

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



İNSANSIZ HAVA ARACI ROTALAMA PROBLEMLERİ İÇİN
MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİLERİ
VE MARMARA BÖLGESİNDE BİR UYGULAMA

MELİKE PULLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. İbrahim KÜÇÜKKOÇ (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Gülşen AYDIN KESKİN
Dr. Öğr. Üyesi Celal ÖZKALE

BALIKESİR, HAZİRAN - 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**İnsansız Hava Aracı Rotalama Problemleri İçin Matematiksel Model Önerileri ve Marmara Bölgesinde Bir Uygulama**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Melike PULLU

ÖZET

**İNSANSIZ HAVA ARACI ROTALAMA PROBLEMLERİ İÇİN
MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİLERİ
VE MARMARA BÖLGESİNDE BİR UYGULAMA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MELIKE PULLU
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)

BALIKESİR, HAZİRAN-2023

İnsansız hava aracı rotalama problemleri günümüzde popüler çalışma konularından biridir. Farklı görevlere çeşitli sensörler ile kolayca adapte edilebilmesi ve maliyetlerinin düşük olması insansız hava araçlarının sıkça tercih edilmesini sağlamaktadır. İnsansız hava araçlarının hızlı olması ve insansız olarak çalışabilmesi sebebiyle afet operasyonlarında ön plana çıkmaktadır. Yolların kapanması ve iletişim ağlarının zarar görmesi ihtimaline karşı hava araçlarını tercih etmek mantıklı olmaktadır ve farklı görevler için yönlendirilebilir olmaları avantaj sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında Marmara Bölgesinde meydana gelebilecek bir doğal afet senaryosunda insansız hava aracı rotalama ve merkez üssü konumunun seçimi üzerine çalışılmıştır. Problemin çözümü için karışık tamsayı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra seçilecek yönetim merkezlerinin konumu da afet yönetiminde önemli bir yere sahiptir. Problemin amacı insansız hava araçlarını ve merkezleri verimli kullanarak hem şehir taleplerinin karşılanması hem de gözetleme faaliyetleri ile bölgelerden haber alınması için en kısa rotanın planlanarak aday yönetim merkezlerinden hangisi veya hangilerinin açılmasının uygun olduğuna karar vermektir. Çalışmada matematiksel model üzerinden 3 farklı senaryo geliştirilmiştir ve senaryolar GAMS üzerinden kodlanmıştır. Senaryolar üzerinden afet durumlarında hangi merkezlerin açılması gerektiği ve bu merkezlerin kullanım kapasitelerinin çözüme etkisi, kullanılacak insansız hava aracı tiplerinden istihbarat ve taşıma görevleri için kaç araç kullanılmasının uygun olduğu analiz edilmiştir. Literatürde ilgili konu için yapılmış olan çalışmalar ve modeller incelendiğinde problemin karar mekanizmaları ve senaryosu çalışmayı diğer benzer çalışmalardan ayrı kılmaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: İHA rotalama, Rota planlama, ARP, Yer Seçimi

Bilim Kod / Kodları : 90610

Sayfa Sayısı : 67

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODELS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE ROUTING PROBLEMS AND A CASE STUDY IN THE MARMARA REGION

MSC THESIS

MELIKE PULLU

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

INDUSTRIAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. İBRAHİM KÜÇÜKKOÇ)

BALIKESİR, JUNE - 2023

Unmanned aerial vehicle routing problems have become popular research topics today. Their ability to easily adapt to different tasks with various sensors and their low costs make unmanned aerial vehicles a preferred choice. Due to their speed and ability to operate without human intervention, unmanned aerial vehicles stand out in disaster operations. Opting for aerial vehicles in case of road closures and damage to communication networks makes sense, and their ability to be directed for different tasks provides an advantage. In this thesis, the focus is on unmanned aerial vehicle routing and the selection of the central hub in a potential natural disaster scenario in the Marmara Region. Mixed-integer programming models have been developed to solve the problem. Additionally, the location of the selected management centers holds a significant role in disaster management. The objective of the problem is to efficiently use unmanned aerial vehicles and centers to both meet city demands and gather information from regions through surveillance activities by planning the shortest route, thus determining which candidate management centers should be opened. In the study, three different scenarios have been developed based on a mathematical model, and the scenarios have been coded in GAMS. By utilizing these scenarios, the analysis has been conducted to determine which centers should be opened during disaster situations, the impact of their utilization capacities on the solution, and the appropriate number of unmanned aerial vehicle types to be used for intelligence and transportation tasks. When examining the existing literature on the related topic, it can be seen that the decision mechanisms and scenario of the problem distinguish this study from other similar works.

KEYWORDS: UAV routing, route planning, VRP (Vehicle Routing Problem), site selection.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Önemi	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Özgün Katkısı.....	1
2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI	3
2.1 İnsansız Hava Araçlarının Sağladığı Avantajlar	3
2.2 İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları.....	3
2.2.1 Askeri Kullanımı	5
2.2.2 Sivil Kullanımı	5
2.3 İnsansız Hava Araçlarının Özelliklerine Göre Sınıflandırılması	5
3. LİTERATÜR TARAMASI	7
3.1 Araç Rotalama	7
3.2 İHA Rotalama	10
4. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ	16
4.1 Araç Rotalama Problemi Tanımı	16
4.2 Araç Rotalama Problemi Eniyileme Ölçütleri	17
4.3 Araç Rotalama Problemi Uygulama Alanları	17
4.4 Araç Rotalama Problem Türleri.....	18
4.4.1 Kısıtlara Göre Araç Rotalama Problemi	19
4.4.1.1 Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi	19
4.4.1.2 Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi	21
4.4.1.3 Zaman Pencere Araç Rotalama Problemi	21
4.4.1.4 Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi.....	22
4.4.1.5 Çok Depolu Araç Rotalama Problemi	22
4.4.2 Rotalama Durumuna Göre Araç Rotalama Problemi.....	22
4.4.3 Çevre Durumuna Göre Araç Rotalama Problemi	24
4.4.4 Yol Durumuna Göre Araç Rotalama Problemi.....	24
5. GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL VE SENARYOLAR	25
5.1 Problemin Tanımı ve Matematiksel Model	25
5.2 Problem Girdileri	28
5.2.1 Senaryo 1 (Açık Uçlu İHA Rotalama).....	34
5.2.1.1 Senaryo 1: Sonuçlar ve Yorum	34
5.2.2 Senaryo 2 (Kapalı Uçlu İHA Rotalama)	36
5.2.2.1 Senaryo 2: Sonuçlar ve Yorum	36
6. DENEYSEL TEST SONUÇLARI	38
6.1 Senaryo 1: Merkez Noktalarının Çözümüne Etkisi	38
6.2 Senaryo 2: Merkez Noktalarının Çözümüne Etkisi	44
6.3 Senaryo 1 - Senaryo 2: Çözümlerin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi	49
6.4 Senaryo 3: Gözetleme Operasyonları İçin Rotalama.....	52

6.4.1 Senaryo 3-1	52
6.4.2 Senaryo 3-2	53
6.4.3 Senaryo 3-3	54
6.4.4 Senaryo 3-1, 3-2 ve 3-3'ün Karşılaştırılması	55
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
8. KAYNAKLAR	58
EKLER	64
EK A: Senaryo 1 GAMS Çözüm Ekranları.....	64
EK B: Senaryo 2 GAMS Çözüm Ekranları	65
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Anka (Tusas, 2010).....	4
Şekil 2.2: Aksungur (Tusas, 2019).....	4
Şekil 2.3: Bayraktar DİHA (Baykartech, 2019).....	4
Şekil 2.4: Bayraktar TB2 (Baykartech, 2014).....	5
Şekil 3.1: İHA rotalama ile ilgili çalışmalar.	15
Şekil 4.1: Araç rotalama problemi için örnek gösterim.	17
Şekil 4.2: Araç rotalama problemi çeşitleri (Erol, 2006).	19
Şekil 4.3: Açık uçlu araç rotalama problemi.....	23
Şekil 4.4: Kapalı uçlu araç rotalama problemi.....	23
Şekil 5.1: Afet planı acil durum müdahale merkezileri ve görev noktaları.	31
Şekil 5.2: Senaryo 1 için çözüm.....	35
Şekil 5.3: Senaryo 2 için çözüm.....	37
Şekil 6.1: Senaryo 1 için sonuçların grafiksel karşılaştırması.	51
Şekil 6.2: Senaryo 2 için sonuçların grafiksel karşılaştırması.	51
Şekil 6.3: Senaryo 3-1 için elde edilen çözüme ait rotaların şematik gösterimi.	52
Şekil 6.4: Senaryo 3-2 için elde edilen çözüme ait rotaların şematik gösterimi.	53
Şekil 6.5: Senaryo 3-3 için elde edilen çözüme ait rotaların şematik gösterimi.	54
Şekil 7.1: Senaryo 1 ve Senaryo 2'ye ait problemler için çözüm.....	56
Şekil A.1: Senaryo 1 GAMS Sonuç Ekranı.....	64
Şekil A.2: Senaryo 1 Kapasitelerin Kullanımları-GAMS Sonuç Ekranı.....	64
Şekil A.3: Senaryo 1 İHA Rotalama Planı-GAMS Sonuç Ekranı.....	65
Şekil B.1: Senaryo 2 GAMS Sonuç Ekranı.....	65
Şekil B.2: Senaryo 2 Kapasitelerin Kullanımları-GAMS Sonuç Ekranı.....	65
Şekil B.3: Senaryo 2 İHA Rotalama Planı-GAMS Sonuç Ekranı.....	66

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Literatür taraması özeti.....	13
Tablo 4.1: Kapasite kısıtlı ARP matematiksel modeli için gerekli notasyon.....	20
Tablo 5.1: Matematiksel model notasyonları.....	26
Tablo 5.2: İHA özellikleri.....	28
Tablo 5.3: İllerin enlem/boylam değerleri.....	29
Tablo 5.4: Mesafe matrisi.....	30
Tablo 5.5: T_j noktalardan gelecek malzeme miktarı.....	31
Tablo 5.6: T_{Bj} noktalarına bırakılacak malzeme miktarı.....	32
Tablo 5.7: İHA'ların göreve uygunluğu ($uykj$).....	33
Tablo 5.8: İstasyonların işlem kapasitesi (W_j).....	33
Tablo 5.9: Senaryo 1 rotalama sonucu.....	35
Tablo 5.10: Senaryo 2 rotalama sonucu.....	37
Tablo 6.1: Senaryo 1, 1. probleme ait çözüm.....	39
Tablo 6.2: Senaryo 1, 2. probleme ait çözüm.....	39
Tablo 6.3: Senaryo 1, 3. probleme ait çözüm.....	40
Tablo 6.4: Senaryo 1, 4. probleme ait çözüm.....	40
Tablo 6.5: Senaryo 1, 5. probleme ait çözüm.....	41
Tablo 6.6: Senaryo 1, 6. probleme ait çözüm.....	41
Tablo 6.7: Senaryo 1, 7. probleme ait çözüm.....	42
Tablo 6.8: Senaryo 1, 8. probleme ait çözüm.....	42
Tablo 6.9: Senaryo 1, 9. probleme ait çözüm.....	43
Tablo 6.10: Senaryo 1, 10. probleme ait çözüm.....	43
Tablo 6.11: Senaryo 2, 1. probleme ait çözüm.....	44
Tablo 6.12: Senaryo 2, 2. probleme ait çözüm.....	44
Tablo 6.13: Senaryo 2, 3. probleme ait çözüm.....	45
Tablo 6.14: Senaryo 2, 4. probleme ait çözüm.....	45
Tablo 6.15: Senaryo 2, 5. probleme ait çözüm.....	46
Tablo 6.16: Senaryo 2, 6. probleme ait çözüm.....	46
Tablo 6.17: Senaryo 2, 7. probleme ait çözüm.....	47
Tablo 6.18: Senaryo 2, 8. probleme ait çözüm.....	47
Tablo 6.19: Senaryo 2, 9. probleme ait çözüm.....	48
Tablo 6.20: Senaryo 2, 10. probleme ait çözüm.....	48
Tablo 6.21: Senaryo 1'e ait problem çözümlerinin özeti.....	49
Tablo 6.22: Senaryo 2'ye ait problem çözümlerinin özeti.....	50
Tablo 6.23: Senaryo 3-1 için elde edilen çözüm.....	53
Tablo 6.24: Senaryo 3-2 için elde edilen çözüm.....	54
Tablo 6.25: Senaryo 3-3 için elde edilen çözüm.....	55
Tablo 6.26: Senaryo 3-1, 3-2 ve 3-3'ün karşılaştırılması.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

km : Kilometre
kg : Kilogram
sa : Saat
km/sa : Kilometre/Saat

ARP : Araç Rotalama Problemi
İHA : İnsansız Hava Aracı
ZARP : Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi
UAV : Unmanned Aerial Vehicle
DİHA : Dikey İniş Kalkışlı İnsansız Hava Aracı
VRP : Vehicle Routing Problem

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bütün bilgi birikimi ile yardımcı olan ve motive eden danışman hocam sayın Doç. Dr. İbrahim Küçükkoç'a teşekkür ediyorum.

Destekleriyle her zaman arkamda olan, hep daha iyisi için beni yönlendiren ve başaracağıma inanıp bana güvenen babaannem Kıymet Pullu'ya, annem Nuray Pullu ve babam Birol Pullu'ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Balıkesir, 2023

Melike PULLU

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Önemi

Türkiye birçok doğal afetin meydana gelebileceği bir coğrafi yapıya sahiptir. Ülkemizde en sık görülen doğal afetler deprem, dolu, sel, taşkın, don, orman yangınları, kuraklık, şiddetli yağış, şiddetli rüzgâr, yıldırım, çığ, kar ve fırtınalardır. Günümüzde artık teknolojinin gelişmesi ile birlikte afetler karşısında önlem alabilmek ve krizi yönetebilmek adına yapılan çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Doğal afetlerin meydana geldiği durumlarda en önemli avantaj zamanı doğru kullanmak ile sağlanacaktır. Afete erken müdahale etmek can ve mal kaybının artmasına engel olabilecektir. Doğal afetlere müdahale, malzeme taşıma ve gözetleme faaliyetleri her zaman uzak mesafeden ve insansız olarak gerçekleştirilememektedir. Operasyonlar sırasında insan görevlendirilmesi hayati tehlike de yaratabilmektedir. Bu aşamada insansız hava aracının tercih edilmesinin afet müdahalelerinde kullanımı uygun bulunmaktadır. Birçok sensör ve aksesuar ile farklı görevlere adapte edilebilir olması, havayolu üzerinden seyahat edebilir olması, yol durumundan etkilenmemesi, zorlu alanlara kolayca ulaşım sağlayabilmesi ve geniş açılarda görüntü alabilmesi tercih edilme sebeplerindedir. Tüm bu faktörler dikkate alındığında son yıllarda afet senaryoları için kamyon - İHA ve sadece İHA rotalama problemleri konusunda yer alan çalışmaların sayısında artış olduğu gözlenmektedir. Diğer bir önemli konu ise insansız hava araçlarının kullanacağı merkezlerin konumudur. Merkez sayısının artmasının veya azalmasının görev noktalarına etkisi araştırılarak merkezin açılacağı konumun doğru tayin edilmesi de bir çalışma konusudur. Bu çalışmada araç rotalama üzerine matematiksel modeller geliştirilmiştir ve geliştirilen model Marmara Bölgesinde meydana gelebilecek bir doğal afet senaryosunda insansız hava araçlarını kullanarak yardım ve iletişim ağını koordine edip, en kısa mesafede görevleri tamamlamak üzere kurgulanmıştır. Açılacak merkez sayısını ve merkezlerin konumunu belirleyerek kullanılacak insansız hava aracı sayısı üzerine sonuçlar elde edilerek tartışılmıştır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Özgün Katkısı

Doğal afet bölgelerinde ihtiyaçların tespiti ve hızlı bir şekilde yorumlanarak kaynakların koordine edilmesi gerekmektedir. Birçok bölgenin bireysel taleplerini ve taleplerin karşılanabileceği noktaları doğru tespit etmenin yanı sıra bu bilgi doğrultusunda bölgeler arasında malzeme akışını sağlamak ve bölgeler hakkında görsel veri toplamak önemli bir

unsurdur. Doğru veri doğru bir yöntem ile analiz edilerek çözüm arandığında süreç açısından etkin kararlar verilerek daha iyi sonuçlar ortaya çıkacaktır.

Bu tez çalışmasında insansız hava araçlarının rotalama problemi ve merkez seçimi problemleri ele alınmıştır. Problemlerin çözümü için matematiksel modeller geliştirilip GAMS üzerinden kodlanmıştır. Geliştirilen model Marmara Bölgesinde oluşabilecek bir doğal afet senaryosu için uygulanmıştır. Problemden kullanılan insansız hava araçları için talep noktalarının sahip olabileceği iki farklı görev belirlenmiştir. Görevlerin farklı İHA modelleri tarafından gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Görev beklentileri şöyledir; talep noktaları arasında teslimat yapılması ve noktaların gözlemlenerek iletişim sağlanmasıdır. Farklı İHA türleri kullanılarak iletişim ve malzeme tedariki sağlayarak en kısa mesafede operasyonu tamamlayacak rotanın planlanarak, açılacak merkezlerin sayısı ve konumunun belirlenmesinde sonuçlar değerlendirilmektedir. Literatürde yayınlanan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, bu tez çalışması kapsamında çözülen problemin matematiksel modeli ve senaryosu açısından benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tezin sonraki bölümleri aşağıda verilen plan dahilinde organize edilmiştir:

İkinci bölümde araç rotalama probleminin tanımı, tarihsel gelişimi, kullanım alanları ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde rotalama problemleri kapsamında literatür incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ARP için çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde Marmara Bölgesinde meydana gelebilecek bir afet senaryosunun çözümünde kullanılacak matematiksel modeller tanımlanarak, problem girdilerinden bahsedilmiştir.

Altıncı bölümde, 3 farklı senaryo üzerinden problemler incelenerek sonuçlar üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır.

Yedinci bölümde, sonuçlar değerlendirilmiştir ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

İnsansız hava aracı (İHA), pilot aracın içerisinde sürücü olarak bulunmadığı koşullarda kullanım için tasarlanmış olan hava araçlarının genel adı olarak literatürde yer almaktadır. Günümüzde maliyetlerin artması ve farklı görev ihtiyaçlarının ortaya çıkması sebebiyle insansız hava araçlarına olan talep oldukça artmıştır.

