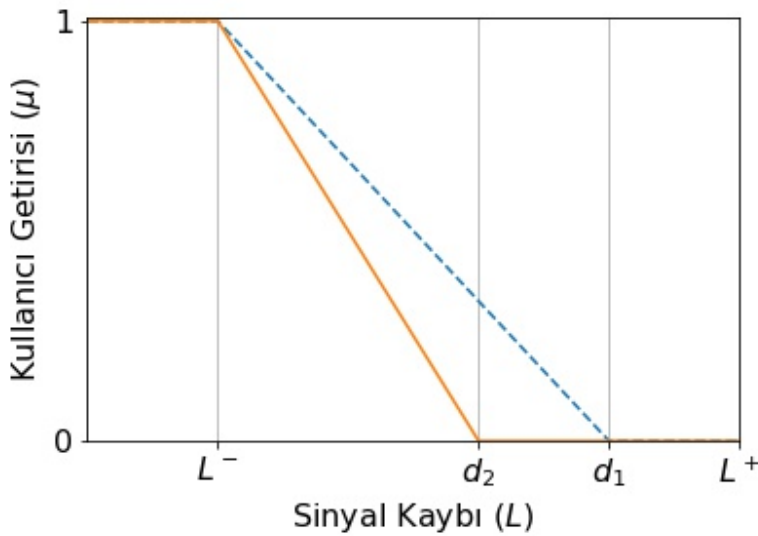
ve tolerans değerlerinin periyotlar özelinde birbirinden bağımsız olduğu varsayılmıştır.

Kullanıcılardan elde edilen getiri, kullanıcıların bireysel önem derecesi $w_i \in [0, 1]$ ile gerçekleşen sinyal kaybı değerine göre belirlenmektedir. $\mu : Q \times S \times \mathbb{R} \leftarrow [0, 1]$, $x \in Q$ konumundaki İHABİ ile $y \in S$ konumunda ve d toleransına sahip kullanıcı arasındaki getiriye belirten fonksiyon olmak üzere, bu fonksiyon aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$\mu(x, y, d) = \max \left\{ 0, \frac{d - L(x, y)}{d - L^-} \right\}. \quad (5.1)$$

μ fonksiyonu ile hem kullanıcıların ancak tolerans değerlerinin altında bir sinyal kaybı sağlandığında kapsanması, hem de daha az sinyal kaybı sağlandıkça getirinin artması sağlanmıştır. Bu yaklaşım, daha önce iki boyutlu yerseçim problemlerinde KMKYP olarak adlandırılmış ve farklı uygulama alanlarında gerçek hayatta karşılığı bulunduğu gösterilmiştir [26]. KHA'lar da bu yaklaşıma oldukça uygun bir uygulama alanı olarak gösterilmiştir. Sinyal kaybı azaldıkça, kullanıcıların daha yüksek bağlantı hızlarına ulaşması sağlandığından, kullanıcı getirisinin de daha yüksek olacağı varsayılmaktadır. Literatürde farklı getiri modelleri ele alınmakla birlikte, bu model kapsamında doğrusal getiri olduğu varsayılmıştır. İki farklı tolerans değeri için elde edilen getiri temsili olarak Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

İHABİ servis alanı ve kullanıcıların konumlandırıldığı alanlar sınırlı kabul edildiğinden, sinyal kaybı değeri de sınırlı olacaktır. Dolayısıyla, gerçek sinyal kaybı değerlerinin olabilecek en küçük ve en büyük sinyal kayıp değerleri, L^- ile L^+ , arasında olabileceği varsayılmıştır. Bu doğrultuda, sinyal kaybı değeri, kullanıcının tolerans değerinden az



Şekil 5.2: İki farklı tolerans değeri için kullanıcı getirisinin sinyal kaybı değerine göre değişimi.

olduğu anda kullanıcıdan getiri elde edilmeye başlanacak ve bu getiri olabilecek en düşük sinyal kaybı değerine dek doğrusal olarak artacaktır.

5.1.2 Matematiksel model

Bu bölümde, bir önceki bölümde çalışma prensipleri verilen KHA için karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Formülasyona geçmeden, dinamik KHA'larda İHABİ'lerin hareket yeteneği ile ilgili olarak literatürde ve bu tezde ele alınan teknikler açıklanmaktadır.

İHABİ'ler hareket kabiliyeti açısından oldukça esnek olmakla birlikte, günümüz batarya ve güç ünitesi teknolojileri İHABİ'lerin havada kalma sürelerinin sınırlı kalmasına sebep olmaktadır. KHA tasarımlarında kullanılan ve alçak irtifada (500 m'ye kadar) uçabilen İHA'ların ortalama uçuş süreleri 1,5 - 2 saat ile sınırlı kalmaktadır. İHABİ'lerde bu süre içerisinde hem İHA hareketi hem de sinyal iletimi, İHA üzerine yerleştirilen bataryalarla sağlanmaktadır. Bu sınırlı sürede İHABİ performansının artırılması amacıyla, İHA hareketinin sinyal iletimine nazaran daha az enerji tüketmesi hedeflenmekte, bu amaçla da farklı metrikler kullanılmaktadır. Ortalama hız, ortalama kat edilen mesafe gibi farklı metrikler kullanılmakla birlikte, bu tezde literatürde de sıklıkla kullanılan toplam kat edilen mesafe kriteri kullanılmıştır.

$\Upsilon : \mathcal{Q}^T \rightarrow \mathbb{R}$, verilen bir yerleşim planına göre kat edilen toplam mesafeyi hesaplayan fonksiyon olmak üzere, başlangıç ve bitiş konumu, x_0^d ve x_{T+1}^d , bilindiği varsayılan bir İHABİ'nin, \mathbf{X}^d , yerleşim planı için toplam kat edilen mesafe aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\Upsilon(\mathbf{X}^d) = \sum_{t=1}^{T+1} \|x_t^d - x_{t-1}^d\|. \quad (5.2)$$

İHABİ'nin hareketi ile kapsama performansı arasındaki denge, $v \in [0, 1]$, parametresi ile kontrol edilecektir. Sonuç olarak, aşağıdaki P_3 karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$P_3 : \text{enb}_{\mathbf{X}^d \in \mathcal{Q}^T} \Pi(\mathbf{X}^d) = -v\Upsilon(\mathbf{X}^d) + (1-v) \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} w_i \mu(x_t^d, y_{it}, d_{it}).$$

P_3 ile İHABİ'nin hizmet verdiği süre boyunca toplam getirinin enbüyükleme amaçlanırken, İHABİ hareketliliğinin de azaltılması hedeflenmiştir. $v = 0$ iken, İHABİ hareketliliği herhangi bir maliyet oluşturmazken, bu değer 1'e yaklaşması İHABİ'nin daha stabil kullanılmasına neden olacaktır. Nümerik analizlerde, bu değer 1'e yaklaşması İHABİ'nin üzerindeki etkisi incelenmiştir (bkz. Bölüm 5.3).

μ fonksiyonu içinde yer alan mak operatörünü bertaraf etmek için, i kullanıcısının t periyodunda kapsanıp kapsanmadığını gösteren $z_{it} \in \{0, 1\}$ ikili değişkenleri formülasyona ilave edilebilir. Bu durumda, $v_{it} = w_i d_{it} / (d_{it} - L^-)$ ve $\kappa_{it} = 1 / (d_{it} - L^-)$, parametreler ve \bar{M} yeterince büyük bir sabit olmak üzere, P_3 , aşağıdaki şekilde tekrar tanımlanabilir:

$$P_3 : \underset{\substack{\mathbf{X}^d \in Q^T \\ \mathbf{Z} \in \mathbb{B}^{n \times T}}}{\text{enb}} \Pi(\mathbf{X}^d, \mathbf{Z}) = -v\Upsilon(\mathbf{X}^d) + (1-v) \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \left(v_{it} z_{it} - \kappa_{it} z_{it} L(x_t^d, y_{it}^u) \right)$$

öyle ki

$$L(x_t^d, y_{it}^u) - d_{it} \leq \bar{M}(1 - z_{it}), \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}. \quad (5.3)$$

Yukarıdaki formülasyonun amaç fonksiyonunda z ve L değişkenlerinin çarpımı bulunmaktadır. Bu çarpımı doğrusallaştırmak için, $s_{it} \geq 0$ yardımcı değişkenleri formülasyona dahil edilmiş ve P_3 'ün son hali aşağıda verilmiştir:

$$P_3 : \underset{\substack{\mathbf{X}^d \in Q^T, \mathbf{Z} \in \mathbb{B}^{n \times T} \\ \mathbf{S} \in \mathbb{R}_+^{n \times T}}}{\text{enb}} \Pi(\mathbf{X}^d, \mathbf{Z}, \mathbf{S}) = -v\Upsilon(\mathbf{X}^d) + (1-v) \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (v_{it} z_{it} - \kappa_{it} s_{it})$$

öyle ki

$$(5.3),$$

$$s_{it} \leq \bar{M} z_{it}, \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T} \quad (5.4)$$

$$s_{it} \leq L(x_t^d, y_{it}^u), \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T} \quad (5.5)$$

$$L(x_t^d, y_{it}^u) - \bar{M}(1 - z_{it}) \leq s_{it}, \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}. \quad (5.6)$$

Yukarıdaki formülasyon ile z değişkeni 0 olduğunda (5.4) kısıtı aktif hale gelecek ve s değişkeni de 0 değerini alacaktır. z değişkeni 1 olduğunda ise (5.5) ve (5.6) kısıtları aktif hale gelecek s değişkeni L fonksiyonunun değerine eşit olacaktır. Bu formülasyon, L fonksiyonunun konveks ve doğrusal olmaması nedeniyle çözümü zor problemler ailesine aittir. Bir sonraki bölümde, daha kısa sürede etkin çözümler üretilmesi amacıyla, ilk olarak Lagranj gevşetmesi yoluyla bir ayrıştırma algoritması sonrasında SY tekniği ile yeni bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

5.2 Çözüm Yöntemi

P_3 , BARON gibi hazır yazılımlar ile çözülebilse de kullanıcı ve periyot sayısı arttıkça çözüm alınamamaktadır. Bu durumla başa çıkabilmek için, bu bölümde ilk olarak orijinal formülasyona uygulanan Lagranj gevşetmesi tekniği ile problem nispeten daha kolay çözülebilir iki alt probleme ayrıştırılmakta, sonrasında bu alt

problemlerin ardışık olarak çözülmesine dayanan bir Lagranj Ayırıştırma Algoritması (LAA) geliştirilmektedir.

5.2.1 Lagranj ayırıştırma algoritması

Orijinal formülasyon, P_3 'te, kısıt kümesinde L fonksiyonunu içeren (5.3), (5.5) ve (5.6) nolu kısıtlar ρ , ϑ ve φ dual değişkenleri ile amaç fonksiyonuna taşındığında, $\omega_{1,it} = (v_{it} - \bar{M}(\vartheta_{it} + \varphi_{it}))$, $\omega_{2,it} = (-\kappa_{it} - \rho_{it} + \vartheta_{it})$, $\omega_{3,it} = (\rho_{it} - \vartheta_{it} - \varphi_{it})$ ve $\omega_{4,it} = (\bar{M}(\vartheta_{it} + \varphi_{it}) + \varphi_{it}d_{it})$, olmak üzere, Lagranj problemi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$P_3^L : \begin{array}{l} \text{enb} \\ \mathbf{X}^d \in Q^T, \mathbf{Z} \in \mathbb{B}^{n \times T} \\ \mathbf{S}, \rho, \vartheta, \varphi \in \mathbb{R}_+^{n \times T} \end{array} \Pi_L(\mathbf{X}^d, \mathbf{Z}, \mathbf{S}, \rho, \vartheta, \varphi) = -v\Upsilon(\mathbf{X}^d) \\ + (1 - v) \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \left(\omega_{1,it} z_{it} + \omega_{2,it} s_{it} + \omega_{3,it} L(x_t^d, y_{it}^u) + \omega_{4,it} \right)$$

öyle ki

$$(5.4).$$

P_3^L , dual değişken değerleri sabitlendiğinde ilki \mathbf{Z} ve \mathbf{S} değişkenleri, ikincisi \mathbf{X}^d değişkenleri için çözülecek iki ayrı alt probleme dönüştürülebilir. Bu alt problemler aşağıda $\bar{P}_3^{L,1}$ ve $\bar{P}_3^{L,2}$ formülasyonları ile gösterilmiştir.

$$\bar{P}_3^{L,1} : \begin{array}{l} \text{enb} \\ \mathbf{Z} \in \mathbb{B}^{n \times T}, \mathbf{S} \in \mathbb{R}_+^{n \times T} \end{array} \Pi_{L,1}(\mathbf{Z}, \mathbf{S}) = (1 - v) \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} (\omega_{1,it} z_{it} + \omega_{2,it} s_{it})$$

öyle ki

$$(5.4).$$

$$\bar{P}_3^{L,2} : \text{enb}_{\mathbf{X}^d \in Q^T} \Pi_{L,2}(\mathbf{X}^d) = -v\Upsilon(\mathbf{X}^d) + (1 - v) \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \omega_{3,it} L(x_t^d, y_{it}^u).$$

$\bar{P}_3^{L,1}$, gözlem yoluyla çözülebilen nispeten kolay bir problemdir. Amacı enbüyüklemek olduğu için, değişkenlerin amaç fonksiyonundaki katsayıları pozitif olduğu sürece ilgili değişkenin alabileceği en yüksek değeri alması uygun olacaktır. Bu doğrultuda, parametre değerlerine göre optimal çözüm elde etme yöntemi Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Her iki parametrenin negatif olması durumunda hem z hem de s değişkeni 0 değerini alacak ve optimal amaç fonksiyon değeri de 0 olacaktır. ω_1 parametresi negatif olmadığı sürece z değişkeni alabileceği en yüksek değer olan 1 değerini alırken, bu durumda, s değişkeni eğer ω_2 negatif değilse alabileceği en yüksek değer olan \bar{M} değerini aksi halde 0 değerini alacaktır. ω_1 'in negatif, ω_2 'nin pozitif olması durumunda iki durum söz konusudur. Eğer $z = 1$ ve $s = \bar{M}$ durumu amaç fonksiyon değerini artırıyor, değişkenler bu değere, aksi halde iki değişken de 0 değerine atanacaktır.

Çizelge 5.2: Lagranj gevşetmesi sonrası elde edilen birinci alt problemin, $\bar{P}_3^{L,1}$, optimal çözümü.

$\omega_{1,it}$	$\omega_{2,it}$	z_{it}	s_{it}	Kıstas
≥ 0	≥ 0	1	\bar{M}	-
≥ 0	< 0	1	0	-
< 0	≥ 0	1	\bar{M}	$\omega_{1,it} + \bar{M}\omega_{2,it} \geq 0$
		0	0	$\omega_{1,it} + \bar{M}\omega_{2,it} < 0$
< 0	< 0	0	0	-

$\bar{P}_3^{L,2}$ formülasyonu, P_3^L 'ye göre nispeten daha kolay çözülebilir olsa da problemin konveks olmayan yapısı halen korunduğundan yine de zor bir problemdir. Bu sebeple, bu ikinci alt problem için ilave bir gevşetme stratejisi olarak sinyal kaybı fonksiyonunda bu konveks olmama durumuna sebep olan P_{LoS} fonksiyonu tüm kullanıcılar için 1 varsayılmaktadır. Bu varsayım ile çözümün olursuz olma ihtimali doğmasına karşın, bu olursuzluktan kurtulmak adına, Lagranj gevşetmesinden elde edilen sonuçlar tekrar orijinal problemde değerlendirilerek kontrol edilmektedir. Bu durumda, sinyal kaybı İHABİ ile kullanıcı arasındaki mesafenin logaritmik bir fonksiyonu olacaktır, d.d. $\tilde{L}(x, y) = A + B + \eta \log_{10} e(x, y)$. Bu durumda, $O = \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \omega_{3,it} (A + B)$ ve $\omega_{5,it} = \eta \omega_{3,it}$, olmak üzere, gevşetilmiş $\bar{P}_3^{L,2}$ aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\tilde{P}_3^{L,2} : \text{enb}_{\mathbf{X}^d \in Q^T} \tilde{\Pi}_{L,2}(\mathbf{X}^d) = O - v\Upsilon(\mathbf{X}^d) + (1 - v) \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \omega_{5,it} \log_{10} d_{it}.$$

$\tilde{P}_3^{L,2}$ 'de, O değeri problem çözümünde bir etkisi olmadığından, çözümden sonra amaç fonksiyonuna eklenebilir. Ayrıca, ω_5 parametreleri pozitif ya da negatif olabilir. \mathcal{I}_t^+ ve \mathcal{I}_t^- , sırasıyla, $\omega_{5,t}$ parametresinin negatif olmayan ve negatif olduğu kullanıcıların kümesi olmak üzere, d.d. $\mathcal{I}_t^+ = \{i : \omega_{5,it} \geq 0\}$ ve $\mathcal{I}_t^- = \{i : \omega_{5,it} < 0\}$, $\tilde{P}_3^{L,2}$, aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_3^{L,2} : \text{enb}_{\mathbf{X}^d \in Q^T} \tilde{\Pi}_{L,2}(\mathbf{X}^d) &= -v\Upsilon(\mathbf{X}^d) + (1 - v) \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}_t^+} \omega_{5,it} \log_{10} d_{it} \\ &+ (1 - v) \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}_t^-} \omega_{5,it} \log_{10} d_{it}. \end{aligned}$$

$\tilde{P}_3^{L,2}$ 'nin bu yeniden düzenlenmiş halinde, amaç fonksiyonunun ilk terimi her biri konveks olan öklid mesafelerinin toplamının negatifi olduğundan konkav bir terimdir. İkinci terim de logaritmanın konkav bir fonksiyon olmasından dolayı konkav fonksiyonların toplamı olacağından konkav bir fonksiyondur. Dolayısıyla, ilk iki terimin toplamı konkavdır. Son terimde yer alan ω_5 değerleri negatiftir. Dolayısıyla, negatiflik işareti toplamın dışına alındığında, konkav bir fonksiyondan

konkav başka bir fonksiyonun çıkarılması ile hesaplanan bir amaç fonksiyonu elde edilmiş olur. Bu durum, literatürde sıklıkla kullanılan “Konveks Fonksiyonların Farkı” programlama yöntemleri ile ele alınmaktadır [100]. $\tilde{P}_3^{L,2}$ kapsamında amaç enbüyükleme olduğundan, bu formülasyon, “Konkav Fonksiyonların Farkı” (KFF), olarak ele alınmıştır.

Yukarıda detayları verilen Lagranj ayrıştırma tekniği ile orijinal problem nispeten daha kolay çözülebilir hale gelmektedir. Bu tekniğe dayanarak geliştirilen LAA, Algoritma 8 ile özetlenmiştir. Algoritma, belirli sayıda adım boyunca (*mak_iter*), her bir k adımında $P_3^{L,1}$ ve $\tilde{P}_3^{L,2}$ formülasyonlarının, değerleri sabitlenmiş ρ , ϑ ve φ dual değişkenleri kullanılarak ardışık şekilde çözülmesini, bu çözümlerden elde edilen ve orijinal probleme bir üst sınır oluşturan amaç fonksiyon değeri ile bu çözümlerden elde edilen karar değişkeni değerlerinin orijinal problemde yerine konmasıyla elde edilen alt sınır değerlerinin takibini gözetmektedir. Algoritma adımları sırasında bu alt ve üst sınır değerleri eşitlendiği takdirde optimal sonuç bulunmuş olur. Aksi takdirde, dual değişkenler alt-gradyan tekniği ile güncellenerek bir sonraki adıma geçilmektedir.

Alt-gradyan tekniği, Lagranj gevşetmesi uygulanan problemlerde sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Bu teknik ile, her değişken iki farklı değer çarpımı kullanılarak güncellenmektedir. Bu çarpımdaki birinci değer, gevşetilmiş problemin amaç fonksiyonuna göre ilgili değişkenin gradyan değerinin diğer tüm değişkenlerin gradyan değeri ile normalize edilmiş değeri, ikinci değer ise sistematik şekilde küçültülen bir

Algoritma 8 Lagranj Ayrıştırma Algoritması.

Girdi: Q, Y^u, D, w, mak_iter .

