



İNSANSIZ UÇAK SİSTEMLERİ İÇİN MEYDAN YERLERİNİN
OPTİMİZASYONU: ÇOK AMAÇLI BİR YAKLAŞIM

TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MUSTAFA ERDEM BAKIR

İNSANSIZ VE OTONOM SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2024



İNSANSIZ UÇAK SİSTEMLERİ İÇİN MEYDAN YERLERİNİN
OPTİMİZASYONU: ÇOK AMAÇLI BİR YAKLAŞIM

TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MUSTAFA ERDEM BAKIR

İNSANSIZ VE OTONOM SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Fatih KASIMOĞLU

ONAY SAYFASI

İNSANSIZ UÇAK SİSTEMLERİ İÇİN MEYDAN YERLERİNİN OPTİMİZASYONU: ÇOK AMAÇLI BİR YAKLAŞIM

Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnsansız ve Otonom Sistem Mühendisliği Anabilim Dalı, İnsansız ve Otonom Sistem Mühendisliği (Türkçe) Tezli Yüksek Lisans Programı öğrencisi **Mustafa Erdem BAKIR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirerek, aşağıda imzaları olan jüri önünde tezini başarı ile sunmuştur.

Doç. Dr. Adnan GÜZEL

Müdür, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Doç. Dr. Habib KANBEROĞLU

Anabilim Dalı Başkanı, İnsansız ve Otonom Sistem Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Fatih KASIMOĞLU

Tez Danışmanı: Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Tez Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Gerçek BUDAK

Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fatih KASIMOĞLU

Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Doç. Dr. Durdu Hakan UTKU

Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Tarih: 14 Ekim 2024

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “İnsansız Uçak Sistemleri İçin Meydan Yerlerinin Optimizasyonu: Çok Amaçlı Bir Yaklaşım” konulu tez çalışmasında tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, başkalarının eserlerinden yararlanmada ilgili eserlere bilimsel normlar dahilinde atıfta bulunduğumu, atıfta bulunduğum her eserin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite ya da başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

Mustafa Erdem Bakır

ÖZET

İNSANSIZ UÇAK SİSTEMLERİ İÇİN MEYDAN YERLERİNİN OPTİMİZASYONU: ÇOK AMAÇLI BİR YAKLAŞIM

BAKIR, Mustafa Erdem

Yüksek Lisans, İnsansız ve Otonom Sistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Fatih Kasımoğlu

Ekim 2024, 115 sayfa

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insansız hava aracı sistemlerine (İHAS) sahip olmak çok daha erişilebilir hale gelmiştir. Bu sistemler, pek çok farklı alanda ve çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Günümüzde öne çıkan kullanım alanlarından biri ülkelerin sınır ve sınır ötesi güvenliğinin sağlanmasıdır. Bu alanın öne çıkmasının temel sebebi ise bu sistemlerin tehlikeli bölgelerde insan kaybı riskini ortadan kaldırması ve geniş alanlarda etkin bir şekilde kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bazı insansız hava aracı (İHA) sistemleri dikey veya bir fırlatıcı vasıtasıyla kalkış yapsa da sınır ve sınır ötesi bölgelerde kullanılan İHA'lar kalkış ve iniş yapabilmek için bir havalimanına ihtiyaç duymaktadır. Aslında operasyonel veya stratejik seviyede bulunan, uzun menzilli görevler icra edebilen, daha donanımlı ve ağır yük taşıyabilen insansız hava araçları operasyonları için bir meydana ihtiyaç duymaktadır. Bu tür İHA'ların meydan yerlerinin belirlenmesi ve uçuş görevlerinin planlanması hem görev gereksinimlerinin karşılanması hem de maliyetlerin en aza indirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada, operasyonel ve sabit maliyetlerin yanı sıra kritik görev gereksinimleri de dikkate alınarak İHA meydan konumlarının optimize edilmesine yönelik çok amaçlı bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu doğrultuda, açılacak meydan sayısını, meydanlardan görev bölgelerine olan toplam uçuş mesafesini, uçuşa elverişli olmayan günleri ve

maliyetleri en aza indirmeyi amaçlayan çok amaçlı bir model geliştirilmiştir. Daha sonra karar verici için belirlenen hedeflerin öncelikleri göz önünde bulundurularak model için etkili çözümler bulmayı amaçlayan algoritmalar sunulmuştur. Son olarak epsilon kısıt yöntemi ile en çok çelişen amaç fonksiyonları için etkin çözüm kümeleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, stratejik ve operasyonel seviyelerde İHA'lar için meydan konumlarını belirlemede ve meydanlardan görev bölgelerine yapılacak uçuş görevlerini planlamada kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Matematiksel modelleme, Optimizasyon, Tesis lokasyonu, İnsansız uçak, Çok amaçlı optimizasyon.



ABSTRACT

BASE LOCATION OPTIMIZATION FOR UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM: A MULTI-OBJECTIVE APPROACH

BAKIR, Mustafa Erdem

Master of Science Thesis, Department of Unmanned and Autonomous
System Engineering

Thesis Supervisor: Dr. Fatih Kasımoğlu

October 2024, 115 page

With the developments in technology, possession and usage of unmanned air vehicle systems (UAVS) get more and more widespread all around the world for various purposes and in many different fields. One common and prominent usage of these systems nowadays is in the security area, especially to ensure border and cross-border security of the countries. The effectiveness of these systems stems from the fact that they eliminate the risk of human loss and can be used efficiently in large areas. Although some unmanned aerial vehicles (UAV) take off vertically or via a launcher, an base is needed for unmanned aerial vehicles used in border and cross-border regions to take off and land. In fact, having long-range missions, strategic and operational level UAVs, which are better equipped and capable of carrying heavy payloads, essentially require an airfield for their operations. Determining the locations of the bases and planning the flight missions of such UAVs is important to meet the mission requirements as well as to minimize the costs. In this study, a multi-objective approach is presented to optimize the locations of UAV bases, taking into account operational and fixed costs as well as critical mission requirements. In this regard, a multi-objective model is developed that aims to minimize the number of bases to be opened, the total flight distance from bases to mission areas, unairworthy days for flight and costs. Then, algorithms are presented to find effective solutions to the model, taking

into account the priorities of the goals determined for the decision maker. Finally, efficient solution sets are given for the most conflicting objective functions using the epsilon constraint method. The results can be used at strategic and operational levels to decide the UAV base locations and the deployment plan of the UAVs from the bases to the mission zones.

Keywords: Mathematical modeling, Optimization, Facility location, Unmanned Aircraft, Multi-objective optimization.



TEŐEKKÖR

Bu tezin hazırlanmasında bilgi ve tecrÖbesini bana aktarmasının yanı sıra hoşgÖrÖsÖnÖ sÖrekli olarak hissettiğim değerli hocam sayın Dr. Fatih KASIMOĞLU’na, eğitimim boyunca maddi ve manevi olarak yanımda olan sevgili eŐim GÖlŐah BAKIR’a, annem Hatice BAKIR’a, kardeŐim GÖrkem BAKIR’a, oğlum Ahmet Çınar BAKIR’a ve 2005 yılında őehit olan babam Ahmet BAKIR’a teŐekkÖrÖ bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
KISALTMALAR LİSTESİ	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 İnsansız Hava Aracı Tanımı ve Tarihi Gelişimi.....	1
1.2 İnsansız Hava Araçlarının Bileşenleri.....	5
1.3 İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması.....	6
2 TESİS YERİ SEÇİMİ PROBLEMİ	9
2.1 Tesis Yeri Seçimi Probleminin Tanımı ve Tarihi Gelişimi	9
2.2 Tesis Yeri Seçimi Probleminin Sınıflandırılması	13
3 ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON PROBLEMİ.....	25
3.1 Çok Amaçlı Optimizasyon Probleminin Tanımı ve Tarihi Gelişimi	25
3.2 Çok Amaçlı Optimizasyon Problemi Çözüm Yaklaşımları	27
4 MATEMATİKSEL MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ.....	31

4.1	Problemin Tanımı ve Kısıtların Belirlenmesi.....	31
4.1.1	Aday Meydanlardan Talep Bölgelerine Mesafenin Belirlenmesi.....	32
4.1.2	Yıllık Uçuş Görevi İstek Sayılarının Belirlenmesi.....	32
4.1.3	Meydanların Yıllık Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısının Belirlenmesi.....	32
4.1.4	Meydanların Sabit Maliyeti ve Uçuş Maliyetinin Belirlenmesi.....	32
4.1.5	Varsayımlar.....	33
4.2	Meydan Yer Seçimi Optimizasyonu İçin Tek Amaçlı Matematiksel Modelleme.....	33
4.2.1	İndis, Küme, Parametre ve Karar Değişkenlerinin Tanımlanması.....	33
4.2.2	Meydan Sayısını Minimize Eden Matematiksel Modelin Tasarımı (Model-1).....	34
4.2.3	Mesafeyi Minimize Eden Matematiksel Modelin Tasarımı (Model-2).....	35
4.2.4	Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısını Minimize Eden Matematiksel Modelin Tasarımı (Model-3).....	35
4.2.5	Maliyeti Minimize Eden Matematiksel Modelin Tasarımı (Model-4).....	36
4.3	Meydan Yer Seçimi Optimizasyonu İçin Çok Amaçlı Bir Yaklaşım İle Matematiksel Modelleme.....	36
4.3.1	Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli (Model-5).....	36
4.3.2	Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi ile Çözüm Yaklaşımı (Model-6).....	37
4.3.3	Önceliklendirilmiş Optimizasyon ile Çözüm Yaklaşımı (Model-5 Algoritma-1,2,3,4).....	38
4.3.4	Epsilon Kısıt Yöntemi ile Çözüm Yaklaşımı.....	42
5	UYGULAMA VE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN ANALİZİ.....	44
5.1	Tek Amaçlı Matematiksel Model Yaklaşımı İle Çözüm ve Analiz.....	46

5.1.1	Meydan Sayısını Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi.....	46
5.1.2	Mesafeyi Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi.....	47
5.1.3	Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısını Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi.....	49
5.1.4	Maliyeti Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi.....	51
5.1.5	Model Çözümlerinin Değerlendirilmesi.....	53
5.2	Çok Amaçlı Matematiksel Model Yaklaşımı İle Çözüm ve Analiz.....	56
5.2.1	Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi ile Çözüm ve Elde Edilen Sonuçlar.....	56
5.2.2	Önceliklendirilmiş Optimizasyon ile Çözüm ve Elde Edilen Sonuçlar.....	57
5.2.3	Epsilon Kısıt Yöntemi ile Çözüm ve Elde Edilen Sonuçlar.....	63
6	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	64
	KAYNAKLAR DİZİNİ	66
	EKLER	
A.	Model-1 GAMS kodu.....	74
B.	Model-2 GAMS kodu.....	76
C.	Model-3 GAMS kodu.....	78
D.	Model-4 GAMS kodu.....	81
E.	Model-5 Algoritma-1 GAMS kodu.....	83
F.	Model-5 Algoritma-2 GAMS kodu.....	86
G.	Model-5 Algoritma-3 GAMS kodu.....	89

H.	Model-5 Algoritma-4 GAMS kodu.....	93
I.	Model-6 GAMS kodu.....	96



TABLÖLER LİSTESİ

TABLÖLER

Tablo 1.1: NATO İHA sınıflandırması.....	7
Tablo 5.1: Aday meydana riskli bölgeye kuş uçuşu mesafe.....	44
Tablo 5.2: Yıllık uçuş görevi isteği.....	45
Tablo 5.3: Uçuşa elverişli olmayan yıllık gün sayısı.....	45
Tablo 5.4: Aday meydanların sabit maliyeti.....	45
Tablo 5.5: Model-1’den elde edilen sonuçlar.....	46
Tablo 5.6: Model-2’den elde edilen sonuçlar.....	48
Tablo 5.7: Model-3’ten elde edilen sonuçlar.....	50
Tablo 5.8: Model-4’ten elde edilen sonuçlar.....	52
Tablo 5.9: Tek amaçlı modellerin çözümünden sonra ortaya çıkan görev planı....	55
Tablo 5.10: Tek amaçlı modellerden elde edilen amaç fonksiyon değerleri.....	56
Tablo 5.11: Model-6’dan elde edilen sonuçlar.....	57
Tablo 5.12: Model-5 Algoritma 1’den elde edilen sonuçlar.....	58
Tablo 5.13: Tüm modellerden elde edilen amaç fonksiyon değerleri.....	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİLLER

Şekil 1.1: Arhitas'ın uçan mekanik kuşu (güvercin)	2
Şekil 1.2: V-1 Buzz bombası.....	3
Şekil 1.3: Ryan-147 İHA.....	4
Şekil 1.4: İnsansız hava aracı bileşenleri.....	5
Şekil 2.1: Kaplama ve Merkez problemi arasındaki ilişki.....	21
Şekil 4.1: İlgi alanında bulunan örnek bölgeler ve aday meydanlar.....	31
Şekil 5.1: Minimum meydan sayısına göre açılan meydanlar.....	47
Şekil 5.2: Minimum mesafeye göre açılan meydanlar.....	49
Şekil 5.3: Uçuşa elverişli olmayan minimum gün sayısına göre açılan meydanlar.....	51
Şekil 5.4: Minimum maliyete göre açılan meydanlar.....	53
Şekil 5.5: Model-5 Algoritma-1'e göre açılan meydanlar.....	59
Şekil 5.6: Uçuş mesafesi ve uçuşa elverişsiz günler konusunda etkin çözümler...	64
Şekil 5.7: Maliyet ve uçuşa elverişsiz günler konusunda etkin çözümler.....	64

KISALTMALAR LİSTESİ

BLOS : Beyond Line of Sight (Görüş Ötesi)

CBS : Coğrafi Bilgi Sistemi

CPA : Cover Protected Area (Koruma Çadırı)

EASA :European Union Aviation Safety Agency (Avrupa Havacılık Emniyet Ajansı)

EO : Electro Optic (Elektro Optik)

FAA : Federal Aviation Administration (Amerika Havacılık İdaresi)

GAMS: General Algebraic Modeling System (Genel Matematiksel Modelleme Sistemi)

HALE : High Altitude Long Endurance (Yüksek irtifa Uzun Dayanım)

IR : Infrared (Kızılötesi)

İHA : İnsansız Hava Aracı

İHAS : İnsansız Hava Aracı Sistemi

JAPCC: Joint Air Power Competence Center (Müşterek Hava Gücü Yetenek Merkezi)

LIDAR: Light Detection and Ranging (Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini)

LOS : Line of Sight (Görüş İçi)

MALE: Medium Altitude Long Endurance (Orta irtifa Uzun Dayanım)

NATO: North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)

SAR : Synthetic Aperture Radar (Sentetik Açıklıklı Radar)

SSM : Savunma Sanayi Müsteşarlığı

PV : Photovoltaic (Fotovoltaik)

UAV : Unmanned Air Vehicle (İnsansız Hava Aracı)

USAF: United States Air Force (Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri)

YKİ : Yer Kontrol İstasyonu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 İnsansız Hava Aracı Tanımı ve Tarihi Gelişimi

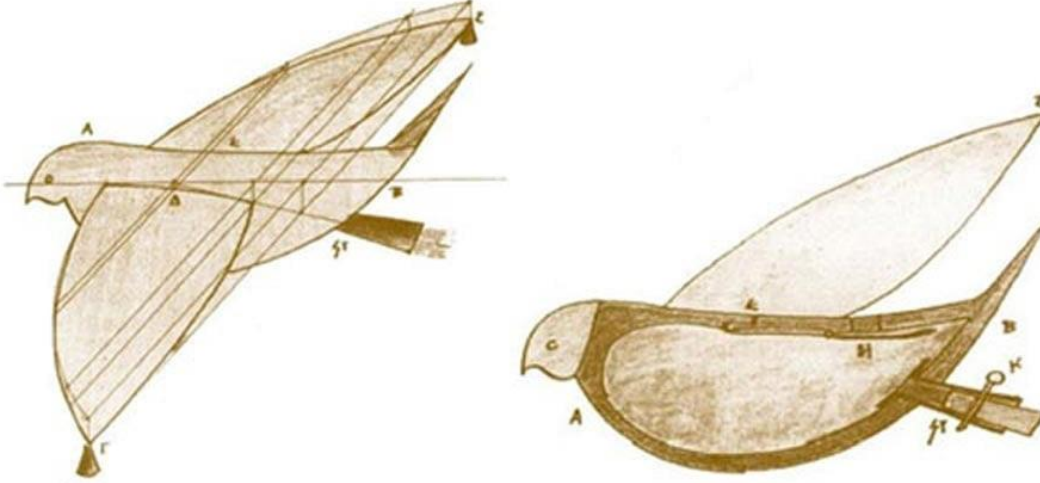
Günümüzde yapay zekanın hızla gelişimi ve otonom sistemlerde kullanılmasıyla birlikte insansız hava araçlarına (İHA) sahip olmak çok daha önemli hale gelmiştir. Bu araçlar, farklı türlerde geniş bir alanda ve çeşitli amaçlarla kullanılabilir. İHA'lar gelişim sürecinde birçok farklı şekilde isimlendirilmiştir. Bu konuda örneklere baktığımızda Amerikan Havacılık İdaresi (FAA) tarafından insansız uçak sistemleri, Amerikan Hava Kuvvetleri (USAF) tarafından uzaktan komutalı hava aracı, Birleşik Krallık tarafından uzaktan komutalı hava sistemi ve Vietnam savaşında ise uzaktan komutalı araçlar olarak adlandırıldığını görmekteyiz [1].

Literatür incelendiğinde insansız hava aracı ile ilgili birçok tanımlama yapıldığı görülmektedir. Bunlar içinde öne çıkan tanımlamalar şu şekildedir:

İnsansız Hava Aracı Müşterek Yetenek Grubu (JCG) tarafından insansız hava araçları, içinde pilot olmadan çalışmak üzere tasarlanan yeniden kullanılabilir uçak olarak tanımlanmıştır[2]. Bir diğer tanımlamada ise İHA; içinde pilotu bulunmayan, havada uçuş için kullanılan veya kullanılması amaçlanan alet olarak açıklanmıştır [3]. Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA) tarafından insansız hava araçları; birbirinden ayrı olarak İHA, kontrol istasyonu, uçuş için gerekli olan komuta-kontrol linkleri ve fırlatma-kurtarma bileşenlerinden oluşan sistem olarak tanımlanmıştır [4]. Son olarak, Savunma Sanayi Müsteşarlığının (SSM) İnsansız Hava Aracı Yol Haritası çalışmasında ise İHA; içinde pilotu bulunmayan, aerodinamik yapısıyla kaldırma kuvvetine sahip olan, otonom olarak uçabilen veya uzaktan pilot tarafından komuta

edilebilen, gerekli görüldüğü durumlarda sarf edilebilen veya yeniden kullanılabilen, öldürücü veya öldürücü olmayan faydalı yük taşıyabilen motorlu hava aracıdır [5] .

İHA'ların gelişimi, kullanımı ve etkinliği her ne kadar 1900'lü yılların ortasından itibaren çok hızlı bir şekilde artmış olsa da bu araçların geçmişi çok daha eski tarihlere dayanmaktadır. Tarihte otonom olarak uçan ilk hava aracı çalışması Tarantolu Arhitas tarafından yapılmıştır. Milattan önce 425 yılında “güvercin” olarak adlandırılan mekanik kuş ahşap yapıda, dengeli bir ağırlığa sahip ve uçmak için midesindeki havayı kullanmaktadır [6]. Bunun yanında mekanik kuşun mekanizması resetlenmeden tekrar kullanılması mümkün değildir [7]. Aynı dönemde Çin’de Ming Hükümdarlığı askeri amaçlı kullanılmak üzere dikey kalkış yapabilen basit hava araçları yapmıştır.



Şekil 1.1: Arhitas'ın uçan mekanik kuşu (güvercin)

Yüzyıllar içinde teknolojik gelişmelerle birlikte hava aracı teknolojisi de gelişmiştir. İlk modern insansız hava aracı fikirleri ise yönlendirilebilir bombalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Yönlendirilebilir bombaların uzaktan komuta edilerek kullanılma fikri Nikola Tesla tarafından 1890'lı yılların sonunda ortaya atılmıştır. Tarih 6 Mart 1918'i gösterdiğinde Elmer Sperry tarafından geliştirilen 'uçan torpido' insansız şekilde fırlatılmış, yaklaşık olarak 1000 metre uçuş yapmış ve ardından hedefe yönelerek inişini gerçekleştirmiştir. Bu şekilde dünyanın ilk gerçek insansız hava aracı ya da dronu ortaya çıkmıştır [8]. II. Dünya Savaşı döneminde ise en önemli insansız hava aracı, Almanya tarafından geliştirilen V-1 Buzz bombası olarak göze çarpmaktadır. Bu bomba, II. Dünya Savaşı'nda önemli bir rol oynayan ilk operasyonel ve büyük

ölçekli insansız hava aracıdır. Almanya tarafından kullanılan bu teknolojik gelişme, taktiksel bombardıman ve stratejik saldırıların yürütülmesinde etkili olmuştur. Resmi adı "Vergeltungswaffe 1" (İntikam Silahı 1) olarak bilinen V-1 uçan bombasıyla ilgili bazı temel özellikler şunlardır:

- Jet motoru ile donatılmış bir kanatlı füze olarak tasarlanmıştır. Argus As 109-014 adlı bir roket motoru kullanılmıştır.
- 240 km (150 mil) menzile sahiptir ve saatte 640 km/s (400 mil/s) hıza ulaşabilmektedir.
- Haziran 1944'ten Mayıs 1945'e kadar Almanya tarafından Birleşik Krallık'a yönelik saldırılarda kullanılmıştır.
- Basit bir jayroskopik otonom kontrol sistemine sahiptir. Belirli bir menzile ulaştıktan sonra, bu sistem otomatik olarak V-1'i belirlenen hedefe yönlendirmektedir.
- V-1 Buzz bombası insansız hava araçları teknolojisinin gelişiminde bir dönüm noktası olarak nitelendirilmiş ve günümüzdeki insansız hava araçlarıyla ilgili çalışmaların temelini oluşturmuştur.



Şekil 1.2: V-1 Buzz bombası

Şimdiye kadar anlatılan sistemler her ne kadar uzaktan komuta edilen hava aracı olarak tanımlansa da aslında güdümlü bomba ya da hedef uçak tanımlarına daha çok uymaktadır. Günümüz insansız hava aracı tanımına uyan ilk İHA, 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanan Ryan-147'dir. Bu hava aracı; keşif, sinyal istihbaratı ve radar sinyallerini aldatma görevlerinde kullanılmıştır. 50000 feet irtifaya ve 600 knot hıza ulaşabilmektedir. İsmi ilerleyen zamanlarda Lightning Bug ve Firebee olarak anılmıştır.