İHA'lar kullanım bakımından farklı kategorilerde incelenebilmektedir. Kullanım bakımından 3'e ayrılmaktadır. Bunlar; otonom, yarı otonom veya bir kontrol merkezi tarafından yönetilmesi olarak gruplandırılabilir. Otonom İHA'lar kendi kararlarını vererek uçuşu yönetebilme kabiliyetine sahiptir. Yarı otonom İHA'lar uçuşun belirli bölümlerinde insan müdahalesi ile çalışan modellerdir. Bir kontrol merkezi tarafından yönetilen İHA'lar ise tüm uçuş boyunca komut alarak ilerlemektedir.

2.1 İnsansız Hava Araçlarının Sağladığı Avantajlar

İnsansız hava araçlarının en büyük avantajlarından biri uzaktan yönetilebilme ve kısıtlı alanlarda zor ve tehlikeli operasyonlar için kullanımının mümkün olmasıdır. Özellikle zorlu ve tehlikeli görevlerde kullanılabilmesi sayesinde, insan hayatını tehlikeye atmadan uzaktan koordine edilerek operasyonlar başarıyla tamamlanabilmektedir. Maliyet açısından da olumlu sonuçları olması sebebiyle günümüz koşullarında birçok alanda kullanımı artarak yaygınlaşmaya devam etmektedir.

2.2 İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları

İnsansız hava araçları günümüzde farklı sensörler ve mekanizmalar aracılığı ile görev yetenekleri geliştirilerek, çeşitli alanlarda kullanımına olanak sağlanması amacıyla geliştirme çalışmaları sürdürülmeye devam etmektedir. Görev gereksinimi doğrultusunda donanımında büyük değişiklikler yapılmadan sensörler ve mekanizmalar yardımıyla görevlere kolaylıkla adapte edilebilirler ve yönlendirmeleri kolay, maliyetleri diğer araçlar ile kıyaslandığında uygun fiyatlı araçlardır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar gösteriyor ki İHA'ların sınır devriyeleri, keşif ve gözetleme faaliyetleri, arama ve kurtarma çalışmaları gibi farklı alanlarda kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir (Liu vd., 2014).

İHA modellerine örnek olarak Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te örnek görseller yer almaktadır.



Şekil 2.1: Anka (Tusas, 2010).



Şekil 2.2: Aksungur (Tusas, 2019).



Şekil 2.3: Bayraktar DİHA (Baykartech, 2019).



Şekil 2.4: Bayraktar TB2 (Baykartech, 2014).

2.2.1 Askeri Kullanımı

Güvenlik tehdidi bir toplumun işleyişini bozabilecek ve kaynakların kullanımını olumsuz etkileyerek maddi, ekonomik ve çevresel kayıplara neden olabilecek unsurlar içerir. Günümüzde can ve mal kaybına neden olan terör eylemleri ve göç dalgalarının kontrolünün sağlanması istenmektedir. Güvenlik ve kontrol şartlarını sağlamak amacıyla İHA kullanımının tercih edilmesi hızlı sonuç alınması, maliyetlerin düşük olması ve can ve mal kaybını en aza indirmesiyle oldukça önemli bir avantaj sağlamaktadır.

2.2.2 Sivil Kullanımı

İHA'lar sivil alanda da pek çok operasyon çeşidi için kullanılabilirler. Bunlara örnek olarak; harita verilerinin oluşturulması, hacim ve alan hesaplamalarının yapılması, arama kurtarma operasyonları, güvenlik ve istihbarat kapsamlı, doğal afet olaylarını izleme ve durum değerlendirme yapma, suç mahallerinin havadan izlenmesi, hassas tarım uygulamaları, 3 boyutlu şehir modellerinin oluşturulması olmak üzere birçok sivil alanda kullanımı yaygın olduğu görülmektedir (Kahveci ve Can, 2017).

2.3 İnsansız Hava Araçlarının Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

İHA'lar günümüz şartlarındaki talepler doğrultusunda yeni özellikler ile birlikte gelişmektedir. Görevin durumuna, çalışılacak alana ve görev gereksinimlerine göre farklı tiplerde İHA kullanımının sağlanması gerekebilir.

İHA'lar farklı kullanım amaçlarına ve teknik özelliklerine göre sınıflandırılabilir.

Sınıflandırmalar aşağıdaki gibidir (Korchenko ve Illyash, 2013).

- 1) Kullanım alanına göre; sivil, askeri, fotoğrafçılık, haritalama.
- 2) Kontrol sistemi çeřidine göre; otonom, yarı otonom, uzaktan kontrol merkezi.
- 3) Uçuş kurallarına göre.
- 4) Aracın tipine göre; helikopter, uçak, döner kanat, sabit kanat, çırpan kanat, vtol.
- 5) Kanat tipine göre; döner kanat, sabit kanat, çırpan kanat, vtol.
- 6) Aracın kalkış-iniş tipi özelliklerine göre; dikey iniş kalkışlı.
- 7) Kullanılan aracın motor tipine göre.
- 8) Kullanılan yakıt cinsine göre; petrol, jet yakıtı.
- 9) Aracın uçuş irtifasına göre.
- 10) Aracın görev yetenekleri ve uygulama alanlarına göre; gözetleme, ilaçlama, haritalama.

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1 Araç Rotalama

Araç rotalama problemleri hakkında literatür incelendiğinde yapılmış önemli çalışmalardan ve kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

Hill ve Benton (1992), yapılan çalışmada aracın noktadan çıkış zamanına göre seyahat süresi yerine hız değeri kullanılmıştır. Hız süresinin değerini tayin etmek amacıyla tahmine dayalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu problem gezgin satıcı probleminin çok satıcılı versiyonu olarak çözülmüştür.

Malandraki ve Dial (1996), zamana bağlı gezgin satıcı problemi üzerine çalışarak dinamik programlama yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Park (2000), zamana ve alana bağlı olarak iki kriterli araç rotalama problemi üzerine çalışmıştır. Problemin amacı işlemin tamamlanma süresinin en küçüklenerek, taşımadaki yükün en küçüklenerek rotanın tamamlanmasıdır. Problem çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli oluşturmuş olup kazanç algoritmasını önermiştir.

Berger vd. (2003), deponun kapasitesinde herhangi bir kısıt olmadığı ve rota uzunluğunun kısıtlandığı yer seçimli araç rotalama problemi üzerine çalışmıştır.

Demir (2008), okullar için araç rotalama problemi üzerine çalışmıştır. Dağıtım ve toplama olmak üzere gerçekleşen turlar üzerinden servislerin rota problemini incelemiştir. Problem çözümünde dört tamsayılı karar modeli çözüm için sunulmuştur. Bu modeller; ikisi düğüm tabanlı ve ikisi akış tabanlı modellerdir. Farklı senaryolar ve veri setleri üzerinden problemi çözdürerek çözüm süreleri ve elde edilen değerler üzerinden yorumlar yapmıştır.

Bayzan (2009), çalışmasında planlanan rotadaki trafik durumu ve yolun açık kapalı olma durumlarını incelemiştir. Rota üzerindeki noktalara yerleştirilen cihazlar üzerinden aldığı verileri değerlendirip, yorumlayarak en iyi rotanın bulunmasını sağlayan bir sistem geliştirmiştir.

MirHassani vd. (2011), yaptıkları çalışmalarda filodaki araçların sayısını ve kat edilen toplam rotayı minimize etmeyi hedefleyen bir model üzerine çalışmışlardır. Yöntem olarak parçacık sürü optimizasyonu yönteminden faydalanmışlardır.

Wang ve Chen (2013), araç sayısı ve seyahat mesafesinin en küçüklenmesi amacıyla esnek zaman pencereli topla-dağıt araç rotalama problemi için tamsayılı bir model geliştirmişlerdir. Probleme evrimleşen algoritma ile yer değiştirme metodu birleştirilmiştir. Literatürde yer alan problemler üzerinden model test edilmiştir.

Pradenas vd. (2013), zaman pencereli önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi için rotaların enerji tüketimlerini saptayıp, müşterilere taşınan yükü dikkate alarak sera gazı salınımını en küçüklemeyi amaçlamıştır. Problem çözümünde dağıtma arama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma literatürde yer alan çeşitli problemler üzerinde test edilmiştir.

Yazdan vd. (2014), Clarke ve With tasarruf algoritması ve en kısa yol metotları kullanarak talep ve kapasite kısıtlı ARP için yeni bir melez algoritma geliştirmiştir. Problem girdisi oluşturulup tasarruf sezgiseli ile sonuçlar elde edilmiştir. Aynı problem girdileri en kısa yol yöntemi ve tasarruf algoritması ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ANOVA testi ile değerlendirilmiştir. Yeni yöntemde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Kiremitçi vd. (2014), birden fazla aracın kullanıldığı, dağıtım toplamalı ve zaman pencereli ARP üzerine çalışmışlardır. Problemin çözümünde kullanılmak üzere genetik algoritma üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Literatürdeki problemler geliştirilen algoritma ile çözülerek mevcut algoritma ile kıyaslaması yapılmıştır.

Keçeci vd. (2015), müşteri taleplerinin karşılanması ve toplama faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi adına eşzamanlı olacak şekilde kurgulanan ARP modeli üzerine çalışmışlardır. Problem çözümü için akış tabanlı matematiksel model önermişlerdir. Geliştirilen akış tabanlı matematiksel modelin literatürde yapılan diğer çalışmalarla kıyaslandığında daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Ulutaş vd. (2017), Bir ekmek fırını için araç rotalama problemi üzerine çalışmışlardır. Çözümde tasarruf algoritması uygulanmıştır. Uygulama tamamlandığından fırın dağıtım maliyetlerinde düşüş olduğu tespit edilmiştir.

Şevki vd. (2017), gazete dağıtım problemi için taşıma maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlamıştır. Problem çok amaçlı Açık Uçlu Araç Rotalama problemi olarak modellenmiştir. Problemin çözümünde Değişken Komşuluk Arama algoritması önerilmiştir. Algoritma çeşitli boyuttaki problemlerde test edilmiştir. Önerilen algoritma diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Jahangir vd. (2018), envanter rotalama üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada ayrık yabancı ot ve genetik algoritma olarak iki metasezgisel önermişlerdir. Çözüm sonuçları üzerinden iki algoritma karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Çözüm sonuçları incelendiğinde ayrık yabancı ot algoritmasının küçük problemler için daha iyi çözüm ürettiği sonucuna varmışlardır. Problem büyüklüğü arttıkça genetik algoritmanın ürettiği çözümlerin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Mulloorakam vd. (2019), birden fazla amacı olan kapasite kısıtlı araç rotalama problemini incelemişlerdir. Araç sayısı ve uzaklık orantılı olarak azaltılmaya çalışarak amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Problemin çözümünde genetik algoritma tabanlı yaklaşım kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda önerilen algoritma sayesinde iyi sonuçlar alındığı kaydedilmiştir.

Fleszar vd. (2019), açık uçlu araç rotalama problemi üzerine çalışmışlardır. Bu problemi çözmek amacıyla değişken komşuluk arama sezgiselini geliştirmişlerdir. Toplam mesafenin ve araç sayısının minimizasyonu üzerine çalışmışlardır.

Ermutaf (2019), yaptığı çalışmada çok amaçlı konteyner yükleme ve kapasite kısıtlı açık uçlu araç rotalama problemi için toplam gidilen mesafenin minimize edilmesini hedeflemiştir. Problem matematiksel model ve genetik algoritma yardımıyla çözümlenerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Normasari vd. (2019), çalışmaları kapasite kısıtlı yeşil ARP üzerinedir. Tavlama benzetimi algoritması problemin çözümünde kullanılmıştır. Kullanılan algoritma ile birlikte deneyler yapılmıştır.

3.2 İHA Rotalama

İnsansız hava araçlarının maliyet olarak uygun olması, uzaktan kontrol edilebilir olması sebebiyle tehlikesiz olması ve kolay kullanımı sayesinde birçok problem için tercih sebebidir. Bundan dolayı literatürde konu olduğu çalışma sayısı oldukça fazladır ve sıkça rastlanmaktadır. Aşağıda tezin çalışma konusu olan İnsansız Hava Araçlarının rotalanması hakkında literatür incelendiğinde yapılmış bazı çalışmalardan ve kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

Song vd. (2018), İHA'lar için teslimat lojistiği alanında kullanımları üzerine çalışma yapmışlardır. Sınırlı uçuş süreleri, yüklenebilir kapasite ve kargo ağırlığının uçuş kabiliyeti üzerine etkileri çalışmada incelenmiştir. Problem çözümü için Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama modeli önerilmiştir. Problemin sorunlarını ele almak amacıyla sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

Ha vd. (2018), gezgin satıcı probleminde İHA kullanımı üzerine inceleme yapmışlardır. Bu yaklaşımda hizmet kalitesinin artırımını sağlamak ve nakliye maliyetlerini azaltmak amacıyla İHA ve Kamyon birlikte kullanılmıştır. Her müşteri yalnız bir defa ziyaret edilmektedir ve müşterilere kamyon veya İHA tarafından hizmet verilebilmektedir. Her iki araç içinde rota depoda başlayarak depoda bitmektedir. İki farklı sezgisel yöntem kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Fu vd. (2018), İHA rotalama üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada İHA'nın rota planlamasında enerji faktörünün doğru hesaplanarak İHA'nın rotasını depoda tamamlaması adına model üzerinde çalışılmıştır. Amaç fonksiyonunda yol güvenliği maliyeti, uzaklık maliyeti, düzgünlük maliyetleri probleme dâhil edilerek enerji tüketimi maliyetleri incelenmiştir. Sezgisel algoritma önerilerek sonuçlar deneysel olarak analiz edilmiştir.

Yürek (2018), İHA ve kamyonun eş zamanlı dağıtım yaptığı problem için rotalama problemini çözmüştür. Çözüme kamyonun rotasını minimize edecek şekilde başlanarak rotalama süresince kararlar her noktadan sonra sürekli yinelenerek iyileştirilmeye

çalışılmaktadır. Çoklu İHA senaryosunun uygulanmasında amaç fonksiyonu depoya en son gelen İHA'nın dönüş zamanının minimizasyonu olarak belirlenmiştir. Çalışmada matematiksel ve sezgisel çözüm yöntemleri ile sonuç performansları karşılaştırılmıştır.

Değirmen vd. (2018), afet bölgelerine ulaşım sağlanamadığı durumlarda durum tespiti yapmak amacıyla İHA kullanımı üzerine rota planlaması yapılmıştır. İHA'ların gözetleme yapacağı alanlar için kullanacağı istasyonların belirlenmesinde rota planlaması amacıyla kümeleme yöntemi uygulanmıştır ve bunun için matematiksel model önermişlerdir. Model üzerine uygulamalar yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Karabay (2018), İHA rotalama problemi için çözüm aramıştır. Algoritmada hedef tamamlandıkça rota yeniden hesaplanarak değerlendirilmektedir. Algoritmanın çalışma şekli şöyledir; İHA'lar merkezden ayrılarak rotasındaki en yakın hedeflere gidecektir, hedeflerden ayrıldıktan hemen sonra en yakın hedefi belirleyerek ilerleyecek ve sonunda merkeze dönmektedir. Problem için sezgisel algoritma geliştirilerek sonuçlar incelenmiştir.

Elmas (2019), İHA'ların rotalama faaliyetlerinde ulaşılması zor olan alanlara malzeme sevkiyatı sağlamak, gözetleme faaliyetlerini gerçekleştirmek amacıyla kullanılması üzerine çalışılmıştır. Modelden İHA'lar için en kısa rota mesafesinin oluşturulması beklenmektedir. Farklı senaryolar üzerinden sezgisel yöntemler kullanılarak İHA'ların sahip olduğu özelliklerin ve senaryoların problem çözümüne olan etkisi incelenmiştir.

Uçar vd. (2021), Heterojen filolu - zaman pencereli-kapasite kısıtlı hareketli müşteri araç rotalama problemi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada görev süresi ve görev maliyetleri minimize edilmeye çalışılmıştır. Problem çözümü için üç farklı sezgisel algoritma kullanılmıştır. Algoritma parametrelerinin belirlenmesinde Taguchi metodu kullanılmıştır.

Daşdemir (2021), İHA rotalama problemi için düşman bölgesinde gözlem noktaları belirlenmiştir. İHA'ların görevleri yerine getirirken toplam uçuş mesafesini minimize etmesi ve görev dolayısıyla gizlilik durumunu koruması amaçlanmaktadır. Karma tam sayılı programlama modeli üzerine çalışılmıştır daha sonrasında çözüm için hibrit bir algoritma geliştirilmiştir.

Ibroşka (2021), kamyon ve İHA'ların eşzamanlı çalışmasını ele almışlardır. Genel Değişken Komşuluk Arama algoritması geliştirilerek problemi çözmüştür ve sonuçlar mevcut çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Özkan (2021), İHA yönlendirme problemini çözmek amacıyla bir metasezgisel algoritmayı tamsayılı doğrusal programlama modeliyle melezlemiştir. Problem karmaşıklığı nedeniyle oluşturulan metasezgisel modelin iyi sonuçlar için olumlu sonuçlar elde etmesi planlanmıştır. Türkiye için gerçek hayattan bir örnek vaka seçilerek uygulama yapıp sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sajid (2022), İHA rotalama problemleri için optimizasyon çalışması önermiştir. Problemlerin çözümü için karma tam sayılı doğrusal programlama modelleri üzerine çalışmıştır. Süreçlerin ve değişken yükün seyahat süresi üzerine etkisi dikkate alınarak problem çözülmüştür.

Tezcaner ve Köksalan (2023), çoklu amaçlar olmak üzere kat edilen mesafeyi ve radara yakalanma olasılığını en aza indirmeye yönelik bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu iki amaç fonksiyonu doğrultusunda İHA'ların sürekli uzayda rotalanabilmesi üzerine problem geliştirmişlerdir.

Kara vd. (2023), çalışmasında meydana gelen anız yangınları ile mücadelede kullanılacak İHA'lar arasından en uygununun seçilmesi üzerine çözüm önerisinde bulunmuştur. Bulanık analitik ağ süreci (AHP) ile elde edilen kriter ağırlıkları Complex Proportional Assessment (COPRAS) yöntemi içerisinde kullanılarak farklı senaryolar üzerinden yorumlanmıştır.

Literatür araştırmalarına ait özet Tablo 3.1’de verilmiştir.

