



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSIZ HAVA ARACI DESTEKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Emine EŞ YÜREK

Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2018

TEZ ONAYI

Emine EŞ YÜREK tarafından hazırlanan “İnsansız Hava Aracı Destekli Araç Rotalama Problemi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. H.Cenk ÖZMUTLU

İmza



Başkan: Prof. Dr. H.Cenk ÖZMUTLU
Uludağ Ü., Mühendislik Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

İmza



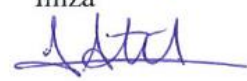
Üye : Prof. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU
Osmangazi Ü., Müh. Mim. Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

İmza



Üye : Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR
Uludağ Ü., Mühendislik Fakültesi,
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

İmza



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKANSEL
Uludağ Ü., Mühendislik Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Koray ALTUN
Bursa Teknik Ü., Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

07/09/2018

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07/09/2018

İmza

Emine EŞ YÜREK

ÖZET

Doktora Tezi

İNSANSIZ HAVA ARACI DESTEKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Emine EŞ YÜREK

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU

Araç rotalama problemi, literatürde ve gerçek hayatta en sık çalışılan problemlerden biridir. Bu problemin yeni ortaya çıkan ve insansız hava araçlarını (İHA) dağıtım faaliyetlerine entegre eden yeni bir türevi, kamyon ve İHA'ların, zaman ve konum olarak koordinasyonunu sağlayarak eşzamanlı dağıtım yapmalarını amaçlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, ilk olarak, tek kamyon ve tek İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptığı problemin (ARP-İHA) çözümü için, 2-aşamalı, yinelemeli bir kesin çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, kamyon rotası ilk aşamada belirlenmektedir. İHA rotası ise ikinci aşamada, geliştirilen karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli çözümlenmektedir. Çözüme en kısa kamyon rotası ile başlanarak, atama ve rotalama kararları yinelemeli olarak iyileştirilmektedir. Yapılan sayısal çalışma ile, çözüm yaklaşımının performansı değerlendirilmiştir. Sonrasında, orta ve büyük ölçekli ARP-İHA'ların çözümü için, makine öğrenmesi ile fonksiyon kestirime dayanan melez bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Literatürdeki mevcut çalışma ile karşılaştırılan sonuçlar, küçük ve orta ölçekli problemlerde melez genetik algoritmanın daha başarılı olduğunu göstermiştir. Önerilen kesin çözüm yaklaşımı ve melez genetik algoritma, kamyon ve birden fazla İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptığı (ARP-mİHA) probleme uyarlanmıştır. Bilindiği kadarıyla, tez kapsamında kabul edilen varsayımları dikkate alarak, ARP-mİHA için geliştirilmiş kesin ve sezgisel çözüm yaklaşımları, ilk kez bu tez çalışması tarafından önerilmektedir. Yapılan sayısal çalışma ile, geliştirilen yöntemlerin performansı ve İHA sayısındaki artışın dağıtım sürelerine etkisi analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşırı öğrenme makinesi, dağıtım, fonksiyon kestirimi, insansız hava aracı, karışık tamsayılı doğrusal programlama, melez genetik algoritma, makine öğrenmesi.

2018, ix+94 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

UNMANNED AERIAL VEHICLE SUPPORTED VEHICLE ROUTING PROBLEM

Emine EŞ YÜREK

Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. H. Cenk ÖZMUTLU

Vehicle routing problem is one of the most studied problems in the literature and real life. An emerging variant of this problem, which integrates unmanned aerial vehicles (UAVs) into the last-mile delivery operations, aims the coordinated delivery of truck and UAVs while synchronizing them in terms of both time and location. In this thesis, initially, a 2-stage, iterative exact solution approach is developed for the solution of the coordinated delivery problem of a truck and a UAV (TSP-D). In this approach, the truck route is determined at the first stage. The UAV route is optimized at the second stage by the mixed integer linear programming model. Beginning with the shortest truck route, the assignment and routing decisions are iteratively improved. A computational study is conducted to evaluate the performance of the solution approach. Next, a hybrid genetic algorithm which is based on function approximation by machine learning is developed to solve medium and large-scale problems. The results are compared with the state-of-the-art study and it is concluded that the proposed algorithm gives better results for the small and medium-scale problems. The proposed exact solution approach and hybrid genetic algorithm are extended to the delivery problem in which a truck and multi-UAV deliver parcels in conjunction (TSP-mD). To the best of our knowledge, this is the first study proposing exact and heuristic solution approaches for the TSP-mD under the assumptions existing in this study. A computational study is conducted to analyze the performance of the proposed algorithms and the impact of the increase in the number of UAVs on the delivery times.

Keywords: Extreme learning machine, last-mile delivery, function approximation, unmanned aerial vehicle, mixed integer linear programming, hybrid genetic algorithm, machine learning,

2018, ix+94 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve tez çalışmam sırasında bilimsel katkıları ile bana yol gösteren ve motive eden danışman hocam sayın Prof. Dr. H. Cenk Özmütlu'ya teşekkür etmek istiyorum.

Değerli zamanlarını ayıran ve fikirleriyle yol gösteren, tez izleme komitesinde yer alan hocalarım Prof. Dr. Aydın Sipahioğlu ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akansel'e katkılarından dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum. Ayrıca, tez savunma sınavımda yer alan Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR ve Dr. Öğr. Üyesi Koray ALTUN'a teşekkür ediyorum.

Destekleriyle her zaman arkamda olan, en umutsuz zamanlarımda beni ayağa kaldıran ve yolumu her daim aydınlatan annem Ayşe Eş ve babam Mecit Eş'e sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum. Benim için her zaman moral kaynağı olan ablam Elif Karakaya ve kardeşim M. Burak Eş'e teşekkür ediyorum.

Eşim Fatih Yürek'e, doktora öğrenimim boyunca verdiği her türlü destek ve sonsuz anlayışı için teşekkür ediyorum.

Evlatlarım Yiğit ve Kerem Yürek'e katlandıkları fedakarlık ve gösterdikleri anlayış için sonsuz teşekkürler ediyorum.

Doktora öğrenimim sırasında yurtiçi doktora burs programı kapsamında sağladıkları burs desteği nedeniyle TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Emine EŞ YÜREK

07/09/2018

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Motivasyon	1
1.2. Tez Çalışmasının Amacı	4
1.3. Tez Çalışmasının Önemi ve Literatüre Katkısı.....	5
1.4. Tez Çalışmasının Yöntemi.....	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	8
2.1. İHA Destekli Araç Rotalama Problemi	9
2.2. Çoklu İHA Destekli Araç Rotalama Problemi.....	13
3. İHA DESTEKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ.....	16
3.1. Problem Tanımı	16
3.2. 2-Aşamalı Yinelemeli Kesin Çözüm Algoritması	19
3.2.1. Algoritma 1	22
3.2.2. Kamyonun İHA'yı bekleme süresini enküçükleyen matematiksel model	26
3.2.3. Algoritma 2	30
3.2.4. Sayısal çalışma.....	32
3.2.4.1. Varsayımlar	32
3.2.4.2. Algoritma 1 ve 2'nin performans değerlendirmesi	33
3.2.4.3. Literatür ile karşılaştırma	38
3.3. Makine Öğrenmesi ile Fonksiyon Kestirimine Dayanan Melez Genetik Algoritma	39
3.3.1. Melez genetik algoritma	40
3.3.1.1. Genetik algoritma.....	42
3.3.1.1.1. Kodlama şeması	43
3.3.1.1.2. Başlangıç çözüm	44

3.3.1.1.3. Çaprazlama.....	45
3.3.1.1.4. Mutasyon.....	46
3.3.1.1.5. Uygunluk fonksiyonu.....	49
3.3.1.1.6. Yerel Arama.....	49
3.3.1.2. Aşırı öğrenme makinesi	50
3.3.2. Sayısal çalışma.....	51
3.3.2.1. Varsayımlar	52
3.3.2.2. Sonuçlar	53
4. ÇOKLU İHA DESTEKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ	56
4.1. Problem Tanımı	56
4.2. Kesin Çözüm Algoritmasının Çoklu İHA'ya Uyarlanması	58
4.3. Melez Genetik Algoritmanın Çoklu İHA'ya Uyarlanması	62
4.4. Sayısal Çalışma.....	67
4.4.1. Kesin sonuçlar	67
4.4.2. Sezgisel sonuçlar	71
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	75
KAYNAKLAR	77
EKLER.....	80
EK 1 İHA'YA ATANABİLECEK EN BÜYÜK MÜŞTERİ SAYISI HESAPLAMA..	81
EK 2 1 İHA İLE ELDE EDİLEN SEZGİSEL SONUÇLAR	83
EK 3 2 İHA İLE ELDE EDİLEN SEZGİSEL SONUÇLAR	89
EK 4 3 İHA İLE ELDE EDİLEN SEZGİSEL SONUÇLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	93

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

a_{ip}	p turunda, i müşterisine İHA tarafından teslimat yapıp yapılmadığını gösteren parametre
b_i	Gizli katmandaki i . düğümün eşik değeri
C	Müşteri kümesi
CD	İHA'ya atanabilecek müşterilerin kümesi
D_{max}	İHA'ya atanabilecek en büyük müşteri sayısı
d_p	p turunun tamamlanma süresi
D_s	s numaralı yinelemede İHA'ya atanan müşterilerin kümesi
$dist_{ij}$	Kamyonun, i ve j düğümleri arasındaki seyahat süresi
E	İHA'nın bataryası bitmeden havada kalabilme süresi (batarya ömrü)
f_{ip}	p turunun, i düğümünde başlayıp başlamadığını gösteren parametre
H	Gizli katman çıktı matrisi
h	Gizli katmandaki düğüm sayısı
l_{ip}	p turunun, i düğümünde bitip bitmediğini gösteren parametre
m	Çıktı katmanındaki düğüm sayısı
M	Dağıtım ağındaki İHA sayısı
m_k	Kamyon rotasındaki k . pozisyona atanan müşteri
n	Girdi katmanındaki düğüm sayısı
N	Dağıtım ağındaki müşteri sayısı
ND	Dağıtım ağındaki İHA'ya atanabilecek müşteri sayısı
N_b	Yineleme sonunda anakütleyle dahil edilecek en iyi çocuk birey sayısı
N_c	Her yinelemede uygulanacak çaprazlama sayısı
N_g	Genetik algoritmadaki yineleme sayısı
N_{mm}	Anakütlede en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı
N_{mb}	Her yinelemede anakütleyle dahil edilecek en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı
N_p	Anakütle büyüklüğü
N_{rand}	Her yinelemede anakütleyle dahil edilecek rassal oluşturulmuş birey sayısı
n_s	s numaralı iterasyonda seçilen kamyon rotasındaki müşteri sayısı
N_t	Başlangıç eğitim verisinin büyüklüğü
$N+1$	Rotanın son düğümü olarak depo
\mathbf{o}_j	Çıktı vektörü
P_m	Mutasyon olasılığı
P_s	s numaralı yinelemede İHA'nın gerçekleştirebileceği turların kümesi

R	Kamyon rotalarının kümesi
$R(s)$	R kümesindeki s . eleman
\bar{r}_s	s numaralı yinelemenin ilk aşamasında belirlenen kamyon rotası
S	Eğitim verisindeki girdi sayısı
S_L	İHA turunun başlama düğümündeki hazırlık zamanı
S_P	İHA turunun bitiş düğümündeki hazırlık zamanı
T	Eğitim verisinin hedef matrisi
t_i	Kamyonun i düğümüne geliş zamanı
t_i^v	v numaralı aracın kamyon rotasındaki i . düğüme geliş zamanını gösteren değişken
$tmax_i^v$	v numaralı aracın kamyon rotasındaki i . düğümde en erken çıkış zamanını gösteren değişken
V	Araç kümesi (kamyon ve İHA'lar)
wt_i	Kamyonun İHA'yı i . düğümde bekleme süresini gösteren değişken
w_i	Gizli katmandaki i . düğüm ile girdi katmanındaki düğümleri bağlayan ağırlık vektörü
x_j	Girdi vektörü
x_p	p turunun İHA'ya atanıp atanmadığını gösteren 0, 1 değişken
x_p^v	p turunun v numaralı İHA'ya atanıp atanmadığını gösteren 0, 1 değişken
β_0	Bias parametresi
β_i	Gizli katmandaki i . düğüm ile çıktı katmanı düğümlerini bağlayan ağırlık vektörü

Kısaltmalar

Açıklama

ARP-İHA	İHA Destekli Araç Rotalama Problemi
ARP-mİHA	Çoklu İHA Destekli Araç Rotalama Problemi
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi
GSP	Gezgin Satıcı Problemi
GRASP	Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı
BÜS	Bütünsel Üst Sınır
İHA	İnsansız Hava Aracı
YAS	Yerel Alt Sınır
YÜS	Yerel Üst Sınır
MIP	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama
PÖMÇP	Paralel Özdeş Makineli Çizelgeleme Problemi
TSP-D	Traveling Salesman Problem with Drone

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Amazon'un Amazon Prime Air adını verdiği dağıtım İHA'sı prototipi.....	2
Şekil 1.2. UPS'in İHA ile entegre modifiye dağıtım aracı	3
Şekil 1.3. Mercedes'in İHA ile entegre dağıtım aracı prototipi.....	4
Şekil 1.4. Tez çalışmasının adımları	7
Şekil 3.1. ARP-İHA çözümü için bir örnek	18
Şekil 3.2. ARP-İHA'nın 2-aşamalı çözümü için bir örnek	21
Şekil 3.3. 1'nci tip olursuz İHA tur atamasına bir örnek	29
Şekil 3.4. 2'nci tip olursuz İHA tur atamasına bir örnek	29
Şekil 3.5. Melez genetik algoritmadaki kromozom yapısı.....	44
Şekil 3.6. Çaprazlama operasyonu	46
Şekil 3.7. Yer değiştirme operatörü	47
Şekil 3.8. Ekleme operatörü	47
Şekil 3.9. Çıkarma operatörü	48
Şekil 4.1. ARP-2İHA çözümü için bir örnek	58
Şekil 4.2. Örnek bir çözümde yapılan değişikliğin etkileri.....	65
Şekil 4.3. 1, 2 ve 3 İHA'lı ARP çözümlerinde dağıtım süreleri	69
Şekil 4.4. ARP-mİHA'nın MGA çözümünde, GSP çözümüne göre elde edilen iyileşme yüzdeleri.....	72
Şekil 4.5. Dağıtım sürelerine İHA sayısı ile batarya ömrünün etkisi.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. İHA destekli araç rotalama probleminin özet literatür karşılaştırması	9
Çizelge 3.1. Örnek problem için üretilen kamyon rotaları.....	25
Çizelge 3.2. Örnek problemin çözüm adımları	25
Çizelge 3.3. Kamyonun bekleme süresini enküçükleyen matematiksel modelde kullanılan gösterim.....	26
Çizelge 3.4. Belirli kamyon rotası için üretilen İHA turlarına bir örnek	27
Çizelge 3.5. Algoritma 1 ve 2'nin çözüm performansı açısından karşılaştırılması	34
Çizelge 3.6. 13 müşterili örnek problemlerin çözümüne ait sonuçlar.....	35
Çizelge 3.7. Kamyon rotası üretme süresinin toplam çözüm süresindeki payı	35
Çizelge 3.8. 10, 11, 12 ve 13 müşterili örnek problemlerin çözümüne ait sonuçlar.....	37
Çizelge 3.9. ARP-İHA çözümünün, GSP çözümüne göre dağıtım sürelerinde sağladığı ortalama iyileşme yüzdeleri.....	38
Çizelge 3.10. Sezgisel sonuçların literatür ile karşılaştırılması	54
Çizelge 3.11. 10 ve 50 müşterili problemlerin MGA çözümünde kullanılan parametre değerleri	55
Çizelge 3.12. 100 müşterili problemlerin MGA çözümünde kullanılan parametre değerleri	55
Çizelge 4.1. ARP-mİHA'nın dağıtım süresini enküçükleyen matematiksel modelde kullanılan gösterim	62
Çizelge 4.2. 1, 2 ve 3 İHA'lı ARP çözümlerinin GSP çözümü ile karşılaştırması.....	69
Çizelge 4.3. Örnek verinin 1, 2 ve 3 İHA'lı ARP çözümüne ait çeşitli istatistikler	70
Çizelge 4.4. ARP-mİHA'nın MGA ile çözümündeki parametre değerleri.....	71
Çizelge 4.5. 1, 2 ve 3 İHA'lı sezgisel çözümler.....	72
Çizelge 4.6. İHA'ların ortalama kullanım oranları	73
Çizelge 4.7. Farklı İHA sayısı ve batarya ömrü ile elde edilen dağıtım süreleri (sn).....	73

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojinin sağladığı imkanlarla birlikte, günümüzde insansız hava araçları (İHA) başta askeri faaliyetler (istihbarat toplama, sınır kontrolü, düşman tespiti, mühimmat taşınması) olmak üzere; enerji (arıza tespiti ve gaz ölçümleri) ve tarım uygulamaları (veri toplama), harita yapımı, arkeolojik alanların belgelenmesi, ormanlık alan uygulamaları ve afet yönetimi gibi çeşitli sivil alanlarda da kullanılmaktadır (<http://www.komhedos.com>, 2016, Çömert ve ark. 2016). Bunların yanı sıra, ilk yardım (arama kurtarma) ve trafik (yol durumu) gibi daha pek çok alanda İHA'ların kullanılabilmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin devam ettiği bilinmektedir (<http://www.komhedos.com>, 2016).

1.1. Motivasyon

Günümüzde artan rekabet koşulları, firmaları, operasyonel verimliliğini arttırıp maliyetlerini düşürmek ve hizmet kalitesini arttırmak amacıyla, teknolojideki gelişmeleri yakından takip ederek yenilikçi çözüm yaklaşımları üretmeye zorlamaktadır. Bunun son örneklerinden biri, İHA teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, dağıtım hizmetinde İHA'lardan yararlanılması fikri ile ortaya çıkmaktadır.

Dünyanın en yaygın alışveriş sitelerinden biri olan Amazon'un CEO'su Jeff Bezos'un 2013 yılında verdiği bir röportajında yaptığı açıklama, lojistik sektöründe İHA'ların kullanılmasına yönelik yoğun araştırmaların yapıldığını göstermektedir (<http://www.cbsnews.com>, 2016). Bezos'a göre, Amazon yakın bir gelecekte paket dağıtımında İHA kullanarak, siparişlerinin %86'sını oluşturan 2,25 kg'dan hafif siparişleri, 30 dk içerisinde müşterilere teslim edebilecektir (<http://www.cbsnews.com>, 2016). Bu açıklama, projenin gerçekleşip gerçekleşmeyeceğine dair pek çok tartışmayı da beraberinde getirmiştir. Halihazırda, İHA'ların paket dağıtımında kullanılmasının önünde teknik ve yasal birtakım engeller bulunmaktadır. Wang'a göre, batarya ömrü, uçulabilecek mesafe, taşınabilecek paket ağırlığı, paket büyüklüğü, ormanlık alanda GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi) sinyallerinin düşük olması gibi teknik kısıtların yanı sıra İHA'ların her uçuşta tek bir paket taşıyabilmeleri ve her seferinde depoya dönme zorunluluğu nedeniyle ekonomik açıdan da geleneksel kamyonlarla yarışmalarının zor

olduğu gözükmetedir (<http://www.flexport.com/blog/drone-delivery-economics/>, 2016). Bunların yanı sıra, yerleşim bölgeleri üzerinde ticari amaçlı İHA'ların kullanımı yasalarla engellenmiş olduğundan bu yasal engelin de aşılması gerekmektedir. Tüm bu engellere rağmen, Amazon konuyla ilgili çeşitli gelişmelere de imza atmaktadır. Aralık 2016'da, İngiltere'de alınan özel izinle, Amazon'un Cambridge'deki iki müşterisine İHA aracılığıyla ilk teslimat gerçekleştirilmiştir (Hern, <https://www.theguardian.com/technology/2016/dec/14/amazon-claims-first-successful-prime-air-drone-delivery>, 2017). Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, Avusturya, Fransa ve İsrail'de Prime Air (Şekil 1.1) geliştirme merkezleri kuran Amazon (<https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>, 2018), İHA ile teslimat hizmeti modelinin patentini almıştır (https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2018/03/22/amazon-issued-patent-for-delivery-drones-that-can-react-to-screaming-flailingarms/?noredirect=on&utm_term=.af77b9e62d22, 2018).



Şekil 1.1. Amazon'un Amazon Prime Air adını verdiği dağıtım İHA'sı prototipi (<https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>)

Diğer taraftan paket dağıtımında İHA kullanmayı planlayan tek firmanın Amazon olmadığı görülmektedir. Amazon'un Prime Air adını verdiği prototipine ilaveten, DHL Parcelcopter, Domino's Domicopter isimli prototiplerini tanıtmış olup, Zookal isimli kitap firması Avustralya'da İHA ile paket gönderimini test etmeye başlamıştır (<http://www.computerworld.com.au>, 2016). Flirtey ise 2015 yılında, İHA ile tıbbi malzeme gönderimi için ilk testleri başarıyla tamamlamıştır (Murphy,

<https://qz.com/458703/the-first-successful-drone-delivery-in-the-us-has-taken-place/>, 2016).

İHA teslimatının gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceği tartışmaları bir başka dağıtım modelinin daha ortaya çıkmasına neden olmuştur. Cincinnati Üniversitesi ile birlikte İHA üretimi üzerine çalışan AMP Electric Vehicles isimli firma yetkilileri, müşterilere paket dağıtımının direkt depodan yapılması yerine, İHA'ların paket dağıtımındaki kamyonlarla entegre edilerek kullanılmasının zaman ve ekonomik kazanım açısından daha gerçekleştirilebilir olduğu düşüncesiyle HorseFly ismini verdikleri İHA ile entegre çalışan WorkHorse isimli aracın prototipini ürettiklerini duyurmuştur (<http://www.prweb.com/releases/2014/06/prweb11913357>, 2016). UPS ise, geleneksel dağıtım aracını, Şekil 1.2'de görüldüğü gibi, üzerinden İHA'nın kalkış ve inişine izin verecek şekilde modifiye ederek, Şubat 2017'de ilk testini tamamlamıştır (<https://www.cnbc.com/2017/02/25/ups-tests-drone-deliveries-via-high-tech-truck.html>, 2017). Mercedes firması da, Şekil 1.3'de gösterilen, İHA ile entegre bir araç ve bu araca entegre otomatik paket düzenleme sistemi üzerinde çalıştıklarını duyurmuştur (www.daimler.com/innovation/specials/vision-van/en/, 2017).



Şekil 1.2. UPS'in İHA ile entegre modifiye dağıtım aracı (https://www.youtube.com/watch?v=xx9_6OyjJrQ, 2017)

İHA'ların paket dağıtımında kullanımı, teknik ve ekonomik boyutları kadar operasyonel boyutuyla da ele alınması gereken bir konudur. Paket dağıtımında İHA'ların kullanımı, karşılaşılabilecek olan rota eniyilemesi ve atama gibi çeşitli problemlerin çözümü için yeni

algoritmalar geliştirilmesini gerektirecek olup, Banker, Amazon'un halihazırda bu problemler üzerinde çalıştığını belirtmektedir (<http://www.forbes.com>, 2016).



Şekil 1.3. Mercedes'in İHA ile entegre dağıtım aracı prototipi (<https://iclsystems.com/mercedes-benz-vision-van-looks-future-logistics-last-mile-drone-delivery/>, 2017)

1.2. Tez Çalışmasının Amacı

İHA'ların dağıtım hizmetinde kullanılması, teknik, yasal ve sosyal bir takım zorluklara rağmen son yıllarda popülerliği artan ve henüz yeni olması nedeniyle geliştirilmeye ihtiyaç duyulan bir konudur. Kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptıkları yeni dağıtım modeli, her iki aracın zaman ve konum olarak koordinasyonunu gerektirdiğinden rotalama problemini bir hayli zorlaştırmakta ve bu problemin çözümü için yeni algoritmaların geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu tez çalışması, problemin literatürdeki kesin ve sezgisel çözümleri iyileştirecek yeni bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamaktadır.

İHA'nın dağıtım faaliyetlerine dahil edildiği yeni dağıtım modelinde, kamyonun birden fazla İHA ile eşzamanlı dağıtım yapması, olası ve gerçekçi bir senaryodur. Dolayısıyla, bu senaryonun da operasyonel açıdan incelenmesi bir ihtiyaçtır. Bu nedenle, odak

noktamız çoklu İHA senaryosuna kolaylıkla uyarlanabilecek bir çözüm yaklaşımı geliştirmektedir.

1.3. Tez Çalışmasının Önemi ve Literatüre Katkısı

İHA'ların dağıtımda kullanılma fikri, yalnızca akademik çevrelerin ilgisini çekmekle kalmamıştır. UPS ve Mercedes örneğinde olduğu gibi, iş çevrelerinin de bu yeni dağıtım modeline ilgi gösterdikleri anlaşılmaktadır. Kamyon ve İHA'ların eşzamanlı dağıtımını öngören bu yeni problemin gerçekte uygulanabilmesi için, farklı senaryoların incelenerek sağlayacağı katkının ortaya çıkartılmasına, bunun için etkin çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtım probleminin çözümü için 2-aşamalı, yinelemeli bir kesin çözüm yaklaşımı önerilmiş ve aynı varsayımlar için daha önce geliştirilmiş olan yaklaşımdan daha büyük problemleri çözdüğü gösterilmiştir. Bu yöntemin en güçlü tarafı, kolaylıkla çoklu İHA senaryosuna uyarlanabilmesidir.
2. Kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtım probleminin çözümü için, makine öğrenmesi ile fonksiyon kestirime dayanan melez genetik bir algoritma geliştirilmiştir. Aynı varsayımlar için daha önce geliştirilmiş olan tavlama benzetimi yöntemi ile karşılaştırılan sonuçlar, küçük ve orta büyüklükteki problemlerde, geliştirilen yöntemin daha iyi sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Melez genetik algoritmanın diğer çalışmadan bir üstünlüğü, kolaylıkla çoklu İHA senaryosuna uyarlanabilmesidir.
3. 2-aşamalı, yinelemeli kesin çözüm yaklaşımı, kamyon ve birden fazla İHA'nın eşzamanlı dağıtım problemine uyarlanmıştır. Bilindiği kadarıyla bu çalışma, söz konusu problemin dağıtım süresinin enküçüklendiği ilk çalışmadır.
4. Melez genetik algoritma, kamyon ve birden fazla İHA'nın eşzamanlı dağıtım problemine uyarlanmıştır. Kabul edilmiş varsayımları dikkate alan bilinen ilk çalışmadır.

1.4. Tez Çalışmasının Yöntemi

Tez çalışmasında ele alınan, kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptığı problem, her iki aracın koordinasyonunu gerektirdiğinden, oldukça karmaşık bir problemdir. Bu tür karmaşık ve birbirinden bağımsız olmayan kararların bulunduğu problemlerde, problemi küçük parçalara bölerek çözmek sıklıkla başvurulan yöntemlerden biridir. Tez çalışması kapsamında, incelenen problemin 2 aşamaya bölünerek çözülmesine dayanan kesin ve melez çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu çalışma, dört adımda gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar hakkında daha detaylı bilgi aşağıda verilmektedir:

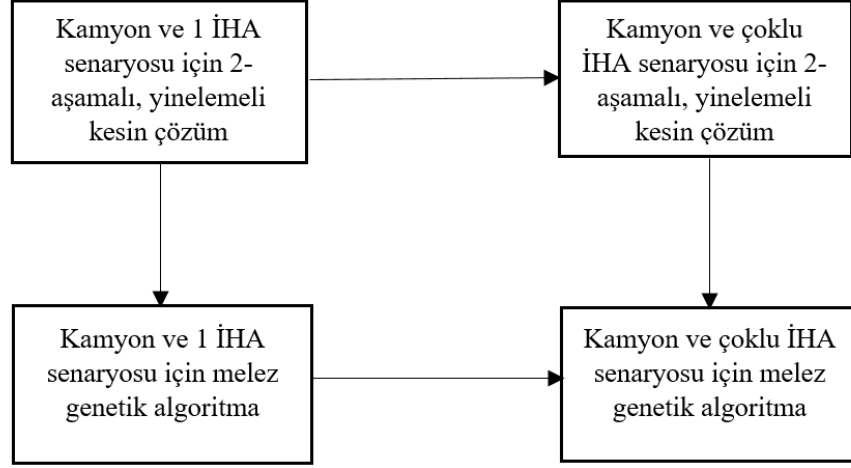
Birinci adımda; kamyonun tek İHA ile eşzamanlı dağıtım yaptığı senaryo için iki farklı kesin çözüm algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, problemin 2 aşamaya bölünerek yinelemeli çözülmesine dayanmaktadır. Geliştirilen yöntem, çalışmanın yapıldığı dönemde mevcut kesin çözümleri iyileştirmiş olmasına rağmen, ancak küçük boyutlu problemleri çözebilmektedir. Orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel yöntemlere başvurulması kaçınılmazdır.

İlk adımda geliştirilen yöntemin artı ve eksileri değerlendirildiğinde, problemin daha küçük iki probleme ayrıştırılmasının olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, ikinci adımda bu yapının korunmasına karar verilmiştir. İlk adımda geliştirilen yöntem; ilk aşamada kamyon rotasına, ikinci aşamada İHA rotasına karar vermektedir. Bu yaklaşımda, olası tüm kamyon rotaları üretilmektedir. İkinci adımda, tüm kamyon rotalarının üretilmesi yerine, iyi sonuç verme potansiyeline sahip olan kamyon rotalarının üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk aşamada kamyon rotaları genetik algoritma ile üretilmektedir. Üretilen rotaların uygunluk değerlerinin belirlenmesi için makine öğrenmesi kullanılarak fonksiyon kestirimi yapılmaktadır. İkinci aşamada ise İHA rotası eniyilenmektedir. Bu melez algoritma, çalışmamızın ikinci adımını oluşturmaktadır.

Üçüncü adımda; birinci adımda geliştirilen kesin çözüm yaklaşımı, formüle edilmiş olan matematiksel modelin yeniden düzenlenmesi ile, kamyonun birden fazla İHA ile eşzamanlı dağıtım yaptığı senaryoya uyarlanmıştır.

Son olarak, dördüncü adımda; üçüncü adımdaki değişikliklerin, ikinci adımda geliştirilen melez çözüm yaklaşımına uygulanması ile; melez genetik algoritma, çoklu İHA senaryosuna uyarlanmıştır.

Bu adımlar Şekil 1.4'te özetlenmektedir.



Şekil 1.4. Tez çalışmasının adımları

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Araç rotalama problemi, literatüre çok uzun zaman önce girmiş olup; araç sayısı, araç çeşitliliği, araçların kapasitesi, müşterilerin hizmet alabileceği zaman aralığı, verilen hizmetin çeşidi, depo sayısı, depoya uğrama zorunluluğu, dağıtım sürelerindeki belirsizlik gibi çeşitli kısıtlar ilave edilerek ortaya çıkan farklı türevleri çalışılmış ve halen de çalışılmaktadır. Son yıllarda, İHA teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, araç filosunun yalnız İHA'lardan (Song ve ark. 2018) veya taşıyıcı araç ve İHA'lardan oluştuğu rotalama problemleri de çalışılmaya başlanmıştır (Garone ve ark. 2011, Mathew ve ark. 2015, Othman ve ark. 2017, Luo ve ark. 2017, Chang ve Lee 2018). Fakat bu problemlerde, bu tez kapsamında çalışılan problemden farklı olarak, taşıyıcı araç dağıtım yapmayıp hava aracı için seyyar bir depo görevi görmekte, dağıtım hizmeti sadece hava araçları ile karşılanmaktadır. Dolayısıyla, hava aracının hizmet sunacağı noktalar belirlidir.