Şekil 1.3: Ryan-147 İHA

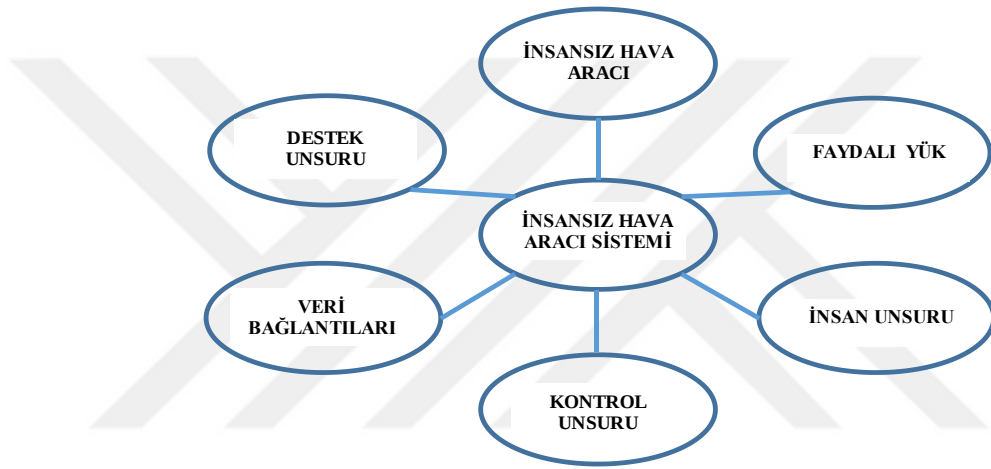
Bilgisayar sistemlerinin, küresel konumlama uydu sistemlerinin ve dahili navigasyon sistemlerinin gelişimi ile birlikte insansız hava araçlarının otonom görev yapma kabiliyetleri artmıştır. 1982 yılında Beka vadisi çatışmasında İsrail tarafından ve 1991 yılında Çöl Fırtınası operasyonunda ABD tarafından insansız hava araçları operasyonel olarak kullanılmıştır. Özellikle son yıllarda insansız hava aracını etkin şekilde kullanabilen ülkeler önemli bir kuvvet çarpanına sahip olmuştur. Yakın gelecekte insanlı savaş uçaklarının yerini insansız savaş uçaklarının alacağı değerlendirildiğinde bu alanda ilerleyen ve kendini geliştiren ülkeler çok büyük kazanımlar elde edeceklerdir.

İnsansız hava araçlarının kullanımı askeri amaçlar dışında da hızla gelişmektedir. Bu sistemlerin kullanım alanlarına örnek olarak; çevre koruma faaliyetleri, haritacılık, orman yangını kontrolü, arama ve kurtarma faaliyetleri, kritik öneme sahip altyapıların takip ve gözlemlenmesi (barajlar, boru hatları, elektrik hatları vb.), tarımsal uygulamalar, balıkçılık, trafik denetimi ve yoğunluk analizi, kirlilik denetimi, kargo

(yük) taşımacılığı, şehir modelleme, doğal afetlerin takibi sayılabilir [9]. Bu şekilde, her geçen gün İHA'ların hayatımızda daha fazla yer edindiğini görmekteyiz.

1.2 İnsansız Hava Araçlarının Bileşenleri

İHA'lar karmaşık alt bileşenlerin bir araya getirilmesiyle çalışan sistemlerdir. Müşterek Hava Gücü Yetkinlik Merkezi (JAPCC) tarafından insansız hava aracı sistemi 6 bölüme ayrılmıştır [10]. Bunlar insansız hava aracı, faydalı yükler, insan unsuru, kontrol unsurları, veri bağlantıları ve destek unsurlarıdır.



Şekil 1.4: İnsansız Hava Aracı Bileşenleri

İnsansız hava aracı, içinde uçuş mürettebatı bulunmayan hava aracı olarak tanımlanabilir. Bu hava araçları döner kanat veya sabit kanat olarak tasarlanabilir. İHA'lar genel olarak itki, yakıt, elektrik-güç, aviyonik, data linkleri vb. alt sistemlerden oluşmaktadır. İnsansız hava araçları içerisinde insan olmadan kullanıldığı için gerektiğinde sarf edilebilir. Bu özellik kullanıcı için hava aracını kaybetmek anlamına gelse de aynı zamanda önemli bir yetenek olarak değerlendirilmelidir. Aynı zamanda bu yetenek ile insan kaybı riski minimize edilerek hava aracını riskli veya kirlenmiş bölgelere göndermek mümkündür.

Faydalı yükler; insansız hava aracı üzerine monte edilen mühimmat, kargo, sensör (elektro-optik EO, infrared IR, sentetik açıklık radar SAR, ışık tespit ve mesafe ölçme LIDAR) ve kamera sistemlerini tanımlar. Hava aracına yerleştirilen faydalı yüklerin

artmasıyla hava aracının sahip olduğu yetenek havuzuda aynı şekilde artmaktadır. Hava aracına eklenen her faydalı yük uçağın ağırlığını arttırarak ebatlarının da büyümesini zorunlu kılmaktadır.

İnsansız hava aracı sistemlerinin adında her ne kadar insansız sözcüğü geçse de, tüm sistem değerlendirildiğinde bu karmaşık bileşimin temel unsuru insan faktörüdür. Hava araçlarının kullanımının perde arkasında; uçağın teknik özelliklerini mühendis seviyesinde bilen ve tüm havacılık kurallarını uygulayarak uçağı uzaktan komuta eden pilot, faydalı yük sistemlerini hassas bir şekilde kullanan operatör ve uçağın uçuşa hazır olmasını sağlayan teknisyen ekibi vardır. Bu hava araçlarının uzun süreler havada kaldığı düşünöldüğünde uçuş ekibinin yönetimi ve uyumu yapılan görevlerin başarısı için çok önemlidir.

Yer kontrol istasyonları (YKİ), insansız hava aracının uzaktan kontrol edildiğı istasyonlardır. Bu istasyonlar vasıtasıyla hava aracı ile iletişim kurularak komut gönderilmektedir. Pilot ve Faydalı yük işletmeni bu istasyon içerisinde görevini yapmaktadır. Kontrol istasyonları sabit veya mobil olarak kullanılabilir. İstasyonlar genelde hava aracının kalkış ve iniş yaptığı meydanlarda konuşlandırılmaktadır. Ancak, görev gerekliliğı veya diğere sebeplerle taşınarak farklı yerlerde de kullanılabilir.

Veri bağlantıları, kontrol istasyonlarından hava aracına gönderilen komutlar ile hava aracından kontrol istasyonuna gelen verilerin akışını sağlamaktadır. Bu kapsamda hava araçlarına görüş içi kapsama (LOS) kapasitesi olan antenler ve görüş dışı kapsama (BLOS) özelliğine sahip donanımlar eklenebilir. Hava araçları bu şekilde konuşlu bulunduğı meydanlardan uzak mesafelerde görev yapma kabiliyetine sahip olmaktadır.

Destek unsurları ise insansız hava aracı sistemlerinin kurulması, taşınması, bakımı, iletişimin sağlanması gibi lojistik ihtiyaçların tümünü kapsamaktadır.

1.3 İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

İHA'ların operasyonel kabiliyetleri ve onları oluşturan bileşenlerin etkisiyle çeşitli İHA sınıflandırmaları ortaya çıkmıştır. Özellikle hava aracının kalkış ağırlığı, maksimum irtifası, seyir hızı, otonom özellikleri, görev süresi ve kullanıcı seviyelerine

göre sınıflandırmaların olduğu görülmektedir. Dalamatkidis ve arkadaşları tarafından hava aracı kalkış ağırlığına göre yapılan sınıflandırmada 6 kategori oluşturulmuştur [11]. Kategorinin en altında 1 kg'a kadar olan İHA'lar mevcutken en üstünde 4332 kg'dan yüksek İHA'lar bulunmaktadır. Clough tarafından yapılan sınıflandırmada İHA'lar otonom kontrol seviyelerine göre kategorize edilmiştir [12]. Toplam 10 seviyeye ayrılan kategori içinde en üstte tam otonom İHA'lara yer verilmiştir. Başka bir sınıflandırma ise NATO (North Atlantic Treaty Organization) üyesi ülkeler tarafından kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma; ağırlık, uçuş yüksekliği ve görev menziline dayanmaktadır. NATO tarafından yapılan İHA sınıflandırması Tablo 1.1'de sunulmuştur [10].

Tablo 1.1: NATO İHA sınıflandırması

Class	Category	Normal Employment	Normal Operating Altitude	Normal Mission Radius	Example Platform
CLASS I (Less than 150 kg)	SMALL >20 kg	Tactical Unit (Employ launch system)	Up to 5K ft AGL	50 km (LOS)	Luna, Hermes 90
	MINI 2-20 kg	Tactical Sub-unit (manuel launch)	Up to 3K ft AGL	25 km (LOS)	Scan Eagle, Skylark, Raven, DH3
	MICRO <2 kg	Tactical PI, Sect, Individual	Up to 200 ft AGL	5 km (LOS)	Black Widow
CLASS II (150 kg to 600 kg)	TACTICAL	Tactical Formation	Up to 10.000 ft AGL	200 km (LOS)	Sperwer, Iview 250, Aerostar
CLASS III (More than 600 kg)	STRIKE/ COMBAT	Strategic/ National	Up to 65.000 ft	Unlimited (BLOS)	
	HALE	Strategic/ National	Up to 65.000 ft	Unlimited (BLOS)	Global Hawk
	MALE	Operational/ Theatre	Up to 45.000 ft MSL	Unlimited (BLOS)	Predator B, Predator A, Heron, Heron TP, Hermes 900

Tablo 1.1 incelendiğinde NATO'nun İHA sınıflandırmasının 3 kategoriye ayrıldığı görülmektedir. 150 kg'a kadar olan İHA'lar 1'inci kategori olarak adlandırılmıştır. Bu kategoride kendi içinde 3'e ayrılmıştır. Toplam ağırlığı 2 kg'a kadar olan İHA'lar Mikro, 2-20 kg arasında olan İHA'lar Mini ve 20-150 kg arasındaki İHA'lar ise Küçük İHA olarak isimlendirilmiştir. Mikro, Mini ve Küçük İHA'ların uçuş yüksekliği ve görev yarıçapı 2 ve 3'üncü kategori İHA'lara göre kısıtlıdır. 2'nci kategori İHA'lar Taktik seviye olarak adlandırılmıştır. Bu İHA'ların toplam ağırlığı 150-600 kg arasındadır. 600 kg üstü ağırlığa sahip İHA'lar ise 3'üncü kategori olarak adlandırılmıştır. Orta irtifa-yüksek dayanıklılık (MALE), yüksek irtifa-yüksek dayanıklılık (HALE) ve muharip İHA'lar bu kategoride bulunmaktadır. Bu kategoride bulunan İHA'lar genel olarak uydu iletişimini kullandığından görev menzili diğer 2 kategoriye kıyasla daha geniştir. Aynı zamanda deniz seviyesinden 45000 ile 60000 feet irtifaya kadar çıkabilecek motor gücüne ve kompozit yapıya sahiplerdir. Özellikle sınır güvenliği görevlerinde, riskli bölgelere yönelik görevlerde ve kirli alanlarda icra edilecek görevlerde (Çernobil nükleer santrali faciası gibi), operasyonun gerektirdiği faydalı yükler (hava araçları ekipmanları) oldukça önemli bir yere sahiptir. Bunun yanında bu tür görevler için İHA'nın görev yapabileceği mesafe ve uçuş irtifasında önemli faktörlerdendir. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında riskli veya kirli alanlar için orta irtifa-yüksek dayanıklılık (MALE) kategorisinde bulunan insansız hava araçlarının kullanılması en uygun seçenek olarak gözükmemektedir. MALE kategorisi İHA'ların toplam kalkış ağırlığı ve kullandıkları faydalı yükler düşünüldüğünde operasyonlarını icra edebilmeleri için meydanlara ihtiyaç vardır. Görev gereklerini yerine getirirken meydanların sayısını ve yerlerini en iyi şekilde belirlemek karar vericiler için önemli bir sorundur. Meydan yerlerinin belirlenmesi temelde tesis yeri seçim problemi konusuna girmektedir. Bu kapsamda bir sonraki bölümde tesis yeri seçimi problemi konusuna değinilecektir.

BÖLÜM 2

TESİS YERİ SEÇİMİ PROBLEMİ

2.1 Tesis Yeri Seçimi Probleminin Tanımı ve Tarihi Gelişimi

Tesis yerleşimi problemi (Facility Location Problem), bir şirketin veya kuruluşun belirli bir bölgede yerleşik olacak tesislerinin optimal konumlarını belirlemeye odaklanan operasyonel araştırma problemi olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade de ise tesis yerleşim problemi bir grup müşterinin talebini karşılamak için belirli bir alanda bir dizi tesisin konumlandırılması olarak açıklanmıştır [13]. Bu tanımlamaların yanında şehirlerdeki aşırı nüfus yoğunluğu, trafik sorunları, çevre kirliliği ve sınırlı kaynakların etkili bir şekilde kullanılması gibi sorunlarda, tesis yeri problemlerinin konusu arasında yer alabilir. Bu problem türünde temel olarak maliyetleri minimize etmek, müşteri ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılamak veya belirli kısıtlamalar altında en verimli işleyişi sağlamak gibi amaçlar optimize edilmeye çalışılır.

Tesis yeri seçimi, insanoğlunun üretim faaliyetlerini sürdürdüğü tarihlerden itibaren var olan bir konsept olarak karşımıza çıkmaktadır. Tarih boyunca, çeşitli uygarlıklar ve dönemlerde tesislerin yerleşim yerleri seçilirken dikkate alınan faktörler evrim geçirmiştir.

Antik dönemler incelendiğinde tarım ve zanaat faaliyetleri için genellikle su kaynaklarına yakın yerler seçildiği gözlenmiştir. Özellikle nehirler, göller veya deniz kıyısında bulunan yerleşim yerleri, su temini ve taşımacılık konusunda sağladığı avantajlar nedeniyle tercih edilmiştir. Bunun önemli örneklerinden biri, Mısır'da Nil Nehri'nin etrafında gelişen tarım uygarlığıdır. Bu uygarlık su kaynağına dayalı tesis yerleşimine örnek olarak gösterilebilir.

Orta Çağ'da ticaretin gelişmesiyle birlikte, ticaret yollarının kavşak noktaları veya liman şehirleri gibi stratejik konumlara yapılan tesis yerleşimleri önem kazanmıştır. Bu dönemde, tesislerin seçimine ekonomik faktörlerinde eklendiği görülmektedir.

Sanayi Devrimi ile birlikte, enerji kaynakları ve ulaşım imkanları tesis yeri seçiminde belirleyici hale gelmiştir. Kömür madenlerine yakın, kara ve deniz ulaşımına sahip yerlere kurulan fabrikalar, tesis yerlerinin seçiminde etkili olmuştur.

Tesis yeri seçimi probleminin matematiksel modellerle çözülmesi, 1950'lerin ortalarına dayanmaktadır. Koopmans tarafından yer tahsis problemiyle ilgili matematiksel modellerin temelleri atılmıştır [14]. 1960'larda, Dantzig ve diğer araştırmacılar, lineer programlama gibi matematiksel teknikleri kullanarak tesis yeri seçimi problemini ele almıştır [15]. Bu dönem, yer seçimi konusunun akademik çevrelerde ve endüstriyel dünyada önemli bir farkındalık kazandığı dönem olarak değerlendirilmektedir.

Tesis yeri seçimi modelleri, 1970 ve 1980'li yıllarda çeşitlenmeye başlamıştır. Bu dönemde sadece deterministik modeller değil aynı zamanda stokastik modeller de ortaya çıkmıştır. İşletmeler, tesis yerleşim kararlarını daha karmaşık faktörleri içeren modellerle ele almaya başlamıştır. Günümüzde ise tesis yeri seçimi problemleri birçok faktörü içinde barındıran kompleks bir karar haline dönüşmüştür. Küresel tedarik zincirleri, lojistik avantajlar, işgücü yetenekleri, vergi politikaları, sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve çevresel etkiler gibi bir dizi faktör, şirketlerin stratejik yer seçiminde etkili olmaktadır. Özellikle tesislerin ilk konumlandırılması veya yeniden konumlandırılmasının yüksek maliyetleri, bu kararları kuruluşlar için daha kritik hale getirmiştir [16].

Karar vericinin tesis yeri seçimindeki amaçları, işletmenin stratejik hedefleri doğrultusunda belirlenmektedir. Bu amaçlar, genellikle işletmenin uzun vadeli başarısını maksimize etmeyi ve operasyonel etkinliği optimize etmeyi içermektedir. Tesis yeri seçimi probleminin temel amaçlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- **Maliyet Minimizasyonu:** Tesis yeri seçimi, işletme için en düşük maliyetle faaliyet gösterebilecek bir konumu belirleme amacını taşımaktadır. Bu maliyetler; işgücü, ulaşım, enerji, altyapı ve vergiler gibi çeşitli unsurları içermektedir.

- Lojistik ve Tedarik Zinciri Verimliliği: Tesis, tedarik zinciri yönetimi açısından stratejik bir rol oynamaktadır. İşletmeler tesis yerini belirleyerek lojistik maliyetleri minimize eder, tedarik zinciri etkinliğini artırır ve müşteriye daha hızlı hizmet sunabilir.

- Müşteri Erişimi ve Pazar Payı Artışı: Tesis yeri seçimi işletmenin hedef müşteri kitlesine daha etkili bir şekilde ulaşmasına olanak tanımaktadır. Stratejik bir konumda bulunan tesisler, pazar payını artırabilir ve rekabet avantajı sağlayabilir.

- İşgücü Nitelik ve İstikrarı: İşletmeler, tesislerini kuracakları yerde uygun niteliklere sahip işgücü bulma potansiyelini değerlendirirler. Bu şekilde istikrarlı bir işgücü kaynağı ve operasyonel süreklilik sağlanmaktadır.

- Sürdürülebilirlik ve Çevresel Faktörler: Günümüzde, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik önemli bir odak noktası haline gelmiştir. İşletmeler tesis yerini seçerken çevresel etkileri en aza indirme, doğal kaynakları etkili kullanma ve toplumsal beklentilere uyum sağlama hedeflerini gözetmektedir.

Bu amaçlar, işletmenin stratejik hedeflerine bağlı olarak değişebilir ve tesis yeri seçimi sürecinde dikkate alınan faktörlerle birlikte değerlendirilir. Tesis yeri seçimi için bazı örnek uygulamaları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Otomotiv Fabrikası:

Amacı, üretim maliyetlerini minimize etmek ve lojistik avantajlardan yararlanarak küresel pazarlara ulaşmaktır. Örnek faktörler; tedarik zinciri erişimi, ulaşım altyapısı, işgücü becerileri ve enerji maliyetleridir.

- Gıda İşleme Tesisi:

Hammadde kaynaklarına yakın olmayı, lojistik maliyetleri minimize etmeyi ve tüketici pazarlarına etkin şekilde dağıtım sağlamayı amaçlamaktadır. Örnek faktörler ise hammadde erişimi, lojistik altyapı ve pazar talepleridir.

- Enerji Santrali:

Amacı; enerji verimliliğini artırmak, enerji kaynaklarına yakın olmak ve enerji talep merkezlerine etkin şekilde enerji sağlamaktır. Örnek faktörler; enerji kaynakları, ulaşım altyapısı ve çevresel etkilerdir.

- Kimya Fabrikası:

Amaç; hammaddelere ve tüketici pazarlarına kolay erişim sağlayabilmek, çevresel güvenlik standartlarına uyum sağlamak olarak sıralanabilir. Hammadde kaynakları, lojistik altyapı, çevresel düzenlemeler ve işgücü becerileri ise kullanılacak örnek faktörlerdir.

- Tarım İşletmesi:

Verimli tarım alanlarına yakın olmak, su kaynaklarına kolay erişim sağlamak ve tüketici pazarlarına yakınlık amaçları olarak sıralanabilir. Bu işletmenin örnek faktörleri ise toprak kalitesi, su kaynakları, iklim koşulları ve ulaşım altyapısıdır.

Bahsedilen örnekler, farklı sektörlerdeki çeşitli işletmelerin tesis yeri seçimi için dikkate aldığı faktörleri yansıtmaktadır. İşletmeler kendi stratejik hedefleri doğrultusunda en uygun tesis yeri kararını almaya çalışırlar.

Tesis Yerleşim Probleminde amaçlar ve kısıtlar belirlendikten sonra genellikle matematiksel optimizasyon modelleri kullanılarak çözüm sağlanır. Çözüm için oluşturulan adımları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

I. Modelleme: Problem, matematiksel bir modele dönüştürülmelidir. Model ile tesis yerleşimi ve ilişkili maliyetleri ifade eden bir matematiksel fonksiyon oluşturulur. Model; her bir tesisin açılma maliyeti, tesisler arası taşıma maliyetleri ve müşteri talepleri gibi faktörleri içerebilir.

II. Hedef Fonksiyonu Belirleme: Bu tür problemlerde amaç olarak hangi kriterin optimize edileceği belirlenir. Örneğin, toplam maliyeti minimize etmek veya müşteri memnuniyetini maksimize etmek gibi.

III. Kısıtlamaları Tanımlama: Gerçek dünya durumları genellikle kısıtlamalarla doludur. Bu kısıtlamalar; tesislerin sayısı, mevcut kaynaklar, kapasite sınırları ve coğrafi faktörleri içerebilir. Bu kısıtlamalar modele eklenmelidir.

IV. Optimizasyon Algoritmaları Kullanma: Matematiksel modele dayalı olarak; lineer programlama, tam sayılı programlama veya heuristik yöntemler ile problem çözülebilir.

V. Çözümü Analiz Etme: Optimizasyon algoritmaları genellikle birçok farklı parametre setiyle denemeler yapar. Bu nedenle, çözümü dikkatlice analiz etmek ve iş gereksinimlerine en uygun olanı seçmek önemlidir.

2.2 Tesis Yeri Seçimi Probleminin Sınıflandırılması

Literatür incelendiğinde birçok araştırmacı tesis yeri seçimi problemi üzerine çeşitli çalışmalar yürütmüştür (okullar, hastaneler, yangın istasyonları vb.) [17]. Tesis yeri modelleri incelendiğinde talebi gidermek maksadıyla birçoğunun var olan modelden türediğini görebiliriz. Revelle vd. tarafından yapılan çalışmada tesis yeri problemi 4 kategoriye ayrılmıştır [18]. Bu kategoriler; analitik, ağ, sürekli ve ayrık modellerdir. Analitik modellerde temelde basitleştirilmiş varsayımlar ile talebin eşit olarak dağıtılması veya sabit maliyetle tesis yeri seçimleri modellenmiştir. Ağ modellerinde, ulaşım planlamaları ve rotalama üzerine modeller kurulmuştur. Sürekli modellerde ise tüm alan içinde müşterilerin kümeleştiği merkez noktalar bulunarak bu bölgelere tesislerin yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Son olarak ayrık modellerde belirli bir alan üzerinde bulunan aday tesis yerlerinden talep noktalarına hizmet sağlayacak yerleşimin yapılması amaçlanmıştır. Ayrık modeli, bilinen konumlarda bulunan tesislerden hizmet alacak müşteriler için minimum maliyetle gerekli sayıda tesisin seçilmesi olarak tanımlayabiliriz [19]. Bunun yanı sıra Mladenovi vd. tarafından yapılan çalışmada ise tesis yerleşim problemleri sürekli ve ayrık olarak sınıflandırılmıştır [20]. Bu çalışma kapsamında temel sınıflandırma yöntemlerinden biri olan kaplama, medyan veya merkez problemlerine değinilecektir [13].

a. Kaplama Problemleri

Kaplama problemleri, tesis tarafından hizmet noktalarındaki taleplerin karşılanması maksadıyla tesisin kapsama mesafesi veya kapsama yarıçapını minimize etmeyi amaçlayan problemlerdir. Tesis yeri problemlerinde müşteri ile tesis yeri arasındaki mesafe veya zaman önceden belirlenmiş sayıdan eşit yada az ise talep her tesis tarafından karşılanmış sayılır [21]. Berman vd. ve Owen-Daskin'e göre kapsama problemleri acil durum servislerinin (itfaiye tesisi, ambulans noktaları) yer seçim probleminden ortaya çıkmıştır [22,16]. Acil durum servis yerlerinin belirlenmesinde amaç maksimum talebi karşılayacak minimum sayıda tesisin seçilmesidir.