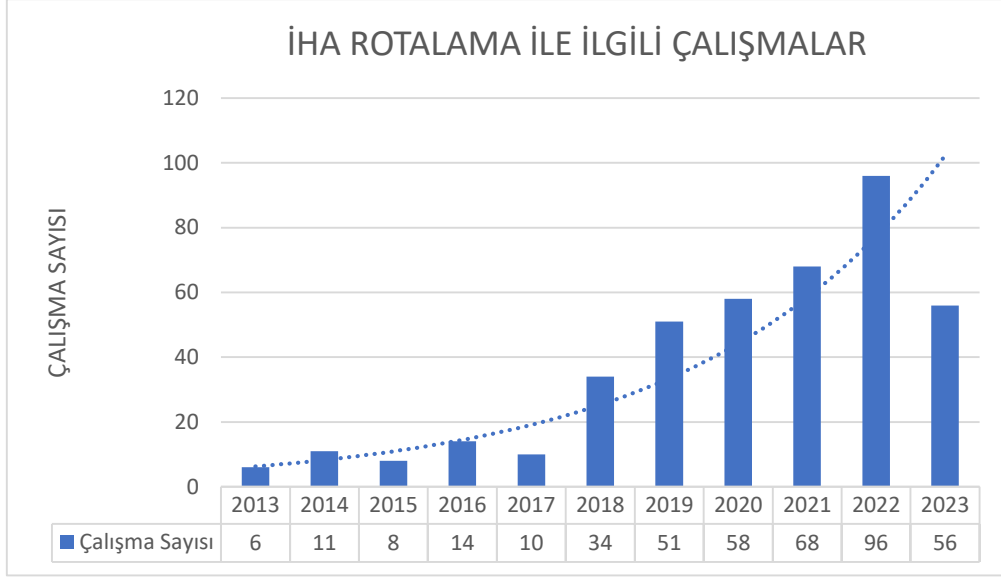
Tablo 3.1: Literatür taraması özeti.

Yazar	Yıl	Konu	Metot	Model Türü		İHA Sayısı		Merkez Sayısı		Amaç
				Açık: A Kapalı: K		=1	>1	=1	>1	
				A	K					
Song vd.	2018	İHA teslimat lojistiği	Sezgisel		√		√	√		Kapsanan görevlerin toplam sayısı ve teslimat mesafesinin maksimize edilmesi
Ha vd.	2018	İHA ve Kamyon ile gezgin satıcı problemi	Sezgisel		√		√	√		Toplam nakliye maliyetlerinin minimize edilmesi
Fu vd.	2018	Enerji tüketimi kısıtı altında İHA yol planlaması	Sezgisel		√		√	√		Yol güvenliği, uzaklık ve düzgünlük maliyetlerinin minimize edilmesi
Değirmen vd.	2018	Afet operasyonların İHA rotalama	MIP	√			√		√	Gidilen toplam mesafesinin minimize edilmesi
Karabağ	2018	İHA rotalama problemi	Sezgisel		√		√	√		Gidilen toplam mesafesinin minimize edilmesi
Elmas	2019	İHA rotalama problemi	Sezgisel-MIP		√		√		√	Gidilen toplam mesafesinin minimize edilmesi
Uçar vd.	2021	Hareketli müşteri araç rotalama problemi	Sezgisel		√		√	√		Görev süresi ve görev maliyetlerinin minimize edilmesi

Tablo 3.1 (devam)

Yazar	Yıl	Konu	Metot	Model Türü		İHA Sayısı		Merkez Sayısı		Amaç
				Açık: A	Kapalı: K	=1	>1	=1	>1	
Daşdemir	2021	İHA rotalama problemi	Sezgisel-MIP		√	√		√		Gidilen toplam mesafesinin minimize edilmesi ve rotada İHA gizlilik durumunun sağlanması
İbroşka	2021	İHA rotalama problemi	Sezgisel		√		√	√		Gidilen toplam mesafesinin minimize edilmesi
Ozkan	2021	Orman yangınlarının tespitinde İHA rotalama	MIP-Metasezgisel		√		√	√		Gidilen toplam mesafenin minimize edilmesi
Sajid	2022	İHA rotalama problemi	MIP		√		√	√		Gidilen toplam mesafesinin minimize edilmesi
Tezcaner ve Köksalan	2023	İHA rotalama problemi	Sezgisel		√		√	√		Radara yakalanma olasılığı ve mesafenin minimize edilmesi
Karavd.	2023	İHA seçimi	Sezgisel				√			En uygun İHA'ya karar verilmesi

Şekil 3.1'de İHA Rotalama konusunu içeren 2013-2023 yılları arasında Scopus üzerinden alınan veriler doğrultusunda mühendislik bilimlerinde gerçekleştirilmiş olan araştırma ve geliştirme çalışmalarının sayısı grafiksel olarak gösterilmiştir. Yıllar bazında çalışma sayısının sürekli arttığı bir grafik elde edilmiş olması İHA rotalama konusunun popüler bir çalışma alanı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1: İHA rotalama ile ilgili çalışmalar.

4. ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ

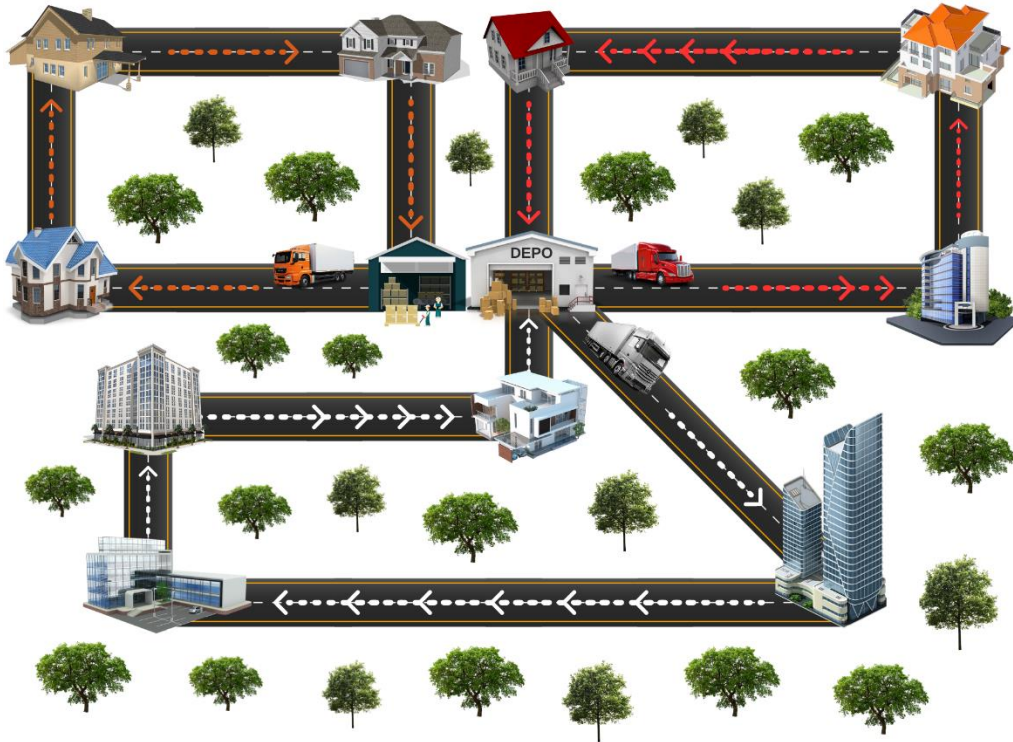
4.1 Araç Rotalama Problemi Tanımı

Araç rotalama problemleri (ARP), ziyaret edilmesi için belirlenen noktalara veya görevlere gidilmesi için gereken yol mesafesini en aza indirecek rotaların bulunması problemi olarak tanımlanmaktadır.

Dağıtım ve toplama operasyonlarında araç rotalarının belirlenmesi önemlidir. Araç rotalama problemi özellikle lojistik ve sevkiyat alanlarında oldukça yaygın kullanılan bir problem türüdür. Lojistik ile ilgilenen firmalar araç rotalama problemlerini optimize etmek amacıyla çalışmalar yaparak avantaj sağlamaya çalışmaktadırlar. Araç rotalama problemleri için amaç fonksiyonlarını geliştirilerek ve optimize etmek için yapılan çalışmalar literatür kapsamında önemli bir konu olarak yer almaktadır (Li vd., 2020).

ARP araçların belirli bir merkezden yolculuğa başlayarak ziyaret etmesi gereken noktalara gidip, son olarak rotasını merkezde tamamladığı süreci kapsamaktadır. Rotalama çalışmalarında noktaların talepleri karşılanmalıdır. Talep noktaları araç rotalarında yer almalıdır. Dağıtım yapılacak yük miktarı araç kapasitesini hiçbir zaman aşmamalıdır, bu sebeple araçlar talep miktarları dikkate alınarak rotalanmalıdır. ARP problemleri için amaç, maliyet fonksiyonunu minimize ederken bütün kısıtların gerekliliklerini sağlayarak kullanılacak araç, depo sayısı ve toplam mesafeleri minimize etmeye çalışmaktır. Bir diğer amaç olarak müşteri memnuniyetini arttırmak olarak gösterilebilmektedir. Taleplerin hızlı bir şekilde karşılanması ve az maliyet ile ulaştırılması müşteri memnuniyetini arttırmış olacaktır (Demircioğlu, 2009).

ARP problemleri için örnek gösterim Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Araç rotalama problemi için örnek gösterim.

4.2 Araç Rotalama Problemi Eniyileme Ölçütleri

Araç rotalama problemlerinde birçok konu başlığı için farklı amaçlar bulunmaktadır. Araç rotalama problemlerinin birçok alana adapte edilerek kullanım sağlanmasının mümkün olması çeşitliliğin artmasının en önemli nedenlerindedir.

ARP için bazı amaçlar şöyledir (Atmaca, 2012);

- Taşıma operasyonlarının gerçekleştirildiği çalışmalar için kat edilen mesafe ve kullanılacak olan araç maliyetlerini minimize etmek
- Rotada kullanılacak araç sayısını minimize etmek
- Rotalardaki iş yükü dağılımının dengeli olması.

4.3 Araç Rotalama Problemi Uygulama Alanları

Araç rotalama problemleri için amaç ve görev gereksinimleri doğrultusunda farklı uygulamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Kişilerin, eşyaların taşınması veya çöplerin toplama işlemleri gibi faaliyetlerin her biri bir problem olmaktadır. Bu problemlerin çözümü ülkeler için ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Araç rotalama problemleri için yapılan

çalışmalardaki tasarruf değerlerinin getirisi düşünüldüğünde iyileştirme ve geliştirme çalışmaları için şirketler ve araştırmacılar tarafından dikkat çekici bir alan olmaya devam etmektedir.

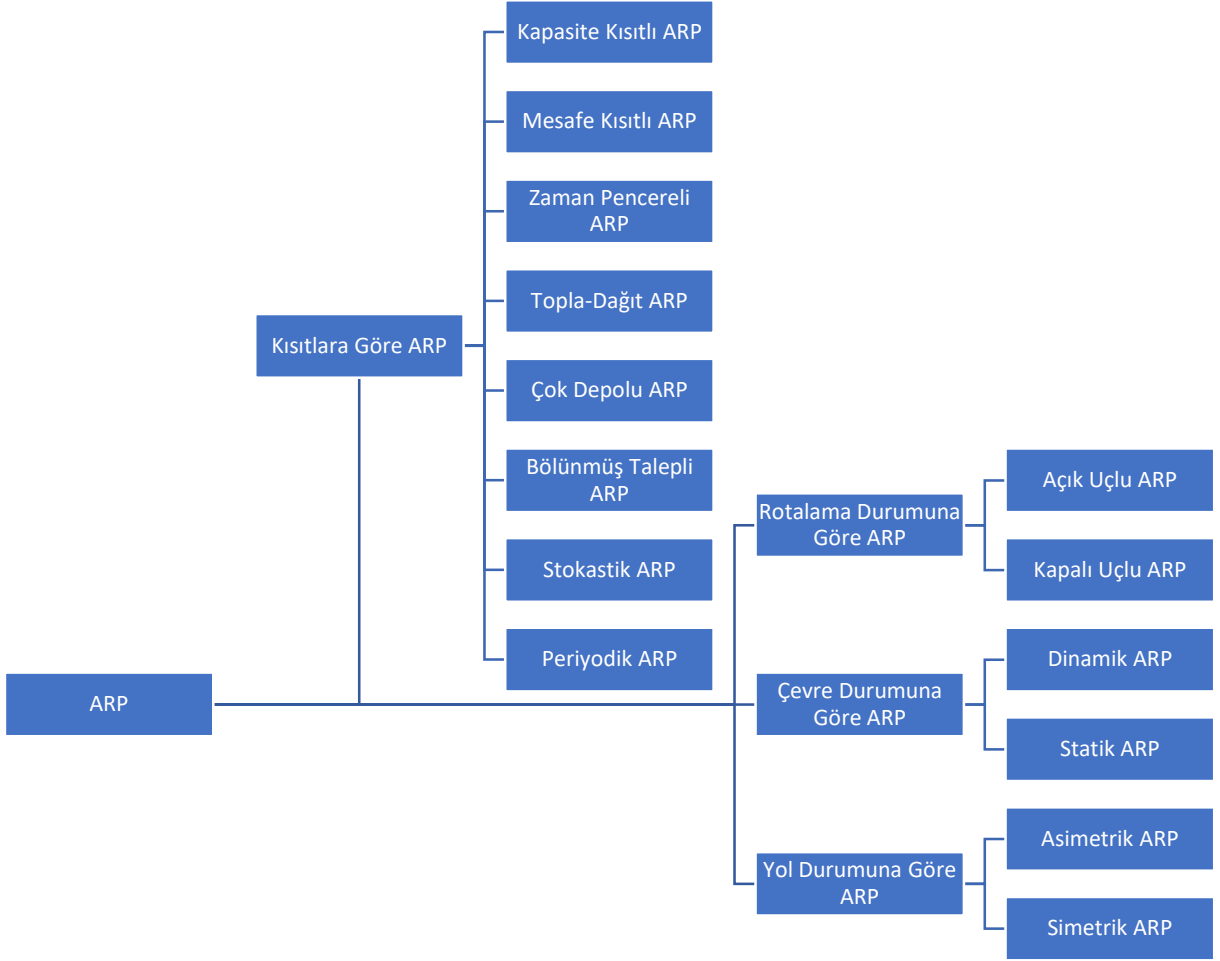
Günümüzde çalışılmakta olan bazı problemlerden örnekler aşağıda verilmiştir:

- İstasyon ve merkezlerin yerleşim yerlerinin belirlenmesinde,
- Malzeme sevkiyatı olan problemlerde rotanın planlanmasında
- İş akışı ve zaman çizelgelerinin planlanmasında,
- Dağıtım toplamalı araç rotalama problemlerinde,
- Afet bölgeleri için araç rotalama problemlerinde,
- Belediye çöp toplama faaliyetlerinde rota planlanmasında,
- Uçaklar için havaalanı rotalama çalışmalarında,
- Sınır güvenliğinde rotalama faaliyetlerinde,
- Gemicilik faaliyetlerinde rota planlanmasında

uygulama alanları mevcuttur.

4.4 Araç Rotalama Problem Türleri

Araç rotalama problemleri temel olarak kısıtlara, rotalama durumuna, çevre durumuna ve yol durumuna göre farklı başlıklarda gruplandırılmaktadır. Bu gruplandırmalar problem çözümünde uygulanan kısıtlar, araçlar, depolar, talepler ve yol durumu olmak üzere çeşitli faktörler doğrultusunda şekillenmektedir. Şekil 4.2’de problem türlerinin ayrıldığı kategoriler gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Araç rotalama problemi çeşitleri (Erol, 2006).

4.4.1 Kısıtlara Göre Araç Rotalama Problemi

Araç rotalama problemlerinde gerçek hayat temel alındığında problemler için kısıtlar meydana gelmektedir. Bu kısıtlar kapasite, mesafe, depo noktaları ve görevler doğrultusunda şekillenerek rotalama problemlerini çeşitlendirmektedir.

4.4.1.1 Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi

Kapasite kısıtlı ARP çeşitleri literatürde sıkça yer alan bir problem türüdür. Depo noktası 0 ile gösterilirken, bir depodan n adet müşteriye ($N=\{1, 2, \dots, n\}$) dağıtım yapılmaktadır. $E=\{(i,j):i, j \in V, i \neq j\}$ depo ile müşteriler arasındaki bağlantıları ifade etmektedir. Noktalar arasındaki mesafe d_{ij} (i noktasından j noktasına olan mesafe) olarak tanımlanmaktadır. Dğümler arasında bulunan mesafeler için simetri durumu söz konusu değildir. Modelde homojen K adet araç yer almaktadır. Araçlar depodan hareket etmektedir. Malzemeler

müşterilere bu araçlarla taşınmaktadır. TB_i müşterilere ulaştırılacak olan talep değerlerini ifade etmektedir. Problemin amacı belirtilen kısıtlar doğrultusunda araçlar için rotadaki kat edilen mesafenin minimize edilmesidir.

Aşağıda verilmekte olan matematiksel model (Toth ve Vigo, 2014) için gerekli tüm notasyonlar Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

Tablo 4.1: Kapasite kısıtlı ARP matematiksel modeli için gerekli notasyon.

İndeks

- N** : Müşteri kümesi; $N = \{1, 2, \dots, n\}$
V : Düğüm kümesi; $V = \{0\} \cup N$
E : Yollar kümesi; $E = \{(i,j) : i, j \in V, i \neq j\}$

Parametreler

- d_{ij}** : i ve j düğümü arasındaki mesafe ($\forall i, j \in V, i \neq j$)
K : Filoda yer alan araç sayısı
Q : Araç kapasitesi
 TB_i : i müşterisinin talebi ($\forall i \in N$)

Karar değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ aracı } i \text{ noktasından sonra } j \text{ noktasını ziyaret etti ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda } (\forall i, j \in V, i \neq j) \end{cases}$$

l_i = Aracın i müşterisine geldiğinde o ana kadar diğer müşterilere dağıtılmış olan birikimli talep miktarı ($\forall i \in N$)

$$\text{Minimize } \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ij} \quad (4.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j} \leq K \quad (4.4)$$

$$l_i - l_j + Qx_{ij} \leq Q - TB_j \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (4.5)$$

$$TB_i \leq l_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (4.6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (4.7)$$

$$l_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (4.8)$$

Yukarıdaki modelde verilmekte olan amaç fonksiyonu (4.1) araçlar için kat edilen mesafeyi minimize etmeye çalışmaktadır. Kısıt (4.2) ve Kısıt (4.3) müşteri noktalarına ziyaretin yalnızca bir defa yapılmasını ve ziyaret edilen noktalardan bir defa ayrılmasını garanti etmektedir. Kısıt (4.4) araç sayısı kadar rota olabileceğini, araç sayısından fazla rotanın bulunmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.5) alt tur eleme kısıtıdır ve noktalar arasında yük miktarı değişimini kısıtlamaktadır. Kısıt (4.6) müşteriye teslim edilecek ürün miktarının araç kapasitesini aşmasını engellemektedir. Kısıt (4.7) ve Kısıt (4.8) işaret kısıtlarıdır.