Literatürde “Traveling Salesman Problem with Drone (TSP-D)” olarak geçen, bu çalışmada İHA Destekli Araç Rotalama Problemi (ARP-İHA) olarak isimlendirilen problemde ise İHA'nın gidebileceği müşterilere her iki araç da hizmet götürebilecek olup, bu müşterilerin taleplerinin hangi araç tarafından karşılanacağı problem çözümünde belirlenmektedir. Bu problemde; dağıtım, kamyon ve İHA tarafından eşzamanlı gerçekleştirilmekte, dolayısıyla araçlar arasında koordinasyonun sağlanması gerekmektedir. Bu bölümde, kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtımına odaklanmış çalışmalara yer verilecektir. ARP-İHA'nın, temel olarak tek kamyon ve tek İHA veya çoklu kamyon ve çoklu İHA senaryoları ile çalışıldığı görülmektedir. Bu nedenle, bu iki farklı senaryoyu inceleyen çalışmalar, iki alt bölüm halinde verilecektir. Alt bölümlerin daha anlaşılır olması amacıyla, incelenen çalışmaların karakteristiklerinin, benzerlik ve farklılıkların bir özeti Çizelge 2.1'de verilmektedir. Çizelgedeki “Paralel Tur” sütunu, kamyon ve İHA'nın paralel seyahatine izin verilip verilmediğini göstermektedir. Paralel tura izin verilmemesi durumunda, kamyon İHA'yı, uçuşun başladığı düğümde beklemektedir.

Çizelge 2.1. İHA destekli araç rotalama probleminin özet literatür karşılaştırması

Çalışma	Kamyon #	İHA #	Kalkış=İniş	Paralel Tur	Amaç	Batarya	Kesin Çözüm	Sezgisel Çözüm
Ha ve ark. (2015)	1	1		X	Süre	Değişim		rotala-kümele/ kümele-rotala
Murray ve Chu (2015)	1	1		X	Süre	Değişim	MIP	rotala-kümele
	1	n	X	X	Süre	Değişim		GSP/ PÖMÇP tabanlı sezgisel
Ferrandez ve ark. (2016)	1	n	X		Süre	Değişim		Genetik Algoritma ve k-ortalama
Ponza (2016)	1	1		X	Süre	Değişim		Tavlama Benzetimi
Wang ve ark. (2016)	m	n		X	Süre	Değişim		En kötü senaryo analizi
Daknama ve ark. (2017)	m	n		X	Süre	Şarj		İç içe geçmiş yerel arama
Marinelli ve ark. (2017)	1	1		X	Süre	Değişim		GRASP
Poikonen ve ark. (2017)	m	n		X	Süre/Maliyet	Değişim		En kötü senaryo analizi
Pugliese ve Guerriero (2017)	m	n		X	Maliyet	Değişim	MIP	
Agatz ve ark. (2018)	1	1	X	X	Süre	Değişim	MIP	Dinamik prog./ Yerel Arama
Ha ve ark. (2018)	1	1		X	Maliyet	Değişim	MIP	GRASP/ Yerel Arama
Bu çalışma	1	1/n		X	Süre	Değişim	2-aşamalı yinelemeli alg.	Makine Öğrenmesi ile fonk kest. dayanan Melez Genetik Algoritma

2.1. İHA Destekli Araç Rotalama Problemi

Literatüre ARP-İHA'yı kazandıran ilk çalışma Murray ve Chu'ya (2015) aittir. Yaptıkları çalışmada İHA'larla kamyonları entegre eden iki farklı problem tanımlamışlardır. Bu problemlerin ilkinde, depo müşterilerden uzak bir lokasyonda olup araç filosu tek bir kamyon ve İHA'dan oluşmaktadır. Araçlar ayrı veya birlikte depodan bir kere çıkabilir ve yine bir kere depoya dönebilir. İHA kamyonundan ayrı, depoya bir kere dönerse servis dışı kalır ve paket dağıtımı için depodan ikinci kez ayrılamaz. İHA, ziyaret ettiği her müşteri sonrasında kamyon ile buluşmalıdır. Buluşma noktasına kamyonundan daha erken ulaşması durumunda ise İHA'nın havada kaldığı kabul edilmekte, dolayısıyla İHA'nın batarya ömrü sona ermeden kamyonun da aynı noktaya ulaşma zorunluluğu doğmaktadır. Bu buluşma, İHA'nın kamyonundan ayrıldığı düğümden ve ziyaret ettiği müşteriden farklı bir düğümden gerçekleşmek zorundadır. Ayrıca kamyon, ziyaret ettiği müşteriye İHA'yı almak üzere ikinci kez uğrayamaz. Çalıştıkları ikinci problemde ise depo müşteri düğümlerine göre merkezi bir lokasyonda olup, kamyon müşterilere paket dağıtımı yaparken, bir veya birden fazla aynı özellikteki İHA da direkt depodan çıkıp müşteri

ziyaretinden sonra tekrar depoya dönmek üzere paralel turlar gerçekleştirir. İlk problemin aksine ikinci problemde kamyon ve İHA arasında herhangi bir senkronizasyon söz konusu değildir. Her iki tip problem için de matematiksel model geliştirildikten sonra yine iki problem için iki farklı sezgisel önerilmiştir. İlk problem için önerdikleri “rotala ve tekrar ata” sezgiselinde öncelikle tüm müşterileri kamyonu atayıp Gezgin Satıcı Problemi’ni (GSP) çözerek bir rota elde edilmektedir. Daha sonra, “İHA’ya atanabilecek müşterilerin kamyon rotası içinde pozisyonu değişse veya İHA’ya atansa kalkış ve varış düğümlerine göre rotanın tamamlanma süresindeki kazanım ne olur?” sorularına cevap aranarak toplam dağıtım süresi iyileştirilmektedir. İkinci problem tipi için geliştirilen sezgiselde ise öncelikle İHA’ların ziyaret edebileceği müşteriler İHA’lara, diğerleri kamyonu atanarak GSP çözümü ile kamyon rotası, Paralel Özdeş Makine Çizelgeleme Problemi (PÖMÇP) çözümü ile de İHA’ların rotası belirlenmektedir. Daha sonra İHA’ların tamamlanma süresi kamyonunkinden büyük ise İHA müşterilerinden kamyon rotasına atanabilecek aday müşterilerin sağlayacağı iyileştirmeler değerlendirilerek en büyüğü seçilir. Eğer tamamlanma süresinde iyileşme sağlanamıyorsa veya kamyonun rotasının tamamlanma süresi İHA’nın rotasının tamamlanma süresinden büyükse, o zaman kamyon ve İHA rotası arasında müşteri değiş tokuşu gerçekleştirilir. Burada amaç, kamyon ve İHA’nın dağıtımını tamamlama sürelerinin dengelenmesini sağlamaktır. Yaptıkları sayısal çalışmalar, ters orantılı olan İHA hızı ve batarya ömründen İHA hızının, dağıtım süresi performansı açısından daha etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca dağıtım ağına, tanımlanan problemlerden hangisinin uygulanacağını tespitinin bazı durumlar dışında zor olduğu ve problem tipinin sonuçları etkilediği gösterilmiştir.

Ha ve ark. (2015), ARP-İHA’nın çözümü için önce kümele- sonra rotala ve önce rotala- sonra kümele sezgisellerine dayanan iki farklı çözüm yaklaşımı önermiştir. Her iki sezgiselin kümeleme aşamasında, İHA rotasının enbüyüklenmesi amacıyla geliştirdikleri matematiksel model çözülmektedir. İlk sezgiselde, İHA rotasını enbüyükleyen İHA atamaları yapıldıktan sonra, kalan düğümler ve İHA turlarının başlangıç ve bitiş düğümleri düzenlenerek, GSP çözümü ile kamyon rotası belirlenmiştir. Alternatif olarak geliştirilen önce rotala- sonra kümele sezgiselinde ise çözüm, tüm müşterilerin kamyon tarafından ziyaret edildiği GSP çözümüne dayandırılmıştır. Yapılan sayısal çalışma, iki yöntemden önce kümele- sonra rotala yaklaşımının daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

Yüksek lisans tez çalışmasında ARP-İHA üzerine çalışan Ponza (2016), Murray ve Chu'nun (2015) geliştirdikleri matematiksel modelin zaman yönetimini daha gerçekçi hale getirecek ufak değişiklikler önermiştir. Çözüm yöntemi olarak kullanılabilir tavlama benzetimi, karınca kolonisi meta sezgiselleri ile basit bir sezgisel incelendikten sonra probleme tavlama benzetimi meta sezgiseli uygulanmış ve bu yöntem ile İHA destekli dağıtım probleminde önemli ölçüde tasarruf sağlayacak çözümler üretildiği gösterilmiştir.

Paket dağıtımında kamyon ve İHA'ların birlikte kullanımının analiz edildiği bir başka çalışma Ferrandez ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Tek bir kamyonun bir veya birden fazla dron ile entegre dağıtım yaptığı bu çalışmada, İHA'ların batarya ömrü göz ardı edilmektedir. Modelde kamyon, müşteriye paket teslimi veya İHA'nın kamyonun ayrılması olmak üzere iki nedenle durabilmektedir. Geliştirilen melez algoritmada, Newton yöntemi ile kamyonun İHA'ları müşterilere göndereceği lokasyon sayısı optimize edilirken, bu lokasyonların koordinatları K-ortalama yöntemi ile belirlenmektedir. Belirlenen lokasyonlar içinde kendilerine en yakın olan merkeze atanan müşteriler, o merkeze giden kamyonun hareket eden İHA'lar tarafından ziyaret edilmektedir. Kamyonun bu merkezleri ziyaret edeceği rota ise genetik algoritma ile belirlenmektedir. Daha sonra bu melez algoritmanın girdi ve çıktısını oluşturan veri kullanılarak, tahmini merkez sayısı ve tahmini toplam dağıtım süresi için; dağıtım alanı, kamyon hızı, İHA hızı, İHA sayısı ve müşteri sayısı bilgisine dayanan formüller oluşturulmuştur. Yapılan sayısal çalışma sonucunda toplam dağıtım süresinin kamyon ve İHA'ların birlikte kullanımı ile, enerji tüketiminin ise paket dağıtımının yalnız İHA'larla yapılması durumunda en küçük olduğu belirtilmiştir.

Agatz ve ark. (2018), tek kamyon ve tek İHA'nın tüm araç filosunu oluşturduğu rotalama problemi için, kamyon ve İHA'nın depodan başlayarak birbirlerinden ayrıldıkları ve tekrar birleştikleri müşteri düğümleri aralarındaki alt turların seçimine dayanan bir formülasyon geliştirmiştir. Murray ve Chu'nun (2015) incelediği problemden farklı olarak, bu çalışmada kamyon, İHA'nın ayrılmasından sonra İHA ile farklı müşteri düğümünde buluşmak zorunda olmayıp aynı müşteride İHA'nın geri dönüşünü bekleyebilmektedir. Geliştirdikleri yapı üzerinde yaptıkları teorik analiz ile ARP-İHA

için bir alt sınır geliştirmiş ve bu problemin eniyi çözümünün, kamyonun daha önce ziyaret ettiği bir müşteriyi, İHA'yı almak üzere ikinci kez ziyaret etmesini gerektirebileceğini göstermişlerdir. Problemin çözümü için tüm müşterilerin kamyonu atandığı “önce rotala- sonra kümele” mantığına dayalı iki farklı sezgisel önerilmiştir. Başlangıç rotası olarak, gezgin satıcı veya en küçük kapsayan ağaç problemlerinin çözümünü kullanan sezgisellerin ilki; bu çözümde her bir düğümün kamyon, İHA veya ortak düğüm olarak etiketlendiği açgözlü bir algoritmaya dayanmaktadır. Geliştirilen diğer sezgisel ise başlangıç çözümdeki sırayı takip ederek dinamik programlama yaklaşımı ile düğümleri kamyon veya İHA'lara atamaktadır. Ürettikleri test verisi üzerinde, geliştirilen sezgisellerin performansları ve matematiksel modelin çözümü değerlendirilerek, dinamik programlamaya dayalı olanın çok daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Ha ve ark. (2018) ise ARP-İHA'yı, dağıtım süresi yerine dağıtım maliyeti açısından incelemiştir. Murray ve Chu'nun (2105) matematiksel modelini kendi problemine göre tekrar düzenleyen Ha ve ark. (2018), bu problemin çözümü için iki farklı sezgisel algoritma geliştirmiştir. İlk olarak, geliştirdikleri Açgözlü Rassallaştırılmış Uyarlamalı Arama Yordamı (GRASP) sezgiselinde, en yakın komşuluk ilişkisi kullanılarak oluşturulan tüm müşteri düğümlerini kapsayan kamyon rotaları, bölünme algoritması ile kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptığı yeni rotalara dönüştürülmüştür. Ortaya çıkan yeni rotaların yerel arama operatörleri ile iyileştirilmesinden sonra dağıtım maliyetini en küçükleyen rota seçilmiştir. Geliştirdikleri diğer sezgiselde ise yine tüm müşterilerin kamyonu atanması ve GSP çözümü ile elde edilen kamyon rotası, müşterilerin rota içindeki pozisyonları çeşitli operatörler yardımıyla değiştirilerek iyileştirilmiştir. Yapılan sayısal çalışma sonrasında ise 10 müşteriden oluşan küçük bir veri setinde, geliştirilen ilk sezgiselin, matematiksel modelin çözüm süresine göre çok daha kısa sürede eniyi sonucu verdiği gösterilmiştir. Ayrıca iki sezgisel karşılaştırıldığında GRASP'ın diğerinden daha hızlı çalıştığı ve daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Yukarıdaki çalışmaların tamamında, kamyon ve İHA'nın ancak müşteri düğümlerinde ayrılabilirdikleri ve buluşabildikleri varsayımı yapılmaktadır. Marinelli ve ark. (2017),

İHA kullanımını artıracığı düşüncesi ile bu varsayımı kaldırarak, ayrılma ve buluşmanın yalnız müşteri düğümlerinde değil, düğümler arasındaki ayrıtlarda da gerçekleşebileceği varsayımını incelemiştir. Bu sayede, İHA'nın seyahat süresinin kısılacağı, kullanılmadan kalan İHA bataryasının artacağı dolayısıyla da batarya ömrünün kullanımında bir artışa neden olacağı ve bu sayede İHA kullanımının artacağı düşünülmektedir. Bu problemin çözümü için Ha ve ark. (2018) tarafından geliştirilen açgözlü algoritmaya dayanan bir sezgisel önerilmiştir. Bu sezgisel, GSP çözümü ile başlamaktadır. Tüm müşterilerin kamyonu atandığı bir kamyon rotası elde edildikten sonra Agatz ve ark.'ın (2018) yaptığı gibi, her olası i ve k düğümleri arasındaki olurlu operasyonlar üretilmektedir. Artan operasyon sürelerine göre sıralanan operasyonlar dikkate alınarak İHA tur atamaları açgözlü şekilde yapılmaktadır. Bu aşamaya kadar kamyon ve İHA, müşteri düğümlerinde ayrılıp buluşmaktadır. İyileştirme ise, ayrılma ve buluşmanın ayrıtlarda gerçekleştiği yeni operasyonların üretilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu yeni operasyonlardaki ayrılma ve buluşma konumları, İHA düğümü j 'nin etrafındaki R yarıçapına sahip en iyi İHA kapsama alanı ile kısmi kamyon rotasındaki ayrıtlar arasındaki kesişmeler dikkate alınarak elde edilmektedir. Yapılan sayısal çalışma, yeni varsayımın, kamyon ve İHA'nın eşit hızlara sahip olduğu senaryoda daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

2.2. Çoklu İHA Destekli Araç Rotalama Problemi

Wang ve ark. (2016), dağıtım ağındaki müşteri paketlerinin m kamyon tarafından dağıtıldığı problemi incelemiştir. Her kamyonun k adet İHA kapasitesi ve C adet paket kapasitesi olduğu kabul edilmektedir. Müşteri düğümünde kamyonun ayrılan İHA, yalnızca bir müşteri ziyaret ettikten sonra yine aynı kamyonla depo veya müşteri düğümünde buluşmak zorundadır. Bu problemin en kötü durum analizi yapılarak teorik sınırlar elde edilmek ve bu sayede İHA'ların paket dağıtımında kullanımının yararları tespit edilmek istenmiştir. Çalışma sonunda farklı hızlara sahip, farklı sayılarda kamyon ve İHA'lardan oluşan senaryolar incelenerek, kamyon ve İHA'ların birlikte kullanımı ile yalnızca kamyonların kullanıldığı dağıtım modeline göre dağıtım süresinde elde edilebilecek iyileştirmeler belirlenmiştir.

Poikonen ve ark. (2017), Wang ve ark.'ın (2016) teorik çalışmasını çeşitli senaryoları kapsayacak şekilde genişletmiştir. Wang ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada İHA'nın sınırlı batarya ömrünü ihmal etmiş, kamyon ve İHA mesafeleri için aynı hesaplama ölçütünü kullanmıştır. Poikonen ve ark. (2017) ise bu senaryoları da değerlendirdikleri yeni teorik sınırlar geliştirmiştir. Ayrıca, dağıtım süresinin yanı sıra, kamyon ve İHA'ların değişken maliyetlerinin de enküçüklendiği yeni bir teorem önerilmiştir.

Daknama ve Kraus (2017), m kamyon ve her kamyonun taşıyabildiği n İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptığı ve ortalama paket teslim süresinin enküçüklendiği çoklu ARP-İHA problemini çalışmıştır. Daknama ve Kraus (2017), diğer çalışmalardan farklı bir batarya politikası benimsemiştir. Bu bölümde incelenen çalışmaların tamamında, her uçuş sonrasında kamyonun dönen İHA'nın bataryasının yeni/dolu bir batarya ile değiştirildiği kabul edilmiştir. Bu çalışmada ise, bataryanın kamyon üzerinde seyahat edilen bir ayırıt boyunca şarj edildiği kabul edilmektedir. Daknama ve Kraus (2017), bu problemin çözümü için yerel arama algoritmasına dayanan iç içe geçmiş sezgisel bir yöntem önermiştir. Öncelikle tüm müşterilerin kamyonun atandığı kamyon rotaları belirlenmiş, sonrasında bu kamyon rotalarından yerel arama yardımıyla İHA turları oluşturulmuştur. Kamyon rotaları ve İHA turlarının belirlenmesinin ardından daha geniş bir yerel arama ile çözüm iyileştirilmiştir.

Çoklu İHA Destekli Araç Rotalama Problemi (ARP-mİHA) için, dağıtım maliyetlerini enküçüklemeyi amaçlayan, bilinen ilk matematiksel model Pugliese ve Guerriero (2017) tarafından önerilmiştir. Pugliese ve Guerriero (2017), her kamyonun birden fazla İHA taşımaya izin verilen durumda, kamyonlar ve İHA'ların eşzamanlı dağıtımını incelemiştir. Çalışmada, İHA'ların, uçuş sonrasında yalnızca kendi kamyonlarına geri dönebildikleri kabul edilmektedir. Batarya ömrü, mesafe olarak dikkate alınmakta ve İHA'ların ziyaret ettiği müşteride tanımlı en büyük süre kadar beklemesine izin verilmektedir. Ayrıca, kamyonların da, ziyaret ettikleri müşteride İHA'ları belirli bir süre beklemelerine izin verilmektedir. Müşteriler için zaman penceresi tanımlı olup, her müşteri kendi zaman kısıtları içinde ziyaret edilmelidir. Bu problem için geliştirilen karışık tamsayı doğrusal programlama (MIP) formülasyonu örnek problemler için çözümlenerek, dağıtımda İHA kullanımının ekonomik etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışmada,

sırasıyla 5 ve 10 müşterinin dağıtımı, her birinin yalnız bir İHA taşıdığı iki kamyon tarafından gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, dağıtımda İHA kullanımının, hizmet kalitesinde sağlayacağı düşünülen avantajın aksine, ekonomik açıdan uygun olmadığına vurgu yapılmıştır.



3. İHA DESTEKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Bu bölümde, ARP-İHA ve bu problemin çözümü için tez kapsamında önerilen yaklaşımlar ele alınmaktadır. İlk olarak, ARP-İHA'nın ayrıntılı anlatımına yer verilmektedir. Ardından, problemin kesin çözümü için geliştirilmiş olan 2-aşamalı, yinelemeli çözüm algoritması anlatılmaktadır. Kesin çözüm için geliştirilen algoritmaya ait iki farklı versiyon önerilmektedir. Son olarak, kesin çözüm algoritması, ancak küçük boyutlu problemlerin çözümünde makul sürelerde sonuca ulaşabildiği için, daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için makine öğrenmesi ile fonksiyon kestirimine dayanan melez bir genetik algoritma önerilmektedir.

3.1. Problem Tanımı

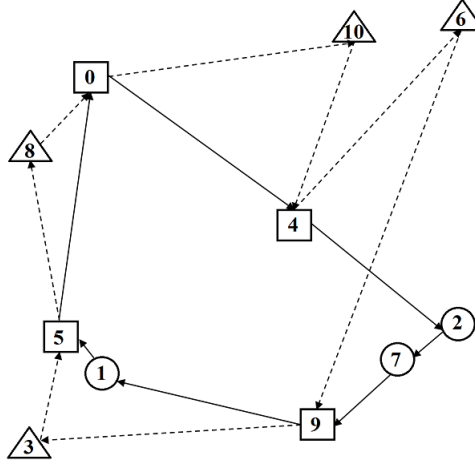
Lojistikte paket dağıtımı, geleneksel olarak dağıtım kamyonları ile gerçekleştirilmektedir. Ancak, dağıtım kamyonları görece yavaş hareket etmekte (Agatz ve ark. 2018) ve arazi koşullarından kolay etkilenmektedir. İHA'lar, paket dağıtımında kullanılan kamyonlarla kıyaslandığında, birtakım avantajları olduğu görülmektedir. Daha hızlı olması, operatör gerektirmemesi, uçuşu nedeniyle kamyonun maruz kaldığı trafik tıkanıklığı sorununu yaşamaması ve taşıma maliyetlerinin daha düşük olması bu avantajlar arasında sayılmaktadır (Ha ve ark. 2018). Verimlilik, hız ve maliyet unsurları dikkate alındığında, paket dağıtımında İHA'nın avantajlarından yararlanılmak istenmektedir. Ancak teknik engeller, İHA'nın her gönderide tek bir paket taşımaması, dolayısıyla her müşteriden sonra depoya geri dönmesini zorunlu kılmaktadır. Bu zorunluluk ise İHA'ların maliyet ve süre avantajından yararlanmayı güçleştirmektedir. Diğer taraftan bu engeller, dağıtımında kamyon kullanımının avantajları olarak kabul edilmektedir. Zira kamyonun, çeşitli büyüklük ve ağırlıktaki paketleri uzak mesafeli müşterilere taşımada zorlu arazi koşulları dışında herhangi bir engel bulunmamaktadır. İHA ve kamyonun birbirini tamamlayacak bu teknik özelliklere sahip olması, her ikisinin birlikte kullanımını öneren yeni bir dağıtım modelinin doğmasına neden olmuştur.

Geniş bir literatüre sahip olan araç rotalama probleminin yeni bir açılımı olarak kabul edilebilecek ve Murray ve Chu (2015) tarafından tanıtılan bu yeni dağıtım modelinde araç

filosu, kamyon ve İHA olmak üzere iki farklı araç tipinden oluşmaktadır. İHA, kamyonla birlikte (İHA'nın kamyon üzerinde taşınması şeklinde) veya kamyonun ayrı hareket edebilmektedir. İHA, kamyonun sadece müşteri lokasyonunda yeni bir uçuş için ayrılabilen, kamyonun ayrıldıktan sonra pil ömrü nedeniyle tek bir müşteri ziyaret ederek bu müşteriden farklı bir müşteri lokasyonunda kamyonla tekrar buluşmak zorundadır. İHA'dan ayrılan kamyon ise bu arada bir veya birden fazla müşteriyi ziyaret ederek İHA ile buluşacağı müşteri lokasyonuna gitmektedir. İHA, kamyonun sadece mevcut müşteri noktalarında ayrılıp yine müşteri noktalarında kamyonla buluşabilmekte, müşteri dışında herhangi bir lokasyonda ayrılma veya buluşmaya izin verilmemektedir. Kamyon üzerinde, İHA'nın her ayrılışında, İHA'ya müşterinin paketi yerleştirilmekte ve her dönüşünde bataryası değiştirilmektedir. Bu bakımdan kamyon, İHA için seyyar bir depo gibi düşünülebilir. Müşterilerin bir kısmının paketleri İHA'nın havalanması ve alçılması sırasında yaşanabilecek ve arazi şartlarından kaynaklanabilecek nedenlerden dolayı veya paketin ağırlık ve boyutunun İHA'nın taşıyabileceğinden fazla olması nedeniyle İHA tarafından teslim edilemeyecek olup sadece kamyon tarafından teslim edilmeyi gerektirebilir. Burada amaç dağıtımın tamamlanma süresini kısaltmaktır. Dağıtımın, en son aracın depoya dönmesi ile tamamlandığı kabul edilmektedir.

Şekil 3.1'de, ARP-İHA'ya ait örnek bir çözüm verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, üç farklı düğüm ve 2 farklı ayrıt bulunmaktadır. Düğümler, kendilerini ziyaret eden araç; ayrıtlar ise düğümler arasındaki seyahati gerçekleştiren araçları ayırtmak için farklı şekillerde tanımlanmışlardır. Buna göre; üçgen ile gösterilen düğüm yalnız İHA tarafından ziyaret edilmekte, daire ile gösterilen düğüm yalnız kamyon tarafından ziyaret edilmekte, kare ile gösterilen düğüm ise üzerinde İHA ile seyahat eden kamyon tarafından ziyaret edilmektedir. Düz ayrıtlar, kamyon rotasını; kesikli ayrıtlar ise İHA uçuşunu göstermektedir. Örnekte araçlar depodan ayrı ayrı çıkmaktadır. Depodan havalanan İHA, Düğüm 10'un teslimatını gerçekleştirdikten sonra kamyonla buluşmak üzere Düğüm 4'e gitmektedir. Kamyon ise depodan ayrıldıktan sonra doğrudan Düğüm 4'e giderek İHA ile buluşmaktadır. Ayrılma ve buluşma düğümlerindeki teslimatlar kamyon tarafından gerçekleştirilmektedir. 6 no'lu müşterinin paketini alan İHA, Düğüm 4'ten çıktıktan sonra Düğüm 6'ya ziyaret edip Düğüm 9'a gitmektedir. Düğüm 4'ten Düğüm 9'a doğru seyahat eden kamyon bu arada Düğüm 2 ve 7'yi de ziyaret etmektedir. Düğüm 9'da buluşan

araçlar, İHA'nın bataryasının yenilemesinin ve 3 no'lu müşterinin paketini yüklemesinin ardından Düğüm 5'te buluşmak üzere tekrar ayrılırlar. Kamyon, Düğüm 9'un ardından Düğüm 1'i de ziyaret ederek Düğüm 5'e ulaşmaktadır. Kamyon, Düğüm 5'te İHA ile buluştuktan sonra depoya dönerken; İHA ise Düğüm 8'i ziyaretinden sonra depoya dönmektedir.



Şekil 3.1. ARP-İHA çözümü için bir örnek

Murray ve Chu (2015), bu çalışma kapsamında da benimsenen aşağıdaki varsayımlarda bulunmaktadır:

- İHA, herhangi bir tur esnasında, kamyonu beklemek amacıyla bile olsa, şarj tüketimini azaltmak için park edemez, havada kalmalıdır. Bu varsayım, İHA'nın dışardan gelebilecek müdahaleleri önlemek için güvenlik amacıyla düşünülmüştür. Ayrıca söz konusu varsayım, batarya ömrünün yalnız İHA turunu değil, kamyonun ayrılma ve buluşma noktaları arasındaki seyahatini de kısıtlamasına neden olmaktadır.
- İHA, her uçuşta yalnız bir müşteri ziyareti gerçekleştirebilir.
- Kamyon ve İHA, İHA turunun başladığı düğümde buluşamazlar. Ayrılma ve buluşma noktaları birbirinden farklı olmalıdır.

- Araçların ayrılma ve buluşmaları, yalnız müşteri düğümlerinde gerçekleşebilir. Müşteri düğümü olarak tanımlanmayan başka hiçbir noktada (depo hariç) ayrılma ve buluşma söz konusu olamaz.
- Hiçbir müşteri aynı araç tarafından ikinci bir kez ziyaret edilemez. Kamyon, daha önce ziyaret ettiği bir müşteriye, İHA ile buluşmak üzere tekrar gidemez.
- Bir İHA turunun depoda bitmesi durumunda, araç servis dışı bırakılır, İHA depodan tekrar havalanamaz. ARP-İHA, İHA'nın her turda depoya dönüşünün pratik olmadığı durumlardan esinlenerek ortaya çıkmıştır. Bu varsayım, problemin yapısına sadık kalmak amacıyla kabul edilmiştir.

3.2. 2-Aşamalı Yinelemeli Kesin Çözüm Algoritması

ARP-İHA'da, belirlenmesi gereken üç farklı karar bulunmaktadır:

- Hangi müşteriye, hangi tip araç hizmet verecek?
- Kamyon, kendisine atanan müşterileri hangi sıra ile ziyaret edecek?
- İHA ve kamyon, hangi müşteri düğümlerinde ayrılıp buluşacak; İHA her bir turda hangi müşteriye hizmet verecek? Diğer bir deyişle, İHA turları ne olacak?

Bu kararların birbirinden bağımsız olmadıkları ve her iki aracın eşzamanlı şekilde çalışması gerektiği açıkça görülmektedir. Drexl (2012), farklı araçların eşzamanlamasını gerektiren benzer problemlerde ortaya çıkan eşzamanlama kısıtlarıyla ilgili bir sınıflandırma yapmıştır. Bu sınıflandırmaya göre, ARP-İHA üç farklı eşzamanlama kısıtını içermektedir. Bunlardan ilki “görev eşzamanlaması”dır. Her bir müşterinin tek bir araç tarafından, tek bir kez ziyaret edilmesi gerekliliği bu kısıt ihtiyacının doğmasına neden olmaktadır. İHA'ya birden fazla müşteri atanması, İHA'nın kendisine atanan müşteri sayısı kadar uçuş/tur gerçekleştirme anlamına gelmektedir. Zira, İHA her bir turda yalnız bir müşterinin paketini taşıyabilmekte ve her turun sonunda bataryası yenilenmektedir. Dolayısıyla her iki araç; gereken zamanda, gereken müşteri noktasında buluşmak zorundadır. Bu durum, her iki aracın zaman ve konum açısından koordinasyonunu zorunlu hale getirmektedir. Drexl (2012), bu koordinasyon ihtiyacını “operasyon eşzamanlaması” olarak tanımlamaktadır. Bu çalışmada, verilen

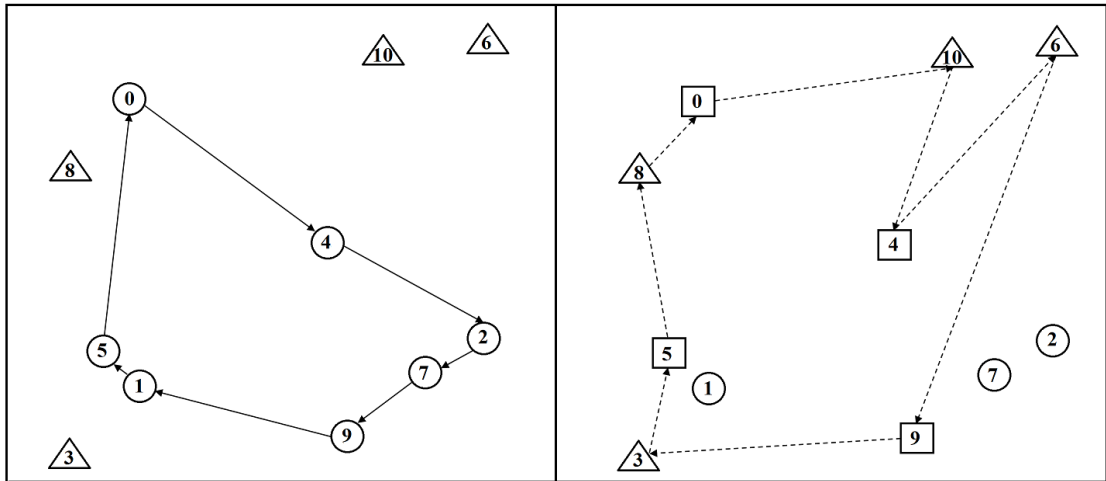
sınıflandırmaya uyan son bir kısıt ihtiyacı daha söz konusudur; “hareket eşzamanlaması”. Dağıtım boyunca araçlar üç farklı şekilde hareket edebilmektedir: Kamyon ve İHA birlikte, İHA yalnız ve kamyon yalnız hareket etme imkanına sahiptir. İHA’nın yalnız gerçekleştirdiği her turun başlangıç ve bitiş noktaları arasında kamyon da yalnız hareket etmek durumundadır. Fakat İHA’nın kamyonun ayrı tur gerçekleştirmesinin toplam dağıtım süresi açısından karlı olmadığı durumlarda, İHA, kamyonun üzerinde taşınmaktadır. Bu durum, “hareket eşzamanlaması” olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yukarıda bahsi geçen kararların birbirinden bağımsız olmaması, yani kararların herhangi birinde meydana gelecek bir değişikliğin diğer kararlarda da değişikliğe neden olacak olması, bu kararları farklı aşamalarda belirlemeyi mümkün hale getirmektedir. Zira problemin iki farklı aşamaya ayrıştırılarak, ilk aşamada üst seviye kararların, ikinci aşamada alt seviye kararların verilmesi ile bir hayli karmaşık ve zor olan problemin çözümü, daha az karmaşık ve daha küçük iki problemin çözümü ile elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, ARP-İHA’nın çözümü için 2-aşamalı, yinelemeli bir çözüm yaklaşımı önerilmektedir. İlk aşamada kamyon rotası belirlenmektedir. Kamyon rotasının dışında kalan düğümler, İHA tarafından ziyaret edilmek zorunda olduklarından bu karar aynı zamanda, hangi araçların, hangi müşterileri ziyaret edeceğini de belirlemektedir. İkinci aşamada ise; ilk aşamada belirlenen kamyon rotası ve İHA tarafından ziyaret edilecek müşteri bilgisi kullanılarak araçların ayrılma ve buluşma düğümlerine, yani İHA’nın gerçekleştireceği turların detaylarına karar verilmekte olup bu aşamada, MIP modeli çözülmektedir.