Kaplama problemlerinin ilki küme kaplama problemidir [23]. Küme kaplama problemleri tüm müşterileri kapsayacak şekilde gerekli sayıda tesisin bulunmasını amaçlar [16]. Küme problemlerinde bir kapsama mesafesi belirlenir. Tesis yeri ile hizmet noktası arasındaki mesafe, kapsama mesafesi içinde ise hizmet noktasının

talebi karşılanmış olarak değerlendirilir. Küme kaplama problemini matematiksel olarak şu şekilde açıklayabiliriz:

İndis ve Kümeler

i ; aday tesisler ($i=1, \dots, I$)

j ; talep noktaları ($j=1, \dots, J$)

Parametreler

D_{ij} ; talep noktası i ile aday nokta j arasındaki mesafe

D_c ; kaplama mesafesi

$N_{i,j} = \{D_{ij} \leq D_c\}$ i 'nin talep noktasına uzaklığının kaplama mesafesine eşit veya küçük olduğu aday noktalar kümesi

Karar değişkenleri

x_j ; $\begin{cases} 1; \text{eğer aday } j \text{ noktası açılırsa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

$$\min \sum_{j \in J} x_j \quad (2.2.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2.2.2)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.2.3)$$

Burada (2.2.1) minimum sayıda tesisin seçilmesi için amaç fonksiyonunu tanımlamaktadır. (2.2.2) kısıtı açılacak tesis sayısının sıfıra eşit veya büyük olmasını sağlar. (2.2.3) kısıtı ise karar değişkeninin alacağı değeri ifade eder.

Kaplama problemlerinin ikincisi maksimum kaplama problemidir. Maksimum kaplama problemlerinde, hizmet noktalarının talep miktarlarını maksimum seviyede

karşılacak minimum tesis seçimi amaçlanmaktadır. Bu alanda ilk çalışma Church ve ReVelle tarafından P-maksimum kaplama problemi ile yapılmıştır[24]. Bu çalışmada, P adet tesis seçilerek maksimum kaplama sağlamak amaçlanmıştır. Maksimum kaplama problemini matematiksel olarak şu şekilde açıklayabiliriz:

İndis ve Kümeler

i ; aday tesisler ($i=1, \dots, I$)

j ; talep noktaları ($j=1, \dots, J$)

Parametreler

H_i ; i noktasındaki talep miktarı

P ; açılacak tesis sayısı

D_{ij} ; talep noktası i ile aday nokta j arasındaki mesafe

D_c ; kaplama mesafesi

$N_{i,j} = \{D_{ij} \leq D_c\}$ i 'nin talep noktasına uzaklığının kaplama mesafesine eşit veya küçük olan aday noktalar kümesi

Karar değişkenleri

x_j ; $\begin{cases} 1; \text{eğer aday } j \text{ noktası açılırsa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

z_i ; $\begin{cases} 1; \text{eğer } i \text{ talep noktası kapsama alanındaysa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

$$\text{maks} \sum_{i \in I} H_i z_i \quad (2.2.4)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j \in N_i} x_j - z_i \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2.2.5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (2.2.6)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.2.7)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (2.2.8)$$

Burada (2.2.4) maksimum kaplama miktarını sağlayan amaç fonksiyonunu tanımlamaktadır. (2.2.5) kısıtı kaplama mesafesi içine hangi talep noktalarının dahil olduğunu, (2.2.6) kısıtı açılacak tesis sayısının P adet olmasını, (2.2.7) ve (2.2.8) kısıtı ise değişkenlerin alacağı değeri ifade eder.

b. Medyan Problemleri

Kaplama problemlerinde, genel olarak bir kaplama mesafesi içinde minimum tesis seçimi yada maksimum müşteri memnuniyeti amaçlanmaktadır. Medyan problemlerinde ise toplam maliyeti en aza indirmek için aday tesislerin medyan noktaları belirlenerek tesis yeri ve tesisten yapılacak hizmet miktarı bulunur. Okul ve hastane gibi kamu hizmet tesislerinin kurulması bu tür problemler arasında sayılabilir [25,26].

Bu problemler Ahmadi-Javid vd. tarafından ikiye ayrılmıştır [27]. Bunlardan ilki minimum maliyet hesabı olarakta adlandırılan P-medyan problemidir. P- medyan probleminde açılacak olan P adet tesisten talep noktalarına olan ağırlıklandırılmış toplam maliyetin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Hakimi, ReVelle ve Swaim tarafından oluşturulan formül şu şekildedir [28,29]:

İndis ve Kümeler

i ; aday tesisler ($i=1, \dots, I$)

j ; talep noktaları ($j=1, \dots, J$)

Parametreler

H_i ; i noktasındaki talep miktarı

P; açılacak tesis sayısı

D_{ij} ; talep noktası i ile aday nokta j arasındaki mesafe

Karar değişkenleri

$$x_{ij} ; \begin{cases} 1; \text{ eğer } i \text{ noktasındaki talep isteği } j \text{ tesisinden karşılanıyorsa} \\ 0; \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$y_j ; \begin{cases} 1; \text{ eğer } j \text{ noktasındaki tesis açılırsa} \\ 0; \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$\min \sum_{i \in I, j \in J} H_i D_{ij} x_{ij} \quad (2.2.9)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.2.10)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J, i \neq j \quad (2.2.11)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = P \quad \forall j \in J \quad (2.2.12)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.2.13)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.2.14)$$

Burada (2.2.9) minimum maliyetle talep miktarını karşılayacak P adet tesisin seçimini veren amaç fonksiyonudur. (2.2.10) kısıtı tüm talep noktalarının isteğinin karşılandığını, (2.2.11) kısıtı talep noktalarının sadece açılan tesislerden hizmet alacağını, (2.2.12) kısıtı sabit sayıda tesis açılacağını, (2.2.13) ve (2.2.14) kısıtı değişkenlerin alacağı değeri ifade eder.

Medyan problemlerinin ikincisi sabit maliyetli medyan problemidir. Medyan problemlerinin amaç fonksiyonuna tesisin açılış maliyetleri eklendiğinde ortaya çıkan problemler olarak tanımlanabilir. Bu problemde, P-medyan probleminde ortaya konan tesis yeri sayı kısıtı bulunmamaktadır. Bu modeli matematiksel olarak aşağıdaki şekilde gösterebiliriz:

İndis ve Kümeler

i ; aday tesisler ($i=1, \dots, I$)

j ; talep noktaları ($j=1, \dots, J$)

Parametreler

H_i ; i noktasındaki talep miktarı

D_{ij} ; talep noktası i ile aday nokta j arasındaki mesafe

C_j ; j tesis noktasının sabit maliyeti

A_j ; j tesisinin kapasitesi

Karar değişkenleri

x_{ij} ; $\begin{cases} 1; \text{eğer } i \text{ noktasındaki talep isteği } j \text{ tesisinden karşılanıyorsa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

y_j ; $\begin{cases} 1; \text{eğer } j \text{ noktasındaki tesis açılırsa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (x_{ij} D_{ij}) + (c_j y_j) \quad (2.2.15)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.2.16)$$

$$\sum_{i \in I} H_i x_{ij} \leq A_j y_j \quad \forall i \in I \quad (2.2.17)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \geq y_j \quad \forall i \in I \quad (2.2.18)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.2.19)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.2.20)$$

Burada (2.2.15) minimum toplam maliyetle açılacak tesis sayısını belirleyen amaç fonksiyonunu vermektedir. (2.2.16) kısıtı her bir talep noktasının yalnız 1 tesisten

hizmet almasını, (2.2.17) kısıtı i müşterisinin toplam talebinin, i müşterisinin talebini karşılayan j tesisinin toplam kapasitesinden az olmasını, (2.2.18) kısıtı açılacak toplam tesis sayısının toplam müşteri sayısından az olmasını, (2.2.19) ve (2.2.20) kısıtı değişkenlerin alacağı değeri ifade eder.

c. Merkez Problemleri

Merkez problemlerinin en öne çıkan modeli P-merkez problemidir [30]. P-merkez problemi önceden sayısı belli olan P adet tesisten talep bölgesine olan maksimum mesafeyi minimize etmeyi amaçlar. Bu problemler minimax problemi olarakta bilinir [26]. İtfaiye istasyonları, polis merkezleri gibi acil durum hizmeti veren tesislerin yer seçimleri için uygundur [19]. Hakimi tarafından aşağıdaki şekilde matematiksel olarak modellenmiştir [28]:

İndis ve Kümeler

i ; aday tesisler ($i=1, \dots, I$)

j ; talep noktaları ($j=1, \dots, J$)

Parametreler

D_{ij} ; talep noktası i ile aday nokta j arasındaki mesafe

P ; açılacak tesis sayısı

D ; Talep noktası ile en yakın tesis arasındaki maksimum mesafe

Karar değişkenleri

x_{ij} ; $\begin{cases} 1; \text{eğer } i \text{ noktasındaki talep isteği } j \text{ tesisinden karşılanıyorsa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

y_j ; $\begin{cases} 1; \text{eğer } j \text{ noktasındaki tesis açılırsa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

$$\min D \quad (2.2.21)$$

Kısıtlar

$$D \geq \sum_{j \in J} D_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in I \quad (2.2.22)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.2.23)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J, i \neq j \quad (2.2.24)$$

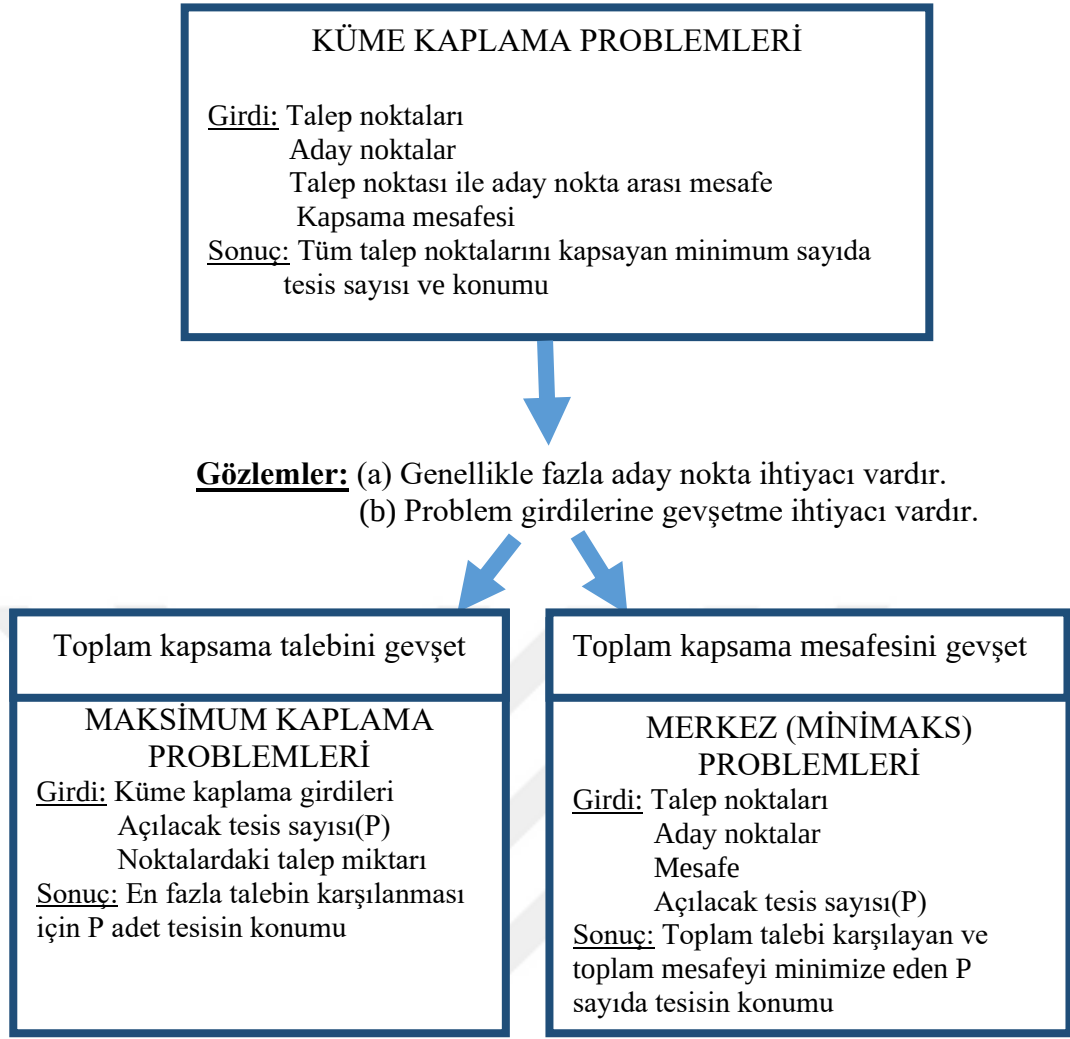
$$\sum_{j \in J} y_j = P \quad \forall j \in J \quad (2.2.25)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.2.26)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.2.27)$$

Burada amaç fonksiyonu (2.2.21), (2.2.22) kısıtı ile birlikte herhangi bir talep noktasıyla, en yakınında bulunan tesis arasındaki mesafeyi minimize etmeyi amaçlar. (2.2.23) kısıtı tüm talep noktalarının isteğinin karşılandığını, (2.2.24) kısıtı talep noktalarının sadece açılan tesislerden hizmet alacağını, (2.2.25) kısıtı sabit sayıda bir tesis açılacağını, (2.2.16) ve (2.2.27) kısıtı değişkenlerin alacağı değeri ifade eder.

Kurulacak tesis sayısı 1'e eşitse buna mutlak merkez problemi denir [28]. Bunun yanında eğer tesis konumları ağın düğümleri ile sınırlıysa buna tepe noktası merkez problemi denir [31]. Kaplama ve merkez problemleri arasındaki ilişkiyi Daskin şu şekilde göstermiştir [31].



Şekil 2.1: Kaplama ve Merkez problemi arasındaki ilişki

Literatürde tesis yeri seçimi ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

Nambier vd. [32] tarafından Malezya’da kauçuk endüstrisinin verimliliği arttırılmaya çalışılırken büyük ölçekli yer tahsisi problemi ele alınmıştır. Problem doğal kauçuk üreten merkezi kauçuk işleme fabrikalarının konumlandırılmasını ve lateksin merkezi kauçuk işleme fabrikalarına taşınmasına ilişkin rotalamayı kapsamaktadır. Kapasite ve zaman kısıtlamalarına bağlı olarak problem ele alınmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Schreuder [33] tarafından Rotterdam şehrinde ihtiyaç duyulan itfaiye istasyonu sayısının belirlenmesi, mevcut lokasyonlara göre ihtiyaç duyulan itfaiye istasyonu sayısı ve güvenlik açısından alternatif lokasyonların oluşturulması üzerine çalışma yapılmıştır. Olası yerlerin belirlenmesinde P-medyan ve P-merkez modelleri

kullanılmıştır. Yerleştirilecek itfaiye istasyonları küme kapsama problemi olarak çözülmüş ve belirlenen süre içinde yangınlara müdahale edebilecek bir organizasyon oluşturulmuştur.

Aygüneş [34] tarafından yapılan çalışmada kırsal bölgede terörle mücadele görevi yapan askeri birliklerin yer seçimi problemi P-medyan, P-merkez, küme kaplama ve maksimum kaplama modelleri ile çözülmüştür.

Aktaş vd. [35] tarafından İstanbul Büyükşehir Belediyesi sınırları içinde itfaiye istasyonu yerleşimine çalışılmıştır. Bu çalışmada, yangın bölgesine 5 dakikalık erişim zamanı ve tam kaplama sağlayacak tesis yerleşim çözümü ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlarla itfaiye tesisinin kurulması durumunda yangına karşı hizmet düzeyinin değişimi incelenmiştir.

Ayöperken ve Ermiş [36] tarafından İHA'lar için en iyi üs konumlarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. En uygun üs yerlerinin belirlenmesi ve bu üs yerlerine uygun konfigürasyondaki İHA'ların atanması matematiksel olarak modellenmiştir.

Ye ve Chuang [37] tarafından Tayvan'da geri dönüşüm tesislerinin verimliliğin artırılması maksadıyla tesis yerlerinin azaltılması ve yeniden konuşlandırılması problemine çalışılmıştır. Aynı zamanda etkili bir rotalama yapılarak toplam ulaşım mesafesinin azaltılması hedeflenmiştir. Küme kaplama ve P-medyan modelleriyle çözüm elde edilmiş ve analizleri yapılmıştır.

Sarıçiçek vd. [38] tarafından Türkiye sınırında keşif ve gözetleme maksadıyla kullanılan İHA'ların üs seçimi ve görev planlaması üzerine çalışma yapılmıştır. Problem kapsamında çok kriterli karar verme yöntemi ELECTRE ile üslerin ve talep noktalarının ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra geliştirilen tek amaçlı matematiksel model çözülerek ana dağıtım üslerinin yerleri tespit edilmiştir.

Kurban ve Can [39] tarafından kaplama mesafeleri farklı olan mini insansız hava araçlarının görev etkinliğini artırmak için maksimum kaplama problemi üzerine çalışılmıştır. Modelde toplam on yedi ayrı senaryo ele alınmış ve her senaryo için GAMS programı ile optimal çözümler elde edilmiştir. Problem parametreleri değiştirilerek elde edilen sonuçların değişimi incelenmiştir.

Şengül ve Gencer [40] tarafından Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerini kapsayacak bir ana üs ve yeterli sayıda ileri üs için tesis yeri seçimi problemi üzerine çalışılmıştır. Bu doğrultuda Coğrafi Bilgi Sisteminden faydalanılmış ve görüş analizleri incelenmiştir. Küme kaplama modeli ile aday üsler belirlenmesi ve karar vericiler tarafından istenen hedefler doğrultusunda; önceliklendirilmiş optimizasyon ve ağırlıklı hedef programlama ile en etkin üs konumları bulunmuştur.

Aydın vd. [41] tarafından İstanbul Maltepe ilçesi için afetlerde kullanılmak üzere lojistik deposu tesis yeri seçimi üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada, küme kaplama ve P-medyan modeli kullanılmıştır. Her iki model için ortaya çıkan optimal çözümler analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

Yılmaz [42] tarafından keşif ve gözetleme faaliyetlerinde kablo güdümlü balonların kullanılması için konuş yerlerinin belirlenmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Kablo güdümlü balonlar ile insansız hava aracı sistemlerinin güney sınır bölgelerinde hibrit şekilde kullanım senaryosu test edilmiştir. Yapılan test sonucunda Türkiye'nin güney sınırlarının coğrafi koşullar sebebiyle insansız hava araçları ile keşif ve gözetlemesinin yapılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir.

Liu vd. [43] tarafından sınır devriyesinde istihbarat, keşif ve gözetleme amacıyla kullanılan İHA'ların üs konumlarını ve uçuş rotalarını belirlemek için sezgisel bir algoritma üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışma da, Guangxi Zhuang özerk bölgesi ile Vietnam sınırı arasında devriye gezilmesi için 6 farklı üs seçimi senaryosu hazırlanmıştır. İHA'ların bazı sabit ve değişken maliyetlerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Chauhan vd. [44] tarafından talep lokasyonu ve drone miktarına göre maksimum kapsama alanına sahip potansiyel drone kalkış lokasyonlarının seçilmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Araştırmada kısıt olarak drone pil süresi kullanılmıştır.

Sarikaya vd. [45] tarafından ilçe sınırları içinde 3 farklı tipte jandarma karakolunun maksimum kapsama modeli ile tesis yeri seçimi problemi incelenmiştir. Kapsama mesafesi, bölgesel özellikler, meydana gelen olay sayısı gibi kısıtlar eklenerek aday karakol noktalarının yeri tespit edilmiştir. Parametre değişimleri ile çıkan sonuçlar analiz edilmiştir.

Kara ve Yurdakul [46] tarafından Kocaeli ili sınırları içerisinde yapılması planlanan metro projesinde optimum istasyon ve lokasyonların tespit edilmesi için küme kapsama ve P-medyan modelleri oluşturulmuştur.

Park vd. [47] tarafından acil sağlık hizmetlerinde kullanılan insansız hava araçlarına ilişkin konum ve tahsis sorunu, Mitropoulos vd. [48] tarafından hastane yer seçimi ve Xavier vd. [49] tarafından yüksek öğrenim tesislerinin yer seçimi üzerine çalışma yapılmıştır.

He vd. [50] tarafından Hong Kong gibi yüksek nüfus yoğunluğu bulunan şehirlerde şarj altyapısının geliştirilmesi için tesis yeri seçim modeli oluşturulmuştur. Potansiyel şarj istasyonlarının yeri maliyet, talep ve servis çapı göz önüne alınarak seçilmiştir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda potansiyel şarj istasyonlarının yeri ile ilgili tavsiyelerde bulunulmuştur.

Braßel vd. [51] tarafından İHA hangarlarının tesis yeri için optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Beş farklı kısıtlama senaryosu ile en kısa görev yörüngelerinin bulunması için A* algoritması kullanılmıştır. Talep noktalarına verilen hizmet süresini en aza indirerek erişilebilirliği en üst düzeye çıkarmak amaçlanmıştır.

Ren vd. [52] tarafından kara ambulansları yerine tıbbi dronelerin kullanılarak hastane ortamından uzak bölgelerde kalp durması vakalarına daha hızlı bir şekilde reaksiyon verilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu kapsamda Tianjin (Jinnan) bölgesinde kapsama alanı, batarya boşalma süresi, görev süresi ve maliyetler göz önüne alınarak oluşturulan model çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile tıbbi hizmetlere erişimin daha hızlı bir şekilde yapılması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 3

ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON PROBLEMİ

3.1 Çok Amaçlı Optimizasyon Probleminin Tanımı ve Tarihi Gelişimi

Tek amaçlı optimizasyon modelleri kısıtlar dahilinde tek bir amacı gerçekleştirmek için oluşturulan matematiksel modellerdir. Ancak günümüz dünyasında farklı amaçların optimal hale getirilmesi için çok amaçlı optimizasyon daha çok önem kazanmaktadır. Bir başka deyişle günümüz dünyasının problemlerini çözebilmek için çok amaçlı optimizasyon modellerine ihtiyaç vardır. Aslında, birden fazla amaç içerisinde tek birini seçip çözüm üretmek gerçekçi bir yaklaşım olmadığı için yöneylem araştırmalarında çok amaçlı optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır [53]. Çok amaçlı problemler genellikle çeşitli kısıtlamalar altında çözülmeye çalışılır. Çözüm, bir hedefi artırırken diğerini azaltabilir ya da dengelemeye çalışabilir. Bu şekilde karmaşık ve gerçek dünya problemlerine daha etkili çözümler bulunmaya çalışılır. Bu tür problemlerin çözümünde kullanılmak üzere Stadler'e [54] göre Edgeworth-Pareto yaklaşımını uygulamak gerekir. Pareto optimal çözümlerinin hedefi problemi oluşturan amaçlar arasında optimal dengeyi sağlayan çözümler kümesi olarak tanımlanabilir. Bu çoklu optimizasyon problemleri için temel ilke olarak kabul edilmektedir.