- 1: ρ, ϑ, φ değişkenlerini rasgele belirle. $k \leftarrow 0, \Pi_{üst} \leftarrow +\infty$.
 - 2: **Geçerliyen** $k < mak_iter$ **yap**
 - 3: ρ, ϑ, φ değerlerini kullanarak, Z_k ve S_k değişkenlerinin değerlerini belirle (bkz. Çizelge 5.2)
 - 4: $X_k^d = \arg \max_{X^d \in Q^T} \tilde{\Pi}_{L,2}(X^d)$.
 - 5: **Eğer** $\Pi_L(X_k^d, Z_k, S_k, \rho, \vartheta, \varphi) < \Pi_{üst}$ **ise**
 - 6: $\Pi_{üst} \leftarrow \Pi_L(X_k^d, Z_k, S_k, \rho, \vartheta, \varphi)$
 - 7: **Bitir Eğer**
 - 8: **Eğer** $\Pi_{üst} = \Pi(X_k, Z_k, S_k)$ **ise**
 - 9: **BİTİR**
 - 10: **Değilse**
 - 11: ρ, ϑ, φ değerlerini alt-gradyan tekniği ile güncelle
 - 12: **Bitir Eğer**
 - 13: $k \leftarrow k + 1$.
 - 14: **Bitir Geçerliyen**
 - 15: **Çıktı:** $\Pi_{üst}$
-

parametredir. Bu parametre, genellikle 2 değeri ile başlayıp, gevşetilmiş problemin çözümünün iyileştirilemediği belirli bir adım sayısı sonrasında yarısına indirilmektedir. LAA için de aynı yöntem uygulanmıştır.

LAA'nın çözüm üretmesinin dışında diğer bir faydası da algoritma boyunca orijinal problemin amaç fonksiyonu için alt ve üst sınır değerlerinin izlenebilmesidir. Gevşetilmiş problemin amaç fonksiyonu, orijinal probleme bir üst sınır sağlarken, bu problemin çözümü ile elde edilen yerleşim planı, orijinal probleme uygulandığında elde edilen amaç fonksiyon değeri bir alt sınır vermektedir. Dolayısıyla, LAA'nın her bir adımında alt ve üst sınırlar arasındaki fark izlenerek, orijinal amaç fonksiyon değeri için bir aralık da belirlenebilecektir.

5.2.2 Sürekli yakınsama (SY) algoritması

LAA her ne kadar orijinal probleme nazaran daha hızlı çözümler üretse de kullanıcı ve periyot sayısının artması, içinde bulundurduğu KFF adımları sebebiyle, bu algoritmanın da performansında kötüleşmeye neden olmaktadır. Bu bölümde, bu zorluğu da bertaraf etmek adına, literatürde özellikle iki boyutlu yerleşim problemlerinde kullanılan SY tekniği, dinamik İHABİ yerleşim problemine uyarlanmış ve kısa sürelerde makul çözümler alınması hedeflenmiştir.

SY, esasında problem parametrelerinin kesikli olması yerine sürekli fonksiyonlar ile yakınsandığı ve bu sebeple ilgili karar değişkenlerinin de sürekli fonksiyonlarla ifade edilebileceği varsayımına dayanmaktadır. İlk olarak [101] tarafından sadece zaman boyutu düşünülerek toplu taşıma araçlarının çizelgelenmesi amacıyla kullanılmış, sonrasında iki boyutlu yerleşim problemlerinin tedarik zinciri, tesis yerleşimi ve depo yerleşimi gibi statik senaryoları için yeniden ele alınmıştır [102–106]. İlk kez, [107], SY'yi dinamik yerleşim problemleri için iki boyutlu düzlemde kullanmış, sürekli artan talebin olduğu bir market için tesis yerleşim probleminin çözümünü geliştirmiştir. Bu teknik için en önemli varsayımlardan bir tanesi, parametre değerlerinin zaman ya da coğrafi olarak aşırı değişkenlik göstermemesidir. SY'nin farklı kullanım alanları için [108] ve bu çalışmanın atıf yaptığı çalışmalar incelenebilir.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların tamamı iki boyutlu düzlemde ve açıldıktan sonra yeri değişmeyen tesislerin yer aldığı problemler için SY tekniğini kullanmaktadır. Çok periyotlu problem için yapılan çalışmada ise, [107], yine tesislerin açıldıktan sonra yer değiştiremeyeceği, bununla birlikte kullanıcı taleplerinin zaman içinde monoton arttığı varsayılmıştır. Ancak, bu tez kapsamında incelenen dinamik İHABİ yerleşim problemi, hem problemin üç boyutlu ortamda incelenmesini hem de talebin herhangi bir trend

izlemeden değiştiği senaryoyu baz almaktadır. Bununla birlikte, telekomunikasyon uygulamaları SY'nin geçerli olabileceği uygun alanlardandır. Kullanıcı yoğunluğu özellikle coğrafı anlamda kısa mesafelerde aşırı değişkenlikler göstermediğinden, SY tekniğinin bu tezde incelenen probleme uygulanabileceği öngörülmüştür.

SY tekniğinde, w ve D 'nin kullanıcının konumuna ve zamana bağlı sürekli fonksiyonlar ile ifade edildiği varsayılmaktadır. Bundan sonraki bölümde, $w : S \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ve $d : S \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonları $y \in S$ konumundaki bir kullanıcının $t \in \mathbb{R}$ anındaki getiri ve talep değerlerini gösteren fonksiyonları ifade edecektir. İlk olarak nispeten daha kolay olan, kullanıcı talebinin tüm S içinde eşit olduğu homojen senaryo ele alınmış ve bu problem için geliştirilen zm yöntemi kullanılarak daha geniş uygulama alanı olan, parametrelerin değişken olabileceği heterojen senaryo için bir zm algoritması geliştirilmiştir.

5.2.2.1 Homojen durum

Homojen durumda, kullanıcı parametreleri, w ve D 'nin, tüm S üzerinde her yerde ve tüm planlama ufku boyunca aynı olduğu varsayılmaktadır, d.d. $w(y, t) = \bar{w}, d(y, t) = \bar{d}$. Bu durumda, İHABİ'nin kullanıcıların konum ve taleplerine adapte olmak amacıyla farklı zamanlarda hareket etmesine gerek kalmayacaktır. Bu doğrultuda, L 'nin yatay ve dikey mesafeye bağlı bir fonksiyon olmasını kullanarak aşağıdaki önerme sunulmuştur.

Önerme 5.1. *Homojen durumda İHABİ yüksekliği sabitlendiğinde, İHABİ'nin kapsama alanı bir daire ile ifade edilebilir.*

İspat. İHABİ yüksekliği sabit varsayıldığından, sinyal kaybı yalnızca İHABİ ile kullanıcı arasındaki yatay mesafeye bağlı değişecektir. Bu durumda, sinyal kaybı yatay mesafeye göre monoton azalan bir fonksiyon olduğundan (ispat için bkz. Ek-3), S içinde herhangi bir noktadan uzaklaşmaya başlandığında, bu artış hem İHABİ ile kullanıcı arasındaki toplam mesafede bir artışa hem de aradaki açıda bir azalışa sebep olacağından, sinyal kaybı monoton artacaktır. d de tüm noktalarda sabit ve sonsuz olmayan bir değer olduğundan, belirli bir mesafede sinyal kaybı mutlaka bu d değerini aşacaktır. Belirlenen noktadan uzaklaşma yn mesafe ve aı bakımından bir değişiklik yaratmayacağı için herhangi bir yönde gidilmesi d 'nin aşılacağı mesafeyi değiştirmeyeceğinden, herhangi bir nokta etrafındaki kapsama alanı, d 'nin aşıldığı mesafeyi yarıçap kabul eden bir daire ile gösterilebilir. \square

Önerme 5.1 ile S içindeki herhangi bir y noktası etrafındaki maksimum kapsama alanı, bu alanın içindeki ortalama sinyal kaybı değerinin d 'ye eşit olduğu alan olarak

belirlenebilecektir. $A : S \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, İHABİ $h \in \mathbb{R}$ yüksekliğindeyken $y \in S$ noktası etrafındaki kapsama alanını gösteren fonksiyon olmak üzere, homojen durumda tüm parametreler her noktada aynı olduğundan, A fonksiyonunun bir değişkeni olan y göz ardı edilebilir, d.d. $A(y, h) \approx A(h)$.

SY tekniğinde ele alınması gereken önemli bir husus, incelenen sistemin maliyet ya da fayda fonksiyonunun, bulunmaya çalışılan kapsama alanına bağlı bir şekilde ifade edilebilmesidir. Bugüne dek incelenen çalışmalar genellikle maliyet odaklı olduğundan, genellikle maliyet fonksiyonları üzerinde çalışılmıştır. Örneğin, [105], bir ana depodan son kullanıcıya ulaştırılacak ürünlerin dağıtımında kullanılacak bir dağıtım üssünün yerseçim problemi için maliyet fonksiyonunun, dış ve iç transfer maliyetlerinin toplamından oluşacağını, dış transfer maliyetinin kapsama alanındaki ortalama talep miktarıyla, iç transfer maliyetinin kapsama alanındaki son kullanıcılara olan ortalama mesafe ile formülize edilebileceğini göstermiştir.

Dinamik İHABİ yerseçim probleminde de toplam getirinin İHABİ kapsama alanının bir fonksiyonu şeklinde tanımlanabilmesi öngörülmektedir. Kapsama alanı içindeki ortalama sinyal kaybı değeri net olarak bilinmemekle birlikte, bu alan genişledikçe bu kaybın artması, dolayısıyla birim getirinin azalması beklenmektedir. Sabit bir h değerinde, sinyal kaybındaki artış yalnızca yatay mesafe ile ilişkili olacaktır. [103], dairesel kapsama alanı için ortalama mesafenin, A toplam alanı göstermek üzere, $2/(3\sqrt{\pi}) \times \sqrt{A}$ formülü ile bulunabileceğini göstermiştir. Bu tezde de aynı yaklaşım kullanılmıştır.

Bununla birlikte, kapsama alanı arttıkça daha fazla kullanıcıya ulaşılacağı varsayıldığından ortalama birim getirinin de bu alanla doğru orantılı olarak artacağı varsayılmıştır. Sinyal kaybı ve birim getiri özelindeki bu varsayımlar altında, $\bar{L}(h) = A + 10\eta \log_{10}(h) + \mu_{LoS}$, İHABİ'nin $y \in S$ noktasının hemen üzerinde h yüksekliğinde olduğundaki sinyal kaybı değeri olmak üzere, SY formülasyonu aşağıda tanımlanmıştır:

$$P_3^S : \text{enb}_{h, A(h) \geq 0} \Pi_S(h, A(h)) = \bar{w}A(h) \left(\frac{d - \bar{L}(h)(2/3)\sqrt{A(h)/\pi}}{d - L^-} \right).$$

Yukarıdaki formülasyon aslında farklı \bar{L} fonksiyonları kullanılarak da kurulabilir. Ancak, bu tezdeki yaklaşım, İHABİ'nin herhangi bir noktadan uzaklaştıkça sinyal kaybı değerindeki ortalama azalışı baz aldığından, bu kaybın başlangıç değeri olarak İHABİ'nin bu noktanın hemen üzerinde olduğundaki durum dikkate alınmaktadır.

P_3^S 'te kapsama alanına bağlı toplam getiri $wA(h)$ ile, orijinal formülasyondaki μ fonksiyonu ise parantez içindeki ifade ile temsil edilmektedir. Bu formülasyonun, kesikli formülasyona göre en önemli avantajı, S içinde herhangi bir nokta bazında

kolaylıkla çözülebilmesidir. Π_S , konkav bir fonksiyon olduğundan (bkz. Ek-6), sabit bir h için optimal $A(h)$ değeri, Π_S fonksiyonunun $A(h)$ 'ye göre ilk türevinin 0'a eşitlendiği noktada bulunabilir. Bu işlem sonrası, sabit h için optimal kapsama alanı ve bu alana bağlı optimal amaç fonksiyon değeri aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$A^*(h) = \pi \left(\frac{\bar{d}}{\bar{L}(h)} \right)^2, \quad (5.7)$$

$$\Pi_S(h, A^*(h)) = \frac{\pi \bar{w} \bar{d}^3}{3(\bar{d} - L^-) \bar{L}^2(h)}. \quad (5.8)$$

(5.8), $\bar{L}(h)$ 'nin en küçük olduğu değerde en büyüklenecektir. \bar{L} , h 'nin logaritmik bir fonksiyonu olduğundan, h 'nin en küçük değerinde en küçüklenmiş olur. Dolayısıyla, homojen durumdaki optimal çözüm, İHABİ'nin yerleştirilebileceği en alçak yükseklikte, (5.7) ile bulunan kapsama alanı ile S üzerindeki herhangi bir noktaya yerleştirilmesi ile bulunabilir.

5.2.2.2 Heterojen durum

Heterojen durumda, homojen durumdan farklı olarak w ve d değerlerinin $y \in S$ ve $t \in \mathbb{R}$ 'ye bağlı olarak değişebileceği varsayılmıştır. Bu durumda, farklı zamanlarda farklı talep değerleri oluşacağı için İHABİ hareketliliği de önem kazanacaktır. Heterojen durumun çözümü için, ilk olarak İHABİ hareketliliğinin göz ardı edildiği bir formülasyon geliştirilmiş, sonrasında bu formülasyonun iyileştirilmesi amacıyla İHABİ hareketliliğinin modele dahil edildiği bir arama algoritması geliştirilmiştir.

[107], zaman boyutunun dahil edildiği problemlere SY tekniği uygulandığında, tüm planlama ufkunun sınırlı sayıda periyota bölünerek kesikli hale getirilmesinin ve parametre değerlerinin bu periyotların her birinin tam ortasındaki değerlerle yakınsanmasının problemlerin çözüm kalitesi açısından önemli bir değişikliğe yol açmadığını göstermiştir. Bu tezde de benzer bir yaklaşım kullanılmıştır.

Bu doğrultuda, tüm planlama ufku, her biri eşit sürelerde olacak T periyoda bölünebilir. İHABİ hareketliliği başlangıçta göz ardı edildiğinden, İHABİ yerleşimi, her bir $t \in \mathcal{T}$ periyodu özelinde ayrı ayrı yapılabilir. τ_t , $t \in \mathcal{T}$ periyodunun orta noktasını, t , ise her periyotun uzunluğunu göstermek üzere, $y \in S$ noktasının t periyodundaki parametre değerleri $w(y, \tau_t)$ ve $d(y, \tau_t)$ ile yakınsanabilecektir. Bu değerler, her $y \in S$ noktası için her $t \in \mathcal{T}$ periyodunda farklılık gösterebilecektir. Bununla birlikte, her $y \in S$ noktasındaki parametre değerleri farklı olacağından bu noktalar etrafındaki kapsama alanlarının da farklı olması beklenmektedir. Dolayısıyla, homojen durumdan farklı

olarak, heterojen durumdaki kapsama alanı $A(h)$ ile değil, $A(y, h)$ fonksiyonu ile bulunabilir. Bu durumda, $t \in \mathcal{T}$ periyodu özelindeki optimal İHABİ yüksekliği ve kapsama alanı aşağıdaki formülasyon ile bulunabilir.

$$\text{enb}_{\substack{y \in S, h \geq 0 \\ A(y, h) \geq 0}} \Pi_t(y, h, A(y, h)) = w(y, \tau_t) A(y, h) \frac{d(y, \tau_t) - \bar{L}(h)(2/3) \sqrt{A(y, h)/\pi}}{d(y, \tau_t) - L^-}. \quad (5.9)$$

Yukarıdaki formülasyon, her bir $y \in S$ özelinde homojen durumda izlenen yol ile kolaylıkla çözülebilir. Buradaki tek fark, homojen durumda her noktada aynı olacağı varsayılan parametrelerin, her nokta için ilgili noktanın kendi parametresi ile değiştirilecek olmasıdır. Her $y \in S$ için elde edilen optimal çözümün amaç fonksiyon değeri $\Pi_t(y, h, A^*(y, h))$ ile gösterilmek üzere, bu değerlerden en yükseği veren y noktası h yüksekliği için İHABİ kapsama alanının t periyodundaki merkez noktası kabul edilebilir. Bu nokta $y_t^*(h)$ ile gösterilmek üzere, yükseklik özelinde bir çizgi arama algoritması ile en iyi çözümü veren h yüksekliği de bulunabilir. Sonuç olarak, bu yükseklik, h_t^* ile gösterilmek üzere, heterojen durumdaki İHABİ konumu $x_t^* = (y_t^*, h_t^*)$, amaç fonksiyon değeri ise $\Pi_t^* = \iota \times \Pi_t(y_t^*, h_t^*, A^*(y_t^*, h_t^*))$ ile bulunmuş olur. Tüm periyotların amaç fonksiyonun değerlerinin toplamı ile bu periyotlardaki x_t^* konumları SY modelinin heterojen durum için amaç fonksiyon değerini ve İHABİ yerseçim stratejisi, \mathbf{X}^* verecektir, d.d. $\Pi^* = \sum_{t \in \mathcal{T}} \Pi_t^*$, $\mathbf{X}^* = \{x_t^*\}_{t \in \mathcal{T}}$.

İHABİ hareketliliğinin amaç fonksiyonuna etkisi göz ardı edildiğinden yukarıdaki süreç, her bir periyot için birbirinden uzak noktalarda İHABİ konumları ile sonuçlanabilir. Bu durumu iyileştirmek için, her adımında rasgele ya da birbirine en uzak iki periyot konumu seçilen ve bu iki konum üzerinden değerlendirme yapılan bir arama algoritması geliştirilmiştir. Algoritma 9, geliştirilen algoritmayı özetlemektedir.

X^* ve Π^* , heterojen durum ile ilgili yukarıdaki süreç sonunda elde edilen İHABİ yerseçim stratejisi ve bu strateji sonucunda elde edilen amaç fonksiyon değeri olmak üzere, arama algoritmasının her bir adımında ilk olarak \mathcal{P} olasılıkla rasgele iki periyot, $1 - \mathcal{P}$ olasılıkla birbirine en yakın iki İHABİ konumu seçilmekte, daha sonra bu İHABİ konumları belirli bir Ψ mesafesi kadar birbirine yaklaştırılmaktadır. Bu yaklaştırma sonrası, orijinal amaç fonksiyonu değeri yükseldiyse $\{x_t^*\}$ stratejisi bu yeni değerlerle güncellenmekte aksi takdirde yeni bir seçim değerlendirmesi için algoritma bir sonraki adıma geçmektedir. Art arda *mak_arama* adımında iyileştirme olmadığında algoritma sonlandırılmaktadır.

Bu algoritma ile izlenen yolun temsili bir gösterimi Şekil 5.3'te verilmiştir. Opak sarı daireler her periyottaki mevcut İHABİ kapsama alanını, opak mavi daireler yaklaştırma sonrası oluşan kapsama alanlarını göstermektedir. Kırmızı ve yeşil çarpım

Algoritma 9 SY Algoritması.

Girdi: $\mathbf{X}^*, \Pi^*, \mathcal{P}, \Psi, \zeta, \bar{k}$.

1: $\bar{\mathbf{X}} \leftarrow \mathbf{X}^*, \bar{\Pi} \leftarrow \Pi^*, k \leftarrow 0, j \leftarrow 0, \Psi_k \leftarrow \Psi$.

2: **Geçerliyen** $k < mak_arama$ yap

3: **Eğer** $j == \bar{k}$ ise

4: $\Psi_k \leftarrow \Psi_k \times \zeta, j \leftarrow 0$

5: **Bitir Eğer**

6: \mathcal{P} olasılıkla rasgele iki periyot ya da $(1 - \mathcal{P})$ olasılıkla birbirine en uzak iki periyodu seç ve bu periyotlardaki İHABİ konumlarını Ψ_k kadar birbirine yaklaştır. Bu yakınlştırma sonrası elde edilen amaç fonksiyon değerini $\tilde{\Pi}$ 'ye ata

7: **Eğer** $\tilde{\Pi} > \bar{\Pi}$ ise

8: $\bar{\Pi} \leftarrow \tilde{\Pi}, k \leftarrow 0$. $\bar{\mathbf{X}}$ 'i yeni konumlara göre güncelle.