ARP-İHA’nın, 2-aşamalı çözümü, 10 müşterili bir örnek için Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Şekilde aynı dağıtım ağı üzerinde iki farklı rota görülmektedir. Sol taraftaki şekil, birinci aşamanın çözümünü göstermektedir. Yukarıda da açıklandığı gibi, ilk aşamada kamyon rotasına karar verilmektedir. Kamyon rotasının belirlenmesi, aynı zamanda İHA düğümlerini de belirlemektedir. Örnekte, 4, 2, 7, 9, 1 ve 5 no’lu düğümler sırasıyla kamyon tarafından ziyaret edilmektedir. Kamyon rotasına atanmamış olan 3, 6, 8 ve 10 no’lu düğümler ise İHA tarafından ziyaret edilecek demektir. Her bir müşterinin atandığı aracı göstermek amacıyla, Şekil 3.1’de olduğu gibi, müşteri düğümleri farklı

şekillerde gösterilmektedir. İHA'ya atanan müşteri düğümleri üçgen ile, kamyonu atanmış müşteriler ise daire ile gösterilmektedir. Şekilde aynı zamanda kamyonun rotasını gösteren düz ayrıtlar da yer almaktadır. İlk aşamanın çözümü elde edildikten sonra Bölüm 3.2.2'de yer verilecek olan matematiksel modelin çözümü ile belirlenen ikinci aşamaya ait çözüm Şekil 3.2'nin sağ tarafında gösterilmektedir. Şekilde kesikli ayrıtlar, İHA'nın kamyonun ayrı gerçekleştirileceği turları göstermektedir. Daire içinde gösterilen 1, 2 ve 7 numaralı düğümler ise kamyonun İHA'dan ayrı, yalnız ziyaret edeceği müşteri düğümlerinden oluşmaktadır. İHA'ya ait her bir turun üç düğümden oluştuğu düşünüldüğünde, İHA turlarının sırasıyla 0-10-4, 4-6-9, 9-3-5 ve 5-8-0 olduğu kolaylıkla görülmektedir. İkinci aşama çözümünde, İHA turlarının belirlenmesiyle birlikte 0, 4, 9 ve 5 no'lu düğümler kare içinde gösterilmektedir. Bu durum, söz konusu düğümlere, ayrılma ve buluşma amacıyla her iki aracın da uğradığını göstermektedir. Her iki aşamadaki çözümden oluşan kamyon ve İHA'nın eşzamanlı rotaları ise Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2. ARP-İHA'nın 2-aşamalı çözümü için bir örnek

ARP-İHA için bu tez kapsamında önerilen çözüm yaklaşımı, kamyon ve İHA'nın rotalama kararlarının farklı aşamalara ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Bu problemde dağıtımın, son aracın depoya gelişi ile tamamlandığı kabul edilmektedir. Problemin amacı, dağıtımın tamamlanma süresinin enküçüklenmesi olduğundan, algoritmaya en küçük kamyon rotası ile başlanarak, buluşma düğümlerinde kamyonun İHA'yı bekleme sürelerini enküçükleyecek İHA turlarının atamasının yapılması ve yinelemeli olarak üst

sınırın iyileştirilerek en iyi çözüme ulaşılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla 2 farklı algoritma geliştirilmiştir.

3.2.1. Algoritma 1

İlk aşamada kamyon rotasının belirlenmesi halinde, bu rotanın dışında kalan müşterilerin İHA tarafından ziyaret edilmesini gerektirdiğinden, bu aşamada aynı zamanda atama kararları da belirlenmiş olacaktır. Kamyon rotasının belirlenmesi için, tamsayı programlama modeli çözülmesi yerine, olası bütün kamyon rotalarının türetilmesi tercih edilmiştir. Bu nedenle, atanabilecek en büyük sayıdaki İHA düğümü için tüm kombinasyonlar hesaplanarak, her İHA düğümü kombinasyonunun bunun dışında kalan düğümlerin, kamyonu atanmış müşteri sayısına sahip permütasyonları üretilmektedir. Burada dikkat çekilmesi gereken bir konu, İHA'ya atanabilecek en büyük müşteri sayısının ne olacağıdır. İHA'ya mümkün olduğu kadar fazla müşteri atayabilmek için kamyonun ayrılma ve buluşma noktaları arasında müşteri ziyareti yapmaması gerekir. Tezin geri kalanında, İHA'ya yapılabilecek en büyük atama sayısı D_{max} ile gösterilecek olup Denklem 3.1'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$D_{max} = \text{aşağı_yuvarla}((\text{Müşteri Sayısı} + 1) * \text{İHA Sayısı} / (1 + \text{İHA Sayısı})) \quad (3.1)$$

Bu hesaplamanın ayrıntıları EK-1'de verilmektedir. Örneğin, 6 müşterili bir dağıtım ağında, İHA'ya atanabilecek en büyük müşteri sayısı 3'tür ve bu 3 müşteri 20 farklı şekilde seçilebilir. Bu 20 farklı İHA düğümü atamasına karşılık, kalan 3 düğümün 3'lü permütasyonları ile toplam $6 * 20$ farklı kamyon rotası üretilmektedir. Kamyon rotaları üretilirken dikkat edilecek bir konu, GSP çözümü ile elde edilecek olan bütünsel üst sınırdan (BÜS) küçük olma gerekliliğidir. Zira, kamyon rotasının süresi, GSP çözümüne eşit veya GSP çözümünden daha uzun ise, üretilen rotanın, kamyonun İHA'yı bekleme süreleri de hesaba katıldığında, GSP çözümünden daha kısa sürede tamamlanma olasılığı yok demektir. Bu nedenle, algoritmaya GSP çözülerek başlanır. Kamyon rotalarının üretiminde permütasyon hesabı kullanıldığından, bu rotaların sayısı çok hızlı büyümektedir. Üretilen kamyon rotalarının sayısının azaltılması için, kamyon rotasındaki ilk müşteri numarası, son müşteri numarasından büyük olan rotalar üretilmemektedir. Örneğin; 0-1-2-3-4-5-0 rotası ile 0-5-4-3-2-1-0 rotası aynı rotalar oldukları için bunlardan

yalnızca birinin üretilmesi yeterlidir. 0-3-4-5-1-2-0 rotası üretilmez çünkü bunun aynısı olan 0-2-1-5-4-3-0 rotası zaten üretilmiştir. Rota üretmede kullanılan bu özellik şöyle ifade edilebilir: 1 ile başlayan rotalarda hiçbir sınırlama yapılmamakta ve bütün permütasyonları üretilmektedir; 2 ile başlayan ve 1 ile biten rotalar üretilmezken 2 ile başlayıp 3, 4 ve 5 ile biten tüm rotalar üretilmektedir. 3 ile başlayıp 1 ve 2 ile bitenler; 4 ile başlayıp 1,2 ve 3 ile bitenler üretilmemektedir. Ayrıca 5 ile başlayan hiçbir rota üretilmemektedir. Böylece üretilen rota sayısı, yarı yarıya azalmaktadır. Fakat, bu varsayımın ancak simetrik mesafeler söz konusu olduğunda geçerli olduğunu da belirtmek gerekmektedir. Bu rotaların üretilmemesi, İHA turlarını etkilememektedir. Çünkü İHA turları, her yinelemede, seçilen kamyon rotasındaki sıralamaya göre oluşturulmaktadır. Üretilen kamyon rotaları, R kümesinde rota süresine göre azalmayan sırada tutulmaktadır. İHA'ya yapılabilecek en büyük sayıdaki atama için olası kamyon rotaları üretildikten sonra, en küçük süreye sahip rota (R kümesinin ilk elemanı) birinci aşamanın çözümü için seçilir, bu rotanın süresi yerel alt sınırı (YAS) vermektedir. Daha sonra, bu rota için atanabilecek tüm olası İHA turları oluşturulmakta ve en iyi İHA tur atamaları matematiksel modelin çözümü ile elde edilmektedir. Kamyon rotasının süresi ve kamyonun İHA'yı bekleme süresi toplamı yerel üst sınırı (YÜS) vermektedir. Eğer bu üst sınır, GSP çözümünden kısa ise BÜS güncellenmekte, değilse BÜS, GSP çözümü olarak kalmaktadır. Daha sonra, İHA'ya D_{max} 'tan daha az sayıda atanabilecek diğer düğüm kombinasyonlarına karşılık gelen kamyon rotaları üretilmektedir. Bu rotaların üretiminde güncel BÜS değeri dikkate alınmaktadır. Kamyon rotalarının, en büyük sayıdaki İHA düğümü atamaları için algoritmanın başında, daha az sayıdaki İHA düğümü atamaları için daha sonra üretilmesinin nedeni, BÜS'ün düşürülerek üretilen rota sayısının azaltılmak istenmesidir. Rota üretimi tamamlandıktan sonra, algoritmanın yinelemeli yapısı işlemeye başlamaktadır. Her yinelemede, R kümesinde sıralı şekilde tutulan ve bir önceki yinelemede kullanılan bir sonraki kamyon rotası seçilerek YAS güncellenmekte, seçilen rota için İHA turları oluşturulmakta ve matematiksel modelin çözümü ile en iyi tur atamaları yapılmakta, BÜS'ün iyileşmesi durumunda bu değer güncellenmektedir. Yerel alt sınır ve bütünsel üst sınır arasındaki fark kapanana kadar yinelemeler devam etmektedir. Yerel alt sınırın, bütünsel üst sınırı geçtiği yinelemede algoritma sonlandırılmaktadır. Anlatılan bu yapı, Algoritma 3.1'de özet şekilde verilmektedir.

Algoritma 3.1. ARP-İHA çözümü için 2-aşamalı, yinelemeli algoritma-Versiyon 1

1. Yinelemeyi başlat, $s \leftarrow 0$
2. Bütünsel üst sınır elde etmek için GSP çöz, $v(GSP)$
3. $BÜS \leftarrow v(GSP)$
4. Kamyon rotasına olası en küçük sayıda müşteri ($C-D_{max}$) atanacak şekilde bütün olası kamyon rotalarını üret ve rota süresi, $BÜS$ 'ten küçük olanları R kümesinde azalmayan sıra ile tut
5. Yerel alt sınırı, R kümesindeki ilk rotanın süresi olarak belirle, $YAS \leftarrow R(0)$
6. Olası İHA turlarını üret, P_s
7. Kamyonun İHA'yı bekleme süresini elde etmek için matematiksel modeli (Z) çöz, $v(Z)$
8. Eğer $BÜS > (v(Z) + R(0))$
9. $BÜS \leftarrow v(Z) + R(0)$
10. Kamyon rotasındaki müşteri sayısı ($C-D_{max}$)'tan büyük olacak şekilde bütün olası rotaları üret ve rota süresi, $BÜS$ 'ten küçük olanları R kümesindeki rotalara ekle ve azalmayan sıra ile tut
11. ($YAS < BÜS$) olduğu sürece yap
12. $s \leftarrow s + 1$
13. $YAS \leftarrow R(s)$
14. Eğer ($YAS \geq BÜS$)
15. Dur
16. Aksi takdirde
17. Olası İHA turlarını üret, P_s
18. Eniyi İHA tur atamaları için Z 'yi çöz, $v(Z)$
19. Eğer ($v(Z) + YAS < BÜS$)
20. $BÜS \leftarrow v(Z) + YAS$

Algoritmanın daha iyi anlaşılabilmesi için sayısal bir örnek üzerinden adımlar şu şekilde açıklanabilir: Dört müşteriden oluşan örnek bir problemimiz olsun ve bu problemin GSP çözümü 35,56 dk olsun. Bu durumda başlangıç $BÜS$ değeri 35,56'dır. Müşteri sayısı dört olduğunda, İHA'ya atanabilecek en büyük müşterisi sayısı 2 olabilir. İHA'ya en büyük sayıda müşteri ataması yapıldığında, kamyon rotasındaki müşteri sayısı da en küçük olacaktır. Başlangıç olarak, 2 müşterili ve GSP çözümünden küçük olan kamyon rotaları üretilsin ve rota süresine göre azalmayan sıra ile tutulsun. Örnekte bu kriterleri sağlayan altı adet kamyon rotası üretilmiş olsun. Bu rotalar Çizelge 3.1'de verilmektedir. En küçük dağıtım süresine sahip rota (rota kümesindeki ilk rotaya karşılık gelmektedir), 11,45 dk ile 5 numaralı rotadır. Bu rota için en iyi İHA tur atamaları yapıldığında kamyonun en küçük bekleme süresi 12,02 dk olsun. Elde edilen 23,47 dk'lık dağıtım süresi GSP çözümünden küçük olduğu için $BÜS$ değeri 23,47 olarak güncellenir. Bu aşamadan sonra

artık ikiden daha fazla müşteri atanmış olan kamyon rotaları üretilir ve süresi BÜS'ten küçük olanlar, rota kümesinde uygun sırada (rota süresine göre) tutulur. Çizelge 3.2'de, üçüncü sütunda üretilmiş olan rotaların tamamı, ikinci sütunda rota numarası ile verilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere, ilk yinelemenin sonunda, BÜS'ten küçük olan üç yeni rota (7, 8 ve 9 no'lu rotalar) daha üretilmiştir. İkinci yinelemede elde edilen çözüm, BÜS'ten küçük olup BÜS güncellenmiştir. Aynı şekilde, dördüncü yinelemede elde edilen çözüm BÜS'ün güncellenmesine neden olmuştur. Bu çözüm en iyi çözüm olmasına rağmen yinelemelere devam edilir. Çünkü beşinci yinelemedeki yerel alt sınır, bütünsel alt sınırdan küçüktür ve mevcut en iyi çözümden küçük bir çözüm elde edilme olasılığı vardır. Beşinci yinelemede BÜS güncellenmeden altıncı yinelemeye geçilir. Bu yinelemede, YAS, yani kamyon rotasının süresi, BÜS'ten büyüktür. Bu durumda, mevcut en iyi çözümden daha iyi bir çözüm elde edilmesi mümkün değildir ve algoritma sonlandırılır.

Çizelge 3.1. Örnek problem için üretilen kamyon rotaları

Rota No.	Rota	Rota Süresi (dk)
5	0-2-4-0	11,45
4	0-2-3-0	11,76
6	0-3-4-0	12,49
1	0-1-2-0	27,82
2	0-1-3-0	30,67
3	0-1-4-0	32,56

Çizelge 3.2. Örnek problemin çözüm adımları

Yineleme	Rota No.	Rota	Rota Süresi (dk)	YAS	Bekleme Süresi (dk)	Çözüm	BÜS	GSP
1	5	0-2-4-0	11,45	11,45	12,02	23,47	23,47	35,56
2	4	0-2-3-0	11,76	11,76	11,49	23,25	23,25	35,56
3	6	0-3-4-0	12,49	12,49	12,17	24,66	23,25	35,56
4	7	0-2-4-3-0	14,45	14,45	3,21	17,66	17,66	35,56
5	8	0-3-2-4-0	16,51	16,51	1,16	17,67	17,66	35,56
6	9	0-2-3-4-0	18,25	18,25	*	*	*	35,56
*	1	0-1-2-0	27,82	*	*	*	*	35,56
*	2	0-1-3-0	30,67	*	*	*	*	35,56
*	3	0-1-4-0	32,56	*	*	*	*	35,56

* Algoritma sonlandırıldığı için sonuçlar hesaplanmamıştır.

3.2.2. Kamyonun İHA'yı bekleme süresini enküçükleyen matematiksel model

Birinci aşamada, kamyon rotasının belirlenmesi, aynı zamanda İHA'nın ziyaret edeceği müşterilerin de belirlenmesi anlamına gelmektedir. Zira, kamyon rotasının dışında kalan müşteriler İHA'ya atanmış demektir. İHA'nın, kendisine atanmış olan bu müşteri ziyaretlerini gerçekleştirmek üzere kamyonun hangi noktalarda ayrılacağı ve hangi noktalarda kamyon ile tekrar buluşacağı, ikinci aşamada karışık tamsayılı doğrusal programlama modelinin çözümü ile belirlenmektedir. Bu modelde kullanılan gösterim, Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. Kamyonun bekleme süresini enküçükleyen matematiksel modelde kullanılan gösterim

i, j	: düğüm indeksleri
k	: pozisyon indeksi
p	: İHA turu indeksi
s	: yineleme indeksi
C	: müşteri kümesi
D_s	: s numaralı yinelemede İHA'ya atanan müşterilerin kümesi
P_s	: s numaralı yinelemede İHA'nın gerçekleştirebileceği turların kümesi
d_p	: p turun tamamlanma süresi
f_{ip}	: p turu, i düğümü ile başlıyorsa 1, aksi takdirde 0
a_{ip}	: p turunda, İHA i müşterisine teslimat yapıyorsa 1, aksi takdirde 0
l_{ip}	: p turu, i düğümü ile bitiyorsa 1, aksi takdirde 0
D_{max}	: İHA'ya atanabilecek en büyük müşteri sayısı
N	: Dağıtım ağındaki müşteri sayısı
t_i	: kamyonun i düğümüne geliş zamanı
m_k	: kamyon rotasındaki k . pozisyona atanan müşteri
\bar{r}_s	: s numaralı yinelemenin ilk aşamasında belirlenen kamyon rotası
$\{0, N+1\}$: başlangıç ve bitiş noktası olarak depo
x_p	: p turu İHA'ya atanırsa 1, aksi takdirde 0
wt_i	: Kamyonun İHA'yı i . düğümde bekleme süresi

Matematiksel modele geçmeden önce, modelde kullanılan kümelerin nasıl oluşturulduğu ile ilgili kısa bir bilgilendirme yapmak gerekmektedir. Bu aşamaya gelindiğinde, kamyon rotası ve İHA'nın ziyaret edeceği müşteriler bilinmektedir. Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi; \bar{r}_s , s . yinelemenin birinci aşamasında belirlenmiş olan kamyon rotasını göstermektedir. Yine bu yinelemede İHA'ya atanmış olan düğümler D_s kümesi ile gösterilmektedir.

Öyleyse, bu iki bilgi kullanılarak, İHA'nın gerçekleştirebileceği turların bir kümesi oluşturulabilir. Bir İHA turunu oluşturan üç düğümden ilki kamyondan ayrılma, üçüncüsü de kamyonla buluşma noktasını gösterdiğinden, bu düğümlerin kamyon rotasına, \bar{r}_5 , ait olması gerektiği açıkça görülmektedir. İHA turunun ikinci düğümü ise, İHA'nın teslimat yaptığı müşteri olduğundan, bu düğümün de İHA'ya atanan müşterilerden, D_s , seçilmesi gerekmektedir. Buna ilaveten, İHA için oluşturulacak her bir turun ilk düğümü, kamyon rotasındaki sıralamaya göre, üçüncü düğümden daha önce ziyaret edilmelidir. Turlar üretilirken dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da batarya ömrü ile ilgilidir. Üretilen turların, çözümde kullanılacak olurlu turlar olabilmesi için tur süresinin, batarya ömründen kısa olması gerekmektedir. Ayrıca, Bölüm 3.1'de anlatılan varsayımlardan ilkinde göre, kamyonun, turun başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki seyahat süresi de batarya ömrünü geçmemelidir. Şekil 3.1'deki dağıtım ağı ve atama kararları kullanılarak şöyle bir örnek verilebilir: Kamyon rotası 0-4-2-7-9-1-5-0 ve İHA düğümleri de 3, 6, 8 ve 10 olduğuna göre, 3 numaralı müşterinin ziyareti için oluşturulabilecek turlar Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Belirli kamyon rotası için üretilen İHA turlarına bir örnek

0-3-4	4-3-2	2-3-7	7-3-9	9-3-1	1-3-5	5-3-0
0-3-2	4-3-7	2-3-9	7-3-1	9-3-5	1-3-0	
0-3-7	4-3-9	2-3-1	7-3-5	9-3-0		
0-3-9	4-3-1	2-3-5	7-3-0			
0-3-1	4-3-5	2-3-0				
0-3-5	4-3-0					

Birinci aşamada, kamyon rotasının belirlenmesi ile kamyon rotasının süresi de bilinmektedir. Fakat, İHA turlarının neden olabileceği beklemler, kamyonun dağıtım süresinin, birinci aşamada belirlenenden daha fazla olmasına neden olacaktır. Öyle ki, buluşma noktası olarak belirlenen müşterilerden herhangi birine kamyonun önce gelmesi durumunda, kamyon rotasına devam edemez; İHA'nın bataryasını yenilemek ve bir sonraki müşterisinin paketini yüklemek için İHA'yı beklemek zorundadır. Bu durumda, kamyon rotası, birinci aşamada belirlenenden daha uzun bir sürede tamamlanacaktır. Kamyonun bu aracı bekleme süresini enküçükleyecek ve kamyon rotasının tamamlanma süresini daha fazla uzatmayacak eniyi İHA turları ataması için aşağıdaki matematiksel model geliştirilmiştir:

$$Z = \min \sum_{i \in C \cup \{N+1\} \setminus D_s} wt_i \quad (3.2)$$

$$\sum_{p \in P_s} \left\{ d_p l_{ip} x_p - \left(t_i l_{ip} x_p - \sum_{j \in C \cup \{0\} \setminus D_s} t_j f_{jp} x_p \right) \right\} \leq wt_i, \quad (3.3)$$

$$i \in C \cup \{N+1\} \setminus D_s$$

$$\sum_{p \in P_s} a_{ip} x_p = 1, \quad i \in D_s \quad (3.4)$$

$$\sum_{p \in P_s} f_{ip} x_p \leq 1, \quad i \in C \cup \{0\} \setminus D_s \quad (3.5)$$

$$\sum_{p \in P_s} l_{ip} x_p \leq 1, \quad i \in C \cup \{N+1\} \setminus D_s \quad (3.6)$$

$$\sum_{p \in P_s} f_{m_k p} x_p + \sum_{p \in P_s} l_{m_k p} x_p \leq 2 \left(1 - \sum_{p \in P_s} f_{m_i p} l_{m_j p} x_p \right), \quad i = 0, 1, \dots, n_s - 1, \quad (3.7)$$

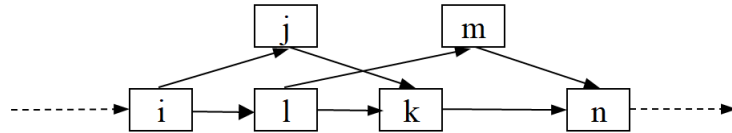
$$j = i + 2, \dots, n_s + 1, \quad k \in H, H = \{h | i < h < j\}, \quad i \neq j$$

$$x_p \in \{0, 1\}, \quad p \in P_s \quad (3.8)$$

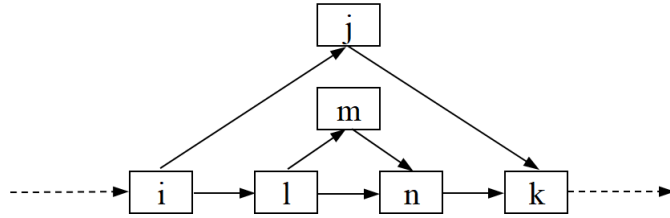
$$wt_i \geq 0, \quad i \in C \cup \{N+1\} \setminus D_s \quad (3.9)$$

Bekleme durumu yalnızca buluşma noktalarında meydana gelebileceği için kamyon rotasındaki müşteriler ile depodaki bekleme zamanları dikkate alınmaktadır (Denklem (3.2)). Denklem 3.3, buluşma noktasında kamyonun İHA'yı ne kadar beklediğini hesaplamaktadır. Bu aşamaya gelindiğinde, kamyon rotası belirlenmiş olduğundan, kamyonun hangi müşteriye ne zaman gideceği de bilinmektedir. Bu durumda, i düğümünde kamyonun bekleme süresi, buraya gelmeden önce İHA ile ayrıldıkları j düğümünden bu düğümüne geliş süresinin, İHA'nın j 'de başlayıp i 'de biten turunun süresinden çıkartılması ile hesaplanmaktadır. Denklemdeki iç parantez, i düğümünde biten p turunun başladığı j düğümü ile i düğümü arasındaki mesafeyi kamyonun ne kadar sürede tamamladığını göstermektedir. i ve j arasındaki İHA turu, kamyonun bu mesafeyi

kat etme süresinden daha uzunsa kamyon beklemektedir, aksi takdirde kamyonun bekleme süresi 0'dır. Problemdaki tur atamalarının olurlu atamalar olabilmesi için birtakım şartlar sağlanmalıdır. Bunlardan ilki Denklem 3.4'te verilmektedir. Denklemde de anlaşılacağı üzere, birinci aşamada İHA'ya atanmış olan her bir müşteri için, bu müşterilerin ara düğüm olduğu tek bir İHA turu mutlaka seçilmelidir. Ayrıca, kamyon rotasındaki depo dahil her bir müşteri, en fazla bir İHA turunun başlangıç düğümü (İHA'nın kamyonun ayrıldığı düğüm) olarak seçilebilir (Denklem 3.5). Benzer şekilde, kamyon rotasındaki depo dahil her bir müşteri, en fazla bir İHA turunda bitiş düğümü (araçların buluştukları düğüm) olarak seçilebilir (Denklem 3.6). Ponza (2016), yaptığı çalışmada iki tip olursuz tur ataması tanımlamakta ve bunlar Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'teki gibi gösterilmektedir. Bu iki tip olursuz atamayı da önleyen son kısıt, Denklem 3.7'de verilmektedir. Bu kısıt, İHA'nın bir turu bitirmeden başka bir tura başlamamasını garanti etmektedir. Öyle ki, s . yinelemede kamyon rotasına n_s adet müşteri atanmış olsun. Kamyon rotasının i . pozisyonundaki müşteride başlayan ve j . pozisyonundaki müşteride biten bir İHA turu seçiliyorsa, bu iki pozisyon arasındaki herhangi bir k pozisyonunda bulunan müşteride başlayan veya biten hiçbir İHA turu seçilemez. Denklem 3.8 ve Denklem 3.9'da değişken tanımları verilmektedir.



Şekil 3.3. 1'nci tip olursuz İHA tur atamasına bir örnek



Şekil 3.4. 2'nci tip olursuz İHA tur atamasına bir örnek

3.2.3. Algoritma 2

Kamyon ile gerçekleştirilen geleneksel dağıtım yaklaşımının İHA'lar ile desteklenmek istenmesinin amacı, kamyonun ziyaret edeceği müşteri sayısının azaltılıp, kalan müşterilerin İHA tarafından, kamyon ile eşzamanlı dağıtılması sayesinde, dağıtım süresinin kısaltılmasıdır. Bu nedenle, en iyi çözümde, İHA'ya mümkün olduğunca çok müşterinin atanması beklenmektedir (en iyi çözümde her zaman D_{max} kadar İHA tur ataması olmayabilir). ARP-İHA'nın çözümü için Bölüm 3.2.1'de önerilen algoritma, başlangıç BÜS'ten daha kısa olan tüm kamyon rotalarının üretilerek sırayla değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu durumda, üretilen çok sayıda kamyon rotası değerlendirilmeden algoritma sonlandırılmaktadır. Bu kamyon rotalarının üretilmesi ise, rota üretme süresini bir hayli arttırmakta, ayrıca bilgisayar hafızasını zorlamaktadır. Buradan yola çıkılarak geliştirilen ikinci algoritmada, başlangıç BÜS'ten kısa olan kamyon rotalarının tamamının üretilmesi yerine, kamyon rotalarının aşama aşama üretilmesi önerilmektedir. Durma kriterleri sağlanana kadar, her aşamada üretilmiş olan kamyon rotaları Algoritma 1'deki gibi araştırılarak, çözüm süresinde iyileşme sağlanıp sağlanmayacağı araştırılmaktadır.

Geliştirilen bu ikinci algoritmada, GSP çözümü, yine başlangıç için BÜS değerini vermektedir. İlk aşamada, BÜS'ten daha kısa ve mümkün olan en küçük sayıda ($N-D_{max}$) müşteri atanmış tüm kamyon rotaları üretilmekte ve azalmayan sıra ile tutulmaktadır. Her yinelemede, kamyon rotasının süresi (YAS) ve MIP modelin çözümü ile elde edilen bekleme süresinin toplamı YÜS'ü vermektedir. Eğer YÜS, BÜS'ten küçükse, BÜS güncellenerek YÜS değerini alır. Bu aşamanın sonlandırılması için gerekli kriterler sağlandığında bir sonraki aşamaya geçilir. Sonraki aşamada, kamyonu atanacak müşteri sayısı bir artırılır ve önceki aşamada belirlenen BÜS'ten küçük tüm kamyon rotaları üretilir. Durma kriterleri sağlanana kadar aynı işlemler gerçekleştirilir. Bir aşamanın sonlandırılarak, sonraki aşamaya geçilmesi için gerekli kriterler şöyle sıralanmaktadır:

1. YAS ve BÜS arasındaki farkın kapanması
2. Aşamadaki tüm kamyon rotalarının değerlendirilmesi

İlk kriter gerçekleştiğinde, söz konusu aşamada daha iyi çözüm elde edilemeyeceği için bir sonraki aşamaya geçilmektedir. İkinci kriterde ise, aşamadaki tüm kamyon rotaları araştırılmıştır. Bir sonraki aşamada BÜS'ten daha küçük sürelerle sahip kamyon rotaları üretilebilir. Bu nedenle, sonraki aşamaya geçilir. Yeni bir aşamaya geçildiğinde ise, üretilen kamyon rotalarının tamamının süresi BÜS'ten büyükse, algoritma sonlandırılır. Zira söz konusu aşamadaki en kısa rotanın bile BÜS'ü geçmesi durumunda, sonraki aşamada bir düğümün daha eklenmesiyle daha kısa bir rota üretilmesi mümkün olamaz. Anlatılan bu yapının özeti, Algoritma 3.2'de verilmektedir.