Edgeworth [55], ilk kez birden fazla amacı içeren optimizasyonu açıklayan akademisyen olarak karşımıza çıkmaktadır. Yaptığı çalışmada P ve π olarak iki tüketiciyi ele almıştır. Bu kapsamda elde edilen (x,y) noktasından ileri adım atıldığında P ve π noktaları birlikte artış göstermeyecek ve biri artış gösterirken diğeri düşüş gösterecek şekilde problemini tanımlamıştır.

Sosyal bilimlerde, Neuman [56] 1943 yılında oyun teorisi üzerinden çoklu optimizasyonu sunmuştur. İki oyunculu oyunlar üzerindeki çoklu stratejileri ve çok

amaçlı optimizasyonun kullanımının gelişmesini sağlamıştır [57]. Stadler [54] ve Steuer [58], çok amaçlı optimizasyonun teorik yapısını, çözüm yöntemlerini ve uygulamalarını içeren çalışmalarıyla literatüre katkı yapmıştır.

Günümüzde, çok amaçlı optimizasyon, gerçek dünya problemlerine uygun çözümler bulma konusunda yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Bu optimizasyon alanı, çeşitli sektörlerdeki karmaşık sistemlerin etkin yönetimi için sürekli olarak gelişmekte ve yeni yöntemlerle zenginleşmektedir.

Çok amaçlı optimizasyonun temel amaçları şunlardır:

- Çeşitli Kısıtlamaları Karşılama: Optimizasyon problemleri genellikle çeşitli kısıtlamalara tabidir. Çok amaçlı optimizasyon, bu kısıtlamalar altında çeşitli hedefleri optimize etme yeteneğini içermektedir.
- Karmaşık Sistemlerde Verimliliği Artırmak: Çok amaçlı optimizasyon, karmaşık sistemlerde verimliliği artırmayı hedeflemektedir.
- Çeşitli Uygulama Alanlarına Adaptasyon: Bu optimizasyon türü, mühendislik, ekonomi, finans, lojistik gibi birçok farklı uygulama alanına adapte edilebilmektedir.
- Karar Vericilere Alternatifler Sunmak: Çok amaçlı optimizasyon, karar vericilere çeşitli alternatif çözümler sunarak, en uygun kararı vermelerine yardımcı olmaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için genel adımlar şu şekildedir:

I. Hedefleri Belirleme: İlk adım, optimize edilmesi istenilen hedefleri belirlemektir. Her hedefi net olarak tanımlamak ve bu hedefleri optimize etmeye çalışmak bu aşamada önemlidir.

II. Problemi Modelleme: Problemi matematiksel bir model oluşturarak formüle etmek gereklidir. Bu model, çeşitli hedefler ve kısıtlamalar altında problemi tanımlamaktadır.

III. Çözüm Uzayını Tanımlama: Değişkenlerin ve parametrelerin hangi aralıklarda değer alabileceğini tanımlamak gereklidir. Bu adım, matematiksel modelin çalışma alanını belirlemektedir.

IV. Optimizasyon Algoritmalarını Seçme: Çok amaçlı optimizasyon problemleri genellikle karmaşık ve çok boyutludur. Bu nedenle, çeşitli optimizasyon algoritmalarını değerlendirmek ve en uygun olanını seçmek önemlidir.

V. Popülasyon Oluşturma: Bazı optimizasyon algoritmalarında, bir başlangıç popülasyonu oluşturmak gereklidir. Bu popülasyon, çözüm uzayındaki potansiyel çözümleri temsil etmektedir.

VI. Çözüm Uzayında Araştırma ve Seçim: Optimizasyon algoritması, çözüm uzayında arama yapmakta ve her adımda yeni çözümler ortaya çıkarmaktadır.

VII. Optimal Çözümleri Analiz Etme: Elde edilen sonuçları analiz etmek önemlidir. Çözümler arasında denge kurmak ve karar vericiye seçenekler sunmak gereklidir.

VIII. Sonuçları Yorumlama ve Uygulama: Elde edilen çözümleri yorumlamak, bu çözümlerin gerçek dünya uygulamalarına nasıl entegre edilebileceğini değerlendirmek ve karar vericiye anlamlı bilgiler sunmak önemlidir.

Bu adımlar, çok amaçlı optimizasyon problemlerini ele almak için genel bir çerçeveyi oluşturur. Her adım, problem özelinde uygun bir şekilde uyarlanmalıdır.

3.2 Çok Amaçlı Optimizasyon Problemi Çözüm Yaklaşımları

Çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için literatür incelendiğinde farklı yaklaşımların olduğu görülmektedir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, birden fazla amaç fonksiyonu, varsa kısıtlar ve değişken sınırları da dikkate alınarak, birlikte çözüm aranır. Bu çözümü gerçekleştirebilmek için kullanılan çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları genel olarak Sayısallaştırma ve Pareto yaklaşımıdır [59]. Sayısallaştırma yaklaşımında optimize edilmek istenen amaç fonksiyonları çeşitli yöntemlerle önceliklendirilerek tek amaçlı bir modele dönüştürülmektedir. Bu modelin çözümü ile tek bir çözüm noktasına ulaşılmaktadır. Sayısallaştırma yaklaşımında; Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi, Uzlaşık Programlama, Çok Nitelikli Fayda Analizi, Hedef Programlama, Önceliklendirilmiş (Preemptive) Optimizasyon ve Bulanık Mantık en çok bilinen yöntemlerdir [60]. Pareto çözüm yaklaşımında ise tek bir çözüm değeri bulmak yerine optimal çözümlerin kümesi vardır. Karar verici Pareto sınırları içinde bulunan optimal çözüm kümeleri içinden tercihte bulunur. Pareto yaklaşımında; Pareto Filtreleme, Normal Sınır Kesişimi, Epsilon Kısıt, Çok Amaçlı

Genetik Algoritmalar kullanılan yöntemler olarak sayılabilir [60]. Bu çalışma kapsamında geliştirilen çok amaçlı modellere etkin çözümler elde etmek için önceliklendirilmiş optimizasyon, ağırlıklandırılmış toplam yaklaşımı ve ϵ kısıt yöntemi kullanılacaktır.

- Önceliklendirilmiş Optimizasyon ve Ağırlıklandırılmış Toplam Yaklaşımı (Preemptive Optimization and Weight-Sum Approach): Önceliklendirilmiş optimizasyon yaklaşımında amaç veya hedefler, en önemlisinden başlanarak birer birer optimize edilir. En önemli hedefteki optimalite korunarak ikinci en önemli hedef optimize edilir ve bu böyle devam eder [61]. Bu şekilde çok amaçlı modeller klasik tek amaçlı modeller haline gelir. Ağırlıklandırılmış Toplam yönteminde ise karar verici tarafından amaçlara katsayılar verilerek önceliklendirme yapılır. Ardından amaç fonksiyonları verilen katsayılar ile çarpılır ve toplanır. Son olarak yeni oluşan fonksiyonun minimumu bulunarak çözüme ulaşılır. Michalewicz ve Schoenauer [62], Ishibuchi ve Murata [63], Murata ve Ishibuchi [64] bu yaklaşımı kullanarak dikkate değer çalışmalar yapmıştır.

- ϵ kısıt yöntemi: Epsilon kısıt yöntemi ilk kez Haimes vd. [65] tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemde amaç fonksiyonlarından biri optimizasyon için seçilir. Diğer amaç fonksiyonları ise kısıt olarak kullanılır. Bu şekilde çok amaçlı optimizasyon problemlerinde çatışan amaç fonksiyonlarının uyumu kontrol edilebilir. Matematiksel modeli aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\min f_i(X) \quad (3.2.1)$$

$$f_j(X) \leq \epsilon_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, k; \quad \forall j \neq i \quad (3.2.2)$$

$$X \in S \quad (3.2.3)$$

ϵ kısıt yönteminde, optimizasyon için seçilen amaç fonksiyonuna (3.2.1) eklenen kısıtlar (3.2.2, 3.2.3) ile (ϵ_j) değerinin değiştirilmesi sonucu optimal çözüm değerleri pareto sınırı üzerinde farklı değerler almaktadır. Elde edilen sonuçlar, $f_i = \epsilon_j$ değerine ulaşılan kadar pareto çözüm kümesi içinde dağılım gösterecektir.

Literatürde çok amaçlı optimizasyon problemleri ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

Mardle vd. [66] tarafından balıkçılığın biyoekonomik alanda çoklu optimizasyonu üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada kuzey denizi balıkçılığında istihdamın sürmesi, nesli tükenen türlerin avlanmasının azaltılması ve gelirin arttırılması için çok amaçlı bir model oluşturularak sonuçlar analiz edilmiştir.

Tapia vd. [67] tarafından çok amaçlı evrimsel algoritmaların ekonomi ve finans alanında uygulamalarının sınıflandırılması yapılmıştır. Yapılan sınıflandırma çalışmasında 5 uygulama alanında yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmanın son bölümünde açığa çıkmamış ve araştırılması henüz yapılmamış 4 farklı alan potansiyel yol olarak gösterilmiştir.

Marler vd. [68] tarafından çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kullanılan bir yöntem olan ağırlıklandırılmış toplam tekniği kullanılarak çalışma yapılmıştır.

Gunasekara vd. [69] tarafından politika, yönetim ve pazarlama gibi alanlarda kilit öneme sahip kişilerin belirlenmesinde çok amaçlı bir algoritma çalışması yapılmıştır. Bu çalışma ile sosyal hayatın içerisinde örnek olabilecek anahtar kişilerin belirlenmesine yönelik matematiksel model oluşturulmuştur.

Karasakal vd. [70] tarafından hava savunma sistemlerine yönelik olarak güdümlü mermilerin angajman durumunda kullanımları ve mühimmatların hedeflere tahsis planlarıyla ilgili çalışma yapılmıştır. Oluşabilecek durumlar modellenerek ϵ kısıt yöntemi ile etkin çözümler oluşturulmuştur.

Gunantara [71] tarafından çok amaçlı optimizasyonun çözümünde kullanılan metotlar ve uygulamaları hakkında çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde temelde 2 yöntemin kullanıldığı anlatılmıştır. Bu yöntemlerden ilkinin çok amaçlı modeli tek amaçlı modele çevirmeye amaçlayan skaler yöntemler olarak anlatmıştır. Diğer çözüm yöntemini ise pareto yöntemler başlığı altında anlatmıştır.

Suárez [72] tarafından envanter yönlendirmede ağırlıklandırılmış toplam yöntemi kullanılarak lojistik maliyetleri ve müşteri hizmet düzeyini optimize edecek matematiksel model üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışma ile bozulabilir ürünlerin envanter yönetimi ve rotalamasına ilişkin literatürdeki problemlere katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Pereira vd. [73] tarafından makine mühendisliğinde yapılan çalışmalar üzerine çok amaçlı optimizasyon kullanılarak çalışma yapılmıştır. Tasarım optimizasyonundaki sorunlar, imalattaki sorunlar ve yapısının durumunun incelenmesinde oluşan sorunlar çalışma içinde incelenmiştir.

Karataş vd. [74] iki amaçlı bir model geliştirerek İHA'ların gözetleme etkinliğini ve gözetleme sürecinde maruz kaldıkları tehditlere optimize etmeyi amaçlayan çok amaçlı bir model üzerine çalışmıştır.

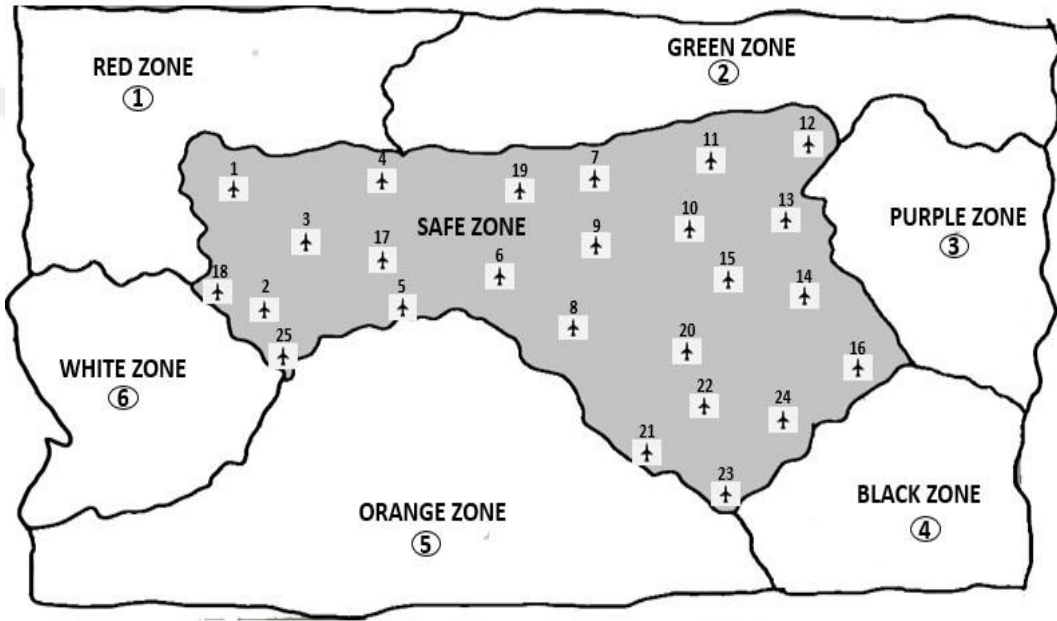
Shehedah vd. [75] hafriyat faaliyetlerinde kullanılacak ağır makinelerin (kamyon ve ekskavator gibi) seçimini ve kapasitesini minimum zaman ve maliyetle optimize etmek için çok amaçlı bir matematiksel model oluşturmuştur.

Son olarak, Alsaba vd. [76] yenilenebilir enerji kaynaklarının değişkenliğini minimum seviyeye indirmek ve güç üretimini maksimum düzeye çıkarmak için rüzgar türbinlerinin ve güneş fotovoltaiklerinin (PV) en uygun konumlarını optimize eden çok amaçlı bir model oluşturmuştur.

BÖLÜM 4

MATEMATİKSEL MODELLERİN GELİŞTİRİLMESİ

4.1 Problemin Tanımı ve Kısıtların Belirlenmesi



Şekil 4.1: İlgi alanında bulunan örnek bölgeler ve aday meydanlar

Şekil 4.1’de bulunan ilgi alanı içinde güvenli ve riskli olarak belirlenen temel iki bölge mevcuttur. Riskli bölge kendi içinde altıya (Red, Green, Purple, Black, Orange, White) ayrılmıştır. Güvenli bölge içinde ise yirmi beş adet aday meydan bulunmaktadır. Güvenli bölge, riskli bölgeler ve aday meydanlar Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Güvenli bölge içinde bulunun her bir aday meydanın İHA kullanımına yönelik kapasiteleri ve eksiklikleri bilinmektedir. Bazı meydanlarda insansız hava araçlarının konuşlandırılması için gerekli hangarlar ve CPA (Cover protected area) çadırları bulunmaktadır. Sivil ve/veya askeri amaçlı kullanılan İHA'ların her meydandaki kurulum maliyetleri farklılık göstermektedir ve bu maliyetler bilinmektedir. Güvenli bölge içerisinde yer alan meydanlar farklı meteorolojik koşullara sahiptir. Her bir

meydan için uçuşa elverişli olmayan günlerin sayısı da bilinmektedir. Amaç, Güvenli bölgeden riskli bölgelere operasyonel düzeyde insansız hava aracı uçuş görevleri için meydan konumlarını ve meydanlardan görev bölgelerine yapılacak uçuş görevlerini optimize etmektir.

4.1.1 Aday Meydanlardan Talep Bölgelerine Mesafenin Belirlenmesi

Her bir aday meydandan, riskli bölge olarak belirlenen talep bölgelerine olan mesafe kilometre olarak hesaplanmaktadır. Ölçüm yapılırken aday meydanların bulunduğu yerden talep bölgelerinin merkez noktası olarak değerlendirilen noktaya olan kuş uçuşu mesafe dikkate alınmaktadır.

4.1.2 Yıllık Uçuş Görevi İstek Sayılarının Belirlenmesi

Riskli bölgelere uçuş görevleri öncelikle sınır uzunluğuna göre belirlenmekte ve güvenli bölgenin güvenlik ihtiyacını karşılayacak şekilde ortaya çıkmaktadır. Güvenlik ihtiyacına bağlı olarak her riskli bölge farklı sayıda görev gerektirmektedir.

4.1.3 Meydanların Yıllık Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısının Belirlenmesi

İHA'lar da diğer hava araçları gibi meteorolojik olaylardan etkilenmektedir. Gök gürültülü sağanak yağış, rüzgar koşulları ve yoğun bulutluluk genel olarak İHA'lar için uçuşa elverişsiz koşullardır. Aday meydanların meteorolojik raporları gün gün bellidir. Pilotlar tarafından hava aracı limitlerine göre uçuş görevinin yapılıp yapılmayacağına karar verilir. Yıllık uçuşa elverişli olmayan ortalama gün sayısı geçmiş yıllardan elde edilen verilere göre bilinmektedir.

4.1.4 Meydanların Sabit Maliyeti ve Uçuş Maliyetinin Belirlenmesi

Aday bir meydanın işletilebilmesi için bazı sabit ve değişken maliyetler gereklidir. İHA'ların meydanlarda konuşlandırılmasında kullanılacak hangarlar, CPA çadırları ve diğer yaşam alanları sabit maliyetleri oluşturmaktadır. Hava aracının mesafeye göre tükettiği yakıt ise değişken maliyet olarak kullanılmıştır.

4.1.5 Varsayımlar

- Hava aracı tipinin aynı olduğu varsayılmaktadır.
- Hava aracının uçuş irtifasının sabit olduğu varsayılmaktadır.

- Hava aracının hızının sabit ve sürekli olduğu varsayılmaktadır. (270 km/h)
- Hava aracının veri linklerinden bir tanesinin uydu iletişimi olduğu varsayılmaktadır.
- Hava aracının kalkış yaptığı meydana iniş yaptığı varsayılmaktadır.
- Riskli bölgelerin hava durumunun uçuşa elverişli olduğu kabul edilmektedir.
- Hava aracının uçuş yapması için gerekli olan uçuş ekibi, yer kontrol istasyonu, veri linkleri, faydalı yükler ve destek ekipmanlarının uçuş için yeterli sayıda bulunduğu kabul edilmektedir.
- Hava aracının JP-8 yakıtı kullandığı ve JP-8 yakıtının litresinin 0.56 dolar olduğu varsayılmaktadır.
- Hava aracının saatte ortalama 200 litre yakıt harcadığı varsayılmaktadır.

4.2 Meydan Yer Seçimi Optimizasyonu İçin Tek Amaçlı Matematiksel Modelleme

4.2.1 İndis, Küme, Parametre ve Karar Değişkenlerinin Tanımlanması

İndis ve Kümeler

i ; aday meydanlar ($i=1, \dots, I$)

j ; talep bölgeleri ($j=1, \dots, J$)

Parametreler

D_j ; j bölgesindeki yıllık görev sayısı talebi

$R_{i,j}$; i meydanından j talep bölgesine uzaklık (km)

F_i ; i meydanının sabit maliyeti (Dolar)

C ; operatif seviye İHA'nın km'de tükettiği jp-8 yakıtının maliyeti (Dolar)

UAD_i ; i meydanındaki yıllık uçuşa elverişsiz gün sayısı

L_i ; i meydanından yapılacak yıllık minimum görev sayısı

N_i ; i meydanından yapılacak yıllık maksimum görev sayısı

$$N_i = (365 - UAD_i) * 3 \quad (\text{tüm } i \text{ ler için } = 1, \dots, I)$$

Karar değişkenleri

$$y_i ; \begin{cases} 1; \text{eğer aday } i \text{ meydanı açılmışsa} \\ 0; \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$x_{i,j}$: i meydanından j talep bölgesine yapılan yıllık görev sayısı

4.2.2 Meydan Sayısını Minimize Eden Matematiksel Model (Model-1)

Aday meydanlardan riskli bölgelere talep edilen uçuş görevlerinde minimum sayıda meydan seçilmesini amaçlayan matematiksel model (Model-1) aşağıda sunulmuştur.

Model-1:

$$\min \sum_{i=1}^I y_i \quad (4.2.2.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^I x_{i,j} \geq D_j \quad (\text{tüm } j \text{ ler için } = 1, \dots, J) \quad (4.2.2.2)$$

$$L_i y_i \leq \sum_{j=1}^J x_{i,j} \quad (\text{tüm } i \text{ ler için } = 1, \dots, I) \quad (4.2.2.3)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} \leq N_i y_i \quad (\text{tüm } i \text{ ler için } = 1, \dots, I) \quad (4.2.2.4)$$

$$y_i = 0 \text{ yada } 1 \quad (\text{tüm } i \text{ ler için } = 1, \dots, I) \quad (4.2.2.5)$$

$$x_{i,j} \geq 0 \quad (4.2.2.6)$$

Model-1’de, 4.2.2.1 meydan sayısını minimize etmeyi amaçlayan fonksiyonunu, 4.2.2.2 kısıtı i meydanından j talep bölgesine planlanan yıllık toplam görev sayısının, j riskli bölgesi tarafından talep edilen yıllık görev sayısına eşit veya fazla olmasını, 4.2.2.3 kısıtı açılacak olan i meydanından j talep bölgesine yıllık görev sayısının, en az i meydanın yıllık minimum görev sayısına eşit olmasını, 4.2.2.4 kısıtı açılacak olan

i meydanından j talep bölgesine görev sayısının, i meydanındaki yıllık maksimum görev sayısına eşit veya küçük olmasını, 4.2.2.5 kısıtı aday meydan seçilecekse 1 seçilmeyecekse 0 değerini almasını, 4.2.2.6 kısıtı i meydanından j talep bölgesine yıllık görev sayısının en az sıfır olmasını ifade eder.

4.2.3 Mesafeyi Minimize Eden Matematiksel Model (Model-2)

Aday meydanlardan riskli bölgelere talep edilen uçuş görevlerinde mesafeyi minimize etmeyi amaçlayan matematiksel model (Model-2) sunulmuştur.

Model-2:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J R_{i,j} x_{i,j} \quad (4.2.3.1)$$

Kısıtlar

(4.2.2.2), (4.2.2.3), (4.2.2.4), (4.2.2.5), (4.2.2.6)

Model-2’de, 4.2.3.1 mesafeyi minimize etmeyi amaçlayan fonksiyonu ifade eder. Model-1’de belirtilen kısıtlar kullanılmıştır.

4.2.4 Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısını Minimize Eden Matematiksel Model (Model-3)

Aday meydanlardan riskli bölgelere talep edilen uçuş görevlerinde uçuşa elverişsiz gün sayısını minimize etmeyi amaçlayan matematiksel model (Model-3) aşağıda gösterilmiştir.

Model-3:

$$\min \sum_{i=1}^I UAD_i y_i \quad (4.2.4.1)$$

Kısıtlar

(4.2.2.2), (4.2.2.3), (4.2.2.4), (4.2.2.5), (4.2.2.6)

Model-3’te, 4.2.4.1 uçuşa elverişsiz gün sayısını minimize etmeyi amaçlayan fonksiyonu ifade eder. Model-1’de belirtilen kısıtlar kullanılmıştır.