4.4.1.2 Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi

Mesafe kısıtlı araç rotalama problemi, yönlendirilen bir aracın kat edebileceği maksimum mesafeyi aşmadığı problem türü olarak tanımlanmaktadır. Bu mesafe aracın teknik özellikleri, seyir hızı ve ortam koşulları çerçevesinde şekillenmektedir. Araç rotadaki gidebileceği yol mesafesini hesaplayarak en son depoya dönecek şekilde noktalar arasında seyahate devam eder. Gittiği müşteriden mutlaka depoya dönmesi gerekmektedir. Modelde bu hesap göz önünde bulundurularak araç kapasitesi yetersiz kalacağı noktada bir sonraki seyahati gerçekleştirilerek depo noktasına dönmeyi tercih etmektedir (Erol, 2006).

4.4.1.3 Zaman Pencere Araç Rotalama Problemi

Zaman pencere araç rotalama problemlerinde (ZPARP) belirli bir zaman aralığında müşterinin ziyaret edilmesi gerekmektedir. Zaman pencere araç rotalama problemleri zaman aralığı açısından 2'ye ayrılmaktadır. Bunlar Sıkı Zaman Pencere ARP ve Esnek Zaman Pencere ARP'dir. Belirlenen zaman aralığından önce gidilerek aracın noktada beklediği, geç gittiğinde ise operasyonun gerçekleştirilemediği problemler Sıkı Zaman Pencere ARP olarak tanımlanır. Esnek Zamanlı ARP'ler de ise belirlenen zaman aralığı

dışında araç tarafından gidildiğinde operasyon gerçekleştirilmektedir fakat probleme bir ceza maliyeti yansıtılmaktadır (Dursun, 2009).

4.4.1.4 Eş Zamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi

Topla dağıt araç rotalama problemi, bir merkezden müşterilere yapılacak dağıtım operasyonları ve müşterilerden merkeze taşınacak toplama faaliyetleri için aynı aracın kullanıldığı problem türleridir. Problem için aşağıdaki türler bulunmaktadır:

- Önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi
- Karma topla dağıt araç rotalama problemi
- Eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi

4.4.1.5 Çok Depolu Araç Rotalama Problemi

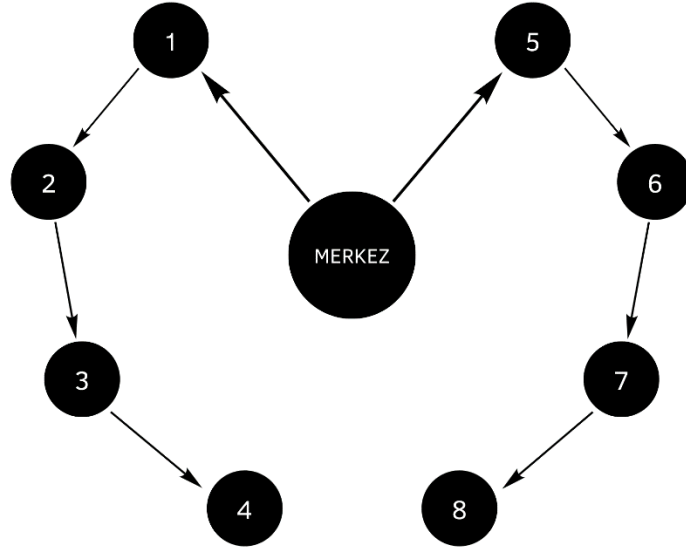
Birden fazla müşteri için merkezlerin birden fazla olması gerekliliği sebebiyle çok depolu araç rotalama problemleri için gereksinim ortaya çıkmıştır. Bu problemler için birden fazla tedarikçi, fabrika veya depo malzemeleri müşterilere ulaştırmak adına en uygun çözümün arandığı problemler olarak çeşitli alanlarla uygulamaları yapılmaktadır. Birden fazla merkez noktasının bulunması ve müşteri taleplerinin birden fazla merkez için planlanması problemi karmaşıktırarak çözümü zorlaştırmaktadır.

Bu problem türlerinde çok sayıda depo ve çok sayıda araç bulunmaktadır. Müşterilere taşıt rotaları planlanmasında taleplerin hepsi karşılanmalı ve kat edilen mesafe minimum olacak şekilde problem çözümlenmelidir.

4.4.2 Rotalama Durumuna Göre Araç Rotalama Problemi

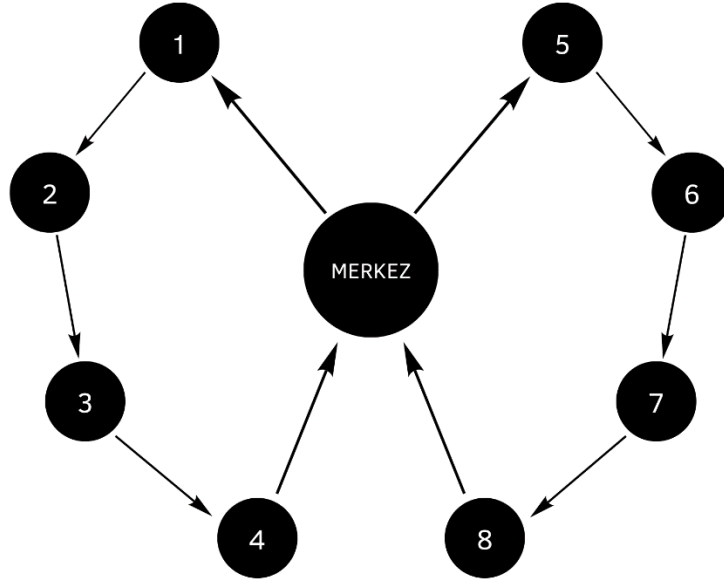
Araç rotalama problemleri rotada başlangıç ve bitiş noktalarının durumu değerlendirilerek açık veya kapalı uçlu olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. Başlangıç ve bitiş noktasının aynı olduğu modeller kapalı uçlu araç rotalama problemi kapsamına girmektedir. Rotanın başlangıç ve bitiş noktasının farklı olduğu modeller ise açık uçlu araç rotalama problemi olarak tanımlanmaktadır (Erol, 2006).

Açık uçlu ARP için örnek çözüm Şekil 4.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.3: Açık uçlu araç rotalama problemi.

Kapalı uçlu ARP için örnek çözüm Şekil 4.4'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.4: Kapalı uçlu araç rotalama problemi.

4.4.3 Çevre Durumuna Göre Araç Rotalama Problemi

Çevre Durumuna Göre Araç Rotalama Problemi statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Statik ARP için araç kapasiteleri, müşteri talepleri, seyahat sürelerinin maksimum değerleri, kısıtlar ve değişkenler problem çözülmeden önce bilinmektedir ve bilgiler daha sonrasında değişmemektedir. Dinamik ARP için tam tersi durum gerçekleşmektedir. Problem süresince verilerin anlık değişimi mümkün olmaktadır. Örnek olarak müşteri talebi anlık olarak artabilir veya azalabilmektedir (Papağan, 2022).

4.4.4 Yol Durumuna Göre Araç Rotalama Problemi

Gidiş ve varış mesafelerinin aynı olmaması, noktalar arasındaki mesafenin simetrik veya asimetric olmasına göre ulaşılabacak rotalar iki kategoriye ayrılmıştır.

Asimetrik Araç Rotalama Problemi: Merkezden ayrılan aracın hizmet noktasına gidiş yolu ile merkeze aynı noktadan dönüş yolunun mesafe matrisinde eşit olmadığı problemlerdir.

Simetrik Araç Rotalama Problemi: Merkezden ayrılan aracın hizmet noktasına gidiş yolu ile merkeze aynı noktadan dönüş yolunun mesafe matrisinde eşit olduğu problemlerdir.

5. GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODEL VE SENARYOLAR

Marmara bölgesinde meydana gelebilecek doğal afetlerde müdahale için bilgi toplanması ve ihtiyaç noktalarına malzeme tedariki sağlanması önemli bir konudur. Bu problemde yola çıkarak İHA kullanımının daha uygun olacağı görülmüştür. İHA'nın yönetileceği merkez sayısı ve konumu, kullanılacak İHA modeli ve türü geliştirilen model ile farklı senaryolar üzerinden test edilmiştir.

Problem amacı doğrultusunda İHA'ların sahip olduğu görevler;

- Malzeme taşıma görevi sadece merkez üssünden görev noktalarına olmayacaktır. Acil durum senaryolarında afetin meydana geldiği bölgelerde ihtiyaçlar farklılık göstermektedir. Bu bölgelerdeki talepler veya talep fazlası malzemeler belirlenerek hem merkez hem de görev noktaları arasında malzeme tedariki sağlanabilecektir. Bu sayede eldeki kaynaklar daha verimli kullanılarak ihtiyaçlar doğru noktalara hızlı bir şekilde ulaştırılmış olacaktır.
- Bilgi toplama ve gözlem görevi, afet senaryolarında müdahale planı oluşturmak, hasarı tespit etmek ve iç karışıklığı önlemek amacıyla bilgi toplayarak, görüntü alması olarak tanımlanmıştır. Afet müdahalelerinde karar vermek amacıyla bu verilerin doğru kullanılması oldukça önemli bir konudur.

Bir diğer model ise İHA'ların yönetileceği merkez üssü sayısının ve konumunun belirlenmesidir. İstasyonların konumu ve sayısı rota maliyetini doğrudan etkilemektedir. Uygulamada aday merkezler için farklı kombinasyonlar denenerek sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Merkezler üzerine iş yükünü eşit dağıtmak adına modele merkez işlem kısıtı eklenerek tek merkez üzerinde işlem yığılmasının önüne geçilmesi istenmiştir. Bu da problemi gerçek hayat senaryolarına daha uygulanabilir kılmaktadır.

5.1 Problemin Tanımı ve Matematiksel Model

Model, üs noktalarından görev noktalarına İHA'ların hangi merkezden yönlendirileceğini, araçların ne kadar yükü merkezden ayrılması gerektiğini ve bu amaçla gidilen mesafeyi en aza indiren rotayı bulmayı amaçlamaktadır. Bu problemde matematiksel modelde kullanılan notasyonlar Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1: Matematiksel model notasyonları.

Kümeler

- V** : Dügümlerin kümesi, $V = I \cup J$
E : Bağlantıların (arkların) kümesi, $((i, j) \in E)$
I : Potansiyel merkez düğümleri kümesi, $I = \{1, 2, \dots, b\}$
J : Görev noktalarının kümesi, $J = \{b+1, \dots, n\}$
K : İHA'ların kümesi, $k = \{1, \dots, m\}$

Parametreler

- b** : Merkez sayısı
n : Tüm düğümlerin sayısı
m : Mevcut İHA sayısı
g : Büyük bir sayı
 T_j : j noktasından toplanacak yük miktarı (kg)
 TB_j : j noktasına bırakılacak yük miktarı (kg)
 Q_k : k İHA'sının yük kapasitesi (kg)
 W_j : j merkezi için İHA'ların kalkış ve iniş sayısının kapasitesi
 KG_k : k İHA'sının havada kalma süresi (sa)
 VK_k : k İHA'sının hızları (km/sa)
 d_{ij} : i ve j noktaları arasındaki mesafe (km)
 uy_{kj} : k İHA'sının j noktasındaki göreve uygunluğu; 1: uygun, 0: uygun değil

Karar değişkenleri

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ aracı } i \text{ noktasından sonra } j \text{ noktasını ziyaret etti ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$v_i = \text{Modele girilen rotadaki } i \text{ ve } j \text{ düğümlerinin konumlarıdır. } (\forall i \in N)$$

$$l_i = \text{Aracın } i \text{ düğümlüne geldiğinde o ana kadar noktalara dağıtılmış olan birikimli talep miktarı } (\forall i \in N)$$

$$l_k = k \text{ aracının merkezden ayrılırken sahip olması gereken yük miktarı } (\forall k \in K)$$

Gidilen mesafeyi en aza indirmek için önerilen matematiksel model, Tablo 5.1'de listelenen parametreler ve karar değişkenleri kullanılarak aşağıdaki gibi modellenmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} d_{ij} \quad (5.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in J \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{irk} = \sum_{j \in V} x_{rjk} \quad \forall r \in J, \forall k \in K \quad (5.4)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in I} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (5.5)$$

$$v_i - v_j + (n - m) \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq n - m - 1 \quad \forall i, \forall j \in J, \forall i \neq j \quad (5.6)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \frac{x_{ijk} d_{ij}}{VK_k} \leq KG_k \quad \forall k \in K \quad (5.7)$$

$$x_{ijk} \leq u y_{kj} \quad \forall i \in V, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (5.8)$$

$$l_k = \sum_{i \in I} \sum_{j \in V} TB_j x_{ijk} \quad \forall k \in K \quad (5.9)$$

$$l_j \geq l_k + T_j - TB_j - g(1 - x_{ijk}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (5.10)$$

$$l_j \geq l_i - TB_j + T_j - g(1 - \sum_{k \in K} x_{ijk}) \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall i \neq j \quad (5.11)$$

$$l_k \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (5.12)$$

$$l_j \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} * Q_k \quad \forall j \in J \quad (5.13)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{jik} \leq W_j \quad \forall j \in I \quad (5.14)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K \quad (5.15)$$

$$v_i \geq 0 \text{ ve } v_i \in z ; \forall i \in J \quad (5.16)$$

$$l_i \geq 0 \text{ ve } l_i \in z ; \forall i \in J \quad (5.17)$$

Modelde m sayıda İHA, b sayıda üs noktası ve n sayıda düğüm bulunmaktadır. d_{ij} , i ve j düğümleri arasındaki Öklid uçuş mesafesidir. x_{ijk} karar değişkinleri düğümlerin arasındaki rotalama ilişkisini göstermektedir. Rotada i noktasından j noktasına k aracı ile gidiliyorsa

$x_{ijk} = 1$, aksi takdirde $x_{ijk} = 0$ değerini almaktadır. Modelde v_i ve v_j , alt turları önleme için modelde gidilen rotadaki i ve j düğümlerinin konumları olarak modele eklenmiştir.

Amaç fonksiyonu (5.1) İHA'lar için gidilen toplam mesafeyi en aza indirmektedir. Kısıt (5.2) ve Kısıt (5.3), tüm görev noktaların ziyaret edilmesini, görevlerin yerine getirilmesini sağlar. Kısıt (5.4) bir İHA'nın atandığı noktada görevi tamamladıktan sonra o noktadan ayrılmasını sağlar. Kısıt (5.5) oluşturulan rota sayısının kullanılan İHA sayısından fazla olmamasını, her İHA'nın bir rotada yalnızca bir defa kullanılabilmesini garanti eder. Kısıt (5.6) alt turların oluşmasını engellemek adına modele eklenmiştir. İHA'ların hızları ve havada kalma süreleri doğrultusunda Kısıt (5.7) gidilen mesafede havada kalma süresini kısıtlamaktadır. İHA'ların atanacak göreve uygunluğu Kısıt (5.8) ile kısıtlanmaktadır. Kısıt (5.9) İHA'nın başlangıç noktasından havalanırken dağıtım yapması planlanan noktaların talebini karşılayacak kadar yük ile merkezden ayrılmasını sağlar. İHA'nın ilk noktadan sonraki araç yükleri Kısıt (5.10), rota boyunca İHA kapasitesi Kısıt (5.11) ile kısıtlanmaktadır. İlk noktadan sonraki ve rota boyunca İHA kapasitesi Kısıt (5.12) ve (5.13) ile kontrol edilmektedir. Kısıt (5.14), merkez noktalarına İHA'lar tarafından yapılan iniş ve kalkış sayısını kısıtlar. Bu kısıt merkezler arasında dengeli işlem dağılımı yapılması adına eklenmiştir. Kısıt (5.15), (5.16) ve (5.17) işaret kısıtlarıdır.

5.2 Problem Girdileri

Afet operasyonlarında rotalama çalışması için iki farklı İHA modeli kullanımına karar verilmiştir. Çalışma yapılacak bölgenin mesafeleri ve yerine getirilmesi beklenen görevlerin durumu göz önünde bulundurularak ANKA ve Bayraktar DİHA olmak üzere iki İHA Modeli kullanımına karar verilmiştir. İHA'ların teknik özellikleri Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.2: İHA özellikleri.

İHA Modeli	Havada Kalış Süresi (sa)	Faydalı Yük Kapasitesi (kg)	Hız (km/sa)
Anka	24	250	138
Bayraktar DİHA	12	5	83

Anka afet bölgesinde noktalar arasında yük taşıma ve toplama faaliyetlerinde kullanılmak üzere rotalanacaktır. Bayraktar DİHA ise istihbarat amacıyla gözetleme ve bilgi toplama faaliyetleri için rotalanacaktır. Problem çözümünde 2 adet Anka, 2 adet Bayraktar DİHA kullanılmaktadır.

Problemde rotalama faaliyetleri için çalışılacak illerin enlem ve boylam verileri Google Maps üzerinden alınmıştır. Veriler Tablo 5.3'te verilmiştir. Çalışmada İHA üzerinden rotalama problemi çözüldüğünden dolayı kullanılan mesafe matrisi Öklid uzaklık mesafesi alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 5.3: İllerin enlem/boylam değerleri.