Algoritma 3.2. ARP-İHA çözümü için 2-aşamalı, yinelemeli algoritma-Versiyon 2

1. Aşamayı başlat, $a \leftarrow 0$
2. GSP'yi çöz, $BÜS \leftarrow v(GSP)$
3. Kamyonla atanan düğüm sayısını başlat, $n \leftarrow C - D_{max}$
4. Aşamayı bir arttır, $a \leftarrow a + 1$
5. a aşamasındaki yinelemeyi başlat, $s \leftarrow 0$
6. Olası tüm kamyon rotalarını üret, BÜS'ten küçük olanları Ra kümesinde azalmayan sırada tut
7. Eğer BÜS'ten kısa kamyon rotası yoksa
8. Algoritmayı sonlandır
9. Aksi takdirde
10. Yerel alt sınırı, Ra kümesindeki s . kamyon rotasının süresi olarak belirle, $YAS \leftarrow Ra(s)$
11. Eğer $YAS < BÜS$ ise
12. Olası tüm İHA turlarını üret, Ps
13. Kamyonun bekleme süresini elde etmek için MIP'i çöz, $v(Z)$
14. Eğer $BÜS > v(Z) + YAS$
15. BÜS'ü güncelle, $BÜS \leftarrow v(Z) + YAS$
16. Eğer üretilen tüm kamyon rotaları değerlendirildiyse
17. Yinelemeyi arttır, $s \leftarrow s + 1$
18. Kamyonla atanan düğüm sayısını arttır, $n \leftarrow n + 1$
19. Adım 4'e git
20. Aksi takdirde
21. Yinelemeyi arttır, $s \leftarrow s + 1$
22. Adım 10'a git
23. Aksi takdirde
24. Kamyonla atanan düğüm sayısını arttır, $n \leftarrow n + 1$
25. Adım 4'e git

3.2.4. Sayısal çalışma

Yapılan sayısal çalışma, bu bölümde üç farklı kısımda anlatılmaktadır. İlk olarak, sayısal çalışmada kullanılan parametrelerin seçimi ile ilgili deneysel hazırlık aşaması anlatılmaktadır. İkinci olarak, ARP-İHA'nın çözümü için önerilen Algoritma 1 ve Algoritma 2, çözüm performansları açısından karşılaştırılmaktadır. Ayrıca ARP-İHA için elde edilen sonuçlarla ilgili gözlemler paylaşılmaktadır. Son olarak, önerilen 2-aşamalı, yinelemeli çözüm yaklaşımı, literatürdeki mevcut çalışmalar ile karşılaştırılarak başarısı gösterilmektedir.

3.2.4.1. Varsayımlar

Literatürde, ARP-İHA için genel kabul görmüş karşılaştırma verisi bulunmamaktadır. Her ne kadar, Bouman ve ark. (2016) bu problem için bir veri kümesi oluşturmuşsa da, bu veri önerdiğimiz algoritmanın test edilmesi için uygun değildir. Çünkü, küçük boyutlu problemler için üretilen en büyük veri 9 müşteri bulundurmaktadır. Bu nedenle, deneysel çalışmada kullanılmak üzere farklı problem boyutlarında ve her problem boyutu için 10 farklı veri olmak üzere çok sayıda veri üretilmiştir. Literatürdeki yaklaşımların bir saatlik çözüm süresi sınırlaması altında çözebildikleri problem boyutunun 10 olduğu görülmektedir (Agatz ve ark. 2018, Murray ve Chu, 2015). Bu nedenle, algoritmanın performans değerlendirmesine 10 müşterili veri ile başlanmış, 1 saatlik çözüm süresi içinde çözüldüğü takdirde, müşteri sayısı artırılarak yeni bir veri kümesi daha üretilmiştir. Müşterilerin x ve y koordinatları 0 ve 10 km arasında tekdüze dağılacak şekilde rassal olarak üretilmiştir. Kamyon hızının 40 km/sa ve İHA hızının 56 km/sa olduğu kabul edilmiştir. Bunun yanı sıra, bir diğer parametre olan batarya ömrü 20 dakika ile sınırlandırılmıştır. Bu parametre değerleri; Murray ve Chu (2015), Ha ve ark. (2015) ve Ha ve ark. (2018)'nin yaptığı çalışmalarla uyumlu olması amacıyla seçilmiştir. Biri karada diğeri havada hareket eden iki farklı aracın, kamyon ve İHA'nın, bu farkını modele yansıtmak amacıyla, Murray ve Chu (2015) ve Ha ve ark. (2018) kamyonun kat ettiği mesafe hesaplamaları için Manhattan ölçütünü, İHA için Öklit ölçütünü kullanmaktadır. Manhattan ölçütünün, cadde ve sokak yapısını daha iyi yansıttığı düşünülmektedir. İHA ise bu tip bir yapıyı kullanmak zorunda olmadığı için Öklit ölçütünün, İHA uçuşu için

daha uygun olduğu değerlendirilmektedir. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada da mesafe hesabı benzer şekilde uygulanmıştır.

Çalışmada önerilen kesin çözüm algoritmasına ait tüm kodlar C++ dilinde yazılmış, matematiksel modeller için ILOG CPLEX Concert Teknoloji 12.6.3. kullanılmıştır. Bütün deneyler, Intel Core i7-7500U işlemciye ve 16 GB RAM'e sahip dizüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.2. Algoritma 1 ve Algoritma 2'nin performans değerlendirmesi

Önerilen her iki algoritmanın performansları, toplam çözüm süresi, üretilen kamyon rotası sayısı, yineleme sayısı ve rota üretme süresi açısından Çizelge 3.5'te karşılaştırılmaktadır. Her bir örnek veride, ilgili performans kriteri açısından daha iyi olan algoritmaya ait sonuç koyulaştırılarak vurgulanmaktadır. Çizelgeye bakıldığında; Algoritma 2'nin, üretilen kamyon rotası sayısını ciddi ölçüde azalttığı görülmektedir. Yineleme sayısı ise, bu algortmada belirgin bir şekilde artmaktadır. Algoritma 2 ile kamyon rotası sayısında elde edilen azalmanın sağladığı avantaj, yineleme sayısı arttığı için toplam çözüm süresine, özellikle müşteri sayısının daha az olduğu örnek veride çok yansımamaktadır. Fakat müşteri sayısı ile birlikte, rota üretme süreleri de Algoritma 1'de daha fazla arttığından, 12 müşterili örnek verinin bir kısmında, Algoritma 2'nin toplam çözüm süresi açısından daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu iyileşmenin, özellikle rota üretme süresinin Algoritma 1'de yüksek olduğu verilerde gerçekleştiği gözlemlenmektedir.

Algoritma 1, en fazla 12 müşterili örnek verileri çözebilmekte, 13 müşterili veride ise henüz rota üretme aşamasında hafıza sınırlamasından dolayı algoritma sonlandırılmaktadır. Algoritmanın değiştirilerek tekrar düzenlenen versiyonu olan Algoritma 2 ise, 13 müşteri ile oluşturulan 10 örnek problemden 5'ini çözebilmektedir. Sonuçlar, Çizelge 3.6'da verilmektedir. Çizelgeye göre, 13 müşteri durumunda, algoritmanın çözebildiği 5 probleme ait ortalama çözüm süresi ortalama 45 dakika civarındadır.

Çizelge 3.5. Algoritma 1 ve 2'nin çözüm performansı açısından karşılaştırılması

N=10 Problem	Toplam Çözüm Süresi (sn)		Üretilen Kamyon Rotası		Yineleme Sayısı		Rota Üretme Süresi	
	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2
1	238	407	27351	9101	1262	1560	3	1
2	27	52	5074	4482	124	122	2	1
3	161	298	24692	8368	825	1262	4	1
4	51	102	9784	3783	260	349	1	1
5	41	106	7126	7136	207	359	1	1
6	6	30	14020	3951	26	63	2	1
7	24	77	26245	4874	102	182	4	1
8	21	28	39752	6767	62	61	10	1
9	10	63	5158	2123	52	145	2	1
10	34	138	4674	3280	165	529	1	1
Ort.	61,3	130,1	16287,6	5386,5	308,5	463,2	3	1

N=11 Problem	Toplam Çözüm Süresi (sn)		Üretilen Kamyon Rotası		Yineleme Sayısı		Rota Üretme Süresi	
	Alg. 1	Alg.2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2
1	412	528	28263	8198	2436	2694	8	2
2	736	451	168396	17275	1600	2260	479	2
3	221	311	58152	9942	1034	1551	32	1
4	367	379	94370	15751	1532	1495	119	2
5	150	302	79127	12013	434	1519	76	2
6	534	1678	101657	21107	1901	8802	137	2
7	156	311	88984	11418	319	1679	101	2
8	184	532	39851	22563	1080	2908	10	2
9	172	269	60476	11203	843	1529	37	2
10	59	81	27688	7184	241	308	9	1
Ort.	299,1	484,2	74696,4	13665,4	1142	2475	100,8	1,8

N=12 Problem	Toplam Çözüm Süresi (sn)		Üretilen Kamyon Rotası		Yineleme Sayısı		Rota Üretme Süresi	
	Alg. 1	Alg.2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2	Alg. 1	Alg. 2
1	514	613	45924	18615	2667	2710	69	8
2	686	266	162658	42459	496	1165	575	23
3	372	297	88641	26139	1037	1198	162	11
4	1316	791	254995	138930	1278	2400	1056	361
5	905	1017	68729	28014	3776	4466	108	10
6	413	1096	74498	53936	1671	4802	85	47
7	1853	1246	260771	81827	5137	5791	1233	96
8	413	741	85760	28564	1331	3224	156	26
9	216	444	60237	22533	642	2037	88	8
10	914	1036	63130	44594	4094	4488	73	41
Ort.	760,2	754,7	116534,3	48561,1	2213	3228	360,5	63,1

Önerilen algoritmaların çözüm performansları yukarıda gösterilmiştir. Çizelge 3.5'te, müşteri sayısı ile çözüm sürelerinin ciddi ölçüde arttığı görülmektedir. Bu artışın temel nedeni, kamyon rotalarının üretilmesinde başvuru permütasyon sayısının artmasıdır. Üretilen kamyon rotası sayısı ile birlikte bu rotaların üretilme süresi de artmaktadır. Çizelge 3.7, her bir problem boyutunda, Algoritma 1 ve 2'nin toplam çözüm süresinin yüzde kaçının kamyon rotalarını üretmek için kullanıldığını göstermektedir. Algoritma 1'in, 10 müşterili veride çözüm süresinin ortalama %13,61'i rota üretmek için

kullanılırken, 12 müşteride bu rakam %40,66'ya çıkmaktadır. Algoritma 2'de ise Algoritma 1'de görülen keskin artışlar gerçekleşmemekle beraber 13 müşterili problemlerde kamyon rotası üretmek için geçen ortalama sürenin toplam çözüm süresinin %20'sini oluşturduğu görülmektedir. Kamyon rotalarının aşama aşama üretilmesinin, rota üretme süresinde sağladığı avantaj açıkça görülmektedir.

Çizelge 3.6. 13 müşterili örnek problemlerin çözümüne ait sonuçlar

Problem	Toplam Çözüm Süresi (sn)	Üretilen Kamyon Rotası	Yineleme Sayısı	Rota Üretme Süresi	İHA Tur Sayısı
1	3133	178350	13118	582	4
2	*	*	*	*	*
3	3760	143074	17452	448	5
4	2372	170636	11168	498	5
5	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*
8	1357	80121	7252	154	5
9	1545	159384	5952	540	5
10	*	*	*	*	*
Ort.	2433,4	146313	10988,4	384,4	4,8

Çizelge 3.7. Kamyon rotası üretme süresinin toplam çözüm süresindeki payı

Problem	Rota Üretme Süresi*100/Toplam Çözüm Süresi						
	N=10		N=11		N=12		N=13
	Alg.1	Alg.2	Alg.1	Alg.2	Alg.1	Alg.2	Alg.2
1	1,261	0,246	1,942	0,379	13,424	1,305	18,576
2	7,407	1,923	65,082	0,443	83,819	0,086	*
3	2,484	0,336	14,480	0,322	43,548	0,037	11,915
4	1,961	0,980	32,425	0,528	80,243	45,638	20,994
5	2,439	0,943	50,667	0,662	11,934	0,983	*
6	33,333	3,333	25,655	0,119	20,581	4,288	*
7	16,667	1,299	64,744	0,643	66,541	7,705	*
8	47,619	3,571	5,435	0,376	37,772	3,509	11,349
9	20,000	1,587	21,512	0,743	40,741	1,802	34,951
10	2,941	0,725	15,254	1,235	7,987	3,958	*
Ort.	13,611	1,494	29,719	0,545	40,659	6,931	19,558

Çizelge 3.8 ise, ARP-İHA'nın 10, 11, 12 ve 13 müşterili veride elde edilen çözümüne ait bazı bileşenlerini göstermektedir. Çizelge 3.8 incelendiğinde, başlangıç üst sınırın da

* Algoritma sonlandırıldığı için sonuçlar elde edilememiştir.

problem boyutuyla artış gösterdiği söylenebilir. Müşteri sayısı arttıkça, başlangıç üst sınırın artması pek de şaşırtıcı değildir. Zira, algoritmanın başında, İHA'ya en büyük sayıda atama yapılmakta, bu da kamyon rotasındaki müşteri sayısını azaltmaktadır. Böylece kamyon, İHA turlarına paralel gerçekleştirdiği seyahatlerinde, ayrılma ve birleşme düğümleri arasında müşteri ziyaret etme imkanı bulamadığı için, İHA'yı daha uzun süre beklemek durumundadır. Bu bekleme süresi de başlangıç üst sınırın yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Ancak, en iyi çözümde, İHA'ya her zaman en büyük sayıda atama yapılmadığı, İHA'ya atanan düğüm sayısının gösterildiği "İHA Tur Sayısı" sütununda gözlenmektedir. 10 müşterili 10 veriden sadece birinde İHA'ya 5 adet müşteri atanmış, daha büyük boyuttaki hiçbir veride İHA'ya 6 adet atama yapılmamıştır. Bunun nedeni, en iyi çözümde, ayrılma noktasından hareket eden kamyonun buluşma noktasına doğrudan giderek orada İHA'yı beklemek yerine, buluşma noktasına varmadan mümkün olduğu kadar fazla müşteriyi ziyaret etmek suretiyle beklemek süresini azaltmasıdır. Bunun bir sonucu olarak, Çizelge 3.8'de verilen İHA'nın ortalama bekleme süresinin, kamyonun bekleme süresinden yaklaşık 2 dk daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da kamyonun İHA'yı beklemesi yerine, İHA'nın kamyonu beklemesinin dağıtım süresi açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Her iki aracın seyahat sürelerine bakıldığında, bekleme sürelerindeki dağılımdan farklı olarak, kamyonun daha uzun süre seyahat ettiği ve bu sürenin müşteri sayısı ile arttığı görülmektedir. Seyahat ve bekleme süreleri birlikte değerlendirildiğinde ise, beklendiği üzere, her iki aracın depodan çıkıp tekrar depoya dönüncüye kadar dağıtım ağında geçirdikleri sürenin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. ARP-İHA'nın dağıtım süresinde sağladığı avantajın problem boyutu ile ilişkisi Çizelge 3.9'da gösterilmektedir. 10, 12 ve 13 müşterili örnek problemlerde ortalama GSP çözümleri birbirine çok yakın değerler almaktadır. GSP çözümünün bu kadar yakın olduğu 3 durumda, iyileşmenin %36'dan %27'ye düşmüş olması, İHA'nın dağıtıma dahil edilmesinin sağladığı katkının, müşteri sayısı ile, dolayısıyla da müşterilerin nispeten daha yoğun yerleşimlerinde azaldığını düşündürse de, bu çıkarımın yalnız küçük veri dikkate alınarak yapılmasının çok sağlıklı olmayacağı unutulmamalıdır.

Çizelge 3.8. 10, 11, 12 ve 13 müşterili örnek problemlerin çözümüne ait sonuçlar

Veri									
N=10	v(Z)	Kamyon Seyahat Süresi (dk)	İHA Uçuş Süresi (dk)	Kamyon Bekleme Süresi (dk)	İHA Bekleme Süresi (dk)	GSP (dk)	Başlangıç YAS	Başlangıç BÜS	İHA Tur Sayısı
1	32,038	30,312	29,774	1,725	2,264	49,936	16,387	45,683	4
2	41,826	41,744	37,463	0,082	4,408	60,992	34,352	49,542	4
3	37,449	35,586	37,449	1,863	0,000	59,044	23,940	53,422	3
4	45,457	43,520	44,203	1,937	1,254	63,024	33,324	63,024	4
5	39,653	39,653	33,414	0,000	6,239	59,344	29,097	41,030	3
6	41,360	41,360	36,287	0,000	5,073	60,512	35,178	59,674	4
7	31,600	30,604	30,277	0,996	1,322	55,477	27,320	47,560	4
8	37,837	37,340	33,044	0,497	4,793	60,296	25,862	60,296	5
9	33,560	33,116	32,561	0,444	0,999	61,011	28,318	45,821	4
10	37,244	37,244	35,101	0,000	2,143	61,065	32,071	46,898	3
<i>Ort.</i>	37,802	37,048	34,957	0,754	2,849	59,07	28,585	51,295	3,8
<i>N=11</i>									
11	38,121	37,96	36,044	0,161	2,077	47,544	14,551	47,544	4
12	38,703	38,703	34,703	0,000	4,000	59,057	24,474	59,057	4
13	39,858	38,831	36,223	1,028	3,636	56,615	28,421	56,615	4
14	38,368	37,421	36,149	0,947	2,218	56,282	23,815	56,282	5
15	35,682	34,256	32,229	1,427	3,453	53,874	23,453	53,874	5
16	36,076	36,076	32,767	0,000	3,309	55,290	22,044	55,290	2
17	37,381	36,54	36,749	0,841	0,632	56,831	27,894	56,831	4
18	35,507	33,21	33,084	2,297	2,423	130,98	22,363	47,849	4
19	40,232	38,446	39,282	1,786	0,950	58,434	21,111	58,434	5
20	43,604	42,809	40,347	0,796	3,257	60,836	35,069	60,836	5
<i>Ort.</i>	38,353	37,425	35,758	0,928	2,595	63,574	24,32	55,261	4,2
<i>N=12</i>									
21	45,915	45,574	36,195	0,341	9,720	54,721	28,470	54,721	5
22	44,781	44,781	40,250	0,000	4,531	64,154	32,579	64,154	4
23	47,654	46,753	37,589	0,901	10,065	63,239	38,038	63,239	5
24	44,780	42,531	44,297	2,249	0,483	71,999	35,500	60,579	5
25	43,959	43,175	43,075	0,784	0,884	56,443	26,661	56,443	5
26	34,033	34,033	31,986	0,000	2,047	51,039	27,020	41,819	3
27	38,370	36,166	38,240	2,204	0,129	52,135	27,473	48,767	5
28	42,383	39,367	41,827	3,016	0,556	57,894	29,767	57,894	3
29	41,312	41,281	38,853	0,031	2,459	55,272	33,046	55,272	4
30	41,950	41,756	38,319	0,194	3,631	58,846	31,998	50,273	5
<i>Ort.</i>	42,514	41,542	39,063	0,972	3,451	58,574	31,055	55,316	4,4
<i>N=13</i>									
31	47,570	46,874	44,646	0,695	2,924	68,376	32,023	68,376	4
32	*	*	*	*	*	55,914	*	*	*
33	38,923	37,800	37,269	1,123	1,654	54,534	24,212	54,534	5
34	42,452	40,540	41,218	1,912	1,233	61,534			5
35	*	*	*	*	*	61,250	*	*	*
36	*	*	*	*	*	58,669	*	*	*
37	*	*	*	*	*	53,062	*	*	*
38	39,041	39,041	31,445	0,000	7,597	53,849	31,994	53,849	5
39	44,725	39,379	42,927	5,346	1,798	65,027	31,839	65,027	5
40	*	*	*	*	*	58,255	*	*	*
<i>Ort.</i>	42,542	40,7268	39,501	1,815	3,041	59,047	29,456	59,484	4,8

* Algoritma sonlandırıldığı için sonuçlar elde edilememiştir.

3.2.4.3. Literatür ile karşılaştırma

Bu çalışmaya başlandığında, literatürde, ARP-İHA için önerilen iki temel model bulunmakta idi. Bunlardan ilki, problemi literatüre kazandıran Murray ve Chu'ya (2015), diğeri ise Agatz ve ark.'a (2018) aittir. Literatürde, söz konusu problemle ilgilenen çalışmalar bu ikisi ile sınırlı olmamasına rağmen, diğer çalışmalardaki modellerin çoğunlukla Murray ve Chu'nun (2015) modelini baz aldıkları görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında hazırlanan yöntemin performansı, bahsi geçen bu iki çalışmadaki matematiksel modeller ile kıyaslanmaktadır.

Çizelge 3.9. ARP-İHA çözümünün, GSP çözümüne göre dağıtım sürelerinde sağladığı ortalama iyileşme yüzdeleri

Problem	(GSP-v(Z))*100/GSP			
	N=10	N=11	N=12	N=13
1	35,842	19,821	16,092	30,429
2	31,423	34,464	30,198	*
3	36,574	29,598	24,645	28,625
4	27,874	31,830	37,805	31,011
5	33,181	33,768	22,119	*
6	31,651	34,752	33,320	*
7	43,040	34,225	26,403	*
8	37,866	72,892	26,792	27,499
9	44,994	31,149	25,258	31,221
10	39,009	28,326	28,711	*
Ort.	36,145	35,082	27,134	29,757

Çizelge 3.5, Algoritma 1 ve Algoritma 2'nin, 10, 11 ve 12 müşterili verinin çözümündeki performanslarını göstermektedir. Sonuçların elde edilmesinde, 60 dk çözüm süresi sınırlaması getirilmiş ve her iki algoritma da 12 müşterili problemleri bu süre içerisinde çözebilmiştir. 13 müşterili problemlerin ise %50'si Algoritma 2 tarafından çözülebilmektedir. Murray ve Chu'nun (2015) çalışmalarında önerdikleri matematiksel modelin CPLEX ile çözümü, ürettiğimiz verinin, 10 müşterili senaryo da dahil olmak üzere hiçbirinde, 60 dk'lık süre içerisinde en iyi çözümü elde edememiştir. Agatz ve ark.'ın (2018) çalışması ise, bu tez kapsamında kabul edilmiş olan varsayımlardan farklı

* Algoritma sonlandırıldığı için sonuçlar elde edilememiştir.

varsayımlarda bulunmaktadır. Agatz ve ark. (2018), kamyon ve İHA'nın, ayrıldıkları düğümde buluşmalarına izin vermektedir. Diğer bir deyişle, kamyon, İHA'yı ayrılma düğümünde, bu düğümünden ayrılmadan bekleyebilir. Bizim çalışmamızdan farklılaşan diğer bir varsayım ise, kamyonun daha önce ziyaret ettiği bir müşteriye, İHA ile buluşmak üzere tekrar uğrayabilecek olmasıdır. Bu iki varsayımdan dolayı, Agatz ve ark.'ın (2018) önerdiği matematiksel modelin çözüm performansı ile sağlıklı bir karşılaştırma yapılamamaktadır. Agatz ve ark. (2018) önerdikleri modelin, 9 müşterili problemleri yaklaşık 5 ile 40 sn arasında çözdüğünü fakat 11 müşterili problemlerde çözüm süresinin 120 dk'nın üzerine çıktığını belirtmiştir. Dolayısıyla, kesin çözüm için önerdiğimiz algoritma tamamlandığında; 11, 12 ve 13 müşterili ARP-İHA'ların kesin çözümünü elde edebilen ilk çalışma olmuştur.

3.3. Makine Öğrenmesi ile Uygunluk Fonksiyonu Kestirimine Dayanan Melez Genetik Algoritma Önerisi

Geliştirilmiş olan 2-aşamalı, yinelemeli çözüm yaklaşımının, 13 müşterili problemleri çözebildiği açıktır. Ancak, önerilen yaklaşım mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında başarılı olduğu görülse bile, bu başarı küçük boyutlu problemlerle sınırlı kalmıştır.

Sayısal çalışmalar sonucunda, algoritmanın 2'nci aşamasında çözülen MIP modelinin, 50 müşterili örnek problemlerde bile aslında hızlı çalıştığı, fakat algoritmanın 1'nci aşamasında üretilen kamyon rotalarının sayısının fazlalığı nedeniyle, bu büyüklükteki problemlerin mevcut algoritma önerisi ile çözümünün mümkün olmadığı görülmüştür. Bu durum, daha büyük problemlerin çözümünde sezgisel yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Problemin en kısıtlayıcı varsayımlarından biri olan sınırlı batarya ömrü, yerel arama algoritmalarının uygulanması durumunda, uygunluğun korunmasını oldukça güçleştirmektedir. Bu durum, onarım işleminin uygulanmasını gerektirmekte ve bu işlem için ilave süreler harcanmasına neden olmaktadır. Bölüm 3.1'de anlatılan varsayımlardan ilkinde göre, batarya ömrü hem İHA'nın uçuş süresini, hem de kamyonun İHA'dan ayrı hareket ettiği süreyi sınırlamaktadır. Önerilen 2-aşamalı yaklaşımda, 2'nci aşamaya geçildiğinde kamyon rotası bilinmekte, dolayısıyla kamyonun, rotasındaki her bir

müşteriye varış ve bu müşterilerden çıkış zamanları da bilinmektedir. Bu durum, 2'nci aşamada İHA tur atamaları yapılırken, batarya süresini dikkate almayı kolaylaştırmakta; böylece, hem İHA'nın uçuş süresi, hem de kamyonun çıkış ve varış düğümleri arasındaki seyahat süresinin batarya ömrünü geçmediği turlar oluşturulmaktadır. Olurluk kısıtlarının 2'nci aşamada gayet kolay şekilde yönetilmesi ve bu aşamada çözülen MIP modelin hızlı olması, geliştirilen sezgisel yaklaşımda 2-aşamalı yapının korunmasını ve tüm kamyon rotalarının üretilmesi yerine, iyi çözüm verme potansiyeline sahip olanların üretilmesi ve yalnızca bu rotalar için en iyi İHA tur atamalarının yapılması için motivasyonumuzu oluşturmuştur.

3.3.1. Melez genetik algoritma

Önerilen melez algoritmada, ilk aşamada yine kamyon rotaları üretilmekte ve ikinci aşamada kamyonun bekleme süresini enküçükleyecek en iyi İHA turları atanmaktadır. İlk aşamada kamyonun dağıtım süresi, ikinci aşamada kamyonun bekleme süresi elde edilmekte ve ikisinin toplamı, depoya son dönen aracın dağıtım süresini vermektedir. Geliştirilen yaklaşımda, ilk aşamadaki kamyon rotaları genetik algoritma ile oluşturulmaktadır. Genetik algoritma, rotalama problemlerinde tavlama benzetiminden sonra sık başvurulan meta sezgisellerden biridir.

Evrimsel algoritmalarda, yerel çözümlere takılmamak amacıyla anakütle büyüklüğü yeterince büyük seçilmelidir. Bazı durumlarda, uygunluk fonksiyonunun hesaplanması çok maliyetli olabilir. Bu gibi durumlarda, tahmini uygunluk fonksiyonunun hesaplanmasına dayanan melez algoritmalara ihtiyaç duyulabilir. Uygunluk fonksiyonunun kestiriminde çeşitli yaklaşımlardan yararlanıldığı görülmektedir. Kim ve Cho (2001), geliştirdikleri genetik algoritmada, anakütlerdeki bireyleri k-ortalama yöntemi ile kümeleyerek her kümeye ait temsili bir bireyin uygunluk fonksiyonunu kesin olarak hesaplamaktadır. Her kümedeki diğer bireylerin uygunluk fonksiyonu ise, temsili birey ile aralarındaki mesafe dikkate alınarak tahmin edilmektedir. Benzer şekilde, Yoon ve Cho (2010) ile Han ve ark. (2015), uygunluk değerinin hesaplanmasında uygunluk kestirim fonksiyonu ile kümelemenin bir kombinasyonundan yararlanmaktadır. Yaptıkları sayısal çalışma, hem uygunluk hesaplama maliyetinin düştüğünü hem de

genetik algoritma ile benzer bir performans elde edildiğini göstermektedir. Zhao ve ark. (2016) ise bireyin uygunluk değerini, hesapladıkları bir yarıçapa sahip alan içerisindeki diğer bireylerin ortalamasını alarak hesaplamaktadır.

Genetik algoritma ile kamyon rotaları oluşturulduktan sonra, uygunluk değerinin hesaplanabilmesi için kamyonun bekleme sürelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Çünkü amaç fonksiyonu, kamyon rotasının süresi ile kamyonun bekleme sürelerinden oluşmaktadır. Bekleme sürelerinin elde edilmesi için ise Bölüm 3.2.2’de verilen matematiksel modelin çözülmesi gerekmektedir. Bu durumda, yukarıda bahsedildiği gibi uygunluk fonksiyonu çok maliyetli olacaktır. Bu nedenle her yinelemede üretilen kamyon rotaları için kamyonun yaklaşık bekleme süreleri, makine öğrenmesi kullanılarak ve uygunluk fonksiyonu kestirimi ile belirlenmekte ve yalnızca belirli sayıdaki en iyi uygunluk değerine sahip rotalar için İHA tur atamaları eniyilenmektedir. Her yinelemede, elde edilen kesin çözümler eğitim verisine eklenerek, eğitim tekrarlanmakta, bu sayede kesin uygunluk değeri ile yaklaşık uygunluk değeri arasındaki farkın, yinelemeler ilerledikçe azaltılması amaçlanmaktadır.

Benzer bir çözüm yaklaşımı, daha önce 2-aşamalı, kapasite kısıtlı tesis yerleştirme probleminde uygulanmıştır (Guo ve ark. 2017). Tesis üretiminin ve depo stok kapasitelerinin sınırlı olduğu bu problemde, sabit maliyetleri ve taşıma maliyetlerini enküçükleyecek tesis ve depo yerleşimleri ile tesislerden depolara, depolardan müşterilere ürün akışı belirlenmektedir. Guo ve ark. (2017), ilk aşamada genetik algoritma ile tesis ve depo yerleşimine karar vermekte, ikinci aşamada ise tesislerden müşterilere doğru gerçekleşen ürün akışını matematiksel model çözümü ile belirlemektedir. Algoritmayı hızlandırmak için, her aşamada matematiksel model çözmek yerine, makine öğrenmesi ile fonksiyon kestirimi yaparak yalnızca iyi olması beklenen 1’nci aşama çözümleri için kesin çözümleri elde etmektedir.

Bu tez kapsamında, kamyon rotalarının üretilmesinde genetik algoritma, fonksiyon kestiriminin eğitilmesinde ise aşırı öğrenme makinesi (extreme learning machine) kullanılmaktadır. Melez genetik algoritma Algoritma 3.3’te özetlenmekte, detayları ise alt bölümlerde anlatılmaktadır.

Eğitim verisi rassal Şekilde oluşturulmaktadır. Veri setindeki her girdi, rassal oluşturulmuş kamyon rotalarını temsil etmektedir. Kamyon rotaları üretilirken, İHA'ya atanamayacak müşterilerin kamyon rotasına atanması sağlanmaktadır. Daha sonra, her kamyon rotası için, Bölüm 3.2.2'de verilen MIP modeli çözülmekte ve her kamyon rotasındaki en iyi bekleme süreleri elde edilmektedir. Kamyon rotaları ve bu rotaların en iyi bekleme süreleri makine öğrenmesi için girdi ve hedef verimizi, dolayısıyla eğitim verisini oluşturmaktadır. Başlangıç anakütle ise anakütle büyüklüğü kadar en iyi rotanın eğitim verisinden seçilmesi ile oluşturulmaktadır. AŞırı öğrenme makinesi kullanılarak, eğitim verisi için fonksiyon kestiriminde kullanılacak ağırlıklar hesaplanmaktadır. Sonrasında çaprazlama ile belirli sayıda çocuk bireyler oluşturulmakta, belirli bir olasılıkla mutasyon uygulanmakta ve üretilen her çocuk bireyin yaklaşık uygunluk değeri, uygunluk fonksiyonu kestirimi ile hesaplanmaktadır. Uygunluk kestirimi, üretilen çocuk bireyin bekleme süresi için yapılmakta, kamyon rotasının süresi ise kesin olarak hesaplanmaktadır. Daha sonra, kesin rota süresi ve yaklaşık bekleme süresi toplamı olarak tanımlanan yaklaşık çözümler en düşük olan belirli sayıdaki çocuk birey için MIP çözümlenerek, kesin bekleme süresi ve dolayısıyla kesin çözüm değeri elde edilmektedir. Seçilen en iyi çocuk bireyler ve bunların kesin çözüm değerleri hem anakütleye, hem de eğitim verisine eklenmektedir. En iyi çocuk bireylerin anakütleye eklenmesinin ardından, eklenen çocuk sayısı kadar en kötü çözüm anakütleden atılmakta, böylece anakütlenin büyüklüğü sabit kalmaktadır. Eğitim verisi ise her yinelemede eklenen çocuk bireylerin girdi ve hedef değerleri ile birlikte büyümektedir. Yeni verinin eklendiği güncel eğitim verisi dikkate alınarak, öğrenme belirli aralıklarla tekrarlanmaktadır. Öğrenmeden sonra baŐa dönülerek çaprazlama ile yeni çocuk genler elde edilmekte ve durma kriterleri sağlanana kadar yinelemeler bu Şekilde tekrarlanmaktadır.