4.2.5 Maliyeti Minimize Eden Matematiksel Model (Model-4)

Aday meydanlardan riskli bölgelere talep edilen uçuş görevlerinde toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlayan matematiksel model (Model-4) aşağıda sunulmuştur.

Model-4:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C R_{i,j} x_{i,j} + \sum_{i=1}^I F_i y_i \quad (4.2.5.1)$$

Kısıtlar

(4.2.2.2), (4.2.2.3), (4.2.2.4), (4.2.2.5), (4.2.2.6)

Bu modelde, 4.2.5.1 toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlayan fonksiyonu ifade eder. Model-1’de belirtilen kısıtlar kullanılmıştır.

4.3 Meydan Yer Seçimi Optimizasyonu İçin Çok Amaçlı Bir Yaklaşım İle Matematiksel Modelleme

Tek amaçlı fonksiyonlara sahip modeller Bölüm 4.2’de verilmiştir. Problem ile ilgili amaçları birlikte optimize etmek için oluşturulan çok amaçlı model aşağıda sunulmuştur.

4.3.1 Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli (Model-5)

Model-5:

$$\min \sum_{i=1}^I y_i \quad (4.2.2.1)$$

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J R_{i,j} x_{i,j} \quad (4.2.3.1)$$

$$\min \sum_{i=1}^I UAD_i y_i \quad (4.2.4.1)$$

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C R_{i,j} x_{i,j} + \sum_{i=1}^I F_i y_i \quad (4.2.5.1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^I x_{i,j} \geq D_j \quad (\text{tüm } j \text{ ler için } = 1, \dots, J) \quad (4.2.2.2)$$

$$L_i y_i \leq \sum_{j=1}^J x_{i,j} \quad (\text{tüm } i \text{ ler için } = 1, \dots, I) \quad (4.2.2.3)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} \leq N_i y_i \quad (\text{tüm } i \text{ ler için } = 1, \dots, I) \quad (4.2.2.4)$$

$$y_i = 0 \text{ yada } 1 \quad (\text{tüm } i \text{ ler için } = 1, \dots, I) \quad (4.2.2.5)$$

$$x_{i,j} \geq 0 \quad (4.2.2.6)$$

Model-5, önceki modellerle aynı kısıt setini kullanarak, dört amaç fonksiyonunun tamamını, (açılan toplam üs sayısını 4.2.2.1, toplam uçuş mesafesini 4.2.3.1, toplam yıllık uçuşa elverişli olmayan gün sayısını 4.2.4.1 ve toplam maliyetleri 4.2.5.1) en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Burada görüldüğü gibi birbirinden farklı 4 amaç bulunmaktadır. Bu amaçları tek bir amaç fonksiyonu olarak ifade etmek mümkün değildir. Amaçlardan birincisi meydan sayısını, ikincisi toplam mesafeyi, üçüncüsü toplam uçuşa elverişli olmayan gün sayısını ve dördüncüsü toplam maliyeti ifade etmektedir. Bütün amaç fonksiyonlarının birimleri farklıdır ve biri diğeri cinsinden ifade edilemez. Örneğin uçuşa elverişli olmayan 1 günün gerçek hayatta ne kadara mal olacağı kestirilemez. Çünkü burada maliyetten çok bir görevin yapılıp yapılamaması durumu söz konusudur.

4.3.2 Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi ile Çözüm Yaklaşımı (Model-6)

Ağırlıklandırılmış toplam yaklaşımında amaçlara önem sırasına göre katsayı vererek çözüm elde edilmiştir. Bu kapsamda meydan seçimi optimizasyonunda öncelik sıramız sırasıyla toplam mesafeyi, toplam uçuşa elverişsiz gün sayısını, toplam maliyeti ve açılacak meydan sayısını minimize etmektir. Bu önem sırasına göre amaç fonksiyonlarımız aşağıdaki göreceli olarak birbirinden çok büyük katsayılar ile çarpılarak çözülmüştür.

P1=100.000.000

P2=1.000.000

P3=1000

P4=1

Model-6:

$$\begin{aligned} \min P1 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J R_{i,j} x_{i,j} + P2 \sum_{i=1}^I UAD_i y_i \\ + P3 \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C R_{i,j} x_{i,j} + \sum_{i=1}^I F_i y_i \right) + P4 \sum_{i=1}^I y_i \end{aligned} \quad (4.3.2.1)$$

Kısıtlar

(4.2.2.2), (4.2.2.3), (4.2.2.4), (4.2.2.5), (4.2.2.6)

4.3.3 Önceliklendirilmiş Optimizasyon ile Çözüm Yaklaşımı (Model-5 Algoritma-1,2,3,4)

Önceliklendirilmiş optimizasyon yaklaşımı ile çözüm için önceliklendirme sırasına göre modelleri ardışık olarak çözüp sonuca ulaşabiliriz. 4 farklı model ve amaç fonksiyonu olduğundan karar verici tarafından 24 farklı önceliklendirme yapılması mümkündür. Burada önceliklendirmenin karar verici tarafından mantıklı bir esasa dayalı olarak yapıldığı varsayılmaktadır. Bu kapsamda aşağıda sunulan 4 farklı önceliklendirme tipi gerçeğe en uygun örnekler olarak verilmiştir.

Önceliklendirmenin sırası ile Model-1, Model-2, Model-3, Model-4 olduğu kabul edilerek aşağıda sunulan Algoritma-1 ile etkin bir çözüm bulunabilir.

Algoritma-1 (Öncelik Sırası = Meydan Sayısı→Mesafe→Uçuşa Elverişsiz Gün→Maliyet):

Model-1'i çöz

$z_1^* = \text{Model 1'in optimal } Z \text{ değeri}$

Model-2'ye aşağıdaki yeni kısıtları ekle

$$\text{Toplam Meydan Sayısı} \leq z_1^*$$

Model-2'yi çöz

$$z_2^* = \text{Model 2'nin optimal } Z \text{ değeri}$$

Model-3'e aşağıdaki yeni kısıtı ekle

$$\text{Toplam Meydan Sayısı} \leq z_1^*$$

$$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$$

Model-3'ü çöz

$$z_3^* = \text{Model 3'ün optimal } Z \text{ değeri}$$

Model-4'e aşağıdaki yeni kısıtı ekle

$$\text{Toplam Meydan Sayısı} \leq z_1^*$$

$$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$$

$$\text{Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı} \leq z_3^*$$

Model-4'ü çöz

$$z_4^* = \text{Model 4'ün optimal } Z \text{ değeri}$$

$$x^* = \text{Model 4'ün optimal } x \text{ değerleri}$$

$$y^* = \text{Model 4'ün optimal } y \text{ değerleri}$$

Önceliklendirmenin sırası ile Model-2, Model-3, Model-4, Model-1 olduğunu kabul ederek aşağıda sunulan Algoritma-2 kullanılarak etkin bir çözüm bulunabilir.

Algoritma-2 (Öncelik Sırası = Mesafe → Uçuşa Elverişsiz Gün → Maliyet → Meydan Sayısı):

Model-2'yi çöz

$$z_2^* = \text{Model 2'nin optimal } Z \text{ değeri}$$

Model-3'e aşağıdaki yeni kısıtı ekle

$$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$$

Model-3'ü çöz

$z_3^* = \text{Model 3'ün optimal } Z \text{ değeri}$

Model-4'e aşağıdaki yeni kısıtları ekle

$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$

$\text{Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı} \leq z_3^*$

Model-4'ü çöz

$z_4^* = \text{Model 4'ün optimal } Z \text{ değeri}$

Model-1'e aşağıdaki yeni kısıtları ekle

$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$

$\text{Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı} \leq z_3^*$

$\text{Toplam Maliyet} \leq z_4^*$

Model-1'i çöz

$z_1^* = \text{Model 1'in optimal } Z \text{ değeri}$

$x^* = \text{Model 1'in optimal } x \text{ değerleri}$

$y^* = \text{Model 1'in optimal } y \text{ değerleri}$

Önceliklendirmenin sırası ile Model-3, Model-2, Model-4, Model-1 olduğunu kabul ederek aşağıda sunulan Algoritma-3 kullanılarak etkin bir çözüm bulunabilir.

Algoritma-3 (Öncelik Sırası = Uçuşa Elverişsiz Gün → Mesafe → Maliyet → Meydan Sayısı):

Model-3'ü çöz

$z_3^* = \text{Model 3'ün optimal } Z \text{ değeri}$

Model-2'ye aşağıdaki yeni kısıtları ekle

$\text{Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı} \leq z_3^*$

Model-2'yi çöz

$z_2^* = \text{Model 2'nin optimal } Z \text{ değeri}$

Model-4'e aşağıdaki yeni kısıtı ekle

$$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$$

$$\text{Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı} \leq z_3^*$$

Model-4'ü çöz

$$z_4^* = \text{Model 4'ün optimal Z değeri}$$

Model-1'e aşağıdaki yeni kısıtları ekle

$$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$$

$$\text{Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı} \leq z_3^*$$

$$\text{Toplam Maliyet} \leq z_4^*$$

Model-1'i çöz

$$z_1^* = \text{Model 1'in optimal Z değeri}$$

$$x^* = \text{Model 1'in optimal } x \text{ değerleri}$$

$$y^* = \text{Model 1'in optimal } y \text{ değerleri}$$

Önceliklendirmenin sırası ile Model-4, Model-2, Model-3, Model-1 olduğunu kabul ederek aşağıda sunulan Algoritma-4 kullanılarak etkin bir çözüm bulunabilir.

Algoritma-4 (Öncelik Sırası = Maliyet → Mesafe → Uçuşa Elverişsiz Gün → Meydan Sayısı):

Model-4'ü çöz

$$z_4^* = \text{Model 4'ün optimal Z değeri}$$

Model-2'ye aşağıdaki yeni kısıtı ekle

$$\text{Toplam Maliyet} \leq z_4^*$$

Model-2'yi çöz

$$z_2^* = \text{Model 2'nin optimal Z değeri}$$

Model-3'e aşağıdaki yeni kısıtı ekle

$$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$$

$$\text{Toplam Maliyet} \leq z_4^*$$

Model-3'ü çöz

$$z_3^* = \text{Model 3'ün optimal Z değeri}$$

Model-1'e aşağıdaki yeni kısıtları ekle

$$\text{Toplam Uçuş Mesafesi} \leq z_2^*$$

$$\text{Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı} \leq z_3^*$$

$$\text{Toplam Maliyet} \leq z_4^*$$

Model-1'i çöz

$$z_1^* = \text{Model 1'in optimal Z değeri}$$

$$x^* = \text{Model 1'in optimal } x \text{ değerleri}$$

$$y^* = \text{Model 1'in optimal } y \text{ değerleri}$$

4.3.4 Epsilon Kısıt Yöntemi ile Çözüm Yaklaşımı

Epsilon kısıt yöntemiyle birbiriyle çelişki içinde bulunan amaç fonksiyonlarını tespit ederek pareto optimal çözüm kümesi bulunmaktadır. Ele aldığımız problemde elde edilen çözümler sonucunda toplam mesafe ile toplam uçuşa elverişsiz gün sayısının birbiriyle çelişki içinde bulunduğu görülmektedir. Bu yöntemle, mesafeyi minimize eden amaç fonksiyonun pareto çözüm kümesi toplam uçuşa elverişsiz gün sayısının değiştirilmesi ve diğer iki amaç fonksiyonun kısıt olarak eklenmesiyle elde edilmiştir.

Ele alınan problemde bir diğer çelişkinin toplam uçuşa elverişsiz gün sayısı ile toplam maliyet arasında olduğu görülmektedir. Bu kapsamda epsilon kısıt yöntemi kullanılarak toplam maliyeti minimize eden amaç fonksiyonun pareto çözüm kümesi toplam uçuşa elverişsiz gün sayısı değiştirilmesi ve diğer iki amaç fonksiyonun kısıt olarak eklenmesiyle elde edilmiştir.

Her iki pareto optimal çözüm kümesinin bulunmasında toplam uçuşa elverişsiz gün sayısının en iyi değeri öncelikle kullanılmış, bu değer ortalama 25 birimlik artışlar ile değiştirilmiş, bu şekilde mesafe ve maliyet üzerindeki değişim gözlemlenerek etkin çözümler elde edilmiştir.



BÖLÜM 5

UYGULAMA VE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN ANALİZİ

Oluşturulan jenerik senaryoda güvenli bölge içinde 25 adet aday meydan ve toplamda 6 adet riskli bölge vardır. Güvenli bölgeden riskli bölgelere yapılacak uçuş görevleri için meydan seçimini optimize eden tek amaçlı ve çok amaçlı modellerin uygulaması yapılarak, elde edilen sonuçlar analiz edilecektir. Bu senaryo için gerekli olan veriler sentetik olarak oluşturulmuş olup aşağıda verilmiştir. Tablo 5.1’de aday meydanlardan riskli bölgelere uçuş mesafesi gösterilmiştir.

Tablo 5.1: Aday meydandan riskli bölgeye kuş uçuşu mesafe

Meydan i / Bölge j	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

Çalışma kapsamında riskli bölgelerin yıllık uçuş görevi istek sayısı Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2: Yıllık uçuş görevi isteği

Bölge j	1	2	3	4	5	6
Talep Sayısı	1080	1440	360	720	2160	360

Güvenli bölge içindeki aday üslerin uçuşa elverişli olmayan gün sayısı Tablo 5.3’de gösterildiği gibidir.

Tablo 5.3: Uçuşa elverişli olmayan yıllık gün sayısı

Meydan i	1	2	3	4	5	6
UAD	118	107	95	103	101	145
Meydan i	7	8	9	10	11	12
UAD	164	130	141	137	153	155
Meydan i	13	14	15	16	17	18
UAD	139	128	132	134	99	88
Meydan i	19	20	21	22	23	24
UAD	150	92	121	93	95	98
Meydan i	25					
UAD	80					
*UAD: Unairworthy Day (Uçuşa Elverişsiz Gün)						

Aday üslere ait sabit maliyet Tablo 5.4’de gösterilmiştir.

Tablo 5.4: Aday meydanların sabit maliyeti

Meydan i	1	2	3	4	5	6
Sabit Maliyetx1000 (dolar)	1606	466	1606	466	1606	1606
Meydan i	7	8	9	10	11	12
Sabit Maliyetx1000 (dolar)	1606	1606	466	1606	153	466
Meydan i	13	14	15	16	17	18
Sabit Maliyetx1000 (dolar)	1606	466	1606	1606	1606	1606
Meydan i	19	20	21	22	23	24
Sabit Maliyetx1000 (dolar)	1606	1606	1606	1606	1606	1606
Meydan i	25					
Sabit Maliyetx1000 (dolar)	1606					

Problem kapsamında kullanılacak İHA'nın kullandığı yakıtın JP-8 olduğu varsayılmaktadır. Hava aracının km başına tükettiği yakıtın ise 0,42 dolar olduğu hesaplanmıştır.

5.1 Tek Amaçlı Matematiksel Model Yaklaşımı İle Çözüm ve Analiz

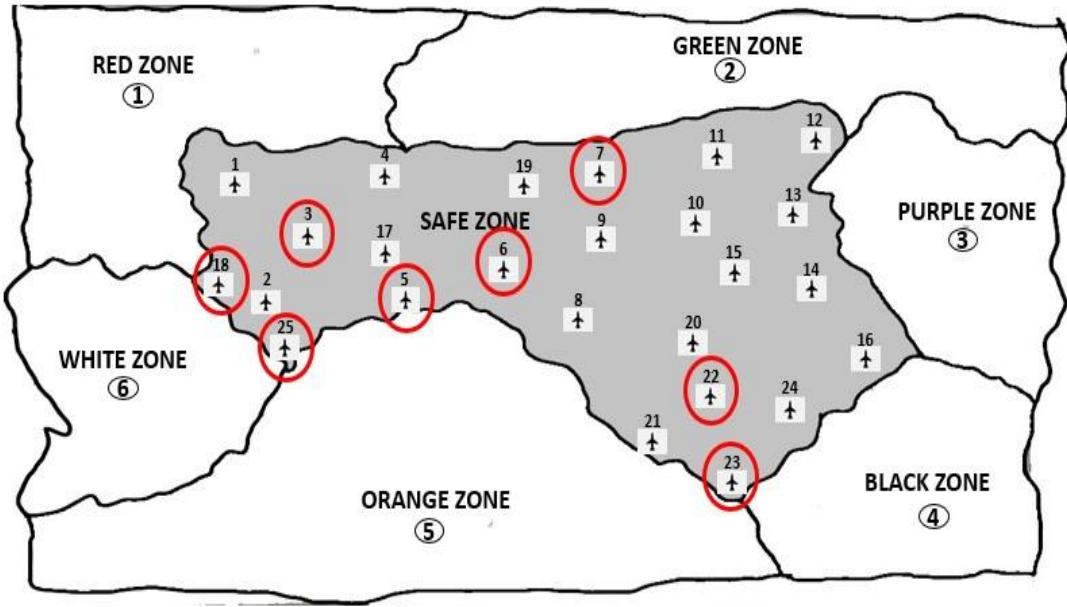
5.1.1 Meydan Sayısını Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi:

Riskli bölgeler tarafından talep edilen uçuş görevlerini karşılayacak minimum sayıda meydanın seçilmesi için tasarlanan matematiksel model GAMS [77] programı ve CPLEX çözücü ile çözülmüştür. Problemin çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5: Model-1’den elde edilen sonuçlar

Amaç fonksiyonu= Toplam meydan sayısının minimizasyonu=8			
Açılan Meydan Sayısı	Açılan Meydanlar	Açılan Meydanlara Bağlı Talep Bölgeleri	Açılan Meydanlardan Planlanan Uçuş Görev Sayısı
8	3	Orange (5)	450
		White (6)	360
	5	Orange (5)	792
	6	Orange (5)	660
	7	Black (4)	345
		Orange (5)	258
	18	Green (2)	96
		Purple (3)	360
		Black (4)	375
	22	Green (2)	816
	23	Red (1)	282
		Green (2)	528
	25	Red (1)	855

Model-1'in çözümü sonrasında açılan toplam meydan sayısı, açılan meydanlar, açılan meydanlara bağlı talep bölgeleri ve açılan meydanlardan planlanan uçuş görev sayısı Tablo 5.5'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, 25 aday meydandan 6 riskli bölgeye talep edilen uçuş görevlerinin minimum sayıda meydanın seçilerek icra edilmesi için 8 meydan seçimi yapılmıştır. Bu kapsamda yıllık uçuş görev talebinin en fazla olduğu Orange zone bölgesinin isteğinin karşılanması için 3,5,6 ve 7 numaralı meydanların kullanıldığı görülmektedir. Green zone bölgesinin talebi ise 18,22,23 numaralı meydanlardan sağlanmaktadır. Aynı şekilde Red zone bölgesinin talebinin karşılanması için 23 ve 25 numaralı meydanların açıldığı görülmektedir. Black zone bölgesi talebi ise 7 ve 18 numaralı meydanlar vasıtasıyla çözümlenmektedir. Purple zone bölgesi ve White zone bölgesi uçuş görev talepleri ise sırasıyla 20 ve 18 numaralı meydanlar tarafından karşılanmaktadır. Bu meydanların bulunduğu yerler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Minimum meydan sayısına göre açılan meydanlar

5.1.2 Mesafeyi Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi:

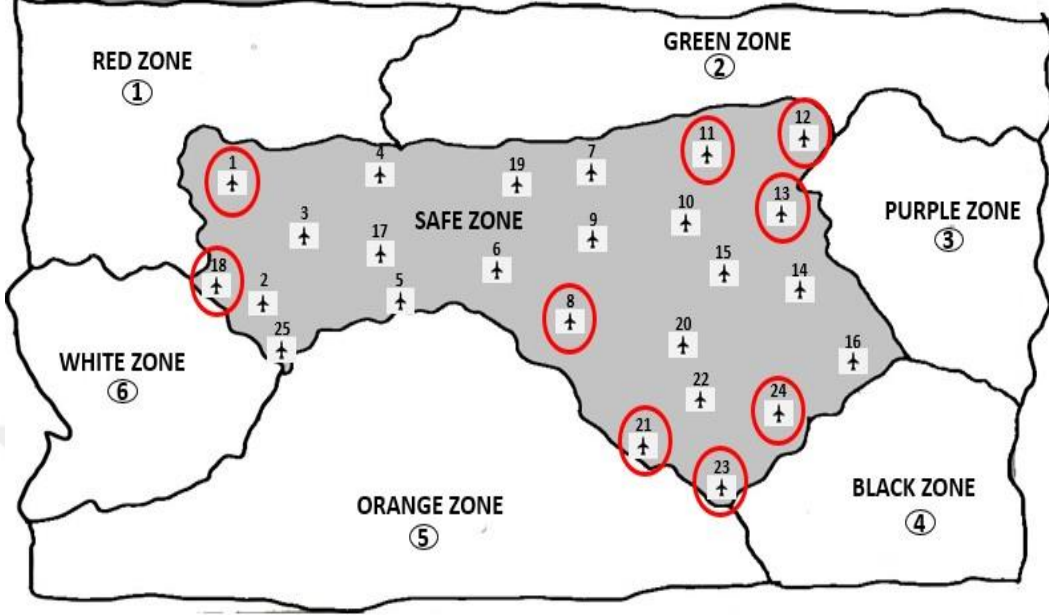
Riskli bölgeler tarafından talep edilen uçuş görevlerini karşılamak maksadıyla toplam mesafeyi minimize eden matematiksel model GAMS programı ve CPLEX çözücü ile

çözümüştür. Problemin çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6: Model-2’den elde edilen sonuçlar

Amaç fonksiyonu= Toplam uçuş mesafesinin minimizasyonu=3481776 km			
Açılan Meydan Sayısı	Açılan Meydanlar	Açılan Meydanlara Bağlı Talep Bölgeleri	Açılan Meydanlardan Planlanan Uçuş Görev Sayısı
9	1	Red (1)	741
	8	Orange (5)	618
	11	Green (2)	636
	12	Green (2)	630
	13	Green (2)	174
		Purple (3)	360
	18	Red (1)	339
		White (6)	360
	21	Orange (5)	732
	23	Orange (5)	810
	24	Black (4)	720

Model-2’nin çözümü sonrasında açılan toplam meydan sayısı, açılan meydanlar, açılan meydanlara bağlı talep bölgeleri ve açılan meydanlardan planlanan uçuş görev sayısı Tablo 5.6’da sunulmuştur. Tabloda görüldüğü üzere aday 25 meydandan 6 riskli bölgeye talep edilen uçuş görevlerinin minimum mesafede icra edilmesi için 9 meydan seçimi yapılmıştır. Bu kapsamda yıllık uçuş görev talebinin en fazla olduğu Orange zone bölgesinin isteğinin karşılanması için 8,21 ve 23 numaralı meydanların kullanıldığı görülmektedir. Green zone bölgesinin isteği 11,12,13 numaralı meydanlardan sağlanmaktadır. Aynı şekilde Red zone bölgesinin isteğinin karşılanması için 1 ve 18 numaralı meydanların açıldığı görülmektedir. Black zone bölgesi talebi ise 24 numaralı meydandan sağlanmaktadır. Purple zone ve White zone bölgesi talepleri sırasıyla 13 ve 18 numaralı meydanlar vasıtasıyla karşılanmaktadır. Bu meydanların bulunduğu yerler Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Minimum mesafeye göre açılan meydanlar