9: **Değilse**

10: $k \leftarrow k + 1$

11: **Bitir Eğer**

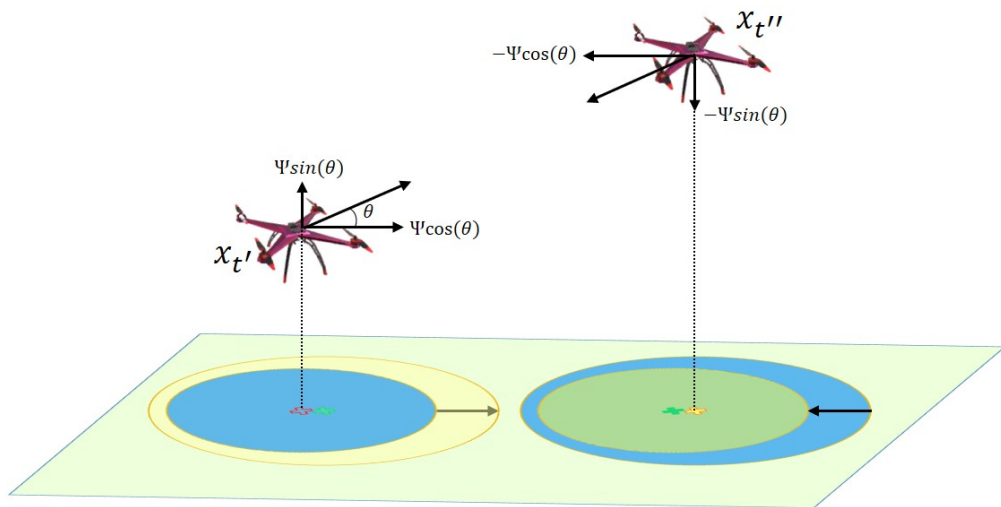
12: $j \leftarrow j + 1$

13: **Bitir Geçerliyen**

14: **Çıktı:** $\bar{\Pi}, \bar{\mathbf{X}}$

işaretleri sırasıyla mevcut ve yakınlştırma sonrası elde edilen kapsama alanı merkez noktalarını göstermektedir. İki konum belirlendikten sonra, konumlar arasındaki açının sinüs ve kosinüs değeri yatay ve dikey düzlemdeki hareket miktarının belirlenmesi için kullanılmaktadır.

Burada dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi, yakınlştırma sonrası yalnızca İHABİ konumlarında değil kapsama alanlarında da bir değişim yapıldığıdır. İHABİ



Şekil 5.3: SY çözümünün iyileştirilmesi için geliştirilen arama algoritmasının bir adımının temsili gösterimi.

konumu yukarı doğru hareket ettirildiğinde, kullanıcı alanından uzaklaşılmasından kaynaklı sinyal kaybı artışının ortalama açının da artırılması ile tolere edilebilmesi amacıyla, kapsama alanı genişletilmekte, aşağı hareket ettirildiğinde benzer sebeple daraltılmaktadır. Örneğin, 200 metreden 205 metreye çıkan bir İHABİ'nin kapsama alanı $|((205 - 200)|/200) \times 100 = \%2,5$ oranında genişletilmektedir. Bunların dışında, İHABİ konumunun Q dışına çıkması halinde, bu çıkışın olduğu yönün tam tersi yönde yakınlaştırma mesafesi için kullanılan parametre kadar Q içine taşınması ve algoritmanın ilerleyen adımlarında aşırı değişimlerden korunmak amacıyla her \bar{k} adımda bir Ψ 'nin ζ oranında küçültülmesi sağlanmaktadır. Sonuç olarak elde edilen yerseçim stratejisi, orijinal problemde, P_3 , yerine konarak SY algoritmasının gerçek amaç fonksiyon değeri bulunmuştur.

Klasik iki boyutlu yerseçim problemlerinde genellikle birden fazla tesisin yerseçimi yapıldığından ve kullanıcıların yalnızca bir tesisten hizmet alması esas olduğundan tesislerin kapsama alanlarının birbiri ile kesişmemesi amaçlanmaktadır. Ancak, bu tezdeki problemde böyle bir kısıt olmadığından, klasik iki boyutlu problemlere uygulanan SY tekniklerinden farklı olarak İHABİ izdüşümlerinin birbiri ile kesişimine izin vermektedir.

5.3 Deneysel Çalışma Sonuçları

Bu bölümde LAA ve SY algoritmalarının optimal çözümlere oranla gösterdiği performans irdelenmiş, bununla birlikte problemde tanımlanan bazı parametrelerin değişimine göre SY algoritmasının hassasiyet analizi yapılmıştır. Literatürde karşılaştırma yapılabilecek bir veri seti olmadığından ilk olarak test problemleri oluşturulmuştur. Algoritmalar Python v3.6 programlama dili kullanılarak kodlanmış ve tüm deneyler Intel i7-6700 CPU @3.40 GHz, 64-bit, 8GB RAM Windows 10 işletim sistemli bir bilgisayar ile yapılmıştır. Orijinal problemlerin optimal çözümleri, NEOS platformunda [98] bulunan BARON çözücüsü ile 4 saatlik zaman sınırı altında elde edilmiştir.

5.3.1 Veri hazırlama

Tüm test problemleri, $Q = [(0, 1500) \times (0, 1500) \times (50, 500)]$ ve $S = [(0, 1500) \times (0, 1500)]$ olacak şekilde kurulmuş ve problemlerin çözümünde daha önceki problemlerde kullanılan haberleşme parametreleri (bkz. Çizelge 4.4) kullanılmıştır.

SY modeli için, w ve d fonksiyonları sırasıyla $w(y, t) = \bar{w}[1 + \Delta_w \cos(\pi||y||)]f(t)$ ve

$d(y,t) = \bar{d}[1 + \Delta_d \cos(\pi|y|)]f(t)$ fonksiyonları ile ifade edilecektir. Bu fonksiyonlarda, \bar{w} ve \bar{d} parametreleri, kullanıcı değerlerinin ortalamasını, Δ_w ve Δ_d parametreleri bu değerlerin coğrafi değişkenlere göre farklılaşmasını, $f(t)$ fonksiyonu ise bu değerlerin zamana göre değişimini kontrol etmektedir. Parametrelerin zaman içindeki değişimi, artan, azalan ve rasgele olmak üzere üç farklı f fonksiyonu ile deneylere dahil edilmiştir. Δ_t , bu fonksiyonlarda zamana göre farklılaşmayı kontrol eden parametre olmak üzere, artan değerler, $f(t) = 1 + \log(1 + \Delta_t t)$ fonksiyonu ile, azalan değerler $f(t) = \exp(-\Delta_t t)$ fonksiyonu ile, rasgele değerler ise $\bar{\psi} [0,1]$ aralığından rasgele bir reel sayı olmak üzere $f(t) = 1 + \Delta_t \bar{\psi}_k t$ fonksiyonu ile sağlanmıştır. İHABİ hareketliliğinin amaç fonksiyonuna etkisini kontrol eden v ise, $|S|$, tüm kullanıcı alanının büyüklüğünü göstermek üzere, kullanıcı getirilerinin birim zaman ve birim alana orantılı değerine göre belirlenmiştir, d.d. $v = (1 + \Delta_v) \frac{1}{T|S|} \int_T \int_S w(y,t) dy dt$.

Kesikli problem verileri için ise [107]'ye benzer bir metodoloji kullanılmıştır. Bu doğrultuda, S sınırlı sayıda küçük alana bölünmüş ve bu alanların her birinin içinden rasgele bir nokta belirlenmiştir. Bu rasgele noktanın ait olduğu alandaki tüm getiri ve talebin ortalaması bu noktada toplanmış ve bu noktalar kesikli problemdeki \mathcal{I} kümesini oluşturmuştur. Kesikli problemlerin tamamı NEOS platformu [98] üzerindeki BARON çözücüsü ile 4 saat zaman limiti ile çözdürülmüştür. LAA ve SY algoritmaları ise Python programlama diliyle kodlanmış ve Intel i-5@3.20 GHz işlemcili ve 8 GB RAM bulunan Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayar ile çözdürülmüştür.

5.3.2 Parametre kalibrasyonu

LAA ve SY algoritmalarında kullanılan parametrelerin çözüme etkilerini görmek amacıyla birkaç öncül test uygulanmıştır. Bu amaçla, $\bar{w} = 0.5$, $\bar{d} = 105$ ve $\Delta_w = \Delta_d = \Delta_v = \Delta_t = 0.2$ olmak üzere her seferinde bir parametrenin zaman fonksiyonu değiştirilerek (örn: 1. problemde getiri artan, talep artan, 2. problemde getiri artan talep azalan, 3. problemde getiri artan, talep rasgele) 9 farklı problem verisi türetilmiştir. Parametre değerleri için $\bar{k} \in \{50, 100, 150\}$, $\mathcal{P} \in \{0, 1, 0, 3, 0, 5, 0, 7, 0, 9\}$, $\Psi \in \{10, 20, 30\}$ ve $\zeta \in \{0, 1, 0, 2, 0, 3, 0, 4, 0, 5, 0, 6, 0, 7, 0, 8, 0, 9\}$ alternatifleri kullanılmış ve sonuçta aynı problem her birinde tek bir parametre değerinin değiştirildiği 405 tekrar ile çözdürülmüştür.

Öncül test sonuçlarında, \bar{k} , Ψ ve ζ , arama algoritmasındaki İHABİ konumlarının yer değiştirme kararlarını etkilemesinden dolayı, bu üç parametrenin algoritmanın çözüm süresini etkilediği gözlenmiştir. \bar{k} ve Ψ parametreleri alternatifler arasından en küçük değeri, ζ ise en büyük değeri aldığında çözüm süresi maksimum olurken, tersi durumlarda çözüm süresi kısalmaktadır. Ancak, amaç fonksiyon değerindeki

değişim çözüm süresindeki değişime nazaran sınırlı kalmaktadır. Üç parametrenin uç alternatifleri düşünüldüğünde, çözüm süresi 4 kat değişirken, amaç fonksiyon değeri %0,91 değişmiştir. Bu sonucun, bu parametre değerleri her ne kadar algoritmanın ilerleyen adımlarında İHABİ'lerin aşırı hareketliliğini engellese de, çözümün sonuçta benzer noktalara yakınsamasından kaynaklandığı görülmüştür. Diğer taraftan, \mathcal{P} 'nin yüksek değerleri çözüm süresinde önemli bir değişiklik yaratmadan amaç fonksiyon değerinde ortalama %0,84 iyileşme sağlamıştır. Sonuç olarak, hem çözüm süresinin makul kalması hem de amaç fonksiyonunda iyileşme sağlanması amacıyla, \bar{k} , Ψ ve ζ parametreleri için test edilen alternatiflerin ortalama değerlerinin (sırasıyla 100, 20 ve 0,5), \mathcal{P} için ise en yüksek değerin (0,9) kullanılmasına karar verilmiştir.

5.3.3 Sonuçlar

LAA ve SY algoritmalarının performansı, öncül teste benzer şekilde her bir problemin 9 farklı versiyonu ile test edilmiştir. Her versiyonda sadece bir parametrenin zaman fonksiyonu değiştirilmiştir. Kesikli problemler için S 20, 50 ve 100 küçük alana bölünmüş ve her bölünme için 9 versiyon 10 periyotluğuna uygulanmıştır. Hem LAA hem de SY algoritması en fazla 1000 adıma kadar çalıştırılmıştır. Problemlerde, $\bar{w} = 0,5$, $\bar{d} = 105$, ve $\Delta_w = \Delta_d = \Delta_v = \Delta_t = 0,2$, değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

$Obj_B^{üst}$ ve $Obj_L^{üst}$, sırasıyla, BARON ve LAA tarafından amaç fonksiyonu için raporlanan üst sınır değerlerini, Obj_B^{alt} ve Obj_L^{alt} , sırasıyla BARON ve LAA tarafından raporlanan en iyi olurlu çözümlerin amaç fonksiyon değerlerini, Obj_S , ise SY algoritmasından elde edilen çözümün orijinal problemdeki amaç fonksiyonunda yerine konulduğunda elde edilen değeri göstermek üzere, çizelgede raporlanan OU değerleri aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

$$OU = \frac{\min \{Obj_B^{üst}, Obj_L^{üst}\} - Obj_B^{alt}}{\min \{Obj_B^{üst}, Obj_L^{üst}\}} \times 100, \quad (\text{BARON})$$

$$OU = \frac{\min \{Obj_B^{üst}, Obj_L^{üst}\} - Obj_L^{alt}}{\min \{Obj_B^{üst}, Obj_L^{üst}\}} \times 100, \quad (\text{LAA})$$

$$OU = \frac{\min \{Obj_B^{üst}, Obj_L^{üst}\} - Obj_S}{\min \{Obj_B^{üst}, Obj_L^{üst}\}} \times 100. \quad (\text{SY})$$

SY algoritması, içeriğindeki rasgeleliklerden dolayı, her problem özelinde 10 tekrar ile çözdürülmüş ve bu algoritmanın performansı, her problem özelinde bu tekrarlardan elde edilen en yüksek ve ortalama amaç fonksiyon değerleri kullanılarak raporlanmıştır. Çizelgeden görüleceği üzere BARON ve LAA performansı özellikle küçük kullanıcı

Çizelge 5.3: Dinamik tek İHABİ'li KHA için deney sonuçları.

w	Kullanıcı	d											
		Artan				Azalan				Rasgele			
		OU(%)		CPU(s)		OU(%)		CPU(s)		OU(%)		CPU(s)	
BRN	LAA	BRN	LAA	BRN	LAA	BRN	LAA	BRN	LAA	BRN	LAA		
Artan													
20	-	-	4335	7637	-	-	5386	7695	-	1,34	5698	7747	
50	5,75	3,59	ZS	6386	2,33	3,25	ZS	4614	4,82	3,65	ZS	5603	
100	4,38	7,17	ZS	ZS	4,55	4,76	ZS	ZS	5,17	4,29	ZS	ZS	
SY	(7,18, 8,09)		(66, 78)		(5,10, 6,72)		(41, 65)		(8,27, 8,89)		(58, 74)		
Azalan													
20	-	-	6181	7473	-	1,61	4913	6818	-	1,98	4483	4743	
50	5,90	2,18	ZS	7689	5,06	4,11	ZS	7620	4,97	3,98	ZS	4850	
100	7,99	5,12	ZS	ZS	7,07	6,95	ZS	ZS	4,52	7,04	ZS	ZS	
SY	(8,20, 9,27)		(61, 68)		(7,61, 8,12)		(29, 67)		(9,85, 10,58)		(81, 91)		
Rasgele													
20	-	1,26	4207	7722	-	1,00	5566	3954	1,63	1,72	ZS	6179	
50	3,14	2,27	ZS	3916	5,69	5,43	ZS	6266	4,21	4,94	ZS	6558	
100	4,86	4,89	ZS	ZS	7,75	7,14	ZS	ZS	4,89	7,12	ZS	ZS	
SY	(8,87, 9,56)		(35, 61)		(9,18, 10,30)		(51, 61)		(11,15, 12,71)		(60, 82)		

- ZS: Zaman Sımmı, BRN: BARON,

sayıları için birbirine oldukça yakınken, her iki çözücü de artan kullanıcı sayısı ile zaman sınırı içerisinde optimal çözümü bulamamaktadır. BARON 27 problem arasından 8 problemin optimal çözümünü bulurken, LAA bu 8 problemde 3'ünün optimalini bulmuş, kalan 5 problemdeki ortalama OU değeri %1,45 olmuştur. 8 problem haricinde kalan 19 problemde BARON'un OU değeri %4,98 olurken, bu problemler için LAA'nın OU değeri %4,71 olmuştur. Bu sonuçlarla, LAA performansının artan kullanıcı sayısı ile BARON'a göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

SY algoritması çözüm süresi açısından, tüm problemlere bir dakikadan daha kısa sürede çözüm üreterek, diğer iki çözücüye göre üstün bir performans göstermiştir. Çözüm kalitesi açısından ise her iki çözücünün de gerisinde kalmış, tekrarlardan elde edilen ortalama OU değerlerinin ortalaması %9,36, en düşük OU değerlerinin ortalaması ise %8,38 olmuştur.

Çizelgeden çıkarılabilecek sonuçlardan bir tanesi, SY algoritmasının performansının özellikle parametrelerinde rasgelelik içeren problemlerde kötüleşmesidir. En az bir parametrenin zaman içinde rasgele olduğu problemlerde, her iki parametrenin de artan ya da azalan trende sahip olduğu problemlere kıyasla amaç fonksiyon değeri %2,44 azalmıştır. Bu durum, artan ya da azalan trendin olduğu problemlerde, parametre değerlerinin periyotlar arasında daha az değişkenliğe sahip olması ile açıklanabilir. Parametrelerin belirli bir trende sahip olduğu problemlerde, başlangıç periyodunda yüksek ya da düşük bir parametre değerine sahip olan bir konumun ilerleyen periyotlarda da benzer özelliklere sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla, optimal İHABİ konumunun birbirine yakın noktalarda olma ihtimali yüksektir. Ancak, bu durum rasgele zaman fonksiyonunda geçerliliğini yitirmektedir. SY algoritmasında, ilk olarak İHABİ hareketliliği göz ardı edilip, sonrasında bu hareketlilikten kaynaklanan kaybın sezgisel bir arama algoritması ile bertaraf edilmesi amaçlandığından, belirli bir trende sahip problemlerde bu sezgisel yaklaşım çok fazla değişime sebep olmazken, rasgele durumda önem kazanmaktadır.

SY algoritmasının, amaç fonksiyonu açısından LAA ve BARON'un gerisinde kalmasına karşın oldukça hızlı çözüm üretmesi, bu algoritmanın son çözüm algoritması olarak kullanılması yerine bir başlangıç çözüm algoritması olarak kullanılması fikrini doğurmuştur. Bu amaçla, halihazırda türetilmiş test problemleri, BARON ile SY algoritmasından elde edilen çözümün başlangıç çözümü olarak verildiği halleriyle tekrar 4 saatlik zaman sınırı altında çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4'te sunulmuştur.

Çizelgede, "OU" sütunundaki değerler SY algoritmasından elde edilen çözümün başlangıç çözümü olarak verildiği durumda 4 saat sonunda elde edilen OU değerlerini,

Çizelge 5.4: BARON çözücüsüne başlangıç çözümü verilmesi sonrasında amaç fonksiyon değerlerinde elde edilen iyileşme oranları.

w	d	Kullanıcı					
		20		50		100	
		OU	İyileşme	OU	İyileşme	OU	İyileşme
Artan	Artan	-	-	4,23	26,35	1,89	56,88
	Azalan	-	-	2,97	49,66	5,47	31,53
	Rasgele	-	-	2,24	28,75	3,78	22,12
Azalan	Artan	-	-	2,10	9,83	3,05	32,93
	Azalan	-	-	3,88	23,34	5,68	19,69
	Rasgele	-	-	3,67	35,63	5,17	33,32
Rasgele	Artan	-	-	2,70	44,00	2,20	57,44
	Azalan	-	-	2,36	52,52	2,30	49,08
	Rasgele	1,21	25,78	2,95	29,87	1,98	59,52

Not: Tüm değerler % ifade etmektedir.

“İyileşme” sütunundaki değerler ise başlangıç çözümü verilmeyen duruma göre elde edilen iyileşme oranlarını göstermektedir. Her ne kadar daha önce optimal çözülemeyen hiçbir problem bu yaklaşımla da optimal çözülmüş olmasa da, SY algoritmasının başlangıç çözümü olarak kullanılması amaç fonksiyon değerlerinde ortalama %25,78 artış sağlamıştır. Bu artış, özellikle en az bir parametrenin rasgele olduğu problemler özelinde %40’dan fazla gerçekleşmiştir.

BARON çözücüsü ile 100 üzerinde kullanıcı sayısının olduğu problemler için 4 saatin ardından herhangi bir olurlu çözüm ya da üst sınır değeri elde edilememiştir. Daha yüksek sayıdaki kullanıcı olan problemler yalnızca LAA ve SY algoritması özelinde değerlendirilmiştir. Öncekilerden farklı olarak kullanıcı sayısının 200 ve 500 olduğu 18 yeni problem türetilmiş, bu problemler herhangi bir başlangıç çözümü verilmeden ve SY algoritmasından elde edilen çözümün başlangıç çözümü olarak verildiği haller için LAA ile çözdürülmüş, elde edilen sonuçlar başlangıç çözümü olup olmamasına göre Çizelge 5.5’te özetlenmiştir.

Çizelgede her kullanıcı sayısının altındaki ilk iki sütun LAA’ya herhangi bir başlangıç çözümü verilmediğinde, son iki sütun ise SY algoritmasından elde edilen çözümün başlangıç çözümü olarak verildiğinde elde edilen başlangıç ve bitiş OU değerlerini göstermektedir. SY algoritmasından elde edilen çözümün kullanıldığı durumlarda 200 kullanıcı için son OU değerleri ortalama %6,92’den %5,72’ye, 500 kullanıcı için ise %8,45’ten %7,43’e düşmüştür. Bu sonuçlar LAA’nın büyük problemlere de oldukça iyi sonuçlar üretebileceğini gösterirken, SY algoritmasının da iyi bir başlangıç çözüm algoritması olarak kullanılabilirliğini teyit etmiştir.

Çizelge 5.5: Dinamik tek İHABİ'li KHA için büyük test problemlerinde LAA performansı ve SY algoritmasının etkisi.