3.3.1.1. Genetik algoritma

Genetik algoritma, ilk olarak Holland (1975) tarafından geliştirilmiş olup, evrim mekanizmasına dayanan sezgisel bir arama tekniğidir. İyi olan bireylerin hayatta kalarak üreyip yeni nesiller oluŐturması, kötü bireylerin ise doğal seleksiyon ile elenmesi üzerine kurgulanmıŐ bir yöntemdir. Genetik algoritma operatörlerinin, ARP-İHA'da nasıl uygulandıkları alt bölümlerde ayrıntılı Şekilde anlatılmaktadır.

Algoritma 3.3. Makine öğrenmesi ile uygunluk kestirimine dayanan melez algoritma

1. Eğitim verisi (N_p) kadar rassal kamyon rotası üret.
2. Eğitim verisindeki her bireyin dağıtım süresini hesapla.
3. Eğitim verisindeki her birey için Bölüm 3.2.2'de verilen MIP'i çöz, eniyi bekleme süresini elde et.
4. Eğitim verisini eğit.
5. Eğitim verisindeki en iyi N_p rotayı, dağıtım ve bekleme süreleri ile anakütleye kopyalayarak başlangıç anakütleyi oluştur.
6. Anakütleden rassal ebeveynler seçerek N_c kadar çaprazlama gerçekleştir, N_c kadar çocuk birey üret.
7. Üretilen her çocuk bireyin dağıtım süresini hesapla.
8. Makine öğrenmesini kullanarak, üretilen her çocuk bireyin uygunluk kestirimini yap, yaklaşık bekleme sürelerini elde et.
9. P_m olasılığı ile mutasyon gerçekleştir.
10. Mutasyon sonucunda dağıtım ve yaklaşık bekleme süreleri toplamı iyileşirse mutasyonu uygula.
11. Çocuk bireylerden yaklaşık bekleme ve kesin dağıtım süresini dikkate alarak en iyi N_b bireyi seç.
12. Seçilen N_b birey için MIP çöz, kesin bekleme sürelerini hesapla.
13. Bu çocuk bireyleri anakütleye ve eğitim verisine ekle.
14. Anakütleden en kötü N_b bireyi çıkart.
15. N_{rand} kadar rassal kamyon rotası üret.
16. N_{nn} kadar kamyon rotasını, en yakın komşuluğa göre üret.
17. Üretilen N_{rand} ve N_{nn} birey için dağıtım süresini hesapla.
18. Üretilen N_{rand} ve N_{nn} birey için MILP çöz.
19. Anakütledeki en kötü $N_{rand}+N_{nn}+1$ bireyi çıkart.
20. Üretilen N_{rand} ve N_{nn} bireyi anakütleye ve eğitim verisine ekle.
21. Anakütledeki en iyi bireye yerel arama uygula.
22. Yerel arama ile elde edilen bireyi anakütleye ekle.
23. Eğitim verisini eğit.
24. Eğer yineleme sayısı N_g 'ye ulaştıysa
25. Dur.
26. Aksi takdirde
27. Adım 6'ya git.

3.3.1.1.1. Kodlama şeması

ARP-İHA'nın çözümü için önerilen genetik algorithmada, her kromozom bir kamyon rotasını temsil etmektedir. Kromozom genlerden oluşmakta ve kromozomdaki gen sayısı rassal olarak belirlenmektedir. ARP-İHA'da, herhangi bir kromozomda bulunabilecek gen sayısı için alt sınır bulunmaktadır. İHA'ya atanabilecek müşteri sayısında bir sınırlama olması, kamyona atanacak müşteri sayısını da etkilemektedir. İHA'ya

atanabilecek en büyük müşteri sayısı daha önceki bölümlerde D_{max} ile gösterilmişti. Bu durumda, herhangi bir kromozoma en az $N-D_{max}$ kadar müşteri düğümü atanmalıdır. Her kamyon rotası mutlaka depoda başlar ve depoda biter. Kodlama kolaylığı açısından, kamyon rotasının başındaki ve sonundaki depo düğümüne, kromozom yapısında yer verilmemiştir. Bu durum, algoritmayı ve hesaplamayı etkilememektedir. Önerilen genetik algoritmaya ait örnek bir kromozom gösterimi Şekil 3.5'te verilmektedir. Şekildeki kromozom, bir kamyon rotasını göstermekte olup, bu çözümde depodan hareket eden kamyon sırasıyla 3-1-6-2-9 ve 7 no'lu müşterileri ziyaret etmekte ve son olarak tekrar depoya dönmektedir.

Kamyon rotası					
3	1	6	2	9	7

Şekil 3.5. Melez genetik algoritmadaki kromozom yapısı

3.3.1.1.2. Başlangıç çözüm

Başlangıç anakütle, İHA'ya atanamayacak olan müşterileri dikkate alarak rassal şekilde oluşturulmaktadır. Bilindiği üzere, paket ağırlığı veya boyutları gibi nedenlerle, İHA tarafından ziyaret edilemeyecek müşteriler olabilir. Bu müşteriler, kamyon tarafından ziyaret edilmek zorundadır ve dolayısıyla, kamyon rotasını temsil eden her bir kromozomda bulunmak zorundadır. Bu nedenle, başlangıç anakütle oluşturulurken önce İHA atamalarına karar verilmektedir. Başlangıç anakütleyi oluşturma adımları aşağıda verilmektedir.

1. 1 ile D_{max} arasında rassal bir sayı üret, bu sayı r_d olsun. r_d , İHA'ya kaç müşteri atanacağını gösterecektir.
2. Aşağıdaki adımları r_d kez tekrarla.
 - 2.1. 1 ile ND (İHA'ya atanabilecek müşteri sayısı) arasında bir rassal sayı üret, bu sayı r_s olsun. r_s , CD 'deki (İHA'ya atanabilecek müşteriler kümesi) kaçınıcı düğümün İHA'ya atanacağını gösterecektir.
 - 2.2. İHA'ya atanabilecek müşteri kümesi CD 'den, r_s . elemanı çıkart.
 - 2.3. CD kümesindeki müşteri sayısını güncelle, $ND=ND-1$.
 - 2.4. Adım 2.1'e git.

Algoritma 3'ün 16'ncı adımında, anakütledeki bireylerin N_{mn} kadarının, en yakın komşuluğa göre üretildiği belirtilmiştir. Bu işlemde, öncelikle çözümde, İHA'ya atanacak düğüm sayısı, ardından İHA'ya atanan düğümler rassal olarak belirlenir. Daha sonra, kamyonu atanmış müşteriler, en yakın komşuluğa göre atanarak, kamyon rotası oluşturulur. Burada amaç, uzunluğu ve ziyaret edilecek müşterileri rassal olarak belirlenen, mümkün olduğu kadar kısa kamyon rotalarını anakütlede bulundurmaktır.

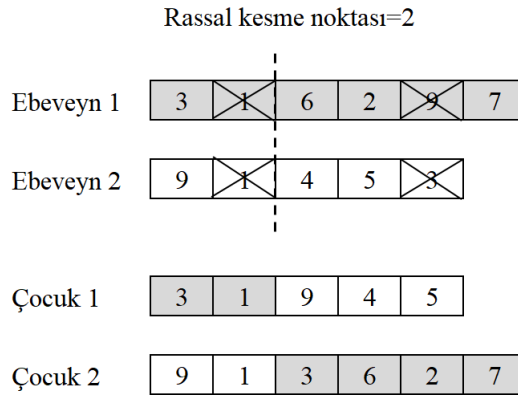
3.3.1.1.3. Çaprazlama

Çaprazlama, yeni çocuk bireyler üretmek için kullanılan bir operatördür. Önerilen algoritmada tek noktalı çaprazlama uygulanmaktadır. Buna göre rassal olarak iki farklı ebeveyn kromozom seçilir. Yine rassal olarak bir kesme noktası seçilir. Kesme noktasının solundaki genler ilk ebeveyn'den ilk çocuk kromozoma aktarılır. Daha sonra, çocuk bireye aktarılan genler, ikinci ebeveyn'den çıkartılır. Kalan genler, ikinci ebeveyn'den çocuk bireye aktarılır. Çaprazlamanın bu şekilde uygulanmasının nedeni, üretilen çocuktaki gen sayısının alt sınırın altına düşmesinin engellenmesi istenmesidir. İkinci çocuğun üretilmesi için de aynı adımlar izlenir. Çaprazlama, belirlenen sayı kadar (N_c) tekrarlanır.

Şekil 3.6'daki örnek, 10 müşterili bir ARP-İHA'da uygulanan çaprazlama yönetimini göstermektedir. Ebeveyn 1, altı genden; Ebeveyn 2 ise beş genden oluşmaktadır. Bu genler, her bir çözümde kamyonun ziyaret edeceği müşterileri ziyaret sırasıyla göstermektedir. Rassal kesme noktası 2'dir. Bu durumda, Ebeveyn 1'deki ilk iki gen, Çocuk 1'e aktarılır. Daha sonra, Çocuk 1'e aktarılan 3 ve 1 değerine sahip genler, Ebeveyn 2'den çıkartılır. Bu işlemden sonra Ebeveyn 2'de kalan sırasıyla, 9, 4 ve 5 değerine sahip genler, Çocuk 1'e aktarılır. Çaprazlamanın bu şekilde uygulanmaması, Çocuk 1'e Ebeveyn 1'den 3 ve 1, Ebeveyn 2'den 4 ve 5 değerli genlerin aktarılmasına ve Çocuk 1'in olumsuz bir çözüm olmasına neden olacaktır. Zira, 10 müşterili bir ARP-İHA'da, İHA'ya atanabilecek en büyük müşteri sayısı 5 olabileceğinden, kamyon rotasında en az 5 müşteri bulunması gerekmektedir. Çocuk 2'nin üretiminde ise, ilk iki gen Ebeveyn 2'den Çocuk 2'ye aktarılır. 9 ve 1 değerine sahip iki genin Ebeveyn 1'den çıkarılması sonucu, kalan 3, 6, 2 ve 7 değerli genler ise Ebeveyn 1'den Çocuk 2'ye aktarılır. Üretilen çocuk kromozomunun uzunluğu, rassal kesme noktasının sağ tarafının alındığı ebeveynin uzunluğu kadar olmaktadır.

3.3.1.1.4. Mutasyon

Mutasyon, genetik algoritmada, genetik çeşitliliği sağlayarak, çözümün yerel en iyi çözümlere takılmasını önlemek için kullanılmaktadır. ARP-İHA’da, problemin 2-aşamalı yapısına uygun olarak, üç farklı mutasyon operatörü kullanılmıştır. Önerilen algoritmada, çaprazlama sonucu ortaya çıkan çocuk bireye, önceden tanımlanmış olasılığa göre mutasyon uygulanır. Eğer çocuk bireye mutasyon uygulanacaksa, yine tanımlı olan olasılıklara göre hangi tip operatörün uygulanacağı belirlenir. Mutasyon sonucunda ortaya çıkan yeni kromozom için yaklaşık uygunluk fonksiyonu hesaplanarak, mutasyonun uygunluk değerini iyileştirmesi durumunda, değişiklik kalıcı hale getirilir. Aksi takdirde, mutasyon aşamasında yapılan değişiklik uygulanmaz. Kullanılan operatörler aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.6. Çaprazlama operasyonu

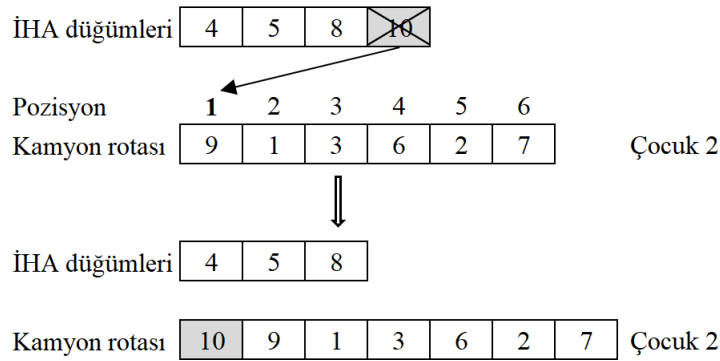
Operatör 1 (1-1 Yer değiştirme): Mutasyon uygulanacak olan kromozom üzerinde, rassal olarak iki pozisyon seçilir. İlk pozisyondaki gen diğer pozisyona, ikinci pozisyondaki gen ise ilk pozisyona yerleştirilir. Bu işlem tamamlandığında, söz konusu kamyon rotasındaki iki müşterinin yerleri değiştirilmiş olacaktır. Şekil 3.7’de, Şekil 3.6’da üretilmiş olan Çocuk 2’ye yer değiştirme operatörü uygulanmaktadır. Çocuk 2’deki 2 ve 6 no’lu pozisyonlar rassal olarak seçilmiştir. Pozisyon 2’de bulunan gen pozisyon 6’ya, pozisyon 6’daki gen ise pozisyon 2’ye taşınır.

Pozisyon	1	2	3	4	5	6
Çocuk 2	9	1	3	6	2	7
Çocuk 2	9	7	3	6	2	1

Şekil 3.7. Yer değiştirme operatörü

Operatör 2 (1 Ekleme): Bu operatör, söz konusu çözümde, atama kararlarından birini değiştirerek, İHA'ya atanmış olan müşterilerden birini, İHA'nın rotasından çıkartarak kamyona atamaktadır. Bunun için, kromozomda bulunmayan müşterilerden bir tanesi rastgele seçilir. Seçilen bu müşteri, kamyon rotasında rastgele seçilen bir pozisyona yerleştirilir. Bu işlem tamamlandığında, kromozomda bulunan gen sayısı, yani kamyon rotasındaki müşteri sayısı bir artar. Bu operatörün uygulanabilmesi için, İHA'ya birden fazla müşteri atanmış olmalıdır.

Şekil 3.8'de mutasyon uygulanacak olan birey ve bu bireyin temsil ettiği kamyon rotasının dışında kalan İHA düğümleri gözükmemektedir. Öncelikle kamyon rotasına aktarılmak üzere İHA'ya atanmış olan düğümlerden 10 no'lu düğüm rastgele seçilmiştir. Daha sonra üretilen 1 değerine sahip rassal sayı, seçilen 10 no'lu düğümün kamyon rotasında Pozisyon 1'e yerleştirileceğini göstermektedir. Sonuçta ortaya çıkan yeni çözüm Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Bu operatör, İHA düğümlerinin sayısını 3'e düşürmüştür, kamyon rotasındaki düğümlerin sayısını ise 7'ye yükseltmiştir.

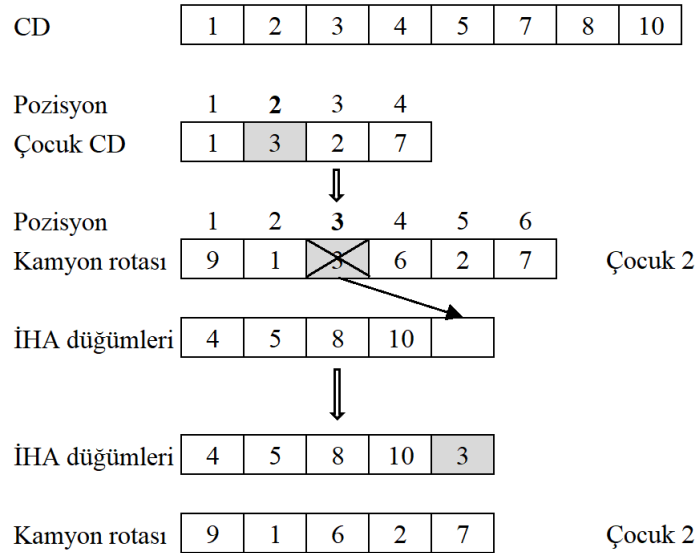


Şekil 3.8. Ekleme operatörü

Operatör 3 (1 Çıkarma): Bu operatör, söz konusu çözümde, atama kararlarından birini değiştirerek, kamyona atanmış olan müşterilerden birini, kamyon rotasından çıkartarak

İHA'ya atamaktadır. Bunun için, kromozomda bulunan genlerden bir tanesi rastgele seçilir. Seçilen bu gen, kromozomdan çıkartılır. Bu işlem tamamlandığında, kromozomda bulunan gen sayısı, yani kamyon rotasındaki müşteri sayısı bir azalır. Kamyon rotasından çıkartılacak olan genin seçiminde, seçilecek olan genin İHA'ya atanamayacak, diğer bir deyişle, kamyona atanması zorunlu olan genlerden olmamasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde, olurluk bozulacaktır. Bu operatörün uygulanabilmesi için, kamyona mümkün olan en küçük sayıdan daha fazla atama yapılmış olmalıdır. En küçük sayıda gen içeren bir kromozoma uygulandığında, kamyona atanmış olan müşteri sayısı alt sınırın altına düşeceği için olurluk bozulacaktır.

Operatör 3'ün Çocuk 2'ye uygulanmasına ait bir örnek, Şekil 3.9'da verilmektedir. Dağıtım ağında, İHA'ya atanabilecek olan düğümler *CD* kümesi ile gösterilmiştir. Kamyon rotasından çıkartılarak İHA'ya atanacak olan düğümün olurluğu bozmaması için, İHA'ya atanabilen düğümlerden seçilmesi gerekir. Bunun için öncelikle, kromozomda ve *CD* kümesinde ortak bulunan düğümler belirlenmiş ve Çocuk *CD* ile gösterilmiştir. Çocuk *CD*'de bulunan düğümlerden rastgele seçilen düğüm, 2. pozisyonda bulunan 3 no'lu düğümdür. Değeri 3 olan bu gen, Çocuk 2'den çıkartılarak İHA'ya atanır.



Şekil 3.9. Çıkarma operatörü

3.3.1.1.5. Uygunluk fonksiyonu

Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, ARP-İHA için geliştirilen 2-aşamalı yapıda, amaç değeri iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan biri kamyonun rotasını tamamlama süresi olarak ifade edilirken diğeri de kamyonun, kendi rotası üzerindeki buluşma noktalarında İHA'yı bekleme süresi olarak ifade edilmektedir. Geliştirilen melez algoritmada, uygunluk değeri, algoritmanın farklı adımlarında, yaklaşık ve kesin olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanmaktadır.

Hatırlanacağı gibi melez algoritmada, kesin çözüm algoritmasından farklı olarak, bütün olası kamyon rotalarının üretilmesi yerine iyi sonuç verme potansiyeline sahip olanlar üretilmekte ve bu rotalar üzerinde kamyonun İHA'yı bekleme süreleri elde edilmektedir. Üretilen her kamyon rotası için, bekleme sürelerini enküçükleyecek İHA tur atamalarının Bölüm 3.2.2'deki matematiksel modelin çözümü ile elde edilmesi ise uzun çözüm süreleri gerektirmektedir. Bu nedenle, genetik algoritma ile üretilen her kamyon rotası için yaklaşık bekleme süresi, fonksiyon kestirimi ile hesaplanmaktadır. Fonksiyon kestirimi için aşırı öğrenme makinesi yöntemi kullanılmakta olup, bu yöntem Bölüm 3.3.1.2'de detaylı şekilde anlatılacaktır. Yaklaşık bekleme süresi ile kamyonun dağıtım süresi, yaklaşık uygunluk değerini verecektir. Yaklaşık uygunluk değeri hesaplanan çözümlerden belli sayıdaki en küçük yaklaşık uygunluk değerine sahip çözüm için, MIP çözümü ile kesin bekleme süreleri elde edilecektir. Kesin bekleme süresi ile kamyonun dağıtım süresi ise kesin uygunluk değerini verecektir. Anakütledeki her bireyin uygunluk değeri, kesin uygunluk değeri olup, seçim işlemi, kesin uygunluk değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir.

3.3.1.1.6. Yerel Arama

Melez algoritmanın performansının artırılması amacıyla algoritma içinde yerel arama stratejisi uygulanmaktadır. Her yinelemede, en iyi çözüme Bölüm 3.3.1.1.4'te tanımlanan üç operatörden rassal olarak seçilen bir tanesi uygulanmaktadır. Her bir operatör için seçilme olasılığı belirlenmekte ve seçim, önceden belirlenmiş olasılıklar çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. Yerel arama sonucunda üretilmiş olan yeni birey, uygunluk değerinin iyileşip iyileşmediğine bakılmaksızın, anakütledeki en kötü çözümle yer değiştirerek anakütleye katılmaktadır.

3.3.1.2. Aşırı öğrenme makinesi

Önerilen melez algoritmada, genetik algoritma ile üretilen çözümlerin yaklaşık uygunluk değerinin hesaplanmasında fonksiyon kestiriminden yararlanılmaktadır. Fonksiyon kestirimi ise aşırı öğrenme makinesi ile gerçekleştirilmektedir. Aşırı öğrenme makinesi, Huang ve ark. (2006) tarafından geliştirilmiş olup, hızlı ve kolay uygulanan bir yöntem olması nedeniyle, biyomedikal, görüntü işleme, sistem modelleme, kontrol ve robotik gibi farklı alanlarda kullanımın giderek arttığı görülmektedir (Huang ve ark. 2015). Huang ve ark. (2006), geleneksel ileri beslemeli öğrenme makinelerinin yavaş çalışmalarını, bu yöntemlerde girdi ve çıktı katmanı arasındaki parametrelerin ayarlarının yinelemeli şekilde yapılmasına bağlamaktadır. Bu nedenle, ileri beslemeli ve yinelemeli olmayan aşırı öğrenme makinesini geliştirmiş ve geriye yayılım algoritması (Back Propagation Algorithm) ve destek vektör makinesi (Support Vector Machine) gibi geleneksel öğrenme makinelerinden daha hızlı çalıştığını göstermişlerdir. Aşırı öğrenme makinesini, diğer geleneksel yöntemlerden ayıran bir diğer özellik, tek gizli katmana sahip olması ve gizli katman parametrelerinin rassal olarak atanmasıdır (Huang ve ark. 2006). Bu tez kapsamında fonksiyon kestirimi için aşırı öğrenme makinesinin tercih edilme nedeni, kolay uygulanabilmesi ve yinelemeli olmaması nedeniyle hızlı çalışmasıdır. Algoritmada kullanılan gösterim (Guo ve ark. 2017) aşağıdaki gibidir:

n : girdi katmanındaki düğüm sayısı

h : gizli katmandaki düğüm sayısı

m : çıktı katmanındaki düğüm sayısı

S : eğitim verisindeki girdi sayısı

$\mathbf{w}_i = [\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in}]^T$, $1 \leq i \leq h$: gizli katmandaki i . düğüm ile girdi katmanındaki düğümleri bağlayan ağırlık vektörü

$\boldsymbol{\beta}_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{im}]^T$: gizli katmandaki i . düğüm ile çıktı katmanı düğümlerini bağlayan ağırlık vektörü

β_0 =bias parametresi

$\beta = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_h]^T$: çıktı ağırlıkları matrisi ($\beta \in R^{(h+1)*m}$)

b_i : gizli katmandaki i . düğümün eşik değeri ($b_i \in R$)

$\mathbf{x}_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}]^T$, $1 \leq j \leq S$: girdi vektörü

$\mathbf{o}_j = [o_{j1}, o_{j2}, \dots, o_{jm}]^T$, $1 \leq j \leq S$: çıktı vektörü

$\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_S]^T$: eğitim verisinin hedef matrisi ($\mathbf{T} \in R^{S*m}$)

\mathbf{H} =gizli katman çıktı matrisi ($H \in R^{S*(h+1)}$)

Algoritmanın adımları şöyledir:

1. Ağırlık vektörü \mathbf{w}_i ve bias b_i rassal olarak üretilir, $i=1, \dots, h$.
2. \mathbf{H} gizli katman çıktı matrisi üretilir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & g(\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_1 + b_1) & \dots & g(\mathbf{w}_h \mathbf{x}_1 + b_h) \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 1 & g(\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_S + b_1) & \dots & g(\mathbf{w}_h \mathbf{x}_S + b_h) \end{bmatrix}$$

3. β çıktı ağırlığı elde edilir. Bu işlemde, \mathbf{H} matrisinin Moore-Penrose tersi kullanılır.

$$\beta = \mathbf{H}^+ \mathbf{T}$$

4. Çıktı vektörü aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\sum_{i=1}^h \beta_i g(\mathbf{w}_i^T \mathbf{x}_j + b_i) + \beta_0 = \mathbf{o}_j, j = 1, \dots, S$$

Bu çalışma kapsamında, aşırı öğrenme makinesinde, aktivasyon fonksiyonu ($g(\cdot)$) olarak kosinüs fonksiyonu, $\cos(\mathbf{w}\mathbf{x}+b)$, kullanılmıştır. Kosinüs fonksiyonunun seçilme nedeni, farklı aktivasyon fonksiyonları ile yapılan ön çalışmada, yaklaşık ve kesin bekleme süreleri arasında diğer fonksiyonlara göre daha düşük farklar elde edilmesidir.

3.3.2. Sayısal çalışma

Bu bölümde, sezgisel yöntemin performansının değerlendirilmesi amacıyla literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırma sonuçlarına yer verilmiştir. Sonuçlardan önce sayısal çalışmada kullanılan parametre seçimi ile ilgili varsayımlar anlatılmıştır.

3.3.2.1. Varsayımlar

Literatürde, problem tanımı ve varsayımlar açısından, bizim çalışmamızdaki problem ile aynı problemi çalışan tek sezgisel çalışma Ponza'ya (2016) aittir. Ponza (2016), ARP-İHA'ya tavlama benzetimi metasezgiselini uygulamış, ürettiği veri seti ile performans analizini yapmıştır. Çalışmamızda geliştirilen melez genetik algoritmanın performansı, Ponza'nın (2016) ürettiği veri seti kullanılarak değerlendirilecek ve iki çalışmanın çözüm performansları arasında karşılaştırma yapılacaktır.

Sayısal sonuçlara geçmeden önce Ponza (2016) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılabilmesi için bu tez kapsamında önerilen algorithmada yapılan bir uyarlamadan bahsedilmesi gerekmektedir. Ayrılma düğümlerinde paket yüklenmesi için harcanan ve buluşma düğümlerinde batarya değişimi için harcanan servis zamanları, önerilen kesin çözüm algoritmasında ve melez genetik algorithmada ihmal edilmiştir. Ponza (2016) ise bu süreleri dikkate almıştır. Dolayısıyla her iki çalışma arasında performans karşılaştırması yapabilmek için önerilen algorithmaya servis sürelerinin dahil edilmesi gerekmektedir. Araçlar buluşma düğümünde birbirlerini bekledikleri ve bu düğümden aynı anda ayrıldıkları için, melez genetik algoritmanın matematiksel model çözüm aşamasında üretilen her bir İHA turu oluşturulurken söz konusu servis zamanları dikkate alınmaktadır. Bu amaçla, her birleşme düğümünde kamyonun bekleme süresine servis zamanları ilave edilmektedir.

Ponza'nın (2016) ürettiği örnek problemlerde müşteriler, 32,1868 km x 32,1868 km'lık bir alanda tekdüze dağılmaktadır. Kamyon hızı 56,32 km/sa, İHA hızı 80,47 km/sa, batarya ömrü 24 dk olarak kabul edilmiştir. Ayrıca servis zamanlarından ayrılma düğümünde harcanan zaman $S_L=40$ sn, birleşme düğümünde harcanan zaman $S_P=30$ sn olarak kabul edilmiştir. Mesafeler Öklit ölçeği dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Melez genetik algoritma MATLAB dilinde kodlanmış, matematiksel modeller için ILOG CPLEX Concert Teknoloji 12.6.3. kullanılmıştır. Bütün deneyler, Intel Core i7-7500U işlemciye ve 16 GB RAM'e sahip dizüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

3.3.2.2. Sonuçlar

Çizelge 3.10'da Ponza'nın (2016), 10, 50 ve 100 müşterili dağıtım ağı için ürettiği veri üzerinde, önerdiğimiz algoritma ile elde edilen sonuçlar, Ponza'nın sonuçları ve bu sonuçların karşılaştırması gösterilmektedir. Tabloda *Amaç* sütunu, indekste belirtilen yöntem (nerilen melez genetik algoritma/tavlama benzetimi) ile çalıştırılan 10 tekrardan elde edilen en iyi sonuçların ortalamasını vermektedir. T_{Eniyi} ve T_{Toplam} , sütunları ise yine indekste ki yöntem ile çalıştırılan tekrarlardaki en iyi sonucun elde edilme süresi (sn) ile toplam sürenin (sn) ortalamalarını göstermektedir. $Ama^{GSP}$, GSP zm ile elde edilen dağıtım süresini göstermektedir. İyileşme yüzdeleri ise, üç sütun olarak verilmiştir. Bunlardan ilki ($İyileşme^{MGA}$) ve ikincisi ($İyileşme^{TB}$), sırasıyla, önerdiğimiz algoritmanın ve tavlama benzetimi yönteminin, gezgin satıcı problemine kıyasla sağladığı iyileşmeyi göstermektedir. Son sütun ise, her iki yöntemin sağladığı iyileştirme arasındaki farkları göstermektedir.

Tabloda, 10 müşterili problem sonuçlarında koyu ile gösterilen sonuçlar en iyi sonuçlardır. Görüldüğü zere, MGA beş problemin dördünde en iyi sonuca ulaşmış, kalan problemde de TB'den daha iyi sonuç elde etmiştir. TB ise problemlerin nde en iyiye ulaşabilmiştir. MGA'nın ortalama zm süresi, yarım dakikadan daha kısa srmştir.

50 müşterili orta ölçekli problemlerde ise, 5 problemden nde MGA, ikisinde ise TB daha iyi sonuçlara ulaşmıştır. Her iki yöntemle de İHA destekli dağıtım, GSP zmne göre dağıtım süresinde %10'un üzerinde iyileşme sağlamıştır. 50 müşterili problemlerde MGA'nın ortalama zm süresinin yaklaşık 5 dk olduğu görülmektedir.

100 müşterili büyük boyutlu problemlerde, MGA'nın zm sürelerinin 30 dk.'ya ulaştığı, bazı problemlerde ise bu süreyi geçtiği görülmektedir. Bu durum, daha iyi sonuçlara ulaşılması için yinelemelere devam edilmesini güçleştirmektedir. Nitekim, 800 yineleme sonucunda elde edilen sonuçlar, TB'den daha uzun dağıtım süreleri vermektedir. GSP zmne göre ise ortalama olarak yaklaşık %6 daha kısa dağıtım süreleri elde edilmektedir.

Büyük boyutlu problemlerde MGA diğer yöntemlere göre daha yavaş çalışmakla birlikte, MGA'nın kolaylıkla tek kamyon ve çoklu İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptıkları senaryoya uyarlanabiliyor olması, MGA'nın bu açıdan diğer yöntemlere göre üstünlüğünü göstermektedir. Çoklu İHA senaryosunda, TB gibi yerel arama tabanlı algoritmalarda olurluğu korumak bir hayli zor olduğu için uyarılmanın MGA'daki kadar kolay olmayacağı düşünülmektedir. Nitekim, bu senaryo aynı varsayımlarla ve dağıtım sürelerinin enküçüklenmesi amacıyla ilk kez bu tez kapsamında çalışılmıştır. MGA'nın çoklu İHA problemine uyarlanması ve sayısal sonuçlar Bölüm 4'te verilmektedir.