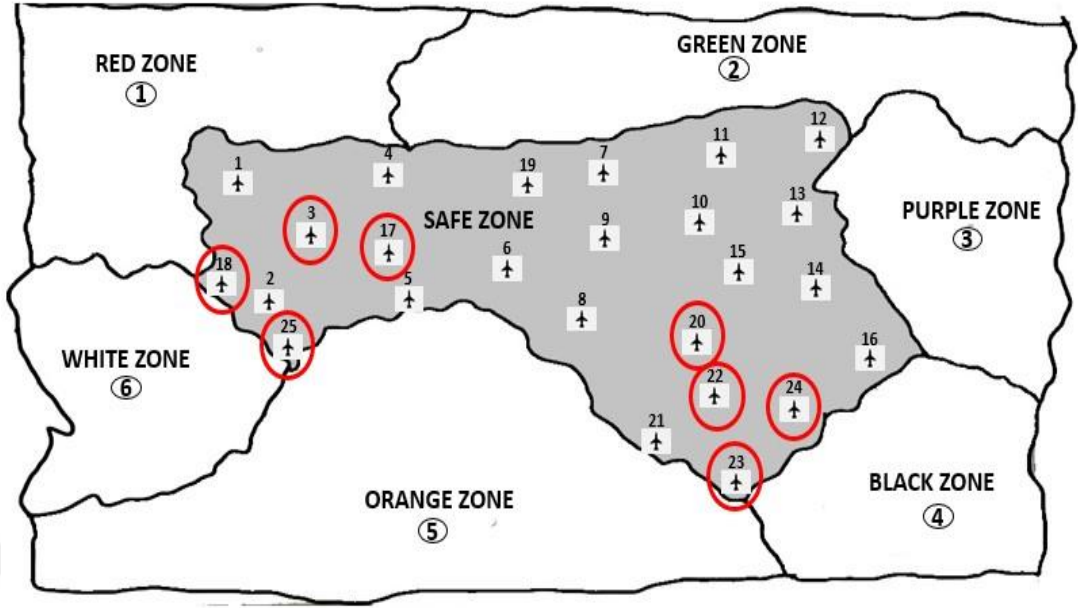
5.1.3 Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısını Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi:

Riskli bölgeler tarafından talep edilen uçuş görevlerini karşılamak maksadıyla yıllık uçuşa elverişsiz gün sayısını minimize eden matematiksel model GAMS programı ve CPLEX çözücü ile çözülmüştür. Problemin çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7: Model-3'ten elde edilen sonuçlar

Amaç fonksiyonu= Toplam uçuşa elverişsiz gün sayısının minimizasyonu=740 gün			
Açılan Meydan Sayısı	Açılan Meydanlar	Açılan Meydanlara Bağlı Talep Bölgeleri	Açılan Meydanlardan Planlanan Uçuş Görev Sayısı
8	3	Orange (5)	450
		White (6)	360
	17	Orange (5)	798
	18	Orange (5)	831
	20	Purple (3)	18
		Black (4)	720
		Orange (5)	81
	22	Green (2)	474
		Purple (3)	342
	23	Green (2)	810
	24	Red (1)	645
		Green (2)	156
	25	Red (1)	855

Model-3'ün çözümü sonrasında açılan toplam meydan sayısı, açılan meydanlar, açılan meydanlara bağlı talep bölgeleri ve açılan meydanlardan planlanan uçuş görev sayısı Tablo 5.7'de sunulmuştur. Tabloda görüldüğü üzere aday 25 meydandan 6 riskli bölgeye talep edilen uçuş görevlerinin uçuşa elverişli olmayan minimum gün sayısına göre icra edilmesi için 8 meydan seçimi yapılmıştır. Bu kapsamda yıllık uçuş görev talebinin en fazla olduğu Orange zone bölgesinin isteğinin karşılanmasında 3,17,18 ve 20 numaralı meydanların kullanıldığı görülmektedir. Green zone bölgesinin isteği 22,23,24 numaralı meydanlardan sağlanmaktadır. Aynı şekilde Red zone bölgesinin talebinin karşılanması için 24 ve 25 numaralı meydanların açıldığı görülmektedir. Black zone bölgesi talebi ise 20 numaralı meydandan sağlanmaktadır. Purple zone bölgesinin talebi 20 ve 22, White zone talebi ise 3 numaralı meydan tarafından karşılanmaktadır. Bu meydanların bulunduğu yerler Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Uçuşa elverişli olmayan minimum gün sayısına göre açılan meydanlar

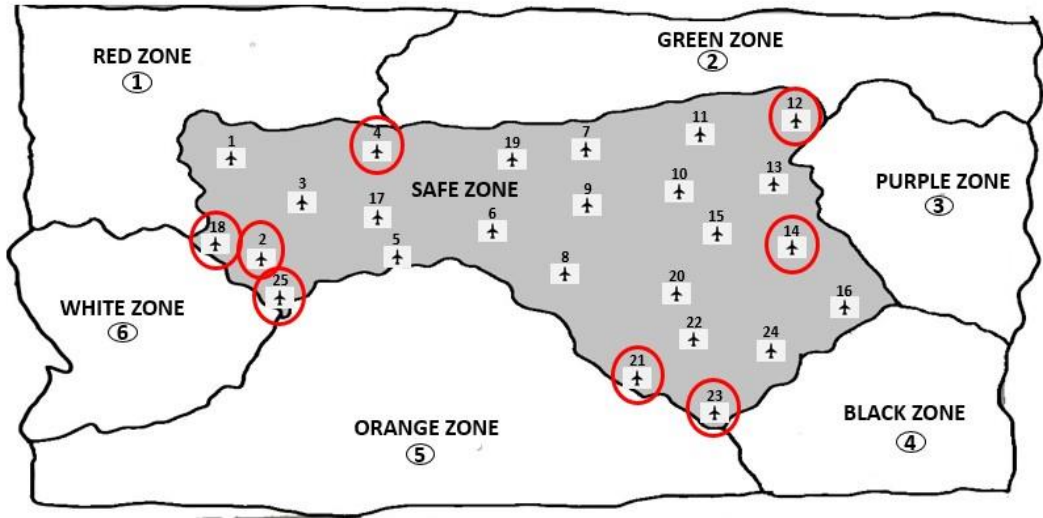
5.1.4 Maliyeti Minimize Eden Matematiksel Modelin Çözümü ve Sonuçların Analizi:

Riskli bölgeler tarafından talep edilen uçuş görevlerini karşılamak maksadıyla toplam maliyeti minimize eden matematiksel model GAMS programı ve CPLEX çözücü ile çözülmüştür. Problemin çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8: Model-4'ten elde edilen sonuçlar

Amaç fonksiyonu= Toplam maliyetin minimizasyonu=10.160.960\$			
Açılan Meydan Sayısı	Açılan Meydanlar	Açılan Meydanlara Bağlı Talep Bölgeleri	Açılan Meydanlardan Planlanan Uçuş Görev Sayısı
8	2	Orange (5)	483
		White (6)	291
	4	Red (1)	318
		Green (2)	459
	12	Green (2)	630
	14	Green (2)	351
		Purple (3)	360
	18	Red (1)	762
		White (6)	69
	21	Orange (5)	732
	23	Black (4)	720
		Orange (5)	90
	25	Orange (5)	855

Model-4'ün çözümü sonrasında açılan toplam meydan sayısı, açılan meydanlar, açılan meydanlara bağlı talep bölgeleri ve açılan meydanlardan planlanan uçuş görev sayısı Tablo 5.8'de sunulmuştur. Tabloda görüldüğü üzere aday 25 meydandan 6 riskli bölgeye talep edilen uçuş görevlerinin minimum maliyetle icra edilmesi için 8 meydan seçimi yapılmıştır. Bu kapsamda yıllık uçuş görev talebinin en fazla olduğu Orange zone bölgesinin isteğinin karşılanmasında 2,21,23 ve 25 numaralı meydanların kullanıldığı görülmektedir. Green zone bölgesinin isteği 4,12,14 numaralı meydanlardan sağlanmaktadır. Red zone bölgesinin isteğinin 4 ve 18 numaralı meydanlardan karşılandığı görülmektedir. Black zone bölgesi talebi 23 numaralı meydandan sağlanmaktadır. Purple zone bölgesi talepleri 14, White zone bölgesi talebi ise 2 ve 18 numaralı meydanlar tarafından karşılanmaktadır. Bu meydanların bulunduğu yerler Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Minimum maliyete göre açılan meydanlar

5.1.5 Model Çözümlerinin Değerlendirilmesi

Tek amaçlı model sonuçlarının daha iyi karşılaştırılması ve kapsamlı bir değerlendirme yapılabilmesi için, bir yılda her bir meydandan her bir talep bölgesine planlanan İHA görev sayısı Tablo 5.9' da gösterilmiştir. Bu bakımdan ilgili tabloda meydan konumlarıyla ilgili operasyonel ve stratejik açıdan bazı kritik bilgiler verilmektedir. Örneğin, 1 numaralı meydan sadece toplam mesafeyi minimize eden Model-2' de açılmaktadır. Bu modelde, 1 numaralı meydandan Red zone bölgesine 741 uçuş görevi planlanmıştır. Yani eğer öncelikli amaç uçuş mesafesini en aza indirmekse 1 numaralı meydanın açılması gerekmektedir, aksi takdirde seçilmeyecektir. Aynı yorum sadece Model-2' de seçilen 11 ve 13 numaralı meydanlar içinde geçerlidir. Benzer şekilde 17 numaralı meydan sadece uçuşa elverişli olmayan gün sayısının en aza indirilmesinin amaçlandığı Model-3' te kullanılmakta ve maliyetin en aza indirildiği Model-4' te ise sadece 4 ve 14 numaralı meydanlar seçildiği görülmektedir. Ayrıca 9,10,15,16 ve 19 numaralı meydanların hiçbir modelde açılmadığını ancak 18 ve 23 numaralı meydanların dört modelin tamamında seçildiğini görüyoruz ki bu da İHA kullanımında meydanların önemi hakkında karar vericiler için değerli bir bilgidir.

Bunun yanında tek amaçlı modellerin çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.10'da sunulmuştur. Söz konusu hedeflerin ulaşılan seviyeleri için Tablo 5.10'a baktığımızda ilk olarak Model-1, Model-3 ve Model-4'te açılan meydan sayısının 8, Model-2'de ise 9 olduğunu görüyoruz. Yani uçuş mesafesi ön planda olduğunda bir meydan daha seçildiği söylenebilir. Bir sonraki hedefimiz olan toplam uçuş mesafesinin Model-2'de gözle görülür derecede az olması, bu modelin amacının sadece mesafeyi minimize etmesi olduğundan beklenen bir durumdur. Benzer şekilde, modellerin belirlenen amaçları doğrultusunda toplam uçuşa elverişsiz gün sayısı Model-3'te, toplam maliyet ise Model-4'te en iyi değerini almaktadır.

Tablo 5.10'da görüldüğü üzere, Model-3'te ulaşılan tüm hedef düzeylerinin Model-1'e göre eşit veya daha iyi olması nedeniyle Model-3'ün çözümünün Model-1'in çözümüne hakim olduğu görülmektedir. Ayrıca her tek amaçlı modelin kendi amaç fonksiyon değerini optimize ederken diğer amaç değerleri açısından kötü sonuçlar elde edilebileceğini de belirtmek gerekir. Bunun sebebi ise ulaşılan hedef seviyeleri ile amaç fonksiyonları arasında bir çelişki olduğunu gösteren bazı önemli farklılıkların bulunmasıdır. Örneğin Model-2 uçuş mesafesi açısından en iyi değeri verirken, uçuşa elverişsiz gün açısından en kötü değeri vermektedir. Bu eksiklikler, bir sonraki bölümde ele alacağımız çok amaçlı çözüm yaklaşımının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Tablo 5.9: Tek amaçlı modellerin çözümünden sonra ortaya çıkan görev planı

	Model-1						Model-2						Model-3						Model-4					
	Bölgeler						Bölgeler						Bölgeler						Bölgeler					
Meydanlar	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1							741																	
2																							483	591
3					350	460											350	460						
4																			318	459				
5					792																			
6					660																			
7				345	258																			
8											618													
9																								
10																								
11								636																
12								630												630				
13								174	360															
14																				351	360			
15																								
16																								
17																	798							
18		496	360	375			339				360						831		762					9
19																								
20															18	720	81							
21											732												732	
22		816												474	342									
23	282	528									810			810								720	90	
24										720			645	156										
25	855												855										855	

Tablo 5.10: Tek amaçlı modellerden elde edilen amaç fonksiyon değerleri

Amaçlar	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4
Açılan Meydan Sayısı (Adet)	8	9	8	8
Toplam Uçuş Mesafesi (km)	8.440.632	3.481.776	8.288.868	4.459.428
Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı (Gün)	861	1097	740	877
Toplam Maliyet (dolar)	16.393.070	14.776.350	16.329.320	10.160.960

5.2 Çok Amaçlı Matematiksel Model Yaklaşımı İle Çözüm ve Analiz

Çalışmanın bu bölümünde tek amaçlı modellerin eksikliklerini gidermek için çok amaçlı bir yaklaşım ile öncelikli hedeflere etkili bir çözüm bulmak için Bölüm 4.3.2'de verilen Model-6 ve Model-5'e ait Algoritma-1,2,3,4 uygulanmıştır. Etkin çözüm kümeleri oluşturmak için epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır.

5.2.1 Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi ile Çözüm ve Elde Edilen Sonuçlar

Riskli bölgeler tarafından talep edilen uçuş görevlerini karşılamak maksadıyla oluşturulan ağırlıklandırılmış çok amaçlı optimizasyon modeli önem sırasına göre belirlenen katsayılar ile çarpılmış ve elde edilen matematiksel model GAMS programı ve CPLEX çözücü ile çözülmüştür. Problemin çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11: Model-6'dan elde edilen sonuçlar

Öncelik Sırası = Mesafe→ Uçuşa Elverişsiz Gün→ Maliyet→ Meydan Sayısı			
Açılan Meydan Sayısı	Açılan Meydanlar	Açılan Meydanlara Bağlı Talep Bölgeleri	Açılan Meydanlardan Planlanan Uçuş Görev Sayısı
9	1	Red (1)	741
	8	Orange (5)	618
	11	Green (2)	636
	12	Green (2)	630
	13	Green (2)	174
		Purple (3)	360
	18	Red (1)	339
		White (6)	360
	21	Orange (5)	732
	23	Orange (5)	810
	24	Black (4)	720

Model-6'nın çözümü sonrasında açılan toplam meydan sayısı, açılan meydanlar, açılan meydanlara bağlı talep bölgeleri ve açılan meydanlardan planlanan uçuş görev sayısı Tablo 5.11'de sunulmuştur. Tabloda görüldüğü üzere aday 25 meydandan 6 riskli bölgeye talep edilen uçuş görevlerinin öncelik sırasına göre icra edilmesi için 9 meydan seçimi yapılmıştır. Çok amaçlı modelde mesafeyi minimize etmek ilk öncelik olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı katsayı olarak en yüksek değer bu amaç fonksiyonuna verilmiştir. Ardından öncelik sırasına göre uçuşa elverişsiz gün sayısı, maliyet ve meydan sayısı amaç fonksiyonlarına katsayılar verilmiştir. Elde edilen sonuçların tek amaçlı toplam mesafeyi minimize eden Model-2 ile aynı olduğu görülmüştür. Bu sebeple mesafeyi minimize eden tek amaçlı model etkili bir çözüme sahiptir.

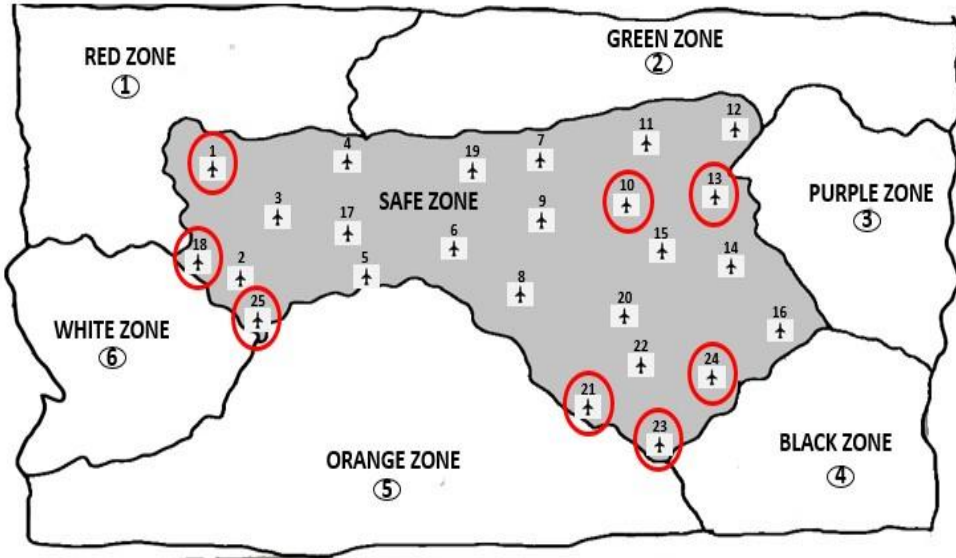
5.2.2 Önceliklendirilmiş Optimizasyon ile Çözüm ve Elde Edilen Sonuçlar

Öncelikli hedeflere etkin bir çözüm bulmak için oluşturulan Model-5, en önemli öncelikleri sırasıyla minimum meydan sayısı, uçuş mesafesi, uçuşa elverişsiz gün sayısı ve maliyet olan Algoritma-1,2,3 ve 4 ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.1'de ortaya çıkan sonuçlar ile benzer olmakla beraber tam olarak aynı sonuçlar elde edilmemiştir. Örnek olarak Algoritma-1'den elde edilen sonuçlar Tablo 5.12 ve Şekil 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.12: Model-5 Algoritma 1’den elde edilen sonuçlar

Öncelik Sırası = Meydan Sayısı→Mesafe→Uçuşa Elverişsiz Gün→Maliyet			
Açılan Meydan Sayısı	Açılan Meydanlar	Açılan Meydanlara Bağlı Talep Bölgeleri	Açılan Meydanlardan Planlanan Uçuş Görev Sayısı
8	1	Red (1)	741
	10	Green (2)	684
	13	Green (2)	678
	18	Red (1)	339
		Orange (5)	120
		White (6)	360
	21	Orange (5)	732
	23	Black (4)	357
		Orange (5)	453
	24	Green (2)	78
		Purple (3)	360
		Black (4)	363
	25	Orange (5)	855

Tablo 5.12’de görüldüğü üzere aday 25 meydana 6 riskli bölgeye talep edilen uçuş görevlerinin icra edilmesi için 8 meydan seçimi yapılmıştır. Bu kapsamda yıllık uçuş görev talebinin en fazla olduğu Orange zone bölgesinin isteğinin karşılanmasında 18,21,23 ve 25 numaralı meydanların kullanıldığı görülmektedir. Green zone bölgesinin isteği 10,13,24 numaralı meydanlardan sağlanmaktadır. Red zone bölgesinin isteğinin 1 ve 18 numaralı meydanlardan karşılandığı görülmektedir. Black zone bölgesi talebi 23 ve 24 numaralı meydana sağlanmaktadır. Purple zone bölgesi talepleri 24, White zone bölgesi talebi ise 18 numaralı meydan tarafından karşılanmaktadır. Bu meydanların bulunduğu yerler Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5: Model-5 Algoritma-1'e göre açılan meydanlar

Algoritma-2,3 ve 4 ile de uygulama yapılarak sonuçlar alınmıştır. Ancak burada asıl amaç, tek amaçlı modellerin eksikliklerinin nasıl aşıldığını göstererek elde edilen etkin çözümlerle amaç fonksiyonlarındaki iyileştirmelere dikkat çekmektir. Bu nedenle tekrardan kaçınmak için Tablo 5.13'de modellerden elde edilen amaç fonksiyonu değerleri verilmiştir.

Tablo 5.13 incelendiğinde tek amaçlı modellerden elde edilen amaç fonksiyon değerleri ile çok amaçlı yaklaşımdan elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılabileceği görülmektedir. Yani Model-1,2,3 ve 4'ün sonuçları sırasıyla Algoritma-1,2,3 ve 4'ün sonuçlarıyla ilişkilendirilebilir. Bunun sebebi, her bir algoritmanın birinci önceliğinin algoritmaya karşılık gelen tek amaçlı modelin hedefiyle aynı olmasıdır (örn. Algoritma-1'in ilk amacı Model-1'in amacıdır). Tablo 5.13'de görüldüğü üzere Model-1 ve Algoritma-1'in hedeflerinin ulaşılan seviyelerine bakıldığında uçuş mesafesinde (8.440.632'den 4.023.612'ye düşüş) ve maliyette ciddi bir iyileşme olduğu görülmektedir (16.393.070'den 14.537.920'ye düşüş). Ancak uçuşa elverişli olmayan günlerde ise bir miktar artış (861'den 876'ya) olduğu gözlenmektedir. Model-2 ve Algoritma-2'nin amaç değerlerine bakıldığında ise tamamen aynı değerlerin görülmesi Model-2 çözümünün aslında etkin bir çözüm olduğunu göstermektedir. Model-3 ve Algoritma-3 sonuçları karşılaştırıldığında uçuş

mesafesinde (8.288.868'den 5.206.104'e düşüş) ve maliyette (16.329.320'den 15.034.560'a düşüş) ciddi bir iyileşme dikkat çekmektedir. Son olarak Model-4 ve Algoritma-4'ün ortaya çıkan amaç değerleri incelendiğinde aynı sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir, bu da Model-4'ün çözümünün etkin olduğunu göstermektedir.

Ortaya çıkan sonuçlar, tek amaçlı modellerin etkili çözümler sağlayıp sağlamadığını ortaya çıkarmaktadır. Çok amaçlı yaklaşımla, Model-1 ve Model-3'te karşılaşılan etkin olmayan durumlar için çözümün Algoritma-1 ve Algoritma-3'te gösterildiği gibi uygulanmasıyla önemli iyileştirmelerin sağlandığı görülmektedir. Öte yandan, tek amaçlı fonksiyonun çözümü etkinse, çok amaçlı algoritmalarla aynı amaç fonksiyonu değerleri elde edilmektedir. Bu durumda Model-2 ve Model-4 etkin çözümlere sahip olduğundan algoritma sonuçları iyileştirilememektedir. Başka bir deyişle, Model-2 veya Model-4'te sırasıyla toplam uçuş mesafesi için 3.481.776 km. ve toplam maliyet için 10.160.960 dolar olarak ortaya çıkan optimal değerlerinde bir bozulma veya artış olmadan iyileştirme gerçekleşemez.