		Kullanıcı											
		200						500					
w	d	Başlangıç: Yok			Başlangıç: SY			Başlangıç: Yok			Başlangıç: SY		
		Başlangıç	Bitiş		Başlangıç	Bitiş		Başlangıç	Bitiş		Başlangıç	Bitiş	
Artan	Artan	33,47	5,98	11,19	5,51	33,40	8,32	11,21	7,57				
	Azalan	34,02	6,81	11,42	5,83	35,45	8,52	8,43	7,41				
Azalan	Rasgele	35,36	7,14	10,59	5,78	34,44	9,09	10,49	7,55				
	Artan	34,10	5,85	9,62	5,37	35,82	8,60	11,11	6,64				
Rasgele	Azalan	31,46	7,61	8,87	6,49	32,67	8,23	11,93	7,68				
	Rasgele	27,90	8,02	8,95	5,67	31,90	8,66	11,86	7,71				
Rasgele	Artan	26,25	5,65	9,19	5,44	36,78	7,88	10,09	7,10				
	Azalan	33,09	6,98	10,96	5,67	37,16	7,92	11,30	7,63				
	Rasgele	28,88	8,22	9,32	5,74	32,13	8,85	9,93	7,62				

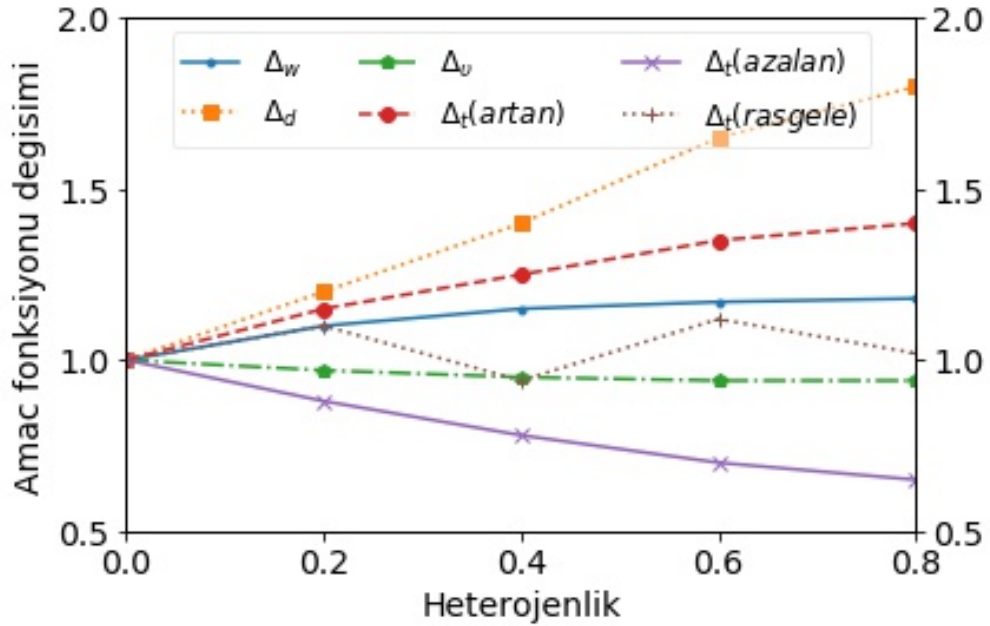
Not: Tüm değerler % ifade etmektedir.

Veri setleri üretilirken kullanılan farklı parametrelere göre SY algoritmasından elde edilen sonuçlardaki amaç fonksiyonunun değişimini incelemek amacıyla bir hassasiyet analizi de gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, her seferinde bir parametrenin değeri değiştirilmek üzere yeni bir problem seti oluşturulmuştur. Bu problemler için Δ_w , Δ_d , Δ_t , ve Δ_v değerleri için $\{0, 0, 2, 0, 4, 0, 6, 0, 8\}$ alternatifleri kullanılmıştır. Tüm problemlerde aynı $\bar{w} = 0,5$ ve $\bar{d} = 105$ değerleri kullanılmış ve her bir yeni alternatifin yer aldığı problem tüm parametrelerin 0'a eşit olduğu problem ile karşılaştırılarak normalize edilmiş amaç fonksiyonu değişimleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

Şekilden görüleceği üzere Δ_d parametresi, amaç fonksiyonunu etkileyen en önemli parametre olurken, Δ_v parametresi en az etkileyen parametre olmuştur. SY yaklaşımında parametrelerin coğrafi ve zaman boyutunda aşırı değişmemesi beklendiğinden, İHABİ hareketliliğinin etkisinin de az olması doğal karşılanmıştır. Diğer taraftan, SY algoritmasındaki optimal kapsama alanlarının belirlenmesinde d parametresi önemli olduğundan (bkz. (5.7)), bu parametredeki değişim amaç fonksiyonu değerlerini önemli derecede etkilemektedir.

5.4 Değerlendirme

Tezin bu bölümünde tek İHABİ'nin dinamik bir KHA'daki yerleşim problemi ele alınmıştır. İHABİ'nin hizmet alanındaki kullanıcıların sınırlı bir süre içinde belirli



Şekil 5.4: Dinamik test problemlerin türetilmesinde kullanılan farklılaşma parametrelerinin hassasiyet analizi.

anlarda konumlarının ve veri taleplerinin değiştiği, İHABİ'nin de bu anlarda yeni duruma göre konumunu adapte edebildiği bir sistem kurulmuş, bu sistem için karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Bu formülasyonun, NP-Zor olması sebebiyle biri Lagranj ayrıştırma, diğeri sürekli yakınsama tekniklerine dayanan iki farklı algoritma geliştirilerek, algoritmaların performansı yapay verilerle test edilmiştir. Deney sonuçlarında, her iki algoritmanın çözüm kalitesi açısından, özellikle SY algoritmasının buna ek olarak çözüm süresi açısından da oldukça iyi performans gösterdiği görülmüştür.

SY algoritmasının hızlı çözüm üretebilme kabiliyeti, bu algoritmanın kesin çözüm algoritmaları için iyi bir başlangıç çözüm algoritması olarak da kullanılabilceğini göstermiştir. Sistem varsayımları açısından özellikle veri setlerinde kullanılan bazı parametrelerin değişkenliklerine göre SY algoritmasının hassasiyet analizleri de yapılmış ve kullanıcı taleplerinin problemin amaç fonksiyonu açısından en etkili, İHABİ hareketliliğinin ise en etkisiz faktör olduğu sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

İHA'ların hız ve hareketlilik kabiliyetlerinden faydalanmak adına birçok sektörde son yıllarda artan kullanım oranları, bu araçların entegre edildiği sistemlerin detaylı incelenmesini gerektirmiştir. Son yıllarda, bu araçların kullanımının artış gösterdiği en önemli sektörlerden birisi de telekomünikasyon sektörü olmuş ve yeni nesil KHA'larda bu araçlardan sıklıkla faydalanılacağı öngörülmüştür. Ancak, mevcut teknoloji ile sınırlı sürede hizmet verebilecek olması, bu araçların en önemli eksikliği olarak görülmekte ve bu sınırlı sürede alınabilecek en yüksek verimliliğin alınması için çalışmalar yürütülmektedir.

Mevcut KHA'ların kapasitesinin artırılması, arıza ve/veya acil durumlarda hasar gören karasal haberleşme sistemlerine ikame olması ya da yüksek katımlı ve kısa süreli organizasyonlardaki anlık yükselen talebin karşılanması gibi farklı senaryolar için İHABİ'lerin kullanılabilmesi görülmüştür. Bu sayede, hem servis sağlayıcıların kendi sistemlerinin ağ performansını artırması ve bununla birlikte maliyet avantajı sağlanması, hem de kullanıcıların artan haberleşme performansı ile memnuniyet düzeyinin artırılması hedeflenmektedir. Özellikle son 5 yılda İHABİ'lerin mevcut KHA'lara entegre edilmesi ile ilgili çalışmalar artış göstermiş, bu çalışmaların büyük bölümü İHABİ'lerin yerleşim ve kaynak atama problemlerine ayrılmıştır.

Bu problem, her ne kadar telekomünikasyon sektöründe yeni bir problem olarak görünse de yöneylem araştırmaları literatüründe tesis yerleşim ve kaynak atama problemleri uzun yıllardır iki boyutlu coğrafya için çalışılmaktadır. Ancak, klasik çözüm yaklaşımları, İHABİ'lerin dikey düzlemde de hareket kabiliyeti olmasından dolayı kullanılamamaktadır. Bununla birlikte, mevcut tesis yerleşim çalışmalarında tesis kapasiteleri ve kullanıcı hizmetleri genellikle sabit ya da basit doğrusal ve/veya konveks fonksiyonlarla ifade edilirken, İHABİ yerleşim problemlerinde İHABİ kapasiteleri oldukça karmaşık doğrusal ve konveks olmayan fonksiyonlarla ifade edilmektedir. Dolayısıyla, İHABİ yerleşim problemleri için yeni formülasyonların geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu tez kapsamında, hem statik hem de dinamik ortamlar için İHABİ yerleşim ve

kaynak atama problemleri ele alınmıştır. Bu amaçla, Bölüm 4'te ilk olarak statik 3 boyutlu yerseçim problemi için genelleştirilmiş bir problem tanımı yapılmış ve bu problem için kesikli ve sürekli formülasyonlar geliştirilmiştir. Her iki formülasyon için optimal çözümlerin bulunması amacıyla teoremler üretilmiş ve kapsama fonksiyonunun bazı özel durumları için çözüm yaklaşımları sunulmuştur. Aynı bölümde daha sonra tek bir İHABİ'nin mevcut KHA'ya entegre edildiği statik bir yerseçim ve kaynak atama problemi ele alınmış, bu problem için amacı kar enbüyükleme olan bir karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu ve bu formülasyonun çözümü için sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Sonrasında, benzer bir problem birden fazla İHABİ için ele alınmış ve bu kez amacı mevcut tüm kullanıcıları belirli bir hizmet seviyesinde kapsamak için kar enbüyükleme olan yeni bir formülasyon ve bu formülasyonun çözümü için yeni bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Hem tek İHABİ'li hem de çok İHABİ'li KHA'lar için yapay veri setleri türetilmiş ve bu setler üzerinden geliştirilen algoritma performansları incelenmiştir.

Bölüm 5'te bir önceki bölümdeki statiklik varsayımı gevşetilmiş ve kullanıcı konumlarının ve veri taleplerinin belirli periyotlarda değişebileceği dinamik bir problem ele alınmıştır. Bu amaçla, tek İHABİ'li bir KHA için yeni bir karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Geliştirilen formülasyon ile hem tüm hizmet süresi içindeki kapsama getirisinin enbüyüklenmesi hem de İHABİ hareketliliğinin enküçüklenmesini hedefleyen bir amaç fonksiyonu ile çalışılmıştır. Problemin NP-Zor olması sebebiyle iki farklı çözüm algoritması geliştirilmiştir. İlk algoritmada, Lagranj ayrıştırma tekniği kullanılarak, orijinal probleme uygulanan Lagranj gevşetmesi ile problem nispeten daha kolay çözülebilen iki alt probleme indirgenmiş ve bu alt problemlerin ardışık olarak çözülmesine dayanan bir algoritma geliştirilmiştir. Buna ilaveten, kesikli formülasyonlardaki zaman problemlerini bertaraf etmek amacıyla, literatürde iki boyutlu yerseçim problemleri için sıklıkla kullanılan SY tekniği ilk kez üç boyutlu bir probleme uyarlanmış ve bu doğrultuda hem homojen hem de heterojen senaryolar için çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar, yapay veri setleri kullanılarak test edilmiş ve her iki algoritmanın da halihazırda birçok farklı doğrusal olmayan programlama formülasyonlarının çözümünde kullanılan BARON çözücüsü ile hem çözüm süresi hem de çözüm kalitesi açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

İHABİ yerseçim problemleri uzun bir geçmişe sahip olmamasına karşın son yıllarda gittikçe artan oranlarda çalışmalara konu olmaktadır. Bununla birlikte, özellikle bu tez özelinde araştırılan konuların, bu alanda bazı yeni çalışmalara da ışık tutabileceği öngörülmektedir. Özellikle dinamik problemlerin çok daha detaylı incelenmesi gerekmekte olup, olası çalışma alanları aşağıda sunulmuştur:

- Dinamik yerseçim problemleri gerek kompleks matematiksel yapıları gerekse de hızlı veri ihtiyacı sebebiyle çözümü ve kurgulanması zor problemlerdir. Ancak, yakın zamanda uygulamaya alınacak 5. nesil KHA'larda hem yoğun veri talebi hem de bu talebin kesintisiz ve gecikmesiz sunulması ihtiyacı mevcut KHA'ların çok daha iyi performans göstermesini gerektirmektedir. Nesnelerin interneti, taşıtların interneti ve büyük veri gibi hem sürekli veri alışverişi imkanının sağlandığı hem de aktarılan verinin boyutunun mevcut kullanımın kat kat üzerinde olacağı beklentisine cevap verebilen KHA tasarımları zaruri hale gelecektir.

Bölüm 5'te altyapısı verilen dinamik problemin, kullanıcıların hizmet devamlılığı esasına göre yeniden ele alınması önemli bir araştırma konusu olacaktır. Halihazırda incelenen problem herhangi bir kullanıcının hizmet aldığı bir periyottan sonraki periyotlarda hizmet almasını garanti etmediğinden bu durum hem kullanıcı memnuniyetsizliğine hem de sistem yoğunluğu açısından öngörülemezliğe neden olabilecektir. Bu eksikleri gidermek için yine toplam getiriyi enbüyüklemek amaçlanırken kısıt kümesinde her bir kullanıcının hizmet almaya başladığı periyottan sonraki tüm periyotlarda da hizmet almasını garanti edecek bir kısıt eklenebilir, d.d. $z_{it} \geq z_{it-1}, i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}$. Bu yeni model yine karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonuna sahip olacaktır.

Çözüm açısından, yine bu tezde önerildiği şekliyle Lagranj gevşetmesi kullanılabilir. Ancak bu durumda, mevcut problemden farklı olarak Lagranj gevşetmesi yeni bir ayrıştırmayı sağlayamayabilir. Bu nedenle, yeni bir çözüm yaklaşımı getirilmesine ihtiyaç duyulacaktır. Bu amaçla dinamik programlama teknikleri bir çözüm olarak kullanılabilir. Bu doğrultuda toplam getiriyi ifade edecek bir özyineleme fonksiyonu kurularak periyotlar özelinde geriye doğru bir dinamik programlama modeli geliştirilebilir. Bu sayede, orijinal formülasyonda kullanıcıların her periyota özel tanımlanan ikili değişkenlerinde azalış olması beklendiğinden daha küçük bir olurlu kümede çalışılacağı öngörülmektedir.

- İHABİ'lerle ilgili önemli konulardan bir tanesi de boyutları sebebiyle enerji yüklerinin de sınırlı kalmasıdır. Bu amaçla özellikle baz istasyonu işlevlerini sağlayan anten güçlerinin enküçüklenmesi statik problemlerde ele alınan konulardandır (bkz. Çizelge 3.1). Ancak, bu husus özellikle dinamik problemler için yeterince incelenmemiştir. Bu doğrultuda, İHABİ'lerin daha uzun süre hizmet vermesi amacıyla yeni bir KHA tasarımı geliştirilebilir. Bu sayede, hem hizmet süresi artırılabilecek hem de SV, SGO ve bağlantı hızı göstergeleri iyileştirilebilecektir.

Bu problem, bu tezde incelenen problemle benzerlik taşısa da hem amaç fonksiyonu hem de kısıt kümesi olarak farklılıklar içermektedir. Amaç

fonksiyonu, toplam hizmet süresini enbüyüklemek ya da ihtiyaç duyulan anten gücünü enküçüklemek olabilirken, kısıt kümesi özellikle SV göstergesi açısından bir tolerans değerini içermelidir. Bu sayede kullanıcıların belirli bir hizmet seviyesinin üstünde hizmet alması sağlanacak ve gerçek hayat şartlarına daha uyumlu bir KHA tasarlanabilecektir. Bunların yanı sıra, kısıt kümesinde önceki enerji çalışmalarında incelendiği şekliyle, İHABİ'nin ortalama uçuş süresi ya da ortalama hızı ile ilgili de alt ve üst sınır değerlerini sağlaması ihtiyacı giderilmelidir.

Bu problemin çözümü açısından son birkaç yılda özellikle statik modellerde makine öğrenmesi ve adaptif öğrenme teknikleri kullanılmıştır. Benzer şekilde, dinamik problem için de adaptif çözüm yaklaşımları geliştirilebilir. Bu sayede, örneğin, talebin belirli bir seviyenin altında kaldığı durumlarda İHABİ üzerindeki güç ünitelerinin uyku moduna alınması ve bu sayede hizmet süresinin uzatılması gibi alternatif çözümler kullanılabilir.

- Gerek statik gerekse de dinamik problemler için bugüne dek ele alınan problemlerde genellikle kesikli formülasyonlar kullanılmıştır. Dolayısıyla, kesin optimal çözüm teknikleri ile makul sürelerde çözüm üretilmemiştir. Birçok çalışmada problem özelinde geliştirilen sezgisel ya da ağgözlü algoritmalar kullanılmış olsa da bu algoritmaların optimal çözümlerle karşılaştırması için numaralandırma yöntemleriyle uzun sürelerde elde edilen optimal çözümler kullanılmıştır. Bu nedenle, algoritma performansları genellikle 100 ve altı kullanıcı için optimal çözümlerle karşılaştırılabilmiştir. Her ne kadar bu tez özelinde 5000 kullanıcıya kadar algoritma performansları sunulsa da optimal çözüm için günümüzde karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama için sıklıkla kullanılan ve başarısı birçok uygulamada ispatlanmış BARON çözücüsü dahi makul çözümler sunamamıştır. Bu durum göz önüne alındığında, hem statik hem de dinamik problemler için kesin çözüm algoritmaları geliştirilmesi de bir ihtiyaç olarak görülmektedir.

Bu yaklaşım, telekomünikasyon sektöründe faaliyet gösteren kurum ve kuruluşlarca hızlı çözüme ihtiyaç duyulması sebebiyle ilgi görmese de, kesin çözüm teknikleri hem bu alandaki gelecek çalışmalarda geliştirilecek çözüm yaklaşımlarının performans testlerinde kullanılabilir, hem de problemlerin karakteristiklerinin detaylıca öğrenilmesi için faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Owen, S. H.** ve **Daskin, M. S.**(1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111, 423 – 447.
- [2] **Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M., ve Goh, M.**(2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 368 – 407.
- [3] **Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., ve Zhang, J. C.**(2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32, 1065–1082.
- [4] **Bor-Yaliniz, R. I., El-Keyi, A., ve Yanikomeroglu, H.**(2016). Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia. May 23-27.
- [5] **Cao, X., Yang, P., Alzenad, M., Xi, X., Wu, D., ve Yanikomeroglu, H.**(2018). Airborne communication networks: A survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36, 1907–1926.
- [6] **Cicek, C. T., Gultekin, H., Tavli, B., ve Yanikomeroglu, H.**(2019). UAV base station location optimization for next generation wireless networks: Overview and future research directions. *2019 IEEE Unmanned Vehicle Systems Conference (UVS)*, Muskat, Umman. Feb 2-7.
- [7] **Al-Hourani, A., Kandeepan, S., ve Lardner, S.**(2014). Optimal LAP altitude for maximum coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3, 569–572.
- [8] **Church, R.** ve **ReVelle, C.**(1974). The maximal covering problem. *Papers in Regional Science*, 32, 101–118.
- [9] **Current, J.** ve **O’Kelly, M.**(1992). Locating emergency warning sirens. *Decision Sciences*, 23, 221–234.

- [10] **Erkut, E., Ingolfsson, A., ve Erdoğan, G.**(2008). Ambulance location for maximum survival. *Naval Research Logistics (NRL)*, 55, 42–58.
- [11] **Berman, O., Hajizadeh, I., ve Krass, D.**(2013). The maximum covering problem with travel time uncertainty. *IIE Transactions*, 45, 81–96.
- [12] **Chan, T. C. Y., Demirtas, D., ve Kwon, R. H.**(2016). Optimizing the deployment of public access defibrillators. *Management Science*, 62, 3617–3635.
- [13] **Zhang, Y., Berman, O., ve Verter, V.**(2009). Incorporating congestion in preventive healthcare facility network design. *European Journal of Operational Research*, 198, 922 – 935.
- [14] **Farahani, R. Z., Hassani, A., Mousavi, S. M., ve Baygi, M. B.**(2014). A hybrid artificial bee colony for disruption in a hierarchical maximal covering location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 129 – 141.
- [15] **Frade, I., Ribeiro, A., Gonçalves, G., ve Antunes, A. P.**(2011). Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, 2252, 91–98.
- [16] **He, S. Y., Kuo, Y.-H., ve Wu, D.**(2016). Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 131 – 148.
- [17] **Gentili, M. ve Mirchandani, P.**(2012). Locating sensors on traffic networks: Models, challenges and research opportunities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 227 – 255.
- [18] **Alexandris, G. ve Giannikos, I.**(2010). A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities. *European Journal of Operational Research*, 202, 328 – 338.
- [19] **Shillington, L. ve Tong, D.**(2011). Maximizing wireless mesh network coverage. *International Regional Science Review*, 34, 419–437.