Çizelge 3.10. Sezgisel sonuçların literatür ile karşılaştırılması

Problem	$Amaç^{MA}$	T_{Eniyi}^{MA} (s)	T_{Toplam}^{MA} (s)	$Amaç^{TB}$	T_{Eniyi}^{TB} (s)	T_{Toplam}^{TB} (s)	$Amaç^{GSP}$	$İyileşme^{MA}$ %	$İyileşme^{TB}$ %	$İyileşme^{MA-TB}$ %
010.1	5986,712	0,49	30,61	5986,712	1,07	73,62	6229,23	3,89	3,89	0,00
010.2	6394,386	3,79	29,20	6394,386	37,42	81,68	6815,79	6,18	6,18	0,00
010.3	6417,488	6,75	21,90	6585,438	56,06	134,14	8273,07	22,43	20,40	2,03
010.4	8377,917	0,78	21,64	8377,917	1,23	249,87	8515,94	1,62	1,62	0,00
010.5	8934,411	0,58	22,14	8984,151	4,47	34,26	9612,35	7,05	6,54	0,52
050.1	12414,394	212,39	318,08	12518,933	71,54	213,87	14350,67	13,49	12,76	0,73
050.2	12391,933	164,28	318,35	12475,138	91,11	208,36	14458,60	14,29	13,72	0,58
050.3	12534,728	222,55	280,61	12664,646	102,77	191,04	14318,07	12,46	11,55	0,91
050.4	13084,525	291,47	337,97	12908,182	98,72	184,85	14745,09	11,26	12,46	-1,20
050.5	12262,458	226,92	325,40	12164,831	98,72	184,85	14564,93	15,81	16,48	-0,67
100.1	19169,429	1690,94	1713,31	17974,852	247,24	267,42	19803,20	3,20	9,23	-6,03
100.2	18533,183	1734,81	1698,12	17342,184	244,04	272,35	19715,32	6,00	12,04	-6,04
100.3	18712,832	1333,70	1691,95	17181,877	240,67	265,45	19644,69	4,74	12,54	-7,79
100.4	19061,465	1628,74	1911,31	18538,033	249,87	266,75	20459,82	6,83	9,39	-2,56
100.5	18414,479	1651,60	1909,30	17404,425	287,34	312,77	19858,24	7,27	12,36	-5,09

Bu sonuçların elde edildiği tekrarlardaki parametre seçimi, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12'de verilmektedir. İlk çizelgede, 10 ve 50 müşterili problemlerin çözümünde, ikinci çizelgede ise 100 müşterili problemlerin çözümünde kullanılan parametre değerleri gösterilmektedir. Problem boyutu ile çözüm sürelerinin ciddi şekilde arttığı Çizelge 3.10'da açıkça görülmektedir. Algoritmadaki öğrenme sürecinde, yeni bireylerin kesin çözümü ile veriyi tekrar eğitmek, algoritmaya zaman açısından fazladan yük getirmektedir. Bu nedenle öğrenmenin her yinelemede tekrarlanması yerine, 20 yinelemede bir öğrenme tekrarlanmaktadır.

Çizelge 3.11. 10 ve 50 müşterili problemlerin MGA çözümünde kullanılan parametre değerleri

Anakütle büyüklüğü	(N_p)	:	50
Anakütlede en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı	(N_{nn})	:	$0,2*N_p$
Başlangıç eğitim verisinin büyüklüğü	(N_i)	:	$1*N_p$
Her yinelemede uygulanacak çaprazlama sayısı	(N_c)	:	$0,5*N_p$
Yineleme sayısı	(N_g)	:	800
Yineleme sonunda anakütlede dahil edilecek en iyi çocuk birey sayısı	(N_b)	:	5
Her yinelemede anakütlede dahil edilecek rassal oluşturulmuş birey sayısı	(N_{rand})	:	2
Her yinelemede anakütlede dahil edilecek en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı	(N_{nmb})	:	3
Mutasyon olasılığı	(P_m)	:	0,5
Gizli katmandaki düğüm sayısı	(h)	:	$2*N$

Çizelge 3.12. 100 müşterili problemlerin MGA çözümünde kullanılan parametre değerleri

Anakütle büyüklüğü	(N_p)	:	50
Anakütlede en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı	(N_{nn})	:	$0,2*N_p$
Başlangıç eğitim verisinin büyüklüğü	(N_i)	:	$1*N_p$
Her iterasyonda uygulanacak çaprazlama sayısı	(N_c)	:	$0,5*N_p$
İterasyon sayısı	(N_g)	:	800
İterasyon sonunda anakütlede dahil edilecek en iyi çocuk birey sayısı	(N_b)	:	5
Her iterasyonda anakütlede dahil edilecek rassal oluşturulmuş birey sayısı	(N_{rand})	:	1
Her iterasyonda anakütlede dahil edilecek en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı	(N_{nmb})	:	2
Mutasyon olasılığı	(P_m)	:	0,5
Gizli katmandaki düğüm sayısı	(h)	:	$2*N$

4. ÇOKLU İHA DESTEKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ

Bölüm 3'te çalışılan ARP-İHA, tek kamyon ve tek İHA'nın koordinasyonunu incelemektedir. Oysa ki, ARP-İHA için tasarlanan dağıtım kamyonunun birden fazla İHA'yı taşıması ve birden fazla İHA ile eşzamanlı dağıtım yapması, gerçek hayatta uygulanabilecek bir senaryodur. Dolayısıyla, bu senaryonun da operasyonel açıdan değerlendirilmesi gerekmektedir. Tek kamyon ve birden fazla İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptığı problem, çalışmamızın bundan sonraki kısmında "Çoklu İHA Destekli Araç Rotalama Problemi" olarak adlandırılacak ve "ARP-mİHA" olarak kısaltılacaktır.

4.1. Problem Tanımı

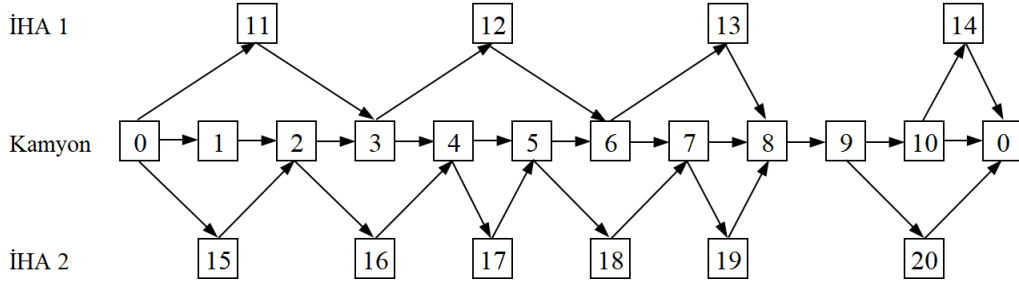
ARP-mİHA'da, araç filosu, kamyon ve İHA olmak üzere iki farklı araç tipinden oluşmakta ve filo büyüklüğü $M+1$ ile ifade edilmektedir. M , kamyonun üzerinde aynı anda taşınabilen enbüyük İHA sayısıdır. Tıpkı ARP-İHA'da olduğu gibi, İHA'lar, kamyon ile birlikte veya kamyonun ayrı hareket edebilmektedir. İHA'lar, kamyonun sadece müşteri lokasyonunda yeni bir uçuş için ayrılmakta, kamyonun ayrıldıktan sonra pil ömrü nedeniyle tek bir müşteri ziyaret ederek, bu müşteriden farklı bir müşteri lokasyonunda kamyonla tekrar buluşmak zorundadır. İHA'ların, her uçuştan önce bataryaları yenilenir ve bir sonraki müşterinin paketi yüklenir. İHA'dan ayrılan kamyon bu arada bir/birden fazla müşteriyi ziyaret edebilir. Bu sırada, kamyonun daha önce ayrılmış olan İHA'lardan biri/birkaçı/tamamı kamyonla buluşabilir veya kamyonun üzerinde seyahat etmekte olan diğer İHA'lar kamyonun ayrılabilir. İHA'lar, birbirinden bağımsız hareket etmektedir. Diğer bir deyişle, her bir İHA, bataryasının yenilenmesi ve paketinin yüklenmesi için kamyon ile buluşmak, gerektiğinde kamyonu beklemek zorundadır. Fakat İHA'lar arasında, birbirlerini beklemeyi gerektirecek herhangi bir durum söz konusu değildir. Kamyon, herhangi bir düğümde, o düğümde buluşması gereken tüm İHA'lar gelene kadar beklemek zorundadır. Dolayısıyla, ayrılma ve buluşmanın gerçekleşeceği bir düğümde, araçların varış sırasına göre farklı kalkış senaryoları söz konusudur. 2 İHA'lı bir örnek üzerinde, her bir varış senaryosundaki kalkışlar aşağıdaki gibidir:

Senaryo 1 (Kamyon, İHA 1, İHA 2): Bu senaryoda, buluşma düğümüne önce kamyon gelir, ardından sırayla İHA 1 ve İHA 2 gelmektedir. Kamyon, İHA 1'in bataryasını değiştirir, sonraki müşterinin paketini yükler. İHA 1, bu düğümde yeni bir uçuş için havalanacaksa, İHA 2'yi beklemeden uçuşuna başlar. Kamyon ise, bulunduğu düğümde İHA 2'yi beklemek zorundadır. Bu düğümüne gelen İHA 2'nin hizmeti tamamlandıktan sonra (batarya değişimi vs.), kamyon ve İHA 2 aynı anda hareket ederler.

Senaryo 2 (İHA 1, Kamyon, İHA 2): Bu senaryoda, buluşma düğümüne önce İHA 1 gelir. İHA 1, bataryasının değişimi ve sıradaki müşterisinin paketinin yüklenmesi için, kamyonu beklemek zorundadır. Ancak kamyonun gelişinden sonra yeni bir uçuş için havalanabilir. İHA 1'in havalanmasından sonra, kamyon beklemeye devam eder. İHA 2 geldikten sonra, tıpkı Senaryo 1'de olduğu gibi, kamyon ve İHA 2, söz konusu düğümde aynı anda ayrılırlar.

Senaryo 3 (İHA 1, İHA 2, Kamyon): Bu senaryoda ise kamyon, İHA'lardan sonra gelmektedir. Bu durumda, her iki araç da kamyonu beklemek zorundadır. Kamyon geldikten sonra, her iki İHA'nın bataryası değiştirilir, paketleri yüklenir ve araçların tamamı aynı anda hareket ederler.

Bu problemde amaç, dağıtımın tamamlanma süresini kısaltmaktır. Bölüm 3.1'de yapılan varsayımların tamamı, ARP-mİHA için de geçerli olmaktadır. Şekil 4.1'de, 2 İHA'lı, 20 müşterili ARP-mİHA'ya ait örnek bir çözüm gösterilmektedir. Bu örnek çözümde, araçlar depodan ayrı ayrı çıkmaktadır. İHA 1, sırasıyla, 0-11-3, 3-12-6, 6-13-8 ve 10-14-0 uçuşlarını gerçekleştirmektedir. İHA 2, sırasıyla, 0-15-2, 2-16-4, 4-17-5, 5-18-7, 7-19-8 ve 9-20-0 uçuşlarını gerçekleştirmektedir. Depodan hareket eden kamyon ise, sırasıyla, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 no'lu müşterileri ziyaret etmektedir. 8 no'lu müşteriden araçların birlikte, yani her iki İHA'nın kamyon üzerinde çıktıkları görülmektedir. 9 no'lu düğümde, İHA 2, kamyonun ayrılarak 9-20-0 turu için havalanır. Kamyon ve İHA 1 birlikte hareket etmeye devam ederler. 10 no'lu düğümüne geldiklerinde, bu kez İHA 1, 10-14-0 turu için havalanır. Araçlar, depoya ayrı ayrı gelirler.



Şekil 4.1. ARP-2İHA çözümü için bir örnek

4.2. Kesin Çözüm Algoritmasının Çoklu İHA'ya Uyarlanması

Bu bölümde, ARP-İHA için geliştirilen 2-aşamalı yinelemeli kesin çözüm algoritması, tek kamyon ve birden fazla İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptıkları dağıtım problemine uyarlanacaktır.

ARP-İHA'da, 2-aşamalı algoritmanın ilk aşamasında kamyon rotası ve dolaylı olarak da İHA'ya atanan müşteri düğümleri belirlenmektedir. Birinci aşamada, kamyon rotasının belirlenmesi ile kamyonun dağıtım süresi de bilinmektedir. Fakat, İHA turlarının neden olabileceği beklemler, kamyonun dağıtım süresinin, birinci aşamada belirlenenden daha fazla olmasına neden olacaktır. Bu durumda, kamyon rotası, birinci aşamada belirlenenden daha uzun bir sürede tamamlanacaktır. Bu nedenle ikinci aşamada, ilk aşamada belirlenmiş olan kamyon rotası ve İHA düğümleri dikkate alınarak kamyonun bekleme sürelerini minimize edecek şekilde en iyi İHA tur atamaları yapılmaktadır. Algoritma, en küçük kamyon rotası ile başlamakta ve yinelemeli şekilde alt ve üst sınırların iyileştirilmesi ile devam etmektedir. Yerel alt sınır ile bütünsel üst sınır arasındaki farkın kapanması ile mevcut en iyi çözümden daha kısa bir kamyon rotası elde edilemeyeceği için algoritma sonlandırılmaktadır.

Görüldüğü gibi, geliştirilen 2-aşamalı yinelemeli kesin çözümün algoritmasının ilk aşaması İHA sayısından bağımsız olup, sadece kamyon rotası ile ilgilenmektedir. İkinci aşamaya geçildiğinde ise, İHA turlarını belirleyen matematiksel modele ilave kısıtlar getirilmesi ile çoklu İHA tur atamalarının yapılması mümkündür. ARP-mİHA'nın çözümü için, Bölüm 3.2.1 ve Bölüm 3.2.3'te önerilen 2-aşamalı yinelemeli kesin çözüm

algoritmalarında, matematiksel model dışında herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duyulmamaktadır.

Kamyonun tek bir İHA ile koordinasyonu söz konusu olduğunda, bekleme durumu yalnızca buluşma noktasında meydana gelebileceği için kamyon rotasındaki müşteriler ile depodaki bekleme zamanlarının dikkate alınması yeterlidir. Kamyon, birden fazla İHA ile koordinasyonu sağlamak zorunda kaldığında ise durum biraz daha karışık hale gelmektedir. Zira, bekleme gerçeğiyle buluşma noktaları, diğer bazı İHA turlarında ara düğümlere karşılık gelebilmektedir. Şekil 4.1’de verilen örnek çözüme dikkatli bakıldığında, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 no’lu düğümlerde, kamyon bir İHA ile buluşurken diğer İHA uçuşuna devam etmektedir. Söz konusu düğümlerde meydana gelecek kamyon bekleme süreleri, kamyonun diğer İHA ile ayrılma ve buluşma düğümleri arasındaki seyahat süresini uzatacaktır. Bu durum, diğer İHA’nın batarya ömrü dikkate alındığında herhangi bir olumsuzluğa neden olmamalıdır. Örneğin, kamyonun, 2 no’lu düğümdeki bekleme süresi nedeniyle, İHA 1’in 0 no’lu düğümden kalkışı ile kamyonun 3 no’lu düğüme gelişi arasındaki süresi, İHA’nın batarya ömründen büyük olmamalıdır. Çünkü kamyon, İHA 1’in bataryası tükenmeden 3 no’lu düğümden bu araç ile buluşmalıdır. Bölüm 3.2.2’de verilen matematiksel model, birden fazla İHA’nın turlarını eniyileyecek şekilde aşağıdaki gibi değiştirilmektedir. Modelde kullanılan gösterim, Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

$$(Z) \quad \min t \max_{N+1}^0 \quad (4.1)$$

$$\sum_{v=1}^M \sum_{p \in P_s} a_{ip} x_p^v = 1, \quad i \in D_s \quad (4.2)$$

$$\sum_{p \in P_s} f_{ip} x_p^v \leq 1, \quad i \in C \cup \{0\} \setminus D_s, v = 1, 2, \dots, M, \quad (4.3)$$

$$\sum_{p \in P_s} l_{ip} x_p^v \leq 1, \quad i \in C \cup \{N+1\} \setminus D_s, v = 1, 2, \dots, M, \quad (4.4)$$

$$\sum_{p \in P_s} f_{m_k p} x_p^v + \sum_{p \in P_s} l_{m_k p} x_p^v \leq 2 \left(1 - \sum_{p \in P_s} f_{m_i p} l_{m_j p} x_p^v \right), \quad i = 0, 1, \dots, n_s - 1, \quad (4.5)$$

$$j = i + 2, \dots, n_s + 1, v = 1, 2, \dots, M, k \in H, H = \{h | i < h < j\}, \quad i \neq j$$

$$t_{m_{j+1}}^v \geq tmax_{m_j}^v + dist_{m_{j+1}m_j}, \quad j = 0, \dots, n_s, v = 0 \quad (4.6)$$

$$t_{m_j}^v \geq tmax_{m_i}^v + d_p \sum_{p \in P_s} f_{m_i p} l_{m_j p} x_p^v, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, i < j, i \cup 0, \quad (4.7)$$

$$v = 1, 2, \dots, M,$$

$$tmax_{m_j}^k \geq t_{m_j}^v, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, k = 0, v = 1, 2, \dots, M \quad (4.8)$$

$$tmax_{m_j}^v \geq t_{m_j}^v, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, v \in V \quad (4.9)$$

$$tmax_{m_j}^v \geq t_{m_j}^k, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, k = 0, v = 1, 2, \dots, M \quad (4.10)$$

$$tmax_0^v = 0, \quad v \in V \quad (4.11)$$

$$t_{m_j}^k - tmax_{m_i}^v \leq E + M \left(1 - \sum_{p \in P_s} f_{m_i p} l_{m_j p} x_p^v \right), \quad (4.12)$$

$$j = 1, \dots, n_s + 1, i < j, i \cup 0, k = 0, v = 1, 2, \dots, M$$

$$x_p^v \in \{0, 1\}, \quad p \in P_s, v = 1, 2, \dots, M \quad (4.13)$$

$$t_{m_j}^v \geq 0, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, v \in V \quad (4.14)$$

$$tmax_{m_j}^v \geq 0, \quad j = 0, 1, \dots, n_s + 1, v \in V \quad (4.15)$$

Çoklu İHA senaryosunda, amaç fonksiyonu depoya en son gelen aracın geliş zamanı olacaktır. Kamyon, bir düğümünden hareket etmek için aynı düğümün buluşma noktası olduğu tüm İHA'ların gelmesini beklemek zorundadır. Bu nedenle amaç fonksiyonu, kamyonun depodan çıkabileceği en erken zamanın enküçüklenmesi olarak ifade edilmektedir (Denklemler 4.1). Problemdaki tur atamalarının olurlu atamalar olabilmesi için birtakım şartlar sağlanmalıdır. Bunlardan ilki Denklem 4.2'de verilmektedir. Denklemden de anlaşılacağı üzere, birinci aşamada İHA'ya atanmış olan her bir müşteri

yalnızca bir İHA'ya atanmak zorundadır. Ayrıca, kamyon rotasındaki depo dahil her bir düğüm, her bir İHA'nın rotasındaki en fazla bir İHA turunun başlangıç düğümü olarak seçilebilir (Denklem 4.3). Bu düğüm, diğer İHA'lara atanan turlarda başlangıç, bitiş veya ara düğüm olarak bulunabilir. Benzer şekilde, kamyon rotasındaki depo dahil her bir düğüm, her bir İHA'nın rotasındaki en fazla bir İHA turunda bitiş düğümü olarak seçilebilir (Denklem 4.4). İHA'ya olurlu tur atamaları yapılabilmesi için gerekli diğer bir kısıt Denklem 4.5'te verilmektedir. Bu kısıt, her bir İHA'nın bir turu bitirmeden başka bir tura başlamamasını garanti etmektedir. Öyle ki, kamyon rotasına n_s adet müşteri atanmış olsun. Kamyon rotasının i . pozisyonundaki müşteride başlayan ve j . pozisyonundaki müşteride biten bir İHA turu seçiliyor ise, bu iki pozisyon arasında herhangi bir k pozisyonunda bulunan müşteride başlayan veya biten hiçbir İHA turu seçilemez. Denklem 4.6, kamyonun, rotasındaki j . pozisyonda bulunan düğümden hareket ederek sonraki düğüme geliş zamanını hesaplamaktadır. v aracına, i . pozisyondaki düğüme başlayıp, j . pozisyondaki düğüme biten bir tur atanması halinde, j pozisyonuna varış zamanı, i pozisyonundan kalkabileceği en erken zamana, uçuş süresi eklenerek hesaplanmaktadır (Denklem 4.7). Kamyon, j pozisyonundaki düğümden çıkmak için her bir İHA'nın bu düğüme gelişini beklemelidir (Denklem 4.8). Araçların herhangi bir düğümden çıkış zamanı, bu düğüme geliş zamanından küçük olamamaktadır (Denklem 4.9). İHA'lar, kamyon ile bir araya gelmeden, kamyon rotasındaki herhangi bir düğümden yeni bir uçuş için hareket edememektedir. Dolayısıyla, bu düğümden çıkabilmek için, kamyonun bu düğüme gelişini beklemelidir (Denklem 4.10). Araçlar, depodan aynı anda ve 0 zamanında çıkmaktadır. Herhangi bir İHA, kamyon rotasındaki i . pozisyonda başlayıp j . pozisyonda biten bir uçuş gerçekleştirdiğinde, bataryası tükenmeden, kamyon ile buluşmalıdır (Denklem 4.12). İHA, i . pozisyondaki düğümden uçuşuna başladığında, kamyon başka bir İHA için aynı düğüme beklemeye devam ediyor olabilir. İHA, buluşma noktasına kamyondan önce vardığında havada kamyonu beklemek zorundadır. Bu nedenle, İHA'nın uçuşunun batarya ömründen kısa olması yeterli değildir. İHA'nın kalkışı ile kamyonla buluşması arasında geçen sürenin, diğer bir deyişle havada kaldığı sürenin, batarya ömründen kısa olması gerekmektedir. Bu kısıt, kamyonun, söz konusu İHA ile ayrılma ve birleşme düğümleri arasındaki seyahat süresini de sınırlandırmaktadır. Denklem 4.13, İHA'lara tur atamaları için değişken tanımını göstermektedir. Araçların, kamyon rotasındaki düğümlere geliş zamanları için karar

değişkeni tanımları Denklem 4.14'te verilmektedir. Araçların, kamyon rotasındaki düğümlerden çıkış zamanları için karar değişkeni tanımları Denklem 4.15'te verilmektedir.

Çizelge 4.1. ARP-mİHA'nın dağıtım süresini enküçükleyen matematiksel modelde kullanılan gösterim

i, j	: düğüm indeksleri
p	: İHA turu indeksi
v	: araç indeksi
s	: yineleme indeksi
C	: müşteri kümesi
V	: araç kümesi (kamyon ve İHA'lar, $M+1$)
D_s	: s numaralı yinelemede İHA'ya atanan müşterilerin kümesi
P_s	: s numaralı yinelemede İHA'nın gerçekleştirebileceği turların kümesi
d_p	: p alt turun tamamlanma süresi
$dist_{ij}$: kamyonun, i ve j düğümleri arasındaki seyahat süresi
f_{ip}	: p turu, i düğümü ile başlıyorsa 1, aksi takdirde 0
a_{ip}	: p turunda, İHA i müşterisine teslimat yapıyorsa 1, aksi takdirde 0
l_{ip}	: p turu, i düğümü ile bitiyorsa 1, aksi takdirde 0
D_{max}	: İHA'ya atanabilecek en fazla müşteri sayısı
N	: dağıtım ağındaki müşteri sayısı
M	: dağıtım ağındaki İHA sayısı
E	: İHA'nın bataryası bitmeden havada kalabilme süresi (batarya ömrü)
m_k	: kamyon rotasındaki k . pozisyona atanan müşteri
n_s	: s . yinelemede kamyon rotasına atanmış müşteri sayısı
$\{0, N+1\}$: başlangıç ve bitiş noktası olarak depo
x_p^v	: p turu v numaralı İHA'ya atanırsa 1, aksi takdirde 0
t_i^v	: v numaralı aracın kamyon rotasındaki i . düğüme geliş zamanı (0 ve $N+1$ numaralı düğümler, depodan çıkış ve depoya dönüşü temsil etmektedir)
$tmax_i^v$: v numaralı aracın kamyon rotasındaki i . düğümden en erken çıkış zamanı (0 ve $N+1$ numaralı düğümler, depodan çıkış ve depoya dönüşü temsil etmektedir)

4.3. Melez Genetik Algoritmanın Çoklu İHA'ya Uyarlanması

Bölüm 2'de açıklandığı gibi, ARP-mİHA'nın araştırıldığı az sayıda çalışma bulunmaktadır. Wang ve ark. (2016) ve Poikonen ve ark. (2017), bu problemi teorik açıdan incelemiş ve en kötü senaryo analizlerini yapmıştır. Problemin çözümüne dair teorik sınırlar elde edilmesi, İHA'nın dağıtımda kullanılmasının faydalarını ortaya çıkarmak açısından önemlidir. Ancak problemin çözümü için çeşitli yaklaşımların

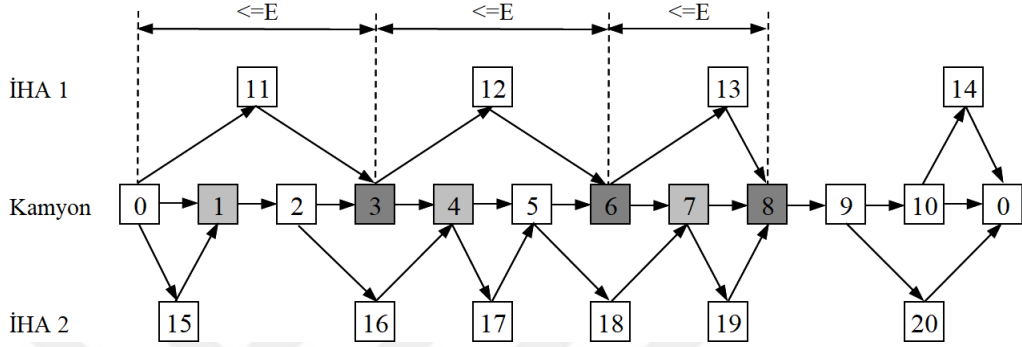
geliştirilmesi de gerekmektedir. Pugliese ve Guerriero (2017), ARP-İHA'nın zaman pencereli, çoklu kamyon ve çoklu İHA senaryosu için dağıtım maliyetlerini enküçükleyen bir MIP önermektedir. Önerilen modelin, iki kamyon ve her aracın taşıdığı 1'er İHA ile 5 ve 10 müşterili dağıtım problemlerini çözdüğü gösterilmiş, dağıtımda İHA'ların beklenen ekonomik avantajı sağlamayacağı belirtilmiştir. Ortalama paket teslim sürelerini enküçüklemek amacıyla, Daknama ve Kraus (2017), m kamyon ve her bir kamyonun taşıdığı n adet İHA'nın eşzamanlı dağıtım yaptığı ARP-mİHA için ilk ve bilindiği kadarıyla tek sezgisel yaklaşımı önermektedir. Daknama ve Kraus (2017), yaptığı çalışmada iç içe geçmiş bir sezgisel yaklaşım uygulamaktadır. Öncelikle tüm müşteriler GSP'ye dayanan bir sezgisel yaklaşımla kamyonlara atanmaktadır. Daha sonra, yerel arama yardımıyla kamyon rotalarından İHA turları oluşturulmaktadır. En son, tüm araçlar arasında uygulanan yerel arama algoritması ile daha geniş bir alanda değişim gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, problemdeki kamyon sayısının bir olarak seçilmesi ile ARP-mİHA'ya da uygulanabilir.

Daknama ve Kraus (2017), söz konusu çalışmada, bizim çalışmamızda benimsenen varsayımlardan farklı varsayımlarda bulunmaktadır. Öncelikle, Daknama ve Kraus (2017), batarya değişim politikası yerine batarya şarj politikasını uygulamaktadır. Buna göre, İHA'nın her uçuşundan sonra, bataryası yeni/ dolu bir batarya ile değiştirilmek yerine belli bir süre şarj edilmektedir. Bataryanın şarj edildiği süre boyunca, İHA, kamyon üzerinde taşınmaktadır. Çalışmada, uzunluğuna bakılmaksızın, İHA uçuşunun tamamlanmasının ardından birlikte seyahat edilen ilk ayrıt süresince bataryanın tamamının dolduğu kabul edilmektedir. Bunun gerçekçi bir varsayım olmadığı açıktır. Ayrıca, batarya ömrü yalnız İHA uçuşunda dikkate alınmakta, kamyonun seyahatini hiçbir şekilde kısıtlamamaktadır. Bölüm 3.1'de değinilen varsayımlardan ilki ise, İHA'nın uçuşunun başladığı düğümden hareket eden kamyonun, İHA'nın bataryası bitmeden, uçuşun bittiği düğüme varışını zorunlu hale getirmektedir. Bu varsayım, Daknama ve Kraus (2017) tarafından geliştirilen yerel arama tabanlı sezgisel yaklaşımın, Bölüm 4.1'de tanımlanan ARP-mİHA'ya uygulanmasını güçleştirmektedir. Çünkü, söz konusu çalışmada uygulanan yerel aramada, yapılan herhangi bir değişiklik, bu değişikliği kapsayan İHA turu, batarya ömründen kısa olduğu müddetçe olurluğu bozamaz. Yerel arama bu tez kapsamında çalışılan ARP-mİHA'ya uygulandığında ise,

olurluğu zincirleme şekilde bozabileceği gibi uygunluk değerinin hesaplanması da bir hayli maliyetli olacaktır.

Şekil 4.1’de gösterilen örnek çözüm üzerinde uygulanacak bir değişikliğin, olurluğu nasıl bozabileceği Şekil 4.2’de üzerinde anlatılmaktadır. Şekil 4.1’de gösterilen çözümde İHA 2’ye atanan 0-15-2 turu, Şekil 4.2’de 0-15-1 olarak değiştirilmiştir. Bu durumda, bu yeni turdaki kamyon rotasının (0-1), eski rotaya (0-1-2) göre bir miktar azalacağı açıktır. 0-15-2 turunun sonunda, İHA bekliyor ise (kamyon 2 no’lu düğüme İHA 2’den daha sonra geliyorsa), 0-15-1 turunun sonunda kamyonun İHA’yı bekleme olasılığı; 0-15-2 turunun sonunda kamyon İHA’yı bekliyor ise bu bekleme süresinin artma olasılığı söz konusu olup, bu durum 0-15-1 uçuşunun süresine bağlıdır. 1 no’lu düğüme kamyonun bekleme süresinde meydana gelecek olası bir artış, bu düğümün açık gri ile renklendirilmesi ile gösterilmektedir. Bu düğümdeki artış, kamyonun, 0 ve 3 no’lu düğümler arasındaki seyahat süresini arttıracaktır ve burada olurluğun sorgulanmasına neden olacaktır. Zira, Şekil 4.1’deki çözümde batarya ömründen küçük/ eşit olan bu yol, Şekil 4.2’de, 1 no’lu düğümdeki bekleme süresinden dolayı batarya ömrünü aşıyor olabilir. Önceki durumda 3 no’lu düğüme kamyon bekliyor ise, 0-3 no’lu düğümler arasındaki seyahat süresinin uzaması, 3 no’lu düğümdeki bekleme süresinin azalmasına neden olacaktır. Bu durum, Şekil 4.2’de 3 no’lu düğümün koyu griyle renklendirilmesi ile gösterilmektedir. Benzer şekilde, 3 no’lu düğümdeki bekleme süresinde meydana gelecek azalış, 4 no’lu düğümdeki bekleme süresinde artışa; bu artış, 6 no’lu düğümdeki bekleme süresinde azalışa; 6 no’lu düğümdeki azalış, 7 no’lu düğüme artışa; son olarak da, 7 no’lu düğümdeki artış, 8 no’lu düğüme azalışa neden olacaktır. 4 ve 7 no’lu düğümlerde, önceki durumda kamyon bekliyor ise, yeni durumda da bekleme sürelerinde artış olması kaçınılmazdır. İHA 2’nin beklemesi durumunda ise İHA 2 yerine kamyonun bekleme durumuna geçme olasılığı bulunmaktadır. Bu, kamyonun rotası boyunca ilgili düğümlerdeki azalışa bağlı olarak değişecektir. 4 no’lu düğümdeki artış, 3 ve 6 no’lu düğümler arasındaki seyahat süresinin, 7 no’lu düğümdeki artış ise 6 ve 8 no’lu düğümler arasındaki seyahat süresinin artışına neden olacaktır. Bu durumda, kamyonun, 3-6 düğümleri ile 6-8 düğümleri arasındaki mesafeyi, batarya ömrü dolmadan tamamlayamama riski ortaya çıkacaktır. Bunun gerçekleşmesi durumunda ise olurluk bozulacaktır. Üstelik, olurluk tek bir turda bozulabileceği gibi, üç turda birden de

bozulabilir. Görüldüğü üzere, İHA 2'ya atanan tek bir turun (0-15-2), yalnızca buluşma düğümünün değiştirilmesi bile olurluğun zincirleme bir etki ile bozulmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, olurluğun korunması durumunda bile, uygunluk değerinin hesaplanması için, söz konusu değişiklikten etkilenen tüm düğümlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu da uygunluk fonksiyonunun maliyetini önemli ölçüde arttıracaktır.