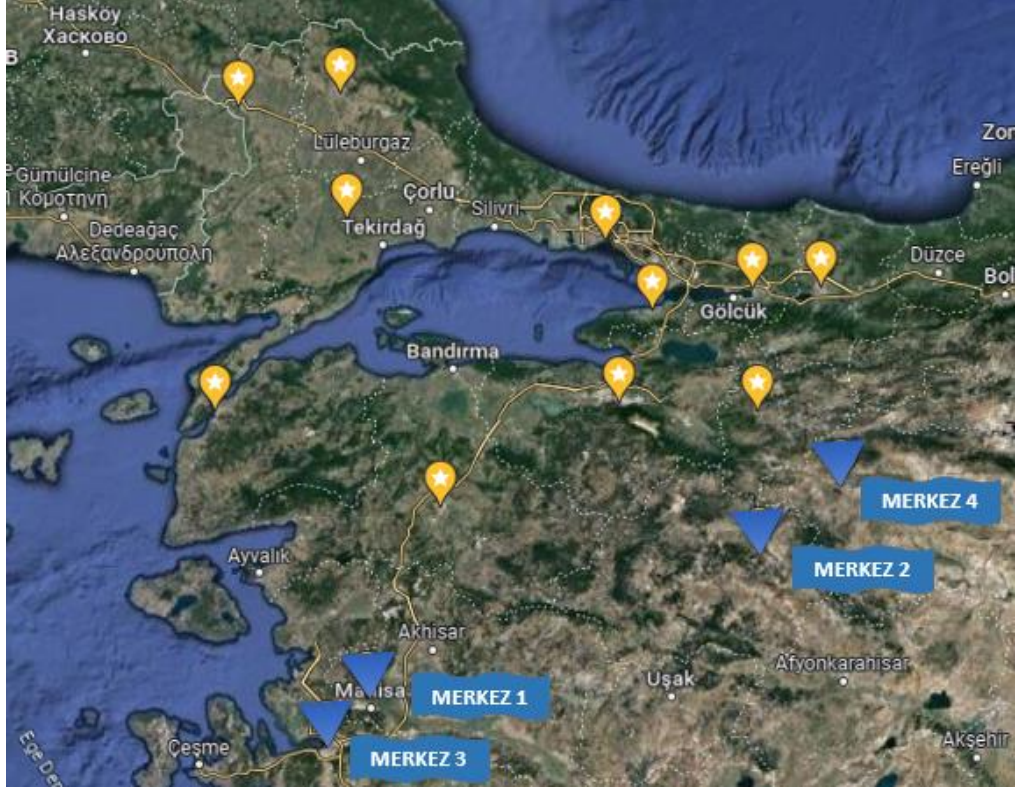
No	İl	Enlem	Boylam
S1 (Merkez)	Manisa	38,73	27,45
S2 (Merkez)	Kütahya	39,40	29,97
S3 (Merkez)	İzmir	38,42	27,13
S4 (Merkez)	Eskişehir	39,77	30,52
S5	Balıkesir	39,64	27,83
S6	Edirne	41,66	26,46
S7	Çanakkale	40,13	26,46
S8	Bursa	40,19	29,07
S9	Bilecik	40,12	29,98
S10	İstanbul	41,10	28,96
S11	Kırklareli	41,74	27,24
S12	Sakarya	40,83	30,38
S13	Yalova	40,71	29,25
S14	Tekirdağ	40,95	27,37
S15	Kocaeli	40,77	29,94

Bu tez çalışmasında afet durumunda müdahale planı için merkez ve görev noktaları belirlenmiştir. Araçların rotalarındaki illeri dolaşarak tüm görevleri yerine getirmesi beklenmektedir. Algoritmanın verdiği sonucun test edilebilmesi ve çözüm sonuçlarının karşılaştırılması için öncelikle 4 merkez yeri ve 11 görev noktasından oluşan 15 şehir için çözümler elde edilmiştir. Tablo 5.4'te mesafe matrisi verilen 15 şehir için matematiksel model çalıştırılmış olup çözüm sonuçları incelenmiştir.

Tablo 5.4: Mesafe matrisi.

NOKTALAR		(Merkez 1) Manisa	(Merkez 2) Kütahya	(Merkez 3) İzmir	(Merkez 4) Eskişehir	Balıkesir	Edirne	Çanakkale	Bursa	Bilecik	İstanbul	Kırklareli	Sakarya	Yalova	Tekirdağ	Kocaeli
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
(Merkez 1) Manisa	S1	0	238	36	294	109	342	186	221	275	291	341	346	273	255	318
(Merkez 2) Kütahya	S2	238	0	269	60	185	383	316	116	80	197	347	154	149	297	150
(Merkez 3) İzmir	S3	36	269	0	328	150	365	201	256	309	327	368	381	308	299	353
(Merkez 4) Eskişehir	S4	294	60	328	0	226	397	354	133	62	190	354	112	144	133	122
Balıkesir	S5	109	185	150	226	0	253	138	115	185	176	238	246	162	170	212
Edirne	S6	342	383	365	397	253	0	169	267	334	214	55	336	254	86	300
Çanakkale	S7	186	316	201	354	138	169	0	225	303	236	189	344	249	128	306
Bursa	S8	221	116	256	133	115	267	225	0	78	91	230	130	55	182	98
Bilecik	S9	275	80	309	62	185	334	303	78	0	128	302	78	81	252	69
İstanbul	S10	291	197	327	190	176	214	236	91	128	0	167	121	46	143	85
Kırklareli	S11	341	347	368	354	238	55	189	230	302	167	0	286	210	71	252
Sakarya	S12	346	154	381	112	246	336	344	130	78	121	286	0	93	265	38
Yalova	S13	273	149	308	144	162	254	249	55	81	46	210	93	0	176	56
Tekirdağ	S14	255	297	299	133	170	86	128	182	252	143	71	265	176	0	227
Kocaeli	S15	318	150	353	122	212	300	306	98	69	85	252	38	56	227	0

Afet planı acil durum müdahale merkezleri ve görev noktalarının haritadaki konumları Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Afet planı acil durum müdahale merkezileri ve görev noktaları.

Afet durumunda malzeme tedarigi ve noktalar arası malzeme aktarımı sağlamak önemli bir unsurdur. Noktaların ürün talepleri veya gereksinim miktarları farklılık gösterebilmektedir. Bir nokta için talep edilmeyen malzeme başka bir nokta için gerekli olabilmektedir. Bu amaçla modelde noktalardan gelen bilgiler doğrultusunda aynı malzeme grubu için rotalama problemi yapılarak tüm noktaların talepleri karşılanmaya çalışılmaktadır. Tablo 5.5’te görev aşamasında noktaların ihtiyaç fazlası olan malzeme miktarlarını vermektedir. İHA’lar bu malzemeleri toplayarak uygun buldukları noktalara aktarımını sağlamaktadır.

Tablo 5.5: T_j noktalardan gelecek malzeme miktarı.

Nokta Adı	Şehirler (Görev Noktaları)	Toplanacak Malzeme Miktarı (kg)
S5	Balıkesir	0
S6	Edirne	0
S7	Çanakkale	70
S8	Bursa	0
S9	Bilecik	100
S10	İstanbul	0

Tablo 5.5 (devam)

Nokta Adı	Şehirler	Toplanacak Malzeme Miktarı (kg)
S11	Kırklareli	150
S12	Sakarya	0
S13	Yalova	90
S14	Tekirdağ	0
S15	Kocaeli	0

Noktalara bırakılacak malzeme miktarları Tablo 5.6’da gösterilmektedir. Her İHA taşıma kapasitesini aşamayacak şekilde, dağıtım yapacağı noktalar için gerekli olan yük miktarı ile merkezden ayrılmaktadır.

Tablo 5.6: TB_j noktalarına bırakılacak malzeme miktarı.

Nokta Adı	Şehirler	Bırakılacak Malzeme Miktarı (Kg)
S5	Balıkesir	0
S6	Edirne	0
S7	Çanakkale	0
S8	Bursa	70
S9	Bilecik	0
S10	İstanbul	200
S11	Kırklareli	0
S12	Sakarya	0
S13	Yalova	0
S14	Tekirdağ	0
S15	Kocaeli	170

Modelde kullanılan ANKA taşıma görevleri için kullanılırken, Bayraktar DİHA istihbarat ve gözetleme operasyonları için kullanılacaktır. Tablo 5.7 İHA’ların göreve uygunluğunu göstermektedir; 1 değeri İHA’nın göreve uygun olduğu anlamına gelmektedir, 0 değeri ise İHA’nın göreve uygun olmadığı anlamına gelmektedir. İHA’lar uygun olmadığı göreve atanamamaktadır.

Tablo 5.7: İHA'ların göreve uygunluğu (uy_{kj}).

			ŞEHİRLER										
			Balıkesir	Edirne	Çanakkal	Bursa	Bilecik	İstanbul	Kırklareli	Sakarya	Yalova	Tekirdağ	Kocaeli
			S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
İHALAR	Anka	M1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
	Anka	M2	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
	Bayraktar DİHA	M3	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	Bayraktar DİHA	M4	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Merkez noktalarının kapasiteleri iş gücü, malzeme ve alan olarak kısıtlıdır. Bu durum göz önünde bulundurularak merkez noktaları için işlem kapasite kısıtı eklenmiştir. Bu modelde bu durum göz önünde bulundurularak her bir İHA kalkış ve iniş operasyonu birer işlem sayılmaktadır. Merkeze atanan İHA'ların toplam işlem sayısı bu işlem sınırını aşmamalıdır. Tablo 5.8'de modelde kullanılan merkezlerin işlem kısıtları verilmiştir.

Tablo 5.8: İstasyonların işlem kapasitesi (W_j).

Merkez No	Şehirler	İşlem Kısıtı (Adet)
S1	Manisa	2
S2	Kütahya	2
S3	İzmir	2
S4	Eskişehir	2

5.2.1 Senaryo 1 (Açık Uçlu İHA Rotalama)

Senaryo 1, İHA'nın tüm kısıtlar dâhilinde rotasına merkezden başlayarak en yakın merkezde tamamladığı senaryonun incelenmesidir.

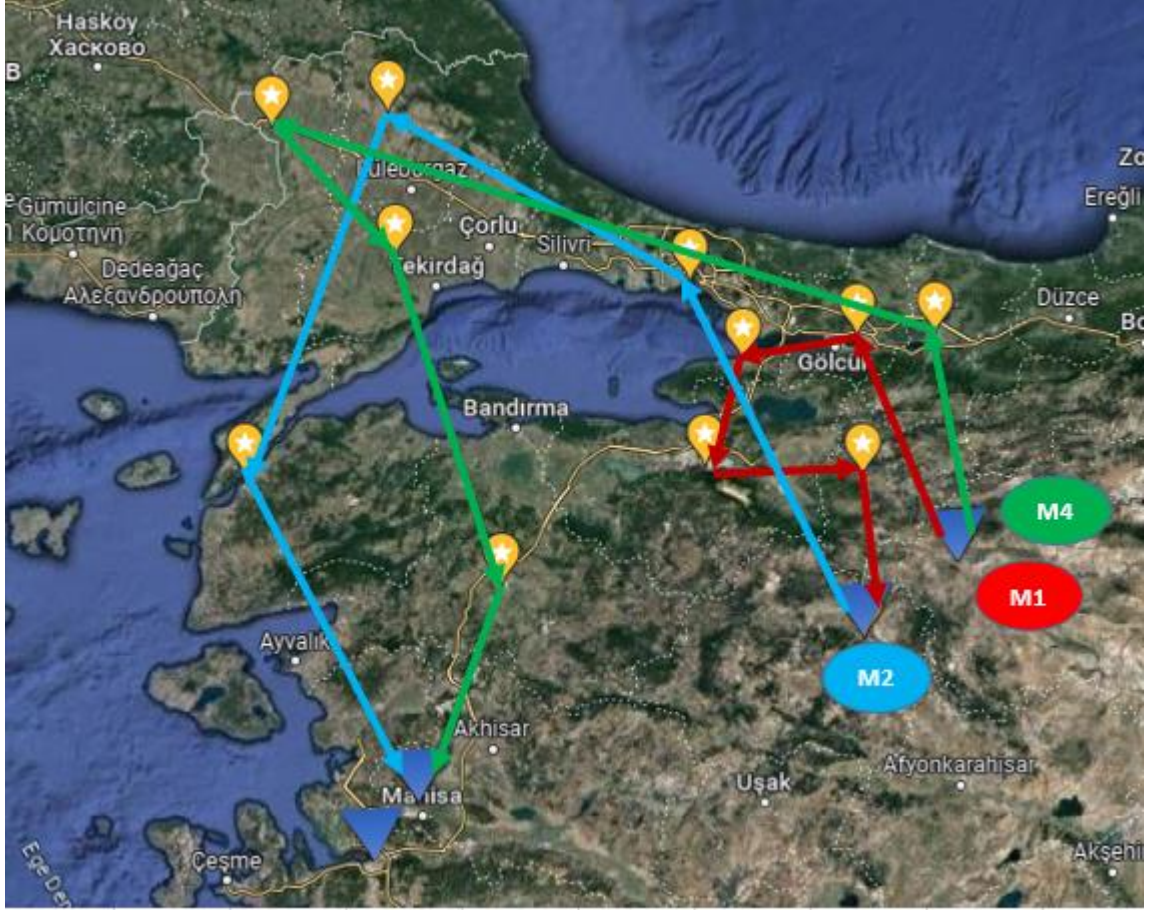
Senaryo Özellikleri:

Senaryo özellikleri ve varsayımları aşağıdaki şekilde listelenmiştir.

- Merkezlerin malzeme kapasitesi sınırsız olarak kabul edilmiştir.
- İHA merkezden çıkar ve rotasını tamamlamak için en yakın merkeze döner. İHA'nın kalkış ve iniş yapacağı merkezler farklı olabilir.
- Kullanılacak İHA ve merkez sayısına model karar vermektedir.
- Tüm noktaların talepleri öncesinde bilinmektedir. Her seferdeki toplam talep aracın kapasitesini geçemez.
- İHA'lar heterojendir. Bu nedenle uygunluk matrisine göre yeterli görüldükleri görevlere yönlendirilebilir.

5.2.1.1 Senaryo 1: Sonuçlar ve Yorum

Senaryo 1 için 4 merkez, 4 İHA ve 11 görev noktası üzerinden model sınınmıştır. Sonuç olarak 3 adet İHA kullanılmış ve 3 rota oluşturulmuştur. İHA'lar rotalarını en yakın merkez noktasına dönerek tamamlamışlardır. Şekil 5.2 de Senaryo 1'in sonucuna göre İHA'ların rotası ve kalkış iniş yaptığı merkezler gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Senaryo 1 için çözüm.

Tablo 5.9: Senaryo 1 rotalama sonucu.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S4 - S2	M1	S4 - S15 - S13 - S8 - S9 - S2	2,83	391
S2- S1	M2	S2 - S10 - S11 - S7 - S1	5,35	739
S4 - S1	M4	S4 - S12 - S6 - S14 - S5 - S1	9,79	813

Senaryo 1 uygulanarak yapılan model çözüm sonucunda kullanılan merkezler, kullanılan İHA'lar, izlenen rotalar ve kat edilen toplam mesafeler Tablo 5.9'da yer almaktadır. Verilen rotalama sonuçlarına göre kat edilen toplam mesafe 1943 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotanın tamamlanma süresi 9,79 saattir.

5.2.2 Senaryo 2 (Kapalı Uçlu İHA Rotalama)

Senaryo 2 İHA'nın tüm kısıtlar dâhilinde rotasına merkezden başlayarak, başladığı merkezde rotasını tamamladığı senaryonun incelenmesidir. Bu senaryo için Kısıt (5.18) eklenmiştir. Eklenen kısıt her İHA'nın rotasını başladığı noktada bitirmesini sağlamaktadır.

$$\sum_{j \in V} x_{rjk} = \sum_{j \in V} x_{jrk} \quad \forall r \in I, \quad \forall k \in K \quad (5.18)$$

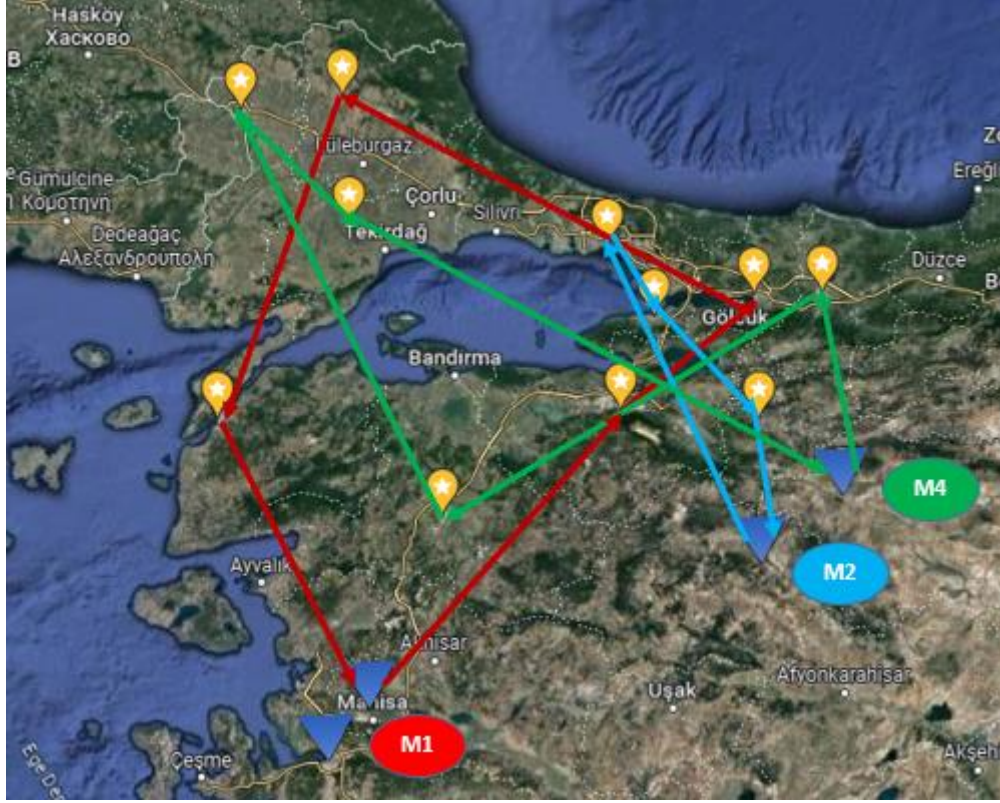
Senaryo Özellikleri:

Senaryo özellikleri ve varsayımları aşağıdaki şekilde listelenmiştir:

- Merkezlerin malzeme kapasitesi sınırsız olarak kabul edilmiştir.
- İHA merkezden çıkar ve rotasını tamamlamak için başladığı merkeze döner. İHA'nın kalkış ve iniş yapacağı merkezler farklı olamaz.
- Kullanılacak İHA ve merkez sayısına model karar vermektedir.
- Tüm noktaların talepleri öncesinde bilinmektedir. Her seferdeki toplam talep aracın kapasitesini geçemez.
- İHA'lar heterojendir. Bu nedenle uygunluk matrisine göre yeterli görüldükleri görevlere yönlendirilebilirler.