- [20] **Murray, A. T.**(2016). Maximal coverage location problem: Impacts, significance, and evolution. *International Regional Science Review*, 39, 5–27.
- [21] **Berman, O., Krass, D., ve Drezner, Z.**(2003). The gradual covering decay location problem on a network. *European Journal of Operational Research*, 151, 474 – 480.
- [22] **Drezner, Z., Wesolowsky, G. O., ve Drezner, T.**(2004). The gradual covering problem. *Naval Research Logistics*, 51, 841–855.
- [23] **Drezner, Z. ve Suzuki, A.**(2004). The big triangle small triangle method for the solution of nonconvex facility location problems. *Operations Research*, 52, 128–135.
- [24] **Tammy, D., Zvi, D., ve Zvi, G.**(2010). A stochastic gradual cover location problem. *Naval Research Logistics (NRL)*, 57, 367–372.
- [25] **Berman, O. ve Wang, J.**(2011). The minmax regret gradual covering location problem on a network with incomplete information of demand weights. *European Journal of Operational Research*, 208, 233 – 238.
- [26] **Berman, O., Drezner, Z., ve Krass, D.**(2010). Generalized coverage: New developments in covering location models. *Computers & Operations Research*, 37, 1675 – 1687.
- [27] **Church, R. L. ve Murray, A.** Location covering models. *Advances in Spatial Science*. Springer(2018).
- [28] **Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., ve Bergman, L.**(1971). The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19, 1363–1373.
- [29] **Storbeck, J. E.**(1988). The spatial structuring of central places. *Geographical Analysis*, 20, 93–110.
- [30] **Balas, E. ve Padberg, M.**(1976). Set partitioning: a survey. *SIAM Reviews*, 18, 710–760.
- [31] **García, S. ve Marín, A.** Covering location problems. **Laporte, G., Nickel, S., ve Gama, F.Saldanha da** , editors, *Location Science*, pages 93–114. Springer(2015).

- [32] **Erdemir, E. T., Batta, R., Rogerson, P. A., Blatt, A., ve Flanigan, M.**(2010). Joint ground and air emergency medical services coverage models: A greedy heuristic solution approach. *European Journal of Operational Research*, 207, 736 – 749.
- [33] **Bor-Yaliniz, R. I. ve Yanikomeroglu, H.**(2016). The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells. *IEEE Communications Magazine*, 54, 48–55.
- [34] **Kalantari, E., Bor-Yaliniz, I., Yongacoglu, A., ve Yanikomeroglu, H.**(2017). User association and bandwidth allocation for terrestrial and aerial base stations with backhaul considerations. *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, Canada. Oct 8-13.
- [35] **Alzenad, M., El-Keyi, A., ve Yanikomeroglu, H.**(2018). 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station for maximum coverage of users with different QoS requirements. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7, 38–41.
- [36] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., ve Debbah, M.**(2017). Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient internet of things communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16, 7574–7589.
- [37] **Sharma, V., Sabatini, R., ve Ramasamy, S.**(2016). UAVs assisted delay optimization in heterogeneous wireless networks. *IEEE Communications Letters*, 20, 2526–2529.
- [38] **Alzenad, M., El-Keyi, A., Lagum, F., ve Yanikomeroglu, H.**(2017). 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*, 6, 434–437.
- [39] **Sharma, V., Srinivasan, K., Chao, H. C., Hua, K. L., ve Cheng, W. H.**(2017). Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage. *Journal of Network and Computer Applications*, 85, 94–105.
- [40] **Košmerl, J. ve Vilhar, A.**(2014). Base stations placement optimization in wireless networks for emergency communications. *2014 IEEE*

International Conference on Communications Workshops (ICC), Sydney, Australia. Jun 10-14.

- [41] **Merwaday, A. ve Guvenc, I.**(2015). UAV-Assisted heterogeneous networks for public safety communications. *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, New Orleans, LA. Mar 9-12.
- [42] **Merwaday, A., Tuncer, A., Kumbhar, A., ve Guvenc, I.**(2016). Improved throughput coverage in natural disasters: Unmanned aerial base stations for public-safety communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11, 53–60.
- [43] **Kalantari, E., Shakir, M. Z., Yanikomeroglu, H., ve Yongacoglu, A.**(2017). Backhaul-aware robust 3-D drone placement in 5G+ wireless networks. *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Paris, France. May 21-25.
- [44] **Kalantari, E., Yanikomeroglu, H., ve Yongacoglu, A.**(2016). On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks. *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Montreal, Canada. Sep 18-21.
- [45] **Azizi, A., Parsaeefard, S., Javan, M. R., Mokari, N., ve Yanikomeroglu, H.**(2019). Profit maximization in 5G+ networks with heterogeneous aerial and ground base stations. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pages 1–1.
- [46] **Zhang, T., Zhou, F., Feng, L., Yu, P., Li, W., Rong, B., ve Rutagemwa, H.**(2017). Capacity enhancement for next generation mobile networks using mmWave aerial base station. *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore. Dec 4-8.
- [47] **Li, B., Fei, Z., ve Zhang, Y.**(2019). UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, 6, 2241–2263.
- [48] **Fotouhi, A., Ding, M., ve Hassan, M.**(2017). Dynamic base station repositioning to improve spectral efficiency of drone small cells.

2017 IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, Macau, China. Jun 12-15.

- [49] **Liu, C. H., Chen, Z., Tang, J., Xu, J., ve Piao, C.**(2018). Energy-efficient UAV control for effective and fair communication coverage: A deep reinforcement learning approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36, 2059–2070.
- [50] **Wang, Z., Duan, L., ve Zhang, R.**(2019). Adaptive deployment for UAV-aided communication networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18, 4531–4543.
- [51] **Zhan, C., Zeng, Y., ve Zhang, R.**(2018). Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7, 328–331.
- [52] **You, C. ve Zhang, R.**(2019). 3D trajectory optimization in rician fading for UAV-enabled data harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18, 3192–3207.
- [53] **Gong, J., Chang, T., Shen, C., ve Chen, X.**(2018). Flight time minimization of UAV for data collection over wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36, 1942–1954.
- [54] **Hayat, S., Yanmaz, E., ve Muzaffar, R.**(2016). Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18, 2624–2661.
- [55] **Bor-Yaliniz, I., El-Keyi, A., ve Yanikomeroglu, H.**(2019). Spatial configuration of agile wireless networks with Drone-BSs and User-in-the-loop. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18, 753–768.
- [56] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., ve Debbah, M.**(2015). Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis. *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA. Dec 6-10.
- [57] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., ve Debbah, M.**(2016). Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. *IEEE Communications Letters*, 20, 1647–1650.

- [58] **Lyu, J., Zeng, Y., Zhang, R., ve Lim, T. J.**(2017). Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations. *IEEE Communications Letters*, 21, 604–607.
- [59] **Chen, J. ve Gesbert, D.**(2017). Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France. May 21-25.
- [60] **Shakhatreh, H., Khreishah, A., Alsarhan, A., Khalil, I., Sawalmeh, A., ve Othman, N. S.**(2017). Efficient 3D placement of a UAV using particle swarm optimization. *2017 8th International Conference on Information and Communication Systems*, Irbid, Jordan. Apr 4-6.
- [61] **Shakhatreh, H., Khreishah, A., ve Ji, B.**(2017). Providing wireless coverage to high-rise buildings using UAVs. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France. May 21-25.
- [62] **Rupasinghe, N., Ibrahim, A. S., ve Guvenc, I.**(2016). Optimum hovering locations with angular domain user separation for cooperative UAV networks. *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Washington, DC. Dec 4-8.
- [63] **Sun, X. ve Ansari, N.**(2018). Jointly optimizing drone-mounted base station placement and user association in heterogeneous networks. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO. May 20-24.
- [64] **Lagum, F., Bor-Yaliniz, R. I., ve Yanikomeroglu, H.**(2018). Strategic densification with UAV-BSs in cellular networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7, 384–387.
- [65] **Cicek, C. T., Gultekin, H., ve Tavli, B.**(2019). The location-allocation problem of drone base stations. *Computers & Operations Research*, 111, 155 – 176.
- [66] **Zeng, Y. ve Zhang, R.**(2017). Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16, 3747–3760.
- [67] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., ve Debbah, M.**(2016). Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned

aerial vehicles. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia. May 23-27.

- [68] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., ve Debbah, M.**(2016). Mobile internet of things: Can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture? *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Washington, DC. Dec 4-8.
- [69] **Wu, Q., Zeng, Y., ve Zhang, R.**(2018). Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pages 2109–2121.
- [70] **Zhang, G., Wu, Q., Cui, M., ve Zhang, R.**(2017). Securing UAV communications via trajectory optimization. *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Singapore. Dec 4-8.
- [71] **Xie, L., Xu, J., ve Zhang, R.**(2018). Throughput maximization for UAV-enabled wireless powered communication networks. *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, Chicago, USA. Aug 27-30.
- [72] **Zeng, Y., Xu, X., ve Zhang, R.**(2018). Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17, 2233–2246.
- [73] **Lyu, J., Zeng, Y., ve Zhang, R.**(2017). Spectrum sharing and cyclical multiple access in UAV-aided cellular offloading. *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Singapore. Dec 4-8.
- [74] **Cheng, F., Zhang, S., Li, Z., Chen, Y., Zhao, N., Yu, F. R., ve Leung, V. C. M.**(2018). UAV trajectory optimization for data offloading at the edge of multiple cells. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67, 6732–6736.
- [75] **Alsharoa, A., Ghazzai, H., Kadri, A., ve Kamal, A. E.**(2017). Energy management in cellular HetNets assisted by solar powered drone small cells. *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, San Francisco, CA. Mar 19-22.
- [76] **Ghazzai, H., Ghorbel, M. B., Kadri, A., ve Hossain, M. J.**(2017). Energy efficient 3D positioning of micro unmanned aerial vehicles for underlay cognitive radio systems. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France. May 21-25.

- [77] **Sun, X.** ve **Ansari, N.**(2017). Latency aware drone base station placement in heterogeneous networks. *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Singapore. Dec 4-8.
- [78] **Wu, Y., Xu, J., Qiu, L.,** ve **Zhang, R.**(2018). Capacity of UAV-enabled multicast channel: joint trajectory design and power allocation. *2018 IEEE International Conference on Communications(ICC)*, Kansas City, MO. May 20-24.
- [79] **Yang, D., Wu, Q., Zeng, Y.,** ve **Zhang, R.**(2018). Energy tradeoff in ground-to-UAV communication via trajectory design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67, 6721–6726.
- [80] **Wu, Q., Zeng, Y.,** ve **Zhang, R.**(2017). Joint trajectory and communication design for UAV-enabled multiple access. *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Singapore. Dec 4-8.
- [81] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M.,** ve **Debbah, M.**(2018). Communications and control for wireless drone-based antenna array. *IEEE Transactions on Communications*, pages 1–1.
- [82] **Bulut, E.** ve **Guvenc, I.**(2018). Trajectory optimization for cellular-connected UAVs with disconnectivity constraint. *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Kansas City, MO. May 20-24.
- [83] **Chen, M., Mozaffari, M., Saad, W., Yin, C., Debbah, M.,** ve **Hong, C. S.**(2017). Caching in the sky: Proactive deployment of cache-enabled unmanned aerial vehicles for optimized quality-of-experience. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35, 1046–1061.
- [84] **Yang, P., Cao, X., Yin, C., Xiao, Z., Xi, X.,** ve **Wu, D.**(2017). Proactive drone-cell deployment: Overload relief for a cellular network under flash crowd traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18, 2877–2892.
- [85] **Ghanavi , R., Kalantari, E., Sabbaghian, M., Yanikomeroglu, H.,** ve **Yongacoglu, A.**(2018). Efficient 3D aerial base station placement considering users mobility by reinforcement learning. *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Barcelona, Spain. Apr 15-18.

- [86] **Stankiewicz, R., Cholda, P., ve Jajszczyk, A.**(2011). Qox: What is it really? *IEEE Communications Magazine*, 49, 148–158.
- [87] **Averbakh, I., Berman, O., Krass, D., Kalcsics, J., ve Nickel, S.**(2014). Cooperative covering problems on networks. *Networks*, 63, 334–349.
- [88] **Blanquero, R., Carrizosa, E., Schöbel, A., ve Scholz, D.**(2011). A global optimization procedure for the location of a median line in the three-dimensional space. *European Journal of Operational Research*, 215, 14 – 20.
- [89] **Brimberg, J., Juel, H., ve Schöbel, A.**(2002). Linear facility location in three dimensions: Models and solution methods. *Operations Research*, 50, 1050–1057.
- [90] **Church, R. L. ve Meadows, M. E.**(1979). Location modeling utilizing maximum service distance criteria. *Geographical Analysis*, 11, 358–373.
- [91] **Drezner, Z.**(1981). On a modified one-center model. *Management Science*, 27, 848–851.
- [92] **Cooper, L.**(1964). Heuristic methods for location-allocation problems. *SIAM Review*, 6, 37–53.
- [93] **Luis, M., Salhi, S., ve Nagy, G.**(2011). A guided reactive grasp for the capacitated multi-source weber problem. *Computers & Operations Research*, 38, 1014 – 1024.
- [94] **Manzoural-Ajdad, S., Torabi, S., ve Pishvae, M. S.**(2013). New heuristic methods for the single-source capacitated multi facility weber problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 1569–1579.
- [95] **Öncan, T.**(2013). Heuristics for the single source capacitated multi-facility weber problem. *Computers & Industrial Engineering*, 64, 959 – 971.
- [96] **Fréville, A.** May 2004. The multidimensional 0-1 knapsack problem: An overview. *European Journal of Operational Research*, 155, 1–21.
- [97] **Cooper, L.**(1963). Location-allocation problems. *Operations Research*, 11, 331–343.

- [98] **Czyzyk, J., Mesnier, M. P., ve Moré, J. J.**(1998). The NEOS server. *IEEE Journal on Computational Science and Engineering*, 5, 68 — 75.
- [99] **Gong, D., Gen, M., Yamazaki, G., ve Xu, W.**(1997). Hybrid evolutionary method for capacitated location-allocation problem. *Computers & Industrial Engineering*, 33, 577 – 580.
- [100] **Horst, R. ve Thoai, N. V.**(1999). DC programming: Overview. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 103, 1–43.
- [101] **Newell, G. F.**(1971). Dispatching policies for a transportation route. *Transportation Science*, 5, 91–105.
- [102] **Dasci, A. ve Verter, V.**(2001). A continuous model for production distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 129, 287 – 298.
- [103] **Ouyang, Y. ve Daganzo, C. F.**(2006). Discretization and validation of the continuum approximation scheme for terminal system design. *Transportation Science*, 40, 89–98.
- [104] **Cui, T., Ouyang, Y., ve Shen, Z.-J. M.**(2010). Reliable facility location design under the risk of disruptions. *Operations Research*, 58, 998–1011.
- [105] **Daganzo, C. F.** *Logistics Systems Analysis*. Springer, Berlin(2010).
- [106] **Wang, X. ve Ouyang, Y.**(2013). A continuum approximation approach to competitive facility location design under facility disruption risks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 50, 90 – 103.
- [107] **Wang, X., Lim, M. K., ve Ouyang, Y.**(2017). A continuum approximation approach to the dynamic facility location problem in a growing market. *Transportation Science*, 51, 343–357.
- [108] **Ansari, S., Başdere, M., Li, X., Ouyang, Y., ve Smilowitz, K.**(2018). Advancements in continuous approximation models for logistics and transportation systems: 1996-2016. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107, 229 – 252.

EKLER

EK-1: Bağlantı Hızının Bant Genişliğine Göre Konkavlığı

EK-2: Bağlantı Hızının İHABİ Yüksekliğine Göre Tek Modluluğu

EK-3: Bağlantı Hızının Yatay Mesafeye Göre Monoton Azalanlığı

EK-4: Statik Çoklu İHABİ KHA İçin Gevşetilmiş Problem Formülasyonu

EK-5: Statik Çoklu İHABİ KHA İçin Büyük Ölçekli Problemlerin Deneysel Çalışma Sonuçları

EK-6: SY Amaç Fonksiyonunun Konkavlığı

EK-1: Bağlantı Hızının Bant Genişliğine Göre Konkavlığı

Bu ekte, bağlantı hızı fonksiyonu R 'nin, bant genişliği miktarı b 'ye göre konkav bir fonksiyon olduğunun ispatı yapılmıştır. İspat için konkav fonksiyonun tanımından yola çıkılmaktadır. Tanımı gereği, $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ rasgele bir fonksiyon olmak üzere, fonksiyonun ikinci dereceden türevinin pozitif olmadığına gösterilmesi, f 'nin konkav olduğu göstermektedir. Bu doğrultuda, R 'nin b 'ye göre ikinci dereceden türevi incelenmiştir.

Bağlantı hızı fonksiyonu en açık ifadesiyle aşağıdaki şekilde tanımlanmış idi:

$$R(x, y, b) = b \times \log_2 \left(1 + 10^{\frac{G-A-\eta \log_{10} e(x,y) - BP_{\text{LoS}}(x,y) - 10 \log_{10}(b)}{10\sigma_N}} \right). \quad (6.1)$$

Fonksiyonun sadece b 'ye bağlı konkavlığı gösterileceğinden b dışındaki tüm değişkenlerin sabit olduğu varsayılabilir, d.d. $e(x, y) = \bar{d}$, $P_{\text{LoS}}(x, y) = \bar{P}_{\text{LoS}}$. Bu durumda birkaç cebirsel değişim uygulandığında, $k_0 = \frac{G-A-\frac{\eta}{2} \log_{10} \bar{d} - BP_{\text{LoS}}}{10\sigma_N}$ ve $k_1 = 10^{k_0} > 0$, $k_2 = 1/\sigma_N \in (0, 1)$, sabitler olmak üzere, R aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$R(b) = b \log_2 \left(1 + \frac{k_1}{b^{k_2}} \right). \quad (6.2)$$

İspatı tamamlamak için yukarıdaki ifadenin b 'ye göre ikinci türevinin b 'nin hiçbir değeri için pozitif olmadığını göstermemiz gerekmektedir. Bu doğrultuda ifadenin ikinci türevi alındığında aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{\partial R}{\partial b} = -\frac{k_1 k_2 (k_1 + (1 - k_2) b^{k_2})}{\ln(2) b (b^{k_2} + k_1)^2} \stackrel{?}{\leq} 0. \quad (6.3)$$

Yukarıdaki eşitsizlik, $b > 0$ ve $k_2 < 1$ varsayıldığından her zaman sağlanacaktır. Dolayısıyla, R 'nin b 'ye göre konkav olduğu gösterilmiştir. \square

EK-2: Bağlantı Hızının İHABİ Yüksekliğine Göre Tek Modluluğu

Bu ekte, bağlantı hızı fonksiyonu R 'nin, İHABİ yüksekliğine göre tek modlu olduğunun ispatı yapılmıştır. İspat için tek modlu fonksiyonun tanımından yola çıkılmaktadır. Tanımı gereği, $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ rasgele bir fonksiyon olmak üzere, tanım aralığındaki herhangi bir $m \in \mathbb{R}$ değeri için, m 'den küçük tüm $\delta \leq m$ değerleri için monoton azalan (artan), m 'den büyük tüm $\delta \geq m$ değerler için monoton artan (azalan) bir fonksiyon ise f tek modlu bir fonksiyondur. Bu durumda, f 'nin tek bir global minimum (maksimum) noktası var ve bunun dışında herhangi bir lokal minimum (maksimum) noktası yoktur denebilir. Bunlarla birlikte, f her noktasında türevlenebilir bir fonksiyonsa, f 'in birinci derece türevinin, tanım aralığında yalnızca bir noktada 0'a eşit olduğunu ispatlamak tek modluluğu da ispat edecektir. Bu ispatta da bu özellik kullanılmıştır.