Şekil 4.2. Örnek bir çözümde yapılan değişikliğin etkileri

Dağıtımda kullanılacak İHA sayısındaki artış ile birlikte, bu tez kapsamında Bölüm 3.1'de kabul edilen varsayımlar altında yerel arama tabanlı sezgisellerin uygulanmasında olurluğun bozulacağı ve kontrolünün zorlaşacağı açıkça görülmektedir. Bölüm 3.3'te önerilen makine öğrenmesi ile fonksiyon kestirimine dayanan melez genetik algoritma ise, ilk aşamada kamyon rotasına karar verip, İHA uçuşlarını 2'nci aşamada ve kesin olarak belirlediği için, mevcut varsayımlar altında ARP-mİHA'nın çözümüne uyarlanmaya elverişli bir yapıya sahiptir. Bölüm 3.3'te önerilen melez genetik algoritmanın ARP-mİHA'ya uygulanabilmesi için gerekli tek değişiklik, algoritmanın 2'nci aşamasında çözülen matematiksel modelin çoklu İHA tur atamalarına uyarlanmasıdır. Bu uyarlama, Bölüm 4.2'de verilmiştir.

Hatırlanacağı üzere, Bölüm 3.3.2'de paylaşılan sayısal çalışmada, önerilen melez algoritmanın sonuçları, Ponza (2016) tarafından önerilen tavlama benzetimi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın yapılabilmesi için, algoritmadaki matematiksel modele servis zamanları dahil edilmiştir. ARP-mİHA'nın orta büyüklükteki problemlerde vereceği çözümlerin ARP-İHA çözümleri ile karşılaştırılabilmesi için ARP-mİHA'ya da servis zamanlarının dahil edilmesi gerekmektedir. Servis zamanları, İHA

yeni bir uçuşa başlamadan önce müşteri paketinin İHA'ya yüklenmesi ve uçuş tamamlandığında İHA'nın bataryasının değiştirilmesi için gereken zamandan oluşmaktadır. Servis zamanlarının ARP-mİHA'ya dahil edilmesi, tekli İHA versiyonundaki kadar basit olmayıp matematiksel modeldeki bazı kısıtlarda yeni düzenlemeler yapmayı gerektirmektedir. Bölüm 4.2'de verilen denklemlerden 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.11 ve 4.12'de herhangi bir değişikliğe gerek yoktur. Bu kısıtların çoğu, olurlukla ilgili kısıtlardır. Araçların herhangi bir düğüme geliş ve herhangi bir düğümden ayrılışı ile ilgili olan diğer kısıtlar ise, araçların arasındaki eşzamanlamayı da kontrol ettiğinden aşağıdaki şekilde değiştirilmesi gerekmektedir:

$$t_{m_{j+1}}^k \geq tmax_{m_j}^k + dist_{m_{j+1}m_j} + S_L \sum_{p \in P_s} f_{m_{j p}} x_p^v, \quad j = 0, \dots, n_s, \quad (4.16)$$

$$k = 0, v = 1, \dots, M$$

$$t_{m_j}^v \geq tmax_{m_i}^v + (d_p + S_L) \sum_{p \in P_s} f_{m_i p} l_{m_j p} x_p^v, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, i < j, \quad (4.17)$$

$$i \cup 0, v = 1, 2, \dots, M$$

$$tmax_{m_j}^k \geq t_{m_j}^v + S_R \sum_{p \in P_s} l_{m_j p} x_p^v, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, k = 0, v = 1, 2, \dots, M \quad (4.18)$$

$$tmax_{m_j}^v \geq t_{m_j}^v + S_R \sum_{p \in P_s} l_{m_j p} x_p^v, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, v \in V \quad (4.19)$$

$$tmax_{m_j}^v \geq t_{m_j}^k + S_R \sum_{p \in P_s} l_{m_j p} x_p^v, \quad j = 1, \dots, n_s + 1, k = 0, v = 1, 2, \dots, M \quad (4.20)$$

Bölüm 4.2'deki Denklem 4.6, Denklem 4.16'daki gibi değiştirilmektedir. Bu denklemde kamyonun, rotasındaki j . pozisyonda bulunan düğümden hareket ederek sonraki düğüme geliş zamanı hesaplanmaktadır. j pozisyonundaki düğümden, herhangi bir uçuş başlamışsa, S_L kadar bir servis zamanı harcanacaktır. v aracına, i . pozisyonundaki düğümden başlayıp, j . pozisyonundaki düğümden biten bir tur atanması halinde, j pozisyonuna varış zamanı, i pozisyonundan kalkabileceği en erken zamana, uçuş süresi eklenerek hesaplanmaktadır. Kalkış düğümünde S_L kadar zaman harcanacaktır (Denklem 4.17). Kamyon, j pozisyonundaki düğümden çıkmak için bu düğümden buluşacağı her bir İHA'nın bu

düğümüne gelişini beklemelidir (Denklem 4.18). Kamyon, İHA'ların gelişi ile birlikte S_R zamanı harcandıktan sonra bu düğümden ayrılabilir. Araçların herhangi bir düğümden çıkış zamanı, bu düğüme geliş zamanından küçük olamaz (Denklem 4.19). j pozisyonundaki düğümden buluşma gerçekleşiyorsa, bu düğümden ayrılma zamanına S_R süresi ilave edilmelidir. İHA'lar, kamyon ile bir araya gelmeden, kamyon rotasındaki herhangi bir düğümden yeni bir uçuş için hareket edememektedir. Dolayısıyla, bu düğümden çıkabilmek için, kamyonun bu düğüme gelişini beklemeli ve buluştuktan sonra S_R kadar zaman geçirmelidir (Denklem 4.20).

4.4. Sayısal Çalışma

ARP-mİHA'nın değerlendirilmesi amacıyla, örnek problemler kamyonla eşzamanlı dağıtım yapan 2 ve 3 İHA senaryosu için çözülmüş olup, bu çalışma iki bölüm halinde sunulmaktadır. İlk bölümde, örnek problemlerin kesin çözümleri ve çeşitli çözüm istatistikleri verilmektedir. İkinci bölümde ise, önerilen melez genetik algoritma ile elde edilen sezgisel çözümler paylaşılmaktadır.

4.4.1. Kesin sonuçlar

Sayısal çalışma için gereken parametreler, Bölüm 3.2.4.1'de belirlenmiş olan parametrelerle aynıdır. Yalnızca, ARP-İHA için üretilen örnek problemlere, daha fazla müşteri içeren yeni problemler ilave edilmiştir. Söz konusu yeni problemler, daha önce olduğu gibi, x ve y koordinatları, 0 ve 10 km arasında tekdüze dağılacak şekilde rassal oluşturulmuştur. Kamyon hızının 40 km/sa, İHA hızının 56 km/sa, batarya ömrünün 20 dk olduğu kabul edilmiştir. Servis zamanları ihmal edilmiştir.

Çalışmadaki tüm kodlar C++ dilinde yazılmış, matematiksel modeller için ILOG CPLEX Concert Teknoloji 12.6.3. kullanılmıştır. Bütün deneyler, Intel Core i7-7500U işlemciye ve 16 GB RAM' e sahip dizüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3.2.4.2'de, ARP-İHA'nın kesin çözümü için önerilen iki algoritma karşılaştırılmış ve müşteri sayısı ile Algoritma 2'nin performansının, Algoritma 1'e göre üstünlüğü

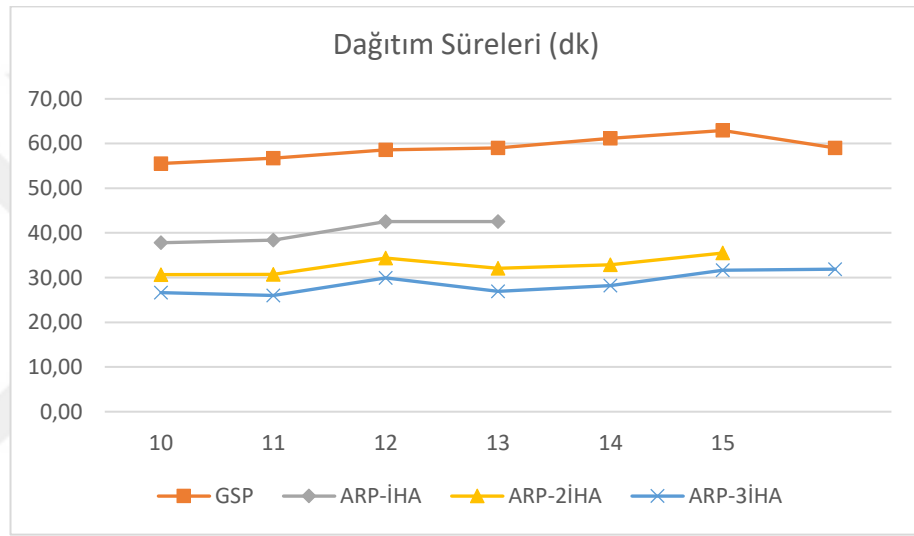
gösterilmiştir. Bu nedenle ARP-mİHA'daki kesin çözümlerin elde edilmesi için Algoritma 2 kullanılmıştır. Hatırlanacağı gibi, ARP-İHA'nın kesin çözümü için geliştirilen yaklaşımda, servis zamanları ihmal edilmiş ve sayısal sonuçlar bu şartlar altında elde edilmiştir. 2 ve 3 İHA'lı problem çözümleri ARP-İHA ile karşılaştırılacağı için bu bölümde paylaşılan sonuçlar da yine servis zamanları ihmal edilerek elde edilmiştir.

Çizelge 4.2'de, dağıtımın yalnız kamyonla ve kamyonu eşlik eden, sırasıyla, 1, 2 ve 3 İHA ile gerçekleştirilmesi durumunda elde edilen ortalama dağıtım süreleri verilmektedir. Çizelge aynı zamanda, İHA/ İHA'ların dağıtıma entegre edilmesi ile GSP çözümüne göre dağıtım sürelerinde elde edilen iyileşme yüzdelerini de göstermektedir. Bölüm 3.2.4.2'de belirtildiği gibi, önerilen Algoritma 2, 13 müşterili 10 örnek problemden 5'ini 1 sa'lik süre sınırlaması içerisinde çözebilmiştir. ARP-2İHA'da 15 müşterili 10 örnek problemden 4'ü, ARP-3İHA'da ise 15 müşterili 10 örnek problemden 6'sı ve 16 müşterili 10 örnek problemden ancak 2'si belirlenen süre içerisinde çözülebilmektedir. Çizelgedeki dağıtım süreleri, her problem boyutundaki 10 örnek problemden, çözümü elde edilmiş olanların ortalamalarını göstermektedir. Dağıtımdaki İHA sayısı arttıkça, algoritmanın çözebildiği problem boyutunun da arttığı Çizelge 4.2'de görülmektedir. Bu sonuç dikkat çekicidir. Çünkü İHA sayısının artması, değişken sayısını ve problemin karmaşıklığını arttırmaktadır. Önerilen kesin çözüm algoritmasında ise, problemin 2 aşamaya ayrıştırılması, çözüme en büyük İHA müşterisi ataması ve en küçük kamyon rotası ile başlanması, hem bütünsel üst sınırı hızlı iyileştirmekte, hem de üretilen kamyon rotası sayısını ciddi ölçüde azaltmaktadır. Ancak çoklu İHA senaryosunda çözülebilen problem boyutundaki artışın, İHA sayısındaki artış ile azaldığı söylenebilir. Dağıtım sürelerinde GSP çözümüne göre elde edilen iyileşme oranlarına bakıldığında, dağıtım süresinin tek İHA'nın entegrasyonu ile ortalama %30, 2 İHA'nın entegrasyonu ile ortalama %45 ve 3 İHA'nın entegrasyonu ile ortalama %50 civarında azaldığı görülmektedir. İyileşme oranları ile müşteri sayısı arasında bir ilişki gözlenmemiştir.

Çizelge 4.2'de verilmiş olan dağıtım süreleri, aynı zamanda Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Şekil, İHA sayısındaki artış ile dağıtım sürelerinde elde edilen iyileşmenin, azalan bir seyir izlediğini açıkça göstermektedir.

Çizelge 4.2. 1, 2 ve 3 İHA'lı ARP çözümlerinin GSP çözümü ile karşılaştırması

Müşteri Sayısı	Dağıtım Süresi (dk)				İyileşme %		
	GSP	ARP-İHA	ARP-2İHA	ARP-3İHA	ARP-İHA	ARP-2İHA	ARP-3İHA
10	55,54	37,80	30,67	26,65	31,93	44,77	52,02
11	56,72	38,35	30,74	26,01	32,38	45,81	54,14
12	58,57	42,51	34,38	29,94	27,42	41,30	48,88
13	59,03	42,54	32,06	26,91	27,94	45,70	54,41
14	61,18	*	32,87	28,21	*	46,27	53,89
15	62,92	*	35,50	31,63	*	43,57	49,73
16	58,99298	*	*	31,88	*	*	45,95



Şekil 4.3. 1, 2 ve 3 İHA'lı ARP çözümlerinde dağıtım süreleri

Çizelge 4.3, ARP-İHA, ARP-2İHA ve ARP-3İHA çözümlerinin karşılaştırılabilmesi için bazı çözüm istatistiklerini göstermektedir. Bunlar çözüm süresi, yineleme sayısı, üretilen kamyon rotalarının sayısı, bu rotaların üretilme süresi ve İHA'lara yapılan atama sayısı olup, paylaşılan değerler her problem boyutu için oluşturulan 10 örnek problemden çözülebilenlerin ortalamasını vermektedir. Çizelge, çözüm süresinin, yineleme sayısının, kamyon rotası sayısının ve bu rotaların üretilme süresinin, müşteri sayısı ile arttığını, İHA sayısı ile azaldığını açıkça göstermektedir. 16 müşteri için paylaşılan sonuçlar, yalnızca iki örnek çözümün ortalaması olduğu için, çözüm süresi ve yineleme sayısında bir azalış olduğu değerlendirmesi çok sağlıklı olmayacaktır.

* Algoritma sonlandırıldığı için sonuçlar elde edilememiştir.

Çizelge 4.3'te paylaşılan istatistikler, birbirleri ile ilişkili olup birbirlerinden bağımsız değerlendirmek mümkün değildir. Problemin 2 aşamaya ayrıştırılması sayesinde bütünsel üst sınırın yinelemeler ile iyileştirilmesi ve en kısa kamyon rotası ile başlanıp, kamyon rotalarının aşama aşama üretilmesi sayesinde, çözüm alanı daraltılmaktadır. Bu, üretilen kamyon rotalarının sayısını azaltmış, böylece rota üretmeye fazla zaman harcanmamıştır. Tüm bunlar, çözüm süresini kısaltmıştır. Bu istatistiklerin, müşteri sayısı ile artacağı açıktır. Ancak ilginç olan, İHA sayısı ile azalmasıdır. İHA sayısının artması, İHA'lara yapılabilecek en büyük atama sayısını arttırmakta, bu da kamyon rotasındaki müşteri sayısını azaltmaktadır. Kamyona atanan müşteri sayısının azalması, üretilen kamyon rotası sayısını da ciddi ölçüde azaltmaktadır. Daha az kamyon rotası, daha az yineleme ile çözüme ulaşmayı kolaylaştırmıştır. Bu sayede, İHA sayısındaki artışa rağmen, çözüm süresi kısalmış, çözülebilen problem boyutu artmıştır. İHA'lara atanan müşteri sayısı ise, beklendiği gibi, müşteri sayısı ve İHA sayısı ile artış göstermektedir.

Çizelge 4.3. Örnek verinin 1, 2 ve 3 İHA'lı ARP çözümüne ait çeşitli istatistikler

	İHA Sayısı	Müşteri Sayısı						
		10	11	12	13	14	15	16
Çözüm Süresi (sn)	1	130,10	484,20	754,70	2433,40	*	*	*
	2	79,60	261,90	358,70	1162,60	2314,80	2702,50	*
	3	38,10	104,30	176,90	283,30	798,40	2260,71	1450,50
Yineleme Sayısı	1	463,20	2474,50	3228,10	10988,40	*	*	*
	2	114,40	404,30	546,70	1870,60	2837,80	2369,75	*
	3	53,60	123,00	188,80	337,20	513,20	1347,00	611,50
Kamyon Rotası Sayısı	1	5386,50	13665,40	48561,10	146313,00	*	*	*
	2	412,70	844,40	4349,80	9104,60	13283,70	92133,75	*
	3	88,00	175,20	742,20	1118,20	1510,80	2783,29	20148,00
Rota Üretme Süresi (sn)	1	1,00	1,80	63,10	444,40	*	*	*
	2	1,00	1,00	1,20	6,20	18,70	245,00	*
	3	1,00	1,00	1,00	1,00	2,40	32,71	40,50
İHA Atama Sayısı	1	3,90	4,30	4,40	4,80	*	*	*
	2	5,70	5,90	6,50	6,70	7,70	8,50	*
	3	6,20	6,80	7,70	8,30	9,50	9,86	10,00

* Algoritma sonlandırıldığı için sonuçlar elde edilememiştir.

4.4.2. Sezgisel sonuçlar

ARP-mİHA'nın sezgisel sonuçlarının değerlendirilmesi için Bölüm 3.3.2.1'deki deneysel hazırlık esas alınmıştır. 10 müşterili problemler, çok İHA'lı dağıtım versiyonu için çok küçük olup gerçekçi değildir. 50 müşterili problemlerin çözümü de tek İHA'lı versiyonun çözüm sürelerine kıyasla bir hayli uzun olmaktadır. Bu nedenle, ARP-mİHA'nın sayısal analizleri 30 müşterili örnek problemler üzerinde yapılmıştır. Bu amaçla, Ponza'nın (2106) yaptığı gibi, x ve y koordinatları -16,0934 ile +16,0934 arasında tekdüze dağılan 30 müşterili örnek problemler oluşturulmuştur. Sayısal parametreler için Bölüm 3.3.2.1'de kabul edilen değerler esas alınmıştır. Algoritmadaki parametre seçimi ise Çizelge 4.4'teki gibidir.

Çizelge 4.4. ARP-mİHA'nın MGA ile çözümündeki parametre değerleri

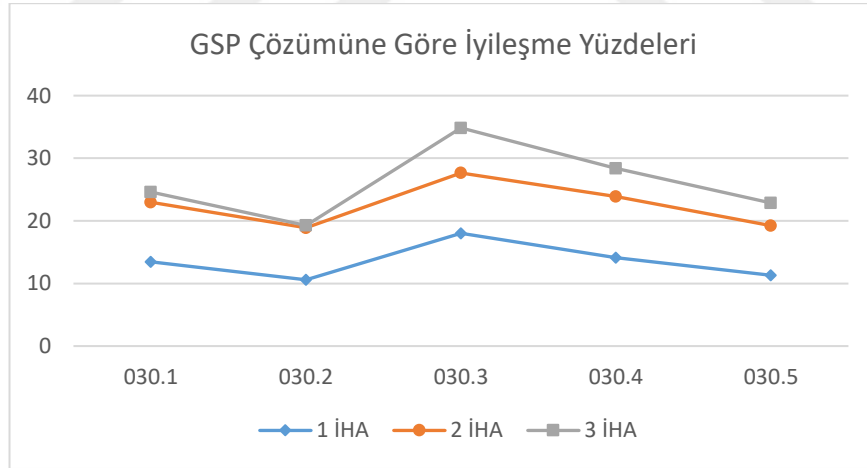
Anakütle büyüklüğü	(N_p)	:	50
Anakütlede en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı	(N_m)	:	$0,2*N_p$
Başlangıç eğitim verisinin büyüklüğü	(N_i)	:	$1*N_p$
Her yinelemede uygulanacak çaprazlama sayısı	(N_c)	:	$0,5*N_p$
Yineleme sayısı	(N_g)	:	500
Yineleme sonunda anakütlede dahil edilecek en iyi çocuk birey sayısı	(N_b)	:	3
Her yinelemede anakütlede dahil edilecek rassal oluşturulmuş birey sayısı	(N_{rand})	:	1
Her yinelemede anakütlede dahil edilecek en yakın komşuluğa göre oluşturulmuş birey sayısı	(N_{mb})	:	2
Mutasyon olasılığı	(P_m)	:	0,5
Gizli katmandaki düğüm sayısı	(h)	:	$2*N$

Çizelge 4.5'te 30 müşterili örnek problemlerin 1, 2 ve 3 İHA ile çözümünden elde edilen dağıtım süreleri ve çözüm süreleri ile GSP çözümleri verilmektedir. Her problem için paylaşılan değerler, ilgili problemin 10 tekrarında elde edilen değerlerin ortalamasını göstermektedir. 1 İHA ile elde edilen detaylı sonuçlar Ek 2'de, 2 İHA ile edilenler Ek 3'te, 3 İHA çözümleri ise Ek 4'te paylaşılmaktadır. *Amaç* sütunu dağıtım sürelerini (sn), *T_eniyi* ve *T_toplam* sütunları, sırasıyla, en iyi çözümün elde edilme süresi ile toplam çözüm süresini, *İyileşme_GSP* sütunu ise her bir senaryoda, GSP çözümüne kıyasla dağıtım sürelerinde elde edilen iyileşme yüzdelerini göstermektedir. Çizelgede görüldüğü üzere, çözüm süreleri İHA sayısı ile çok hızlı artmaktadır. 1 İHA durumunda 1 dk içinde çözüme ulaşılrken, bu sürenin 2 İHA'da 1 sa, 3 İHA durumunda 2,5 sa'te kadar uzadığı görülmektedir.

Çizelge 4.5. 1, 2 ve 3 İHA'lı sezgisel çözümler

Veri	Amaç			T_eniyi (sn)			T_toplam (sn)			Amaç_GSP (sn)	İyileşme_GSP %		
	1 İHA	2 İHA	3 İHA	1 İHA	2 İHA	3 İHA	1 İHA	2 İHA	3 İHA		1 İHA	2 İHA	3 İHA
030.1	11586,90	10315,15	10098,19	32,43	2640,73	6381,31	47,12	3711,48	7721,71	13390,60	13,47	22,97	24,59
030.2	10474,46	9500,47	9457,60	25,39	2116,06	4601,26	43,19	2733,53	5360,26	11714,10	10,58	18,90	19,26
030.3	10098,35	8912,06	8025,18	26,39	1779,05	4238,68	48,30	3234,68	5959,43	12317,00	18,01	27,64	34,84
030.4	10332,94	9153,02	8613,64	25,16	2255,41	6515,50	42,37	2874,04	9549,70	12029,10	14,10	23,91	28,39
030.5	9781,52	8907,64	8508,79	28,09	1277,20	3066,67	48,03	2370,22	4888,50	11028,20	11,30	19,23	22,85

GSP çözümüne göre elde edilen iyileşme yüzdelerindeki artış hızı ise İHA sayısı ile azalmaktadır. Bu sonuç, Şekil 4.4'te net biçimde görülmektedir. 3'üncü İHA'nın dağıtım ağına katılması ile özellikle 030.1 ve 030.2 no'lu problemlerde 2 İHA'lı senaryoya kıyasla çok küçük iyileşme oranları elde edilmiştir. Benzer sonuç, İHA'ların kullanım oranlarında da görülmektedir. Çizelge 4.6'da 30 müşterili problemlerde farklı İHA sayıları ile elde edilen İHA kullanım oranları verilmektedir. Çizelgeye göre, İHA kullanım oranı, 3 İHA durumunda 2 İHA durumuna göre azalmıştır. Dağıtım sürelerinde elde edilen iyileşmedeki artış miktarının İHA sayısı ile azalmasının, İHA sayısındaki artış ile kamyonun İHA'ları bekleme süresindeki artışa bağlı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.4. ARP-mİHA'nın MGA çözümünde, GSP çözümüne göre elde edilen iyileşme yüzdeleri

Çizelge 4.6'da paylaşılan sonuçlar, İHA sayısındaki artış ile İHA'ların etkin kullanımının azaldığını göstermektedir. Bu sonuç, İHA sayısı ile elde edilen iyileşmenin batarya ömründeki bir artış ile gerçekleşip gerçekleşmeyeceği sorusunu akıllara getirmiştir. Bu amaçla, 30 müşterili ARP-İHA problemi, batarya ömrünün 2 katı (40 dk) olduğu

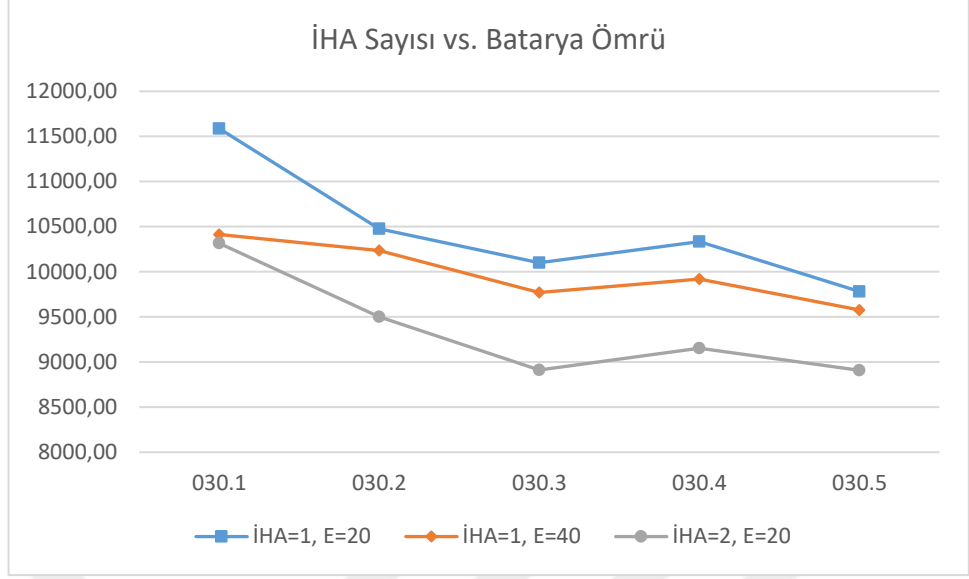
varsayımı altında tekrar çözülmüştür. Sonuçlar Ek 2’de paylaşılmaktadır. Çizelge 4.7, farklı İHA sayısı ve batarya ömrü kombinasyonu ile 10 tekrarda elde edilen dağıtım sürelerinin ortalamasını göstermektedir. Şekil 4.5’te ise, İHA sayısı ve batarya ömrü kombinasyonunun dağıtım sürelerine etkisi daha net biçimde görülmektedir. Buna göre, 5 örnek problemden yalnız 1’inde, 1 İHA ve 40 dk’lık batarya kombinasyonu, 2 İHA ve 20 dk’lık batarya kombinasyonuna yakın dağıtım süreleri vermiştir. Bu sonuç, kamyon ve İHA’nın eşzamanlı dağıtım probleminde İHA sayısının etkisi kadar, batarya ömrünün ve dolayısıyla batarya teknolojisinin de önemli olduğunu göstermektedir. Daha derin analiz yapabilmek için, maliyetlerin de dikkate alındığı çalışmalara ihtiyaç olduğu açıktır.

Çizelge 4.6. İHA’ların ortalama kullanım oranları

Veri	İHA Tur Sayısı		
	1 İHA	2 İHA	3 İHA
030.1	9,0	14,7	15,6
030.2	8,2	14,9	16,8
030.3	8,7	14,9	17,2
030.4	9,4	14,8	17,4
030.5	11,0	16,8	18,2
Ort.	9,3	15,2	17,0
D_{max}	15	20	23
Ort. Kullanım	0,62	0,76	0,74

Çizelge 4.7. Farklı İHA sayısı ve batarya ömrü ile elde edilen dağıtım süreleri (sn)

Veri	İHA=1, E=20	İHA=1, E=40	İHA=2, E=20
030.1	11586,90	10413,08	10315,15
030.2	10474,46	10233,75	9500,47
030.3	10098,35	9771,07	8912,06
030.4	10332,94	9920,07	9153,02
030.5	9781,52	9576,38	8907,64



Şekil 4.5. Dağıtım sürelerine İHA sayısı ile batarya ömrünün etkisi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Günümüzde artan rekabet, firmaları, yenilikçi çözüm yaklaşımları geliştirerek operasyonel verimliliklerini arttırmaya zorlamaktadır. Bu amaçla firmalar, teknolojik gelişmeleri yakından takip etmektedir. İHA teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, firmaların İHA'ları dağıtım faaliyetlerinde kullanma çabası ortaya çıkmıştır. Bunun bir sonucu olarak ortaya çıkan dağıtım modellerinden biri, klasik dağıtım aracı olan kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtım yapmaları fikrine dayanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kamyon ve İHA'nın eşzamanlı dağıtım problemi ele alınarak, hem literatürdeki yöntemlerin geliştirilmesi, hem de bu problemin çoklu İHA senaryosunun çalışılarak bu konudaki boşluğun doldurulması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması, dört temel adımda yürütülmüştür. İlk olarak, kamyon ve tek İHA senaryosunu dikkate alan ARP-İHA probleminin kesin çözümünün geliştirilmesi hedeflenmiş, bu amaçla 2-aşamalı yinelemeli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, tezin ilk aşamasında, literatürde 1 sa çözüm süresi içerisinde çözülebilen problem boyutunu 10 müşteriden 13 müşteriye çıkarmıştır. Bununla ilgili çalışma 2018 yılında yayımlanmıştır (Es Yurek ve Ozmutlu 2018).

İkinci olarak, orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için 2-aşamalı yapının korunduğu, makine öğrenmesi ile fonksiyon kestirime dayanan melez bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Yapılan sayısal çalışma, aynı varsayımları dikkate alarak tavlama benzetimi yöntemini uygulayan çalışma ile karşılaştırılmış, küçük ve orta büyüklükteki problemlerin çözümünde MGA'nın daha iyi sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Büyük boyutlu problemlerde ise MGA diğer çalışmaya göre yavaş kalmıştır. Fakat geliştirilen MGA, küçük uyarlamalarla, kamyonun birden fazla İHA ile eşzamanlı dağıtım problemi olan ARP-mİHA'ya uygulanabilmektedir. Bu tezin, diğer çalışmadan üstünlüğü bu noktada ortaya çıkmaktadır.