5.2.2.1 Senaryo 2: Sonuçlar ve Yorum

Senaryo 2 için 4 adet merkez, 4 adet İHA ve 11 görev noktası üzerinden model sınanmıştır. Sonuç olarak 3 adet İHA kullanılmış ve 3 rota oluşturulmuştur. İHA'lar göreve başladıkları merkez noktasına geri dönerek rotalarını tamamlamışlardır. Şekil 5.3'te Senaryo 2'nin çözüm sonucuna göre İHA'ların rotası ve kalkış iniş yaptığı merkezler gösterilmektedir.



Şekil 5.3: Senaryo 2 için çözüm.

Tablo 5.10: Senaryo 2 rotalama sonucu.

Kullanılan İstasyonlar	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1	M1	S1 – S8 – S15 – S11 – S7 – S1	6,85	946
S2	M2	S2 – S10 – S13 – S9 – S2	2,93	404
S4	M4	S4 – S12 – S5 – S6 – S14 – S4	10,00	830

Senaryo 2 uygulanarak yapılan çözüm sonucunda kullanılan merkezler, kullanılan İHA'lar, izlenen rotalar ve kat edilen toplam mesafeler Tablo 5.10'da yer almaktadır. Verilen rotalama sonuçlarına göre kat edilen toplam mesafe 2180 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotanın tamamlanma süresi 10 saattir.

6. DENEYSEL TEST SONUÇLARI

Senaryo 1 ve Senaryo 2 de bulunan merkezlerin işlem kısıtı kaldırıldığında merkezler ve noktalar arasındaki rota ilişkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Senaryo 1 ve Senaryo 2 için merkez sayıları ve merkez gruplarının eşleşmesi değiştirilerek farklı senaryolar için test edilmiştir. İki farklı senaryoda aynı merkezler probleme girdi olarak işlenip, problem çözüldüğünde senaryoların tepkilerinin test edilerek, sonuçlarının karşılaştırılması istenmektedir.

Senaryo 1 ve Senaryo 2 için 10'ar adet problem üretilmiştir. Toplamda 20 problem üzerinden merkez noktalarının amaç fonksiyonuna etkisi incelenmiştir.

Senaryo 3'te, geliştirilen matematiksel modelin dağıtım toplama görevi ortadan kaldırılarak, rototalamada ki başarısını incelemek adına gözetleme faaliyetlerini kapsayan ve tüm noktalara hizmet veren İHA'lar için 3 farklı problem üzerinden sonuçlar yorumlanmıştır. Modelin kapalı ve açık uçlu olma, merkez işlem kısıtlı ve kısıtsız olma durumları karşılaştırılarak rotanın gözetleme faaliyetleri için tamamlanma süresi ve kat edilen mesafeleri incelenmiştir.

Sunulan sonuç tablolarında, "Kullanılan Merkezler" başlığında İHA'ların kalkış veya iniş aşamasında hangi merkezleri kullandığı belirtilmektedir. "Kullanılan İHA" sütunu rotada kullanılan İHA'nın türünü ifade etmektedir. "Rota" sütunu ise İHA'nın merkezden hareket etmesi sonrasında hangi noktalara uğradığı ve hangi merkeze döndüğünü belirtilerek güzergâhı hakkında bilgi vermektedir. "Toplam Mesafe" sütunu tüm rotanın tamamlanması için kat edilen mesafenin km cinsinden değeridir. "Görev Tamamlanma Süresi" tüm görevlerin tamamlanması için geçen süreyi göstermektedir.

6.1 Senaryo 1: Merkez Noktalarının Çözümüne Etkisi

İHA'ların başladığı merkezden sonra rotasını tamamladığında en yakın merkeze döndüğü senaryo kapsamında merkezlerin değişiminin çözüme etkisi incelenmiştir.

(S1-S2) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.1: Senaryo 1, 1. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1 - S2	M1	S2 – S10 – S11 – S7 – S1	5,35	2208
S1 - S2	M2	S2 – S15 – S13 – S8 – S9 – S1	4,45	
S1 - S2	M4	S2 – S12 – S6 – S14 – S5 – S1	10,30	

Tablo 6.1’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2208 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,30 saattir.

(S1-S3) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.2: Senaryo 1, 2. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1 – S3	M1	S1 – S10 – S11 – S7 – S3	6,14	2997
S1 – S3	M2	S1 – S8 – S15 – S13 – S9 – S3	6,54	
S1	M3	S1 – S6 – S14 – S1	8,23	
S1	M4	S1 – S12 – S5 – S1	8,44	

S1 istasyonunun yanında S3 merkezinin açılmasının sonucu olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Tablo 6.2’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2997 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 8,44 saattir.

(S1-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.3: Senaryo 1, 3. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1 – S4	M1	S4 – S15 – S13 – S8 – S9 – S1	4,25	2123
S1 – S4	M2	S4 – S10 – S11 – S7 – S1	5,30	
S1 – S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S1	7,00	
S4	M4	S4 – S12 – S4	2,70	

Tablo 6.3'te gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2123 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 7 saattir.

(S2-S3) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.4: Senaryo 1, 4. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2	M1	S2 – S10 – S13 – S9 – S2	2,93	2271
S2	M2	S2 – S8 – S15 – S11 – S7 – S2	7,04	
S2- S3	M3	S3 – S5 – S14 – S6 – S12 – S2	10,79	

Tablo 6.4'te gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2271 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,79 saattir.

(S2-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.5: Senaryo 1, 5. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2	M1	S4 – S10 – S11 – S7 – S2	6,25	2083
S2 – S4	M2	S4 – S15 – S13 – S8 – S9 – S2	2,83	
S4	M4	S4 – S12 – S5 – S6 – S14 – S4	10,00	

S2 ve S4 merkezinin açılmasının bu problemde ikili kombinasyonlar açısından en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir. Tablo 6.5'te gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2083 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

(S3-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.6: Senaryo 1, 6. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S3 – S4	M1	S4 – S10 – S11 – S7 – S3	5,41	2197
S3- S4	M2	S4 – S15 – S13 – S8 – S9 – S3	4,49	
S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S12 – S4	10,00	

Tablo 6.6'da gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2197 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

(S1-S2-S3) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.7: Senaryo 1, 7. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2	M1	S2 – S15 – S13 – S8 – S9 – S2	3,04	2028
S2-S3	M2	S2 – S10 – S11 – S7 – S3	5,46	
S1-S2	M3	S1 – S5 – S14 – S6 – S12 – S2	10,30	

Tablo 6.7’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2028 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,30 saattir.

(S1-S2-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.8: Senaryo 1, 8. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2-S4	M1	S4 – S15 – S13 – S8 – S9 – S2	2,83	1928
S1- S4	M2	S4 – S10 – S11 – S7 – S1	5,30	
S1-S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S1	7,00	
S4	M4	S4 – S12 – S4	2,70	

Tablo 6.8’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 1928 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 7 saattir.

(S2-S3-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.9: Senaryo 1, 9. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2- S4	M1	S4 – S15 – S13 – S8 – S9 – S2	2,83	1968
S3 –S4	M2	S4 – S10 – S11 – S7 – S3	5,41	
S4	M4	S4 – S12 – S5 – S6 – S14 –S4	10,00	

Tablo 6.9’da gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 1968 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10 saattir.

(S1-S2-S3-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.10: Senaryo 1, 10. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2- S4	M1	S4 – S15 – S13 – S8 – S9 – S2	2,83	1928
S1–S4	M2	S4 – S10 – S11 – S7 – S1	5,30	
S1-S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S1	7,00	
S4	M4	S4 – S12 – S4	2,70	

Problem için 4 merkezin de açılmak üzere aday gösterildiği durumda S3 merkezinin açılmaması tercih edilmiştir. Tablo 6.10’da gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 1928 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 7 saattir.

6.2 Senaryo 2: Merkez Noktalarının Çözümüne Etkisi

İHA'ların başladığı merkezden sonra rotasını tamamladığında başladığı merkeze geri döndüğü senaryo kapsamında merkezlerin değişiminin çözüme etkisi incelenmiştir.

(S1-S2) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.11: Senaryo 2, 1. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1	M1	S1 – S10 – S13 – S9 – S1	5,02	2570
S1	M2	S1 – S8 – S15 – S11 – S7 – S1	6,85	
S2	M3	S1 – S8 – S15 – S11 – S7 – S1	11,22	

Tablo 6.11'de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2570 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 11,22 saattir.

(S1-S3) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.12: Senaryo 2, 2. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S3	M1	S3 – S8 – S15 – S11 – S7 – S3	7,22	3143
S3	M2	S3 – S10 – S13 – S9 – S3	5,53	
S1	M3	S1 - S6 – S14 – S1	8,23	
S1	M4	S1 – S5 – S12 – S1	8,44	

S3 Merkezinin sonucu olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Tablo 6.12’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 3143 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 8,44 saattir.

(S1-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.13: Senaryo 2, 3. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1	M1	S1 – S10 – S13 – S9 – S1	5,02	2469
S1	M2	S1 – S8 – S15 – S11 – S7 – S1	6,85	
S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S12 – S4	10,00	

Tablo 6.13’te gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2469 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

(S2-S3) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.14: Senaryo 2, 4. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S3	M1	S3 – S8 – S15 – S11 – S7 – S3	7,22	2690
S3	M2	S3 – S10 – S13 – S9 – S3	5,53	
S2	M3	S1 – S5 – S14 – S6 – S12 – S2	11,22	

Tablo 6.14'te gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2690 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 11,22 saattir.

(S2-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.15: Senaryo 2, 5. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2	M1	S2 – S10 – S13 – S9 – S2	2,93	2205
S2	M2	S2 – S8 – S15 – S11 – S7 – S2	7,04	
S4	M3	S4 – S12 – S5 – S6 – S14 – S4	10,00	

S2 ve S4 merkezlerinin açılması ikili kombinasyonlarda en iyi sonucun elde edildiği durum olarak kaydedilmiştir. Tablo 6.15'te gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2205 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

(S3-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.16: Senaryo 2, 6. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S3	M1	S3 – S10 – S13 – S9 – S3	5,53	2589
S3	M2	S3 – S8 – S15 – S11 – S7 – S3	7,22	
S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S12 – S4	10,00	

Tablo 6.16’da gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2589 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

(S1-S2-S3) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.17: Senaryo 2, 7. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1	M1	S1 – S10 – S13 – S9 – S1	5,02	2570
S1	M2	S1 – S8 – S15 – S11 – S7 – S1	6,85	
S2	M4	S2- S5 – S14 – S6 – S12 – S2	11,22	

Tablo 6.17’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2570 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 11,22 saattir.

(S1-S2-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.18: Senaryo 2, 8. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2	M1	S2 – S10 – S13 – S9 – S2	2,93	2180
S1	M2	S1 – S8 – S15 – S11 – S7 – S1	6,85	
S4	M4	S4 – S14 – S6 – S5 – S12 – S4	10,00	

Tablo 6.18’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2180 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

(S2-S3-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.19: Senaryo 2, 9. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S2	M1	S2 – S10 – S13 – S9 – S2	2,93	2205
S2	M2	S2 – S8 – S15 – S11 – S7 – S2	7,04	
S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S12 – S4	10,00	

Tablo 6.19’da gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2205 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

(S1-S2-S3-S4) merkez noktaları için çözüm:

Tablo 6.20: Senaryo 2, 10. probleme ait çözüm.

Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1	M1	S1 – S8- S15 – S11 – S7 –S1	6,85	2180
S2	M2	S2 –S10 – S13 – S9 – S2	2,93	
S4	M3	S4 – S14 – S6 – S5 – S12 –S4	10,00	

Probleme 4 merkezin de açılmak üzere aday gösterildiği durumda S3 merkezinin açılmaması tercih edilmiştir. Tablo 6.20’de gösterilen problemin çözümüne göre toplam mesafe 2180 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 10,00 saattir.

6.3 Senaryo 1 - Senaryo 2: Çözümlerin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Senaryo 1 ve Senaryo 2 için sunulan matematiksel modeller farklı kısıtlar ve girdiler kullanılarak toplamda 20 adet problem için incelenmiştir.

Tablo 6.21 ve Tablo 6.22’de Senaryo 1 ve Senaryo 2 çözüm sonuçları verilmiştir. “No” sütunu, kullanılan senaryo ve problemin numarasını belirtmektedir. İşlem kısıtı merkezler için işlem sayısında kısıt olup olmadığını göstermektedir. “Kullanılabilir Merkezler” sütunu probleme girdi olarak girilen aday merkez noktalarıdır. “Kullanılan Merkezler” sütunu ise problemin sonucunda elde edilen rotada kullanılmış olan merkez numaralarını göstermektedir. “Kullanılan İHA’lar” sütunu rotada hangi İHA’ların kullanıldığını göstermektedir. “Görev Tamamlanma Süresi” tüm görevlerin rotada tamamlanması için geçen süreyi göstermektedir. Mesafe bölümünde ise rotanın toplam mesafesi yer almaktadır.

Tablo 6.21: Senaryo 1’e ait problem çözümlerinin özeti.

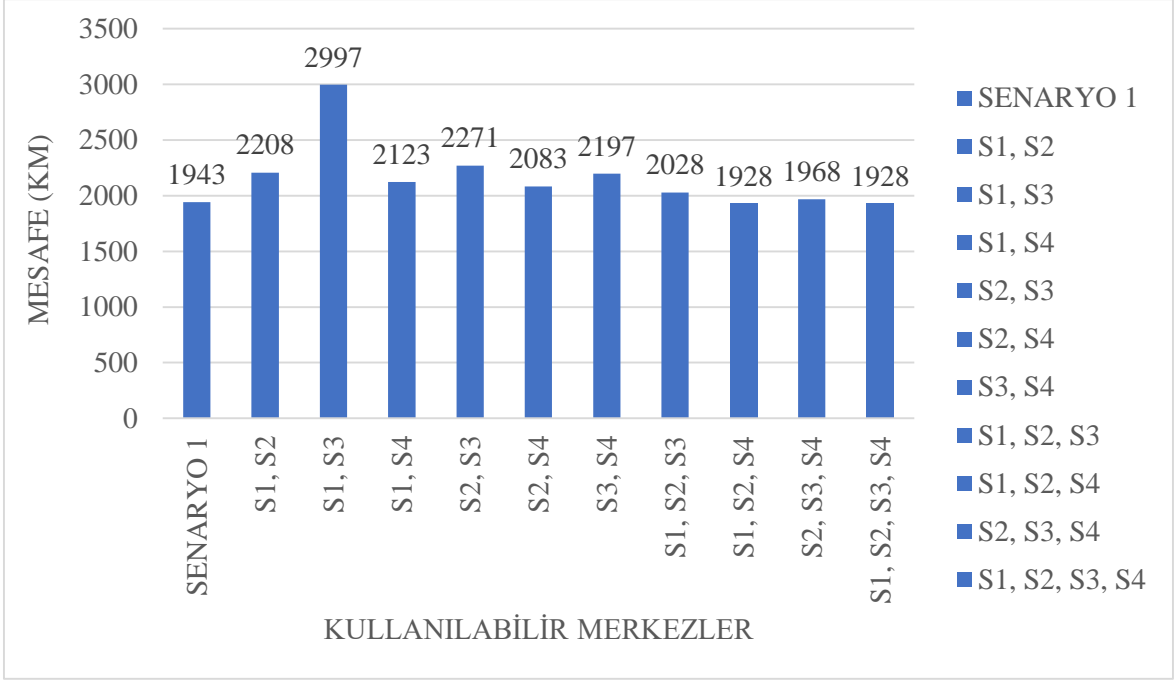
No	İşlem Kısıtı	Kullanılabilir Merkezler	Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA’lar	Tüm Görevlerin Tamamlandığı Süre (saat)	Mesafe (km)
Senaryo 1	Var	S1, S2, S3, S4	S1, S2, S4	M1, M2, M4	9,79	1943
Problem 1.1	Yok	S1, S2	S1, S2	M1, M2, M4	10,30	2208
Problem 1.2	Yok	S1, S3	S1, S3	M1, M2, M3, M4	8,44	2997
Problem 1.3	Yok	S1, S4	S1, S4	M1, M2, M3, M4	7,00	2123
Problem 1.4	Yok	S2, S3	S2, S3	M1, M2, M3	10,79	2271
Problem 1.5	Yok	S2, S4	S2, S4	M1, M2, M4	10,00	2083
Problem 1.6	Yok	S3, S4	S3, S4	M1, M2, M3	10,00	2197
Problem 1.7	Yok	S1, S2, S3	S1, S2, S3	M1, M2, M3	10,30	2028
Problem 1.8	Yok	S1, S2, S4	S1, S2, S4	M1, M2, M3, M4	7,00	1928
Problem 1.9	Yok	S2, S3, S4	S2, S3, S4	M1, M2, M4	10,00	1968
Problem 1.10	Yok	S1, S2, S3, S4	S1, S2, S4	M1, M2, M3, M4	7,00	1928

Tablo 6.22: Senaryo 2'ye ait problem çözümlerinin özeti.