Bağlantı hızı fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmış idi:

$$R(x, y, b) = b \times \log_2 \left(1 + \frac{10^{G-A - \frac{\eta}{2} \log_{10}(r^2(x,y) + h^2(x,y)) - B - \frac{1}{1 + \alpha \exp\{-\beta(\frac{180}{\pi} \arctan(h(x,y)/r(x,y)) - \alpha)\}} - 10 \log_{10}(b)}}{10^{10\sigma_N}} \right). \quad (6.4)$$

Fonksiyonun sadece h 'ye göre tek modluluğu gösterileceğinden h dışındaki tüm değişkenlerin sabit olduğu varsayılabilir, d.d. $r(x, y) = \bar{r}$ ve $b = \bar{b}$. Bu durumda, birkaç cebirsel değişim uygulandığında, $k_1 = 10^{(G-A)/(10\sigma_N)} (\bar{b})^{-1/\sigma_N} > 0$, $k_2 = \eta / (20\sigma_N) > 0$, $k_3 = 10^{-B/(10\sigma_N)} > 0$, $p = e^{\alpha\beta} \geq 0$ ve $s = e^{-\beta} \geq 0$ sabit değerleriyle birlikte $f(h) = 1 + k_1 (\bar{r}^2 + h^2)^{-k_2} k_3^{g(h)} \in [1, +\infty)$, $g(h) = \frac{1}{1 + \alpha p s^{\theta(h)}} \in (0, 1]$ ve $\theta(h) = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{h}{\bar{r}}\right) \in [0, 90]$, h 'ye bağlı fonksiyonlar olmak üzere, R aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$R(h) = \bar{b} \log_2(f(h)). \quad (6.5)$$

İspatı tamamlamak için yukarıdaki ifadenin birinci türevinin h 'nin tek bir değeri için 0'a eşit olduğunu göstermemiz gerekmektedir. Bu doğrultuda ifadenin birinci türevi alındığında, f' , f 'nin birinci türevini ifade etmek üzere, aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{\partial R}{\partial h} = \frac{b f'(h)}{\log(2) f(h)}, \quad (6.6)$$

Yukarıdaki ifadede, $b > 0$ için $b/(\log(2)f(h))$ 0'dan büyüktür. Dolayısıyla yalnızca $f'(h) = 0$ şartının sağlanıp sağlanmadığının kontrol edilmesi yeterlidir. $f'(h)$ 'nin daha açık ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} f'(h) &= -2k_1k_2h(\bar{r}^2 + h^2)^{-k_2-1}k_3^{g(h)} + k_1(\bar{r}^2 + h^2)^{-k_2}\log(k_3)k_3^{g(h)}g'(h) \\ &= k_1(\bar{r}^2 + h^2)^{-k_2}[-2k_2h(\bar{r}^2 + h^2)^{-1}k_3^{g(h)} + \log(k_3)k_3^{g(h)}g'(h)] \end{aligned} \quad (6.7)$$

İncelediğimiz problemlerde uygulama sıkıntıları nedeniyle İHABİ yüksekliği 0 olamamaktadır. Dolayısıyla tüm fonksiyonlarda $h > 0$ şartı geçerlidir. Bu durum dikkate alındığında, (6.7) ifadesinde köşeli parantez dışındaki ifade kesinlikle 0'dan büyüktür. Dolayısıyla, yalnızca parantez içerisindeki ifadenin 0'a eşit olup olamayacağına bakmak yeterli olacaktır, d.d:

$$\begin{aligned} &-2k_2h(\bar{r}^2 + h^2)^{-1}k_3^{g(h)} + \log(k_3)k_3^{g(h)}g'(h) \stackrel{?}{=} 0 \\ \Rightarrow &-2k_2h(\bar{r}^2 + h^2)^{-1} + \log(k_3)g'(h) \stackrel{?}{=} 0 \\ \Rightarrow &k_4g'(h) \stackrel{?}{=} h(\bar{r}^2 + h^2)^{-1}. \quad //k_4 = \log(k_3)/(2k_2) > 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Yukarıdaki kontrolde ikinci satıra geçiş, $k_3^{g(h)}$ ifadesi kesinlikle 0'dan büyük olduğu için sağlanmaktadır. Bir sonraki adıma geçmeden ilk olarak $g'(h)$ aşağıdaki şekilde,

$$g'(h) = \frac{\alpha\beta ps^{\theta(h)}\theta'(h)}{(1 + \alpha ps^{\theta(h)})^2}, \quad (6.9)$$

bu ifadede ihtiyaç duyulan $\theta'(h)$ aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

$$\theta'(h) = \frac{180\bar{r}}{\pi(\bar{r}^2 + h^2)} \quad (6.10)$$

İlk olarak $\theta'(h)$ 'ı (6.9) ifadesine, sonra da elde edilen yeni ifadeyi (6.8) ifadesinde yerine koyduğumuzda aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{aligned} &\frac{k_4\alpha\beta ps^{\theta(h)}\frac{180\bar{r}}{\pi(\bar{r}^2 + h^2)}}{(1 + \alpha ps^{\theta(h)})^2} \stackrel{?}{=} h(\bar{r}^2 + h^2)^{-1} \\ \Rightarrow &\frac{k_5s^{\theta(h)}}{(1 + \alpha ps^{\theta(h)})^2} \stackrel{?}{=} h \quad //k_5 = \frac{k_4\alpha\beta p180\bar{r}}{\pi} \geq 0 \\ \Rightarrow &k_5q(h) \stackrel{?}{=} h(1 + \Lambda q(h))^2 \quad //q(h) = s^{\theta(h)} \in (0, 1], \Lambda = \alpha p \geq 0 \\ \Rightarrow &k_5q(h) \stackrel{?}{=} h(1 + 2\Lambda q(h) + (\Lambda q(h))^2) \\ \Rightarrow &q(h)(k_5 - 2\Lambda h) \stackrel{?}{=} h(1 + (\Lambda q(h))^2) \\ \Rightarrow &Q(h) \stackrel{?}{=} W(h) \quad //Q(h) = q(h)(k_5 - 2\Lambda h), W(h) = h(1 + (\Lambda q(h))^2) \end{aligned} \quad (6.11)$$

$\theta(h)$, h 'ye göre monoton artan bir fonksiyon ve $\beta > 0$ olduğundan, $q(h) = e^{-\beta\theta(h)}$, monoton azalan bir fonksiyondur. Dolayısıyla, h , 0'dan sonsuza giderken, $Q(h)$ de k_5 'ten 0'a doğru gider. Diğer taraftan, $W(h)$, h 0'dan sonsuza giderken, 0'dan sonsuza giden monoton artan bir fonksiyondur. Dolayısıyla, (6.11) ifadesi h nin yalnızca bir değerinde eşitlik olarak sağlanacaktır. Bu değer \bar{h} olduğu varsayıldığında, $h \leq \bar{h}$ değerleri için R 'nin h 'ye göre birinci türevi pozitif, $h \geq \bar{h}$ değerleri için negatif olacaktır. Dolayısıyla, R , \bar{h} değerine kadar monoton artan, \bar{h} 'de global maksimum değerine ulaşan ve sonrasında monoton azalan bir fonksiyondur. Bu durum da R 'nin tek modlu olduğunu ispatlamaktadır. \square



EK-3: Bağlantı Hızının Yatay Mesafeye Göre Monoton Azalanlığı

Bu ekte, bağlantı hızı fonksiyonu R 'nin, İHABİ ile kullanıcı arasındaki yatay mesafe r 'ye göre monoton azalan bir fonksiyon olduğunun ispatı yapılmıştır. İspat için monoton azalan herhangi fonksiyonun birinci derece türevinin negatif olması gerekliliğinden yola çıkılmıştır.

Bağlantı hızı fonksiyonu en açık gösterimiyle (6.4) ile verilmektedir. Fonksiyonun sadece r 'ye göre monotonluğunu göstereceğimizden r dışındaki tüm değişkenlerin sabit olduğunu varsayabiliriz, d.d. $h(x,y) = \bar{h}$ ve $b = \bar{b}$. Bu durumda, birkaç cebirsel değişim uygulandığında, Ek-2'de izlenen yola benzer şekilde, $f(r) = 1 + k_1 \left(r^2 + \bar{h}^2 \right)^{-k_2} k_3^{g(r)} \in [1, +\infty)$, $g(r) = \frac{1}{1 + \alpha p s^{\theta(r)}} \in (0, 1]$ ve $\theta(r) = \frac{180}{\pi} \arctan \left(\frac{\bar{h}}{r} \right) \in [0, 90]$, r 'ye bağlı fonksiyonlar olmak üzere, R aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$R(r) = \bar{b} \log_2 (f(r)). \quad (6.12)$$

İspatı tamamlamak için yukarıdaki ifadenin birinci türevinin her zaman negatif olduğunu göstermemiz gerekmektedir. Bu doğrultuda, Ek-2'de açıklanan bazı cebirsel değişimler yardımıyla kontrol edilmesi gereken ifade aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$-2k_2 h (\bar{r}^2 + h^2)^{-1} k_3^{g(h)} + \log(k_3) k_3^{g(h)} g'(h) \stackrel{?}{\leq} 0. \quad (6.13)$$

Yukarıdaki ifadenin ilk terimi $k_2, k_3 \geq 0$ olduğundan her zaman negatiftir. İkinci terimde ise $\log(k_3) k_3^{g(r)}$ ifadesi her zaman pozitifdir. Dolayısıyla, $g'(r)$ 'in negatifliği ispatlanırsa, ispat tamamlanmış olacaktır. $g'(r)$, aşağıda verilmiştir:

$$g'(r) = \frac{\alpha \beta p s^{\theta(r)} \theta'(r)}{(1 + \alpha p s^{\theta(r)})^2}. \quad (6.14)$$

Yukarıdaki ifadede, $\theta'(r)$ haricindeki tüm değerler pozitifdir. $\theta'(r)$ aşağıda verilmiştir:

$$\theta'(r) = -\frac{180\bar{h}}{\pi \left(r^2 + \bar{h}^2 \right)} \quad (6.15)$$

Görüleceği üzere $\theta'(r)$ her zaman negatiftir. Bu da (6.13) eşitsizliğinin her zaman sağlandığını, dolayısıyla, R 'nin yatay mesafeye göre monoton azalan bir fonksiyon olduğunu ispatlamaktadır. \square



EK-4: Statik Çoklu İHABİ KHA İçin Gevşetilmiş Problem Formülasyonu

Bu ekte, Bölüm 4’de açıklanan ve çoklu İHABİ KHA’sı için geliştirilen karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama formülasyonunun çözüm süresinin yüksek kullanıcı sayılı problemlerde uzun sürmesine çözüm üretmek amacıyla geliştirilen bir gevşetilmiş formülasyon açıklanmaktadır.

Gevşetme, esasında bağlantı hızı, R , ve ana taşıyıcı link kapasitesi, K , fonksiyonlarında uygulanmış ve orijinal problemin ana yapısı korunmuştur. Bu amaçla, R için bir alt, bir üst sınır, K için de bir üst sınır fonksiyonu geliştirilmiş ve orijinal problemde hem ilgili fonksiyonlar bu gevşetilmiş fonksiyonlarla değiştirilerek hem de ikili değişken kısıtları sürekli değişken olarak gevşetilerek yeni bir doğrusal olmayan programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, aşağıdaki önermelerle ilk olarak R ve K fonksiyonları için geliştirilen alt ve üst sınır fonksiyonları açıklanmıştır.

Önerme 6.1. $\alpha \geq 0$ ve $\varepsilon_R^{alt} \leq 10^{(G-A)/(10\sigma_N)}$, sabitler olmak üzere, $\Lambda^{alt}(x, y, b) = b[\varepsilon_R^{alt} + \eta/(10\sigma_N) \log_2 b + (1/\sigma_N) \log_2 e(x, y)]$, $R(x, y, b)$ için bir alt sınırdır.

İspat. $x \in Q$ ve $y \in S$ noktalarındaki İHABİ ve kullanıcı arasında $b \in \mathbb{R}$ bant genişliği olması halinde, bağlantı hızı aşağıdaki gibi bulunmakta idi:

$$R(x, y, b) = b \times \log_2 \left(1 + 10^{\frac{G-A-\eta \log_{10} e(x, y) - BP_{LoS}(x, y) - 10 \log_{10}(b)}{10\sigma_N}} \right). \quad (6.16)$$

Bu ifade birkaç cebirsel değişiklikle, $g = g(x, y) = 10^{[G-A-BP_{LoS}(x, y)]/[10\sigma_N]}$, $k_1 = \eta/(10\sigma_N)$ ve $k_2 = 1/\sigma_N$ olmak üzere, aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir:

$$R = b \log_2 \left(1 + \frac{g}{b^{k_1} d^{k_2}} \right).$$

Yukarıdaki formülde, notasyon kullanım kolaylığı açısından $R = R(x, y, b)$ ve $e = e(x, y)$ kullanılmıştır. İlk olarak logaritma fonksiyonu içindeki sabitten kurtulmak için aşağıdaki alt sınır bulunabilir:

$$b \log_2 \left(1 + \frac{g}{b^{k_1} d^{k_2}} \right) \geq b \log_2 \left(\frac{g}{b^{k_1} d^{k_2}} \right) = b (\log_2 g + k_1 \log_2 b + k_2 \log_2 d). \quad (6.17)$$

g fonksiyonu içinde yer alan P_{LoS} fonksiyonu bir olasılık değeri olduğundan 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. G ve A değerleri de sabit olduğundan, bu fonksiyon için sabit bir $\epsilon_R^{alt} \geq 0$ alt sınır değeri her zaman bulunabilir. Örneğin, “taşra” ortamı için verilen parametre değerleri göz önüne alındığında $\epsilon_r^{alt} \leq 50,175$ kullanılabilir. Bu sonuçla, aşağıdaki alt sınır değeri bulunabilir.

$$b(\log_2 g + k_1 \log_2 b + k_2 \log_2 d) \geq b(\epsilon_r^{alt} + k_1 \log_2 b + k_2 \log_2 d) = \Lambda^{alt}. \quad (6.18)$$

□

Önerme 6.2. $A \leq 0$, $\alpha \geq 0$, $\bar{g} \geq 10^{G-A}$ ve $\epsilon_R^{üst} < \infty$, sabitler olmak üzere $\Lambda^{üst}(x, y, b) = \epsilon_R^{üst} + b(\log_2 \bar{g} + k_1 \log_2 b + k_2 \log_2 e(x, y))$, $R(x, y, b)$ için bir üst sınırdır.

İspat. Bu önermenin ispatı için de bir önceki ispatta olduğu gibi g fonksiyonunun özelliklerinden faydalanılacaktır. g fonksiyonu içindeki P_{LoS} fonksiyonunun en yüksek değeri 1 olabileceğinden ve G ile A sabit olduğundan, bu fonksiyon için her zaman bir $\bar{g} < \infty$ üst sınır değeri bulunabilir. Dolayısıyla, aşağıdaki eşitsizlik yazılabilir:

$$R = b \log_2 \left(1 + \frac{g}{b^{k_1} d^{k_2}} \right) \leq b \log_2 \left(1 + \frac{\bar{g}}{b^{k_1} d^{k_2}} \right). \quad (6.19)$$

Logaritmik fonksiyonların özelliği kullanılarak yukarıdaki eşitsizlikte logaritma içerisindeki sabit değerden kurtulmak için her zaman bir üst sınır değeri bulunabilir. Örneğin, “taşra” ortamı parametreleri baz alındığında bu üst değer için 113.228 kullanılabilir. Sonuç olarak, bu üst sınır değeri $\epsilon_R^{üst} < \infty$ ile gösterilmek üzere, aşağıdaki üst sınır değeri bulunmuştur:

$$\begin{aligned} b \log_2 \left(1 + \frac{\bar{g}}{b^{k_1} d^{k_2}} \right) &\leq b \log_2 \left(\frac{\bar{g}}{b^{k_1} d^{k_2}} \right) + \epsilon_R^{üst} \\ &= \epsilon_R^{üst} + b(\log_2 \bar{g} + k_1 \log_2 b + k_2 \log_2 d) = \Lambda^{üst}. \end{aligned} \quad (6.20)$$

□

Önerme 6.3. $k_1 = 10^{[G-A]/[10\sigma_N]}$, $k_2 = \eta/(10\sigma_N)$, $k_3 = 1/\sigma_N$ ve $\epsilon_K^{üst} < \infty$, sabitler olmak üzere, $\Theta^{üst}(x, y, B) = \epsilon_K^{üst} + \Phi(\log_2 k_1 + k_2 \log_2 b + k_3 \log_2 d)$, $K(x, y, B)$ için bir üst sınırdır.

İspat. Ana taşıyıcı link kapasitesi, $x \in Q$ ve $y \in S$ İHABİ ve KBİ konumlarında Φ bant genişliği ayrılması halinde, en açık ifadesi ile aşağıdaki şekilde ifade edilmekte idi:

$$K(x, y, \Phi) = \Phi \log_2 \left(1 + 10^{\frac{G-A-\eta \log_{10} e(x,y) - 10 \log_{10}(\Phi)}{10\sigma_N}} \right) \quad (6.21)$$

Yukarıdaki ifade, $k_1 = 10^{[G-A]/[10\sigma_N]}$, $k_2 = \eta/(10\sigma_N)$ ve $k_3 = 1/\sigma_N$ olmak üzere, aşağıdaki şekilde yeniden ifade edilebilir:

$$K = \Phi \log_2 \left(1 + \frac{k_1}{b^{k_2} d^{k_3}} \right). \quad (6.22)$$

Önerme 6.2 için de kullanılan logaritmik fonksiyonların özellikleri doğrultusunda logaritma içindeki sabit elimine edilerek, $\varepsilon_K^{\text{üst}} < \infty$ bir sabit olmak üzere, aşağıdaki üst sınır değeri bulunabilir:

$$\begin{aligned} K &= \Phi \log_2 \left(1 + \frac{k_1}{b^{k_2} d^{k_3}} \right) \leq \varepsilon_K^{\text{üst}} + \Phi \log_2 \left(\frac{k_1}{b^{k_2} d^{k_3}} \right) \\ &= \varepsilon_K^{\text{üst}} + \Phi (\log_2 k_1 + k_2 \log_2 b + k_3 \log_2 d) \\ &= \Theta^{\text{üst}}. \end{aligned}$$

□

R ve K fonksiyonları için alt ve üst sınır değerlerini gösterdikten sonra, gevşetilmiş problem, aşağıdaki formülasyon ile verilmiştir:

$$\begin{aligned} \bar{P}_2 : \quad \text{enb} \quad P_2(\mathbf{X}^d, \mathbf{B}, \mathbf{T}, \mathbf{W}, \Phi) &= \sum_{i \in \mathcal{I}} u_i \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \Lambda_{ij}^{\text{üst}} T_{ij} \right) - \sum_{j \in \mathcal{J}} v_j W_j \\ &\quad - \sum_{l \in \mathcal{L}} z_l \sum_{j \in \mathcal{J}} \Phi_{jl} \end{aligned}$$

öyle ki:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \Lambda_{ij}^{\text{alt}} T_{ij} \leq W_j \sum_{l \in \mathcal{L}} \Theta_{jl}^{\text{üst}}, \quad j \in \mathcal{J} \quad (6.23)$$

$$\rho^- \leq \sum_{j \in \mathcal{J}} \Lambda_{ij}^{\text{üst}} T_{ij}, \quad i \in \mathcal{I} \quad (6.24)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} T_{ij} = 1, \quad i \in \mathcal{I} \quad (6.25)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \Phi_{jl} \leq \psi_l, \quad l \in \mathcal{L} \quad (6.26)$$

Önerme 6.4. \bar{P}_2 , P_2 'nin bir gevşetmesidir.

İspat. Ξ 'nin P_2 için olurlu bir çözüm olduğu varsayalım. Bu durumda aşağıdaki eşitsizlikler, Ξ için sağlanmıştır.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} R_{ij} T_{ij} \leq W_j \sum_{l \in \mathcal{L}} \Phi_{jl}, \quad j \in \mathcal{J}, \quad (6.27)$$

$$\rho^- \leq \sum_{j \in \mathcal{J}} R_{ij} T_{ij}, i \in \mathcal{I}. \quad (6.28)$$

Önerme 6.1 ile aşağıdaki eşitsizlik elde edilebilir:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \Lambda_{ij}^{\text{alt}} T_{ij} \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} R_{ij} T_{ij}, j \in \mathcal{J}. \quad (6.29)$$

Benzer şekilde, Önerme 6.3 ile aşağıdaki eşitsizlik elde edilebilir:

$$W_j \sum_{l \in \mathcal{L}} \Phi_{jl} \leq W_j \sum_{l \in \mathcal{L}} \Theta_{jl}^{\text{üst}}, j \in \mathcal{J}. \quad (6.30)$$

(6.27), (6.29) ve (6.30) kullanılarak aşağıdaki eşitsizlik yazılabilir:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \Lambda_{ij}^{\text{alt}} T_{ij} \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} R_{ij} T_{ij} \leq W_j \sum_{l \in \mathcal{L}} \Phi_{jl} \leq W_j \sum_{l \in \mathcal{L}} \Theta_{jl}^{\text{üst}}, j \in \mathcal{J}. \quad (6.31)$$

Buna ek olarak, Önerme 6.2 ile aşağıdaki eşitsizlik elde edilebilir:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} R_{ij} T_{ij} \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} \Lambda_{ij}^{\text{üst}} T_{ij}, i \in \mathcal{I}. \quad (6.32)$$

(6.28) ve (6.32) kullanılarak aşağıdaki eşitsizlik elde edilebilir:

$$\rho^- \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} R_{ij} T_{ij} \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} \Lambda_{ij}^{\text{üst}} T_{ij}, i \in \mathcal{I}. \quad (6.33)$$

Sonuç olarak, (6.31) ve (6.33), Ξ 'nin \bar{P}_2 için de olurlu olduğunu göstermektedir. ancak, tersi bir ilişki her zaman geçerli olmayabilir. Örneğin, gevşetilmiş formülasyonun çözümünde $\Lambda^{\text{üst}}$ bağlantı hızı tam sınırda olan rasgele bir $i \in \mathcal{I}$ kullanıcısının, gerçek bağlantı hızı değeri ρ^- 'den yavaş olacağı için orijinal problem olursuz olacaktır.