Üçüncü adımda kamyon ve çoklu İHA'nın eşzamanlı dağıtım problemine yönelmiş olan bu tez kapsamında, 2-aşamalı yinelemeli kesin çözüm algoritması, ARP-mİHA'ya

uyarlanmıştır. Bilindiği kadarıyla, literatürde aynı varsayımları dikkate alarak ARP-mİHA'nın dağıtım süresini enküçükleyen bir başka çalışma henüz mevcut değildir. İHA sayısı ile problem daha zorlaşmakla birlikte, önerilen çözüm yaklaşımı, ARP-İHA'ya göre daha büyük boyutlu problemleri çözebilmiştir. Bu durum, 2-aşamalı yapının bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

Son olarak, ikinci adımda geliştirilmiş olan MGA, kolaylıkla ARP-mİHA'ya uyarlanmıştır. ARP-mİHA'nın kabul edilmiş varsayımlar altında çözümü için önerilen ilk sezgisel çalışma bilindiği kadarıyla bu tez kapsamında geliştirilmiştir.

ARP-İHA, henüz yeni sayılabilecek bir problem olmakla birlikte, akademik ve iş çevreleri tarafından ilgi görmüştür ve bu ilgi nedeniyle literatüre kazandırılan çalışma sayısı da hızlı şekilde artmaktadır. Tez kapsamında önerilmiş olan melez genetik algoritmanın çözüm süreleri, problem boyutu ve İHA sayısı ile hızlı şekilde artmaktadır. Bunun temel nedeni, çözümün ikinci aşamasında matematiksel model çözülüyor olmasıdır. Yöntemin performansının iyileştirilmesi amacıyla, ilerleyen dönemde, ikinci aşamanın matematiksel modelden kurtarılıp, bu aşama çözümü için etkin bir sezgisel yöntem geliştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, yapılan sayısal çalışma, kamyon ve İHA'ların eşzamanlı dağıtım probleminde, İHA'ların sayısının yanısıra batarya ömrünün de büyük bir öneme sahip olduğunu göstermiştir. İHA ve batarya teknolojilerinin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar düşünüldüğünde, maliyetlerin de dikkate alınarak, dağıtım sürelerine İHA sayısı ve batarya ömrünün etkilerinin analiz edildiği detaylı bir çalışmanın önemi görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Agatz, N., Bouman, P., Schmidt, M. 2018.** Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*, 1-17.
- Anonim,** The Mercedes-Benz Vision Van, www.daimler.com/innovation/specials/vision-van/en/-(Erişim tarihi: 08.10.2017).
- Anonim,** Where are you building and testing? <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>-(Erişim tarihi: 02.04.2018).
- Anonim, 2014.** Workhorse TM by AMP Holding Inc. develops horsefly TM aerial vehicle designed for package delivery market. <http://www.prweb.com/releases/2014/06/prweb11913357.htm>-(Erişim tarihi: 02.08.2016).
- Anonim, 2016.** Mercedes-Benz vision van looks at the future of logistics and last mile drone delivery. <https://iclsystems.com/mercedes-benz-vision-van-looks-future-logistics-last-mile-drone-delivery/>-(Erişim tarihi: 10.08.2017).
- Anonim, 2017.** UPS tests drone deliveries via high-tech truck, <https://www.cnbc.com/2017/02/25/ups-tests-drone-deliveries-via-high-tech-truck.html>-(Erişim tarihi: 08.10.2017).
- Anonim, 2017.** UPS tests residential delivery via drone, https://www.youtube.com/watch?v=xx9_6OyjJrQ- (Erişim tarihi:05.07.2017).
- Banker, S., 2013.** Amazon and drones—here is why it will work. <http://www.forbes.com>-(Erişim tarihi: 14.07.2016).
- Bender, A., 2015.** Watch drones deliver text books in video demo by Zookal. <http://www.computerworld.com.au>-(Erişim tarihi: 14.07.2016).
- Bouman, P., Agatz, N., Schmidt, M., 2015.** Instances for the tsp with drone. <https://github.com/pcbouman-eur/TSP-D-Instances>-(Erişim tarihi: 12.04.2017).
- Chang, Y.S., Lee, H.J. 2018.** Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route. *Expert Systems with Applications*, 104: 307-317.
- Çömert, R., Avdan, U., Şenkal, E. 2012.** İnsansız havaaraçlarının kullanım alanları ve gelecekteki beklentileri. IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, BEÜ, Zonguldak.
- Daknama, R., Kraus, E., 2017.** Vehicle routing with drones. <https://arxiv.org/abs/1705.06431>-(Erişim tarihi: 21.11.2017).
- Drexel, M. 2012.** Synchronization in vehicle routing- a survey of VRPs with multiple synchronization constraints. *Transportation Science*, 46(3), 297-316.
- Es Yurek, E., Ozmutlu, H.C., 2018.** A decomposition-based iterative optimization algorithm for traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C*, 91: 249-262.

- Ferrandez, S.M., Harbison, T., Weber, T., Sturges, T., Rich, R. 2016.** Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(2): 374-388.
- Garone, E., Naldi, R., Casavola, A. 2011.** A traveling salesman problem for a class of carrier-vehicle systems. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 34(4): 1272-1276.
- Guo P., Cheng W., Wang Y. 2017.** Hybrid evolutionary algorithm with extreme machine learning fitness function evaluation for two-stage capacitated facility location problems. *Expert Systems with Applications*, 71: 57-68.
- Ha, Q.M., Deville, Y., Pham, Q.D., Ha, M.H., 2015.** Heuristic methods for the traveling Salesman Problem with Drone. <http://www.oalib.com/paper/4051200#.W1Sqk9IzaUk>- (Erişim tarihi: 05.05.2016).
- Ha, Q.M., Deville, Y., Pham, Q.D., Ha, M.H. 2018.** On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C: Emerging. Technologies*, 86: 597-621.
- Han, X., Liang, Y., Li, Z., Li, G., Wu, X., Wang, B., Zhao, G., Wu, C. 2015.** An efficient genetic algorithm for optimization problems with time-consuming fitness evaluation. *International Journal of Computational Methods*. 12:01.
- Hern, A., 2016.** Amazon claims first successful Prime Air drone delivery. <https://www.theguardian.com/technology/2016/dec/14/amazon-claims-first-successful-prime-air-drone-delivery->(Erişim tarihi: 25.05.207).
- Holland, J.A. 1975.** Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Pres, USA,183 pp.
- Huang, G.B., Zhu, Q.Y., Siew, C.K. 2006.** Extreme learning machine: Theory and applications. *Neurocomputing*, 70: 489-501.
- Huang, G., Huang, G.B., Song S., You, K. 2015.** Trends in extreme learning machines: A review. *Neural Networks*, 6: 32-48.
- Kim, H.Su., Cho, S.B., 2001.** An efficient genetic algorithm with less fitness evaluation by clustering. Proceedings of the 2001 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Seoul, South Korea.
- Luo, Z., Liu, Z., Shi, J. 2017.** A two- echelon cooperated routing problem for a ground vehicle and its carried unmanned aerial vehicle. *Sensors*, 17 (5).
- Marinelli, M., Caggiani L., Ottomanelli M., Dell’Orco M. 2017.** En-route truck-drone parcel delivery for optimal vehicle routing strategies. *IET Intelligent Transport Systems*, 2 (4): 253-261.
- Mathew, N., Smith, S.L., Waslander, S.L. 2015.** Planning paths for package delivery in heterogeneous multi-robot teams. *IEEE Transactions on Autotamation Science and Engineering*, 12(4): 1298-1308.

- Murphy, M., 2015.** The first successful drone delivery in the US has taken place. <https://qz.com/458703/the-first-successful-drone-delivery-in-the-us-has-taken-place/>- (Erişim tarihi: 03.08.2016)
- Murray, C.C., Chu, A.G. 2015.** The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C*, 54: 86-109.
- Othman, M.S.B., Shurbevski, A., Nagamochi, H. 2017.** Routing of carrier-vehicle systems with dedicated last-stretch delivery vehicle and fixed carrier route. *Journal of Information Processing*, 25: 655-666.
- Poikonen, S., Wang, X., Golden, B., 2017.** The vehicle routing problem with drones: Extended models and connections. *Networks*, 70(1).
- Ponza, A. 2016.** Optimization of drone- assisted parcel delivery. *Tesi Di Laurea Magistrale*. Facolta Di Ingegneria, Universita Degli Studi Di Padova, Italy.
- Pugliese, L.D.P., Guerriero, F. 2017.** Last-mile deliveries by using drones and classical vehicles. Optimization and Decision Science: Methodologies and Applications. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, Springer, s. 557-565.
- Rose, C., 2013.** Amazon's Jeff Bezos looks to the future. <http://www.cbsnews.com>- (Erişim tarihi: 14.07.2016).
- Sevinçli, M., 2015.** Dron kullanım alanları. <http://www.komhedos.com>-(Erişim tarihi: 13.07.2016).
- Shaban, H., 2018.** Amazon is issued patent for delivery drones that can react to screaming voices, flailing arms. https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2018/03/22/amazon-issued-patent-for-delivery-drones-that-can-react-to-screaming-flailing-arms/?noredirect=on&utm_term=.af77b9e62d22- (Erişim tarihi: 03.04. 2018)
- Song B.D., Park, K., Kim, J. 2018.** Persistent UAV delivery logistics: MIP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 120: 418-428.
- Wang, D., 2015.** The Economics of Drone Delivery. [www. flexport.com/blog/drone-delivery-economics/](http://www.flexport.com/blog/drone-delivery-economics/)-(Erişim tarihi: 14.07.2016).
- Wang, X., Poikonen, S., Golden, B. 2016.** The vehicle routing problem with drones: several worst-case results. *Optimization Letters*, 1-16.
- Yoon, J.G., Cho, S.B., 2010.** Fitness approximation for genetic algorithm using combination of approximation model and fuzzy clustering technique. Proceedings of the 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Barcelona, Spain.
- Zhao, N., Zhao, Y.Z., Fu, C.X. 2016.** A framework for computationally expensive problems with genetic algorithm. Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation, Springer, s. 421-428.

EKLER

EK 1 İHA'ya Atanabilecek En Büyük Müşteri Sayısı Hesaplama

EK 2 1 İHA ile Elde Edilen Sezgisel Sonuçlar

EK 3 2 İHA ile Elde Edilen Sezgisel Sonuçlar

EK 4 3 İHA ile Elde Edilen Sezgisel Sonuçlar



EK 1 İHA'YA ATANABİLECEK EN BÜYÜK MÜŞTERİ SAYISI HESAPLAMA

N : Dağıtım ağındaki müşteri sayısı

M : Dağıtım ağındaki İHA sayısı

D_{max} : İHA'ların tamamına atanabilecek enbüyük müşteri sayısı

n : Kamyonu atanmış müşteri sayısı

Kamyon ve İHA'lara yapılan atamanın toplamı müşteri sayısına eşit olmalıdır.

$$D_{max} + n = N$$

Dağıtım, depoda başlayıp depoda bitmelidir. Dolayısıyla, kamyon rotasında toplam $n + 2$ düğüm bulunur. Bu düğümler arasında ise toplam $n + 1$ adet ayrıt bulunur. İHA'nın her tur başlangıcında kamyonla ayrılıp, her tur bitişinde kamyonla buluşması gerektiği düşünüldüğünde, bir İHA'ya atanabilecek enbüyük müşteri sayısının, kamyon rotasındaki ayrıt sayısına eşit olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda, İHA'lara yapılan toplam atamanın, İHA sayısına bölünmesi ile elde edilecek tamsayı, kamyon rotasındaki ayrıt sayısına eşit olmalıdır.

$$yukarı_yuvarla\left(\frac{D_{max}}{M}\right) = n + 1$$

Yukarıdaki denklemden n çekilerek, ilk denklemden yerine koyduğumuzda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$D_{max} + yukarı_yuvarla\left(\frac{D_{max}}{M}\right) - 1 = N$$

$$D_{max} + yukarı_yuvarla\left(\frac{D_{max}}{M}\right) = N + 1$$

$$MD_{max} + D_{max} \leq M(N + 1)$$

$$(M + 1)D_{max} \leq M(N + 1)$$

$$D_{max} \leq \left(\frac{M(N + 1)}{M + 1}\right)$$

İHA'ların tamamına atanabilecek enbüyük müşteri sayısı tamsayı olmalıdır. Bu nedenle D_{max} aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$D_{max} = \text{aşağı_yuvarla} \left(\frac{M(N+1)}{M+1} \right)$$



EK 2 1 İHA İLE ELDE EDİLEN SEZGİSEL SONUÇLAR

Problem 010.1 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>
1	5986,712	31,690	0,405
2	5986,712	31,712	0,164
3	5986,712	30,309	0,849
4	5986,712	29,303	0,305
5	5986,712	30,783	0,904
6	5986,712	30,547	0,541
7	5986,712	30,007	1,278
8	5986,712	30,436	0,172
9	5986,712	30,428	0,160
10	5986,712	30,908	0,160
<i>Ort.</i>	5986,712	30,612	0,494

Problem 010.2 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>
1	6394,386	32,250	6,285
2	6394,386	28,291	5,245
3	6394,386	26,679	1,095
4	6394,386	27,639	1,545
5	6394,386	29,546	3,401
6	6394,386	30,311	7,496
7	6394,386	29,126	3,262
8	6394,386	30,046	2,625
9	6394,386	27,072	1,807
10	6394,386	31,066	5,174
<i>Ort.</i>	6394,386	29,203	3,794

Problem 010.3 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>
1	6310,604	21,735	4,126
2	6310,604	21,901	8,807
3	6422,947	21,819	2,328
4	6422,947	22,873	16,348
5	6591,987	22,377	16,164
6	6310,604	21,149	4,977
7	6591,987	22,076	0,691
8	6591,987	21,780	2,697
9	6310,604	21,648	1,173
10	6310,604	21,670	10,138
<i>Ort.</i>	6417,488	21,903	6,745

Problem 010.4 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>
1	8377,917	22,097	0,559
2	8377,917	21,843	0,154
3	8377,917	21,608	0,786
4	8377,917	22,100	0,831
5	8377,917	21,450	0,272
6	8377,917	21,023	0,286
7	8377,917	20,991	2,085
8	8377,917	21,921	0,193
9	8377,917	21,982	0,388
10	8377,917	21,365	2,224
<i>Ort.</i>	8377,917	21,638	0,778

Problem 010.5 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>
1	8934,411	22,298	0,132
2	8934,411	24,352	1,316
3	8934,411	21,403	0,222
4	8934,411	21,777	0,106
5	8934,411	21,019	0,103
6	8934,411	23,160	0,132
7	8934,411	21,957	0,907
8	8934,411	21,712	0,532
9	8934,411	21,816	0,941
10	8934,411	21,922	1,415
<i>Ort.</i>	8934,411	22,142	0,581

Problem 030.1 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	12022,029	17,701	47,958	9
2	11262,150	42,100	45,400	10
3	11483,895	17,857	45,658	9
4	11875,398	49,078	50,050	9
5	11870,070	40,994	45,432	9
6	11582,543	18,427	50,606	9
7	11167,264	28,937	44,195	10
8	11169,373	35,603	49,142	8
9	11689,541	44,175	47,146	8
10	11746,750	29,416	45,621	9
<i>Ort.</i>	11586,901	32,429	47,121	9

Problem 030.2 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	10891,083	34,526	43,977	8
2	10234,997	20,677	44,437	11
3	10368,231	29,747	44,172	7
4	10528,060	33,156	42,155	8
5	9981,672	28,645	45,137	9
6	10199,302	20,188	43,327	9
7	10680,675	10,638	42,448	8
8	10577,057	42,046	42,483	7
9	10437,304	5,596	42,941	8
10	10846,240	28,652	40,826	7
<i>Ort.</i>	10474,462	25,387	43,190	8,2

Problem 030.3 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	10058,966	42,185	57,798	10
2	9997,738	25,706	51,066	8
3	10375,788	5,935	46,671	9
4	10089,157	20,759	40,998	8
5	10055,403	20,175	58,825	9
6	9972,988	28,097	44,188	9
7	10183,148	45,238	45,990	9
8	9909,579	45,836	46,764	8
9	9909,579	21,087	47,517	8
10	10431,168	8,890	43,186	9
<i>Ort.</i>	10098,351	26,391	48,300	8,7

Problem 030.4 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	10698,754	24,235	46,555	10
2	10298,638	24,966	41,663	9
3	10407,097	9,746	40,123	9
4	10222,630	11,761	41,006	9
5	10350,662	28,725	43,028	10
6	10252,205	34,197	45,911	9
7	10211,214	32,202	40,716	9
8	10255,361	27,690	41,712	10
9	10471,976	34,070	41,933	9
10	10160,818	23,963	41,094	10
<i>Ort.</i>	10332,936	25,155	42,374	9,4

Problem 030.5 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	9539,134	33,932	50,318	10
2	9973,699	12,980	45,581	11
3	9857,123	20,209	50,603	9
4	9622,691	33,893	46,307	11
5	10044,873	34,078	46,291	11
6	9790,206	4,683	47,024	13
7	9805,209	14,742	48,942	12
8	9813,294	43,154	50,459	11
9	9550,279	36,927	47,300	10
10	9818,711	46,314	47,502	12
<i>Ort.</i>	9781,522	28,091	48,033	11

Problem 030.1 - E=40				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}	<i># D</i>
1	10197,7	37,29331	117,5595	8
2	10163,93	107,9016	117,3935	6
3	10310,32	87,24289	118,1114	9
4	10381,21	110,6224	114,6199	9
5	10711,16	67,74682	122,0133	9
6	10605,37	52,78144	115,3509	9
7	10523,47	53,08213	122,3228	8
8	10125,23	70,80387	116,4379	8
9	10690,69	42,65308	115,5091	8
10	10421,757	26,96992	122,771	8
<i>Ort.</i>	10413,08	65,70974	118,2089	8,2

Problem 030.2 - E=40				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}	<i># D</i>
1	10217,5	96,03469	118,5064	8
2	9987,752	55,79716	114,2174	9
3	10518,06	22,6717	107,0801	9
4	10122,5	92,28553	113,0439	9
5	10034,22	105,8149	114,5536	8
6	10552,47	79,14509	117,2478	8
7	10089,84	94,67402	131,3675	9
8	9633,653	107,4417	117,5242	8
9	10404,83	70,35262	111,6859	8
10	10776,687	65,24832	108,8852	8
<i>Ort.</i>	10233,75	78,94657	115,4112	8,4

Problem 030.3 - E=40				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}	<i># D</i>
1	9743,47	68,22924	116,2963	8
2	9600,091	118,1022	118,4745	9
3	9763,938	22,45948	110,1222	8
4	9763,938	30,00596	111,2461	8
5	9774,676	53,47733	128,5297	8
6	9785,269	74,20539	123,1903	9
7	10171,62	18,30965	107,8935	7
8	9816,842	99,31699	110,1533	9
9	9743,47	107,0013	110,6898	8
10	9547,355	106,9478	119,509	9
<i>Ort.</i>	9771,067	69,80554	115,6105	8,3

Problem 030.4 - E=40				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	9863,706	92,72084	117,8424	8
2	10000,93	60,30725	115,9377	9
3	10101,19	58,76043	118,5785	8
4	9877,247	52,83241	117,3833	9
5	9864,137	43,64864	115,3436	7
6	9833,539	89,35842	121,3906	7
7	9876,824	12,33546	114,7198	9
8	9821,891	31,0867898	118,4518	9
9	9841,448	24,58464	116,2487	9
10	10119,79	29,78613	116,1974	9
<i>Ort.</i>	9920,07	51,59269	117,2094	8,4

Problem 030.5 - E=40				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	9651,916	64,76839	135,99	9
2	9786,883	9,556335	118,1104	8
3	9470,843	29,64475	122,5591	12
4	9785,237	38,84121	126,9806	9
5	9417,796	62,4794	131,9959	11
6	9635,506	55,23956	116,3554	9
7	9275,135	44,91474	129,5927	10
8	9668,197	74,00314	133,1491	10
9	9374,999	110,4366	125,3052	10
10	9697,325	51,23738	123,3753	10
<i>Ort.</i>	9576,384	54,11215	126,3414	9,8

Problem 050.1 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>
1	12024,346	230,327	310,127
2	12208,821	264,470	325,287
3	1224,272	192,705	326,573
4	12567,761	174,687	326,212
5	12243,845	265,739	321,369
6	12272,262	305,005	320,029
7	12733,494	193,713	345,166
8	12879,287	112,003	287,359
9	12299,105	87,477	307,995
10	12690,753	297,788	310,650
<i>Ort.</i>	11314,394	212,391	318,077

Problem 050.2 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>
1	12368,834	235,960	314,602
2	12178,550	323,599	339,132
3	12640,214	52,855	291,860
4	12743,704	45,940	313,447
5	12416,888	53,854	332,962
6	12036,082	162,808	314,436
7	12055,391	219,311	307,486
8	12300,127	227,420	322,418
9	12568,904	156,810	328,816
10	12610,639	204,948	241,368
<i>Ort.</i>	12391,933	168,351	310,653

Problem 050.3 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	12320,620	268,817	350,144
2	12395,869	283,236	297,621
3	12520,937	263,445	271,350
4	12699,829	237,465	252,907
5	12187,083	271,718	274,664
6	12528,903	213,269	292,946
7	12628,670	129,642	281,957
8	12798,501	175,292	265,244
9	12848,337	185,671	261,436
10	12418,534	211,897	257,783
<i>Ort.</i>	12534,728	224,045	280,605

Problem 050.4 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	12908,615	331,542	335,315
2	12783,410	251,594	339,545
3	13325,236	320,613	345,610
4	13294,877	311,706	313,740
5	13242,221	277,536	337,268
6	12980,779	217,266	359,208
7	12897,710	315,904	319,360
8	13150,068	270,133	356,407
9	13285,147	346,057	354,145
10	12977,184	272,358	319,055
<i>Ort.</i>	13084,525	291,471	337,966

Problem 050.5 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	12512,932	346,239	373,971
2	12943,703	292,518	314,759
3	11828,846	160,800	291,411
4	12828,492	98,818	300,284
5	12403,051	30,700	277,595
6	11714,650	399,346	347,253
7	12102,806	309,497	343,725
8	12383,142	250,745	320,658
9	12284,062	173,264	365,624
10	11622,896	207,265	318,689
<i>Ort.</i>	12262,458	226,919	325,397

Problem 100.1 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	19723,942	1334,851	1339,975
2	19113,307	1709,663	1723,107
3	19247,379	1705,052	1719,565
4	19037,514	1167,715	1698,406
5	19209,766	1649,449	1842,768
6	18860,804	1668,359	1673,839
7	18863,058	1740,192	1775,667
8	19393,634	1584,851	1672,613
9	19035,118	1729,142	1755,609
10	19209,766	1740,799	1931,545
<i>Ort.</i>	19169,429	1603,007	1713,310

Problem 100.2 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	18214,026	1810,396	1792,387
2	18638,533	1817,174	1775,304
3	18432,814	199,956	1696,914
4	18490,775	1841,872	1661,847
5	18676,920	1816,616	1624,031
6	18553,042	1985,428	1859,448
7	18604,979	1857,883	1782,190
8	18490,775	1842,124	1662,213
9	18676,920	1821,536	1629,961
10	18553,042	1988,212	1863,835
<i>Ort.</i>	18533,183	1698,120	1734,813

Problem 100.3 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	19000,205	1322,744	1613,722
2	18450,254	1471,191	1863,916
3	18635,241	850,228	1669,566
4	18656,804	1672,021	1695,159
5	19000,205	1320,640	1610,623
6	18450,254	1401,780	1805,392
7	18635,241	841,537	1654,229
8	18656,804	1799,020	1822,426
9	18806,646	1429,917	1572,350
10	18836,662	1227,926	1612,100
<i>Ort.</i>	18712,832	1333,700	1691,948

Problem 100.4 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	19138,888	894,150	1964,409
2	18995,269	1883,701	1991,282
3	19421,916	1810,143	1923,253
4	18726,309	1673,307	1772,754
5	19607,693	1863,260	1902,123
6	19566,694	1554,083	1829,084
7	18652,130	1796,761	2078,317
8	18270,038	1498,886	1885,959
9	18740,202	1907,230	1939,828
10	19495,511	1573,861	1826,096
<i>Ort.</i>	19061,465	1645,538	1911,310

Problem 100.5 - E=20			
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	T_{Eniyi}	T_{Toplam}
1	18176,294	1579,744	2185,700
2	18557,748	2034,630	2264,560
3	18002,979	2082,489	2112,292
4	18767,740	2030,658	2071,296
5	18031,212	1929,858	2144,411
6	18720,541	2216,630	2251,578
7	18707,406	1871,280	1941,942
8	18418,234	2044,286	2166,997
9	18076,047	1471,556	2084,940
10	18231,155	1734,140	2127,682
<i>Ort.</i>	18368,936	1899,527	2135,140

EK 3 2 İHA İLE ELDE EDİLEN SEZGİSEL SONUÇLAR

Problem 030.1 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	10178,659	3096,410	3982,866	13
2	10789,356	489,297	2283,159	14
3	10538,372	1142,626	2234,961	17
4	10000,756	3179,113	3267,172	15
5	9985,751	2107,999	3024,109	16
6	10301,938	3567,241	4048,111	15
7	10446,858	2540,843	3236,367	15
8	10299,533	2948,500	4121,553	14
9	10077,525	5043,309	5571,618	14
10	10532,724	2291,950	5344,929	14
<i>Ort.</i>	10315,147	2640,729	3711,484	14,7

Problem 030.2 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	9479,7014	2069,958	2082,7014	14
2	9625,0084	1587,626	2364,6611	16
3	9438,2543	1977,4132	2809,7749	14
4	9433,9949	1555,3924	2512,7673	15
5	9545,8369	3298,9036	3388,333	16
6	9536,6703	3061,8454	3459,6905	14
7	9491,7761	459,67496	2782,4608	16
8	9465,0596	2165,9466	2686,0561	14
9	9460,571	3246,6968	3475,6461	14
10	9527,7955	1737,1645	1773,2444	16
<i>Ort.</i>	9500,4668	2116,0622	2733,5336	14,9

Problem 030.3 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	8922,672	2087,714	2476,390	15
2	9004,793	1881,621	2443,853	16
3	9029,751	1254,621	4098,550	15
4	8813,222	1956,295	3021,366	15
5	8860,670	869,592	2246,944	17
6	8929,903	2846,712	2586,438	14
7	8890,613	564,525	4101,213	14
8	8916,314	697,876	4174,809	14
9	8934,464	3602,588	4236,153	15
10	8818,199	2028,962	2961,133	14
<i>Ort.</i>	8912,060	1779,051	3234,685	14,9

Problem 030.4 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Enivi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	9204,4326	1930,1875	2808,019	17
2	9091,1389	2376,1747	2717,2727	14
3	9131,1389	2265,7612	2768,7272	15
4	9121,1389	2439,6537	3117,9089	14
5	9260,476	2121,2659	2709,043	15
6	9074,4965	1751,5858	3006,1753	14
7	9083,8516	1919,361	2438,4259	14
8	9163,288	3751,8669	3908,0504	16
9	9177,1969	2282,4296	2670,0511	15
10	9223,0861	1715,8585	2596,7538	14
<i>Ort.</i>	9153,0244	2255,4145	2874,0427	14,8

Problem 030.5 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Enivi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	8975,449	992,309	2311,065	17
2	8894,585	1573,371	2155,589	17
3	8864,254	1993,556	2477,650	16
4	9198,288	1433,972	1594,313	18
5	8857,915	980,167	2341,996	18
6	8844,203	276,431	2856,575	17
7	8807,687	661,092	2374,388	16
8	8931,548	1401,441	3096,278	16
9	8860,191	2111,414	2309,414	15
10	8842,264	1348,294	2184,953	18
<i>Ort.</i>	8907,638	1277,205	2370,222	16,8

EK 4 3 İHA İLE ELDE EDİLEN SEZGİSEL SONUÇLAR

Problem 030.1 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	10553,727	6233,962	6632,466	13
2	10108,201	3593,918	7043,512	14
3	10221,982	11019,466	11130,021	17
4	9892,016	4964,390	6268,780	16
5	10031,082	4181,447	6161,719	15
6	10308,490	5133,411	7625,196	17
7	9560,406	5219,079	6376,085	16
8	10191,983	7563,210	8416,648	15
9	10221,982	10924,744	11027,560	17
10	9892,016	4979,503	6535,075	16
<i>Ort.</i>	10098,188	6381,313	7721,706	15,6

Problem 030.2 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	9280,668	5065,875	5114,445	15
2	9718,079	5565,081	5871,528	17
3	9313,998	4678,231	5529,248	17
4	9545,689	4323,948	5757,561	18
5	9280,106	4932,284	4980,050	14
6	9718,079	4030,434	4311,084	17
7	9313,998	4095,900	4907,903	17
8	9545,689	4245,369	5645,789	18
9	9313,998	4481,604	5332,055	17
10	9545,689	4593,867	6152,900	18
<i>Ort.</i>	9457,599	4601,259	5360,256	16,8

Problem 030.3 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	8326,897	7997,684	9181,889	15
2	8552,140	3270,846	5459,494	18
3	8344,329	4625,703	5383,150	17
4	4449,444	1830,022	4449,444	17
5	8588,715	1495,587	5454,761	18
6	8425,794	7255,239	8001,531	17
7	8359,874	1934,500	3561,466	19
8	8392,318	5299,728	5375,309	18
9	8371,020	5660,239	6826,375	16
10	8441,278	3017,237	5900,871	17
<i>Ort.</i>	8025,181	4238,679	5959,429	17,2

Problem 030.4 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	8960,064	7583,207	9510,237	16
2	8903,861	5839,784	7152,999	15
3	9021,194	2499,307	6406,472	19
4	8909,595	1186,197	7209,262	16
5	8999,640	7496,254	12234,942	16
6	8228,511	9124,228	13263,902	18
7	8268,217	9450,601	10602,202	19
8	8248,549	6318,392	9088,309	18
9	8228,511	8265,200	11993,562	18
10	8368,217	7391,854	8035,122	19
<i>Ort.</i>	8613,636	6515,502	9549,700	17,4

Problem 030.5 - E=20				
<i>Tekrar</i>	<i>Amaç</i>	<i>T_{Eniyi}</i>	<i>T_{Toplam}</i>	<i># D</i>
1	8440,892	3059,205	5329,214	18
2	8490,169	1447,987	5535,278	19
3	8522,916	2220,819	3333,952	19
4	8371,691	7165,425	7281,053	17
5	8343,479	5166,992	5777,274	17
6	8389,859	2915,605	6098,802	18
7	8874,674	223,229	3484,762	19
8	8703,402	1183,964	3649,080	19
9	8536,743	3402,556	4082,895	19
10	8414,050	3880,936	4312,715	17
<i>Ort.</i>	8508,788	3066,672	4888,503	18,2

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Emine EŞ YÜREK
Doğum yeri ve Tarihi :Samsun, 26/02/1982
Yabancı Dili :İngilizce

Eğitim Durumu

Lise :Kütahya Ali Güral Anadolu Lisesi, 2000.
Lisans :Yıldız Teknik Üniversitesi, 2004.
Yüksek Lisans :Boğaziçi Üniversitesi, 2007.

Çalıştığı Kurum : Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2013-....
İletişim : esyurek@uludag.edu.tr
Yayımları :

1. Uluslararası hakemli dergilerdeki makaleler

- **Es Yurek, E., Ozmutlu, H.C., 2018.** A decomposition-based iterative optimization algorithm for traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C*, 91: 249-262.

2. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler

2.1. Sözlü sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

- **Es Yurek, E., Ozmutlu, H.C.,** An iterative optimization approach for drone supported traveling salesman problem. *Optimization 2017, Lisboa (2017).*
- **Es Yurek, E., Ozmutlu, H.C.,** Traveling salesman problem with multi-drones. *29th European Conference on Operational Research (EURO), Valencia (2018).*

2.2. Sözlü sunulan ve tam metni yayımlanan bildiri(ler)

- **Es Yurek, E., Ozmutlu, H.C.,** Analysis of traveling salesman problem with drone under varying drone speed. *15th International Logistics and Supply Chain Congress (LMSCM), İstanbul (2017).*

3. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler

3.1. Sözlü sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiri(ler)

- **Eş Yürek, E., Özmutlu, H.C., İHA destekli gezgin satıcı problemi. 38. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi (YAEM), Eskişehir (2018).**