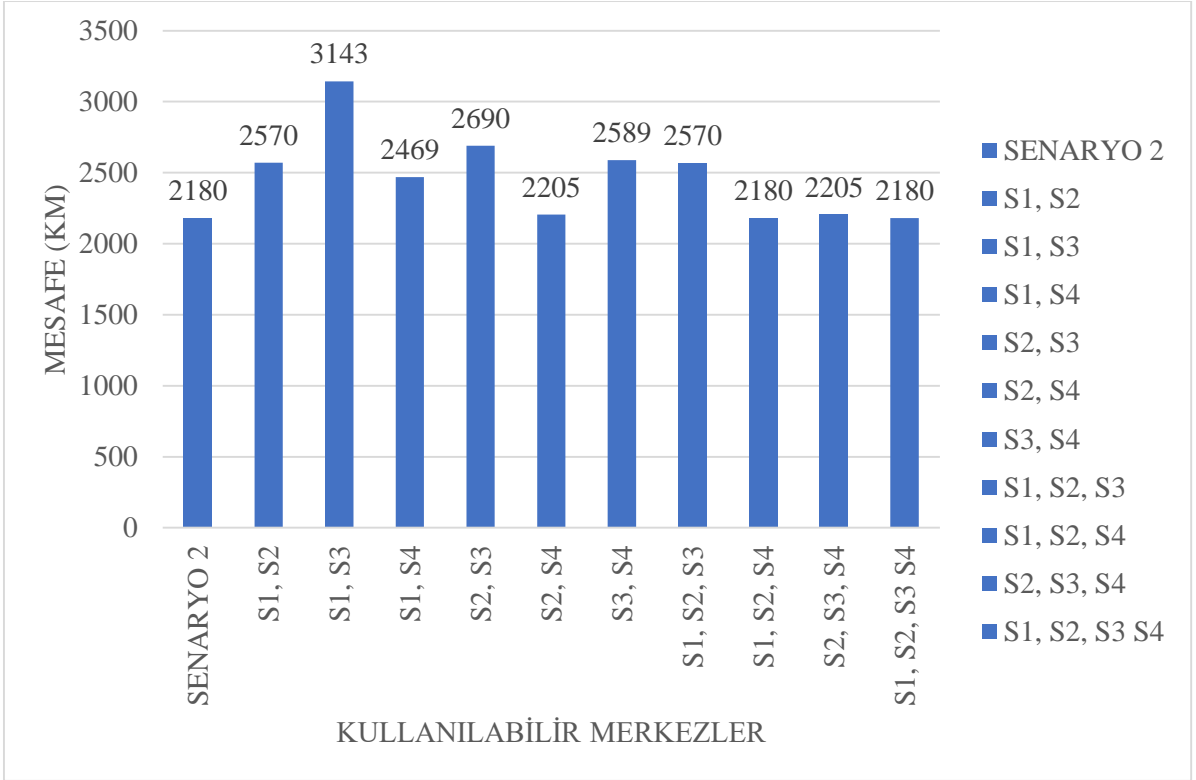
No	İşlem Kısıtı	Kullanılabilir Merkezler	Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA'lar	Tüm Görevlerin Tamamlandığı Süre (saat)	Mesafe (km)
Senaryo 2	Var	S1, S2, S3, S4	S1, S2, S4	M1, M2, M4	10,00	2180
Problem 2.1	Yok	S1, S2	S1, S2	M1, M2, M3	11,22	2570
Problem 2.2	Yok	S1, S3	S1, S3	M1, M2, M3, M4	8,44	3143
Problem 2.3	Yok	S1, S4	S1, S4	M1, M2, M3	10,00	2469
Problem 2.4	Yok	S2, S3	S2, S3	M1, M2, M3	11,22	2690
Problem 2.5	Yok	S2, S4	S2, S4	M1, M2, M3	10,00	2205
Problem 2.6	Yok	S3, S4	S3, S4	M1, M2, M3	10,00	2589
Problem 2.7	Yok	S1, S2, S3	S1, S2	M1, M2, M4	11,22	2570
Problem 2.8	Yok	S1, S2, S4	S1, S2, S4	M1, M2, M4	10,00	2180
Problem 2.9	Yok	S2, S3, S4	S2, S4	M1, M2, M3	10,00	2205
Problem 2.10	Yok	S1, S2, S3 S4	S1, S2, S4	M1, M2, M3	10,00	2180

Şekil 6.1'de Senaryo 1, Şekil 6.2'de Senaryo 2 üzerinden türetilen problemlerin matematiksel model ile çözümünü sonrasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak özetlenmiştir.

Senaryo 1 için Problem 1.8 ve 1.10'da sunulan çözümler en az mesafede rotayı tamamlayarak, tüm görevlerin tamamlanma zamanı açısından da en iyi sonucu vermektedir. Senaryo 2 için Problem 2.8 ve 2.10 için elde edilen çözümler en az mesafede rotayı tamamlamaktadır. Tüm görevlerin tamamlanma zamanı açısından sonuçlar incelendiğinde ise en iyi sonuç Problem 2.2'de elde edilmiştir.



Şekil 6.1: Senaryo 1 için sonuçların grafiksel karşılaştırması.



Şekil 6.2: Senaryo 2 için sonuçların grafiksel karşılaştırması.

6.4 Senaryo 3: Gözetleme Operasyonları İçin Rotalama

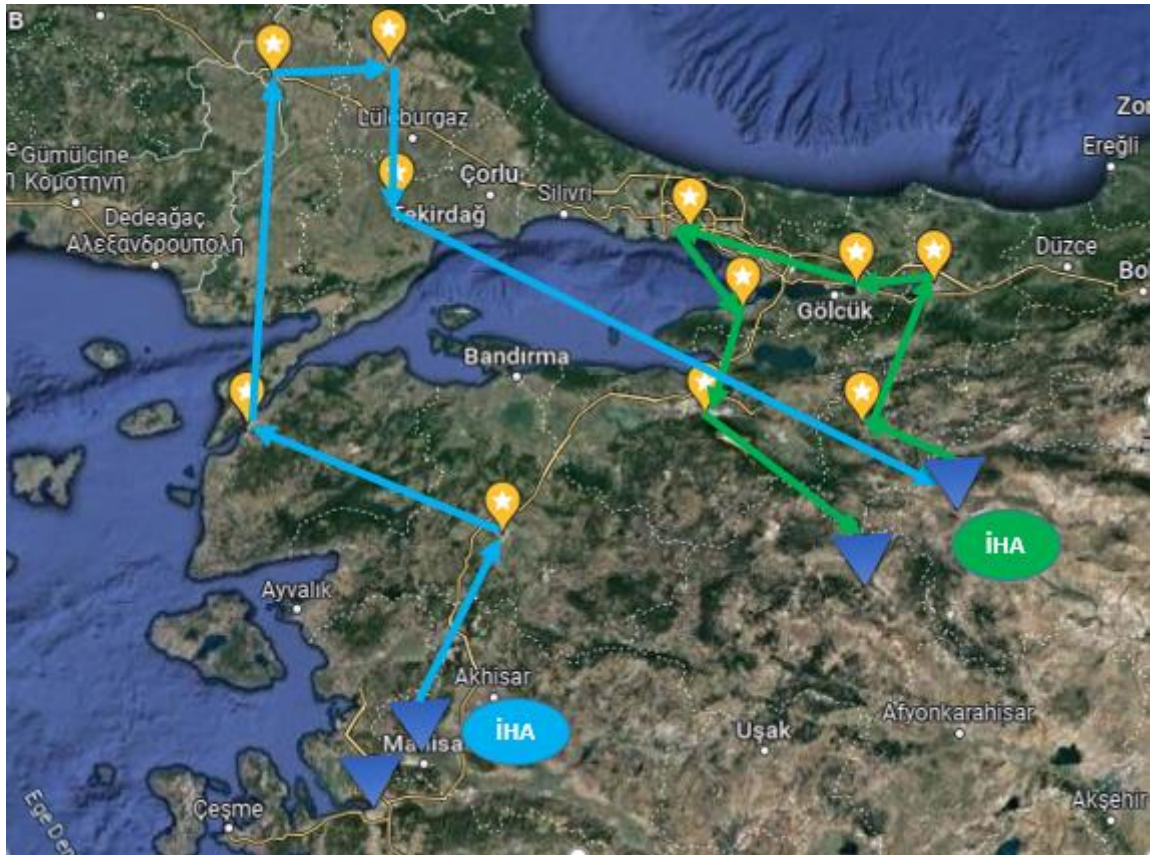
Mevcut İHA'lar için sadece gözetleme operasyonu tanımlandığında oluşturulacak rota, kullanılacak merkez ve İHA sayısını gözlemek için rotalama problemi çözülmüştür.

Problemin çözümü için 4 adet Bayraktar DİHA, 4 merkez kullanımına izin verilerek problemin kararları ve rotaları yorumlanmıştır. İHA'lar için göreve uygunluk kriteri ortadan kaldırılarak tüm görev noktaları için gözetleme faaliyetlerinin incelenmesi ve yorumlanması adına farklı kısıtlar altında üç problem türetilerek incelenmiştir.

6.4.1 Senaryo 3-1

- Her merkez için işlem kısıtı iki olarak belirlenmiştir.
- Problem açık uçlu olarak tasarlanmıştır.

Problem çözümü sonucunda elde edilen rota Şekil 6.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 6.3: Senaryo 3-1 için elde edilen çözüme ait rotaların şematik gösterimi.

Tablo 6.23: Senaryo 3-1 için elde edilen çözüm.

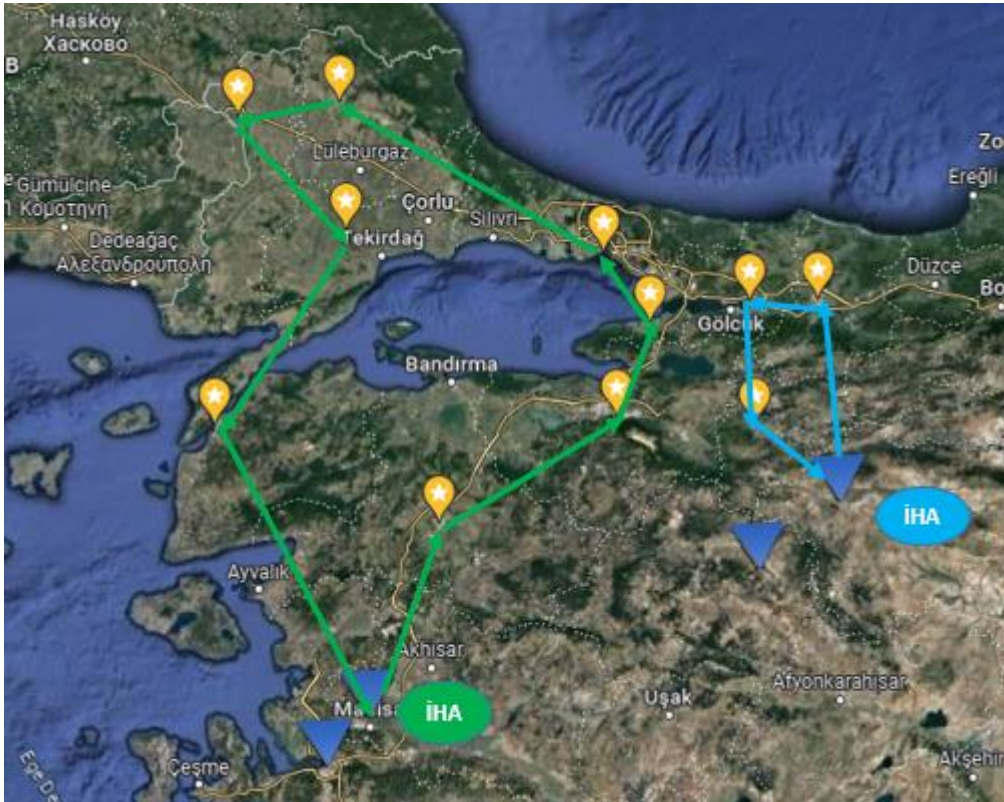
Kullanılan Merkezler	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1-S4	S1-S5-S7-S6-S11-S14-S4	8,13	1155
S2-S4	S4-S9-S12-S15-S10-S13-S8-S2	5,78	

Problem çözümüne göre rotalar Tablo 6.23'te gösterildiği gibidir. S1, S2 ve S4 merkezinin açıldığı durum tercih edilmiştir. Kat edilen toplam mesafe 1155 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 8,13 saattir.

6.4.2 Senaryo 3-2

- Her merkez için işlem kısıtı iki olarak belirlenmiştir.
- Problem kapalı uçlu olarak tasarlanmıştır.

Problem çözümü sonucunda elde edilen rota Şekil 6.4'te gösterildiği gibidir.



Şekil 6.4: Senaryo 3-2 için elde edilen çözüme ait rotaların şematik gösterimi.

Tablo 6.24: Senaryo 3-2 için elde edilen çözüm.

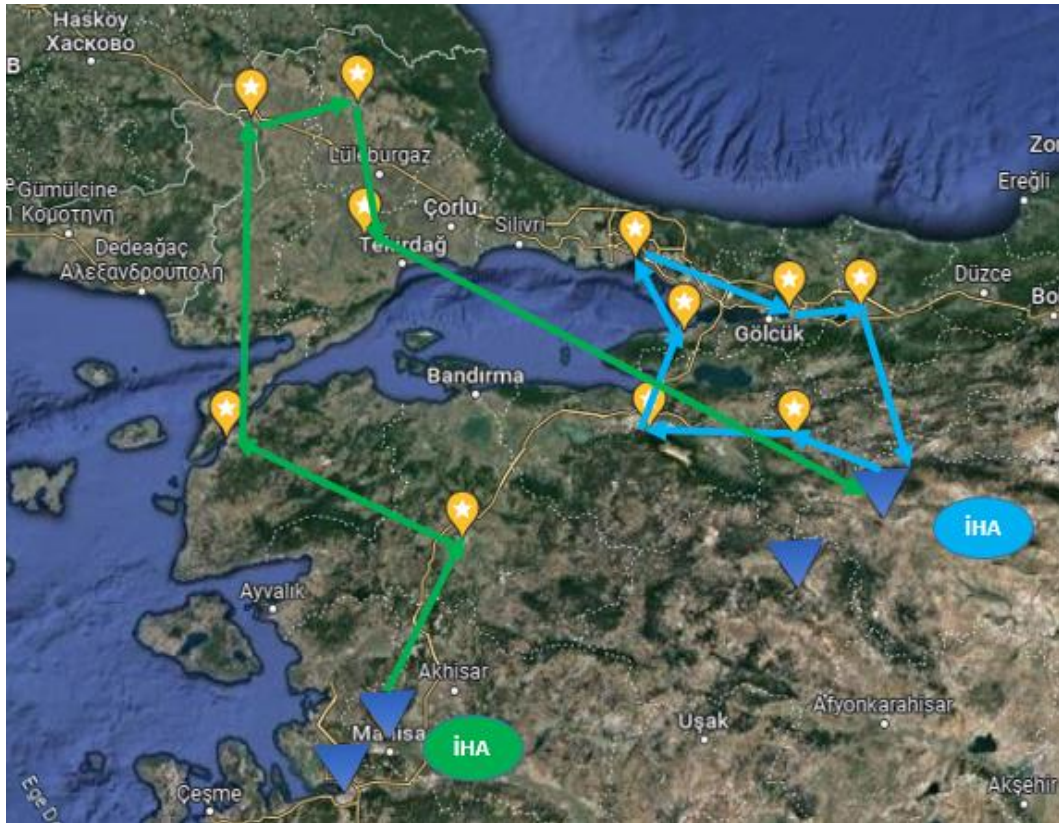
Kullanılan Merkezler	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S1	S1-S5-S8-S13-S10-S11-S6-S14-S7-S1	11,41	1228
S4	S4-S12-S15-S9-S4	3,38	

Problem çözümüne göre rotalar Tablo 6.24’te gösterildiği gibidir. S1 ve S4 merkezinin açıldığı çözüm tercih edilmiştir. Kat edilen toplam mesafe 1228 km’dir. Kullanılan İHA’lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotaların tamamlanma süresi 11,41 saattir.

6.4.3 Senaryo 3-3

- Merkezler için işlem kısıtı bulunmamaktadır.
- Problem açık uçlu olarak tasarlanmıştır.

Problem çözümü sonucunda elde edilen rota Şekil 6.5’te gösterildiği gibidir.



Şekil 6.5: Senaryo 3-3 için elde edilen çözüme ait rotaların şematik gösterimi.

Tablo 6.25: Senaryo 3-3 için elde edilen çözüm.

Kullanılan Merkezler	Rota	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Toplam Mesafe (km)
S4	S4-S9-S8-S13-S10-S15-S12-S4	5,73	1151
S1-S4	S1-S5-S7-S6-S11-S14-S4	8,13	

Problem çözümüne göre rotalar Tablo 6.25'te gösterildiği gibidir. S1 ve S4 merkezinin açıldığı çözüm tercih edilmiştir. Kat edilen toplam mesafe 1151 km'dir. Kullanılan İHA'lar aynı anda göreve başladıklarında tüm rotanın tamamlanma süresi 8,13 saattir.

6.4.4 Senaryo 3-1, 3-2 ve 3-3'ün Karşılaştırılması

Tablo 6.26: Senaryo 3-1, 3-2 ve 3-3'ün karşılaştırılması.

No	İşlem Kısıtı	Özellik	Kullanılan Merkezler	Kullanılan İHA Sayısı	Görev Tamamlanma Süresi (saat)	Mesafe (km)
Senaryo 3-1	Var	Açık Uçlu	S1, S2, S4	2	8,13	1155
Senaryo 3-2	Var	Kapalı Uçlu	S1, S4	2	11,41	1228
Senaryo 3-3	Yok	Açık Uçlu	S1, S4	2	8,13	1151

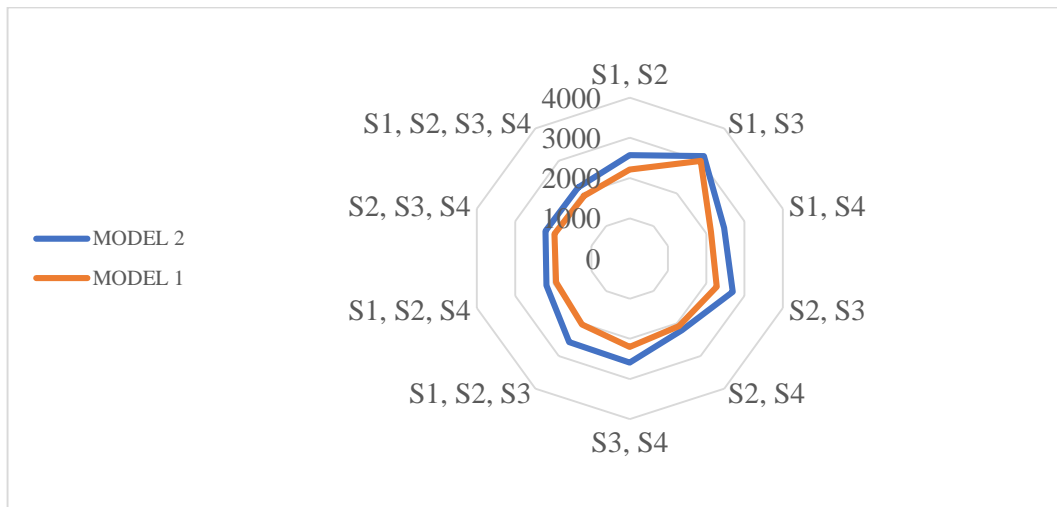
Sadece gözlem için rotalama problemi çözdürülerek elde edilen sonuçlar Tablo 6.26'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda açık uçlu araç rotalama probleminin kat edilen toplam mesafeyi azaltma konusunda olumlu yönde etki gösterdiği gözlenmiştir. Merkezlerin işlem kısıtına sahip olmasının ise çözümü olumsuz etkilediği gözlenmektedir. Merkezlerin işlem kısıtlarını doğru belirleyerek problemler için daha gerçekçi ve uygulanabilir çözümler elde etmek mümkün olacaktır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

İşlem kısıtı altında Senaryo 1’de S1, S2 ve S4 merkezleri açılarak M1, M2 ve M4 İHA’larının kullanımı tercih edilmiş ve rota mesafesi 1943 km olarak hesaplanmıştır. Senaryo 2’de ise S1, S2 ve S4 merkezleri açılarak M1, M2 ve M4 İHA’larının kullanımı tercih edilerek rota mesafesi 2180 km olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple Senaryo 1 ve Senaryo 2 karşılaştırıldığında Senaryo 1’de daha iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir. Senaryo 1 işlem kısıtsız türevleri için çözüm sonuçları incelendiğinde, amaç fonksiyonu doğrultusunda rota mesafesinin minimize etmek adına en iyi çözümün S1, S2 ve S4 merkezlerinin açılıp 4 İHA kullanılarak 1928 km mesafe ile tamamlanması olduğu görülmüştür. iki merkez açmak istendiğinde ise en iyi çözüm S2 ve S4 merkezlerinin açılarak üç İHA kullanılıp 2083 km mesafe ile rotayı tamamladığı senaryonun olduğu görülmektedir.