Bunlarla birlikte, kullanıcı getirilerinin bağlantı hızına göre artan bir fonksiyon olduğu varsayıldığından gevşetilmiş problemin amaç fonksiyon değeri orijinal problemin amaç fonksiyon değerinden her zaman daha yüksek olacaktır. Bu da, \bar{P}_2 'nin, P_2 için bir gevşetme olduğunu ispatlamaktadır. \square

Gevşetilmiş formülasyonun en büyük avantajı, problemi kompleksleştiren etmenlerden biri olan ve trigonometrik fonksiyonlar içeren θ fonksiyonunun elimine edilmiş olmasıdır. Bu fonksiyonun olmadığı durumda, gevşetilmiş formülasyon, konik

dönüşümler kullanılarak çözümü orijinal formülasyona göre nispeten daha kolay olan konik problemlere dönüştürülebilir.

Konik dönüşümleri uygulamak amacıyla, $p_{1,ij}$, $p_{2,ij}$, $p_{3,ij}$, $p_{4,ij}$, $q_{1,jl}$, $q_{2,jl}$, $q_{3,jl}$ ve $q_{4,jl}$ karar değişkenleri tanımlanmış ve aşağıdaki kısıtlar formülasyona eklenmiştir.

$$p_{1,ij} \geq r_{ij}^2 + h_{ij}^2, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.34)$$

$$p_{2,ij} \geq \log p_{1,ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.35)$$

$$p_{3,ij} \leq -b_{ij} \log b_{ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.36)$$

$$\Lambda_{ij}^{\text{alt}} \geq \varepsilon_R^{\text{alt}} + \frac{1}{\log 2} p_{3,ij} - \frac{1}{\log 2} b_{ij} p_{2,ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.37)$$

$$\Lambda_{ij}^{\text{üst}} \leq \varepsilon_R^{\text{üst}} + \Delta_R^{\text{üst}} b_{ij} + \frac{1}{\log 2} p_{3,ij} - \frac{1}{\log 2} b_{ij} p_{2,ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.38)$$

$$q_{1,jl} \geq r_{jl}^2 + h_{jl}^2, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \quad (6.39)$$

$$q_{2,jl} \geq \log q_{1,jl}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \quad (6.40)$$

$$q_{3,jl} \leq -\Phi_{jl} \log \Phi_{jl}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \quad (6.41)$$

$$\Theta_{jl}^{\text{üst}} \leq \varepsilon_K^{\text{üst}} + \Delta_K^{\text{üst}} \Phi_{jl} + \frac{1}{\log 2} q_{3,jl} - \frac{1}{\log 2} \Phi_{jl} q_{2,jl}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}. \quad (6.42)$$

(6.37), (6.38) ve (6.42), iki karar değişkeninin çarpımını içermektedir. Bu çarpımları doğrusallaştırmak için, $p_{4,ij}$, $p_{5,ij}$, $p_{6,ij}$, $q_{4,jl}$, $q_{5,jl}$ ve $q_{6,jl}$ karar değişkenleri tanımlanmış ve aşağıdaki kısıtlar formülasyona eklenmiştir.

$$2p_{4,ij} = b_{ij} + p_{2,ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.43)$$

$$2p_{5,ij} = b_{ij} - p_{2,ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.44)$$

$$p_{4,ij}^2 \geq p_{5,ij}^2 + p_{6,ij}^2, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.45)$$

$$\Lambda_{ij}^{\text{alt}} = \varepsilon_R^{\text{alt}} + \frac{1}{\log 2} p_{3,ij} - \frac{1}{\log 2} p_{6,ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.46)$$

$$\Lambda_{ij}^{\text{üst}} = \varepsilon_R^{\text{üst}} + \Delta_R^{\text{üst}} b_{ij} + \frac{1}{\log 2} p_{3,ij} - \frac{1}{\log 2} p_{6,ij}, i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, \quad (6.47)$$

$$2q_{4,jl} = \Phi_{jl} + q_{2,jl}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \quad (6.48)$$

$$2q_{5,jl} = \Phi_{jl} - q_{2,jl}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \quad (6.49)$$

$$q_{4,jl}^2 \geq q_{5,jl}^2 + q_{6,jl}^2, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \quad (6.50)$$

$$\Theta_{jl}^{\text{üst}} = \varepsilon_K^{\text{üst}} + \Delta_K^{\text{üst}} \Phi_{jl} + \frac{1}{\log 2} q_{3,jl} - \frac{1}{\log 2} q_{6,jl}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}. \quad (6.51)$$

Son olarak, $e_{1,ij}$, $e_{2,ij}$, $e_{3,ij}$, $f_{1,ij}$, $f_{2,ij}$, $f_{3,ij}$, $\omega_{1,jl}$, $\omega_{2,jl}$ ve $\omega_{3,jl}$ karar değişkenleri tanımlanmış ve amaç fonksiyonundaki karar değişkenlerinin çarpımını içeren ifadeler bu karar değişkenleri ile doğrusallaştırılmıştır. Sonuç olarak, gevşetilmiş formülasyonun

son hali aşağıdaki gibidir:

$$\bar{P}_2 : \begin{array}{l} \text{enb} \\ \mathbf{X}^d \in \mathcal{Q}^m, \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m} \\ \mathbf{T} \in \mathbb{B}^{n \times m}, \mathbf{W} \in \mathbb{B}^m \\ \Phi \in \mathbb{R}^{s \times m} \end{array} P_2(\mathbf{X}^d, \mathbf{B}, \mathbf{T}, \mathbf{W}, \Phi) = \sum_{i \in \mathcal{I}} u_i \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} e_{3,ij} \right) - \sum_{j \in \mathcal{J}} v_j W_j - \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{J}} z_l \Phi_{jl}$$

öyle ki

$$(4.25), (4.26), (6.34) - (6.36), (6.39) - (6.41), (6.43) - (6.51)$$

$$2e_{1,ij} = \Lambda_{ij}^{\text{üst}} + T_{ij}, \quad i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \quad (6.52)$$

$$2e_{2,ij} = \Lambda_{ij}^{\text{üst}} - T_{ij}, \quad i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \quad (6.53)$$

$$e_{1,ij}^2 \geq e_{2,ij}^2 + e_{3,ij}^2, \quad i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \quad (6.54)$$

$$\rho^- \leq \sum_{j \in \mathcal{J}} e_{3,ij}, \quad i \in \mathcal{I} \quad (6.55)$$

$$2f_{1,ij} = \Lambda_{ij}^{\text{alt}} + T_{ij}, \quad i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \quad (6.56)$$

$$2f_{2,ij} = \Lambda_{ij}^{\text{alt}} - T_{ij}, \quad i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \quad (6.57)$$

$$f_{1,ij}^2 \geq f_{2,ij}^2 + f_{3,ij}^2, \quad i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \quad (6.58)$$

$$2\omega_{1,jl} = \Theta_{jl}^{\text{üst}} + w_j, \quad j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L} \quad (6.59)$$

$$2\omega_{2,jl} = \Theta_{jl}^{\text{üst}} - w_j, \quad j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L} \quad (6.60)$$

$$\omega_{1,jl}^2 \geq \omega_{2,jl}^2 + \omega_{3,jl}^2, \quad j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L} \quad (6.61)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} f_{3,ij} \leq \sum_{l \in \mathcal{L}} \omega_{3,jl}, \quad j \in \mathcal{J}. \quad (6.62)$$

EK-5: Statik Çoklu İHABİ KHA İçin Büyük Ölçekli Problemlerin Deneysel Çalışma Sonuçları

Çizelge Ek.1: Statik çok İHABİ'li KHA büyük ölçekli test problemlerinin çözüm süreleri.

ψ	m	s		n				
				500	1000	2000	5000	
20(50)	1	1	Min	7,31	44,37	266,40	2079,55	
			Ort	9,45	71,39	377,04	2799,61	
			Mak	10,78	81,03	459,73	3876,80	
			2	Min	10,31	52,40	264,69	2614,31
				Ort	13,05	63,34	355,70	3240,71
				Mak	14,59	78,57	466,40	3880,99
			3	Min	8,25	76,02	264,36	2649,48
				Ort	10,69	77,41	306,37	3443,72
				Mak	11,97	80,27	390,84	3906,93
			4	Min	8,37	43,44	117,63	3638,69
				Ort	11,00	58,78	288,50	3720,58
				Mak	13,13	76,24	349,38	3802,48
2	1	1	Min	5,99	50,77	194,48	2103,94	
			Ort	6,58	67,93	216,31	2866,70	
			Mak	7,13	73,55	288,79	3677,58	
			2	Min	6,07	68,92	193,26	2097,76
				Ort	9,78	72,00	271,93	2585,95
				Mak	11,88	74,04	295,93	2815,51
			3	Min	8,10	50,20	201,77	1858,21
				Ort	10,01	68,67	204,42	2554,43
				Mak	11,39	74,42	206,75	2900,65
			4	Min	8,10	50,97	195,73	2094,74
				Ort	10,29	59,49	233,99	2196,88
				Mak	12,13	71,52	289,59	1945,24
3	1	1	Min	5,88	48,49	327,53	2486,50	
			Ort	8,17	65,12	353,83	2733,87	
			Mak	10,60	69,94	450,05	3399,27	
			2	Min	7,15	49,97	209,95	1681,33
				Ort	10,42	75,34	306,12	2514,17
				Mak	12,84	113,99	331,75	3348,17

Çizelge Ek.1: (devam)

ψ	m	s		n			
				500	1000	2000	5000
20(50)	3	3	Min	9,01	51,16	308,67	1713,42
			Ort	12,74	77,36	348,46	2523,99
			Mak	18,83	95,87	427,70	3335,42
		4	Min	8,87	50,32	196,03	2391,90
			Ort	10,40	66,92	250,37	2386,82
			Mak	12,14	72,85	286,83	2345,10
	4	1	Min	7,21	76,07	197,58	2348,66
			Ort	9,06	91,09	293,18	2391,06
			Mak	12,03	131,45	395,32	2467,83
		2	Min	6,31	54,10	196,40	1707,59
			Ort	8,47	82,95	256,62	2213,63
			Mak	10,32	111,65	297,75	2405,23
		3	Min	8,34	56,12	200,18	1643,37
			Ort	9,80	93,37	256,33	1852,11
			Mak	11,01	119,72	298,47	2387,89
		4	Min	7,20	45,60	299,02	1669,13
			Ort	9,46	61,50	391,52	2280,81
			Mak	11,74	70,53	588,28	2503,12
	5	1	Min	5,63	55,72	203,78	1612,97
			Ort	8,59	74,69	292,59	2513,52
			Mak	10,47	103,21	390,33	3537,14
		2	Min	7,38	54,11	196,82	2372,38
			Ort	9,08	76,89	294,19	2752,45
			Mak	10,67	100,60	382,71	3492,96
3		Min	6,83	55,89	200,08	2455,65	
		Ort	9,74	77,47	272,04	2752,69	
		Mak	14,24	97,13	291,28	3314,47	
4		Min	7,55	42,82	158,66	1578,79	
		Ort	9,98	58,45	223,11	2334,78	
		Mak	11,46	63,12	248,51	2658,00	
6	1	Min	5,95	54,58	265,53	2598,02	
		Ort	8,39	70,86	381,46	3174,13	
		Mak	12,22	82,30	530,98	3750,24	
	2	Min	7,10	78,47	274,06	2499,65	
		Ort	8,60	83,63	349,05	2526,72	
		Mak	10,60	99,79	408,74	2553,78	
	3	Min	8,43	75,84	178,11	2529,07	
		Ort	11,07	81,03	320,85	3113,83	
		Mak	13,52	99,15	548,37	3698,58	
	4	Min	7,85	41,22	162,78	1343,75	
		Ort	9,55	60,84	252,80	1710,19	
		Mak	12,49	83,20	384,38	2244,19	

Çizelge Ek.1: (devam)

ψ	m	s		n			
				500	1000	2000	5000
30(60)	1	1	Min	2,21	45,53	126,90	1808,61
			Ort	2,75	54,43	251,08	2560,54
			Mak	3,40	61,06	361,07	2884,33
		2	Min	3,27	42,68	190,51	1894,00
			Ort	3,78	57,81	294,26	2540,56
			Mak	4,74	63,41	373,37	2856,45
		3	Min	4,13	40,97	278,21	1873,80
			Ort	5,03	44,85	324,37	2586,37
			Mak	5,46	57,43	378,86	2848,83
		4	Min	3,58	39,75	295,32	1582,36
			Ort	4,75	45,37	306,86	1613,60
			Mak	5,84	56,49	316,55	1628,05
	2	1	Min	2,68	49,83	182,95	1856,04
			Ort	3,52	53,78	221,40	2587,15
			Mak	4,24	56,06	274,70	3688,27
		2	Min	3,25	38,97	189,87	1697,04
			Ort	4,30	49,04	236,97	2572,44
			Mak	5,31	53,68	324,12	3102,28
		3	Min	3,80	39,33	185,77	1709,20
			Ort	4,73	51,24	261,40	2541,06
			Mak	5,39	55,53	281,94	3070,82
		4	Min	3,62	40,79	179,69	2164,52
			Ort	4,65	51,42	251,94	2207,52
			Mak	5,95	57,28	272,64	2211,32
3	1	Min	3,32	47,59	274,78	2086,19	
		Ort	3,98	54,00	284,09	2934,88	
		Mak	4,74	64,63	304,40	3816,06	
	2	Min	3,76	34,76	189,82	1636,85	
		Ort	4,77	45,41	258,08	2702,53	
		Mak	5,56	52,09	277,96	3229,14	
	3	Min	4,42	42,78	188,09	1628,52	
		Ort	8,27	47,66	242,34	2314,60	
		Mak	11,46	51,76	284,28	2775,91	
	4	Min	4,54	36,24	185,48	2011,90	
		Ort	5,47	48,60	252,28	2051,99	
		Mak	7,05	56,80	274,65	2085,68	
4	1	Min	3,82	42,15	182,91	1629,53	
		Ort	4,63	52,45	219,69	2096,31	
		Mak	5,31	60,45	273,19	2274,57	
	2	Min	3,79	55,74	185,45	1510,90	
		Ort	4,84	63,94	258,98	2259,59	
		Mak	6,29	78,39	448,04	3021,44	

Çizelge Ek.1: (devam)

ψ	m	s		n				
				500	1000	2000	5000	
30(60)	4	3	Min	3,96	37,35	186,51	1546,72	
			Ort	5,44	50,67	205,34	2120,52	
			Mak	6,24	60,68	274,05	2386,28	
		4	Min	4,84	41,73	292,96	2119,35	
			Ort	5,65	47,32	376,21	2609,53	
			Mak	6,33	55,10	532,05	3153,68	
		5	1	Min	3,90	55,98	167,63	2500,68
				Ort	4,45	59,35	260,72	3248,35
				Mak	5,18	68,65	340,49	3714,44
	2		Min	4,33	46,53	172,03	2267,80	
			Ort	4,89	53,78	217,03	3406,14	
			Mak	5,36	58,53	252,25	4538,45	
	3		Min	4,73	38,32	181,07	2823,50	
			Ort	5,87	59,29	246,25	3327,64	
			Mak	7,30	84,52	320,49	3689,81	
	4		Min	4,44	30,84	224,36	2275,54	
			Ort	5,14	41,24	285,90	2612,71	
			Mak	5,92	50,66	381,72	3785,55	
	6	1	Min	3,57	40,59	261,06	2060,02	
			Ort	4,43	56,45	405,55	2094,78	
			Mak	4,86	72,23	622,53	2132,18	
		2	Min	4,67	39,73	253,19	1429,32	
			Ort	5,12	48,37	328,70	1452,55	
			Mak	5,91	51,66	388,50	1476,86	
3		Min	4,04	50,00	373,07	1341,87		
		Ort	5,61	51,86	426,97	1342,76		
		Mak	7,38	53,24	505,46	1357,10		
4		Min	5,46	29,89	150,88	1961,10		
		Ort	6,04	42,56	221,04	2274,08		
		Mak	7,98	53,49	294,28	3292,68		
40(70)	1	1	Min	2,31	26,61	185,21	964,58	
			Ort	2,88	37,82	186,67	2420,76	
			Mak	3,67	46,31	188,55	3034,38	
		2	Min	3,40	24,13	177,80	2802,69	
			Ort	4,74	35,13	243,61	3036,27	
			Mak	5,69	44,55	263,32	3444,07	
		3	Min	3,07	28,46	175,46	1864,93	
			Ort	4,06	35,62	246,88	2821,72	
			Mak	5,03	38,63	266,59	3479,61	
		4	Min	4,23	23,80	87,60	2324,01	
			Ort	5,34	31,29	175,61	2327,81	
			Mak	5,99	33,83	257,89	2357,72	

Çizelge Ek.1: (devam)

ψ	m	s		n			
				500	1000	2000	5000
40(70)	2	1	Min	2,94	27,19	262,46	1622,18
			Ort	3,96	31,41	286,34	2212,89
			Mak	5,07	39,70	303,69	2434,97
		2	Min	4,09	21,40	198,91	1656,47
			Ort	4,94	27,78	261,83	2202,90
			Mak	5,40	33,33	306,93	2434,19
	3	Min	3,39	20,73	195,38	1610,76	
		Ort	4,91	24,57	273,74	1629,83	
		Mak	7,77	26,36	298,50	1660,40	
	4	Min	4,49	25,40	243,07	1941,26	
		Ort	5,50	28,79	261,54	1953,12	
		Mak	6,22	32,85	327,58	1954,57	
3	1	Min	3,13	22,17	244,78	1655,94	
		Ort	4,03	25,01	249,02	2060,71	
		Mak	5,06	27,51	252,22	2483,35	
		2	Min	4,07	17,55	255,55	1673,71
			Ort	4,99	23,51	316,36	2241,65
			Mak	6,98	31,15	407,65	2546,33
	3	Min	3,58	21,47	242,47	1753,99	
		Ort	5,19	26,76	263,57	2823,19	
		Mak	7,50	31,71	325,56	3368,74	
	4	Min	4,92	26,04	162,86	2022,11	
		Ort	5,40	32,04	230,87	2047,21	
		Mak	5,97	36,93	324,42	2059,47	
4	1	Min	3,25	26,77	171,30	1495,17	
		Ort	4,72	33,07	240,37	2501,56	
		Mak	6,53	38,78	268,19	3346,23	
		2	Min	4,33	19,07	241,47	2368,52
			Ort	5,57	24,24	248,76	3092,26
			Mak	7,15	35,42	257,11	4299,50
	3	Min	4,23	25,82	166,63	2214,90	
		Ort	5,55	30,28	227,44	2842,88	
		Mak	7,46	33,54	245,04	3373,44	
	4	Min	4,32	12,30	153,86	1507,03	
		Ort	5,69	18,53	236,26	1862,59	
		Mak	7,81	27,13	395,05	2157,49	
5	1	Min	3,92	19,11	152,03	5932,44	
		Ort	4,57	25,71	200,91	6028,94	
		Mak	5,84	29,89	234,22	6074,42	
	2	Min	4,00	20,51	160,29	2360,72	
		Ort	4,71	24,42	205,48	2906,44	
		Mak	5,41	29,62	287,70	3452,16	

Çizelge Ek.1: (devam)

ψ	m	s		n				
				500	1000	2000	5000	
40(70)	5	3	Min	4,92	19,90	151,42	2368,00	
			Ort	6,07	23,89	183,00	2295,52	
			Mak	7,74	27,64	231,03	2452,68	
	4	4	Min	4,45	14,47	137,03	1434,73	
			Ort	5,48	20,29	202,60	2059,68	
			Mak	7,59	26,44	255,22	2264,75	
	6	1	1	Min	3,89	17,51	259,79	3910,61
				Ort	4,50	22,27	363,69	3943,01
				Mak	5,09	26,44	452,08	4020,86
		2	2	Min	3,85	20,54	202,63	1327,73
				Ort	4,90	24,37	338,82	1331,15
				Mak	6,26	28,19	436,07	1350,11
3		3	Min	3,97	17,58	232,89	1292,55	
			Ort	5,19	21,98	367,74	1299,17	
			Mak	6,12	26,15	467,80	1303,35	
4		4	Min	4,49	17,26	143,99	2313,67	
			Ort	5,86	22,18	252,12	2650,47	
			Mak	7,89	27,49	388,59	3196,08	

Çizelge Ek.2: Statik çok İHABİ'li KHA büyük ölçekli test problemlerinin amaç fonksiyon değerleri.