Tablo 5.13: Tüm modellerden elde edilen amaç fonksiyon değerleri

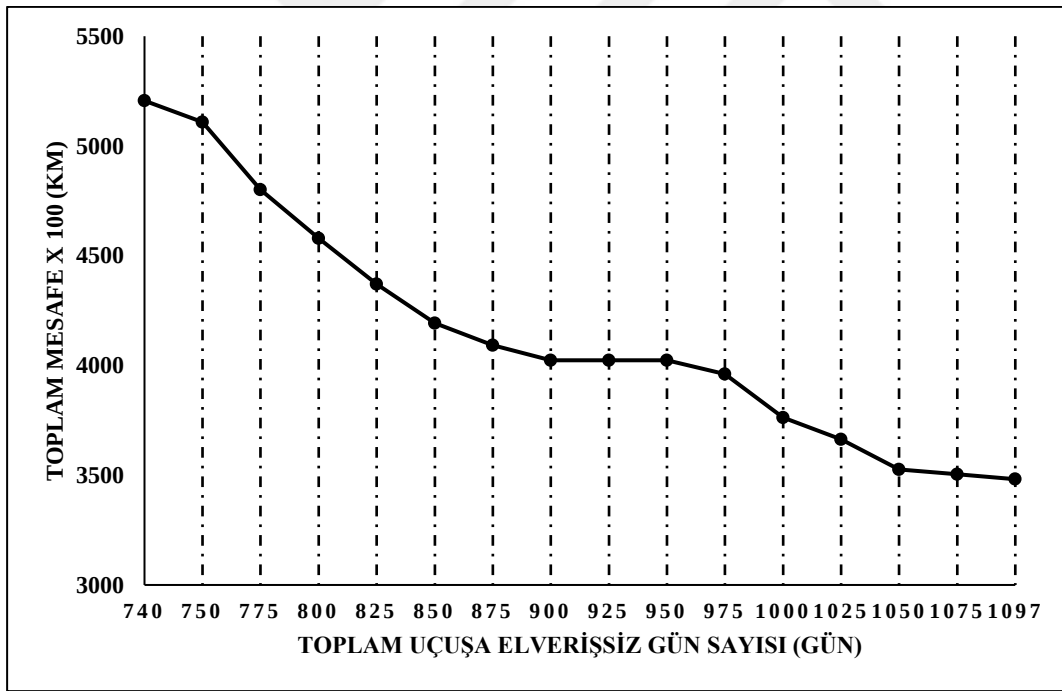
Amaçlar	Mode I-1	Mode I-2	Mode I-3	Mode I-4	Mode I-6	Mode I-5 Alg-1	Mode I-5 Alg-2	Mode I-5 Alg-3	Mode I-5 Alg-4
Açılan Meydan Sayısı (Adet) (Z1)	8	9	8	8	9	8	9	8	8
Toplam Uçuş Mesafesi (km) (Z2)	8.440. 632	3.481. 776	8.288. 868	4.459. 428	3.481. 776	4.023. 612	3.481. 776	5.206. 104	4.459. 428
Toplam Uçuşa Elverişsiz Gün Sayısı (Gün)	861	1097	740	877	1097	876	1097	740	877
Toplam Maliyet (dolar) (Z4)	16.39 3.070	14.77 6.350	16.32 9.320	10.16 0.960	14.77 6.350	14.53 7.920	14.77 6.350	15.03 4.560	10.16 0.960

5.2.3 Epsilon Kısıt Yöntemi ile Uygulama ve Elde Edilen Sonuçlar

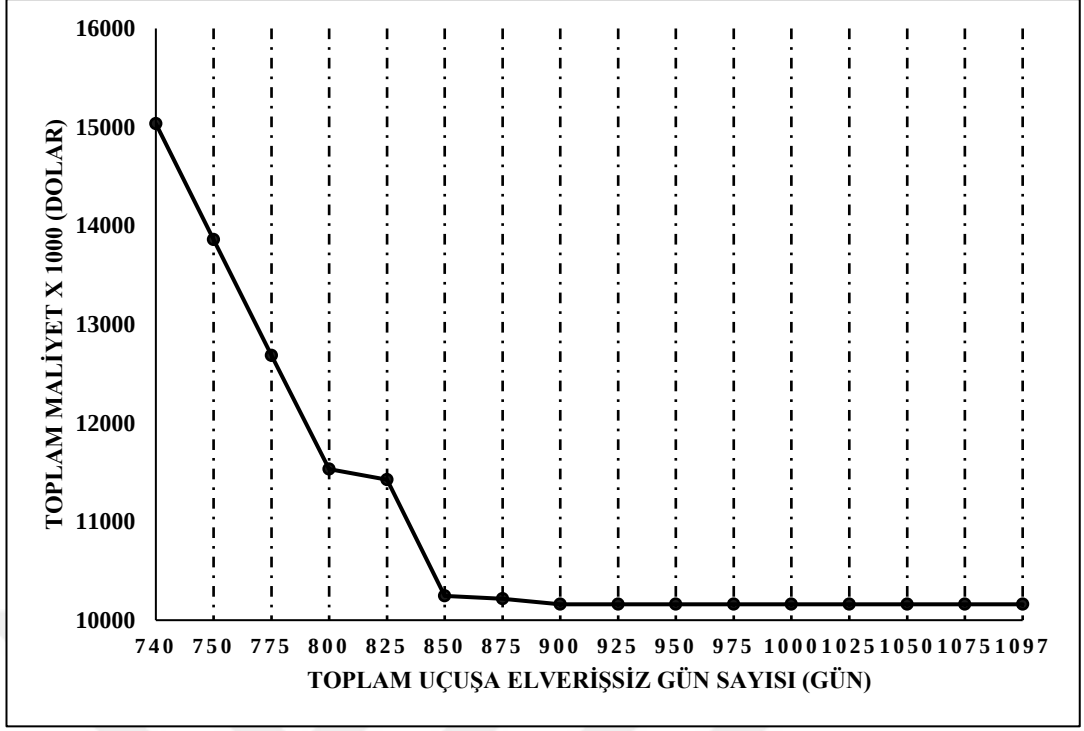
Tablo 5.10 incelendiğinde ulaşılan amaç fonksiyonları değerleri arasında büyük bir fark olduğu görülmektedir. En çelişen amaç fonksiyonlarını tespit ederek etkin çözüm kümesini bulmak için epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır. Bu açıdan özellikle Model-2 ile Model-3 amaç değerleri arasında ve Model-3 ile Model-4 değerleri arasında gözle görülür bir çelişki görülmektedir. Bu çelişkilere odaklanarak, uçuş mesafesi ve uçuşa elverişsiz günler açısından etkin çözümleri Şekil 5.6'da ve uçuşa elverişsiz günler ve maliyet açısından etkin çözümler ise Şekil 5.7'de sunulmuştur. Her iki durumda da uçuşa elverişli olmayan günlerin sayısı, sağ taraf değerleri ortalama 25 birim artırılarak mesafe ve maliyet değerlerinde oluşan değişim gözlemlenmiştir. Karşılaştırılmaya dahil edilmeyen modellere ait amaç fonksiyon değerleri en gevşek

hali ile kısıt olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda uçuş mesafesi ve uçuşa elverişsiz gün sayısı arasındaki etkin çözümler için 9 meydan kısıtı ve 16.393.070 dolara eşit veya küçük olma kısıtı eklenmiştir. Aynı şekilde uçuşa elverişsiz gün sayısı ve maliyet arasındaki etkin çözümler için 9 meydan kısıtı ve 8.440.362 km'ye eşit veya küçük olma kısıtı eklenmiştir.

Şekil 5.6'da uçuş mesafesi ile uçuşa elverişli olmayan günler arasındaki çelişki açıkça görülmektedir. Uçuşa elverişli olmayan günlerin daha düşük seviyelerde olması isteniyorsa, daha yüksek uçuş mesafeleri ortaya çıkmaktadır. Aynı tür ilişki Şekil 5.7'de maliyet ile uçuşa elverişsiz günler arasında da görülmektedir. Uçuşa elverişli olmayan gün sayısı azaldıkça daha yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Uçuşa elverişli olmayan gün sayısının 800' ün altında olması durumunda da çok ciddi bir maliyet artışı gözlenmektedir. Dikkati çeken bir diğer nokta ise uçuşa elverişsiz gün sayısının 850 ile 1097 arasında ki değerlerinde maliyette bir değişim olmamasıdır. Buda karar vericinin seçimi için değerli bir bilgidir.



Şekil 5.6: Uçuş mesafesi ve uçuşa elverişsiz günler konusunda etkin çözümler



Şekil 5.7: Maliyet ve uçuşa elverişsiz günler konusunda etkin çözümler

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sınır ve sınır ötesi güvenlikte kullanılan İHA'ların meydan konumlarını optimize etmek amacıyla ilk olarak meydan sayısını, toplam mesafeyi, toplam uçuşa elverişsiz gün sayısını ve toplam maliyeti en aza indirecek dört tek amaçlı model geliştirilmiştir. Bu modellerin çözümü sonucunda minimum meydan sayısı 8, minimum toplam mesafe 3.481.776 km, minimum toplam uçuşa elverişli olmayan gün sayısı 740, minimum toplam maliyet ise 10.160.960 dolar olarak bulunmuştur. Çalışma ile her meydandan her riskli bölgeye planlanan görev sayısı da sunulmuştur. Ortaya çıkan sonuçlar incelendiğinde bazı meydanların sadece belirli durumlarda seçildiği, bazılarının her durumda seçildiği, bazılarının ise hiçbir durumda seçilmediği görülmektedir. Örneğin, 1 numaralı meydan sadece toplam mesafenin minimize edilmesinin amaçlandığı Model-2’de açılmaktadır. Bunun yanında 9,10,15,16 ve 19 numaralı meydanlar hiçbir modelde açılmazken, 18 ve 23 numaralı meydanlar ise dört modelin tamamında seçilmiştir. Bu sonuçlar karar vericilerin operasyonel ve stratejik düzeydeki İHA kullanımında meydanların kritikliği hakkında fikir sahibi olması açısından önemlidir.

Tek amaçlı modeller karar vericilere önemli sonuçlar vermesine rağmen bu modellerin bir eksikliği, ortaya çıkan çözümlerin bir diğerine göre baskın olabilmesidir. Başka bir çözümün hakim olamayacağı etkin çözümler bulmak için çok amaçlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çözüm sonucunda yapılan analizler ile Model-1 ve Model-3’ün çözümlerinin aslında etkin olmadığı görülmektedir. Algoritma-1 kullanılarak uçuş mesafesinde (8.440.632'den 4.023.612'ye düşüş) ve maliyet değerinde (16.393.070'den 14.537.920'ye düşüş) önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Model-1 çözümleri ile kıyaslandığında benzer şekilde Model-3 ile Algoritma-3 sonuçları

arasında uçuş mesafesinde (8.288.868'den 5.206.104'e düşüş) ve maliyette (16.329.320'den 15.034.560'a düşüş) ciddi bir iyileşme olduğu görülmüştür.

Son olarak, karar vericilerin bir hedefi diğeriyle değiştirmesi gereken veya bazı hedeflerin birbiriyle çeliştiği durumlar göz önüne alındığında, karar vericilere daha fazla seçenek sunulması ve tercihlerinin sonuçlarını bilmesi için epsilon kısıt yöntemi kullanılarak etkili çözüm setleri ortaya konmuştur. Uygulamada elde edilen sonuçlarda uçuş mesafesi ile uçuşa elverişsiz günler arasındaki çelişki nedeniyle uçuşa elverişsiz günlerin düşük seviyeleri, daha yüksek uçuş mesafelerine sebep olmaktadır. Aynı tür ilişki maliyet ile uçuşa elverişsiz günler arasında da görülmektedir. Yani uçuşa elverişli olmayan gün sayısının azalması için daha yüksek maliyetlerin ödenmesi gerekmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda riskli bölgelerde oluşabilecek tehditler, riskli bölgelerin hava durumunun uçuşa elverişliliği, hava araçlarının uçuş boyunca kullanacağı irtifa seviyesi ve aday meydanların bulunduğu yerlerin sınıra yakınlığı gibi faktörler modele entegre edilebilir. Bunun yanında meydan seçimi optimizasyonu yapıldıktan sonra hava araçlarının uçuşta kullanması için rotalama ve zaman çizelgeleme çalışması yapılabilir.

KAYNAK DİZİNİ

- [1] Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (Eds.). (2015). Handbook of unmanned aerial vehicles (Vol. 1). Dordrecht: Springer Netherlands.
- [2] Joint Capability Group on Unmanned Aerial Vehicles, STANAG 4671- unmanned aerial vehicle systems air worthiness requirements (USAR).draft, NATO Naval Armaments Group, 2007.
- [3] Federal Aviation Administration, Unmanned aircraft systems operations in the U.S. national airspace system. Interim Operational Approval Guidance 08-01,2008.
- [4] European Aviation Safety Agency, Airworthiness certification of unmanned aircraft systems (UAS).Policy Statement,E.Y013-01,2009.
- [5] SSM (Savunma Sanayi Müsteşarlığı) (2011) Türkiye İnsansız Hava Aracı Sistemleri Yol Haritası (2011-2030), Ankara.
- [6] Gellius, Attic nights. Book 10 (Trans. by Rolfe, J. C.) (1927), http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Gellius/10*.html
- [7] Guedj, Le Theoreme du Perroquet (Editions du Seuil, Paris, 1998)
- [8] Barnhart, R. K., Marshall, D. M., & Shappee, E. (Eds.). (2021). Introduction to unmanned aircraft systems. Crc Press.
- [9] Sever H.,Kuplay Ö. (2023). İnsansız Hava Araçları Makinelerin Yükselişi, Adalet Yayınevi, Ankara.
- [10] Joint Air Power Competence Centre. (2010). Strategic Concept of Employment: For Unmanned Aircraft Systems in NATO. Joint Air Power Competence Centre.
- [11] K.Dalamagkidis,K.Valavanis,L. PiegI,On IntegratingUnmannedAircraft Systems into the National AirspaceSystem: Issues, Challenges,Operational Restrictions,Certification, and Recommendations, Intelligent Systems,Control

- [12] B. Clough, Metrics, schmetrics! How do you track a UAV's autonomy? in Proceedings of the AIAA 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles, Portsmouth, 2002a
- [13] Barbati, M. (2013). Models and Algorithms for Facility Location Problems with Equity Considerations.
- [14] Koopmans, T. C., & Beckmann, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 53-76.
- [15] Dantzig, G. (1963). Linear programming and extensions. Princeton university press.
- [16] Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European journal of operational research*, 111(3), 423-447.
- [17] Farahani, R. Z., & Hekmatfar, M. (Eds.). (2009). Facility location: concepts, models, algorithms and case studies. Springer Science & Business Media.
- [18] Revelle, C. S., Eiselt, H. A., & Daskin, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European journal of operational research*, 184(3), 817-848.
- [19] Sule, D. R. (2001). Logistics of facility location and allocation. CRC Press.
- [20] Mladenović, N., Brimberg, J., Hansen, P., & Moreno-Pérez, J. A. (2007). The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 927-939.
- [21] Fallah, H., Sadigh, A. N., and Aslanzadeh, M. (2009). Covering problem. In *Facility Location* (pp. 145-176). Physica-Verlag HD.
- [22] Berman, O., Drezner, Z., & Krass, D. (2010). Generalized coverage: New developments in covering location models. *Computers & Operations Research*, 37(10), 1675-1687.

- [23] Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations research*, 19(6), 1363-1373.
- [24] Church, R., & ReVelle, C. (1974, December). The maximal covering location problem. In *Papers of the regional science association* (Vol. 32, No. 1, pp. 101-118). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- [25] Jamshidi, M. (2009). Median location problem. *Facility location: Concepts, models, algorithms and case studies*, 177-191.
- [26] Daskin MS (2013) *Network and discrete location: models, algorithms and applications*, 2nd edn. Wiley, New York.
- [27] Ahmadi-Javid, A., Seyedi, P., & Syam, S. S. (2017). A survey of healthcare facility location. *Computers & Operations Research*, 79, 223-263.
- [28] Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research*, 12(3), 450-459.
- [29] ReVelle, C. S., & Swain, R. W. (1970). Central facilities location. *Geographical analysis*, 2(1), 30-42.
- [30] Arabani, A. B., & Farahani, R. Z. (2012). Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 408-420.
- [31] Daskin, M. (1997). Network and discrete location: models, algorithms and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 48(7), 763-764.
- [32] Jay M. Nambiar, Ludo F. Gelders, Luc N. Van Wassenhove 1981. A large scale location-allocation problem in the natural rubber industry. *European Journal of Operational Research*, Volume 6, Issue 2, Pages 183-189.
- [33] Schreuder, J. (1981). Application of a location model to fire stations in Rotterdam. *European Journal of Operational Research*, 6, 212-219.
- [34] H. Aygüneş, “Kırsal Bölgelerde Askeri Birliklerin Konuşlandırılmasında Yer Seçimi Modellerinin Kullanılması”, *Savunma Bilimleri Dergisi*, c. 7, sy. 1, ss. 93–112, 2008, doi: 10.17134/sbd.98657.

- [35] Aktaş, E., Özaydın, Ö., Ülengin, F., Önsel, Ş., & Ağaran, B. 2011. İstanbul'da İtfaiye İstasyonu Yerlerinin Seçimi İçin Yeni Bir Model. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 2-12
- [36] Ayöperken, E., Ermiş, M. 2011. İnsansız Hava Araçları İçin Üs Konumlarının Kapsama Alanı Problemi Olarak Modellenmesi ve En iyilenmesi. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 5, Sayı 1, 61-71.
- [37] Ye, Lin & Ye, Chunming & Chuang, Yi-Fei, 2011. "Location set covering for waste resource recycling centers in Taiwan," Resources, Conservation & Recycling, Elsevier, vol. 55(11), pages 979-985.
- [38] Sarıççek, İ., & Akkuş, Y. (2015). Unmanned aerial vehicle hub-location and routing for monitoring geographic borders. Applied Mathematical Modelling, 39(14), 3939-3953.
- [39] Kurban, Ö. ve Can, T. 2016. Acil İstihbarat, Gözetleme ve Keşif İhtiyaçları İçin Mini İnsansız Hava Araçlarının Yer Kontrol İstasyonlarının Seçimi. Marmara Üniversitesi Öneri Dergisi, Cilt 12, Sayı 45, 35-59.
- [40] T. Şengül And C. Gencer, "İnsansız Hava Aracı Sistemleri İçin Üs Bölgesi Yer Seçimi," Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol.33, no.2, pp.1-15, 2017
- [41] Aydın, H., Ayvaz, B., & Küçükaşçı, E. Ş. (2017). Afet Yönetiminde Lojistik Depo Seçimi Problemi: Maltepe İlçesi Örneği. Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, 12, 1-
- [42] Yılmaz, N. (2018). Etkin Keşif Gözetleme Sistemi İçin Kablo Güdümlü Balonlar ve İHA Sistemlerine Yönelik Yer Seçimi ve Rotalama Model Önerileri. Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018-10-01
- [43] Liu, Y., Liu, Z., Shi, J., Wu, G., & Chen, C. (2019). Optimization of base location and patrol routes for unmanned aerial vehicles in border intelligence, surveillance, and reconnaissance. Journal of Advanced Transportation, 2019.
- [44] Chauhan, D., Unnikrishnan, A., & Figliozzi, M. (2019). Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 99, 1-18.
- [45] Sarıkaya, H. A. (2020). Jandarma Karakollarının Yer Seçiminin En Büyük Kapsama Metodu ile Belirlenmesi. Endüstri Mühendisliği, 31(1), 28-47.

- [46] S. Kara, S., & Yurdakul, G. (2021). Raylı Sistem İstasyon Yeri Belirleme Problemi İçin Küme Kapsama ve Alternatif Servis Seviyeli P-Medyan Modelleriyle Çözüm Arayışı: Gebze-Darıca Metro Hattı Uygulaması.
- [47] Park, Y., Lee, S., Sung, I., Nielsen, P., & Moon, I. (2022). Facility location-allocation problem for emergency medical service with unmanned aerial vehicle. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 24(2), 1465-1479.
- [48] Mitropoulos, P., Mitropoulos, I., Giannikos, I., & Sissouras, A. (2006). A biobjective model for the locational planning of hospitals and health centers. *Health Care Management Science*, 9, 171-179.
- [49] Xavier, C. M., Costa, M. G. F., & Costa Filho, C. F. F. (2020). Combining facility-location approaches for public schools expansion. *Ieee Access*, 8, 24229-24241.
- [50] He, S. Y., Kuo, Y. H., & Sun, K. K. (2022). The spatial planning of public electric vehicle charging infrastructure in a high-density city using a contextualised location-allocation model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 160, 21-44.
- [51] Braßel, H.; Zeh, T.; Fricke, H.; Eltner, A. Optimal UAV Hangar Locations for Emergency Services Considering Restricted Areas. *Drones* 2023, 7, 203.
- [52] Ren, Xinhui & Li, Ruibo. (2023). The Location Problem of Medical Drone Vertiports for Emergency Cardiac Arrest Needs. *Sustainability*. 16. 44. 10.3390/su16010044.
- [53] M. Atlas, Çok Amaçlı Programlama Çözüm Tekniklerinin Sınıflandırılması, *Anadolu Üniversitesi Sos. Bilim. Derg.* 8 (2008) 47–68.
- [54] Stadler, W. (1979). A survey of multicriteria optimization or the vector maximum problem, part I: 1776–1960. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 29, 1-52.
- [55] Edgeworth, F.Y., *Mathematical Psychics*, P. Keagan, London, England, 1881.
- [56] Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of games and economic behavior* (2nd rev. ed.). Princeton University Press.

- [57] Leonard, R. J. (1995). From parlor games to social science: Von Neumann, Morgenstern, and the creation of game theory 1928-1944. *Journal of economic literature*, 33(2), 730-761.
- [58] Steuer, R.E. (1986) *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics.
- [59] De Weck, O. (2004). Multiobjective optimization: History and promise. Invited Keynote Paper, GL2-2, The Third China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, Kanazawa, Japan.
- [60] G. Baysal, Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerine Çekicilik Fonksiyonu Yaklaşımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2015.
- [61] Rardin, R. L., & Rardin, R. L. (1998). *Optimization in operations research* (Vol. 166). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [62] Michalewicz, Z., & Schoenauer, M. (1996). Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. *Evolutionary computation*, 4(1), 1-32.
- [63] Ishibuchi, H., & Murata, T. (1998). A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews)*, 28(3), 392-403. And *Automation: Science and Engineering*, vol. 36, 2nd edn. (Springer, Dordrecht/New York, 2012)
- [64] Murata, T., & Ishibuchi, H. (1995, November). MOGA: multi-objective genetic algorithms. In *IEEE international conference on evolutionary computation* (Vol. 1, pp. 289-294). IEEE Piscataway.
- [65] Haimes YY, Lasdon LS & Wismar DA. 1971. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* SMC-1, 296–297.
- [66] Mardle, S., Pascoe, S., Tamiz, M., & Jones, D. (2000). Resource allocation in the North Sea demersal fisheries: a goal programming approach. *Annals of Operations Research*, 94, 321-342.

- [67] Tapia, M. G. C., & Coello, C. A. C. (2007, September). Applications of multi-objective evolutionary algorithms in economics and finance: A survey. In 2007 IEEE congress on evolutionary computation (pp. 532-539). IEEE.
- [68] Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization*, 41, 853-862.
- [69] Gunasekara, R. C., Mehrotra, K., & Mohan, C. K. (2014, August). Multi-objective optimization to identify key players in social networks. In 2014 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2014) (pp. 443-450). IEEE.
- [70] Karasakal, O., Karasakal, E., & Silav, A. (2016 0). Bir Deniz Görev Grubu için Satihtan Havaya GÜdümlü Mermilerin Dinamik Çizelgelemesi. YA/EM 2016 Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği 36. Ulusal Kongresi, (13-15 Temmuz 2016), İzmir, Türkiye. <https://hdl.handle.net/11511/73747>
- [71] Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 1502242.
- [72] Alayón Suárez, S. M. (2021). Weighted Sum Method for Multi-objective Optimization LP Model for Supply Chain Management of Perishable Products in a Dairy Company. In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA LATIN AMERICA 2021* (pp. 285-298). Springer International Publishing.
- [73] Pereira, J. L. J., Oliver, G. A., Francisco, M. B., Cunha Jr, S. S., & Gomes, G. F. (2022). A review of multi-objective optimization: methods and algorithms in mechanical engineering problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(4), 2285-2308.
- [74] Karatas, M., Yakıcı, E., & Dasci, A. (2022). Solving a bi-objective unmanned aircraft system location-allocation problem. *Annals of Operations Research*, 319(2), 1631-1654.
- [75] Shehadeh, A., Alshboul, O., Tatari, O., Alzubaidi, M. A., & Salama, A. H. E. S. (2022). Selection of heavy machinery for earthwork activities: A multi-objective

optimization approach using a genetic algorithm. Alexandria Engineering Journal, 61(10), 7555-7569.