Senaryo 2 işlem kısıtsız türevleri için çözüm sonuçları incelendiğinde amaç fonksiyonu doğrultusunda rota mesafesini minimize etmek adına en iyi çözümün S1, S2 ve S4 merkezlerinin açılıp üç İHA kullanılarak 2180 km mesafe ile tamamlanması olduğu görülmüştür. iki merkez açmak istendiğinde ise en iyi çözümün S2 ve S4 merkezlerinin açılarak üç İHA kullanılıp 2205 km mesafe ile rotayı tamamladığı durumun olduğu görülmektedir.

Şekil 7.1 incelendiğinde görülmektedir ki Senaryo 1’de tüm problemler kapsamında Senaryo 2’den daha iyi çözüm değerlerine ulaşılmıştır. Bu da en yakın merkeze dönebilme koşulunun, başladığı merkeze dönme koşuluna kıyasla rotalama mesafesini her problemde olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.



Şekil 7.1: Senaryo 1 ve Senaryo 2'ye ait problemler için çözüm.

Senaryo 3 için yapılan incelemeler; modelin sadece gözlem amacıyla kullanılan İHA'lar için rota belirlemede ortaya koyduğu sonuçların analiz edilmesidir. En iyi sonuç bu modeller içinde açık uçlu ve kapasite kısıtsız Senaryo 3-3'te yakalanmıştır. İşlem kapasitesi merkezler için doğru bir şekilde belirlendiğinde, model kat edilen mesafeyi en küçükmek adına en iyi rotayı bulmaya çalışmaktadır. Yapılan çalışmalar sonrasında modelin çeşitli kısıtlar altında rotalama problemlerinde iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Bu çalışma ile birlikte acil durum senaryolarında kaynakların kullanımı ve müdahale planlarının oluşturulduğu noktada, doğru tespitlerin doğru kararlar ile birleşmesi amacıyla senaryoların ihtiyaçlara ve kaynaklara göre türetilebilmesi önemlidir. Bu çalışma oluşabilecek bir acil durum senaryosu için çeşitli görevler, eldeki imkân ve kaynaklar ile şekillenerek afet yönetiminde başarıyla uygulanabilecektir.

Gelecek çalışmalarda gerçek bir problem senaryosu üzerinden hızı etkileyen faktörler (örneğin; hava koşulları, taşınan yük, manevralar vb.) dikkate alınıp bu faktörler probleme dâhil edildiğinde İHA'ların kullanım kapasiteleri üzerinden gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir. Dağıtım-toplama operasyonları için yük miktarı ile bağlantılı olarak görevi yerine getirmek için de gerekli süreler saptanarak gerçeğe en yakın tahminleri yapmak mümkün olacaktır. Geliştirilen model küçük problemler için kısa sürede iyi sonuçlar üretmektedir. Büyük problemler için metasezgisel yöntemlere başvurulması kısa sürede iyi çözümlerin bulunması için avantaj sağlayabilir.

8. KAYNAKLAR

- Atmaca, E. (2012). Bir kargo şirketinde araç rotalama problemi ve uygulaması. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 5 (2), 12-27.
- Baykar. (2014). Baykartech: <https://baykartech.com/tr/uav/bayraktar-tb2/> adresinden alındı.
- Baykar. (2019). Baykartech: <https://baykartech.com/tr/uav/bayraktar-diha/> adresinden alındı.
- Bayzan, Ş. (2009). GPRS verileri yardımıyla araç rotalarının belirlenmesi problemine farklı bir yaklaşım. *Akademik Bilişim*, 9 (1), 243-249.
- Berger, Barkaoui, M., Bräysy, O. (2003). A route-directed hybrid genetic approach for the vehicle routing problem with time windows. *INFOR Journal*, 41 (2), 179-194.
- Daşdemir, E. (2021). *Unmanned air vehicle routing with multiple objectives* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 690919).
- Değirmen, S., Çavdar, F., & Sebatlı, A. (2018). Afet operasyonları yönetiminde insansız hava araçlarının kullanımı: gözetleme operasyonları için kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, doi:10.17482/uumfd.455146.
- Demir, E. (2008). *Okul taşıtları rotalama problemi için tamsayılı karar modelleri*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No.176969).
- Demircioğlu, M. (2009). *Araç rotalama probleminin sezgisel bir yaklaşım ile çözümlenmesi üzerine bir uygulama* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 241435).
- Dursun, P. (2009). *Zaman pencereci araç rotalama probleminin genetik algoritma ile modellenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 251628).
- Elmas, D. A. (2018). *İnsansız hava araçlarında araç rotalama problemi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 555888).

- Ermutaf, E. (2019). *Çok amaçlı konteyner yükleme ve araç rotalama problemlerinin çözümü için genetik algoritma yaklaşımı: porselen sektöründe karar destek sistemi önerisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 538771).
- Erol, V. (2006). *Araç rotalama problemleri için popülasyon ve komşuluk tabanlı metasezgisel bir algoritmanın tasarımı ve uygulaması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 180526).
- Eş Yürek, E. (2018). *İnsansız hava aracı destekli araç rotalama problemi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 527207).
- Fleszar, K. Osman, I. H. ve Hindi, K. S. (2009). A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 195, 803-809.
- Fu, Z., Yu, J., Xie, G., Chen, Y., ve Mao, Y. (2019). A heuristic evolutionary algorithm of uav path planning. *Wireless Communications and Mobile Computing*, (ID. 2851964).
- Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., ve Ha, M. H. (2018). On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C*, 86, 597-621.
- Hill, A.V. ve Benton, W.C. (1992). Modelling intra-city time-dependent travel speeds for vehicle scheduling problems, *Journal of the Operational Research Society*, 43 (4), 343-351.
- İbroşka, B. (2021). *Simultaneous operation of trucks and unmanned aerial vehicles at package delivery* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 693809).
- Jahangir, H., Mohammadi, M., Pasandideh, S. H. R. ve Nobari, N. Z. (2018). Comparing performance of genetic and discrete invasive weed optimization algorithms for solving the inventory routing problem with an incremental delivery. *Journal of Intelligent Manufacturing*, doi.org/10.1007/s10845-018-1393-z.

- Kahveci, M., ve Can, N. (2017). İnsansız hava araçları: Tarihçesi, tanımı, dünyada ve Türkiye'deki yasal durumu. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (4), 511-535.
- Kara M., Yumuşak R. ve Eren T. (2023). Anız yangınlarına müdahale için itfaiye drone seçimi: Giresun örneği. *Journal of Aviation Research*, 5 (1), 1-15.
- Karabay, N. (2018). *Real time unmanned air vehicle routing* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 489544).
- Keçeci, B., Altıparmak, F., Kara, İ. (2015). Heterojen eş zamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi: matematiksel modeller ve sezgisel bir algoritma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakülte Dergisi*, 30 (2), 185-195.
- Kiremitçi, B., Kiremitçi, S. ve Keskindürk T. (2014). Zaman pencereli çok araçlı dağıtım toplamalı rotalama problemi için gerçek değerli genetik algoritma yaklaşımı. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 43 (2), 391-403.
- Korchenko A.G. ve Ilyash O.S. (2013). The generalized classification of unmanned air vehicles. *IEEE*, doi: 10.1109/APUAVD.2013.6705275.
- Liu, P., Chen, A. Y., Huang, Y. N., Han, J. Y., Lai, J. S., Kang, S. C., Wu, T. H., Wen, M. C. ve Tsai, M. (2014). A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (uav) developments and applications in civil engineering, smart structures and systems. *Smart Structures and Systems*, 13 (6), 1065-1094.
- Liu, Y., Liu, Z., Shi, J., Wu, G. ve Pedrycz, W. (2020). Two-echelon routing problem for parcel delivery by cooperated truck and drone. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51 (12), 7450-7465.
- Malandraki, C. ve Dial, R.B. (1996). A restricted dynamic programming heuristic algorithm for the time dependent traveling salesman problem, *European Journal of Operational Research*, 90 (1), 45-55.
- MirHassani, S. A. ve Abolghasemi, N. (2011). A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11547-11551.

- Mulloorakam, A. T. ve Nidhiry, N. M. (2019). Combined objective optimization for vehicle routing using genetic algorithm. *Materials Today: Proceedings, 11*, 891-902.
- Normasari, N. M. E., Yu, V. F. ve Bachtiyar, C. (2019). A simulated annealing heuristic for the capacitated green vehicle routing problem. *Mathematical Problems in Engineering*, doi.org/10.1155/2019/2358258.
- Ozkan, Ö. (2021). Optimization of the distance-constrained multi-based multi-uav routing problem with simulated annealing and local search-based matheuristic to detect forest fires: the case of Turkey. *Applied Soft Computing*. doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108015.
- Papağan, O. R. (2022). *İnsansız hava araçlarının rotalama probleminin metasezgisel yöntemlerle çözümü: bir e-ticaret firmasında uygulanması*. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya.
- Park, Y. B. (2000). A solution of the bicriteria vehicle scheduling problems with time and area-depend travel speeds. *Computers & Industrial Engineering, 38*, 173– 187.
- Pradenas, L., Boris Oportus B., ve Parada V. (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in vehicle routing problems with backhauling, *Expert Systems With Applications, 40*, 2985–2991.
- Sajid, M., Mittal, H., Pare, S. ve Prosed, M. (2022). Routing and scheduling optimization for uav assisted delivery system: A hybrid approach. *Applied Soft Computing*, doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109225.
- Song, B. D., Park, K., ve Kim, J. (2018). Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering, 120*, 418-428.
- Şevkli, A.Z. ve Güler, B. (2017). A multi-phase oscillated variable neighbourhood search algorithm for a real-world open vehicle routing problem. *Applied Soft Computing Journal, 58*, 128-144.
- Tezcaner Öztürk, D. ve Köksalan, M. (2023). Biobjective route planning of an unmanned air vehicle in continuous space, *Transportation Research Part B: Methodological, 168*, 151-169.

- Toth, P. ve Vigo, D. (2014). Vehicle routing problems, Methods and Applications (2. Edition). SIAM.
- Türk Havacılık Uzay Sanayii. (2010). <https://www.tusas.com/urunler/iha/operatif-stratejik-iha-sistemleri/anka> adresinden alındı.
- Türk Havacılık Uzay Sanayii. (2019). <https://www.tusas.com/urunler/iha/yuksek-faydali-yuk-kapasitesi/aksungur> adresinden alındı.
- Uçar, U. U., İşleyen, S. K., ve Gökçen, H. (2021). Experimental analysis of Meta-Heuristic algorithms for moving customer vehicle routing. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 459-475.
- Ulutaş, A., Bayrakçıl, A. O. ve Kutlu, B. (2017). Araç rotalama probleminin tasarruf algoritması ile çözümü: Sivas'ta bir ekmek fırını için uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 18 (1), 185-197.
- Wang, H.F. ve Chen Y.Y. (2013). A coevolutionary algorithm for the flexible delivery and pickup problem with time windows. *Int. J. Production Economics*, 4, 4-13.
- Yazgan, H. R., Ercan, S. ve Arslan, C. (2014). Talep ve kapasite kısıtlı optimizasyon problemi için yeni bir melez algoritma. *Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 25 (2), 16-28.

EKLER

EKLER

EK A: Senaryo 1 GAMS Çözüm Ekranları

```

                S O L V E      S U M M A R Y

MODEL   ornek                OBJECTIVE  z
TYPE    MIP                  DIRECTION MINIMIZE
SOLVER  CPLEX                FROM LINE 185

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    1943.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT      1.141 100000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    20501 2147483647
--- *** This solver runs with a community license. No commercial use.
--- GMO setup time: 0.00s
--- Space for names approximately 0.05 Mb
--- Use option 'names no' to turn use of names off
--- GMO memory 0.75 Mb (peak 0.76 Mb)
--- Dictionary memory 0.00 Mb
--- Cplex 22.1.1.0 link memory 0.03 Mb (peak 0.19 Mb)
--- Starting Cplex

--- MIP status (101): integer optimal solution.
--- Cplex Time: 1.12sec (det. 695.34 ticks)

--- Returning a primal only solution to GAMS (marginals all set to NA).
--- Fixing integer variables and solving final LP...

--- Fixed MIP status (1): optimal.
--- Cplex Time: 0.02sec (det. 1.52 ticks)

Proven optimal solution
MIP Solution:      1943.000000      (20501 iterations, 2012 nodes)
Final Solve:      1943.000000      (10 iterations)

Best possible:      1943.000000
Absolute gap:       0.000000
Relative gap:       0.000000
```

Şekil A.1: Senaryo 1 GAMS sonuç ekranı.

```

---- EQU kısıt8 İstasyonlara kalkış+iniş sayısını kısıtlar
      LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
S1     -INF      2.0000      2.0000      .
S2     -INF      2.0000      2.0000      .
S3     -INF      .          2.0000      .
S4     -INF      2.0000      2.0000      .

---- EQU kısıt9 İhaların sahip olduğu hız doğrultusunda yolun tamamlanma süresini iha enerji kapasitelerine göre kısıtlar
      LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
M1     -INF      2.8333      24.0000      .
M2     -INF      5.3551      24.0000      .
M3     -INF      .          12.0000      .
M4     -INF      9.7952      12.0000      .
```

Şekil A.2: Senaryo 1 kapasitelerin kullanımları GAMS sonuç ekranı.

```

---- 186 VARIABLE x.L
          M1      M2      M4
S2 .S10                1.000
S4 .S12                1.000
S4 .S15      1.000
S5 .S1                1.000
S6 .S14                1.000
S7 .S1                1.000
S8 .S9      1.000      1.000
S9 .S2      1.000
S10.S11                1.000
S11.S7                1.000
S12.S6                1.000
S13.S8      1.000
S14.S5                1.000
S15.S13      1.000

----- 186 VARIABLE z.L = 1943.000

EXECUTION TIME = 1.281 SECONDS 5 MB 42.5.0 cf11b917 WEX-WEI

```

Şekil A.3: Senaryo 1 İHA rota planı GAMS sonuç ekranı.

EK B: Senaryo 2 GAMS Çözüm Ekranları

```

          S O L V E      S U M M A R Y
MODEL   ornek          OBJECTIVE z
TYPE    MIP            DIRECTION MINIMIZE
SOLVER  CPLEX          FROM LINE 185

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    2180.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT      2.328 10000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    29487 2147483647
--- *** This solver runs with a community license. No commercial use.
--- GMP setup time: 0.00s
--- Space for names approximately 0.05 Mb
--- Use option 'names no' to turn use of names off
--- GMP memory 0.75 Mb (peak 0.76 Mb)
--- Dictionary memory 0.00 Mb
--- Cplex 22.1.1.0 link memory 0.03 Mb (peak 0.20 Mb)
--- Starting Cplex

--- MIP status (101): integer optimal solution.
--- Cplex Time: 2.33sec (det. 1576.83 ticks)

--- Returning a primal only solution to GAMS (marginals all set to NA).
--- Fixing integer variables and solving final LP...

--- Fixed MIP status (1): optimal.
--- Cplex Time: 0.00sec (det. 1.55 ticks)

Proven optimal solution
MIP Solution:      2180.000000 (29487 iterations, 2484 nodes)
Final Solve:      2180.000000 (10 iterations)

Best possible:      2180.000000
Absolute gap:       0.000000
Relative gap:       0.000000
<

```

Şekil B.1: Senaryo 2 GAMS sonuç ekranı.

```

---- EQU kisit8 İstasyonlara kalkış+iniş sayısını kısıtlar
          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
S1      -INF      2.0000      2.0000      .
S2      -INF      2.0000      2.0000      .
S3      -INF      .      2.0000      .
S4      -INF      2.0000      2.0000      .

---- EQU kisit9 İhaların sahip olduğu hız doğrultusunda yolun tamamlanma süresini iha enerji kapasitelerine göre kısıtlar
          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
M1      -INF      6.8551      24.0000      .
M2      -INF      2.9275      24.0000      .
M3      -INF      10.0000     12.0000      .
M4      -INF      .      12.0000      .

```

Şekil B.2: Senaryo 2 kapasitelerin kullanımları GAMS sonuç ekranı.

```

---- 186 VARIABLE x.L
      M1      M2      M3
S1 .S8      1.000
S2 .S10
S4 .S12      1.000
S5 .S6      1.000
S6 .S14      1.000
S7 .S1      1.000
S8 .S15      1.000
S9 .S2      1.000
S10.S13     1.000
S11.S7      1.000
S12.S5      1.000
S13.S9      1.000
S14.S4      1.000
S15.S11     1.000

---- 186 VARIABLE z.L      =      2180.000
      VARIABLE z.M      =      0.000

EXECUTION TIME      =      2.437 SECONDS      5 MB 42.5.0 cf11b917 WEX-WEI

```

Şekil B.3: Senaryo 2 İHA rota planı GAMS sonuç ekranı.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Melike Pullu

Doğum tarihi ve yeri : 27.10.1998 Bursa

e-posta : melikepullu@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2023
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2020
Lise	Özel İletişim Temel Lisesi	2016