ψ	m	s		n			
				500	1000	2000	5000
20(50)	1	1	Min	21061131,45	28557899,78	29039755,96	58705335,60
			Ort	21859024,69	30051383,75	30044834,03	64815182,50
			Mak	22267127,44	32828915,88	30366482,04	67408515,61
		2	Min	22830046,61	30709372,86	29995896,93	65995480,08
			Ort	22967243,86	31056214,90	31356088,17	69561326,68
			Mak	23106928,07	31316993,60	32734728,72	72033203,84
		3	Min	24435598,54	30530872,14	31418952,60	69131725,10
			Ort	24637223,14	31392235,65	31969000,23	70879454,28
			Mak	24714930,90	31733133,96	32224545,19	71547774,01
		4	Min	23370567,88	31006013,06	31513177,56	77239907,60
			Ort	23556613,05	31846054,70	32592244,96	77239907,60
			Mak	23635675,01	32507462,86	32985005,03	77239907,60
	2	1	Min	24767270,43	29476979,88	29115736,10	62211725,85
			Ort	24968723,63	30297361,18	29971568,42	63980893,90
			Mak	25182650,21	30818509,21	31308718,39	64783496,14
		2	Min	23234980,86	30089021,44	29821358,29	66865212,74
			Ort	23569263,44	30759281,86	31155878,45	69676022,13
			Mak	23915405,24	31897860,82	32293397,16	74272853,95
		3	Min	21779822,35	29825538,25	31368157,97	71003312,87
			Ort	21983810,72	31098606,78	31420701,27	73177586,85
			Mak	22205589,33	32189316,66	31630847,47	76516785,72
		4	Min	24190954,93	30290954,22	31522051,35	73221423,09
			Ort	24416090,85	30911989,62	31881892,51	73221423,09
			Mak	24611265,92	31368198,28	32204983,28	73221423,09
	3	1	Min	23593998,03	31773497,37	29717648,32	66747992,14
			Ort	23831943,47	32329099,70	30138782,66	68964554,92
			Mak	24090933,97	32588168,56	30701608,59	71247574,46
		2	Min	23830242,19	30913647,86	30241478,81	68028218,93
			Ort	24078035,22	31695352,52	30833227,38	70849331,31
			Mak	24289723,22	32449516,67	31251219,44	72498481,73
		3	Min	23549991,17	31808285,32	31684073,87	72646836,40
			Ort	23805808,65	32389270,28	34041424,79	74834886,71
			Mak	24010557,54	32730325,71	35616528,68	76938033,78
		4	Min	24534211,06	31606836,39	31423508,69	68598188,50
			Ort	24723639,17	32600321,25	31951238,75	68598188,50
			Mak	24862707,28	33316063,07	32459061,08	68598188,50
4	1	Min	23808256,75	30831783,98	30221378,97	74882204,02	
		Ort	24072121,66	31490226,02	31411888,98	76268590,61	
		Mak	24341657,66	31974618,80	32549950,89	78309863,83	
	2	Min	22046674,08	30604420,18	27692468,74	68042176,28	
		Ort	22325594,51	31651739,98	29129664,78	71140845,73	
		Mak	22621958,09	33347377,66	30413353,05	72784177,25	
	3	Min	22825646,43	30444757,74	29625227,87	71580463,72	
		Ort	23202713,64	31174744,93	31437245,26	72522294,95	
		Mak	23364027,22	31691310,75	32418618,79	74092756,44	
	4	Min	23402324,42	31519015,30	31161754,45	71792776,68	
		Ort	23662089,79	32170114,79	31453746,18	74270385,07	
		Mak	23750261,44	33162964,93	31951426,09	76570622,37	
5	1	Min	24346170,59	29501502,20	32124477,19	73026465,15	
		Ort	24650609,80	29719547,97	32361541,42	75369957,10	
		Mak	24993378,33	30088438,71	32869068,14	78118916,57	

Çizelge Ek.2: (devam)

ψ	m	s		n				
				500	1000	2000	5000	
20(50)	5	2	Min	22469492,66	30362780,73	31023919,07	73371499,74	
			Ort	22858689,38	31153039,46	32904553,98	75608913,84	
			Mak	23352964,51	31760371,67	34160619,71	77949545,67	
		3	Min	23061877,48	30596271,04	30066909,53	76094813,67	
			Ort	23253361,14	31678043,11	31409808,64	76952805,79	
			Mak	23456161,47	32995734,94	33410433,32	78052878,35	
		4	Min	23850941,13	32233233,18	32163393,27	73172769,94	
			Ort	24192301,07	32914479,88	32835674,83	74973304,00	
			Mak	24398594,10	33921634,01	33836723,75	77398658,66	
	6	1	Min	22289572,61	30461829,77	32957258,33	70527427,66	
			Ort	22548910,48	30581475,60	33726957,40	70972538,66	
			Mak	22723806,01	30706060,31	34637033,98	71417649,67	
		2	Min	22772360,90	30516529,39	30117832,90	72986518,49	
			Ort	23088267,40	31202772,54	30913153,93	75328229,68	
			Mak	23474327,90	32242102,04	31801127,61	77669940,87	
		3	Min	23527171,94	31886781,55	31553876,98	73524184,92	
			Ort	23907066,41	32397456,83	32275355,85	75293681,74	
			Mak	24216645,37	33053889,63	32665424,76	77063178,56	
4		Min	24594003,41	30949687,72	30564647,32	70761190,92		
		Ort	24723685,63	32072453,66	31765531,41	73348717,57		
		Mak	24865549,72	33285257,78	32559416,72	74914884,65		
30(60)	1	1	Min	23459168,79	37701391,21	45873457,17	72283328,60	
			Ort	23652738,02	39552933,26	46519976,85	76556846,87	
			Mak	23820421,91	40989336,38	47281653,37	78530794,37	
		2	Min	22301425,94	40799274,57	44356121,36	84074510,58	
			Ort	22436509,94	41534961,75	46212409,82	88075338,40	
			Mak	22665139,82	41850981,48	47489559,48	90323013,28	
		3	Min	23423933,87	40050258,43	48455809,92	85507464,05	
			Ort	23513953,78	40862885,85	48550185,96	85947022,43	
			Mak	23626421,79	41486255,47	48782855,39	86276778,01	
		4	Min	24355019,34	40136139,42	48778732,42	89738228,30	
			Ort	24476245,13	40534180,00	48892813,07	89738228,30	
			Mak	24546174,44	41055517,11	49058679,80	89738228,30	
		2	1	Min	24475141,53	39111055,01	44100527,87	83716029,44
				Ort	24486907,85	40111066,45	45596472,72	86433788,73
				Mak	24493803,15	41028127,84	46888462,60	91575840,64
			2	Min	23646205,84	40642934,36	42392561,89	85313042,42
				Ort	23726397,85	41342541,47	43862366,98	85918510,10
				Mak	23869845,99	42276757,23	44930671,68	86360396,67
	3		Min	23698655,60	40918879,60	45742777,01	90596604,33	
			Ort	23823938,06	41143513,16	47554565,42	91946660,90	
			Mak	23924418,98	41375635,05	49351770,08	92838840,80	
	4		Min	24452033,70	42583703,68	46950265,82	89309044,33	
			Ort	24586153,49	42804648,82	48232146,86	89309044,33	
			Mak	24658250,74	42932914,38	49209967,00	89309044,33	
	3	1	Min	24777383,92	37881387,72	41609075,42	79445705,06	
			Ort	24913681,25	39327567,63	43012039,75	83855644,91	
			Mak	24990997,87	39974689,32	44533407,17	87948620,91	
2		Min	23872068,68	41056437,07	43923879,61	83011053,03		
		Ort	23940709,21	41858275,53	45708390,37	84852134,13		
		Mak	24001386,67	43366538,67	48746117,08	86697596,84		
3		Min	24592161,13	41760577,33	43604330,81	83979993,43		
		Ort	24646144,97	42847112,35	45825797,43	87293007,70		
		Mak	24725355,26	43705945,10	46930782,17	90033921,36		

Çizelge Ek.2: (devam)

ψ	m	s		n			
				500	1000	2000	5000
30(60)	3	4	Min	24664109,32	39924316,00	47817191,14	95778615,09
			Ort	24741014,71	40435756,28	49144326,18	95778615,09
			Mak	24848691,61	41352908,17	50392054,48	95778615,09
	4	1	Min	23349025,72	40024570,10	45123210,17	85437023,76
			Ort	23444972,43	40907420,97	46918501,93	86754749,53
			Mak	23530112,81	41514785,99	48034146,88	87997200,23
		2	Min	24765539,12	39157429,57	43647461,93	84858334,22
			Ort	24782289,95	40421264,51	45970911,59	90510844,95
			Mak	24808544,22	41696151,37	47789256,45	97968564,67
	3	Min	24203369,65	41058420,50	48442200,04	81513014,50	
		Ort	24331153,00	41824935,73	49661072,80	87226648,94	
		Mak	24434361,12	42611323,78	51948113,08	92199611,55	
	4	Min	23274846,24	41988492,02	46449346,71	93013327,35	
		Ort	23332279,20	42773321,98	47797755,01	94898001,79	
		Mak	23394816,72	43571066,01	48483025,20	96605613,74	
	5	1	Min	24279241,35	41303863,15	45612719,84	90531712,66
			Ort	24380505,69	41927499,46	47640659,53	91313602,59
			Mak	24445154,14	42445553,46	49596079,45	92475094,50
		2	Min	24774010,42	40654604,62	46871062,40	91817953,72
			Ort	24905174,94	41660393,97	48082872,29	93458291,32
			Mak	25024414,63	42546835,04	49487565,32	94922433,07
		3	Min	24205057,93	39121705,50	46078888,98	86682219,44
			Ort	24287055,49	39944003,47	48564246,07	86974710,23
			Mak	24372524,01	41190876,39	50077691,66	87375323,35
4		Min	24574552,04	41018971,94	49362726,29	87108334,36	
		Ort	24639378,01	41637687,97	49667502,76	91382406,45	
		Mak	24668334,64	42425986,85	50309955,66	98413871,89	
6	1	Min	22785951,15	38696336,04	46316365,84	93412843,78	
		Ort	22902311,22	39652508,46	47436550,38	93412843,78	
		Mak	22988736,81	40764278,83	48342994,25	93412843,78	
	2	Min	24987491,32	41917419,87	45112251,44	87454809,91	
		Ort	25038262,17	43056229,36	47437830,71	87454809,91	
		Mak	25146016,50	43779934,32	48985148,12	87454809,91	
	3	Min	25017693,41	41496545,13	47287512,32	91375170,14	
		Ort	25065684,92	42044085,42	49003154,21	91375170,14	
		Mak	25115542,28	42747260,40	51171926,45	91375170,14	
	4	Min	24300797,73	42370307,93	48211754,34	91012650,34	
		Ort	24362418,69	42936038,55	49564828,69	95573109,20	
		Mak	24432830,58	44085183,71	50644876,42	103289219,73	
40(70)	1	1	Min	24057637,27	43824315,32	59904519,51	94300761,30
			Ort	24104832,95	45131522,75	59935842,07	96587093,92
			Mak	24182382,22	46223434,57	60061132,31	101181704,00
		2	Min	24457892,75	45471428,89	60219665,87	102018450,08
			Ort	24467039,41	45707062,70	60897459,21	103590770,06
			Mak	24489386,33	45878327,24	61655231,16	104692572,62
		3	Min	25437606,47	48386139,68	58144504,97	104831619,61
			Ort	25468161,42	48789944,07	59228773,87	105088968,97
			Mak	25497920,14	48923101,16	60571814,69	105627482,82
		4	Min	22828407,75	46296168,63	59185998,60	107557863,50
			Ort	22949701,65	46471669,14	60684255,11	107557863,50
			Mak	23038651,84	46595787,63	61361217,84	107557863,50
	2	1	Min	23219737,27	44828994,34	61148537,41	96377018,59
			Ort	23415216,17	45444946,87	61993951,30	101128081,45
			Mak	23549159,43	46159551,94	62463835,08	104018781,59

Çizelge Ek.2: (devam)

ψ	m	s		n			
				500	1000	2000	5000
40(70)	1	2	Min	23143011,99	46500260,81	54859141,79	106035897,88
			Ort	23286825,01	46929869,68	56684545,94	110218492,28
			Mak	23403991,12	47331395,90	58615029,48	114918976,24
		3	Min	23703294,88	48804551,22	60169070,93	107621056,01
			Ort	23751197,17	48936528,69	62026165,21	110892111,86
			Mak	23786294,49	49160275,05	63626606,76	112149953,02
		4	Min	23824402,46	45037977,55	63208430,11	108366209,70
			Ort	23853010,55	45365040,81	63473632,86	108366209,70
			Mak	23881138,84	45501871,92	63851047,08	108366209,70
	3	1	Min	22769314,89	44800103,67	59545617,52	103436574,19
			Ort	22942956,44	45377837,42	60253632,82	107348912,26
			Mak	23051297,83	45674236,64	61022790,87	110323420,76
		2	Min	23012975,99	45074056,20	58907320,22	99081182,72
			Ort	23194481,33	46428241,75	60056902,02	102980591,42
			Mak	23346443,56	47295641,48	62103192,54	106557724,01
		3	Min	24120309,93	46313348,02	62743129,05	101161988,51
			Ort	24201082,26	46623445,41	64613760,23	104616455,63
			Mak	24297736,26	47136476,19	65750046,90	107767787,09
		4	Min	22840165,47	46760911,63	61259585,05	102696321,97
			Ort	22950439,77	46919550,70	62466660,67	102696321,97
			Mak	23046197,77	47342534,35	63590070,75	102696321,97
	4	1	Min	22911018,47	44884011,10	52713529,95	101847802,60
			Ort	23080827,37	45206019,72	54855090,75	103009869,87
			Mak	23226983,23	45582657,57	57076126,65	104868777,14
		2	Min	23914954,00	45010407,86	58907527,05	101600988,71
			Ort	24014550,67	45239577,72	61357344,22	103205399,00
			Mak	24118017,70	45424554,14	63916765,82	104567082,35
		3	Min	24180418,57	45068904,46	58825305,72	101454743,61
			Ort	24284977,69	45522892,23	59859428,84	105169779,86
			Mak	24380648,01	46467918,18	60453835,72	107745610,96
		4	Min	21653461,95	46583770,57	60287494,85	104058243,03
			Ort	21767864,58	47336079,55	62576314,64	105999648,79
			Mak	21861466,68	48188922,78	64222257,81	109402532,57
	5	1	Min	24091618,87	45934841,13	56046337,81	97211336,72
			Ort	24127969,23	46224868,94	59114881,27	97211336,72
			Mak	24169563,93	46500317,12	60815962,13	97211336,72
2		Min	23289415,57	46738497,84	59865189,06	102112358,57	
		Ort	23400905,65	47092468,28	60372329,98	105101843,34	
		Mak	23478980,20	47512115,72	62077034,10	108091328,12	
3		Min	24343227,69	46134460,33	59481000,57	102814613,47	
		Ort	24378908,79	46965527,49	60542409,39	105783014,97	
		Mak	24440232,67	47493369,05	61510094,92	109334391,29	
4		Min	24548726,54	47068347,29	61886634,91	101193337,73	
		Ort	24610276,27	47621130,09	63030176,76	105234809,83	
		Mak	24651212,21	47952874,45	65206795,12	108833044,24	
6	1	Min	24705861,44	48230727,48	62203402,25	106846627,97	
		Ort	24719679,03	48490216,70	63974303,70	106846627,97	
		Mak	24727330,79	48918571,11	64998497,93	106846627,97	
	2	Min	23690739,28	46439905,73	57203722,68	95057035,60	
		Ort	23772592,57	47005142,43	59214878,35	95057035,60	
		Mak	23859726,11	47780064,31	62332578,26	95057035,60	
	3	Min	23015377,00	42072563,21	58362441,68	115554082,59	
		Ort	23061453,26	42475954,10	62026691,32	115554082,59	
		Mak	23123112,98	42699637,41	65157318,34	115554082,59	

Çizelge Ek.2: (devam)

ψ	m	s		n			
				500	1000	2000	5000
40(70)	6	4	Min	22991870,02	45068248,98	61164124,63	105480266,82
			Ort	23074269,22	45716672,53	63086238,35	107508924,74
			Mak	23114638,04	46092662,00	66624466,85	110295189,48



EK-6: SY Amaç Fonksiyonunun Konkavlığı

Bu ekte, $P_3 + S$ ile tanımlanan SY formülasyonunun amaç fonksiyonunun konkav bir fonksiyon olduğu gösterilmektedir.

Fonksiyonun, İHABİ yüksekliği h ve kapsama alanı A olmak üzere iki değişkeni bulunmaktadır. Birkaç cebirsel işlem ile fonksiyonunun Hesyan matrisi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$\nabla'' \Pi_S(h, A) = \begin{bmatrix} -\frac{20\eta\bar{w}A^{3/2}}{3\log(10)\sqrt{\pi}(\bar{d}-L^-)h^2} & -\frac{10\eta\bar{w}A^{1/2}}{\log(10)\sqrt{\pi}(\bar{d}-L^-)h} \\ -\frac{10\eta\bar{w}A^{1/2}}{\log(10)\sqrt{\pi}(\bar{d}-L^-)h} & -\frac{B\bar{w}A^{-1/2}}{2\sqrt{\pi}(\bar{d}-L^-)} - \frac{5\eta\bar{w}A^{-1/2}\log_{10}(h)}{\sqrt{\pi}(\bar{d}-L^-)} \end{bmatrix}. \quad (6.63)$$

Kullanıcı taleplerinin sinyal kaybının en küçük değerinden küçük olamayacağı ve kullanıcı getirilerinin de negatif olamayacağı varsayılmıştır, d.d. $d \geq L^-$ ve $w, \eta \geq 0$. Dolayısıyla, yukarıdaki matrisin birinci esas derecesi negatiftir. İkinci esas derecesi de $h \geq 10^{3/\log^2(10)} \approx 3.68$ şartı için pozitiftir. İHABİ yerseçim problemlerinde İHA'ların genellikle 50 metre üzerine yerleştirildiği düşünüldüğünde bu şart sağlanmış olacaktır, yukarıdaki Hesyan matrisi negatif yarı-kesin bir matristir ve bu da Π_S 'nin konkav bir fonksiyon olduğunu göstermektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Cihan Tuğrul Çiçek

Uyruğu : T.C.

Doğum Tarihi ve Yeri : 12.10.1988 – Sivas

E-posta : cihantugrulcicek@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yöneylem Araştırması
- **Yüksek Lisans** : 2014, University College London, Facilities and Environmental Management

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017-(devam)	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2016	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği	Proje Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Cicek, C.T., Gultekin, H., Tavli, B., 2019. The location-allocation problem of drone base stations, *Computers & Operations Research* 111, 155-176.
- Cicek, C.T., Gultekin, H., Tavli, B., 2019. UAV Base Station Location Optimization for Next Generation Wireless Networks: Overview and Future Research Directions, 2019 1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman (UVS), Feb 2–7, Muscat, Oman.
- Cicek, C.T., Gultekin, H., Tavli, B., 2019. 3D Location-Allocation Problem of Drone Base Stations in Next Generation Wireless Networks, 30th European Conference on Operational Research (EURO2019), June 23–26, Dublin, U.K.
- Cicek, C.T., Shen, Z.J.M., 2019. 3-D Maximal Covering Location Problem with Unimodal Coverage: Planar case, *Production and Operations Management Society (POMS) 30th. Annual Conference*, May 2–7, Washington D.C, USA.
- Cicek, C.T., Shen, Z.J.M., 2019. Locating Drone Base Stations for Disaster Recovery, *Production and Operations Management Society (POMS) 30th. Annual Conference*, May 2–7, Washington D.C, USA.
- Cicek, C.T., Gultekin, H., Kutlu, T., Tavli, B., 2018. 3-D Location-Allocation Problem of UAV Base Stations in 5G+ Cellular Networks. 38th. *Operations Research and Industrial Engineering National Congress*, June 26–29, Eskişehir, Turkey

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Cicek, C.T., Fescioğlu-Ünver, N., 2017. Yetkinlik bazlı personel atama problemi, 35. Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi, 13–15 Temmuz, Eskişehir, Türkiye.
- Cicek, C.T., Meral, F.S., 2016. Çok kullanıcı binalarda enerji verimliliğini artırıcı bir yaklaşım, 33. Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi, 13–15 Haziran, Ankara, Türkiye.