[76] AlSaba, M. T., Hakami, N. A., AlJebreen, K. S., & Abido, M. A. (2023). Multi-objective distributionally robust approach for optimal location of renewable energy sources. Alexandria Engineering Journal, 77, 75-94.

[77] GAMS, General Algebraic Modeling System, GAMS Development Corporation, www.gams.com. Last accessed 03 August 2024.



EKLER

A. Model-1 GAMS kodu

sets

```

i candidate bases
/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
j mission zones
/1,2,3,4,5,6/

```

```
;
```

parameters

```

D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
/ 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
/ 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,
19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
24 1606000,
25 1606000/
N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission
flights)
* N(i) is calculated using UAD
TotFlightDist total flight distance
TotUAD total UAD in a year
TotCost total cost
UAD(i) unair worthy days for each base in a year
/ 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9
141,
10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17
99,
18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25
80 /
c jp8 fuel cost per km (dollar)
/0.42/

```

Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212

5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

```

;
N(i)= (365-UAD(i))*3;
positive variables
    x(i,j) number of planned missions from candiate base i to mission
    zone j in a year
;
binary variables
    y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)
;
variables
    Z objective function value (minimum number of stations-bases)
;
equations
    ObjF, Demand(j)
    MinNumberOfFlight(i)
    MaxNumberOfFlight(i)
    * MaxNumberOfStations
;
ObjF..
    Z=E=sum((i), y(i))
;

Demand(j)..
    sum(i, x(i,j)) =G= D(j)

```

```

;
MinNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*    sum(i,y(i))=E=8
;
model MinNumberOfStations /all/;
solve MinNumberOfStations using MIP minimizing Z;
TotFlightDist= sum((i,j),r(i,j)*x.L(i,j));
TotUAD= sum((i), UAD(i)*y.L(i));
TotCost=sum((i,j),c*r(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display x.L,y.L,Z.L,TotFlightDist,TotUAD,TotCost;

```

B. Model-2 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
    j mission zones
/1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
        / 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
        7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
        13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,
        19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
24 1606000,
        25 1606000/
    N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission
flights)
* N(i) is calculated using UAD
    TotBaseOpened total number of bases opened
    TotUAD total UAD in a year
    TotCost total cost

```

```

    UAD(i) unair worthy days for each base in a year
        / 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9
141,
        10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17
99,
        18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25
80 /
    c    jp8 fuel cost per km (dollar)
        /0.42/

```

Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

```

;
N(i)= (365-UAD(i))*3;
positive variables
    x(i,j) number of planned missions from candiate base i to mission
zone j in a year
;
binary variables
    y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)
;
variables

```

```

    Z    objective function value (minimum total flight distance)
;
equations
    ObjF, Demand(j)
    MinNumberOfFlight(i)
    MaxNumberOfFlight(i)
*    MaxNumberOfStations
;
ObjF..
    Z=E=sum((i,j), r(i,j)*x(i,j))
;

Demand(j)..
    sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*    sum(i,y(i))=E=8
;
model MinTotalDistance /all/;
solve MinTotalDistance using MIP minimizing Z;
TotBaseOpened= sum((i),y.L(i));
TotUAD= sum((i), UAD(i)*y.L(i));
TotCost=sum((i,j),c*r(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display x.L,y.L,Z.L,TotBaseOpened,TotUAD,TotCost;

```

C. Model-3 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
    /1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
    j mission zones
    /1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)

```

/ 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
 1606000,
 7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
 466000,
 13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
 18 1606000,
 19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
 24 1606000,
 25 1606000/

N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission flights)

* N(i) is calculated using UAD

TotFlightDist total flight distance

TotBaseOpened total number of bases opened

TotCost total cost

UAD(i) unair worthy days for each base in a year

/ 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9
 141,
 10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17
 99,
 18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25
 80 /

c jp8 fuel cost per km (dollar)

/0.42/

Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800

21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

```

;
N(i)= (365-UAD(i))*3;
positive variables
    x(i,j) number of planned missions from candidate base i to mission
zone j in a year
;
binary variables
    y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)
;
variables
    Z objective function value (total unair worthy days in a year)
;
equations
    ObjF, Demand(j)
    MinNumberOfFlight(i)
    MaxNumberOfFlight(i)
;
ObjF..
    Z=E=sum((i), UAD(i)*y(i))
;

Demand(j)..
    sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*    sum(i,y(i))=E=8
;
model MinTotalUnairworthyday /all/;
solve MinTotalUnairworthyday using MIP minimizing Z;
TotBaseOpened= sum((i),y.L(i));
TotFlightDist= sum((i,j),r(i,j)*x.L(i,j));
TotCost=sum((i,j),c*r(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display x.L,y.L,Z.L,TotBaseOpened,TotFlightDist,TotCost;

```


D. Model-4 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
    /1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
    j mission zones
    /1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
        / 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
        7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
        13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,
        19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
24 1606000,
        25 1606000/
    N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission
flights)
    * N(i) is calculated using UAD
    UAD(i) unair worthy days for each base in a year
        / 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9
141,
        10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17
99,
        18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25
80 /
    c    jp8 fuel cost per km (dollar)
        /0.42/
    Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j

```

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884

11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

```

;
N(i)= (365-UAD(i))*3;
positive variables
    x(i,j) number of planned missions from candiate base i to mission
zone j in a year
;
binary variables
    y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)
;
variables
    Z    objective function value (minimum total cost)
;
equations
    ObjF, Demand(j)
    MinNumberOfFlight(i)
    MaxNumberOfFlight(i)
*    MaxNumberOfStations
;
ObjF..
    Z=E=sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i),F(i)*y(i))
;

Demand(j)..
    sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;

```

```

*MaxNumberOfStations..
*      sum(i,y(i))=E=8
;
model MinTotalCost /all/;
solve MinTotalCost using MIP minimizing Z;
Display z.L,x.L,y.L,N;

```

E. Model-5 Algoritma-1 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
    /1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
    j mission zones
    /1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
        / 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
        7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
        13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,
        19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
24 1606000,
        25 1606000/
    N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission
flights)
* N(i) is calculated using UAD
    TotFlightDist total flight distance
    TotBaseOpened total number of bases opened
    TotUAD total UAD in a year
    TotCost total cost
    UAD(i) unair worthy days for each base in a year
        / 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9
141,
        10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17
99,
        18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25
80 /
    c      jp8 fuel cost per km (dollar)
        /0.42/

```

Table $r(i,j)$ distance between candidate base i and mission zone j

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

;

$N(i) = (365 - UAD(i)) * 3$;

positive variables

$x(i,j)$ number of planned missions from candidate base i to mission zone j in a year

;

binary variables

$y(i)$ whether base i is opened or not (1 if opened)

;

variables

Z2 objective function value (minimum total flight distance)

Z3 objective function value (total unair worthy days in a year)

Z4 objective function value (minimum total cost)

Z1 objective function value (minimum number of stations-bases)

;

equations

ObjF2, ObjF3, ObjF4, ObjF1

Demand(j)

MinNumberOfFlight(i)

```

        MaxNumberOfFlight(i)
*      MaxNumberOfStations
;
ObjF2..
        Z2=E=sum((i,j), r(i,j)*x(i,j))
;
ObjF3..
        Z3=E=sum((i), UAD(i)*y(i))
;
ObjF4..
        Z4=E=sum((i,j), c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i), F(i)*y(i))
;
ObjF1..
        Z1=E=sum((i), y(i))
;
Demand(j)..
        sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
        sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
        sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*      sum(i, y(i))=E=8
;
model M1MinNumberOfStations
/ObjF1,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight/;
solve M1MinNumberOfStations using MIP minimizing Z1;
Display x.L,y.L,Z1.L;
equations
        OptObjF1Const
;
OptObjF1Const..
        sum((i), y(i))=L=Z1.L
;
model M2MinTotalDistance
/ObjF2,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF1Const/;
solve M2MinTotalDistance using MIP minimizing Z2;
Display x.L,y.L,Z2.L;
equations
        OptObjF2Const
;
OptObjF2Const..
        sum((i,j), r(i,j)*x(i,j))=L=Z2.L

```

```

;
model M3MinTotalUWD
/ObjF3,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF1Const,OptObjF
2Const/;
solve M3MinTotalUWD using MIP minimizing Z3;
Display x.L,y.L,Z3.L;
equations
OptObjF3Const
;
OptObjF3Const..
    sum((i), UAD(i)*y(i))=L=Z3.L
;
model M4MinTotalCost
/ObjF4,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF1Const,OptObjF
2Const,OptObjF3Const/;
solve M4MinTotalCost using MIP minimizing Z4;
Display x.L,y.L,Z4.L;
**TotFlightDist= sum((i,j),r(i,j)*x.L(i,j));
**TotBaseOpened= sum((i),y.L(i));
**TotUAD= sum((i), UAD(i)*y.L(i));
**TotCost=sum((i,j),c*r(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display Z1.L,Z2.L,Z3.L,Z4.L,x.L,y.L;

```

F. Model-5 Algoritma-2 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
    j mission zones
/1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
        / 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
        7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
        13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,
        19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
24 1606000,
        25 1606000/

```

N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission flights)

* N(i) is calculated using UAD

TotFlightDist total flight distance

TotBaseOpened total number of bases opened

TotUAD total UAD in a year

TotCost total cost

UAD(i) unair worthy days for each base in a year

/ 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9

141,

10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17

99,

18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25

80 /

c jp8 fuel cost per km (dollar)

/0.42/

Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

;

N(i)= (365-UAD(i))*3;

positive variables

```

        x(i,j) number of planned missions from candiate base i to mission
zone j in a year
;
binary variables
        y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)
;
variables
        Z2 objective function value (minimum total flight distance)
        Z3 objective function value (total unair worthy days in a year)
        Z4 objective function value (minimum total cost)
        Z1 objective function value (minimum number of stations-bases)
;
equations
        ObjF2,ObjF3,ObjF4,ObjF1
        Demand(j)
        MinNumberOfFlight(i)
        MaxNumberOfFlight(i)
*      MaxNumberOfStations
;
ObjF2..
        Z2=E=sum((i,j), r(i,j)*x(i,j))
;
ObjF3..
        Z3=E=sum((i), UAD(i)*y(i))
;
ObjF4..
        Z4=E=sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i),F(i)*y(i))
;
ObjF1..
        Z1=E=sum((i), y(i))
;
Demand(j)..
        sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
        sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
        sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*      sum(i,y(i))=E=8
;
model M2MinTotalDistance
/ObjF2,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight/;
solve M2MinTotalDistance using MIP minimizing Z2;

```



```

Display x.L,y.L,Z2.L;
equations
    OptObjF2Const
;
OptObjF2Const..
    sum((i,j),r(i,j)*x(i,j))=L=Z2.L
;
model M3MinTotalUWD
/ObjF3,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF2Const/;
solve M3MinTotalUWD using MIP minimizing Z3;
Display x.L,y.L,Z3.L;
equations
OptObjF3Const
;
OptObjF3Const..
    sum((i), UAD(i)*y(i))=L=Z3.L
;
model M4MinTotalCost
/ObjF4,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF2Const,OptObjF
3Const/;
solve M4MinTotalCost using MIP minimizing Z4;
Display x.L,y.L,Z4.L;
equations
OptObjF4Const
;
OptObjF4Const..
    sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i),F(i)*y(i))=L=Z4.L
;
model M1MinNumberOfStations
/ObjF1,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF2Const,OptObjF
3Const,OptObjF4Const/;
solve M1MinNumberOfStations using MIP minimizing Z1;
Display x.L,y.L,Z1.L;
**TotFlightDist= sum((i,j),r(i,j)*x.L(i,j));
**TotBaseOpened= sum((i),y.L(i));
**TotUAD= sum((i), UAD(i)*y.L(i));
**TotCost=sum((i,j),c*r(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display Z1.L,Z2.L,Z3.L,Z4.L,x.L,y.L;

```

G. Model-5 Algoritma-3 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/

```

```

    j mission zones
/1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
        / 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
        7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
        13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,
        19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
24 1606000,
        25 1606000/
    N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission
flights)
* N(i) is calculated using UAD
    TotFlightDist total flight distance
    TotBaseOpened total number of bases opened
    TotUAD total UAD in a year
    TotCost total cost
    UAD(i) unair worthy days for each base in a year
        / 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9
141,
        10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17
99,
        18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25
80 /
    c    jp8 fuel cost per km (dollar)
        /0.42/
    Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j
        1      2      3      4      5      6
    1    420    1704    2340    2520    1440    900
    2    840    1800    2280    2256    1080    564
    3    660    1620    2100    2244    1200    864
    4    780    1200    1824    2220    1356    1212
    5    1080    1380    1788    1824    876    984
    6    1260    1080    1536    1680    960    1272
    7    1380    564    1212    1704    1356    1740
    8    1560    1080    1284    1380    840    1476
    9    1440    780    1200    1560    1128    1644
    10   1740    576    888    1356    1320    1884
    11   1800    360    852    1596    1620    2100
    12   2040    336    576    1620    1740    2460

```

13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

```

;
N(i)= (365-UAD(i))*3;
positive variables
    x(i,j) number of planned missions from candiate base i to mission
zone j in a year
;
binary variables
    y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)
;
variables
    Z2 objective function value (minimum total flight distance)
    Z3 objective function value (total unair worthy days in a year)
    Z4 objective function value (minimum total cost)
    Z1 objective function value (minimum number of stations-bases)
;
equations
    ObjF2,ObjF3,ObjF4,ObjF1
    Demand(j)
    MinNumberOfFlight(i)
    MaxNumberOfFlight(i)
*    MaxNumberOfStations
;
ObjF2..
    Z2=E=sum((i,j), r(i,j)*x(i,j))
;
ObjF3..
    Z3=E=sum((i), UAD(i)*y(i))
;
ObjF4..
    Z4=E=sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i),F(i)*y(i))
;
ObjF1..
    Z1=E=sum((i), y(i))

```

```

;
Demand(j)..
    sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*    sum(i,y(i))=E=8
;
model M3MinTotalUWD /ObjF3,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight/;
solve M3MinTotalUWD using MIP minimizing Z3;
Display x.L,y.L,Z3.L;
equations
    OptObjF3Const
;
OptObjF3Const..
    sum((i), UAD(i)*y(i))=L=Z3.L
;
model M2MinTotalDistance
/ObjF2,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF3Const/;
solve M2MinTotalDistance using MIP minimizing Z2;
Display x.L,y.L,Z2.L;
equations
OptObjF2Const
;
OptObjF2Const..
    sum((i,j),r(i,j)*x(i,j))=L=Z2.L
;
model M4MinTotalCost
/ObjF4,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF3Const,OptObjF
2Const/;
solve M4MinTotalCost using MIP minimizing Z4;
Display x.L,y.L,Z4.L;
equations
    OptObjF4Const
;
OptObjF4Const..
    sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i),F(i)*y(i))=L=Z4.L
;
model M1MinNumberOfStations
/ObjF1,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF2Const,OptObjF
3Const,OptObjF4Const/;

```

```

solve M1MinNumberOfStations using MIP minimizing Z1;
Display x.L,y.L,Z1.L;
**TotFlightDist= sum((i,j),r(i,j)*x.L(i,j));
**TotBaseOpened= sum((i),y.L(i));
**TotUAD= sum((i), UAD(i)*y.L(i));
**TotCost=sum((i,j),c*r(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display Z1.L,Z2.L,Z3.L,Z4.L,x.L,y.L;

```

H. Model-5 Algoritma-4 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
    /1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
    j mission zones
    /1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
        / 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
        7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
        13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,
        19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
24 1606000,
        25 1606000/
    N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission
flights)
    * N(i) is calculated using UAD
    TotFlightDist total flight distance
    TotBaseOpened total number of bases opened
    TotUAD total UAD in a year
    TotCost total cost
    UAD(i) unair worthy days for each base in a year
        / 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9
141,
        10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17
99,
        18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25
80 /
    c      jp8 fuel cost per km (dollar)

```

/0.42/

Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020
18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

;

N(i)= (365-UAD(i))*3;

positive variables

x(i,j) number of planned missions from candidate base i to mission zone j in a year

;

binary variables

y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)

;

variables

Z2 objective function value (minimum total flight distance)

Z3 objective function value (total unair worthy days in a year)

Z4 objective function value (minimum total cost)

Z1 objective function value (minimum number of stations-bases)

;

equations

ObjF2,ObjF3,ObjF4,ObjF1

Demand(j)

```

        MinNumberOfFlight(i)
        MaxNumberOfFlight(i)
    *   MaxNumberOfStations
;
ObjF2..
    Z2=E=sum((i,j), r(i,j)*x(i,j))
;
ObjF3..
    Z3=E=sum((i), UAD(i)*y(i))
;
ObjF4..
    Z4=E=sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i),F(i)*y(i))
;
ObjF1..
    Z1=E=sum((i), y(i))
;
Demand(j)..
    sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*   sum(i,y(i))=E=8
;
model M4MinTotalCost
/ObjF4,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight/;
solve M4MinTotalCost using MIP minimizing Z4;
Display x.L,y.L,Z4.L;
equations
    OptObjF4Const
;
OptObjF4Const..
    sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j)) + sum((i),F(i)*y(i))=L=Z4.L
;
model M2MinTotalDistance
/ObjF2,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF4Const/;
solve M2MinTotalDistance using MIP minimizing Z2;
Display x.L,y.L,Z2.L;
equations
    OptObjF2Const
;
    OptObjF2Const..

```

```

        sum((i,j),r(i,j)*x(i,j))=L=Z2.L
;
model M3MinTotalUWD
/ObjF3,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF4Const,OptObjF
2Const/;
solve M3MinTotalUWD using MIP minimizing Z3;
Display x.L,y.L,Z3.L;
equations
OptObjF3Const
;
OptObjF3Const..
        sum((i), UAD(i)*y(i))=L=Z3.L
;
model M1MinNumberOfStations
/ObjF1,Demand,MinNumberOfFlight,MaxNumberOfFlight,OptObjF2Const,OptObjF
3Const,OptObjF4Const/;
solve M1MinNumberOfStations using MIP minimizing Z1;
Display x.L,y.L,Z1.L;
**TotFlightDist= sum((i,j),r(i,j)*x.L(i,j));
**TotBaseOpened= sum((i),y.L(i));
**TotUAD= sum((i), UAD(i)*y.L(i));
**TotCost=sum((i,j),c*rz(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display Z1.L,Z2.L,Z3.L,Z4.L,x.L,y.L;

```

I. Model-6 GAMS kodu

```

option optcr=0.0001;
sets
    i candidate bases
/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25/
    j mission zones
    /1,2,3,4,5,6/
;
parameters
    D(j) number of missions needed (demand) at zone j in a year
        / 1 1080, 2 1440, 3 360, 4 720, 5 2160, 6 360/
    F(i) fixed cost for each candidate base (dollar)
        / 1 1606000, 2 466000, 3 1606000, 4 466000, 5 1606000, 6
1606000,
        7 1606000, 8 1606000, 9 466000, 10 1606000, 11 1606000, 12
466000,
        13 1606000, 14 466000, 15 1606000, 16 1606000, 17 1606000,
18 1606000,

```


19 1606000, 20 1606000, 21 1606000, 22 1606000, 23 1606000,
 24 1606000,
 25 1606000/

N(i) capacity of each base in a year (number of yearly mission flights)

* N(i) is calculated using UAD

TotFlightDist total flight distance

TotBaseOpened total number of bases opened

TotCost total cost

TotUAD total UAD in a year

UAD(i) unair worthy days for each base in a year

/ 1 118, 2 107, 3 95, 4 103, 5 101, 6 145, 7 164, 8 130, 9

141,

10 137, 11 153, 12 155, 13 139, 14 128, 15 132, 16 134, 17

99,

18 88, 19 150, 20 92, 21 121, 22 93, 23 95, 24 98, 25

80 /

c jp8 fuel cost per km (dollar)

/0.42/

p1 Prioritynumber1

/ 100000000 /

p2 prioritynumber2

/ 1000000 /

p3 prioritynumber3

/ 1000 /

p4 prioritynumber4

/ 1 /

Table r(i,j) distance between candidate base i and mission zone j

	1	2	3	4	5	6
1	420	1704	2340	2520	1440	900
2	840	1800	2280	2256	1080	564
3	660	1620	2100	2244	1200	864
4	780	1200	1824	2220	1356	1212
5	1080	1380	1788	1824	876	984
6	1260	1080	1536	1680	960	1272
7	1380	564	1212	1704	1356	1740
8	1560	1080	1284	1380	840	1476
9	1440	780	1200	1560	1128	1644
10	1740	576	888	1356	1320	1884
11	1800	360	852	1596	1620	2100
12	2040	336	576	1620	1740	2460
13	1980	504	552	1260	1560	2280
14	2160	876	540	972	1308	2220
15	1860	720	744	1128	1212	1956
16	2400	1140	540	624	1380	2400
17	900	1344	1824	1956	1044	1020

18	660	1860	2400	2460	1224	492
19	1140	876	1464	1764	1260	1560
20	1880	1020	984	1032	984	1800
21	1980	1380	1236	960	600	1680
22	2000	1212	1020	888	900	1824
23	2280	1620	1200	600	816	1884
24	2240	1248	876	588	1080	2100
25	1020	1752	2220	2136	912	540

```

;
N(i)= (365-UAD(i))*3;
positive variables
    x(i,j) number of planned missions from candiate base i to mission
zone j in a year
;
binary variables
    y(i) whether base i is opened or not (1 if opened)
;
variables
    Z    objective function value (Priority Objective)
;
equations
    ObjF, Demand(j)
    MinNumberOfFlight(i)
    MaxNumberOfFlight(i)
;
ObjF..
    Z=E=p1*sum((i,j),r(i,j)*x(i,j))+ p2*sum((i),UAD(i)*y(i))+
        p3*(sum((i,j),c*r(i,j)*x(i,j))+sum((i),F(i)*y(i)))+
p4*sum((i),y(i))
;

Demand(j)..
    sum(i, x(i,j)) =G= D(j)
;
MinNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =G= 360*y(i)
;
MaxNumberOfFlight(i)..
    sum(j, x(i,j)) =L= N(i)*y(i)
;
*MaxNumberOfStations..
*    sum(i,y(i))=E=8
;
model MinTotalpriority /all/;
solve MinTotalpriority using MIP minimizing Z;
TotBaseOpened= sum((i),y.L(i));

```

```

TotUAD = sum((i),UAD(i)*y.L(i));
TotFlightDist= sum((i,j),r(i,j)*x.L(i,j));
TotCost=sum((i,j),c*r(i,j)*x.L(i,j)) + sum((i),F(i)*y.L(i))
Display x.L,y.L,Z.L,TotFlightDist,TotUAD,TotBaseOpened,TotCost;

```

